

黄铁矿的标型特征及其在找金矿研究中的应用

魏 强¹, 张耕硕²

¹辽宁省有色地质一〇九队有限责任公司, 辽宁 朝阳

²华北科技学院矿山安全学院, 河北 廊坊

收稿日期: 2023年9月13日; 录用日期: 2024年1月25日; 发布日期: 2024年4月28日

摘 要

黄铁矿作为许多贵金属矿物的载体之一, 与金属矿床的关系密切, 分布也非常广泛, 特别是金矿床中几乎均有黄铁矿的产出, 且通常作为金的主要载体矿物, 黄铁矿的化学成分标型特征贮藏了大量的找矿矿物学和成因矿物学信息。本文通过对黄铁矿的标型特征的研究与归纳总结, 并以典型的吉林某金矿床为例, 充分说明了运用黄铁矿的标型特征对划分矿床成因、成矿阶段以及判断矿体延伸与剥蚀程度、矿石的含金性等提供了重要的找矿依据。

关键词

黄铁矿, 黄铁矿标型特征, 应用, 吉林省东部

Typomorphic Characteristics of Pyrite and Its Application in the Prospecting Research

Qiang Wei¹, Gengshuo Zhang²

¹Liaoning Province Nonferrous Geology 109 Team Limited Liability Company, Chaoyang Liaoning

²College of Mine Safety, North China Institute of Science and Technology, Langfang Hebei

Received: Sep. 13th, 2023; accepted: Jan. 25th, 2024; published: Apr. 28th, 2024

Abstract

In many precious metal deposits, pyrite is distributed, and gold deposits are more pyrite as its representative mineral, and pyrite generally becomes the carrier of precious metal gold. In this paper, the mineral characteristics of pyrite in gold deposits are studied and summarized, and a typical gold deposit in Jilin province is taken as an example to fully illustrate that the application of pyrite typomorphic characteristics provide an important prospecting basis for dividing the ge-

nesis and metallogenic stage of the deposit, judging the extension and denudation degree of the ore body, and the gold-bearing property of the ore.

Keywords

Pyrite, Typomorphic Characteristics of Pyrite, Apply, Eastern Jilin Province

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

黄铁矿在各类矿床中普遍存在, 尤以金矿床为代表的矿床, 它是金矿物的重要载体, 因此研究黄铁矿的矿物学特征对指导找矿具有非常重要的指示意义。

黄铁矿是一种常见的硫化矿物, 其化学式为 FeS_2 , 它常常含有多种其他元素, 如金(Au)、银(Ag)、铜(Cu)、钴(Co)、镍(Ni)、砷(As)、硒(Se)、碲(Te)、锑(Sb)等, 这些元素可以以极细小的矿物形式存在, 或者通过类质同象作用[1]替代 FeS_2 晶格中的铁或硫。在黄铁矿中, 这种作用可以形成 $\text{FeS}_2\text{-CoS}_2$ 和 $\text{FeS}_2\text{-NiS}_2$ 系列, 随着钴(Co)和镍(Ni)含量的增加, 晶胞参数会增大, 硬度相对降低, 颜色也会变浅。

金矿床中的黄铁矿集合体常见的集中类型包括: 以独立矿物形式存在的粒状; 以紧密堆积形式存在的致密块状; 以细小颗粒分散在其他岩石矿物中的侵染状。黄铁矿的特征如下: 浅黄色 - 铜黄色, 条痕颜色为绿黑色; 具有强金属光泽, 无解理, 参差状断口, 摩式硬度较大, 约 6~6.5, 相对密度较大, 约 4.9~5.2。

这些特征使得黄铁矿在地质勘探和矿物识别中具有重要的指示作用, 特别是在寻找与黄铁矿伴生的金矿床时。

2. 黄铁矿的标型特征

2.1. 黄铁矿化学成分标型特征

黄铁矿在不同地质条件下形成的过程中, 其铁与硫的比例以及其有关元素比值特征和微量元素种类和含量都有差异, 从而反映出矿床成因和重要的找矿信息[2]。

2.1.1. 主要元素

金矿床中黄铁矿的主要元素铁(Fe)和硫(S)的含量变化与矿床的成因有着密切的关系。这种关系是矿物学和矿床学研究中的一个重要课题[3], 因为黄铁矿的元素组成可以反映其形成时的物理化学条件, 以及成矿作用的性质。

黄铁矿中铁和硫的含量变化主要由形成条件、类质同象代替、相关元素混入等因素引起, 主要影响机理如下:

形成条件: 黄铁矿在不同的地质环境中形成, 其铁和硫的含量会受到形成时的温度、压力、氧逸度、流体成分等因素的影响。

类质同象代替: 如前所述, 类质同象作用会导致晶体结构中的某些原子被其他元素的原子所替代。在黄铁矿中, 这种作用可能导致铁被其他金属(如钴、镍)所替代, 或者硫被其他硫族元素(如砷、硒、碲)

所替代。

相关元素的混入：不同的成矿环境中，黄铁矿可能会混入不同的元素，这些元素的存在会影响铁和硫的相对含量。

黄铁矿的主要元素铁和硫的理论比值(S/Fe)为2，但实际上这个比值会有一些的变化范围，通常在1.8到2.1之间。引起这种比值差异主要是因为黄铁矿的成因类型不同[3]。

在沉积岩中形成的黄铁矿，其S/Fe比值通常接近理论值。外生黄铁矿(如与沉积作用相关的黄铁矿)通常含有较多的硫，即S/Fe比值偏高，内生黄铁矿(如与岩浆作用相关的黄铁矿)通常亏硫，即S/Fe比值偏低；在矿体顶部或上部的黄铁矿通常含有较多的硫，而在矿体下部或底部的黄铁矿则通常亏硫。

2.1.2. 微量元素

黄铁矿中的微量元素十分复杂，据统计有50多种[4]。黄铁矿中的微量元素研究对于理解矿床成因、成矿过程和成矿环境具有重要意义。微量元素的分析不仅可以帮助科学家们追踪成矿流体来源，还可以作为判断矿床类型和成矿温度的指标。

Co和Ni含量及Co/Ni比值：

以Bralia(1979)为代表的多数学者研究认为，不同成因黄铁矿中Co、Ni含量及Co/Ni比值是不同的。沉积矿床中的黄铁矿通常含有较低的Co和Ni，且Co/Ni比值小于1。层控铜矿中的黄铁矿Co/Ni比值可能大于1，表明这些矿床可能经历了热液改造。如Hegemann [5]研究了73个沉积矿床，其中68个矿床中黄铁矿 $w(\text{Co}) < w(\text{Ni})$ ，只有两个 $w(\text{Co}) > 100 \times 10^{-6}$ 。DaVidson [6]研究发现非洲和前苏联的一些层控铜矿中的黄铁矿 $\text{Co/Ni} > 1$ ，而现代沉积的黄铁矿 $\text{Co/Ni} < 1$ ，因而提出层控铜矿曾被热液改造过。

Loftus和Cobalt [7]研究了塔斯曼尼亚西部多种岩石和矿石中黄铁矿及花岗岩中黄铁矿、黄铁矿脉中黄铁矿和蚀变火山岩中黄铁矿的Co、Ni含量(共106个样品)，认为火山成因的黄铁矿Co/Ni比值通常较高，Co/Ni比值在5~22，而沉积成因的黄铁矿Co/Ni比值较低，Co/Ni一般小于0.63。热液成因黄铁矿Co/Ni一般为1.17，岩浆成因的黄铁矿Co/Ni比值在0.09~12。因此黄铁矿Co、Ni含量及Co/Ni比值具有一定的标型意义，特别是Co/Ni比值有指示成因的作用[8]。

Se和Te的含量及其比值[9]：

中低温热液矿床中的黄铁矿S/Se比值较低，而沉积成因的黄铁矿S/Se比值较高。黄铁矿中Se + Te的含量与Au + Ag含量成正比，可以用来评估矿石的含金性。Te的含量随着成矿温度的降低而增加，可以作为成矿温度的指示剂。

As含量及意义：

As通常以类质同象形式替代S进入黄铁矿晶格，与Au含量呈线性正相关，是金矿化的一个重要标志。As的含量在特定范围内(如 $n \times 10^{-5}$ ~ $n \times 10^{-4}$)可以作为金矿化的指示。

近年来，对金矿中黄铁矿微量元素的研究[10] [11]表明：

高活动性的低温亲铜元素(如Hg、As、Sb、Ba、Se、Te)与Au呈正相关，多富集在矿体上部或顶部边缘。

中温亲铜元素(如Cu、Pb、Zn)与Au、Ag的位置一致，多富集在矿体中部。

高温亲铁、亲石元素(如Co、Ni、Ti、Cr)与Au常呈负相关，多富集在矿体下部或根部。

通过分析黄铁矿中的微量元素及其空间分布，可以预测矿床深部的金矿化远景，为勘探和开发提供科学依据。这些研究成果对于指导找矿和资源评价具有实际应用价值。

2.2. 矿物晶体结构标型特征

黄铁矿(FeS_2)是一种常见的硫化矿物，其晶体结构中的 α 轴理想值确实为0.54175 nm。当黄铁矿中含

有诸如金(Au)、砷(As)、钴(Co)和镍(Ni)等元素时, 这些元素可以以不同的方式进入晶格, 导致晶胞参数的变化。例如, As 元素可能会取代 S 原子, 形成含砷黄铁矿, 这种取代会导致晶格参数的增大。

在找矿实践中, 通过分析黄铁矿的晶体结构, 可以预测可能的成矿类型和品位, 为勘探工作提供重要信息。综上所述, 通过测定黄铁矿的晶胞参数, 并结合其他地质、地球化学数据, 可以有效地指导找矿工作。

2.3. 矿物晶体形态标型特征

黄铁矿的晶体类型包括立方体{100}、五角十二面体{210}和八面体{111}, 这些不同的晶形反映了不同的成矿环境:

{100}晶形: 通常在低饱和度、低硫逸度的条件下形成, 或者在温度偏离黄铁矿最佳形成温度时出现。这种晶形的黄铁矿在围岩中较为常见, 可能指示了不利的成矿条件。

{210}和{111}晶形: 这些晶形在中等温度、缓慢冷却和物质来源充足的条件下形成, 通常与高过饱和度和高硫逸度的热液环境有关。在这样的条件下, 黄铁矿的生长速度较快, 有利于复杂晶形的发育。

而根据 Murow chick(1987) [12]通过实验也得出类似上述结论, 随着热液过饱和度的降低, 黄铁矿晶形的演化顺序分别是{210}→{111}→{100}。

黄铁矿的晶形可以划分成矿阶段[2], 黄铁矿的晶形及晶面花纹能有效的反映矿体的成矿阶段。根据矿物共生组合, 矿化可分为三个阶段。

第一世代: 黄铁矿晶形主要是{100}, 有时出现{111}, 与矿化早期阶段的矿物共生。属于矿化早期阶段, 与碲金矿共生的有菱铁矿、石英、闪锌矿、黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿。

第二世代: 晶形复杂, 常见{100}、{111}和{210}, 晶面具有羽毛状多角形的条纹, 与主要矿化期共生, 是含金性较好的标志。与自然金共生的有黄铁矿、铁白云石、绿泥石、石英、磁黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿、方铅矿、硫砷铁矿。

第三世代: 晶形主要是{100}, 晶面具有粗糙不连续的条纹, 与矿化后期阶段的矿物共生。(矿化后期)与分散的自然金共生的有铁白云石、黄铁矿。

黄铁矿的粒度和晶形完整性也与含金性有关[2]:

完整的、粗大的{100}晶形的黄铁矿通常含金性不高; 晶形不好、粒度细小的{210}和{111}晶形的黄铁矿含金性较好, 尤其是当这些黄铁矿破碎并被其他硫化物切穿、充填、胶结时, 含金性更高。因此, 细粒破碎黄铁矿出现 {210} 单形是富金找矿的重要标志。

2.4. 矿物物理性质标型特征

黄铁矿的物理性质标型特征主要是指颜色、光学性质、硬度、相对密度、热电性、磁性等, 重点介绍颜色、硬度和热电性。

颜色标型: 含矿黄铁矿的颜色多为浅黄色、浅黄绿色、灰黄色或暗色。

硬度: 含金黄铁矿由于含较高的 As, 晶体结构常发生线状位移及存在较多的包裹体等使其硬度降低, 也就是说含矿的黄铁矿一般硬度低。

热电性: 黄铁矿热电性标型特征能够反映黄铁矿在其形成过程中与成矿有关的信息[13], 这是黄铁矿最重要的标型特征之一, 如可用于判断矿床成因类型、矿体延伸规模及矿体剥蚀程度等提供可靠的依据。判定依据如下:

1) 矿床成因类型的判定: 黄铁矿的导电类型有电子型(N型)、空穴型(P型)、混合型(P + N型), 根据前人对多个矿床的总结对比统计, 沉积型黄铁矿导电类型为空穴型(P型) (热电系数-160~-150); 热液

型矿床黄铁矿导电类型为混合型(P + N 型) (热电系数-20~-90); 变质成因黄铁矿则为电子型(N 型) (热电系数-76)。

2) 矿体延伸规模的判定: 由于矿体或岩石的各个部分, 矿物的热电性通常是有差别的, 热电性变化程度较小的方向或区间, 表现了相同或近似的矿物形成条件及其空间分布。热电性变化程度较小的方向往往是矿体延伸再现矿化或有隐伏矿体的向; 变化幅度较大的方向或地段可能是指向矿体边缘矿化的尖灭(或隔离后再现)的边梢。

3) 矿体剥蚀程度的判定: 根据黄铁矿热电性垂向分布及变化规律, 可以估计矿体的剥蚀程度[14] [15]。依据热电性参数 X_{np} , 采用公式 $X_{np} = (2 f_I + f_{II}) - (f_{IV} + 2 f_V)$ (其中 f 为样品中相应热电系数值域的黄铁矿百分比, f_I 为 $\alpha > 400 \mu V/^\circ C$, f_{II} 为 $\alpha = 200 \sim 400 \mu V/^\circ C$, f_{IV} 为 $\alpha = 0 \sim -200 \mu V/^\circ C$, f_V 为 $\alpha < -200 \mu V/^\circ C$) 计算矿体剥蚀率 $\gamma = 50 - X_{np}/4$ (实际是指采样空间范围相对于矿化总延伸的百分比)。

3. 找矿应用实例

以吉林某金矿床中黄铁矿标型特征为例:

吉林某金矿床位于吉林省东部偏东, 根据相关资料, 地层主要由中侏罗统屯田营组和晚侏罗统金沟岭组的火山岩 - 次火山岩组成。岩浆岩以海西期花岗闪长岩和燕山期次安山岩为主。构造位置位于大石头 - 大北城东西向深断裂带和嘎呀河北西向大断裂带交汇处, 断裂构造发育。

金矿床地质特征: 金矿体围岩为花岗闪长岩, 总体产状走向北北西, 倾向 NW, 倾角较陡立, 最陡处 65° ; 主要赋存于地层及其周边侵入性岩浆岩内的断裂构造破碎蚀变带; 矿脉长度超过 1000 m, 地下延伸达 450 m, 厚度 1~3 m; 金品位较好, 最低品位大于 2×10^{-6} , 矿石类型以多金属硫化物蚀变岩型为主; 蚀变类型主要为硅化、黄铁绢英岩化、钾长石化、沸石化、青磐岩化、碳酸盐化和泥英岩化等。

该金矿床形成分为三个世代。每个世代黄铁矿形成的解理结构均有所差别。黄铁矿形成的不同世代正好对应了金矿体不同的形成时期:

第一世代: 与早期矿化相关, 黄铁矿晶形主要为{100}, 说明该金矿床主要是在低饱和度和低硫逸度的物理化学环境下形成的。该世代金含量平均为 2.08×10^{-6} 。

第二世代: 最重要的矿化时期, 黄铁矿颗粒较大, 晶形不完整, 为金的主要储存空间, 金含量最高, 金含量也达到了最高的 87.68×10^{-6} , 同时该世代也是黄铁矿最多的世代。

第三世代: 与晚期矿化相关, 金含量相对较低, 金含量平均为 15.48×10^{-6} 。

黄铁矿的化学成分:

元素比特征: $w(S)$ 、 $w(Fe)$ 分别平均为 53.36%、46.42%, $w(S)/w(Fe) = 1.89 \sim 2.21$, 平均为 2.01。与理想黄铁矿的化学成分($w(S) = 53.45\%$ 、 $w(Fe) = 46.55\%$; $w(S)/w(Fe) = 2$, 变化范围为 1.8~2.1)相比, 黄铁矿中的 S、Fe 含量略有不足, 表明可能存在类质同象代替现象, 即其他元素可能替代了部分 S 或 Fe。

这些信息表明, 黄铁矿的晶形、化学成分和世代特征在该金矿床的形成过程中起到了关键作用, 不仅反映了成矿环境, 而且与金矿化的强度和分布密切相关。

黄铁矿中 Co、Ni 含量较高, 其含量变化范围分别为 $100 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ 、 $20 \times 10^{-6} \sim 105.5 \times 10^{-6}$ 。Co/Ni 比值较大, 其变化范围为 2~10, 平均为 5.45。可以认为该金矿床中的黄铁矿 Co、Ni 含量变化具有火山岩浆热液成因的特点。

该金矿床中黄铁矿热电性研究, 据李松虎、金佰禄等(1999)研究, 该金矿床中黄铁矿类型主要为 P 型、N-P 型、N 型、P-N 型这四种热电性型。根据数据看, 第一世代的 P 型 + N-P 型占 8%, 其余两个

类型占 92%。第二世代的 P 型 + N-P 型占 65%，其余两个类型占 35%。第三世代的 P 型 + N-P 型占 75%，其余两个类型占 25% (见表 1)。P 型 + N-P 型的占比越高，形成金矿体的可能性越高。

Table 1. Characteristics of the compensation potential (VnP) of pyrite in the 10th vein of a gold deposit
表 1. 某金矿床 10 号矿脉黄铁矿补偿热电动势(VnP)特征

中段	样品号	VnP	类型	各中段 P +(N-P)型百分比/%	各中段 N +(P-N)型百分比/%
3	NH3 -1	-45.585	N	25	75
	NH3 -2	-28.865	N		
	NH3 -3	+60.285	P		
	NH3 -4	-10.62	N		
4	NH4 -1	-48.325	N	16.7	83.3
	NH4 -2	-7.55	P-N		
	NH4 -3	-21.935	N		
	NH4 -4	-18.688	N		
	NH4 -5	-39.055	N		
	NH4 -6	+6.636	N-P		
5	NH5 -1	+10.57	P	66.7	33.3
	NH5 -2	+46.65	P		
	NH5 -3	+68.125	P		
	NH5 -4	-19.86	N		
	NH5 -5	+61.153	P		
	NH5 -6	-40.995	N		

注：样品由吉林省地质研究所实验室测试，1999。

根据现有的数据分析，该金矿床是有根的，深部五中段的黄铁矿热电性 P 型 + (N-P)型占比很高，该矿床下方具有深部工程验证的价值，这也是目前寻找工业矿体的方向。

4. 结论

1) 黄铁矿与金的共生关系：

金的亲铁性使得它常与黄铁矿共生，黄铁矿因此成为金的主要载体之一。黄铁矿的粒度和晶形特点与含金性有关。晶形完整、粒度粗大的{100}黄铁矿含金性不高，而晶形不好、粒度细小的{210}和{111}黄铁矿含金性较好。在黄铁矿富集且破碎严重的区域，含金量通常较高，这些区域的黄铁矿被其他硫化物切穿、充填、胶结，是寻找富金矿的重要标志。

2) 黄铁矿的热电性：

黄铁矿的热电性是在找矿中的一个重要物理性质，可以用来指导寻找金矿床。通过对黄铁矿热电性的分析，可以进一步确认找金的方向，有助于分析金矿体的空间分布，为找矿预测提供科学依据。

3) 黄铁矿标型特征的应用：

以吉林某金矿床为例，黄铁矿的标型特征(如晶形、粒度、共生组合等)对于寻找金矿具有重要的指示意义。这些特征有助于划分矿床成因、成矿阶段，判断矿体的延伸与剥蚀程度，以及了解成矿环境、成矿介质条件和矿石的含金性等，为矿床的勘探和开发提供了重要的依据。

综上所述，黄铁矿的物理和化学特征在金矿床的勘探和评价中扮演着关键角色，通过综合分析这些特征，可以提高找矿的效率和准确性。

参考文献

- [1] 申俊峰, 李胜荣, 马广钢, 等. 玲珑金矿黄铁矿标型特征及其大纵深变化规律与找矿意义[J]. 地学前缘, 2013, 20(3): 55-75.

-
- [2] 陈光远, 孙岱生, 殷辉. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1987: 11-35.
- [3] 邵洁涟. 金矿找矿矿物学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988.
- [4] 周学武, 邵洁涟, 边秋娟. 四川松潘东北寨金矿黄铁矿标型特征研究[J]. 地球科学, 1994(1): 52-59.
- [5] Hegemann, F. (1943) Die geochemische Bedeutung Von Kobalt and Nickel im Pyrit. *Zeitschr Angew Mineralogie*, **4**, 121-239.
- [6] Da Vidson, C.F. (1962) On the Cobalt: Nickel Ratio in Ore Deposits. *Mineralogical Magazine*, **106**, 78-85.
- [7] Loftus, G.H. and Cobalt, S.M. (1967) Nickel and Selenium in Sulphides as Indicators of Ore Genesis. *Mineralium Deposita*, **2**, 228-242. <https://doi.org/10.1007/BF00201918>
- [8] 李红兵, 曾凡治. 金矿中的黄铁矿标型特征[J]. 地质找矿论丛, 2005, 20(3): 199-203.
- [9] 刘洪涛, 李忠满, 李大中. 黄铁矿标型特征在找矿中的应用: 以赵家堡子金矿为例[J]. 矿物学报, 2011, 31(S1): 58-60.
- [10] Boyle, R.W. (1979) *The Geochemistry of Gold and Its Deposits*. Canadian Government Publishing Centre, Hull.
- [11] 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, 2001, 15(2): 238-241.
- [12] Murowchick, J.B. and Barnse, H.L. (1987) Effects of Temperature and Degree of Supersaturation on Pyrite Morphology. *American Mineralogist*, **72**, 1241-1250.
- [13] 邵伟, 陈光远, 孙岱生, 等. 黄铁矿热电性研究方法及其在胶东金矿的应用[J]. 现代地质, 1990, 4(1): 46-57.
- [14] Mills, R.A. and Elderfield, H. (1995) Rare Earth Element Geochemistry of Hydrothermal Deposits from the Active TAG Mound, 26°N Mid-Atlantic Ridge. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **59**, 3511-3524. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00224-N](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00224-N)
- [15] 陈光远, 孙岱生, 邵伟, 等. 胶东金矿成因矿物学与找矿[M]. 重庆: 重庆科技出版社, 1989.