doi: 10. 20239/j. issn. 1671-9492. 2026. 08. 009

矿床成因约束下高砷锡铜矿矿物学基因特性与分选制约研究

冯 凯[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: 高砷锡石-硫化物型锡铜共生矿矿物组成复杂、有价矿物嵌布粒度差异大、共生关系紧密,生产中普遍存在铜精矿中砷超标、铜锡回收率偏低等难题。矿石基因特征受控于矿床成因及多期次成矿演化过程,是决定矿物嵌布形态、粒度特征、连生关系及矿石可选性的根本内因。本文以该类矿石为研究对象,采用化学分析、光学显微镜、扫描电镜及矿物自动分析等手段,查明矿石化学成分与矿物组成,系统研究黄铜矿、锡石、毒砂的嵌布特征、粒度分布及不同磨矿细度下的解离行为。研究表明,受岩浆期后热液多阶段成矿作用控制,各矿物呈现显著差异化基因特征:锡石早于硫化物沉淀,粒度不均、性脆易过磨;毒砂形成于硫化物早阶段,晶粒粗大、自形程度高,与黄铜矿连生较弱、易单体解离;黄铜矿形成于硫化物晚阶段,受先期矿物空间占据影响呈细粒嵌布,解离难度大。依据矿床成因主导的矿石基因对选矿的制约机制,推荐采用一段适度磨矿—优先浮铜抑砷—铜粗精矿再磨再选—尾矿脱硫—脱硫尾矿重选收锡工艺。该工艺契合矿物嵌布特征与解离规律,可有效实现铜砷分离、减轻锡石过磨、降低微细粒铜损失,同时为从矿床成因-矿石基因角度研发同类多金属矿选矿工艺提供参考。

关键词: 矿石基因特性;矿床成因;成矿阶段;高砷锡铜矿;工艺矿物学

中图分类号: TD912 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9492(2026)08-0099-07

Study on Mineral Genetic Characteristics and Separation Restriction of Arsenic-rich Tin-Copper Ore Under the Constraint of Deposit Genesis

Feng Kai[1,2]

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

Abstract: Arsenic-rich cassiterite-sulfide type copper-tin symbiotic ore is characterized by complex mineral composition, large particle size difference of valuable minerals and close paragenetic relationship. It generally faces prominent problems such as excessive arsenic in copper concentrate and low recovery of copper and tin. Ore genetic characteristics are controlled by deposit genesis and multi-stage metallogenic evolution, which are the fundamental internal factors determining mineral embedding morphology, particle size features, intergrowth relationship and ore processability. Taking this ore as the research object, chemical analysis, optical microscopy, scanning electron microscopy and automatic mineral analysis were adopted to identify the chemical composition and mineral assemblage, and systematically investigated the embedding characteristics, particle size distribution and liberation rules of chalcopyrite, cassiterite and arsenopyrite under different grinding fineness. The results showed that, controlled by multi-stage post-magmatic hydrothermal mineralization, each mineral presented distinctly differentiated genetic characteristics. Cassiterite was deposited earlier than sulfides with uneven particle size and brittle property, which was prone to over-grinding loss. Arsenopyrite was formed in the early sulfide stage with coarse grain size and high euhedral degree; it was weakly intergrown with chalcopyrite and readily liberated. Formed during the late sulfide stage, chalcopyrite occurred as fine grains confined by space occupied by earlier-formed minerals, resulting

收稿日期: 2026-05-31
基金项目: 云南省科技计划项目(202504BW050001)
作者简介: 冯 凯(1990—),男,河北邢台人,博士,高级工程师,主要从事矿石成因矿物学、工艺矿物学及矿产资源可利用性评价。

in poor liberation. According to the mineral processing constraint mechanism dominated by deposit genesis and ore genetic characteristics, a combined flowsheet of moderate primary grinding, preferential copper flotation with arsenic depression, regrinding and re-concentration of copper rough concentrate, tailings desulfurization, and cassiterite recovery by gravity separation from desulfurized tailings was recommended. The flowsheet conforms to mineral embedding characteristics and liberation rules, which can effectively realize copper-arsenic separation, reduce cassiterite over-grinding and decrease fine copper loss. It also provides a reference for developing mineral processing technology of similar polymetallic ores from the perspective of deposit genesis and ore genetic characteristics.

Key words: ore genetic characteristics; deposit genesis; metallogenic stage; arsenic-rich copper-tin ore; process mineralogy

0 引言

锡石-硫化物型矿床是我国华南滇、桂、湘等地区极具综合利用价值的核心锡矿资源类型，成因上与花岗岩岩浆期后热液蚀变成矿作用密切相关，多以层状、似层状矿体产出[1-2]。该类矿石中锡石与黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂等硫化物紧密共生，常伴生锌、铅、铋、银等元素，资源综合利用潜力大。受复杂成矿作用影响，矿石常存在矿物组成多样、目的矿物粒度粗细不均、嵌布共生关系复杂、毒砂等含砷有害矿物含量偏高的问题，选矿生产中易出现铜精矿品质不佳、黄铜矿微细粒损失大、锡石脆性过磨导致重选回收率偏低等技术瓶颈[3-4]。

基因矿物加工工程理论表明，矿床成因、矿石性质、矿物特性，是决定矿石可选性的核心内因[3]。本文以某高砷锡石-硫化物型铜锡共生硫化矿为研究对象，剖析矿石基因特征、关键矿物解离行为及成矿控制机理，阐明了影响矿石中铜、锡回收的矿物学因素，提出适合的磨矿—浮选—重选联合选矿工艺，为同类复杂高砷多金属锡铜矿的选矿工艺优化与资源高效利用提供理论支撑。

1 样品与试验方法

样品取自某锡铜共生硫化矿矿区，为具有代表性的原矿矿石。采用X射线荧光光谱与化学滴定法开展原矿多元素化学分析，精确测定主要有价元素、有害元素及伴生元素含量。采用蔡司偏光显微镜、蔡司EVO18扫描电镜(SEM)和AMICS矿物自动分析系统进行矿物鉴定、嵌布特征观察、嵌布粒度与解离度测量。解离度测量分别在磨矿细度为－0.074 mm占50%、55%、60%和65%四个条件下进行，将各磨矿产品制成光片，在显微镜下对锡石、黄铜矿、毒砂等目标矿物进行解离度统计，解离类型分为单体、与目标矿物连生、与脉石裸露连生以及脉石包裹四类。

2 试验结果分析

2.1 矿石化学成分与矿物组成

原矿样品中主要有价元素是铜和锡，含量分别为0.41%和0.76%；主要有害元素砷的含量为1.74%(表1)。结合光学显微镜、扫描电镜分析和矿物自动测量分析结果可获得矿石的矿物组成信息(表2)。矿石中的铜矿物主要为黄铜矿，锡矿物绝大部分为锡石，硫矿物主要为黄铁矿和磁黄铁矿，砷矿物主要为毒砂。脉石矿物主要为石英和方解石，其次为黑云母、辉石、钾长石、石榴石、绿泥石、角闪石、斜长石、绿帘

表1 矿石主要化学成分分析结果

Table 1 Analysis results of main chemical composition of ore /%

成分	Cu	Sn	As	Zn	Bi	S	Fe	Pb
含量	0.41	0.76	1.74	0.04	0.06	6.45	11.82	0.02

表2 矿物组成与相对含量

Table 2 Mineral composition and relative content /%

矿物名称	含量	矿物名称	含量
黄铜矿	1.02	孔雀石	0.03
锡石	0.95	石英	15.74
黄铁矿	6.28	方解石	11.54
毒砂	3.78	黑云母	8.41
磁黄铁矿	4.64	辉石	6.32
褐铁矿	2.23	钾长石	5.63
磁铁矿	0.32	石榴石	5.28
菱铁矿	0.49	绿泥石	4.67
金红石	0.08	角闪石	4.35
黄锡矿	0.07	斜长石	4.22
闪锌矿	0.06	绿帘石	3.98
方铅矿	0.02	白云母	3.21
自然铋	0.04	白云石	2.82
辉铋矿	0.02	萤石	2.59
白钨矿	0.03	磷灰石	0.70
黑钨矿	0.02	榍石	0.08
铜蓝	0.03	其他	0.34

石、白云母、白云石和萤石等。

2.2　重要矿物的嵌布特征

黄铜矿($CuFeS_2$)是矿石中最主要的铜矿物，是铜回收的目的矿物。黄铜矿主要以半自形-它形粒状结构嵌布在脉石矿物中(图1(a))；其次与黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂等硫化物矿物嵌布关系较为密切，多呈复杂的交代结构(图1(b)、1(c))；有时还可见到少量黄铜矿与锡石嵌布在一起(图1(d))。

锡石(SnO_2)是矿石中最主要的锡矿物。锡石主要呈半自形-他形粒状嵌布在脉石矿物中(图2(a))，具有局部富集的特征；其次与黄铜矿、黄锡矿等含铜矿物之间的嵌布关系相对较为密切(图1(d))，偶见部分细粒锡石被包裹在黄铜矿中；此外，可见部分锡石与黄铁矿、毒砂等金属硫化物紧密镶嵌在一起(图2(b))。

毒砂(FeAsS)是矿石中最主要的含砷矿物。毒砂整体粒度较粗，结晶程度也相对较好。其主要呈自形-半自形粒状结构嵌布在脉石矿物中(图3(a))，有时可见毒砂与黄铜矿、锡石等矿物嵌布关系较为密切(图1(c)和图3(b))，另偶见少量毒砂包裹细粒黄铜矿等硫化物(图3(b))。

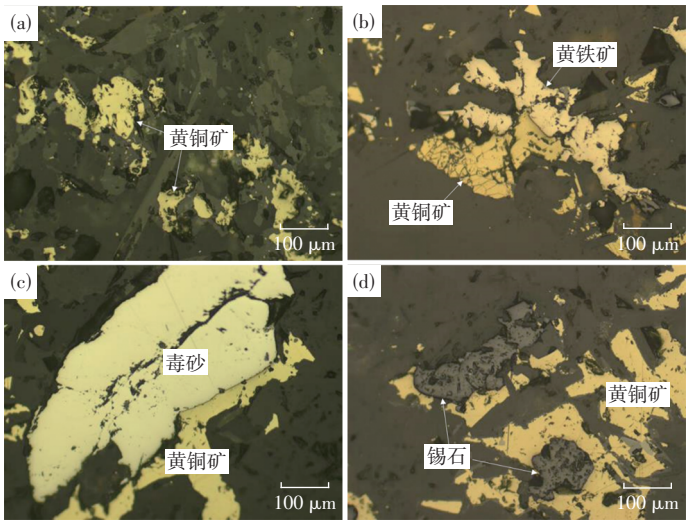


图1　黄铜矿的嵌布特征(反射光)

Fig. 1　The dissemination characteristics of chalcopyrite (Reflected light)

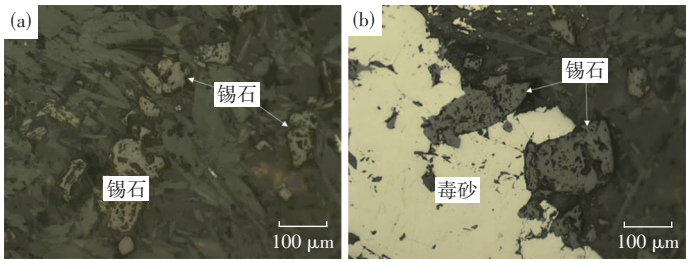


图2　锡石的嵌布特征(反射光)

Fig. 2　The dissemination characteristics of cassiterite (Reflected light)

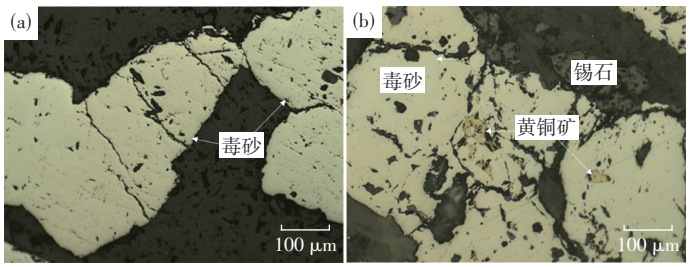


图3　毒砂的嵌布特征(反射光)

Fig. 3　The dissemination characteristics of arsenopyrite (Reflecting light)

2.3 重要矿物的嵌布粒度分布

黄铜矿和锡石是样品中主要回收的目的矿物,其中黄铜矿选别主要通过硫化物浮选回收,而锡石主要通过尾矿重选回收利用[5-6]。毒砂是主要的含砷矿物,对铜的选别和铜精矿的品位与质量有重要影响[7-8]。此次研究分别对锡石、黄铜矿、毒砂的嵌布粒度进行测量与统计,结果如图4所示。

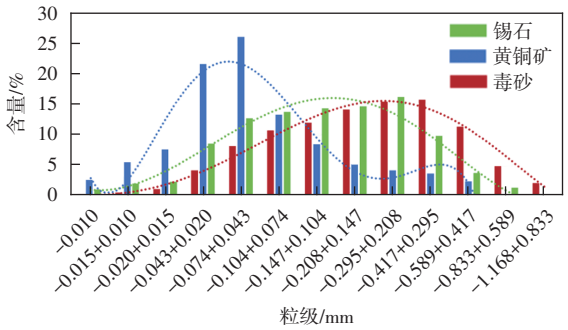


图4 重要矿物的粒度分布特征图

Fig. 4 The grain size distribution diagram of important minerals

由图4可知,锡石的粒度整体粗细不均,在-0.295+0.043 mm范围内相对较为集中,+0.074 mm部分累计占有率可以达到70%以上,0.02 mm以下细粒级部分约占5%。黄铜矿的粒度则相对较细,主要集中在-0.104+0.020 mm范围内,+0.074 mm部分累计占有率仅为36%,而0.020 mm以下细粒级部分占比高达15%左右,这部分微细粒黄铜矿在磨矿过程中单体解离难度较大。毒砂的整体粒度分布则明显较粗,主要分布在-0.598+0.104 mm,+0.074 mm部分累计占有率高达86%。综合考虑到锡石性脆易碎怕过磨、黄铜矿粒度较细难解离的特点,采用阶段磨矿、阶段选别的工艺较为适宜。

2.4 不同磨矿细度下的解离特征

研究采用光学显微镜对不同磨矿细度产品中重要矿物进行了解离度的测量与统计(表3~5),为磨矿细度的确定和硫化物浮选工艺的合理选择提供依据。不同磨矿细度下锡石的粒度分布特征如图5所示。

表3 不同磨矿细度下锡石的解离度

Table 3 The liberation degree of cassiterite under different grinding fineness /%

-0.074 mm粒级占比	单体含量	连生体含量			
		与硫化物连生	与脉石裸露连生		脉石包裹
			≥1/2	<1/2	
50	58.55	5.83	19.72	12.35	3.55
55	70.34	3.73	14.55	8.36	3.02
60	76.12	3.22	11.85	6.81	2.00
65	80.37	2.85	9.77	5.45	1.56

表4 不同磨矿细度下黄铜矿的解离度

Table 4 The liberation degree of chalcopyrite under different grinding fineness /%

-0.074 mm粒级占比	单体含量	连生体含量				
		与硫化铁矿物连生	与毒砂连生	与脉石裸露连生		脉石包裹
				≥1/2	<1/2	
50	56.55	9.80	1.02	10.73	14.73	7.17
55	64.84	5.88	0.96	9.35	13.29	5.68
60	70.67	4.70	0.80	8.17	10.65	5.01
65	76.90	3.33	0.69	5.17	9.77	4.14

表5 不同磨矿细度下毒砂的解离度

Table 5 The liberation degree of arsenopyrite under different grinding fineness /%

-0.074 mm粒级占比	单体含量	连生体含量				
		与黄铜矿连生	与硫化铁矿物连生	与脉石裸露连生		脉石包裹
				≥1/2	<1/2	
50	86.30	1.49	1.83	6.93	2.21	1.24
55	88.84	1.05	1.31	6.04	1.97	0.79
60	91.93	0.93	0.85	4.32	1.45	0.52
65	94.63	0.31	0.52	3.23	1.00	0.31

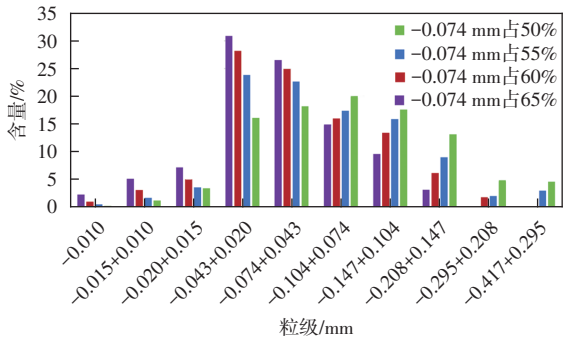


图 5　不同磨矿细度下锡石的粒度分布特征图

Fig. 5　The distribution diagram of grain size of cassiterite under different grinding fineness

由表 3 可知，在 −0.074 mm 粒级含量占 60% 的磨矿细度条件下，锡石单体解离度为 76.12%，单体加脉石富连生体(≥1/2)可达到 88% 左右。与锡石连生的主要是脉石矿物，而硫化物与之连生关系并不十分密切，仅占比 3% 左右。随着磨矿细度增加至 −0.074 mm 粒级含量占 65%，虽然锡石单体解离度虽有进一步提升，但 0.02 mm 以下粒级的锡石占比从 10% 增加至 15% 左右(图 5)，这部分细粒级锡石在重选过程中回收难度大。

由表 4 可知，在 −0.074 mm 占 60% 的磨矿细度下，黄铜矿的单体解离度为 70.67% 左右，虽还没有充分解离，但单体加脉石裸露富连生体(≥1/2)可达到 79% 左右。与黄铜矿连生的主要是脉石矿物，其中与脉石裸露连生＜1/2 占比约 11%，脉石包裹占比约 5%，这部分黄铜矿通过浮选回收难度较大，可能部分易损失至尾矿中。此外，与黄铁矿和磁黄铁矿等硫化铁矿物集合体相连生的黄铜矿占比不足 5%，而黄铜矿与毒砂连生关系并不密切，占比不足 1%。随着磨矿细度增加至 −0.074 mm 粒级含量占 65%，黄铜矿的单体解离度虽然提升至 76.90%，但与脉石裸露连生＜1/2(9.77%)和脉石包裹部分(4.14%)占比减小幅度却十分有限。

由表 5 可知，毒砂整体解离情况很好，在 −0.074 mm 粒级含量占 60% 的磨矿细度下，其单体解离度高达 91.93%。除少量与脉石矿物裸露连生外，毒砂与其他硫化物的连生比例均较低。

3　试验结果讨论

3.1　矿床成因对矿物组成、嵌布关系与粒度的控制

研究样品属于与花岗岩有关的层状似层状锡石-硫化物型矿床，其成矿过程经历了岩浆期后热液蚀变、锡石沉淀、硫化物早阶段、硫化物晚阶段和碳酸盐阶段。不同成矿阶段的演化是理解矿石矿物组成、嵌布关系和粒度特征的根本控制因素。

岩浆期后热液阶段主要发生围岩蚀变，形成了黑云母、绿泥石、白云母、绿帘石等蚀变脉石矿物，为后续矿化准备了空间。随后进入锡石沉淀阶段，热液中锡的溶解度下降，锡石大量结晶，主要与石英、方解石等脉石共生。由于热液活动的不均匀性，锡石粒度分布宽泛，总体偏中粗(+0.074 mm 粒级含量占 70% 以上)，且晶体内部常发育微裂隙，为后期硫化物交代提供通道。随着成矿流体进一步冷却和演化，硫逸度升高，系统进入硫化物阶段。硫化物阶段进一步分为早、晚两个亚阶段。早阶段(中温、中硫逸度)沉淀毒砂、黄铁矿和磁黄铁矿。此时空间充裕，矿物自形程度高、粒度粗，形成硫化物“骨架”。晚阶段(低温、高硫逸度)黄铜矿才开始沉淀，受先期硫化物占据空间限制，只能以细粒它形充填于裂隙和颗粒边缘，形成黄铜矿细粒嵌布、与毒砂连生关系不紧密的赋存特征。碳酸盐阶段形成方解石、白云石脉，对主矿物影响有限。

此外，锡石与硫化物之间的嵌布关系也受成矿阶段控制。由于锡石沉淀早于硫化物阶段，当硫化物阶段的热液活动时，含铜、砷、铁的流体沿锡石颗粒的微裂隙或边缘进行交代，导致部分锡石被黄铜矿、毒砂等硫化物包裹或沿裂隙充填，形成锡石-硫化物连生体。这种“早期矿物被晚期矿物交代”的现象在热液矿床中十分普遍，是锡石与硫化物连生的根本原因。

矿床成因通过控制成矿阶段演化，决定矿物沉淀的先后顺序、生长空间和结晶习性，进而形成了矿石的“基因特征”：毒砂形成早，故自形粗粒，与晚期黄铜矿连生弱；黄铜矿形成晚，故它形细粒，嵌布分散；锡石形成于硫化物之前，故粒度不均且部分被硫化物交代。这些特征从根本上约束了后续磨矿和选别行为。

3.2　矿物物理化学属性对选别行为的制约

矿物自身密度、硬度、脆性、可浮性、表面电化学性质等物理化学属性，构成矿物基因，直接决定其在磨矿、浮选、重选过程中的响应差异，是选矿工艺选型的直接依据。

锡石高密度、高硬度但脆性极强，决定其适合重选回收，但不耐细磨；过磨会大量生成 −0.02 mm 微细粒，超出常规重选回收适宜的粒级范围。当磨矿细度从 −0.074 mm 粒级含量占 60% 提高到 65% 时，−0.02 mm 细粒锡石的占比从约 10% 急剧增至 15%，而锡石单体解离度的提升幅度仅约 4 个百分点。

因此,锡石的“脆性基因”决定了对一段磨矿细度不宜过细,并需要为-0.02 mm细粒锡石配备浮选等回收手段。

黄铜矿天然可浮性较好,但嵌布粒度细。一段粗磨难以完全解离,盲目整体细磨又会造成锡石过粉碎。因此,可采用阶段磨矿—阶段选别方式:在一段磨矿后先将已解离的黄铜矿单体和富连生体浮选出来,得到铜粗精矿,再对粗精矿进行再磨再选,获得合格铜精矿。

毒砂总体呈粗粒自形,在粗磨下即高度解离。毒砂的可浮性在酸性到弱碱性条件下与黄铜矿相近,但在强碱性条件下,毒砂表面易氧化生成砷酸铁等亲水膜,可浮性急剧下降[7-9]。利用这一矿物基因特性,可通过高碱调浆实现铜砷高效分离,为优先浮铜、铜砷分离提供了十分有利的条件。若采用全硫化物混合浮选,大量单体毒砂进入精矿,后续分离难度大,必然降低铜精矿品质与回收率。

3.3 基于“三矿基因”特征的选矿工艺建议

从基因矿物加工工程的视角来看,矿床成因、矿石性质与矿物特性三者共同构成了制约矿石可选性的内因体系。就本矿石而言,这三个层次的基因可按照从宏观到微观的尺度逐级展开。矿床基因主要体现为矿床成因和地质体类型特点。该矿属于与花岗岩有关的层状似层状锡石-硫化物型矿床,成矿过程经历了矽卡岩阶段、锡石沉淀阶段、硫化物早阶段和硫化物晚阶段。在这一成矿演化序列中,毒砂形成于硫化物早阶段,结晶空间充裕,故发育自形粗粒结构;黄铜矿形成于硫化物晚阶段,由于早期硫化物已占据大部分空间,其生长受迫,故呈它形细粒;锡石沉淀于硫化物阶段之前,其晶体内部常发育微裂隙,为后期热液交代提供了通道。这一矿床基因进一步传递到矿石基因层面,即矿石集合体组成和共生关系。成矿时序直接塑造了矿物的嵌布特征与粒度分布,毒砂与黄铜矿之间因结晶时间间隔大、生长空间不重叠,导致两者嵌布关系不紧密、连生比例极低;黄铜矿与黄铁矿、磁黄铁矿因沉淀时间相近、交代作用强烈,故嵌布紧密;锡石因形成早,部分被晚期硫化物沿裂隙交代,形成锡石-硫化物连生体。再进一步,这些矿石集合体特征通过矿物基因,即矿物基本单元的物理化学性质,具体化为选别行为:锡石比重虽大但性脆,过磨后细粒级增加,重选回收困难;黄铜矿天然可浮性好,但其细粒嵌布难完全解离;毒砂自形粗粒、晶界平直,在粗磨下即高度解离,且在高碱度条件下表面易氧化而受到抑制。

综上,从矿床基因到矿石基因再到矿物基因,三个层级依次传递、逐级约束,共同构成了从矿床源头到选矿响应的完整基因链条,基于三者的协同作用对选矿工艺提出以下建议:第一,一段磨矿细度在-0.074 mm粒级含量占60%左右,可平衡黄铜矿解离需求与锡石防止过磨要求,既保证铜、锡、毒砂基本解离,又严控微细粒锡石生成量;第二,利用毒砂与黄铜矿嵌布关系不密切、高碱易抑制的基因特征,采用优先浮铜、高碱抑砷流程,从源头阻隔单体毒砂进入铜精矿,实现铜砷分离;第三,针对黄铜矿细粒连生体难解离特点,采用铜粗精矿再磨再选工艺,获得合格低砷铜精矿;第四,浮选尾矿开展硫化物脱硫浮选,回收硫精矿;第五,脱硫尾矿剔除硫化物干扰后,采用重选回收粗粒锡石,对-0.02 mm微细粒锡石采用浮选工艺,实现全粒级锡资源高效回收。

4 结论

该矿石为典型高砷锡石-硫化物型锡铜共生硫化矿,铜矿物以黄铜矿为主,锡矿物为锡石,砷矿物为毒砂。矿床热液成矿演化规律决定了毒砂早结晶粗粒自形、黄铜矿晚阶段充填呈细粒它形、锡石先期沉淀后期被硫化物交代等矿石固有特征,这是造成铜、锡、硫矿物粒度、嵌布关系及解离行为差异的根本地质内因。基于矿石基因与矿物分选属性,推荐采用一段磨矿-0.074 mm粒级含量占60%,优先浮铜抑砷—铜粗精矿再磨再选—浮选尾矿脱硫—脱硫尾矿重选收锡—微细粒锡石辅助浮选联合工艺。该工艺契合矿物嵌布特征与解离规律,可有效解决铜精矿砷超标、锡石过磨损失、铜锡回收率低等难题,为同类高砷复杂锡铜矿的选矿工艺开发与生产优化提供重要理论与技术依据。

参考文献

[1] 蒋少涌,赵葵东,姜海,等. 中国钨锡矿床时空分布规律、地质特征与成矿机制研究进展[J]. 科学通报,2020,65(33):3730-3745.
Jiang Shaoyong, Zhao Kuidong, Jiang Hai, et al. Spatiotemporal distribution, geological characteristics and metallogenic mechanism of tungsten and tin deposits in China: an overview[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(33): 3730-3745.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 王莉, 陈萍, 姚磊. 我国锡矿资源形势及对策分析[J]. 中国矿业, 2019, 28(11): 44-47.
Wang Li, Chen Ping, Yao Lei. Analysis of the trend of tin resources in China and its enlightenments[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(11): 44-47.

[5] 吕中海, 胡卫波, 张俊, 等. 锡矿石选矿工艺研究现状与进展[J]. 现代矿业, 2009, 25(10): 19-22.
Lü Zhonghai, Hu Weibo, Zhang Jun, et al. Study status and progress of tin ore dressing process[J]. Modern Mining, 2009, 25(10): 19-22.

[6] 赵春贤, 平福先, 张宁翠, 等. 多金属复杂锡铜硫化矿选矿试验[J]. 现代矿业, 2017, 33(7): 60-62, 65.
Zhao Chunxian, Ping Fuxian, Zhang Ningcui, et al. Beneficiation test of polymetallic complex tin-copper sulfide ore[J]. Modern Mining, 2017, 33(7): 60-62, 65.

[7] 李伟, 陈敏, 陈月花, 等. 云锡某选矿厂铜锡共生硫化矿铜精矿降砷试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2016(3): 6-9.
Li Wei, Chen Min, Chen Yuehua, et al. Arsenic separation experiments on copper-tin symbiotic copper concentrate in a dressing plant of Yunnan tin company[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2016(3): 6-9.

[8] 熊玉旺. 云南某锡、铜、砷、银多金属共生硫化矿工艺矿物学研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2016(2): 1-8.
Xiong Yuwang. Study on the process mineralogy of tin, copper, arsenic and silver polymetallic ore deposits in Yunnan[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2016(2): 1-8.

[9] 董敬申, 刘全军, 纪慧超, 等. 硫化铜、砷矿物浮选分离的研究进展[J]. 有色金属工程, 2020, 10(7): 74-81.
Dong Jingshen, Liu Quanjun, Ji Huichao, et al. Research progress on flotation separation of copper sulfide and arsenic sulfide minerals[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(7): 74-81.

（本文编辑 汪东芳）

【缅怀寄语】

2025年8月21日，孙传尧院士永远离开了我们。他曾说：“为了中国的选矿事业在本世纪中叶居世界最强，我还要尽微薄但永不松懈的力量。”这番话语，至今在我耳畔回响。孙传尧院士一生扎根矿冶事业，始终站在学术最前沿，开创性提出“基因选矿、和谐选矿、智能选矿、绿色选矿”四大理念，积极倡导以矿床成因、矿石性质、矿物物性等“三矿”基因特性为基础，构建并应用大数据库，突破传统研发模式，形成高效低耗选矿新方案。

本人有幸参与孙院士主持的基因矿物加工系列研究项目，多次现场聆听教诲。他对“三矿基因”理论的深刻阐释、对青年科研人员的殷切期望，坚定了我从矿床成因源头出发、以矿石基因特性指导工艺设计的研究方向。本文正是这一理念的践行——从成矿阶段分析矿物嵌布差异，据此提出差异化的选矿工艺，顺应矿石本性，实现铜锡高效分离。先生虽已远行，但精神永续。作为后辈，唯有在科研道路上持续前行，让基因矿物加工工程的火种传承不息，才是对先生最好的缅怀与告慰。

——冯　凯