

某细粒级易泥化铜矿选别试验研究

Experimental Study on Flotation of a Fine-grained and Easily Muddled Copper Mine

张慧¹, 郭谨铭², 韩远燕³, 何荣权²

(1. 中冶集团铜锌有限公司, 北京 100101; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038;

3. 长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410000)

摘要:为解决国外某大型斑岩型铜矿铜矿物嵌布粒度细, 易泥化脉石矿物含量较高而影响铜回收的问题, 开展了选别试验研究。研究表明, 采用“三次粗选—粗精矿集中分级再磨再选”的闭路浮选流程, 在粗选磨矿细度 -0.074 mm 占62%、石灰用量 $1\ 500\text{ g/t}$ 、捕收剂乙基黄药用量粗选 I + 粗选 II = $20\text{ g/t} + 10\text{ g/t}$ 、浮选矿浆浓度为33%、浮选时间为3 min、粗精矿再磨细度 -0.038 mm 占90%条件下, 可获得铜精矿铜品位为26.89%, 回收率为94.05%; 钼品位0.43%, 回收率72.97%较好指标, 实现铜、钼的综合回收。

关键词:斑岩型铜矿; 易泥化; 开路粗选; 粗精矿再磨再选

中图分类号: TD952

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2025)06-0095-06

Abstract: In order to solve the problem that the fine dispersion particle size of copper minerals in a large porphyry copper mine abroad and the high content of gangue minerals prone to mudization affect copper recovery, a separation test study was carried out. The research results show that the closed-loop flotation process of “three rounds of rough selection-centralized classification of coarse and concentrate, re-grinding and re-selection” is adopted. Under the conditions that the fineness of coarse selection grinding of -0.074 mm accounts for 62%, the dosage of lime is $1\ 500\text{ g/t}$, the dosage of the collector ethylene xanthate for coarse selection I + coarse selection II = $20\text{ g/t} + 10\text{ g/t}$, the concentration of the flotation pulp is 33%, the flotation time is 3 minutes, and the fineness of coarse concentrate regrinding of -0.038 mm accounts for 90%. The copper grade of the available copper concentrate is 26.89% and the recovery rate is 94.05%. The molybdenum grade of 0.43% and the recovery rate of 72.97% are good indicators, achieving the comprehensive recovery of copper and molybdenum.

Key words: porphyry copper mine; easy to muddle; open road rough selection; regrind and re-select the coarse concentrate

1 前言

近年来, 铜以具有良好导电性、导热性、延展性和韧性以及耐腐蚀性等特性, 在光伏发电、新能源汽车、航空航天、通信技术、人工智能等战略性新兴产业获得广泛应用^[1-2]。我国在《全国矿产资源总体规划(2021—2025年)》明确铜为全国战略性矿产之一。然而我国铜资源禀赋较差, 铜储量和精矿产量与冶炼能力严重不匹配, 高度依赖进口。伴随新兴产业发展, 未来我国对铜资源需求将持续增加^[3-4]。

某铜矿是近年在国外探明大型斑岩型铜矿床, 铜资源量丰富, 开采价值巨大, 但矿石存在铜矿物嵌布粒度细、易泥化矿物含量高等特点。为了高效回收矿石中有用矿物、提高资源利用率, 本文依据矿石工艺

矿物学特性, 开展实验室选矿试验研究, 确定合适的浮选工艺流程和药剂制度, 获得较好浮选指标。

2 矿石性质

2.1 矿石化学成分和物相分析

对原矿石进行化学多元素分析, 结果见表1。矿石中可供选矿回收的铜含量0.559%, 钼含量0.012%, 金、银含量较低, 其中钼、金、银可作为伴生金属回收。

矿石中铜、钼的物相分析结果见表2、表3。铜主要以硫化铜为主, 占94.54%, 其中原生硫化铜占87.27%、次生硫化铜占7.27%; 钼主要以硫化钼为主, 占91.67%。由此可见, 采用浮选硫化矿工艺可实现铜、钼金属高效回收。

[作者简介] 张慧(1983—), 男, 河南浚县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿山管理、资源开发相关工作。

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2024YFCZ910005)

[引用格式] 张慧, 郭谨铭, 韩远燕, 等. 某细粒级易泥化铜矿选别试验研究[J]. 中国矿山工程, 2025, 54(6): 95-100.

表1 原矿化学多元素分析结果

组分	Cu	Mo	Al ₂ O ₃	SiO ₂	S	CaO	Fe	K ₂ O	MgO	Na ₂ O
含量	0.559	0.012	14.96	65.29	2.65	0.50	3.69	5.26	1.28	1.27
组分	P	C	As	Re*	Sb	Sc*	Ag*	Au*	Mn	FeO
含量	0.079	0.073	0.001 2	0.30	0.003	5.7	2.42	0.10	0.02	1.75

注:标注“*”元素单位为 g/t。

表2 矿石中铜物相分析结果

铜物相	含量	分布率
原生硫化铜	0.48	87.27
次生硫化铜	0.04	7.27
自由氧化铜	0.015	2.73
结合氧化铜	0.015	2.73
合计	0.559	100.00

表3 矿石中钼物相分析结果

钼物相	含量	分布率
硫化钼	0.011	91.67
氧化钼	0.001	8.33
合计	0.012	100.00

2.2 矿石矿物组成及嵌布特征分析

利用光学显微镜观察和 MLA 分析,结合 X 射线衍射分析等手段对矿石主要矿物组成进行分析。可知矿石中金属矿物含量低,以黄铁矿、黄铜矿为主,少-微量赤铁矿、辉铜矿、斑铜矿、黝铜矿、铜蓝、辉钼矿等;脉石矿物主要为石英、白云母、钠长石、正长石,石英-绢云母、斜长石、金云母、绿泥石次之,少量透辉石、金红石、磷灰石、硬石膏,微量闪锌矿、锆石等。矿石主要矿物及含量统计结果见表4。

表4 矿石矿物组成及相对含量

矿物名称	含量	矿物名称	含量
黄铜矿	1.44	赤、磁铁矿	1.08
辉铜矿	0.03	斜长石	2.67
斑铜矿、黝铜矿	0.14	透辉石	0.31
铜蓝	0.01	绿泥石	2.78
辉钼矿	0.02	金红石	0.55
黄铁矿	3.25	磷灰石	0.10
石英	38.85	高岭石	0.32
白云母	22.01	硬石膏	0.17
钠长石	9.18	锆石	0.02
正长石	7.92	闪锌矿	微量
石英-绢云母	5.32	其他	0.21
金云母	3.62		

对矿物嵌布粒度和状态进行分析,矿石中铜矿

物粒径主要处于 0.014 ~ 0.3 mm, + 0.037 mm 铜矿物粒度占 63.23%; 辉钼矿粒径主要处于 0.01 ~ 0.074 mm, + 0.037 mm 辉钼矿粒度占比为 56.54%。铜矿物和钼矿物均属于细粒级嵌布范畴。大部分铜矿物以细粒状零星分布或以碎裂状浸染状嵌布在脉石矿物中,少量铜矿物沿黄铁矿边缘、裂隙、孔洞充填交代。

由表4以及嵌布粒度分析可知,矿石中铜矿物嵌布粒度细、易泥化矿物白云母、绢云母和绿泥石等含量较高。此类矿石在磨矿过程中,易产生泥化现象,容易恶化矿浆环境^[5],选矿过程中需要注意易泥化矿物对铜矿物浮选干扰。

3 试验研究与结果

根据工艺矿物学研究结果可知,矿石中主要浮选目的矿物黄铜矿和辉钼矿呈细粒嵌布,易泥化矿物含量较高,因此采用阶段磨矿、阶段选别方案较适宜。为确保精矿回收率,需确保第一段磨矿选别产生尾矿铜、钼品位较低,因此粗选作业尽量不添加脉石矿物抑制剂,防止目的矿物和脉石矿物连生体被抑制,影响有价金属回收^[6]。

采用“三次粗选(优先浮铜钼+两次难选铜强化回收)”流程开展粗选条件试验研究,包括磨矿细度试验、石灰用量(矿浆 pH)试验、捕收剂乙基黄药用量试验、浮选浓度试验,粗选条件试验流程如图1所示。随后开展浮选时间试验,粗精矿再磨细度试验和抑制剂种类试验,最终开展“三次粗选—粗精矿集中分级再磨再选”闭路试验研究。

3.1 粗选磨矿细度试验

矿物单体解离是实现矿物浮选分离的前提条件。当入选粒度较粗时,有用矿物与脉石矿物尚未充分单体解离,另粗颗粒矿物上浮过程易与气泡脱离,影响矿物上浮率;而入选粒度过细时,容易导致脉石矿物泥化,泡沫夹带现象严重,影响精矿品位,同时也增加磨矿能耗。三次粗选采用石灰抑制黄铁矿,开路粗选实现铜钼混浮,一次粗选采用选择性较好捕收剂,二次、三次粗选采用捕收能力强捕收剂强

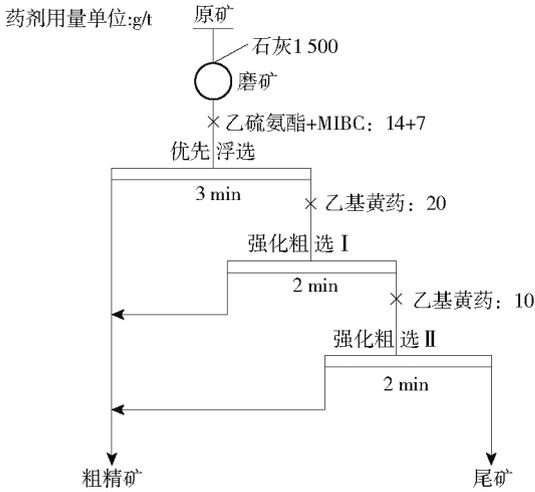


图1 条件试验工艺流程图

化对连生体铜捕收,提高回收率。分别进行磨矿细度为-0.074 mm 占56%、62%、68%、74%条件试验,试验结果如图2所示。

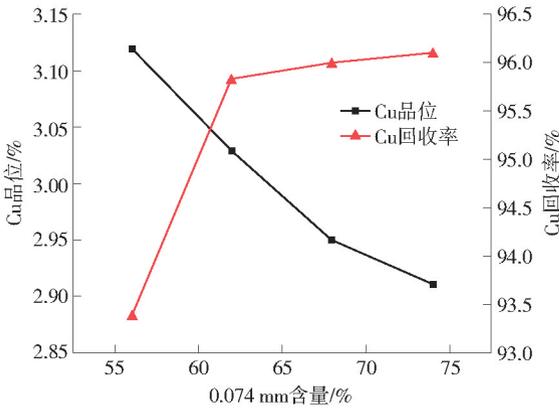


图2 粗选磨矿细度试验结果

由图2可知,随着磨矿细度增加,粗精矿中铜品位逐渐降低,当磨矿细度-0.074 mm 含量由56%增加至62%时,铜回收率增加较多;进一步增加磨矿细度,铜回收率变化较小。综合考虑磨矿成本和回收率指标,一段磨矿细度确定为-0.074 mm 占62%。

3.2 石灰用量试验

由矿物组成分析可知,矿石中含有黄铁矿3.25%。在粗磨条件下,铜矿物解离度不高,部分铜矿物与脉石矿物或黄铁矿连生。石灰是黄铁矿的有效抑制剂^[7],但石灰用量过大可能抑制铜硫连生体,导致铜回收率降低。为了有效抑制黄铁矿、提高精矿回收率,进行石灰用量试验,试验结果如图3所示。

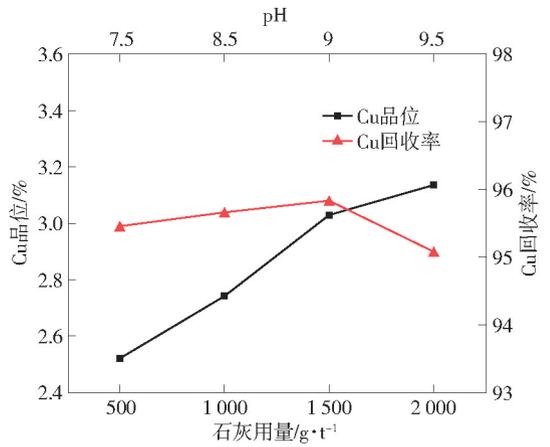


图3 石灰用量试验结果

由图3可知,随着石灰用量增加,铜品位逐渐增加,铜回收率微弱变化。当石灰用量由500 g/t增加至1500 g/t时,铜品位由2.52%增至3.03%;石灰用量继续增加,粗精矿铜品位变化较小。综合考虑药剂成本和指标,石灰用量为1500 g/t,矿浆pH为9。

3.3 捕收剂乙基黄药用量试验

捕收剂乙基黄药主要用于强化连生体铜的捕收,药剂选择性好,价格低廉,市场供应充足。对粗选I和粗选II乙基黄药用量开展试验研究,试验结果如图4所示。

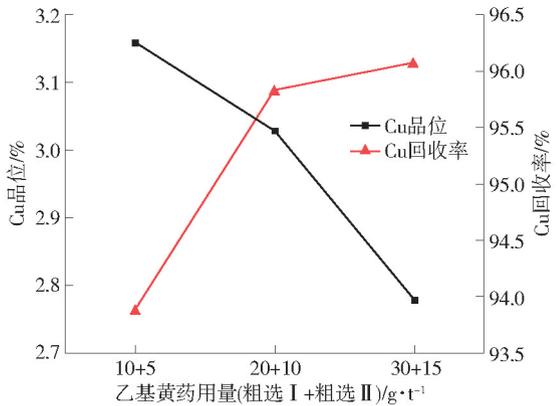


图4 乙基黄药用量试验结果

由图4可知,随着乙基黄药用量增加,粗精矿铜品位有所降低,铜回收率逐渐增加。当粗选I捕收剂用量由10 g/t增至20 g/t时,粗精矿铜回收率增幅较大;继续增加捕收剂用量,铜回收率变化小。确定乙基黄药用量为粗选I 20 g/t + 粗选II 10 g/t。

3.4 浮选浓度试验

矿浆浓度是浮选过程中重要工艺因素,它将直接影响精矿回收率,适宜浮选浓度可提高浮选回收

率和精矿质量,并降低浮选药剂消耗^[8]。实验室在浮选时间相同条件下进行浮选浓度试验,探索浮选浓度对选矿指标影响,试验结果如图5所示。

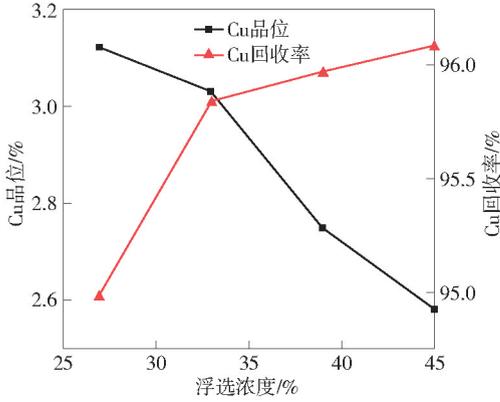


图5 浮选浓度试验结果

由图5可知,随着浮选浓度增加,粗精矿铜品位逐渐降低,回收率先增加后趋于平稳。综合考虑富集比和铜回收率,浮选矿浆浓度为33%。

3.5 浮选时间试验

为考察铜矿物浮选速率,进行开路粗选时间试验,试验中每20s刮出泡沫为一产品,刮泡时间共200s,共10个产品。优先浮选时间试验结果如图6所示。图6中Cu品位为每20s刮出精矿产品中Cu品位,回收率为对应时间所有精矿产品累积回收率。

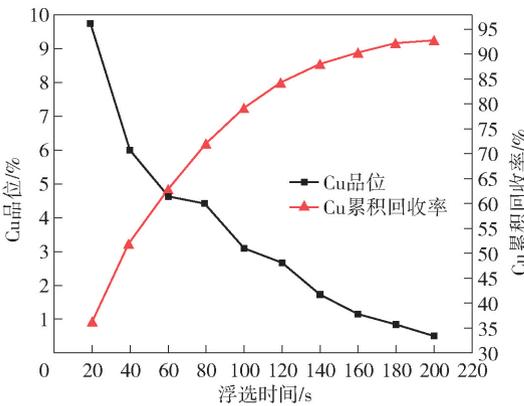


图6 浮选时间试验结果

由图6可知,首个20s获得产品铜品位最高,回收率最高,随着浮选时间延长,铜品位和回收率逐渐下降,第10个20s产品的铜品位已低于原矿品位,铜金属富集效率接近终点,故粗选浮选时间以3min为宜。

3.6 粗精矿再磨细度试验

为进一步提高铜矿物单体解离度,将开路粗选所得粗精矿合并进行再磨后精选。开展了粗精矿再

磨细度研究,磨矿细度分别为-0.038mm占84%、90%、96%,试验流程如图7所示,试验结果如图8所示。

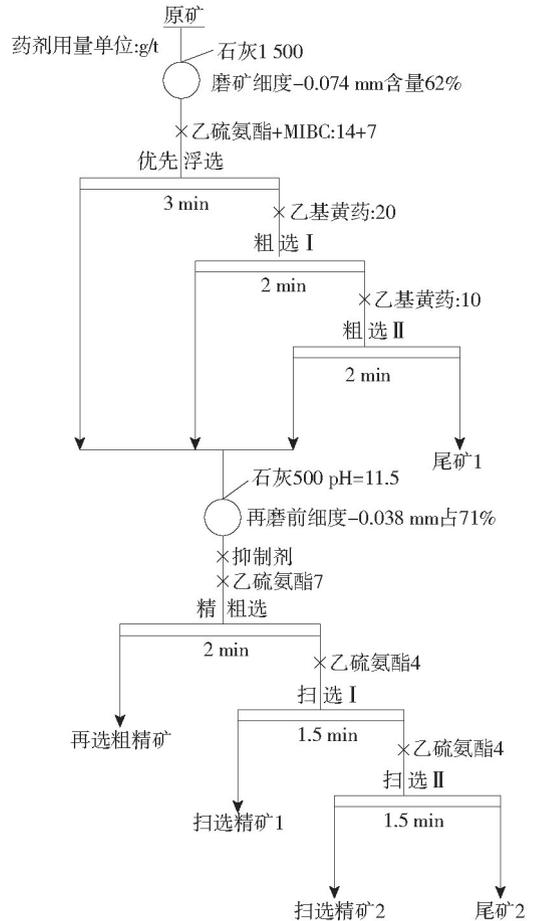


图7 粗精矿再磨细度试验流程图

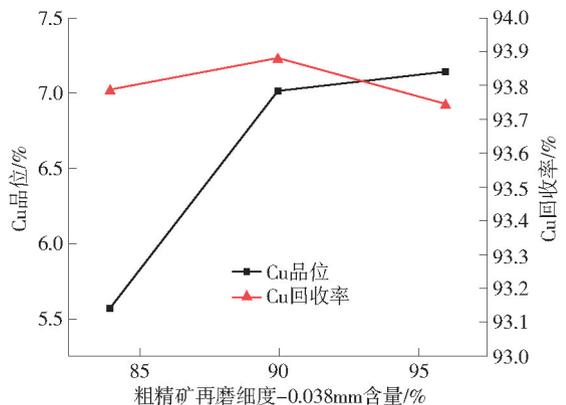


图8 粗精矿再磨细度试验结果

由图8可知,随着再磨细度增加,再选粗精矿铜品位先增加后趋于稳定,回收率较稳定。为确保铜精矿铜品位>25%,综合考虑磨矿功耗成本和指标,再磨细度确定-0.038mm占90%。

3.7 精选抑制剂种类试验

水玻璃、六偏磷酸钠和 CMC 是常用长石、云母等脉石矿物抑制剂^[9-10]。由于 CMC 对辉钼矿有抑制作用,为不影响钼回收率,不采用此抑制剂。分别对水玻璃、六偏磷酸钠和 CD-B 开展了抑制剂种类试验。试验结果见表 5。

表 5 精粗选抑制剂种类试验结果

抑制剂种类和用量	产品名称	Cu 品位/%	Cu 回收率/%
水玻璃 800 g·t ⁻¹	再选粗精矿	6.38	93.93
六偏磷酸钠 320 g·t ⁻¹	再选粗精矿	6.61	93.89
CD-B 100 g·t ⁻¹	再选粗精矿	7.02	93.88

抑制剂种类试验结果表明:水玻璃、六偏磷酸钠和 CD-B 对矿石中微细粒脉石矿物均有抑制剂作用,其中水玻璃用量最大,CD-B 用量最小。采用

CD-B 用量为 100 g/t 时,所得再选粗精矿铜品位最高。综合考虑药剂成本和指标,脉石抑制剂采用 CD-B。

3.8 全流程闭路试验

全流程闭路试验流程如图 9 所示。原矿一段磨矿细度 -0.074 mm 占 62%;然后进行三次粗选,粗选尾矿为尾矿 1;粗选精矿合并进行再磨,再磨磨矿细度 -0.038 mm 占 90%;粗精矿再磨后进行三次精选、三次扫选,中矿依次顺序返回,得到最终精矿和尾矿 2,尾矿 1 和尾矿 2 合并为总尾矿。具体结果见表 6。闭路试验结果见表 6,最终获得铜精矿品位 26.89%,铜回收率 94.05%;钼品位 0.43%,回收率 72.97%;金回收率 39.93%,银回收率 42.33%。该工艺流程简单且浮选指标较好,有效实现矿石中铜、钼、金、银的回收。

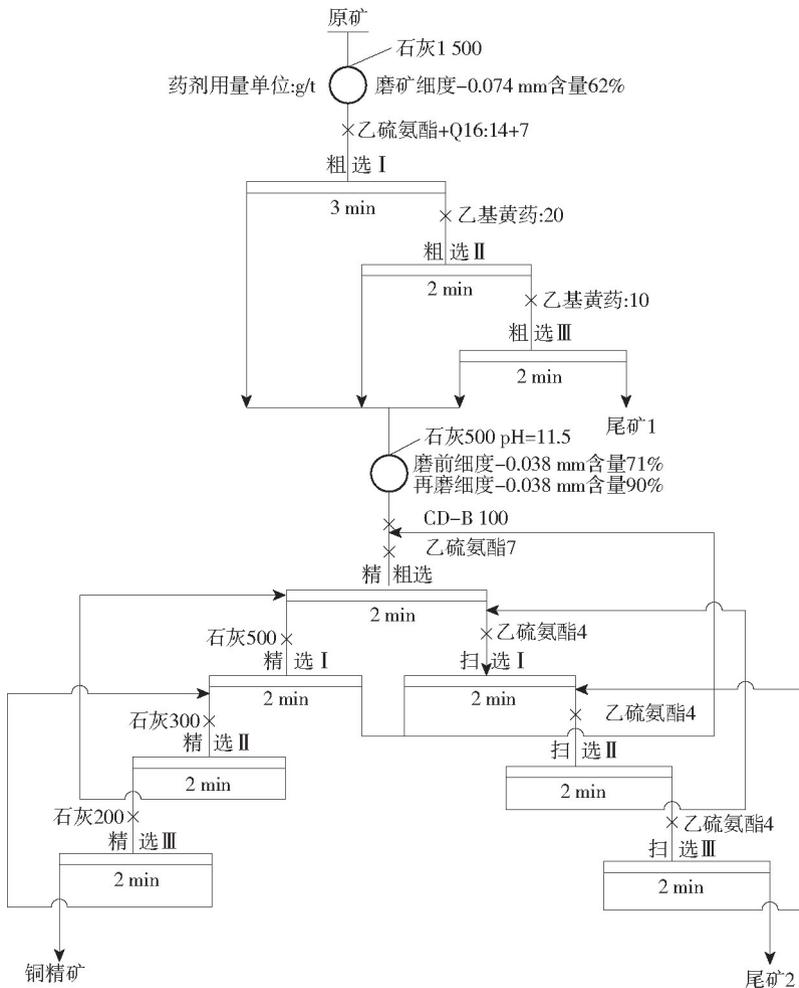


图 9 全流程闭路浮选试验流程

表6 全流程闭路浮选试验结果

产品	产率	品位				回收率			
		Cu	Mo	Au*	Ag*	Cu	Mo	Au	Ag
精矿	1.96	26.89	0.43	2.11	50.64	94.05	72.97	39.93	42.33
尾矿1	83.37	0.024	0.0029	0.05	1.05	3.57	20.93	40.24	37.33
尾矿2	14.67	0.091	0.0048	0.14	3.25	2.38	6.1	19.83	20.33
总尾矿	98.04	0.034	0.0032	0.06	1.38	5.95	27.03	60.07	57.67
原矿	100.00	0.56	0.0115	0.10	2.34	100.00	100.00	100.00	100.00

注:标注“*”元素单位为g/t。

4 结论

为高效回收嵌布粒度细、含泥化矿物高的铜矿石,开展了浮选药剂种类、用量以及磨矿细度的研究,通过研究获得以下结论:

(1)该斑岩型铜矿石铜含量0.559%,钼含量0.012%,伴生少量金、银元素;铜矿物以硫化铜为主,主要为黄铜矿,脉石矿物以石英、白云母、长石等为主;铜矿物嵌布粒度较细、易泥化脉石矿物含量较高会影响回收率指标。

(2)条件试验研究确定了回收最佳条件:磨矿细度-0.074 mm占62%;石灰用量1500 g/t;捕收剂乙基黄药用量粗选Ⅰ+粗选Ⅱ=20 g/t+10 g/t;浮选矿浆浓度为33%;浮选时间为3 min;粗精矿再磨细度-0.038 mm占90%;精选脉石抑制剂选用CD-B,用量为100 g/t。

(3)根据矿石铜矿物嵌布粒度细,易泥化矿物含量高的特点,闭路试验采用三次粗选、粗精矿集中分级再磨、再选精、扫选中矿顺序返回的流程,最终可获得铜精矿铜的品位为26.89%,铜的回收率为94.05%;钼品位0.43%,回收率72.97%;另可回收39.93%金和42.33%银,精矿指标较为理想。

[参考文献]

- [1] 张生辉,王振涛,李永胜,等. 中国关键矿产清单、应用与全球格局[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(5): 138-168.
- [2] 朱永光,张伍丰,王迪,等. 中国铜资源产业链供应链韧性评价[J]. 资源科学, 2023, 45(9): 1761-1777.
- [3] 张楠. 2023年中国铜工业供需形势分析[J]. 中国矿业, 2024, 33(2): 20-28.
- [4] 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, 2025, 16(1): 205-213.
- [5] 李磊,于鸿宾,张磊,等. 西藏某细粒难选型铜矿浮选试验研究[J]. 甘肃冶金, 2024, 46(1): 1-5.
- [6] 王金庆. 异步-快速-强化浮选工艺提高硫化铜矿石选矿指标[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(2): 5-10.
- [7] 于淙权,李光胜,朱幸福,等. 不同抑制剂对黄铁矿的抑制作用研究进展[J]. 山东化工, 2022, 51(3): 73-75.
- [8] 李生鹏,谢海云,曾鹏,等. 低品位难选铜矿铜硫高效浮选分离试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2025(1): 88-96.
- [9] 邓禾淼. 冬瓜山铜矿石浮选抑制剂优化试验[J]. 现代矿业, 2016(5): 75-77, 175.
- [10] 杨婉婷,蓝卓越,简胜,等. 低品位高含泥铜钼矿混合浮选试验研究[J]. 有色金属(中英文), 2025, 15(3): 441-451.