

低品位硫化铜矿浮选试验研究^①

吕兵超

(紫金矿业集团股份有限公司, 福建 上杭 364200)

摘要: 对某低品位硫化铜矿进行了浮选试验研究, 开发了“铜快速浮选-铜硫混合浮选-混合粗精矿再磨后铜硫分离”工艺, 系统研究了磨矿细度、浮选药剂、混合粗精矿再磨细度等因素对铜选别富集的影响。采用丁铵黑药为铜快速浮选捕收剂、丁铵黑药与丁基黄药组合为铜硫混合浮选捕收剂、石灰为硫抑制剂、松醇油为起泡剂, 在磨矿细度-0.074 mm 粒级占60%、再磨细度-0.045 mm 粒级占70%条件下, 对Cu品位0.40%、S品位2.45%的原矿, 闭路试验获得了Cu品位19.49%、回收率87.68%的混合铜精矿和S品位48.65%、回收率35.11%的硫精矿, 实现了该低品位铜矿中铜的高效富集以及硫的综合回收。

关键词: 低品位; 硫化铜矿; 浮选; 快速浮选; 混合浮选; 铜硫分离; 铜精矿; 硫精矿

中图分类号: TD952; TD923

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.05.019

文章编号: 0253-6099(2025)05-0108-05

Experimental Study on Flotation of Low-Grade Copper Sulfide Ore

LYU Bingchao

(Zijin Mining Group Co., Ltd., Shanghang 364200, Fujian, China)

Abstract: Based on flotation tests of a low-grade copper sulfide ore, a processing technique was developed, composed of flash flotation of Cu, Cu-S bulk flotation, and Cu-S separation after regrinding of roughing concentrate from bulk flotation. Effects of factors on flotation were also explored, including grinding fineness, flotation reagent, regrinding fineness of roughing concentrate from bulk flotation. Ammonium dibutyl dithiophosphate was used as the collector for Cu in the flash flotation, a combination of ammonium dibutyl dithiophosphate and butyl xanthate as the collector for Cu-S bulk flotation, lime as a sulfur depressant, and terpineol oil as a frother. With grinding fineness of -0.074 mm 60% and regrinding fineness of -0.045 mm 70%, a closed-circuit test for the raw ore assaying 0.40% Cu and 2.45% S produced a bulk copper concentrate grading 19.49% Cu at 87.68% recovery, and a sulfur concentrate grading 48.65% S at 35.11% recovery. It is concluded that efficient separation and enrichment of copper and comprehensive recovery of sulfur from this low-grade copper ore can be actualized by this technique.

Key words: low-grade; copper sulfide ore; flotation; flash flotation; bulk flotation; Cu-S separation; copper concentrate; sulfur concentrate

铜是国民经济的基础原材料, 被广泛应用于国防军工、航天航空、能源化工等领域^[1-2]。我国是全球最大的铜消费国, 铜矿选冶的装备水平、生产工艺和技术已经进入世界先进行列, 而我国铜资源相对短缺, 铜矿的进口依赖度高达70%^[3-4]。我国铜矿资源以硫化铜矿为主, 其天然可浮性较好, 工业上通常采用浮选法进行分选富集^[5]。随着铜矿资源不断开采, 铜矿品位低、粒度细、矿物共伴生关系复杂的特点日渐凸显, 入选品位已从20世纪初的1.5%~4.0%下降到目前的

0.4%, 极大地增加了资源高效、经济利用的难度^[6]。开发低品位铜矿的高效选别新工艺对提高我国铜资源利用效率具有重要意义。

某铜矿原矿铜品位仅0.3%~0.4%, 铜矿物主要为次生辉铜矿, 与黄铁矿伴生, 属于典型的低品位铜矿。由于铜矿物嵌布粒度不均, 采用单一的铜优先浮选工艺难以获得理想指标。本文针对该铜矿石特点, 根据“阶段磨矿阶段选别”思路开发了“铜快速浮选-铜硫混合浮选-混合粗精矿再磨后铜硫分离”工艺, 通过试

① 收稿日期: 2025-04-08

作者简介: 吕兵超(1988—), 男, 河南漯河人, 工程师, 主要从事矿物加工工艺研究与应用工作。E-mail: 123579469@qq.com

验研究确定合理的药剂制度,较好地实现了低品位铜的高效选别与富集,并综合回收矿石中的硫矿物,可为该矿石的工业化开发提供可靠的数据支持。

1 矿石性质

对原矿进行了化学多元素、矿物组成和铜物相分析,结果分别见表1、表2和表3。由表1可知,矿石中可回收的主要元素为Cu,含有少量Au和Ag,主要杂质元素为SiO₂、Al₂O₃。由表2~3可知,铜矿物主要为蓝辉铜矿,包含少部分铜蓝以及微量硫砷铜矿和黄铜矿,铜主要为次生硫化铜,铜矿物总氧化率为12.16%;其他硫化矿物主要为黄铁矿;脉石矿物主要有石英、明矾石、地开石等。综合原矿工艺矿物学特征分析可知,黄铁矿含量远高于铜矿物,将铜矿物与黄铁矿高效分离是提高铜选别指标的技术关键。

表1 原矿化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1 Multi-elemental analysis of raw ore %

Cu	S	Ag ¹⁾	Au ¹⁾	As	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe
0.36	2.34	2.3	0.17	0.017	72.27	11.33	2.74
Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Pb	Na ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	Zn
3.92	1.58	0.032	0.083	0.026	0.016	0.044	<0.01

1) 单位为g/t。

表2 原矿矿物组成分析结果(质量分数)

Table 2 Mineral composition of raw ore %

蓝辉铜矿	铜蓝	硫砷铜矿	黄铜矿	黄铁矿	褐铁矿
0.46	0.11	0.09	0.01	4.28	0.62
石英	明矾石	地开石	白云母	绿泥石	其他
71.27	8.73	10.25	0.68	0.32	7.18

表3 铜物相分析结果

Table 3 Copper phase analysis

铜物相	铜含量/%	铜占有率/%
水溶性铜	0.004 1	1.19
自由氧化铜	0.018	10.24
结合氧化铜	0.002 5	0.73
次生硫化铜	0.26	70.67
原生硫化铜	0.059	17.17

2 浮选试验

2.1 原则流程

原矿中的硫化矿物包括硫化铜矿和黄铁矿,通过调整碱度可实现浮选铜而抑制黄铁矿的目的。但该矿石中铜矿物嵌布粒度不均,采用阶段磨矿阶段选别工艺更

具经济性。具体试验方案为:①铜快速浮选,在相对较粗的磨矿细度条件下,先将大部分可浮性较好的铜矿物浮选出来,得到高品位铜精矿(铜精矿1);②混合浮选,采用强化捕收剂,同步回收含铜矿物的连生体颗粒以及硫矿物;③铜硫分离浮选,将混合粗精矿再磨,使铜矿物充分解离后进行铜硫分离浮选得到低品位铜精矿(铜精矿2)和硫精矿,实现细粒铜矿物的有效富集。试验原则流程如图1所示。

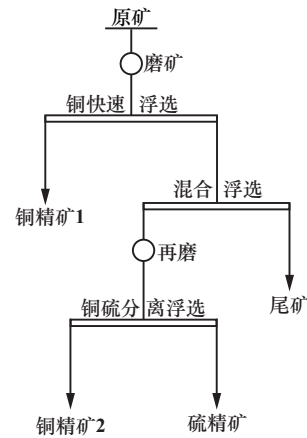


图1 试验原则流程

Fig.1 Basic flowchart in test

2.2 铜快速浮选

2.2.1 磨矿细度试验

有用矿物充分解离是矿石获得有效分选的关键因素^[7]。石灰用量800 g/t、丁铵黑药用量10 g/t、松醇油用量5 g/t条件下,考察了磨矿细度对铜快速浮选的影响,结果如图2所示。磨矿细度-0.074 mm 粒级占比从50%提高到60%,精矿中Cu回收率和品位均提高;但进一步提高磨矿细度,Cu品位和回收率开始下降,主要是铜矿物过磨,导致浮选过程中铜矿物颗粒难以被捕获。综合考虑,铜快速浮选磨矿细度选择-0.074 mm粒级占60%为宜。

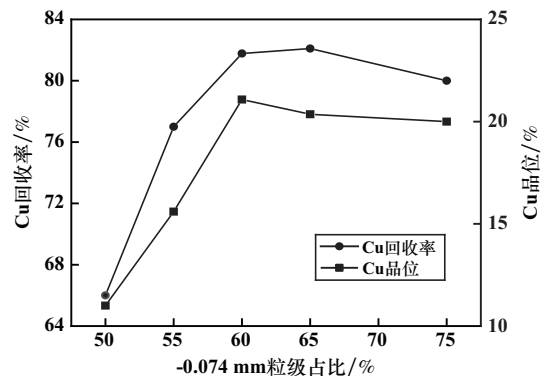


图2 磨矿细度对铜快速浮选的影响

Fig.2 Effect of grinding fineness on Cu flash flotation

2.2.2 抑制剂用量试验

原矿中含有部分可浮性较好的黄铁矿,容易被浮选进入铜精矿,影响精矿质量。为了提高铜精矿品位,需使用抑制剂对黄铁矿进行选择抑制。石灰是铜硫分选过程中应用广泛的抑制剂^[8-9]。在磨矿细度-0.074 mm粒级占60%、丁铵黑药用量10 g/t、松醇油用量5 g/t条件下,考察了石灰用量对铜快速浮选的影响,结果如图3所示。石灰用量从400 g/t增加到800 g/t,精矿中Cu品位从14.97%显著提高至21.08%,Cu回收率也逐渐提高;继续增加石灰用量,Cu品位略有提高,而回收率开始降低。确定铜快速浮选石灰用量800 g/t为宜。

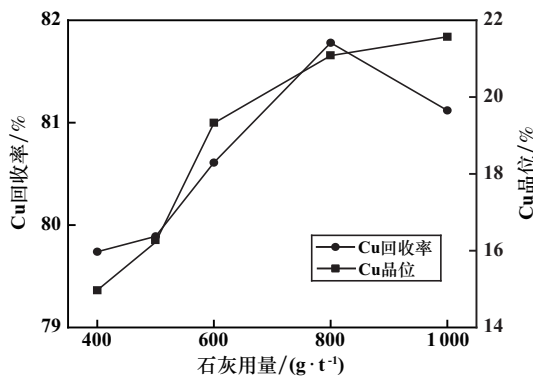


图3 石灰用量对铜快速浮选的影响

Fig. 3 Effect of lime dosage on Cu flash flotation

2.2.3 捕收剂用量试验

石灰用量800 g/t,其他条件不变,考察了捕收剂丁铵黑药用量对铜快速浮选的影响,结果如图4所示。随着丁铵黑药用量增加,精矿Cu回收率提高,Cu品位不断降低,丁铵黑药用量10 g/t时,可获得Cu回收率81.78%、Cu品位21.08%的较好指标;继续增加丁铵黑药用量,Cu回收率和品位均下降。铜快速浮选丁铵黑药用量10 g/t为宜。

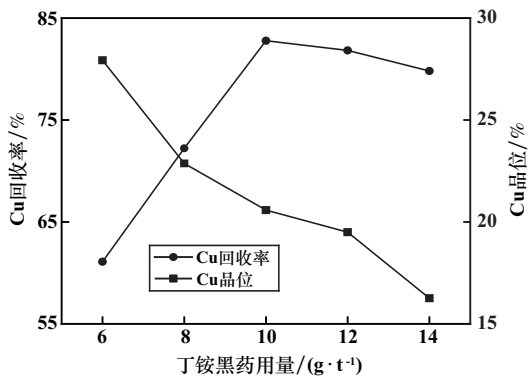


图4 丁铵黑药用量对铜快速浮选的影响

Fig. 4 Effect of ammonium dibutyl dithiophosphate dosage on Cu flash flotation

2.3 混合浮选

混合浮选阶段为浮选活性较低的铜矿物和受抑制的硫矿物,需要使用捕收能力较强的捕收剂强化硫化矿物浮选,才能实现铜硫的同步回收。两种或多种捕收剂按照一定比例组合,其捕收性能和选择性能往往优于单一组分。

以铜品位0.07%的铜快速浮选尾矿为给矿,采用丁铵黑药与捕收能力更强的丁基黄药按质量比1:1混合为捕收剂,考察了混合捕收剂用量对混合浮选的影响,结果如图5所示。随着混合捕收剂用量增加,混合粗精矿Cu回收率提高,Cu品位不断降低;混合捕收剂用量超过10 g/t后,Cu回收率下降。混合浮选捕收剂总用量10 g/t为宜。

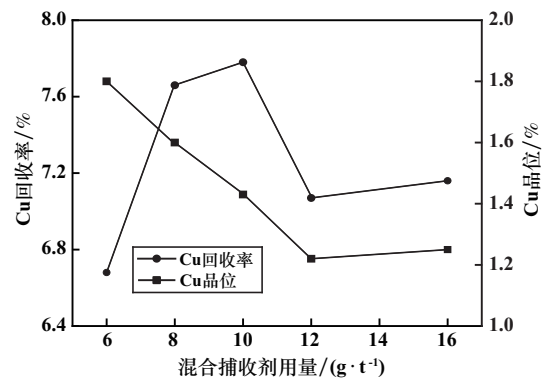


图5 混合捕收剂用量对混合浮选的影响

Fig. 5 Effect of mixed collector dosage on bulk flotation

丁铵黑药与丁基黄药总用量为10 g/t,考察了丁铵黑药与丁基黄药对比对混合浮选的影响,结果见图6。随着混合捕收剂中丁基黄药比例降低,混合粗精矿Cu品位不断上升,回收率呈先升高后降低的趋势。混合捕收剂浮选指标优于单一捕收剂指标,在丁铵黑药与丁基黄药质量比1:1时,可获得较好的浮选指标。综合考虑,混合浮选捕收剂采用丁铵黑药和丁基黄药按质量比1:1混合,总用量为10 g/t。

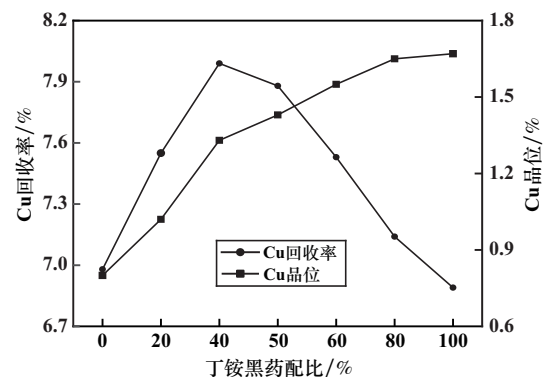


图6 捕收剂对比对混合浮选的影响

Fig. 6 Effect of collector ratios on bulk flotation

2.4 铜硫分离

2.4.1 再磨细度试验

混合粗精矿中铜矿物多为连生体颗粒,直接浮选分离难以获得合格的铜精矿。对混合粗精矿进行再磨,可使连生体颗粒充分解离,并使受抑制矿物颗粒脱药,提高其浮选活性。以铜品位 1.43% 的混合粗精矿为给矿,再磨石灰用量 300 g/t 条件下,研究了再磨细度对铜硫分离效果的影响,结果如图 7 所示。随着再磨细度增加,铜精矿 Cu 品位先增加后减少,回收率减少、增加再减少。再磨细度-0.045 mm 粒级占 70% 时,可获得较好的铜精矿指标。主要原因是矿石泥化,微细粒铜矿物难以被有效浮选。再磨细度-0.045 mm 粒级占 70% 为宜。

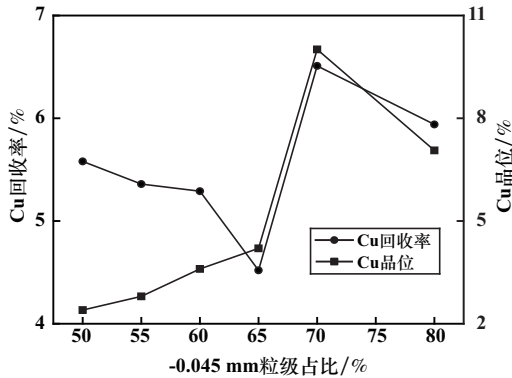


图 7 再磨细度对铜硫分离浮选指标的影响

Fig.7 Effect of regrinding fineness on Cu/S separation

2.4.2 抑制剂用量试验

在再磨细度-0.045 mm 粒级占 70% 条件下,考察了铜硫分离抑制剂石灰用量对铜硫分离效果的影响,结果如图 8 所示。石灰用量从 300 g/t 增加到 600 g/t 时,铜精矿 Cu 回收率略有下降,Cu 品位显著提高;进一步增加石灰用量,Cu 品位呈下降趋势。铜硫分离浮选石灰用量 600 g/t 为宜。

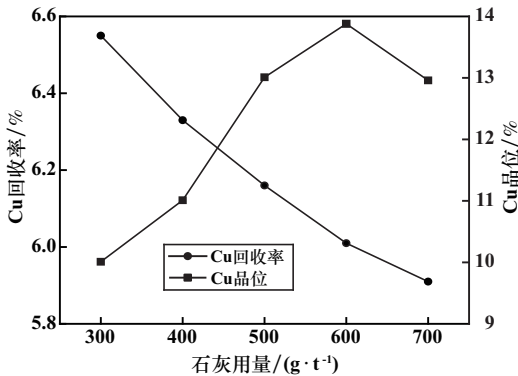


图 8 石灰用量对铜硫分离浮选指标的影响

Fig.8 Effect of lime dosage on Cu/S separation

2.5 闭路试验

根据条件试验确定的优化工艺参数,进行铜快速浮选-混合浮选-混合粗精矿再磨-铜硫分离浮选的全流程闭路试验,试验流程见图 9,结果见表 4。对 Cu 品位 0.40%、S 品位 2.45% 的原矿,闭路试验获得了 Cu 品位 20.16%、回收率 81.49% 的高品位铜精矿和 Cu 品位 13.56%、回收率 6.19% 的低品位铜精矿,混合铜精矿 Cu 品位 19.49%、总回收率 87.68%;硫精矿 S 品位 48.65%、回收率 35.11%,实现了该低品位铜矿中铜的高效分选富集以及硫的综合回收。

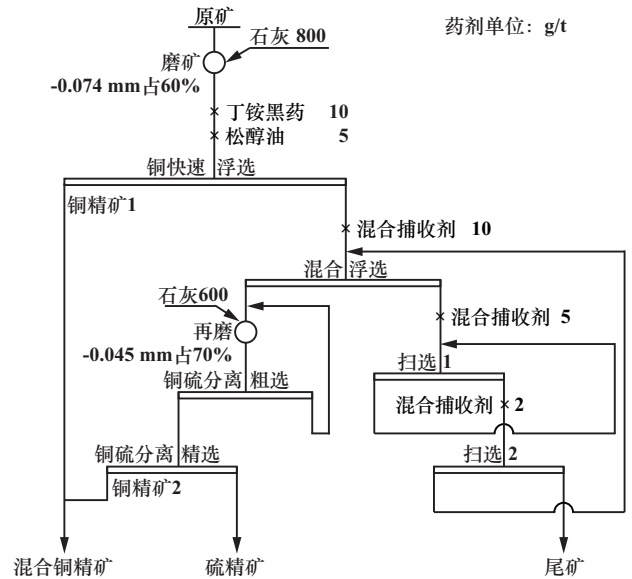


图 9 闭路试验流程

Fig.9 Flowchart for closed-circuit test

表 4 闭路试验结果

Table 4 Result of closed-circuit test

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		Cu	S	Cu	S
高品位铜精矿	1.60	20.16	45.89	81.49	29.99
低品位铜精矿	0.18	13.56	35.42	6.19	2.62
混合铜精矿	1.78	19.49	44.83	87.68	32.60
硫精矿	1.77	0.25	48.65	1.12	35.11
尾矿	96.45	0.046	0.82	11.20	32.28
原矿	100.00	0.40	2.45	100.00	100.00

3 结论

1) 原矿中铜矿物主要为蓝辉铜矿,包含少部分铜蓝以及微量硫砷铜矿和黄铜矿,铜主要为次生硫化铜,铜矿物总氧化率为 12.16%;硫矿物主要为黄铁矿;脉石矿物主要有石英、明矾石、地开石等。黄铁矿含量远高于铜矿物,将硫化铜矿物与黄铁矿高效分离是提高铜选别指标的关键。

2) 对 Cu 品位 0.40%、S 品位 2.45% 的原矿, 经铜快速浮选-混合浮选-混合粗精矿再磨后铜硫分离工艺, 闭路试验获得了 Cu 品位 19.49%、回收率 87.68% 的混合铜精矿和 S 品位 48.65%、回收率 35.11% 的硫精矿, 实现了该低品位铜矿中铜的高效富集以及硫的综合回收。

参考文献(References):

- [1] 苏兴才, 王浩. 中国铜矿资源的现状及潜力分析[J]. 世界有色金属, 2023(4):92-94.
SU Xingcai, WANG Hao. Analysis of the current situation and potential of copper resources in China [J]. World Nonferrous Metals, 2023(4):92-94.
- [2] 董敬申, 刘全军, 纪慧超, 等. 硫化铜、砷矿物浮选分离的研究进展[J]. 有色金属工程, 2020, 10(7):74-81.
DONG Jingshen, LIU Quanjun, JI Huichao, et al. Research progress on flotation separation of copper sulfide and arsenic sulfide minerals[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(7):74-81.
- [3] 刘若曦, 张楠. 2024 年中国铜工业供需形势分析[J]. 中国矿业, 2025, 34(4):144-152.
LIU Ruoxi, ZHANG Nan. Supply and demand situation of China's copper industry in 2024[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(4):144-152.
- [4] 曹玉川. 某硫化铜矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(4):82-84.
CAO Yuchuan. Experimental study on flotation processing of some copper sulfide ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(4):82-84.

(上接第 107 页)

44.79% 和 9.07%, TFe 和 SiO₂ 回收率分别为 17.20% 和 11.67%; 总精矿产率为 69.72%, TFe 和 SiO₂ 品位分别为 58.85% 和 4.80%, TFe 和 SiO₂ 回收率分别为 89.98% 和 24.61%。

参考文献(References):

- [1] 张祖刚. 梅山混合铁矿石磨矿选别回收试验研究[J]. 宝钢技术, 2019(5):30-34.
ZHANG Zugang. Experimental study on grinding recovery of Meishan mixed iron ore[J]. Baosteel Technology, 2019(5):30-34.
- [2] 张祖刚, 曾霄祥. 梅山混合铁矿石磁选梯级回收工艺优化与实践[J]. 矿冶工程, 2018, 38(5):68-71.
ZHANG Zugang, ZENG Xiaoxiang. Optimization and practice of stepwise recovery technique by magnetic separation for the mixed iron ore from Meishan Mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018, 38(5):68-71.
- [3] 张祖刚, 甘茂武, 张登峰. 国内某混合铁矿精矿提质降杂试验研究[J]. 宝钢技术, 2024(6):1-10.
ZHANG Zugang, GAN Maowu, ZHANG Dengfeng. Experimental study on improving the quality and reducing impurities of a certain mixed iron ore concentrate in China [J]. Baosteel Technology, 2024(6):1-10.

- [5] CAI J P, JIA X D, MA Y Y, et al. Separation of copper-sulfur using sodium polyacrylate as pyrite depressant in acidic pulp: Floatability and adsorption studies[J]. Minerals Engineering, 2022, 188:107815.
- [6] 王磊, 李孟乐, 邹玉超, 等. 黄铜矿浮选体系晶态/无定形二氧化硅的流变特性与夹带行为[J]. 工程科学学报, 2023, 45(8):1272-1280.
WANG Lei, LI Mengle, ZOU Yuchao, et al. Rheological properties and entrainment behavior of quartz/amorphous silica in chalcopyrite flotation[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(8):1272-1280.
- [7] 范宛惠, 谢蕾, 郭泽, 等. 某高硫低品位铜矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(4):185-188.
FAN Wanhui, XIE Lei, GUO Ze, et al. Investigation on flotation of low-grade high-sulfur copper ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(4):185-188.
- [8] 曾维能, 任浏祎, 曹雨琪, 等. 黄铜矿与磁黄铁矿浮选分离行为及机理研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(6):30-35.
ZENG Weineng, REN Liuyi, CAO Yuqi, et al. Study on mechanism of action of xanthate in flotation separation of chalcopyrite and pyrrhotite[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(6):30-35.
- [9] 毕云霄, 余攀, 丁湛, 等. 黄铁矿浮选抑制剂的研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(4):157-166.
BI Yunxiao, YU Pan, DING Zhan, et al. The development of research on the pyrite flotation depressants[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(4):157-166.

引用本文: 吕兵超. 低品位硫化铜矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(5):108-112.

LYU Bingchao. Experimental study on flotation of low-grade copper sulfide ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(5):108-112.

- [4] 张祖刚, 成磊, 周润, 等. 梅山铁矿 20~2 mm 磨前预选工艺现状分析及优化研究[J]. 现代矿业, 2022, 38(7):185-188.
ZHANG Zugang, CHENG Lei, ZHOU Run, et al. Analysis and optimization of 20~2 mm preconcentration process before grinding in Meishan iron mine[J]. Modern Mining, 2022, 38(7):185-188.
- [5] 张祖刚. 外磁系与内磁系永磁筒式磁选机对比研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(6):96-100.
ZHANG Zugang. Comparative study on permanent magnetic drum separators with external or internal magnetic systems [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(6):96-100.
- [6] 张祖刚, 许继龙, 王秋林. 墨西哥某含硫铁矿石提质降杂选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(4):64-66.
ZHANG Zugang, XU Jilong, WANG Qiulin. Upgrading concentrate from mineral processing of Mexican sulfur-bearing iron ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(4):64-66.

引用本文: 张祖刚, 钱新宇, 于翔州, 等. 梅山铁矿铁精矿含硅偏高原因初析与降硅对策[J]. 矿冶工程, 2025, 45(5):104-107.

ZHANG Zugang, QIAN Xinyu, YU Xiangzhou, et al. Preliminary analysis of causes of higher silicon content in iron concentrate from Meishan Iron Mine and countermeasures of silicon reduction [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(5):104-107.