doi: 10.20239/j.issn.1671-9492.2026.09.005

工艺矿物学在选矿产品高值化利用技术开发中的应用

——以锡粗精矿研究为例

叶小璐[1],牛耀辉[2],王 伟[2],李 卫[2],李荣峰[2],任晓东[2]

(1. 矿冶科技集团有限公司,北京 100160;
2. 西乌珠穆沁旗银漫矿业有限责任公司,内蒙古 锡林郭勒盟 024400)

摘 要:某银锡多金属矿生产中,粗砂摇床与细砂摇床精矿合并得到锡品位9.53%的锡粗精矿,为实现该选矿产品高值化利用,开展系统的工艺矿物学研究。采用化学多元素分析、AMICS矿物自动分析系统、光学显微镜、扫描电镜等测试手段,查明试样化学组成、矿物赋存状态、嵌布关系以及锡石粒度-解离特征,厘清制约锡石分选提质的关键矿物学因素。结果表明,粗精矿中锡主要赋存于锡石,少量赋存于黄锡矿;有害杂质砷主要来源于毒砂,氟来源于电气石与萤石,试样中砷、氟含量分别为1.31%、1.62%。锡石整体单体解离度为70.19%,连生体以锡石-脉石连生为主,连生矿物粒度集中在0.020~0.30 mm中粗粒区间;锡石解离度随粒度减小显著提升,+0.30 mm粗粒级解离度仅51.74%,存在大量脉石连生体。黄铁矿、毒砂密度与锡石接近,但可浮性差异明显,可通过浮选脱除;电气石、萤石与锡石紧密连生,易造成锡精矿氟杂质超标。基于矿物学特征提出技术思路:优先浮选脱除黄铁矿、毒砂以降低砷硫干扰,对粗粒锡石实施选择性再磨后重选富集,同时控制含氟脉石的不利影响。本研究仅基于矿物学推演,可为锡粗精矿精选提质及高值化利用技术开发提供矿物学依据。

关键词:银锡多金属矿;工艺矿物学;粗精矿;锡石;高值化利用

中图分类号:TD91;TD952 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-9492(2026)09-0047-06

Application of Process Mineralogy in the Development of High-value Utilization Technology for Mineral Processing Products: A Case Study of Tin Rough Concentrate

Ye Xiaolu[1], Niu Yaohui[2], Wang Wei[2], Li Wei[2], Li Rongfeng[2], Ren Xiaodong[2]

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;
2. West Wuzhumuqin Silver Mining Co., Ltd., West Ujimqin Banner, Xilingol League 024400, Inner Mongolia, China)

Abstract: The tin rough concentrate with Sn grade of 9.53% is obtained by combining concentrates from coarse-sand and fine-sand shaking tables in a silver-tin polymetallic ore plant. To realize high-value utilization of this processing product, systematic process mineralogy research was carried out. Multiple testing methods including multi-element chemical analysis, AMICS automatic mineral analysis system, optical microscope and scanning electron microscope were adopted to determine chemical composition, mineral occurrence, intergrowth relationship, as well as particle size and liberation characteristics of cassiterite, and identify key mineralogical constraints for cassiterite upgrading. The results show that tin mainly occurs in cassiterite, and a small proportion is hosted in stannite. Harmful arsenic originates from arsenopyrite while fluorine comes from tourmaline and fluorite, with As and F contents of 1.31% and 1.62% respectively. The overall liberation degree of cassiterite reaches 70.19%, and most intergrowths are cassiterite-gangue assemblages distributed within 0.020—0.30 mm medium-coarse fraction. Cassiterite liberation increases evidently with the decrease of particle size; the liberation degree of +0.30 mm

收稿日期:2026-03-03
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。

coarse fraction is only 51.74% with abundant gangue intergrowths. Pyrite and arsenopyrite have similar density with cassiterite but differ greatly in floatability, which can be removed by flotation. Tight intergrowth between cassiterite and fluorine-bearing tourmaline-fluorite readily causes excessive fluorine impurity in tin concentrate. According to mineralogical characteristics, a technical route is proposed: remove pyrite and arsenopyrite by flotation to reduce arsenic-sulfur interference, adopt selective regrinding for coarse-grained cassiterite followed by gravity concentration, and mitigate adverse effects caused by fluorine-bearing gangues. This work is derived from mineralogical analysis and can provide mineralogical reference for upgrading and high-value utilization of tin rough concentrate.

Key words: silver-tin polymetallic ore; process mineralogy; tin rough concentrate; cassiterite; high-value utilization

锡金属具有多项良好的理化特性，是战略性新兴产业发展的关键元素。中国锡资源丰富但易选优质资源的逐年减少，目前生产中的矿石多以复杂多金属矿为主，锡石的共伴生矿物嵌布特征复杂，整体综合利用率不高。因此，在锡资源开发利用，尤其是高值化利用技术研发过程中，开展系统且有针对性的工艺矿物学研究愈发关键。

国内已有大量针对锡多金属原矿的工艺矿物学研究，揭示锡石嵌布粒度、解离特性对分选的制约[1-3]，但现有研究多聚焦原矿性质解析，针对摇床产出锡粗精矿这类选矿中间产品的系统矿物学解析较少。锡粗精矿虽经过重选初步富集，但仍伴生毒砂、电气石、萤石等杂质矿物，砷、氟杂质超标是限制粗精矿提质、实现高值利用的主要障碍[4]。

某银锡多金属矿采用分级摇床得到锡品位9.53%的锡粗精矿，如能将粗精矿的品位提高到40%以上，可实现锡资源的高值化利用。因此，针对锡粗精矿开展工艺矿物学研究，通过锡的赋存状态、重要矿物的嵌布关系和解离特征等研究，阐明制约锡石分选的矿物学因素，为进一步实现锡粗精矿高值化利用技术开发提供依据。

1 试验样品及研究方法

1.1 试验样品的选取及制样

该银锡多金属矿采用浮选回收银、铜、铅、锌等硫化物矿物，浮选尾矿进入摇床重选回收锡石的“浮—重—浮”锡多金属矿总体流程(图1)，重选环节采用分级重选的方式，由粗砂摇床和细砂摇床的精矿合并形成锡粗精矿，锡粗精矿再进入精选环节形成最终精矿产品。针对锡粗精矿开展工艺矿物学研究，以厘清精选环节影响提高锡品位的矿物学因素。

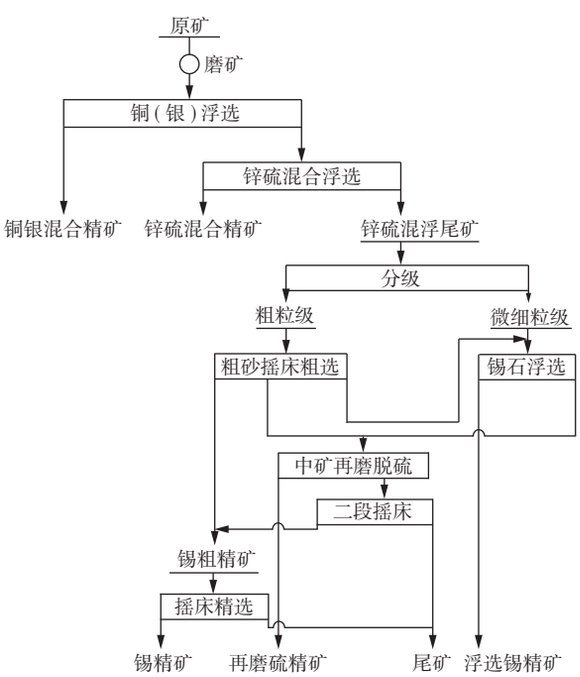


图1 现场试验流程及样品选择

Fig. 1 Field flowsheet and sample selection

1.2 研究方法

1.2.1 矿物组成及相对含量

矿物组成及相对含量的研究采用综合法进行：根据化学分析结果，采用光学显微镜和AMICS矿物自动分析系统对矿物种类以及嵌布特征进行研究，同时采用扫描电镜和电子探针对矿物微区成分进行分析。在矿物学研究的基础上，结合化学分析结果，基于每种矿物的元素含量，通过元素的平衡计算确定。

1.2.2 矿物嵌布特征研究

选矿产品粉末样品由环氧树脂胶结成砂光片后，通过细磨、精磨和抛光后，采用研究级光学显微镜在反光条件下进行重要矿物的嵌布特征研究。

1.2.3　矿物粒度和单体解离特征研究

矿物粒度和单体解离特征采用矿物显微图像测量法进行。采用带直线测微尺的显微镜目镜,在200倍物镜下,按统一的方向,以1 mm为间距,通过机械台左右移动样品光片,读取微尺在目标矿物的粒度,以及单体和不同连生体上的截距长度。

对于矿物的实际粒径,按比例与测微尺上读出的粒度进行换算。

矿物单体解离度和连生体比例的计算公式为:

$$L_0=\frac{N_0}{\sum N_i} \tag{1}$$

式中,L_0为单体解离度或者连生体比例,%;N_0为目标类型所有颗粒的测微尺截距长度之和;N_i为某种类型所有颗粒的测微尺截距长度之和。(说明:本研究采用直线截距法统计矿物解离度,以线段截距长度表征矿物占比,该统计方法存在固有的假设局限性;样品制备环氧树脂固结砂光片,制备多块光片完成观测统计。)

2　结果与讨论分析

2.1　试样化学多元素分析

由化学多元素分析结果(表1)可知,锡粗精矿Sn品位为9.53%。同时有害元素As的含量达到1.31%,F的含量达到1.62%,应注意这些有害元素在精选过程中与Sn的相关性。

2.2　试样矿物组成及相对含量

试样矿物组成及相对含量见表2。由表2可知,粗精矿中金属矿物主要为锡石,其次为黄铁矿、毒砂,少量的闪锌矿、脆硫锑铅矿、黄锡矿、黄铜矿等。脉石矿物主要有石英,其次为绢云母、电气石,少量的菱铁矿、萤石、钠长石、高岭石、绿泥石、方解石等。

2.3　试样中重要矿物的嵌布特征

2.3.1　锡石

锡石是粗精矿中最主要的有价矿物,是锡精选的目的矿物。锡石主要以粒状单体形式存在(图2(a)),其次以不规则粒状与脉石连生(图2(b)),有时可见细粒锡石被包裹在黄锡矿中(图2(c)),偶尔可见锡石与白铁矿、黄铁矿、毒砂等硫化物连生(图2(d))。

锡石多样的嵌布特征表明,试样中既有单体锡石,又存在脉石包裹、硫化物连生的锡石,仅依靠单一重选很难直接获得高品质锡精矿,连生杂质矿物是造成精矿砷、氟超标的重要原因[5]。

2.3.2　黄锡矿

黄锡矿多与黄铁矿、闪锌矿等硫化物连生(图3(a))。此外,常见细粒黄锡矿与锡石连生(图3(b)),偶尔可见黄锡矿以单体形式存在。

2.3.3　黄铁矿

黄铁矿是粗精矿中最主要的金属硫化物矿物。黄铁矿主要为单体(图4(a)),其次多与脉石连生(图4(b)),有时可见与脆硫锑铅矿、黄铜矿连生,偶见与锡石、黄锡矿等连生。

2.3.4　毒砂

毒砂是粗精矿中最主要的含砷矿物,多以半自形粒状单体形式存在(图5(a)),有时可见与锡石、硫化物等矿物连生(图5(b))。

2.3.5　电气石、萤石

粗精矿中含氟矿物包括了电气石和萤石。其中,电气石作为最主要的含氟矿物,也是最主要的脉石矿物,部分电气石与锡石的连生关系紧密,常见电气石与锡石连生或包裹(图6(a))。萤石也是试样中的一种含氟矿物,有时可见萤石与锡石连生(图6(b))。

2.4　试样中锡石的粒度分布和解离特征

2.4.1　粗精矿全粒级试样中锡石的粒度分布特征和解离情况

为了解粗精矿中锡石整体的粒度分布特征和解离情况,针对其中锡石的粒度、单体解离度和连生关系进行了分析,分析结果分别见表3、4。

由表3可知,锡石的粒度基本集中在0.020~0.30 mm。+0.1 mm粒级的分布率达到了50.85%,−0.043 mm粒级的分布率仅占13.93%。从粒度组成来看,中粗粒锡石含量较高,利于锡石重选;连生体部分的锡主要集中在+0.074 mm粒级部分。

表1　试样化学多元素分析结果

Table 1　Results of chemical multi-element analysis of the sample　/%

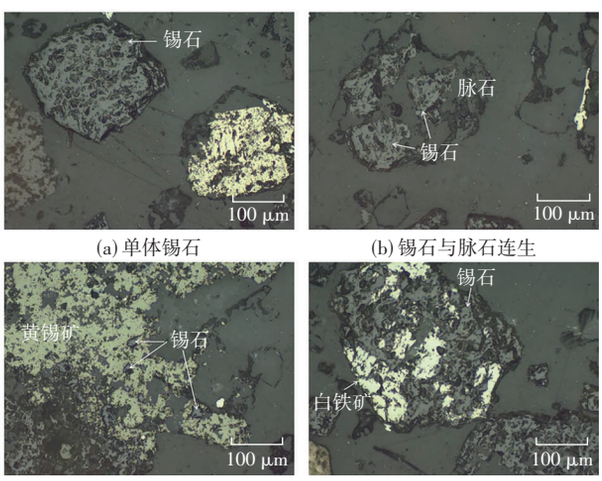
组分	Sn	Cu	Zn	Pb	S	Fe	Sb	As
含量	9.53	0.10	0.35	0.11	4.27	8.05	0.13	1.31
组分	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	TiO_2	F
含量	48.15	2.29	0.56	9.10	1.80	0.50	0.27	1.62

表 2 试样矿物组成及相对含量

Table 2 Mineral composition and relative content of the sample /%

矿物名称	相对含量	矿物名称	相对含量
锡石	12.09	电气石	12.20
黄锡矿	0.13	菱铁矿	4.97
黄铁矿	5.69	萤石	2.87
毒砂	2.85	钠长石	2.11
闪锌矿	0.58	高岭石	1.90
脆硫锑铅矿	0.27	绿泥石	1.90
黝铜矿	0.11	方解石	1.32
黄铜矿	0.06	金红石	0.37
黑钨矿	0.11	钾长石	0.30
石英	34.54	氟铝钙石	0.19
绢云母	14.66	其他	0.46

注:矿物组成采用AMICS矿物自动分析系统结合光学显微镜研究结果获得;白铁矿含量极低,归并至“其他”项。

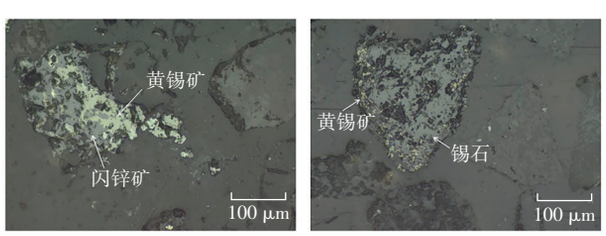


(a) 单体锡石 (b) 锡石与脉石连生

(c) 锡石被黄锡矿包裹 (d) 锡石与白铁矿连生

图 2 锡石在粗精矿中的嵌布特征

Fig. 2 Characteristics of cassiterite in the rough concentrate

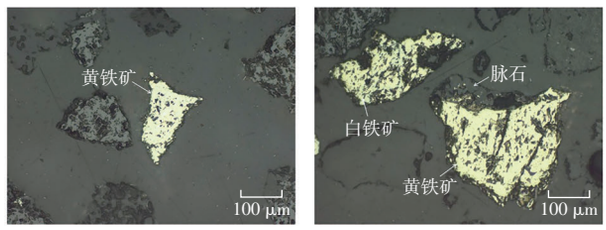


(a) 黄锡矿与闪锌矿连生 (b) 细粒黄锡矿嵌布在锡石边缘

图 3 黄锡矿在粗精矿中的嵌布特征

Fig. 3 Characteristics of stannite in the rough concentrate

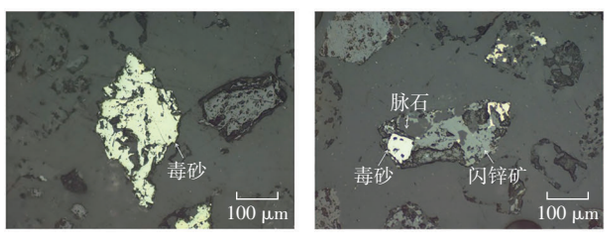
由表4可知,锡石的单体解离度为70.19%;连生体主要为与脉石连生,连生比例为22.54%,其次为与黄铁矿、黄锡矿连生,连生比例分别为3.73%、2.40%,另有少量的与黄铜矿、闪锌矿等其他硫化物连生。



(a) 黄铁矿单体 (b) 黄铁矿与脉石连生

图 4 黄铁矿在粗精矿中的嵌布特征

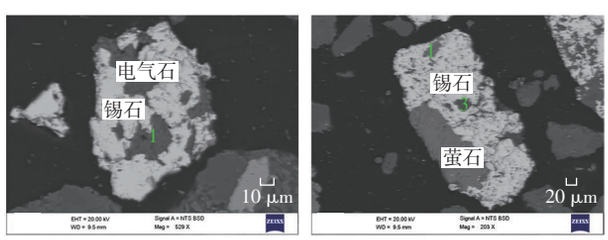
Fig. 4 Characteristics of pyrite in the rough concentrate



(a) 毒砂单体 (b) 毒砂、脉石与闪锌矿连生

图 5 毒砂在粗精矿中的嵌布特征

Fig. 5 Characteristics of arsenopyrite in the rough concentrate



(a) 电气石被锡石包裹 (b) 萤石与锡石连生

图 6 电气石、萤石在粗精矿中的嵌布特征

Fig. 6 Characteristics of tourmaline and fluorite in the rough concentrate

表 3 锡石的粒度分布特征

Table 3 Characteristics of grain size distribution of cassiterite

粒级/mm	整体		连生体	
	分布率/%	累计/%	分布率/%	累计/%
+0.3	4.13	4.13	9.32	9.32
−0.3+0.2	13.20	17.32	17.77	27.09
−0.2+0.15	15.37	32.70	20.35	47.44
−0.15+0.10	18.16	50.85	21.57	69.01
−0.10+0.074	17.81	68.66	14.92	83.93
−0.074+0.043	17.42	86.07	9.83	93.76
−0.043+0.020	11.61	97.68	5.32	99.08
−0.020	2.32	100.0	0.92	100.0

2.4.2 粗精矿各分级样品中锡石的解离特征

现场采用摇床重选的方式提高锡精矿品质,为了给粗精矿精选工艺提供更有针对性的建议,将粗精矿

表 4　粗精矿中锡石的解离特征

Table 4　Dissociation characteristics of cassiterite in the rough concentrate　/%

单体	连生体			
	与脉石	与黄铁矿	与黄锡矿	与其他硫化物
70.19	22.54	3.73	2.49	1.05

进行了粒级筛分,对每个粒级样品中锡石的解离特征进行了分析,分析结果见表5。

由表5可知,锡石单体解离度随粒度变细逐渐升高。−0.10 mm以下各粒级锡石单体解离度均超过 80%, 其 中 −0.10+0.074、−0.074+0.043、−0.043+0.020 和 −0.020 mm粒级的单体解离度依次为83.16%、87.79%、93.06%、97.15%。各粒级内锡石连生体以与脉石连生为主,其次与黄铁矿、白铁矿、黄锡矿连生,少量和黄铜矿、闪锌矿等其他硫化物连生。

2.5　试样中锡石分选的矿物学制约因素

2.5.1　锡的赋存状态

粗精矿中绝大部分锡都赋存于锡石中,仅有0.38%赋存于黄锡矿中(表6)。因此,以锡石为目的矿物的重选工艺,可以确保锡的回收率。

2.5.2　脉石矿物组成对重选效果的影响

粗精矿中的杂质矿物主要包括黄铁矿、毒砂以及脉石矿物。脉石矿物主要是石英、绢云母、电气石,其次为菱铁矿、萤石。这些矿物和锡石的相对密度见表7。

由表7可知,黄铁矿、毒砂的相对密度与锡石较接近,但由于黄铁矿、毒砂的可浮性与锡石差别较大,且二者与锡石的连生关系并不密切,因此可采用浮选优先脱除这些硫化物,减少对后续重选作业的干扰,并提高锡精矿的品质。硫化物在粗精矿中的总占比为6%~7%,该部分硫化物可在形成粗精矿后通过浮选除杂,也可在形成粗精矿之前通过强化浮选脱除。

脱硫后,脉石矿物与锡石之间存在较大密度差。同时从粒度组成来看,86%左右的锡石主要分布在+0.043 mm以上粒级,处于重选易选范围。因此,重选可实现锡石的有效富集。

需要注意的是,脉石矿物中电气石含量为12.20%,是主要的含氟矿物;此外萤石也是含氟矿物,含量在3%左右。部分电气石及萤石与锡石连生,可能导致锡精矿中氟含量偏高。

表 5　分级样品中锡石的解离特征

Table 5　Dissociation characteristics of cassiterite in the fractionated sample

粒级/mm	产率/%	Sn品位/%	单体/%	连生体/%			
				与脉石	与黄铁矿	与黄锡矿	与其他硫化物
+0.30	10.46	9.23	51.74	36.73	6.52	3.25	1.76
−0.30+0.20	8.37	9.21	58.26	32.82	4.95	2.59	1.38
−0.20+0.15	10.96	10.11	67.65	27.10	2.51	2.06	0.67
−0.15+0.10	13.89	11.12	75.81	19.90	2.24	1.54	0.50
−0.10+0.074	11.04	9.34	83.16	13.03	2.06	1.33	0.42
−0.074+0.043	17.34	7.75	87.79	9.96	1.56	0.58	0.11
−0.043+0.020	21.24	11.41	93.06	5.46	1.00	0.38	0.10
−0.020	6.70	9.33	97.15	2.02	0.54	0.21	0.080

表 6　粗精矿中锡的分布平衡计算

Table 6　Distribution balance calculation of Sn in the rough concentrate　/%

矿物名称	矿物相对含量	锡平均含量*	金属量	占有率
锡石	12.09	78.60	9.50	99.62
黄锡矿	0.13	27.53	0.03	0.38
合计				100.0

注:*锡平均含量采用矿物理论成分含量。

表 7　粗精矿中重要矿物的相对密度

Table 7　Relative densities of main minerals in the rough concentrate　/(g•cm^{-3})

项目	锡石	黄铁矿	毒砂	石英	绢云母	电气石	菱铁矿	萤石
相对密度	6.8~7.0	4.9~5.2	6.10	2.65	2.76~3.00	3.03~3.25	4.0~4.5	3.18

电气石与萤石作为主要含氟脉石矿物,其密度与锡石差距明显,但二者和锡石紧密连生,单纯依靠重力分选难以有效分离,连生结构是造成锡精矿氟超标的重要矿物学诱因[5]。

2.5.3 磨矿对提高锡精矿品位的意义

由锡石解离特征研究可知,70.19%的锡石以单体形式存在,在现有解离条件下能够得到较高品位锡精矿。但仍有22.54%的锡石与脉石矿物连生,该部分锡石粒度大多大于0.074 mm,整体粒度偏粗。因此,若要获得高品位精矿,可通过进一步磨矿提升锡石单体占比,减少因连生关系造成杂质混入最终精矿。锡石具有性脆易碎的特点,为防止细粒锡石发生过粉碎,可分级对粗粒锡石实施选择性再磨,在保证锡回收率的前提下进一步提升锡精矿品位。

本研究仅定性阐明粗粒选择性再磨的作用,受研究条件限制,未定量给出目标解离度对应的磨矿细度,合适的再磨工艺参数需要结合磨矿—分选试验进一步确定,磨矿作业需要严格控制强度,防范锡石过粉碎造成金属流失。

3 结论

1)综合锡粗精矿中锡石粒度分布、单体解离特征以及脉石矿物组成特征,为实现锡粗精矿提质,建议优先浮选脱除黄铁矿、毒砂等硫化物,降低砷、硫杂质对后续重选作业和锡精矿产品质量的干扰;针对粗粒锡石进行选择性再磨,避免锡石过粉碎,再通过重选实现锡石富集;分选过程中应重视电气石、萤石等含氟脉石带来的氟杂质问题。本工艺思路基于矿物学研究推演,可供后续选矿试验参考。

2)本文仅完成锡粗精矿的工艺矿物学解析,明确制约粗精矿提质的矿物学瓶颈,并未开展实际分选试验。后续可开展磨矿—分选条件试验,验证上述技术思路的可行性,探究砷、氟有害杂质的脱除效果,为本类锡选矿中间产品的高值化利用提供技术支撑。

参考文献

[1] 毛景文,宋世伟,刘鹏,等. 锡矿床研究现状及发展趋势[J]. 岩石学报,2023,39(5):1233-1240.
Mao Jingwen, Song Shiwei, Liu Peng, et al. Current progress and development trend of the research on tin deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 39(5): 1233-1240.

[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] 柳彦昊,韩彬,宋强,等. 锡尾矿资源综合利用研究进展[J]. 有色金属(选矿部分),2024(10):1-11.
Liu Yanhao, Han Bin, Song Qiang, et al. Research progress on comprehensive utilization of tin tailings resources[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(10): 1-11.

[4] 杨凯志,邱显扬,李汉文,等. 某锡多金属矿浮—重—反浮选中矿中铜锌锡的分离回收试验[J]. 金属矿山,2025,54(3):78-84.
Yang Kaizhi, Qiu Xianyang, Li Hanwen, et al. Experimental study on the separation and recovery of copper, zinc and tin from flotation-gravity-reverse flotation middling in a polymetallic tin ore[J]. Metal Mine, 2025, 54(3): 78-84.

[5] 梁增永,邓海波. "磁—浮—重"联合流程分选某锡石多金属硫化矿的研究[J]. 有色金属(选矿部分),2012(1):29-32,39.
Liang Zengyong, Deng Haibo. Research on beneficiation of cassiterite polymetallic sulfide ore by combined process of magnetic separation-flotation-gravity concentration[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2012(1): 29-32, 39.

(本文编辑 刘水红)