# 金矿中的黄铁矿标型特征

李红兵,曾凡治(中国地质大学研究生院,武汉 430074)

摘要: 黄铁矿是金矿中最常见的金属矿物,它不仅与金的矿化有着密切联系,而且还是主要的载金矿物。通过对黄铁矿的形态、物性、主成分及微量元素等标型特征的研究,可反映金矿床的不同成因,也是预测成矿远景地段、指导深部找矿的有效方法之一。文章对黄铁矿在金矿中的标型特征进行了归纳总结,以期对金矿床的勘探有一定的指导意义。

关键词: 金矿; 黄铁矿; 标型特征; 晶体形态; 热电性

中图分类号: P578. 292; P618. 51 文献标识码: A 文章编号: 1001-1412(2005)03-0199.05

黄铁矿的理论分子式为 FeS2. 自然界中黄铁矿 中的 Fe 常被 Co. Ni 代替形成类质同象。 金矿床中. 黄铁矿是主要的金属矿物,也是主要的载金矿物之 一。这是因为: 金是铜族元素, 具有很大的单质稳定 性, 地球化学性质上既具有较强的亲硫性又具有亲 铁性,所以含金热液中有黄铁矿析出时,金趋向于富 集其中。另外地球化学研究表明, Au 元素常以 [AuS2]<sup>3-</sup>, [Au(SO3)2]<sup>3-</sup>, [Au(HS)2]<sup>-</sup> 等络合物 的形式迁移( 当然也有 Au, Cl 及 Au, Si 络合物), 而 毒砂、黄铁矿等这些硫化物晶体生长时,周围硫的浓 度降低,因此金硫络合物趋向于向这里运动并分解, 使金附着在晶体的生长面上。实际上, 金在毒砂中 的富集程度要比在黄铁矿中高, 然而, 黄铁矿是自然 界分布最广的金属硫化物, 无论是在内生还是在外 生成矿作用中均能大量生成。毒砂则相对少见。且 含量比较低, 所以黄铁矿自然成为最主要的载金矿 物。黄铁矿的标型特征也相应成为重要的找矿标 志。

# 1 黄铁矿的形态标型特征

黄铁矿在金矿中最常见的单晶为立方体和五角十二面体,两者占金矿床中黄铁矿总量的 90% 以上。此外矿体中也往往出现黄铁矿的聚型,还常见半自形、他形、草莓状、胶状变胶状、钟乳状、细脉状等形态的黄铁矿<sup>[1]</sup>。

黄铁矿的晶形和金矿的矿床类型之间有一定的关系。一般认为: 在金 石英 黄铁细晶岩矿床中黄铁矿具有{100}, {210}, {111} 晶形; 在高温石英 金矿石中, 黄铁矿主要以上述聚形产出; 在中温 硫化物组合的矿体中, 黄铁矿更多地呈立方体晶形; 在中低温石英 金 硫化物组合的矿床中,则多呈五角十二面体晶形。不同矿床类型的矿体内部黄铁矿在空间上也有一定的规律性, 如: 热液成因的黄铁矿在矿脉上部以{100} 晶形 为主, 矿脉中部以{100}+ {hk0}, {100}+ {111}, {111}+ {hk0}及{111}等多种晶形为主,而矿脉下部则主要为{hk0}晶形的黄铁矿。

不同类型的金矿或同类型不同矿体中的黄铁矿晶形的空间分布规律也是不尽相同的,但总体上,从矿体头部到矿体尾部、从边部蚀变围岩到矿体中心,黄铁矿晶形具有由简单向复杂、由单型向聚型转变的趋势。其形成原因与黄铁矿在结晶时的物理化学环境有关:若热液温度较高,矿质供应不足,硫逸度较低时,黄铁矿晶体简单、晶面少、颗粒粗大;若热液温度适中、矿质来源充足、硫逸度大时,黄铁矿晶体变得复杂,晶面增多,粒度变化大,整体为中细粒[2]。

黄铁矿晶体在时间和空间上的分布规律最能体现在含金石英脉型金矿中。时间上,早期形成的黄铁矿晶体多为颗粒粗大、晶形完好的立方体晶体。粒度一般都大于  $5~\text{mm}^{[3]}$ ,多为 cm 级,含金性差;中期形成的黄铁矿晶体,多呈细粒(0.2~2~mm) $^{[3]}$ 、自形半自形,形态有立方体、八面体、五角十二面体等,

以及它们的聚形,含金性好;晚期主要形成细粒、自形-半自形,五角十二面体、八面体、立方体等,含金性较差<sup>14</sup>。空间上,在矿体上部、近矿围岩、弱矿化地段及构造破碎带中,黄铁矿主要形态为立方体;在矿体中、下部富矿地段,黄铁矿形态有五角十二面体、八面体、立方体及它们的聚形;在矿体的尾部,则出现立方体、立方体与八面体的聚形等<sup>15</sup>(表 1,表 2)。

表 1 不同矿区黄铁矿晶形与含金性关系 Table 1 Crytal form vs Au-bearing property of pyrites in varied deposits

矿床产地	晶形特点	w (Au) / 10-6	
小秦岭金矿	{ 100}	< 2 含金高	
团结沟金矿	{ 100}  { 210} + { 100}  { 210}	含金低 最高 466. 6	
陕西卡林型金矿	{ 100} 为主 { 210} 为主	3. 83~ 13. 1 70. 2~ 149.5	
赣北某金矿	{100}, {210}, 晶形复杂	含金低 富矿地段	
苏联某金矿	{100}为主, {100}+ {210}+ {111}	含金低 富矿形态标型	

据陈光远等

表 2 秦岭某金矿床黄铁矿粒度与含金量关系 Table 2 Grain size vs Au concentration of pyrites

Table 2 Grain size vs Au concentration of pyrites from an Au deposits in Qinling area

矿物	粒度(mm) $w(Au)/10^{-6}$	
粗粒黄铁矿	> 5	5. 6
中粗粒黄铁矿	3~ 5	24. 20
中粒黄铁矿	3	83. 90
中细粒黄铁矿	1~ 3	138.00
中细粒黄铁矿	1~ 3	219. 40
中细粒黄铁矿	1~ 3	294. 90
细粒黄铁矿	0.1~ 1.5	512. 20

据陈光远等

我国金矿床黄铁矿的研究表明,含金最高的是五角十二面体自形微粒状黄铁矿以及胶状、偏胶状黄铁矿<sup>[6]</sup>。实际上,可能其颗粒度和破碎程度比晶形与含金量的关系更密切。细粒黄铁矿集合体和破碎状、裂纹状黄铁矿大多具有较高的金含量。因为细粒黄铁矿集合体和破碎状、裂纹状黄铁矿具有较

大的比表面积, 使它们更有利于从溶液中有效地吸附金, 所以, 金矿床中细粒状、烟灰状、破碎状等形态比晶形具有更明显的指示意义。

### 2 黄铁矿的物性标型特征

黄铁矿的物性主要是指颜色、反射率、显微硬度、晶胞参数和热电性质等。其他的物性特征也有应用,如黄铁矿的穆斯堡尔效应、EPR 谱、红外光谱等。

- (1)从颜色来看,一般富金的黄铁矿多为浅黄色、黄色、暗黄色,而浅黄白色的黄铁矿含金量低。
- (2)金矿床矿体中富金的黄铁矿反射率和硬度略低于正常黄铁矿,并且对于大多数矿床黄铁矿晶体的  $a_0$  值大于标准的黄铁矿 。金矿中黄铁矿的晶胞参数很大程度上与砷、钴、镍对其中的铁的类质同象置换程度有关。前苏联 Коросеймиков 等 (1985)对 225 个金矿石和蚀变围岩黄铁矿晶胞参数和钴、镍含量的测定表明:黄铁矿的晶胞参数  $a_0$  与钴镍含量均呈显著正相关关系 [8],而微量元素钴镍的激增表明该地区有强烈的热液活动,很可能有不同程度的金矿化。总体来说,一般富含金的黄铁矿反射率和硬度均偏低,光泽暗淡,常呈暗绿黄、暗灰黄色,晶胞参数  $a_0$ 较大,比重也偏高。
- (3) 热电性标型。黄铁矿是一种半导体矿物,其热电参数的大小和符号受其半导体参数、杂质含量、辐射和测量时冷热电极的温差影响。黄铁矿导电类型可分为空穴型(P型)和电子导型(N型) $^{[9]}$ 。一般来说,亏S 并富 Cu, Co, Ni 的高温深成黄铁矿为电子导型(N型),而亏 Fe 且 As, Sb 含量高的低温浅成的黄铁矿则多为空穴型(P型) $^{[10]}$ 。而当黄铁矿的成分和结构近于理想晶体时,其导型不明显,热电势值也很小。黄铁矿的热电性与成矿介质的硫逸度之间也存在一定的关系: P 型指示矿体形成时的硫逸度较高, N 型则指示矿体形成时的硫逸度较低 $^{[11]}$ 。

金矿中黄铁矿热电性与黄铁矿的时空分布及形成时的温度具有一定的相关性: 矿体上部、晚期、较低温的黄铁矿其热电系数  $\alpha$  为正值, 属 P 型导电; 矿体中部、中期、中温黄铁矿的热点系数或正或负, 多属混合型(P-N 型或 N-P 型) 导电; 矿体下部早期、高温的黄铁矿其热电系数为负值, 具有 N 型导电特点。黄铁矿热电性的纵向分带可能是黄铁矿含有 Co, Ni 的黄铁质同象成分引起的。实测证明, 富 Co, Ni 的黄铁

矿为 N 型导电。成矿早期地下深部热液温度较高,热液中的 Co, Ni 含量较高, 又比较活跃, 当黄铁矿结晶时有少部分 Fe 被 Co, Ni 所替代, 则出现 N 型黄铁矿。成矿晚期热液温度降低, Co, Ni 活度降低, To 能浓度也较低, To0, To1 。 黄铁矿也可能因为别的原因而富 To0, To1 。 黄铁矿也可能因为别的原因而富 To2 。 To3 。 黄铁矿也可能因为别的原因而富 To4 。 但可结合其他地质因素进行判断, 总体来说黄铁矿热电导型的不同对矿体的剥蚀深度有一定的指示意义。

在实际的金矿勘探中,可以据黄铁矿的热电导型作出如下判断: 大多数金矿体,特别是岩浆热液型金矿床中的矿体,由浅部向深部,黄铁矿的导电型由 P 型向 N 型演化,因此,P 型黄铁矿大量分布是黄铁矿浅部的标志,而 N 型黄铁矿的大量出现可能暗示已接近矿体尾部了; 一个矿体,如果其规模较小,且黄铁矿绝大部分为 P 型,纵向分带不明显,说明该小矿体可能为深部或边部大矿体的"卫星矿体"; 当一个矿体中黄铁矿热电性不具明显的分带性,整个矿体都是以 N 型为主时,在该矿体的深部、边部存在隐伏矿体的可能性不大; 当矿体中的黄铁矿热电型在纵向上呈旋回式变化时,根据已知矿体旋回式变化的波长,大致确定矿体向下的延伸。

黄铁矿的导电型不仅能指示矿体的剥蚀程度,而且还可以间接地指示黄铁矿的含金量。如:含As,Au的黄铁矿往往多为P型,而N型导电的黄铁矿含Co,Ni较多,Co,Ni往往与金成反相关。所以可以说P型的黄铁矿比N型导电的黄铁矿含金好。

对矿床成因的指示意义: 沉积成因形成的黄铁矿以 P 型导电为主。变质成因的黄铁矿以 N 型导电为主。而来源于沉积物质的热液或热液叠加成因的黄铁矿为混合导型。

- (4) 黄铁矿的穆斯堡尔谱研究表明, 黄铁矿的穆斯堡尔谱与其同质异能位移 (IS) 和线宽 (Tn) 及其含金性关系不明显, 而四极分裂 (QS) 值与含金性密切相关。四极分裂值随砷、金含量的增高而增大, 其大小取决于 (Au+ As) / (Co+ Ni) 原子数百分值<sup>[12]</sup>, 该值愈大, QS 值亦愈大。由于砷和金成密切的正相关关系, 若矿床中黄铁矿的钴、镍含量较低,且变化不大,则 QS 值大者含金高。
- (5) 黄铁矿的 EPR 谱研究表明, 含金黄铁矿具有 1 个线宽很窄的吸收峰, 其强度随金含量增高而增强, 不含金黄铁矿无线宽很窄的吸收峰<sup>[12]</sup>。据此可作为评价黄铁矿的含金性及深部预测的找矿标

志。

(6) 黄铁矿的含金性与其对红外光谱的吸收强度及其密度值成很好的负相关关系,即吸收强度或光密度值愈小,黄铁矿的含金性愈好。由于这些物性特征在实际找矿中效果不佳或使用不方便,所以应用较少。

## 3 主成分标型

标准黄铁矿 S/ Fe 比值近似为 2,而含金黄铁矿中 S, Fe 含量与标准略有差异。一般将 S/ Fe 比值小于 2 的称为硫亏型,形成温度较高;沉积成因的黄铁矿主成分硫和铁的含量与理论值相近或硫略多。黄铁矿亏硫是  $As^{3-}$ , $Sb^{3-}$  等离子与  $S^{2-}$  类质同象代替的结果 $^{[13]}$ ,并且在结构上出现空位,增加了构造缺陷程度,更有利于金的富集。所以亏硫可以作为黄铁矿富金的标志之一。

另有资料表明, 石英脉型金矿中黄铁矿的 Fe/(S+As) 值与其形成深度密切相关, 深部石英脉中黄铁矿的 Fe/(S+As) 值较小, 为  $0.485\sim0.508$ , 而浅部石英脉中黄铁矿的 Fe/(S+As) 值较大, 为  $0.528\sim0.544$ 。

# 4 含金黄铁矿的微量元素标型特征

已知黄铁矿中可含 30 多种微量元素。它们是 A u, A g, Cu, Pb, Zn, As, Sb, Hg, Se, Te, Ti, V, Cr, M n, Co, N i, W, Mo, Re, Sn, Ge, Ga, In, Tl, Cd, U, Th, Zr, N b, Y, Yb, Sr 和 Ba $^{[14]}$ 。 在金矿的黄铁矿中, 这些元素都可能出现。其中 Au 是指示金矿最直接的标型元素, 非金矿床黄铁矿的金含量往往低于  $1 \times 10^{-6}$ ,而金矿床黄铁矿的金含量常达  $10 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$  [15]。

由于金矿床形成条件和地质背景的多样性,不同类型金矿床的黄铁矿微量元素平均值变化很大,具有很大的离散性,但其与温度和深度的关系可使黄铁矿特征性标型元素产生分带现象。在高温热液矿床中,黄铁矿以含亲铁、亲石元素为主,如: Cr,Ti,Co,Ni,V,(U),(Th),Mo,Zr和Bi,Cu,Zn和As的含量也较高;在中温条件下,主要富含亲铜元素,如:Cu,Au,Pb,Zn,Bi和Ag等;在中低温浅成环境中,黄铁矿以含高活动性的亲铜元素为特征,如:Hg,

Sb, Ag和 As。温度的影响也可造成矿体纵向上的分带<sup>[16]</sup>,一般 Ba, Tl, Hg, Ag, Sb和(As)出现在矿体上部或顶部外缘原生晕的黄铁矿中;富 Au, Cu, Pb, Zn, Ag和 Bi的黄铁矿常产于矿体中部;而矿体根部和原生晕中的黄铁矿中则 Ti, Cr, Ni, Co, As等元素含量趋于增高。富矿体部位黄铁矿的微量元素一般也最高<sup>[17]</sup>。当黄铁矿中 Au, Ag, Cu, Pb, Zn和 As

含量增加和变异系数增大时,往往指示可能存在金的矿化。

(1) 金矿床中黄铁矿的 Au/Ag 比值可以反映矿床成因方面的信息。栾世伟认为: 岩浆热液型金矿床中黄铁矿含金较高,  $Au/Ag \ge 0.5$ ; 火山岩型、构造破碎带蚀变岩型、沉积变质热液交代型及各类伴生金矿床中黄铁矿的  $Au/Ag \ge < 0.5$ (表 3)。

表 3 不同类型金矿床黄铁矿中 Au, Ag 质量分数及比值

Table 3 Au/Ag ration of pyrites from different types Au deposit

 $w_{\rm B}/~10^{-6}$ 

金矿类型	斑岩金铜矿	火山岩中的 含金石英脉	混合岩化 热液型金矿	前震旦纪变质岩 中的含金石英脉	沉积 变质热液 碳质片岩型金矿	碳酸岩型金矿
产地	安徽沙溪	浙江八宝山	胶东	吉林夹皮沟	河南围山	前苏联
Au	7. 3	63	21~ 114	114~ 1148	7. 08	113. 5
Ag	22. 3	133	8~ 244	150~ 300	66. 7	416. 9
Au/Ag	0. 33	0. 47	0. 39~ 2. 69	0.71~ 5.70	0.11	0. 27

据南京大学地质系王鹤年等

- (2) 黄铁矿中的  $C_0/N_i$  值具有指示矿床成因和成矿作用的标型意义, 岩浆热液成因的黄铁矿  $C_0/N_i$  一般为  $1\sim 5$ , 个别更高; 沉积成因的黄铁矿  $C_0/N_i$  一般< 1, 而变质热液成因的黄铁矿, 由于其地球化学背景和物理化学条件更接近于沉积成因黄铁矿, 故其  $C_0/N_i$  一般也< 1。
- (3) 黄铁矿中 As 的变化范围具有指示矿床成因的意义。一般而言,岩浆热液型金矿中的黄铁矿 w (As) >  $1~500 \times 10^{-6}$ ,而变质热液型金矿 w (As) =  $500 \times 10^{-6} \sim 1~500 \times 10^{-6}$ 。此外,多个黄铁矿样品中 As 与 Co, Ni 的相对含量可以投影在金矿床黄铁矿成因三角图(图 1) 上,根据大部分投影点所处的区域来判断金矿的成因。
- (4) 黄铁矿中 Se 的标型。一般岩浆热液矿床中黄铁矿 w (Se) >  $2 \times 10^{-6}$ , S/Se 比值<  $1.5 \times 10^{4}$ ; 沉积成因的黄铁矿 w (Se) 较低, 为  $0.2 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$ , S/ Se 比值>  $3 \times 10^{4}$ (涂光炽等, 1984)。
- (5) 黄铁矿中 Cu, Pb, Zn 的标型。  $Cu^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  作为铜型离子与  $Fe^{2+}$  型离子差别较大, 他们很难以类质同象替换 Fe 的方式进入黄铁矿晶格中, 黄铁矿中较高含量的 Cu, Pb, Zn 是黄铁矿中含有极其细微的包体粒状黄铜矿、极细小的网脉状黄铜矿、方铅矿及闪锌矿的缘故。这些金属硫化物又是以充填交代方式成网脉状分布于破碎黄铁矿中。 而破碎的黄铁矿是金的有利赋存场所, 所以较高的 Cu, Pb, Zn 含量与黄铁矿的含金性之间有一种非线性的正相关

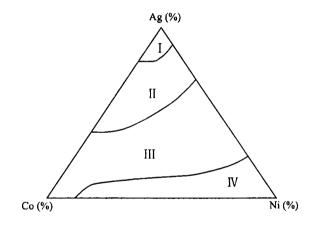


图 1 不同成因金矿中黄铁矿 Co, Ni, As 质量分数的三角图解(据宋学信[18])

Fig. 1 Plot showing variation of Co, Ni, As mass fractions for different genetic Au deposits . 地下卤水淋滤型金矿床黄铁矿 . 岩浆热液型金矿床黄铁矿 . 变质热液型金矿床黄铁矿 . 火山与次火山岩热液型金矿床黄铁矿

#### 关系。

目前,国内外许多学者对黄铁矿性质可能具有的标型意义还在探索,很多方面至今尚未得出一致性的意见,不同矿区、不同研究者的结论不尽相同。所以,我们在应用以上标性特征时不能"局部代替整体",只见树木而不见森林,应结合地、物、化、遥及其他方面的信息进行综合分析,才能得出比较可靠的结论。

### 参考文献:

- [1] 胡楚雁. 黄铁矿的微量元素及热电性和晶体形态分析[J]. 现代地质, 2003, 15(2): 238-241.
- [2] 付绍洪, 顾雪祥, 王乾, 等. 黔西南水银洞金矿床载金黄铁矿标型特征[J]. 矿物学报, 2004, 24(1): 75-80.
- [3] 周文雅. 细微浸染型金矿床中黄铁矿的标型特征及意义[J]. 岩矿测试, 2001, 20(2): 100-104.
- [4] 苏凤霞, 王晓勇, 贾伟光, 等. 吉林闹枝金矿床黄铁矿的标型特征研究[J]. 黄金, 2003, 24(5): 13-16.
- [5] 张艳彬, 张渊, 陈国华, 等. 山东黄埠岭金矿黄铁矿标型特征研究[J]. 黄金, 2004, 25(4): 11-14.
- [6] 薛传东, 谈树成. 老王寨金矿的黄铁 矿标型 特征研究[J]. 昆明理工大学学报, 1999, 24(1): 84-87.
- [7] 杨前进, 丰成友, 姬金生. 东天山康古尔塔格金矿床黄铁矿的标型特征及找矿意义[J]. 地质与勘探, 1999, 35(3): 21-23.
- [8] 江永宏, 李胜荣, 王吉中. 云南墨江金厂金矿床黄铁矿标型特征研究[J]. 矿物岩石, 2003, 23(2): 22-26.
- [9] 卿敏, 韩先菊. 金矿床 主要矿 物标型 特征研 究综述[J]. 黄金 地

- 质, 2003, 9(4): 39-45.
- [11] 魏存弟. 辽宁五龙金矿黄铁矿标型特征[J]. 地质找矿论丛, 2001, 16(2): 136 138.
- [12] 鲍正襄, 万榕江, 包觉敏, 等. 湘西钨锑金矿 床黄铁矿标型特征 及其找矿意义[J]. 湖南冶金, 2004, (1): 3-8.
- [13] 卿敏, 张立庆, 牛翠伊, 等. 山西堡子湾金矿 床黄铁矿标型特征 [J]. 黄金地质, 2001, 7(4): 22-27.
- [14] 刘英俊, 马东升. 金的地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 67-74.
- [15] 梅建明. 浙江遂昌治岭头金矿床黄铁矿的化学成分标型研究 [J]. 现代地质, 2003, 14(1):51-55.
- [16] 钱让清, 杨晓勇, 周文雅, 等. 质子探针研究微细粒金的赋存状态及黄铁矿标型特征——以皖南地区金矿成矿带为例[J]. 中国科学技术大学学报, 2002, 32(4): 482-492.
- [17] 佟景贵,李胜荣,肖启云,等.贵州遵义中南村黑色岩系黄铁矿的成分标型与成因探讨[J].现代地质,2004,18(1):41-47.
- [18] 宋学信. 中国各种成因黄铁矿的微量元素特征[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 1986, (2): 170.

#### THE PYRITE'S TYPOMORPHIC CHARACTERISTICS IN GOLD DEPOSIT

#### LI Hong-bing, ZENG Fan-zhi

(Graduate college of China University of Geosciences Wuhan, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Pyrite is the most common metal mineral in gold deposits. It not only has a close relationship with the gold mineralization, but also is the main gold-carrier. Pyrite can provide the information about metallization, ore potential, deep mineralization etc with its characters, such as crystal shapes, essential composition, microelement and pyroelectricity. This article summarizes the typomorphic characteristics of pyrite by which we can guide Au ore searching.

Key words: geld ore; pyrite; typomorphic characteristics; crystal morphology; pyroelectricity

clay; uranium deposits; SEM and EDS; Turpan-Hami Basin

#### (上接第 191 页)

Abstract: Turpan-hami Basin is one of the sandstone uranium ore districts in China. The clay mineral characteristics is analyzed by EDS and SEM. The saponites in Turpan-hami Basin is basically dioctahedral montmorillonites, the caolin aggregation is variform. It is mainly vermiform and organ. The illites aggregation is anomalous sheet in SEM. The adsorption ability to uranium of clay in oxidation zone is bigger than that in redox zone. The adsorption in redox zone do not have a obvious role in uranium precipitation.