doi: 10.20239/j.issn.1671-9492.2026.08.010

“三矿”基因特性研究在典型锡石-硫化物多金属矿关键矿物甄别及细化分类定量中的应用

叶小璐[1,2]

(1. 矿冶科技集团有限公司,北京 100160;
2. 矿物加工科学与技术全国重点实验室,北京 102628)

摘　要: 基于基因矿物加工工程理论,以典型锡石-硫化物多金属矿为研究对象,综合采用SEM-EDS、电子探针、X射线衍射等测试手段,开展了矿物组成、矿物晶体结构以及矿物原位微区化学成分表征等矿石、矿物基因的研究和测试,确定了磁黄铁矿是制约选矿指标的关键矿物。依据衍射峰与元素组分差异,区分了矿石中同时存在的单斜和六方两种不同晶体结构的磁黄铁矿;通过显微面积统计建立了两类矿物独立定量方法。将定量方法综合运用在原矿和全流程产品的矿物定量中,明确了可浮性更好的单斜磁黄铁矿主要富集在铜硫混合精矿;可浮性较差的六方磁黄铁矿大量进入浮选尾矿并富集于锡重选粗精矿,是锡精矿硫超标的主要因素。研究突破了传统矿物学无法分类定量不同晶体结构磁黄铁矿的局限,厘清了两类磁黄铁矿在流程中的走向特征,为选矿工艺优化提供了矿物学依据。

关键词: “矿床-矿石-矿物”基因特性;关键矿物;锡石-硫化物多金属矿;磁黄铁矿

中图分类号: TD912　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-9492(2026)08-0106-09

Application of Research on Genetic Characteristics of “Three Ores” to Identification and Quantitative Refined Classification of Key Minerals in Typical Cassiterite-Sulfide Polymetallic Deposits

Ye Xiaolu[1,2]

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;
2. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 102628, China)

Abstract: Based on the genetic mineral processing engineering theory, a typical cassiterite-sulfide polymetallic ore was selected as the research object. Multiple testing methods including SEM-EDS, electron probe microanalysis (EPMA), and X-ray diffraction (XRD) were comprehensively adopted to characterize ore and mineral genes, such as mineral assemblages, mineral crystal structures, and in-situ microarea chemical compositions of minerals. It is confirmed that pyrrhotite is the critical mineral restricting mineral processing indicators. Monoclinic and hexagonal pyrrhotite with distinct crystal structures coexisting in the ore were distinguished according to differences in diffraction peaks and elemental compositions. An independent quantitative method for the two types of pyrrhotite was established via microscopic area statistics. This quantitative method was comprehensively applied to mineral quantification of run-of-mine ore and products from the whole beneficiation flowsheet. The results indicate that monoclinic pyrrhotite with superior floatability is mainly enriched in copper-sulfur bulk concentrate, whereas hexagonal pyrrhotite with poor floatability largely enters flotation tailings and accumulates in rough tin gravity concentrate, acting as the primary cause of excessive sulfur content in tin concentrate. This study overcomes the limitation of conventional mineralogy, which fails to separately quantify pyrrhotite polymorphs with different crystal structures. The migration characteristics of the two types of pyrrhotite in the beneficiation flowsheet have been clarified, providing mineralogical support for the optimization of mineral processing technologies.

收稿日期: 2026-06-04
基金项目: 云南省科技计划项目(202504BW050001)
作者简介: 叶小璐(1991—),女,云南昭通人,博士,高级工程师,主要从事工艺矿物学研究。

Key words："deposit-ore-mineral" genetic characteristics; key mineral; cassiterite-sulfide polymetallic ore; pyrrhotite

0 引言

基因矿物加工工程(Genetic mineral processing engineering，简称GMPE)[1]，由孙传尧院士首次提出。其涵盖的内容主要是以矿床成因、矿石性质、矿物特性等矿物加工的"三矿"基因特性研究与测试为基础，建立和应用数据库，并将现代信息技术与矿物加工技术深度融合，经过智能推荐、模拟仿真和有限的选矿验证试验，快捷、高效、精准地选择选矿工艺，为新建选矿厂的设计或老选矿厂的技术改造提供支撑。基因矿物加工工程的基础及核心内容之一是围绕选矿工艺的开发，进行矿床、矿石和矿物基因的测试和研究，用以支撑工艺技术的优化与创新。

本文以典型锡石-硫化物多金属矿为例，基于"三矿"基因特性分析，甄别关键矿物并建立细化分类和定量方法，从而明确关键矿物在选矿流程中的走向，为流程优化提供依据。

1 研究背景

某锡石-硫化物多金属矿含有铜、锡、砷、硫等多种有价金属，生产中采用常规浮—重工艺流程，主要存在铜精矿品位低、锡精矿含硫超标的问题。铜精矿品位往往只有12%左右，无法达到合格铜精矿的品级要求；始终有部分磁黄铁矿进入混合浮选尾矿，对后续锡重选的回收影响极大，造成锡精矿含硫常超标。

为解决上述问题，本文从矿床基因、矿石基因角度出发，明确引发选矿技术难题的关键矿物。再以关键矿物为切入点，针对性开展关键矿物的矿物基因特性和细化分类研究，为选别优化提供准确依据。

2 研究方法

粉末样品由环氧树脂胶结成30 mm×30 mm的圆环，矿石样品被切割成长、宽均为40 mm左右的块体，经过打磨、抛光后用于微区成分测试、显微图像分析和表征方法研究。扫描电子显微镜(SEM)型号为赛默飞Apreo 2S，能谱分析采用布鲁克QUANTAX 600分析系统。采用日本电子1720H型号(EPMA-1720H)电子探针进行磁黄铁矿颗粒的原位微区S、Fe含量及微量元素含量的测量。样品经树脂包埋，采用离子减薄法对表面处理后喷碳。测试时，首先对不同亮度的颗粒在15 kV、50 nA条件下进行定性分析，然后在15 kV、100 nA下进行元素含量分析。采用日本理学(Rigaku)Ultima Ⅵ X射线衍射分析仪对矿石或选矿产品的粉磨样品进行X射线衍射分析(XRD)。XRD工作电压为40 kV，2θ范围为0°～90°，计数时间为10(°)/min。

3 结果与讨论

3.1 锡石-硫化物多金属矿的矿床矿石基因特性研判

我国锡矿产地分布于19个省(区)，其中云南、广西、广东、湖南、内蒙古、江西6省(区)锡资源储量的总和约占全国锡资源储量的97.7%，形成了华南、西南和大兴安岭3个锡成矿带[2]。按照矿床类型，主要有以下四类[3]：

1)热液型锡矿床

热液型锡矿床是中国锡矿床中最主要的一种，其形成与S型花岗岩的侵入密切相关。热液型锡矿主要以砂岩、页岩和变质岩为矿床母岩，由于热液与母岩作用，因此母岩中的组分一定程度会影响最终矿床中矿石的矿物组成。热液型锡矿床中主要的金属矿物常包括黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿和磁黄铁矿等硫化物矿物。

2)矽卡岩型锡矿床

矽卡岩型锡矿床作为我国除热液型锡矿床外另一种重要的锡矿床类型，其形成也与S型花岗岩有关。矽卡岩型锡矿床其外围岩石主要为矽卡岩，且两者之间没有明显的分界线，常呈分层排布特征，因此锡矿床的矿体常常以透镜状、层状和脉状的形式出现，且矽卡岩的矿物组成对锡矿床的矿物组成及矿物特性具有很大的影响。矽卡岩型锡矿中常见的金属矿物主要有磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铁矿和毒砂等。

3)云英岩型锡矿床

云英岩型锡矿床主要在花岗岩内外接触带上形成，这种锡矿床多为脉状。云英岩型锡矿床中除了含有锡以外，常共生钨，同时还可能伴生铜、铁、硫等有价元素。其矿物组合主要为铜、锌的硫化物矿物，有时还含有黑钨矿等。

4)花岗岩风化型锡矿床

花岗岩风化型锡矿床是在花岗岩侵入体顶部的内接触带处形成的矿床。其主要金属矿物包括锡石、黑钨矿、铌钽铁矿、磷钇矿、钛铁矿和金红石等。

按照共生元素组合规律划分,锡石-硫化物多金属矿可大致分为以下五类[4]。

(1)锡-重有色金属-贵金属(Sn-Cu-Pb-Zn-Ag-In-Cd)型:以云南的个旧(Sn-Cu/Pb/Zn)、都龙(Sn-Zn/In)、白牛厂(Sn-Ag/Pb-Zn)以及广西大厂(Sn-Pb/Zn/Cu/In/Sb/Ag)等为典型代表性矿床。

(2)锡-稀有高熔点金属元素组合(Sn-W-Mo-Bi-Nb-Ta)型:新疆白干湖(Sn-W)、湖南柿竹园(Sn-W-Mo-Bi)、湖南金船塘(Sn-Bi)、广西珊瑚(Sn-W)、湖南香花岭(Sn-Nb-Ta)和广西栗木(Sn-Nb-Ta)是该类型的典型代表。

(3)锡-铁型:内蒙古黄岗和广东大顶的锡铁矿是这类资源最典型的两大重要代表。两者的锡资源储量合计达到了66万t,铁资源量合计30 887万t。

(4)独立Sn矿床:这类资源的整体储量都比较低,锡资源量一般都小于10万t。

(5)锡-稀有轻金属(Sn-Li-Be-Cs-B)型:湖南界牌岭是大型的Be-Sn矿床,四川甲基卡则为大型Li矿床,Sn仅作为次要矿产。

从矿床、矿石基因特性上可以看出,锡石-硫化物多金属矿矿物组成复杂,选别时需要同时兼顾硫、氧矿物的差异。有价硫化物矿物除了铜、铅、锌矿物外,还包括大量硫铁矿物。

3.2 关键矿物的甄别及其矿物基因特性

硫铁矿物包括了黄铁矿和磁黄铁矿,其中磁黄铁矿是典型的非化学定比矿物,矿物基因特性常呈连续变化。因此,磁黄铁矿矿物基因特性及其对选别的影响,一直是选矿研究领域的热点。

磁黄铁矿的成分通式为$Fe_{1-x}S$,其中x可视为铁原子亏损的程度,x值介于0~0.233。作为典型的非化学计量矿物,$Fe_{1-x}S$所代表的其实是一系列的具有NiAs结构的铁-硫成分的同质多相矿物[5]。

Ward[6]研究发现单斜磁黄铁矿形成的最大温度为330 ℃左右,一般在304 ℃以下。也就是说单斜磁黄铁矿主要在低温条件下形成。随着铁原子亏损值的增加,形成对称性较差的单斜磁黄铁矿。单斜磁黄铁矿组成成分中铁原子摩尔分数为47.0%~46.5%(近于Fe_7S_8)。在XRD衍射谱线上,单斜磁黄铁矿在2θ为43°~45°时会出现一个强度相同的双峰,强度为2.064 $\overline{A}$和2.065 $\overline{A}$[7]。现有研究普遍认为,单斜磁黄铁矿具有强磁性。

六方磁黄铁矿在低温到高温皆有可能存在。六方磁黄铁矿成分中铁含量在47.4%~48.3%(摩尔分数)[6],其准确化学式为Fe_9S_{10}~$Fe_{11}S_{12}$。六方磁黄铁矿仅有强度为2.066 $\overline{AA}$的单峰[8]。六方磁黄铁矿具有顺磁性,比磁化系数范围较宽,磁性变化大,总体上表现为弱磁性[9-10]。

不同晶体结构磁黄铁矿的氧化速率是不一样的,磁黄铁矿的氧化速率与Fe^{3+}的出现有着明显的正相关性[11]。磁黄铁矿在空气中自然氧化的总体化学反应方程式[12]可表示为:

$$Fe_{1-x}S+(2-x/2)O_2+xH_2O\rightarrow(1-x)Fe^{2+}+SO_4^{2-}+2xH^+ \quad (1)$$

$$Fe^{2+}+1/4O_2+H^+\rightarrow Fe^{3+}+1/2H_2O \quad (2)$$

$$Fe^{3+}+3H_2O\rightarrow Fe(OH)_3(s)+3H^+ \quad (3)$$

$$Fe_{1-x}S+(8-2x)Fe^{3+}+4H_2O\rightarrow(9-3x)Fe^{2+}+SO_4^{2-}+8H^+ \quad (4)$$

从式(1)和式(4)可以看出,O_2和Fe^{3+}是氧化过程中的主要氧化剂,式(2)能反应氧化过程中的快慢步骤。氧气是最直接最基本的氧化剂。磁黄铁矿的氧化速率相比于其他硫化矿矿物更加迅速。当pH<4.5时,三价铁离子是最主要的氧化剂。

不同晶体结构磁黄铁矿所表现出来的可浮性也有显著差异。从总体上认为单斜磁黄铁矿的可浮性比六方磁黄铁矿的强。Khan等[13]发现来自不同矿床的磁黄铁矿的循环伏安曲线存在较为显著的差异,这是由于其表面生成的亲水或疏水性的物质存在差异。Bozkurt等[14]指出异丁基黄药可以转化为双黄药吸附在磁黄铁矿的矿物表面。Rao等[15]发现在氮气氛围下双黄药很难获得较高的氧化点位,因此黄药在磁黄铁矿表面吸附量很少。

对该锡石-硫化物多金属矿的原矿及流程各产品的矿物组成研究(图1)可知,磁黄铁矿是其中含量最高的硫化物矿物。原矿矿石中的磁黄铁矿含量达到了14.81%,铜硫混合精矿中磁黄铁矿的矿物含量为39.05%,砷硫混合精矿中磁黄铁矿的矿物含量为31.23%,浮硫尾矿经螺旋溜槽获得的粗精矿中磁黄铁矿的矿物量达到了60.56%。

通过综合分析锡石-硫化物多金属矿矿床基因造成的矿物共生组合类型,结合矿石基因中该锡石-硫化物矿石的矿物组成及其相对含量研究,可确定磁黄铁矿是该锡石-硫化物多金属矿的关键矿物,查明磁黄铁矿在现有流程中的走向特点,可为后续选矿技术的开发奠定良好矿物学基础。

3.3 不同晶体结构磁黄铁矿的判别

现有研究表明区分单斜磁黄铁矿和六方磁黄铁矿的明显特征可通过它们在XRD衍射特征峰上的差异进行判断:单斜磁黄铁矿和六方磁黄铁矿在XRD的$d_{\overline{102}}$特征峰上会有明显的差异:单斜磁黄铁矿的$d_{\overline{102}}$

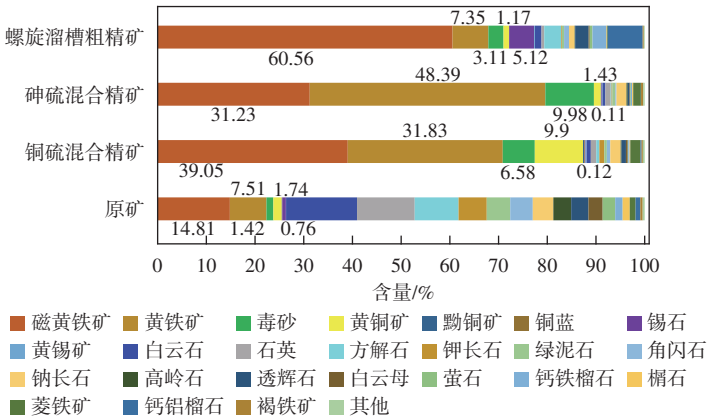


图 1　原矿和重要产品的矿物组成和相对含量

Fig. 1　Mineral composition and relative content for raw ore and important products

会出现裂变且强度基本等高的裂变峰(图 2(a)),六方磁黄铁矿在$d_{\overline{102}}$时则是笔直的单一峰(图 2(c)),若是两种磁黄铁矿混合的情况下,则会出现强度高低不一的裂变峰(图 2(b))。

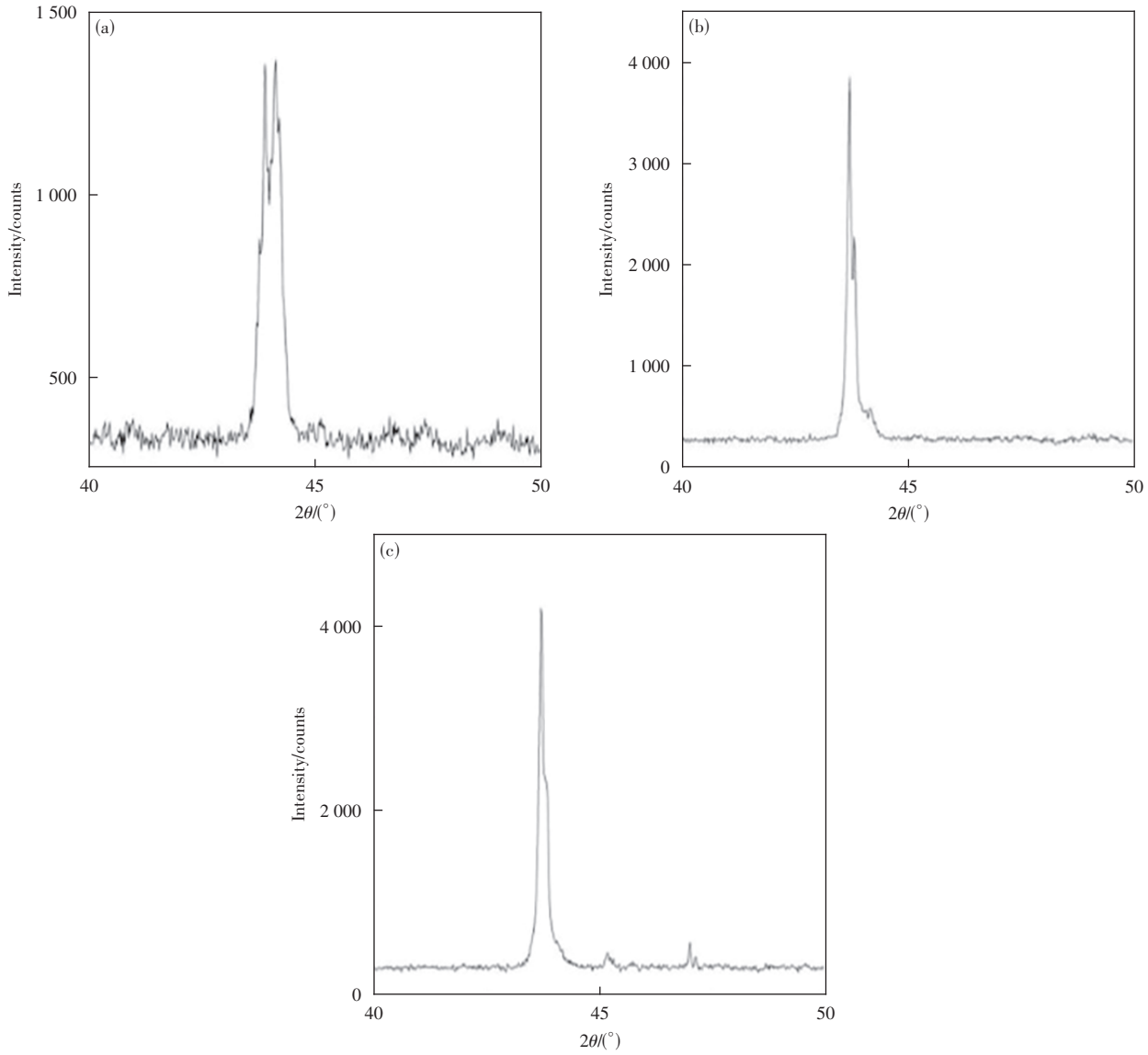


图 2　不同类型磁黄铁矿 XRD 在$d_{\overline{102}}$处的差异

Fig. 2　Differences of XRD for different types of pyrrhotite at $d_{\overline{102}}$

针对锡石-硫化物多金属矿形成的磁黄铁矿相对富集的铜硫混合精矿、砷硫混合精矿和螺旋溜槽重选粗精矿进行了X衍射分析。各产品的XRD图谱见图3~5。

由图3可知，在2θ为43°~45°，出现了明显的双峰裂变，且两峰的强度相当，由此可以判断铜硫混合精矿中以单斜磁黄铁矿为主。

由图4可知，砷硫混合精矿在2θ为43°~45°位置上同样出现了一个双峰，但该峰的强度有明显的差异。因此砷硫混合精矿中除了单斜磁黄铁矿外，还存在有相当含量的六方磁黄铁矿。

由图5可知，螺旋溜槽粗精矿在2θ为43°~45°出现了一个强度为2.06 Å的单峰。因此，粗精矿中的磁黄铁矿主要为六方磁黄铁矿。

3.4 不同晶体结构磁黄铁矿的化学成分差异

根据前人研究，单斜磁黄铁矿和六方磁黄铁矿在

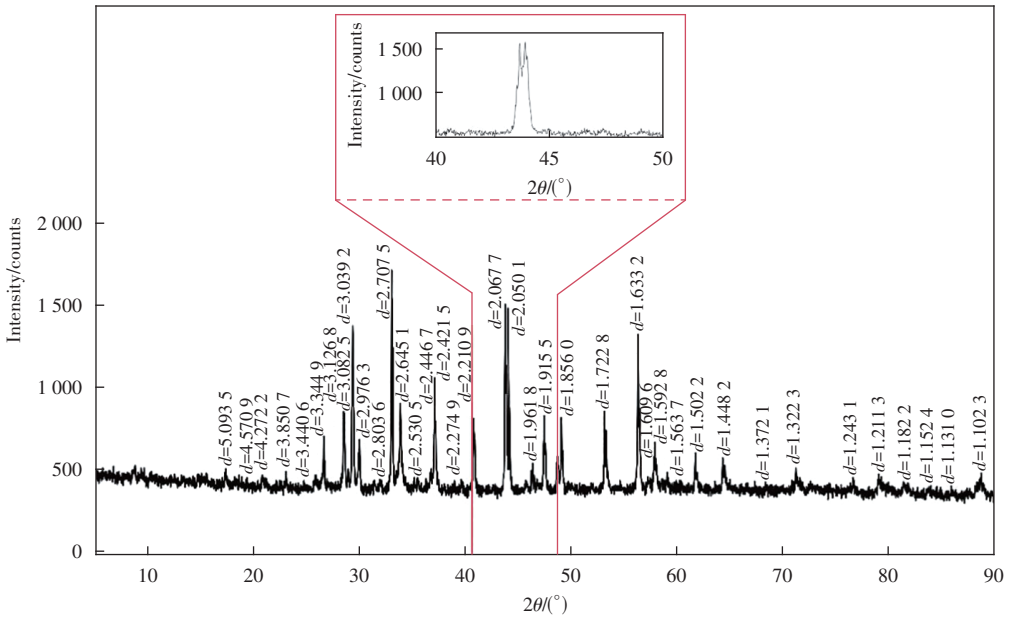


图3 铜硫混合精矿的XRD分析结果

Fig. 3 XRD analysis results of copper-sulfur mixed concentrate

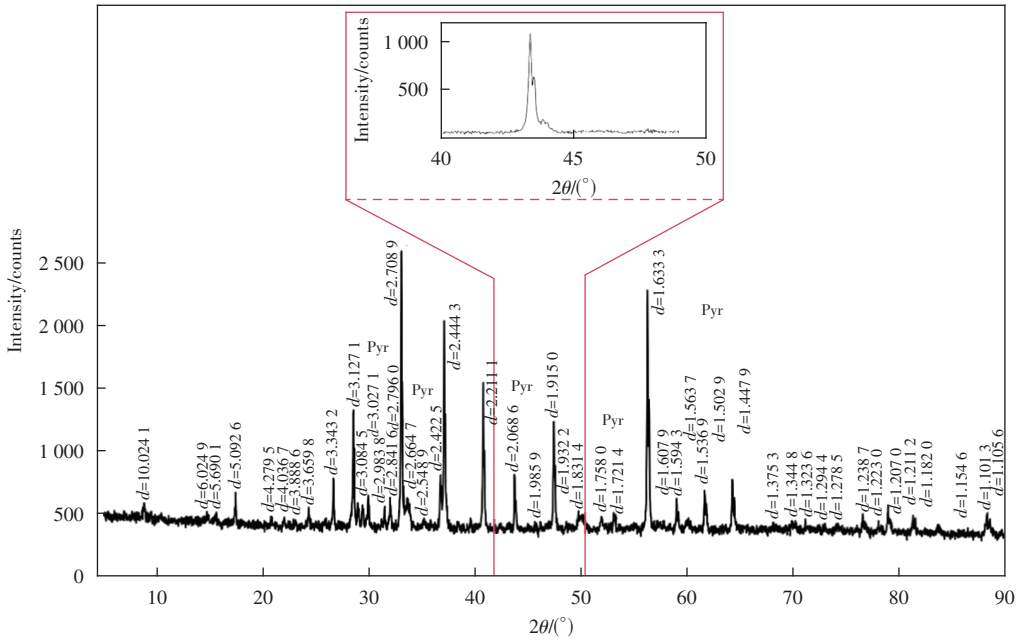


图4 砷硫混合精矿的XRD分析结果

Fig. 4 XRD analysis results of arsenic-sulfur mixed concentrate

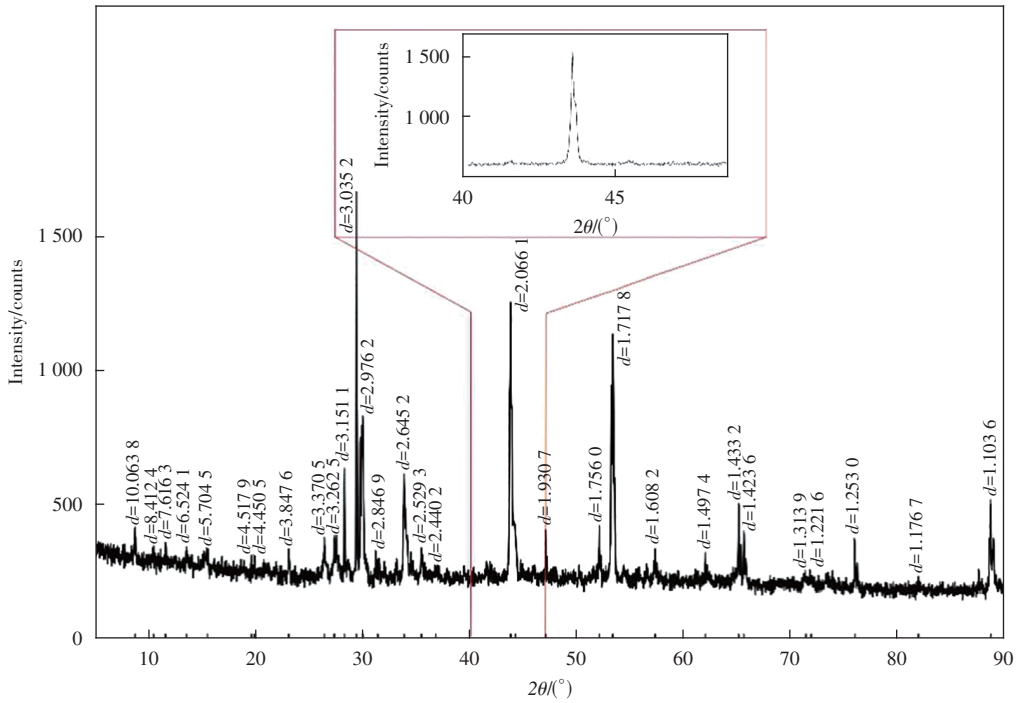


图5　螺旋溜槽粗精矿的XRD分析结果

Fig. 5　XRD analysis results of spiral chute coarse concentrate

硫、铁含量上有一定的范围差异。本研究中，采用电子探针对矿石中大量的磁黄铁矿颗粒进行了硫、铁含量的原位微区成分分析，并通过含量进行颗粒准确化学式和铁亏损值的计算(图6)，从而厘清该锡石-硫化物多金属矿中不同晶体结构磁黄铁矿的硫、铁含量变化范围及其相对应的晶体结构。

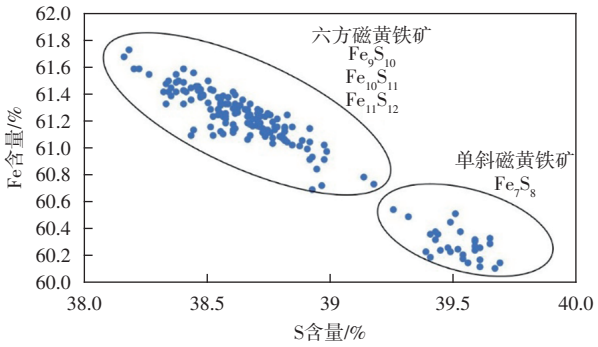


图6　矿石中磁黄铁矿颗粒的原位微区S、Fe含量和晶体结构分类

Fig. 6　S and Fe contents and crystal structure classification of pyrrhotite particles in ore

由图6可知，在锡石-硫化物共生矿中单斜磁黄铁矿中铁的含量在60.19%～60.60%，其准确化学式为Fe_7S_8，六方磁黄铁矿中铁的含量在60.80%～61.80%，其准确化学式为Fe_9S_{10}、$Fe_{10}S_{11}$和$Fe_{11}S_{12}$。

3.5　不同晶体结构磁黄铁矿的接触角和自诱导浮选行为

接触角(θ)是表征固体表面润湿性的重要参数。若固液接触角θ较小，该固体表面为亲水性表面，可浮性较差；反之，θ较大则为疏水性表面，可浮性较好。采用KRUSS力学法表面张力仪(K100)测定了从锡石-硫化物多金属矿原矿石中获得的不同晶系磁黄铁矿粉晶在蒸馏水润湿下的表面接触角，测试结果见表1。

表1　不同晶系磁黄铁矿的接触角测定

Table 1　Contact angle determination of pyrrhotite with different crystal systems

主要矿物	接触角/(°)
单斜磁黄铁矿	69.13
单斜磁黄铁矿为主，少量六方磁黄铁矿	64.41
六方磁黄铁矿为主、少量单斜磁黄铁矿	55.62
六方磁黄铁矿	51.80

为了解单斜和六方磁黄铁矿天然可浮性，在不添加任何捕收剂，以松醇油作为起泡剂(用量10 mg/L)条件下，采用HCl和NaOH对矿浆进行pH调节，研究了矿浆pH值对不同晶系磁黄铁矿浮选回收率的影响，浮选结果见图7。

单斜磁黄铁矿的接触角达到了69.13%，六方磁黄铁矿的接触角仅为51.80%。若粉晶为两种不同晶系磁黄铁矿混合的情况，则会因为混合比例的不同，

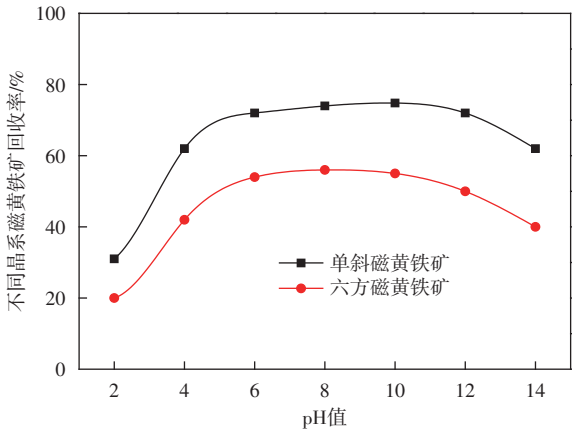


图 7 不同晶系磁黄铁矿的自诱导浮选行为

Fig. 7 Self-induced flotation behavior of pyrrhotite with different crystal systems

导致接触角有所变化。整体变化结果表明,单斜磁黄铁矿天然可浮性优于六方磁黄铁矿。

单斜和六方磁黄铁矿在强酸(pH≤2)及强碱(pH≥12)的条件下,可浮性都会出现下降趋势。在pH=14时,六方磁黄铁矿的可浮性明显受到了抑制,但单斜磁黄铁矿的可浮性仍然比较高,酸碱度的变化对于六方磁黄铁矿更容易起到抑制作用。在任何pH值条件下,单斜磁黄铁矿的回收率都远高于六方磁黄铁矿。结合接触角测试分析,该锡石-硫化物多金属矿中的单斜磁黄铁矿的可浮性显著优于六方磁黄铁矿。

3.6 基于矿物基因特性的关键矿物分类定量及其应用

在获得磁黄铁矿矿物量的基础上,利用电子探针等矿物原位微区分析技术可进一步分析颗粒在微区尺度上的元素含量。因此根据3.4节中给出的锡石-硫化物多金属矿中单斜磁黄铁矿和六方磁黄铁矿的硫、铁含量范围及其准确的化学式和硫、铁元素分布图,即可准确标定样品中不同类型磁黄铁矿的颗粒。

针对锡石-硫化物多金属矿生产流程中的铜硫混合精矿、砷硫混合精矿和螺旋溜槽重选粗精矿中的磁黄铁矿进行了详细的含量分析。每个样品中随机选择了50颗磁黄铁矿颗粒,进行了S、Fe含量的原位微区,结果见图8。

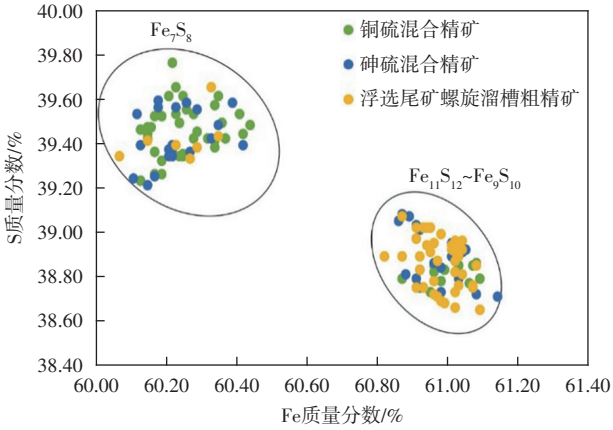


图 8 三种选矿流程产品中磁黄铁矿颗粒的硫铁含量

Fig. 8 The sulfur and iron contents of pyrrhotite particles in three kinds of beneficiation process products

由图8可知,流程中不同选矿产品所含有的磁黄铁矿类型有明显区别。铜硫混合精矿中以单斜磁黄铁矿为主,六方磁黄铁矿仅占少数;砷硫混合精矿中单斜磁黄铁矿的含量明显少于六方磁黄铁矿;浮选尾矿的螺旋粗精矿中磁黄铁矿则主要是以六方磁黄铁矿为主。

对相应的磁黄铁矿颗粒进行面积统计后,两种类型磁黄铁矿颗粒总面积、矿物量见表2。

由表2可知,单斜磁黄铁矿主要分布在流程的前端,铜硫混合精矿中单斜磁黄铁矿和六方磁黄铁矿比例达到了84.83∶15.17,单斜磁黄铁矿的矿物量达到了33.12%,六方磁黄铁矿的矿物量仅为5.93%。浮选尾矿的螺旋溜槽粗精矿中则主要以六方磁黄铁矿为主,单斜和六方磁黄铁矿二者的比例为17.93∶82.07,单斜磁黄铁矿和六方磁黄铁矿的矿物量分别为10.86%和49.70%。

表 2 三种选矿流程产品中不同晶体结构磁黄铁矿的总面积、比例和矿物量

Table 2 The total area, proportion and mineral content of pyrrhotite with different crystal structures in three kinds of beneficiation process products

产品名称	磁黄铁矿总矿物量/%	单斜磁黄铁矿面积/μm²	六方磁黄铁矿面积/μm²	比例	单斜磁黄铁矿矿物量/%	六方磁黄铁矿矿物量/%
铜硫混合精矿	39.05	107 274.30	19 177.10	84.83∶15.17	33.12	5.93
砷硫混合精矿	31.23	74 983.16	100 143.00	42.82∶57.18	13.37	17.86
粗精矿	60.56	25 421.14	116 391.90	17.93∶82.07	10.86	49.70

4 结论

本研究通过对锡石-硫化物多金属矿矿床和矿石基因特性的研究，确定了影响该矿石选别的关键矿物为磁黄铁矿。通过对磁黄铁矿矿物基因特性的研究，突破了常规矿物定量方法无法对不同晶体结构磁黄铁矿进行单独定量的局限性，建立了磁黄铁矿分类及定量的矿物定量新方法，厘清了锡石-硫化物多金属矿选别全流程中不同晶体结构磁黄铁矿的走向特点。

研究结果明确了单斜磁黄铁矿主要富集在流程前端的铜硫选别环节，六方磁黄铁矿则由于可浮性较差会进入到硫化物浮选的尾矿中，成为影响锡重选的主要因素。通过基于矿物基因特点差异的关键矿物细化分类及走向特点研究，可为选矿工艺针对性的创新突破提供准确矿物学依据。

参考文献

[1] 孙传尧，周俊武，贾木欣，等. 基因矿物加工工程研究[J]. 有色金属(选矿部分)，2018(1)：1-7.
Sun Chuanyao，Zhou Junwu，Jia Muxin，et al. Research on genetic mineral processing engineering[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)，2018(1)：1-7.

[2] 孙虎，王建平，王玉峰，等. 我国锡矿开发利用现状及可持续发展建议[J]. 资源与产业，2012，14(4)：58-62.
Sun Hu，Wang Jianping，Wang Yufeng，et al. Status and suggestions of sustainable development to China′s tin ores[J]. Resources & Industries，2012，14(4)：58-62.

[3] 陈郑辉，王登红，盛继福，等. 中国锡矿成矿规律概要[J]. 地质学报，2015，89(6)：1026-1037.
Chen Zhenghui，Wang Denghong，Sheng Jifu，et al. The metallogenic regularity of tin deposits in China[J]. Acta Geologica Sinica，2015，89(6)：1026-1037.

[4] 刘亚川，丁其光，汪镜亮，等. 中国西部重要共伴生矿产综合利用[M]. 北京：冶金工业出版社，2008：193-195.
Liu Yachuan，Ding Qiguang，Wang Jingliang，et al. Comprehensive utilization of important associated minerals in western China[M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，2008：193-195.

[5] Becker M，De Villiers J，Bradshaw D. The mineralogy and crystallography of pyrrhotite from selected nickel and PGE ore deposits[J]. Economic Geology，2010，105(5)：1025-1037.

[6] Ward J C. Structure and properties of some iron sulphides[J]. Reviews of Pure and Applied Chemistry，1970，20(2)：175-178.

[7] Janzen M P，Nicholson R V，Scharer J M. Pyrrhotite reaction kinetics：reaction rates for oxidation by oxygen，ferric iron，and for nonoxidative dissolution[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta，2000，64(9)：1511-1522.

[8] Rezvani A，Raji F，Liu Qi，et al. Unveiling different pyrrhotite superstructures in copper-gold ore samples：insights from advanced spectroscopic and microscopic characterization[J]. Minerals Engineering，2024，206：108536. DOI：10. 1016/j. mineng. 2023. 108536.

[9] Multani R S，Waters K E. A review of the physicochemical properties and flotation of pyrrhotite superstructures(4C-Fe_7S_8/5C-Fe_9S_{10}) in Ni-Cu sulphide mineral processing[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering，2018，96(5)：1185-1206.

[10] Schrader D L，Davidson J，McCoy T J，et al. The Fe/S ratio of pyrrhotite group sulfides in chondrites：an indicator of oxidation and implications for return samples from asteroids Ryugu and Bennu[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta，2021，303：66-91.

[11] Thomas J E，Skinner W M，St C Smart R. A mechanism to explain sudden changes in rates and products for pyrrhotite dissolution in acid solution[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta，2001，65(1)：1-12.

[12] Belzile N，Chen Yuwei，Cai Meifang，et al. A review on pyrrhotite oxidation[J]. Journal of Geochemical Exploration，2004，84(2)：65-76.

[13] Khan A，Kelebek S. Electrochemical aspects of pyrrhotite and pentlandite in relation to their flotation with xanthate. part-I：cyclic voltammetry and rest potential measurements[J]. Journal of Applied Electrochemistry，2004，34(8)：849-856.

[14] Bozkurt V，Xu Z，Finch J A. Pentlandite/pyrrhotite interaction and xanthate adsorption[J]. International Journal of Mineral Processing，1998，52(4)：203-214.

[15] Rao S R，Finch J A. Adsorption of amyl xanthate at pyrrhotite in the presence of nitrogen and implications in flotation[J]. Canadian Metallurgical Quarterly，1991，30(1)：1-6.

（本文编辑 汪东芳）

【缅怀寄语】

在孙院士离开的这近一年里，发生了很多，但一切又好像依旧沿着最初我们努力的方向在继续。在不断讨论“AI＋”，讨论数据驱动科研范式变革的当下，我一次又一次想，这不正与孙院士当年提出基因矿物加工工程时的深远愿景不谋而合吗？以矿床成因、矿石性质、矿物特性等矿物加工的“基因”的研究与测试为基础，建立数据库，依托智能推演与仿真试验，精准优选工艺流程。

孙院士于我，是年少时便仰望的行业泰斗。我围绕磁黄铁矿开展矿物基因特性相关研究期间，承蒙他诸多指点与帮扶。我永远记得第一次承担科技成果鉴定时的感动：我不过初出茅庐的小辈，孙院士却未有半分轻慢。他认真读完了全部鉴定材料，会前特意发来短信叮嘱我，汇报时务必讲透磁黄铁矿矿物基因特性与工艺流程的关联。那场鉴定会从清晨持续到了午后，众人皆显疲惫，唯有他始终思路清晰、严谨审慎，逐一追问细节，反复要求我再凝练、再拔高，绝不将就。也正是他严苛细致的追问与指导，让我对把握技术难点、提高专业认知都有了更深刻的思考。

时光流转，先生虽已远行，但他严谨治学的风骨、提携后辈的温情、务实求真的初心，始终温暖照亮着我们。往后岁月，无论是科研攻关，学科发展，亦或是队伍建设，我们都会带着这份温暖与期许，继续前行。旧语常温，先生从未远去！

——叶小璐