

Relaciones de Fase y Variaciones Composicionales en los Arseniuros del Yacimiento de Aït Ahmane (Marruecos)

/ ELENA LASOBRAS (1,*), ISABEL FANLO (1), IGNACIO SUBÍAS (1), FERNANDO GERVILLA (2)

(1) Dpto. de Ciencias de la Tierra. Ciudad Universitaria. Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna 12. 50009, Zaragoza (España)

(2) Dpto. de Mineralogía y Petrología. Facultad de Ciencias, C.S.I.C.- Universidad de Granada. Avd. Fuentenueva s/n, 18002, Granada(España)

INTRODUCCIÓN

El distrito minero de Bou Azzer, en la parte central del Anti-Atlas (Marruecos), es un importante productor de Co, con más de 60 depósitos, algunos de ellos todavía en explotación. Los estudios realizados en algunos de estos yacimientos (Leblanc, 1975, 1986; Colas et al 2010, entre otros) han sugerido una secuencia paragenética general, temperaturas de formación y posible edad de las mineralizaciones. Sin embargo, las asociaciones de arseniuros y sulfoarseniuros de Co-Ni-Fe presentes son complejas, y en ocasiones las soluciones sólidas no están bien definidas. Este hecho, junto a la presencia de claras evidencias de procesos de equilibrio, ponen de manifiesto la necesidad de nuevos estudios texturales y microanalíticos de detalle para establecer correctamente las paragénesis y las relaciones de fase en este grupo de minerales.

El estudio del yacimiento de Aït Ahmane, (junto con el de Tamdrost, en este mismo volumen), pretende reconocer los procesos que han experimentado las diferentes fases, y cómo han influido en sus composiciones actuales. Los resultados obtenidos redefinen la extensión de las soluciones sólidas propuestas con anterioridad para los arseniuros de este distrito.

CONTEXTO GEOLÓGICO.

El yacimiento de Aït Ahmane se localiza en el extremo más oriental del distrito minero de Bou Azzer. Todos los yacimientos están espacialmente asociados al complejo ofiolítico de Bou Azzer, que forma un cinturón de unos 60 km de longitud, a lo largo de la falla Anti-Atlas Central. Las rocas ofiolíticas totalmente serpentinizadas, representan porciones de rocas máficas y ultramáficas obducidas durante el

principal evento de deformación Panafricano (600-700 Ma). Leblanc (1975) describió el yacimiento de Aït Ahmane como bolsadas en contacto con la serpentinita, limitadas por fallas y brechificadas. Estas bolsadas variaban entre 10 y 150 m de potencia. La ganga es fundamentalmente calcítica.

MINERALOGÍA, TEXTURAS Y QUIMISMO MINERAL

Las principales asociaciones minerales de Aït Ahmane (Fig. 1) están constituidas por sulfoarseniuros, arseniuros, diarseniuros y triarseniuros de Co-Ni-Fe, junto con fases minoritarias de Bi, Cu y Ag. Se han identificado 3 estadios de mineralización. En el estadio I correspondiente a la etapa de mayor temperatura, precipitó skutterudita (Sk I), seguida por fases de la solución sólida rammelsbergita-safflorita-lollingita (RSL), miembros de la solución sólida cobaltita-gersdorffita (CG) y calcita. Durante el estadio II se produjo la precipitación de niquelita minoritaria, junto con skutterudita (Sk II) y dolomita. El estadio III comenzó con la precipitación de cristales zonados de safflorita-lollingita (SL), seguidos por arsenopirita (Apy), alloclasita (All), una nueva generación de skutterudita (Sk III) y, finalmente, lollingita (Lo).

La Sk I es una fase minoritaria ya que ha sido reabsorbida en su mayor parte por la Sk II. Se presenta como cristales idiomorfos finamente zonados con altos contenidos en S y muy bajos en Ni y Fe: $(\text{Co}_{0,86-0,92} \text{Ni}_{0,03-0,08} \text{Fe}_{0,06-0,14}) \text{As}_{2,77-2,90} \text{S}_{0,08-0,22}$. Se encuentra parcialmente reemplazada por pequeñas masas de agregados de cristales de RSL (fig. 1A), los cuales muestran signos de disolución y exhiben una gran porosidad. Sus composiciones son $(\text{Fe}_{0,21-0,60} \text{Co}_{0,16-0,50} \text{Ni}_{0,22-0,38}) \text{As}_{1,79-2,01} \text{S}_{0-0,18}$. Estos cristales han sido parcialmente englobados por calcita. En el contacto

entre estas fases y la Sk II crecieron pequeños cristales idiomorfos de CG $(\text{Co}_{0,42-0,51} \text{Ni}_{0,40-0,53} \text{Fe}_{0-0,1}) \text{As}_{1,17-1,26} \text{S}_{0,73-0,84}$.

En ocasiones, estas masas de RSL han quedado "atrapadas" en bandas de crecimiento de la Sk II. La composición de esta Sk difiere claramente de la Sk I al tener proporciones menores de S y contenidos mucho más altos en Fe y Ni: $(\text{Co}_{0,51-0,81} \text{Fe}_{0,08-0,28} \text{Ni}_{0,06-0,25}) \text{As}_{2,88-3,00} \text{S}_{0-0,11}$. Dentro de la Sk II se observan pequeños restos de diarseniuros que no han sido totalmente reabsorbidos (fig. 1B). En estos casos muestran composiciones de RSL, de safflorita (Saf) $(\text{Co}_{0,87-0,93} \text{Fe}_{0,08-0,14}) \text{As}_{1,81-1,97} \text{S}_{0,02-0,16}$ y de rammelsbergita-lollingita (RL): $(\text{Fe}_{0,58-0,84} \text{Ni}_{0,12-0,37} \text{Co}_{0,06-0,16}) \text{As}_{1,93-1,97} \text{S}_{0,02-0,04}$.

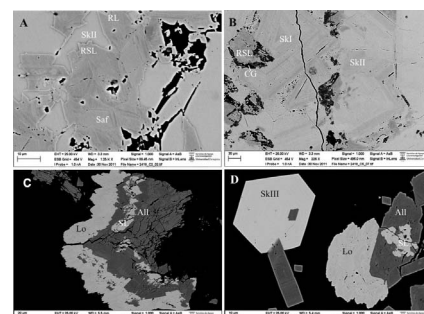


fig 1. Imágenes SEM-BSE de las asociaciones presentes en Aït Ahmane. a) skutterudita I reemplazada por cristales RSL y englobados ambos por skutterudita II. b) restos de diarseniuros (RSL, Saf y RL) parcialmente reabsorbidos por Sk II. c) All reemplazando cristales de SL y rodeada por cristales husiformes de la última Lo. d) Sk III englobando All, que a su vez reemplaza cristales de SL y está rodeada por la última fase de Lo.

El estadio III comenzó con la precipitación de cristales husiformes de la serie SL, con fuertes oscilaciones en los contenidos en Co y Fe. Esta fase presenta evidencias de disolución preferencial de las bandas con composición Lo. Las bandas de safflorita tienen la composición

palabras clave: Arseniuros, Reequilibrio Mineral, Aït Ahmane.

key words: Arsenides, Mineral Reequilibration, Aït Ahmane.

($\text{Co}_{0,78-0,95}\text{Fe}_{0,06-0,20}\text{As}_{1,63-1,88}\text{S}_{0,12-0,37}$ y los escasos restos de Lo: ($\text{Fe}_{0,87-0,94}\text{Co}_{0,08-0,14}\text{As}_{1,88-1,97}\text{S}_{0,02-0,10}$). Esta fase fue seguida por la precipitación de cristales idiomorfos de Apy ($\text{Fe}_{0,91-1,02}\text{Co}_{0-0,10}\text{As}_{0,98-1,08}\text{S}_{0,91-1,02}$) y All ($\text{Co}_{0,67-0,98}\text{Ni}_{0-0,27}\text{Fe}_{0,02-0,12}\text{As}_{0,92-1,04}\text{S}_{0,94-1,07}$), la cual presenta una fuerte zonación y maclado, con zonas muy enriquecidas en Ni. La alloclasita engloba pequeños restos de Sk II, safflorita y SL (fig. 1C). Seguidamente precipitó una nueva generación de skutterudita (Sk III, fig. 1D) en forma de cristales idiomorfos y zonados, debido a pequeñas variaciones en el contenido en S. Composicionalmente se caracteriza por presentar contenidos variables en Fe y casi nulos en Ni: $\text{Co}_{0,72-0,96}\text{Fe}_{0,03-0,28}\text{Ni}_{0-0,06}\text{As}_{2,68-2,90}\text{S}_{0,11-0,30}$. Finalmente, precipitó Lo en forma de masas arborescentes o cristales husiformes, englobando a las fases anteriores ($\text{Fe}_{0,85-1,03}\text{Co}_{0-0,16}\text{As}_{1,75-1,99}\text{S}_{0-0,24}$.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las texturas y las tendencias composicionales exhibidas por las diferentes fases evidencian una clara relación entre las asociaciones minerales de cada estadio y los procesos de desequilibrio y reequilibrio a más bajas temperaturas, debido a la entrada de nuevos fluidos.

Tal y como se muestra en la Fig. 2A, las composiciones de la Sk I son acordes con los campos experimentales a 650 °C de Hem y Makovicky (2004). En cambio, los análisis más ricos en Ni y Fe de la Sk II podrían explicarse por la disolución de las fases RSL pre-existentes y asimilación del Fe y Ni, a medida que ésta las va reemplazando. Coetáneamente, la porosidad creada en los cristales de RSL conforme se van disolviendo, favorecería la circulación de fluidos de más bajas temperaturas, lo que daría lugar a la formación de fases más estables a éstas, con composiciones de safflorita y RL (Fig. 2B). Los cristales de Sk II más próximos a los cristales de RSL muestran los contenidos más altos en Fe y Ni.

Por su parte, la Sk III muestra composiciones enriquecidas en Fe y desprovistas de Ni (Fig. 2A), fuera de los campos experimentales de Roseboom (1962) y Hem y Makovicky (2004). Sus altos contenidos en S (hasta un 4%) indicarían un medio rico en este elemento, aspecto no contemplando por los anteriores autores. Los cristales de

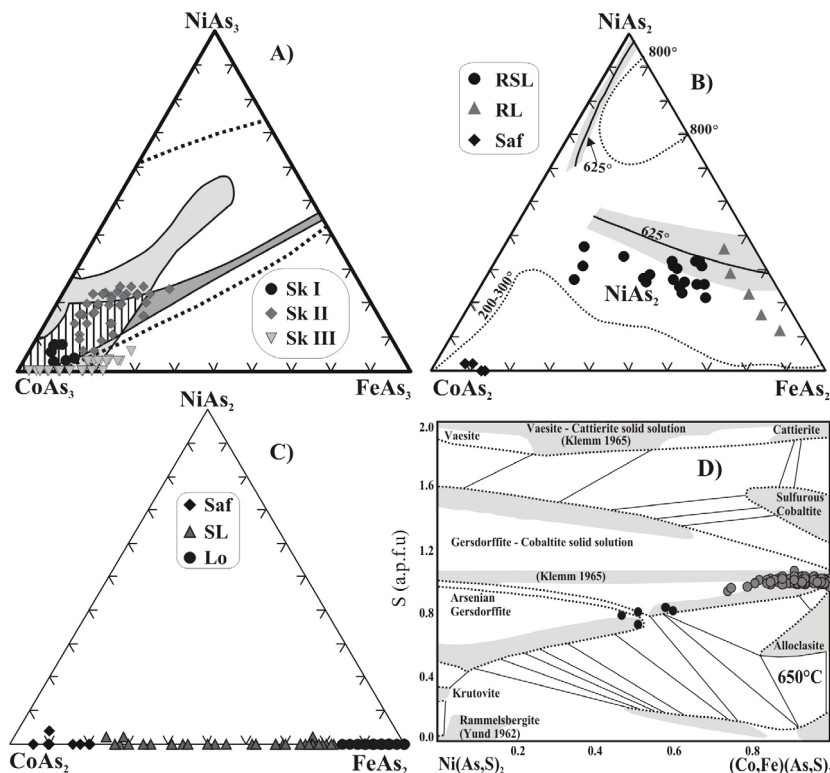


fig. 2: Composición química de las diferentes fases presentes en el yacimiento de Ait Ahmane. A) composiciones de skutterudita. Compilación de datos de skutteruditas naturales (campo gris claro) y experimentales (gris oscuro) a 650°C (Hem y Makovicky, 2004). El área entre las líneas punteadas representa el campo de solución sólida obtenido por Roseboom (1962). B) Diarseniuros del estadio I (RSL) y sus productos de descomposición. Campos solvus a diferentes temperaturas tomados de Roseboom (1963, líneas punteadas) y Gervilla & Ronsbo (1992, área sombreada) C) Diarseniuros de Co-Fe del estadio III. D) sulfarseniuros del estadio I (CG, círculos negros) y estadio III (All, círculos grises). Se han representado las relaciones de fase en el binario Ni(As,S)₂-Co(As,S)₂ a 650°C de Hem (2006) para su comparación.)

SL de este estadio (Fig. 1C), exhiben una solución sólida completa entre los miembros extremos safflorita-lollingita. Sin embargo, teniendo en cuenta los procesos de disolución preferencial que muestran estos cristales, y que la All ha reemplazado gran parte de ellos, dejando pequeñas masas con composiciones mixtas, se puede invocar a procesos de desequilibrio que favorecerían la disolución de Lo y precipitación como fases de tipo SL, con altos contenidos también en S (hasta un 5%). Los restos de safflorita también presentan altos contenidos en S (hasta un 6,5%).

Finalmente, los altos y anómalos contenidos en Ni de la All (Fig. 2D) podrían derivarse de la asimilación parcial de cristales de Sk II, los cuales presentan contenidos muy bajos en Ni en contacto con aquella.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución al proyecto CGL2010-15171

REFERENCIAS

Colás, V., Fanlo, I., Gervilla, F. & Subías, I. (2010): Tendencias composicionales de los arseniuros de Co-Ni-Fe del yacimiento de Aghbar (distrito de Bou-Azzer, Marruecos). *Macla*; **13**, 65-66.
 Gervilla, F. & Ronsbo, J. (1992): New data on (Ni,Fe,Co) diarsenides and sulfarsenides in chromite-nicolite ores from Malaga Province, Spain. *Neues Jahrb. Mineral.*, **13**, 193-206.
 Hem, S. (2006): Solid solution in the Fe-Co-Ni-As-S system. *Chem. Geol.*, **225**, 291-303.
 — & Makovicky, E. (2004): The system Fe-Co-Ni-As-S. II Phase relations in the (Fe,Co,Ni)As_{1.5}S_{0.5} section at 650°C and 500°C. *Can. Min.*, **42**, 63-86.
 Leblanc, M. (1975): Ophiolites précambriennes et gîtes arseniés de cobalt: Bou Azzer (Maroc): Thèse Doct. Etat, Univ. Paris VI, 329 p.
 — (1986): Co-Ni arsenide deposits, with accessory gold, in ultramafic rocks from Morocco. *Can. J. Earth Sc.*, **23**, 592-602.
 Roseboom, E.H. (1962): Sutterudites (Co,Ni,Fe)As_{3-x}: composition and cell dimensions. *Am. Mineral.*, **47**, 310-327.
 — (1963): Co-Fe-Ni diarsenides: compositions and cell dimensions. *Am. Mineral.* **48**, 271-299