

某铜矿尾矿矿石性质及铜回收试验研究

王海波, 赵 强, 张鹏羽, 杨 卓, 李 啸, 马钟琛

(中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410205)

摘要: 本文针对某铜矿尾矿开展资源化综合回收利用研究, 旨在为实现尾矿中铜资源的综合回收, 减少固体废物排放与环境污染, 并为低品位尾矿的资源化利用提供技术参考。在对矿石性质进行系统分析的基础上, 重点对浮选工艺与药剂制度进行优化试验。矿石性质分析结果表明: 该尾矿中金属矿物主要以黄铁矿、黄铜矿、褐铁矿、辉铜矿、赤铁矿为主, 矿石铜质量分数为 0.25%, 黄铜矿为矿石主要回收目的矿物, 铜以硫化铜和氧化铜形式赋存, 其中硫化铜矿物和氧化铜矿物占比分别为 74% 和 26%, 矿石铜含量低、黄铜矿嵌布粒度细且解离度差。在矿石性质研究的基础上, 采用“黄铜矿优先浮选—氧化铜硫化浮选”浮选工艺对该尾矿中铜矿物进行回收, 试验结果表明, 原矿 Cu 品位 0.25% 的情况下, 以 Z-200 为捕收剂、硫化钠为硫化剂, 在“两粗三精两扫”工艺流程下获得了 Cu 品位为 20.34%、Cu 回收率为 25.26% 的铜精矿, 实现了尾矿中铜的回收利用。

关键词: 尾矿; 黄铜矿; 矿石性质; 浮选; 回收

中图分类号: TD926.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)11-0020-07

doi:10.13402/j.gcjs.2025.11.134

Experimental study on the properties of tailings ore and copper recovery of a copper mine

WANG Haibo, ZHAO Qiang, ZHANG Pengyu, YANG Zhuo, LI Xiao, MA Zhongchen

(Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: The research focuses on the comprehensive recovery and utilization of a copper mine tailings, aiming to realize the comprehensive recovery of copper resources in tailings, reduce solid waste emissions and environmental pollution, and provide technical reference for the resource utilization of low-grade tailings. Based on the systematic analysis of ore properties, this paper focuses on the optimization test of flotation process and reagent system. The results of ore property analysis show that the metal minerals in the tailings are mainly pyrite, chalcopyrite, limonite, chalcopyrite and hematite, and the copper content of the ore is 0.25%. Chalcopyrite is the main recovery target mineral of the ore, and the copper is in the form of copper sulfide and copper oxide, of which copper sulfide minerals and copper oxide minerals account for 74% and 26% respectively, and the ore copper content is low, and the chalcopyrite embedding particle size is fine and the dissociation degree is poor. On the basis of the study of ore properties, the flotation process of “chalcopyrite preferential flotation-copper oxide sulfide flotation” was used to recover the copper minerals in the tailings. The test results show that under the condition of 0.25% Cu grade of raw ore, the copper concentrate with a Cu grade of 20.34% and a Cu recovery rate of 25.26% was obtained under the process of “two coarse, three fine and two sweeps” with Z-200 as the collector and sodium sulfide as the sulfiding agent. The recycling of copper from tailings has been realized.

Key words: tailings; chalcopyrite; ore properties; flotation; reclaim

收稿日期: 2024-12-29

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC2902305)

作者简介: 王海波(1977—), 男, 高级工程师, 从事选矿工艺和选矿设计方面的研究。

铜因其良好的导电性被广泛应用于电子、建筑、交通等领域，我国铜资源主要集中在西藏、江西、内蒙古、云南等地^[1]。随着经济的发展，市场对铜的需求量逐年增加，致使铜开采量大幅上升，同步带来的铜尾矿产量也越来越高，约占我国尾矿的 25%^[2-3]。目前大部分铜尾矿没有得到及时处理被堆积于尾矿坝，造成了较为严重的环境污染，且铜尾矿中含有一定量的有价元素，亦造成了一定的资源浪费^[4-7]。

在铜矿冶炼回收铜过程中存在铜的损失，一定的铜资源进入了尾矿，铜浮选尾矿资源化将是资源回收利用的重要方式^[8]。铜在矿石中因其具有赋存状态复杂、嵌布特征多及粒度细、无单体解离的铜等问题，致使其在选矿过程中难以有效地分离出来^[9-11]，而铜浮选尾矿不仅具备这些问题，还因在尾矿坝堆积易受风化侵蚀，致使其被氧化和钝化，造成其回收铜困难^[12-13]。因此，回收利用尾矿中的铜不仅能够回收有价金属铜，还能减少尾矿堆积产生的环境污染，具有重要的意义^[14]。

某铜矿尾矿中 Cu 矿物质量分数为 0.24%，铜以硫化铜和氧化铜形式赋存，其中硫化铜矿物和氧化铜矿物占比分别为 74% 和 26%，具有很高的回收价值。其中黄铜矿为矿石主要回收目的矿物，而黄铜矿嵌布粒度较细，且与石英、钙铁榴石、褐铁矿等脉石矿物连生严重，导致铜回收困难。针对该尾矿的矿石性质，本文选择“黄铜矿优先浮选-氧化铜硫化浮选”的浮选工艺回收尾矿中的铜，针对浮选工艺流程及浮选药剂等方面开展详细的选矿试验研究，以实现尾矿中铜的高

效回收利用，为相关研究提供参考和借鉴。

1 矿石性质研究

1.1 矿石化学成分

对尾矿综合样进行化学多元素分析，确定尾矿中主要组成元素及其质量分数，分析结果如表 1 所示。

由表 1 可知，尾矿中铜的质量分数为 0.25%，为选矿回收最为重要的目的组分，钨的质量分数为 0.04%。矿石中主要的非金属组分为 Al₂O₃、SiO₂、MgO、CaO，合计质量分数超过 85%。

1.2 矿石矿物组成

对尾矿综合样主要矿物组成及其质量分数进行分析，结果如表 2 所示。由表 2 可知，该尾矿中以硫化矿形式存在的矿物主要为黄铁矿与黄铜矿，还含有少量的蓝辉铜矿、辉铜矿等次生铜矿物，含铁的矿物主要为菱铁矿、褐铁矿等，脉石矿物主要为石英、长石、钙铁榴石等矿物。

1.3 铜的化学物相

铜为尾矿中最为主要的有价元素，铜的赋存形式对其选矿回收存在极大影响。为此，对尾矿综合样中铜的化学物相进行分析，结果如表 3 所示。由表 3 可知，该尾矿中的铜主要以硫化铜的形式赋存，其中次生硫化铜中铜占比为 45.60%，原生硫化铜中铜占比为 28.40%，硫化铜矿物总占比达到 74%。其余铜矿物以结合氧化铜与自由氧化铜的形式赋存。

1.4 矿石主要矿物嵌布特征

对尾矿中主要的黄铁矿、黄铜矿的嵌布特征进行分析如下。

表 1 原矿综合样化学多元素分析结果(质量分数)

							%
Cu	Mo	CaO	SiO ₂	S	MgO	Al ₂ O ₃	TFe
0.25	0.01	16.130	42.26	2.66	7.34	8.11	14.34
WO ₃	Pb	Zn	As	C	Au*	Ag*	—
0.04	<0.01	0.063	<0.01	0.93	<0.10	4.75	—

表 2 尾矿的主要矿物组成及相对质量分数

							%
黄铁矿	菱铁矿	黄铜矿	褐铁矿	赤铁矿	磁铁矿	蓝辉铜矿	
4.40	2.47	0.44	3.02	1.34	0.73	0.08	
辉铜矿	石英	斜长石	白云母	钾长石	钙铁榴石	钠辉石	
0.07	28.12	18.06	11.56	7.44	6.43	6.10	

表 3 尾矿中铜的化学物相分析结果

物相	质量分数	占比
次生硫化铜中铜	0.114	45.60
原生硫化铜中铜	0.071	28.40
结合氧化铜中铜	0.018	7.20
自由氧化铜中铜	0.047	18.80
总铜	0.250	100.00

1.4.1 黄铁矿

由图 1 可知，黄铁矿主要呈他形粒状分布，多与石英、斜长石等脉石矿物连生；部分微细黄铜矿与黄铁矿连生；部分黄铁矿与脉石矿物交代共生，形成交代残余结构。

1.4.2 黄铜矿

由图 2 可知，黄铜矿呈半他形粒状，大多矿物颗粒粒度较细，大部分与脉石矿物或黄铁矿连生，部分呈极为细小(小于 5 μm)的颗粒分布与脉石矿物中；部分黄铜矿与脉石矿物交代共生，形成

交代残余结构。

1.5 尾矿中主要矿物的解离度

对尾矿综合样中主要矿物的单体解离度进行分析，测试结果如表 4 所示。由表 4 可知，黄铜矿极少以单体的形式存在，绝大部分为贫连生体，连生体中黄铜矿质量分数 0 ~ 10% 的占比达到 85.34%；黄铁矿相较于黄铜矿解离度更好，但也主要以连生体的形式存在，单体质量分数较低，仅为 0.14%，其中黄铁矿占比 0 ~ 10% 的连生体占比为 27.68%。

对原矿中黄铁矿与黄铜矿的连生情况进行分析，结果如表 5、6 所示。

(1) 黄铁矿与其他矿物的连生情况。由表 5 可知，矿石中黄铁矿单体质量分数为 18.85%，其余多为与多种矿物连生，多相连生体质量分数达到 47.52%，主要与长石、石英和黄铜矿连生。

(2) 黄铜矿与其他矿物的连生情况。由表 6

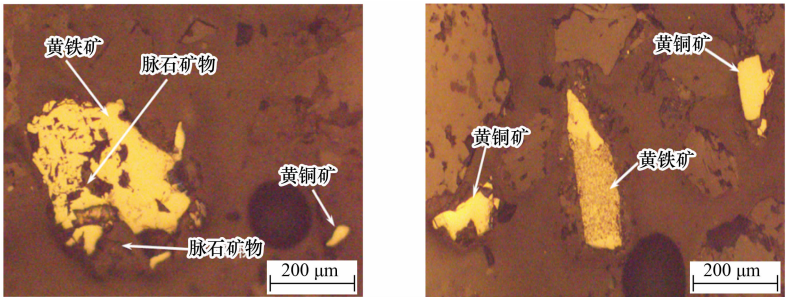


图 1 矿石中黄铁矿与脉石矿物交代共生（左）、黄铁矿单体颗粒（右）

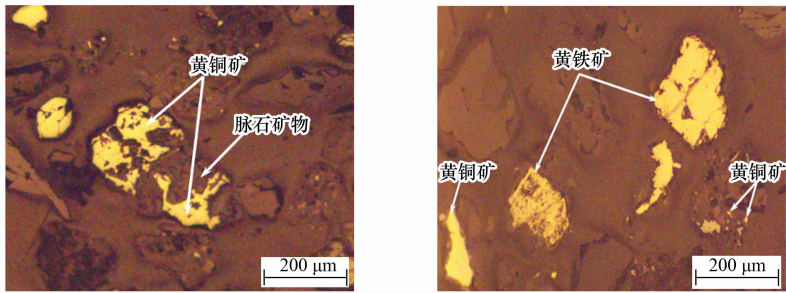


图 2 矿石中黄铜矿与脉石矿物交代共生（左）、微细粒黄铜矿颗粒（右）

表 4 原矿单体及连生体质量分数

原料名称	0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 50	50 ~ 60	60 ~ 70	70 ~ 80	80 ~ 90	90 ~ 100	100
钾长石	25.19	22.76	15.83	9.59	7.10	4.45	3.40	4.18	1.97	5.47	0.06
石英	1.25	4.60	10.85	14.13	14.79	9.42	7.99	6.03	11.41	18.81	0.72
黄铜矿	85.34	3.39	3.31	2.77	3.96	0.17	0.71	0.35	0.00	0.00	0.00
黄铁矿	27.68	8.47	4.36	4.73	5.99	6.56	2.33	6.89	13.15	18.70	1.14
斜长石	1.92	7.30	15.93	11.20	10.81	8.62	12.59	10.82	16.65	3.61	0.54

表 5 黄铁矿单体与连生体质量分数

分布形态	单体	两相连生	三相连生	多相连生	合计
质量分数	18.85	14.67	18.97	47.52	100.00

表 6 黄铜矿单体与连生体质量分数

分布形态	单体	两相连生	三相连生	多相连生	合计
质量分数	0.00	8.52	10.55	80.93	100.00

可知，矿石中黄铜矿单体解离度较差，几乎全部与其他矿物连生，多相连生体质量分数达到 47.52%，主要与长石、石英等脉石矿物连生，部分与黄铁矿等硫化矿连生。

1.6 尾矿中主要矿物的嵌布粒度

对黄铁矿与黄铜矿的嵌布粒度进行分析，测定结果如表 7 所示。由表 7 可知，黄铁矿在原矿中的嵌布粒度相对较粗，部分能达到 127 ~ 140 μm，约有 34.87% 的黄铁矿嵌布粒度小于 71 μm，在 71 ~ 140 μm 粒级范围分布较为均匀。黄铜矿的嵌布粒度较黄铁矿更细得多，约有 84.09% 的黄铜矿嵌布粒度在 41 μm 以下，<21 μm 粒级占比达到 35.09%；(14, 21] μm 粒级占比相对最高，达到 21.71%。

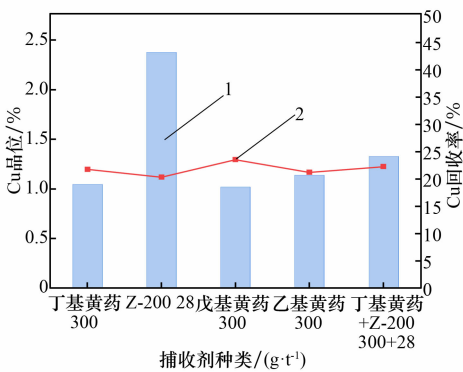
2 试验结果与讨论

由铜尾矿的矿石性质研究结果可知，尾矿中铜质量分数为 0.25%，为矿石主要回收目的组分，且铜以硫化铜和氧化铜形式赋存，其中次生硫化铜中铜占比为 45.60%，原生硫化铜中铜占比为 28.40%，硫化铜矿物总占比达到 74%；此外，铜矿物嵌布粒度较细，<21 μm 粒级占比达到 35.09%。因此，采用浮选工艺回收该尾矿中铜矿物，并对硫化铜矿物进

行优先浮选回收，然后将氧化铜矿物硫化后再进行浮选回收，以提高铜矿物浮选回收效果。

2.1 捕收剂种类对铜回收的影响

捕收剂种类对铜矿物选别有着极为显著的影响，因此试验在 2[#]油用量为 14 g/t 的条件下，考察捕收剂种类对铜浮选回收的影响。选取国内外常见的主流药剂（黄药类捕收剂、Z-200 硫氨基脂类捕收剂）进行试验研究，试验结果如图 3 所示。



1—Cu 品位；2—Cu 回收率。

图 3 捕收剂种类对铜回收的影响试验流程

由图 3 可知，黄药捕收能力强，得到的铜精矿 Cu 品位在 1.00% 左右，其回收率克继 21.00% 最高可达 23.58%，铜回收效果较好；Z-200 捕收

表 7 主要矿物嵌布粒度分析

矿物	粒级/μm	质量分数/%	矿物	粒级/μm	质量分数/%
黄铁矿	(1.17, -15.23]	2.56	黄铜矿	(1.17, 7.93]	2.43
	(15.23, -29.29]	5.12		(7.93, 14.70]	10.95
	(29.29, -43.35]	6.04		(14.70, 21.47]	21.71
	(43.35, -57.42]	12.13		(21.47, 28.24]	4.84
	(57.42, -71.48]	9.02		(28.24, 35.01]	10.51
	(71.48, -85.54]	12.04		(35.01, 41.77]	33.65
	(85.54, -99.60]	17.79		(41.77, 48.54]	4.12
	(99.60, -113.66]	12.32		(48.54, 55.31]	3.17
	(113.66, -127.73]	10.55		(55.31, 62.08]	2.53
	(127.73, -141.79]	12.43		(62.08, 68.85]	6.08

剂选择性好,得到的铜精矿 Cu 品位为 2.38%、Cu 回收率为 20.37%。进一步分析其捕收机理,黄药类捕收剂作为硫化矿浮选的经典药剂,其核心官能团(黄原酸基)通过化学吸附和疏水化实现矿物分离,但受限于选择性低、稳定性差等。Z-200 作为硫代氨基甲酸酯类捕收剂,其核心官能团(硫代氨基甲酸酯基)通过配位吸附和疏水化作用实现硫化矿的高效浮选,与传统的黄药类捕收剂相比,选择性更强,尤其是对黄铜矿的选择性高于黄铁矿。同时,因吸附效率高,可减少药剂消耗。基于试验结果及捕收机理分析,Z-200 为铜矿物浮选捕收剂,获得的精矿浮选指标较好,因此选择 Z-200 作为铜捕收剂。

2.2 磨矿细度对铜回收的影响

该尾矿表面有药剂残留,且经长期堆积风化在目的矿物表面形成氧化层,致使硫化矿物的可浮性降低,影响浮选药剂的吸附,因此浮选前需要进行磨矿擦洗。试验在 Z-200 用量为 28 g/t, 2[#]油用量为 14 g/t 的条件下,考察磨矿细度对铜回收的影响,试验结果如图 4 所示。

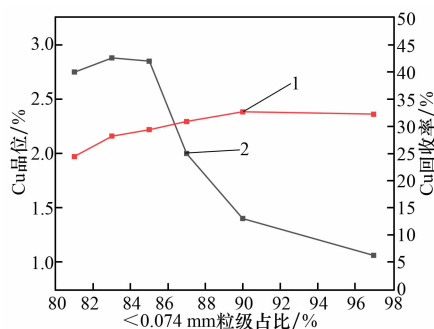


图4 磨矿细度对铜回收的影响试验结果

从图4可见,对尾矿进行磨矿有利于铜的浮选回收,随着磨矿细度的提高,铜品位先升高后下降,回收率逐渐提高,在磨矿细度<0.074 mm质量分数为85%时,能够获得铜品位为2.85%,回收率为29.39%的铜精矿,延增大磨矿细度铜回收率有所提高,但品位开始下降。综合考虑,选取最佳磨矿细度<0.074 mm质量分数为85%。

2.3 矿浆浓度对铜回收的影响

原矿属细度较细且含泥的尾矿产品,极易对浮选过程产生影响。矿浆浓度对浮选药剂的选择性吸附有着很大的影响,因此试验在磨矿细度<0.074 mm质量分数为85%,Z-200用量为

28 g/t, 2[#]油用量为14 g/t的条件下,考察矿浆浓度对铜浮选回收的影响,试验结果如图5所示。由图5可知,随着矿浆浓度的降低,铜品位显著提升,而回收率略有下降;综合考虑选用25%的矿浆浓度,在此条件下能获得Cu品位为4.08%,回收率为25.79%的铜精矿。

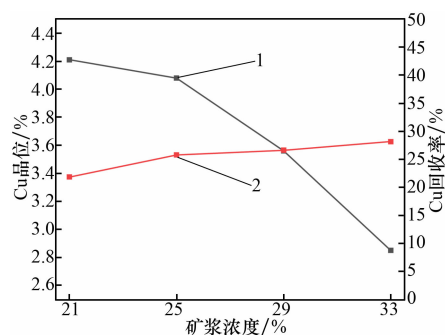


图5 矿浆浓度对铜回收的影响试验结果

2.4 硫化钠用量对铜回收的影响

原矿中铜氧化率偏高,氧化铜中铜占比高达26%,一段粗选大部分回收了硫化铜矿,对氧化铜矿回收有限,考虑铜资源的最大化回收利用,因此增加一段粗选作业,通过添加硫化钠将氧化铜硫化后进行回收,试验考察了硫化钠用量对铜浮选回收的影响。试验流程图如图6所示,试验结果如图7所示。

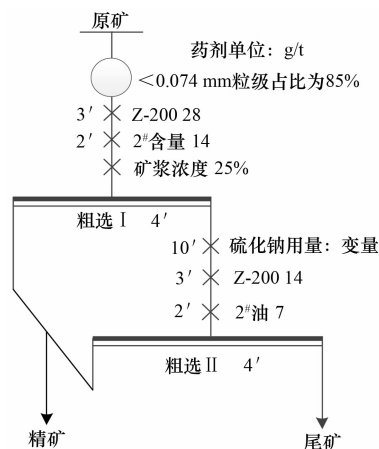


图6 硫化钠用量对铜回收的影响试验流程

由图7可知,两段粗选相比于一段粗选,铜品位有所降低,但是回收率提升较大,随着硫化钠用量增大,铜品位先下降后升高,回收率显著升高,在用量300 g/t时,能够获得Cu品位为2.11%、回收率为40.24%的铜精矿。增大硫化钠用量,回收率逐渐降低,说明硫化钠添加过量会

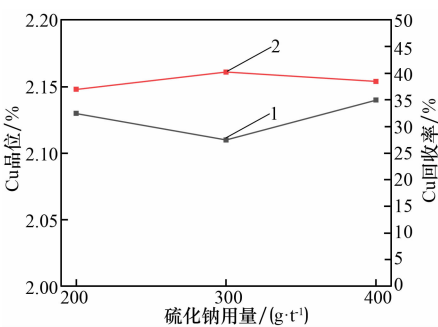


图 7 硫化钠用量对铜回收的影响试验结果

起抑制作用，因此选定硫化钠用量 300 g/t₀，综合考虑选定两段粗选工艺浮选回收铜。

2.5 精选试验

在详细的条件试验基础上，进行铜浮选精选试验，试验流程如图 8 所示，试验结果如表 9 所示。

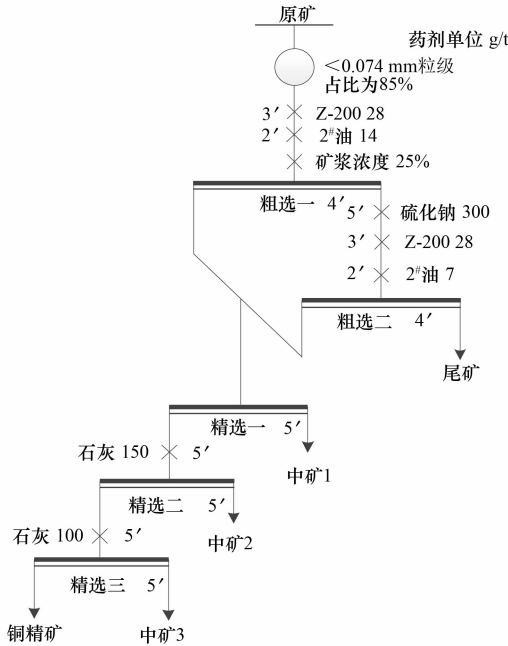


图 8 精选试验流程

表 8 精选开路试验结果 %

产品名称	产率	Cu 品位	Cu 回收率
铜精矿	0.23	22.02	20.26
中矿 1	2.89	0.76	8.79
中矿 2	1.01	1.55	6.26
中矿 3	0.46	2.65	4.88
尾矿	95.41	0.16	59.82
原矿	100.00	0.25	100.00

由表 8 可知，原矿经过 3 段精选作业，可以得到 Cu 品位为 21.77%、回收率为 20.86% 的铜精矿。

2.6 闭路试验

在系统的条件试验的基础上，进行了尾矿回收铜闭路试验，试验流程如图 9 所示，试验结果如表 9 所示。

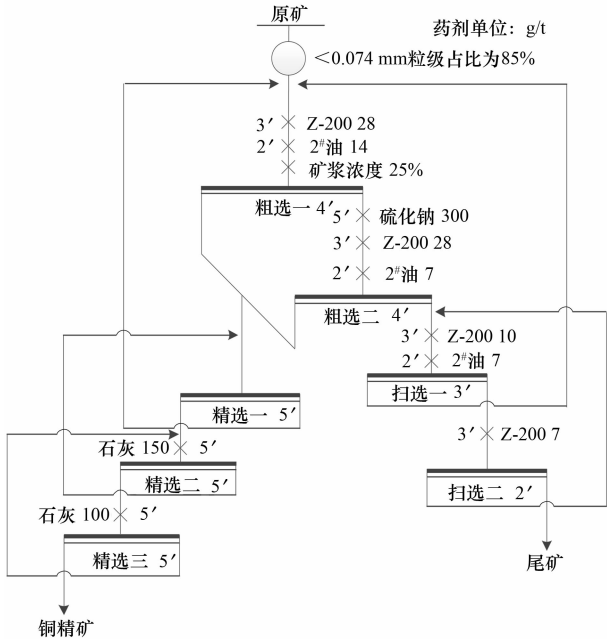


图 9 闭路试验流程

表 9 闭路试验结果 %

产品名称	产率	Cu 品位	Cu 回收率
铜精矿	0.30	20.34	25.26
尾矿	99.70	0.18	74.74
原矿	100.00	0.24	100.00

由表 9 可知，原矿经过“两粗三精两扫”的闭路试验流程，可以得到 Cu 品位为 20.34%、回收率为 25.26% 的铜精矿，实现了尾矿中铜的高效回收。

3 结 论

(1) 该尾矿中金属矿物主要以黄铁矿、黄铜矿、褐铁矿、辉铜矿、赤铁矿为主，黄铁矿为铜矿物分选过程中最主要脉石矿物，矿石铜质量分数为 0.25%，且铜以硫化铜和氧化铜形式赋存，其中次生硫化铜中铜占比为 45.60%，原生硫化铜中铜占比为 28.40%，硫化铜矿物和氧化铜占比分别为 74% 和 26%，矿石铜质量分数低、黄铜矿嵌布粒度细、解离度差。

(2) 采用“黄铜矿优先浮选 - 氧化铜硫化浮选”浮选工艺对该尾矿中铜矿物进行回收，以 Z -

200 铜矿物为捕收剂、硫化钠为氧化铜矿物硫化剂,在原矿 Cu 品位 0.25% 的情况下,采用“两粗三精两扫”浮选工艺流程,闭路试验获得了 Cu 品位为 20.34%、Cu 回收率为 25.26% 的铜精矿,该尾矿中铜矿物得到了有效回收。

(3) 针对该选铜尾矿,在当前铜价和工艺成本下,该工艺具备一定经济性,净收益可达约 30 ~ 70 万元/万吨。若通过技术优化将回收率进一步提升,或铜价持续上涨,经济效益将更加显著,此外,该工艺还能有效减少尾矿堆存污染,降低生态修复成本,同时对国内存在的低品位铜尾矿具有直接参考意义,产生经济、环境、社会效益的多重提升。

参考文献:

- [1] 蒋炜,李伟,刘铁成,等. 全球铜资源分布与价格影响因素分析[J]. 矿产勘查,2024:1-10.
- [2] 王国彬,肖庆飞,田厚源,等. 我国铜尾矿规模化消纳的研究进展[J]. 有色金属工程,2024,14(9):169-183.
- [3] 张鸽,张弛,林星杰,等. 双碳背景下铜尾矿综合利用方向探讨[J]. 矿冶,2024,33(4):600-606.
- [4] 汪楠楠,王宇帆,黄飞,等. 铜尾矿库周边农田土壤重金属污染状况及其对大豆生长的影响[J]. 土壤通报,2024,55(5):1462-1469.
- [5] 迟崇哲,刘影,王超,等. 有色金属矿山尾矿土壤化生态修复技术研究进展[J]. 黄金,2024:1-9.
- [6] 张宏泉,李琦缘,文进,等. 铜尾矿资源的利用现状及展望[J]. 现代矿业,2017,33(1):127-131.
- [7] 张小永,封东霞,柏林,等. 硫化矿尾矿资源化利用研究现状及展望[J]. 矿冶,2021,30(3):51-62.
- [8] 魏转花,岳涛,纪婉颖,等. 蒙古某低品位铜金矿选矿工艺优化及尾矿综合回收铁试验研究[J]. 有色金属工程,2024,14(8):104-110.
- [9] 蔡明明,张文平. 某铜矿石浮选尾矿工艺矿物学研究[J]. 黄金,2020,41(4):64-66;74.
- [10] 陈旭波,刘万峰,于志超. 非洲某次生硫化铜矿选矿试验研究[J]. 中国矿业,2024,33(增刊2):399-404.
- [11] 巴红飞,石玉臣,段景文,等. 刚果(金)某氧化铜钴矿选矿试验研究[J]. 湖南有色金属,2024,40(5):25-29;38.
- [12] 陶恒畅,郭超华,毛富邦. 内蒙古某铜尾矿再选试验研究[J]. 黄金,2021,42(10):83-86.
- [13] 焦文亚,赵义,邵辉,等. 湖北某铜尾矿再选回收铜硫试验[J]. 金属矿山,2016(7):179-181.
- [14] 赵强,魏进超,肖业俭,等. 大型矿山选矿尾矿一体化解决方案探讨[J]. 工程建设,2021,53(1):25-28.