

INTRODUCCION A LA MINERAGRAFIA

**C.Dr. Víctor Demidov
Ing. J. N. Muñoz Gómez**



La Habana, 1993

Edición: Ing Carlos Hermida Laffitte / Edición Ventura Publisher: Mirta Vázquez la O / Corrección: Gisel Abreu / Diseño: Emilio García Viera

© Víctor Demidov, 1993

© Sobre la presente edición:
Editorial Félix Varela, 1993

EDITORIAL FÉLIX VARELA

San Miguel No. 1111 e/ Mazón y Basarrate
El Vedado, Ciudad de la Habana, Cuba
ISBN 959-07-29-2

INDICE

INTRODUCCION	5
CAPITULO 1. Microscópio mineragráfico	7
CAPITULO 2. Metodología de preparación de las secciones pulidas ..	13
CAPITULO 3. Capacidad de reflejo y birreflexión	18
CAPITULO 4. Color de los minerales meníferos	33
CAPITULO 5. Reflejos internos de los minerales meníferos	40
CAPITULO 6. Investigaciones mineragráficas en luz polarizada	45
CAPITULO 7. Efectos ópticos con luz polarizadas meníferos	55
CAPITULO 8. Magnetismo de los minerales meníferos	66
CAPITULO 9. Dureza y microdureza de los minerales metálicos	70
CAPITULO 10. Conductividad eléctrica de los minerales metálicos ..	82
CAPITULO 11. Investigaciones radiográficas	86
CAPITULO 12. Ataque químico	91
CAPITULO 13. Métodos de análisis microquímicos	100
CAPITULO 14. Ataque lumínico	107
CAPITULO 15. Estructura de las menas	109
CAPITULO 16. Análisis fásicos de las menas	145
CAPITULO 17. Características morfológicas de los minerales meníferos	151
CAPITULO 18. Determinaciones cuantitativas de los minerales menife- ros	156
CAPITULO 19. Metodología de las investigaciones mineragráficas ..	165
CAPITULO 20. Determinación de los minerales metálicos	170
BIBLIOGRAFIA	288

INTRODUCCION

El presente manual, *Introducción a la minerografía*, tiene como objetivo el de servir de fundamento teórico en las clases de laboratorio de la asignatura Geología y prospección de yacimientos minerales sólidos I del cuarto año de la carrera de Geología y contribuir al completamiento de su bibliografía.

La asignatura Geología y prospección de yacimientos minerales sólidos I, tiene un carácter teórico, por lo que se hace necesario, desde el punto de vista de lograr el cumplimiento de los objetivos educativos, instructivos así como de las habilidades profesionales en la rama de los yacimientos minerales, la implementación de las prácticas de laboratorio, utilizando las técnicas de la microscopía de menas.

Las prácticas de laboratorio, en su contenido, están dedicadas al estudio del análisis textural-estructural de las menas, vinculadas a diferentes tipos genéticos de yacimientos minerales.

El manual está conformado con los conocimientos preliminares en las técnicas minerográficas lo cual facilita una rápida asimilación por los estudiantes. Al final del manual se ha incorporado al capítulo 20 las tablas diagnósticas las cuales serán de un uso sistemático en el desarrollo de las prácticas antes mencionada, así como para su uso durante las investigaciones minerográficas de las menas.

Por último, el manual sirve de consulta para todos aquellos que investigan los minerales metálicos utilizando los métodos de la minerografía.

Los autores

Moa, 18 de febrero de 1991

CAPITULO 1

MICROSCOPIO MINERAGRAFICO

Los microscopios minerográficos están destinados para la investigación de los minerales meníferos (metálicos). se aplican además para el estudio de otras sustancias artificiales tales como aleaciones, etcétera.

Todos los microscopios minerográficos se fundamentan en el principio de la reflexión de la luz desde una superficie pulida y sus características están expuestas en las especificaciones constructivas.

El microscopio minerográfico moderno está equipado de los accesorios correspondientes de forma tal que permite realizar no sólo las investigaciones minerográficas propiamente dichas sino que además pueden realizarse las investigaciones petrográficas normales; ambas investigaciones pueden llevarse a cabo de forma simultánea. Estos equipos garantizan una buena iluminación del campo visual y permite la observación con aumentos desde 30 a 1 500 veces las dimensiones de los objetos a investigar y en ocasiones pueden ser superior.

Los rayos desde la fuente de la luz pasan a través del colector, el polarizador, el diafragma de aperturas, el diafragma del campo y las lentes de corrección y caen sobre el dispositivo de desviación. Este último es un prisma o una placa de reflexión, que se conecta al esquema óptico del microscopio.

El dispositivo de desviación dirige los rayos de luz hacia el objetivo, a través del cual salen al exterior e iluminan el objeto de observación constituido por la superficie pulida del mineral situado paralelamente a la platina del microscopio. Los rayos reflejados desde la superficie pulida regresan nuevamente a través del objetivo, el tubo del microscopio y el adaptador ocular, caen en el ocular y de aquí al observador.

Para la investigación con luz polarizada en el esquema óptico se conecta el analizador instalado en el tubo del microscopio.

El diafragma de apertura sirve para variar la iluminación del objeto observado y para obtener una representación más contrastante.

El diafragma de campo permite disminuir el área del campo visual.

Para obtener luz transmitida se utiliza un espejo de dos caras, con el cual se dirige el haz luminoso desde la fuente de luz a través de la sección delgada hasta el objetivo. Para obtener luz polarizada transmitida se conecta el polarizador que está situado entre la platina del microscopio y el espejo.

1.1. ACONDICIONAMIENTO DEL MICROSCOPIO PARA EL TRABAJO.

Al iniciarse el trabajo en el microscopio minero gráfico, se deben comprobar las incidencias de los trazos graduados del ocular del adaptador binocular y del tubo del microscopio. El iluminador opaco se coloca de forma tal que su eje se sitúe en un mismo plano con el soporte del tubo y el adaptador binocular; hay equipos en que esta alineación es permanente y no necesita de ajuste durante el trabajo.

Posteriormente se coloca el objetivo seleccionado en el cuerpo del iluminador opaco y se fija en una determinada posición flexible. Se conecta el iluminador opaco al transformador, en cuyo cuerpo existe una muesca especial con un enchufe de contacto. Es de suma importancia que antes de conectar el transformador a la red eléctrica, ésta se corresponda con la tensión correspondiente.

Después de lo anterior, se conecta el transformador a la red y con ayuda del botón del contacto se logra la iluminación normal del bombillo. Hay que tener presente que el bombillo tiene duración de 100 horas de trabajo normal. Para aumentar el plazo de trabajo del bombillo es necesario apagarlo al recesar brevemente, en los trabajos con el microscopio.

La iluminación del campo visual del microscopio se debe regular solamente después de colocar la muestra pulida del mineral (conocido como: sección pulida o superficie pulida o simplemente muestra pulida).

La superficie pulida de la muestra deberá mantenerse siempre, su superficie, completamente paralela al plano de la platina del microscopio; es por eso que la muestra que se investiga se monta en un portaobjeto y descansando en una pequeña porción de plastilina se coloca en la presa que al ejercer presión sobre la muestra se obtiene el paralelismo antes mencionado, con ello mantenemos el principio consistente en la perpendicularidad en la incidencia del haz de rayos de luz sobre la superficie pulida a investigar.

Antes de regular la iluminación del microscopio, la muestra se enfoca con ayuda del mecanismo de enfoque micrométrico, la cual debe llevarse a cabo con mucho cuidado sin que el objetivo haga contacto con la superficie de la muestra; se tendrá una mayor atención cuando se emplean objetivos de gran aumento o se trabaja con los objetivos de inmersión, en los cuales la distancia de foco se mide por fracciones de milímetros. Es recomendable en estos casos realizar el enfoque invertido, es decir, unir lo más posible el objetivo a la superficie de la sección pulida y a través del enfoque micrométrico desplazar el objetivo hacia arriba, hasta lograr la nitidez del objetivo a estudiar.

El ajuste de la iluminación se realiza girando el patrón con el bombillo alrededor de su eje y con el dispositivo regulador del cuerpo del iluminador

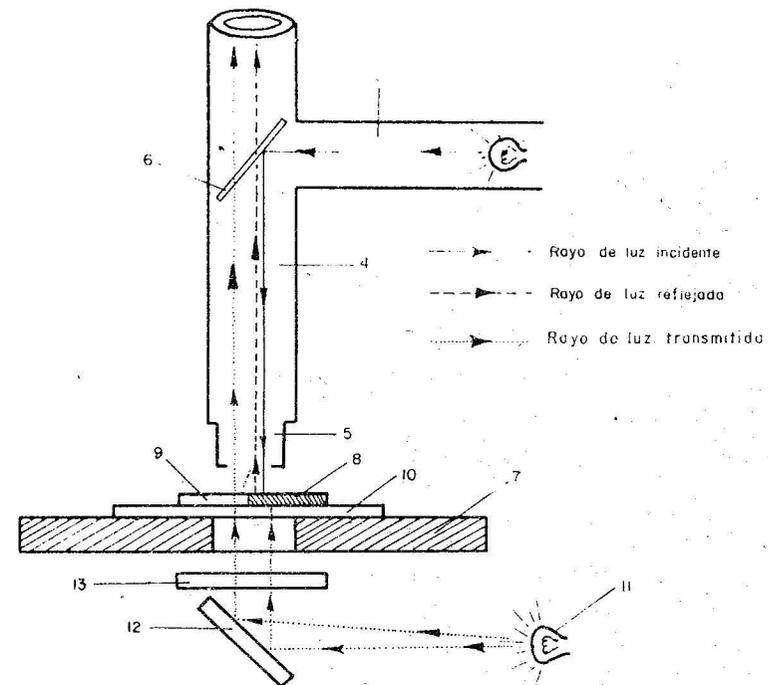


FIGURA 1.1. Esquema del paso de los rayos en un microscopio minero cuando se observan simultáneamente minerales transparentes y no transparentes con la ayuda del espejo. 1. Ocular; 2. Iluminador opaco; 3. Fuente de luz incidente; 4. Tubo del microscopio; 5. Objetivo; 6. Lámina de reflexión; 7. Platina del microscopio; 8. Mineral menífero; 9. Mineral no menífero; 10. Porta objeto; 11. Fuente de luz transmitida; 12. Espejo del microscopio; 13. Polarizador móvil.

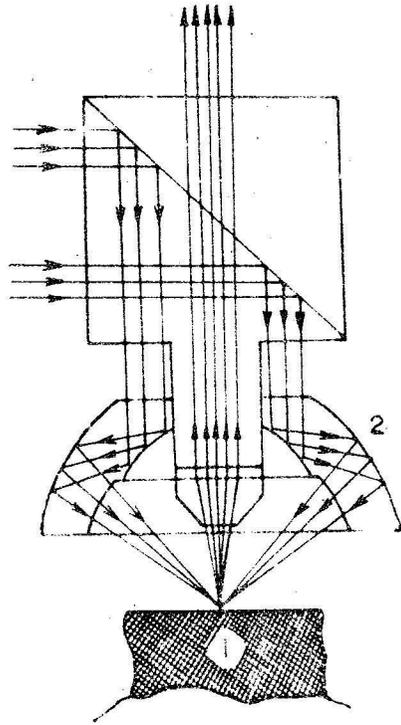


FIGURA 1.2. Esquema del paso de los rayos en el ultraopaco. 1. Sección pulida; 2. Esquema del sistema óptico del ultraopaco.

opaco. Al regular la iluminación del campo visual se debe lograr una iluminación completamente regular con el máximo de intensidad de la luz, la cuál puede ser modificada de acuerdo a la necesidad, a través del botón de regulación del reóstato del transformador.

El siguiente procedimiento es el centrado del objetivo, el cual se realiza girando las clavijas de centrado hasta que coincida con el eje de la platina. Se recomienda que al tomarse un cristal o fragmento de un mineral de referencia se divida en dos la distancia que dista el centro de la cruz filial del ocular del cristal; una mitad se aproxima con las clavijas y otra mitad se realiza manualmente con cuidado: haciéndola coincidir con la cruz filial, la operación se repite de dos a tres veces hasta lograr el centrado perfecto de objetivo.

Se aconseja que al iniciar los trabajos se revisen previamente todos los objetivos del microscopio y se centren; ya que de no haberse previamente, se corre el riesgo que al pasar de un objetivo de menor a mayor aumento, el cristal o grano mineral que se investiga pueda caer fuera del campo visual del nuevo objetivo.

La observación con inmersión debe realizarse con los objetivos de inmersión. Sobre la lente frontal invertido hacia arriba del objetivo de inmersión se coloca una gota de líquido de inmersión (aceite de cedro) utilizando una varilla de vidrio, luego se gira rápidamente el objetivo (lente frontal hacia abajo) y se fija al microscopio. Al enfocar el microscopio, se debe revisar cuidadosamente la distancia lateral entre la gota de líquido en el objetivo y la superficie de la muestra pulida.

El enfoque posterior se realiza con el mecanismo de enfoque micrométrico al observar a través del ocular. En la investigación utilizando inmersión, la sección pulida no puede ser desplazada sobre la platina del microscopio. El objetivo de observación se selecciona previamente con un objetivo seco, cuyo aumento corresponda aproximadamente al aumento del objetivo de inmersión seleccionado.

Después de concluir el trabajo con la inmersión, el lente frontal del objetivo se limpia primeramente con un paño blando y seco y luego con un paño húmedo en alcohol. No se admite que el líquido de inmersión se enfríe y se solidifique sobre el lente del objetivo. La muestra pulida también se limpia con un paño blando y alcohol puro.

Al realizar investigaciones con luz normal el analizador y el polarizador salen del esquema óptico. Las investigaciones comienzan con objetivos de poco aumento y se pasa poco a poco a los de mayor aumento. Al trabajar con luz polarizada con los nicols cruzados, la iluminación del campo visual disminuye bruscamente. Por eso, después de conectar el analizador se aumenta la intensidad del bombillo con el botón del reóstato del transformador. Antes de retirar el analizador se debe disminuir la intensidad de la iluminación.

1.2. CUIDADO DEL MICROSCOPIO

Para prolongar el uso del microscopio mineragráfico, como equipo óptico y de precisión, es necesario recomendar algunas observaciones al respecto.

El microscopio debe instalarse en un local climatizado donde debe existir una humedad relativa del 70-75 % y ausencia de polvo; cuando el microscopio no se encuentre en funcionamiento se guardará en su estuche o cubierto con nylon o material similar.

Para su observación exterior el microscopio se debe limpiar periódicamente con un paño suave con vaselina, posteriormente se limpia cuidadosamente

con un paño limpio y seco. Cuando las partes móviles trabajan con dificultad, se humedecen con bencina o xilol.

Es necesario prestar atención especial a la limpieza de las piezas ópticas del microscopio. Para preservar las superficies interiores de los objetivos contra el polvo se recomienda dejar uno de los oculares en el tubo del microscopio o cubrir el ocular con alguna funda especial. No se debe pegar los dedos a la superficie de los lentes. El polvo, se puede eliminar fácilmente sólo con el pincel suave que forma parte de los accesorios del microscopio.

Cuando se ensucian los lentes éstos se limpian bien con un paño suave de batista humedecido en alcohol, bencina o xilol.

La limpieza de las partes interiores de los objetivos y de los oculares sólo debe realizarse en talleres especiales.

La plastilina utilizada para fijar las secciones pulidas ensucia el microscopio y la prensa manual, por eso es necesario cuidar que la plastilina no se derrame por el portaobjetos y salga del mismo. Las partes metálicas del microscopio, en caso de que se ensucien de plastilina, se limpian fácilmente con un algodón o con una servilleta de papel. No se debe ensuciar con plastilina las piezas ópticas abiertas.

Los reactivos químicos muy activos, utilizados en minerografía, pueden echar a perder el objetivo. Para evitar su efecto dañino al trabajar con reactivos químicos se deben utilizar objetivos que tengan una distancia focal grande, lubricándolos con vaselina para su protección antes de las reacciones microquímicas.

CAPITULO 2

METODOLOGIA DE PREPARACION DE LAS SECCIONES PULIDAS

En todos los manuales de microscopía de menas se describen la metodología de elaboración de las secciones pulidas; aquí prestamos atención a la adquisición por parte de los estudiantes de habilidades que le permiten la preparación de las secciones pulidas.

Analicemos la elaboración de las muestras a través de las siguientes etapas:

1. Etapa inicial: Las actividades prácticas comienzan por el conocimiento de los equipos del taller de preparación de las muestras.

Se muestran las máquinas de corte, desbaste y pulido y las reglas para trabajar con ellas. Se conoce la distribución de accesorios auxiliares, materiales abrasivos y de pulido y el orden de utilización de los equipos. Es de suma importancia prestar atención a las reglas de la técnica de seguridad en el proceso de pulido y acabado.

Para preparar las muestras pulidas de material fragmentado, blando y deleznable es necesario realizarle previamente su briqueteado (encolamiento).

Para este objetivo es mejor utilizar cemento dental, sus propiedades garantizan una extraordinaria solidez entre las partículas de mineral, posee también bastante dureza para preparar secciones pulidas de elevada calidad, es estable a los reactivos químicos y líquidos de inmersión utilizados en minerografía.

El mineral fragmentado se mezcla con el cemento dental en volúmenes iguales (aproximadamente 0,75 ml de cada uno), en un recipiente de porcelana. Después de mezclado se espera durante 20 minutos, al final de los mismos, la masa pastosa se coloca en el molde de la prensa, en cuyo fondo se coloca una lámina de celofán y se cubre igualmente con celofán, se aprieta la prensa de Poinsson haciendo girar el tornillo hasta el tope y de vez en vez, se ajusta. Este prensado se prolonga durante 10-15 minutos. No se puede dejar sin presión la masa preparada.

La muestra se separa de la prensa y ya está lista para su posterior elaboración como si se tratase de una muestra de textura masiva y compacta.

2. PROCESOS DE PULIDO Y ACABADO.

Después de cortada la muestra o la briqueta, se rectifican para preparar la superficie para el pulido. La rectificación se realiza en la máquina de rectificación, de forma consecutiva con dos métodos; el primero con polvo abrasivo M-28, el segundo con polvo abrasivo M-20 o sus similares; cuando se cambia el material abrasivo es necesario lavar cuidadosamente la superficie pulida y las manos del operario.

En el proceso de la rectificación hay que prestar atención a:

1. Al tiempo de rectificación que en dependencia de la dureza de los minerales que se encuentran en la mena, es de 5 hasta 20 minutos.
2. A la consistencia con que se prepara el polvo abrasivo con agua.
3. A la fuerza aplicada en la rectificación.
4. Al desplazamiento por la superficie pulida durante la rectificación.

Al cortar la muestra con una sierra de diamante se obtiene con frecuencia un plano de bastante calidad y en estos casos generalmente se procede inmediatamente al acabado, cambiando el estadio de rectificación. Antes del acabado hay que revisar la preparación bajo el microscopio para determinar la existencia de cavidades, grietas, etcétera. Si éstas existen, entonces es necesario continuar la rectificación y en algunos casos hervirla nuevamente con baquelita.

El acabado generalmente se realiza de tres formas consecutivas: con los polvos abrasivos M-12, M-10, M-7 o M-3. El acabado final se realiza manualmente sobre láminas de vidrio, se humedece con agua y con movimientos circulares desde el centro del vidrio hacia la periferia y viceversa, se termina de pulir la muestra al cambiar el polvo abrasivo y después de concluir el proceso de acabado, la muestra se lava cuidadosamente.

En el proceso de acabado hay que prestar atención:

1. A que la superficie de la lámina de vidrio sea plana y regular sin rugosidades ni curvaturas formadas debido al uso prolongado.
 2. A la consistencia de los polvos abrasivos.
 3. A la consecutividad del desplazamiento sobre la superficie del vidrio.
 4. A la fuerza aplicada durante la preparación.
 5. Al tiempo del acabado, que al igual que la rectificación depende de la dureza de los minerales que forman la mena y es de 10-20 minutos generalmente.
3. Pulido de la muestra.

Antes de comenzar el pulido se revisa la existencia de ángulos agudos en los bordes de la muestra. Si existen tales ángulos, éstos se eliminan en la máquina de rectificación, comprimiendo la punta sobre el plano del disco.

La eliminación de este defecto es necesaria para que en el proceso de pulido no rasquen el paño con el cual se realiza esta operación.

Después a las muestras se le eliminan los restos de material abrasivo y ésta ya se encuentra preparada para su posterior elaboración.

El pulido se realiza con un disco de la lámina de pulido forrado con un paño. El disco se humedece con agua mezclada con el material de pulido, la muestra se aprieta por la superficie pulida sobre el paño y se conecta la máquina.

Tiene una gran importancia para el proceso de pulido la dureza de los minerales que entran en la mena; es por eso que se utilizan polvos para pulir: óxido de cromo (para minerales duros); óxido de aluminio (para minerales de dureza media) y óxido de magnesio (para minerales blandos).

Los polvos para pulir más utilizados son: el óxido de cromo (polvo verde), el cual no es difícil de obtener en el laboratorio.

Para esto, se mezclan tres partes de azufre elemental y una parte de dicromato de amonio $(\text{CNH}_4)_2 \text{Ca}_2\text{O}_7$ o de potasio $(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7)$. La mezcla se agita cuidadosamente y se calienta sobre una lámina de hierro o en un recipiente del mismo material cerrado con una tapa. Lo mismo se puede hacer sin azufre, pero la calidad del material para pulido disminuye.

El material en terrones obtenido de óxido de cromo (Cr_2O_3) se pulveriza en un mortero, se tamiza (350 mm), se coloca en un pomo de vidrio, se le añade 2.5 % de dicromato de amonio $(\text{Cr}_2\text{O}_4) - (\text{NH}_4)_2$ y luego hasta obtener una suspensión fina, que es la que se utiliza para el pulido. El pulido prolongado de una mena de composición compleja provoca relieve superficial, el cual se considera un defecto de pulido.

Al mismo tiempo, el pulido prolongado es el resultado de la mala preparación de la muestra y de que se haya tratado de corregir con el pulido los defectos de rectificado y del acabado.

Por eso, en el proceso de pulido es necesario revisar la calidad de la superficie de la sección pulida bajo el microscopio, y en caso de que sea incontrolable el surgimiento del relieve, se debe repetir de una forma más cuidadosa la operación de acabado.

2.1. Defecto de la sección pulida y su rectificación

Los defectos de la superficie pulida después de la preparación manual o mecánica generalmente son los siguientes:

1. La sección pulida presenta cavidades profundas, condicionadas por las características propias de los minerales.
2. Por un relieve muy grande entre los minerales duros y blandos.

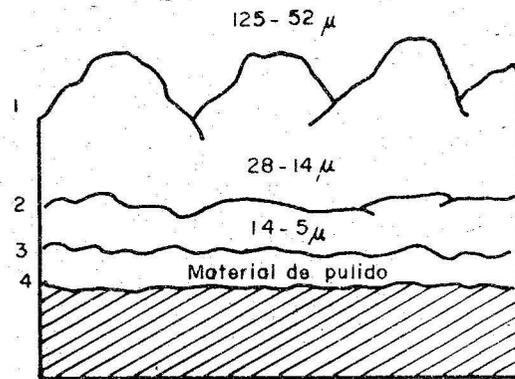


FIGURA 2.1 Esquema de un perfil de una sección pulida en sus diferentes etapas de preparación. 1. Debaste; 2. Rectificación; 3. Acabado; 4. Pulido.

3. La existencia, junto con los minerales bien pulidos, de minerales con la superficie muy rugosa.
4. La existencia de innumerables rasguños en los minerales blandos.
5. La existencia de innumerables manchas oscuras en todos los minerales.

El primer caso confirma que la muestra no ha sido preparada de forma completa o que la duración de la rectificación con materiales abrasivos gruesos ha sido corta. Para eliminar este defecto la sección pulida se somete nuevamente a acabado y se le pule durante un tiempo más corto controlando más cuidadosamente la calidad de la superficie bajo el microscopio.

El tercer caso está condicionado porque los minerales duros, generalmente, hay que pulirlo mucho más tiempo que los blandos. Pero, si los minerales blandos han sido pulidos y el relieve entre los mismos es normal, entonces esto está provocado, comúnmente, porque se ha utilizado un material para pulir demasiado blando o porque el acabado ha sido realizado con poco cuidado. Esta falta se elimina solamente con la repetición de todos los pasos del acabado y con un nuevo pulido.

El cuarto caso confirma la colaboración de una parte de los granos de minerales que tienen rasguños en los minerales blandos, o la suciedad del material pulido. Al reanudar la rectificación y el pulido de dichas muestras después de hervirlas previamente en baquilita, es necesario lavar cuidadosamente el disco de pulido y utilizar materiales de pulido nuevos.

El quinto paso indica que el proceso de pulido ha sido insuficiente y que es necesario continuarlo hasta que desaparezcan las manchas oscuras.

En el proceso de preparación de las muestras pulidas hay que tener presente el orden de la consecutividad de las operaciones realizadas, de los materia-

les abrasivos y de pulido, del tiempo empleado y de los resultados obtenidos. En la conclusión de cada muestra se anotan las características del comportamiento del mineral durante el pulido. Estos informes posteriormente ayudan a seleccionar la metodología más apropiada para la preparación de las muestras pulidas de dicho tipo de mineral.

CAPITULO 3

CAPACIDAD DE REFLEJO Y BIRREFLEXION

3.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Cuando se observa bajo el microscopio una sección pulida, se observa un determinado grado de iluminación de los minerales que forma la mena. Las diferencias más bruscas de iluminación están expresadas entre el grupo de los minerales meníferos (no transparentes) y el grupo de los minerales petrográficos (transparentes). Los minerales meníferos reflejan más intensamente la luz y se ven en la sección pulida muy iluminada en comparación con los petrográficos, que reflejan muy débilmente la luz.

Al mismo tiempo, la iluminación de los minerales meníferos, independientemente de su valor, también es desigual y algunos de ellos se ven más iluminados en comparación con otros. Las diferencias de iluminación son relativamente menor que la que se observa con el grupo de los minerales petrográficos.

La diferencia de iluminación en la superficie pulida de los minerales bajo el microscopio está condicionada por su propiedad de reflejar la luz o capacidad de reflejo.

La capacidad de reflejo es el índice diagnóstico más importante de la minerografía, ya que puede ser medido y presentado por una magnitud numérica.

Cuando se observa bajo el microscopio con luz reflejada, la iluminación de los minerales meníferos o su capacidad de reflejo, se puede valorar cualitativamente por medio de la comparación con otros minerales.

En otras palabras, la capacidad de reflejos es una medida de su brillantez, la cual, en iguales condiciones de observación para cada mineral, es una magnitud constante.

Una valoración aproximada de la capacidad de reflejo se puede realizar "a ojo" (cuando existe la experiencia correspondiente) o por microfotografía, con lo cual los minerales con un índice de reflexión muy alto estarán más iluminados, y los que lo tienen muy bajo estarán más oscuros. El valor exacto de la capacidad de reflejo puede ser calculado por fórmulas o medidos con ayuda de equipos especiales.

La magnitud de la capacidad de reflejo o índice de reflexión se determina por la relación de la intensidad de la luz reflejada con la intensidad de la luz incidente.

La magnitud de la capacidad de reflejo se expresa en por cientos o en fracciones de unidad, en minerografía, la capacidad de reflejo se significa con la letra R.

$$R = \frac{I_2}{I_1} \quad (R: \text{ se expresa en por ciento}) \quad (1)$$

donde:

R - capacidad de reflejo;

I₂ - intensidad de luz reflejada;

I₁ - intensidad de la luz incidente.

Véase la Tabla 3.1.

Tabla 3.1.

Minerales y elementos	Índice de refracción n	Coefficiente de absorción de la luz - X	Capacidad de reflejo R (%)
Plata	0,18	20,3	95,0
Oro	0,50	6,2	83,0
Platino	2,06	2,06	70,1
Galenita	3,91	0,51	44,3
Esfalerita	2,42	0,019	17,2

En caso de que la luz incida perpendicularmente al plano de reflejo, lo que es una condición constante cuando se trabaja con el microscopio minerográfico, la capacidad de reflejo del mineral isotrópico se expresa en función del índice de refracción del mineral y del coeficiente de adsorción de la luz del mineral y puede ser representado por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{I_2}{I_1} = \frac{(n-1)^2 + n^2 X^2}{(n+1)^2 + n^2 X^2}$$

donde:

n - índice de refracción del mineral;

X - coeficiente de absorción de la luz por el mineral;

1 - índice o coeficiente de refracción del aire.

En minerales meníferos anisotrópicos la capacidad de reflejo varía al cambiar la dirección de su valoración; más adelante se expone una fórmula que expresa el valor de la magnitud de la capacidad de reflejo de un mineral anisotrópico; para el caso más simple (cuando la luz incide perpendicular-

mente a la superficie pulida o sección pulida), la fórmula se expresa como sigue:

$$R = \frac{(n_1 - 1)^2 + n_1^2 x_1^2}{(n_1 + 1)^2 + n_1^2 x_1^2} \cos^2 I_1 + \frac{(n_2 - 1)^2 + n_2^2 x_2^2}{(n_2 + 1)^2 + n_2^2 x_2^2} \cos^2 I_2$$

donde:

R - capacidad de reflejo;

n_1 ; n_2 - mayor y menor índice de refracción del mineral;

x_1 ; x_2 - mayor y menor coeficiente de adsorción de la luz por el mineral;

I_1 ; I_2 - azimut de ambas oscilaciones en el cristal (mineral) en relación con la oscilación en el polarizador;

1 - índice o coeficiente de refracción del aire.

En dependencia de los valores máximos y mínimos de los ángulos I_1 , I_2 obtenemos los siguientes valores de la capacidad de reflejo en los puntos extremos; para un mismo mineral anisotrópico.

$$R_1 = \frac{(n_1 - 1)^2 + n_1^2 x_1^2}{(n_1 + 1)^2 + n_1^2 x_1^2}; \text{ cuando } I_1 = 0 \text{ entonces } I_2 = 90^\circ \quad (4)$$

$$R_2 = \frac{(n_2 + 1)^2 + n_2^2 x_2^2}{(n_2 - 1)^2 + n_2^2 x_2^2}; \text{ cuando } I_2 = 0 \text{ entonces } I_1 = 90^\circ$$

Estas expresiones para R_1 y R_2 son respectivamente las magnitudes máximas y mínimas de la capacidad de reflejo del mineral anisotrópico y se obtiene alternativamente al cabo de 90° cuando se hace girar la platina del microscopio.

La diferencia máxima entre la intensidad de la capacidad de reflejo $R_1 - R_2 = R$; se llama birreflexión, que sirve como uno de los índices diagnósticos ópticos.

El fenómeno de birreflexión se manifiesta en el mineral menífero anisotrópico cuando se observa bajo el microscopio con un nicol-polarizador, (luz polarizada plana) varía su capacidad de reflejo (brillantez) al cabo de 90° . Este fenómeno se utiliza como índice diagnóstico valioso, característico de toda una serie de minerales meníferos anisotrópicos, un ejemplo típico lo es la covelina (Cu_2S).

La intensidad media de la capacidad de reflejo se expresa por la fórmula:

$$R_m = \frac{R_1 + R_2}{2}$$

y la magnitud R_m representa el valor promedio de la capacidad de reflejo del mineral anisotrópico.

De las fórmulas señaladas anteriormente vemos que la capacidad de reflejo de los minerales meníferos se determina por tres magnitudes: índice de refracción (n), coeficiente de absorción (x) de la luz por el mineral e índice de refracción del medio de observación.

Los metales y elementos nativos (Au , Ag y Cu) tienen coeficiente de absorción de la luz muy elevados y valores de R muy bajos. De acuerdo a lo anterior, la magnitud (n) influye poco sobre su capacidad de reflejo y la capacidad de reflejo para los elementos nativos es muy alta. Por su brillantez superan a otros minerales meníferos, y por este índice se les puede diferenciar fácilmente.

Cuando el coeficiente de absorción de la luz tiene valores muy pequeños la capacidad de reflejo comienza a depender del índice de refracción y dichos minerales ceden considerablemente en brillantez a los elementos nativos.

Para conocer la influencia del coeficiente de absorción de la luz y del índice de refracción sobre la capacidad de reflejo de los minerales, en la tabla se dan los datos calculados por la fórmula (2) para algunos minerales isotrópicos y elementos nativos.

La capacidad de reflejo de los minerales meníferos depende, no solamente del índice de refracción y del coeficiente de absorción de la luz, sino también del tipo de luz con que se ilumina al mineral durante la determinación de este parámetro.

El carácter diferente de la luz se logra utilizando filtros de colores (o filtros de luz), que dejan pasar la luz con una determinada longitud de onda expresada en manómetros.

En la Tabla 3.2 se muestra la dependencia entre la capacidad de reflejo de algunos minerales y la variación de la longitud de onda de la luz incidente.

Tabla 3.2

Minerales	Capacidad de reflejo R(en %)		
	Verde ($\lambda = 520 \text{ nm}$)	Naranja ($\lambda = 590 \text{ nm}$)	Rojo ($\lambda = 665 \text{ nm}$)
Oro	47,0	82,5	84,0
Platino	65,3	65,3	63,5
Plata	53,5	51,5	48,5
Tetrahedrita	30,8	29,5	27,0

Esfalerita	18,8	17,7	16,7
Cromita	15,7	14,7	13,8

La variación de la capacidad de reflejo en dependencia de la variación de la longitud de la onda de la luz incidente (o del tipo de luz) en algunos casos puede servir como índice diagnóstico. Para algunos minerales, esta alteración está expresada muy bruscamente (oro), para otros muy débilmente tetraedrita.

Los minerales meníferos anisotrópicos, conforme a la fórmula (3) tienen valores diferentes de la capacidad de reflejo para diferentes direcciones, por eso la determinación de la capacidad de reflejo se realiza en la posición del mínimo y del máximo establecido con ayuda de equipos fotométricos o simplemente a "ojo".

Cuando se utilizan objetivos de inmersión la capacidad de reflejo de los minerales disminuye considerablemente a consecuencia del paso de la luz a través de la inmersión (medio más denso que el aire) la cual se absorbe parcialmente. Las variaciones de la capacidad de reflejo en la inmersión para algunos minerales se han señalados en la Tabla 3.3.

Como vemos en la tabla, la capacidad de reflejo para algunos minerales en inmersión disminuye muy bruscamente, lo que también puede servir como uno de sus índices diagnósticos.

La fórmula (1), que expresa la esencia física del fenómeno de reflexión, indica que R es una magnitud relativa y se expresa en fracciones de unidad (si la intensidad de la luz incidente se considera la unidad) o en por ciento (si la intensidad de la luz incidente se considera al 100 %).

La expresión en por ciento es más simple y cómoda, por eso en minerografía la capacidad de de reflejo se expresa en por ciento (R %).

De esta forma la capacidad de reflejo tiene una gran importancia como índice diagnóstico al determinar los minerales meníferos: puede ser medido y por consiguiente es una constante óptica importante.

3.2. METODOS PARA MEDIR LA CAPACIDAD DE REFLEJO

La capacidad de reflejo es un índice diagnóstico óptico importante de los minerales meníferos, el mismo es la base de la mayoría de las tablas determinativas publicadas en diferentes manuales o investigaciones de minerografía.

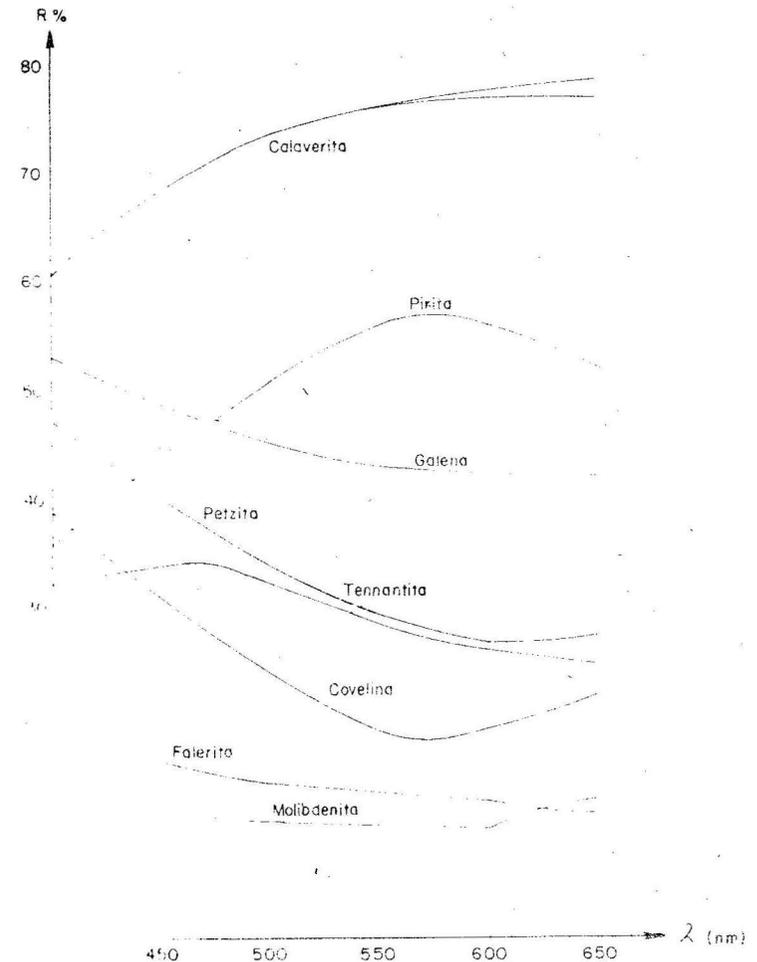


Fig. 11.11. Curvas de dispersión de la capacidad de reflejo de varios minerales meníferos.

Todos los métodos de determinación del índice de reflejo de los minerales se pueden dividir en dos grupos: subjetivos y objetivos. En el primer caso, la determinación de la capacidad de reflejo se realiza a "ojo" o con ayuda de la comparación con patrones, la exactitud de estas determinaciones depende fundamentalmente de la experiencia del investigador.

En el segundo caso, la determinación del índice de reflejo se realiza con ayuda de equipos especiales y no depende de la percepción de estas propiedades de los minerales por los investigadores.

Analicemos los métodos subjetivos. La valoración aproximada de la capacidad de reflejo se puede realizar sin ningún equipo, por medio de la comparación, bajo un microscopio, de la brillantez del mineral conocido que hace contacto con el mineral desconocido cuando el investigador posee bastante experiencia, el error de la determinación del índice de reflexión "a ojo" generalmente no excede el 10 %, lo que es suficiente para diagnosticar muchos minerales meníferos comunes.

Uno de los métodos más simples, bastante exacto y más utilizado, es la comparación del mineral investigado con un patrón. Existen varios métodos con este tipo de comparación.

Uno de ellos está fundamentado en la variación de la brillantez (la capacidad de reflejo) del mineral patrón, lo que logra por medio de la variación del ángulo de cruzamiento de los nicóles. En este método se utilizan las propiedades ópticas de los nicóles, basado en que cuando están paralelos dejan pasar el máximo de luz y cuando están cruzados uno con relación al otro 90° , el campo visual se oscurece.

Por física conocemos que la energía de la onda de luz y, que pasa a través de los nicóles, es proporcional al seno cuadrado del ángulo de giro del analizador.

$$Y = K \cdot a^2 \cdot \text{Sen}^2 \alpha$$

donde:

α - ángulo de giro del analizador;

K - coeficiente;

a - amplitud proporcional de las oscilaciones de la luz.

Sin embargo, la determinación de la amplitud inicial de la oscilación de la luz (a) generalmente es difícil de medir sin equipos especiales, por eso este método no ha encontrado amplia utilización. Además de ello, la exactitud de la determinación con este método no excede el 10 %, es decir, una magnitud establecida con seguridad "a ojo". El siguiente método está basado en la determinación del índice de reflexión (fotometría) con ayuda de equipos especiales.

Así, en el principio de variación del índice de reflexión del mineral patrón hasta la magnitud del índice de reflexión del mineral determinado, fueron basados los métodos propuestos por M. Bereck y I.S. Valmiski, los cuales construyeron para éstos, equipos auxiliares especiales denominados microfotómetro. El más simple y exacto es el microfotómetro de I.S. Valmiski, cuyo principio de trabajo vamos a analizar brevemente.

I.S. Valmiski, en calidad de aditamento auxiliar al microscopio menífero para determinar la capacidad de reflejo utilizó el ocular fotométrico con cuña óptica (en la producción en serie de la forma LOMO este modelo tiene la marca OKF-1).

Este microfotómetro es un ocular corriente en cuyo cuerpo hay una ranura para introducir, en el esquema óptico de la cuña transparente, láminas de colores que aumentan progresivamente. Las variaciones de los colores (o disminución del paso de la luz) en la cuña no ocurre constantemente, sino escalonadamente, en cada uno de los cuales disminuye la intensidad de la luz reflejada en determinada cantidad de por cientos en comparación con el escalón precedente (generalmente en un 5 %). Por su longitud la lámina-cuña está dividida en dos partes, una de las cuales es transparente y tiene una escala graduada, y la otra es la cuña en sí.

En el caso visual del microscopio la lámina se sitúa de forma tal que dicha cuña se encuentra sobre el mineral conocido (patrón) con capacidad de reflejo más alto que el del mineral que se investiga, y la parte transparente de la cuña se coloca sobre el mineral que se está determinando, como se muestra en la Figura No. 3.2.

Otro método de medición del índice de reflexión de los minerales meníferos, recomendados por S. A. Vajromeiev, prevé la utilización del ocular comparativo, el cual permite trabajar con dos microscopios simultáneamente. La determinación de la capacidad de reflejo en este ocular se realiza por medio de la comparación del mineral desconocido con el mineral patrón. Con este método se puede valorar la magnitud de la capacidad de reflejo con una exactitud de hasta 5-10 %.

El principio del trabajo con el ocular comparativo será analizado más detalladamente al estudiar el color de los minerales.

Una medición más exacta de la capacidad de reflejo, basada en el mismo principio, se puede obtener con un microscopio comparativo especial. El microscopio comparativo son dos microscopios montados en una misma base y unidos por un ocular común en el cual se puede observar simultáneamente el campo visual de ambos microscopios.

En la platina de un microscopio se coloca la sección pulida con mineral a determinar, y en la platina del otro microscopio el patrón, el cual es mejor que sea una lámina de platino pulida. El platino posee un índice de reflexión bastante alto, constante para diferentes longitudes de onda y no se óxida al

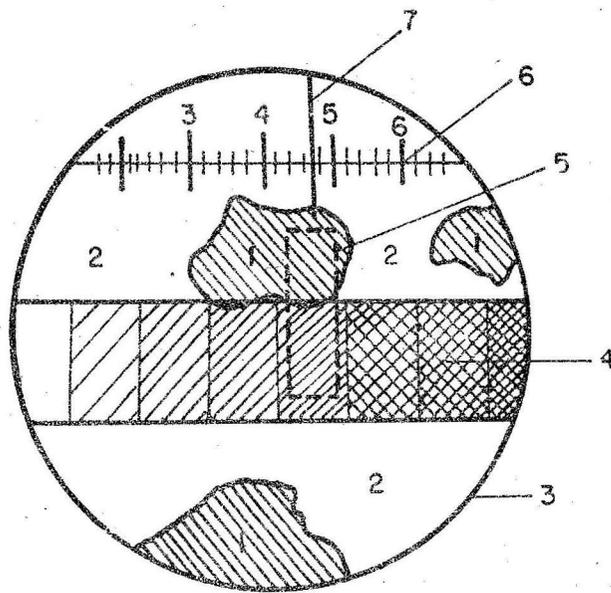


FIGURA 3.2. Esquema de la medición del índice de reflexión con ayuda del ocular fotométrico de I.S. Valmiski. 1. Mineral que se determina; 2. Mineral conocido (patrón); 3. Campo visual del microscopio; 4. Cuña óptica; 5. Diafragma de escudo para comparar la capacidad de reflejo del mineral y del patrón; 6. Escala de graduación de la cuña; 7. Línea del índice que relaciona la cuña con la escala.

contacto con el aire. Antes de colocar la muestra investigada y el patrón se logra igual intensidad de iluminación de los campos visuales de los dos microscopios con ayuda de su regulación.

Cuando se mide la capacidad de reflejo, se introduce el analizador del microscopio sobre el que se ha colocado la lámina patrón en la posición inicial que corresponde al máximo de iluminación, hasta que el índice de reflexión del platino sea igual al índice de reflexión del mineral a determinar; operación que se logra variando el ángulo del analizador. Este ángulo de viraje del analizador (α) se fija. La medición se realiza varias veces y se obtiene el valor promedio de (α_m). La medición de la capacidad de reflejo de los minerales isotrópicos se realiza en cualquier posición en la platina del microscopio. Los minerales anisotrópicos previamente se deben colocar, cuando los nicols están correctamente cruzados, en la máxima oscuridad, y luego girar la platina 45° . La determinación de la capacidad de reflejo del mineral investigado, R_m se realiza por la siguiente expresión:

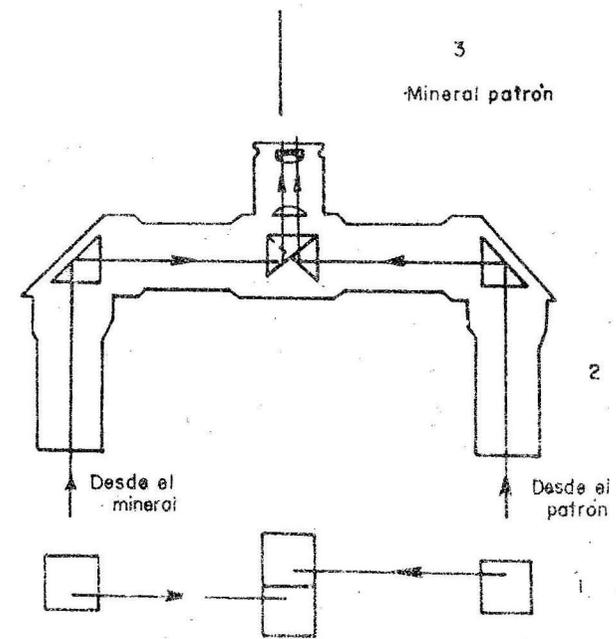


FIGURA 3.3. Esquema principal de la instalación de un ocular comparativo. 1. Posición de los prismas en el plano; 2. Esquema del paso de la luz en el ocular comparativo; 3. Campo visual visible en el ocular comparativo.

$$R_m = R_p \frac{\text{Sen}^2 \alpha}{\text{Sen}^2 2} = R_{pt} = \frac{\text{Sen}^2 \alpha}{\text{Sen}^2 90} = \text{Sen}^2 \alpha m$$

Usando el platino como patrón y sustituyendo; se tiene:

$$R = 70 \text{ Sen}^2 \alpha m$$

donde:

R_{pt} - capacidad de reflejo del platino = 70 %;

p - patrón;

m - mineral investigado;

α - ángulo de giro del analizador.

Con los métodos objetivos de valoración de la capacidad de reflejo la experiencia del observador no participa en la determinación de su característica cuantitativa.

Para la medición objetiva se utilizan equipos especiales cuya construcción está basada en el principio del efecto fotoeléctrico. Estos métodos se llaman fotoelectrométricos, y la parte componente de los equipos es el fotómetro eléctrico o microespectrofotómetro ocular.

Se llama efecto fotoeléctrico al desprendimiento de los electrones de la sustancia bajo la acción de la luz.

Para medir la capacidad de reflejo en minerografía generalmente se utilizan los fotómetros eléctricos de selenio por ser los más sensibles. Se conocen muchos equipos y aparatos diferentes para medir la capacidad de reflejo con ayuda del método fotoelectrométrico, pero el principio de trabajo de la mayoría de ellos se basa en un esquema simple mostrado en la Figura 3.4.

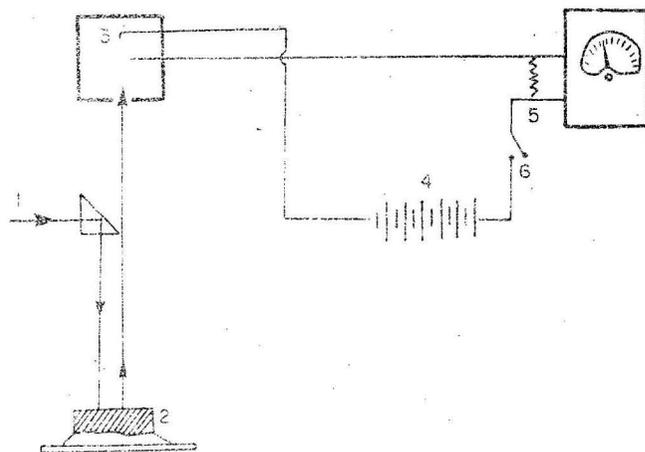


FIGURA 3.4. Esquema principal del microespectro-fotómetro ocular con fotoelemento. 1. Iluminador opaco; 2. Sección pulida; 3. Fotoelemento; 4. Batería seca; 5. Shunt del galvanómetro o miliamperímetro; 6. Paso de la luz.

En estos equipos, como vemos en el esquema, la luz reflejada desde la superficie pulida del mineral pasa a través del microscopio y la luz incide en la capa sensible del fotoelemento. La corriente eléctrica (corriente fotoeléctrica)

que surge va a parar al galvanómetro o miliamperímetro conectado al circuito desplazando la aguja.

Generalmente se utiliza un galvanómetro de espejo muy sensible, en el cual bajo la acción de la corriente fotoeléctrica se vira el espejo y desvía el rayo de luz que se desplaza por la escala. Las indicaciones del galvanómetro son proporcionales a la intensidad de la capacidad de reflejo y la escala del galvanómetro se gradúa con la ayuda de patrones con capacidad de reflejo conocida (silicio).

En relación con el hecho de que la corriente fotoeléctrica que surge en el circuito tiene una magnitud pequeña, en el esquema de los microespectrofotómetros oculares actuales se emplean los fotomultiplicadores electrónicos (EFC) para aumentar la fuerza de la corriente fotoeléctrica, y estabilizadores de la tensión para garantizar la estabilidad de las condiciones durante las investigaciones.

Uno de dichos aparatos, fabricados en serie por la firma LOMO (URSS), es el aditamento microelectrofotométrico (FME-1) que se puede instalar en un microscopio minerográfico corriente. Más moderno es el microespectrofotómetro ocular MSFP-2 de la firma LOMO. Este se compone de una cabeza óptica que se fija al microscopio minerográfico en lugar del aditamento ocular, incluido el tablero de medición y del bloque de tensión estabilizadora. Con ayuda de la cabeza óptica se selecciona el grano a los cristales del mineral que se va a determinar, y se coloca en el centro del campo visual, el cual se estrecha hasta la magnitud necesaria con ayuda de un diafragma especial.

En calidad de receptor de las señales de la luz se utiliza el multiplicador fotoelectrónico (marca del modelo FEU-27). Con ayuda de los filtros de luz se puede variar la longitud de la onda desde 430 nm hasta 700 nm para medir la capacidad de reflejo en luz monocromática y estudiar la dispersión de la capacidad de reflejo.

La determinación de la capacidad de reflejos de los minerales se realiza por la escala de microamperímetro del tablero de dirección por medio de la comparación del patrón y del mineral investigado. Por eso, al comienzo se realiza la medición del patrón o patrones, los cuales se incluyen en el juego de accesorios del microespectrofotómetro; en calidad de patrones se emplea el silicio con pureza de 99,9999 %.

Esto es necesario para que el mínimo viraje del espejo del galvanómetro pueda fijarse visualmente en una escala óptica situada lejos. Uno de los últimos modelos de equipos para medir la capacidad de reflejo de los minerales fabricados en la URSS, es el YASHMA. Este equipo se compone de un microscopio de polarización menínero MIN-6 con dos aditamentos fotoeléctricos, de dos multiplicadores fotoelectrónicos de un mismo tipo (FEU), de un bloque de la instalación amplificadora-registradora y de ali-

mentación y de una cuña óptica que permite dirigir la luz con la intensidad requerida por el microscopio.

Durante la observación visual de la sección pulida, el multiplicador fotoelectrónico se coloca en una platina especial y no perturba el trabajo. Una de las ventajas de este equipo es la posibilidad de observar y estudiar los minerales tanto con luz reflejada, como transmitida sin alterar su esquema óptico lo que es muy importante al investigar los granos más pequeños de los minerales.

Para medir la dispersión de la reflexión el aparato YASHMA está equipado con doce filtros de interferencia intercambiables, que permiten obtener un amplio diapasón de luz monocromática con determinadas longitudes de onda. Las indicaciones de la capacidad de reflexión se toman con la escala del microamperímetro, se compara con la capacidad de reflejo del patrón, y por medio del cálculo elemental se obtiene la característica cuantitativa de la capacidad de reflexión del mineral investigado.

En la calidad de patrones para determinar la capacidad de reflejo, las plantas productoras de estos equipos utilizan diferentes aleaciones o sustancia cristalinas naturales y artificiales y minerales que posee una capacidad de reflejo constante. Para determinar la capacidad de reflejo con métodos comparativos (subjetivos), en calidad de patrones se recomienda utilizar los siguientes elementos nativos naturales y minerales, cuyo índice de reflexión en condiciones normales es más o menos constante.

Mineral o elemento	R (%)
Plata	95
Cobre	90
Platino	70
Hierro	64
Altaita	60
Pirita	53
Pentlandita	53
Galena	43
Buongangerita	37
Tetraedrita	29
Hematita	25
Magnetita	20
Cromita	14
Cuarzo	4
Silicio puro (99,99 % de Si)	34,0 % ($\lambda = 656 \text{ nm}$)

Es necesario recordar que al seleccionar los patrones hay que prestar atención a la calidad de la superficie pulida y utilizar para los patrones solamente los granos o cristales de minerales que no tengan ningún defecto. Antes de comenzar a trabajar, los patrones, al igual que los minerales investigados, se deben limpiar con una tela suave para eliminar el sucio, el polvo y los productos de la oxidación. El local donde se realizan las investigaciones cuantitativas de la capacidad de reflejo tanto durante las comprobaciones de los patrones como en las muestras investigadas debe permanecer completamente oscuro, sin otra fuente de luz exterior; de no observarse lo anterior los valores obtenidos de la capacidad de reflejo no son confiables.

En conclusión, señalamos que en la actualidad se han publicado en la prensa y en manuales, los resultados de muchas mediciones de la capacidad de reflejo de un número considerable de minerales meníferos, pero los datos de diferentes autores, hasta ahora, divergen entre sí. Las causas son innumerables, entre ellas podemos mencionar las mezclas de los minerales, inclusiones mecánicas, defectos de la celda elemental entre otras.

3.3. BIRREFLEXION

El estudio de la birreflexión, llamada también pleocroísmo de reflejo, se realiza luz polarizada bajo el microscopio con un solo nicol. La observación de los efectos de birreflexión se debe realizar con las siguientes condiciones:

1. Sin ningún filtro de luz.
2. Con el diafragma de apertura muy cerrado.
3. Con una iluminación intensa y regular del campo visual.

El color y la capacidad de reflejo de los minerales isotropos no varían en estas condiciones al girar la platina del microscopio. En muchos minerales anisotropos, al girar la platina, se observa una variación más o menos evidente del color o de la brillantez, y algunas veces de ambas propiedades.

La intensidad del efecto de birreflexión es pequeña en la mayoría de los casos, por lo que la birreflexión, generalmente, sólo se observa en agregados monominerales granulosos en el límite de los granos que tienen diferente orientación espacial en las direcciones cristalográficas; en un pequeño número de minerales que tienen una birreflexión muy intensa, tales como corelina, molibdenita, antimonita, siderita, grafito y calcita; este fenómeno se puede observar también en los monocristales.

Al observar la birreflexión de los minerales hay que recordar que el ojo humano es más sensible a los contrastes, que al valor absoluto de la capacidad de reflejo; por eso, en el campo visual es necesario mantener los límites de los minerales al girar la platina del microscopio. Si la observación

se realiza en cristales aislados, entonces la birreflexión puede descubrirse cuando existen maclas (a ambos lados de la línea de macla), por la zonación del desarrollo, por la comparación con la iluminación de la masa mineral isótropa circundante.

La intensidad de la manifestación del efecto de birreflexión, al igual que el color, depende del índice de refracción del medio. Mientras más elevado es el índice de refracción del medio de observación, más intensamente se manifiesta el efecto de la birreflexión. Por eso, en los casos dudosos se recomienda revisar la existencia de birreflexión con los objetivos de inmersión.

La birreflexión es también una función de la orientación cristalográfica de los minerales anisótropos, en cada uno de los cuales existe, por lo menos un plano cristalográfico, paralelamente al cual no hay birreflexión. Por eso, la observación de la birreflexión tiene que realizarse en varios granos del mineral investigado.

Para observar la birreflexión se utilizan objetivos de poco aumento (tanto seco, como de inmersión). Para excluir la influencia de los granos de otros minerales se utiliza el diafragma de campo limitando el campo visual. Si el estudiante comienza a distinguir la birreflexión en minerales tales como la pirrotina y arsenopirita, se puede considerar que ya su ojo adquirió suficiente sensibilidad...

CAPITULO 4

COLOR DE LOS MINERALES MENIFEROS

4.1. GENERALIDADES

El color de los minerales meníferos con luz reflejada es una de las propiedades más útil y característica durante el diagnóstico de los minerales meníferos, pero su valoración es muy difícil, principalmente para los que comienzan a conocer este índice.

El color de los minerales hace tiempo que se utiliza en diferentes tablas determinativas, en petrografía, se distinguen tres grupos: blancos, débilmente coloreados, muy coloreados; existe un límite brusco entre estos grupos y generalmente los minerales se relacionan con dos grupos a la vez. En minerografía esta agrupación solamente se puede hacer para los minerales que poseen una capacidad de reflejo de valor medio, con la cual se relacionan con todos los minerales con colores estables. Sin embargo, dicha clasificación aporta muy poco cuando se determina concretamente el color de las tonalidades del mineral como índice diagnóstico.

Prácticamente no existen minerales meníferos totalmente incoloros, que no posean una característica cromática individual con luz reflejada. Sin embargo, coloraciones específicas, son características de algunos de ellos. Un número importante de minerales meníferos se relaciona con tonalidades entre el color blanco y el color gris. Una menor parte de los minerales posee con luz reflejada determinados colores espectrales, pero principalmente de tonalidades pálidas.

Una de las propiedades más importante del ojo humano es que su sensibilidad a las débiles diferencias de color aumenta rápidamente con el entrenamiento de las determinaciones de las tonalidades, y los contrastes que inicialmente no eran captados por el ojo, son totalmente visibles a medida que se adquiere algunas experiencias. Por ejemplo, a los que comienzan generalmente les resulta muy difícil diferenciar el color de la pirrotina, pirita, calcopirita y pentlandita, al mismo tiempo que el investigador con experiencia determina inmediatamente estos minerales por las tonalidades del color y generalmente no utiliza otros índices para diagnosticarlos.

4.2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES Y PREMISAS TEORICAS

Como color de los minerales meníferos en minerografía siempre se entiende el color de su superficie pulida con luz reflejada; el color del mineral con luz incidente blanca depende del carácter de la dispersión de la capacidad de reflejos del mineral, es decir, de la variación de la capacidad de reflejo con la variación de la longitud de onda de la luz incidente.

El valor numérico de la capacidad de reflejo (R) de los minerales para diferentes longitudes de onda se puede representar en forma de datos tabulados, como se hizo con la capacidad de reflejo, o en forma de curvas de dependencia entre la capacidad de reflexión (R) y la longitud de onda (λ). El análisis de dichas curvas da la posibilidad de valorar cuantitativamente la tonalidad del color del mineral y su grado de saturación o de intensidad en luz reflejada blanca.

En la Figura 3.1 (Capítulo 3), se han señalado los gráficos de dependencia de la capacidad de reflexión (R) y de la longitud de onda de la luz incidente (λ) para algunos minerales. En calidad de ejemplo analicemos los gráficos más característicos.

Así, la curva de dispersión de la pirita, muestra que la mayor capacidad de reflejo la posee en la parte amarillo-naranja del espectro, pero su capacidad de reflejo para la parte azul-violeta del espectro disminuye bruscamente. Por eso, al iluminar la pirita con luz blanca, se verán principalmente los rayos amarillos reflejados desde ella, y nosotros observamos que la pirita posee color amarillo, o más bien amarilloblancuzco.

La curva de dispersión de la galena demuestra que esta posee una alta capacidad de reflejo en las partes violetas y azul del espectro, las cuales son poco sensibles al ojo del hombre. Por eso el color de la galena, el cual observamos con luz blanca, será blanco, incoloro. También por las curvas correspondientes de dispersión de la capacidad de reflejo se puede caracterizar y obtener una idea bastante completa acerca del color de las tonalidades de cada mineral.

De esta forma, el color del mineral con luz blanca es la expresión de la capacidad de reflejo. Como es conocido, la luz blanca a diferencia de la monocromática, es compleja y se compone de rayos de luz de diferentes longitudes de onda. El mineral iluminado con dicha luz, posee particularidades individuales de reflejar, en determinado grado, los rayos con una u otra longitud de onda, lo que determina su color o tonalidad. Por consiguiente, el color del mineral expresado con este método es una constante óptica compleja y adquiere un valor diagnóstico importante sobre el color del mineral menífero se puede tener una idea cualitativa (por el color con luz

blanca) y cuantitativa (por la dispersión de la capacidad de reflejo expresada en valores numéricos o gráficamente).

4.3. CONDICIONES QUE INFLUYEN SOBRE LA RECEPCION DEL COLOR DE LOS MINERALES MENIFEROS.

Bajo el microscopio es casi imposible denominar la tonalidad del color del mineral con la luz reflejada. Con esto se explica el hecho de que en diferentes tablas determinativas y manuales de minerografía la tonalidad del color del mismo mineral es diferente. Así, por ejemplo, la pirrotina posee un color bastante característico y se determina inmediatamente por este índice. Pero sin embargo, en la literatura se describe como de color crema, castaño-crema pálido, bronce claro, amarillo rojizo pálido, etcétera. Por eso, en principio, es importante recordar no tanto el nombre del color del mineral como se señala en uno u otro manual, como obtener, al ver el mineral bajo el microscopio, una impresión exacta de su color y tratar de retenerlo en la memoria. El que comienza debe grabar perfectamente en su memoria colores tales como "pirrotínico"; "calcopirítico"; "bornítico"; "galenítico" y otros y saber reconocer estos minerales por el color.

Sin embargo, todo lo anteriormente dicho no excluye la determinación del color de los minerales, lo que es necesario para tener una idea general acerca del mineral. De los minerales meníferos que poseen las tonalidades más típicas se pueden mencionar las siguientes:

1. Galena: blanco,
2. Tennantita: gris-blanco,
3. Esfalerita: gris,
4. Cuarzo: gris-oscuro,
5. Ilmenita: gris-pardo,
6. Cuprita: amarillo claro,
7. Pirita: amarillo-naranja,
8. Marcasita: amarillo blancuzco,
9. Calcopirita: amarillo,
10. Pirrotina: crema,
11. Bornita: rosado-carmelita,
12. Cobaltina: blanco-rosado,
13. Umanguita: rojo
14. Covelina: azul

La determinación del color de unos u otros minerales meníferos puede ser diferente en dependencia de la serie de condiciones en que se realizan las

observaciones. Estas condiciones es necesario recordarlas al determinar el color del mineral, principalmente cuando el color o la tonalidad no se han manifestado muy claramente.

Entre las condiciones o factores que influyen en la determinación del color de los minerales meníferos tenemos entre otros:

- a) fuente de luz;
 - b) calidad de la superficie pulida de los minerales meníferos;
 - c) influencia del fondo donde se localiza el mineral menífero;
 - d) composición química de los minerales.
- a) Fuente de luz. El color de los minerales meníferos bajo el microscopio depende mucho de la fuente de luz que ilumina al mineral. Generalmente la fuente de luz del microscopio es el bombillo, el cual no da una luz blanca "pura", sino amarillosa. Esta tonalidad amarillosa cae sobre todos los minerales y es necesario excluirla cuando se determina el color del mineral. Cuando el bombillo ilumina débilmente la densidad de la tonalidad amarilla de la luz aumenta bruscamente y en esa condiciones se hace prácticamente imposible determinar el color real del mineral. Cuando se trabaja con el filtro de luz azul (filtro de luz ambiental) aparece la tonalidad azulosa, cuya presencia también perturba la determinación del color, sino hay la suficiente experiencia de trabajo con este filtro de luz. Es mucho mejor utilizar una fuente de luz corriente de bastante intensidad, y según las posibilidades permanente, sin filtros de luz, observando una de las condiciones principales, la regularidad de la iluminación de todo el campo visual bajo el microscopio.
- b) Calidad de la superficie pulida de los minerales. Mientras mejor es la calidad de la superficie pulida del mineral menífero, más iluminado aparece bajo el microscopio y mejor se determina su color. Así por ejemplo, la calcopirita mal pulida tiene un color amarillo oscuro con tonalidad verdosa, que no se parece en nada al color amarillo brillante de la calcopirita, en una sección pulida bien preparada.
- La esfalerita con una superficie de mala calidad tiene color gris oscuro, por lo que se diferenciaría poco del color del cuarzo o de otro mineral no-menífero, al mismo tiempo que en una muestra bien pulida tiene color gris claro, y se distingue claramente entre los minerales no meníferos. Hay que recordar que muchos minerales meníferos se oxidan rápidamente con el aire, (por ejemplo cobre nativo, pirrotina, bornita, calcopirita, calcosina y otros) y su valor varía. Por eso, antes del trabajo las secciones pulidas es necesario pulirlas en la máquina o con un paño.
- c) Influencia del fondo donde se localiza el mineral menífero. El análisis del color de los minerales depende mucho del fondo que rodea a este mineral. Así, por ejemplo, la esfalerita entre cuarzo con luz reflejada es de gris oscuro y cuando está rodeada de galenita blanca el color es gris

o gris blancuzco. La cromita entre serpentinita oscura parece gris claro, pero junto al platino blanco aparece casi oscura. Cuando en el campo visual aparece solamente magnetita, ésta se ve gris, pero cuando se compara con la hematita que generalmente la acompaña, adquiere tonalidades rojizo parduzca. La piritita entre la calcopirita parece casi blanca, y cuando se le compara con la galena o cobre gris adquiere tonalidad amarilla. De esta forma, al determinar el color del mineral es necesario considerar el color y la intensidad de la capacidad de reflexión del fondo, sobre el cual se distingue el mineral investigado.

- J) Composición química de los minerales. Muchos minerales no poseen una fórmula química estable y su composición cuantitativa elemental, puede variar. Esto se relaciona principalmente en combinaciones isomorficas tales como cobre gris, oro, wolframita, esfalerita, cromoespinela, limonita, etcétera. El color de dichos minerales en dependencia de la composición química y de la existencia de mezclas isomorficas, variará algo, lo cual es necesario considerar al investigar dichos minerales.

4.4. CONDICIONES Y METODOS PARA OBSERVAR EL COLOR DE LOS MINERALES BAJO EL MICROSCOPIO

El color de los minerales bajo el microscopio se manifiesta con diferentes grados de precisión durante la observación con objetivos secos y de inmersión. Las mejores condiciones para observar el color de los minerales, y principalmente para determinar las tonalidades más débiles, se crean con la utilización de los objetivos de inmersión y líquidos de inmersión con un elevado índice de refracción. Así por ejemplo, con el líquido de inmersión se distinguen fácilmente las tonalidades de color entre la magnetita y la ilmenita (rojo pardo en la magnetita y pardo de la ilmenita) las cuales, frecuentemente, se encuentran juntos a las menas, y ambos minerales se diferencian notablemente de la hematita (color gris pardo).

En algunos casos la determinación de la tonalidad se complica por los fenómenos de birreflexión intensa (pleocroísmo), característico de los minerales muy anisotrópicos. En este caso se recomienda eliminar del iluminador opaco el polarizador y determinar el color del mineral con luz no polarizada corriente, con lo cual no se produce el efecto de la birreflexión.

Entre los métodos para determinar el color de los minerales meníferos, como ya señalamos, el más simple es la determinación "a ojo", es decir, la valoración directa del color o de la tonalidad. Sin embargo, la exactitud de dicha valoración, sin la experiencia correspondiente, generalmente es pequeña. Existen también otros métodos basados en la comparación del color del mineral investigado con el color patrón.

1. Comparación con el mineral patrón o con otros minerales.

En calidad de patrón para la comparación, generalmente se utiliza la galena, que posee un color blanco bastante puro y está ampliamente en los yacimientos meníferos, principalmente en los sulfurosos. Para la comparación bajo el microscopio se coloca un par de minerales en contacto, de los cuales uno tiene que ser galena, y el otro el mineral investigado. Si no se encuentra dicha pareja, se hace una sección pulida doble de un determinado mineral y de galenita. Estas se pulen de forma tal que estos minerales hagan contacto entre sí. Después de esto se montan juntos en un portaobjeto y se compara bajo el microscopio, el color de la galenita (blanco) con el color del mineral determinado. Este método es cómodo pero requiere trabajo de pulido complementario y una cantidad considerable de mineral investigado para preparar la sección pulida especial.

Es mucho más simple realizar la confrontación del color del mineral con la galena con ayuda del ocular comparativo, el cual es un tubo con cuatro prismas rectangulares y un ocular.

El ocular comparativo se instala simultáneamente a dos microscopios en lugar de los oculares habituales. Su construcción permite desplazar los prismas centrales, gracias a lo cual se puede ver simultáneamente los campos visuales de los microscopios o alternativamente el de la derecha o el de la izquierda. En ambos microscopios se fijan los objetivos de igual aumento y por los transformadores se le aplica igual iluminación a ambos campos visuales. Después, en la platina de un microscopio se coloca la sección pulida con un determinado mineral, y en el otro - con galena. Se hacen coincidir estos minerales en un campo visual común del ocular comparativo y se comparan entre sí.

Con ayuda del ocular comparativo se puede realizar la confrontación del color de un determinado mineral con el color de los minerales patrones de una colección patrón, lo que permite establecer con exactitud este índice diagnóstico. El ocular comparativo se utiliza también para determinar la capacidad de reflexión.

2. Comparación con el espejo plateado o lámina de platino.

El método para determinar el color comparándolo con el espejo, plateado fue propuesto por Van der Vin. Sobre el vidrio se coloca una capa fina de plata obteniéndose de esta manera un espejo. La capa de plata se recubre con bálsamo de Canadá para que la plata no se oxide y no pierda su color natural. Con una aguja fina se hace en la capa plateada un orificio pequeño y se coloca el espejo sobre la sección pulida, con la cara plateada hacia arriba. A través del orificio, en la capa plateada se ve la superficie de la sección pulida, la cual se desplaza hasta que aparece en el campo visual el mineral determinado; el color del mineral se determina comparándolo con el color de la plata que rodea al mineral.

S. A. Vajromeiev varió algo este método. Él recomienda en lugar del espejo plateado, utilizar una lámina de platino pulida y fina con orificios pequeños de diferentes diámetros (para objetivos de diferentes aumentos). El color del platino es blanco y estable, ya que a diferencia de la plata, no se oxida con el aire. El método de comparación del color del mineral con el espejo es más simple que la comparación con los patrones, y por eso se utiliza con mucha frecuencia en la práctica de investigaciones minerográficas.

Para determinar el color de los minerales se han hechos intentos de elaborar otros métodos más exactos. Así, como patrones del color se propusieron determinadas tablas determinativas de Schneider hölm, filtros de luz en forma de cuña y otros métodos. Sin embargo, estos métodos se basan en la reproducción artificial del color del mineral, cuya determinación también depende de la recepción individual y otros no han encontrado aplicación en la práctica de investigación de los minerales meníferos bajo el microscopio.

CAPITULO 5

REFLEJOS INTERNOS DE LOS MINERALES MENIFEROS

5.1. GENERALIDADES Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Los minerales meníferos poseen diferentes grados de transparencias y por este índice se dividen en tres grupos fundamentales: no transparentes, semitransparentes y transparentes. Los minerales de los dos últimos grupos, al observarlos con luz reflejada generalmente tienen un color con el cual se iluminan las láminas finas. Este fenómeno se llama reflejo interno.

Los reflejos internos están condicionados, por la penetración, a cierta profundidad, de la luz que incide sobre el mineral y su reflejo desde los elementos de la estructura interna de los minerales, tales como plano de clivaje, microgrietas, superficie de contacto con otros minerales, etcétera. Al salir a la superficie la luz adquiere un color determinado, característico de dicho mineral, el cual se observará como reflejo interno.

El grado de transparencia de los minerales meníferos se encuentra en dependencia inversa a la absorción de la luz y por consiguiente de la capacidad de reflejo. Prácticamente, esta dependencia inversa se expresa por la siguiente dependencia: Los minerales de capacidad de reflejo elevado ($R = 40\%$), como regla, no tienen reflejos internos; en los minerales con un índice moderado (R desde 20% hasta 40%) aproximadamente la mitad, posee reflejos internos; en los minerales de baja capacidad de reflejo ($R < 20\%$) los reflejos internos son corrientes y ésta es, con frecuencia la propiedad más característica.

En los minerales transparentes los reflejos internos se manifiestan por toda su superficie, visible bajo el microscopio. En los minerales semitransparentes los reflejos se observan en forma de diferentes manchas, en puntos que tienen diferente color según las tonalidades. La densidad de las tonalidades del color de los reflejos internos en diferentes partes del agregado mineral o de un grano, depende:

1. De la transparencia de dicho mineral.
2. De la profundidad de penetración de la luz en las partes internas del mineral.
3. De la intensidad y dirección de la iluminación.

4. De las dimensiones de los granos y agregados del mineral.

Los reflejos internos en los minerales semitransparentes generalmente se observan en las grietas, planos de clivaje, cavidades e inclusiones. Con frecuencia aparecen por el contacto entre los granos minerales, principalmente en el límite con los minerales transparentes. Para los minerales de muy elevada birreflexión, tales como siderita, los reflejos internos y sus límites frecuentemente parecen dobles. Los minerales no transparentes no tienen reflejos y toda su superficie aparece en el campo visual, oscura.

Para diagnosticar los minerales, los reflejos internos son un índice importante que caracteriza no solo el color, sino también a la intensidad de la manifestación. Además de ello, durante el diagnóstico de los minerales transparentes y semitransparentes con frecuencia se utiliza la investigación con su polvo, lo que permite precisar tanto frecuencia de reflejos internos, como su color e intensidad de su manifestación.

5.2 CONDICIONES DE OBSERVACION DE LOS REFLEJOS INTERNOS

Los reflejos internos se observan solamente en el microscopio en diferentes condiciones de iluminación.

Uno de los métodos que da buenos resultados es la observación de los reflejos internos con iluminación oblicua. Con este método, la iluminación de la sección pulida se realiza con cualquier fuente de luz externa desde un lado del tubo del objetivo, la observación se realiza con el iluminador opaco desconectado. Con la iluminación oblicua los rayos de luz caen con un ángulo grande, es decir, con iluminación hacia la superficie pulida de la sección, después de encontrar el corte pulido del mineral no transparente, los rayos se reflejan totalmente a un lado y no caen sobre el ojo del observador. Tales minerales, en el campo visual del microscopio, estarán oscuros o negros. Al mismo tiempo, los rayos que inciden inclinadamente sobre los minerales transparentes y semitransparentes, penetrarán parcialmente en el interior de ellos. Al reflejarse desde los elementos de la estructura interna de los minerales, una parte de los rayos inciden sobre el ojo del observador, como se muestra en la Figura 5.1. Estos rayos al atravesar una vía compleja y quebrada en el interior del mineral, por el color y las intensidades de éste se determina el grado de transparencia y el propio color del mineral (ya con luz transmitida en relación con el mineral).

Cuando se observan los reflejos internos con luz oblicua es necesario utilizar una fuente de luz bastante intensa y una vía óptima para seleccionar la dirección más efectiva de iluminación de la sección pulida. Este método de observación de los reflejos internos se puede utilizar solamente con pequeños aumentos con objetivos de $32\times$ (para el microscopio JENALAB, cuya

distancia de foco permite iluminar la sección pulida desde un lado del objetivo.

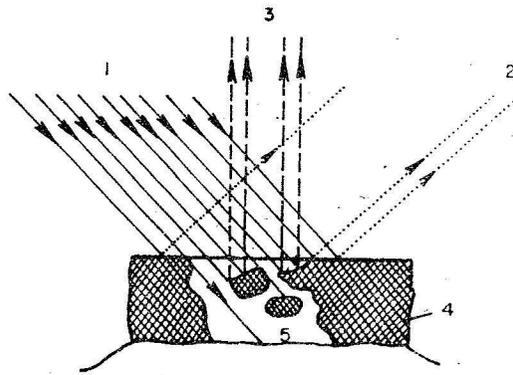


FIGURA 5.1. Esquema del paso de los rayos con iluminación oblicua sobre la sección pulida 1. Dirección del haz de rayos incidentes; 2. Rayos reflejados desde los minerales no transparentes; 3. Rayos que llegan al observador a través de los minerales transparentes.

El método más universal es el de observar los reflejos internos con los nicoles cruzados. Con este método el observador ve tanto la iluminación total del mineral con los nicoles cruzados, como el color y la intensidad de la manifestación de los reflejos internos. Cuando los nicoles están totalmente cruzados, la luz reflejada por los minerales isotrópicos, casi se extingue totalmente con el analizador y sobre el fondo oscuro del mineral se ve el color de sus reflejos internos. En los minerales anisotrópicos es necesario distinguir el efecto de la anisotropía y los reflejos internos, lo que no es difícil y se denomina rápidamente después que se conoce en las prácticas el comportamiento de los minerales anisotrópicos con luz polarizada. Las principales características que se diferencian a los reflejos internos de los efectos de la anisotropía son las típicas tonalidades de un color característicos de los primeros, en cualquier posición de la platina del microscopio y su ausencia en los segundos, su variación desordenada, su aparición y desaparición al girar la platina.

Este método de observación de los reflejos internos, necesita la utilización de objetivos de grandes aumentos y por eso posee una extrema sensibilidad o la posibilidad de observar los reflejos en las inclusiones más pequeñas de minerales meníferos.

Se establecen aun mejores condiciones para la observación de los reflejos internos cuando se utilizan objetivos de inmersión y la inmersión con los nicoles cruzados. En este caso se observan reflejos internos en algunos minerales que no manifiestan estos índices con otros métodos de investigación en un medio aéreo.

El método más complejo para determinar el color y la intensidad de la manifestación de los reflejos internos es la observación del polvo fino de mineral en inmersión. De esta forma existen cuatro métodos fundamentales para investigar los reflejos internos (están dados en orden de mejoramiento de sus condiciones de aparición): 1) Con iluminación oblicua de la superficie pulida de la sección; 2) Cuando los nicoles se cruzan en un medio aéreo; 3) Con los nicoles cruzados en inmersión y 4) Investigación del polvo de mineral en inmersión.

Hay que señalar que para mejorar las condiciones de observación de los reflejos internos con iluminación oblicua frecuentemente se utilizan aparatos de iluminación completa, que crean una iluminación oblicua intensa desde todos los lados y permiten obtener un campo visual oscuro, en el cual se ven los reflejos. Dichos aparatos o ultraopacos pueden utilizarse con objetivos de cualquier aumento. El esquema del paso de los rayos en el ultraopaco se ha señalado en la Figura 1.2. Como vemos en el esquema, en el objetivo y luego en el ocular, llegan al observador solamente los rayos que han sufrido difracción en el sistema óptico del ultraopaco.

En el proceso de estudio de los reflejos internos los estudiantes que comienzan, con frecuencias cometen errores, cuyas causas fundamentales son las siguientes:

- 1) Se consideran los destellos azules de la luz ambiental sobre una muestra de baja calidad como el cobre azul de los reflejos internos del mineral.
- 2) Con los nicoles cruzados, se confunde el color del mineral anisotrópico con el color de los reflejos internos.
- 3) Cuando existen arañazos, generalmente se consideran reflejos internos los destellos de color intenso o incoloros que surgen en partes de estos arañazos.
- 4) Se toman como reflejos internos los minerales no meníferos totalmente transparentes (por ejemplo, el cuarzo), en los cuales algunas veces se observan zonas muy iridiscentes, que surgen a consecuencia de la descomposición de la luz blanca en sus partes componentes (interferencia).

Para tener una idea acerca de los reflejos internos de colores más o menos característicos, podemos mencionar los siguientes:

1. Malaquita: verde intenso.
2. Azurita: azul hasta azul oscuro.
3. Oropimente: amarillo limón.

4. Esfalerita: amarillo claro hasta rojo pardo.
5. Casiterita: amarillo ambar, algunas veces parduzco.
6. Limonita: amarillo pardo hasta rojo pardo oscuro.
7. Cinabrio: rojo claro hasta rojo sangriento.
8. Wolframita: 2 rojo pardo.
9. Hematita: rojo oscuro.
10. Cromita: amarillo pardo (en inmersión).
11. Cuarzo, calcita: incoloros transparentes.

Hay que recordar que los colores de los reflejos internos para algunos minerales no son constantes y dependen de su composición química. Así, por ejemplo, para la esfalerita incolora (clecofana) son característicos los reflejos amarillos claros casi incoloros, y su variedad amarillosa (marmatita) son característicos reflejos rojos parduzcos intensos, y algunas veces carecen de ellos. Por consiguiente, en algunos casos, por el carácter de los reflejos internos, se puede tener una idea acerca de la composición química de uno u otro mineral.

CAPITULO 6

INVESTIGACIONES MINERAGRAFICAS CON LA LUZ POLARIZADA

6.1. GENERALIDADES

Una importancia excepcional tiene la utilización de la luz polarizada en la petrografía, donde casi todas las constantes ópticas de los minerales transparentes se determinan precisamente con luz polarizada. Durante las investigaciones minerográficas el rol de la luz polarizada es menos importante debido a que dicha luz reflejada tiene poca claridad así como de las variaciones relativas de estos fenómenos ópticos observados bajo el microscopio minerográfico.

El microscopio minerográfico posee un polarizador situado en el iluminador opaco y que está conectado permanentemente al esquema óptico, y un analizador que se conecta o desconecta según las necesidades del trabajo en la determinación de la anisotropía óptica de los minerales con luz polarizada-plana reflejada con un nicol (polarizador) y con los nicoles cruzados. Los fenómenos de reflexión de los cristales isotrópicos con un polarizador no se diferencian de los efectos de reflexión con luz polarizada simple. Para algunos minerales anisotrópicos, con esta condición, se observa el fenómeno de birreflexión analizado anteriormente.

Durante la investigación de la anisotropía de los minerales en nicoles cruzados se estudia la característica cualitativa de este fenómeno y basado en esto se clasifican los minerales en determinados grupos según el grado de manifestación de las propiedades de anisotropía. A pesar del carácter cualitativo de los resultados de las observaciones con dos nicoles, la suma de dichas observaciones resulta, en la mayoría de los casos, totalmente determinada para cada mineral y es uno de los índices ópticos principales durante su diagnóstico. En relación con ello al determinar los minerales y al estudiar la microscopía menifera es de gran beneficio una colección de minerales patrones cuidadosamente estudiados y exactamente establecidos (colección patrón).

Sobre la determinación de los fenómenos de anisotropía con nicoles cruzados, ejerce gran influencia la exactitud del montaje del microscopio y algunos factores subjetivos de los que hablaremos más adelante. La utilización de dos nicoles provoca una gran pérdida de luz en relación con lo cual cuando se observa con los nicoles cruzados es necesario utilizar la intensi-

dad máxima posible de la fuente de luz. Cuando se desconecta el analizador, la intensidad de la iluminación del campo visual aumenta bruscamente y, principalmente cuando hay minerales que reflejan intensamente la luz, ésta daña la vista, por eso antes de desconectar el analizador hay que disminuir la intensidad de la luz incidente con ayuda del transformador.

6.2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES Y PREMISAS TEORICAS

La luz blanca se manifiesta por medio de las oscilaciones que tienen lugar en todas direcciones alrededor de la vía del paso del rayo y son paralelas al frente de la onda. Sin embargo, las investigaciones de algunos índices de los minerales meníferos bajo el microscopio, y en particular, los anisotrópicos, se realizan con luz polarizada, por eso es necesario tener una idea sobre la naturaleza de la luz polarizada reflejada.

La luz de polarización puede obtenerse de varias formas, pero en microscopía generalmente se utiliza la polarización provocada por la birreflexión de la luz. Con este tipo de polarización la luz, al entrar en el mineral anisotrópico, se descompone en dos rayos, los cuales poseen diferentes velocidades. Si el mineral es transparente y los rayos caen sobre la superficie del cristal perpendicularmente, ambos planos se polarizan perpendicularmente (o linealmente), al mismo tiempo que el plano de oscilación de uno de ellos se encuentra en ángulo recto con el plano de oscilación del otro rayo, como se muestra en la siguiente figura (Figura 6.1).

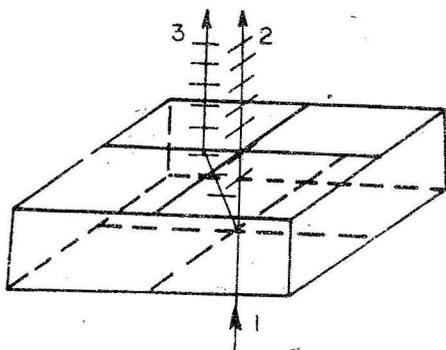


FIGURA 6.1. Esquema de la descomposición de un rayo no polarizado (1) en dos rayos polarizados planos. Las direcciones de las oscilaciones de ambos rayos son perpendiculares entre sí (2 y 3).

La polarización que surge durante la birreflexión se utiliza para obtener luz polarizada plana por medio de la conexión, al esquema óptico del microscopio, de un prisma del nícol. Este prisma es de fragmentos de calcita (espato de Islandia) y está preparado de forma tal que un grupo de rayos que surgen durante la birreflexión se reflejan y forman un sistema, y el otro pasa a través del prisma e ilumina la sección transparente o superficie pulida. En caso de la luz polarizada poseemos dos sistemas de ondas con un mismo plano de oscilación que van por una misma vía.

Dos sistemas de ondas, al oscilar en un plano, se interfiere uno a otro o se intensifican o debilitan mutuamente. Así, si dos sistemas se encuentran en una fase, ocurre la intensificación de la luz y la amplitud del sistema resultante de las ondas será igual a la suma de las amplitudes de los dos sistemas iniciales de ondas, como se ha mostrado, esquemáticamente, en la Figura 6.2.

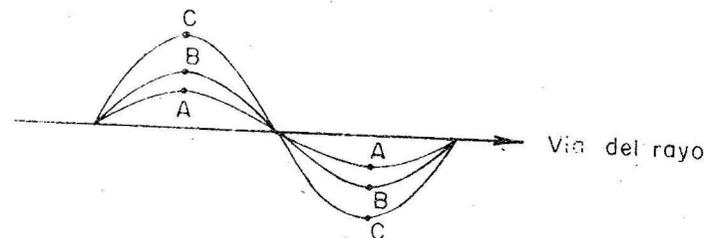


FIGURA 6.2. Las ondas A y B iguales en las fases al oscilar en un plano y seguir la misma vía se amplifican entre sí formando la onda C.

Si dos sistemas de ondas son iguales por la amplitud y contrarios por la fase se extinguen uno con otro y como resultado de esto se observa oscuridad.

Las observaciones de los fenómenos de anisotropía en el microscopio menífero se dificultan por el surgimiento de la luz polarizada elíptica al reflejarse los rayos de luz desde la superficie pulida del mineral.

Supongamos que la luz corriente al reflejarse desde cualquier medio, se descompone en dos rayos polarizados en planos perpendiculares entre sí. Las oscilaciones de estos rayos son simultáneas e imposibles de separar. En este caso son posibles tres tipos de luz polarizada:

a) Luz polarizada rectilínea: Cuando ambos componentes de oscilación no tienen diferencia en el paso o es igual a un número entero de la mitad

de la onda. El rayo rectilíneamente polarizado, al girar el analizador o el polarizador, dan alternativamente oscuridad total o iluminación total.

b) Luz polarizada en círculos: Cuando las amplitudes de las dos componentes de oscilación son iguales, y la diferencia de su paso es igual a $1/4, 3/4, 5/4$, etcétera (donde $\lambda =$ longitud de la onda de luz). El rayo polarizado en círculo, al girar el polarizador o el analizador, da en cualquier posición, iluminación regular.

c) Luz elípticamente polarizada: Cuando la diferencia del paso de los dos componentes de las oscilaciones, con igual amplitud, se diferencian del número entero de la mitad de la onda y no es múltiplo de $1/4$. El rayo elípticamente polarizado, al girar el analizador o el polarizador dan oscuridad incompleta (alternativamente) o iluminación incompleta, es decir, corresponde a la posición media entre la polarización circular y rectilínea.

Como ya señalamos, de la luz polarizada reflejada es característico el tercer tipo de polarización, y precisamente la polarización elíptica, cuya manifestación en el microscopio minerográfico, con los nicoles cruzados, es imposible obtener para el mineral anisotrópico alternaciones de total oscuridad y de total iluminación, se puede observar, solamente, la variación parcial de la iluminación del mineral en diferentes posiciones del analizador.

Los fenómenos de variación de la iluminación o el fenómeno de anisotropía observado con luz polarizada reflejada, se puede expresar por la fórmula de la capacidad de reflejo, que muestra su valor determinado en dependencia de la posición del mineral anisotrópico en relación con el plano de oscilación de la luz. Cuando la luz cae perpendicularmente sobre la superficie pulida del mineral la intensidad de la capacidad de reflejo R con los nicoles cruzados, se expresa por la siguiente igualdad:

$$R = (\text{Sen}^2 2\varphi + \text{tg}^2 2\theta) f \quad (1)$$

en la que:

$$f = n_0^2 \frac{(n_1 - n_2)^2 + (n_1 k_1 - n_2 k_2)}{(n_0 + n_1)^2 + n_1^2 k_1^2 + (n_1 \cdot n_2)^2 + n_2^2 k_2^2} \quad (2)$$

donde (1) y (2):

φ - azimut de la oscilación lineal en el mineral en relación con la dirección de las oscilaciones en el polarizador.

θ - elipse de las oscilaciones, si se toma la relación de los ejes principales de la oscilación elíptica a $b = \text{tg} \theta$.

n_0 - índice de refracción del medio donde se realiza la investigación (aire, aceite, etcétera);

n_1 y n_2 - índice de refracción del mineral con dirección a la normal;

k - coeficiente de adsorción de la luz en dirección a la normal.

El valor mínimo de la intensidad de la luz reflejada será cuando el mineral tiene posición normal, es decir,

$$\text{cuando: } \varphi = 0 \text{ o } \varphi = \frac{\pi}{2}$$

Por consiguiente:

$$R_{\text{min}} = f \cdot \text{tg}^2 2\theta \quad (3)$$

El valor máximo de la intensidad de la luz reflejada será cuando el mineral tiene posición diagonal, es decir, cuando: $\varphi = \pm 45^\circ$

$$R_{\text{max}} = f (1 + \text{tg}^2 2\theta) \quad (4)$$

Restando del valor máximo de la capacidad de reflejo, (4) su valor mínimo (3), obtenemos:

$$f = R_{\text{max}} - R_{\text{min}}$$

El factor f caracteriza la magnitud del fenómeno de anisotropía y presenta la diferencia máxima de las intensidades de la luz reflejada desde el mineral, observada cuando la platina del microscopio gira totalmente. Por la fórmula (2) vemos que los fenómenos de anisotropía se manifiestan más, mientras mayor es la refracción doble de los rayos ($n_1 - n_2$), mientras más intenso sea el dichroísmo ($n_{1x2} - n_{2x2}$) y mayor sea el índice de refracción del medio (n). Esto último sirve de explicación al por qué del fenómeno de anisotropía de los minerales meníferos es más evidente y se manifiesta bruscamente durante la investigación en inmersión.

Por la ecuación (3) vemos que la total oscuridad en las posiciones normales del mineral ($\varphi = 0^\circ$ o $\varphi = \frac{\pi}{2}$) aparece solamente cuando las ondas lumínicas,

que caen sobre la superficie pulida están linealmente polarizadas, es decir, cuando hay polarización elíptica ($\theta = 0^\circ$). Pero esta posición solamente se puede representar teóricamente, y prácticamente la polarización elíptica siempre tiene lugar durante la observación de los minerales con luz reflejada con los nicoles cruzados.

6.3. METODOLOGIA DE OBSERVACION DE LOS FENOMENOS DE ANISOTROPIA DE LOS MINERALES

Para observar los efectos de la anisotropía de los minerales es necesario montar el microscopio de forma tal que la iluminación del campo visual sea regular y tenga la intensidad máxima. Después, en el esquema óptico del microscopio se introduce el analizador y desplazando la plaquita del polarizador se establece la posición de perfecto cruzamiento de los nicoles. El diafragma de campo se cierra un poco. La condición necesaria para la observación del efecto de la anisotropía es la limpieza de los lentes del ocular y del objetivo.

Cuando se gira la platina del microscopio con los nicoles cruzados se observa alternativamente la iluminación y oscurecimiento del mineral anisotrópico o de los granos que lo forman, lo cual es la consecuencia de la variación del azimut de las oscilaciones de la luz en el mineral en relación con el plano de oscilación de la luz en el polarizador. Generalmente las observaciones se realizan cuando los nicoles están perfectamente cruzados, pero algunas veces el efecto de anisotropía se manifiesta más intensamente cuando éstos no están totalmente cruzados.

Esto último es muy característico de los minerales débilmente anisotrópicos. Esquemáticamente, el efecto de la anisotropía se ha representado en la Figura 6.3 (sin considerar la influencia elíptica).

En este esquema se han mostrado: la amplitud de las oscilaciones de la luz polarizada incidente (OP); los componentes (OB y OC) de las direcciones de la sección de los ejes son indicatrices; los componentes derivados (OB' y OC'); el vector resultante (OP') que muestra la dirección y la magnitud de la amplitud de oscilación de la luz reflejada. La elipse N_2W_1 indica la orientación de la sección de la indicatriz de la superficie pulida del cristal con relación a la dirección (PP) de las oscilaciones de la luz incidente del rayo reflejado transmitido por el analizador. El vector OM, que es la proyección del vector OP' en dirección a las oscilaciones en el analizador (AA, expresa la intensidad de la reflexión con los nicoles cruzados). Cuando la indicatriz tiene posición normal, la rotación del plano de polarización no tiene lugar y el vector OP', al variar su magnitud, regresa a la dirección OP. En esta posición la componente OP', en la dirección AA (OM), se transforma en cero, lo que corresponde a la posición del oscurecimiento del cristal. En todas las posiciones intermedias OM es una magnitud determinada y se observa respectivamente una intensidad grande o pequeña de la iluminación de la superficie pulida del cristal.

Si los nicoles están exactamente cruzados (totalmente) al girar la platina del microscopio la extinción del mineral anisotrópico ocurrirá exactamente a

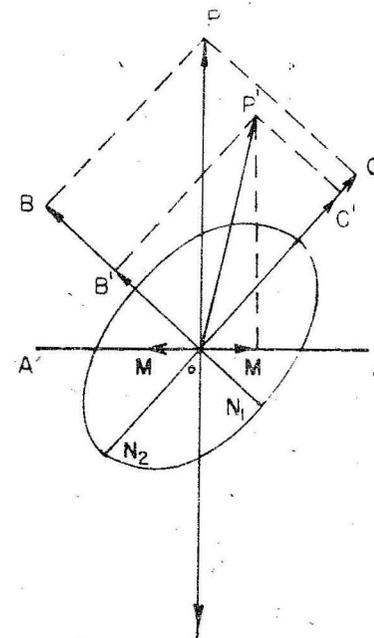


FIGURA 6.3. Esquema del surgimiento del efecto de anisotropía con los nicoles cruzados. Luz reflejada.

90° en posiciones normales (que corresponden a las direcciones de la cruz en el ocular. En posiciones diagonales, a un ángulo de 45° de los normales, se observará el máximo de iluminación de la superficie del mineral. De esta forma, cuando se gira totalmente la platina (a 360°) el mineral anisotrópico se oscurece cuatro veces y cuatro veces se ilumina.

Si los nicoles no están totalmente cruzados, también surgen cuatro posiciones del mínimo y del máximo de iluminación en la superficie pulida del mineral. Sin embargo, con esta condición, la posición de la oscuridad no se fija de manera exacta y los ángulos de inclinación entre las posiciones extremas de iluminación no corresponden exactamente a los intervalos de 90° . Pero las desviaciones de la posición de 90° a ambos lados serán iguales a un mismo ángulo, cuya magnitud aumenta con el aumento del ángulo de giro del polarizador desde la posición en que están exactamente cruzados.

los nicoles. Cuando los nicoles están incorrectamente cruzados puede tener lugar la desaparición del efecto de anisotropía o su manifestación a 180° de desplazamiento de la platina del microscopio.

En la práctica de investigación, cuando los nicoles no están totalmente cruzados, como ya señalamos, se observa el efecto de la anisotropía en algunos minerales débilmente anisotrópicos y en este caso se manifiesta más claramente. Los nicoles no están totalmente cruzados cuando se ha invertido un poco el polarizador, hasta que no obtengamos la diferencia máxima de iluminación en los dos granos de mineral que hacen contacto.

Esta operación es mejor realizarla en la calcopirita.

Una gran importancia tiene la selección del objetivo de investigación. No se debe observar el efecto de la anisotropía en granos aislados grandes o cristales, ya que dichos objetivos generalmente se extinguen y se iluminan simultáneamente por toda la superficie y las variaciones provocadas por la anisotropía algunas son difíciles de notar si no se comparan con otros granos. De igual manera son desfavorables para la observación del efecto de anisotropía los agregados pequeños y finos de los granos minerales, en los que la extinción y la iluminación se unen. En este caso es necesario realizar las investigaciones con objetivos de gran aumento, utilizando la inmersión. Las condiciones más favorables para observar el efecto de la anisotropía se crean cuando en el campo visual se encuentran simultáneamente varios granos de mineral o el mineral posee estructura de macla.

Es necesario recordar que los minerales anisotrópicos, en ocasiones pueden manifestarse como minerales isotrópicos cuando el plano de la sección pulida es perpendicular al eje óptico de los cristales o de los granos minerales. Así, durante la investigación del efecto de anisotropía es necesario asegurarse de su existencia en varios granos de mineral.

El fenómeno de anisotropía, como ya señalamos durante el análisis de la fórmula (2), se observa de forma más clara durante la investigación con inmersión. Por eso, cuando surgen dudas de la existencia del efecto de anisotropía en uno u otro mineral cuando se utilizan objetivos secos, es necesario investigar este efecto con los objetivos de inmersión.

Según la intensidad de manifestación del efecto de anisotropía con los nicoles cruzados, los minerales meníferos se dividen en isotrópicos, débilmente anisotrópicos, anisotrópicos o muy anisotrópicos.

Los minerales isotrópicos, con los nicoles correctamente cruzados, no tienen iluminación intensa y se mantienen con la misma oscuridad en cualquier posición de la platina del microscopio. Esta oscuridad no es total, ya que como resultado del surgimiento, durante la rotación de la polarización elíptica, de la que ya hemos hablado, una parte de la luz no se extingue con el analizador y pasa por el ocular del ojo del observado.

Hay que señalar que algunos minerales isotrópicos de simetría cúbica algunas veces dan un efecto anómalo de la anisotropía. Por eso la isotropía de los minerales también se debe revisar en varios granos. El fenómeno de anisotropía anómala algunas veces se observa en minerales isotrópicos tales como pirita, cobaltina, cuprita, bornita, cobre nativo y algunos otros.

En los minerales isotrópicos no existe el fenómeno de la birreflexión.

Los representantes típicos del grupo de los minerales meníferos isotrópicos son la galena, pirita, tenantita, tetraedrita, esfalerita, magnetita, cromita, platino y oro nativo.

Los minerales débilmente anisotrópicos no poseen una manifestación estable del efecto de la anisotropía y en condiciones normales de investigación, éste se establece más o menos exactamente sólo cuando se observa cuidadosamente y cuando el campo visual está intensamente iluminado. La birreflexión observada con un polarizador, no es característica de este grupo de minerales, se manifiesta muy raramente y muy débilmente.

Los representantes típicos de los minerales débilmente anisotrópicos son: calcopirita, buronita, wurtzita, braunita, wolframita y algunos otros minerales que no poseen una manifestación estable con las propiedades isotrópicas, como por ejemplo: limonita, psilomelano, sheelita y calcosina, etcétera.

Los minerales anisotrópicos o muy anisotrópicos poseen un efecto estable de la anisotropía incluso cuando el campo visual está débilmente iluminado. Estos minerales, con los nicoles cruzados, al girar la platina del microscopio varían bruscamente su iluminación o el color, y con frecuencia varían ambos. La birreflexión en muchos de estos minerales se observa con bastante claridad.

Los representantes típicos de este grupo son: covelina, molibdenita, antimonita, marcasita, pirrotina, arsenopilita, niquelina, bisautina, hematita.

6.4. POSIBLES FUENTES DE ERRORES AL OBSERVAR EL EFECTO DE ANISOTROPIA

Los que comienzan a estudiar los minerales con los nicoles cruzados pueden equivocarse fácilmente y tomar al mineral anisotrópico como isotrópico y viceversa. Estos errores generalmente surgen al no valorar totalmente algunas particularidades de la observación con luz reflejada, de las cuales se pueden considerar fundamentales las siguientes:

1. La superficie irregular del mineral (con rayones, estrefas) pueda dar, al girar la platina del microscopio, alteraciones en la iluminación del mineral que no tenga ninguna relación con el efecto de la anisotropía. Por eso es necesario seleccionar superficies regulares y planas.

2. La sección pulida, montada oblicuamente también variará la iluminación del plano al girar la platina del microscopio, pero este fenómeno, a diferencia del efecto real de la anisotropía, se repetirá solamente dos veces cuando la platina ha girado totalmente, es decir, 180.
3. Se obtiene el mismo cuadro si tenemos caras naturales oblicuamente inclinadas, principalmente cuando salen al plano de la superficie pulida en los lugares de curvatura de la superficie.
4. Como ya señalamos, los minerales anisotrópicos pueden en ocasiones manifestarse como minerales isotrópicos por eso es necesario observar el efecto de la anisotropía en varios granos de un mismo mineral.
5. En los minerales meníferos transparentes que poseen reflejos internos intensos, el efecto de la anisotropía no es visible a consecuencia de su opacamiento por estos reflejos. Por eso, para dichos minerales se recomienda observar el efecto de la anisotropía cuando los nicoles no están totalmente cruzados.
6. Con luz muy débil o cuando se han instalado incorrectamente los nicoles, así como también cuando se ensucia o se ha oxidado la superficie de la sección pulida, el efecto de la anisotropía puede ser o no ser notado aunque el mineral sea muy anisotrópico.
7. En el proceso de pulido, el mineral se recubre con una película amorfa fina que enmascara algunas veces al efecto de la anisotropía. Por eso al preparar las secciones pulidas se debe realizar cuidadosamente el acabado en las láminas de vidrio para reducir el tiempo de pulido en la máquina.
8. Los objetivos de mucho aumento y el prisma del iluminador opaco pueden ser la fuente de la polarización elíptica.

CAPITULO 7

EFFECTOS OPTICOS CON LUZ POLARIZADA CONVERGENTE

7.1. GENERALIDADES

En los últimos años obtiene una mayor aplicación la metodología para estudiar los minerales meníferos con luz polarizada convergente. Por vez primera, las figuras de polarización que surgen al reflejarse la luz polarizada convergente fueron descritas por Neiburg en 1947. Sin embargo, éste no dió una explicación teórica al surgimiento de estas figuras. Posteriormente se ocupó del estudio y la fundamentación de estos fenómenos un grupo de investigadores de la Universidad de Wisconsin (EE.UU.) dirigidos por V. Cameron. Ellos elaboraron las bases de la teoría de la óptica de la luz reflejada convergente, dieron una correcta interpretación física al fenómeno del surgimiento de las figuras de polarización, como resultado de la rotación del plano de polarización de la luz reflejada, y señalaron las vías prácticas de utilización de este fenómeno durante el estudio de las propiedades ópticas de los minerales meníferos.

La luz reflejada convergente en el microscopio se puede obtener con ayuda de objetivos de gran apertura y de grandes aumentos (40x y más), que no poseen óptica de tensión. La luz se conoscopiza con dicho objetivo gracias a la intensa refracción de los rayos que pasan a través de él. En relación con el hecho de que para observar las figuras de polarización, o como aún se les llama, figuras conoscópicas con luz convergente, es necesario utilizar el lente de Bertrand (compensador de mica), el cual no se encuentra en el microscopio MIN-9, entonces con este objetivo generalmente se utiliza el microscopio MIN-8 con iluminador opaco OI-12 previamente éste se reconstruye, equipándolo con una escala graduada que permite determinar con bastante exactitud el ángulo de virage del analizador. La investigación de las figuras de polarización con la platina en diferentes posiciones y con el analizador con diferentes ángulos, permite determinar las llamadas propiedades de rotación de los minerales meníferos, al mismo tiempo que algunos de ellos pueden ser valorados cuantitativamente.

7.2. PREMISAS TEORICAS DEL SURGIMIENTO DE LAS FIGURAS DE POLARIZACION

Como ya señalamos, las figuras de polarización o conoscópicas son el resultado de la rotación del plano de luz polarizada convergente. Estas figuras exteriormente son muy semejantes a las figuras conoscópicas con luz transmitida, sin embargo, las causas de su surgimiento son otras y se basan en lo siguiente:

La luz incidente que llega hasta el objetivo a través del polarizador, y tiene una sola dirección de las oscilaciones para todos los rayos, es decir, todas ellas oscilan en un plano o en planos paralelos entre sí. Sin embargo, en un haz de luz convergente que se forma al salir de un objetivo de gran aumento, los rayos de luz ya no oscilan en una sola dirección, sino que se caracterizan por varios azimut de oscilación diferentes. En este haz convergente que incide sobre los minerales isotrópicos o cortes isotrópicos, una parte de los rayos conserva los planos de oscilación de la anterior orientación, es decir, se mantienen paralelos a la dirección de la oscilación del plano del analizador. Cuando se refleja esta parte de los rayos, sus azimut de oscilación no disminuyen y se extinguen con el analizador, formándose en el campo visual del mineral isotrópico a lo largo de los diámetros ortogonales una cruz oscura, como se muestra en la Figura 7.1.

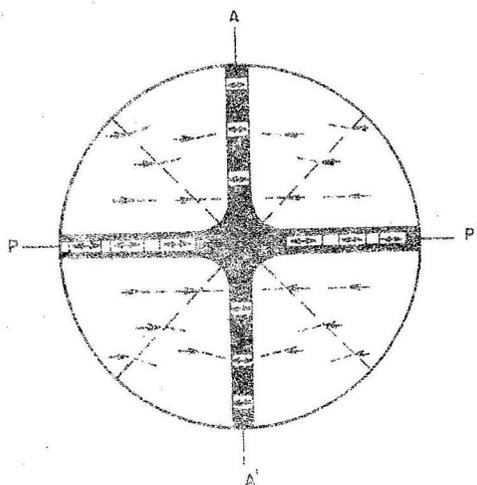


FIGURA 7.1. Esquema del surgimiento de la figura de polarización en un mineral isotrópico. El polarizador (PP') y el analizador (AA') están exactamente cruzados.

Todos los demás rayos del haz, a consecuencia del viraje durante la refracción en el objetivo, tienen una dirección de los planos de oscilación algo diferente, orientada en un pequeño ángulo con el plano de oscilación del analizador y por eso no se extingue totalmente, creando un fondo claro en los cuatro cuadrantes del campo visual.

En la Figura 7.1 se ha mostrado esquemáticamente que la magnitud del viraje (o como debe decirse, la magnitud de la rotación) del plano de polarización de los rayos incidentes en los límites de los cuatro cuadrantes aumentó hacia un lado desde el centro óptico del campo visual y hacia un lado de los diámetros ortogonales.

Los rayos que han experimentado un viraje al salir del objetivo, tienen que reflejarse desde la superficie pulida de la sección y recorrer la vía inversa a través del objetivo. En el objetivo obtienen una rotación igual a la primera, pero contraria en su dirección, y se extinguirían con el analizador, sin embargo, durante la reflexión surge una rotación complementaria no compensada, cuya magnitud depende de la orientación de la oscilación del rayo incidente. Esta rotación complementaria aumenta al aumentarse el ángulo de incidencia (lo que explica el surgimiento de este efecto solamente cuando se utilizan objetivos de gran aumento) y al dirigirse el plano de oscilación y el plano de incidencia del rayo.

Esta rotación, llamada por Cameron, rotación de reflexión, está provocada porque las componentes correspondientes de la oscilación, paralelas y perpendiculares al plano de incidencia, se reflejan con diferentes amplitudes. En la Figura 7.2 se han representado, esquemáticamente, las causas de la rotación de un rayo de polarización plano al reflejarse desde la superficie.

De esta forma, como resultados de los fenómenos anteriormente descritos, en el campo visual surge la cruz negra. Los segmentos de la cruz es un lugar geométrico de puntos, donde los planos de oscilación de los rayos incidentes y reflejados no experimentan rotación y los rayos de luz se extinguen totalmente con el analizador. Las zonas intermedias del campo visual (cuadrantes), en las que los planos de oscilación de los rayos se encuentran en diferentes ángulos con el plano de polarización del analizador, no se extingue totalmente con el analizador y se mantiene iluminado.

Cuando se invierte el analizador de la posición en que están cruzados los nicols, a consecuencia de la variación simétrica de los ángulos de rotación de la reflexión, la cruz se descompone en dos isogiras, las que a medida que aumenta el ángulo de viraje del analizador se pierden a lo largo de una de las direcciones diagonales del campo visual, como se muestra en la Figura 7.3.

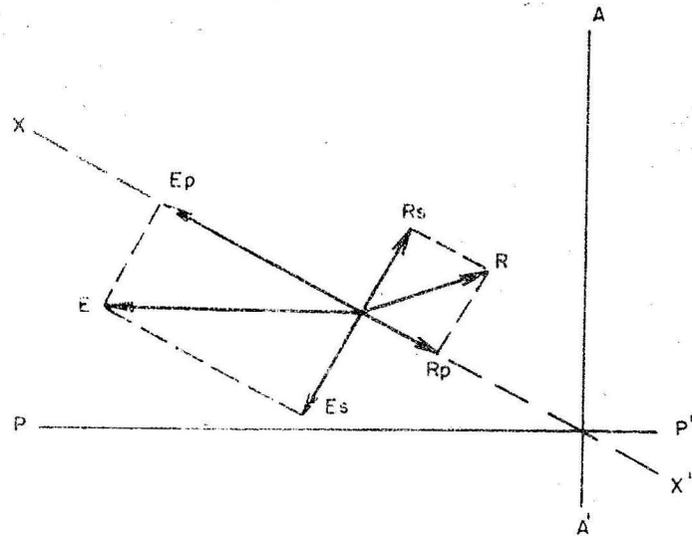


FIGURA 7.2 - Esquema que explica la causa de la rotación de la luz plana polarizada durante la reflexión: E-acimut de oscilación del rayo incidente; R-acimut de oscilación del rayo reflejado; Ep-Es-componente de E, planos paralelos y perpendicular respectivamente de caída del rayo (X X'); Rp-Rs-componente de R, planos paralelos y perpendicular de caída.

Cada isogira o hipérbola también representa un lugar geométrico de puntos, en los cuales los planos de oscilación de los rayos reflejados son perpendiculares a la dirección de las oscilaciones en el analizador invertido.

Cuando se observa con luz blanca, a lo largo de los dos cóncavos o convexos de la hipérbola, con frecuencia surgen bordes coloreados, como se ha mostrado esquemáticamente en la Figura 7.4.

Si los ángulos de rotación de color azul son mayores que los de color rojo, en los lados cóncavos de las hipérbolas surgen bordes azules y en los convexos rojos, y cuando la correlación de los ángulos de rotación es inversa, la posición de los bordes coloreados varía en algunos lugares (vea la Figura 7.4)

Estos fenómenos, Cameron los denominó dispersión de la rotación de reflexión (dispersion of the reflection rotation) y propuso significar el primer esquema de la dispersión de la rotación de reflexión (los azules son mayores que los rojos) $DR_R = v > R$, el segundo (los rojos mayores que los azules)

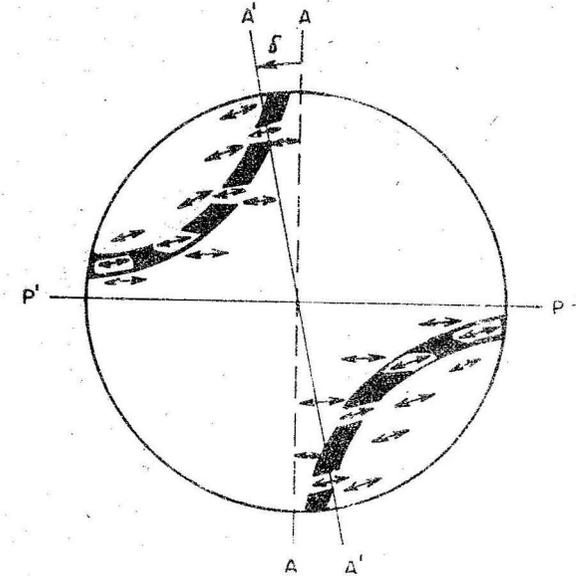


FIGURA 7.3. Esquema del surgimiento de las isogiras convergentes al invertir el analizador desde AA hasta AA' con el ángulo δ . AA-posición de los nicoles exactamente cruzados; AA'-posición del analizador cuando se observan las isogiras.

$DR_R = R > v$ (vea la Figura 7.4). Por ejemplo, $DR_R = R > v$ es característica de la pirita y de la cobaltina, y DR_R para la galena, magnetita, esfalerita, cromita y otros. De cada mineral es característico algunos de los casos señalados, pero si la magnitud de la dispersión de reflexión de la rotación es insignificante, los bordes coloreados se manifiestan debilmente o pueden no existir, como por ejemplo, en la pentiandita. De esta manera, la dispersión de rotación de la reflexión puede servir de índice diagnóstico indirecto de los minerales isotrópicos.

Las causas que provocan las figuras de polarización en los minerales anisotrópicos, son más complejos que en los isotrópicos anteriormente mencionados. Aquí, además de la rotación provocada por la reflexión, tiene lugar la rotación del plano de polarización, relacionada con las propiedades anisotrópicas de los minerales.

Si el mineral anisotrópico se encuentra en una de las cuatro posiciones de extinción máxima, entonces la rotación, condicionada por la anisotropía, es igual a cero. En este caso actúa solamente la rotación de reflexión y tienen lugar todos los fenómenos característicos de los minerales isotrópicos: con

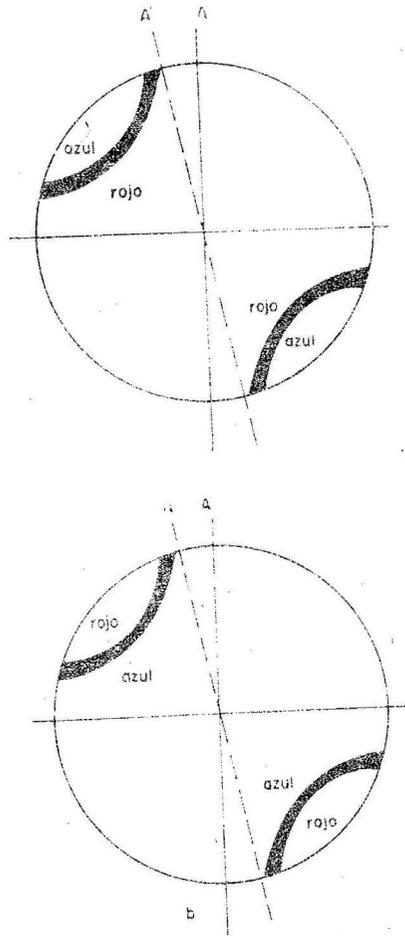


FIGURA 7.4. Esquema de la posición de los bordes coloreados durante la dispersión relativa a la rotación de reflexión: a) $v > r$; b) $r > v$. Estos bordes coloreados surgen en relación con la dispersión del ángulo de rotación de la luz reflejada para diferentes longitudes de onda. Para cada longitud de onda, a ambos lados de las hipérbolas (isogiras) se extinguen solamente aquellos rayos cuyos planos de oscilación son perpendiculares a la dirección de la oscilación, en el analizador invertido.

luz convergente vemos la cruz negra que se descompone en dos isogiras al girar el analizador, y a lo largo de las hipérbolas pueden surgir los bordes coloreados, que indican la dispersión de la rotación de reflexión. Los minerales anisotrópicos tienen una dispersión del tipo $DR_R = v > R$, como por ejemplo, antimonita, covelina, hematita y niquelina; la dispersión del tipo $DR_R = v < R$ es característica de la calcopirita, arsenopirita y marcasita.

En los minerales anisotrópicos, en relación con la existencia de la rotación anisotrópica, en todas las posiciones, además de la de máxima extinción, la oscuridad a lo largo de los diámetros diagonales no surge y la cruz negra desaparece, y en los límites de los cuadrantes actúa el efecto sumario de la rotación de reflexión y de rotación de la anisotropía.

La dirección de la rotación del plano de polarización, provocada por la anisotropía es constante en todos los puntos del campo visual, y la dirección de la rotación de reflexión es diferente en los dos pares contrarios de cuadrantes. Por eso, en un par de cuadrantes, ambas notaciones tienen igual dirección y se suman, para el otro par son contrarias y se restan. En este último caso tiene que tener lugar un sistema de puntos donde ambas rotaciones son contrarias por el signo, iguales por el ángulo de viraje, y por consiguiente, se compensan mutuamente o se extinguen una con otra. En dichos puntos se quedan solamente las direcciones de las oscilaciones perpendiculares al analizador, el cual no las extingue, y en el campo visual se observan dos isogiras oscuras que son el lugar geométrico de los puntos donde todas las oscilaciones se compensan.

Cuando se gira la platina del microscopio las isogiras convergen y la divergen incluso hasta el resurgimiento de la cruz en la posición de total extinción del mineral. La distancia máxima entre las isogiras surge cuando el mineral está orientado 45° con la posición normal (máximo de oscuridad). El grado de divergencia de las isogiras, que se valora en por cientos con relación a toda la longitud del diámetro del campo visual, es propiedad específica de cada mineral y puede servir como índice diagnóstico complementario que se valora cuantitativamente. El grado de divergencia de las isogiras será mayor mientras más intensamente se hayan manifestado las propiedades de anisotropía del mineral. Así, en la molibdenita el grado de divergencia de las isogiras es de 90 %, en la antimonita 70 %, en la marcasita 20 % y es la mínima en la calcopirita débilmente anisotrópica 5 %.

Para los minerales anisotrópicos se determina el ángulo de rotación con luz reflejada convergente. Con este objetivo se coloca el mineral en la posición de extinción total y con la platina se hace girar el mineral a 45° exactamente. Esta segunda posición corresponderá a la divergencia máxima de las isogiras. Después, cambiando al analizador de la posición cruzada se logra el restablecimiento de la cruz.

El número de grados de viraje del analizador, con el cual reaparece la cruz, es también la medida del ángulo de rotación provocada por la anisotropía. Este ángulo se llama ángulo visible de rotación y se significa con el símbolo A_R (*apparent angle of rotation* = ángulo aparente de rotación).

El ángulo visible de rotación A_R también experimenta la dispersión, que se significa con el símbolo DA_R , la cual tiene particularidades características para cada mineral y puede también servir como índice diagnóstico indirecto. Simultáneamente con la medición del ángulo visible de rotación se puede obtener otro índice diagnóstico - la dirección de la rotación (RS), la cual está provocada por la anisotropía. La dirección de la rotación se determina relacionándola con cualquiera de los elementos cristalográficos del grano mineral (alargamiento, clivage, maclas, etcétera). Si cuando se desplaza el analizador la cruz reaparece en la dirección del elemento seleccionado del grano, entonces la dirección de la rotación se considera positiva y se escribe: RS(+) clivage (010), si la dirección es contraria la rotación se considera negativa: RS (-) clivage (010).

De esta forma, la investigación de las figuras de polarización con luz convergente permite determinar las siguientes constantes ópticas nuevas de los minerales meníferos: 1-ángulo visible de rotación A_R 2 - dispersión del ángulo visible de rotación DA_R 3 - dispersión relativa de la rotación de reflexión DRR 4 - magnitud de divergencia de las hipérbolas cuando gira la platina del microscopio 5 dirección de la rotación provocada por la anisotropía con relación a los elementos cristalográficos del mineral RS. Como índices complementarios pueden servir la característica del aspecto exterior de las figuras de polarización, y ante todo, el color y la densidad de coloración de los bordes de dispersión a lo largo de la isogiras (hipérbolas).

Los fenómenos que se observan durante la investigación con luz convergente, son algo diferentes para los minerales isotrópicos y anisotrópicos, y estas diferencias se basan en lo siguiente:

En los minerales isotrópicos: a) cuando los nicoles están totalmente cruzados aparece la cruz negra, que no desaparece cuando se hace girar la platina; b) cuando se invierte el analizador la cruz negra se descompone en dos hipérbolas que divergen a los lados en direcciones diagonales al campo visual y c) en algunos minerales con luz blanca, en lados concavos y convexos de las hipérbolas aparecen las características bordes coloreados.

En los minerales anisotrópicos: a) en la posición de total extinción del mineral (con luz paralela convergente) aparece la cruz negra; b) al girar la platina 45° en cualquiera de las dos posiciones de máxima iluminación, la cruz negra se descompone en dos hipérbolas, que divergen a lo largo de las diagonales del campo visual a una distancia determinada para dicho mineral, c) en muchos minerales, cuando se investiga con luz blanca, las

hipérbolas también están acompañadas de los bordes coloreados dispersos característicos.

7.3. ORDEN DE INVESTIGACION DE LAS FIGURAS DE POLARIZACION

Las observaciones y mediciones cuantitativas de las figuras de polarización en los cortes anisotrópicos de los minerales meníferos es mejor realizarlas en el siguiente orden:

1. Con los nicoles correctamente cruzados se coloca el grano del mineral investigado en la posición de máxima extinción. Se desconecta el ocular o se introduce el lente de Bertrand, y aparece en el campo visual la cruz negra.
 2. Se invierte el analizador y la cruz se compone en dos hipérbolas, en las cuales se hace la investigación de los bordes coloreados y la conclusión sobre la dispersión relativa de la reflexión (DRR).
 3. Se restablece la posición cero del analizador (es decir, restablece la cruz) y esta posición en el limbo de la platina del microscopio se fija como el punto cero de cálculo.
 4. Se gira la platina 45° y se obtiene la posición de isogiras totalmente divergentes; se observan los bordes coloreados y se hace la conclusión acerca de la dispersión relativa del ángulo visible de rotación (DA_R). Se valora el grado de divergencia de las isogiras en porcentajes con el diámetro del campo visual.
 5. Se cambia la luz blanca por el filtro monocromático. Se señala la dirección del viraje del analizador con relación a un elemento cristalográfico determinado del mineral y al mismo tiempo se determina la dirección de la rotación provocada por la anisotropía, en relación con ese mismo elemento del mineral (RS).
 6. Se determina por la escala el ángulo de viraje del analizador, cuya magnitud corresponde al ángulo visible de rotación (A_R).
 7. Para precisar la magnitud obtenida (A_R) se repite la medición del ángulo de rotación en el sentido de las agujas del reloj (si en el primer caso es esta misma dirección) y dos veces en contra de las agujas del reloj, obteniendo en total cuatro mediciones A_R .
 8. La media aritmética de estos cuatro cálculos se toma como la magnitud final del ángulo visible de rotación A_R . En la Tabla 7.1 se han dado como ejemplos las propiedades de rotación de algunos minerales meníferos.
- El método descrito para estudiar las figuras de polarización y las propiedades de rotación de los minerales no tienen una gran importancia y se utilizan poco en la práctica de investigación de los minerales meníferos. Esto está

TABLA 7.1. Propiedades de rotación de algunos minerales meníferos

Mineral	Dirección de la rotación RS	Dispersión de la rotación de reflexión DR _r	Angulo de rotación: A _r cuando $\lambda = 589$ μm	Angulo de rotación observado cuando $\lambda = 589$ μm	Dispersión del ángulo visible de rotación DA _r	Figura de polarización después del viraje del analizador	Figura de polarización del viraje del mineral a 45° nicoles cruzados
Covelina	(+) clivaje (0001)	R > V Baja	11,9 0,4	14,6 0,4	R > V	Isogiras negras; bordes rojos claros en los lados cóncavos; azules en los lados convexos	Figuras rojas y azules brillantes en campo blanco
Molibdenita	(+) clivaje (0001)	Muy débil	10,0 0,1	12,2 0,1	V > R	Isogiras negras en campo blanco	isógiras negras en campo blanco
Antimonita	(+) clivaje (010)	R > V Moderada	5,1 0,2	0,2 0,1	V > R	Isogiras negras; bordes rojos muy claros en los lados cóncavos; azules en los convexos	Isogiras negras; bordes azules muy claros en los lados cóncavos; rojos en los convexos
Pirrotina	(-) disfunción (0001)	No	1,6 0,5	1,3 0,1	Isogiras negras, no hay bordes	Isogiras negras; los lados cóncavos son azul pálido, los convexos anaranjados	
Hematita		R > V evidente	2,2 0,2	2,7 0,2	V >	Isogiras negras; bordes muy claros; rojo en los lados cóncavos, azul en los convexos	Isogiras negras; los lados cóncavos son verde claro.

relacionado, por el momento, con un estudio teórico deficiente de las propiedades de rotación, por la carencia de tablas determinativas seguras de estas propiedades, por la imperfección de los equipos utilizados y por la carencia de equipos especiales para la exacta medición de las constantes ópticas con luz polarizada convergente. Sin embargo, actualmente, en una serie de casos este método junto con los otros, puede ser de gran ayuda durante el diagnóstico de los minerales semejantes por sus índices. Su lado positivo es su relativa sencillez y rapidez para obtener un variado grupo de índices complementarios, incluyendo los cualitativos.

CAPITULO 8

MAGNETISMO DE LOS MINERALES MENIFEROS

8.1. GENERALIDADES Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Las propiedades magnéticas de los minerales depende de la naturaleza de los átomos-iones que aparecen en su composición, es decir, de la presencia de los electrones no apareados en las capas de iones o de la valencia de los iones, así como también de la geometría de distribución de estos átomos en la red cristalina, es decir, del estado del enlace químico entre los diferentes átomos y del tipo de coordinación.

Una de las magnitudes más importantes que caracteriza las propiedades magnéticas de los minerales, es la receptibilidad magnética, la cual determina el comportamiento de los minerales en el campo magnético. Sin detenernos detalladamente en la teoría de las propiedades magnéticas de los minerales, señalaremos que la susceptibilidad magnética volumétrica (χ) caracteriza la intensidad de magnetización de dicha sustancia (I) en un campo magnético de determinada tensión (H); se expresa por:

$$\chi = \frac{I}{H}$$

La receptibilidad magnética específica se expresa por la fórmula:

$$\chi = \frac{\chi}{\rho}$$

donde:

ρ - densidad de la sustancia

La receptibilidad magnética de los minerales es la magnitud física fundamental que determina el comportamiento de los minerales en el campo magnético. En correspondencia con esto todas las sustancias, incluyendo los minerales, se subdividen en tres grupos, según el carácter de la manifestación de las propiedades magnéticas:

1. **Diamagnéticos.** Son sustancias cuyo magnetismo es proporcional a la tensión del cuerpo magnético y está dirigido en dirección contraria a ellas. Son cuerpos diamagnéticos los que no poseen propiedades magnéticas fuera del campo magnético.
2. **Paramagnéticos.** Son sustancias cuyo magnetismo también es proporcional a la tensión del campo magnético, pero con igual dirección. En los cuerpos paramagnéticos cada átomo o molécula es como un imán pequeño, pero cuando no existe un cuerpo magnético externo, dicho cuerpo no ejerce ninguna influencia magnética o no posee campos magnéticos propios, a consecuencia de lo cual los átomos o moléculas están orientados de forma totalmente desordenada y sus influencias magnéticas se distribuyen entre sí; la mayoría de los minerales se relacionan con los paramagnéticos.
3. **Ferromagnéticos.** Son las sustancias que poseen un magnetismo propio elevado o campos magnéticos constantes propios. Las propiedades ferromagnéticas de la sustancia se determinan por las propiedades magnéticas no de diferentes átomos o moléculas, sino por el magnetismo de partes completas llamadas dominios, las cuales contienen una gran cantidad de átomos o moléculas orientadas en determinadas direcciones.

Entre los minerales meníferos que poseen propiedades magnéticas muy evidentes, se distinguen dos grupos fundamentales: muy magnéticos y débilmente magnéticos. El tercer grupo, en el cual entra la gran mayoría de los minerales, lo forman los minerales nomagnéticos.

Con los minerales magnéticos se relacionan; hierro nativo, magnetita, magnesio ferrita, pirrotina y cubanita. Los minerales moderados o débilmente magnéticos son: isoferroplatino, cromita, cromoespinelas ferrosos, jacobita, franklinita, ferberita, wolframita, magnetita y melnikovita. Como vemos en esta lista, la cantidad total de minerales meníferos que poseen magnetismo es pequeña. Por eso el magnetismo, como índice diagnóstico, es secundario.

8.2. METODO PARA DETERMINAR EL MAGNETISMO

El método más simple para comprobar el magnetismo de los minerales en secciones pulidas es el ensayo con una flecha magnética corriente. Este método lo utilizamos en aquellos casos en que la cantidad de mineral investigado es bastante grande. Para el ensayo, la flecha magnética (preferiblemente de poco peso) se coloca sobre una aguja fina y se le acerca lo más posible (pero sin hacer contacto) a la sección pulida del mineral. Si el mineral es magnético, la flecha se desvía de su posición, y si no es magnético se mantiene igual.

El segundo método es más sensible y se basa en el ensayo con polvo de mineral. Para esto, el mineral se raya en la sección pulida bajo el microscopio con el objetivo de obtener una pequeña cantidad de polvo. Después, con un objetivo de poco aumento, en el campo visual, se coloca la flecha magnética y se observa el comportamiento del polvo. Si el mineral es muy magnético, el polvo se desplaza bruscamente de su lugar y se acerca a la flecha, incluso haciendo contacto con ella. Las partículas de minerales poco magnéticos, cuando se desplaza la flecha sobre dichas partículas, éstas pueden moverse algo y se adhieren a la flecha magnética cuando se hace contacto directo con ellas.

Para determinar las propiedades magnéticas de los minerales en las secciones pulidas se utiliza también el equipo de McKinstry (Figura 8.1).

A una aguja de coser corriente se le rompe la parte más gruesa y el resto se magnetiza durante varios días en el campo magnético de un electromagneto o de un imán. Después, se le fija un cabello de caballo o una espina de pescado (diámetro 0,1 mm) con una longitud de 10-12 cm. La otra punta del cabello se fija en el soporte. Este campo se coloca de forma tal que el imán pequeño esté en el campo visual del microscopio y a 1-2 mm más arriba del plano de la sección pulida. Cuando se observa en el microscopio, la sección pulida se mueve de forma tal que el mineral investigado caiga debajo del imán. Si el mineral es muy magnético atrae el ojo de la aguja. En el caso de que el mineral sea débilmente magnético, se cambia la posición del cabello, y el imán no se acercará al mineral. Este método da buenos resultados cuando se determina el magnetismo de granos raros y pequeños del mineral investigado.

Para determinar el magnetismo de granos grandes (0,5 cm y más) el imán se puede utilizar de forma diferente. Fuera del campo visual del microscopio, pero con la superficie de la muestra en posición horizontal, se coloca el imán sobre el mineral investigado y se inclina un poco la sección pulida. Si el mineral no es magnético, sobre el imán se desplaza desde la superficie de la muestra pulida. Para los minerales débilmente magnéticos el ángulo de inclinación será considerablemente mayor, y los minerales muy magnéticos retendrán al imán, incluso con ángulos de inclinación muy grandes o en posición invertida.

En los últimos tiempos ha obtenido aplicación el método para determinar el magnetismo de los minerales con ayuda de polvo electromagnético. Se basa en que sobre la superficie pulida, con una pipeta se tinta espuma de agua con polvo electromagnético, la cual al cabo de 20-30 se elimina con algunas gotas de agua destilada. Después de esto se observa la muestra bajo el microscopio. Con este método todos los granos de minerales ferromagnéticos se cubren con una capa fina de polvo electromagnético, y los granos de minerales diamagnéticos, y paramagnéticos se quedan limpios. Mientras mayor es la intensidad de la capa de polvo que cubre al grano, mayor será la receptividad magnética del mineral. Hay que recordar que si el mineral magnético se

encuentra bajo una capa fina de mineral no magnético en la superficie de la sección pulida, sobre él, puede observarse una débil capa de polvo.

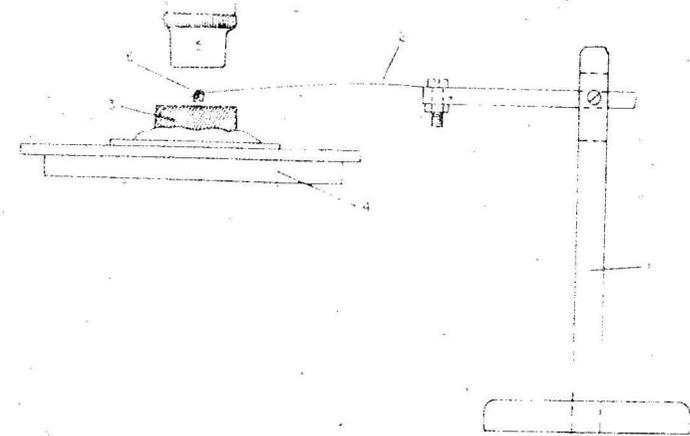


FIGURA 8.1. Esquema del aparato de McKinstry para el ensayo de las propiedades magnéticas de los minerales. 1. Soporte; 2. Cabello de caballo; 3. Sección pulida; 4. Platina del microscopio; 5. Objeto; 6. imán.

CAPITULO 9

DUREZA Y MICRODUREZA DE LOS MINERALES MENIFEROS

9.1. GENERALIDADES

Como dureza se entiende la capacidad de los minerales de resistir un efecto mecánico externo. La dureza de los minerales, como la de cualquier otro cuerpo es la expresión de la manifestación total de propiedades físicas tales como elasticidad, maleabilidad, plasticidad o viscosidad y la fragilidad. La dureza es una magnitud compleja que no puede ser caracterizada exactamente por cualquier propiedad, sino por una forma de efecto.

La determinación de la dureza bajo el microscopio se relaciona con uno de los índices diagnósticos de los minerales más seguros y de fácil acceso a la observación. La medición de la dureza se realiza directamente en las secciones pulidas y en dependencia del método de determinación del mineral puede someterse o no al efecto externo.

En mineralogía, la dureza de los minerales generalmente se determina por el método de la rayadura de un mineral con otro y se mide por la escala de Mohos. Esta escala no está completa debido a la imprecisión en la determinación de los límites de las diferentes escalas y en el irregular conocimiento de los intervalos de las mismas. Por eso, cuando se mide exactamente la dureza esta escala no se utiliza, sino que se expresa la dureza a través de la carga (en gramos) sobre una pirámide de diamante. Para ello se utilizan equipos especiales como los microdurómetros con ayuda de los cuales se realizan las mediciones en pequeños volúmenes de sustancia. Así, con el uso de estos equipos ha surgido un nuevo término, microdureza.

Con frecuencia, la dureza del mineral no es igual en sus diferentes direcciones, es decir, es una magnitud vectorial, lo que nos indica que dicho mineral posee dureza anisotrópica. La dureza anisotrópica está en función de las particularidades de la estructura de la red cristalina, las variaciones de la composición química, la existencia de la mezcla mecánica o isomorfa, la dureza de un mismo mineral no es constante y su magnitud varía, incluso cuando se mide con un solo método. Los resultados de la medición de la dureza con diferentes métodos en un mineral también se diferenciarán entre

9.2. METODOS PARA DETERMINAR LA DUREZA

En minerografía, la dureza de los minerales meníferos se determina por diferentes métodos, los cuales se pueden dividir en dos grupos. En el primer grupo entran los métodos para determinar la dureza sin efecto especial sobre el mineral. Con él se relacionan:

1. Por el carácter de la superficie pulida.
2. Por la línea lumínica.
3. Por el relieve en luz oblicua.
4. Por las grietas provocadas por el material abrasivo.

En el segundo grupo se incluyen los métodos que prevén el efecto mecánico sobre la superficie pulida del mineral. Con el mismo se relacionan:

1. El de las agujas metálicas.
2. Por los minerales de la escala de Mohos.
3. Con el microesclerómetro.
4. Con el microdurómetro.

La utilización de cualquiera de estos métodos para determinar la dureza depende de condiciones concretas y de las posibilidades, y no excluye la utilización de otros métodos de control. Analicemos a continuación cada uno de ellos.

Por el carácter de la superficie pulida. La calidad de la superficie pulida de diferentes minerales de una sección pulida preparada por métodos corrientes, como regla, no es igual. Esto está condicionado por la capacidad de los diferentes minerales de "tomar" indistintamente el pulido, y esta capacidad depende fundamentalmente de su dureza, aunque tenga un valor no menos importante la maleabilidad, fragilidad, clivaje, etc.

Los minerales con una dureza más elevada generalmente tienen una superficie más irregular sobre la cual se ven claramente las estrías profundas que no han sido pulidas. Como ejemplos de estos minerales mencionaremos los siguientes: la pirita, magnetita, casiterita y cromita.

Se pulen mucho mejor los minerales de dureza, tales como esfalerita, calcopirita, cobre gris. Su superficie bajo el microscopio aparece regular, suave sin efectos notables, es decir especular.

Se pulen mal los minerales muy blandos, tales como la molibdemita, grafito, calcosina, los cuales se pintan durante el pulido y se forma una superficie llena de estrías pequeñas, que poseen una brillantez variable bajo el microscopio.

Los minerales que poseen clivaje completo, tales como la galena, descubren, sobre su superficie, formas triangulares características; formándose como consecuencia de la fragilidad del mineral, en los puntos de intersec-

ción de las direcciones de clivaje; se pintan durante el pulido con las sustancias y reactivos que se emplean en esta labor.

En los agregados monominerales, principalmente de minerales duros, cuando el pulido es incompleto, también se puede observar el diferente grado de pulido en los diferentes granos de un mineral. Algunos granos serán totalmente especular, y otros serán rugosos, y esta combinación algunas veces revela las particularidades estructurales internas del agregado mineral o de sus diferentes granos. Dicho fenómeno está condicionado por la anisotropía de la dureza y está relacionado con las diferentes orientaciones de los elementos cristalográficos de los diferentes granos en relación con el plano explotable de la sección pulida. Tales fenómenos son característicos, por ejemplo, de las menas cromíticas y titanio-magnetíticas. La existencia de relieve en una sección pulida por sí misma habla de que tenemos ante nosotros minerales de diferentes durezas.

Por la línea lumínica. Si la diferencia en la dureza de dos minerales en contacto es pequeña, entonces el borde negro del relieve entre ellos es casi imperceptible a la vista. Sin embargo, con frecuencia surge la necesidad de establecer cuál de estos minerales es el más duro o el más blando. Cuando el microscopio está algo desenfocado y la apertura del diafragma se ha conectado paralelamente al borde oscuro, en el límite de dos minerales surge una banda de luz estrecha (la línea lumínica), que se observa mejor con objetivos de aumentos medios.

El surgimiento de la "línea lumínica" se explica por que fuera de los límites de los bordes inclinados del mineral, los rayos oblicuamente reflejados se suman con los rayos verticalmente reflejados y surge la concentración de luz cerca de los límites de los minerales. El esquema del surgimiento y del comportamiento de la línea lumínica en el límite de los minerales de diferente dureza en la sección pulida, se ha mostrado en la Figura 9.1.

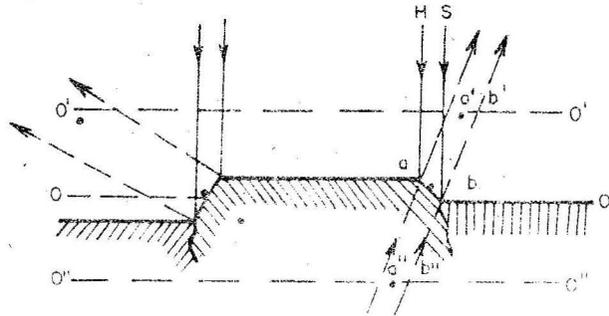


FIGURA 9.1. Esquema del surgimiento y comportamiento de la "línea lumínica" en los límites de los minerales de diferente dureza en una sección pulida

En la posición de enfoque normal del microscopio (plano de foco O-O en la Figura 9.1) la línea lumínica se encontrará en los límites de la parte inclinada de la superficie de la sección delgada (a,b). Al subir el tubo (hasta el plano O'-O') la línea lumínica se desplaza a un lado del mineral con menor relieve (a',b'); cuando desciende el tubo (hasta el plano O''-O'') el desplazamiento de la línea será inverso (hasta la posición a''-b'') a un lado del mineral con mayor relieve.

Así, se ha enunciado una regla por la cual se determina la dureza relativa de dos minerales adyacentes por la línea lumínica. Esta regla es como sigue: cuando el tubo del microscopio se levanta la línea lumínica se desplaza desde el mineral más duro hasta el más blando; cuando se baja el tubo ocurre lo contrario.

Con ayuda de este método que tiene dureza parecida, como por ejemplo, calcopirita y pirrotina, pirrotina y pentlandita, etcétera. Este método para determinar la dureza es muy valioso, porque permite valorar la dureza de los minerales en los granos más pequeños cuya dureza es imposible determinar con otros métodos.

Por el relieve con iluminación oblicua. I.S Valmiski recomienda utilizar el método de iluminación oblicua para determinar los minerales con una dureza muy difícil de determinar. Es mucho más cómodo utilizarlo para valorar la dureza de las inclusiones pequeñas en el caso de que la línea lumínica no se manifieste claramente.

Este método está basado en la observación del efecto de la oscuridad cuando la iluminación inclinada es débil. Los fenómenos ópticos observados en estas condiciones son semejantes a los efectos de la luz-oscuridad en una zona montañosa durante la caída del sol. Las superficies inclinadas de los límites de entrecrecimiento de minerales diferentes por su dureza, dirigidos a un lado de la fuente de luz situada en ángulo con la superficie de la sección pulida, adquieren una iluminación más intensa, y los lados contrarios o límites de los minerales se oscurecen bruscamente, como se ha mostrado en la Figura 9.2.

La iluminación inclinada se logra por medio de un pequeño viraje de la lámina de reflexión del iluminador-opaco o debido al desplazamiento incompleto del anillo del analizador en el tubo del microscopio. En este último caso, en la abertura que ha quedado penetran, solamente, los rayos laterales que se han desviado de la posición vertical.

La dirección de la fuente de luz (o el carácter de la iluminación de las cavidades) se determina en el límite de dos minerales conocidos (este se puede hacer en otra sección pulida donde ya han sido determinados los minerales) de diferentes durezas, cuyo relieve relativo está establecido. En estas condiciones de convexidad se iluminarán (o serán notables) por una parte, y en la concavidad ocurrirá lo contrario. Después de determinar el

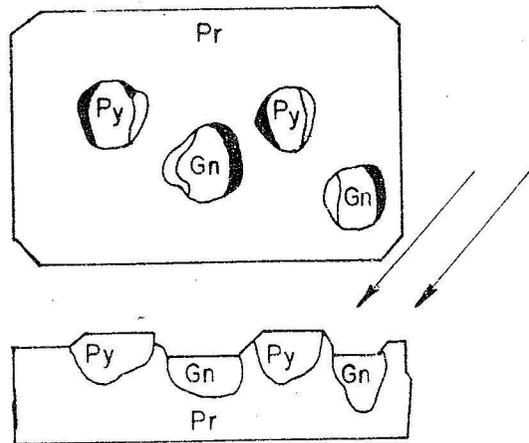


FIGURA. 9.2. Esquema de la determinación de la dureza por el relieve con ayuda de la iluminación oblicua. Py-pirita (dura); Gn-Galena (blanda); Pr-pirrotina (media).

carácter de iluminación del relieve, se procede a la valoración relativa del mismo en los minerales investigados. Por la dimensión de la luz-oscuridad y por su posición se hace la conclusión acerca de la dureza del mineral en relación con el mineral que lo rodea, incluyendo el conocido.

La utilización de este método de determinación de la dureza da buenos resultados, pero requiere una gran experiencia práctica, que solamente se adquiere con el tiempo.

Por las estrías formadas por el polvo abrasivo. Con el método corriente de preparación de las secciones pulidas, sobre la superficie de los minerales generalmente quedan diferentes rayones o estrías debido a los materiales abrasivos. Por las estrías que se forman en la última etapa, es decir, en el proceso de pulido, se puede determinar la dureza relativa de los minerales. Para esto, bajo el microscopio se halla la estría, la cual corta dos o varios minerales que hacen contacto. Sobre el mineral de mayor dureza, la estría será más pequeña y más fina, y sobre el mineral menos duro más ancha y más profunda.

Estas estrías se ven mejor con grandes aumentos y con el diafragma cerrado.

Este método está basado en la suposición de que el esfuerzo aplicado sobre partículas de material abrasivo que deja la estría, se mantiene constante

cuando pasa por el plano de la sección pulida. Esta condición generalmente se observa, pero algunas veces se desvía de esta ley. Por eso para comprobar los resultados obtenidos es necesario repetir varias veces la medición de la dureza.

Cuando se utiliza este método, es necesario considerar que las estrías se conservan mejor en los minerales duros y se pulen rápidamente en los blandos, y se determina la dureza por estrías pulidas viejas, se pueden obtener conclusiones erróneas sobre la dureza de los minerales investigados. En relación con esto es necesario seleccionar las estrías más recientes y realizar varias determinaciones.

El método descrito permite realizar una determinación relativa bastante exacta de la dureza en granos muy pequeños y no echar a perder, por la acción mecánica, la superficie del mineral, lo que es importante en caso de que tengamos granos aislados de cualquier mineral raro.

Con las agujas metálicas. La determinación de la dureza de los minerales con las agujas metálicas es el método más simple utilizado en minerografía. A diferencia de la mineralogía, donde se distingue la dureza "pasiva" (el mineral investigado se raya) y dureza "activa" (el mineral investigado raya), en la minerografía se investiga solamente la dureza "pasiva".

El método de determinación de la dureza con las agujas metálicas prevé la utilización de dos agujas: una de cobre y otra de acero (propuesto por A. G. Betejtin). La aguja se confecciona de cobre rojo en forma de cono alargado con punta fina. Como aguja de acero puede ser utilizada una aguja de coser corriente. La aguja minerográfica estándar es una varilla con un diámetro de 4-6 mm y una longitud de 10-12 cm, a una de cuyas puntas se ha fijado una aguja de cobre, y a la otra la de acero.

Con ayuda de estas agujas todos los minerales se dividen, por su dureza en tres grupos:

1. Dureza baja: los minerales se rayan con la aguja de cobre (y por consiguiente, con la de acero) la dureza de estos minerales por la escala de Mohs es inferior a tres
2. Dureza media: los minerales no se rayan con la aguja de cobre, pero sí con la de acero, su dureza, por la escala de Mohs es entre 3 y 5.
3. Dureza alta: no se rayan con la aguja de acero y por consiguiente tampoco con la de cobre, su dureza por la escala de Mohs, es mayor de 5.

Este método de determinación de la dureza es bastante objetivo y a pesar de su sencillez, es la base de una serie de tablas determinativas junto con las propiedades ópticas fundamentales de los minerales.

La determinación de la dureza de los minerales con las agujas se puede realizar solamente con los objetivos de menor aumento, cuya distancia del

foco permite trabajar con la aguja, cuando se observan simultáneamente los resultados del rayón bajo el microscopio.

Cuando se raya, la aguja debe encontrarse en un ángulo de 30° - 40° con el plano de la sección pulida, dicho rayado debe realizarse muy suavemente para no deteriorar la superficie de la sección. Cuando se raya muy frecuentemente se obtiene la alteración de los resultados reales, un ensombrecimiento rápido e incluso la curvatura de la aguja. Las puntas de las agujas tienen que ser finas, para lo cual es necesario, de vez en vez repararlas o revisarlas bajo el microscopio, antes de comenzar a trabajar, con objetivos de menor aumento.

Una dificultad habitual en los que comienzan es no saber coordinar sus movimientos en relación con la figura invertida bajo el microscopio. Por eso se recomienda inicialmente realizar estrías cortas y preferiblemente en una sola dirección, de izquierda a derecha.

Los errores habituales en los que comienzan al determinar la dureza de los minerales con agujas metálicas bajo el microscopio, son los siguientes:

1. Las agujas de punta roma no pueden hacer una buena estría.
2. Cuando se vira levemente la aguja sobre la superficie de la sección pulida puede que no se obtenga ninguna huella, ya que el borde de la aguja hará contacto con el mineral y no la punta.
3. La aguja al actuar sobre una superficie sucia del mineral deja una huella que se puede confundir con un rasgo. Es por eso que antes de comenzar a trabajar se debe limpiar bien la muestra.
4. La aguja, algunas veces deja una huella (y no un rasgo) que con frecuencia se confunde con un rasgo.
5. La determinación de la dureza con las agujas en granos muy pequeños, es muy difícil, por eso su dureza se determina con otros métodos.
6. La dureza de muchos minerales, como ya se ha señalado, no es una magnitud muy constante. Las variaciones de la dureza de un mismo mineral depende, fundamentalmente de sus condiciones concretas de cristalización y de las variaciones de la composición química, por ejemplo, la limonita puede variar su dureza desde uno (variedad ocre) hasta 6 (variedades compactas) por la escala de Mohs.

La bornita varía su dureza desde media hasta baja en dependencia de la presencia, en su composición, de mezcla de calcosina. La wolframita y la magnetita generalmente se relacionan con el grupo de los minerales de alta dureza (5-5,5), sin embargo, la aguja de acero deja sobre ellos una huella evidente, que no es ni un rasgo, sino una magnitud condicionada, porque estos minerales poseen una elevada maleabilidad y plasticidad.

Con los minerales de la escala de Mohs. Con ayuda de las agujas metálicas se determina la dureza entre 1 y 5 de la escala de Mohs. Pero aproximadamente la cuarta parte de todos los minerales meníferos tiene

dureza 5 y más. Precisamente, los minerales de alta dureza se determinan en mineragrafía con ayuda de los minerales de la escala de Mohs.

Con cristales pequeños de apatito (dureza 5), ortoclosa (6), cuarzo (7), topacio (8), corindón (9) y diamante (10) se hacen, en la máquina pulidora, pirámides de cuatro caras con puntas muy finas. Estas pirámides se fijan en una base fina de latón o de cobre, obteniendo de esta forma una aguja muy singular.

Con esta aguja, en línea recta, fuera del microscopio, se traza el rasgo a través de toda la sección pulida. Después se observa dicho rasgo con el microscopio, desplazando la sección pulida con las correderas de coordinación. Si la aguja de apatito no ha dejado huella sobre el mineral que se investiga, éste se analiza también con la aguja de ortoclasa, y si es necesario, con las de cuarzo, topacio, corindón y diamante. Cuando seleccionamos las agujas de esta forma se puede determinar con bastante exactitud (en los límites de la escala de Mohs) la dureza del mineral.

Con el microesclerómetro. Se llama microesclerómetro los aparatos que se utilizan para determinar la dureza de cualquier sustancia. Existen muchos tipos de esclerómetros, pero en mineragrafía ha tenido utilización el microesclerómetro de Talmed. Este es un balancín en miniatura en uno de cuyos platillos se coloca una pesa y en el otro se fija un aguja de diamante. La pesa, al desplazarse por el platillo, puede crear una determinada carga sobre la punta de la aguja de diamante.

Todo el aparato se fija al objetivo del microscopio de forma tal que cuando la carga es cero la aguja de diamante, por una fracción de milímetro, no hace contacto con la superficie pulida de la sección. Después se aproxima la aguja al mineral investigado y el desplazamiento de la carga le transmite a la aguja una determinada presión. Después con las correderas de coordinación se desplaza la sección pulida en cualquier dirección recta en el campo visual. La aguja de diamante deja un rasgo sobre el mineral investigado. Al variar la carga sobre la aguja de diamante, se logra obtener un rasgo patrón, la cual generalmente se confunde con el ancho del rasgo de la cruz filar del ocular.

Por los resultados del ensayo de dureza de los minerales con este método, Talmed propuso su escala, en la cual la dureza del mineral se expresa por una u otra letra del alfabeto latino y a cada escalón de esta escala corresponde determinada carga sobre la punta de la aguja de diamante. El esquema de la escala de Talmed se ha señalado en la Tabla 9.1.

La clasificación de Talmed no ha hallado amplia aplicación en la práctica de determinación de la dureza, pero los datos de dureza de su escala son muy útiles, ya que los intervalos entre sus escalones son más regulares que en la escala de Mohs.

TABLA 9.1. Escala de dureza de los minerales de Talméd

Grupo de dureza	Símbolo de dureza	Mineral típico	Presión sobre la aguja G	Valores aproximados por escala de Mohs
Baja	A	Molibdenita	0,105	1
	B	Galena	0,210	2
	C	Calcopirita	0,365	3
Media	D	Tetraedrita	0,520	4
	E	Niquelina	0,775	5
Alta	F	Magnetita	1,055	6
	G	Arsenopirita	1,550	7

Con el microdurómetro. La dureza de los minerales determinada por la acción de la pirámide de diámetro con ayuda del microdurómetro, se llama microdureza. En la actualidad se utiliza ampliamente el microdurómetro PMT-3 diseñado por M. M. Jrashev y E. S. Berkovich, aunque ya se han diseñado y fabricado modelos más completos (en especial el PMT-5 y otros). El microdurómetro PMT-3 se compone de una base maciza y de un soporte sobre el cual está montado el microscopio menífero y el indente con el mecanismo de carga, al cual se fija la pirámide de diamante, que está fijada en un soporte especial. El portaobjeto solamente gira 180°, lo que permite desplazar al mineral investigado desde la punta de la aguja de diamante hasta el campo visual debajo del microscopio sin desplazar la sección pulida. El esquema óptico del aparato permite realizar la observación en campo oscuro e iluminado (luz recta u oblicua).

El método de trabajo con este microdurómetro es el siguiente. La sección pulida se fija en el portaobjeto y en el centro del campo visual se coloca el mineral a investigar; luego, sobre el mecanismo de carga se coloca una carga determinada (pesa plana) y se gira la platina 180° (hasta que se detenga). Si el equipo está regulado (centrado) el mineral investigado cae exactamente debajo de la punta de la pirámide de diamante. La operación de comprimir se realiza haciendo girar el dispositivo inmovilizador que sujeta la pirámide la cual desciende sobre el mineral y le aplica una carga igual a la de la pesa. La pirámide se mantiene sobre el mineral durante 15 segundos y luego se vira el dispositivo inmovilizador y se levanta hacia el lado inverso. La platina se vira hacia el lado contrario hasta que se detenga y en el campo visual del microscopio se ve la huella de la pirámide en el mineral. La operación final es la medición de la diagonal de la huella con ayuda del ocular micrométrico. El esquema del campo visual con la huella de la pirámide de diamante se da en la Figura 9.3.

La microdureza de los minerales se calcula por la fórmula:

$$VHN = 2 \operatorname{sen}^2 \alpha \frac{P}{(\bar{d})^2} \quad (1)$$

donde:

α - ángulo entre las caras contrarias de la pirámide

P - carga (en kg)

\bar{d} - Magnitud media de las diagonales de la huella

El ángulo alpha es una magnitud constante y es aproximadamente igual a 136°, la magnitud $2 \operatorname{sen}^2 \alpha/2$ es igual a 1,854

Si P se expresa en kilogramos, y d en milímetros, entonces después de las transformaciones correspondiente la fórmula (1) adquiere el aspecto:

$$VHN = 1,854 \frac{P}{(\bar{d})^2} \quad (2)$$

En la fórmula (2) conocemos todas las magnitudes (P carga señalada y d diagonal media de la huella) y se puede calcular la magnitud de la microdureza VHN. Sin embargo, no siempre es obligatorio realizar el cálculo, ya que existen tablas por las cuales con dicha carga y la longitud de la diagonal se obtiene directamente el valor de microdureza. El valor promedio de varias mediciones de la microdureza es expresada en kg/mm².

Además de la obtención del valor cuantitativo de la microdureza de los minerales, con la ayuda de este método se puede obtener una idea acerca de dichas propiedades del mineral, como elasticidad, plasticidad, fragilidad. Estas propiedades se establecen por medio del estudio del carácter de la perturbación de la forma de la huella. Con ellas se relaciona la formación de huellas o cavidades en los bordes de la huella de la pirámide, la ruptura del mineral durante el aplastamiento, el carácter de la variación de la forma de la huella, etcétera.

Se recomienda, durante la realización de los ensayos efectuar varias determinaciones para poder obtener un valor medio de la microdureza; al efectuar las pruebas deben estar separadas unas de otras por una distancia aproximada de tres veces la longitud de una de las diagonales de la huella de la pirámide de diamante.

Seguidamente se relacionan un grupo de minerales meníferos con sus valores de la dureza (Mohs) y la microdureza H (VHN-Vickers).

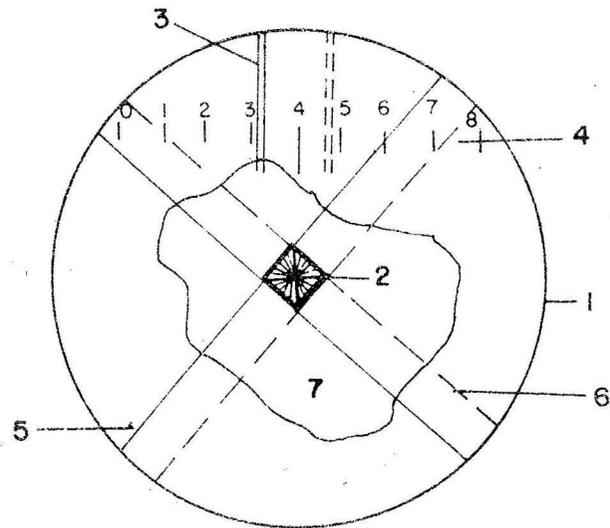


FIGURA 9.3. Esquema del campo visual con la huella de la pirámide de diamante y posición de la cruz filiar durante la medición. 1. Campo visual en el PMT-3 después de obtener la huella; 2. Huella de la pirámide de diamante; 3. Indicador del centro de la cruz filiar; 4. Escala micrométrica del ocular micrométrico; 5. Posición de la cruz filiar antes de la medición de la longitud de la diagonal; 6. Posición de la cruz filiar después de la medición de la longitud de la diagonal; 7. mineral que se investiga.

Mineral	Dureza	Microdureza (Kgf/mm ²)
Cubanita	3,5	199-223
Pirrotina	4	230-390
Tennantita	3,0-4	308-397
Tetraedrita	3,0-4	328-367
Cuprita	3,5-4	205-207
Arsenopirita	5,5-6	976-1127
Pirita	6-6,5	1144-1374
Hematita	6	920-1062
Magnetita	5-5,5	835-695
Rutilo	6-6,5	1074-1210
Ilmenita	5-6	593-934
Cromita	6-7	1036-1566
Casiterita	6-7	1008-1228
Cobaltina	5,5-6	876-1079
Cuarzo	7	1023-1236

Mineral	Dureza	Microdureza (Kgf/mm ²)
Plata (nativa)	2,5-3,0	41-57
Cobre (nativo)	2,5-3,0	111-143
Oro (nativo)	2,5-3,0	50-59
Galena	2,5	65-110
Antimonita	2,5	64-110
Argentita	2,0-2,5	20-30
Calcosina	2,0-2,5	70-98
Cinabrio	2,0-2,5	51-98
Molibdenita	1,0-1,5	24-32
Covelina	1,5-2	77-90
Platino (nativo)	4-4,5	114-116
Millerita	4-5,5	225-376
Niquelina	5-5,5	412-469
Pentlandita	3,5-4	145-223
Calcopirita	3,5-4	184-233

CAPITULO 10

CONDUCTIBILIDAD ELECTRICA DE LOS MINERALES MENIFEROS

10.1. GENERALIDADES

Los minerales tienen diferentes resistencias en relación con la corriente que los atraviesan. Algunos minerales, con los cuales se relacionan los elementos nativos, y en particular el cobre y la plata, son totalmente conductores, y otros como por ejemplo: antimonita, tetraedrita, cromita, conducen muy débilmente la electricidad y prácticamente no son conductores.

La conductibilidad eléctrica de los minerales meníferos es un índice diagnóstico indirecto secundario. Esto está relacionado con el hecho de que al determinar la conductibilidad eléctrica de los minerales en secciones pulidas con frecuencia no hay total seguridad de que los valores obtenidos se relacionan, precisamente, con el mineral investigado, ya que, generalmente no se conoce su configuración espacial y la influencia sobre la conductibilidad del medio circundante. En tales casos, la conductibilidad eléctrica medida puede representar cierto efecto sumario de la serie de minerales vecinos. Sobre la conductibilidad eléctrica influyen también las variaciones de las comparaciones de la composición de los minerales y las microinclusiones. Por eso, la determinación de la conductibilidad eléctrica de los minerales en secciones pulidas tiene un valor secundario durante sus determinaciones.

10.2. METODOS PARA DETERMINAR LA CONDUCTIBILIDAD ELECTRICA

El método más simple para determinar la conductibilidad eléctrica se compone de la utilización de dos contactos aciculares en un marco correspondiente, unidos por la red eléctrica con una batería eléctrica seca y un amperímetro como se ha mostrado en la Figura 10.1.

Los granos de los minerales investigados tienen que tener no menos de 2 mm de sección transversal. Para este método, propuesto por Davis y Franham, la variación de la distancia entre los contactos aciculares desde 1 cm hasta fracciones de milímetros no tiene influencia considerable sobre las indicaciones del amperímetro. Con ayuda de este aparato los minerales

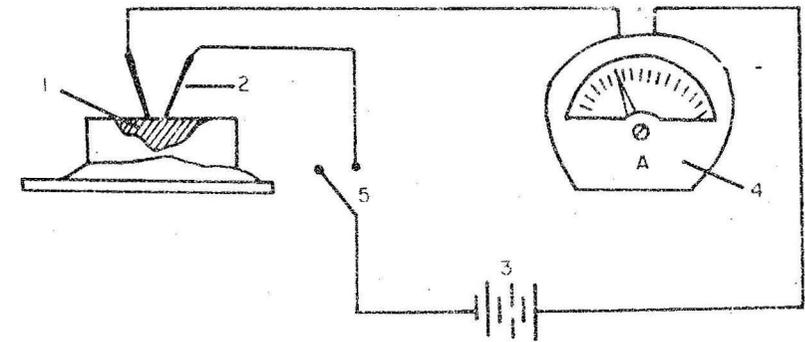


FIGURA 10.1. Esquema simplificado para determinar la conductibilidad eléctrica de los minerales metálicos. 1. Sección pulida con el mineral metálico; 2. Contacto; 3. Batería seca; 4. Amperímetro; 5. Interruptor.

pueden subdividirse, por la conductibilidad eléctrica, en tres grupos: el primer grupo son los minerales que poseen una conductibilidad eléctrica parecida a la del cobre, el segundo grupo son los minerales que transmiten la corriente eléctrica peor que el cobre; el tercer grupo son los minerales que no conducen la electricidad.

El equipo más perfecto para medir la conductibilidad eléctrica fue el utilizado por Keor y Kebin. En el mismo, la corriente eléctrica pasa desde las baterías secas a través del mineral y a través del circuito desde seis bombillos o a través del mineral y del miliamperímetro. La primera combinación se utiliza cuando los minerales tienen alta conductibilidad eléctrica. En dependencia del grado de conductibilidad eléctrica del mineral, la cantidad de bombillos conectados al circuito, puede variar desde 6 a 1. Se puede tener una idea sobre la conductibilidad eléctrica por el número de bombillos que se encienden. La segunda combinación se utiliza cuando los minerales tienen una conductibilidad eléctrica débil, o sea, los bombillos no se encienden. Se puede tener una idea sobre la fuerza de la corriente, en este caso, por la indicación del miliamperímetro. Con ayuda del aparato descrito todos los minerales se dividen, por la conductibilidad eléctrica, en seis grupos. Con los tres primeros se relacionan los minerales que son buenos conductores, con el cuarto y quinto grupo lo que son poco conductores, en los cuales la corriente se acepta solamente por el miliamperímetro, y el sexto grupo son los minerales que no conducen la electricidad (las indicaciones del miliamperímetro no son aceptables).

Las mediciones más exactas de la conductibilidad eléctrica de los minerales fueron realizadas por Garvei. El midió la resistencia de los minerales mení-

feros con ayuda del puente de Winston (potensiómetro) y de un galvanómetro. Los minerales que poseen poca resistencia se median con ayuda del puente de Winston, y los que poseen elevada resistencia con ayuda del galvanómetro. P.D Garvei realizó la investigación de la conductibilidad eléctrica de una gran cantidad de minerales con una gran exactitud. En relación con esto, los datos de R.D Garvei acerca de la conductibilidad eléctrica de los minerales se utilizan en la actualidad como lo más seguro y se señalan en todos los manuales.

I.S Valmiski construyó un aparato especial para medir la conductibilidad eléctrica de los minerales bajo el microscopio por el método de Garvei. Este aparato es una instalación en miniatura que se fija al objetivo del microscopio. El esquema del aparato de I.S Valmiski se muestra en la Figura 10.2.

El equipo se compone de una batería de alimentación (b), del puente de Winston (M) y de un equipo de medición en forma de terminal acicular de los contactos (l) conectado a uno de los brazos del puente. Como equipo que controle la ausencia de corriente en las diagonales del puente se utiliza un bombillo (L), miliamperímetro (MA) o un galvanómetro sensible (G). Estos pueden conectarse al circuito transversalmente al interruptor (P). Cuando no hay corriente en el puente diagonal la resistencia del mineral (x) se calcula

por la fórmula $x = a \frac{c}{b}$.

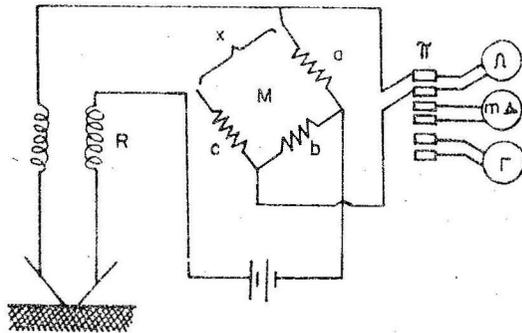


FIGURA 10.2. Esquema del aparato de I. S. Valmiski para determinar la conductividad eléctrica de los minerales metálicos.

Para conocer la magnitud de la conductibilidad eléctrica, que es una función inversa de la resistencia, en la Tabla 10.1 se dan los datos de la resistencia de algunos minerales por el método de Garvei.

Tabla 10.1

Grado de la conductividad eléctrica	Minerales	Resistencia (en Ohms)
A	Plata	10^{-5}
	Cobre	10^{-4}
L	Bismuto	10^{-3}
T	Pirrotina	10^{-2}
A	Magnetita	10^{-1}
B	Pirita	1
	Calcopirita	10
	Marcasita	10^2
	Ilmenita	10^3
	Psilomelano	10^5
A	Cuprita	10^6
	Casiterita	10^7
	Cinabrio	10^8
Insignificante	Limonita	10^8
	Esfalerita	10^8
	Antimonita	10^8

CAPITULO 11

INVESTIGACIONES RADIOGRAFICAS

Las investigaciones radiográficas pueden ser utilizadas con un número limitado de minerales meníferos, y precisamente, sólo con los que poseen propiedades radioactivas. En dependencia del carácter detallado de los resultados, el cual es necesario obtener cuando se estudian los minerales radioactivos, en minerografía se utilizan dos métodos fundamentales: macroradiográfico y microrradiográfico.

11.1. METODO MACROGRAFICO

Es importante para revelar los minerales radiactivos y principalmente para estudiar las particularidades estructural-texturales de las menas que contienen estos minerales. Este método está basado en la obtención de radiografías de las secciones pulidas.

Para obtener la radiografía se utiliza una película roentgenográfica ("xx" o "x"), la cual, en total oscuridad se coloca sobre una superficie dura totalmente lisa. Sobre la película se colocan las secciones pulidas de forma tal que queden pegadas a ella. Después se realiza la exposición de la película para que sobre la radiografía se obtengan los contornos exactos de las secciones pulidas y si fuera posible, hacerlos coincidir uno con otro después de obtener la radiografía.

Después de la exposición, la película, junto con las secciones pulidas superpuestas sobre la película, se somete a exposición en un local totalmente oscuro. La magnitud de la exposición depende de la radioactividad de los minerales que entran en la composición de la mena, y puede oscilar entre varias horas hasta varios días. Al concluir el tiempo de exposición, se apartan las secciones pulidas, y la película (en total oscuridad) se revela y se fija en el orden normal, obteniendo así la radiografía.

En la radiografía, los minerales que poseen radioactividad dejan una huella oscura que corresponde a su forma sobre la superficie pulida de la muestra, y por su posición se puede tener una idea de las particularidades textural-estructurales y de la estructura de la mena. En dependencia de la intensidad de la manifestación de las propiedades radioactivas y del tiempo de exposición, a cada mineral corresponde su grado de oscurecimiento en la radiografía, por la cual se puede determinar la cantidad de minerales radioactivos que entran en la mena y el grado aproximado de su radioacti-

vidad. La macroradiografía se ha presentado esquemáticamente en la Figura 11.1, que representa una textura de filón circuitado.

11.2. METODO MICRORADIOGRAFICO

Permite analizar las características cualitativas y cuantitativas y determinar la naturales de la radioactividad, incluso de los granos más pequeños de minerales radioactivos en las secciones pulidas sin la difícil división, y con frecuencia imposible, de los diferentes minerales.

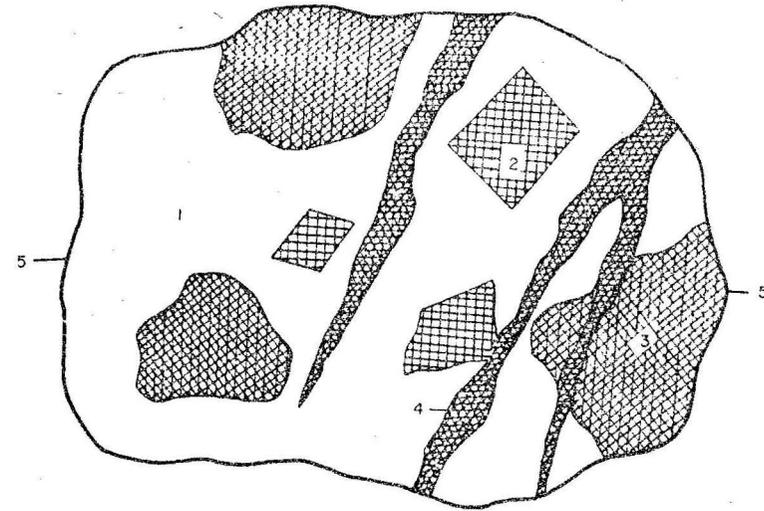


FIGURA 11.1. Esquema de la macroradiografía de una sección pulida. 1. Minerales no radioactivos; 2-4. Minerales radioactivos con grado de radioactividad que aumenta consecutivamente; 5. Contorno de la sección pulida.

Este método está basado en el estudio de las microrradiografías bajo el microscopio. Para prepararlas se utilizan láminas especiales muy finas del tipo A-2, que tienen una capa de emulsión de un grosor de 50-60 mm. La emulsión de estas láminas solamente es sensible a las radiaciones α y a los fragmentos de la fusión de los átomos. La metodología de obtención de las microrradiografías es análoga a la de las macroradiografías. El tiempo de exposición se determina por el contenido de elementos radioactivos en los

minerales y por el objetivo de la radiografía. Para el estudio cuantitativo es mejor dar una exposición en que la cantidad de huellas de partículas α sobre una superficie de $0,02 \text{ mm}^2$ de lámina no sea mayor de varias decenas y el cálculo se hace más difícil. La exposición, en dependencia del contenido en por ciento del elemento radioactivo en el mineral será aproximadamente 45-70 % 20 min, 15-20 % en una hora, 5-10 % en 2 horas, 0,5-1 % en 5 horas. Para el estudio cualitativo, cuando es necesaria una condensación considerable de las huellas α , para obtener las microrradiografías la exposición se aumenta de 5-10 veces y más.

Las huellas del recorrido de las partículas α que se fijan en la capa de emulsión fina, tienen aspecto de estrías de una u otra densidad, que depende de la concentración de radiación α en el mineral, del tiempo de exposición y parcialmente de las dimensiones de los objetivos de la radiación. La longitud máxima del recorrido de una partícula α de mayor energía (en partícula del torio) en la emulsión es de 1 mm. Por eso, el estudio de las microrradiografías se realiza bajo el microscopio con un aumento de 50-500 veces.

El análisis de las microrradiografías puede ser cuantitativo y cualitativo. Durante el estudio cualitativo se utilizan aumentos de 50-100 veces. La microrradiografía se fija a la superficie de la sección pulida de donde fue tomada. Para la total coincidencia de la microrradiografía se utilizan los contornos de la sección pulida, obtenidos durante la iluminación antes de la exposición. De esta forma, las partes oscuras de la radiografía se encontrarán exactamente sobre de los granos de los minerales, debido a los cuales se formaron. Al bajar y subir el tubo del microscopio observamos las partes de la sección pulida (mena) y la representación radiográfica obtenida de ellas. Por la densidad de las huellas de las partículas α sobre determinados granos minerales, por la distribución de las zonas de diferente condensación, por su forma y dimensiones se puede dar una característica cualitativa bastante completa de la mineralización radioactiva en dicha muestra pulida, y también hacer las conclusiones acerca de las particularidades microestructurales y microtexturales de la meniferación al generalizar los resultados del estudio de una gran cantidad de muestras pulidas de cualquier yacimiento o cuerpo menífero.

Durante el estudio cualitativo de las microrradiografías se calcula el número de huellas de partículas α que entran en una determinada área de la radiografía. La cantidad de estas huellas será directamente proporcional a la concentración del elemento radioactivo en dicho mineral y al tiempo de exposición de la lámina (el cual es conocido). Si se calcula bajo el microscopio, para una lámina de tipo A2, la cantidad de huellas de partículas α fijadas de 1 % de contenido de uranio por 1 mm^2 de área de la lámina durante una exposición de 1-hora, entonces esta magnitud será casi constante e

igual, $g = 46,48 \frac{\alpha \text{ partículas}}{\text{mm}^2/\text{hora}}$. Esta magnitud se puede precisar con ayuda de la radiografía del patrón.

Queda calcular la cantidad de huellas de partículas α para la microrradiografía del mineral que nos interesa, lo que es más cómodo hacer con aumentos de 500X. El mismo cálculo se realiza en algunas áreas elementales formadas por la escala micrométrica ocular (un cuadrado tiene un área de $0,0225 \text{ mm}^2$). La cantidad de cuerpos elementales de cálculo depende de la dimensión de los granos radioactivos y aproximadamente son 10 campos por 1 mm^2 . Los resultados obtenidos se tabulan (ver Tabla 11.1). Para el cálculo se toman las huellas con menor longitud de recorrido, igual a 6-7 mc (esto corresponde aproximadamente a la dimensión de 5 granos de bromuro de plata que es la sustancia que forma la emulsión de la lámina).

TABLA 11.1.

Número de campos	Area del campo (mm^2)	Cantidad de huellas α
1	0.0225	N_1
2	0.0225	N_2
3	0.0225	N_3
...
100	0.0225	N_{100}

$$\sum S \quad \sum N$$

El cálculo del contenido del elemento radioactivo (A) se realiza por la fórmula:

$$A = \frac{\sum N}{\sum S \cdot T \cdot g}$$

donde:

$\sum S$ - suma total de las áreas de cálculo

$\sum N$ - cantidad total de huellas α

T - tiempo de exposición en horas.

$$g = 46,48 \frac{\alpha \text{ partículas}}{\text{mm}^2/\text{horas}} \text{ de } 1 \% \text{ de uranio}$$

Semejantes cálculos se realizan para cada mineral radioactivo que contiene diferentes concentraciones del elemento radioactivo y de las partículas α que poseen respectivamente diferente densidad en la microrradiografía.

La determinación de la naturaleza de la radioactividad de los minerales según su microrradiografía está basada en la diferencia de energías máximas de partículas α en series de los elementos de uranio y torio, y por consiguiente, en la longitud de los recorridos de partículas α fijadas en la emulsión de las láminas.

Es conocido que las partículas α poseen la energía máxima cuyo emisor entra en la serie de los elementos de torio (ThC). El recorrido máximo de estas partículas α en el aire es de 8,57 cm. En la serie de los elementos de uranio el emisor más importante de partículas α (Ra C') emite partículas α con energía que corresponde al recorrido máximo total en el aire de 6,91 cm. En el recorrido de la partícula α en la emulsión es mucho más corto que en el aire y 1 cm de recorrido en el aire corresponde a 6 mc de recorrido en la emulsión. De esta forma, las huellas máximas fijadas en la microrradiografía, del recorrido de las partículas α de la serie de los elementos de uranio tendrá una longitud no mayor de 42 μm (cerca de 7 cm en el aire) y todas las huellas de mayor longitud corresponden a la serie de los elementos del torio. Cuando la naturaleza de los emisores de partículas α es variable se observan huellas de diferente longitud.

La longitud de las huellas se mide con ayuda del ocular micrométrico graduado en micrones. Para medir se seleccionan huellas bastante largas, situadas en la emulsión, aproximadamente de forma paralela al plano de la platina del microscopio (o perpendiculares a la línea de observación). Como a menor longitud de las huellas que entran en el cálculo se toma la longitud de 34,8 mc. La cantidad de huellas que tienen una longitud de 34,8 hasta 42,0 mc darán la magnitud n_2 y la cantidad de huellas con una longitud de más de 42,0 mc, la magnitud n_1 .

Al ocurrir esto, la correlación del uranio y del torio se calcula por la fórmula:

$$\frac{C_{\text{torio}}}{C_{\text{uranio}}} = \frac{3,3}{n_2/n_1} = K$$

Si la magnitud $K = 0,1-0,4$, la naturaleza de la radiación de partículas α es uránica; si $K = 0,4 + 1,0$, entonces la naturaleza es mixta, y si $K > 1$, es teórica.

CAPITULO 12

ATAQUE QUIMICO

12.1. GENERALIDADES

En las prácticas de laboratorio, durante la determinación de los minerales meníferos, se utilizan diferentes métodos químicos, de los cuales los más distribuidos y simples son los de ataque diagnóstico.

En minerografía se llama ataque a la variación de la superficie pulida del mineral a consecuencia de la influencia, sobre el mismo, de determinados reactivos químicos. En dependencia de su objetivo, se distinguen el ataque diagnóstico y el ataque estructural. En el primer caso la tarea se basa en la obtención de un índice característico o reacción que determinen al mineral. En el segundo, en la revelación de la estructura interna del mineral.

El ataque diagnóstico químico se realiza con una gota del reactivo químico colocada sobre la superficie pulida del mineral. Los minerales meníferos reaccionan de distinta forma sobre determinados reactivos y esta regularidad es la base de los índices diagnóstico químicos.

Los reactivos utilizados para determinar los minerales tienen que responder a los siguientes requisitos:

1. Estos tienen que ejercer un efecto rápido, intenso y disolvente en el mineral que se investiga.
2. No tienen que dar, en el mineral investigado, sales de difícil solubilidad que enmascaran los resultados de la reacción.
3. Los resultados de la reacción en diferentes direcciones cristalográficas de un mineral, tienen que ser parecidos.
4. Los reactivos tienen que ser químicamente puros, frescos o bien conservados.
5. La reacción tiene que tener lugar a temperatura normal sin calentamiento de la muestra o del reactivo.

En el juego de reactivos estándar que se utilizan para atacar a los minerales meníferos, entran los siguientes:

1. Acido nítrico: NO_3H (concentrado)
2. Acido clorhídrico: ClH (concentrado)
3. Agua regia (concentrada): ($\text{HNO}_3 - 1 \text{ parte} + \text{SO}_4 \text{H}_2 - 3/4 \text{ partes}$)
4. Hidróxido de potasio: KOH (sol al 40 %)
5. Cianuro de potasio: KCN (sol. al 20 %)

6. Tricloruro de hierro : FeCl_3 (sol. al 20 %)

7. Cloruro de mercurio: HgCl_2 (sol. al 5 %)

Los resultados de las reacciones de los minerales meníferos con el ataque con estos reactivos, se da en muchas tablas determinativas y manuales de minerografía como la que aparece en la segunda parte del libro.

Además de los reactivos estándar, para el diagnóstico de algunos minerales meníferos, en investigaciones especiales, se utilizan otros reactivos. Por ejemplo, el agua oxigenada H_2O_2 (soluciones al 3 % y al 30 %) se utiliza para determinar los minerales que contienen manganeso. El nitrato de plata: AgNO_3 (solución acuosa saturada) para diferenciar el oro (no se oscurece al cabo de varios minutos) de la calcopirita (se ennegrece rápidamente). El cloruro de estaño: SnCl_2 (solución acuosa saturada) se utiliza para los minerales del manganeso. El ferrocianuro de potasio: $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ (solución acuosa al 25 %) para diferenciar la tenantita (se oscurece) de la tetraédrita (no se altera). El permanganato de potasio: KMnO_4 y el ácido sulfúrico: H_2SO_4 para la esfalerita, etcétera.

12.2. METODOLOGIA Y RESULTADOS DEL ATAQUE DIAGNOSTICO

La metodología para realizar el ataque diagnóstico se basa en lo siguiente. Con una pipeta muy fina o con la punta fina de un pedazo de papel doblado en forma de cuña, se coloca una gota de reactivo sobre un determinado mineral. La pipeta, después de utilizada debe lavarse cuidadosamente, y el papel desecharlo.

Es mejor realizar el ataque directamente bajo el microscopio con objetivos de poco aumento. Su distancia de foco permite colocar la gota de reactivo sobre la sección pulida bajo el microscopio y observar, simultáneamente, el proceso de la reacción. Para evitar que se dañen las partes metálicas del objetivo con los vapores de los reactivos, éste se reviste con una funda de goma o se engrasa con lubricante grueso, la gota de reactivo se coloca solamente sobre el mineral investigado y no debe hacer contacto con los minerales vecinos, ya que esto provocaría la alteración del resultado de la reacción.

El tiempo del ataque para obtener resultados visibles tiene que ser estrictamente limitado y generalmente no excede los 60 segundos. Para evitar errores motivados por diferentes causas, el ataque se realiza tres o cuatro veces en diferentes lugares del mineral investigado si lo permiten sus dimensiones, o en diferentes granos de un mismo mineral.

Se recomienda comenzar el ataque con los reactivos más débiles y terminar con los más fuertes. Los reactivos estándar se recomienda utilizarlos en el siguiente orden: HgCl_2 , FeCl_3 , KCN, KOH, HCl, HNO_3 , agua regia. Para la

mayoría de los minerales (aunque no para todos) este orden garantiza un ataque con el menor deterioro de la superficie pulida del mineral.

El efecto del reactivo sobre el mineral se basa en una reacción química, cuyo resultado una parte de la sustancia del mineral pasa a la solución, o se precipita, o se desprende en forma de gas.

Durante la preparación, las muestras pulidas se cubren con una película amorfa fina (milésima de milímetro) de los compuestos y reactivos usados en su elaboración. Este material amorfo rellena las microfisuras, los poros, líneas de clivaje y disyunciones del mineral. En el estadio inicial del ataque, al cabo de varios segundos de haber colocado el reactivo la película amorfa se disuelve y aparecen algunas particularidades estructurales de la estructura del mineral. Después de esto, el reactivo interacciona directamente con el mineral.

La observación del resultado del ataque comienza desde el momento que se vierte la gota sobre el mineral. En caso de una reacción positiva durante la observación bajo el microscopio, pueden ocurrir las siguientes alteraciones, que son el resultado de la reacción.

1. El desprendimiento de las burbujas de gas o ebullición rápida. Por ejemplo, cuando actúa el HNO_3 sobre la arsenopirita y la pirita ocurre el desprendimiento de burbujas de gas. Cuando actúa el HNO_3 sobre la calcosina o la cuprita, ebullición agitada.
2. La coloración de la gota de reactivo. Esta coloración es mejor observarla con luz oblicua. Por ejemplo, la gota de HCl se colorea de amarillo cuando actúa sobre la magnetita. Los ácidos que actúan sobre los minerales que contienen cobre, se colorean de azul.
3. La posterior observación se realiza después de la cuidadosa eliminación de la gota de reactivo con ayuda de papel de filtro. Algunas veces, en el lugar de la gota bajo el microscopio se puede notar un sedimento, que se puede ver mucho mejor con luz oblicua. Por ejemplo, cuando actúa el KOH sobre el antimonio lentamente se deposita un sedimento anaranjado característico. Cuando actúan las gotas de agua regia sobre el cobre gris, sobre éste queda el sedimento amarillo del azufre. Sobre la cuprita, bajo la acción del HNO_3 , se forma un sedimento de cobre metálico.

Si durante el ataque se formó sedimento, después que éste se estudie, se elimina limpiando el lugar atacado con un algodón o gasa, y se repule la sección pulida con un paño o en la máquina. Si no se forma sedimento, después que se elimina la gota, sobre el lugar pueden quedar las siguientes huellas, que indican el proceso positivo de la reacción.

4. Coloración de la superficie del mineral. Por ejemplo, la calcopirita debido al efecto del FeCl_3 se colorea de azul. La bornita debido a la

acción del FeCl_3 se torna color naranja, y debido al KCN, carmeilita oscuro.

5. Aclareamiento u oscurecimiento de la superficie del mineral (algunas veces muy intenso) a consecuencia de la corrosión con el reactivo. Por ejemplo, la galenita debido a la acción del HNO_3 se torna de color negro o se empardece. La plata debido a la acción del HNO_3 se oscurece lentamente.

Formación de una película iridiscente sobre la superficie del mineral. Esta película es una capa muy fina de sedimento compacto sobre la superficie pulida. Por ejemplo, cuando el KOH actúa sobre la pirrotina, ésta obtiene las tonalidades del arco iris es decir, es iridiscente. La esmaltina cuando actúa el HgCl_2 adquiere tonalidades iridiscientes. El $\text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ deja sobre la calcopirita una película muy iridiscente.

7. Es posible la aparición de grietas de clivaje, maclas, zonación del desarrollo de cristales, etc; es decir, de la estructura interna del mineral (efecto del ataque estructural) por ejemplo, la calcosina cuando es tratada con HNO_3 revela estructura de granos pequeños; lo mismo se puede observar en la calcopirita cuando sobre ella actúa el $\text{KMnO}_4 + \text{KOH}$. La esfalerita, después que ha sido atacada por el agua regia o el $\text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ revela estructura de macla, clivaje, etcétera.
8. Formación de anillo. Algunos minerales no se alteran bajo el efecto de uno u otro reactivo estándar, pero sus vapores pueden actuar sobre el mineral y formar en este caso una aureola oscura alrededor del borde, llamado anillo. Dicho anillo se puede observar, por ejemplo, en la bismutina o en la jamesonita bajo la acción de los vapores de HCl, en la pirita y en la esfalerita bajo la acción de los vapores de HNO_3 .

Si durante el ataque se observa aunque sea uno de los fenómenos anteriormente señalados, hay que considerar que dicho reactivo actúa sobre el mineral, la reacción es positiva y se significa con el signo (+). Si no se observa ni uno sólo de estos fenómenos, entonces se considera que el reactivo no actúa sobre el mineral, la reacción es negativa y se significa con el signo (-).

12.2.1. ERRORES CARACTERÍSTICOS DURANTE EL ATAQUE QUÍMICO

En el proceso de ataque diagnóstico hay que observar algunas reglas que ayuden a evitar resultados erróneos. Analicemos los errores más característicos durante el ataque y los métodos para eliminarlos.

1. Si la superficie de la sección pulida está sucia de grasa después que se ha observado con inmersión, o debido al contacto de los dedos, o simplemente oxidada por haber sido expuesta largo tiempo al aire

entonces el efecto del reactivo puede ser muy débil o no tiene lugar la reacción o ésta no es característica de dicho mineral y reactivo. Por eso para el ataque es necesario una muestra preparada recientemente o que se haya limpiado bien con un paño.

2. Si la gota de reactivo cubre simultáneamente dos o más minerales, entonces la diferencia de los potenciales eléctricos entre los minerales provoca una corriente débil que frecuentemente acelera el efecto del reactivo sobre un mineral y lo debilita sobre otro. Así por ejemplo, si los granos de galena y bornita que hacen contacto se cubren con una gota de FeCl_3 , la reacción sobre la bornita será intensa, y sobre la galena no actuará. Cuando sobre estos minerales actúa el FeCl_3 separadamente, se observa la acción moderada del reactivo sobre la bornita e intensa sobre la galena. Por eso, para el ataque hay que seleccionar granos grandes y colocar la gota de reactivo de forma tal que ésta no salga fuera de los límites del grano investigado.
3. Las soluciones saturadas de reactivos (por ejemplo, HgCl_2) durante la evaporación del líquido comienzan a cristalizarse y al cabo de un minuto sobre la superficie del mineral se forma una lámina cristalina fina, aunque la reacción sea negativa. No se puede confundir esta lámina con el sedimento de la reacción positiva.
4. En la sección pulida generalmente se observan algunos granos de un mismo mineral cuyos cortes están indistintamente orientados en relación con las direcciones cristalográficas de estos granos. La velocidad de la reacción para estos cortes orientados de forma diferente no siempre será igual. Con esto se explica el hecho de que los granos de un mismo mineral se atacan con diferentes intensidades con un mismo reactivo.
5. Entre los minerales formadores de menas con frecuencia se encuentra la calcita. Las gotas de reactivo pueden hacer contacto con el grano o inclusión pequeña de calcita en el mineral menífero. Debido a esto, en primer lugar, ocurre la ebullición que erróneamente se puede tomar como una reacción positiva entre el mineral investigado y el reactivo, y en segundo lugar, el efecto del reactivo será débil debido a la neutralización con la calcita.
6. Algunas veces el reactivo se descompone en sus componentes sin actuar sobre el mineral. Por ejemplo, el peróxido de hidrógeno algunas veces se descompone cuando actúa sobre minerales de magnesio y provoca una ebullición, pero no ocurre interacción entre ella y el mineral.
7. Pequeñas burbujas de aire pueden desprenderse de las microgrietas y poros del mineral en las gotas de reactivo. Este fenómeno no se debe confundir con el desprendimiento de burbujas de gas como resultado de la reacción.

8. Las menas que han sido afectadas por los procesos de interperismo, se someten más fácilmente al ataque. Así, por ejemplo, la calcopirita y la tetraedrita de la zona de oxidación frecuentemente se ataca con HNO_3 , aunque generalmente este reactivo no actúa sobre ellos.
9. Las mezclas isomorfas o las inclusiones más pequeñas de otros minerales pueden influir considerablemente sobre los resultados del ataque. Así por ejemplo, el cobre gris en dependencia de su composición reacciona de forma diferente con el HNO_3 y KCN.

Hay que recordar que al determinar los minerales es imposible basarse solamente en los datos del ataque. La base para determinar los minerales en minerografía son los índices físicos, al ataque se recurre a medida de las necesidades, como al ensayo complementario o de corrección.

12.3. ATAQUE ESTRUCTURAL

En la mayoría de los casos las estructuras de las menas y la estructura interna de los granos de minerales bajo el microscopio no se observan en condiciones normales.

Esto se explica, en primer lugar, porque los granos del agregado mineral hacen contacto y los límites entre ellos se oscurecen, se ondulan durante el pulido de la sección pulida; en segundo lugar, como ya señalamos, el material amorfo que se forma en el proceso de pulido, rellena los límites entre los minerales y sus elementos estructurales internos (clivaje, zonación, etcétera) y hace que estos límites sean imperceptibles.

En los agregados minerales formados por minerales anisotrópicos, la estructura interna de los granos algunas veces se ve claramente con los nicoles cruzados, pero la mayoría de los minerales son débilmente anisotrópicos o isotrópicos y este método no es favorable para el estudio de las particularidades estructurales. El medio más seguro para revelar las estructuras ocultas, es el ataque estructural.

La metodología para realizar el ataque estructural se diferencia algo del ataque diagnóstico porque requiere un tiempo exacto determinado de ataque para cada mineral y reactivo y los medios de ataque para revelar las estructuras internas son mucho más variados.

No existe un juego estándar determinado de reactivos para el ataque estructural y para muchos minerales los ataques especiales se seleccionan por vía experimental. Además de los reactivos líquidos, durante el ataque estructural algunas veces se utilizan reactivos gaseosos, como por ejemplo, vapores de bromo, vapores de cloro (debido al agua regia) y otros. En estos casos, la superficie pulida de la sección se coloca durante cierto tiempo debajo de una probeta abierta que contiene el reactivo correspondiente. En algunos casos se utiliza el ataque electrolítico.

La tarea de seleccionar un reactivo, el método y el tiempo de ataque se basa en disolver la película amorfa que cubre la superficie de la sección pulida y no provocar una reacción intensa entre el mineral y el reactivo.

El ataque estructural generalmente revela, simultáneamente, la estructura interna del agregado monomineral y la estructura de los diferentes granos que lo forman. Para obtener una figura estructural exacta se requiere la observación de las siguientes condiciones básicas:

1. El ataque estructural hay que realizarlo solamente sobre secciones pulidas de alta calidad. Cuando la muestra es de mala calidad se revelan las grietas rellenas y arañosos que alteran el dibujo estructural del mineral.
2. Una estructura característica o interesante, generalmente hay que buscarla por medio del ataque de varias partes de la sección pulida, y algunas veces de varias secciones. Esto está relacionado con el hecho de que en condiciones normales no vemos esta estructura, y éstas se encuentran, como regla, muy alejadas en cada grano o parte de la superficie pulida.
3. La determinación de la exposición durante el ataque estructural tiene, como en fotografía, una grande y, a veces, decisiva importancia. El tiempo efectivo de ataque es mejor hallarlo por vía experimental.

El estudio de las estructuras internas de los agregados minerales y de los diferentes granos persigue los mismos objetivos que el estudio de las particularidades textural-estructural de las menas. Esto ayuda al esclarecimiento de las condiciones de formación de los yacimientos y es útil en la práctica de beneficio y elaboración tecnológica de las menas. Por ejemplo, con ayuda del ataque estructural se pueden establecer las dimensiones de los diferentes granos o cristales que forman los agregados monominerales, en aquellos casos en que durante una observación normal bajo el microscopio no se distinguen. El ataque estructural frecuentemente revela las deformaciones mecánicas de los minerales, los relictos de la estructura inicial de los agregados, las huellas de la recristalización, la zonación, etcétera y como sabemos, por ejemplo, la zonación permite tener una idea acerca de las condiciones de disposición de los minerales de las soluciones y ayuda a dar una característica determinativa más completa de los procesos que han tenido lugar.

En calidad de ejemplo más abajo se dan datos del ataque estructural de algunos de los minerales más distribuidos.

Galena. Para el ataque estructural se utilizan:

1. HCl (1.1) + corriente eléctrica (4-6 volt)
2. HNO_3 (sol. al 75 %) + alcohol (sol. al 25 %) tiempo de 2-10 s.
3. HNO_3 (1.1) tiempo de ataque 20-30 s.

Se revela la estructura de los agregados de galena, la estructura zonal de los granos, inclusiones de otros minerales (argentita, plata nativa, etcétera), visibles antes del ataque.

Esfalerita

1. $\text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ (1:5). Se prepara antes del ataque. Tiempo 10–30 s. El sedimento marrón se limpia con un algodón húmedo, después se observa.
2. En los vapores de agua regia se mantiene durante varios segundos e inmediatamente se observa.
3. HI no da buenos resultados durante el ataque a la esfalerita.

Como resultado del ataque se establecen las mezclas, diferentes microdeformaciones, clivage, zonación.

Antimonita. La estructura generalmente se observa con los nicoles cruzados pero algunas veces hay necesidad de realizar el ataque. 1 KOH (concentrado). Tiempo 1–3 s, la gota y el sedimento se limpian. Se observan maclas grandes y raramente crecimientos laminares.

Calcosina. Tiempo de ataque casi un minuto. Se revela la estructura del agregado y el clivage en diferentes granos.

Pirrotina. La estructura se observa con los nicoles cruzados, pero algunas veces hay necesidad de atacar.

1. HCl (1:1) + corriente eléctrica. Tiempo 10–30 s.
2. HI (concentrado). El tiempo se determina por vía experimental.

Se observa la estructura del agregado, las maclas, y las deformaciones.

Calcopirita.

1. $\text{KMnO}_4 + \text{KOH}$ (sol. al 40 %) tiempo 1–5 min
2. HNO_3 (1:1) + KClO_3 (cristales) + clorato potásico (1 grano)
3. H_2O_2 (30 %) + NH_4OH (sol. al 25 %).

Preparar antes del ataque. Se observa la estructura del agregado, las maclas, y microdeformaciones.

Cobre gris. $\text{KMnO}_4 + \text{KOH} + \text{H}_2\text{O}_2$ (al 30 %). Tiempo 10–60 s. Se ataca muy mal, es estable a todos los reactivos.

Niquelina. La estructura del agregado es visible con los nicoles cruzados, pero la estructura interna de los granos sólo se revela con el ataque. $\text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$. tiempo 10–15 s. Se revela la estructura, raramente las maclas.

Pirita.

1. HNO_3 . Tiempo casi 1 min
2. $\text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$
3. $\text{HNO}_3 + \text{CaF}_2$ (polvo)

Se revela la zonación, deformaciones, estructura colomorfa, y maclas.

Cobaltina. $\text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$. Se revelan las estructuras del agregado, las maclas, y las deformaciones. No se revela la zonación.

Arsenopirita.

1. $\text{KMnO}_4 + \text{KOH}$. Tiempo 10–60 s.
2. $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{KOH}$.

Se revelan la estructura del agregado, las maclas, y el clivage.

Casiterita. Los métodos corrientes de ataque no le afectan. Para el ataque estructural la casiterita se coloca bajo el hidrógeno que se desprende. Se forma una capa fina de estaño metálico. Esta capa se disuelve en HNO_3 y se revela la estructura. Se observan las maclas y las deformaciones.

Magnetita.

1. Vapores de HCl. Tiempo 1–2 min
2. HBr.

Es característica la revelación de las maclas.

Cromita. Muy resistente al ataque KClO_4 (2 g) + H_2SO_4 (40 cm^3) + H_2O (10 cm^3). Dejarlo hervir de 30 min a 2 h. Se revela el clivage.

MÉTODOS DE ANÁLISIS MICROQUÍMICO

13.1. GENERALIDADES

El análisis químico permite obtener solamente la composición cualitativa y cuantitativa (elemental) de la mena y en este sentido es un método secundario, auxiliar. Durante el estudio de la composición química cualitativa de los minerales en el proceso de análisis microquímico se obtienen solamente aquellas reacciones químicas que no requieren operaciones complejas ni muchos reactivos para separar los elementos.

Vamos a analizar brevemente la metodología fundamental de preparar las soluciones para llevar a cabo las reacciones microquímicas durante las determinaciones de los minerales meníferos, para diferentes elementos químicos presentes en los minerales y empleando, por supuesto, diferentes métodos.

13.2. OBTENCIÓN DE LAS SOLUCIONES PARA INVESTIGACIÓN

Metodología para obtener estas soluciones depende del grado de solubilidad de los minerales. Acerca de la solubilidad se puede tener una idea basada en los resultados de las reacciones de ataque diagnóstico: si la reacción de ataque es positiva, entonces el mineral se disuelve bastante bien en dicho reactivo. Si la reacción es negativa, entonces el mineral no se disuelve, o se disuelve muy poco, lo cual no es aceptable para la reacción microquímica.

Existen varias formas de obtener las soluciones de investigación:

1. Por medio de ataque (disolución) de la superficie pulida de los minerales con los reactivos correspondientes (para los fácilmente solubles).
2. Por medio del ataque con corriente eléctrica (para los de difícil solubilidad)
3. Por medio de la fusión del polvo del mineral con soda o salitre (algunas veces con KOH, NaOH o sal fosfórica) y con la posterior disolución de las fusiones en los disolventes (para los minerales insolubles)

En el primer caso, sobre la superficie pulida del mineral se coloca una gota de reactivo-disolvente (generalmente se utilizan como disolventes el HNO_3

y el HCl). Si la reacción es positiva, la gota se traslada al papel de filtro (para el análisis por goteo) a un portaobjetos (para realizar el análisis cristalográfico). Algunas reacciones microquímicas se pueden realizar directamente sobre la superficie pulida del mineral (reacciones sobre Pb, As, Sb, Fe y algunos otros elementos).

En el segundo caso se aplica la corriente, utilizando como fuente una batería seca y dos contactos de platino unidos a ella. Un contacto (negativo) se introduce en la gota, y el otro (positivo) se pone en contacto con el mineral. Cuando la reacción es positiva, la gota, como en el primer caso, se traslada al papel de filtro o al portaobjetos.

En el tercer método se toma el polvo del mineral, el cual se obtiene rayando a éste. El polvo se mezcla con igual cantidad de soda o de salitre y se coloca en el extremo de un alambre de platino doblado en forma de ojo de agua y se pone en la llama.

Las fusiones obtenidas se disuelven (en HNO_3 , HCl o H_2SO_4) y las soluciones se trasladan al papel de filtro o al portaobjetos. Este método se utiliza en caso de que sea necesario determinar el mineral de una muestra de mineral no pulida.

13.3. SEPARACIÓN DEL PRECIPITADO DE LA SOLUCIÓN

En algunas reacciones es necesario utilizar la solución o solamente el precipitado que se ha obtenido de la reacción con el mineral. Dicha separación puede ser realizada con ayuda de un equipo de filtración especial o de un capilar.

Cuando se filtra con ayuda del capilar el papel de filtro se moja con agua destilada doblado en cuatro partes y la punta fina se coloca junto al sedimento. Sobre el papel y próximo a la gota se coloca el capilar y se mueve el papel hasta que haga contacto con la gota. La solución absorbida por el papel se absorbe con la boca a través del capilar y se coloca sobre un portaobjetos o papel de filtro en dependencia del posterior método de ensayo.

Con frecuencia, para evitar la operación de filtrado con el capilar (cuando el vapor del reactivo tiene olor desagradable o es dañino), la solución con el precipitado se coloca sobre dos hojas de papel de filtro colocadas juntas. Este método generalmente se utiliza durante el análisis con gotas.

13.4. ANALISIS CRISTALOSCOPICO

El análisis cristalográfico empleado en la determinación de los elementos químicos presentes en los minerales meníferos se fundamenta en la obtención de sedimentos cristalizados (sales de determinados elementos) como resultado de reacciones químicas entre la disolución del mineral investigado y los reactivos correspondientes.

Al determinar elementos tales como S, Co, Au, Sr, las reacciones se realizan sobre portaobjetos. Al determinar Pb, As, P, Sb, se efectúa directamente en la sección pulida y se observan en el microscopio.

El elemento desconocido se determina por el color y por las particularidades de la forma de los cristales de las sales que se han desprendido durante la reacción, o por el color característico que adquiere el reactivo. Algunas veces, es una consecuencia de la reacción el sedimento amorfo y en este caso la determinación del elemento se fundamenta principalmente en el color o tonalidad del sedimento.

Como ejemplo de la utilización del análisis cristaloscópico, analicemos las siguientes reacciones:

1. Determinación de azufre (S). El mineral se disuelve en HNO_3 (1:1). La gota se traslada al portaobjetos y se añade una solución de cloruro de bario (BaCl_2). Se desprenden cristales transparentes de sulfato de bario (BaSO_4) que verifica la existencia de azufre en el mineral.
2. Determinación del Bismuto. Una o dos gotas de ácido clorhídrico se vierten sobre el mineral que contiene bismuto y luego sobre el portaobjetos, y se le añaden cristallitos de yoduro de cesio (CsI). Se desprenden cristales de color rojo sangre de singonía hexagonal, los cuales nos hablan de la existencia de bismuto en el mineral.
3. Determinación del oro (Au). Los minerales del oro se atacan con HCl y agua regia. Sobre un portaobjetos se le añade a la gota de solución, cloruro de estaño (SnCl_2). Se desprende el oro metálico o un sedimento coloidal de oro con $\text{Sn}(\text{OH})_2$. Si el sedimento se disuelve en amoníaco (NH_4OH), el líquido se vuelve de color rojo.
4. Determinación del molibdeno (Mo). El polvo de mineral se coloca, mezclado con soda o salitre en el ojo de un alambre de platino y se procede de igual manera al caso en que se menciona este método. La fusión verde se disuelve en HCl (1:1). Si en la solución se introducen varios granos de xantato de sodio (KCNS) ocurre la coloración rosada del líquido.
5. Determinación del estroncio (Sr). El mineral se trata directamente en la sección pulida con HCl (1:1) cuando se deja pasar la corriente eléctrica. La solución se traslada al portaobjetos y se le añade una gota de AuCl_3

u oro coloidal con una mezcla de $\text{Sn}(\text{OH})_2$; posteriormente se le añade NH_4OH (sol. al 10 %), el líquido se torna de color rojo.

El análisis cristalográfico tiene sus ventajas y desventajas delante de las reacciones corrientes del análisis cualitativo. Con las ventajas hay que relacionar la considerable economía de tiempo y de materiales. Con las desventajas, el hecho de que no todos los elementos puedan ser determinados, aunque para los elementos anteriormente mencionados el análisis cristaloscópico da resultados seguros.

13.5. ANALISIS CON GOTAS

Como base de este método se ha situado la diferencia de las velocidades de difusión de las sustancias disueltas durante la filtración de la solución. A consecuencia de esta regularidad química las sustancias disueltas se concentran (adsorben) en diferentes partes del filtro, sedimentándose en sus capilares.

La metodología para realizar el análisis con gotas se basa en lo siguiente. Las gotas de solución investigada y de reactivo se colocan sobre papel de filtro, donde el elemento incógnita se determina por el color de la mancha, y algunas veces por su forma y posición.

Si como resultado de la reacción entre la solución investigada y el reactivo se forma una sal de fácil solubilidad del elemento desconocido, durante la filtración ésta se sitúa en la periferia donde se mantiene en forma de anillo. Si el elemento incógnita participa en la composición de la sal insoluble, entonces se quedan en el centro de la mancha junto con la sal. Si en la solución hay varios elementos que reaccionan con el reactivo seleccionado, entonces el elemento que nos interesa, en dependencia de la solubilidad de la sal que lo contiene, se aleja a la periferia o se queda en el centro de la mancha. Después de la acción del reactivo éste se manifiesta en forma de anillo coloreado o de mancha. Para obtener un cuadro más exacto del resultado de la reacción, con ayuda de una pipeta se lava la mancha con agua destilada.

De esta forma, el análisis con gotas se realiza con papel de filtro y se basa en que el elemento incógnita, con ayuda de algunos reactivos se concentra en determinado lugar de la mancha, donde se descubre con ayuda de otros reactivos, que forman con él o con sus combinaciones un color específico. En calidad de ejemplo analicemos algunas reacciones del análisis con gotas.

1. Determinación del plomo Pb. Una solución de ácido nítrico sobre un mineral que contiene plomo se pone sobre papel de filtro y se obtiene una mancha húmeda incolora. En el centro de la mancha húmeda se

pone, con una pipeta, una gota de yoduro de potasio al 5 %. Aparece una coloración amarilla característica en el centro de la mancha.

2. Determinación del níquel (Ni). Generalmente, el níquel aparece en las menas junto con el hierro. La solución del mineral que contiene níquel e hierro, se coloca sobre papel de filtro. En el centro de la mancha húmeda actúa el amoníaco (NH_4OH al 10 %). Cuando hay hierro se forma un hidrato insoluble de óxido de hierro ($\text{FeO}(\text{OH})_2$), el cual se fija en la parte central de la mancha. El níquel se disuelve en el amoníaco y por eso será desplazado a la periferia de la mancha, donde se descubre, al añadirle unas gotas de solución de dimetilgloxina.

Se forma un anillo de color escarlata.

3. Determinación del manganeso (Mn). El mineral se disuelve en HCl (concentrado). La solución se coloca sobre papel de filtro y se le añade ferrocianuro de potasio ($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ sol. al 5 %). En presencia del manganeso se forma una coloración marrón-rojo, que a diferencia del cobalto se vuelve marrón oscuro debido al KOH.
4. Determinación del cobre (Cu). Un grano de mineral se polvoriga en un mortero y se disuelve en HNO_3 . La solución se coloca sobre un papel de filtro y se le añade $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$. Se forma una coloración rosado-marrón, que se transforma en azul al añadir KOH (sol. al 5 %).
5. Determinación de cromo (Cr). El polvo del mineral se mezcla con cuatro partes de soda (Na_2SO_4) y dos partes de nitrato de potasio (KNO_3). La fusión se disuelve en agua acidificada (ácido acético) y se le añade $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{NaOH}$ en polvo, después la solución junto con el sedimento se pasa por el papel de filtro. Actúa una solución al 5 % de nitrato de plata (AgNO_3). Se forma una coloración marrón-roja.
6. Determinación del zinc (Zn). El polvo del mineral se disuelve en HCl concentrado o HNO_3 (para la esfalerita se le añade H_2O_2). A la solución investigada en el papel de filtro se le añade $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ al 5 %. En presencia del zinc se forma una coloración amarillo-naranja.

El análisis de gotas se relaciona con los métodos más universales para determinar los elementos en los minerales meníferos y frecuentemente se utiliza en la práctica de las investigaciones minerográficas. La dificultad de su utilización está en la necesidad de utilizar equipos especiales (por ejemplo, equipos de microprecisión, equipos de laboratorio) y un juego bastante amplio de reactivos químicos.

13.5. ANALISIS PECULIAR

Para realizar un diagnóstico, el análisis pelicular tiene un valor muy limitado y se utiliza solamente para determinar los minerales carbonatados. Este método está basado en que algunos minerales tienen la capacidad de

absorber los iones coloreados de determinados reactivos químicos y formar, en su superficie, películas coloreadas. La realización del análisis pelicular no requiere equipos especiales ni reactivos complejos.

El fenómeno de adsorción de los iones coloreados es característico por ejemplo, de la calcita, la cual a diferencia de la aragonita y de la dolomita, cuando se introduce en una solución molar de ácido de cobre azul la aragonita, a diferencia de la calcita, adsorbe en su superficie la sal de $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ de color azul violeta.

Las partículas coloreadas en la superficie de los minerales pueden formarse también a consecuencia de las reacciones químicas de intercambio corriente. Por ejemplo, si se echa siderita (FeCO_3) o anquerita ($\text{Ca}(\text{MgFe})(\text{CO}_3)_2$) en una solución de $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ al 5 % y se le añade HCl (1:20), en la superficie de los minerales se forma una película azul debido al hierro de la siderita y de la anquerita.

La coloración de la mena con el objetivo de diagnosticar los carbonatos es mejor realizarla en las superficies pulida de las muestras. Su utilización permite, además de la confirmación del hecho de la presencia de un determinado mineral, establecer su distribución superficial, contenido relativo, magnitud y particularidades texturales.

En la calidad de ejemplo, analicemos la reacciones de análisis pelicular para algunos minerales carbonatados.

1. Determinación de la calcita (CaCO_3). La calcita se relaciona con el grupo de minerales no meníferos, pero con mucha frecuencia aparece en la composición de las menas y se debe diagnosticar para diferenciarla de minerales muy parecidos a ella, como la siderita, anquerita, cerusita, etcétera.

Para determinar la calcita, la muestra, durante 3-4 horas se trata con una solución molar de nitrato de cobre, lo que provoca el surgimiento, en la superficie de la calcita, de una coloración azul que se intensifica debido a la posterior acción del amoníaco sobre ella.

2. Determinación de la anglesita (PbSO_4). En la sección pulida la anglesita se puede establecer por la acción de una solución al 5 % de yoduro de potasio. Si hay anglesita, sobre su superficie se forma una película amarilla. Cuando se observa con luz reflejada bajo el microscopio, las partes correspondientes a la anglesita aparecerán de color azul. Con esta reacción es fácil establecer la anglesita que se encuentra finamente desarrollada con cerusita, la cual no sufre reacción mencionada, y en condiciones normales se diferencian con dificultad de la anglesita.
3. Determinación de la cerusita (PbCO_3). Se determina también, como la anglesita, sólo que a la solución al 5 % de yoduro de potasio se le añade una cantidad igual en volumen de HCl (1:20) o de H_2SO_4 (1:20).

CAPITULO 14

ATAQUE LUMINICO

4. Determinación de la smithsonita ($ZnCO_3$). Actúa sobre la sección pulida $Cu(NO_3)_2 + HNO_3$ (1:20) y $HgCl_2 + KCNS$. Bajo la influencia de estos reactivos sobre la superficie de la smithsonita (y de la hidrocinquita) se forma una película color violeta.
5. Determinación de la scheelita ($CaWO_4$). La superficie pulida del mineral o de los minerales se humedece con ácido clorhídrico y se coloca sobre ella un pedacito de estaño. Al cabo de 1-3 minutos la sección pulida se seca con papel de filtro si hay scheelita, entonces su superficie se cubre con una película azul. La reacción transcurre mejor, si se calienta.

El ataque lumínico pertenece al grupo de las propiedades físico-químicas de los minerales, pero se incluye en los métodos químicos de diagnóstico de los minerales meníferos. Esto está relacionado con el hecho de que aunque la variación de la superficie pulida de los minerales no ocurra bajo la acción de un reactivo químico, sino bajo la acción de la luz, el carácter de la reacción tiene naturaleza química.

El estudio de los resultados del ataque lumínico se relaciona con métodos especiales de investigación y en la práctica de minerografía es muy limitado. Esto está condicionado porque el ataque lumínico ayuda a la determinación de solamente algunos minerales que contienen plata.

La influencia de luz sobre los minerales que contienen en su composición química la plata, fue establecida en 1927 por Makiustry. Este efecto se hace más comprensible si se recuerda que en la composición de todos los materiales sensibles a la luz utilizados en fotografía siempre se encuentran combinaciones de plata.

La acción externa de una iluminación intensa se manifiesta en el oscurecimiento del mineral, en la disminución de su calidad de reflejo. Esto ocurre como resultado de la reacción provocada por un flujo de luz. La reacción está acompañada del desprendimiento de burbujas muy pequeñas y de esferitas metálicas, cuya aparición hace que la superficie del mineral se arrugue, como consecuencia de lo cual se observa el oscurecimiento del mineral con luz reflejada.

Como fuente de luz más intensa, en algunos casos, se utiliza el arco de volta, desde el cual se dirige la luz a través del iluminador opaco.

Stefens (1931), que estudió muy cuidadosamente el fenómeno del efecto fotoquímico, señala los siguientes datos acerca del tiempo necesario para obtener el efecto de ataque lumínico en los minerales que contienen plata durante la utilización del arco de volta como fuente de luz.

Argentita: Ag_2S - 4 s

Polibasita: $8 Ag_2S - Sb_2 S_3$ - 5 s

Petzita: $(Ag_1Au) Fe_2$ - 6 s

Hessita: Ag_2Fe - 10 s

Angorita: $2 PbS Ag_2S 3SbS_3$ - 10 s

Estefanita: $5 Ag_2 S Sb S_3$ - 15 s

Pirargirita: $3\text{Ag}_2\text{S Sb}_2\text{S}_3 - 20\text{ s}$
Proustita: $3\text{Ag}_2\text{S As}_2\text{S}_3 - 90\text{ s}$

El efecto del ataque lumínico se puede observar también con un bombillo, como fuente de luz prevista en el iluminador opaco (microscopio MIN-9). Para esto se aplica la iluminación más intensa al campo visual y del iluminador opaco se elimina el polarizador, que absorbe una parte considerable de luz. El tiempo de ataque es poco, pero proporcionalmente mayor que en los datos señalados anteriormente para el arco de Volta.

La luz ambiental no provoca el ataque lumínico. Sin embargo, bajo los rayos solares directos muchos minerales que contienen plata se oscurecen notablemente. Se recomienda someter a ataque lumínico las superficies recientemente pulidas y durante el ataque cubrir una parte de la superficie del mineral investigado con el diafragma del campo visual.

La parte oculta del mineral no varía bajo la acción de la luz y puede servir para comparar con la parte alterada.

CAPITULO 15

ESTRUCTURAS DE LAS MENAS

15.1. GENERALIDADES

El estudio de las particularidades texturales-estructurales de las menas es una de las tareas más importante durante la investigación de los yacimientos minerales metálicos. Como particularidades texturales-estructurales se entiende todo un conjunto de índices físicos y morfológicos que caracterizan la mineralización menífera. Estas particularidades son: la estructura interna de los agregados minerales, su posición espacial y el carácter del crecimiento; las dimensiones y las formas, las alteraciones postmeníferas y las asociaciones paragenéticas, etcétera.

De los resultados de los estudios de las particularidades textural-estructurales de las menas se determinan la consecutividad de edades de los agregados minerales y minerales; se esclarecen los procesos de formación de las menas y se establecen los estadios de mineralización; lo que a su vez, permite hacer las conclusiones acerca de las condiciones de formación del yacimiento o de su génesis. Las particularidades textural-estructurales se utilizan al elaborar esquemas efectivos de beneficio y durante el tratamiento mecánico de las menas en los procesos metalúrgicos.

La tarea del estudio de las estructuras de las menas, como método de investigación mineralógico, se basa en la determinación de las formas texturales y estructurales, en el conocimiento de su esencia genética, en el esclarecimiento de las condiciones físico-químicas y geológicas durante los procesos de formación de las menas.

El estudio de las estructuras de las menas se realiza en todos los estadios de búsqueda, exploración y explotación de los yacimientos minerales.

Los métodos fundamentales del estudio de las particularidades texturales de las menas son los siguientes:

1. Documentación geológica de las excavaciones mineras.
2. Documentación geológica del testigo de perforación.
3. Estudio macroscópico de las muestras.
4. Estudio macroscópico de las muestras pulidas.
5. Investigación microscópica de las secciones pulidas.

El estudio de las estructuras de las menas comienza con la observación de las particularidades de la textura de los agregados minerales; de las mues-

tras de excavaciones mineras y pozos y concluye con la investigación de la estructura de los granos minerales bajo el microscopio. Las conclusiones acerca de la génesis de la mineralización menífera tienen que basarse en todo un complejo de datos geológicos. La utilización solamente de los resultados de las investigaciones textural-estructurales de las menas puede provocar una interpretación incorrecta de la génesis de un yacimiento mineral.

Lo anterior está relacionado con el hecho de que en las menas de diferentes génesis con frecuencia se encuentran estructuras y texturas morfológicamente semejantes y para interpretarlas no solamente es necesario el estudio cuidadoso de la estructura interna de los agregados minerales y de los granos que lo forman, sino conocer además los factores geológicos y físico-químicos que regulan los procesos de formación de las menas.

Entre textura y estructura de una mena existe una diferencia considerable, y estos dos conceptos no se pueden confundir, aunque en algunos casos es difícil o imposible establecer un límite exacto entre estos dos términos.

La textura de la mena se determina por la forma, dimensión y correlación espacial de los agregados minerales. Por consiguiente, la unidad morfológica que determina la textura es el agregado mineral. Los índices que se utilizan durante la determinación de los tipos morfológicos de textura y de sus grupos genéticos, se llaman particularidades morfológicas del agregado mineral. Lo más importante de ellos son la forma, dimensión, composición química y mineralógica, condiciones de formación y alteraciones secundarias.

El estudio de las texturas de las menas se realiza en los frentes de las excavaciones minerales, en los testigos de los pozos, en las muestras pulidas, es decir, la textura, con rara excepción, es objetivo de microinvestigaciones; constituyen excepciones las llamadas microtexturas características, por ejemplo, de las formaciones coloidales, las que se observan solamente bajo el microscopio.

Las estructuras de la mena se determina por la forma, dimensiones y carácter del crecimiento de los granos minerales. A diferencia de la textura, la unidad morfológica que determina la estructura es el grano o el cristal del mineral.

La estructura de las menas tienen diferencias notables con respecto a la estructura de las rocas. Estas diferencias son las siguientes:

1. La estructura de la roca es un índice característico inherente a dicha roca. La estructura de las menas puede variar en partes muy pequeñas, que puede ser una sección pulida o una parte de ella que sea visible en el campo visual del microscopio. De esta forma, en una sección pulida o incluso en un campo visual, podemos ver dos o varias formas estructurales.

2. Las numerosas alteraciones de las formas de deposición de la sustancia menífera están condicionadas por su menor estabilidad y efecto exterior en comparación con las rocas.
3. La gran diversidad de formas y la estable irregularidad de los agregados meníferos y granos minerales en comparación con las de los minerales de las rocas.

A diferencia del tamaño de los minerales formadores de menas, la estructura puede ser estudiada macroscópica y microscópicamente, pero en la mayoría de los casos las estructuras de las menas se estudian bajo el microscopio y sólo bajo el mismo se puede establecer la mayoría de los índices que determinan el tipo morfogenético de estructura.

Las estructuras reflejan las condiciones de cristalización de las soluciones; de la fusión de la sustancia mineral sólida y de los productos y el reflejo de las condiciones de las alteraciones postmeníferas de la sustancia mineral. De esta forma, las estructuras se encuentran en dependencia de las condiciones físico-químicas de la formación de los minerales y su estudio permite conocer las mismas.

Dado el hecho de que las texturas de las menas se analizan en el curso de yacimientos minerales, no nos detendremos en ello, sino que analizaremos solamente las estructuras de las menas cuya descripción se da en correspondencia con su clasificación genética y se subdivide en los siguientes tipos genéticos:

1. Estructuras de cristalización.
2. Estructuras de descomposición de las soluciones sólidas.
3. Estructuras de desvitrificación de los coloides.
4. Estructura de sustitución.
5. Estructuras metamórficas.

Para cada tipo genético se expone una breve descripción de las variedades morfogenéticas fundamentales que representan cada tipo de estructura.

El estudio de los minerales meníferos revela una gran variedad de estructuras, para su descripción se utiliza una terminología tomada, fundamentalmente, de la petrografía. Es por eso que muchos términos que caracterizan las particularidades estructurales de las menas, tienen el mismo sentido que en las descripciones petrográfica de las rocas.

15.2. ESTRUCTURA DE CRISTALIZACION

Este grupo comprende la estructuras que se han formado a consecuencia de los procesos de cristalización de la sustancia mineral a partir del magma líquido, de las soluciones hidrotermales, de los productos gaseosos, así

como también las que han surgido durante la metasomatosis hidrotermal o durante los procesos de la formación de las menas en los *scarn*.

La formación de estas estructuras está relacionada con las condiciones de cristalización y con las propiedades de cristalización de la sustancia. La sustancia mineral se caracteriza por tener capacidad y velocidad de cristalización.

La capacidad de cristalización es la propiedad de la sustancia de dar uno varios números de centros de cristalización en una unidad de tiempo; por consiguiente, mientras más elevada es la capacidad de cristalización de la sustancia, mayor cantidad de centros de cristalización se forman y menor será la dimensión de cada grano mineral, es decir, se forma un agregado de granos pequeños; cuando la capacidad de cristalización es baja tendremos un cuadro invertido.

La velocidad de cristalización es la velocidad lineal del desarrollo de los cristales en una unidad de tiempo. Cuando la velocidad de cristalización es alta, los cristales crecen rápidamente; pero no dan formas cristalógraficas. Una velocidad de cristalización pequeña provoca el surgimiento de cristales regulares por la forma y generalmente iguales por la dimensiones.

Así, por la forma exterior de los granos minerales y por su dimensiones relativas se puede tener una idea sobre el carácter de los procesos de cristalización durante la formación de las menas.

Con el grupo externo fundamental que influye sobre las condiciones de cristalización se relacionan la temperatura, la presión y el grado de sobresaturación de las soluciones. La temperatura influye directamente sobre la velocidad y la capacidad de cristalización mientras mayor es el grado de enfriamiento del líquido en el momento de comenzar la cristalización, mayor será el número de centros de cristalización que surgirá en él y mayor será la velocidad de desarrollo del mineral. De esta forma, el enfriamiento insignificante del líquido provoca la formación de agregados granuloso cristalinos.

Los descensos bruscos de la temperatura provocan la formación de agregados de granos finos, incluso criptocristalinos; un enfriamiento brusco de la sustancia conduce a la formación del gel de estructura amorfa.

La presión, en comparación con la temperatura, juega un menor papel, pero de todas formas considerable, en el proceso de cristalización; una presión elevada contribuye a la formación de los cristales.

Así por ejemplo, el aumento de la presión en otras condiciones iguales, generalmente provoca el proceso de desvitrificación de los coloides; la disminución de la presión conduce a la formación de masa criptocristalina o coloidal, lo cual está relacionado con la eliminación de las soluciones a una presión baja, de los componentes gaseosos que contribuyen a la intensificación de los procesos de cristalización.

Una dependencia evidente se observa entre las propiedades de cristalización y el grado de sobresaturación de las soluciones.

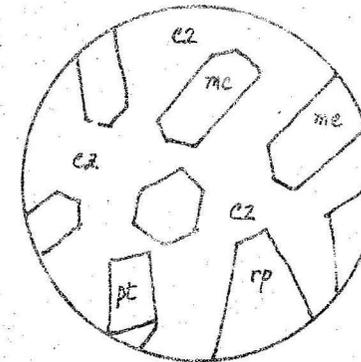
Así, soluciones débilmente sobresaturadas dan cristales complejos por la forma cristalógrafica y generalmente grandes; de las soluciones más sobresaturadas surgen agregados de granos pequeños y finos. Cuando ocurre una brusca sobresaturación puede formarse masas coloidales que no tienen estructura cristalina.

De esta manera, las estructuras de este grupo genético se caracterizan por la presencia de diferentes granos cristalinos de minerales o de sus agregados. La estructura criptocristalina de la sustancia menifera no es típica de este grupo.

Entre las estructuras de cristalización se distinguen las siguientes variedades morfogénicas fundamentales; en las que se describen breves características de las mismas.

15.3. ESTRUCTURA PANIDIOMORFICA GRANULOSA

Los granos de minerales tienen formas cristalógraficas completas idiomórficas; esta estructura caracteriza condiciones muy favorables de cristalización y en las menas se encuentra muy raramente. Como ejemplo pueden servir la pirita, marcasita, arsenopirita de los yacimientos hidrotermales de temperaturas medias, incrustación dispersa de cromita en algunos yacimientos magnéticos; y en menas de albitas-grissen.

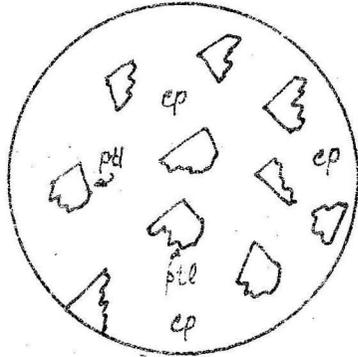


Leyenda
rp – arsenopirita
pt – pirita
mc – marcasita
cz – cuarzo

FIGURA 15.1. Cristales idiomórficos de sulfuros en cuarzo. Yacimientos de albita-grissen.

Estructura hipidiomórfica granulosa. Son diferentes granos de minerales que tienen forma cristalográfica parcialmente desarrollada.

Es característica de menas complejas, en las cuales los minerales formadores de menas poseen propiedades de cristalización diferentes. Esta variedad del tipo de cristalización está ampliamente distribuida en menas que se han formado en el proceso de deposición consecutiva de los minerales y es muy característica de los yacimientos piríticos e hidrotermales.



Leyenda
ptl – pentlandita
cp – calcopirita

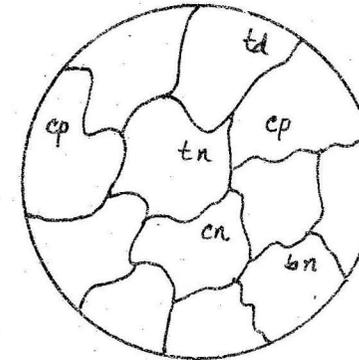
FIGURA 15.2. Yacimientos magmáticos de licuación.

Estructura aliotriomórfica granulosa. Son granos de minerales irregulares que poseen, en dicha condiciones, propiedades de cristalización parecidas. Está muy ampliamente distribuida en los yacimientos de menas sulfurosas.

Estructura sideronítica. Es una variedad de la estructura aliotriomórfica granulosa, característica de los yacimientos magmáticos de cromita y de titanio-magnetita.

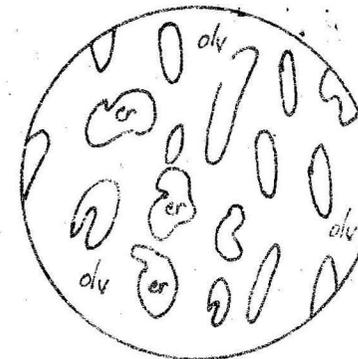
Aquí el mineral menífero cristaliza antes del silicato (olivino-piroxeno) y forma separaciones xenomórficas irregulares en los espacios entre los granos del silicato, como si cementara a estos últimos.

Estructura porfídica. Es la existencia de granos grandes generalmente idiomórficos de un mineral menífero en una masa incrustada continua o de granos pequeños de otro mineral menífero o de diferentes minerales meníferos. Los granos, como regla, son una formación más temprana y con frecuencia son corroídos en mayor o menor grado por las posteriores. Como ejemplo puede servir los yacimientos de menas sulfurosas en las que se observan separaciones porfídicas de pirita en la masa de pirrotina.



Leyenda
cp – calcopirita
bn – bornita
tn – tennantita
td – tetraedrita
Cn – cubanita

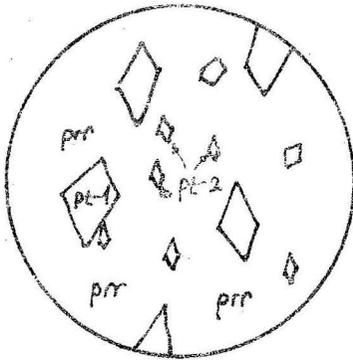
FIGURA 15.3. Yacimientos hidrotermales de menas sulfurosas de cobre.



Leyenda
cr – cromita
olv – olivino

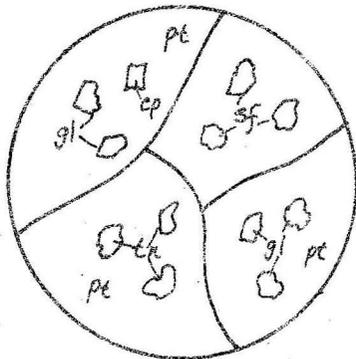
FIGURA 15.4. Yacimientos magmáticos de espinelas cromíferas.

Estructura poiquilitica. Son inclusiones o entrecrecimientos de granos pequeños de un mineral menífero en un cristal grande o grano de otro mineral menífero. La forma de los entrecrecimientos generalmente es irregular y su distribución no es regular. Como ejemplo de dicha estructura pueden servir las menas piríticas de cobre o las pirítico-polimetálicas, en las cuales los cristales grandes de pirita frecuentemente contienen inclusiones de calcopirita, esfalerita, galena o cobre gris. Con esta variedad de estructuras se pueden relacionar las inclusiones de granos pequeños de magnetita



Leyenda
 prr - pirrotina
 pt-1 - pirita de -
 primera generación.
 pt-2 - pirita de -
 segunda generación.

FIGURA 15.5. Yacimientos hidrotermales plutógenos.



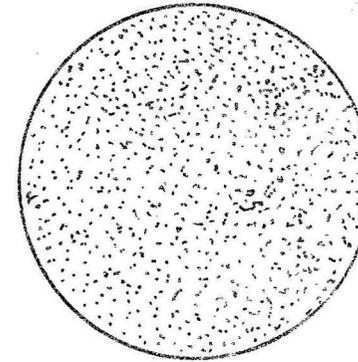
Leyenda
 pt - pirita
 gl - galena
 cp - calcopirita
 tn - tennantita
 sf - esfalerita

FIGURA 15.6. Yacimientos pirítico-calcopiríticos y polimetálicos.

en esfalerita en las menas de zinc de los yacimientos piríticos de los Urales y de la esfalerita en magnetita de algunas menas de *scarn*.

Estructura cryptocristalina o afanítica. Es un agregado mineral cuyo diferentes cristales o granos no son diferenciables incluso bajo el microscopio. Dichas estructuras se forman durante el brusco enfriamiento de las soluciones o durante su brusca sobresaturación en relación con una rápida disminución de la presión debido a la masa fundamental de este disolvente.

Durante los procesos posteriores de metamorfismo las masas cryptocristalinas se someten fácilmente a recristalización, y por eso raramente se encuentran en las menas.



Leyenda
 pt - c - pirita
 coloidal.
 (melnikovita)

FIGURA 15.7. Yacimientos piríticos y polimetálicos estratiformes.

Estructura gráfica. Es una variedad o combinación de la allotriomórfica granulosa y la poiquilítica. Está condicionada por el mutuo crecimiento de dos minerales meníferos en determinada regularidad (semejante a la estructura del granito gráfico).

En las menas esta estructura se encuentra muy raramente e indica la simultaneidad de segregación de los minerales meníferos.

15.4. ESTRUCTURA DE DESCOMPOSICION DE LAS SOLUCIONES SOLIDAS

La formación de este tipo de estructura ocurre en relación con la variación de las condiciones físico-químicas que existieron en el momento de descomposición de las menas. Al variar la presión y la temperatura en el período postmenifero las combinaciones complejas iniciales que forman la sustancia menífera se vuelven inestables y se descomponen en minerales más simples, estables en las nuevas condiciones físico-químicas.

El proceso de descomposición se fundamenta en que una parte de los componentes que entran en la composición del cristal o del grano en el momento de su formación en forma de solución sólida o mezcla isomorfa y con la disminución de la presión y la temperatura, se aíslan en forma de combinaciones minerales independientes en este mismo cristal o grano.



Leyenda
 rg – rejalgar
 rt – oropimente
 pt – pirita

FIGURA 15.8: Yacimientos hidrotermales de temperaturas medias y bajas.

Este proceso tiene lugar en la fase sólida de la sustancia menífera y por eso se denomina de descomposición de las soluciones sólidas.

Las estructuras que reflejan el proceso de descomposición de las soluciones sólidas son entrecrecimientos finos y generalmente regulares de un mineral en otro; estas estructuras se observan solamente bajo el microscopio y con frecuencia sólo con grandes aumentos. Son de gran interés desde el punto de vista del establecimiento de la temperatura de formación de las menas, porque la descomposición de las soluciones sólidas ocurre a determinadas temperaturas, la cuales se han establecido para muchos pares de combinaciones minerales o pueden establecerse por vía experimental.

A continuación se relacionan algunos pares de minerales meníferos que forman estructuras de descomposición de soluciones sólidas, señalándose la temperatura a la cual se produce la formación de las fases mineralógicas

Pares minerales	Temperatura (°C)
Magnetita-espinela	800
Magnetita-ilmenita	700
Oligisto-ilmenita	675
Calcopirita-pirrotina	600
Estannina-calcopirita	500
Calcopirita-tetraedrita	500
Estalerita-calcopirita	500

Pares minerales	Temperatura (°C)
Bornita-calcopirita	475
Cubanita-pentlandita	450
Pirrotina-pentlandita	450 - 425
Pirrotina-calcopirita	350 - 550
Bornita-calcosina	175 - 225
Calcosina-covelina	70 - 75

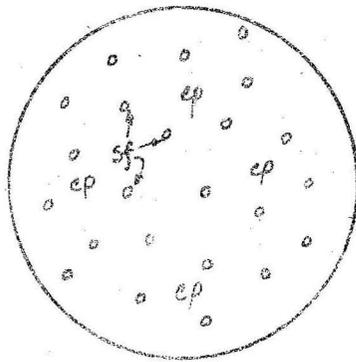
Las estructuras de descomposición de las soluciones sólidas sirven como termómetros geológicos o mineralógicos por los cuales se puede juzgar aproximadamente sobre la temperatura de formación de las menas. La metodología para determinar las temperaturas de descomposición es bastante simple. La sección pulida que contiene minerales con estructura de descomposición, se calienta lentamente y se observa bajo el microscopio. En el momento en que desaparece (se disuelve) la estructura, se fija la temperatura de calentamiento, la cual corresponderá a la temperatura de descomposición. Al mismo tiempo, esta temperatura dará un valor aproximado (algo bajo) de la temperatura del proceso de formación de las menas.

1. Minerales, inclusiones que poseen límites bruscos regulares.
2. Disminución del ancho de las láminas minerales en los lugares de su intersección o combinación.
3. Inclusiones de minerales no relacionados con grietas, límites de los minerales a otros elementos que contribuyen a los procesos de sustitución.
4. Minerales, inclusiones que presentan diferentes cristales o granos, y no sus entrecrecimientos.

En el grupo de las estructuras de descomposición de las soluciones sólidas se incluyen las siguientes variedades fundamentales.

Estructura de emulsión. Son separaciones de granos redondos o redondeados pequeños o muy pequeños de un mineral (mineral de los entrecrecimientos) en la masa fundamental del otro (mineral de la masa fundamental). Estas separaciones poseen configuraciones regulares y en la mayoría de los casos están regularmente dispersos en el mineral de la masa fundamental. Algunas veces, el mineral de los entrecrecimientos forma partes aisladas de incrustaciones o se encuentra situado en cadena interrumpida a lo largo de las direcciones del clivaje, maclas y zonas de desarrollo del mineral de la masa fundamental.

Como ejemplo de esta variedad de estructura puede servir la incrustación de emulsión de calcopirita en esfalerita, que con frecuencia se

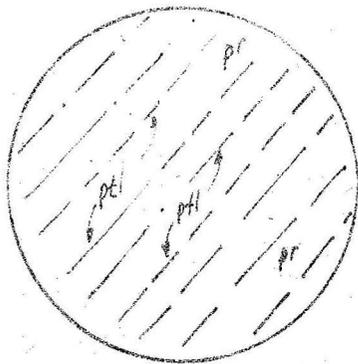


Leyenda
 sf - esfalerita
 cp - calcopirita

FIGURA 15.9. Yacimientos magmáticos hidrotermales, de scarn y piríticos.

encuentra en menas sulfurosas, pirrotina en esfalerita, calcopirita en estamina, iridio, en platino, etcétera.

La estructura laminar. Son entrecrecimientos de forma laminada de un mineral menifero en otro cuando las láminas están situadas paralelamente en los límites de un grano de mineral de la masa fundamental. La disposición de las láminas corresponde a una de las fases sólidas; es característica de pares de minerales tales como pirrotina-pentlandita, cubanita-calcopirita,



Leyenda
 ptl - pentlandita
 pr - pirrotina

FIGURA 15.10. Yacimientos magmáticos, hidrotermales, scarn y polimetálicos.

magnetita-ilmenita, esfalerita-calcopirita y otros (el primero es el mineral de la masa fundamental, el segundo comprende al entrecrecimiento).

La estructura reticular. Es una variedad de la estructura laminada y se caracteriza por separaciones laminares del mineral de las conclusiones en dos direcciones (algunas veces más) de clivaje en el mineral de la masa fundamental. Las láminas de cada dirección son paralelas entre sí en los límites de un grano o cristal y están situadas en ángulos casi rectos, formando como una malla. Esta variedad de estructuras se encuentran en

Leyenda
 Im - ilmenita
 mg - magnetita

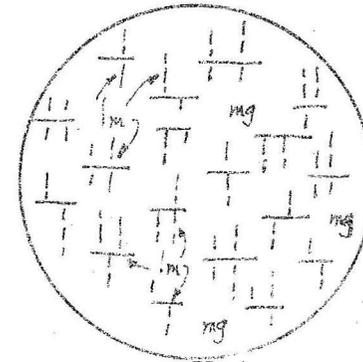


FIGURA 15.11. Yacimientos magmáticos hidrotermales y de scarn

combinación con pares de minerales tales como ilmenita-magnetita, ilmenita-hematita, calcopirita-bornita y otros.

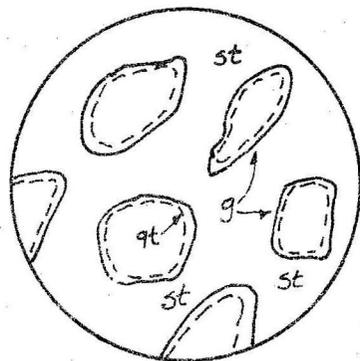
La estructura de nudos. Se forma en el caso de que uno de los minerales durante la descomposición de la solución sólida se aisle en la periferia de otro en forma de láminas finas curvadas. Esta variedad de estructura se observa en los pares de minerales pentlandita-pirrotina; argentita-galena y algunos otros.

La estructura con forma de llama. Es una variedad de la estructura con forma de nudos.

En este caso un mineral forma a lo largo de las direcciones del clivaje o en la periferia del mineral de la masa fundamental, inclusiones alargadas ramificadas que se cuñan como si fueran lenguas de fuego. Dicha estructura se encuentra en pirrotina-pentlandita, raramente en otras condiciones.

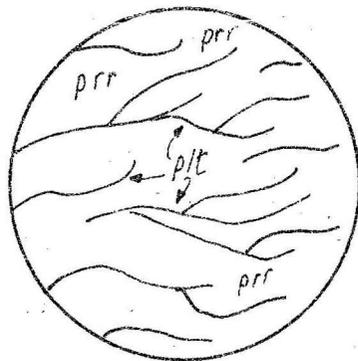
La estructura zonal. Es una estructura de descomposición de las soluciones sólidas, caracterizada por la presencia de grandes cristales de uno de los minerales que forman la solución sólida; el mineral menifero que forma

las inclusiones se localiza en forma de finas burbujas de emulsión en la periferia de los cristales grandes. Es una variedad de estructura poco



Leyenda
g - galena
gt - argentita
st - minerales no metálicos.

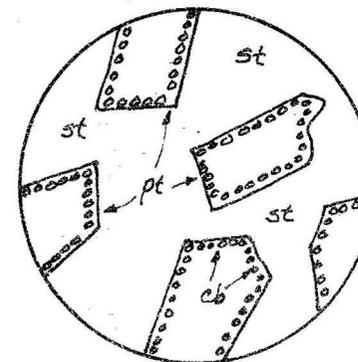
FIGURA 15.12. Yacimientos de albita-greissen, hidrotermales, pirítico-calcopiríticos y polimetálicos.



Leyenda
prf - pirrotina
pit - pentlandita

FIGURA 15.13. Yacimientos magmáticos de licuación y tardíos de titanio-magnetita. frecuente y se presenta en magnetita-hematita; pirita-cobaltina; bornita-pirita y otros.

Estructura de desvitrificación. Caracterizan a los crecimientos minerales que se han formado en las menas debido a la desvitrificación de los coloides en estado sólido bajo la influencia de la variación de temperatura y presión.



Leyenda
pt - pirita
cb - cobaltina (burbujas)
ct - minerales no metálicos.

FIGURA 15.14. Yacimientos hidrotermales plutógenos, scarn y metamorizados.

Las variedades morfológicas de estas estructuras se determinan por las formas y por las dimensiones relativas de los granoblastos en el agregado mineral.

Las sustancias coloidales son inestables en la naturaleza y con el tiempo, en determinadas condiciones, pasan a ser formaciones cristalinas más estables en la naturaleza. A la desvitrificación de los coloides contribuyen los siguientes factores:

1. Incremento de la temperatura durante un tiempo prolongado.
2. Incremento de la presión.
3. Sacudidas mecánicas prolongadas.
4. Energía radiada (radioactiva o ultravioleta).
5. Propiedades de cristalización de las sustancias.

En el último caso además de la capacidad y la velocidad de la cristalización de la sustancia, tiene una gran importancia la "fuerza de la cristalización", es decir, la capacidad del nuevo mineral formado, de desarrollar formas cristalográficas propias en las condiciones de un medio físico-químico específico.

Durante el proceso de desvitrificación de los coloides surgen formas intermedias de las sustancias coloidales a un verdadero cristal; así los minerales que se forman de un gel al pasar al estado cristalino se denominan metacolooides; lo que se diferencia de las formas iniciales del coloide, por su bajo contenido en agua estructural y por su estructura cristalina.

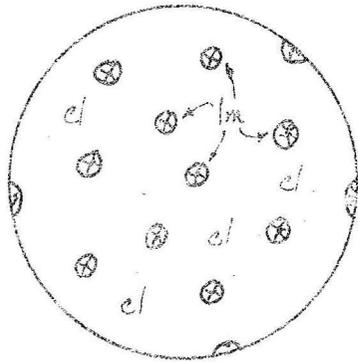
La desvitrificación de los coloides se expresa esencialmente por el surgimiento de centros de cristalización y en la posterior reagrupación, alrededor

de ellos de la fase de dispersión del coloide. Las formas de los minerales que surgen dependen de la velocidad de cristalización y distribución de los centros de cristalización.

Las variedades morfológicas más características del grupo de estructura de desvitrificación son las siguientes:

Las estructura esferolítica

Se forma en el proceso de desvitrificación de los geles de composición homogénea; se caracteriza por contornos exteriores redondeados con estructura interna radiada; durante la desvitrificación el desarrollo de los minerales ocurre, en estos casos, desde el centro de la esfera hacia la



Leyenda
lm - limonita
cl - calcita

FIGURA 15.15. Yacimientos sedimentarios, de infiltración

periferia.

La estructura radiada

Es una variedad de la esferolítica, pero con la condición de que el crecimiento del cristal desde un centro no está limitado por los contornos redondeados externos.

Como resultado del desarrollo de dichas estructuras pueden surgir cristales de formas estrelladas, de abanico y aciculares. Las estructuras radiada y esferolíticas de minerales tales como la hematita, pirolusita, marcasita, pirita, malaquita y muy raramente de otros.

La estructura zonal concéntrica

Se forma debido a la deposición consecutiva de capas finas alrededor de un centro. Sus contornos exteriores son redondos o redondeados, y las capas internas repiten la forma exterior; dicha estructura algunas veces se relacionan con microestructuras y es característica de las menas hematiti-

cas, limoníticas y pirolusíticas de génesis sedimentaria y de la precipitación de geles de origen hidrotermal.

Leyenda
mq - cristales radiados de malaquita

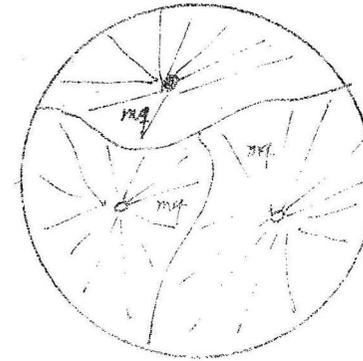


FIGURA 15.16. Yacimientos sedimentarios, zona de oxidación de menas sulfurosas de cobre, yacimientos de infiltración.

Leyenda
ht - hematita coloidal.
st - minerales no metálicos.

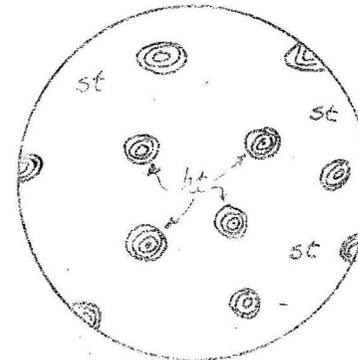


FIGURA 15.17. Yacimientos hidrotermales vulcanógenos: menas sedimentarias.

Una variedad de esta estructura es la colomorfa-metacoloidal, que surge en el proceso de desvitrificación de los agregados coloidales polimineral, esta estructura se caracteriza por la alteración polimineral de las capas más finas formadas por dos o varios minerales.

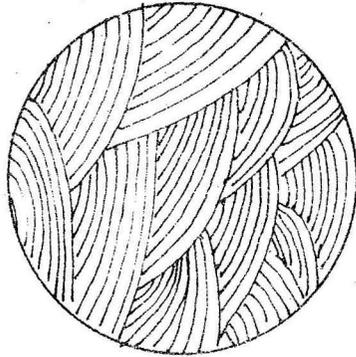
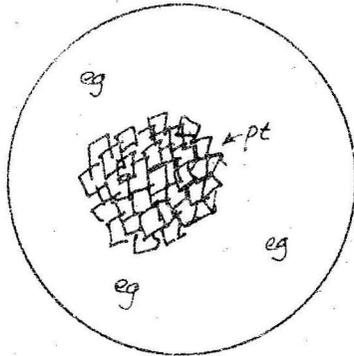


FIGURA 15.18. Yacimientos hidrotermales vulcanógenos, sedimentarios y de intemperismo (infiltración). Las capas pueden ser de un mismo mineral o de varios minerales.

La estructura idiomorfo-blástica o idioblástica

Refleja la estructura del agregado mineral cuando los blastogranos del mineral que lo forma tienen formas cristalográficas claramente expresadas. Esta variedad de estructura se encuentra con mayor frecuencia en los yacimientos de génesis metamórfica.



Leyenda
 pt – pirita
 eg – esquistos grafiticos

FIGURA 15.19. Yacimientos de menas metamorfisadas.

La estructura hipidiomorfo-blástica o granoblástica

Caracteriza aquellos procesos de desvitrificación de los coloides, cuando los granoblastos de los minerales meníferos poseen diferentes grado de idiomorfismo, es decir, cuando junto con formas cristalinas bien desarrolladas se encuentran cristales parcialmente desarrollados y granos de forma irregular. Una particularidad característica de esta variedad de estructura son los límites exactos de los granos sin índice de corrosión. Con frecuencia se observa en menas de génesis metamórfica y en las menas de *scarn*.

Leyenda
 mg – magnetita.
 hm – hematita.
 st – minerales no metálicos.

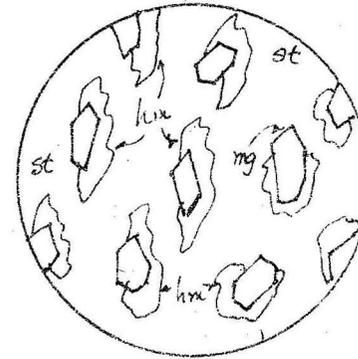


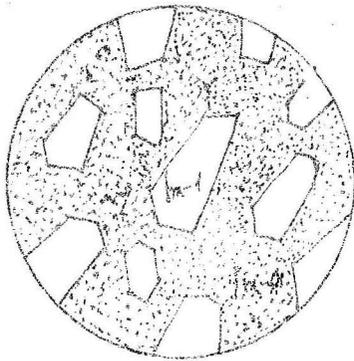
FIGURA 15.20. Yacimientos metamorfogénicos de scarn y raramente hidrotermales.

La estructura porfiloblástica

Se relaciona con la variedad hipidiomorfo-blástica y está condicionada por la presencia de granos grandes aislados de mineral entre la masa fundamental de sus formaciones pequeñas. La diferencia en las dimensiones de los granos del agregado está relacionada con el diferente tiempo en que comenzó la cristalización y la desigual velocidad del propio desarrollo de los minerales.

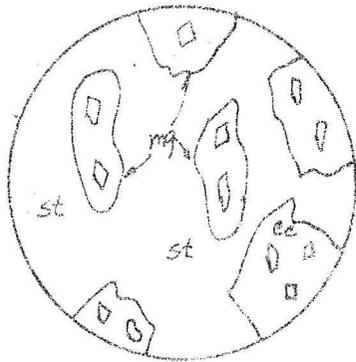
La estructura porquiloblástica

Surge durante la desvitrificación de los coloides de composición heterogénea, lo que provoca la formación de agregados minerales; al ocurrir esto, los granos grandes de un mineral contienen inclusiones pequeñas de otro mineral.



Leyenda
 Lm 1 - limonita
 (1ra. generación)
 Lm 2 - limonita
 (2da. generación)

FIGURA 15.21 Yacimientos sedimentarios, zona de oxidación de menas sulfurosas.

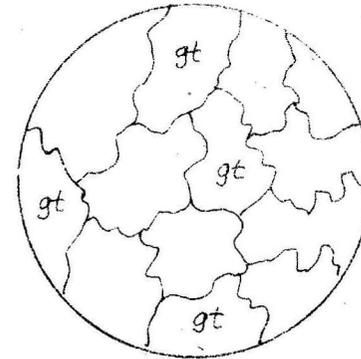


Leyenda
 mq - malaquita
 cc - calcosina
 st - minerales no
 metálicos.

FIGURA 15.22 Yacimientos sedimentarios, zona de enriquecimiento secundario de menas sulfurosas.

La estructura alioitriomorfoblástica

Se caracteriza por la total ausencia de formas cristalográficas y por granos de forma irregular. A diferencia de las estructuras alioitriomórfica granulosa de cristalización, generalmente posee estructura de granos regulares y los granoblastos no tienen forma corrosivas de crecimiento entre sí.



Leyenda
 gt - goethita

FIGURA 15.23 Yacimientos sedimentarios, zona de oxidación, raramente en menas hidrotermales.

La estructura blástica orientada.

Se forma durante la desvitrificación en condiciones de alta presión. Los granoblastos tienen forma alargada, están situados subparalelamente entre sí y están orientados por la longitud, perpendicularmente a la dirección de la presión. Su presencia en las menas indica la recristalización en condiciones de presión en una sola dirección. Estas estructuras son características

Leyenda
 pt - pirita orientada
 ct - calcita

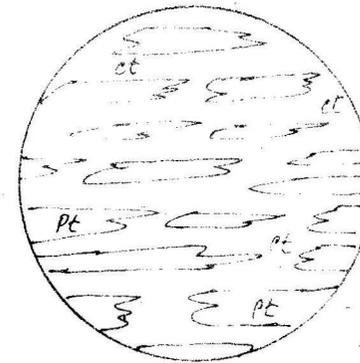


FIGURA 15.24 Yacimientos metamórficos

de los yacimientos metamórficos y están ampliamente distribuidas en menas piríticas con textura bandeada.

15.5. ESTRUCTURA DE SUSTITUCIÓN

Tienen una amplia distribución en yacimientos exógenos y endógenos. El proceso de sustitución puede ocurrir debido a la deposición de la mena en el lugar de las rocas encajantes (sustitución de la roca por el lugar de la mena) y en el lugar de la mena que se formó anteriormente (sustitución de la mena).

La formación de la estructura de sustitución reflejan la consecutividad de los procesos de alteración metasomática que se desarrolla entre los componentes de las rocas y las soluciones hidrotermales; las que aportan los minerales meníferos; así mismo son portadoras de los cambios bruscos de las condiciones físico-químicas que influyen sobre estos procesos.

Así la variación de la temperatura, presión, concentración de los compuestos en las soluciones contribuyen a la disolución de unos minerales y a la deposición de otros. La sustitución metasomática representa al mismo tiempo el proceso de disolución de uno o varios minerales y la deposición de otro mineral sin alterar el volumen de la mena o de la roca e incluso, en ocasiones, prevalecen las estructuras primarias del mineral sustituido. En algunos casos los procesos de sustitución desarrollaron muy intensamente y en dichos yacimientos las estructuras de sustitución en las menas pueden no aparecer a consecuencia de la total transformación de la sustancia mineral primaria. Aquí vemos fundamentalmente estructuras de cristalización, aunque se forman debido a los procesos de sustitución metasomática.

La estructura de sustitución juegan un papel fundamental en la solución de los problemas genéticos de la formación de menas.

Contribuyen a establecer los estadios de deposición de las menas la consecutividad de formación de los minerales y a esclarecer los procesos físico-químicos que han tenido lugar durante la formación del yacimiento mineral.

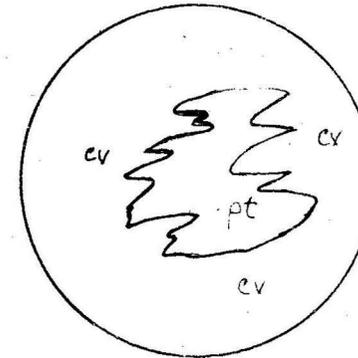
En el grupo de estructuras de sustitución se incluyen los siguientes tipos morfogénéticos fundamentales.

La estructura de corrosión

Está condicionada por la penetración de un mineral en otro y se caracteriza por límites irregulares entre estos minerales.

En el estudio inicial de sustitución es relativamente fácil establecer los minerales que se sustituyen y los nuevos minerales formados ya que los primeros conservan aún sus formas iniciales.

Cuando el proceso de sustitución ha ocurrido a gran profundidad el nuevo mineral formado adquiere una forma extremadamente irregular y en estos casos casi nunca es posible establecer cuál es primario y cual es el secundario. Para esclarecer estas interrelaciones se buscan otras formas estructurales de crecimiento de estos minerales, como por ejemplo, la presencia de filones de un mineral en otro, contactos más característico entre ellos, la existencia de una asociación mineral establecida inicial o posteriormente para dichas menas.



Leyenda
pt - pirita
cv - covelina

FIGURA 15.25. Zona de enriquecimiento secundario de las menas sulfurosas.

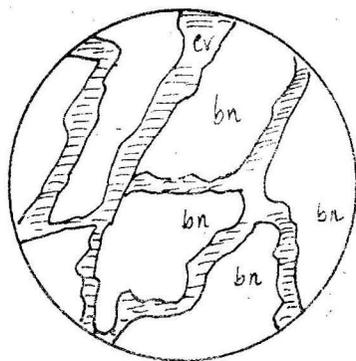
La estructuras de intersecciones

Refleja la existencia de finas grietas del mineral secundario el cual constituye el mineral primario. Estas finas grietas generalmente poseen contactos desiguales, grosor variable y no paralelo entre sí. La existencia de estructura de intersección permite resolver con seguridad el problema de la consecutividad de los procesos de formación de las menas.

Estructura relicta

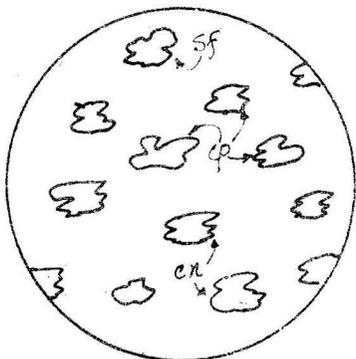
Se manifiesta en la secuencia de relictos del mineral primario durante los procesos de sustitución. Los relictos o residuos del mineral sustituido están aislado por el nuevo mineral depositado; la forma de estos relictos con frecuencia son irregulares y en ocasiones tienen el aspecto de una estruc-

tura laminada o reticular la que está; condicionada por la conservación en el mineral sustituido las direcciones del clivaje, en las cuales se desarrolla con mayor intensidad el proceso de sustitución.



Leyenda
bn - bornita (mineral primario)
cv - covelina (mineral secundario)

FIGURA 15.26. Zona de enriquecimiento secundario, yacimientos de infiltración.



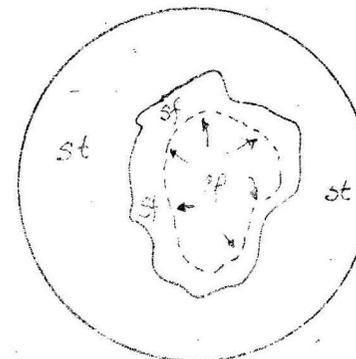
Leyenda
sf - esfalerita
cp - calcopirita
cn - cubanita

FIGURA 15.27. Zona de enriquecimiento de menas sulfurosas y polimetálicas.

Estructura de esqueleto

Se encuentra relativamente poco. Se forma en aquellos casos en que el proceso de sustitución de un mineral menífero por otro ocurre desde el

centro del grano hacia su periferia. Los contornos exteriores del mineral sustituido se conservan, formando el esqueleto o las configuraciones del grano del cristal de este mineral. La estructura de esqueleto es la más característica de los procesos endógenos de sustitución. Dichos crecimientos son característicos de la pirita y la calcopirita, pirita y esfalerita y cuarzo, etcétera.



Leyenda
sf - esfalerita
cp - calcopirita
st - mineral no metálico.

FIGURA 15.28. yacimientos hidrotermales metasomáticos y de scarn.

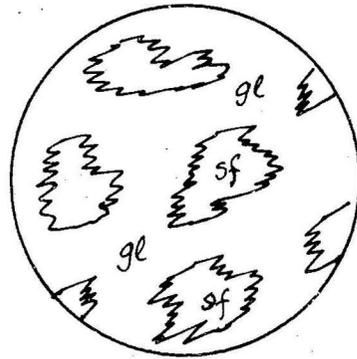
Estructuras gráfica y subgráfica

Están condicionadas por el entrecrecimiento de los minerales, uno de los cuales se forma debido a la sustitución del otro. Ambos minerales están representados por granos parecidos por la configuración, situados en un orden determinado. Dicho dibujo lo forman por ejemplo, la bornita y la calcosina, la gelena y la esfalerita, la galena y la argentita. El mineral sustituido presenta gran irregularidad en sus límites con el mineral secundario.

Estructura reticular

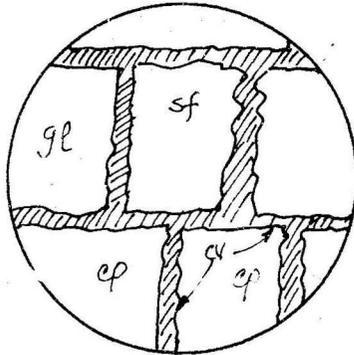
Caracteriza el proceso de sustitución de un mineral menífero por otro a lo largo de dos direcciones (o más) de clivaje que se interceptan, a diferencia de la reticular y de la laminada de descomposición de las soluciones sólidas, en este caso los límites entre los minerales son sinuosos, observándose la retención del mineral sustituido en las grietas y en los lugares de intersección de las direcciones, en el mineral secundario se forman prominencias y las venillas de este mineral, se ramifican.

Tales estructuras se observan frecuentemente en las menas matrizadas durante la sustitución de la magnetita por la hematita.



Leyenda
gl – galena
sf – esfalerita

FIGURA 15.29. Yacimientos hidrotermales, scarn (procesos metasomáticos de formación de las menas).



Leyenda
gl – galena
sf – esfalerita
cp – calcopirita
cv – covelina

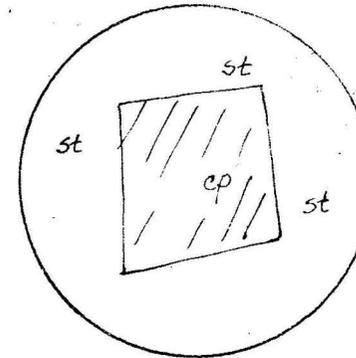
FIGURA 15.30. Yacimiento de scarn y metamorfogénico.

Estructura pseudomórfica.

Se forma como resultado de la total sustitución de los diferentes granos de un mineral por otro con la conservación de la forma del mineral sustituido.

Tales estructuras se observan generalmente junto con las estructuras de los residuos de sustitución y con las estructuras de sustitución.

Estas estructuras son muy características de las menas de la zona de oxidación de los yacimientos sulfurados y algunas veces se observan en las menas primarias, particularmente durante la sustitución de la pirita por la calcopirita, pirita por esfalerita, pirita por bornita y raramente en otras combinaciones minerales.



Leyenda
c – calcopirita
(mineral-
secundario)
st – mineral no
metálico.

FIGURA 15.31. Yacimientos hidrotermales metasomáticos, scarn y zonas de oxidación.

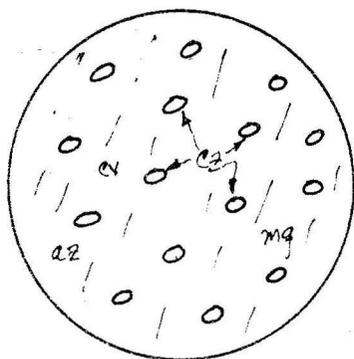
Estructura cementada

Refleja los resultados de la sustitución del cemento no menífero de las rocas sedimentarias por material menífero. Son especialmente favorable para esta sustitución las areniscas con cemento carbonatado, en cuyo lugar, con frecuencia, se depositan los sulfuros.

Así por ejemplo, en las areniscas cupríferas de Kazajastán se observan granos pequeños de cuarzo, cementados con calcopirita y bornita, también puede servir de ejemplo las formaciones cupríferas de Zambia.

15.6. ESTRUCTURA METAMORFICAS

Están ampliamente distribuidas en las menas de los yacimientos metamorfizados. Son un grupo de crecimientos minerales, alterados fundamentalmente debido a las tensiones dinámicas aplicadas a las menas primarias naturalmente que bajo la influencia de cargas mecánicas y los incrementos de temperatura, con ellas relacionadas, los minerales meníferos que se forman con anterioridad y sus agregados varían su estructura.



Leyenda
 Cz - cuarzo
 cw - cobelina
 mq - malaquita
 az - azurita

FIGURA 15.32. Yacimientos hidrotermales de bajas temperaturas. Areniscas cupríferas.

El resultado de la deformación de las menas en gran medida depende de la magnitud de la presión de las propiedades físicas de los minerales sometidos a la presión, así en los minerales frágiles es característico el agrietamiento o la fragmentación pero en los minerales blandos y laminados generalmente se arrugan e incluso pueden experimentar desplazamientos especiales locales en las zonas (por ejemplo, grietas) con menor tensión dinámica.

En algunos casos; en el proceso de metamorfismo puede ocurrir la total o parcial recristalización de la mineralización inicial con la variación no sólo de sus estructurales, sino también de la composición mineralógica. En dichas menas totalmente recristalizadas con frecuencia no quedan ni huellas que indiquen las formas primarias de las estructuras.

La unidad morfológica de las estructuras metamórficas son los granos (metagranos, granoblasto y granos cristalinos) de los minerales meníferos que han sufrido las alteraciones de su forma inicial.

Estas estructuras ayudan a establecer el carácter de los procesos de metamorfismo y el grado de su intensidad, en algunos casos se puede esclarecer la dirección de los esfuerzos dinámicos y su influencia sobre la composición mineral, es decir, las estructuras metamórficas ayudan a restablecer los procesos de la alteración de la sustancia menífera en el período postmenífero.

En el grupo de las estructuras metamórficas se incluyen los siguientes tipos morfológicos fundamentales:

- Agrietamiento
- Fragmentación
- Arrugamiento

- Granoclástica
- Porfiroclástica
- Clástica orientada
- Recristalización

Estructura de agrietamiento

Está ampliamente distribuida en todos los tipos genéticos de agrietamiento que hayan sufrido aunque sea un dinamometamorfismo débil. Esta estructura es característica de los minerales frágiles y se refleja su existencia en los granos minerales o agregados, es una perturbación de la continuidad del mineral representada en forma de grietas finas. Durante este proceso la forma inicial de los minerales se conserva totalmente.

Leyenda
 pt - cristales de piritas finamente agrietados.

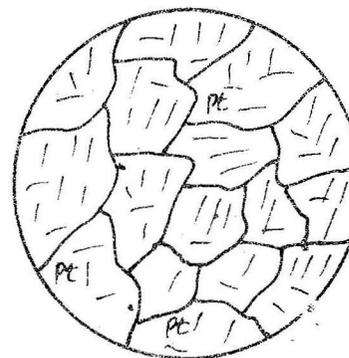
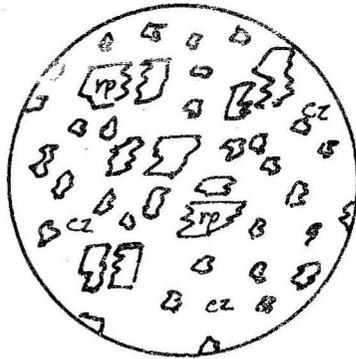


FIGURA 15.33. Yacimientos metamorfizados.

Estructura de fragmentación o cataclítica

También es muy característica de minerales duros y frágiles y de sus agregados, los cuales como resultados de considerables esfuerzos dinámicos se fragmentan.

Los fragmentos o clastos pueden tener diferentes dimensiones, pero de ellos es común la forma angulosa. Las partes del mineral que representan estos clastos, son sometidas a mayor o menor desplazamiento espacial de la posición inicial en el agregado o en el mineral. En ciertos casos por los clastos se logra reproducir la forma inicial del grano o del cristal.



rp – fragmentos de
arsenopirita
cz – cuarzo

FIGURA 15.34. Yacimientos metamorfogénicos del dinamometamorfismo).

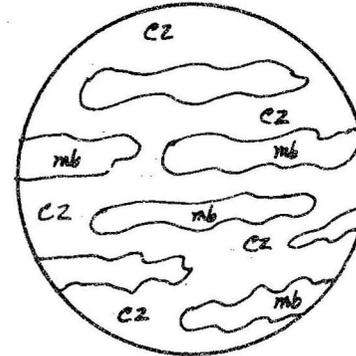
de arrugamiento

stic de los minerales blandos y maleables y de sus agregados; presencia de cargas dinámicas dichos minerales son sometidos a deformaciones plásticas, que se expresan en arrugamiento, aplastamiento (plegamientos) de los diferentes granos y agregados. Sus elementos minerales tienen huellas de sinuosidad e incluso de contorsión, también pueden presentarse la aparición de las maclas de deslizamiento.

En los minerales anisotrópicos las estructuras de arrugamiento se ven claramente con los nicoles cruzados, pero en los isotrópicos se siguen por los elementos cristalinos (clivaje, maclas, etcétera) y se manifiesta después del ataque estructural.

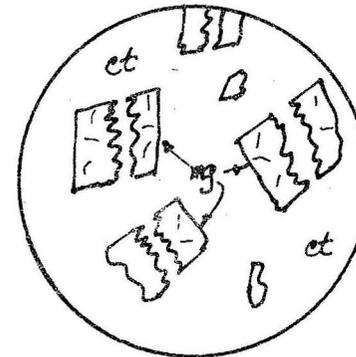
Estructura granoclástica

Es un tipo de la estructura de fragmentación y se caracteriza por la presencia de fragmentos de cristales o de clastos de magnitudes aproximadamente iguales, bastante parecidas entre sí. Algunas veces, los espacios entre estos fragmentos están rellenos con otros minerales meniferos que poseen plasticidad y maleabilidad.



Leyenda
nb – arrugamiento de la
molibdenita.
cz – cuarzo

figura 15.35. Yacimientos metamorfozados (efectos del dinamometamorfismo).

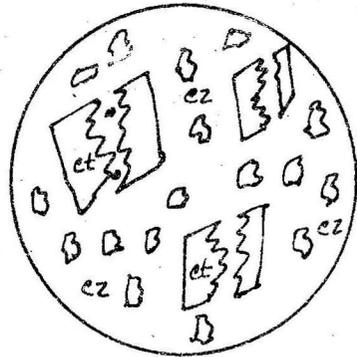


Leyenda
mg – magnetita
ct – calcita.

FIGURA 15.36. Yacimientos hidrotermales (zonas de brechas).

Estructura porfiroclástica

También es una variedad de la estructura de fragmentación, pero caracterizada por la presencia de fragmentos grandes de minerales entre su masa finamente fragmentada.

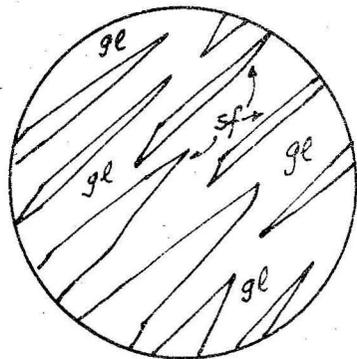


Leyenda
 ct – cristales fragmentado
 de casiterita.
 cz – cuarzo.

FIGURA 15.37. Zona de intensa actividad tectónica (fallamiento y dinamometamorfismo).

Estructura clásica-orientada

Es una variedad de las estructura de fragmentación donde los clastos de los minerales meníferos, se presentan de forma alargada; manteniendo un buen paralelismo en una dirección específica. Cuando esta unidad se presenta en agregados de minerales meníferos maleables pueden manifestarse maclas de deslizamiento; localizándose en láminas finas orientadas.



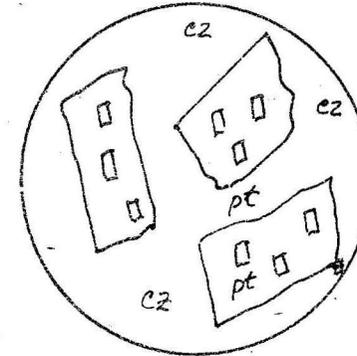
Leyenda
 sf – esfalerita
 gl – galena

FIGURA 15.38. Yacimientos metamorizados (efectos del dinamometamorfismo)

Estructura de recristalización

Se caracteriza por la transformación de unas formas de granos minerales en otras. La más característica es la recristalización convergente en la cual de los granos meníferos pequeños de la masa (o granos) fundamental se forman cristales grandes.

Tales formaciones están acompañadas, en la periferia, por zonas no meníferas; desde esta zona, la sustancia menífera pasa a la formación de los granos grandes.



Leyenda
 pt – cristales de pirita,
 conformación de cristales
 más pequeños
 cz – cuarzo

FIGURA 15.39. Yacimientos de scarn y metamorfológicos.

La clasificación de las estructuras fundamentales de menas de los tipos genéticos anteriormente analizados ha sido resumida en la tabla que se anexa al final.

Los tipos genéticos señalados en la tabla y las variedades morfogenéticas no están totalmente agotados en la naturaleza. Hay que recordar también que las estructuras, semejantes a simple vista por los índices morfológicos, con frecuencia se encuentran en menas de génesis diferente. Sin embargo, esto solamente se refiere a la semejanza, la cual requiere un análisis cuidadoso, con un estudio minucioso de la forma, estructura y alteración del grano mineral o del agregado, no solamente con ayuda de micro-métodos, sino también de todos los conocimientos geológicos de una determinada provincia geológica, región, yacimiento y cuerpo menífero mineral o manifestación mineral.

15.7. ANALISIS TEXTURAL DE LAS MENAS

Se realiza con el objetivo de revelar, en los agregados, las asociaciones minerales, las regularidades de su distribución y las formas de su distribución y las formas de su localización, las condiciones físico-químicas de formación y la consecutividad de formación de los minerales.

Ante todo se establece la composición mineral de las menas y las paragénesis minerales (conjunto de minerales en los agregados que se han formado en condiciones físico - químicas y geológicas determinadas). Se determinan las formas de localización de las menas (blandas, filones, vetas, *stockwork*), se esclarecen las particularidades morfológicas de cada asociación que forma los agregados minerales, se determinan las dimensiones de los diferentes minerales y de sus agregados para obtener las características granulométricas de las menas. Además, se determinan las variedades morfológicas de las texturas, las cuales sientan la base para esclarecer los tipos industriales de menas.

Para esclarecer el tipo de textura es necesario, en primer lugar, establecer las formas de las separaciones minerales (idiomorfa, allotriomorfa, etcétera) y su estructura interna (zonal, de maclas, laminada, etcétera) en cada agregado mineral, lo cual nos permite distinguir las variedades morfológicas de estructuras, que indican la consecutividad de separación de los minerales y de los agregados minerales. Conjuntamente se esclarecen los tipos genéticos de separaciones minerales (granos cristalinos, metagranos, granoblastos, coloides, clastos) en los agregados minerales. Posteriormente se determina con cuál tipo genético se relacionan los tipos morfológicos establecidos de estructuras (allotriomorfogranulosa, granoblástica, clásica, etcétera).

Los tipos genéticos de estructuras indican con cual de los grupos genéticos se relacionan las variedades morfológicas de las texturas.

La presencia de estructuras secundarias y los agregados minerales, por ejemplo, fragmentación, arrugamiento y recristalización, ayudan a establecer el grado de metamorfismo de las menas. Las estructuras de descomposición de las soluciones sólidas pueden ser utilizadas como termómetros geológicos; se puede tener una idea acerca de las temperaturas de formación de los minerales aproximadamente por las temperaturas de homogeneización y de las inclusiones líquidas en minerales transparentes, basado en las temperaturas de decrepitación de minerales meníferos no transparentes.

Generalmente, durante el análisis textural-estructural de las menas, el investigador, en primer lugar, esclarece las condiciones de formación de los agregados minerales que contienen los componentes útiles. Se determina en cuales combinaciones y formas de crecimiento se encuentra el mineral

útil con los agregados minerales no meníferos, la composición acompañante de la mineralización no menífera. Como los de mayor interés son minerales valiosos para la industria, éstos se toman en calidad de criterios básicos para valorar la estructura.

Su forma, dimensiones, estructura y formas de combinación entre sí y con otros agregados minerales en la mena caracterizarán las variedades morfológicas de las texturas de las menas (textura manchada, microtextura, filoneana, nodular, brechosa, etcétera).

La determinación del tipo genético de texturas se realiza en dependencia de las condiciones de formación del agregado mineral básico. Si las separaciones minerales en el agregado son granos cristalinos que se han formado en el proceso de cristalización de la fusión entonces la textura se relaciona con el tipo genético de formaciones magmáticas, y sus particularidades pueden servir como base para relacionarla con las variedades de licuación y otras variedades postmagnéticas.

La ejecución del análisis textural-estructural se hace con el objetivo de establecer los procesos de formación de los minerales, las escalas y la consecutividad de deposición de los minerales en las asociaciones paragenéticas prevé el estudio de todas las formas morfológicas de los agregados minerales en todas sus variedades por la composición mineral y las particularidades textural-estructurales.

Generalmente los cuerpos meníferos o los yacimientos contienen varias variedades morfológicas tanto texturas, como de estructura de menas. Estas variedades corresponden a diferentes estadios o diferentes condiciones de precipitación de los minerales en el proceso de formación de los cuerpos meníferos, y cada uno de ellos tendrá sus particularidades características de estructura de los agregados minerales o de los minerales que los forman.

Todas las particularidades textural-estructurales de las menas son importantes durante el análisis, ya que ellas señalan la manifestación de determinados procesos y condiciones en que los mismos surgieron. Sin embargo, con frecuencia surge el problema cuál considerar la forma textural más importante que caracterice el tipo genético de mena. Tales texturas son aquellas que, en primer lugar, se manifestaron más ampliamente en el período de formación de los componentes útiles y, en segundo lugar, las que satisfacen más completamente las hipótesis enunciadas de formación de las menas para dicho yacimiento.

La consecutividad de precipitación de los minerales de cualquier grupo genético se determina durante el estudio de las estructuras y solamente las particularidades estructurales de interrelación entre los minerales permiten establecer la consecutividad o la simultaneidad de su formación o segregación.

Los granos minerales que se forman simultáneamente, generalmente forman un grupo de estructuras de cristalización, pero las maclas que se encuentran en ellas son maclas de crecimiento. La presencia de formas coloidales de deposición son una demostración segura de la agregación simultánea de los minerales que forman el agregado, al igual que la presencia de estructuras de descomposición de las soluciones sólidas.

Las estructuras características que indican la formación consecutiva de los minerales son la hipidiomorfogranulosa, la sideronítica y el grupo de estructuras de sustitución.

El resumen de las investigaciones minerográficas es el esquema de consecutividad de formación de los minerales en el cual se señalan innumerables particularidades de los procesos de formación de las menas. Las más importantes de ellas son las paragénesis de los minerales, sus estructuras (tanto primarias, como secundarias), las etapas y estadios de mineralización y por último, las texturas. En algunos esquemas se reflejan los elementos químicos fundamentales relacionados con la manifestación de determinados estadios, intensidad y períodos de manifestación de la actividad tectónica, la temperatura de formación de los minerales, etcétera.

El análisis de las asociaciones minerales paragenéticas que corresponden a determinados estadios y etapas de la formación de las menas, con frecuencia permite juzgar la alcalinidad o acidez de las soluciones meníferas y el carácter reductor u oxidante de las reacciones inherentes a dicho proceso de formación de los minerales.

Más adelante, en la tabla, se da la forma aproximada del esquema de consecutividad de formación de los minerales, donde se resumen los resultados de la investigación de la composición de las menas y el análisis textural-estructural de diferentes yacimientos, manifestaciones meníferas o cuerpos meníferos.

El nombre de las etapas y estadios de formación de las menas se han relacionado arbitrariamente y refleja unos u otros índices típicos. Por ejemplo, en las tablas endógenas y exógenas subrayan la formación de los minerales en la profundidad y cerca de la superficie respectivamente. Los estadios pueden dividirse por la temperatura de formación de los minerales, por la asociación mineral predominante característica de dichos estadios, o simplemente enumerarse en orden de consecutividad de manifestación en el proceso general de formación del yacimiento.

ANÁLISIS FÍSICO DE LAS MENAS

El análisis químico físico incluye tres métodos de investigación de las menas: método de las huellas, análisis macrofásico y análisis microfásico.

16.1. METODO DE LAS HUELLAS

Este método se utiliza con el objetivo de diagnosticar, igual que el análisis microquímico, pero principalmente para revelar las particularidades estructural-texturales de los agregados minerales.

Las reacciones por el método de las huellas se realizan en papel fotográfico, en papel gelatinado o en celofán. El papel fotográfico se fija previamente en una solución de hiposulfito para eliminar las sales de plata. El papel gelatinado y el celofán no requieren tratamiento previo.

Para obtener la reacción por el método de las huellas la capa gelatinada del papel fotográfico se lava con reactivo (disolvente), el cual generalmente se utiliza en el análisis microquímico para disolver determinado mineral. Luego, por el lado suave, se comprime la sección pulida contra el papel y se deja el tiempo necesario para la disolución del mineral menífero. Después de esto, el papel se trata con reactivo, el cual forma una reacción coloreada con el elemento químico que entra en la composición del mineral, y se obtiene una huella que caracteriza la forma del mineral o del agregado mineral en la mena. Con el objetivo de obtener una huella resistente, se selecciona un reactivo-revelador, el cual da, junto con el elemento químico investigado, sales insolubles en agua. En caso contrario, cuando se lava la huella con agua el color del precipitado que se obtiene, se vuelve muy pálido o desaparece por completo.

El tiempo de exposición necesario para la disolución del mineral investigado, se establece experimentalmente por la calidad y la resistencia de la huella. La calidad de la huella se valora por el color, el cual tiene que corresponder al color de la sal obtenida durante la interacción del elemento químico investigado con el reactivo correspondiente.

El papel fotográfico, antes de la obtención de la huella, tiene que humedecerse, pero no empaparse. El exceso de reactivo disolvente se elimina con papel de filtro. Antes de obtener la huella, la sección pulida tiene que limpiarse cuidadosamente con un paño.

Algunos minerales se disuelven muy mal, por eso se recurre a un tratamiento previo. Por ejemplo, para obtener una huella de calidad en calcopirita o esfalerita, la superficie de la sección pulida que contiene estos minerales se trata previamente con vapores de agua regia hasta que aparezca un matiz marrón oscuro. La solubilidad de algunos minerales se eleva considerablemente cuando se utiliza la corriente eléctrica.

Para esto, sobre el papel de filtro se coloca una lámina de platino, a la cual se fija un polo negativo (de baterías secas con una tensión de 4-6 V), y a la superficie pulida se conecta un polo positivo, como se ha mostrado en la Figura 16.1.

En los últimos tiempos se ha comenzado la obtención de huellas de testigos. Estas huellas caracterizan más objetivamente la distribución espacial de los componentes meníferos en el agregado o en la mena, y dan un cuadro muy claro de su figura textural.

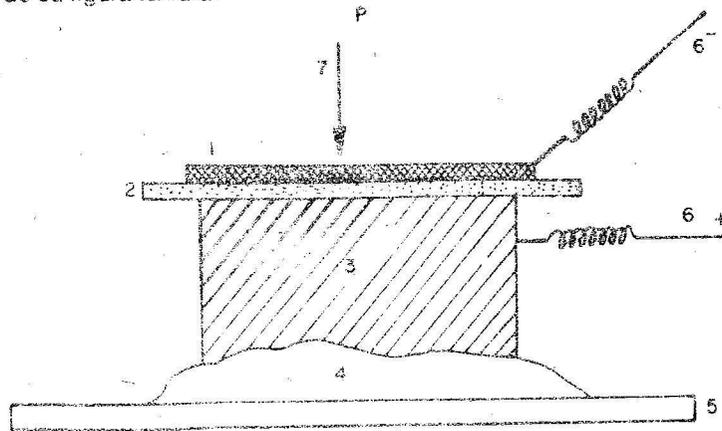


FIGURA 16.1. Esquema para obtener la huella utilizando la corriente eléctrica. 1. Lámina de platino; 2. Papel fotográfico; 3. sección pulida; 4. plastilina; 5. Portaobjeto; 6. conductor; 7. Prensa que comprime la plastilina.

Para esto generalmente se utiliza un testigo obtenido durante perforación con diamante. Este se caracteriza por tener una superficie plana y regular y da mejores resultados. La columna de testigo se envuelve en papel fotográfico humedecido con disolvente y se mantiene así durante cierto tiempo. Luego, se trata con disolvente-revelador y se obtiene la huella investigada del testigo.

De esta manera el análisis químico con el método de las huellas puede ser utilizado para aclarar las regularidades de distribución de los elementos químicos en la mena y de los minerales que los contienen. Cuando se hace

una correcta selección del revelador, las huellas obtenidas pueden variar las fotografías de las texturas y estructuras de las menas. La desventaja del método es la inevitable subjetividad en la valoración de los resultados de la reacción por la huella coloreada de uno u otro elemento y la dificultad del proceso de selección de reactivos-reveladores favorables, efectuada generalmente, por vía experimental.

En calidad de ejemplo, analicemos algunas reacciones por el método de las huellas.

1. Determinación del volframio (W). Como disolvente, en el cual se humedece el papel fotográfico, sirve el ácido clorhídrico (HCl, 1:2). El tiempo de ataque es de 2-5 min.

El reactivo-revelador es cloruro de estaño (SnCl_2 - solución caliente en ácido clorhídrico). Se obtienen huellas de color azul en los minerales que contienen volframio.

2. Determinación del hierro (Fe). El disolvente es el ácido clorhídrico HCl (1:20). Con frecuencia se utiliza en el ataque eléctrico con una tensión de 4 V durante 30-60 s. El reactivo-revelador es una sal amarillo-rojiza $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ al 5%. Como resultado obtenemos una huella azul en los minerales que contienen hierro.
3. Determinación del cobalto (Co). El disolvente es amoníaco (NH_4OH) al 25%. Se utiliza ataque eléctrico con una tensión de 4 V durante 1-2 min. El reactivo revelador es el ácido rubeánico (solución de alcohol al 25%). El resultado es una huella de color amarillo naranja.
4. Determinación del arsénico (As). El reactivo disolvente se NH_4OH al 25% + perhidrol (1/5 parte de la disolución). El ataque eléctrico se hace con una tensión se hace con una tensión de 4 V durante 30-60 s. El reactivo revelador es nitrato de plata (solución al 1-2%). Como resultado se obtiene una huella de color marrón hasta negro.

16.2. ANALISIS MACROFASICO DE LAS MENAS

Como análisis físico se entiende el análisis químico con ayuda del cual se puede establecer las formas minerales de los elementos químicos de la mena (a diferencia del establecimiento de los elementos químicos en otros métodos). Esto se realiza por medio de la disolución selectiva consecutiva en la mena, de uno o de varios minerales parecidos por su solubilidad y generalmente por la composición.

Como es conocido la capacidad de los minerales de disolverse depende mucho de su grado de cristalización, tamaño del grano mineral y presencia de mezclas isomorfas. En relación con esto, la etapa más difícil en la realización del análisis físico es la selección del disolvente, que actúa de igual manera sobre un mineral que posea diferente grado de solubilidad (lo

que generalmente es característico para los mismos minerales de un yacimiento, pero de diferentes partes de los cuerpos meníferos). Además de eso, sobre la solubilidad del mineral, durante, el análisis físico, ejerce gran influencia los minerales fácilmente solubles, tanto meníferos, como no meníferos y principalmente la calcita, asociadas con él.

El análisis macrofásico, por su metodología y por los resultados de la reacción en principio no se diferencia nada del método de las huellas anteriormente analizado. La particularidad está en que con anterioridad, por vía experimental, se selecciona el disolvente para cada mineral que se encuentra en la sección pulida, de forma tal que actúe solamente sobre un mineral y no actúe con la actividad mínima sobre los minerales vecinos.

Cuando los disolventes han sido seleccionado para cada mineral, el análisis se realiza consecutivamente desde los minerales fácilmente solubles a los difícilmente solubles, es decir, se comienza desde los disolventes más débiles para evitar el deterioro de la superficie pulida de la muestra. Los contornos de la sección pulida, al determinar cada mineral, coinciden exactamente con los contornos de su huella y al final del análisis se obtiene una representación de diferente color, donde a cada color corresponde determinado mineral en la sección pulida.

En calidad de ejemplo, analicemos la determinación, con análisis microfásico, de los minerales de plomo, cuando éstos aparecen en la sección pulida en la siguiente composición: galenita (PbS), anglasita ($PbSO_4$), cerusita ($PbCO_3$), Vanadita ($Pb_5(NO_3)_3Cl$), wulfenita ($PbMoO_4$) y plumbojarusita ($PbFe_6(SO_4)_3(OH)_2$).

Si se plantea la tarea de esbozar las áreas de distribución de cada uno de éstos minerales, las reacciones se realizan en el siguiente orden.

Para establecer la plumbojarusita, el papel fotográfico se humedece con una solución de HNO_3 (1:40), se comprime contra la muestra pulida y al cabo de 2 minutos se revela con una solución al 5 % de KI . Las zonas de distribución de la plumbojarusita tienen color amarillo limón.

Si la plumbojarusita se revela como hierro, entonces se realiza la misma reacción de disolución, pero aparece una solución de color rojo sangre ($K_3Fe(CN)_6$). Aquí la plumbojarusita se revela con tonalidades azules. Con otros métodos de ensayos microquímicos es muy difícil determinar la plumbojarusita.

Para establecer la cerusita, ese mismo papel fotográfico se humedece en una solución de HNO_3 (1:20) y luego da un contacto de 2 min con esa misma sección pulida aparece en una solución al 5 % de KI . Las partes de color amarillo será la cerusita.

Para establecer la vanadinita, el disolvente es HNO_3 (1:20), durante 2 min de exposición el reactivo-revelador es bencidina acética. El resultado es, las partes azules corresponden a la vanadinita. Si en calidad de revelador

se utiliza H_2O_2 (solución al 10 %) las zonas correspondientes a la vanadinita serán de color rojo-naranja.

Para determinar la anglasita, el disolvente HNO_3 (1:1), durante 2 min de exposición. El revelador es KI (solución al 5 %). El resultado: las partes de color amarillo limón en el papel fotográfico corresponderá a la anglasita.

Lo mismo que en el caso anterior se hace para determinar la wulfenita y la galena, pero las huellas de color amarillo limón que corresponden a este mineral, cambian muy rápidamente e incluso se envejecen debido al sulfuro de hidrógeno que se desprende durante la reacción.

Para determinar la molibdenita en la wulfenita, el papel se humedece con HNO_3 concentrado, se deja durante 2 min en contacto con la muestra pulida y se revela con $K_4Fe(C)_6$. Las partes de color marrón indican la distribución superficial del molibdeno (wulfenita).

De esta forma como resultado del análisis químico macrofásico se obtiene una huella coloreada, donde a la distribución de cada mineral menífero corresponde un color determinado o tonalidad.

16.3. ANALISIS MICROFASICO

Este tipo de análisis se utiliza para determinar en los minerales de microinclusiones, cuyas dimensiones son de décimas y centésimas de fracción de milímetros. El análisis microfásico se realiza sobre películas de celofán o de gelatina, estudiando el proceso de la reacción y el resultado bajo el microscopio.

La metodología para realizar las reacciones en celofán es la siguiente. El celofán se humedece con una mezcla de disolvente y revelador durante 1-2 h. Después de esto, el celofán húmedo se coloca sobre la parte estudiada de la sección pulida y rápidamente se seca con papel de filtro. Los resultados de las reacciones se observan bajo el microscopio, fijando la variación del color de la película. Con luz reflejada, estos resultados no siempre son visibles con bastante claridad, por eso la película generalmente se estudia, además, con luz transmitida, después de colocarla entre dos cubreobjetos.

La metodología para realizar las reacciones sobre una película gelatinosa, es la siguiente. Una gota de gelatina recientemente preparada se mezcla con disolvente y revelador en volúmenes iguales y se coloca sobre la parte estudiada de la sección pulida. Cuando se está secando la galenita, en sus poros tienen lugar las reacciones, cuyos resultados se estudian sobre el mineral investigado.

El juego de reactivos utilizados en el análisis físico, es más variado que el utilizado con el método de las huellas. Cuando los reactivos han sido correctamente seleccionados a las microinclusiones de los minerales co-

responden las zonas coloreadas de la película, que responden a la forma de estas separaciones y que reflejan su estructura.

El análisis químico-físico se utiliza para determinar los minerales oxidados y algunos elementos, como el cobre, níquel, hierro, plomo, zinc; para revelar sus zonas de distribución y las particularidades texturales-estructurales en las muestras pulidas; para diagnosticar las microinclusiones meníferas en los minerales meníferos y no meníferos. Como todos los métodos de diagnóstico químico, el análisis físico es auxiliar y secundario.

CAPITULO 17

CARACTERISTICAS MORFOLOGICAS DE LOS MINERALES MENIFEROS

17.1. FORMA DE LOS CORTES DE LOS GRANOS MINERALES

La observación de la forma del corte de los granos minerales en las secciones pulidas, es un índice diagnóstico indirecto y está relacionado con el hecho de que las formas cristalinas son muy variables y no siempre se manifiestan de forma clara. Por consiguiente, la idea sobre las formas cristalinas con ayuda de observaciones microscópicas no puede ser exacta y siempre posible. Sin embargo, en una serie de casos, estas observaciones permiten la determinación del mineral y con frecuencia ayudan a descifrar los procesos de formación de las menas.

Cuando se estudia la forma de los granos es necesario recordar que sobre la superficie pulida éstos presentan diferentes cortes y no los granos completos o cristales. Las formas del corte de los cristales, en cada caso, depende de la posición en la cual fueron cortados los cristales por la superficie de la sección pulida. Así, los paralelogramos pueden dar cubos en el corte, rectángulos, paralelepípedos, rombos, triángulos irregulares, equiláteros y rectángulos. La forma cristalina volumétrica total del mineral puede ser restablecida por medio del estudio de una serie de cortes planos. Todos los términos, determinaciones y conceptos, utilizados en mineralogía cuando se da la característica descriptiva de los cristales, se utilizan también en minerografía. Por eso es necesario conocer el sentido y el contenido de dichos términos y conceptos, como ejemplo, la singonía cúbica, octoédrica radiada, tabular, colomorfa, etcétera. El conocimiento exacto de estos conceptos es necesario para la descripción de las rocas cristalinas y ayuda considerablemente durante el diagnóstico de los minerales por su hábito.

Si los minerales en el proceso de formación han obtenido una forma cristalográfica regular, su género es idiomorfo. Si se conservan relictos de caras cristalinas, aunque los minerales hayan experimentado la influencia de enmascaramiento de los procesos superpuestos de corrosión, fragmentación, recristalización, etcétera, dichos cristales se llaman automorfos. Se llama xenomorfos a las formas subordinadas de desprendimientos de los

minerales que se forman generalmente en los espacios que están entre las formas cristalinas anteriormente formadas.

La diversidad de formas cristalinas en cortes planos pueden ser subdivididas en dos grupos: isométricas y alargadas. Con las isométricas se relacionan los cortes de formas cristalinas regulares que tienen aproximadamente iguales mediciones en todas direcciones. Los minerales más típicos que forman cortes isométricos son la pirita, magnetita, esfalerita, muy raramente la casiterita. Las formas alargadas las poseen los cortes de todos los cristales prismáticos, aciculares y tabulares (laminados). Las dimensiones de estos cortes son muy desiguales en longitud y ancho; como ejemplo de este grupo pueden servir la jamesonita y el rutilo (aciculares), hematita y molibdenita (tabulares), antimonita y arsenopirita (prismáticas).

Clivaje y disyunción. En las secciones pulidas, por una serie de causas, el clivaje no siempre se manifiesta claramente, pero su existencia frecuentemente facilita la determinación de los minerales.

El clivaje o la disyunción de los minerales sobre su superficie pulida se expresa con uno o varios sistemas de grietas paralelas de diferente grado de precisión. Las huellas del clivaje y la disyunción se manifiestan en forma de líneas negras, que son la consecuencia de los amontonamientos de la superficie pulida del mineral a ambos lados de la línea de clivaje, que es una microgrieta. Estas huellas se diferencian de las grietas onduladas desiguales por ser rectilíneas.

Cuando el clivaje es completo, en varias direcciones, en la superficie pulida puede ocurrir que las partículas se manchen en el lugar de unión de los planos de clivaje de diferentes direcciones durante el proceso de pulido. Este fenómeno con mucha frecuencia se observa en los cristales de singonía cúbica, tales como galenita, altaíta, muy raramente la esfalerita, magnetita, pentlandita. Durante el pulido se manchan las partículas limitadas por los planos de las caras del cubo, y en el corte del plano de la sección se observan figuras triangulares que parecen triángulos negros en luz reflejada. En los límites de un grano cristalino, estos triángulos manchados tienen una orientación común y forman una cadena discontinua a lo largo de una dirección.

De manera semejante a la forma cristalográfica, la geometría del clivaje o de la disyunción en los minerales tiene que establecerse en varios granos, y no en uno solo. Por ejemplo, si todos los granos del mineral descubren solamente un sistema de planos de clivaje, éste por el pinacoide se puede considerar demostrado. Dos series de planos de clivaje permiten hablar ya sobre clivaje prismático o sobre dos clivajes en pinacoide.

El clivaje o la disyunción, invisible en granos inalterables de mineral, con frecuencia se revela como resultado de los procesos de alteración secundaria. Así, las muestras de buena calidad de pirrotina puede que no descu-

bran las huellas de la disyunción, sin embargo, la transformación (recristalización) de este mineral en marcasita o pirita se controla por la dirección de la disyunción, la cual gracias a ello se manifiesta muy claramente. La oxidación de la galena hasta anglesita o cerusita, también se controla por el clivaje, como la dirección más débil. Son muy características las observaciones del clivaje durante los procesos de intemperismo.

17.2. ESTRUCTURA DE MACLA

Las maclas son cristales complejos de un mismo mineral, que se han obtenido como resultado del desarrollo de individuos cristalinos de dos o mayor número de sistemas de orientación. En mineralografía, la existencia de maclas se considera un índice diagnóstico complementario, condicionado porque la capacidad de formación de las maclas (tanto simples, como polisintéticas) la poseen, solamente, determinados minerales.

Los criterios que diferencian una macla simple de un crecimiento casual de dos granos de mineral, son la exacta línea recta de la grieta de macla y lo frecuente de este fenómeno. Las maclas polisintéticas se revelan por los reiterados crecimientos característicos de los diferentes individuos en consecuencia normal.

En los minerales anisotrópicos las maclas se establecen perfectamente con los nicoles cruzados. A consecuencia de la diferente orientación cristalina de los individuos, cuando se gira la platina del microscopio, éstas, en diferentes posiciones, se extinguen y se iluminan, lo que las hace más notables. Las maclas generalmente forman individuos en posición laminar, raramente reticular, limitados por los bordes de dicho grano o cristal.

Los minerales meníferos típicos que forman las maclas polisintéticas son la antimonita, marcasita, molibdenita, calcopirita, estanina, jamesonita, siderita. Las maclas, con luz reflejada y los nicoles cruzados con frecuencia descubren minerales no meníferos tales como la calcita y el grafito.

En los minerales isotrópicos las maclas no se ven con los nicoles cruzados. Se establece por la desigual altura del relieve de los individuos cristalinos en el crecimiento o se revelan con ayuda del ataque estructural; en los minerales isotrópicos, las maclas polisintéticas se observan en la esfalerita.

Hay que recordar que algunos minerales descubren las llamadas maclas de deslizamiento, condicionadas por la deformación mecánica posmineral. Este tipo de macla está acompañado por el desarrollo de una disyunción; las maclas de deslizamiento, principalmente en minerales blandos, con frecuencia provocan la curvatura o la ondulación de los individuos laminados finos. Las deformaciones con frecuencia están acompañadas por la curvatura o incluso por el agrietamiento de los granos minerales, lo que se observa por la curvatura de las maclas o la extinción ondulada con los

nicos cruzados. Con mucha frecuencia las variaciones deformadoras de las maclas se diferencian en la antimonita, molibdenita, covelina, pirrotina, etcétera.

17.3. ZONACION DE LOS MINERALES MENIFEROS

La estructura interna de los granos minerales de un mismo mineral puede ser homogénea y heterógena. Los granos minerales de estructura homogénea con luz polarizada se iluminan y oscurecen regular y simultáneamente, y durante el ataque varían de igual forma en toda la superficie.

En los desprendimientos minerales de estructura heterogénea con luz polarizada o durante el ataque con frecuencia se observa la estructura interna, una de cuyas manifestaciones es la zonación.

La estructura zonal es una de las particularidades características de una serie de minerales, con la cual se relacionan la casiterita, la pirita, arsenopirita, esmaltina y otros, la zonación puede utilizarse como índice diagnóstico indirecto para su determinación.

El desarrollo del proceso de zonación se manifiesta en forma de estructuras estratificadas que repiten los cotornos exteriores del cristal, y verifica la deposición consecutiva de las capas alrededor del centro de cristalización. La cantidad de capas puede ser diferente, éstas pueden ser muy finas o muy gruesas en relación con el tamaño total del cristal.

La formación de las capas o zonas en el interior de los cristales puede estar condicionada por diferentes causas, las más importantes de las cuales pueden ser las siguientes:

1. Las interrupciones en la deformación de la sustancia mineral, observados en la estructura del cristal.
2. La variación de la velocidad de desarrollo del cristal, la cual puede repetirse varias veces.
3. La cristalización simultánea de los granos de diferentes minerales en diferentes estadios de desarrollo y la inclusión de estos granos en el cuerpo del cristal.
4. La variación de la composición o de la concentración de la solución madre en el proceso de cristalización, que provoca la variación de la composición de las capas que depositan; por ejemplo, la zonación de la esfalerita puede ocurrir al precipitarse el contenido de hierro en la solución, de la que se forman sus cristales.

En ciertos casos, la zonación de los granos cristalinos es notable con luz normal, gracias a los contraste entre las zonas de desarrollo o a evidente heterogeneidad física en el interior del cristal, o por las inclusiones, zonalmente distribuidas, de otros minerales.

Una variedad de la zonación es la estructura sectorial de la sustancia, la cual está condicionada por la diferente velocidad de desarrollo de las caras y aristas del cristal, con la conservación de las particularidades de su estructura cristalográfica.

CAPITULO 18

DETERMINACIONES CUANTITATIVAS DE LOS MINERALES MENIFEROS

18.1. GENERALIDADES

En los capítulos anteriores fueron analizados los índices que dan la posibilidad de establecer la composición mineralógica cualitativa de la mena. Sin embargo, en muchos casos se plantea la determinación cuantitativa de determinados parámetros de la mena. Estas determinaciones tienen gran importancia al valorar las manifestaciones meníferas y los yacimientos durante la búsqueda y la exploración, en la interpretación de las investigaciones geológicas, en la práctica de beneficio mecánico de las menas, en la elaboración de métodos tecnológicos efectivos de extracción de los componentes útiles de las menas.

La composición cuantitativa de los componentes útiles en la mena puede determinarse y se determina con ayuda de métodos químicos, pero éstos requieren tiempo y laboratorios especiales.

Bajo el microscopio se pueden realizar esas mismas determinaciones de la composición cuantitativa, y aunque sus resultados son menos exactos, dan una característica cuantitativa bastante completa de las menas. Además, las determinaciones cuantitativas bajo el microscopio son imprescindibles durante el cómputo de los datos del análisis químico de los componentes minerales, principalmente en yacimientos complejos, donde un mismo componente útil puede encontrarse en varios minerales.

En minerografía, con ayuda de las determinaciones cuantitativas se puede obtener la característica granulométrica de los minerales meníferos, su contenido en por ciento y volumétrico en la mena, el contenido de uno u otro metal o elemento en la mena.

18.2. DETERMINACION DE LAS MEDICIONES DE LOS GRANOS MINERALES

La determinación de las dimensiones de los granos de los minerales meníferos se realiza con el ocular que posee la escala reticular, lo cual es necesario conocer para distinguir los diferentes tipos de menas y hacer algunas conclusiones acerca del carácter genético durante el estudio de la

mena. La metodología para efectuar las mediciones de los granos minerales es simple, aunque en algunos casos requiere mucho tiempo.

El método más simple y exacto es la determinación de las transversales de los granos minerales que se realiza con ayuda de la escala ocular micrométrica.

La escala ocular es una lámina redonda de vidrio, sobre la cual, en una distancia de 1 mm, se encuentran 100 divisiones (o sea en cada división hay 0,01 mm). Esta escala se ve claramente cuando trabajamos con el ocular $17\times$ con luz reflejada.

Con ayuda de la escala ocular no se mide el objetivo, sino su representación en el plano focal del ocular. Por eso, previamente para cada objetivo se determina el valor de una división de la escala ocular.

Al determinar el valor de la división se utiliza el objetivo micrométrico, el cual se coloca en lugar de la sección pulida sobre la platina del microscopio y se calcula a cuantas divisiones del objetivo micrométrico corresponde una división de la escala ocular. Las dimensiones de los granos (o de su transversal) se determina en las divisiones de la escala ocular, y el resultado final se multiplica por el valor de la división, obteniendo la dimensión en milímetros ($x = n.E$, donde x – transversal del grano, n – cantidad de divisiones de la escala ocular, E – valor de una división del objetivo).

Cuando un mineral tiene granulación regular en los límites de la sección pulida, se realizan varias mediciones (10–20) y como magnitud final se toma el promedio de todas las mediciones.

En caso de que los diferentes granos de mineral sean de estructura de granos irregulares, éstos se dividen, aproximadamente, en tres grupos: pequeños, medianos y grandes. Para cada grupo de tamaño se hacen varias decenas de mediciones y se obtiene la dimensión promedio de los granos del grupo, así también se obtiene el valor promedio para dicho mineral por los resultados de todas las dimensiones.

Las mediciones lineales más exactas bajo el microscopio se realizan con ayuda del ocular micrométrico de espiral, en el cual el cálculo se realiza por el tambor micrométrico; al desplazar la cruz filiar en el campo visual del ocular. La exactitud de la medición con ayuda del ocular micrométrico es de 0,001 mm.

18.3. METODOS PARA DETERMINAR EL CONTENIDO VOLUMETRICO DE LOS MINERALES

Existen varios métodos para realizar cálculos cuantitativos de los minerales en las secciones pulidas bajo el microscopio. Analicemos algunos de ellos.

El método superficial (planimétrico) está fundamentado en la dependencia directa entre las áreas de corte y los volúmenes de los minerales en la mena lo cual se basa en que las relaciones cuantitativas entre la superficie de los minerales en la sección pulida son iguales a las relaciones de los volúmenes de estos minerales.

La medición del contenido volumétrico en por ciento de los minerales con este método, se realiza con ayuda de la red ocular, es una lámina redonda de vidrio con una red cuadrada situada sobre ella. La red cuadrada tiene 20 divisiones a cada lado, es decir, tiene 400 celdas cuadradas elementales.

Cuando la distribución de determinados minerales en la mena es regular, su cálculo se realiza de la siguiente manera. Sobre la superficie de la sección pulida se selecciona una zona de 1-2 cm² que en forma de cuadrado o rectángulo se delinea con tinta china. La sección pulida se coloca en la platina del microscopio con las correderas de coordenadas, la platina se fija con el tornillo lateral. Al deslizarse la sección pulida con las correderas, se hace coincidir uno de los ángulos del cuadrado delineado con la red ocular y se observa el primer campo visual después comienza el cálculo. Se cuentan las celdas que caben en un mineral, uniendo las partes de las celdas ocupadas por el mineral, luego se cuenta el número de celdas que caben en el otro mineral, después otro y así sucesivamente si es necesario (solamente los minerales meníferos). Luego se cuenta el número de celdas que caben en los minerales no meníferos. Los resultados de cada uno de los cálculos se anotan y después de los mismos se comprueba las sumas de todas las mediciones la cual tiene que ser igual a 400 (cantidad total de cuadrados de la red).

Después de concluir las mediciones en el primer campo visual se desplaza la sección de forma tal que el límite del nuevo cuadrado que se va a medir coincida con uno de los lados del cuadrado ya medido. Aquí tenemos el segundo campo visual, donde realizamos las mismas mediciones del primer campo visual. Así, consecutivamente se desplaza la sección y se observa el tercer, cuarto, etcétera campos visuales, hasta tanto no se cierra toda la superficie delimitada en la sección pulida. El desplazamiento de los campos visuales se realiza en línea vertical u horizontal. La distancia entre las líneas generalmente es igual al ancho de un cuadrado de la red ocular.

Cuando los minerales tienen los granos distribuidos irregularmente el área total de cálculo se aumenta 2-3 veces o se analiza toda la superficie de la sección pulida. Algunas veces el cálculo se realiza con los campos divididos en orden escaqueado (para abarcar mayor área de cálculo).

Al concluir las mediciones, se suman los resultados de cada uno de los minerales y en por cientos se calculan las áreas ocupadas por ellas. Como el 100 % se considera toda el área de la sección pulida cubierta de mediciones, los valores obtenidos corresponderán al contenido volumétrico

en por ciento de mineral en dicha sección pulida o en la parte de la mena que represente.

El método de puntos está basado en que el número de puntos que cabe en uno u otro mineral, cuando su cantidad es considerable y su posición regular, será proporcional a los cortes (o superficies) de los minerales y a sus volúmenes.

Este método se basa en que, en la superficie de la sección pulida se distribuye regularmente una gran cantidad de puntos de observación y se calcula la cantidad de puntos que caen sobre cada mineral.

En la práctica, el contenido volumétrico en por cientos de mineral en la sección pulida, se puede calcular por dos métodos. El primero de ellos es tan exacto como el superficial, solamente se calcula la cantidad de puntos (intersecciones de las líneas de la red ocular) que han caído sobre un determinado mineral.

El segundo método se basa en que la sección pulida se desplaza cada vez con las correderas a una determinada distancia, comúnmente igual a la transversal promedio del mineral menífero, y se observa el mineral sobre el que se ha detenido la cruz filiar. Se realizan varios desplazamientos de este tipo (20-30), y la distancia entre los minerales se considera igual al desplazamiento en línea, para que se obtenga una red regular de puntos.

Al finalizar las mediciones se suman la cantidad total de puntos tomándolos como el 100 % y la cantidad de puntos pertenecientes a cada mineral. De estos valores se calcula el contenido volumétrico en por ciento de los minerales.

El método de los puntos se simplifica considerablemente si se utiliza un equipo especial denominado platina integradora. Su diseño permite desplazar la sección pulida a la distancia indicada oprimiendo suavemente el botón, por separado para cada mineral. Simultáneamente se realiza el cálculo de todos los desplazamientos efectuados en cada mineral por separado. El observador solamente se fija sobre cuál mineral, se detuvo la cruz filiar y después de las mediciones calcula el resultado final.

El método de los puntos no es bastante seguro para determinaciones cuantitativas exactas, si la cantidad total de puntos que participan en el cálculo no es muy grande.

El error probable del método en cada caso se puede calcular por la fórmula del error que se da para el método lineal.

El método lineal está basado en que las transversales de los granos de los minerales en la sección pulida, cuando el número de mediciones es grande, son proporcionales a las superficies de los minerales, y las superficies, como dijimos con anterioridad, proporcionales a sus volúmenes.

El método lineal es más simple que el superficial y tan exacto como él. En relación con esto, en la práctica de las investigaciones cuantitativas, a este método se le da preferencia.

Con el método lineal de cálculo para el contenido volumétrico en por ciento de los minerales se utiliza la escala ocular. La superficie se coloca sobre la platina del microscopio en las correderas de coordinación y en dependencia de la regularidad de distribución de los minerales meníferos se coloca la red de mediciones. Esta red generalmente está interceptada por las líneas perpendiculares, cuya distancia entre sí se considera igual a la magnitud promedio de los granos minerales.

El primer campo visual se establece al comienzo de una de las líneas (en la parte izquierda de la línea superior). Se mide la longitud de los segmentos con las divisiones de la escala ocular para cada mineral que ella corte, y se anotan los resultados obtenidos a lo largo de la línea seleccionada de forma tal que al final de la primera posición de la escala, se encuentre al final de la segunda, es decir, se obtiene el segundo campo visual. Aquí, de la misma manera se realizan las mediciones, se fijan los resultados y se pasa al siguiente campo visual. Después del desplazamiento de la sección pulida hacia arriba o hacia abajo se pasa a la otra línea y se efectúan las mediciones. Cuando se han recorrido todas las líneas en una dimensión, la platina se gira 90° y se repite toda la operación para las líneas de la otra dirección. La cantidad total de campos visuales en lo que se realizan los cálculos, tiene que ser 20-40. Esta cantidad garantiza una exactitud entre 1,0-1,5 % de error.

El registro de los resultados de las mediciones es mejor hacerlo en un modelo preparado previamente en forma de tabla como la que se muestra a continuación (Tabla 18.1).

TABLA 18.1

Minerales	Indice	Resultados de las mediciones					Total
		Campo 1	Campo 2	Campo 3	" " "	n Campos	
Galena	n ₁	15	3	6		45	471
Pirita	n ₂	35	15	14		25	329
Esfalerita	n ₃	17	12	27		18	8,7
No menífero	n ₄	33	70	53		12	1 083
Total		100	100	100		100	2 700

En esta tabla, en las verticales se dan los resultados de las mediciones en cada campo visual, y en las horizontales se señala con cual mineral se

relaciona dicho grano. Todos los valores se toman en divisiones mínimas (elementales) de escala ocular.

Al concluir las mediciones se suma la cantidad de divisiones que ha correspondido a cada mineral (n₁, n₂ ... n_x), y se calcula la cantidad total de segmentos, tomando esta magnitud (N) como el 100 %. El cálculo del contenido volumétrico en por ciento para cada mineral se realiza por la fórmula:

$$A_x = \frac{n_x}{N} \cdot 100 \% \quad (1)$$

donde: A – contenido volumétrico en por cientos

n – cantidad de divisiones para dicho mineral

N – número total de divisiones

Esta fórmula se utiliza con los métodos superficial y de puntos, variando la cantidad de divisiones por la cantidad de superficies o de puntos.

La exactitud del método lineal, al igual que la del superficial y de puntos, depende de la frecuencia de las mediciones (cantidad de campos de observación) y del contenido del mineral a la mena. El error de estos métodos se calcula por la fórmula:

$$= 0,67 \frac{A(100-A)}{m} \quad (2)$$

donde: 0,67 – coeficiente constante

A – contenido volumétrico en por ciento de mineral

m – cantidad de campos de observación

Los cálculos por el método lineal pueden mecanizarse con la utilización de equipos especiales. Con ellos se relacionan la platina integradora, el integrador eléctrico, el motor integrador y otros. En estos aparatos el cálculo se realiza automáticamente durante el desplazamiento de la sección pulida por las correderas de coordinación.

18.4. LAS DETERMINACIONES CUANTITATIVAS A OJO

Con frecuencia se utilizan en la práctica de las investigaciones mineragráficas. Esto es una determinación rápida del contenido de uno u otro mineral en la mena. El error de la determinación a ojo, cuando hay bastante experiencia no excede 5-10 %, pero cuando la cantidad de secciones para las determinadas es muy grande el error se compensa y los valores determinados se obtienen totalmente satisfactorios, principalmente cuando el

contenido de mineral en la mena es elevado. Sin embargo, las determinaciones cuantitativas a ojo requieren una gran experiencia práctica por parte del investigador. Un rasgo positivo de las determinaciones a ojo es que ocupan muy poco tiempo y aportan materiales útiles para caracterizar la mena.

El método de comparación ha sido tomado de la fotografía y se basa en que la cantidad de granos de un determinado mineral visible bajo el microscopio, se compara con los patrones. En calidad de patrones se utilizan círculos dibujados que representan el campo visual bajo el microscopio. Sobre el fondo negro de estos círculos se encuentran distribuidas regularmente figuras blancas isométricas que forman un determinado contenido en por ciento en relación con el área de todo el círculo. Por medio de la comparación es fácil hallar el patrón más parecido, por el contenido, y establecer la cantidad aproximada de mineral en cada campo visual. Generalmente, la comparación se realiza en 20-30 campos para cada sección pulida y el promedio de las mediciones obtenidas se toman como el resultado final.

Este método es bastante rápido y ayuda al que comienza a dominar la valoración cuantitativa aproximada del contenido a ojo. Su lado negativo es la limitación de utilización en relación con la posibilidad de utilizarlo solamente con variedades más o menos regularmente incrustados y en parte macizas de menas.

Los métodos actuales de determinación cuantitativa de los minerales meníferos en secciones pulidas prevén la utilización de equipos especiales, algunas veces muy complejos. Uno de ellos se fabrica en la URSS en serie Kontrast (AMO-11) con un esquema óptico y eléctrico complejo.

El diseño de este equipo permite distinguir desde la superficie de la sección pulida solamente la magnitud de la capacidad de reflejo. Esta posibilidad es la base de las determinaciones cuantitativas.

El equipo se prepara para determinar la capacidad de reflejo de un determinado mineral, se relaciona el área de investigación y sobre ella, con ayuda del rayo electrónico móvil, se fijan solamente las partes que correspondan a la capacidad de reflejo indicada (o a un determinado mineral). La relación de estas partes con toda el área de investigación da el contenido volumétrico en por ciento de mineral. Toda la operación de cálculo con este equipo requiere 2-3 minutos y un equipo de computación especial da el resultado ya elaborado.

18.5. ANALISIS CUANTITATIVO DE LA COMPOSICION MINERAL

Los métodos anteriormente mencionados dan la posibilidad de establecer el contenido de uno u otro mineral en la mena, en magnitudes volumétricas

o en por cientos volumétricos. Esta dimensión no da una idea completa del contenido de componente útil y por eso con frecuencia hay que recurrir al cálculo del contenido en por ciento de peso de mineral o incluso del metal en la mena.

El cálculo del contenido en por ciento de peso de mineral en la mena se realiza utilizando los datos de las mediciones del contenido volumétrico por la siguiente fórmula.

$$B_x = \frac{100n_x d_x}{n_1d_1 + n_2d_2 + \dots + n_xd_x} \quad (3)$$

donde: B_x – contenido en por ciento de peso del mineral que determina
 $n_1 \ n_2 \ \dots \ n_x$ – cantidad de divisiones, cuadradas elementales o puntos (en dependencia del método de cálculo)
 n – cantidad de divisiones, áreas, puntos del mineral que se determina
 $d_1 \ d_2 \ \dots \ d_x$ – peso específico de cada uno de los minerales que forman la mena
 d – peso específico del mineral que se determina

En el trabajo práctico con frecuencia es suficiente conocer el contenido en por ciento de peso de un solo mineral, con el cual está relacionado el componente útil o el metal. En este caso, para los cálculos se utiliza la fórmula simplificada:

$$B_x = \frac{100n_x d_x}{N \cdot d} \quad (4)$$

donde: n_x – cantidad de divisiones, áreas o puntos del mineral que se determina
 d_x – peso específico del mineral que se determina
 N – cantidad total de divisiones, áreas, puntos que participan en el cálculo
 d – peso específico de la mena

La fórmula (3) se puede utilizar para calcular el contenido en por ciento de peso de cualquiera de los minerales presente en la mena, si se conoce el peso específico de la mena. Este último puede ser establecido rápidamente por medio del pesaje hidrotástico de la muestra en una balanza de laboratorio. El peso específico de los minerales se puede tomar de cualquier manual de mineralogía.

El cálculo del contenido en por ciento de peso de metal en la mena se realiza utilizando los datos del contenido en por ciento de peso del mineral por la fórmula:

$$C = \frac{M_1 M_1 + M_2 B_2 + \dots}{100} \quad (5)$$

donde: C - contenido en por ciento de dicho metal en la mena -
M₁ M₂ - Contenido en % de peso de este metal en los minerales de la mena
B₁ B₂ - Contenido en por ciento de peso de los minerales correspondientes en la mena, obtenido de la fórmula (3)

Los valores m₁ m₂ etcétera se puede tomar de manuales de mineralogía o calcularlo por el peso molecular. B₁ B₂ etcétera son datos obtenidos como resultado de la determinación del contenido en por ciento de peso de los minerales en la mena. El error probable del cálculo del contenido de metal en la mena, con este método generalmente es igual al error admisible obtenido durante el cálculo del contenido en por ciento volumétrico de mineral.

El registro de los resultados finales de la observación y de los resultados finales de la observación y de los cálculos se resume en forma de tabla (véase la Tabla 18.1).

CAPITULO 19

ORGANIZACION Y COMPUTO DEL TRABAJO DE INVESTIGACION MINERAGRAFICA DE LAS MENAS

Como ya señalamos, la investigación mineragráfica plantea, como su tarea fundamental, el estudio de la composición de las menas y de sus particularidades textural estructurales. Esta tarea se puede resolver completamente sólo con el estudio general y consecutivo del yacimiento, comenzando desde las investigaciones de campo y terminando con la presentación del informe.

19.1 CONOCIMIENTO DEL YACIMIENTO Y SELECCION DE LAS MUESTRAS PARA LA INVESTIGACION

El conocimiento del yacimiento comienza con las excavaciones mineras y del testigo de los pozos, el análisis de la documentación geológica e informes que existan sobre el yacimiento. Es obligatorio el estudio de todas las muestras de rocas que existan hasta ese momento.

Por estos datos se confecciona el esquema de la estructura del yacimiento, la posición espacial de los cuerpos meníferos, el carácter de la mineralización menífera y su composición, determinada macroscópicamente.

Se realiza un intento previo de distinguir los tipos de menas por los índices texturales.

Después de esto, se procede a la selección de las muestras para las macro y microinvestigaciones. Las muestras se seleccionan de forma tal que caractericen totalmente a los diferentes cuerpos meníferos o depósitos por el busamento, rumbo y frecuencia, que reflejan todas las variedades texturales y tipos de menas. Las muestras se toman de los contactos y de las rocas encajantes, lo que se debe hacer incluso en caso de que en ella no se establezca la mineralización menífera visible. Todos los lugares de selección de muestras se asientan en el plano del yacimiento o del cuerpo menífero, y también en los planos de las excavaciones mineras y del testigo. Las interrelaciones más interesantes (genéticas) entre los agregados meníferos, elementos texturales y asociaciones paragenéticas es necesario dibujarlas, prestando atención a las texturas de las menas, estructura del

depósito, carácter de los contactos, composición mineral, etcétera. Es necesario señalar los elementos de yacencia del propio depósito menífero, las perturbaciones tectónicas observadas en él, grietas de disminución, espejo de deslizamiento, fallas de desplazamiento horizontal, fallas normales, etcétera.

Además de la selección sistemática de las muestras, se toman otras de minerales raros, con formas texturales interesantes, con formas raras de crecimiento o de interrelación de los agregados minerales y minerales. Cuando los elementos texturales de la mena son alargados y dirigidos, con frecuencia se toman de ella muestras orientadas.

Además de la selección sistemática de las muestras, se toman otras de minerales raros, con formas texturales interesantes, con formas raras de crecimiento o de interrelación de los agregados minerales y minerales cuando los elementos texturales de la mena son alargados y dirigidos con frecuencia se toman de ella muestras orientadas.

19.2. ESTUDIO MACROSCÓPICO DE LAS MUESTRAS

Además de la selección de muestras, éstas se marcan indicando el lugar de selección, y una descripción macroscópica detallada. En la descripción de las muestras se incluye: forma de la muestra, textura aproximada, tipo de mena, composición mineralógica aproximada (cualitativa y cuantitativa), alteraciones secundarias, transformaciones metamórficas observadas y otras particularidades observables a simple vista. Algunas veces se realiza la determinación de algunas propiedades físicas de la mena, como por ejemplo, magnetismo, densidad, porosidad, etcétera.

Las particularidades texturales de las menas, como de las rocas, aparecen claramente en las muestras pulidas, denominadas muestras pulidas. En ellas, mucho más claramente que en una muestra corriente, se dibujan los contactos, se ve mucho mejor la interrelación de edades de los agregados minerales, se analizan mejor los detalles de la estructura de la mena y algunas veces las formas estructurales de los minerales. Para preparar estas muestras pulidas se seleccionan las menas más típicas o las más interesantes por una u otra causa.

La dimensión de dichas muestras es estándar y como promedio es 9x12 cm. La metodología para su preparación es la misma de las secciones pulidas. Las muestras pulidas se describen cuidadosamente, se dibujan o se fotografían. Algunas veces se estudian bajo el microscopio o lupa binocular.

Después de la descripción macroscópica de las muestras y de su sistematización por las particularidades observadas (texturas, composición, tipos de menas, etcétera) se realiza su selección para preparar las secciones pulidas y transparente. La cantidad de secciones pulidas necesarias para el

estudio de un yacimiento puede ser diferente, varía ampliamente y depende de factores tales como la génesis del yacimiento, complejidad de la composición, estudio, tareas del estudio microscópico, etcétera.

En las condiciones más favorables, cuando la estructura y la composición mineral del yacimiento son bastante simples, se puede confeccionar una colección de muestras de 100-150 ejemplares, seleccionando de ellas 50-60 muestras para investigaciones microscópicas. Al seleccionar las muestras para preparar las secciones pulidas es necesario guiarse por la tarea concreta de la investigación, el volumen del trabajo, los recursos y la velocidad de su ejecución. Las muestras seleccionadas tienen que abarcar lo más posible la distribución espacial de las menas y representar todos los tipos de menificación.

19.3. PREPARACION DE LAS SECCIONES PULIDAS

Esta tiene que ser controlada por los especialistas que las estudian. Esto está relacionado con el hecho de que la calidad de las secciones pulidas determina mucho el éxito del trabajo de la investigación minerográfica de las menas. A las secciones pulidas preparadas se les revisa la calidad de la preparación y si ésta no satisface los requisitos planteados, las secciones deben ser devueltas para su rectificación.

Las secciones pulidas se montan con ayuda de plastilina o cera sobre el portaobjeto, cuyos bordes se cambian para que la marca se haga visible sobre la propia sección pulida, a un lado, con pintura o tinta china.

Las secciones pulidas montadas se conservan en cajas especiales con divisiones, donde se coloca la etiqueta correspondientes. Dicho método de conservación es el que mejor la preserva del sucio, del polvo, humedad y de posibles contusiones de los números cuando se trabaja con ellas. Todas las secciones pulidas se anotan en un catálogo especial, en el que posteriormente se anotan los resultados fundamentales de su investigación.

Además de las secciones pulidas corrientes hay que hacer, si existe la posibilidad, cierta cantidad de secciones pulidas (10-20%) de alta calidad en relieve, en las cuales podrían determinarse las microinclusiones y obtener buenas microfotografías. También hay que preparar varias secciones pulidas transparentes para la investigación de las interrelaciones entre minerales meníferos y no meníferos.

19.4. INVESTIGACION MICROSCÓPICA DE LAS MENAS

Ésta se realiza en los laboratorios. Todos los resultados del estudio microscópico de las menas se anotan en una libreta de trabajo especial que es el mismo sobre un determinado yacimiento. En la parte derecha de la libreta

generalmente se da la descripción detallada de los minerales, de sus agregados, formas del crecimiento, etcétera, y en la parte izquierda se señalan los resultados finales de las observaciones, para las cuales se prevé una determinada forma, que se muestra más adelante en forma de tabla (Tabla 19.1).

Algunas veces estos formatos se imprimen tipográficamente en modelos estándar y de estos modelos llenados para cada sección pulida, se confecciona un fichero. Este último se sistematiza por la composición mineral, estructuras, diferentes cuerpos meníferos, tipos de menas u otras particularidades. Posteriormente, esto ayuda a hallar muy rápidamente los datos necesarios obtenidos durante la investigación microscópica de las menas. El que comienza debe adaptarse a esta forma y determinar todos los parámetros incluidos en la tabla; tanto para los diferentes *minerales*, como para la mena en conjunto. A medida que se adquiere experiencia en la determinación de los minerales meníferos distribuidos, su diagnóstico se realizará solamente por diferentes índices y en la parte "Composición mineralógica" no se llenarán todas las columnas. Para un investigador experimentado esta parte le será necesaria sólo cuando determine minerales difíciles de establecer.

El orden normal de las investigaciones mineragráficas, es el siguiente:

1. Se realiza la determinación de los minerales meníferos por los índices físicos; influencia de la capacidad de reflejo, dureza, color, relación con la luz polarizada, reflejos internos, birreflexión. Por estos índices se determina la mayoría de los minerales de forma segura y sin la utilización de los índices complementarios.
2. Si los índices observados no dan resultados durante la determinación del mineral, entonces se investiga el magnetismo, la conductibilidad eléctrica, los índices morfológicos, la propiedades de rotación. En caso de necesidad se realiza el ataque diagnóstico. Sin embargo, el abuso del ataque no es aconsejable, ya que deteriora la sección pulida. Si el ataque diagnóstico no da resultados positivos, se provoca una reacción microquímica de prueba. Según los índices hallados el mineral se determina con la ayuda de la tabla determinativa resumen.
3. Después de establecer la composición mineralógica de la mena se realiza el estudio de su característica granulométrica con la determinación de las dimensiones promedios generales para cada mineral por separado.
4. Se determina el contenido volumétrico en por ciento de minerales meníferos y en caso de necesidad se calcula el contenido de uno u otro componente útil en la sección pulida investigada. Estas determinaciones cuantitativas, en dependencia de la exactitud requerida, se realiza a ojo,

por el método de composición o por uno de los métodos de cálculo (lineal, superficial, de punto).

5. La siguiente etapa es el esclarecimiento de la estructura interna de los agregados minerales y de sus granos. Los minerales anisotrópicos se estudian con los nicoles cruzados, y los isotrópicos con el ataque estructural. Los lugares de ataques estructurales sobre el plano de la sección pulida se señala con círculos o con otros signos convencionales y se enumeran. Con el número correspondiente, en la parte derecha se anotan el reactivo, el tiempo y el resultado del ataque.
6. Se establecen las particularidades textural-estructurales de los minerales y de sus agregados. Se señala el método de observación de las estructuras (luz polarizada, luz reflejada), el aumento del microscopio utilizado durante la observación de las estructuras. Se describen las interrelaciones de los minerales entre sí (crecimiento, inclusiones, intersecciones, sustitución, relación, etcétera). Basado en estos datos se hacen las conclusiones acerca de la consecutividad de separación de los minerales y acerca de los procesos que condicionan su formación.
7. Al finalizar las investigaciones microscópicas y la descripción de los minerales de la sección pulida, de ésta se seleccionan las estructuras interesantes, los granos, las formas de crecimiento, etcétera, para los dibujos y microfotografías (si hay necesidad de éstas). Estos lugares se señalan en el plano de la sección pulida con signos convencionales.

La práctica de las investigaciones con luz reflejada demuestra que para el estudio completo de una sección pulida se requiere dos o tres veces más tiempo, que para el estudio completo de una sección delgada.

Si surge la necesidad, después del estudio de las secciones pulidas de menas, se procede a la investigación de las secciones o muestras pulidas empleadas en el análisis textural.

CAPITULO 20

DETERMINACION DE LOS MINERALES METALICOS

20.1 USO DE LAS TABLAS DIAGNOSTICO

La metodología y el orden de determinación de los minerales metálicos dependen mucho, principalmente para los que comienzan, de la forma y perfección de las tablas diagnósticos utilizadas durante el trabajo.

La base de cualesquiera de las tablas diagnósticos son uno u otro índice diagnóstico o índices que el autor considere importante. Así, por ejemplo, en la mayoría de los manuales viejos de minerografía, la base para determinar los minerales meníferos se ha situado el ataque diagnóstico. Este método tiene desventajas considerables, que se basan en la poca precisión de los resultados obtenidos y con frecuencia en la imposibilidad de establecer, después de su aplicación en los minerales atacados, el resto de los índices diagnóstico-físicos. Además de eso, la mayoría de los minerales se determina más rápida, simple y seguramente sobre la base de los índices físicos.

El desarrollo de los métodos de investigación de las propiedades físicas de los minerales y el perfeccionamiento de los equipos en los últimos tiempos constituyen la base de las tablas diagnósticos de los índices físicos, los más importantes de los cuales se consideran la capacidad de reflejo, el color, la dureza, la microdureza (VHN) y la relación con la luz polarizada.

En los manuales que generalmente utilizan los estudiantes, las tablas determinativas también han sido confeccionadas basados en los índices físicos, pero los diferentes autores varían la estructura misma de las tablas. Así, por ejemplo, S.A Yuskro en *Métodos de investigación de menas en el laboratorio*, confeccionó sus tablas situando como base la relación de los minerales con la luz polarizada (anisotrópicas e isotrópicas) y la capacidad de reflejo en relación con la calcita y la esfalerita.

Hay que señalar la claridad y compactación de estas tablas, aunque las mismas no están carentes de desventajas. En primer lugar, no son totalmente cómodas para los que comienzan debido a la gran cantidad de signos convencionales tanto en la parte gráfica, como numérica. En segundo lugar, la capacidad de reflejo situada como base con la determinación de sus valores: "mayor que la galenita", "igual que la galenita y menor", "igual que

la esfalerita y menor" no es algo totalmente exitoso, tanto por parte de la utilización práctica, como por parte de la determinación de la capacidad de reflejo como índice cuantitativo expresado con un valor numérico. Además de eso, los valores dados para cada mineral, de la capacidad de reflejo, se dan para la luz monocromática (verde, naranja, rojo), y esto altera la idea del valor de la capacidad de reflejo con luz amarilla normal, en la cual se realiza la investigación de los índices fundamentales del mineral.

Para los que comienzan, la mejor tabla es la propuesta por S. A. Vajromeiev. Aunque ésta no está totalmente completa y no incluye algunos índices diagnóstico secundarios, su esquema permite establecer rápidamente el mineral o el grupo de minerales que poseen determinados índices.

El resumen propuesto en este curso de índices diagnósticos ha sido confeccionado basado en el principio de la tabla de Vajromeiev.

El índice fundamental en esta tabla es la dureza, determinada con las agujas metálicas, por la cual los minerales se dividen en tres grupos. Con los índices fundamentales se han relacionado:

1. Capacidad de reflejo expresada en por cientos para iluminación corriente y monocromática (con luz verde, amarilla y roja).
2. Color de los minerales
3. Relación con la luz polarizada
4. Dureza expresada en las unidades de la escala de Mohs y en kgf/mm^2 (para la microdureza VHN). En calidad de índices complementarios se han dado:
 1. Reflejos internos
 2. Birreflexión
 3. Magnetismo
 4. Resultados del ataque diagnóstico.

Además de eso, para cada mineral se da su fórmula química y la singonía.

Al determinar el mineral, ante todo se establece su dureza, lo que permite distinguir uno de los tres grupos que incluyen dicho mineral. Más adelante se determinan la capacidad de reflejo y el color. Algunos minerales se establecen por estos índices con buena precisión. Para otros es necesario determinar la relación con la luz polarizada, los reflejos internos, la birreflexión. En sentido general, no se revela un mineral, sino un grupo en 3-4 minerales con propiedades semejantes. Entonces se recurre a los índices complementarios, como el ataque diagnóstico, análisis microquímico, magnetismo, etcétera. Estas propiedades permiten precisar la posición del mineral investigado en la tabla diagnóstica.

En el presente curso, en las tablas determinativas se han dado los principales minerales formadores de mena, con los cuales, generalmente, tienen que tener contacto los estudiantes y los que comienzan en la práctica de

investigación, y los principales minerales no metálicos. La determinación exacta de los minerales metálicos con el método minerográfico es difícil y no siempre posible, pero el conocimiento de sus propiedades con luz reflejada y el poder diferenciarlos de los minerales no metálicos es totalmente necesario.

Más adelante se da la tabla resumen de las propiedades diagnósticas de los minerales meníferos. Tabla 20.1.

Para una mayor comprensión se han dado dos ejemplos de determinación de los minerales por estas tablas.

Ejemplo 1. Para un mineral se ha determinado: dureza media, R = entre 40-50 %, débilmente anisotrópico, color amarillo, no tiene reflejos internos. De los minerales de dureza media sólo la calcopirita satisface todos los índices.

Ejemplo 2. Para un mineral se ha establecido dureza media, R = 45-55 %, color amarillo, amarillo claro. Entre estos índices se observan cuatro minerales en el grupo de dureza media: millerita, niquelina, pentlandita, calcopirita. Por los datos de la tabla vemos que poseen diferentes grado de anisotropía del mineral investigado y establecemos que es muy anisotrópico. Este índice satisface a la millerita y a la niquelina. El índice más característico de estos dos minerales, como vemos en la tabla, es la birreflexión y determinamos que éste índice se manifiesta muy intensamente. Por consiguiente, el mineral investigado es la niquelina. Si existe duda en la identificación del mineral entonces es necesario comprobar sus otros índices, en particular: la magnitud de la capacidad de reflejo con luz monocromática, la microdureza, realizar análisis químico con arsénico.

Hay que recordar que en los manuales publicados de minerografía, además de los datos de la tabla, generalmente se da también la descripción detallada de los índices diagnósticos más importantes y sus particularidades para cada mineral. Cuando surgen dificultades en la determinación de uno u otro mineral hay que utilizar estos informes más ampliados. Es por ello que al final del capítulo se ofrece un complemento de las propiedades minerográfica de los minerales metálicos más comunes; en esta relación aparecen con un asterisco *.

Cuando se está adquiriendo experiencia en el diagnóstico de los minerales meníferos, cada investigador elabora sus propios métodos, basándose en la captación individual de unos u otros índices y en el equipo auxiliar que posea. Una gran importancia tiene el conocimiento de los fundamentos de la teoría de formación de las menas, el cual ayuda, junto con los datos de la tabla, a orientarse en la paragénesis de las asociaciones minerales.

Relación de los minerales por grupo de dureza en la tabla resumen. Los minerales marcados con un asterisco * están incluidos en la descripción final.

Grupo I. Minerales de dureza baja: Mohs (1-3) VHN: 20-250 kf/mm²

Mineral	Fórmula química
1. Plata nativa*	Ag
2. Cobre nativo*	Cu
3. Electrum	A,Ag
4. Oro nativo*	Au
5. Bismuto nativo*	Bi
6. Altaita*	Pb Te
7. Teluro nativo	Te
8. Telurobismutina	Bi ₂ Te
9. Krennerita	(Au, Ag) Te ₂
10. Melonita	Ni Te ₂
11. Silvanita	(Au, Ag) Te
12. Tetradimita	Bi ₂ Te ₂ S
13. Calaverita*	Au Te ₂
14. Clausthalita	Pb Se
15. Bismutina*	Bi ₂ S ₃
16. Valerita	Cu ₃ Fe S ₃
17. Antimonita	Sb ₂ S ₃
18. Siguenita*	Pb Cu Bi S ₃
19. Molibdenita*	MoS ₂
20. Galena*	PbS
21. Cilindrita	Pb ₃ Sn ₄ Sb ₂ S ₁₄
22. Geocronita	S ₈ Sb As Pb ₅
23. Hessita*	Ag Te
24. Petzita	Ag ₃ Au Te ₂
25. Jamesonita*	4 PbS, Fe s 3 Sb ₂ S ₃
26. Tillita	Pb Sn S ₂
27. Boulangerita*	Pb ₅ Sb ₄ S ₁₁
28. Emplectita	Cu Bi S ₂
29. Berterita*	FeS Sb ₂ S ₃
30. Argentita*	Ag ₂ S
31. Bornonita*	Pb Cu Sb S ₃
32. Zinckenita	Pb S ₄ Sb ₂
33. Wittchenita	Cu ₃ Bi S ₃
34. Eukairita	Ag Cu Se
35. Pirargirita	Ag ₃ SbS ₃

36. Klockmantita	Cu Se
37. Calcosina*	Cu ₂ S
38. Estefanita	Ag ₅ Sb S ₄
39. Cinabrio*	Hg S
40. Estromeyerita	Cu ₂ S Ag ₂ S
41. Metacinannbarita	Hg ₃ As S ₃
42. Proustita	Ag ₃ As S ₃
43. Quermesita	Sb ₂ S ₂ O
44. Oropimente*	As ₂ S ₃
45. Bornita*	Cu ₅ Fe S ₄
46. Covelina*	Cu S
47. Grafito	C
48. Rejalgar	AsS
49. Idaita	Cu ₅ Fe S ₆
50. Digenita*	Cu ₉ S ₅
51. Wulfenita	Pb Mo O ₄
52. Umanguita	Cu ₃ Se ₂
53. Crocoita	Pb CrO ₄
54. Valentinita	Sb ₂ O ₃
55. Azufre nativo	S
56. Melnikovita	FeS ₂
57. Anglesita*	PbSO ₂
58. Eritrina*	Co ₃ (As ₃ O ₄) ₈ · 8 H ₂ O
59. Annabergita	Ni ₃ (As ₃ O ₄) ₂ · 8 H ₂ O
60. Zuricalcita	(Zn,Cu) ₅ (CO ₃) ₂ · 8 H ₂ O
61. Calcita	CaCO ₃
62. Garnierita	Ni ₂ (SO ₁₀)(OH) ₈ · 4 H ₂ O
63. Calcantita	Cu SO ₄ · 5 H ₂ O
64. Bilirita	Co SO ₄ · 7 H ₂ O
65. Morenosita	NiSO ₄ · 7 H ₂ O

Grupo II. Minerale de dureza media Mosh (4-5-6) - VHN: 250-550 kgf/mm²

Mineral	Fórmula
66. Antimonio nativo	Sb
67. Platino*	Pt
68. Poladio*	Pd
69. Hierro nativo*	Fe
70. Saflorita*	Co As ₂
71. Domeykita*	Cu ₃ As
72. Millerita*	NiS
73. Pentlandita*	(Ni,Fe) ₉ S ₈
74. Calcopirita*	Cu Fe S ₂
75. Galenobismutina*	PLS Bi ₂ S ₃
76. Troilita	FeS
77. Calcoestibinita	Cu ₂ S Sb ₂ S ₃
78. Cubanita*	Cu Fe ₂ S ₃
79. Hauchecornerita	(Ni,Co) ₇ (S,Sb,Re) ₈
80. Pirrotina*	Fe _{1-x} S
81. Violarita	Fe NiS ₄
82. Freibergita	(Cu,Ag)SbS ₃
83. Renierita	S(Cu,Fe,Ge,Zn,Re)
84. Tetraedrita	Cu ₃ Sb S ₃
85. Tennantita	Cu ₃ As S ₃
86. Sulvanita	Cu ₃ vs ₄
87. Cuprita*	Cu ₂ O
88. Luzonita	Cu ₃ As S ₄
89. Enargita*	Cu ₃ As S ₄
90. Alabandina*	MnS
91. Tenorita*	CuO
92. Estannina	Cu ₃ Fe M S ₄
93. Hidroematita	Fe ₂ O ₃ n H ₂ O
94. Germanita	Cu ₃ (Fe,Ge)S ₄
95. Lepidocroita	Fe OOH
96. Greenockita	CdS
97. Maghemita	Fe ₂ O ₃
98. Mangamita	MnO(OH)
99. Esfaierita*	ZnS

100. Hidrogoethita	FeOOH.H ₂ O
101. Wurtzita	ZnS
102. Cincita*	ZnO
103. Cerusita	Pb CO ₃
104. Powellita	Ca MoO ₄
105. Scheelita*	Ca WO ₄
106. Malaquita*	Cu CO ₃ . Cu(OH) ₂
107. Siderita	Fe CO ₃
108. Azurita*	2 Cu CO ₃ .Cu (OH) ₂
109. Esferocobaltina*	Cu Co ₃
110. Plumbojarosita	Pb Fe ₆ (SO ₄) ₄ .(OH) ₁₂
111. Escorodita	Fe (AsO ₄). 2H ₂ O
112. Yarosita	K Fe ₃ (SO ₄) ₂ .(OH) ₆
113. Rodocrosita	Mn CO ₃
114. Barita	Ba SO ₄
115. Crisocola	Cu SiO ₃ .n H ₂ O
116. Fluorita	CaF ₂

**Grupo III. Minerales de dureza alta: Mosh (7-8-9) - VHN:
600 kgf/mm²**

Mineral	Fórmula
118. Escuterudita	Cu As ₃
119. Rammelsbergita	Ni As ₂
120. Muscherita	Ni ₁₁ As ₈
121. Glaucodota*	(Co
122. Cloantita*	(Ni,Co)As _{3-x}
123. Esmmaltina*	Co As ₂
124. Niquelina*	Ni As
125. Espirritita*	Pt As ₂
126. Arsenopirita*	Fe AsS
127. Loellingita*	Fe As ₂
128. Marcasita*	Fe S ₂
129. Pirita*	FeS ₂
130. Cobaltina*	Co As S
131. Gersdorffita*	Ni As S

132. Breithauptita*	Ni Sb
133. Uimanita	NiSbS
134. Linneita*	Co ₃ S ₂
135. Carrolita	Cu CO ₂ S ₄
136. Sigenita	(Co Ni)S
137. Polidimita	Ni ₃ S ₄
138. Corinita	Ni (As Sb)S
139. Bravoita	(Ni Fe Co) S ₄
140. Pirolusita	MaO ₂
141. Psilomelano	nMa ₂ O ₃ . MnO ₂ . mH ₂ O
142. Hematita*	Fe ₂ O ₃
143. Rutilo*	TiO ₂
144. Magnetita	Fe ₃ O ₄
145. Hausmanita	Mn ₃ O ₄
146. Jakobsita	MnO(Fe,Mn)
147. Braunita*	Mn ₂ O ₃ SiO ₃ Mn
148. Columbita-tantalita*	(Fe,Mn)(Ta,Nb) ₂ O ₆
149. Ilmenita*	Fe TiO ₃
150. Ilmenorutilo	Ti(Nb,Ta Fe)O ₂
151. Gohetita	Fe(OH)
152. Wolframita*	(Fe,Mn)WO ₄
153. Ferberita	Fe WO ₄
154. Hubnerita	Mn WO ₄
155. Franklinita	(Zn Fe Mn) . Fe ₂ O ₃
156. Perovskita	CaTiO ₃
157. Uraninita	(U Th)O ₂ ~
158. Nasturano	UO ₂
159. Cromita*	(Fe Mg)Fe Al Cr ₂ O ₄
160. Casiterita*	SnO ₂
161. Smithsonita	ZnCO ₃
162. Calamina	Zn ₄ Si ₂ O ₇ . (OH) ₂ H ₂ O
163. Cuarzo	SiO ₂

1. Alquinita (PCuBiS₃)

Propiedades físicas

Sistema: rómbico

Peso específico: 6,1-6,7 g/cm³

Dureza: Mohs 2-2,5

Microdureza: 165-204 kgf/mm²

Capacidad de reflejo

R_{máx} = 47,8 (540 nm)

R_{min} = 36,6 (700 nm)

R_v = 45,1 (500 nm)

R_n = 45,9 (620nm)

R_a = 39,0(580 nm)

Se pule mal; no es magnético; conduce débil la electricidad

Composición química

Cu = 11%; Pb = 36,0 %; Bi = 36,2 %; S = 16,8 %

Puede presentar impurezas de Te y Au; el oro en forma de inclusiones en estructura de composición de solución sólida.

Características microscópicas

- Anisotrópico
- Birreflexión: se manifiesta claramente.
- Reflejos internos: no se presentan; color blanco con tonalidades crema a amarillo pulido.

Se presentan en agregado aciculares y prismáticas; algunas veces en rayado vertical; raramente en forma de masas continuas (Borsovsk, Urales).

Paragénesis

Es un acompañante típico de menas auríferas hidrotermales de altas temperaturas, asociándose con el cuarzo, bismutino, pirita, calcopirita, galena, esfalerita, tetraedrita y emplectita.

Ataque químico

Con el HNO ebulle, desprendimiento de PbSO y azufre; con HCl (concentrado), se oscurece inmediatamente, revelando su estructura.

Indices característicos

Se parece a la bismutina, pero en comparación con ella tiene tonalidades amarillo-crema; mayor dureza; menor capacidad de reflejo; reacciones químicas positiva con HNO y HCl.

2. Alabandita (MnS)

Propiedades físicas

Sistema: Cúbico

Dureza: Mohs: 3,5-4

Peso específico: 3,95-4,04 g/cm³

Microdureza: 240-266 kgf/mm²

Capacidad de reflejo

R_{máx} = 28,8 (420 nm)

R_{min} = 21,1 (700 nm)

R_v = 24,4 (500 nm)

R_n = 21,6 (620 nm)

R_r = 21,1 (700 nm)

Se pule bien, no es magnético; conductividad eléctrica muy débil, prácticamente no es conductor.

Composición química

De acuerdo a su fórmula química contiene el 63,14 % de manganeso y el 36,85 % de azufre.

Características microscópicas

- Isotrópica, puede presentar débil anisotropía anómala de color gris-clara o gris oscuro.
- Birreflexión: no presenta
- Reflejos internos: verde oscuro o amarillo (se observan mejor en inmersión).
- Color: blanco con tonalidades grisáceas, se parece a la esfalerita.

Se presenta en agregados contínuos y xenomórficos, en ocasiones idiomórficos en intercrecimiento con otros minerales, pueden localizarse macias determinadas durante el pulido o en los ensayos estructurales.

Paragénesis

Se asocia frecuentemente con la rodocrosita, rodonita, calcita, cuarzo, esfalerita, galena, calcopirita, cobre gris, minerales de plata teluros de oro y otros.

Ataque químico

Reacción positiva con HNO_3 , HCl , ebulle, se oscurece y revela su estructura con desprendimiento de H_2S ; la estructura se revela mejor si se emplea $\text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ (solución).

Índices característicos

Presenta reflejos verde oscuro hasta amarillos, reacción positiva con el HNO_3 y HCl ; negativa con KCN , FeCl_2 ; reacción microquímica por el Mn positivo.

3. Aitaita (PbTe)

Propiedades físicas

Sistema: Cúbico

Dureza: Mohs: 2-3

Peso específico

Microdureza: 39-60 kgf/mm^2

Capacidad de reflejo

$R_{\text{máx}} = 71,8$ (580 nm)

$R_{\text{min}} = 60,2$ (700 nm)

$R_{\text{a}} = 69,0$ % (460 nm)

$R_{\text{v}} = 67,0$ % (500 nm)

$R_{\text{n}} = 64,6$ % (620 nm)

Se pule bien; no es magnético, conductividad eléctrica débil.

Composición química

Pb = 68,1 %; Te = 38,2 % puede contener algunos contenidos de plata (Ag)

Características microscópicas

- Isotrópica

- Birreflexión: no presenta

- Reflejos internos: no presenta

- Color: blanco brillante; puede presentar tonalidades verdosas hasta gris.

Los granos minerales comúnmente son pequeños y xenomórficos; pueden localizarse inclusiones fuera del mineral en la galena, petzita y hessita.

Paragénesis

Es un mineral de génesis hidrotermal; localizándose con cuarzo, calcedonia y siderita; además puede presentarse en filones piríticos con mineralización de oro y plata junto a la galena, teluros de oro y esfalerita.

Ataque químico

Reacción positiva con HNO_3 , ebulle y se oscurece (carmelita); HCl es iridiscente y se oscurece; con agua regia, se disuelve inmediatamente.

Índices característicos

Se diferencia de la galena por su alta capacidad de reflejo y por la reacción positiva al Te, reacción negativa con KCN , KOH .

4. Anglesita (Pb SO)

Propiedades físicas

Sistema: Rómbico

Dureza: Mohs: 25-3

Peso específico: 6,1-6,4 g/cm^3

Microdureza: 122-155 kgf/mm^3

Capacidad de reflejo

$R_{\text{m}} = 9$ %

Se pule bien; no es magnético; no conduce la electricidad.

Composición química

$\text{PbO} = 73,6$ %; $\text{Pb} = 68,3$ %; $\text{SO} = 26,4$ %. No se presenta impurezas; se conoce una variedad que puede contener Ba hasta 8,45 %.

Características microscópicas

- Débilmente anisotrópica.
- Birreflexión: no presenta.
- Reflejos internos: incoloros a pardos.
- Color: gris.

Sus agregados colomorfos de estructuras criptocristalina y de gel; en forma de estructura irregular o de filones; en ocasiones puede presentar cristales prismáticos alargados; es frecuente que forme bordes alrededor de los cristales de galena.

Paragénesis

Es un mineral común en la zona de oxidación de los yacimientos polimetálicos de plomo y zinc y en menas sulfurosas junta a la galena.

Ataque químico

Reacciona con HNO_3 y se oscurece con KI (5%) al cabo de un minuto se cubre con una película iridiscente de color azul.

Indices característicos

Semejante a la cerusita; se diferencia por la anisotropía, ausencia de birreflexión y por la reacción con el KI . Reacción positiva al KOH ; se disuelve a diferencia de la celestina y la borita.

5. Antimonita ($\text{Sb}_2 \text{S}_3$ estibinita)

Propiedades físicas

Sistema: Rómbico
Dureza: Mohs 2-2,5
Peso específico: $4,6 \text{ g/cm}^3$
Microdureza: $65-153 \text{ kgf/mm}^2$

Capacidad de reflejo:

$R_{\text{máx}} = 58,3 \%$ (460 nm)
 $R_{\text{mín}} = 30,0 \%$ (660 nm)
 $R_v = 56,7 \%$ - $31,4 \%$ (500 nm)
 $R_n = 49,3 \%$ - $29,6 \%$ (620 nm)

$R_r = 47,2 \%$ - $30,1 \%$ (700 nm)

Se pule bien; no es magnético; no conduce la electricidad.

Composición química

$\text{Sb} = 71,4 \%$; $\text{S} = 28,6 \%$

En ocasiones pueden observarse mezclas de As , Ag y Au ; tanto la plata como el oro se presentan en estructuras de descomposición de solución sólida.

Características microscópicas

- Anisotropía: intensa; muy fuerte; desde azul-gris-bianco y carmelita; fuerte extinción y en ocasiones presenta extinción ondulosa.
- Birreflexión: intensa; varía desde gris-blanco a carmelita.
- Reflejos internos: no presenta (en polvo fino y en inmersión, rojos intensos)
- Color: blanco con tonalidad azulosa.

Los cristales son prismáticos, aciculares y radiados, raramente allotriomórfico-granulosos; se presentan maclas polisintéticas, en ocasiones pueden estar zonados sus cristales.

Paragénesis

La antimonita, es un mineral de génesis hidrotermal; localizándose en filones de cuarzo-oro. Además, se asocia al cinabrio, fluorita, calcita, borita, arsenopirita y rejalgar-oropimente.

Ataque químico

Reacción positiva con HNO_3 se oscurece y KOH se oscurece y forma un precipitado rojo-naranja; con HCl se oscurece; reacción negativa con FeCl_3 , NaOH y HgCl_2

Indices característicos

- Intensa birreflexión y anisotropía; la reacción positiva con KOH (formación de precipitado rojo-naranja); reacción positiva al Sb .

6. Argentita (Ag₂S Acanrita)

Propiedades físicas

Sistema: existen dos modificaciones: cúbica, estable a temperatura superior a los 179 C°; por debajo de esa temperatura es rómbico y se denomina acanrita.

Dureza: Mohs 2-2,5

Peso específico: 7,2-7,4 g/cm³

Microdureza: 20-30 kgf/mm²

Capacidad de reflejo

Ra = 34,3 (470 nm)

Ra = 30,1 (589 nm)

Rr = 28,9 (650 nm)

Se pule mal, no es magnético, conductividad eléctrica débil

Composición química

Ag = 87,1 %; S = 12,9 %; las impurezas que se presentan: Cu, Pb, Fe y Sb.

Características microscópicas

- Isotrópico o débilmente anisotrópico
- Birreflexión: muy débil, visible en aceite, en las zonas de contacto con otros minerales o en las maclas.
- Reflejos internos: no se manifiestan.
- Color: blanco grisáceo con débil tonalidad verde-azulosa.

Sus segregaciones son allotriomorfa-granulosas en forma de incrustaciones o de venillas filamentosas; es común las estructuras de descomposición de las soluciones sólidas con la galena. Además, presentan asociaciones con covelina, bismutina, calcopirita, pirargirita y polibasita; es un mineral de génesis hidrotermal.

Paragénesis

Se asocia con la plata nativa; además de las mencionadas anteriormente con freibergita, esfalerita y más raramente con arseniuros de cobalto y níquel.

Ataque químico

En HNO₃ diluido, da reacción positiva, es raramente atacado por H₂O₂. En HCl se oscurece y es iridiscente. algunas veces se cambia a color negro por la acción de una luz intensa se enriquece rápidamente.

Indicis característicos

Presenta tonalidad verde azulosa; microscópicamente reacción negativa con HCl, KOH, NaOH, reacción positiva a la luz muy intensa.

7. Arsenopirita (Fe As S misquiqui)

Propiedades físicas

Sistema: monoclinico

Dureza- Mohs: 5,5-6

Peso específico: 5,9-6,2 g/cm³

Microdureza: 715-1354 kgf/mm²

Capacidad de reflejo

Rv = 47,9 % (500 nm)

Rv = 51,1 % (620 nm)

Rr = 50,0 % (700 nm)

Por lo general se pule bien, no es magnético, débil conductor de la electricidad

Composición química

Fe = 34,3 %; As = 46,0 %; S = 19,7 %; es general, los análisis representan cifras variables para los contenidos de As y S; entre las impurezas más frecuente se mencionan: Cu, Ni, Sb; particularmente el Au aparece en muchos yacimientos en la estructura de la arsenopirita (en fase microaleada).

Características microscópicas

- Muy anisotrópico; los colores varían desde tonos rosados hasta azul-verdoso.
- Birreflexión: débil pero se manifiesta
- Reflejos internos: no presenta
- Color: blanco con tonalidades crema a rosado.

Generalmente forma cristales idiomórficos de forma romboédrica, prismática, acicular; es característico el estriado de las caras de los cristales; pueden presentarse maclas en forma de cruz.

Paragénesis

La arsenopirita es un mineral de origen hidrotermal de altas temperaturas; se forma también por vía metasomática; es común en los filones auríferos y se presenta con frecuencia en algunos filones polimetálicos de Pb-Zn, rica en plata; presenta intercrecimiento con la pirita, lollenguita, menas grises, pirrotina, galena, safforita y cobaltina, forma estructura de descomposición de solución sólida con la glaucodota, en menor grado forma paragénesis con la casiterita, scheelita, bismuto, bismutino, plata y cubanita.

Ataque químico

Con HNO_3 se presenta ebullición y es iridiscente; revela estructura; reacción negativa con KCN; HCl, FeCl_3 .

Índices característicos

Alta dureza, color blanco; reacción positiva al NH_4OH , los demás reactivos no actúan, con excepción del agua, donde se disuelve con un tono pardo oscuro.

8. Azurita ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$)

Propiedades físicas

Sistema: monoclinico

Dureza: Mohs 3,5-4

Peso específico: 3,7-3,9 g/cm^3

Microdureza: 120-200 kgf/cm^2

Capacidad de reflejo: Muy baja, aproximadamente de 9-10 %.

No se realizan determinaciones cuantitativas.

Composición química

$\text{CuO} = 69,2 \%$; $\text{Cu} = 55,3 \%$; $\text{CO}_2 = 25,6 \%$; $\text{H}_2\text{O} = 5,2 \%$.

Los cristales prácticamente son puros, excepcionalmente se localizan escamas de oro nativo.

Características microscópicas

- Anisotropía: prácticamente no se manifiestan por estar su efecto emmascarado por sus reflejos internos.

- Birreflexión, no se manifiestan. Débil.

- Reflejos internos: muy fuerte; azul, azul-marino

- Color: blanco-azuloso o crema-azuloso.

Los cristales son prismáticos así como formas tabuladas, son frecuentes las drusas de pequeños cristales, masas continuas granulares y tenasas.

Paragénesis

Su presencia siempre está dada con la malaquita, pueden sustituirse mutuamente, se localiza en las zonas de oxidación de menas sulfuradas en condiciones hipogénicas.

Ataque químico

Se disuelve bien en HNO_3 y HCl con fuerte ebullición; se disuelve en NH_4OH dando una coloración azul a la solución.

Índices característicos

Baja capacidad de reflejo; reflejos internos azules; reacción positiva a los ácidos.

9. Bertierita ($\text{Fe Sb}_2 \text{S}_2$)

Propiedades físicas

Sistema: ortorrómbico

Dureza: Mohs 2-3

Peso específico: 3,9-4,3 g/cm^3

Microdureza: 134-206 kgf/mm^2

Capacidad de reflejo:

$R_{\text{máx}} = 45,9$ (420 nm)

$R_{\text{mín}} = 29,3$ % (500 nm)

$R_V = 44,0$ % (500 nm)

$R_n = 40,6$ (620 nm)

$R_r = 31,1$ % (700 nm)

Se pule bien, no es magnética, buen conductor de la electricidad

Composición química

Hay discrepancia entre los valores para cada elemento, al presentarse valores diferentes y no corresponderse con su fórmula química.

Características microscópicas

- Muy anisotrópica; parecida a la estibina pero son más vivos.
- Birreflexión: muy fuerte y es característico; es carmelita con tonalidades rosadas; parecido a la pirrotina.
- Reflejos internos: no presenta
- Color: blanco con tonalidades carmelitas-rosáceas.

Se presenta en cristales filamentosos en forma de agujas, raramente en agregados granuloso; es frecuente la aparición de maclas.

Paragénesis

Forma intercrecimientos orientados con la estibina calcopirita, reemplaza metasmicamente a la arsenopirita; pirita pirrotina, gudmundita y esfalerita; es reemplazado por la estibina; forma estructura de descomposición de las soluciones sólidas con pirita, arsenopirita, puede localizarse con antimonita, sulfosales de plata, jamesonita y cuarzo.

Ataque químico

Reacción positiva con KOH se oscurece lentamente (carmelita claro); NaOH, reacción similar pero más rápida; reacción negativa con: HNO₃, HCl, KCl, KCN, FeCl₃.

Indices característicos

Alta manifestación de la birreflexión, reacción positiva al KOH, reacción negativa a HCl y HNO₃.

10. Bismuto nativo (Bi)

Propiedades físicas

Sistema: trigonal
Dureza: Mohs 2-2,5
Peso específico: 9,7-9,8 g/cm³
Microdureza: 16-26 kgf/mm²

Capacidad de reflejo

R_{máx} = 78,0 (700 nm)
R_{min} = 54,5 (460 nm)
R_v = 55,4 (500 nm)
R_a = 60,3 - 73,6 (580 nm)
R_n = 64,6 - 77,3 (620 nm)

Se pule bien; es buen conductor de la electricidad.

Composición química

La composición química puede alcanzar el 100 % del elemento; con frecuencia se detectan cantidades de Te y Au.

Características microscópicas

- Anisotropía: muy anisotrópico; cambio de tonalidades
- Birreflexión: débil pero se manifiesta especialmente en inmersión; las tonalidades varían desde el crema a crema-gris.
- Reflejos internos: no presenta.
- Color blanco con tonalidad rosado-crema.

El bismuto nativo se manifiesta en agregados allotromórficos-granulosos, dendritas, esqueléticas; con luz polarizada (nicoles cruzados) se pueden observar maclas laminadas.

Paragénesis

El bismuto se asocia con pirrotina, pirita, esfalerita, calcopirita, cubanita, bismutina; forma paragénesis con minerales de Co-As; se localiza además con casiterita-cuarzo-scheelita y wolframita.

Ataque químico

Reacción positiva con el HNO₃; ebulle con escape de gas; con HCl se oscurece lentamente la superficie; bajo la acción del FeCl₃ se oscurece, es iridiscente y revela su estructura. Reacción negativa con KCN, KOH.

Indices característicos

Baja dureza y microdureza; típica estructura de maclas, alta capacidad de reflejos; en granos pequeños puede confundirse con la plata; diferenciándose por su repuesta de ataque químico.

11. Bismutina (Bi_2S_3)³

Propiedades físicas

Sistema: Rómbico
Dureza: Mohs: 2-2.
Peso específico: 6,4-6,8 g/cm³
Microdureza: 118-172 Kgf/mm²
Capacidad de reflejo
R_{máx} = 52,5 (500 nm)
R_{min} = 33,0 (700 nm)
Ra = 52,3-37,2 (460 nm)
Rn = 50,0-33,8 (580 nm)

No es magnético se pule bien; conduce la electricidad débilmente.

Composición química

Bi = 81,3 %; S = 18,7 %. Son frecuentes las impurezas de Pb, Cu, Fe As y Sb; en menor grado Te. En el caso específico del Te, Pb, Sb pueden ser sustitutos isomorfos del bismuto.

Características microscópicas

- Muy anisotrópico; especialmente en inmersión; su anisotropía es más débil que la antimonita; se manifiesta con tonalidades desde gris hasta amarillo.
- Birreflexión: débil; pero se distingue.
- Reflejos internos: no presenta
- Color: blanco puro, en ocasiones con débiles tonalidades amarillas.

Se presenta al igual que la antimonita en cristales aciculares alargados, prismáticos; presentando un fino estriado; también se encuentra en masas granulares, en forma de agregados radiales.

Paragénesis

Se asocia a la casiterita, wolframita, arsenopirita, pirrotina, raramente con el oro; topacio, berilo, pirlita y galena. Se encuentra en asociación con el bismuto nativo y los sulfoantimoniuros de Pb y Ag.

Ataque químico

Reacción positiva con HNO con desprendimiento de S; con IK produce fosforescencia roja (yoduro de bismuto); con HI concentrado es iridiscente. Reacción negativa: con KCN, FeCl₃, KOH.

Indices Característicos

Reacción positiva al Bi, se diferencia de la antimonita por el resultado negativo al KOH.

12. Bornita ($\text{Cu}_5\text{Fe}_4\text{S}$)

Propiedades físicas

Sistema Tetragonal (a los 220 °C pasa al sistema cúbico)
Peso específico: 4,9-5,0 g/cm³
Dureza : Mohs 3
Microdureza: 97-124 Kgf/mm²

Capacidad de reflejo

R_{máx} = 28,8 (660 nm)
R_{min} = 15,7(470 nm)
Rv = 18,6 (500 nm)
Rn = 26,3 (620 nm)
Rr = 27,4 (700 nm)

Se pule muy bien; no es magnético y conduce débilmente la electricidad.

Composición química

Su composición química no es constante; de acuerdo a su fórmula química: Cu Fe S;- su composición debe ser: Cu = 63,3 %; Fe = 11,2 %; S = 25,5 %. No obstante la composición de la bornita varía en intervalos considerables, ya que el mineral puede contener calcopirita y calcosina en forma de solución sólida; en ocasiones puede contener Ag.

Características microscópicas

- Usualmente muestra una débil anisotropía: solamente en agregados de granos muy pequeños puede mostrarse isotrópicos.

- Birreflexión; no se presenta; en ocasiones puede mostrarse una débil birreflexión; sobre todo en los contactos con estos minerales y en las maclas laminadas.

- Reflejos internos: no presenta.

- Color: rosado-carmelita, violeta o irisado

El mineral se manifiesta en agregados granulosos; es común que forme estructuras de descomposición de soluciones sólidas con calcopirita y calcosina.

Paragénesis

La bornita primaria está asociada con la calcopirita y cobre gris en los yacimientos hidrotermales; la bornita secundaria es característica de las zonas de enriquecimiento secundario y está asociado con covelina, calcosina y calcopirita.

Ataque químico

Reacción positiva con HNO_3 , ebulle y se oscurece, revela estructura; reacción similar si se utiliza KCN; con FeCl se disuelve y da coloración naranja. Reacción negativa con HCl, HCl (concentrado), KOH, NaOH y H_2SO_4 (concentrado).

Indices característicos

Por su repuesta al ataque químico, la microdureza es baja; paragénesis; su color es típico.

13. Boulangerita ($\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{S}_{11}$)

Propiedades físicas

Sistema: monoclinico

Peso específico: $6,23 \text{ g/cm}^3$

Dureza: Mohs: 2,5-3

Microdureza: $113-179 \text{ Kg/mm}^2$

Capacidad de reflejo

$R_{\text{máx}} = 56,0$ (440 nm)

$R_{\text{mín}} = 33,0$ (700 nm)

$R_v = 37,3-54,7$ (500 nm)

$R_v = 38,1-47,4$ (420 nm)

$R_n = 33,7-49,9$ (660 nm)

Se pule bien; no es magnético; no conduce la electricidad.

Composición química

$\text{Pb} = 55,4 \%$; $\text{Sb} = 25,7 \%$; $\text{S} = 18,9 \%$

El contenido de plomo varía entre 54 y 58 %; en ocasiones puede contener hasta 1 % de cobre.

Características microscópicas

- Anisotropía débil; se manifiesta mejor de aceite en inmersión donde presenta variados colores tales como el gris, crema, azul.

- Birreflexión; débil; se manifiesta mayor en el contacto con otros minerales y donde se detectan maclas.

- Reflejos internos: débiles; poco visibles; rojos y rojo-oscuro (mejor en inmersión)

- Color: blanco con tonalidades verde azulosa.

Se presenta en cristales en forma de agujas; muy raras veces; lo común es encontrarlo en agregados filamentosos y enmarañados.

Paragénesis

La boulangerita se forma prácticamente en yacimientos hidrotermales de diferentes rangos de temperaturas en menas de plomo y zinc; puede ser reemplazada por la galena, tetraedrita, bournonita, calcopirita, pirargirita y otros antimoniuros; además, se localiza intercrecimiento con la galena, estibina (antimonita), estannina y esfalerita.

Ataque químico

Reacción positiva con el HNO_3 ; se oscurece rápidamente y ebulle; reacción negativa con HCl, KCN, FeCl_3 NaOH y KOH; con este último se diferencia de la jamesonita.

Indices característicos

Se diferencia de la galena por la anisotropía débil; bien marcada en inmersión con diferentes tonalidades y con la reacción negativa del KOH; se diferencia de la jamesonita.

14. Braunita ($3 \text{ MnO}_3 \cdot \text{SiO}_3 \text{ Mn}$)

Propiedades físicas

Sistema: tetragonal

Dureza: Mohs 6-6,5

Peso específico: 4,7-5,0 g/cm^3

Microdureza: 689-786 kg/mm^2

Capacidad de reflejo

$R_{\text{máx}} = 31,8$ (440 nm)

$R_{\text{mín}} = 19,4$ (700 nm)

$R = 21,9-31,1$ (500 nm)

$R = 21,2-29,9$ (540 nm)

Se pule bien; no es magnético; no conduce la electricidad.

Composición química

$\text{MnO} = 44,8\%$ $\text{MnO} = 55,2\%$

Las cifras anteriores se consideran para la fórmula Mn_2O_3 ; recientemente fue establecida la fórmula que aparece más arriba, de acuerdo a investigaciones rontgenográfica; pudiendo llegar el contenido de SiO_2 hasta 8%; así como la existencia del Fe hasta el 10,0%, también ha sido posible establecer la presencia de B y Ba. Ramdohr expresa la composición de la braunita como sigue: $3(\text{Mn}, \text{Fe})_2\text{O}_3 \cdot \text{MnSiO}_3$.

Características microscópicas

- Se manifiesta débil anisotropía; distinguiéndose mejor en aceite (inmersión); con tonalidades desde el gris débil a tintes azulosos; es característico que se observe la extinción ondulosa.

- Birreflexión: débil; se manifiesta mejor en inmersión; con tonalidades carmelita oscura.

- Reflejos internos: carmelita oscuro; más visible en inmersión.

- Color: gris claro con tonalidades carmelita.

Es común que se presente en forma de agregados isométrico y piramidales raramente se observan maclas y zonalidad.

Paragénesis

La braunita es un mineral de manganeso que se forma en diferentes condiciones geológicas y físico-químicas; pudiéndose formar en condiciones hipergénicas en zonas de enriquecimiento secundario a bajas tempe-

raturas y presión; a partir de gel de psilomelano y de otros minerales de manganeso. Se localiza también a altas temperaturas y presión como producto del metamorfismo regional. Forma intercrecimiento con la hematita; pirolusita; puede ser sustituido por pirolusita, hausmanita y psilomelano; además, se asocia con la magnetita y la manganita.

Ataque químico

No reaccionan los reactivos normales; HF concentrado y después de 60-100 segundos produce la revelación de la estructura del mineral.

Indices característicos

La identificación de la braunita es difícil se confunde con la hausmanita, manganita y magnetita, en ocasiones con la jakobsita; de la que se distingue porque la braunita es débilmente anisotrópica y estos dos últimos son fuertemente anisotrópicos; un índice característico es su reacción negativa a los reactivos comunes.

15. Breithauptita (Ni Sb)

Propiedades físicas.

Sistema: hexagonal

Dureza: Mohs 5,5

Peso específico: 7,5 = 7,6 g/cm^3

Microdureza: 412 = 584 Kg/cm^2

Capacidad de reflejo

$R_{\text{máx}} = 60,9$ (660 nm)

$R_{\text{mín}} = 35,2$ (500 nm)

$R = 37,4-45,5$ (470 nm)

$R = 36,9-48,2$ (546 nm)

$R = 43,7-53,0$ (589 nm)

$R = 51,0-58,0$ (650 nm)

Se pule bien, no es magnético, buen conductor de la electricidad.

Composición química

Antimoniuro de níquel, que puede presentar algunos contenidos de As; su composición es $\text{Ni} = 32,8\%$ y $\text{Sb} = 67,2\%$. Presenta brillo metálico muy

fuerte: su tonalidad es rojo de cobre que cambia rápidamente a violeta o pardo rojizo.

Características microscópicas

- Reflejos internos no presenta.
- Color: rosado con tonalidades violeta.

Sus agregados son allotriomórficos; raramente cristales idiomórficos; con frecuencia presentan maclas; es común que se manifieste zonación en sus granos.

Paragénesis

Se localiza en varios yacimientos minerales que se han formado bajo altos valores de temperatura y presión; su mayor distribución está dada en filones hidrotermales en paragénesis con minerales de cobalto, níquel, plata (en calcita); puede ser reemplazada por la níquelina, plata, minerales de plata y saflorita. Ocasionalmente se localiza en inclusiones de cromita, pentlandita, galena saflorita; puede formar intercrecimientos con la pirrotina.

Ataque químico

Reacción positiva con HNO_3 ; ebulle lentamente, se oscurece; se ennegrece; reacción negativa con HCl , KCN , HgCl_2 , $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$.

Índices característicos

Color rosado, anisotropía intensa (juego de colores); reacciones positiva al Ni y Sb.

16. Bournonita (CuPbSbS_3)

Propiedades físicas

Sistema: rómbico

Dureza: Mohs 2,5-3

Peso específico: 5,7-5,9 g/cm^3

Microdureza: 166-187 kg/mm^2

Capacidad de Reflejo

$R_{\text{máx}} = 38,0(460 \text{ nm})$

$R_{\text{mín}} = 30,0(700 \text{ nm})$

$R_{\text{v}} = 36,1-37,7(420 \text{ nm})$

$R = 36,6-342(540 \text{ nm})$

$R = 34,7-32,3(620 \text{ nm})$

Se pule bien, no es magnético, no conduce la electricidad.

Composición química

Cu, 13,0 %; Pb - 42,5 %; Sb - 24,7 %; S - 19,8 %. En la estructura del mineral es posible localizar Fe (hasta el 5,0 %), Ag (hasta el 3 %); también, contenidos muy bajos de Zn y Mn.

Características microscópicas

- Anisotropía débil; se distingue bien cuando aparecen maclas; desde azul - pulido - gris verdoso - carmelita oscuro - púrpura.
- Birreflexión; débil se distingue mejor en los contactos con otros minerales y zonas de maclas.
- Reflejos internos; se presentan raramente; rojos oscuros - pardo oscuro.
- Color: blanco grisáceo con tonalidades azul-verdosa.

Generalmente forma agregados de granos allotriomórficos o de cristales finamente prismáticos; es característico del mineral la presencia de las maclas laminadas en (110) lo que se desarrollan en dos direcciones (macla polisintética).

Paragénesis

La bournonita se asocia generalmente con yacimientos hidrotermales de temperatura media de Pb-Zn; es común la asociación con la galena y la tetraedrita; la bournonita también puede estar presente en yacimientos metamórficos de menas polimetálicas de Pb - Zn.

Ataque químico

Reacción positiva con agua regia, reacciones negativa con HNO_3 , KCN , HCl .

Índices característicos

Reacción negativa con el HNO_3 ; y la presencia de maclas polisintéticas en dos direcciones.

17. Calaverita (Au Te₂)

Propiedades físicas

Sistema: monoclinico
Dureza: Mohs 2,5
Peso específico: 9,0 g/cm³m
Microdureza: 213-237 kgf/mm²

Capacidad de reflejo

R_{máx} = 70,9(700 nm)
R_{mín} = 49,2(420 nm)
R = 51,9-63,8 (500nm)
R = 63,1-67,6(580 nm)
R = 55,9-70,0 (660 nm)

Se pule bien; no es magnético; buen conductor de la electricidad.

Composición química

En la composición química de la calaverita - Au Te₂; el oro (Au) - 44% y el Te - 56,0 % desde el punto de vista teórico; en la composición del mineral, está presente casi siempre, la Ag que puede llegar hasta contenidos del 4 % ocasionalmente se localiza Cu y Sb.

Características microscópica

- Anisotropía: débil, pero se manifiesta bien.
- Birreflexión: débil; se distingue; (depende de la orientación)
- No presenta relieves internos
- Color: blanco, con tonalidades crema-rosado o amarillenta.

El mineral aparece en agregados continuos, allotriomórficos; también en cristales prismáticos pequeños.

Paragénesis

Es un mineral típicamente hidrotermal de baja temperatura, se asocia con la silvanita y con otros teluros, piritas, esfalerita, monas grises, bismutina, antimonita, arsenopirita y calcopirita; además, se asocia al oro nativo y plata nativa.

Ataque químico

Reacción positiva con HNO₃, ebulle lentamente, es iridiscente, se torna pardo y ennegrece; reacción negativa con KCN, HCl, Na OH, Hg Cl₂.

Índices característicos

La paragénesis es importante en su determinación; se diferencia de la silvanita por una dureza y microdureza más alta y por birreflexión débil.

18. Calcopirita (Cu Fe S₂)

Propiedades físicas

Sistema: tetragonal
Dureza: Mohs 3-4
Peso específico: 4,1-4,3 g/cm³
Microdureza: 174-219 kgf/mm²

Capacidad de reflejo

R_{máx} = 49,7 (620 nm)
R_{mín} = 18,0 (420 nm)
R = 27,4(440 nm)
R = 25,0-32,5 (460 nm)
R = 31,7-42,1(500 nm)
R = 36,4-47,1(540 nm)
R = 39,3-49,2 (580 nm)
R = 29,2-48,4 (660 nm)

Se pule bien; no es magnético conduce débilmente la electricidad.

Composición química

La composición química de la calcopirita; de acuerdo a su fórmula, es como sigue:

Cu - 34,57 % ; Fe - 30,54 % ; S - 34,9 % ; como impureza se observan, a veces, cantidades muy bajas de plata (Ag) y oro (Au)

Características microscópicas

La anisotropía es débil, casi no se observa, aunque se ve mucho mejor en inmersión; dando tonalidades desde el gris azulado al gris amarillento.

aquellos que el contenido de Fe es mayor al normal, la intensidad del fenómeno se incrementa, hasta fuerte anisotropía.

- Birreflexión: ocasionalmente puede presentar birreflexión.

- No presenta reflejos internos.

- Color: amarillo, amarillo brillante; de contener pequeñas cantidades de Se el color pasa a carmelita.

Sus agregados son allotromórficos muy raramente aparecen cristales; es posible la presencia de maclas polisintéticas; se localizan, además, formaciones colomórficas en forma arriñonada.

Paragénesis

La calcopirita es un mineral ampliamente distribuido; se localiza en los primeros diferenciados magmáticos en las menas de sulfuro de níquel y cobre; en asociación con la pentlandita-pirrotina-magnetita-cubanita.

Es más común localizarla en los yacimientos posmagmáticos, fundamentalmente en los yacimientos de scarn e hidrotermales; en estas condiciones se asocia a la pirita; menas grises, galena, calcosina, covelina, hematita, arsenopirita, scheelita, wolframita, molibdenita, oro nativo, cobre nativo, cuprita, tenorita, etcétera. Raramente puede formarse en condiciones exógenas (sementarias); en presencia de ácido sulfúrico y soluciones con alto contenido de Cu.

La calcopirita, en sus paragénesis, es común la presencia de estructuras de descomposición de soluciones sólidas.

Ataque químico

Reacción positiva con HNO_3 ; es atacado lentamente originando manchas muy ligeras; reacción negativa con HCl , KCN , FeCl_3 , HgCl_2 , KOH , NaOH .

Indices característicos

Color amarillo que en pequeños granos puede confundirse con el oro; la presencia de estructuras de descomposición; la reacción positiva con HNO_3 ; se diferencia de la pirita: esta es menos amarilla.

19. Calcosina (Cu_2S)

Propiedades físicas

Sistema: rómbico 103°C hexagonal

Peso específico: 5,5-5,8 g/cm^3

Dureza: Mohs 2,3

Microdureza: 70-98 Kg/mm^2

Capacidad de reflejo

$R_{\text{máx}} = 37,0$ (420 nm)

$R_{\text{min}} = 27,1$ (700 nm)

$R_v = 35,1-33,5$ (500 nm)

$R_a = 30,2-31,3$ (580 nm)

$R_n = 29,0-30,2$ (620 nm)

Se pule muy bien; no es magnético; buen conductor de la electricidad.

Composición química

La composición química de la calcosina es como sigue: Cu - 79,9 % ; S - 20,1 %; están presente las impurezas de Ag, Fe, Co, Ni, As y Au; algunos de ellos en forma de mezclas mecánicas.

Características microscópicas

- Anisotropía: débil pero se distingue; con tonalidades desde el verde esmeralda al rosado brillante, sobre todo si se emplea alta iluminación se ha comprobado que una fuerte presión durante el proceso de pulido puede originar un falso isotropismo.

- Birreflexión: débil; en ocasiones no se distingue.

- Reflejos internos: no presenta.

- Color: blanco azulado grisáceo

Los cristales son sumamente raros y en ocasiones tienen aspecto hexagonal en forma de columnas; la masa fundamental del mineral se presenta en agregados microgranulares o en forma de inclusiones con otros sulfuros.

Paragénesis

Se forma por vía hidrotermal en condiciones endógenas, raramente se forma a partir de soluciones neumatolíticas, la vía fundamental de formación es exógena en las llamadas zonas de enriquecimiento secundario de los yacimientos de menas sulfurosas de cobre; al reaccionar los sulfuros primarios de cobre con el sulfato de cobre que se infiltra desde la zona de oxidación en los mencionados yacimientos cupríferos; puede también formarse por vía sedimentaria.

Ataque químico

Reacción positiva con el HNO_3 ; que produce fuerte ebullición, y se tornan azul oscuro, revelando su estructura; el FeCl_3 ; se disuelve y disminuye su coloración; no desarrollando la estructura; débil reacción al Hg Cl_2 . Reacción negativa con HCl

Indices característicos

Color azul claro o rosado inestable que al ponerse en contacto con el aire, adquiere rápidamente tonos oscuros, ataque, paragénesis.

20. Casiterita (SnO_2)

Propiedades físicas

Sistema: tetragonal

Dureza: Mohs 6-7

Peso específico: 6,8-7,0 g/cm^3

Microdureza: 1008-1228 Kgf/mm^2

Capacidad de reflejo

$R_{\text{máx}} = 13,6$ (460 nm)

$R_{\text{min}} = 10,0$ (660 nm)

$R = 11,6-13,0$ (420 nm)

$R = 11,2-13,0$ (500 nm)

$R = 10,3-12,4$ (620 nm)

Se pule mal, generalmente forma superficies arrugadas; no es magnético. No conduce la electricidad.

Composición química

De acuerdo a la fórmula posee $\text{O}_2-21,2\%$; $\text{Sn}-78,8\%$; casi siempre hay impurezas, fundamentalmente en las casiteritas de origen pegmatítico; las impurezas más comunes son: Fe_2O_3 ; Ta_2O_5 ; Nb_2O_5 ; TiO_2 ; MnO , FeO , ocasionalmente ZrO_2 y WO_3 ; los que se presentan como mezclas isomórficas o en estructura de descomposición de soluciones sólidas.

Características microscópicas

Anisotrópico con tonalidades desde el carmelita al carmelita oscuro; su elaboración es mejor en inmersión; su determinación puede estar interferida por la manifestación de reflejos internos.

Birreflexión; débil

Color gris, pero puede cambiarse hasta carmelita-rojizo por la presencia de impureza sobre todo las de Fe.

Reflejos internos abundantes, incoloros, amarillos, amarillo ambar, amarillito pardo.

Se presentan cristales isométricos de aspecto bipiramidal y prismáticos; agregados granulados, segregaciones arriñonadas y metacolooidales; sus granos frecuentemente están maclados y zonados.

Paragénesis

Forma varias asociaciones piragenéticas:

a) En los gneises se asocia al cuarzo, topacio, turmalina, molibdenita y wolframita.

b) En las pegmatitas con cuarzo, topacio, albita, micas berilo, columbita y tantalita.

c) En yacimientos hidrotermales, con cuarzo, sulfuros de cobre, plomo, hierro, bismuto, algunas veces cobalto.

Puede ser sustituida por pirita, arsenopirita, pirrotina, bismutina; en cambio sustituye a la pirita, arsenopirita y esfalerita.

Se asocia, además, a la scheelita, wurtzita, tetraedrita, tenantita; sulfosales de Pb-Zn, marcasita, burnonita, niquelina y estibinita.

Ataque químico

No actúa ningún reactivo común.

Indices característicos

Baja dureza, baja capacidad de reflejo, y reflejos intensos a muy intensos; paragénesis.

21. Cinabrio (S Hg)

Propiedades físicas

Sistema: trigonal

Dureza : Mohs 2-2,5
Peso específico: 8,09 g/cm³
Microdureza: 51-98 Kg/mm²

Capacidad de reflejo

R_{máx}: 35,6 (420 nm)
R_{mín}: 22,9 (700 nm)
R = 31,6-26,9 (460 nm)
R = 30,2-24,9 (540 nm)
R = 28,2-24,0 (620 nm)

Se pule bien; no es magnético; no conduce la electricidad.

Composición química

Hg - 86,2 %; S - 13,8 %; puede presentar mezclas isomórficas

Características microscópicas

- Anisotrópico; la observación se dificulta por ser interferida por la intensidad de los reflejos internos.

- Birreflexión débil; se observa mejor en inmersión.

- Reflejos internos, rojo brillante, intensos, interfieren los de más índice microscópicos.

- Color blanco con tonalidades de gris a azulado (celestino)

Los cristales son pequeños, tabulados; forman macías muy típicas; sus agregados son irregulares, a veces, en masas compactas y pulverulentas.

Paragénesis

Generalmente, se localiza en yacimientos hidrotermales de bajas temperaturas donde se asocia con la antimonita, cinabrio, realgar, bismutina, oropimente, pirita, marcasita, cuarzo, carbonatos y fluorita; se localiza también junto a la metacinnabarita (variedad cúbica del HgS), galena y enargita.

Ataque químico

Reacción positiva con agua regia, produce efervescencia, reacción negativa con HNO₃, KCN, HCl, FeCl₃ y KOH.

Indices característicos

Reflejos internos rojos intensos, baja dureza, reacción positiva con agua regia; paragénesis.

22. Cincita (ZnO)

Propiedades físicas

Sistema: hexagonal

Dureza: Mohs 4,5-5

Peso específico: 5,4-5,7 g/cm³

Microdureza: 150-318 kgf/mm²

Capacidad de reflejo

R = 11,0 (500 nm);

R = 10,0 (580 nm);

R = 8,0 (700 nm)

Se pule bien; no es magnético; no conduce la electricidad.

Composición química

De acuerdo a su composición, contiene de Zn-80,3 %, O-19,7 %, comúnmente posee Mn que puede llegar hasta 9,0 %.

Características microscópicas

Anisotropía débil, casi no se revela se dificulta su determinación por los reflejos internos.

Birreflexión; no se observa.

Reflejos internos; muy intensos y abundante, amarillos, rojos, rojo brillante.

Color, gris, con tonalidades amarillo rosáceos y carmelita.

No es frecuente la presencia de cristales, agregados poligonales, idiomórficos.

Paragénesis

Se asocia con la franklinita, esfalerita, willemita, calcita, y smithsonita.

Ataque químico

Reacción positiva con HNO₃ y HCl; ebulle y se oscurece, revela estructura.

Indices característicos

Reflejos internos, intensos, brillantes y abundantes, anisotropía débil y paragénesis

23. Cobaltina (CoAsS)

Propiedades físicas

Sistema: cúbico

Dureza: Mohs 5-6

Peso específico: 6,0-6,4 g/cm³

Microdureza: 948-1079 Kgf/mm²

12 = Capacidad de reflejo

R_{máx} = 56,6 (700 nm)

R_{min} = 47,7 (420 nm)

R = 48,6 (460 nm)

R = 50,3 (540 nm)

R = 54,1 (620 nm)

Se pule mal; es muy raro obtener buen pulido, no es magnético; conduce debilmente la electricidad.

Composición química

La composición química teórica es como sigue: Co-35,4 % ; As-45,3 % ; S-19,3 %. Según los datos de análisis, el contenido de Co, oscila entre el 26 %-34 %; el de As, entre el 42 %-48 %; el de S, entre 18 y el 21 %. Es común encontrar contenido de Ni entre 2 %-3 %, el Fe puede alcanzar hasta el 8 % y excepcionalmente el 16 % en la ferrocobaltina.

Características microscópicas

- Anisotropía muy débil; casi imperceptible en observaciones al aire; se revela mucho mejor en inmersión.

- Birreflexión no se manifiesta en el aire; en inmersión desde blanco, a rosado pálido.

- Reflejos internos, no presenta.

- Color, blanco con tonalidades desde el rosado al violeta y carmelita.

Los cristales del mineral son frecuentes (cristales ortoédricos, cúbicos); se localiza también en granos irregulares y en masas compactas; las maclas laminadas son frecuentes, así como la zonación de los cristales.

Paragénesis

Se encuentra fundamentalmente como mineral típico de los procesos hidrotermales en los yacimientos metasomáticos de contacto. Se localizan inclusiones de oro, plata, niquelina, calcopirita, puede sustituir a: arsenopirita, pirita, skuterudita, esfalerita, galena. Además, se localiza junto a la cubanita, bismuto, molibdenita, grafito y glaucodota, pudiendo formar intercrecimientos con la gersdosfita y la safflorita.

Ataque químico

Reacción positiva con $K MnO_4 + H_2 SO_4$; reacción muy débil al HNO_3 ; reacción negativa con HCl , $Fe Cl_3$, $Hg Cl_2$, H_2O_2 (30 %); la reacción inicial, positiva es muy favorable para la revelación de estructura y maclado.

Indices característicos

Color blanco rosáceo, mal pulido, alta microdureza, estructura zonal; puede confundirse con algunos minerales del grupo de los platinoides.

24. Cobre nativo (Cu)

Propiedades físicas

Sistema: Cúbico

Dureza: Mohs 2,5-3

Peso específico: 8,5-8,9 g/cm³

Microdureza: 111-143 kg/mm²

Capacidad de reflejo

R_{máx} = 98,3 (700 nm)

R_{min} = 37,7 (420 nm)

R = 42,2-54,9 (460 nm)

R = 47,5-60,0 (540 nm)

R = 75,4-93,9 (620 nm)

Se pule bien, no es magnético; buen conductor de la electricidad.

Composición química

El cobre hasta 100 % de cobre; puede contener impurezas de Fe (puede llegar hasta 2,5 %); Ag; en forma de inclusiones, raramente Au en estructura de descomposición sólida.

Características magnéticas

- Isotrópica, algunas veces débilmente anisotrópica.
 - No presenta birreflexión.
 - No presenta reflejos internos.
 - Color rosado brillante; puede cambiarse a tonalidad carmelita.
- Los cristales son raros, pueden localizarse maclas polisintéticas; sus agregados son finas laminillas, en menor grado en masas compactas.

Paragénesis

El cobre aparece en pequeñas inclusiones en la cuprita, bornita, calcosina, pirrotina y pentlandita; pueden localizarse intercrecimientos orientados de cubanita y cuprita.

Se localiza en las formaciones hipogénicas, se asocia con la azurita, malaquita, tennantita, cuprita, piritita, crisocola, turquesa, hidróxidos de Fe y otros.

Ataque químico

Reacción positiva con el HNO_3 , ebulle y se ennegrece, KCN, se oscurece lentamente, con FeCl_3 se oscurece rápidamente; con HgCl_2 se ennegrece rápidamente y es iridiscente; reacción negativa con HCl.

Indices característicos

Alta capacidad de reflejo y su color característico; paragénesis y sus respuestas al ataque químico.

25. Columbita Tantalita. $(\text{Fe, Mn}), (\text{Ta, Nb})_2 \text{O}_6$

Propiedades físicas

Sistema: rómbico
Dureza: Mohs 6
Peso específico: 5,15–8–20 g/cm^3
Microdureza: 727–1021 kg/mm^2

Capacidad de reflejo

$R_{\text{máx}} = 18,4$ (420 nm)
 $R_{\text{mín}} = 15,2$ (700nm)
 $R = 16,8$ –17,7(460 nm)

$R = 16,3$ –16,8 (540 nm)

$R = 15,4$ –16,5 (620 nm)

Se pule bien; no es magnético; conduce la electricidad.

Composición química

La columbita $(\text{Fe, Mn}) \text{Nb}_2 \text{O}_6$ y la tantalita $(\text{Fe, Mn}) \text{Ta}_2 \text{O}_6$; forman una serie continua de mezclas isomórficas, donde los contenidos de Fe y Mn varían en grandes intervalos, a veces pueden contener Sn con valores entre 1–2 % de metal; es posible localizar, además, W y Ti.

Características microscópicas

- Anisotrópico, se distingue bien, presenta fuerte extinción.
 - Birreflexión; visible; fundamentalmente en los contactos con los granos de otros minerales.
 - Reflejos internos visibles, mejor en inmersión; con tonalidades alta de Mn, rojos cuando predomina el Fe.
 - Color; gris claro con tonalidades carmelitas.
- Se presenta en cristales prismáticos y finamente laminados; es común la presencia de maclas; se localizan concreciones de columbita con samarskita.

Paragenesis

La columbita–tantalita está asociada a intrusiones diferenciadas ácidas de rocas granitoides; se localiza en pegmatitas granáticas en filones de albita–gneisen donde forma paragénesis con la casiterita, wolframita, berilio lepidolita, monacita, apatito. Es frecuente la presencia de estructuras de descomposición de soluciones sólidas de la columbita con la casiterita, galena, hematita, rutilo y uraninita.

Ataque químico

No actúa ningún reactivo standard.

Indices característicos

Baja capacidad de reflejo, alta dureza; se distingue de la magnetita; por la anisotropía; reflejos internos en inmersión.

26. Covelina (Cu S)

Propiedades físicas

Sistema: Hexagonal

Dureza: Mohs 1,5-2,0

Peso específico: 4,59-4,67 g/cm³

Microdureza: 92-110 kg/mm²

Capacidad de reflejo

R_{máx} = 31,0 (420 nm)

R_{mín} = 3,7 (580-620 nm)

R = 23,8-12,7 (480 nm)

R = 25,1-10,3 (500 nm)

R = 24,2-11,9 (700 nm)

Se pule bien; no es magnético; conduce débilmente la electricidad.

Composición química

De acuerdo a la fórmula química tiene un contenido de Cu-66,5 %; S-33,5 %; en los análisis se detectan algunos contenidos de Fe y en menor grado impurezas de Se, Ag y Pb.

Características microscópicas

- Anisotropía, extremadamente alta, presentando una gama de colores, es un rasgo típico del mineral; los colores pasan, del azul al rojo y carmelita.
- Birreflexión; muy alta; con tonalidades desde el azul cielo al azul intenso.
- Reflejos internos, no presenta.
- Color, desde azul a azul blancuzco.
- Presenta cristales laminados, crecimientos radiados, segregaciones morfogranulosas, masas terrosas, venillas finas, buen clivaje, así como masas pulverulentas.

Paragénesis

Mineral común en la zona de enriquecimiento secundario de menas sulfurosas de cobre; al oxidarse la calcopirita, bornita, menas sulfurosas de cobre; al oxidarse la calcopirita, bornita, menas grises y otros minerales de cobre; puede ser también mineral primario hidrotermal; tal como sucede en Butte, Montana, EE.UU., Tsumeb, Namibia.

Ataque químico

Reacción positiva con el KCN, tornándose a color rojo; con agua regia produce efervescencia; reacción negativa con HNO₃, HCl, HgCl₂, KOH, etcétera.

Indices característico

Las propiedades microscópicas de la covelina son tan obvias que no admite confusión con otros minerales, entre ellas, el color azul, anisotropía intensa, birreflexión y paragénesis.

27. Cromita (Fe, Mg)(Cr, Al, Fe)₂O₄

Cromita: FeCr₂O₄

Magnocromita: (Mg, Fe)Cr₂O₄

Alumocromita: Fe(Cr,Al)₂O₄

Cromopicotita: (Mg, Fe)(Cr, Al)₂O₄

Capacidad de reflejo

R = 11,9-13,8 (470 nm)

R = 11,5-13,3 (546 nm)

R = 11,5-13,0 (589 nm)

R = 11,2-12,7 (650 nm)

Se pule bien; algunas veces es débilmente magnético (cuando se incrementa la cantidad de Fe); no conduce la electricidad.

Composición química

El contenido de las cromitas varía en rangos amplios:

Cr₂O₄: 18,0-62,0 %

FeO: 0,0-18,0 %

MgO: 6,0-16,0 %

Al₂O₃: 0,0-33,0 %

Fe₂O₃: 2,0-30,0 %

Ocasionalmente pueden presentarse contenidos de TiO₂, V₂O₅, MnO, ZrO, NiO y CoO.

Características microscópicas

– Isotrópico; puede localizarse muestras que manifiesten anisotropía muy débil, específicamente en cristales zonados; las espinelas cromíticas que presentan en su composición, mezclas isomórficas de Zn; se manifiesta débil anisotropía.

– Birreflexión: no presenta.

– Reflejos internos: rojos carmelita oscuro en aquellos que poseen altos contenidos de Mg-Al; cuando es alto el contenido de Fe no se manifiestan los reflejos internos; para su determinación efectiva debe usarse aceite de inmersión.

– Presenta granos isométricos e isomórficos; pueden localizarse formas arredondeadas irregulares y en masas granulares continuas.

Paragénesis

Las espinelas cromíferas se localizan solamente en yacimientos magnéticos en rocas ultrabásicas; así se localiza junto al olivino (en las dunitas) piroxinas (en las piroxenitas); y a la peridotita; puede formar estructuras de descomposición de soluciones sólidas con la ilmenita, magnetita, rutilo y con los elementos del grupo del platino y sus minerales.

Ataque químico

No reacciona con los reactivos comunes.

Indices característicos

La elevada microdureza, sus reflejos internos; paragénesis y su reacción negativa con los reactivos comunes.

28 . Cubanita $Cu Fe_2 S_3$

Propiedades físicas

Sistema: rómbico

Dureza: Mohs 3,5

Peso específico: 4,03–4,18 g/cm³

Microdureza: 199–228 kgf/mm²

Capacidad de reflejo

R_{máx} = 44,6 (700 nm)

R_{min} = 20,4 (420 nm)

R = 34,7–27,0 (460 nm)

R = 39,0–31,6 (500 nm)

R = 42,8–38,8 (620 nm)

Se pule bien en las secciones; muy magnético, conduce débilmente la electricidad.

Composición química

De acuerdo a su fórmula química la cubanita presenta la siguiente composición: Cu–22–24 %; Fe–40–42 %; S–34–35 %.

Características microscópicas

– Anisotropía: fuertemente visible aunque; no tan fuerte como la pirrotina; se observan variaciones de tonalidades que van desde el rosado–carmelita al gris azulado; las secciones basales son menos anisotrópicas; perpendiculares a (001) presenta lámina muy finas proveniente de la estructura polisintética de las hojas de la cubanita.

Birreflexión: se distingue mucho mejor en aceite; variando del gris–crema al gris al carmelita oscuro.

– Reflejos internos: no presenta.

– Color: amarillo rosáceo.

Se localiza en granos irregulares, comúnmente en forma de finas láminas; intercrecimiento con la calcopirita, bornita y pirrotina; forma estructuras de descomposición de soluciones sólidas; las láminas son prismáticas; esta estructura también se localiza en intercrecimiento con la esfalerita y la galena; en menor grado con la valerita y la pentlandita.

Puede sustituir a la calcopirita y la pirrotina.

Paragénesis

La cubanita se forma en paragénesis de altas temperaturas; (250°–300°C) es un mineral abundante y se localiza en:

– Yacimientos de licuación en paragénesis con la calcopirita.

– En las pegmatitas en formaciones neumatolíticas.

– Yacimientos de contacto metasomático (skarn), principalmente en contactos silicatados

– Yacimientos hidrotermales (plutógenos), con calcopirita, esfalerita y otros minerales meniferos

Ataque químico

Reacción positiva con el HNO_3 ; reacción negativa con: HCl ; KCN ; FeCl_3 ; HgCl_2 y KOH .

Índices característicos

La presencia de granos laminados en la calcopirita; magnetismo; paragénesis. Se diferencia de la calcopirita por su anisotropía mucho más fuerte en la cubanita.

29. Cuprita (Cu_2O)

Propiedades físicas

Sistema: cúbico

Dureza: Mohs 3,5-4

Peso específico: 6,1 gr/cm^3

Microdureza: 192-218 kgf/mm^2

$R_{\text{máx}} = 32,2$ (420 nm)

$R_{\text{mín}} = 23,1$ (700 nm)

$R = 31,5-31,7$ (460 nm)

$R = 26,8-27,5$ (540 nm)

$R = 23,8-23,9$

Se pule bien; no es magnético; no conduce la electricidad.

Composición química

Cu-88,8%; O-11,2%; normalmente se presenta puro; pero puede presentar bajos contenidos de óxido de Fe.

Características microscópicas

- Anisotropía: muestra siempre una alta anomalía anisotrópica, con tonalidades que van desde el azul verdoso fuerte al verde olivo.

- Birreflexión: se manifiesta, es visible.

- Reflejos internos: rojo, claramente visibles en el aire.

- Color: blanco grisáceo con tonalidades azulosas.

Se localiza en cristales cúbicos, octoédricos y dodecaédricos; no se presentan macias, se presentan además en forma alotrópicas continuas.

Paragénesis

Generalmente la cuprita se forma en la zona de oxidación de los yacimientos de menas sulfuradas ricas en cobre; es común localizarla en paragénesis carbonatadas, donde, además, se presentan cobre nativo, tenorita, calcosina, ilmonita, malaquita; se considera que su formación, en las condiciones de intemperismo, es debido a la oxidación de la calcosina.

Ataque químico

Reacción positiva con el NO_3H ; ebulle precipitando el cobre metálico; en HCl se oscurece, con luz oblicua se forma una capa fina de color blanco; con KCN , se oscurece y revela su estructura; con FeCl_3 , se oscurece, es iridiscente; reacción negativa con: KOH ; NaOH , y HgCl_2 .

Índices característicos

Reflejos internos rojos intensos; paragénesis, reacciones positivas y negativas.

30. Digenita (Cu_9S_5 alpha-calcosina)

Propiedades físicas

Sistema: cúbico

Dureza: Mohs 2,5-3

Peso específico: 5,5-5,8 gr/cm^3

upsilon Microdureza: 60-74 kgf/mm^2

Capacidad de reflejo

$R = 25,2$ (460 nm)

$R = 21,3$ (540 nm)

$R = 20,0$ (580 nm)

$R = 19,3$ (640 nm)

Se pule bien; no es magnética; mal conductor de la electricidad

Composición química

Se corresponde con el contenido de la calcosina Cu - 79,9 %, S - 20,1 % y puede contener impurezas de Ag, Fe, Co, Ni, As, Au y Se; la estabilidad de la digenita (alpha-calcosina) se debe a la ausencia de aproximadamente el 10 % de Cu monovalente con un contenido similar de Cu divalente.

Características microscópicas

- Isótropo: se mantiene isótropo en condiciones normales de temperatura, ocasionalmente puede presentar anisotropía anómala.
 - Birreflexión: no presenta.
 - Reflejos internos: no presenta.
 - Color: desde azul celeste hasta azul.
- Se manifiesta en granos alotriomórficos, el clivaje octaédrico a menudo se observa; es común en intercrecimiento con calcosina, bornita, enargita; se localiza en forma de finas láminas en estructuras de descomposición de soluciones sólidas con la covelina.

Paragénesis

Es un mineral secundario formado en las zonas de cementación de las menas sulfurosas de Cu de origen hidrotermal en condiciones supergénicas, asociándose con la bornita, calcosina y covelina.

Ataque químico

- Reacción positiva con NH_4OH ; ebulle, se ennegrece; con FeCl_3 y KCN se ennegrece; reacción negativa con ClH .
- Anisótropo, muestra siempre una alta anomalía anisotrópica con tonalidades que van desde azul verdosa fuerte al verdeolivo.
 - Birreflexión: se manifiesta, es visible.
 - Reflejos internos: rojos, claramente visibles en el aire.
 - Color: Blanco grisáceo con tonalidades azulosas.
- Se localiza en cristales, cúbicos, ortoédricos y dodecaédricos, no se presentan maclas; se presentan, además, en forma alotriomórfica continuos.

Paragénesis

Generalmente la cuprita se forma en la zona de oxidación de los yacimientos de menas sulfurosas ricas en cobre; es común localizarla en paragénesis carbonatadas, donde además, se presentan cobre nativo, tenorita, calcosina, limonita, malaquita; se considera que su formación, en las condiciones de intemperismo, es debido a la oxidación de la calcosina.

Ataque químico

Reacción positiva al NO_3H ; ebulle precipitando el cobre metálico; HCl se oscurece, con luz oblicua se forma una capa fina de color blanco; el KCN,

se oscurece y revela su estructura; también el FeCl_3 , lo oscurece; es iridiscente; reacción negativa con: KOH , NaOH y AgCl_2 .

Índices característicos

Reflejos internos rojos intensos, paragénesis; reacciones positivas y negativas.

31. Enargita (Cu_3AsS_4)

Propiedades físicas

Sistema: rómbico
Dureza: Mohs 3
Peso específico: $4,4 \text{ g/cm}^3$
Microdureza: $205-397 \text{ kgf/mm}^2$

Capacidad de reflejo

$R_{\text{máx}} = 30,3$ (700 nm)
 $R_{\text{mín}} = 23,8$ (580 nm)
 $R_v = 27,0$ (420 nm)
 $R_v = 28,2$ (500 nm)
 $R_n = 25,6$ (620 nm)
Se pulcra bien; no es magnético; conductividad eléctrica débil.

Composición química

Cu -48,3 % ; As -19,1 % ; S -32,6 %. Ocasionalmente puede contener impureza de Sb hasta 6,5 %; Fe hasta 5,7 % así como pequeñas cantidades de Pb, Zr y Ag.

Características microscópicas

- Muy anisotrópico; presenta tonalidades desde el azul-verdoso al rojizo y naranja.
- Birreflexión: se distingue principalmente en aceite; presentando tonalidades desde el gris rosado hasta el gris violeta.
- Puede presentar reflejos internos de calor rojo intenso.
- Color: gris rosado a carmelita rosado.

Los cristales se presentan en la mayoría de los casos bajo formas aciculares, columnares con estrías verticales; es común localizarse en masas granulares compactas o como impregnaciones.

Paragénesis

Es un mineral típico hidrotermal; en paragénesis con tetraedritas, calcopirita, galena y pirita; puede sustituir a la esfalerita y a la tenantita y es sustituido por: bornita, galena, coovelina y pirita.

Ataque químico

Reacción positiva con KCN, oscureciéndose; en agua regia se colora de carmelita; con $HgCl_2$; ocasionalmente presenta una débil coloración. Reacción negativa con HNO_3 y HCl.

Índices característicos

Anisotropía intensa, paragénesis y reacciona positivas y negativas en el ataque químico.

32. Eritrina ($Co_3(AsO_4)_2 \cdot 6 H_2O$)

Propiedades físicas

Sistema: Monoclínico

Dureza: Mohs 1,5-2,5

Peso específico: 2,95 g/cm^3

Microdureza: 100-121 kgf/mm^2

Capacidad de reflejo

$R_{máx} = 12,0$

$R_{mín} = 8,0$

Se pule bien, no es magnético; no conduce la electricidad.

Composición química

CoO -37,5 %; As_2O_5 -38,4 %; H_2O -24,1 % . El Ni sustituye el cobalto para formar una serie completa hasta la annaberguita; por ello, se localizan contenidos de Ni, Mn, Fe, Ca; entre otros

Características microscópicas

- Débilmente anisotrópico.

- Birreflexión: no se manifiesta

- Reflejos internos: Rosados típicos se manifiestan en el aire.

La eritrina es un mineral secundario, localizándose en masas terrosas filamentosas y radiadas; los cristales son raros aciculares o en láminas finas.

Paragénesis

Se localiza en las zonas de oxidación de yacimientos en cuyas menas primarias contienen cobaltina y esmaltina; es común con la annaberguita, pirita y sulfuros de níquel.

Ataque químico

Reacción positiva con HNO_3 , se forma una superficie arrugada; con KOH se torna iridiscente.

Índices característicos

Reflejos internos rosados; paragénesis; reacción positiva con HNO_3 y KOH.

33. Esfalerita ($Zn S$)

Propiedades físicas

Sistema: cúbico

Dureza: Mohs 3-4

Peso específico: 3,9-4,0 g/cm^3

Microdureza: 128-276 kgf/mm^2

Capacidad de Reflejo

Máx. = 18,5 (420 nm)

R = 17,7 (500 nm)

R_n = 16,9 (620 nm)

R_r = 15,9 (700 nm)

Se pule bien, no es magnético; no conduce la electricidad.

Composición química

Teóricamente su composición química es: Zn -67,1 % y S -32,9 %, las variedades puras son raras; generalmente contiene un valor alto de FeS (pirrotina) lo que puede llegar hasta 20 % de Fe; cuando el contenido de Fe es 10 %; recibe la denominación de "marmatita" y "cristophita"; los contenidos de pirrotina forman estructuras de descomposición de soluciones sólidas y en las variedades ricas en Fe; la homogenización fija la temperatura de formación de la esferita.

Características microscópicas

- Isotrópica, comúnmente, ocasionalmente puede presentar falsa anisotropía debido a efectos tectónicos sobre el mineral; así como impurezas químicas; así, las de alto contenido de Fe generalmente presentan anisotropía débil.
- Birreflexión: no presenta.
- Reflejos internos: desde amarillo hasta rojo; se observan mejor en aceite.
- Color: gris en el aire; gris oscuro en inmersión; puede presentar tonalidades carmelitas.

Generalmente es visible el clivaje en granos grandes; frecuente el maclado y zonación de sus cristales; se localizan estructuras de descomposición de soluciones sólidas orientadas con otros sulfuros.

Paragénesis

La esferita es un mineral común y ampliamente distribuido en diferentes tipos genéticos de yacimiento minerales; pero su mayor abundancia se localiza en los yacimientos hidrotermales junto a la galena, calcita, cuarzo y calcopirita; se encuentra, además con la pirrotina, cubanita y menas grises; se caracteriza por presentar desmezcla en minerales como la calcopirita, bornita y pirita. Puede sustituir a la marcasita, pirita, arsenopirita y otros sulfuros.

Ataque químico

Reacción positiva con HNO_3 , ebulle y se ennegrece, reacción negativa con KCN, HCl.

Índices característicos

Baja capacidad de reflejo, reflejos internos y reacciones negativas y positivas de ataque.

34. Esmaltina-Cloantita (Co, Ni) As_{2-3}

Propiedades físicas

Sistema: cúbico
Peso específico: 6,4 - 6,8 g/cm^3
Dureza: Mohs 5,5-6
Microdureza: 268-402 Kgf/cm^2
116-729 kgf/cm^2

Capacidad de reflejo

$R_{\text{máx}} = 54,8$ (440 nm)
 $R_{\text{mín}} = 52,5$ (540 nm)
 $R_v = 52,7$ (500 nm)
 $R_a = 52,8$ (580 nm)
 $R_r = 53,6$ (700 nm)

Se pule bien; no es magnético; no conduce la electricidad.

Composición química

La composición química no es constante y el contenido de los elementos químicos varían en intervalos bastante amplio; así para la esmaltina se tiene: As 71,6-63,4 %; S -0,0-1,4 %; Co -24,1-13,8 %; Ni -1,0-15,0 %; Fe -1,2-7,3 %. Para la cloantita: As -73,5-70,1 %; S -0,0-96 %; Co -3,6-6,3; Fe -2,8. En algunos análisis químicos se ha determinado contenidos de Cu, Bi, Pb y Ag.

Características microscópicas

- Isotrópicas; algunas veces débilmente anisotrópica; presentándose anisotropía anómala sobre todo cuando los cristales están zonados.
 - Birreflexión: no presenta.
 - Color: blanco; con tonalidades desde crema a azuloso.
 - Reflejos internos: no presenta.
- Comúnmente se localiza en agregados pequeños alotriomorfo-granulosos; raramente en cristales isométricos con estructura zonal.

Paragénesis

Es característico de las menas níquel-cobaltíferas oxidadas y semioxidadas; se asocia con safflorita, níquelina, rammelsberguita, pirita y otros minerales de la formación: Co - Ni - Bi, Ag - U.

Ataque químico

Reacciones positivas: HNO_3 , Fe Cl_3 , $\text{KMnO}_4 + \text{H}_2 \text{SO}_4$ reacciones negativas: HCl , KOH , HN_4OH , KCN , Hg Cl_2 .

Índices característicos

Se puede confundir con algunos minerales de su grupo; las reacciones químicas positivas y negativas, isotrópicas y estructura zonal en sus cristales idiomórficos.

35. Ferberita (Fe WO)

Propiedades físicas

Sistema: monoclinico

Dureza: Mohs 5-6

Peso específico: $7,5 \text{ g/cm}^3$

Microdureza: $322-412 \text{ kgf/mm}^2$

Capacidad de reflejo

$R_{\text{máx}} = 18,6$ (460 nm)

$R_{\text{mín}} = 14,4$ (700 nm)

$R_a = 18,6-15,3$ (460 nm)

$(R_v = 18,6-15,0$ (500 nm)

$R_n = 18,4-14,5$ (660 nm)

Se pule bien, débilmente magnético; no conduce la electricidad.

Composición química

La ferberita y la hubnerita forman una serie isomórfica de solución sólida (wolframita); en el caso específico de la ferberita ésta contiene: WO -6,3 % y Fe -23,7 %.

Características microscópicas

- Anisotrópica; se manifiesta bien con tonalidades desde el amarillo verdoso hasta el gris oscuro.
- Birreflexión: no presenta o es muy débil
- Reflejos internos: no presenta

- Color: gris blanco en el aire; en inmersión, crema a tonalidades amarillo grisáceo.

Se localiza en largos cristales y también en agregados concéntricos con disposición radial; el clivaje se manifiesta en cristales idiomórficos.

-Paragénesis

Se encuentra en diferentes tipos genéticos de yacimientos postmagmáticos en asociación con la casiterita, molibdenita, scheelita, bismutina, pirita, berilio.

Ataque químico

No actúa ningún reactivo común.

Índices característicos

Se diferencia de la wolframita y de la hubnerita por la ausencia de reflejos internos; presenta baja capacidad de reflejo.

36. Galena (Pb S)

Propiedades físicas

Sistema: cúbico

Dureza: Mohs 2-3

Peso específico: $7,4-7,6 \text{ g/cm}^3$

Microdureza: $88-159 \text{ kgf/mm}^2$

Capacidad de reflejo

$R_{\text{máx}} = 47,9$ (470 nm)

$R_{\text{mín}} = 43,1$ (589 nm)

Se pule bien formando triángulos de coloración, no es magnético; conductividad eléctrica débil.

Composición química

Pb -86,6 %, S -13,4 %; las impurezas más comunes son Ag , algunas décimas del 1 % Cu , Zn y So ; ocasionalmente puede contener Bi , Fe , As , Sb , Mo a veces Mn y U .

Características microscópicas

- Isotrópica; a débilmente anisotrópica, no es común, cuando se presenta es gris a gris oscuro.
 - Birreflexión: no presenta
 - Reflejos internos: no presenta.
 - Color: blanco brillante, ocasionalmente con tonalidades rosadas, bajo contenido de teluros puede cambiar su color original; las dimensiones de sus cristales pueden variar su color; es decir, si sus granos son muy finos se incrementa el gris.
- Se presenta en agregados granulares, así como en cristales idiomórficos; se desarrolla buen intercrecimiento con otros minerales idiomórficos y también con otros minerales. Su clivaje perfecto casi siempre es visible, formándose triángulos en la intersección de las líneas de clivaje. Maclado por deformaciones mecánicas, pueden producirse.

Paragénesis

Se encuentra fundamentalmente en formaciones hidrotermales. Puede reemplazar a: arsenopirita, pirita, marcasita, pirrotina, esfalerita, calcopirita, tetraedrita, bornita y enargita; es sustituida por covelina, calcosina, plata, electrum, telurios de A- Au, argentita, magnetita.

En la galena se pueden localizar estructuras de descomposición de soluciones sólidas tales como Ag y minerales de Ag, bismutina, tetradimita, pirita, esfalerita. Es común los intercrecimientos minerales.

Ataque químico

Reacción positiva con HNO_3 , se ennegrece; algunas veces ebulle, con HCl , es iridiscente; reacción negativa con KCN , KOH , HgCl_2 y otros.

Indices característicos

Color blanco puro, (en buen pulido), triángulo de coloración en la dirección del clivaje; reacciones del Pb al ataque químico.

37. Galenobismutina ($\text{Pb}_3\text{S}_2\text{Bi}_2\text{S}_3$)

Propiedades físicas

Sistema: ortorrómbico
Dureza: Mohs 2,5
Peso específico: $6,9 \text{ g/cm}^3$

Microdureza: $88-113 \text{ kgf/cm}^2$

Capacidad de reflejo

$R_{\text{máx}} = 51,4 (460 \text{ nm})$
 $R_{\text{mín}} = 43,4 (660 \text{ nm})$
 $R_v = 51,0-46,2 (500 \text{ nm})$
 $R_a = 48,4-44,7 (580 \text{ nm})$
 $R_n = 47,5-43,9 (620 \text{ nm})$

Se pule bien; no es magnético; no es conductor de la electricidad.

Composición química

A menudo puede llegar a alta pureza de Fe_2O_3 , a bajas temperaturas puede presentar pequeños contenidos Fe Ti O_3 ; más raramente Mg TiO_3 .

Características microscópicas

- Anisotrópico: muy fuerte con tonalidades desde el amarillo al carmelita oscuro.
 - Birreflexión: muy fuerte con tonalidades amarillas al rosado y gris.
 - Reflejos internos: no presenta.
 - Color: Blanco grisáceo a blanco-crema; similar a la galena.
- Se presenta en cristales aciculares y finamente laminados y de granos finos; puede presentar maclas polisintéticas.

Paragénesis

Se asocia a minerales de Pb y Bi; puede contener inclusiones de galena orientada; se localiza junto a la tetradimita, pirargirita, calcopirita, wolframita, casiterita, scheelita y arsenopirita.

Ataque químico

Reacción positiva: HNO_3 inmediatamente se ennegrece; débil reacción con el HCl , se torna carmelita; reacciones negativas: KCN , $(\text{HCl}) (\text{Fe Cl}_3)$, KOH y HgCl_2 ; con FeCl_3 puede débilmente.

Indices característicos

Se diferencia con dificultad de la aiquinita y la bismutina; reacciones de Pb y Bi.

38. Hematita (Fe₂O₃)

Propiedades físicas

Sistema: trigonal

Dureza: Mohs 5-6

Peso específico: 5,0-5,2 g/cm³

Microdureza: 920-1062 kgf/cm²

Capacidad de reflejo

R_{máx} = 31,5 (486 nm)

R_{min} = 22,8 (650 nm)

R_v = 30,0-26,2 (546 nm)

R_a = 28,8-25,1 (589 nm)

Se pule mal; no es magnético; conduce la electricidad

Composición química

Fe -70 % ; O₂ -30 % a veces contiene Ti (titano-hematita) y Mg como mezclas isomorfas; el Ti y el Mg lo contiene en: Fe Ti O₃ y Mg Ti O₃ respectivamente; ocasionalmente puede contener agua.

– Color: blanco grisáceo; se presenta en cristales alotriomórficos granulosos, seudomorfosis, oolitas, concreciones. En los granos son característicos las maclas laminadas.

Paragénesis

La hematita es un mineral muy común y se forma bajo un amplio rango de condiciones; desde las menas magnéticas a las sedimentarias. Sustituye a la magnetita por seudomorfosis (martita); puede contener inclusiones de pirita, oro, bismuto. Forma intercrecimiento con ilmenita, magnetita, rutilo, casiterita; así como estructura de descomposición de soluciones sólidas.

Ataque químico

No actúa ningún reactivo común; puede obtenerse lixiviación estructural por acción del HF concentrado y frío, durante 1-2 minutos de reacción.

Indices característicos

Alta dureza, dificultad al pulirlo; débil anisotropía, reflejos internos rojos; reacciones químicas negativas.

39. Hesita (Ag₂Te)

Propiedades físicas

Sistema: monoclinico

Dureza: Mohs 2,5-3,0

Peso específico: 8,3-9,0 g/cm³

Microdureza: 28-44 kgf/mm²

Capacidad de reflejo

R_{máx} = 43,0 (640 nm)

R_{min} = 37,4 (580 nm)

R_a = 40,3-40,7 (460 nm)

R_n = 43,0-37,4 (640 nm)

Se pule mal; no es magnético, buen conductor de la electricidad.

Composición química

Ag -63,0 % ; Te -37,0 % ; puede contener Au y cuando así sucede es difícil distinguirlo de la petzita: Te(Ag, Au)₂.

Características microscópicas

– Anisotropía: fuerte, presentando diferentes colores desde el oro oscuro, carmelita, hasta naranja-gris azulado hasta azul profundo.

– Birreflexión: no presenta ó se manifiesta débilmente.

– Reflejos internos: no presenta.

– Color: blanco grisáceo con tonalidades crema.

Se puede encontrar en agregados alotriomórficos granulosos finos y pequeños; cristales generalmente deformados; raramente cristales idiomórficos.

Paragénesis

Se encuentra en yacimientos filoneanos hidrotermales de oro y plata en asociación con teluros de oro y plata, altaíta, pirita, galena, tetraedrita, esfalerita y otros; con frecuencia contiene microinclusiones de oro nativo y plata; en estructura de descomposición de soluciones sólidas.

Ataque químico

Reacción positiva con NH_4OH ; tornándose pardo rápidamente, algunas veces ebulle; con el HCl algunas veces se torna pardo; con KCN, se torna pardo lentamente; al FeCl_3 es iridiscente y se oscurece; también con HgCl_2 se torna pardo y se oscurece. Reacción negativa: KOH.

Indices característicos

Se diferencia de la argentita por el tono color crema y el efecto de color de la anisotropía; baja dureza y su paragénesis con los telururos.

40. Ilmenita (Fe Ti O_3)

Propiedades físicas

Sistema: hexagonal
Dureza: Mohs 5,0-6,0
Peso específico: $4,72 \text{ g/cm}^3$
Microdureza: $593-734 \text{ kgf/mm}^2$

Capacidad de reflejo

$R_{\text{máx}} = 22,0$ (440 nm)
 $R_{\text{mín}} = 16,6$ (700 nm)
 $R_a = 20,6-17,3$ (460 nm)
 $R_v = 20,4-17,1$ (500 nm)
 $R_n = 20,3-16,7$ (620 nm)

Se pule bien; no es magnético; conduce débilmente la electricidad.

Composición química

Fe -36,8 % ; Ti -31,6 % ; O -31,6 % ; puede contener cantidades de Mg en forma isomórfica; también trazos de Mn.

Características microscópica

- Anisotropía: Se manifiesta fuertemente con tonalidades desde gris-verdoso hasta el gris-carmelita.
- Birreflexión: se distingue desde el verdoso-carmelita hasta el carmelita oscuro.

- Reflejos internos carmelita oscuro; se manifiesta raramente; más frecuente en los elementos con alto contenidos de Mg (picroilmenita)

- Color: gris claro con tonos crema, algunas veces con matices violeta.

Se encuentra en cristales tabulares idiomórficos o agregados allotriomórficos granulosos, en forma de láminas finas en las estructuras de descomposición de las soluciones sólidas en la magnetita; es común la presencia de maclas.

Paragénesis

Se localiza en las rocas ígneas básicas en asociación con la magnetita (titanomagnetita); en los yacimientos de licuación de cobre-níquel con pirrotina, pentlandita, magnetita, hematita y calcopirita. Se encuentra también con espinelas, corindón y rutilo.

Ataque químico

No actúa ningún reactivo común

Indices característicos

Se diferencia de la magnetita por un tono parduzco más denso y anisotropía alta; del rutilo por reflejos internos débiles.

41. Jamesonita ($\text{Pb}_4 \text{Fe Sb}_6 \text{S}_{14}$)

Propiedades físicas

Sistema: monoclinico
Dureza: Mohs 2-3
Peso específico: $5,5-6,0 \text{ g/cm}^3$
Microdureza: $104-123 \text{ kgf/mm}^2$

Capacidad de reflejo

$R_{\text{máx}} = 45-8$ (420 nm)
 $R_{\text{mín}} = 31,0$ (700 nm)
 $R_a = 46,2-35,6$ (460 nm)
 $R_v = 46,0-35,6$ (500 nm)
 $R_n = 41,7-32,2$ (620 nm)

Se pule bien; no es magnético; no conduce la corriente eléctrica.

Composición química

Pb - Puede llegar del 40 al 50 %; Fe hasta el 10 %, Sb - próximo al 30 %; S, alrededor del 20 %; las impurezas más comunes: Cu, Zn, Ag.

Características microscópicas

- Anisotropía: fuerte; con tonalidades desde el gris, carmín, azul claro; las secciones basadas son débilmente anisotrópicas.

- Birreflexión: tiene fuerte birreflexión en el aire y en inmersión con tonalidades desde el blanco brillante al amarillo-verde.

- Reflejos internos: los ejemplares ricos en Bi presentan reflejos rojizos.

Se localizan en cristales aciculares, agregados alotriomórficos granulosos; algunas muestras presentan el clivaje perpendicular a la elongación.

Paragénesis

Se asocia con la antimonita, boulangerita, burnonita, esfalerita, galena, pirita, tetraedrita, sulfuros de plomo, cuarzo y carbonatos.

Ataque químico

Reacción positiva HNO_3 , ebulle débilmente y se torna se ennegrece, HCl los vapores forma una capa fina, se oscurece. Reacción negativa: FeCl_3 , KOH .

Indices característicos

Tonalidad verdosa, birreflexión intensa; reacciones positiva y negativa; paragénesis.

42. Linneita ($\text{Co}_3 \text{S}_3$)

Propiedades físicas

Sistema: cúbico

Dureza: Mohs 5-5,5

Peso específico: $4,8 \text{ g/cm}^3$

Microdureza: $508-554 \text{ kgf/mm}^2$

Capacidad de reflejo

$R_{\text{máx}} = 52,8 (700 \text{ nm})$

$R_{\text{mín}} = 42,0 (460 \text{ nm})$

$R_v = 42,5-47,2 (500 \text{ nm})$

$R_a = 44,7-47,7 (580 \text{ nm})$

$R_n = 45,8-48,9 (620 \text{ nm})$

Se pule bien; no es magnético. Posee conductividad eléctrica débil.

Composición química

De acuerdo a su fórmula química contiene el 57,95 % de cobalto y el resto 42,04 % de azufre.

Características microscópicas

- Isótropo.

- Birreflexión: no presenta; en algunos casos puede presentar débil birreflexión.

- Reflejos internos: no presenta.

- Color: Blanco crema hasta blanco rosáceo.

Se pule bien; no es magnético; conductividad eléctrica débil.

Paragénesis

Se asocia con los minerales de cobalto y níquel, calcopirita, pirita, galena, siderita y cuarzo.

Ataque químico

Reacción positiva con HNO_3 ; debido a los vapores se oscurece; algunas veces ebulle, Hg Cl , se oscurece; es iridiscente y revela la estructura del mineral.

Indices característicos

Microdureza baja; se pule bien; isotrópica; reacción positiva con el cobalto.

43. Loellingita (Fe As_2)

Propiedades físicas

Sistema: rómbico

Dureza: Mohs 5-5,5

Peso específico: $7,0-7,4 \text{ g/cm}^3$

Microdureza: $635-741 \text{ kgf/mm}^2$

Capacidad de reflejo

R_{máx} = 60,2 (460 nm)

R_{mín} = 48,8 (700 nm)

R_v = 52,9-57,3

R_a = 51,7-58,0 (580 nm)

R_n = 49,6-56,8 (660 nm)

Se pule bien; no es magnético; buen conductor de la electricidad.

Composición química

Teóricamente la composición química es como sigue: Fe -27,2 % y As -72,8 %; es necesario esclarecer que la relación de Fe: As no es constante; puede contener cantidades de S que pueden llegar al 6 % y de Sb hasta un 5 %. Se localizan variedades ricas en Co (glaucopirita); indicando la existencia de la serie saflorita (CoAs₂)-lollingita-rammelsbergita; además del Co; se localizan pequeños valores de Ni.

Características microscópicas

- Anisotropía muy elevada.
- Birreflexión: Se manifiesta débilmente, mejor en inmersión; con tonalidades de blanco a blanco-azuloso; puede dar tintes amarillentos, más débil que la arsenopirita, pero más alta que la saflorita.

Reflejos internos: no presenta.

Color: Color blanco con tonalidades crema

Se encuentra en forma de cristales alargados e ideomórficos que forman concreciones; algunas veces se observan maclas polisintéticas y zonación interna, lo cual es común.

Paragénesis

Se asocia con arsenopirita, sulfuros de hierro y de cobre, arseniuros de cobalto, calcita, siderita, cuarzo y otros.

Ataque químico

Reacción positiva: con H₃NO₃ se torna carmelita, fundamentalmente por los vapores; FeCl₃ (concentrado) se torna; reacción negativa: KCN, HCl, KOH, NaOH, HgCl₂.

Indices característicos

Tiende a confundirse con la arsenopirita (ésta tiene mayor anisotropía y birreflexión); paragénesis; reacciones químicas positivas y negativas.

44. Magnetita (Fe₃O₄)

Propiedades físicas

Sistema: cúbico

Dureza: Mohs 5,5-6,0

Peso específico: 4,9-5,2 g/cm³

Microdureza: 535-695 kgf/mm²

Capacidad de reflejo

R_{máx} = 21,8 (420 nm)

R_{mín} = 20,3 (500 nm)

R_a = 20,7 (460 nm)

R_n = 21,3 (620 nm)

R_r = 21,2 (700 nm)

Se pule bien; muy magnético; tiene conductividad eléctrica débil.

Composición química

La magnetita de acuerdo a su fórmula química contiene Fe -72,4 % y O₂ -27,6 %, puede contener TiO₂ (tieno magnetita); Cr (cromomagnetita); también bajos por cientos de Mg, Al, V.

Características microscópicas

- Isotrópica: ocasionalmente puede manifestarse una débil anisotropía anómala debido a tensiones internas en los cristales; por deformaciones tectónicas así como por maclado.

- Birreflexión: no presenta

- Reflejos internos: no presenta; excepcionalmente algunas magnetitas con altos contenidos de Mn; pueden presentar débiles reflejos internos.

- Color: gris claro con tonalidades parduzca; si posee Ti; puede dar tintes carmelitas y con Mn da tonalidades verde amarillenta.

Se presenta en agregado de cristales isométricos, octoédricos y cúbicos; forma estructuras de descomposición con la elmenita; se sustituye por la hematita.

Paragénesis

Se asocia a todos los tipos genéticos de yacimientos endógenos; fundamentalmente magmáticos y de skarn; sus paragénesis típicos son con la hematita, elmenita, piritita, granates y sulfuros de cobre.

Ataque químico

Reacción positiva con el HCl; se oscurece y revela la estructura.

Indices característicos

Baja capacidad de reflejos; no presenta birreflexión; muy magnético y por su paragénesis.

45. Malaquita ($\text{Cu CO}_3 \cdot \text{Cu (OH)}_2$)

Propiedades físicas

Sistema: monoclinico
Dureza: Mohs 3,5-4
Peso específico: 39-4 gr/cm^3
Microdureza: 124-156 kgf/mm^2

Capacidad de reflejo

$R_{\text{máx}} = 10,0$ (420 nm)
 $R_{\text{min}} = 6,0$ (700 nm)
Se pule bien; no es magnético; no conduce la electricidad.

Composición química

De acuerdo a su fórmula: Cu O -71,9 % (Cu -57,4 %) CO -19,9 %; H O -8,2 %; como impurezas más comunes tenemos: CaO, Fe_2O_3 , SiO_2 ; la presencia de tales mezclas se debe a inclusiones mecánicas, fundamentalmente.

Características microscópicas

- Isótropa; los reflejos internos interfieren su observación.
- Birreflexión: intensa
- Reflejos internos: desde brillantes, claramente visibles en el aire, también en inmersión.
- Color: gris con tonalidades rosáceas.

Se presenta en grandes masas arriñonadas; con estructura zonal concéntrica; bien definida en superficies pulidas; también es posible observar variedades terrosas.

Paragénesis

Es típica de la zona de oxidación de las menas sulfurosas con contenidos de cobre; se asocia a la azurita, crisocola, hidróxidos de hierro, cuprita, tenorita, cobre nativo y otros minerales.

Ataque químico

Reacción positiva con HCl; ebulle y se oscurece, revela su estructura; KCN, revela débilmente la estructura; FeCl, ebulle lentamente, se cubre con una película amarilla; KOH reacciona, formando un precipitado azul claro.

Indices característicos

Reflejos internos verde brillante; baja capacidad de reflejo; birreflexión intensa; paragénesis y reacciones positivas.

46. Marcasita (Fe S_2)

Propiedades físicas

Sistema: rómbico
Dureza: Mohs 6-6,5
Peso específico: 4,6-4,9 g/cm^3
Microdureza: 824-1119 kg/mm^2

Capacidad de reflejo

$R_{\text{máx}} = 58,3$ (540 nm)
 $R_{\text{min}} = 45,1$ (420 nm)
 $R_a = 44,5-51,0$ (460 nm)
 $R_v = 46,2-56,3$ (500 nm)
 $R_r = 46,2-53,5$ (700 nm)
Se pule bien; no es magnética; débil conductor de la electricidad.

Composición química

Fe -46,6 % ; S -53,4 % como impurezas más comunes tenemos: Sb, As, Tl; en cantidades muy pequeñas.

Características microscópicas

- Anisotropía muy fuerte con tonalidades azules, verde amarillenta y gris violeta.
- Birreflexión: fuerte con tonalidades carmelita.
- Reflejos internos: no presenta.
- Color: amarillo claro y en ocasiones amarillo verdoso.

Cristaliza en forma alargada y laminada, raramente de aspecto rómbico, algunas veces con maclas laminadas, también en forma de agregados colomórficos con estructura concéntrica zonal y radial.

Paragénesis

Se asocia a sulfuros de hierro, cobre, plomo, zinc, raramente otros elementos, frecuentemente, sustituye a la pirrotina y a la pirita; puede ser sustituida por la galena y la plata; ocasionalmente puede presentar intercrecimientos con arsenopirita, pirita, calcopirita, covelina y proustita.

Ataque químico

Reacción positiva: HNO_3 produce débil efervescencia y se colorea de carmelita; reacciones negativas del resto de los reactivos comunes.

Indices característicos

Se diferencia de la pirita por el fenómeno de la anisotropía.

47. Nillerita (Ni S)

Propiedades físicas

Sistema: trigonal
Dureza: Mohs 3-4
Peso específico: 5,2-5,6 g/cm^3
Microdureza: 225-256 kgf/mm^2

Capacidad de reflejo

$R_{\text{máx}} = 62,7$ (700 nm)
 $R_{\text{mín}} = 31,7$ (420 nm)
 $R_a = 36,9-44,0$ (460 nm)
 $R_v = 46,2-50,0$ (500 nm)
 $R_n = 51,8-60,3$ (620 nm)

Se pule bien; frecuentemente se tiñe. No es magnético. Buen conductor de la electricidad.

Composición química

La composición química es como sigue:

Ni -64,7 % ; S -35,3 %; las impurezas más comunes son de Fe(1-2 %); Co (hasta 0,5 %); Cu (hasta 1 %).

Características microscópicas

- Anisotropía: muy fuerte; con tonalidades desde carmelita a amarillo limón hasta azul y violeta; no se extingue completamente; las secciones perpendiculares al eje óptico son isotrópicas.
- Birreflexión: se manifiesta en inmersión con tonalidades amarillentas.
- Reflejos internos: no presenta.
- Color: amarillo claro; parecido a la calcopirita.

Se encuentra en forma de agregados radiales y aciculares; es frecuente la presencia en láminas de descomposición de soluciones sólidas; son características las maclas y el clivaje.

Paragénesis

Se asocia con la linneita, pentlandita, violarita, pirrotina, esfalerita, pirita, hematita, magnetita, minerales del grupo del platino, calcopirita, rammelsberguita; es común en la zona de oxidación de los yacimientos ricos en sulfuros de níquel.

Ataque químico

Reacción positiva: HNO_3 concentrado algunas veces ebulle; FeCl_3 débil reacción; $\text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ fuerte reacción. Reacción negativa HNO_3 (1:1); reacción muy débil: KCN.

Indices característicos

Color, anisotropía; forma de las segregaciones, paragénesis. reacciones positivas y negativas.

48. Molibdenita (Mo S₂)

Propiedades físicas

Sistema: Hexagonal

Peso específico: 4,7-5,0 g/cm³

Dureza: Mohs 1

Microdureza: 21-28 kgf/mm²

Capacidad de reflejo

R_{máx} = 56,2 (460 nm)

R_{mín} = 19,0 (700 nm)

R_v = 22,2-54,8 (420 nm)

R_v = 22,7-52,6 (500 nm)

R_n = 20,0-45,7 (620 nm)

Se pule bien, pero son frecuentes las estrías del esmeril en la superficie debido a su baja dureza. No es magnético, conductividad eléctrica débil, la cual se incrementa con el aumento de la temperatura.

Composición química

La composición química es como sigue: Mo -60,0 %; S -40,0 %; aunque esos valores son promedios; el contenido de Mo varía entre 57,1-60,0 % y el azufre entre 42,9-40,0 %; es común la presencia del renio (Re) y de acuerdo a los análisis espectrales el renio tiene sus máximos valores en la molibdenita.

Características microscópicas

- Anisotropía; muy fuerte presentando tonalidades desde el blanco-rosado hasta el azul oscuro muy típico; se observa mejor si los nicols no están perfectamente cruzados.
- Birreflexión: extremadamente fuerte y característica con tonalidades desde el blanco al carmelita.
- Reflejos internos: no presenta
- Color: blanco y tonalidades de gris a carmelita; por la alta birreflexión.

Sus agregados y cristales son tabulados; en forma de escamas y láminas; son característicos los cristales con maclas polisintéticas raramente aparecen agregados creptocristalinos.

Paragénesis

Se asocia con la scheelita, cuarzo, wolframita, pirita, calcopirita, arsenopirita, nasturano, esfalerita, pirrotina; en la zona de oxidación es sustituido por la powellitita.

Ataque químico

Reacción positiva: HNO₃ débil influencia; reacción negativa: HCl, KCN, FeCl₃, HgCl, KOH (regularmente no actúa ningún reactivo común).

Indices característicos

Birreflexión muy intensa, reacción químicas negativas al Mo, paragénesis; en comparación con el grafito es un débil conductor de la electricidad.

49. Niquelina (Ni As)

Propiedades físicas

Sistema: Hexagonal

Dureza: Mohs-5

Pesos específico: 7,6-7,8 g/cm³

Microdureza: 308-533 kgf/mm²

Capacidad de reflejo

R_{máx} = 63,9 (700 nm)

R_{mín} = 31,8 (460 nm)

R_v = 38,5-47,1 (420 nm)

R_v = 34,7-47,7 (500 nm)

R_n = 52,3-59,7 (620 nm)

Se pule muy bien; no es magnético; conductividad eléctrica débil.

Composición química

La composición química es como sigue: Ni-43,9 %; As-56,1 %; las principales impurezas son Fe (hasta el 2,7 %), S(hasta el 5 %) a veces Sb y Co.

Características microscópicas

- Anisotropía: muy fuerte; con tonalidades amarillentas, gris, verde, azul-violeta; azul-gris; la determinación es mejor cuando los nicoles no están bien cruzados.
- Birreflexión: fuerte; es típico, amarillo-rosado brillante hasta carmelita.
- Reflejos internos: no presenta.
- Color: rosado con tonalidades amarillenta; se confunde con la birreflexión muy alta.

Los agregados son allotriomórficos granulados, raramente arriñonados y radiales; los cristales frecuentemente están zonados.

Paragénesis

Se asocia con la cloantita, safflorita, rammelsberguita, mancherita, breithauptita, minerales de bismuto y de plata en yacimientos hidrotermales; forma asociaciones junto a la pirrotina, pentlandita, piritita, calcopirita y magnetita en los yacimientos magnéticos de sulfuros de níquel y cobre.

Ataque químico

Reacciones positivas: HNO_3 (1:1) ebulle; se oscurece; $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{KMnO}_4$; reacciona fuerte, ebulle. Reacción negativa: HCl , KOH , KCN , $(\text{NH}_4)_2\text{S}$, HgCl_2 y ZnCl_2 .

Indices característicos

- Anisotropía y birreflexión intensa, color rosado claro (paragénesis Au) reacciones químicas.

Propiedades químicas

Sistema: cúbico

Dureza: Mohs 2,5-3

Peso específico: $19,3 \text{ g/cm}^3$ (puro)

Microdureza: $50-59 \text{ Kmf/mm}^2$

Capacidad de reflejo

$R_v = 47,0$ (500 nm)

$R_n = 82,5$ (580 nm)

$R_r = 86,0$ (700 nm)

Se pule bien (en dependencia de los métodos de pulido); no es magnético; es buen conductor de la electricidad.

Composición química

El oro químicamente puro es difícil de localizar en la naturaleza; el oro nativo contiene comúnmente impurezas isomórficas de Ag (entre el 4-15 %); además, puede contener Pd, Cu, Bi, Pt, Hg, y Rh.

Características microscópicas

- Isotrópico; aunque no presenta extinción completa bajos los nicoles cruzados; se observa en su superficie y en las estrías producidas por el pulido un tinte verde + so.
- Birreflexión: no presenta.
- Reflejos internos: no presenta.
- Color: amarillo brillante "de oro" el cual varía con el contenido de impurezas.

Se localiza en forma de granos isométricos pequeños y agregados allotriomórficos granulados, algunas veces microgrietas rellenas y dendritas, segregaciones calomórficas; es común las maclas laminadas.

Paragénesis

El oro se asocia con la molibdenita, scheelita, piritita, arsenopirita, diferentes minerales de Te; antimonita, bismuto nativo, menas grises, borato, fluorita y cuarzo. En los yacimientos de menas sulfuradas que han alcanzado la superficie se concentra en la zona de oxidación. Por su alta estabilidad física y química así, como su alto peso específico, se localiza en yacimientos de placer de diferentes tipos.

Ataque químico

Reacción positiva con KCN ; se ennegrece con formación de superficie aspera; con Hg forma amalgama. Reacción negativa: HNO_3 ; HCl ; KOH , NaOH (El agua regia: $1/4 \text{ NO}_3\text{H} + 3/4 \text{ ClH}$, la disuelve).

Indices característico

Color amarillo, alta capacidad de reflejo baja dureza, reacciones microquímicas.

51. Oropimente (As₂ S₃)

Propiedades físicas

Sistema: monoclinico

Dureza: Mohs 1,5-2

Peso específico: 3,49 g/cm³

Microdureza: VHN - 51-57 kgf/mm²

Capacidad de reflejo

R_{máx} = 26,1 (460 nm)

R_{min} = 17,1 (660 nm)

R_v = 19,2-25,5 (500 nm)

R_a = 18,3-23,8 (540nm)

R_n = 17,3-22,0 (620 nm)

Se pule bien; no es magnético; no conduce la electricidad.

Composición química

As -61 %; S -39 %; puede contener hasta 2,7 % de Sb.

Características microscópicas

- Anisotropía: fuerte parecido a la molibdenita; aunque se enmascara por la intensidad de los reflejos internos.

- Birreflexión: fuerte tomando diferentes tonalidades.

Reflejos internos: muy abundantes e intensos; desde blanco a amarillo - limón.

Color: gris claro.

Se localiza en granos prismáticos y segregaciones radiales y en masas terrosas de estructura amorfa y cripto- cristalina.

Paragénesis

Es característico de los yacimientos de baja temperatura de antimonio, arsénico y mercurio, donde se asocia con rejalgar, antimonita, cinabrio, marcasita, aragonito, arsénico nativo, calcita y calcedonia, entre otros.

Ataque químico

Reacción positiva: KCN se oscurece y revela su estructura; HgCl₂ algunas veces forma una capa fina; KOH se oscurece y ennegrece. Reacciones negativas: HNO₃; HCl; FeCl₃.

Indices característicos

Reflejos internos intensos amarillo limón; paragénesis y reacciones microscópicas.

52. Pentlandita ((Fe, Ni)₉ S₈)

Propiedades físicas

Sistema: cúbico

Peso específico: 4,5-5,0 g/cm³

Dureza: Mohs 3-4

Microdureza: VHN - 195-223 kgf/mm²

Capacidad de reflejo

R_{máx} = 57,3 (700 nm)

R_{min} = 29,8 (420 nm)

R_a = 37,5-44,2 (460 nm)

R_v = 42,4-50,1 (500 nm)

R_n = 50,2-55,4 (620 nm)

Se pule bien; no es magnético; conduce débilmente la electricidad.

Composición química

La composición química es variable, la relación Fe/Ni es 1:1 ; en la mayoría de los casos se puede encontrar contenidos de 0,4 hasta 2,5 % de cobalto como mezcla isomorfa.

Características microscópicas

- Isótopo

- Birreflexión. no tiene.

- Color: amarillo claro a crema (más claro que la pirita) generalmente se presenta en agregados alotriomórficos - granulosos. Forma estructuras de descomposición de las soluciones sólidas con la pirrotina, calcopirita,

cubanita, mackinawita, mostrando diferentes variedades. Puede ser sustituida por la calcopirita, pirita y marcasita.

Paragénesis

Se encuentra en asociación con otros sulfuros y arseniuros de Ni, Cu y Co en los yacimientos magnéticos de licuación, talés como: calcopirita, pirrotina, magnetita, millerita, breithauptita, rammelsbergita, pararammelsbergita; forma paragénesis con minerales del grupo del platino.

Ataque químico

Reacción positiva: HNO_3 (diluido), débil coloración, es iridiscente. Reacciones negativas: HCl , FeCl_3 , KOH y NaOH .

Indices característicos

Paragénesis; se diferencia de la pirrotina por la isotropía y por una capacidad de reflejo más elevada.

53. Pirita (FeS_2)

Propiedades físicas

Sistema: cúbico

Dureza: Mohs 6-6,5

Peso específico: 4,9-5,2 g/cm^3

Microdureza: VHN - 1144-1374 Kgf/mm^2

Capacidad de reflejo

$R_{\text{máx}} = 57,0$ (700 nm)

$R_{\text{mín}} = 38,6$ (420 nm)

$R_{\text{a}} = 44,3-45,5$ (460 nm)

$R_{\text{v}} = 51,0-51,3$ (500 nm)

$R_{\text{n}} = 54,3-55,5$ (620 nm)

Se pule bien, no es magnético; conduce débilmente la electricidad.

Composición química

Fe - 46,6 % ; S - 53,4 %; presenta, a menudo, impurezas de Co, Ni, As, Sb; Cu, Au, y Ag; en el caso de los los elementos nobles se trata de minúsculas inclusiones en forma de descomposición sólida.

Características microscópicas

- Isótopa.

- Birreflexión: no presenta

- Reflejos internos: no presenta

- Color: amarillo claro.

Se presenta en cristales idiomórficos y en agregados alotriomórficos granulados; los cristales tienen forma de cubo y otras combinaciones; la pirita amorfa (melnikovita) se manifiesta en estructura colomórficas y en forma de finas capas superpuestas.

Paragénesis

Es el sulfuro más abundante en la corteza terrestre y también el de mayor distribución, localizándose en diversos tipos de yacimientos minerales y en las más variadas condiciones físico-químicas de formación.

Ataque químico

Reacción positiva: HNO_3 ; ebulle y se torna carmelita brillante; reacción negativa: KCN , HCl , HCl concentrado; agua regia, FeCl y KOH .

Indices característicos

Color amarillo claro, isotrópico, forma de las segregaciones, elevada microdureza.

54. Pirrotina (Fe_{1-x}S o (FeS))

Propiedades físicas

Sistema: hexagonal

Dureza: Mohs 4

Peso específico: 4,58-4,7 g/cm^3

Microdureza: 214-343 kgf/mm^2

Capacidad de Reflejo

Rmáx = 44,5 (700 nm)

Rmin = 27,8 (420 nm)

Ra = 29,7-35,3 (460 nm)

Rv = 31,6-37,8 (500 nm);

Rn = 39,8-43,5 (660 nm)

Se pule bien; muy magnético, conduce débilmente la electricidad.

Composición química

Es variable el S -39,0-40,0 % y el Fe entre 60,0-61 % ; a veces contiene impurezas de Cu, Ni y Co; también puede presentar bajos contenidos Mn, Zn.

Características microscópicas

- Anisotropía: muy fuerte; con tonalidades desde el amarillo-gris hasta el gris azulado.
- Birreflexión: se distingue el carmelita-crema hasta el carmelita rojizo.
- Reflejos internos: no presenta.
- Color: crema con tonalidad rosada.

Se localiza en agregados alotriomórficos en granos pequeños; es frecuente localizar maclas polisintéticas; es común la presencia de pentlandita y esfalerita en estructuras de emulsión (descomposición de soluciones sólidas).

Paragénesis

Se encuadra en las menas de los yacimientos de diferentes tipos genéticos; es común la asociación con la pirita, pentlandita, esfalerita, calcopirita, galena, arsenopirita y magnetita.

Ataque químico

Reacciones positivas: HNO₃ débil ebullición. Reacción negativa: HCl KCl, y FeCl₃.

Índices característicos

Color: crema; alta manifestación de la anisotropía magnética.

55. Platino (Pt)

Propiedades físicas

Sistema: cúbico

Peso específico: 21,4 gr/cm³

Dureza: Mohs 4-4,5

Microdureza: 114-146 kgf/mm²

Capacidad de reflejo

Rmáx = 70,0

Ra = 76,5 (460 nm)

Rv = 77,3 (500 nm)

Rn = 80,1 (620 nm)

Rr = 81,0 (720 nm)

Se pule bien; las variedades con contenido de Fe se pule bien (isoferroplatino); buen conductor de la electricidad.

Composición química

Casi nunca puro; presenta contenido de los otros elementos de su grupo (Pt, Ir, Pd, Ru, Rh y Os); puede contener Fe, Cu, Au y Ni.

Características microscópicas

- Isótropo; aunque no presenta extinción completa.
 - Birreflexión: no presenta
 - Reflejos internos: no presenta.
 - Color: blanco; en dependencia a impurezas y al contacto con otros minerales puede tomar tonalidades: blanco amarillenta y gris.
- Se manifiesta en agregados alotriomórficos; a veces en cristales pequeños de aspecto crítico; algunas veces subredondeados; en ocasiones se localizan maclas.

Paragénesis

Se encuentra junto a las cromo espinelas y titanomagnetitas en rocas ultrabásicas; también en los yacimientos magmáticos de licuación junto a la pentlandita, calcopirita, pirrotina y magnetita.

Ataque químico

No presenta ningún reactivo común. Actúa el agua regia, ácido crómico con ácido hidroclórico.

Indices característicos

Color blanco puro, paragénesis, elevada capacidad de reflejo, se diferencia de la plata por la dureza y las reacciones positivas y negativas de la plata.

56. Plata (Ag)

Propiedades físicas

Sistema: cúbico

Peso específico: 10,1-11,1 g/cm³

Dureza: Mohs 2,5-3

Microdureza: 41-57 kgf/mm²

R_{máx} = 97,8 (660 nm)

R_{min} = 71,0 (420 nm)

R_a = 92,0 (460 nm)

R_v = 93,0 (500 nm)

R_n = 97,3 (620 nm)

Se pule bien; no es magnético, buen conductor de la electricidad.

Composición química

La plata nativa es muy propagada en la corteza terrestre; por debajo del cobre y también del oro, la plata pura 100 % de contenido es rara; casi siempre se acompaña con el oro (en cualquier proporción); presenta, además, impurezas de cobre, antimonio y plomo, entre otros.

Características microscópicas

- Isótropo
- Birreflexión: no presenta
- Reflejos internos: no presenta
- Color: blanco brillante con tonalidades cremas; en contacto con la luz pierde el brillo rápidamente.

Aunque en granos irregulares, raramente en forma de dendritas y de esqueletos; los cristales ideomórficos se encuentran muy raramente.

Paragénesis

Se asocia a los minerales de plata y oro, galena argentífera, arseniuros de níquel y cobalto; también con calcita, barita, fluorita y cuarzo.

Ataque químico

Reacción positiva: HNO₃ produce efervescencia; FeCl₃ aureola iridiscente, HgCl₂, forma aureola de gris a carmelita; reacciones negativas: KOH.

Índice diagnóstico

Alta capacidad de reflejo, microdureza baja y las reacciones de ataque químico; se oscurece al aire y a la luz.

57. Rutilo (TiO₂)

Propiedades físicas

Sistema: Tetragonal

Dureza: Mohs 6,0

Peso específico: 4,2-4,3 g/cm³

Microdureza: 1074-1210 kgf/mm²

Capacidad de reflejo

R_v = 20,5 (500 nm)

R_n = 18,0 (620 nm)

R_r = 17,5 (700 nm)

Se pule con dificultad, no conduce la corriente eléctrica.

Composición química

De acuerdo a su fórmula reportan: Ti -60 % y O -40 %; los análisis muestran contenido de Fe tanto divalente como trivalente; ocasionalmente Sn hasta 1,5 %; raramente Cr⁺³, V⁴⁺; cuando el contenido de Fe es alto se puede formar la variedad conocida por nigrina FeTiO₃, la cual forma estructura de descomposición de soluciones sólidas con el rutilo.

Características microscópicas

- Anisotropía: anisotrópico, en la mayoría de las determinaciones la magnitud de los reflejos internos interfiere la observación.

- Birreflexión: débil, en la mayoría de los casos no es visible en el aire.
 - Reflejos internos: intensos y abundantes, varían desde tonalidades incoloras amarillos, rojos, pardos y azules bien visibles en el aire e inmersión.
 - Color: blanco grisáceo.
- La mayoría de las veces se observan cristales aciculares, filamentosos, es frecuente la presencia de maclas y estructura de descomposición de soluciones sólidas con otros minerales.

Paragénesis

Se presenta en menas magmáticas de la formación mineral titanio-magnetita y en los procesos metamórficos; se asocia con la hematita, magnetita, ilmenita, ilmeno-rutilo; en menor grado con casiterita, wolframita, arsenopirita, cromita y cuarzo, entre otros.

Ataque químico

No actúa ningún reactivo común.

Índices característicos

Baja capacidad de reflejo; abundancia de los reflejos internos; morfología de sus cristales; elevada microdureza y sus reacciones son negativas con los reactivos comunes.

58. Safflorita (CoAs₂)

Propiedades físicas

Sistema: rómbico
 Dureza: Mohs 4,5-5,5
 Peso específico: 6,9-7,3 g/cm³
 Microdureza: 430-751 kgf/mm²

Capacidad de reflejos

R_{máx} = 56,9 (460 nm)
 R_{mín} = 50,0 (700 nm)
 R_v = 53,0-55,9 (420 nm)
 R_v = 53,9-55,7 (500 nm)
 R_n = 50,2-54,5 (620 nm)

Se pule bien, no es magnético, débil conductor de la electricidad.

Composición química

La safflorita (CoAs₂) y la rammelsbergita (NiAs₂) son los extremos de una serie continua, incluyendo la parammelsbergita.

Características microscópicas

- Anisótropo e isotropo (indistintamente).
- Birreflexión: débil o no presenta.
- Reflejos internos: no presenta.
- Color: blanco con tonalidades azul claro.

Se presenta en cristales idiomórficos y sus agregados; raramente crecimiento radiados y dentados; algunas veces formaciones criptocristalinas.

Paragénesis

Se asocia a minerales de cobalto y de níquel, tanto sulfuro como arseniuros; es típica la paragénesis safflorita-loellingita-rammelsbergita. Además, puede localizarse en paragénesis con la plata nativa, bismuto, cuarzo y calcita.

Ataque químico

Reacciones positivas: HNO₃ produce débil efervescencia, se observa su estructura; FeCl₃, se torna carmelita, en ocasiones puede ser negativo el efecto. Reacciones negativas: HCl, KCN, KOH.

Índices característico

Se diferencia del resto de los sulfuros y arseniuros por una capacidad de reflejo alta y por valores de la microdureza bajos.

59. Scheelita (CaWO₄)

Propiedades físicas

Sistema: tetragonal
 Dureza: Mohs 4,5
 Peso específico: 5,8-6,2 g/cm³
 Microdureza: 392-414 kgf/mm²

Capacidad de reflejo

R_v = 10,0 (500 nm)

Rn = 10,0 (620 nm)

Rr = 10,0 (700 nm)

Se pule bien, no es magnético, no conduce la electricidad.

Composición química

CaO -19,4 %; W O₃ -80,6 %; puede presentar mezcla isomorfa, observándose el MoO₃; puede llegar hasta el 10 %; CuO, alcanza hasta el 7 % (cupro-scheelita) ocasionalmente se localizan tierras raras del grupo del cerio.

Características microscópicas

- Isotrópico, algunas veces es débilmente anisotrópico.
 - Birreflexión: no presenta.
 - Reflejos internos: incoloros, amarillos, bien visibles en el aire.
 - Color: gris.
- Se manifiestan en agregados y granos isométricos e idiomórficos.

Paragénesis

Se asocia a granates, piroxenos, molibdenita, wolframita, casiterita y cuarzo; puede sustituir a la wolframita.

Ataque químico

Reacciones positivas con HNO₃, se descompone el mineral formando un precipitado amarillo (es luminiscente).

Índice característico

Baja capacidad de reflejo; reacción luminiscente a la luz; es azul claro bajo la luz ultravioleta.

60. Tenorita (CuO)

Propiedades físicas

Sistema: monoclinico

Dureza: Mohs 3,5

Peso específico: 5,8-6,4 g/cm³

Microdureza: 209-254 kgf/mm²

Capacidad de reflejo

Rmáx = 30,7 (500 nm)

Rmín = 14,0 (700 nm)

Rv = 21,9-30,6 (420 nm)

Ra = 14,2-29,6 (580 nm)

Rn = 14,1-29,2 (620 nm)

Se pule de regular a bien, no es magnético, conductibilidad eléctrica débil.

Composición química

CuO -79,9 %; O -20,1 %.

Características microscópicas

- Anisotrópico: con variación de tonalidades.
- Birreflexión: se manifiesta bien, pudiendo ser intensa.
- Reflejos internos: no presenta.
- Color: blanco grisáceo.

Se presenta en agregados finamente granulosos y criptocristalinos, también en agregados radiados, colomórficos y laminados; es muy típica la presencia de los cristales en maclas polisintéticas.

Paragénesis

Se localiza en yacimientos postmagmáticos, principalmente de cobre de diferentes génesis en asociación con la calcopirita, galena, esfalerita, pirita, arsenopirita y otros sulfuros y arseniuros.

Ataque químico

Reacciones positivas: HCl se oscurece rápidamente, cuando el ácido se evapora queda un anillo alrededor del cristal. Reacciones negativas; HNO₃ FeCl₃, KCN y KOH.

Índices característico

Color, alta anisotropía, Birreflexión intensa, paragénesis.

61. Wolframita ((Fe Mn) WO₄)

Propiedades físicas

Sistema: monoclinico

Peso específico: 6,7-7,5 g/cm³

Dureza: Mohs 4,5-5,5

Microdureza: 398-593 kgf/mm²

Capacidad de reflejo

R_{máx} = 19,0 (420 nm)

R_{min} = 14,4 (700 nm)

R_a = 15,3-18,6 (460 nm)

R_v = 15,0-18,6 (500 nm)

R_n = 14,5-18,4 (620 nm)

Se pule bien, magnetismo débil, se incrementa al aumentar los contenidos de Fe (ferberita) y asciende hasta llegar a la hubnerita, donde casi no se manifiesta. No conduce la electricidad.

Composición química

La wolframita forma una serie isomórfica en cuyos extremos tenemos a la ferberita (FeWO₄) y la hubnerita (MnWO₄) el contenido de WO₃ puede llegar hasta 75 %, entre las impurezas tenemos: Mg, CaO, Ta₂O₅ y SnO₂, entre otros.

Características microscópicas

- Anisotrópico: se manifiesta bien.
- Birreflexión: no presenta ó es muy débil.
- Reflejos internos: de color rojo-pardos, visibles en inmersión y ocasionalmente en el aire.
- Color: gris.

Se presenta en cristales prismáticos y tubulares, es característico el clivaje en dos direcciones y las maclas se observan con luz polarizada.

Paragénesis

La wolframita es típica de las formaciones de greissen y yacimientos hidrotermales de paragénesis cuarzosa; se asocia con la molibdenita, casiterita, scheelita, bismuto nativo, bismutina, pirita, berilo y otros.

Ataque químico

No actúa ningún reactivo común.

Índices característicos

La forma prismática de sus cristales, maclas simples, reflejos internos rojo-pardos y paragénesis.

TABLA 20.1. Para los minerales metálicos
GRUPO I. Minerales de Dureza baja

Minerales	Fórmula química	Singoñía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico	
					Escala de Mohs	kg/mm ²						
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Planta nativa (*) (56)	Ag	Cub.	95	Bianco crema	2,5-3	41-57	Isótropo	No	No	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece pierde el brillo, se oscurece es iridiscente
2	Cobre nativo (*) (24)	Cu	Cub	90	Rosado intenso	2,5-3	1111-43	Isótropo anisótropo	No	No	No	HNO ₃ - ebulle; se oscurece FeCl ₃ - se oscurece HgCl ₂ - el brillo
3	Electrum	Au, Ag	Cub	84	Amarillo Claro	2,5-3	80-100	Isótropo	No	No	No	HNO ₃ - Amarillo oscuro KCN - se oscurece HgCl ₂ - se oscurece, es iridiscente FeCl ₃ - algunas veces se oscurece
4	Oro nativo (*) (50)	Au	Cub	84	Amarillo intenso	2,5-3	41	Isótropo	No	No	No	KCN - se oscurece lentamente FeCl ₃ - algunas veces se oscurece
5	Bismuto nativo (*) (10)	Bi	Trig.	88-6	Bianco con tonalidades rosa crema	22,5	16-26	Muy anisótropo	No	No	No	HNO ₃ - se oscurece, ebulle HCl - se oscurece, amarillo oscuro, FeCl ₃ - se oscurece, es iridiscente. HgCl ₂ - se oscurece lentamente

256

TABLA 20.1 Continuación

Minerales	Fórmula química	Singoñía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico	
					Escala de Mohs	kg/mm ²						
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
6	Altaita (*) (3)	Pb Te	Cub	65	Bianco, con tonalidad verdosa	2-3	46-60	Isótropo	No	No	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece HCl - pierde el brillo FeCl ₃ - es iridiscente, se oscurece
7	Teluro nativo	Te	Trig.	63	Bianco con tonalidad cremosa	2-2,5	29-37	Muy anisotrópico	No	Débil	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece HCl, FeCl ₃ - algunas veces se oscurece
8	Teluro bismutita	Bi ₂ Te	Trig.	61	Bianco con tonalidad rosada	1,5-2	32-93	Muy anisotrópico	No	débil	No	HCl - ebulle, se oscurece FeCl ₃ - se oscurece
9	Krennerita	(Au, Ag) Te ₂	Rómb.	61	Bianco con tonalidad cremosa	2-2,5	36-88	Muy anisotrópico	No	Evidente	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece FeCl ₃ - algunas veces se torna amarilloso KOH - algunas veces se oscurece
10	Melonita	Ni Te ₂	Hexag.	60	Bianco Rosáceo	1-1,5	141-220	Muy Anisotrópico	No	débil	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece FeCl ₃ - se oscurece. HCl - algunas veces se oscurece
11	Silvanita	(Au, Ag) Te ₄	Monocl.	59-49	Bianco con tonalidad amarillosa	2	60-98	Muy anisotrópico	No	Intenso	No	HNO ₃ - se oscurece rápidamente.

257

TABLA 20.1 Continuación:

No	Minerales	Fórmula química	Singonía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
12	Tetradimita	Bi ₂ TeS	Trig.	56	Blanco con tonalidades rosado amarillosa	1.5-2	25-76	Anisotrópico	No	Débil No	No	HNO ₃ - ebulle, es iridiscente, amarillo negro FeCl ₃ - se oscurece HCl - algunas veces se oscurece.
13	Calaverita (*) (17)	AuTe ₂	Monocl.	56	Blanco con tonalidades amarillosa	2.5-3	213-237	Anisotrópico	No	Débil	No	HNO ₃ - ebulle se oscurece es iridiscente FeCl ₃ - Algunas veces se oscurece es iridiscente.
14	Clausthalita	PbSe	Cúbica	50	Blanco	2-3	49-53	Isótropo	No	Débil	No	HNO ₃ - pierde el brillo precipita HCl - pierde el brillo es iridiscente.
15	Bisutina (*) (11)	B ₂ S	Rómbica	48-42	Blanco con tonalidades amarillosa	2	118-172	Muy anisotrópico	No	Débil	No	HNO ₃ - ebulle se oscurece HCl - algunas veces es iridiscente HgCl ₂ - algunas veces precipita oscuro.
16	Valerita	Cu ₃ Fe ₃ S ₃	Rómbica	47-19	Desde blanco-cremoso hasta gris	1-2,5	50-93	Muy anisotrópico	No	Intenso	No	No actúa ningún reactivo

TABLA 20.1 Continuación

No	Minerales	Fórmula química	Singonía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
17	Antimonita (*) (5)	Sb ₂ S ₃	Rómbica	45-30	Blanco con tonalidad azulosa	2-2,5	65-153	Muy anisotrópico	Rojo intenso en polvo fino (inmersión)	Intenso	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece anillo iridiscente KOH - se oscurece precipita (rojo)
18	Aiquinita (*) (1)	PbCuBiS ₃	Rómbica	44	Blanco con tonalidad amarilla débil	2-2,5	165-205	anisotrópico	No	Evidente	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece FeCl ₃ - se oscurece, estructura HCl - algunas veces se oscurece
19	Molibdenita (*) (48)	MoS ₂	Hexag.	44-15	Desde blanco hasta gris	1-1,5	21-28	Muy anisotrópico	No	Intenso	No	No actúa ningún reactivo
20	Galena (*) (36)	PbS	Cúbica	43	Blanco	2,5	88-159	Isótropo	No	No	No	HNO ₃ - se oscurece, es iridiscente amarillo negro FeCl ₃ - es iridiscente

TABLA 20.1 Continuación

No	Minerales	Fórmula química	Singoñía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
21	Citindrita	Pb ₃ Sn ₄ Sb ₂ S ₁₄	Rómbica	41	Blanco con tonalidad verdosa	2-2,5	66-77	Anisotrópico	No	Débil	No	HNO ₃ , FeCl ₃ - se oscurece, es iridiscente. KOH - amarillo negro.
22	Geocronita	S ₈ Sb As Pb ₅	Monocli	41	Blanco con tonalidades verdosa	2,5	95-140	Anisotrópico	No	Débil	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece estructura. HCl - se oscurece débilmente
23	Hesita (*) (39)	Ag ₂ Te	Cub. Monocli	40	Blanco grisáceo con tonalidad cremosa	2-3	28-44	Isótropo anisótropo.	No	No Débil (inmersión)	No	HNO ₃ - se oscurece, algunas veces ebulle, estructura. HCl - se oscurece FeCl ₃ - es iridiscente, se oscurece
24	Petzita	Ag ₃ Au Te ₂	Cúbica Rómbica	40	Blanco grisáceo con tonalidad parduzca	2,5-3	46-54	Isótropo. Débilmente anisotrópico	No	No	No	HNO ₃ - ebulle, es iridiscente HCl - es iridiscente HgCl ₂ - se oscurece
25	Jamesonita (*) (41)	Pb ₄ Fe Sb ₆ S ₁₄	Monocli	40-32	Blanco con tonalidad verdosa	2,5-3	104-123	Muy anisotrópico	Rojos (inmersión)	Intenso	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece estructura HCl - amarillo negro

260

TABLA 20.1 Continuación

No	Minerales	Fórmula química	Singoñía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
26	Tillita	PbSnS ₂	Rómbica	38	Blanco con tonalidad cremosa	2	32-83	Anisotrópico	No	Débil	No	KCN - algunas veces se oscurece parcialmente, es iridiscente.
27	Boulangierita (*) (13)	Pb ₅ Sb ₄ S ₁₁	Monoclinico	38	Blanco con tonalidad verdosa-azulosa	2,5-3	113-179	Muy Anisotrópico	Rojos intensos (inmersión)	Débil	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece HCl - algunas veces forma anillo negro
28	Emplectita	CuBiS ₂	Rómbica	38	Blanco amarillento	2	158-238	Muy Anisotrópico	No	Débil	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece KOH - algunas veces se oscurece
29	Berterita (*) (9)	FeS Sb ₂ S ₃	Rómbica	38-27	Blanco con tonalidad rosada	2-3	134-206	Muy Anisotrópico	No	Intenso	No	HNO ₃ - algunas veces se oscurece KCN, HgCl ₂ , KOH - algunas veces se oscurece
30	Argentita (*) (6)	Ag ₂ S	Cúbica, Monoclinico	35	Blanco con tonalidad verdosa-azulosa	2-2,5	20-30	Isótropo Débilmente anisotrópico	No	No	No	HNO ₃ , KCN - se oscurece FeCl ₃ , HgCl ₂ - se oscurece es iridiscente

261

TABLA 20.1 Continuación

Minerales	Fórmula química	Singonía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico	
					Escala de Mohs	kg/mm ²						
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
31	Bornonita (*) (16)	PbCuSbS ₃	Rómbica	35	Blanco con tonalidades azul-verdosa	2,5-3	166-187	Débilmente anisotrópico	Rojos (inmersión)	Débil	No	HNO ₃ - amarillo negro, algunas veces se oscurece
32	Zinckenita	PbS ₄ Sb ₂	Hexag.	35	Blanco	3	162-207	Débilmente anisotrópico	Rojos (inmersión)	Débil	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece HCl - se oscurece KOH - estructura
33	Witcheinita	Cu ₂ BiS ₃	Rómbica	34	Blanco grisáceo con tonalidad marrón	2-3	170-206	Débilmente anisotrópico	No	No	No	HNO ₃ - se torna amarillo, anillo negro KOH, FeCl ₃ - algunas veces se oscurece
34	Eukairita	AgCuSe	Rómbica	32	Amarillo claro como la pirita	2-2,5	23-42	muy anisotrópico	No	muy débil	No	HNO ₃ - se oscurece FeCl ₃ , KCN - se oscurece
35	Pirargirita	Ag ₃ SbS ₃	Trig.	32	Blanco grisáceo con tonalidad azulosa	2-2,5	72-109	Anisotrópico	Rojos (visibles)	Evidente	No	KCN - iridiscente HgCl ₂ , FeCl ₃ - algunas veces se oscurece KOH - iridiscente

262

TABLA 20.1 Continuación

Minerales	Fórmula química	Singonía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico	
					Escala de Mohs	kg/mm ²						
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
36	Klockaninita	CuSe	Hexag.	30-18	Blanco grisáceo con tonalidades verdosas o azulosas	2-3	57-86	Muy anisotrópico	No	Intensos	No	HNO ₃ - amarillo negro KCN - se oscurece HgCl ₂ - algunas veces setornan azul KOH - algunas veces se oscurece
37	Calcosina (*) (19)	Cu ₂ S	Rómbica	29	Blanco con tonalidades azulosas o rosáceas	2,0-3,0	70-98	Débilmente anisotrópico isotrópico	No	No	No	HNO ₃ - ebulle se torna azul, estructura FeCl ₃ - se torna azul
38	Stefanita	Ag ₅ SbS ₄	Rómbica	29	Blanco grisáceo con tonalidad rosada	2-2,5	26-47	Muy anisotrópico	No	Débil	No	KCN, FeCl ₃ - se oscurece KOH - precipitado pardo oscuro, estructura
39	Cinabrio (*) (21)	HgS	Trig.	28	Blanco grisáceo con tonalidad azul	2-2,5	51-96	Muy anisotrópico	Rojos intensos (visibles)	Débil	No	No actúa ningún reactivo.

263

TABLA 20.1 Continuación

No	Minerales	Fórmula química	Singonía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
40	Estromeyerita	Cu ₂ S Ag ₂ S	Rómbica Cúbica	27	Blanco grisáceo con tonalidad lilácea	2,5-3	38-44	Muy anisotrópico	No	Débil	No	HNO ₃ , HCl - se oscurece FeCl ₃ , HgCl ₂ - iridiscente, estructura KOH - se oscurece
41	Metacinnabarita	Hg S	Cúbica	27	Blanco grisáceo	2,5-3	74-86	Isótropo	No	No	No	Agua regia, KOH - algunas veces oscurece
42	Prostita	Ag ₃ As ₂ S ₃	Trig.	28-25	Blanco grisáceo con tonalidad azulosa	2-2,5	101-137	Anisotrópico	ojos anaranjados (visibles)	Evidente	No	KCN - se oscurece, estructura FeCl ₃ - se oscurece HgCl ₂ - se oscurece es iridiscente
43	Quernesita	Sb ₂ S ₂	Triclin.	27	Blanco grisáceo con tonalidad azulosa	1-1,5	36-90	Muy anisotrópico	Rojos con tonalidades violeta	Evidente	No	HNO ₃ , KCN - se oscurece KOH - se oscurece, es iridiscente
44	Oropimente (*) (51)	As ₂ S ₃	Monoclin.	26-20	Blanco grisáceo	1,5-2	51-57	Muy anisotrópico	Amarillo (visibles)	Intenso	No	KCN - se oscurece, estructura KOH - se oscurece

264

TABLA 20.1 Continuación

No	Minerales	Fórmula química	Singonía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
45	Bornita (*) (12)	Cu ₃ FeS ₄	Cúbica Tetrag.	23	Rosado carmelita	3	97-124	Isotróp. anisotrópico	No	No	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece estructura KCN, FeCl ₃ - se oscurece
46	Covelina (*) (26)	Cu S	Hexag.	22-3,2	Azul, azul celeste	1,5-2	92-110	Muy anisotrópico	No	Intenso	No	KCN - algunas veces se torna rojo, estructura
47	Grafito	C	Hexag.	22-5	Blanco grisáceo con tonalidad rosada	1-2	7-12	Muy anisotrópico	No	Intenso	No	No actúa ningún reactivo
48	Rejalgar	As S	Monoclin.	21-19	Blanco grisáceo	1,5-2	50-57	Muy anisotrópico	Rojos anaranjados (visibles)	Intenso	No	KOH - se oscurece
49	Idaíta	Cu ₉ FeS ₆	Hexag.	20	Anaranjado rojizo	2,5	216-260	Muy anisotrópico	No	Intenso	No	HCl - algunas veces se oscurece
50	Digenita (*) (30)	Cu ₉ S ₅	Cúbica	19	Azul celeste hasta azul	2,5-3	70-74	Isotrópico	No	No	No	HNO ₃ , FeCl ₃ , KCN - se oscurece

265

TABLA 20.1 Continuación

No	Minerales	Fórmula química	Singonía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
51	Mulfenita	Pb Mo O ₄	Tetrag.	17	Gris con tonalidad azul celeste	2,5-3	90-183	Anisotrópico	Incoloros amarillos anaranjados (visibles)	Débil	No	HNO ₃ - se oscurece HCl - oscurece débilmente
52	Umangita	Cu ₃ Se ₃	Rómbica	17-14	Liláceo hasta azul grisáceo	3	77-108	Muy anisotrópico	No	Intenso	No	HNO ₃ , HgCl ₂ - oscurece, se torna azul KCN - oscurece, se torna azul HCl, FeCl ₃ - se torna azul KOH - algunas veces oscurece
53	Crocoíta	Pb Cr O ₄	Monocli.	16	Gris	2,5-3	111-120	Anisotrópico	Anaranjados rojizos (visibles)	Débil	No	HNO ₃ - se oscurece HCl, KOH - algunas veces ebulle, se oscurece
54	Valentinita	Sb ₂ O ₃	Rómbica	15	Gris	25-3	60-120	Anisotrópico	Incoloros amarillos visibles	Débil	No	No actúa ningún reactivo
55	Azufre nativo	S	Rómbico Monoclic.	15-10	Gris	1-2	24-66	Anisotrópico	Amarillos visibles	Intenso	No	No actúa ningún reactivo

266

TABLA 20.1 Continuacion

No	Minerales	Fórmula química	Singonía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
56	Melikovita	Fe S ₂	Amorfa	10	Amarillo claro hasta marrón	2-3	40-120	Isotrópico	No	No	Débilmente magnético	HNO ₃ , HCl, KCN - se oscurece
57	Anglesita (*) (4)	Pb SO ₄	Rómbica	9	Gris	2,5-3	122-155	Débilmente anisotrópico	Incoloros algunas veces parduzcos visibles	No	No	HNO ₃ - oscurece débilmente
58	Eritrina (*) (32)	CO ₃ (As O ₄) ₂ 8 H ₂ O	Monoclínica	8	Gris oscuro	1,5-2,5	100-121	Débilmente anisotrópico	Rosados visibiles	Débil	No	HNO ₃ - se oscurece KOH - es iridescente
59	Annaber-gu	Ni ₃ (As O ₄) ₂ 8 H ₂ O	Monoclínica	7	Gris oscuro	2,5-3	60-120	Anisotrópico	Incoloros verdes	Débil	No	HNO ₃ , HCl, KCN, HgCl ₂ , KOH - se oscurece
60	Auricalcita	(Zn Cu) ₅ (CO ₃) ₂ 8 (H ₂ O)	Rómbica	7	Gris oscuro	2-3	100-200	Anisotrópico	Incoloros azul celeste visibles	No	No	HNO ₃ , HCl - ebulle, se oscurece

267

TABLA 20.1 Continuación

No	Minerales	Fórmula química	Singonía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
61	Calcita	Ca CO ₃	Trig.	7-4	Gris oscuro	3	120-202	Muy anisotrópico	Blanco incoloros (visibles)	Intenso	No	HNO ₃ , HCl - ebulle, se oscurece FeCl ₃ - es iridiscente
62	Garmerita	Ni ₆ (SO ₄) ₁₀ (OH) ₈ · 4 H ₂ O	Linorfa Monocli.	6	Gris oscuro	2-3	No hay datos	Isotrópico	Incoloros verdes (visibles)	No	No	HNO ₃ , KCN - estructura
63	Calcanita	Cu SO ₄ 5 H ₂ O	Tricl.	5	Gris oscuro	2,5	45-60	Anisotrópico	Incoloros verdes, Azules (visibles)	Débil	No	Es atacado por todos los reactivos
64	Biberita	Co SO ₄ 7 H ₂ O	Monocli.	4	Gris oscuro	2	20-60	Débilmente anisotrópico	Rojos rosáceos (visibles)	No	No	Se disuelve en todos los ácidos
65	Morenosita	Ni SO ₄ 7 H ₂ O	Rómbica	4	Gris oscuro	2-2,5	30-60	Débilmente anisotrópico	Incoloros verdosos (visibles)	No	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece HCl ₃ - se oscurece

268

Grupo II. Minerales de dureza media

No	Minerales	Fórmula química	Singonía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
66	Animonio nativo	Sb	Trig.	74	Blanco brillante	3-3,5	88-135	Anisotrópico	No	Débil	No	HNO ₃ , HgCl ₂ - se oscurece HCl - amarillo negro KCN, FeCl ₃ - se oscurece
67	Platino (*) (55)	Pt	Cúbi	70	Blanco brillante	4-4,5	114-146	Isotrópico	No	Algunas veces magnético	No	No actúa ningún reactivo
68	Paladio	Pd	Cúbi	70	Blanco brillante con tonalidad amarillosa	4,5-5	No hay datos	Isótropo	No	No	No	No actúa ningún reactivo
69	Hierro nativo	Fe	Cúbi	63	Blanco con tonalidad cremosa	4	132-141	Isótropo	No	No	Muy magnético	HNO ₃ , HCl - ebulle, se oscurece FeCl ₃ - se oscurece, es iridiscente HgCl ₂ - se oscurece
70	Saflorita (*) (58)	CoAs ₂	Rómbica	55	Blanco con tonalidad azul	4,5	430-751	Anisotrópico	No	Débil	No	HNO ₃ - ebulle lentamente precipita FeCl ₃ - se oscurece

269

TABLA 20.1 Continuación

Minerales	Fórmula química	Singoñía	P. (%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico	
					Escala de Mohs	kg/mm ²						
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
71	Domeykita	Cu ₃ As	Cúbica Trig.	56	Blanco cremoso	3-3,5	No hay datos	Isótropo Débilmente anisotrópico	No	No	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece HCl, FeCl ₃ , HgCl ₂ - se oscurece KOH - se oscurece, iridiscente, estructura
72	Millerita (*) (47)	NiS	Trig.	54	Amarillo claro	3-4,0	225-256	Muy anisotrópico	No	No Débil	No	HNO ₃ - algunas veces ebulle HgCl ₂ - se oscurece
73	Pentlandita (*) (52)	(FeNi) ₉ S ₈	Cúbica	53	Amarillo claro	3,0-4	195-223	Isótropo	No	No	No	HNO ₃ - algunas veces es iridiscente
74	Calopirita (*) (18)	Cu Fe S ₂	Tetrag.	47	Amarillo	3,0-4,0	174-219	Débilmente anisotrópico	No	No	No	HNO ₃ , KCN - algunas veces oscurece vapores de agua regia - estructura
75	Galeno bismuta (*) (37)	PbS.Bi ₂ S ₃	Rómbica	43	Blanco	2,5	88-113	Muy anisotrópico	No	Intenso	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece precipitado FeCl ₃ - algunas veces se torna amarillo
76	Troilita	FeS	Hexag.	42	Crema	4-4,5	192-277	Muy anisotrópico	No	Evidente	Débilmente magnético	HNO ₃ , HCl - ebulle KOH - es iridiscente

270

TABLA 20.1 Continuación

Minerales	Fórmula química	Singoñía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico	
					Escala de Mohs	kg/mm ²						
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
77	Calcoesitibinita	Cu ₂ S Sb ₂ S ₃	Rómbico	42	Blanco con tonalidad rosácea	3-4	No hay datos	Anisotrópico	No	Débil	No	HNO ₃ - iridiscente, se oscurece
78	Cubanita (*) (28)	Cu Fe ₂ S ₃	Rómbica	40	Amarillo rosáceo	3,5	199-228	Muy anisotrópico	No	Débil	Muy magnético	No actúa ningún reactivo
79	Hauchecornerita	(Ni, Co) ₇ (S, Sb, Bi) ₈	Tetrag.	40	Crema	5	No hay datos	Anisotrópico	No	No	No	HNO ₃ - se oscurece HCl - amarillo oscuro
80	Pirrotina (*) (54)	Fe _{1-x} S	Hexag.	38	Crema	4	214-343	Muy anisotrópico	No	Débil	Muy magnético	HNO ₃ - algunas veces se oscurece KOH - algunas veces es iridiscente
81	Violarita	FeNi ₂ S ₄	Cub.	38	Blanco grisáceo con tonalidad violeta	4-5	458	Isótropico	Algunas veces rojo-marrón (inmersión)	No	No	HNO ₃ - ebulle lentamente, se oscurece
82	Freibergita	(Cu, Ag) ₃ SbS ₃	Cub.	30	Blanco grisáceo con tonalidad amarilla verdosa	3-4	317-375	Isótropico	Algunas veces rojo-marrón (inmersión)	No	No	HNO ₃ - se oscurece KCN, FeCl ₃ - se oscurece, es iridiscente

271

TABLA 20.1 Continuación

No	Minerales	Fórmula química	Singonía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
83	Reinierita	(Cu, Fe, Ge, Zn) ₂ S	Seudo cúbica	36	Rosado anaranjado marrón	4,5	318-367	Anisotrópico	No	Débil	No	No actúa ningún reactivo
84	Tetraedrita	Cu ₂ SbS ₃	Cúbica	29	Bianco grisáceo con tonalidad verde olivo	3-4	328-376	Isotrópico	Algunas veces marrones (inmersión)	No	No	HNO ₃ - anillo oscuro KCN - algunas veces se oscurece
85	Tennantita	Cu ₃ AsS ₃	Cúbica	29	Bianco grisáceo con tonalidad verdosa	3,5-4,5	308-397	Isotrópico	Rojo marrones (método (inmersión))	No	No	HNO ₃ - anillo oscuro KCN - algunas veces se oscurece
86	Sulvanita	Cu ₃ V ₄ S ₄	Cúbica	28	Bianco amarilloso	3,5	157-161	Isotrópico	No	No	No	HNO ₃ , HCl - amarillo oscuro KCN - algunas veces se oscurece
87	Cuprita (*) (29)	Cu ₂ O	Cúbica	27	Bianco grisáceo con tonalidad azulosa	3-4	192-218	Isotrópico Débilmente anisotrópico	Rojos (visibles)	No	No	HNO ₃ - ebulle, precipitado anillo oscuro HCl - se oscurece, precipitado KCN, FeCl ₃ - se oscurece, estructura

272

TABLA 20.1 Continuación

No	Minerales	Fórmula química	Singonía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
88	Luzanita	Cu ₃ AsS ₄	Tetrag.	27-22	Marrón con tonalidad rosácea	3-4	257-412	Muy anisotrópico	No	Intenso	No	HNO ₃ - oscurece lentamente KCN, HgCl ₂ - oscurece, estructura
89	Enargita (*) (31)	Cu ₃ AsS ₄	Rómbica	25	Bianco grisáceo con tonalidad rosada	3-3,5	205-397	Muy Anisotrópico	No	Débil	No	HNO ₃ , HgCl ₂ - algunas veces oscurece KCN - se oscurece, estructura
90	Alabandina (*) (2)	MnS	Cúb.	25	Bianco grisáceo	3,5-4	240-266	Isotrópico	Verde amarillo oscuro (inmersión)	No	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece, estructura HCl - idem
91	Tenorita (*) (60)	Cu ₂ O	Monocl.	24-20	Gris claro con tonalidad marrón	3,5	209-254	Anisotrópico	No	Evidente	No	HCl, HNO ₃ - anillo oscuro FeCl ₃ - algunas veces oscurece
92	Estannina	Cu ₂ FeSnS ₄	Tetrag.	23	Bianco grisáceo con tonalidad verdosa	3,5-4	206-307	Anisotrópico	No	Débil	No	HNO ₃ , HCl - algunas veces es iridiscente

273

TABLA 20.1 Continuación

No	Minerales	Fórmula química	Singoñía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
93	Hidrohematita	Fe ₂ O ₃ nH ₂ O	Colomor	22	Blanco grisáceo con tonalidad azul	4,5	No hay datos	Isotrópico	Rojos (inmersión visibles)	No	No	No actúa ningún reactivo
94	Germanita	Cu ₃ (Fe, Ge)S ₄	Cub.	22	Rosado crema	3-4	412-458	Isotrópico	No	No	No	No actúa ningún reactivo
95	Lepidocrocita	FeO OH	Rómbica	20-10	Blanco grisáceo	4-5	690-803	Muy anisotrópico	Pardos amarillo (inmersión)	Intenso	No	No actúa ningún reactivo
96	Greenockita	CdS	Hexag.	19	Gris claro con tonalidad azul	3,5	52-91	Isotrópico	amarillo limón pardos visibles)	No	No	NHN ₃ - se oscurece, estructura
97	Maghemita	Fe ₂ O ₃	Cub.	18	Blanco grisáceo con tonalidad azul	5	357-387	Isotrópico	Pardo rojizo (inmersión)	No	Muy magnético	No actúa ningún reactivo

274

TABLA 20.1 Continuación

No	Minerales	Fórmula química	Singoñía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
98	Managanita	Mn O (OH)	Monocl.	17	Gris claro con tonalidad parduzca	4	367-459	Muy anisotrópico	Pardo rojizo (inmersión visible)	Evidente	No	No actúa ningún reactivo
99	Esfalerita (*) (33)	Zn S	Cúbico	17	Gris claro	3,0-4,0	128-276	Isotrópico	Amarillo rojo pardo (visibles)	No	No	HNO ₃ - algunas veces oscurece
100	Hidrogocita	Fe O OH H ₂ O	Rómbica	17	Gris claro con tonalidades azulosa	4,5	300-340	Isotrópico Débilmente anisotrópico	Desde amarillo hasta pardo (visibles)	No	No	No actúa ningún reactivo
101	Murtzita	Zn S	Hexagonal	17	Gris blan-cuzo	3,5-4	159-274	Anisotrópico	amarillo hasta pardo rojizo (visibles)	No	No	HNO ₃ - algunas veces se oscurece

275

TABLA 20.1 Continuación

No	Minerales	Fórmula química	Singonía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
102	Cincita (*) (22)	Zn O	Hexg.	12	Gris con tonalidad amarillosa	4,5	150-318	Débilmente anisotrópico	Amarillo hasta rojos brillante (visibles)	No	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece., HCl - ebulle, precipitado FeCl ₃ , HgCl - estructura
103	Cerusita	Pb CO ₃	Rómbica	12-8	Gris	3-3,5	200	Muy anisotrópico	Incolores, pardos amarillos	Intenso	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece HCl - ebulle, precipitado FeCl ₃ , HgCl ₂ - estructura
104	Powellita	Ca Mo O ₄	Tetrag.	11	Gris	3-4	200-300	Débilmente anisotrópico	Incolores amarillo (visibles)	No	No	HNO ₃ , HCl - se oscurece
105	Sheelita (*) (59)	CaWO ₄	Tetrag.	10	Gris	4,5	392-414	Anisotrópico	Incolores, amarillo (visibles)	No	No	HNO ₃ - HCl - precipitado amarillo
106	Malaquita (*) (45)	CuCO ₃ Cu(OH) ₂	Monocl.	10-6	Gris con tonalidad rosácea	3,5-5	124-156	Anisotrópico	verde intenso (visibles)	Intenso	No	HNO ₃ , HCl - ebulle, se oscurece, estructura KCN - estructura FeCl ₃ - ebulle, precipitado KOH - precipitado azul

276

TABLA 20.1 Continuación

No	Minerales	Fórmula química	Singonía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
107	Siderita	Fe CO ₃	Trig.	10-6	Gris hasta gris oscuro	3,5-4	200-397	Muy anisotrópico	Incolores, amarillos-pardos (visibles)	Intenso	No	HNO ₃ , HCl - ebulle, se oscurece, iridiscente, estructura
108	Azurita (*) (8)	C ₂ (CO ₃). (OH) ₂	Monocl.	9	Gris con tonalidad débilmente rosácea	3,5-4	120-200	Anisotrópico	Azules brillante (visibles)	Débil	No	HNO ₃ , HCl - ebulle, se oscurece estructura FeCl ₃ , KOH - estructura
109	Esterocobaltina	Co CO ₃	Trig.	9	Gris	3-4	No hay datos	Anisotrópico	Rosado amarillo rosáceo (visibles)	No	No	HNO ₃ , HCl - ebulle, se oscurece
110	Plumbojarosita	Pb Fe ₈ (SO ₄) ₄ (OH) ₁₂	Trig. Amorfa	8	Gris hasta gris oscuro	2,5-4,5	110-210	Anisotrópico	Amarillos, amarillos-marrones (visibles)	No	No	HNO ₃ , HCl - se oscurece

277

TABLA 20.1 Continuación

No	Minerales	Fórmula química	Singonía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
111	Escorodita	Fe (As O ₃ .2H ₂ O	Rómbica	8	Gris oscuro con tonalidad azulosa	3,5-4	247-322	Débilmente anisotrópico	Incoloros amarillos verdoso	No	No	HNO ₃ , HCl - se oscurece
112	Yarosita	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	Trig.	8	Gris oscuro	2,5-4,5	110-210	Débilmente anisotrópico Isotrópico	Desde incoloros hasta pardos amarillos (visibles)	No	No	HNO ₃ , HCl - se oscurece
113	Rodocrosita	MnCO ₃	Trig.	7-4	Gris oscuro	3,5	238-367	Anisotrópico	Incoloros rosados, marrones rosáceos (visibles)	Intenso	No	HNO ₃ , HCl - ebulle, se oscurece FeCl ₃ - es iridiscente
114	Barita	BaSO ₄	Rómbica	6	Gris oscuro	3-3,5	127-232	Isotrópico	Incoloros (visibles)	No	No	No actúa ningún reactivo
115	Criscola	CuSuO ₅ .nH ₂ O	Cripcocrystal	4	Gris oscuro	2-4	82-119	Isotrópico	Verde claro, azules (visibles)	No	No	HNO ₃ , HCl - se oscurece
116	Fluorita	Ca F ₂	Cub.	3	Gris claro	4	170-200	Isotrópico	Incoloros, (visibles)	No	No	No actúa ningún reactivo

278

Grupo III. Minerales de dureza alta

No	Minerales	Fórmula química	Singonía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
117	Iridio ósmico	IrOs	Hexag.	68	Blanco	6-7	550-645	Débilmente anisotrópico	No	No	No	No actúa ningún reactivo
118	Skutterudita	Co As ₃	Cúbica	60	Blanco con tonalidad crema	5,5-6	589-724	Isotrópico	No	No	No	HNO ₃ - oscurece, lentamente estructura
119	Rammelsbergita	N As ₂	Rómbica	60	Blanco blanco, crema	5,5-6	556-629	Anisotrópico	No	Débil	No	HNO ₃ - se oscurece, estructura FeCl ₃ - estructura
120	Maucherita	Ni ₁₁ As ₈ (Ni ₁₁ As) ₈	Tetrag.	59	Blanco con tonalidad rosada	5-5,5	685-724	Anisotrópico	No	No	No	HNO ₃ - se oscurece, estructura HgCl ₂ , FeCl ₃ - algunas veces se oscurece
121	Galucodota	(Co, Fe) AsS	Rómbica	57	Blanco con tonalidad rosada	5,5-6	841-978	Débilmente Anisotrópico	No	No	No	HNO ₃ - oscurece lentamente
122	Cloantita (*) (34)	(Ni, Co) As _{3-x}	Cúbica	57	Blanco	5-5,5	268-402	Isotrópico	No	No	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece, estructura FeCl ₃ - se oscurece, estructura HgCl ₂ - es iridiscente

279

TABLA 20.1 Continuación

No	Minerales	Fórmula química	Singoñía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
123	Esmaltita (*) (34)	Co As ₂	Cúbica	56	Blanco con tonalidad crema	5,5-6	616-729	Isotrópico	No	No	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece FeCl ₃ - se oscurece, estructura HgCl ₂ - se oscurece lentamente
124	Niquelina (*) (49)	NiAs	Hexag.	56-53	Rosado amarillizo	5-5,5	308-533	Muy anisotrópico	No	Muy débil	No	HNO ₃ - ebulle, pierde el brillo, anillo FeCl ₃ , HgCl ₂ - se oscurece
125	Espiriritita	Pt As ₂	Cúbica	55	Blanco	6-7	645-783	Isotrópico	No	No	No	HCl - se torna amarillo lentamente
126	Arsenopirita (*) (7)	FeAs ₂ S	Monocl.	54	Blanco con tonalidad amarillizo rosáceo	5,5-6	715-1354	Anisotrópico	No	Débil	No	HNO ₃ - iridiscente, se oscurece, algunas veces ebulle, estructura
127	Leollingita (*) (43)	Fe As ₂	Rómbica	54	Blanco con tonalidad crema	5-5,5	635-741	Anisotrópico	No	Débil	No	HNO ₃ - se torna amarillo HgCl ₂ - algunas veces se oscurece
128	Marcasita (*) (46)	Fe S ₂	Rómbica	54	Blanco amarillizo amarillo claro	6-6,5	824-1119	Anisotrópico	No	Débil	No	HNO ₃ - algunas veces ebulle se oscurece débilmente

280

TABLA 20.1 Continuación

No	Minerales	Fórmula química	Singoñía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
129	Pirita (*) (53)	FeS ₂	Cúbica	53	Amarillo claro	6-6,5	1144-1374	Isotrópico	No	No	No	HNO ₃ - algunas veces se oscurece débilmente, ebulle
130	Cobaltina (*) (23)	CoAs	Cúbica	52	Blanco rosáceo	5,0-6	948-1079	Isotrópico débilmente anisotrópico	No	No	No	HNO ₃ - algunas veces oscurece
131	Gersdorffita	Ni As S	Cúbica	50	Blanco con tonalidad rosácea	5,5,5	520-688	Isotrópico	No	No	No	HNO ₃ - se oscurece FeCl ₃ , HgCl ₂ - se oscurece débilmente
132	Brithauptita (*) (15)	Ni Sb	Hexag.	50	Rosado con tonalidad violeta	5,5	412-584	Muy anisotrópico	No	Intenso	No	HNO ₃ - se oscurece, es iridiscente FeCl ₃ - iridiscente HgCl ₂ - algunas veces se oscurece
133	Uimanita	NiSb S	Cúbica	47	Blanco con tonalidad crema pálida	5-5,5	498-542	Isotrópico	No	No	No	HNO ₃ , FeCl ₃ - se oscurece
134	Linneita (*) (42)	Co ₃ S ₄	Cúbica	46	Blanco crema	5-5,5	508-554	Isotrópico	No	No	No	HNO ₃ - se oscurece, algunas veces ebulle, anillo oscuro HgCl ₂ - se oscurece, es iridiscente, estructura

281

TABLA 20.1 Continuación

Minerales	Fórmula química	Singoñía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico	
					Escala de Mohs	kg/mm ²						
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
135	Carrollita	CuCo ₂ S ₄	Cúbica	46	Blanco crema	5,5	351-566	Isotrópico	No	No	No	HNO ₃ - anillo oscuro HgCl ₂ - oscurece
136	Sigenita	(Co, Ni) ₃ S ₄	Cúbica	46	Blanco crema	5,5	503-553	Isotrópico	No	No	No	HNO ₃ - algunas veces oscurece HgCl ₂ - algunas veces oscurece
137	Polidimita	Ni ₃ S ₄	Cúbica	46	Amarillo rosáceo	4,5-5,5	362-449	Isotrópico	No	No	No	HNO ₃ - ebulle, se oscurece, es iridiscente, estructura
138	Corinita	(Ni, As, Sb)S	Cúbica	45	Bianco	5-5,5	No hay datos	Isotrópico	No	No	No	HNO ₃ - iridiscente, anillo FeCl ₃ - algunas veces oscurece
139	Bravoita	(Ni, Fe, Co)S ₂	Cúbica	45	Bianco con tonalidad violeta marrón	4-6	668-861	Isotrópico	No	No	No	HNO ₃ - oscurece, algunas veces ebulle, estructura
140	Pirolusita	MnO ₂	Tetrag.	35	Bianco grisáceo con tonalidad parduzca	4-6,5	503-627	Muy anisotrópico	No pardo (inmersión)	Evidente	No	HNO ₃ - anillo oscuro FeCl ₃ , KCN - se oscurece

282

TABLA 20.1 Continuación

Minerales	Fórmula química	Singoñía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico	
					Escala de Mohs	kg/mm ²						
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
141	Psilomelano	nMn ₂ O ₃ . MnO ₂ . mH ₂ O	Monocl. criptocristalina	35-30	Bianco grisáceo	1-6	503-627	Anisotrópico Isotrópico	Algunas veces pardos (inmersión)	Débil No	No	HNO ₃ - algunas veces oscurece HCl - se oscurece lentamente
142	Hematita (*) (38)	Fe ₂ O ₃	Trig.	25	Bianco grisáceo	5,5-6,0	920-1062	Anisotrópico	Rojos oscuros (inmersión)	No	No	No actúa ningún reactivo
143	Rutilo (*) (57)	TiO ₂	Tetrag.	22	Bianco grisáceo	6,0	1074-1210	Anisotrópico	Incoloros, amarillos raramente rojo pardo, (verdoso)	Débil	No	No actúa ningún reactivo
144	Magnetita (*) (44)	Fe ₃ O ₄	Cúbica	21	Gris claro con tonalidad parda	5,5-6,0	535-695	Isotrópico	No	No	Muy magnético	HCl - Algunas veces oscurece, estructura

283

TABLA 20.1 Continuación

No	Minerales	Fórmula química	Singonía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
145	Hausmanita	Mn ₃ O ₄	Trig.	20	Gris claro tonalidad azul	5-5,5	541-613	Anisotrópico	Rojo pardo (inmersión)	Evidente	No	HNO ₃ - anillo oscuro HCl - algunas veces oscurece
146	Jakobsita	Mn O. (Fe Mn) ₂ O ₃	Cúbico	19	Gris claro tonalidad verdosa	6	724-745	Isotrópico	Marrones visibles	No	Débilmente magnético	No actúa ningún reactivo
147	Braunita (*) (14)	Mn ₂ O ₃ ·SiO ₃ Mn	Tetrag.	19	Gris claro tonalidad marrón	6-6,5	689-766	Débilmente anisotrópico	Pardos oscuros (inmersión)	No	No	No actúa ningún reactivo
148	Columbitantalita (*) (25)	(Fe, Mn) (Ta, Nb) ₂ O ₆	Rómbica	19	Gris claro tonalidad marrón	6,0	727-1021	Anisotrópico	Paramente rojo claro, pardo amarilloso (inmersión)	No	No	No actúa ningún reactivo
149	Ilmenita (*) (40)	FeTiO ₃	Trig.	18	Gris claro con tonalidad parduzca	5-6	593-734	Anisotrópico	Paramente pardo oscuro (inmersión)	Débil	No	No actúa ningún reactivo

284

TABLA 20.1 Continuación

No	Minerales	Fórmula química	Singonía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
150	Ilmenorutilo	Ti (Nb, Ta, Fe) O ₂	Tetrag.	18	Gris claro con tonalidad rosado parduzca	6-7	800-1100	Muy anisotrópico débilmente anisotrópico	Pardo oscuro (inmersión)	Débil	No	No actúa ningún reactivo
151	Gohetita	FeO (OH)	Rómbica	17	Gris claro con tonalidad azul	5-5,5	525-620	Isotrópico	Pardo amarillento rojo parduzco visibles	Débil intenso	No	No actúa ningún reactivo
152	Wolframita (*) (61)	(Fe, Mn) WO ₄	Monocl.	17	Gris	4,5-5,5	398-593	Anisotrópico	Rojos marrones pálido visibles (inmersión)	No	Débilmente magnético	No actúa ningún reactivo
153	Ferberita (*) (35)	FeWO ₄	Monocl.	17	Gris	5-5,5	322-412	Anisotrópico	No	No	Débilmente magnético	No actúa ningún reactivo
154	Hubnerita	MnWO ₄	Monocl.	16	Gris	5-5,5	No hay datos	Anisotrópico	No	No	Débilmente magnético	No actúa ningún reactivo
155	Frankinita	(Zn, Fe, Mn) O. Fe ₂ O ₃	Rómbica	16	Gris con tonalidad parduzca	5,5-6,5	753-794	Isotrópico	Rojo oscuro inmersión	No	Débilmente magnético	HCl - anillo oscuro

285

TABLA 20.1 Continuación

No	Minerales	Fórmula química	Singonía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
156	Perovskita	CaTiO ₃	Cúbica Monocl.	15	Gris hasta azul en inmersión	5,5	925-1050	Isotrópico	Incoloros, raramente pardos amarillos visibles	No	No	No actúa ningún reactivo
157	Uraminita	(U, Th) O ₂	Rómbica	14	Gris con tonalidad parduzca	6-7	782-839	Isotrópico	No	No	No	HNO ₃ , FeCl ₃ - oscurece lentamente
158	Nasturano	UO ₂	Cúbica	14	Gris algunas veces con tonos pardos	4-6	471-724	Isotrópico	No. Algunas veces pardos verdes (inmersión)	No	No	HNO ₃ , HCl, FeCl ₃ - oscurece

286

TABLA 20.1 Continuación

No	Minerales	Fórmula química	Singonía	R(%)	Color	DUREZA		Anisotropía	Reflejos internos	Birreflexión	Magnetismo	Ataque químico
						Escala de Mohs	kg/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
159	Crominita (*) (27)	(Fe, Mg) (Fe, Al, Cr) ₂ O ₄	Cúbica	14	Gris	6-7,5	1036-2000	Isotrópico	Pardo rojizo oscuro (inmersión)	No	Algunas veces poco magnético	No actúa ningún reactivo
160	Casiterita (*) (20)	SnO ₂	Tetrag.	11	Gris hasta gris oscuro	6,0-7	1008-1228	Anisotrópico	Incoloro amarillito parduzco visibles	Débil	No	No actúa ningún reactivo
161	Smithsonita	ZnCO ₃	Trig.	9	Gris oscuro	4,5-5,5	409-420	Anisotrópico	Incoloro parduzco verdoso visibles	Débil	No	HNO ₃ , HCl - ebulle, estructura KCN - estructura HgCl ₂ - oscurece
162	Calamina	Zn ₄ Si ₂ O ₇ ·(OH) ₂ ·H ₂ O	Rómbica	5	Gris oscuro	4,5-5,5	350-550	Débilmente anisotrópico	Transparente como el agua visibles	No	No	HNO ₃ , HCl - iridiscente
163	Cuarzo	Si O ₂	Trig.	4	Gris oscuro	7	1023-1236	Débilmente anisotrópico	Incoloros Transparente	No	No	No Actúa ningún reactivo

287

BIBLIOGRAFIA

1. BATEMAN, A.: *The Formation of Mineral Deposits*, John Wille and Sons, Inc., New York-London-Sydney, 1951.
2. BRIAN, J. S. Editor. *Economic Geology. Seventy-Fifth Anniversary Volume*, 1980.
3. CAMERON, I.: *Ore Microscopy*. John Wille and Sons, Inc New York, 1966.
4. FERRIZ, O.: *Apuntes de minerografía*. Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 1975.
5. RAMDOHR, P.: *The Ore Minerals and their Intergrowth* vol. I y II. Pergamon Press, 1989.
6. SMIRNOV, V. I.: *Geología de yacimientos minerales*. Ed. MIR, Moscú.
7. UYTENBOGAARD, W. and E. A. J. BURKE: *Tables for microscopic identification of ore Minerals*, Elsevier, Amsterdam, 1988.
8. VALIUSKI, I. S.: *Determinación de los minerales meníferos bajo el microscopio*, Editorial Nedra. Moscú, 1987.
9. YUSHKO, S.: *A. Métodos de investigación de las menas en el laboratorio*, Nedra, Moscú.
10. ZUSSMAN, J.: *Physical Methods in Determinative Mineralogy*. Academic Press, London and New York, 1984.