

引文格式: 曾令明,林清泉,周兆钰,等.某含铜尾矿粗砂工艺矿物学特征及选矿试验研究[J].铜业工程,2022(6):63-68.

某含铜尾矿粗砂工艺矿物学特征及选矿试验研究

曾令明¹, 林清泉¹, 周兆钰¹, 黄权兵², 戴智飞¹

(1.江西铜业技术研究院有限公司, 江西 南昌 330096; 2.江西铜业股份有限公司永平铜矿, 江西, 上饶 334506)

摘 要: 为查找铜损失在尾矿中的原因并制定选矿回收工艺, 对某低品位含铜尾矿粗砂进行了工艺矿物学分析和选矿试验研究。结果表明: 含铜矿物主要是黄铜矿 (CuFeS_2), 嵌布粒度微细且呈浸染状分布, 未能充分单体解离而损失在尾矿中。经过选矿优化试验确定粗尾砂可采用立式搅拌磨, 使微细粒级铜矿物充分单体解离; 然后, 采用优先浮选工艺回收铜, 闭路试验可获得Cu品位18.02%、Cu回收率41.05%的铜精矿。

关键词: 含铜尾矿; 工艺矿物学; CuFeS_2 ; 搅拌磨; 优先浮选

中图分类号: TD9

文章编号: 1009-3842 (2022) 06-0063-06

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1009-3842.2022.06.013

Experimental Study on Mineralogical Characteristics and Beneficiation Process of a Copper Bearing Tailings

ZENG Ling-ming¹, LIN Qing-quan¹, ZHOU Zhao-yu¹, HUANG Quan-bing², DAI Zhi-fei¹

(1. Jiangxi Copper Technology Research Institute Co., Ltd, Nanchang 330096, Jiangxi, China; 2. Yongping Copper Mine of Jiangxi Copper Company Limited, Shangrao 334506, Jiangxi, China)

Abstract: In order to find out the cause of copper loss in tailings and formulate the beneficiation recovery process, the process mineralogy analysis and beneficiation test of a low-grade copper bearing coarse tailings were carried out. The results show that the copper bearing mineral is mainly chalcopyrite, which is lost in the tailings due to the incomplete monomer dissociation and the fine embedded particle size and disseminated distribution. Through the beneficiation optimization test, it is determined that the micro fine copper minerals can be fully separated from the coarse tailings by the vertical agitating grinding mill, and the copper can be recovered by the preferential flotation process. The closed circuit test shows that copper concentrate with copper grade and recovery of 18.02% and 41.05% respectively were obtained.

Keywords: copper bearing tailings; process mineralogy; chalcopyrite; agitating grinding; preferential flotation

1 引言

中国是全球最大的铜金属消费国, 据最新数据显示中国铜资源的对外依存度已超过 78%, 由于新冠疫情的影响, 海外铜金属矿山受到巨大冲击, 供需失衡导致国际铜价高涨, 极大影响了制造业的发展^[1]。国内铜金属矿山由于长期开发, 面临巨大的资源枯竭压力, 纷纷谋求产业绿色转型升级, 对尾矿等二次资源进行再利用。而从尾矿中提取有

价值的铜、金、钨、硫等有价元素, 对提高资源回收率具有重要意义^[2-6]。

永平铜矿是一座以铜、硫为主, 伴生金、银、钨、锌等多种有价元素的大型矽卡岩矿, 选厂年处理矿石量约 320 万 t。为高效回收利用资源, 进行了很多选矿工艺和药剂方面的研究, 铜和硫的选矿回收率得到了显著提高, 但铜硫选矿的尾矿中铜、钨等元素依然具备较高的回收价值^[7-9]。目前, 永平铜矿采用铜硫依次优先浮选工艺回收铜和硫, 选

收稿日期: 2022-04-21

作者简介: 曾令明 (1993—), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 主要从事浮选工艺与浮选药剂研究。E-mail: lingmingzeng123@163.com

硫尾矿经分级抛尾后进行白钨矿的分选回收。在白钨矿的回收工艺中,需预先分级将粗粒级的尾砂抛尾。经分级后,尾砂中铜品位得到了显著富集,铜品位可达 0.1%~0.15%,经折算铜金属量有 230.4~345.6 t/a,具有较好的经济回收价值。

本文基于工艺矿物学分析结果,分析了含铜尾矿中粗砂的工艺矿物学特性,查明了粗尾砂中铜损失的原因,并制定了合理可行的选矿工艺对铜资源进行回收利用^[10-12]。对类似矿山尾矿中资源的回收利用,可提供技术借鉴。

2 工艺矿物学研究

2.1 化学成分和矿物组成分析

对粗尾砂样品进行了化学多元素分析和铜、硫的化学物相分析,并采用经镜下鉴定、X 射线衍射分析、扫描电镜分析和 MLA 检测方法对矿物组成进行了分析,分析结果分别见表 1、表 2、表 3 和表 4。由结果分析可知:

(1) 粗尾砂中铜品位为 0.094%,原生硫化铜占铜总量的 76.60%,次生硫化铜占铜总量的 14.89%,矿物组成主要以黄铜矿(CuFeS_2)为主。尾砂中硫品位为 0.76%,含量较低,且大部分赋存在硫化物中。

(2) 粗尾砂中主要的脉石矿物为石英、云母、石榴石、长石、方解石等,其中石英含量高达 44.72%,若需进行磨矿将铜矿物与脉石矿物充分单体解离,难度较大。

表 1 粗尾砂化学多元素分析结果 %

组分	Cu	Pb	S	Fe	As	Mo	TiO ₂
含量	0.094	0.56	0.73	4.67	0.11	0.0075	0.14
组分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O
含量	60.80	6.51	10.59	2.65	0.15	0.20	2.34

表 2 粗尾砂中铜的化学物相分析结果 %

铜相	原生硫化铜	次生硫化铜	自由氧化铜	结合氧化铜	合计
含量	0.072	0.014	0.004	0.004	0.094
分布率	76.60	14.89	4.26	4.26	100.00

表 3 粗尾砂中硫的化学物相分析结果 %

硫相	硫化物中硫	硫酸盐中硫	单质硫	合计
含量	0.58	0.14	0.01	0.73
分布率	79.45	19.18	1.37	100.00

表 4 粗尾砂中主要矿物种类及含量 %

矿物名称	相对含量	矿物名称	相对含量
黄铜矿	0.21	石榴石	10.5
斑铜矿、黝铜矿	0.02	绿泥石	2.58
闪锌矿	0.03	辉石	2.18
白钨矿	0.04	闪石	2.13
黄铁矿、磁黄铁矿	1.28	滑石	0.4
磁铁矿	0.05	蛇纹石、块硅 镁石	0.24
赤铁矿、褐铁矿	0.62	石膏	0.21
菱铁矿	0.59	金红石、楣石	0.18
石英	44.72	磷灰石	0.12
云母	11.87	高岭石	0.11
白云石、方解石	14.19	其他	0.16
长石	7.57	合计	100.00

2.2 重要矿物的产出形式

2.2.1 黄铜矿(CuFeS_2)

CuFeS_2 是粗尾砂中铜的最主要赋存矿物,多呈不规则粒状(见图 1a),除 5% 左右呈单体产出外,多以各种形式与其他矿物连生。呈单体产出的 CuFeS_2 粒度普遍在 0.02 mm 以下,部分甚至小于 0.005 mm(见图 1b)。根据与其他矿物的嵌连比例,可将 CuFeS_2 连生体颗粒大致分为三种类型:

(1) 以 CuFeS_2 为主的连生体。颗粒中 CuFeS_2 体积含量通常大于 50%,与其嵌连的矿物主要是石英和方解石,嵌连方式多为包裹或半包裹(见图 1c)。这种类型的 CuFeS_2 粒度相对较细,主要分布在 0.005~0.03 mm 之间,数量上约占样品中铜矿物总量的 5%。

(2) 以脉石为主的连生体。颗粒中 CuFeS_2 体积含量为 25%~50%, CuFeS_2 多呈微细的不规则状沿石英、方解石、绿泥石等脉石矿物边缘,紧密镶嵌或包裹在这些脉石中(见图 1d)。这种类型的 CuFeS_2 粒度相对较粗,主要分布在 0.01~0.08mm 之间,数量上占样品中 CuFeS_2 总量的 10% 左右。

(3) CuFeS_2 的极贫连生体。数量上约占样品中 CuFeS_2 总量的 80%。颗粒中 CuFeS_2 的体积含量通常小于 25%,部分甚至小于 5%。这种连生体中 CuFeS_2 的粒度极不均匀,粗者可达 0.1 mm 左右,微细者小于 0.001 mm,一般变化于 0.005~0.08 mm 之间。据镜下粗略统计,粒度大于 0.04 mm 的约占 50%。颗粒中 CuFeS_2 多呈浸染状包裹在主要由石英、

方解石、绿泥石和闪石等脉石组成的集合体中(见图1d), 通常这些脉石集合体粒度也相对较粗。

总体来说, 损失在粗尾砂中的CuFeS₂解离程度较低, 绝大部分都与脉石矿物紧密镶嵌, 且粒度极不均匀。特别是第三种类型的连生体中, 大部分CuFeS₂粒度大于0.04 mm, 预计进一步适度磨矿可获得单体解离形成铜的富连生体。因此从矿物嵌布粒度分析, 对于粒度大于0.04 mm的CuFeS₂, 除第一、二种类型连生体中的CuFeS₂以外, 第三种类型连生体中粒度较粗的CuFeS₂也可以得到进一步的回收。然而, 对于粒度小于0.04 mm的CuFeS₂, 因其粒度过细、分散程度过高、与脉石矿物的镶嵌关系过于复杂, 预计即使进一步细磨也很难得到充分的解离。

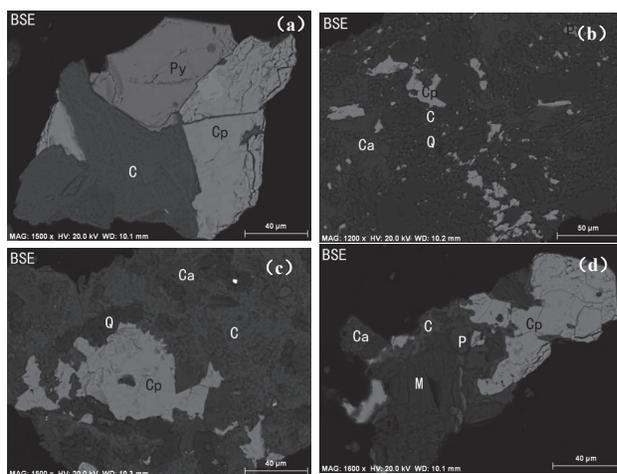


图1 CuFeS₂不同嵌布类型的SEM背散射图像
(a) 粒状CuFeS₂ (Cp)毗连镶嵌嵌布; (b) 微粒CuFeS₂ (Cp)呈不规则状零星嵌布; (c) CuFeS₂ (Cp)呈不规则状包裹连生; (d) 形态不甚规则的微细粒CuFeS₂ (Cp)沿脉石边缘或粒间紧密镶嵌

CP-CuFeS₂; Py-CuFeS₂; C-绿泥石; M-云母; C-绿泥石; Ca-方解石; P-长石; Q-石英

图1 CuFeS₂不同嵌布类型的SEM背散射图像

2.2.2 黄铁矿 (FeS₂)

FeS₂是粗尾砂中最主要金属硫化物。形态多为自形、半自形或不规则粒状, 部分呈单体状态产出, 其余部分主要与石英、方解石和云母等脉石矿物镶嵌构成不同比例的连生体, 自形、半自形的粒状FeS₂嵌布在石英和方解石中(见图2a), 少量与CuFeS₂、绿泥石和闪石等矿物共生(见图2b-c), 部分FeS₂的边缘或裂隙因氧化作用被赤铁矿、褐铁矿等次生矿物交代, 粒度较细, 一般变化于0.02~0.15 mm之间, 极个别粗者可达0.25 mm左右。

FeS₂与CuFeS₂嵌布关系并不密切, 仅少部分与CuFeS₂嵌连, 且与FeS₂嵌连的CuFeS₂粒度不仅较为细小, 且嵌布关系较为复杂, 这部分CuFeS₂即使细磨也难以与FeS₂分离。

2.2.3 脉石矿物

粗尾砂中脉石矿物种类较多, 主要是石英、方解石、石榴石和长石, 其次是绿泥石、辉石和闪石等。总体来看, 样品中脉石矿物形态多为不规则粒状, 大部分呈单体状态产出, 少量与FeS₂或CuFeS₂等金属硫化物呈连生关系(见图2a-b)。经比较, 石英和方解石与金属硫化物的嵌连关系更为紧密, 且部分绿泥石、云母、闪石和长石也与金属硫化物嵌连。

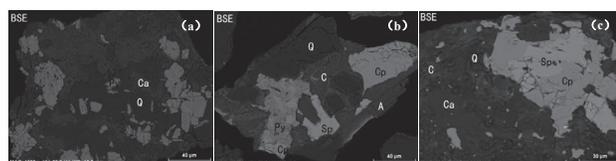


图2 FeS₂和其他脉石矿物不同嵌布类型的SEM背散射图像
(a) 自形、半自形粒状FeS₂ (Py)嵌布在石英(Q)和方解石(Ca)之间; (b) FeS₂ (Py)与CuFeS₂ (Cp)、石英(Q)和绿泥石(C)紧密镶嵌; (c)不规则粒状CuFeS₂ (Cp)沿闪锌矿(Sp)粒间充填分布

图2 FeS₂和其他脉石矿物不同嵌布类型的SEM背散射图像

2.3 铜矿物和硫矿物的嵌布粒度特征

采用MLA对粗尾砂中铜矿物和硫矿物的嵌布粒度特征进行了分析, 结果见表5所示。由结果分析可知: 粗尾砂中铜矿物和硫矿物均具微细粒-细粒分布的特征, 但硫矿物粒度相对较粗。其中, 铜矿物的产出粒度分布有两个特点: 一是粒度分布较为分散, 在0.005~0.074 mm之间的各个粒级中分布较为均匀, 铜分布率在11%~19%之间; 二是整

表5 铜矿物和硫矿物的嵌布粒度特征分析结果

粒径/mm	铜矿物		硫矿物	
	分布率/%	累计/%	分布率/%	累计/%
+0.21	-	-	0.75	0.75
-0.21+0.15	0.93	0.93	3.51	4.26
-0.15+0.105	1.58	2.51	13.41	17.67
-0.105+0.074	5.02	7.53	19.70	37.37
-0.074+0.052	12.81	20.34	18.32	55.69
-0.052+0.037	15.15	35.49	13.43	69.13
-0.037+0.026	15.01	50.50	9.88	79.01
-0.026+0.019	13.74	64.24	7.11	86.12
-0.019+0.010	19.60	83.84	8.64	94.76
-0.010+0.005	11.04	94.88	3.57	98.33
-0.005	5.12	100.00	1.67	100.00

体粒度明显较细, 虽然与硫矿物均属微细粒 - 细粒分布的范畴, 但实际上差异较为明显, 具体表现为 +0.037 mm 部分铜矿物占比仅为 35.49%, 而硫矿物高达 69.13%。

综合分析可知, 该含铜粗尾砂需进行超细磨才能将铜矿物与其他脉石矿物充分解离。此外, 脉石矿物不仅含有大量的硅酸盐难磨矿物, 还含有部分易泥化的绿泥石等物质, 会对磨矿解离和浮选分离指标造成较大的影响。

2.4 铜矿物和硫矿物的解离度及嵌连关系

选择合适的磨矿细度使绝大部分目的矿物充分单体解离, 是获得理想选矿技术指标的前提。采用 MLA 对粗尾砂中铜矿物和硫矿物分别进行了解离度、嵌连关系的测定, 测定结果分别见表 6、表 7。

表 6 粗尾砂中铜矿物和硫矿物的解离度分析结果 %

矿物	粒级 /mm	单体	连生体			
			>3/4	3/4~1/2	1/2~1/4	<1/4
铜矿物	+0.18	5.23	1.42	1.29	13.85	78.21
	-0.18+0.106	4.04	0.33	1.20	4.07	90.36
	-0.106	14.86	0.85	3.51	10.64	70.14
	合计	6.74	0.95	1.70	9.98	80.63
硫矿物	+0.18	12.19	4.78	4.91	20.22	57.90
	-0.18+0.106	20.04	12.12	10.58	21.41	35.85
	-0.106	56.78	17.57	7.37	8.86	9.42
	合计	41.66	14.48	7.82	13.49	22.54

表 7 粗尾砂中铜矿物和硫矿物连生体与嵌连矿物的比例 %

嵌连矿物	铜矿物	硫矿物
铜矿物	-	1.76
硫矿物	3.94	-
其他硫化物	0.80	0.69
磁铁矿	0.05	0.03
赤(褐)铁矿	1.93	4.17
石英	38.06	40.25
碳酸盐矿物	22.06	25.92
长石	4.43	2.51
绿泥石	7.18	6.13
云母	5.41	7.12
辉石	2.32	2.51
闪石	8.13	6.29
石榴石	3.87	1.25
滑石	0.90	0.21
其他	0.92	1.16
合计	100.00	100.00

由结果分析可知:

(1) 粗尾砂中呈单体产出的铜矿物仅占 6.47%, 即使加上富连生体(颗粒中铜矿物的体积含量大于 75%) 所占比例亦仅为 7.69%, 而呈贫连生体(颗粒中铜矿物的体积含量小于 75%) 产出的铜矿物却占 92.31%, 特别是极贫连生体占比高达 80.63%。在铜矿物连生体中, 与其嵌连关系最密切的矿物是石英和方解石, 其次是绿泥石、闪石、云母等, 而与硫矿物嵌连者仅占 3.94%。

(2) 粗尾砂中硫矿物的解离度为 41.66%, 在硫矿物连生体中, 与其嵌连关系最密切的矿物主要是石英和方解石, 其次为绿泥石、闪石、云母等, 与铜矿物连生者占 1.76%。

3 选矿试验研究

3.1 工艺矿物学影响因素与选矿工艺分析

根据工艺矿物学分析结果, 影响粗尾砂选矿指标的工艺矿物学因素可归纳如下:

(1) 粗尾砂中铜矿物主要为 CuFeS_2 , 损失的主要原因是其嵌布粒度较细, 且多呈浸染状与脉石紧密镶嵌构成不同比例的连生体, 极贫连生体所占比例较高。

(2) 粗尾砂中硫矿物主要为 FeS_2 , 少量为磁黄铁矿, 它们损失在尾矿中的原因是粒度较细、与脉石矿物的嵌连关系十分紧密。

针对粗尾砂中铜矿物嵌布粒度微细、矿物单体解离不充分的问题, 选矿工艺需要进一步细磨才有可能使其得到较充分的解离, 并通过高选择性捕收剂进行回收。

3.2 不同磨矿方式和磨矿细度试验对比

根据工艺矿物学研究结果, 针对含铜矿物需要超细磨的问题, 试验对比了立式搅拌磨和球磨两种磨矿方式对磨矿效果的影响(见图 3), 并在不同磨矿方式条件下开展了磨矿细度条件优化试验(见图 4)。由结果可知:

(1) 相比球磨, 立式搅拌磨可大幅度减少磨矿时间, 并且在相对短的时间内, 磨矿细度可以达到工艺的要求。

(2) 随着磨矿细度的增加, 球磨选铜粗选 Cu 回收率最高仅有 60% 左右, 而搅拌磨可达到 80% 左右。相比而言, 立式搅拌磨对于提高铜回收率具有

明显优势。当磨矿细度 -0.045 mm 含量超过 90% 时, 铜回收率明显下降, 说明过磨会严重影响铜回收率, 因此选择适宜的磨矿细度为 -0.045 mm 占 90.71%。

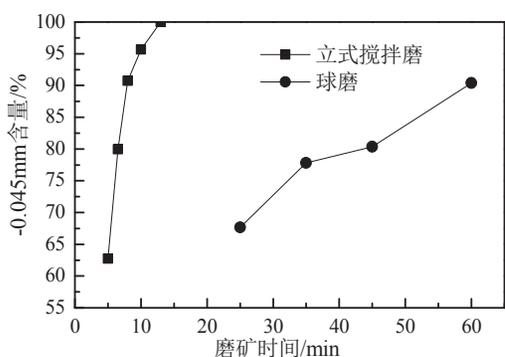
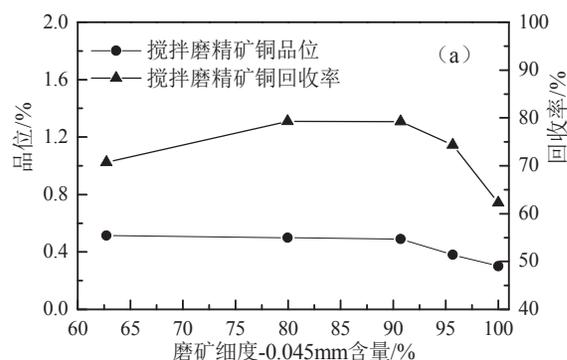
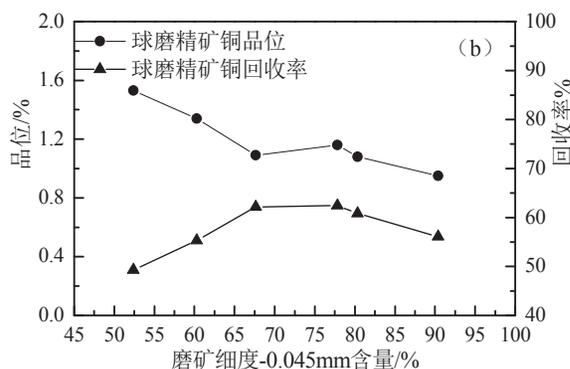


图3 不同磨矿方式磨矿曲线对比试验结果



(a) 搅拌磨磨矿细度试验结果



(b) 球磨磨矿细度试验结果

图4 不同磨矿方式对选铜粗选回收率的影响结果

3.3 开路和闭路试验

3.3.1 全流程开路对比试验

根据探索试验及条件优化试验结果, 可采用立式搅拌磨对含铜粗尾砂进行细磨, 最优的磨矿细度为 -0.045 mm 含量占 90.71%, 合适的粗选捕收剂为 EP 捕收剂或者丁基黄药 + 丁胺黑药组合捕收剂。在采用二次粗选、四次精选、中矿顺序返回的浮选流程的条件下, 对比了两种捕收剂的浮选指标, 结

果见表 8, 开路试验流程图参考图 5。开路试验结果可知:

(1) 采用 EP 为捕收剂, 优先选铜工艺可获得含铜 18.32% 的铜精矿, 说明 EP 可以作为生产高品位精矿方案的捕收剂。

(2) 采用丁基黄药与丁胺黑药组合捕收剂, 铜硫混浮工艺可获得含铜 8.55% 的铜精矿。考虑到丁基黄药与丁胺黑药组合药剂具有较强的捕收能力, 有利于达到较高的选铜回收率, 可选择丁基黄药与丁胺黑药组合药剂作为生产低品位精矿方案的捕收剂。

表8 含铜尾砂搅拌磨再磨选铜工艺开路试验结果

捕收剂种类	样品名称	产率 /%	品位 /%		回收率 /%	
			Cu	Cu	Cu	Cu
丁基黄药与丁胺黑药组合捕收剂	铜精矿	0.30	8.55	24.55		
	中矿 M1	5.33	0.32	16.12		
	中矿 M2	1.59	0.88	13.21		
	中矿 M3	0.39	2.09	7.81		
	中矿 M4	0.19	5.22	9.49		
	尾矿	92.19	0.033	28.83		
给矿	100.00	0.106	100.00			
EP	铜精矿	0.11	18.32	20.06		
	中矿 M1	9.23	0.12	10.92		
	中矿 M2	3.44	0.26	8.79		
	中矿 M3	0.76	1.84	13.72		
	中矿 M4	0.13	7.02	9.08		
	尾矿	86.32	0.044	37.43		
给矿	100.00	0.101	100.00			

3.3.2 全流程闭路对比试验

根据选铜尾矿粗尾砂选矿工艺优化试验和开路试验结果, 采用铜优先浮选和铜硫混合浮选工艺均可实现铜回收。在考虑选矿工艺的同时, 试验对比了两种不同的药剂制度条件下的闭路试验的效果, 试验结果见表 9, 闭路试验流程图见图 5, 闭路试验推荐工艺的工艺数质量流程图见图 6 所示。由闭路试验结果分析可知:

表9 含铜尾砂搅拌磨再磨选铜工艺闭路试验结果

方案	药剂制度	样品名称	产率 /%	品位 /%		回收率 /%	
				Cu	Cu	Cu	Cu
低品位精矿方案	丁基黄药 + 丁胺黑药	铜精矿	0.69	7.66	59.63		
		尾矿	99.31	0.04	40.37		
		给矿	100.00	0.09	100.00		
高品位精矿方案	EP	铜精矿	0.20	18.02	41.05		
		尾矿	99.80	0.05	58.95		
		给矿	100.00	0.09	100.00		

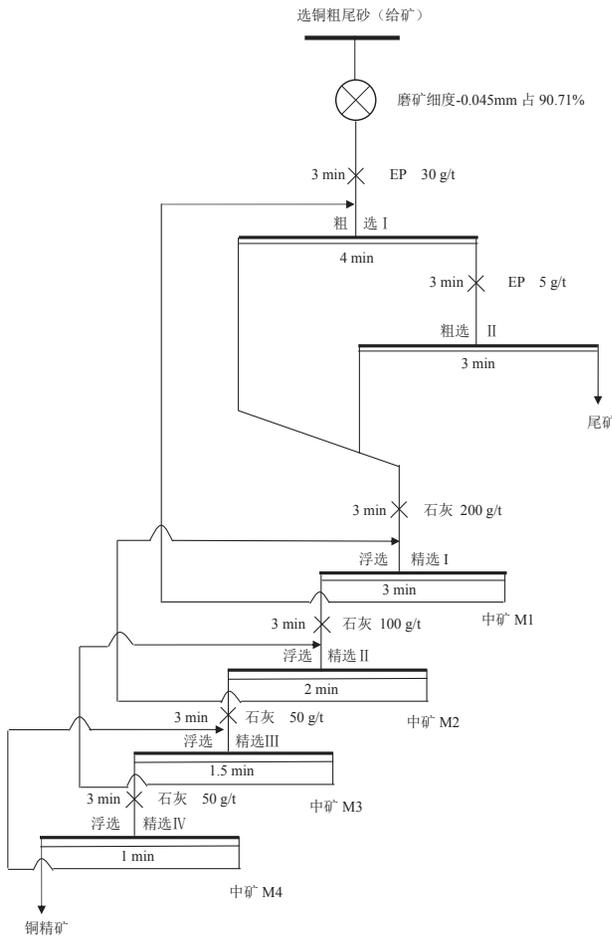


图 5 含铜粗尾砂再磨优先选铜工艺闭路试验流程图

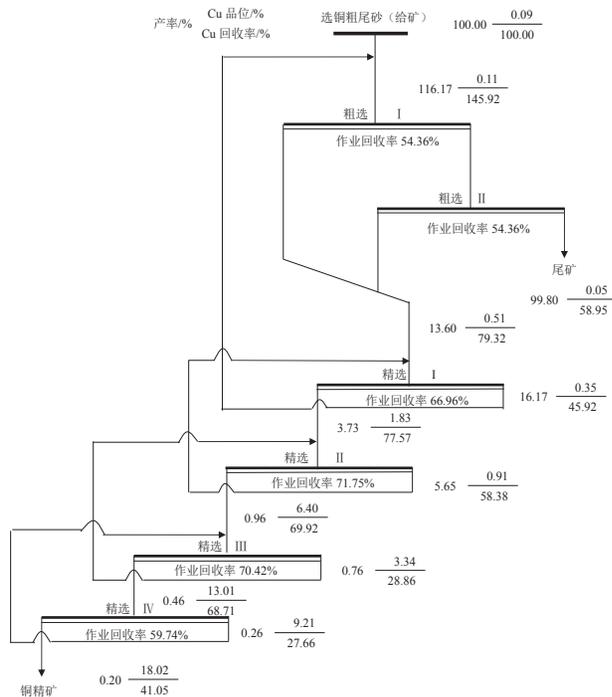


图 6 高品位精矿方案闭路试验选矿工艺数质量流程图

(1) 以丁基黄药 + 丁铵黑药的组合药剂作为浮

选捕收剂, 粗尾砂选铜可获得 Cu 品位 7.66%、Cu 回收率 59.63% 的铜精矿。

(2) 以 EP 药剂作为浮选捕收剂, 粗尾砂选铜可获得 Cu 品位 18.02%、Cu 回收率 41.05% 的铜精矿。

根据市场对铜精矿品位的要求, 推荐采用 EP 为捕收剂, 优先选铜工艺以生产高品位铜精矿的方案, 以实现粗尾砂中铜的回收。

4 结论

(1) 含铜尾矿粗尾砂中铜矿物和硫矿物的嵌布粒度微细、解离程度低, 与脉石的镶嵌关系复杂, 需采用高效磨矿设备进行细磨, 使铜、硫矿物得到充分解离, 然后采用浮选工艺进行分离回收, 可实现铜、硫矿物的有效回收。

(2) 采用立式搅拌磨对含铜粗尾砂进行细磨可充分解离含铜矿物, 试验对比了铜硫混合浮选工艺和铜硫依次优先浮选工艺的试验指标, 采用 EP 捕收剂或丁基黄药 + 丁铵黑药组合捕收剂的两种药剂制度分选出不同品位的铜精矿。

(3) 推荐以 EP 作为浮选捕收剂, 采用再磨后二次粗选、四次精选、中矿顺序返回的优先选铜工艺, 闭路试验可获得 Cu 品位 18.02%、回收率 41.05% 的铜精矿。

参考文献:

- [1] 韩见, 夏鹏, 邢佳韵, 等. 后疫情时代中国铜资源供应形势分析 [J]. 地球学报, 2021,42(2):223-228.
- [2] 刘豹, 王梓, 孙乾予, 等. 贵州某铜尾矿铜金回收浮选试验 [J]. 金属矿山, 2015(1):157-160.
- [3] 王金金, 李英. 某锡尾矿回收锡试验研究 [J]. 四川有色金属, 2021(3):38-41.
- [4] 钱志博, 孙志健, 万丽, 等. 贵州某铜尾矿铜金回收浮选试验 [J]. 金属矿山, 2015(1):157-160.
- [5] 李杰, 翟旭东, 王勇, 等. 新疆某金矿选矿厂老尾矿回收金试验研究 [J]. 黄金, 2021,42(9):59-63.
- [6] 赵迎锋, 邱廷省, 陈江安, 等. 某选铜尾矿中白钨回收试验研究 [J]. 矿产综合利用, 2019(3):127-130.
- [7] 袁源平, 彭会清. 提高永平铜矿选铜回收率的试验研究 [J]. 金属矿山, 2011(8):86-88,93.
- [8] 罗忠义, 谢珉, 吴峰. 永平铜矿合理选矿工艺流程的研究 [J]. 有色金属 (选矿部分), 1995(4):6-10.
- [9] 王可祥, 祁忠旭, 江旭, 等. 某低品位复杂难选铜锌矿选矿工艺研究 [J]. 矿业研究与开发, 2021,41(9):137-140.
- [10] 卓建英, 卢涛, 吴启明, 等. 某选铜尾矿工艺矿物学及选矿试验研究 [J]. 铜业工程, 2019(4):63-67.
- [11] 王川. 工艺矿物学在新疆某铜矿浮选尾矿降尾工艺试验中的应用研究 [J]. 有色金属 (选矿部分), 2021(4):13-17.
- [12] 禹雪薇, 罗建安. 江西某复杂难选铅锌矿工艺矿物学研究 [J]. 矿冶, 2021,30(5):141-146.