

重选尾矿细泥锡石浮选回收实验

邢姜¹, 邓久帅¹, 张浩¹, 王体琛¹, 黄艳², 吴伯增^{1,3}

(1. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 广西华锡矿业有限公司铜坑矿业分公司, 广西 河池 547219; 3. 广西高峰矿业有限责任公司, 广西 河池 547219)

摘要: 广西大厂矿区选厂在生产中采用摇床重选的方法对锡石进行回收, 存在锡石难选、细泥损失大等问题。为强化尾矿中细粒级锡石的回收, 提高锡选别作业的回收率, 对该选厂摇床重选得到的尾矿开展了锡石细泥回收浮选实验研究。实验结果表明, 通过“预先脱硫-锡石浮选”工艺流程, 在条件实验的基础上, 确定采用 2 000 g/t 捕收剂, 800 g/t 活化剂和 6 g/t 具有消泡功能的辅助捕收剂药剂制度进行浮锡实验, 最终重选尾矿选锡闭路实验得到锡品位为 7.41%, 回收率 47.61% 的锡精矿, 指标良好, 经济可行。

关键词: 锡石细泥; 浮选; 脱硫; 回收率

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2025.02.010

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 02-0065-07

引用格式: 邢姜, 邓久帅, 张浩, 等. 重选尾矿细泥锡石浮选回收实验[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(2): 65-71.

XING Jiang, DENG Jiushuai, ZHANG Hao, et al. Flotation recovery of fine slime cassiterite from gravity tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(2): 65-71.

锡有熔点低、耐腐蚀和易改变其他金属性能等优点^[1], 在现代国防、电子和冶金等行业用途广泛。据统计, 我国锡金属资源丰富, 总量达到 113.07 万 t, 其中云南、广西和湖南等省份尤为集中^[2-4]。以广西大厂的锌锡多金属矿和云南文山都龙的铜锌锡多金属矿为例^[5], 此类含锡多金属矿的主要特点包括品位较低、嵌布粒度细以及共伴生元素间关系复杂。锡石传统选矿工艺是重选^[6], 但实践发现在-0.028 mm 粒级的锡石, 重选效果不理想^[7]。在处理锡石过程中, 由于锡石性脆特性, 且浮选作业通常安排在硫化矿浮选作业后^[8], 易导致锡石的过粉碎, 从而以微细粒的形式损失于尾矿中^[9]。因此, 提升这些微细粒锡石的作业回收率, 对锡资源的高效开发利用至关重要。

“重-浮”联合工艺是目前回收微细粒锡石最具应用前景的方法之一^[10-14], 但在实际生产中, 该工艺对溢流中细粒级锡的回收效果差^[15], 仍需要探

索尾矿中细粒级锡石的强化回收技术。本研究针对广西大厂矿区选厂重选尾矿开展了细粒锡石的浮选实验研究, 基于工艺矿物学的研究, 先进行尾矿先浮选脱硫, 后续再进行浮锡实验^[16], 浮选效果得到提升, 锡资源在尾矿中的高效回收得以实现。

1 矿样性质

实验矿样来自广西大厂矿区选厂重选尾矿, -0.074 mm 80.36%, 粒度较细, 此粒级下锡金属分布率高达 98.45%, 已完全单体解离, 无需进一步磨矿。其主要金属矿物包括锡石、铁闪锌矿、脆硫锑铅矿和磁黄铁矿, 脉石矿物主要是方解石与石英。原矿性质研究显示, 试样主要有以下特征: 硫化矿物含量较高, 会影响锡的回收率^[17]; 锡品位为 0.76%, 易获得高质量锡精矿; 锡金属集中在-0.074 mm 粒级中, 其中-0.043 mm 79.63%,

收稿日期: 2024-05-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52274283)

作者简介: 邢姜(2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向为矿产资源综合利用

通信作者: 邓久帅(1983-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事矿产资源综合利用等研究工作。

适宜采用浮选法回收锡石。试样多元素分析结果见表 1，为查明各元素存在的主要矿物形式，采用 BPMA 测定试样的矿物组成，结果见表 2，试样粒度分析结果见表 3。

表 1 尾矿试样的化学多元素分析/%
Table 1 Chemical multi-element analysis of tailings specimens

Sn	Pb	Sb	Zn	S	Fe	CaO	SiO ₂
0.76	0.10	0.14	0.24	2.35	10.03	41.72	14.41

表 2 试样的矿物组成分析结果
Table 2 Mineral analysis of the samples

矿物	锡石	磁黄铁矿	方解石	黄铁矿	脆硫锑铅矿	铁闪锌矿	毒砂	石英
含量/%	1.7	7.96	20.96	8.61	1.35	3.89	1.06	17.58

2 实验流程确定

研究表明，硫化矿含量如果过高会对锡石浮

表 3 尾矿试样的粒度分析结果
Table 3 Results of particle size analysis of tailing samples

粒级/mm	产率/%	锡品位/%	锡分布率/%
+0.074	19.64	0.06	1.55
-0.074+0.056	21.14	0.32	8.88
-0.056+0.043	13.06	0.58	9.94
-0.043+0.031	15.81	1.27	26.35
-0.031+0.021	11.00	1.28	18.47
-0.021+0.010	5.84	1.55	11.88
-0.010+0.008	2.92	1.28	4.91
-0.008	10.49	1.31	18.02
合计	100.00	0.76	100.00

选作业带来双重影响。首先，会增加锡石捕收剂的损耗；其次会使锡精矿的品质下降。由于原矿含有较多的金属硫化矿，在硫化矿物浮选过程中加入大量的石灰用于抑制黄铁矿，从而造成部分含硫矿物可浮性减弱^[18]，导致尾矿硫含量偏高。为探究硫化矿物对锡石浮选的影响^[19]，选用黄药对其进行脱硫实验，具体实验流程见图 1 和图 2。

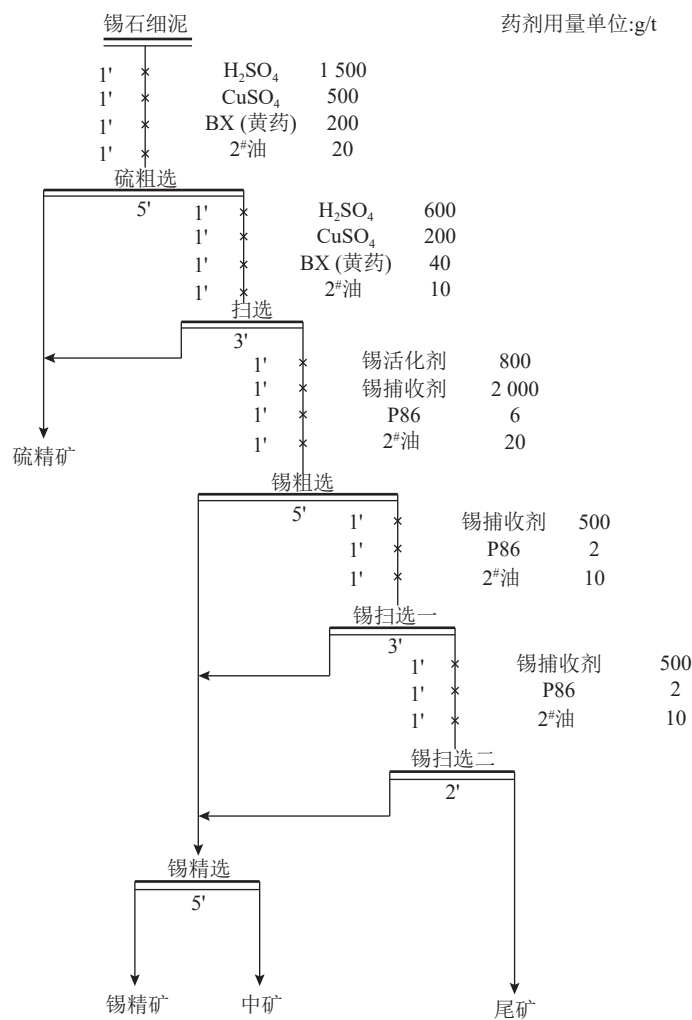


图 1 脱硫条件实验流程
Fig.1 Process flow of removal of sulfur flotation

在进行浮锡条件实验时，主要探究了活化剂、捕收剂、具有消泡作用的辅助捕收剂等药剂制度，实验流程见图1。

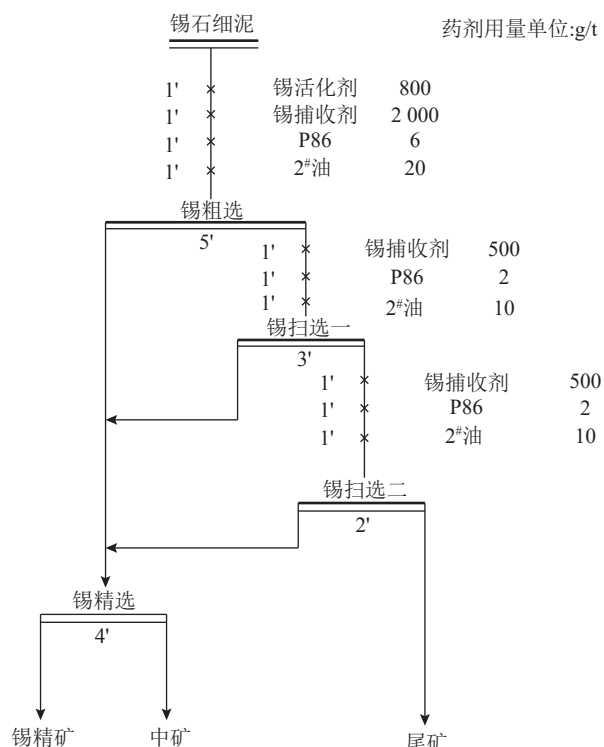


图2 不脱硫条件实验流程
Fig.2 Process flow of non-removal of sulfur flotation

3 实验结果与分析

3.1 活化剂用量实验

为获得较好的浮选指标，使用活化剂 XCK11 增强矿浆分散性，其主要成分是硝酸铅和硫酸铜。在 P86 用量 6 g/t、捕收剂 KDX9 用量 2 000 g/t 条件下，研究了 XCK11 用量对锡石浮选的影响，实验流程见图1，实验结果见图3。

从图3可知，当活化剂用量从 0 g/t 增大至 800 g/t 时，锡的品位和回收率均呈现逐渐升高的趋势。当 XCK11 的用量 800 g/t，锡精矿中锡品位为 4.52%，回收率为 42.70%。当持续增加活化剂用量时，锡精矿中锡品位和锡回收率双双下降。综合考虑，确定 XCK11 活化剂较佳用量为 800 g/t。

3.2 捕收剂用量实验

在活化剂 XCK11 用量为 800 g/t、P86 用量为 6 g/t 的条件下，研究了捕收剂 KDX9 用量对浮锡效果的影响，KDX9 为羟肟酸类捕收剂。实验流程见图1，实验结果见图4。

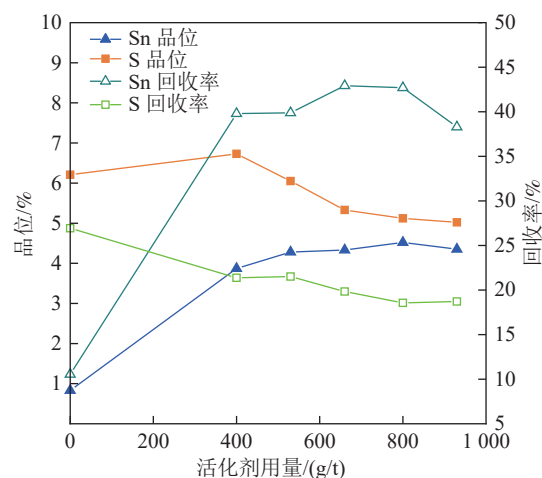


图3 活化剂用量对锡石浮选指标的影响
Fig.3 Effect of activator dosage on flotation indexes of cassiterite

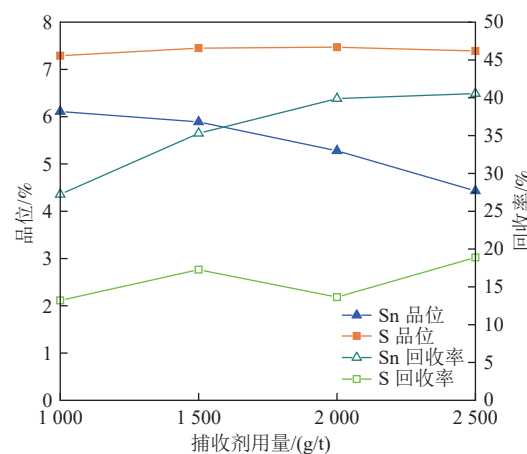


图4 捕收剂用量对锡石浮选指标的影响
Fig.4 Effect of dosage on cassiterite flotation indexes

从图4可知，随着捕收剂用量从 1 000 g/t 提升到 2 000 g/t，锡精矿中的锡品位从 6.11% 降至 4.28%，而锡回收率相应地从 27.22% 提升至 39.89%。进一步增加 KDX9 用量，不利于锡回收率，锡品位略有提升。综合考虑，KDX9 较佳用量为 2 000 g/t。

3.3 消泡剂用量实验

P86 在锡石、钨矿和稀土矿的浮选过程中，通常作为辅助捕收剂，与羟肟酸类捕收剂结合使用，具备起泡和消泡特性^[20]。在活化剂 XCK11 用量为 800 g/t、捕收剂 KDX9 用量 2 000 g/t 条件下，研究 P86 用量对锡浮选的影响，实验流程见图1，实验结果见图5。

从图5可知，当 P86 用量从 2 g/t 增至 6 g/t 时，锡品位和回收率均升高，当 P86 用量为 6 g/t

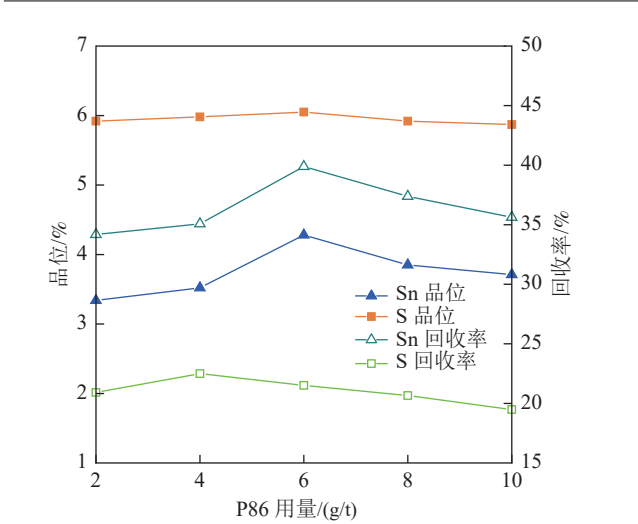


图 5 P86 用量对锡石浮选指标的影响
Fig.5 Effect of P86 dosage on cassiterite flotation indexes

时，锡精矿中锡品位为 4.28%、回收率为 39.89%。继续增加 P86 用量，锡精矿中锡品位和锡回收率均有所下降。综合考虑，确定消泡剂 P86 的较佳用量为 6 g/t。

3.4 全开路浮锡实验

锡石具有较高的密度特性^[21]，普遍采用重选工艺对其进行回收，然而，鉴于试样的粒度较细，常规重选法的回收效果并不理想^[22-24]。本研究采用浮选法处理尾矿中的锡石。为克服浮选过程中硫化矿对锡石选择性浮选的干扰^[13]，并减小药剂的消耗，在较佳药剂制度下开展预先脱硫实验，同时设置未脱硫直接浮锡对照组实验，实验流程图见图 1 和图 2，实验结果见表 4。

表 4 脱硫与不脱硫浮锡实验结果						
Table 4 Results of removal of sulfur and non-removal of sulfur during cassiterite flotation						
条件实验名称	产品	产率/%	Sn		S	
			品位/%	回收率/%	品位/%	回收率/%
脱硫浮锡	硫精矿	9.34	0.90	10.98	9.62	44.78
	锡精矿	7.14	4.28	39.89	6.05	38.95
	锡中矿	10.03	1.26	16.51	3.89	35.20
	尾矿	73.49	0.34	32.62	0.39	25.85
	给矿	100.00	0.77	100.00	2.01	100.00
不脱硫浮锡	锡精矿	9.86	1.78	22.98	7.90	38.47
	锡中矿	31.53	0.78	31.77	2.41	37.51
	尾矿	58.61	0.59	45.25	0.83	24.02
	给矿	100.00	0.76	100.00	2.03	100.00

由表 4 可知，对照组中锡精矿中锡品位 1.78%，锡回收率 22.98%；预先进行脱硫浮锡时，锡精矿中锡品位 4.28%，锡回收率 39.89%，与不脱硫对比可以看出锡精矿中锡品位提高了 2.5%，锡回收率提高了 16.91%。浮选结果表明，预先脱硫能够显著提高锡精矿的浮选指标，因此后续闭路实验采用预先脱硫-浮锡流程。

3.5 闭路实验

通过条件实验确定浮选条件后进行闭路实验，闭路实验流程见图 6，实验结果见表 5。

从表 5 可知，脱硫尾矿经闭路浮选实验获得锡品位 7.41%、锡回收率 47.61% 的浮选指标，实现了尾矿中锡资源的有效回收。

表 5 细泥系统脱硫尾矿综合条件闭路实验结果
Table 5 Results of the complete closed-circuit test of desulfurized tailings from the fine mud system

产品名称	产率/%	Sn		S	
		品位/%	回收率/%	品位/%	回收率/%
硫精矿	12.36	1.18	18.63	9.42	51.75
锡精矿	5.03	7.41	47.61	7.96	17.78
锡尾矿	82.61	0.32	33.76	0.83	30.47
给矿	100.00	0.78	100.00	2.25	100.00

4 结 论

(1) 广西大厂矿区尾矿中的锡主要以锡石形式赋存，硫主要是以磁黄铁矿、黄铁矿和铁闪锌

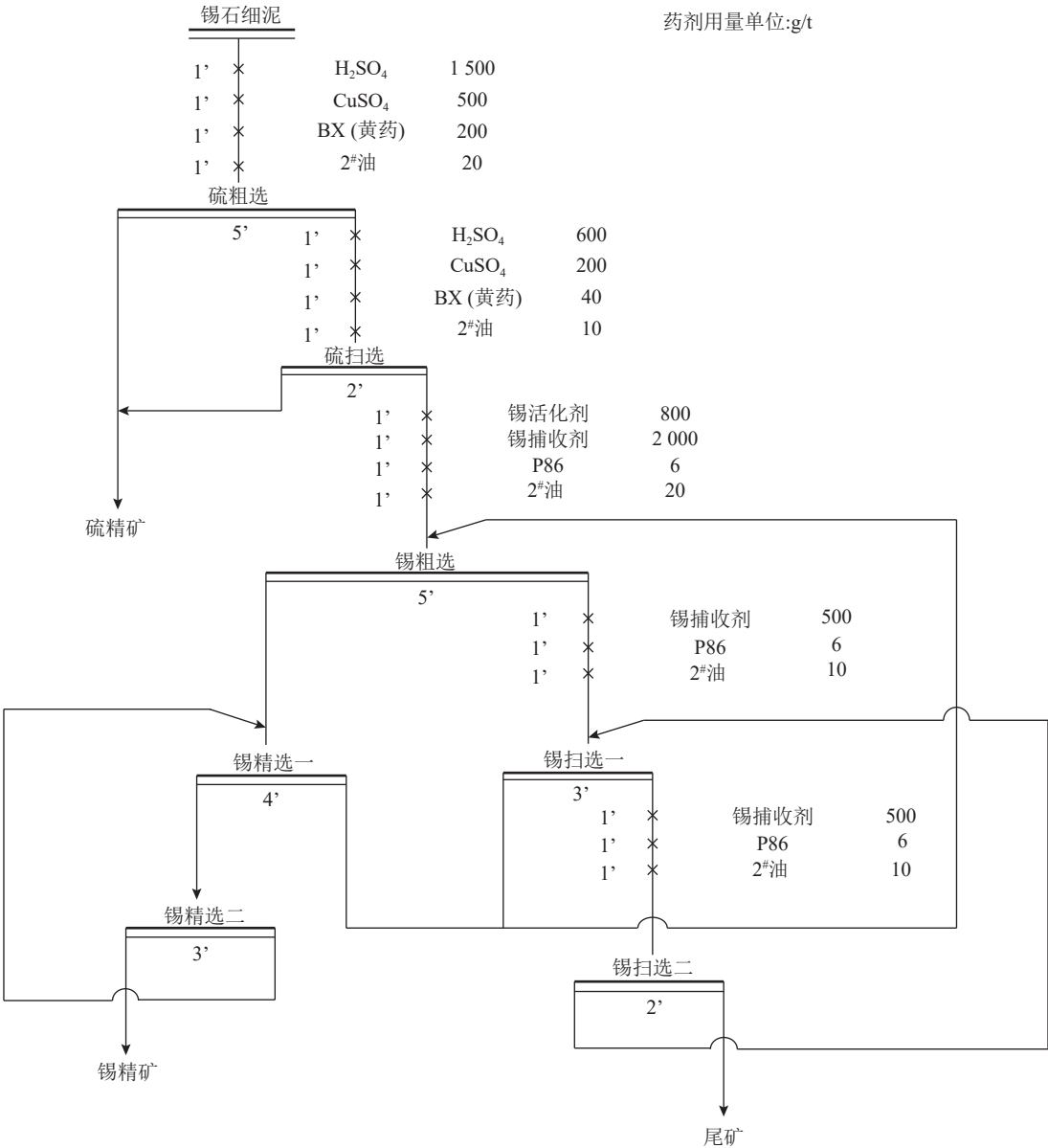


图 6 浮选回收闭路实验流程
Fig.6 Test flow of flotation recovery closed circuit

矿的形式存在。锡石的单体解离程度良好，部分与石英等脉石矿物共生，且集中于-0.043 mm 的微细粒级，导致重选回收较为困难。

(2) 脱硫实验表明，脱硫浮锡与未预先脱硫相比，锡精矿中锡品位提高了 3.48%，锡回收率提高了 26.49%。说明脱硫能够显著提高锡石细泥中锡的浮选效果。

(3) 对广西大厂矿区选厂细泥锡石进行条件实验，得到较佳的药剂制度，在捕收剂 KDX9 用量为 2 000 g/t，活化剂 XCK11 用量为 800 g/t，P86 用量为 6 g/t 条件下进行闭路实验，最终得到锡品位为 7.41%、回收率为 47.61% 的锡精矿，成功实

现了对尾矿锡资源的富集和回收。

参考文献：

[1] 刘燕, 霍锡晓. 细泥中回收锡石的选矿实验研究[J]. 矿产综合利用, 2017(2):72-74+48.

LIU Y, HUO X X. Experimental study on the recovery of cassiterite from fine mud[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017(2):72-74+48.

[2] 黄渝芝, 何东, 刘代才, 等. 旋流器脱泥溢流中微细粒级锡石回收探索实验[J]. 矿冶, 2023, 32(5):57-63.

HUANG Y Z, HE D, LIU D C, et al. Experimental study on the recovery of fine-grained cassiterite in the desliming overflow of

a cyclone[J]. *Mining and Metallurgy*, 2023, 32(5):57-63.

[3] 谢禹, 叶国华, 胡艺博, 等. 锡尾矿的资源现状、特点与再选研究进展[J]. *矿冶*, 2020, 29(2): 91-97.

XIE Y, YE G H, HU Y B, et al. Resource status, characteristics and reprocessing research progress of tin tailings [J]. *Mining and Metallurgy*, 2020, 29 (2) : 91-97.

[4] 鞠长春, 梁国帅. 某矿细粒级锡再回收浮选实验研究[J]. *有色矿冶*, 2023, 39(2): 23-26+19.

JU C C, LIANG G S. Experimental study on the re-recovery flotation of fine-grained tin in a mine [J]. *Non-ferrous Mining and Metallurgy*, 2023, 39 (2) : 23-26 + 19.

[5] 陈瑜, 文书明, 王伊杰, 等. 云南都龙微细粒级锡石浮选实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2018(4): 32-36.

CHEN Y, WEN S M, WANG Y J, et al. Experimental study on flotation of fine cassiterite in Dulong, Yunnan [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018 (4) : 32-36.

[6] 罗红莹, 张英, 蔡教忠, 等. 硝酸铅对水杨羟肟酸浮选锡石性能的影响[J]. *矿产综合利用*, 2021(2):27-32.

LUO H Y, ZHANG Y, CAI J Z, et al. Effect of lead nitrate on the flotation performance of cassiterite by salicylhydroxamic acid[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(2):27-32.

[7] 汪泰, 胡真, 何名飞, 等. 锡矿泥浮选工艺研究及工业化应用[J]. *矿冶工程*, 2020, 40(3):50-53.

WANG T, HU Z, HE M F, et al. Tin slime flotation process research and industrial application[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2020, 40(3):50-53.

[8] 张帅, 王桂芳, 梁光传, 等. 含硫低品位细粒锡尾矿的回收实验研究[J]. *有色金属 (选矿部分)*, 2023(3):40-48.

ZHANG S, WANG G F, LIANG G C, et al. Experimental study on the recovery of sulfur-containing low-grade fine-grained tin tailings[J]. *Non-ferrous Metals (beneficiation part)*, 2023(3):40-48.

[9] 杨波, 王晓, 谢贤, 等. 云南某含锡多金属矿尾矿回收微细粒锡石实验[J]. *矿物学报*, 2023, 43(4):433-440.

YANG B, WANG X, XIE X, et al. Experiment on recovering fine cassiterite from tailings of a tin-bearing polymetallic ore in Yunnan[J]. *Journal of Mineralogy*, 2023, 43(4):433-440.

[10] 陈珺, 吴杰, 矣建林. 某含锡尾矿锡石浮选实验研究[J]. *矿冶*, 2022, 31(1):36-40.

CHEN J, WU J, YI J L. Experimental study on flotation of cassiterite from a tin-containing tailings[J]. *Mining and Metallurgy*, 2022, 31(1):36-40.

[11] 马爱鹏, 普久然, 石丽芬. 云南某重选尾矿细粒锡石浮选实验研究[J]. *有色金属 (选矿部分)*, 2023(4):163-168.

MA A P, PU J R, SHI L F. Experimental study on the flotation of fine cassiterite from a gravity tailings in Yunnan[J]. *Non-ferrous Metals (Beneficiation Part)*, 2023(4):163-168.

[12] 江华. 广西某选厂细泥锡石浮选实验[J]. *现代矿业*, 2014, 30(5):48-50.

JIANG H. Flotation test of fine slime cassiterite from a concentrator in Guangxi[J]. *Modern Mining*, 2014, 30(5):48-50.

[13] 莫峰, 韩彬. 都龙矿区锡石资源综合高效回收的生产实践[J]. *矿产综合利用*, 2018(1):119-122.

MO F, HAN B. Production practice of comprehensive and efficient recovery of cassiterite resources in Dulong mining area[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(1):119-122.

[14] 汪泰, 胡真, 李汉文. 微细粒锡石浮选药剂筛选及选矿工艺研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(2):96-101.

WANG T, HU Z, LI H W. Research on flotation agent screening and mineral processing technology for fine-grained cassiterite[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(2):96-101.

[15] 黄翔, 郑永兴, 王振兴. 微细粒级锡矿选矿实验研究[J]. *矿冶*, 2023, 32(1):51-59.

HUANG X, ZHENG Y X, WANG Z X. Experimental study on beneficiation of fine-grained tin ore[J]. *Mining and Metallurgy*, 2023, 32(1):51-59.

[16] 张晶, 简胜, 唐鑫, 等. 国外某锡精矿提质工艺研究[J]. *云南冶金*, 2022, 51(1):48-53.

ZHANG J, JIAN S, TANG X, et al. Study on the upgrading process of a tin concentrate abroad[J]. *Yunnan Metallurgy*, 2022, 51(1):48-53.

[17] 张婷, 李平, 冯博, 等. 离心重选-浮选脱硫工艺回收细粒级钨锡矿物的实验研究[J]. *黄金科学技术*, 2022, 30(1):113-121.

ZHANG T, LI P, FENG B, et al. Experimental study on the recovery of fine-grained tungsten-tin minerals by centrifugal gravity separation-flotation desulfurization process[J]. *Gold Science and Technology*, 2022, 30(1):113-121.

[18] 郑永兴, 宁继来, 吕晋芳, 等. 云南某铜锡尾矿脱硫选锡实验研究[J]. *金属矿山*, 2021(5):103-108.

ZHENG Y X, NING J L, LYU J F, et al. Experimental study on desulfurization and tin separation of a copper-tin tailings in Yunnan[J]. *Metal Mine*, 2021(5):103-108.

[19] 王进明, 余世磊, 任明强, 等. 重选-浮选工艺回收云南某硫化铅尾矿中的微细粒锡石[J]. 有色金属 (选矿部分), 2019(2):29-34.

WANG J M, YU S L, REN M Q, et al. Recovery of fine cassiterite from a lead sulfide tailings in Yunnan by gravity separation-flotation process[J]. Nonferrous metals (mineral processing part), 2019(2):29-34.

[20] 张兴勋. 某锡石多金属硫化矿浮-重联合选矿实验[J]. 有色金属 (选矿部分), 2020(5):17-23.

ZHANG X X. Flotation-gravity combined beneficiation test of a cassiterite polymetallic sulfide ore[J]. Non-ferrous Metals (Beneficiation Part), 2020(5):17-23.

[21] Matveeva T N, Chanturiya V A, Getman V V, et al. The Effect of complexing reagents on flotation of sulfide minerals

and cassiterite from tin-sulfide tailings[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2022, 43(3): 346-359.

[22] Zhu L J, Liu J, Zhu Y M, et al. Mechanism of HCA and CEPPA in flotation separation of cassiterite and fluorite[J]. Minerals Engineering, 2022, 187: 107773.

[23] Gong G C, Liu J, Han Y X, et al. Study on flotation performances and adsorption mechanism of 2-carboxyethylphenylphosphinic acid to cassiterite[J]. Separation Science and Technology, 2019, 54(11): 1815-1828.

[24] Jin S Z, Zhang P Y, Ou L M, et al. Flotation of cassiterite using alkyl hydroxamates with different carbon chain lengths: A theoretical and experimental study[J]. Minerals Engineering, 2021, 170: 107025.

Flotation Recovery of Fine Slime Cassiterite from Gravity Tailings

XING Jiang¹, DENG Jiushuai¹, ZHANG Hao¹, WANG Tichen¹, HUANG Yan², WU Bozeng^{1,3}

(1.China University of Mining and Technology-Beijing, School of Chemical and Environmental Engineering, Beijing 100083, China; 2.Guangxi Huaxi Mining Co., Ltd., Tongkeng Mining Branch, Hechi 547219, Guangxi, China; 3.Gaofeng Mining Co., Ltd., Hechi 547219, Guangxi, China)

Abstract: The concentrator of Dachang mining area in Guangxi adopts the method of shaking table gravity separation to recover cassiterite in production, which has problems such as difficult cassiterite separation and large loss of fine mud. In order to strengthen the recovery of fine-grained cassiterite in tailings, the flotation test of cassiterite fine mud recovery was carried out on the tailings obtained from the shaking table gravity separation of the concentrator. The test results show that through the technological process of flotation “pre-desulfurization and cassiterite flotation”, on the basis of conditional tests, 2 000 g/t collector, 800 g/t activator and 6 g/t defoamer were used for the tin flotation test. The tin concentrate with a tin grade of 7.41% and a recovery rate of 47.61% was obtained in the closed-circuit test, and the index is good and economical.

Keywords: Fin cassiterite; Flotation; Removal of sulfur; Recovery