

某高海拔复杂铜硫矿选矿工艺优化试验研究^①

刘玫华^{1,2,3}, 简胜^{1,2,3}, 吴海军⁴, 张晶^{1,2,3}, 杨东⁴, 刘朝兴⁴

(1.昆明冶金研究院有限公司, 云南 昆明 650031; 2.有色金属强化冶金新技术国家重点实验室, 云南 昆明 650031; 3.云南省选冶新技术重点实验室, 云南 昆明 650031; 4.中铝秘鲁矿业公司, 秘鲁 利马 15001)

摘要: 采用两段铜硫混合浮选-粗精矿再磨-铜硫分离工艺对某高海拔铜矿进行了选矿工艺优化试验研究。两段铜硫混合浮选采用异步浮选方法, 使用对铜选择性好的 KMY-1 铜捕收剂进行铜硫分离, 可高效回收微细粒级嵌布难选铜矿物。小型闭路试验获得了铜品位 23.06%、铜回收率 78.29% 的铜精矿, 比现场生产流程得到的铜精矿铜品位和铜回收率分别提高了 2.92 个百分点和 9.59 个百分点。

关键词: 铜硫矿; 次生铜; 异步浮选; 混合浮选; 铜捕收剂; 铜精矿; 工艺优化; 铜硫分离

中图分类号: TD923

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.01.007

文章编号: 0253-6099(2025)01-0041-05

Optimization of Beneficiation Technique for Complex Copper-Sulfur Ore at High Altitude

LIU Meihua^{1,2,3}, JIAN Sheng^{1,2,3}, WU Haijun⁴, ZHANG Jing^{1,2,3}, YANG Dong⁴, LIU Chaoxing⁴

(1. Kunming Metallurgical Research Institute Co., Ltd., Kunming 650031, Yunnan, China; 2. State Key Laboratory of New Technologies for Enhanced Metallurgy of Non-ferrous Metals, Kunming 650031, Yunnan, China; 3. Yunnan Key Laboratory for New Technologies of Beneficiation and Metallurgy, Kunming 650031, Yunnan, China; 4. Chinalco Peru Mining Co., Ltd., Lima 15001, Peru)

Abstract: A beneficiation flowsheet comprised of two stages of roughing for copper-sulfur bulk flotation, bulk concentrate regrinding and Cu/S separation was adopted for optimization of beneficiation technique for a high-altitude copper ore. By applying asynchronous flotation for Cu-S bulk flotation and using KMY-1, a copper collector with good selectivity for Cu/S separation, efficient recovery of refractory copper minerals with microfine-grained dissemination can be actualized. A laboratory closed-circuit test finally produced a copper concentrate grading 23.06% Cu at 78.29% recovery, up by 2.92 percentage points and 9.59 percentage points correspondingly compared to the copper concentrate yielded from the on-site processing flow.

Key words: copper-sulfur ore; secondary copper; asynchronous flotation; bulk flotation; copper collector; copper concentrate; process optimization; Cu/S separation

铜矿是我国急需的战略性矿产资源之一。尽管我国铜矿资源丰富,但对外依存度高达 75%^[1-2]。某高海拔铜矿矿产产状复杂,矿带连续性差,蚀变类型多样,矿物组成复杂,选矿厂浮选生产指标波动较大,铜回收率低。为改善该矿生产指标,尽可能提高此类矿石综合回收率,本文对该矿开展了工艺优化实验室试验研究。

1 矿石性质

矿样化学多元素分析结果见表 1,矿物组成分析结果见表 2。矿样中 Cu、Fe、S 品位分别为 0.59%、9.64%、3.56%, Ag 品位 9.3 g/t;铜以黄铜矿为主,铁以黄铁矿为主;矿石中有价元素主要为 Cu,可综合伴生回收银;脉石矿物主要为石英、云母、滑石、透闪石、绿

① 收稿日期: 2024-09-06

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC2904603); 云南省重大科技专项(202202AB080012); 云南省基础研究专项-重点项目(202201AS070054)

作者简介: 刘玫华(1983—),女,广西桂平人,硕士,工程师,主要从事多金属选矿工艺优化及药剂研发工作。E-mail:gxliumeihua@163.com

通信作者: 张晶(1985—),女,湖北应城人,硕士,正高级工程师,主要从事选矿工艺及药剂研发工作。E-mail:happy-jingle@163.com

泥石等。

表1 矿样化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1 Main chemical element analysis results of ore sample %

Cu	Ag ¹⁾	Mo	As	Zn	Fe	MgO	F	S
0.59	9.3	0.015	<0.10	0.11	9.64	11.13	0.37	3.56

1) 单位为 g/t。

表2 矿样矿物组成分析结果(质量分数)

Table 2 Analysis results of mineral composition of ore sample %

黄铁矿	黄铜矿	辉铜矿	石英	绿泥石	云母	滑石
11.52	1.04	0.25	28.00	4.25	15.05	17.85
蛇纹石	透闪石	透辉石	勃姆石	钾长石	其他	合计
4.22	7.88	1.31	1.25	2.51	4.87	100.00

矿样铜化学物相分析结果见表3。铜以原生硫化铜和次生硫化铜为主。铜氧化率为5.25%，结合表2数据可知，氧化铜矿物主要是硫化矿物表面氧化，会对铜矿物浮选速率产生影响；同时矿浆中溶解的铜离子会促进黄铁矿上浮，导致铜硫分离困难。

表3 铜化学物相分析结果

Table 3 Analysis results of chemical phase of copper

铜物相	铜质量分数/%	分布率/%
游离氧化铜	0.018	3.05
结合氧化铜	0.013	2.20
次生硫化铜	0.20	33.84
原生硫化铜	0.36	60.91
合计	0.59	100.00

矿石中黄铜矿和辉铜矿的嵌布粒度分析结果见表4。结果表明，黄铜矿和辉铜矿嵌布粒度均较细，磨矿细度不够时均不能很好解离。

表4 原矿中黄铜矿、辉铜矿嵌布粒度分析结果

Table 4 Analysis results of disseminated size of chalcopyrite and chalcocite in raw ore

粒度/ μm	正累计分布率/%	
	黄铜矿	辉铜矿
+300	5.61	—
-300+212	8.86	—
-212+150	19.61	—
-150+74	43.26	8.42
-74+38	69.02	36.88
-38+19	86.97	74.86
-19+9.6	96.08	94.02
-9.6	100.00	100.00

2 试验结果与讨论

工艺矿物学研究结果表明，该铜矿矿物组成复杂，含有大量黄铁矿，微细粒黄铁矿与铜矿物连生，矿样存在表面氧化现象。拟采用两段粗选-粗精矿再磨-铜硫分离工艺进行试验。

2.1 一段磨矿细度对铜选别的影响

磨矿细度对浮选指标影响很大。浮选浓度30%、浮选机搅拌速度1992 r/min、充气量0.4 m³/h，按照图1所示流程，在捕收剂异戊基黄药用量50 g/t、醇类起泡剂HCCl用量40 g/t、生石灰用量1000 g/t条件下进行了一段磨矿细度试验，结果见图2。由图2可知，随着一段磨矿细度增加，粗精矿铜品位逐步增加；磨矿细度-0.074 mm 粒级占比大于70%后，粗精矿铜品位小幅下降；随着磨矿细度增加，铜回收率逐步提升，磨矿细度-0.074 mm 粒级占比大于65%后，铜回收率稍有下降。考虑能耗和磨矿系统的处理能力，一段磨矿细度选择-0.074 mm 占65%为宜。

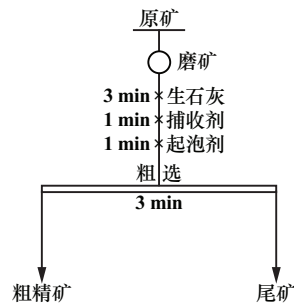


图1 浮选试验流程

Fig. 1 Flowchart for flotation test

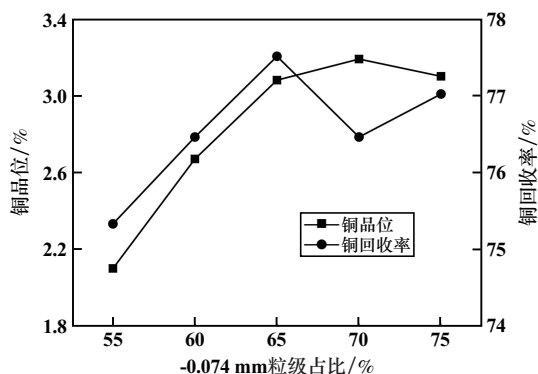


图2 一段磨矿细度试验结果

Fig. 2 Experimental result of the first stage grinding fineness

2.2 生石灰用量对铜选别的影响

在矿浆中添加生石灰既能调节矿浆 pH 值使其利于铜硫矿物上浮，也可中和沉淀杂质离子，减少重金属离子对浮选的不良影响^[3-4]。按照图1所示流程，在磨

矿细度-0.074 mm 粒级占 65%、铜硫捕收剂异戊基黄药用量 50 g/t、起泡剂 HCCL 用量 40 g/t 条件下,进行了生石灰用量试验,结果见图 3。由图 3 可知,随着生石灰用量增加,粗精矿铜品位和铜回收率均先提升后逐步降低,表明少量添加生石灰可提高硫化铜矿物的疏水作用,提高泡沫稳定性,强化铜矿物在气泡上的吸附,提高铜矿物回收率。生石灰用量太大,泡沫黏度增加,泡沫夹带现象严重,导致脉石矿物上浮较多,精矿铜品位下降,同时部分硫矿物在高碱度环境下受到抑制,造成嵌布其中的铜矿物无法回收,铜回收率降低。粗选生石灰用量 1 000 g/t 为宜,此时矿浆 pH 值 7~8,精矿铜品位 2.34%、铜回收率 81.46%。

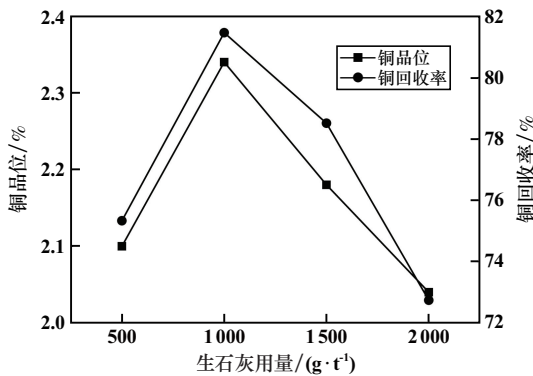


图 3 生石灰用量对铜选别的影响

Fig. 3 Effect of quicklime dosage on copper flotation index

2.3 Na₂S 用量对铜选别的影响

表面氧化的铜硫矿物不易上浮,故使用异步浮选法^[5-7],粗选 1 添加捕收剂和起泡剂让易浮和浮游速度快的铜硫矿物先上浮,粗选 2 添加 Na₂S 让表面氧化、可浮性下降的氧化铜矿物和浮游速度慢的铜矿物后上浮,更利于提高铜回收率。按照图 4 所示流程,在磨矿细度-0.074 mm 粒级占 65%、生石灰用量 1 000 g/t、粗选 1+粗选 2 铜硫捕收剂异戊基黄药用量(50+20) g/t、

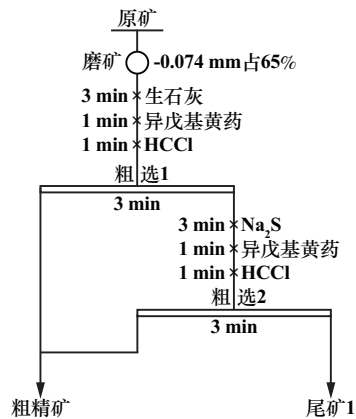


图 4 Na₂S 用量试验流程

Fig. 4 Flowchart of Na₂S dosage test

起泡剂 HCCL 用量(40+20) g/t 条件下,进行了 Na₂S 用量试验,结果见图 5。结果表明,添加 Na₂S 有利于提高铜回收率,随着 Na₂S 用量增加,粗精矿铜回收率提高,Na₂S 用量大于 200 g/t 后,铜回收率提升幅度减少。粗选 2 适宜的 Na₂S 用量为 200 g/t。

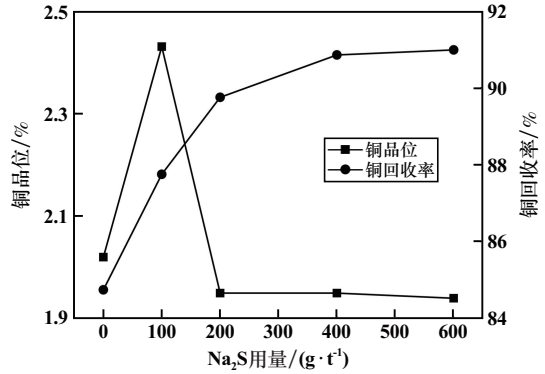


图 5 Na₂S 用量对铜选别的影响

Fig. 5 Effect of Na₂S dosage on copper flotation index

2.4 捕收剂用量对铜选别的影响

按照图 4 所示流程,粗选 2 的 Na₂S 用量 200 g/t,其他条件不变,进行了捕收剂异戊基黄药用量试验,结果见图 6。随着异戊基黄药用量增加,精矿铜回收率逐步提高,粗选 1 异戊基黄药用量大于 50 g/t 后,铜回收率提高幅度收窄。粗选 1+粗选 2 捕收剂异戊基黄药用量(50+20) g/t 为宜。

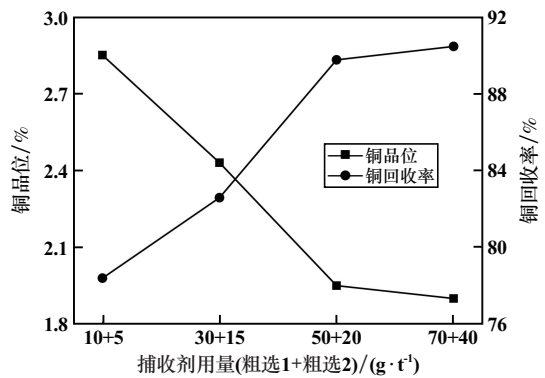


图 6 捕收剂用量对铜选别的影响

Fig. 6 Effect of collector dosage on copper flotation index

2.5 再磨细度对铜硫分离效果的影响

再磨细度太粗,铜矿物未能从黄铁矿及脉石矿物中解离,铜品质势必会下降;再磨细度太细,也会造成微细粒级铜损失,同时微细粒脉石会附着罩盖在铜矿物表面,影响铜矿物上浮^[8-11]。铜硫分离再磨细度试验流程见图 7,使用昆明冶金研究院有限公司自主研发的药剂 KMY-1 作为铜捕收剂,用量为 10 g/t,再磨时添加生石灰 1 000 g/t,精选时添加生石灰 200 g/t,

进行了再磨细度试验,结果见图8。KMY系列捕收剂主要是酯类药剂与烃类油的乳化产物,该系列捕收剂对硫化铜矿物选择性较好^[12]。结果表明,粗精矿再磨细度-0.045 mm 粒级占80%时可获得较高的铜精矿品位和回收率。

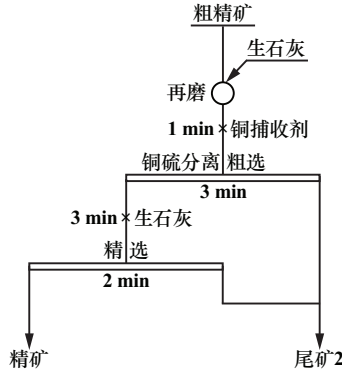


图7 再磨细度试验流程

Fig. 7 Flowchart for regrinding test

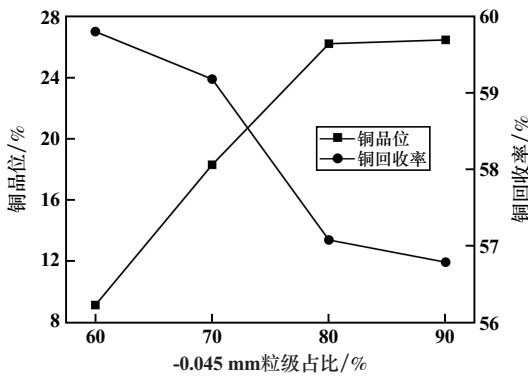


图8 再磨细度对铜硫分离效果的影响

Fig. 8 Effect of regrinding fineness on Cu/S separation

2.6 捕收剂种类对铜硫分离效果的影响

铜硫分离时铜捕收剂的选择非常重要。按照图7所示流程,再磨时添加生石灰 1 000 g/t,再磨细度-0.045 mm 粒级占80%,粗选捕收剂用量 10 g/t、精选生石灰用量 200 g/t 条件下,进行了铜硫分离捕收剂种类试验,结果见表5。5种捕收剂得到的铜精矿回收率差别不大,但铜品位相差明显,KMY-1为捕收剂时铜

表5 铜硫分离捕收剂种类试验结果

Table 5 Effect of different collectors in Cu/S separation

捕收剂种类	铜品位/%	铜回收率/%
丁铵黑药	10.55	65.54
KMY-1	15.31	61.18
Z200	9.01	60.08
Y89	12.46	65.79
乙硫氮	10.45	62.80

精矿品位较高。

2.7 生石灰用量对铜硫分离效果的影响

按照图7所示流程,在再磨细度-0.045 mm 粒级占80%、粗选捕收剂 KMY-1 用量 10 g/t 条件下,开展了铜硫分离粗选生石灰用量试验,结果见表6。随着生石灰用量增加,铜精矿铜品位先增加后降低,铜回收率大幅下降,表明过量的生石灰对铜矿物产生了抑制。综合考虑,铜硫分离段适宜的生石灰用量为 2 000 g/t。

表6 铜硫分离粗选生石灰用量试验结果

Table 6 Effect of quicklime dosage on Cu/S separation

生石灰用量/(g · t ⁻¹)	pH 值	铜品位/%	铜回收率/%
500	8	8.55	65.54
1 000	9	15.31	61.18
2 000	10	25.01	60.08
2 500	12	20.46	55.79

2.8 闭路试验

在实验室条件下,分别采用现场生产流程和本文推荐流程进行了闭路试验。现场生产用捕收剂和起泡剂均购自美国,现场生产流程见图9,本文推荐流程见图10,试验结果见表7。现场生产流程闭路试验获得了 Cu 品位 20.14%、Cu 回收率 68.70% 的铜精矿,本文推荐流程闭路试验获得了 Cu 品位 23.06%、Cu 回收率

药剂单位: g/t

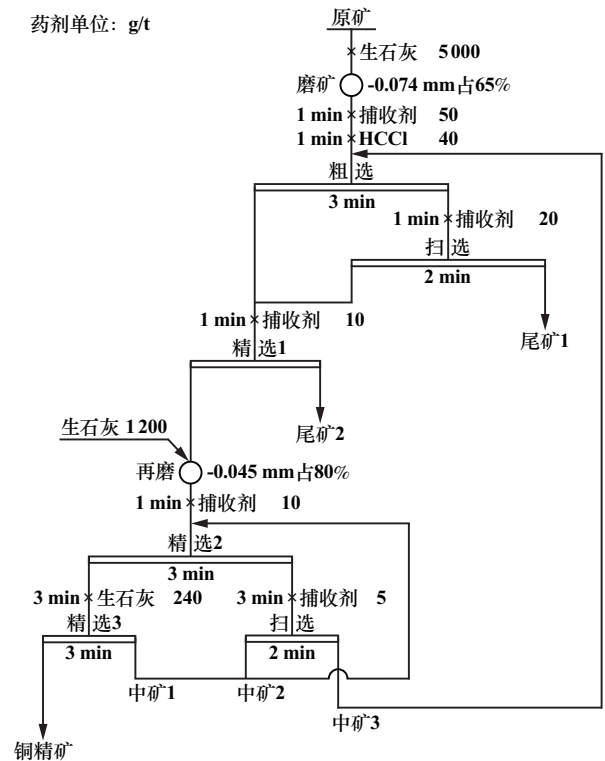


图9 现场生产流程

Fig. 9 Flowchart for on-site production

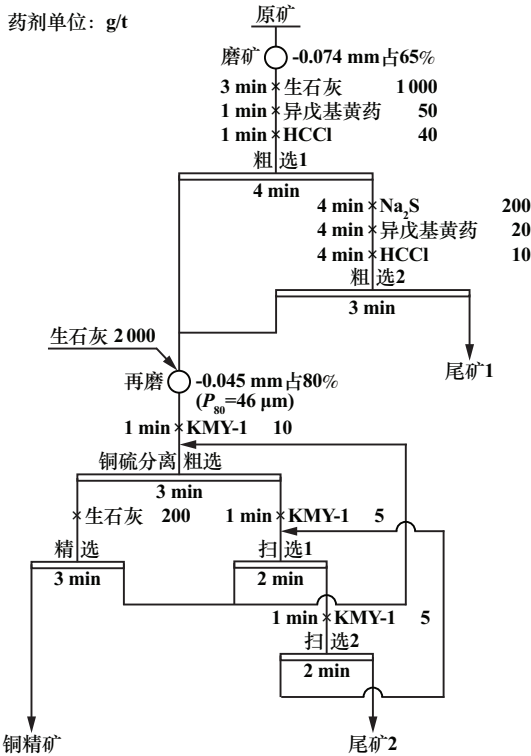


图 10 本文推荐流程

Fig. 10 Flowchart recommended in this paper

表 7 试验结果

Table 7 Test results

流程名称	产品名称	产率/%	铜品位/%	铜回收率/%
现场生产流程	铜精矿	1.99	20.14	68.70
	尾矿 1	81.93	0.14	19.83
	尾矿 2	16.08	0.42	11.47
	原矿	100.00	0.58	100.00
本文推荐流程	铜精矿	2.05	23.06	78.29
	尾矿 1	69.71	0.10	11.64
	尾矿 2	28.24	0.22	10.07
	原矿	100.00	0.60	100.00

78.29%的铜精矿,铜精矿中 Ag 品位 245.2 g/t,比现场生产闭路流程得到的铜精矿铜品位和铜回收率分别提高了 2.92 个百分点和 9.59 百分点,表明本文推荐的闭路流程更具优越性。

3 结论

1) 某高海拔复杂铜硫矿主要有价元素为铜,铜以原生硫化铜和次生硫化铜为主,脉石矿物主要为石英、云母、滑石、透闪石、绿泥石等。采用铜硫混合浮选-铜硫分离工艺,小型闭路试验获得了铜品位 23.06%、铜回收率 78.29%的铜精矿,比现场生产闭路流程得到的铜精矿铜品位和铜回收率分别提高了 2.92 个百分点和 9.59 百分点。

2) 铜硫混合浮选粗选段使用异步浮选法,利于表面氧化、可浮性下降的铜硫矿物和浮游速度慢的铜硫矿物上浮,更利于提高铜回收率。

参考文献 (References):

[1] 杨建锋,马腾,王尧,等. 社会经济发展对铜矿资源勘查驱动传导机制分析[J]. 资源科学, 2018,40(3):526-534.
YANG Jianfeng, MA Teng, WANG Yao, et al. Socio-economic mechanisms driving copper exploration[J]. Resources Science, 2018,40(3): 526-534.

[2] 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.

[3] 王鑫,何廷树,鱼博,等. 不同矿浆温度下 Ca²⁺、Mg²⁺对黄铁矿可浮性的影响[J]. 矿产综合利用, 2024,45(3):121-128.
WANG Xin, HE Tingshu, YU Bo, et al. Influence of Ca²⁺ and Mg²⁺ on pyrite flotation at different slurry temperatures[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024,45(3): 121-128.

[4] 王鹏程. 西藏玉龙铜矿铜硫矿选矿工艺及机理研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2017.
WANG Pengcheng. Study on mineral processing technology and mechanism copper-sulphur ore of Yulong Copper Mine in Xizang[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2017.

[5] 杨虎. 硫化钠强化回收次生斑铜矿的浮选试验及作用机理研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2022.
YANG Hu. Flotation test and mechanism of sodium sulfide enhanced recovery of secondary bornite[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.

[6] 薛季玮,刘启鸿,刘童,等. 氧化对铜硫矿物浮选影响的研究现状[J]. 金属矿山, 2024(2):48-55.
XUE Jiwei, LIU Qihong, LIU Tong, et al. Research status on the effect of oxidation on flotation of copper-sulfide minerals[J]. Metal Mine, 2024(2):48-55.

[7] 李冬,代献仁,李世男. 异步浮选工艺回收米拉多铜矿试验研究[J]. 现代矿业, 2021,37(7):112-115.
LI Dong, DAI Xianren, LI Shinan. Experimental study on recovery of mirador copper minerals by asynchronous flotation process[J]. Modern Mining, 2021,37(7): 112-115.

[8] 张洋,崔毅琦,蓝卓越,等. 组合捕收剂强化回收普朗含泥微细粒硫化铜矿试验及机理分析[J]. 矿产保护与利用, 2023,43(2):27-34.
ZHANG Yang, CUI Yiqi, LAN Zhuoyue, et al. Experiment and mechanism analysis of enhanced recycling mud-containing fine-grained copper sulfide ore of Pulang by combined collectors[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023,43(2): 27-34.

[9] 廖德进,陶黎明,王建军,等. 微细矿物分选理论和浮选药剂研究进展[J]. 现代矿业, 2023,39(9):44-48.
LIAO Dejin, TAO Liming, WANG Jianjun, et al. Research progress on separation theory and flotation reagents of micro-fine minerals[J]. Modern Mining, 2023,39(9):44-48.

(下转第 56 页)

- half-metallicity in Cr-substituted GaN, GaP, GaAs, GaSb material systems[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, 43(9): 3169-3176.
- [8] HOSSAIN A, SARKER M S I, KHAN M K R, et al. Spin effect on electronic, magnetic and optical properties of spinel CoFe_2O_4 : A DFT study[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2020, 253: 114496.
- [9] ROHR D R, TOULOUSE J, PERNAL K. Combining density-functional theory and density-matrix-functional theory[J]. *Physical Review A*, 2010, 82: 052502.
- [10] 邹志强, 黄李金鸿, 李新冬, 等. 镧离子和铵离子在高岭石表面的吸附机理研究[J]. *矿冶工程*, 2023, 43(4): 52-56.
ZOU Zhiqiang, HUANG Lijinhong, LI Xindong, et al. Adsorption mechanism of lanthanum and ammonium ions on kaolinite[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2023, 43(4): 52-56.
- [11] 卯松, 章铁斌. 基于密度泛函理论的含 CO_3^{2-} 缺陷白云石表面性质研究[J]. *矿冶工程*, 2023, 43(2): 66-68.
MAO Song, ZHANG Tiebin. Study on surface properties of dolomite with CO_3^{2-} defects based on density functional theory[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2023, 43(2): 66-68.
- [12] MILMAN V, REFSOON K, CLARK S J, et al. Electron and vibrational spectroscopies using DFT, plane waves and pseudopotentials: CASTEP implementation[J]. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, 2010, 954(1/2/3): 22-35.
- [13] PFROMMER B G, CÔTÉ M, LOUIE S G, et al. Relaxation of crystals with the quasi-newton method[J]. *Journal of Computational Physics*, 1997, 131(1): 233-240.
- [14] EISBERG R, RESNICK R, BROWN J. Quantum physics of atoms, molecules, solids, nuclei and particles[J]. *Physics Today*, 1975, 28(12): 51-52.
- [15] PÉNICAUD M, SIBERCHICOT B, SOMMERS C B, et al. Calculated electronic band structure and magnetic moments of ferrites[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1992, 103(1/2): 212-220.
- 引用本文: 张景奇, 张覃. 杂质取代对菱锰矿磁性的影响研究[J]. *矿冶工程*, 2025, 45(1): 51-56.
ZHANG Jingqi, ZHANG Qin. Effect of impurity substitution on magnetism of rhodochrosite[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025, 45(1): 51-56.

(上接第45页)

- [10] 祁忠旭, 孙大勇, 冯程, 等. 小寺沟低品位微细粒级铜矿高效分离技术研究[J]. *矿业研究与开发*, 2019, 39(3): 10-14.
QI Zhongxu, SUN Dayong, FENG Cheng, et al. Study on high efficiency separation technology of low-grade fine grained copper mine in Xiaosigou[J]. *Mining Research and Development*, 2019, 39(3): 10-14.
- [11] 肖策环. 微细粒黄铜矿表面特性与可浮性关系研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2016.
XIAO Cehuan. The study on the relationship between the surface characteristics and flotability of micro fine chalcopyrite[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2016.
- [12] 唐鑫, 简胜, 张晶, 等. 某含钼高硫矽卡岩型铜矿选矿试验研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2023(3): 49-57.
TANG Xin, JIAN Sheng, ZHANG Jing, et al. Experimental study on beneficiation of a high sulfur molybdenum-bearing skarn copper ore[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2023(3): 49-57.
- [13] 谢晶曦, 常俊标, 王绪明. 红外光谱在有机化学和药物化学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
XIE Jingxi, CHANG Junbiao, WANG Xuming. Application of infrared spectroscopy in organic chemistry and medicinal chemistry[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [14] 刘文刚, 段浩, 刘文宝, 等. 浮选药剂与矿物表面吸附的空间匹配特性研究现状[J]. *金属矿山*, 2021(12): 2-10.
LIU Wengang, DUAN Hao, LIU Wenbao, et al. Current status in spatial matching between molecular structure of flotation reagents and mineral surface[J]. *Metal Mine*, 2021(12): 2-10.
- 引用本文: 魏邦其, 李解, 曹钊, 等. 酯化淀粉对方解石的抑制机理[J]. *矿冶工程*, 2025, 45(1): 46-50.
WEI Bangqi, LI Jie, CAO Zhao, et al. Mechanism for depressing calcite with esterified starch[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025, 45(1): 46-50.

(上接第50页)