

低品位锡尾矿机柱联合浮选实验研究

蔺慧杰¹, 蓝卓越², 熊文良¹, 张丽军¹, 陈达¹, 刘能云¹, 周政¹

(1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 中国地质调查局稀土资源应用技术创新中心, 自然资源部战略矿产综合利用工程技术创新中心, 四川 成都 610041; 2. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 这是一篇矿物加工工程领域的论文。为提高锡尾矿中的资源利用效率, 在传统浮选工艺的基础上, 提出机柱联合浮选的工艺流程。浮选柱进行粗-扫选作业, 发挥其大处理量, 高富集比优势; 浮选机做精选作业, 可提高流程的整体稳定性。本次实验结果表明, 在给矿品位 0.28% 的前提下, 经机柱联合浮选后可得到品位 15.26%, 回收率 61.13% 的锡石富中矿, 再经摇床作业后精矿品位达到 40.87%, 可达到 6 等品锡精矿的指标要求。实验表明本流程对于低品位、细粒锡石矿有较好的适应性, 同时可减少选厂的建设用地, 具备一定推广意义。

关键词: 矿物加工工程; 锡尾矿; 机柱联合; 细粒回收; 高效富集

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.04.023

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)04-0153-04

中国的锡资源储量约 110 万 t 居全球第一^[1], 上世纪我国的锡石选矿技术以重选为主, 资源回收率低, 在 60 余年的开采中堆积了大量尾矿, 目前云锡集团下辖的全部尾矿库中约有 2.5 亿 t 尾矿, 广西大厂镇与车河镇的锡尾矿量约 3000 万 t^[2-3], 尾矿中锡品位一般在 0.8% 以下, 0.3%~0.4% 的尾矿居多。采用浮选工艺可以对细粒锡石实现有效回收, 由于锡尾矿整体品位较低, 在精矿产能一定的情况下, 尾矿的处理量一般是原矿处理量的 5 倍左右, 相比于传统浮选机, 浮选柱由于占地面积小, 单位面积的处理能力远高于浮选机, 所以浮选柱在低品位锡石矿浮选中有着一定的应用前景^[4]。

与传统浮选机相比, 浮选柱的优势有: 占地面积小, 富集比高, 处理量大等优点, 但浮选柱自吸能力弱, 不能通过自吸实现矿浆逐级返回, 其灵活性及操作性不如浮选机^[5-6]。制造工艺方面, 近年来浮选柱气泡发生器部分的稳定性提升明显; 气体的充入量, 均匀性及使用寿命均有所提高, 随着设备材料性能的提升, 浮选柱批量生

产的稳定性也有一定提高^[7]。目前浮选柱在铜矿、铁矿、铅矿等矿种中均有应用, 北矿院研发的 KYZB 系列浮选柱在德兴铜矿、云天化昆阳磷矿等厂家已投产应用^[8]。目前的机柱联合工艺中, 浮选柱一般用于精选段较多, 在粗扫选作业端的应用案例较少, 主要受限与浮选柱操作灵活性与稳定性等原因。为发挥浮选柱大富集比优势, 本文将浮选柱用于粗扫选端, 与精选端的浮选机配合使用, 以提高工艺流程的整体稳定性, 探索低品位锡尾矿, 大富集比的高效选矿工艺。

1 实验样品

本实验选取云南某锡石选厂尾矿, 矿物整体呈粉末状青灰色。样品化学多元素分析及粒级筛分结果见表 1、2。

尾矿中锡品位 0.284%, 达到了 0.2% 的工业品位。脉石组成以硅酸盐为主, 硫、铁含量较低, 可以不进行预选除杂作业。矿物中-0.074 mm 83%, -0.031 mm 32.43%, 矿物整体粒度较细, 锡在

收稿日期: 2022-10-28

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目 (DD20211235); 四川省中央引导地方科技发展专项项目 (2022ZYD0126); 中央在川高校院所重大科技成果转化项目任务合同书 (2022ZHCG0124)

作者简介: 蔺慧杰 (1993-), 男, 助理工程师, 研究方向为矿山资源综合利用。

通信作者: 蓝卓越 (1976-), 男, 副教授, 研究方向为矿山资源综合利用。

-0.031 mm 的矿物中分布率达到了 83.62%，细粒富集现象明显。矿物整体组成较为简单，细度适中，可直接进行浮选实验，便于直观对比浮选与浮选柱的效果。

表 1 试样主要化学成分分析结果/%

Table 1 Analysis results of the main chemical component of sample

Sn	S	Fe	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	SiO ₂
0.284	0.24	1.40	10.35	3.72	9.46	50.53

表 2 锡在各粒级的分布结果 /%

Table 2 Results of Sn distribution in each grain level

产品粒级/mm	产率/%	品位/%	分布率/%
+0.074	16.90	0.056	3.75
-0.074+0.045	32.87	0.059	7.69
-0.045+0.031	17.80	0.070	4.94
-0.031	32.43	0.650	83.62
给矿	100.00	0.25	100.00

2 锡石浮选条件实验

2.1 药剂制度实验

为保证药剂效果更直观，前期采用浮选机进行探索实验。进行调整剂、活化剂、捕收剂、起泡剂等药剂的用量实验。其中 pH 值调整剂为碳酸钠，活化剂为硝酸铅，捕收剂为 YT-1(主要成分为苯甲羟肟酸)，起泡剂为 2#油。实验工艺流程见图 1。

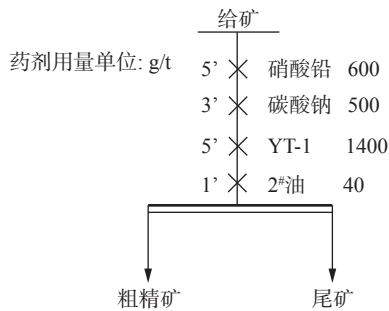


图 1 条件实验浮选流程

Fig.1 Flow chart of conditional test flotation

在上述药剂制度条件下，一次粗选后粗精矿锡品位 2.5%，尾矿中锡品位 0.14%，回收率在 54%，证明了尾矿锡石浮选的可行性。在确定药剂的基本用量后，其余浮选条件实验在浮选柱实验部分进行完善。

2.2 浮选柱条件实验

在得到药剂制度的前提下进行浮选柱条件实验，本次实验所用的浮选柱为实验室小型浮选柱，直径 10 cm，柱高 2200 cm，单次实验所用矿

10 kg 以上，矿浆浓度 30%，给矿量 250 mL/min。

在浮选柱实验部分主要进行了矿浆浓度，充气量，泡沫层厚度 3 个条件的实验。为了更好地反应浮选柱的浮选效果，本次实验单次用矿样 50 kg，变更浮选条件后浮选柱稳定运转半小时以上，可开展该条件下的取样工作，样品取样周期为 10 min，一次取样 10 s，5 min 取一次，取 3 次为一个试样。浮选柱的条件实验结果见表 3，为减少实验误差，开展平行实验，实验结果取两次实验的平均值。

表 3 浮选柱条件实验结果

Table 3 Test results of flotation column conditions

充气量/(L/min)	产品名称	Sn品位/%	产率/%	回收率/%	分选层/精矿泡沫层/cm
1.6	粗精矿	5.42	1.93	36.70	
	尾矿	0.123	98.07	63.30	70/70
	原矿	0.285	100	100	
1.8	粗精矿	6.16	2.47	53.58	
	尾矿	0.111	96.86	46.42	70/80
	原矿	0.284	100	100	
2.0	粗精矿	5.54	2.59	51.43	
	尾矿	0.105	97.31	48.57	80/65
	原矿	0.279	100	100	
2.2	粗精矿	5.37	2.63	50.26	
	尾矿	0.123	98.07	49.74	70/70
	原矿	0.281	100	100	

综合对比浮选柱与浮选机的实验结果发现，浮选柱在充其量 1.8 L/min 的条件下可以得到品位 6.16%，回收率 53.58% 的锡富中矿，回收率略低于浮选机 54% 的回收率，但精矿品位较浮选机有巨大提高，一次粗选便可以达到锡富中矿要求。随着充气量的增加精矿泡沫层的稳定性收到了一定程度的影响，精矿产率略有增加但整体回收率并未提高。经实验给出浮选柱的浮选的合理参数为充气量 1.8 L/min，液位 70 cm，矿浆浓度为 30%。

3 机柱联合浮选实验

机柱联合实验流程图及药剂制度见图 2，为保证锡石回收率，浮选柱进行粗、扫选作业，粗选精矿与扫选精矿合并进入浮选机浮选。浮选机粗选、扫选使用 XFD-1.5 L 浮选机，浮选机精选使用 XFD-1 L 浮选机。

受实验条件限制，浮选柱实验与浮选机实验分开进行。完成浮选柱部分实验后将粗精矿合并再进行浮选机实验。浮选机实验部分同样将粗选、扫选作业精矿合并进入精选。

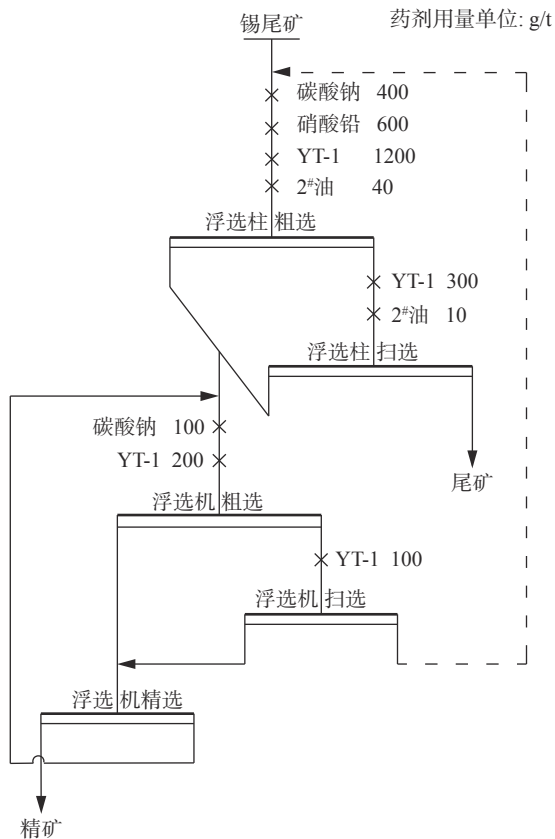


图2 闭路实验流程

Fig.2 Flow chart of closed circuit test

浮选柱实验过程中，共取粗精矿样5组，尾矿样5组，表4中的结果为5次取样结果化验后的平均值。可以看出在增加一次扫选后，最终的浮选尾矿可以降低至0.1%以下，浮选回收率达到67.04%，与浮选机相比富集效果大幅提升。本次浮选柱实验共得到粗精矿约3 kg，将粗精矿矿浆称重后平均分为6份进行浮选机部分实验，实验结果见表5。

表4 浮选柱部分实验结果

Table 4 Test results of flotation column

产品名称	产率/%	品位/%	回收率/%
粗精矿	3.35	5.75	67.04
尾矿	96.65	0.098	32.96
给矿	100.00	0.287	100.00

表5 浮选机部分实验结果

Table 5 Test results of flotation machine

产品名称	产率/%	品位/%	作业回收率/%
精矿	32.84	15.26	87.14
中矿	67.16	1.10	12.86
给矿	100.00	5.75	100.00

浮选机实验得到了品位15.26%的精矿，作业回收率达到87.14%，浮选机整体的富集比2.65左右，精矿品位提升较为显著。参考相关文献中锡

石尾矿浮选指标，品位在0.3%左右的锡石尾矿，通过浮选一般只能得到品位6%~10%的锡富中矿^[9]。浮选机扫选尾矿中锡品位为1.1%，满足返回浮选的品位要求。

结合本次实验机柱实验的结果认为，浮选柱对细粒锡石有着良好的回收效果，但并不能认为浮选柱具备大面积推广至有色金属选矿生产的条件。后续在对浮选柱应用矿山调研期间发现：浮选柱虽然富集比高，但存在矿浆不能自流返回的问题，精选返回部分需借助泵等设备才能实现^[10]。机柱联合工艺，只需将浮选机扫选尾矿返回至浮选柱即可，一定程度解决浮选柱矿浆循环稳定问题。

4 摇床精选实验

在完成机柱浮选实验后，对浮选机精矿再进行重选富集，虽然本次实验矿样锡石整体粒度偏细，但整体粒度组成较为均匀，尝试采用细粒摇床进行探索实验。在对浮选精矿进行简单脱药后进行摇床实验，接取精矿与尾矿两个产品。摇床实验结果见表6。

表6 摇床实验结果

Table 6 Test results of shaking

产品名称	产率/%	品位/%	作业回收率/%
精矿	24.27	40.87	65.01
富中矿	75.73	7.05	34.99
给矿	100.00	15.26	100.00

经摇床最终富集后，锡石的最终品位可以达到40.87%，满足了锡石6级精矿的指标要求。虽然摇床的回收率只有65%，但摇床精矿与中矿均可作为锡石矿产品进行出售，摇床作业端的矿物利用率达到了100%。

全流程锡精矿的回收率相对原矿为37.98%，品位40.87%，富中矿回收率20.44%，品位7.05%，锡资源整体回收率达到61.13%，实验效果较好。

5 结论

在使用常规锡石浮选条件实验的前提下，进行了浮选柱充气量、精矿泡沫层厚度、尾矿层厚度等条件实验，给出浮选柱工作参数调节的实验依据。在经浮选柱浮选后锡石品位由0.28%提升至5.75%，富集比在20以上，远高于常规浮选机实验结果，验证了细粒锡石浮选柱浮选的可行性。采用浮选机对浮选柱精矿进一步提质降杂后，得到了品位15.26%，作业回收率87.14%锡富

中矿；机柱联合工艺对锡尾矿整体回收率达到 61.13%。在重选进一步富集的情况下将锡精矿品位提升至 40% 以上，满足锡石精矿要求，同时可产出品位 7% 的锡富中矿。

参考文献：

- [1] 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):32-36.
SUN H, WANG J P, WANG Y F, et al. Present situation of tin ore development and utilization in China and suggestions for sustainable development[J]. Resources and Industry, 2012, 14(4):32-36.
- [2] 吴杰, 陈珺, 薛春华, 等. 云南某含锡尾矿再选试验研究与生产实践[J]. 云南冶金, 2020, 49(4):35-38.
WU J, CHEN J, XUE C H, et al. Experimental study and production practice of re-separation of a tin-containing tailings in Yunnan[J]. Yunnan Metallurgy, 2020, 49(4):35-38.
- [3] 吕晋芳, 童雄. 浮选柱在国内金属矿选矿中的应用[J]. 矿产综合利用, 2012(1):3-5+9.
LV J F, TONG X. Research and application of flotation column in domestic metal ore dressing[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2012(1):3-5+9.
- [4] 何名飞, 高玉德, 孟庆波, 等. 浮选柱在微细粒锡石浮选中的应用研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(5):38-40.
HE M F, GAO Y D, MENG Q B, et al. Application of flotation column in micro-fine cassiterite flotation[J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2019, 39(5):38-40.
- [5] 李纪, 黄迎春, 马国印, 等. 采用 CCF 浮选柱回收某尾矿中铜的实验研究[J]. 矿产综合利用, 2022(5):42-45.

- LI J, HUANG Y C, MA G Y, et al. Experimental study on recovery of copper from tailings by CCF flotation column[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(5):42-45.
- [6] 代献仁, 陈洲, 袁启东, 等. 安徽某铜矿山浮选柱半工业试验[J]. 金属矿山, 2020(4):78-83.
DAI X R, CHEN Z, YUAN Q D, et al. Semi-industrial test of flotation column in a copper mine in Anhui[J]. Metal Mine, 2020(4):78-83.
- [7] 梁冰, 韩苗苗, 韩继康, 等. 一种新型浮选柱发泡器生成气泡特性研究[J]. 矿产综合利用, 2020(3):190-196.
LIANG B, HAN M M, HAN J K, et al. Study on bubble generation characteristics of a new flotation column frother[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(3):190-196.
- [8] 佚名. 北矿院 KYZB 型大型浮选柱群正式投产运行[J]. 现代矿业, 2012(1): 114.
Anonymous. KYZB-type large flotation column group of North Mine officially put into operation [J]. Modern Mining, 2012 (1) : 114.
- [9] 郑伟, 王春, 张杰. 锡石浮选捕收剂研究及应用现状 [C]// 中国工程院;中国金属学会. 中国工程院;中国金属学会, 北京, 2016.
ZHEN W, WANG C, ZHANG J. Research and application status of cassiterite flotation collector [C] // Chinese Academy of Engineering; China Metal Society. Chinese Academy of Engineering; China Metal Society, Beijing, 2016.
- [10] 莫峰, 韩彬. 都龙矿区锡石资源综合高效回收的生产实践简[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.

Column Combined Flotation of Low Grade Tin Tailings

Lin Huijie¹, Lan Zhuoyue², Xiong Wenliang¹, Zhang Lijun¹, Chen Da¹, Liu Nengyun¹, Zhou Zheng¹
(1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Rare Earth Resource Application Technology Innovation Center of China Geological Survey, Technology Innovation Center for Comprehensive Utilization of Strategic Minerals Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan, China; 2. Faculty of Land Resources Engineering of Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, China)

Abstract: This is an essay in the field of mineral processing engineering. In order to make more efficient use of the resources in cassiterite tailings, we put forward the process flow of combined operation of flotation column and flotation machine on the basis of traditional flotation process. Among them, the flotation column for roughing and scavenging operations can give full play to the advantages of large processing capacity and high enrichment ratio of the flotation column; the selection operation of flotation machine can improve the overall stability of the process. Through this experiment, it is shown that under the premise of feeding ore grade of 0.28%, cassiterite middlings with grade of 15.26% and recovery rate of 61.13% can be obtained by combined flotation of flotation column and flotation machine. After shaking table operation, the concentrate grade reaches 40.87%, which can reach the index of grade 6 tin concentrate. The test results show that this process has good adaptability to low-grade and fine-grained cassiterite ore, and can reduce the construction land of the concentrator, which has certain promotion significance.

Keywords: Mineral processing engineering; Tin tailings; Machine column joint; Fine particle recovery; Efficient enrichment