Classe dos sulfetos e sulfossais

Para o estudo sistemático de amostras macroscópicas de minerais desta classe você vai precisar ter sempre à mão (e usar) os seguintes equipamentos:

- Lupa
- Imã
- Placa de porcelana
- Canivete

A coleção macroscópica de mineralogia contém em torno de 100 amostras da classe dos sulfetos. Observe essas amostras atentamente, com base nas propriedades físicas listadas abaixo para cada mineral e tente identificá-los. Fique bem atento(a) às associações mineralógicas, a ocorrência de uma série de minerais associados deve facilitar a identificação dos mesmos.

A classe dos sulfetos é muito importante porque inclui grande número de minerais de minério. A fórmula geral dos sulfetos pode ser expressa como X_mZ_n , na qual o X representa o elemento metálico e o Z o elemento não metálico. Seguindo a orientação de Klein & Hurlbut os minerais listados abaixo estão organizados em ordem decrescente da razão X:Z.

1. Calcocita – Cu_2S

Dados cristalográficos: Monoclínico, pseudo-ortorrômbico, $2/m$ ou m (abaixo de 105 °C); hexagonal (acima de 105 °C).

Hábito: cristais são incomuns, geralmente pequenos e tabulares com formas hexagonais. Mais comumente maciço e de granulação fina.

Propriedades físicas:

Clivagem: {110} pobre

Dureza: 2,5-3,0

Peso específico: 5.5 – 5.8

Brilho: metálico

Cor: cinza chumbo brilhante, oxida facilmente desenvolvendo coloração preta sem brilho.

Traço: preto acinzentado

Composição: Cu 79,8% e S 20,2%. Pode conter pequenas quantidades de Ag e Fe

2. Bornita – Cu_5FeS_4

Dados cristalográficos: tetragonal, $\bar{4}2m$ (abaixo de 228 °C), isométrico $4/m\bar{3}2/m$ (acima de 228 °C).

Hábito: A mais comum forma do mineral é tetragonal. Cristais octaédricos, dodecaédricos e pseudo-cúbicos são raros. Geralmente maciço

Propriedades físicas:

Dureza: 3

Peso específico: 5,06 – 5,08

Brilho: metálico

Cor: bronze amarronzado em superfície fresca, mas oxida rapidamente para tons azuis e roxos e finalmente para preto.

Traço: preto acinzentado.

Composição e estrutura: Cu 63,3%, Fe 11,2% e S 25,5% para Cu_5FeS_4 estequiométrico, mas extensa solução sólida no sistema Cu-Fe-S ocorre. A estrutura de alta temperatura é relativamente complexa, com átomos de enxofre ocupando os vértices e centros de faces de um arranjo cúbico do tipo F, os átomos de Cu e Fe estão então tetraédricamente coordenados ou S. A estrutura de baixa T é derivada da estrutura de alta T apenas apresentando uma série de defeitos.

Alteração: altera facilmente para covelita e calcocita.

3. Galena – PbS

Dados cristalográficos: isométrico, $4/m\bar{3}2/m$

Hábito: geralmente em cubos, algumas vezes truncados por octaedros. Dodecaedros e trioctaedros são raros.

Propriedades físicas:

Clivagem: {001} perfeita

Dureza: 2,5

Peso específico: 7,4 – 7,6

Brilho: metálico

Cor: cinza chumbo

Traço: cinza chumbo

Composição e estrutura: Pb 86,6% e S 13,4%. Ag está normalmente presente em solução sólida ou como inclusões de minerais de prata, tais como acantita e tetraedrita. Inclusões devem também ser responsáveis pelas pequenas quantidades de Zn, Cd, Sb, As e Bi presentes. Selênio pode substituir S. Galena tem a mesma estrutura do NaCl, com Pb no lugar de Na e S no lugar de Cl

Alteração: Galena oxida para anglesita (PbSO₄) e cerussita (PbCO₃)

4. Esfalerita - ZnS

Dados cristalográficos: isométrico, $\bar{4} 3 m$

Hábito: Tetraedros, dodecaedros e cubos são formas comuns, mas os cristais são freqüentemente altamente complexos, mal formados ou em agregados arredondados, mostram geminação polissintética em {111}. Geralmente encontrados em massas quebráveis, de granulação fina a grosseira. Compactos, botrioidais, criptocristalino.

Propriedades físicas:

Clivagem: {011} perfeita, mas a maioria dos cristais é muito fina para que a clivagem possa ser observada.

Dureza: 3,5 – 4,0

Peso específico: 3,9 – 4,1

Brilho: não metálico e resinoso a sub-metálico, também adamantino.

Cor: incolor quando puro, e verde quando quase puro. Geralmente amarelo, preto, marrom, ficando mais escuro com o aumento do teor de Fe. Também vermelho. Transparente a translúcido.

Traço: branco a amarelo e marrom

Composição e estrutura: Zn 67% e S 33% quando puro. Quase sempre contém Fe, sendo que a quantidade desse metal depende da temperatura e da composição química do ambiente de formação. Se Fe está em excesso (normalmente indicado pela presença de pirrotita), a quantidade de FeS na esfalerita pode atingir 50% molal. Mn e Cd ocorrem em pequenas quantidades em solução sólida. A estrutura da esfalerita é similar à estrutura do diamante, com metade dos átomos de carbono substituídos por Zn e a outra metade por S.

5. Calcopirita – CuFeS₂

Dados cristalográficos: tetragonal, $\bar{4} 2 m$

Hábito: geralmente apresenta um aspecto tetraedral com dominância do diesfenóide. Geralmente maciça.

Propriedades físicas:

Dureza: 3,5 – 4,0

Peso específico: 4,1 – 4,3

Brilho: metálico

Cor: amarelo, freqüentemente oxida apresentando uma coloração bronze ou iridescente.

Traço: preto esverdeado

Composição e estrutura: Cu 34,6 %, Fe 30,4% e S 35,0%. Desvia-se muito pouco da composição ideal CuFeS₂. Estrutura derivada da estrutura da esfalerita onde metade do Zn está substituído por Cu e a outra metade por Fe, esse efeito leva ao duplicamento da célula unitária.

Alteração: Calcopirita é a principal fonte de cobre para os minerais secundários malaquita, azurita, covelita, calcocita e cuprita. Concentração de cobre em zonas de enriquecimento supergênico são freqüentemente o resultado de tal alteração e remoção de cobre em solução com sua deposição subsequente.

6. Pirrotita – Fe_{1-x}S

Dados cristalográficos: monoclinica, 2/m para variedade de baixa temperatura, estável abaixo de 250 °C ; hexagonal 6/m 2/m 2/m para forma de alta temperatura

Hábito: Cristais hexagonais, geralmente tabulares ou piramidais indicam cristalização como polimorfo de alta temperatura.

Propriedades físicas:

Dureza: 4,0

Peso específico: 4,58 – 4,65

Brilho: metálico

Cor: bronze amarronzado

Traço: preto

Magnética, mas de variável intensidade, quanto maior o teor de ferro, menor o magnetismo.

Composição e estrutura: A maioria das pirrotitas têm deficiência em ferro em relação ao S, como indicado pela fórmula $Fe_{1-x}S$, onde x fica normalmente entre 0,0 e 0,2. Solução sólida completa entre FeS (com 50% de Fe) e pirrotita com 44,9% de Fe existe no campo de estabilidade de alta temperatura (entre 1190 °C, temperatura de fusão e 400 °C) que é caracterizado por simetria hexagonal. A mais baixa temperatura o campo de estabilidade da pirrotita é mais restrito e a variedade hexagonal única dá lugar a vários tipos hexagonais e monoclinicos. A variedade monoclinica é estável de 0°C até 254 °C, quando inverte-se para hexagonal. A estrutura da pirrotita é bastante complexa, onde os átomos de S estão arranjados em empacotamento fechado aproximadamente hexagonal.

7. Pentlandita – (Fe,Ni)₉S₈

Dados cristalográficos: isométrico, 4/m $\bar{3}$ 2/m

Hábito: Maciço, geralmente em agregados granulares com partição octaédrica.

Propriedades físicas:

Partição: {111}

Dureza: 3,5 – 4,0

Peso específico: 4,6 – 6,0

Brilho: metálico

Cor: bronze amarelado

Traço: marrom claro

Composição e estrutura: (Fe,Ni)₉S₈, geralmente a razão Fe:Ni é próxima de 1:1. Geralmente contém pequenas quantidades de Co. A estrutura da pentlandita é muito complicada, trata-se de uma estrutura cúbica de face centrada, onde os átomos metálicos estão em coordenação octaédrica e tetraédrica com S. Pura (Fe,Ni)₉S₈ sem Co é estável até 610 °C no sistema Fe-Ni-S. Pentlandita com até 40,8 % de Co é estável até 746 °C. Geralmente ocorre como lamelas de exsolução na pirrotita.

8. Covelita – CuS

Dados cristalográficos: hexagonal, 6/m 2/m 2/m.

Hábito: raramente com cristais hexagonais tabulares. Geralmente maciça recobrimdo ou disseminada com outros minerais de Cu

Propriedades físicas:

Clivagem: {0001} perfeita

Dureza: 1,5 – 2,0

Peso específico: 4,6 – 4,76

Brilho: metálico

Cor: azul indigo ou mais escura

Traço: preto a cinza chumbo

Composição e estrutura: Cu 66,4%, S 33,6%. Uma pequena quantidade de Fe pode estar presente. A estrutura da covelita é muito complexa, um tipo de átomo de Cu está tetraedricamente coordenado com S, sendo que 3 dos vértices do tetraedro formam camadas. Um segundo tipo de Cu está em coordenação trigonal com o S, dando origem a camadas planares. A excelente clivagem {0001} é paralela a essa estrutura acamadada. Covelita é estável até 507 °C.

9. Cinábrio – HgS

Dados cristalográficos: hexagonal (trigonal), 3 2 (polimorfo de baixa temperatura, estável até aproximadamente 344 °C); isométrico, $\bar{4}$ 3 m (polimorfo de alta temperatura, conhecido como meta-cinábrio).

Hábito: cristais geralmente romboédricos apresentando geminação penetrativa. Faces trapezoedrais são raras. Geralmente de granulação fina, maciço, também terroso, como incrustações e disseminações através da rocha.

Propriedades físicas:

Clivagem: {1010} perfeita

Dureza: 2,5

Peso específico: 8,10

Brilho: adamantino quando puro, até terroso quando impuro.

Cor: vermelho quando puro a vermelho amarronzado quando impuro. Transparente a translúcido

Traço: vermelho

Composição e estrutura: Hg 86,2%, S 13,8%, com pequenas variações no teor de Hg. Se e Te podem substituir S. Geralmente impuro misturado com argilas, óxido de ferro e bitume. A estrutura do cinábrio difere de todo e qualquer sulfeto, é baseada em espiral infinita de Hg-S-Hg que se estende ao longo do eixo “c” cristalográfico.

10. Realgar – AsS

Dados cristalográficos: monoclinico, 2/m

Hábito: cristais prismáticos curtos geralmente estriados. Frequentemente de granulação grosseira a fina, muitas vezes terroso e como incrustações.

Propriedades físicas:

Clivagem: {010} boa

Dureza: 1,5 – 2,0

Peso específico: 3,48

Brilho: resinoso

Cor: vermelho a laranja; transparente a translúcido

Traço: vermelho a laranja

Composição e estrutura: As 70,1, S 29,9. A estrutura do realgar é caracterizada por anéis de As₄S₄, similares aos anéis de S₈ no enxofre nativo. Cada As está ligado covalentemente a outro As e a 2 átomos de S.

11. Ouropigmento – As₂S₃

Dados cristalográficos: monoclinico, 2/m

Hábito: cristais pequenos tabulares ou prismáticos curtos.

Propriedades físicas:

Clivagem: {010} perfeita

Dureza: 1,5 – 2,0

Peso específico: 3,49

Brilho: resinoso, nacarado na face de clivagem

Cor: amarelo limão

Traço: amarelo pálido

Composição e estrutura: As 61,0%, S 39,0 %. Contém até 2,7 % de Sb. Pirâmides trigonais de As S₃ dividem vértices formando anéis de seis membros. Esses anéis estão ligados formando uma estrutura em camadas enrugadas de As₂S₃. As ligações dentro das camadas são de natureza residual. A clivagem {010} perfeita é paralela a essas camadas.

12. Estibnita – Sb₂S₃

Dados cristalográficos: ortorrômbico, 2/m 2/m 2/m

Hábito: prismático, zonas prismáticas verticalmente estriadas. Cristais frequentemente com terminações marcantes e algumas vezes curvadas ou dobradas. Grupos de cristais radiais ou em forma de lâminas com clivagem proeminente são comuns. Maciço de granulação grosseira a fina.

Propriedades físicas:

Clivagem: {010} perfeita, com estrias paralelas a {100}

Dureza: 2,0

Peso específico: 4,52 – 4,62

Brilho: metálico, brilho intenso na superfície de clivagem

Cor: preto a cinza chumbo

Traço: preto a cinza chumbo

Composição e estrutura: Sb 71,4%, S 28,6%. Podem ocorrer pequenas quantidades de Au, Ag, Fe, Pb e Cu. A estrutura da estibnita é definida por cadeias em zigzag de átomos de Sb e S que são paralelas ao eixo “c” cristalográfico. A distância entre Sb-S nas cadeias varia de 2,5 a 3,6 Å. Os prismas longos, estriados de estibnita são paralelos a esta estrutura em cadeia (//c). A clivagem {010} ocorre entre cadeias Sb-S.

13. Pirita – FeS₂

Dados cristalográficos: isométrico, 2/m $\bar{3}$.

Hábito: freqüentemente em cristais, as formas mais comuns incluem o cubo, o piritoedro e o octaedro. Também maciço, granular, reniforme, globular, estalactítico.

Propriedades físicas:

Fratura: conchoidal

Dureza: 6,0 – 6,5

Peso específico: 5,02

Brilho: metálico

Cor: amarelo pálido, pode ser mais escura devido à oxidação

Traço: preto amarronzado a esverdeado.

Composição e estrutura: Fe 46,6 %, S 53,4%. Pode conter pequenas quantidades de Ne e Co. A completa solução sólida ocorre entre bravoita (Fe,Ni)S₂ e pirita. Pode conter pequenas quantidades de Au e Cu como impurezas microscópicas. A estrutura da pirita pode ser considerada como uma estrutura modificada da estrutura do NaCl com Fe na posição do Na e S₂ na posição do Cl.

Alteração: pirita altera facilmente para óxidos de ferro, geralmente limonita. Cristais pseudomorfos de pirita são comuns.

14. Marcasita – FeS₂

Dados cristalográficos: ortorrômbico, 2/m 2/m 2/m

Hábito: cristais normalmente tabulares {010}. Algumas vezes prismáticos {001}. Freqüentemente geminados. Geralmente em formas radiais. Formas estalactíticas geralmente com um centro com estrutura radial e coberto com grupos de cristais irregulares. Também globular e reniforme.

Propriedades físicas:

Dureza: 6,0 – 6,5

Peso específico: 4,89

Brilho: metálico

Cor: amarelo bronze pálido até quase branco na superfície de fratura. Oxida para amarelo a marrom.

Traço: preto acinzentado.

Composição: composição constante FeS₂, polimorfo de pirita. O campo de estabilidade de pirita e marcasita não está bem definido, mas considerando as ocorrências geológicas marcasita parece indicar mais baixa temperatura de formação do que pirita.

15. Molibdenita – MoS₂

Dados cristalográficos: hexagonal, 6/m 2/m 2/m

Hábito: cristais em placas hexagonais ou primas curtos. Comumente foliados, maciços ou em escamas.

Propriedades físicas:

Clivagem: {0001} perfeita, laminada, flexível mas não elástica.

Dureza: 1,0 – 1,5

Peso específico: 4,62 – 4,73

Brilho: metálico

Cor: cinza chumbo

Traço: preto a cinzento

Sensação: graxoso

Composição e estrutura: Mo 59,9 %, S 40,1%, de composição constante. Na estrutura da molibdenita uma folha de átomos de Mo está ensanduichada entre duas folhas de átomos de S, as três folhas juntas definem uma estrutura em camadas. As forças de ligações nas folhas são muito mais fortes do que as forças de ligações entre as folhas, dando origem à excelente clivagem {0001}.

16. Arsenopirita – FeAsS

Dados cristalográficos: monoclinico, 2/m, pseudo-ortorrômbico.

Hábito: cristais comumente alongados ao longo do eixo cristalográfico “c” e menos comumente ao longo do “b”. Geminção ao longo de {100} e {001} produz cristais pseudo-ortorrômbicos, geminação ao longo de {110} gera geminação de contato ou penetração.

Propriedades físicas:

Clivagem: {101} pobre

Dureza: 5,5 – 6,0

Peso específico: 6,07

Brilho: metálico

Cor: branco prata

Traço: preto

Composição e estrutura: composição próxima a FeAsS , com pequena variação no conteúdo de As e S, variando de $\text{FeAs}_{0,9}\text{S}_{1,1}$ e $\text{FeAs}_{1,1}\text{S}_{0,9}$. Co pode substituir parte do Fe e uma série estende-se até glaucodota, $(\text{Co}, \text{Fe})\text{AsS}$. A estrutura da arsenopirita é derivada da estrutura da marcasita na qual metade do S está substituída por As.

Referências bibliográficas:

- Klein, C. & Hurlbut, C.S., 1999. Manual of Mineralogy. John Wiley & Sons, New York. P. 350-371

- Milovsky, A.V. & Kononov, O.V., 1985. Mineralogy. Mir Publishers. Moscow. P. 109-130.

ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DISTINTIVAS E PARAGÊNESES DE SULFETOS

CALCOCITA – Minério de Cobre, ocorre em paragêneses:

- Primárias, em veios com bornita, calcopirita, enargita, pirita
- Secundárias (zonas de enriquecimento supergênico)

- Altera para covelita, malaquita, azurita
- Dureza baixa (2.5 – 3.0), ligeiramente séctil, cor e traço cinza escuro a preto, associação com outros minerais de cobre

BORNITA – Minério de cobre. Altera para calcocita, calcopirita, covelita, cuprita (Cu_2O)

- Cor vermelho-cobre a marrom dourado ou bronze, em fratura recente
Embaça rapidamente, dando cores (iridescência) violáceas

GALENA – Praticamente o único minério de chumbo, forma importante associação com sulfeto de zinco (esfalerita). Associado também com minerais de prata, arsênio e antimônio

- Clivagem cúbica perfeita, brilho metálico, cor e traço cinza-chumbo, alto peso específico (7.4 a 7.6)

ESFALERITA – Mais importante minério de zinco. Pode conter quantidades apreciáveis de Ferro e pequenas quantidades de Cádmiio. Associação comum com galena

- Cor extremamente variável: incolor (pura), verde (quase pura), vermelho, geralmente amarelo a marrom escuro, às vezes preto (mas com traço mais claro). Cristais tetraédricos, brilho não metálico, resinoso, sub-metálico, adamantino. Transparente a translúcido. Peso específico 3.9 a 4.1

CALCOPIRITA – Mineral de cobre mais comum.

Minério primário em “cobres pórfiros”, associada com pirita, bornita, esfalerita, molibdenita

Associada com pirita e ouro

Associada com pentlandita e pirrotita, depósitos magmáticos de Cu-Ni sulfetado em rochas ultramáficas

Associada com galena e esfalerita, em depósitos de sulfeto vulcanogênico.

Altera para calcocita, covelita, crisocola, malaquita, óxido de Fe

- Cor amarelo-latão, iridescência, traço preto-esverdeado, cristais tetraédricos. Associação com outros minerais de cobre.

PIRROTITA – Comumente associada a minérios de Ni (associação pirrotita-pentlandita-calcopirita)

- Cor amarelo bronze, escurece rapidamente, Magnética, traço preto a cinza

REALGAR – Ocorre em veios hidrotermais, associado com ouropigmento e outros minerais de arsênio. Associado também com estibnita, ou com minérios de chumbo, prata, ouro.

- Cor vermelho alaranjado a amarelo alaranjado, transparente quando fresco.

ESTIBNITA – Mais importante mineral de antimônio (Sb também é obtido como sub-produto da mineração do Pb). Ocorre em veios, associado a realgar, ouropigmento, galena, sulfantimonietos de Pb, marcasita, pirita, cinábrio, calcita, ankerita, barita, calcedônia, quartzo.

- Cristais comuns, prismáticos achatados, tipicamente estriados // c. Cristais frequentemente curvos. Também agregados aciculares ou radiados. Cor preto-cinza, com embaçamento iridescente.

BISMUTINITA – Semelhante à estibnita, mas tem um peso específico mais alto (6.78, enquanto estibnita tem peso específico 4.63)

PIRITA – Mais comum dos sulfetos. Pode ser uma fonte de S, usado também como gema.

- Cor mais clara e dureza mais alta que a da calcopirita. Cristais euédricos frequentes: cubos ou piritoedros (faces pentagonais). Faces estriadas são comuns

ARSENOPIRITA – Mais abundante mineral de arsênio, mas geralmente não é minerada para As (sub-produto de outros depósitos contendo arsenopirita). Associada com:

- Veios de quartzo com ouro
- Veios de cassiterita
- Scheelita

- Cor branco-prata, a cinza-aço. Traço preto-acinzentado escuro. Odor de alho, quando moída. Cristais comuns, prismáticos, alongados, com seções basais rômbricas.

MOLIBDENITA – Mineral mais comum de Molibdênio. Acessório em granitos e pegmatitos. Minério de Mo, associado a:

- scheelita, wolframita, topázio e fluorita em veios
- scheelita, silicatos cálcicos e calcopirita em escarnitos
- calcopirita e outros minerais de cobre em “cobres pórfiros”

- Dureza muito baixa, clivagem basal perfeita. Cor cinza-chumbo azulado. Traço cinza azulado no papel, esverdeado na porcelana. Sensação graxosa.

Tipos composicionais

X_2Z

Argentita – Ag_2S
Calcocita – Cu_2S

X_3Z_2

Bornita – Cu_5FeS_4

XZ

Galena – PbS
Esfalerita – ZnS
Calcopirita – $CuFeS_2$
Grupo da Nicolita
 Pirrotita – $Fe_{1-x}S$
 Nicolita – $NiAs$
 Breithauptita – $NiSb$
Millerita – NiS
Pentlandita – $(Fe,Ni)_9S_8$
Covelita – CuS
Cinábrio – HgS
Realgar – AsS

X_2Z_3

Estibnita – Sb_2S_3
Bismutinita – Bi_2S_3
Ouropigmento – As_2S_3

ZX_2

Grupo da Pirita
 Pirita – FeS_2 (isom.)
 Sperrilita – $PtAs_2$
Cobaltita – $CoAsS$
Marcasita – FeS_2 (ortorr.)
Arsenopirita – $FeAsS$
Molibdenita – MoS_2
Grupo da Krennerita
 Krennerita – $(Au,Ag)Te_2$
 Calaverita – $AuTe_2$
 Silvanita – $(Au,Ag)Te_2$

XZ_3

Série da escuterudita –
 $(Co,Ni)As_{2-3}$

X_3YZ_3

Pirargirita – Ag_3SbS_3
Proustita – Ag_3AsS_3
Tetraedrita – $(Cu,Fe)_{12}Sb_4S_{13}$
Tenantita – $(Cu,Fe)_{12}As_4S_{13}$

X_3YZ_4

Enargita – Cu_3AsS_4

X_2YZ_3

Bourmonita – $PbCuSbS_3$

XYZ_2

Boulangerita – $Pb_5Sb_4S_{11}$