

# 新型耐低温捕收剂对齐大山铁矿石的反浮选试验研究<sup>①</sup>

郑业超, 赵通林, 依爽, 宋宝旭, 马芳源, 南楠

(辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114044)

**摘要:** 采用新型耐低温捕收剂 CH 对齐大山铁矿石进行了低温反浮选条件试验、常温及低温反浮选闭路试验, 并对矿物的吸附机制进行了研究。结果表明: 矿浆温度 10 °C、矿浆 pH 值 11.0、抑制剂苛化淀粉用量 600 g/t、活化剂氧化钙用量 750 g/t、捕收剂 CH 用量 1 050 g/t、矿浆浓度(质量分数)30%时, 采用一粗一精反浮选, 可以获得铁品位 68.32%、铁回收率 70.76% 的铁精矿; 一粗一精三扫低温(10 °C)闭路试验可以获得铁品位 66.32%、铁回收率 85.14% 的铁精矿, 常温(25 °C)闭路试验可以获得铁品位 67.31%、铁回收率 85.45% 的铁精矿, 证明 CH 捕收剂在低温下仍具有良好浮选指标。红外光谱、石英表面接触角以及表面张力测定结果表明, 捕收剂 CH 在石英表面发生了吸附, 且吸附作用明显优于传统阴离子捕收剂油酸钠。

**关键词:** 反浮选; 铁矿; 捕收剂; 耐低温捕收剂; 低温浮选; 齐大山铁矿

中图分类号: TD923

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.016

文章编号: 0253-6099(2025)03-0099-05

## Experimental Study on Reverse Flotation of Qidashan Iron Ore with Novel Low-Temperature Collector

ZHENG Yechao, ZHAO Tonglin, YI Shuang, SONG Baoxu, MA Fangyuan, NAN Nan

(School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114044, Liaoning, China)

**Abstract:** A novel low-temperature collector was adopted in the reverse flotation of Qidashan iron ore. Based on a reverse flotation condition test at low temperature, closed-circuit reverse flotation tests at room temperature and low temperature, as well as the study on the mineral adsorption mechanism, it is found that under conditions including pulp temperature at 10 °C, pH of 11.0, caustic starch as a depressor at an amount of 600 g/t, CaO as an activator at an amount of 750 g/t, CH collector at an amount of 1 050 g/t, and pulp density of 30%, the reverse flotation consisting of one stage of roughing and one stage of cleaning can produce an iron concentrate grading 68.32% Fe at 70.76% recovery; the closed-circuit tests by adopting a process consisting of one stage of roughing, one stage of cleaning and three stages of scavenging at 10 °C can yield an iron concentrate grading 66.32% Fe at 85.14% recovery; while the close-circuit test at room temperature (25 °C) results in 85.45% Fe recovery into an iron concentrate grading 67.31% Fe. It has proven that CH collector can bring good flotation effect at low temperatures. Infrared spectroscopy analysis, quartz contact angle testing and surface tension measurements indicate that CH collector has a stronger adsorption on quartz surfaces compared to traditional anionic collector sodium oleate.

**Key words:** reverse flotation; iron ore; collector; low-temperature collector; low-temperature flotation; Qidashan iron ore

铁矿是我国重要的战略资源。我国铁矿资源储量虽大,但其天然禀赋差,具有贫、细、杂等特质<sup>[1-3]</sup>,铁矿石品位较低,需要经过复杂的选别流程<sup>[3-4]</sup>。阴离子反浮选具有选择性好、稳定性强、产品品位高等特点,是低品位难选铁矿石的主要回收方法<sup>[5-6]</sup>。

辽宁鞍山地区是我国重要的铁矿资源分布区。但鞍山地处较高纬度的寒冷地区,因为阴离子药剂在低温下选择性较差,阴离子反浮选工艺在鞍山地区铁矿工业生产应用中都需要将矿浆加热至一定温度才能达到理想的选别指标,但加温不仅会消耗大量热能,同时

① 收稿日期: 2024-12-25

基金项目: 辽宁省教育厅面上项目(LJKMZ20220650)

作者简介: 郑业超(1998—),男,安徽合肥人,硕士研究生,主要研究方向为浮选及矿产资源综合利用。E-mail: 3056726470@qq.com

通信作者: 南楠(1986—),女,河北唐山人,博士,讲师,主要研究方向为浮选溶液化学和浮选药剂研发。E-mail: nannan\_neu@163.com

也会排放大量  $\text{CO}_2$ , 对环境造成破坏。为了满足国家节能减排要求、实现可持续发展, 开发新型耐低温组合药剂已成为目前浮选行业的中中之重。本文采用实验室自主研发的新型脂肪酸类耐低温捕收剂 CH, 在低温条件下对齐大山铁矿石进行反浮选试验, 并研究其作用机理, 证明新型耐低温捕收剂 CH 相较于传统阴离子捕收剂油酸钠具有更强的吸附能力。

## 1 试样性质

试验试样为齐大山铁矿选矿厂磁选后的混磁精矿, 其主要化学成分、矿物组成及平衡分配、粒度分析结果分别如表 1~3 所示。

表 1 试样主要化学成分分析结果(质量分数)

TFe	$\text{SiO}_2$	CaO	MgO	$\text{Al}_2\text{O}_3$
45.73	24.65	4.18	4.95	1.54

表 2 试样矿物组成及平衡分配结果

矿物名称	矿物含量(质量分数)/%	铁品位/%	铁分配率/%
磁赤铁矿	26.21	67.12	38.47
赤铁矿	27.45	68.03	40.83
磁铁矿	7.85	72.86	12.51
铁质辉石	13.22	12.78	3.69
菱铁矿	4.84	41.34	4.37
低铁锰闪石	0.65	6.03	0.09
石英	17.86	—	—
绿泥石	0.94	—	—
黄铁矿	0.04	46.12	0.04
其他脉石	0.94	—	—
合计	100.00	45.73	100.00

表 3 试样粒度组成分析结果

粒度/mm	产率/%	铁品位/%	铁分布率/%
+0.074	0.96	17.00	0.25
-0.074+0.043	12.96	17.50	4.97
-0.043+0.02	71.95	52.42	82.89
-0.02+0.01	10.44	41.63	9.06
-0.01	3.69	35.51	2.83
合计	100.00	45.80	100.00

由表 1~3 可以看出, 试样 TFe 品位 45.73%,  $\text{SiO}_2$  品位 24.65%, CaO 及 MgO 含量较少。试样中主要含铁矿物为磁赤铁矿、赤铁矿和磁铁矿。菱铁矿和黄铁矿中虽然铁品位较高, 但矿物含量少, 铁分配率较低。矿石中脉石矿物以含硅矿物石英为主, 其余脉石矿物含量较低, 因而实现含硅矿物的选择性捕收是选择捕

收剂的关键。试样-0.043 mm 粒级中铁分布率达到了 94.78%, 在实际反浮选过程中, 细粒级铁矿物容易吸附于浮选泡沫中, 不利于铁回收。虽然 0.02~0.043 mm 细粒级铁分布率高, 但仍在可以选别处理的范围内, 而-0.02 mm 粒级是铁损失最多的粒级, 这是导致回收率损失的主要原因。试样已达到了反浮选细度要求, 属于细粒级难选矿物, 不需要采用磨矿流程, 可以直接进行浮选。

## 2 试验方法

浮选试验在 1.5 L 单槽浮选机中进行。试验时调节转速 2 240 r/min, 称取 550 g 样品加入浮选机后加水搅拌, 依次加入 pH 值调整剂(3% NaOH 溶液)、抑制剂(3% 苛化淀粉溶液)、活化剂(3% CaO 溶液)以及捕收剂(3% CH 溶液)。低温浮选试验在空调房中采用冰水调浆, 调浆后温度稳定在 10 ℃。浮选后对精矿、尾矿分别进行过滤、烘干、称重、制样、化验、计算处理。其中低温条件试验采用一粗一精开路流程, 闭路试验采用一粗一精三扫闭路试验流程。低温反浮选试验流程如图 1 所示。

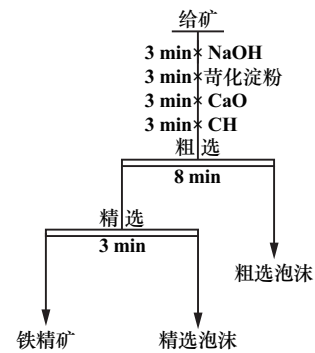


图 1 低温反浮选试验流程

Fig. 1 Flowchart of low temperature reverse flotation

采用 VERTEX 70v 傅里叶变换红外光谱仪检测捕收剂作用前后石英的红外光谱。采用 JC2000C1 接触角测量仪测定油酸钠和 CH 作用前后石英的接触角, 每个样品测定 3 次后取平均值。采用 Sigma701 型全自动表面张力仪测定油酸钠和 CH 作用前后石英的表面张力, 重复测定 3 次后取平均值。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 低温浮选条件试验

#### 3.1.1 矿浆 pH 值对浮选指标的影响

矿浆温度 10 ℃、苛化淀粉用量 500 g/t、氧化钙用量 500 g/t、CH 用量 800 g/t、矿浆浓度(质量分数, 下同)30%条件下, 考察了矿浆 pH 值对铁精矿浮选指标

的影响,结果如图2所示。由图2可知,在试验pH值范围内,随着矿浆pH值升高,精矿铁品位逐渐升高,铁回收率逐渐下降。综合考虑药剂成本与浮选指标等因素,选择矿浆pH值为11.0进行后续试验。

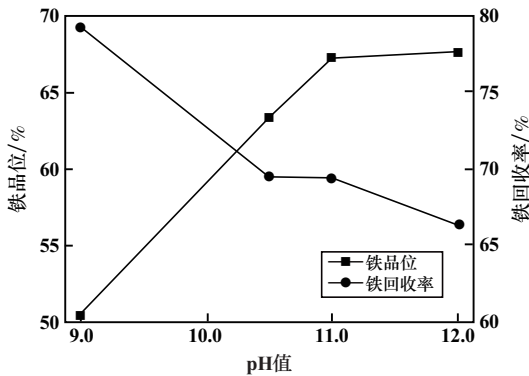


图2 矿浆pH值对铁精矿浮选指标的影响

Fig.2 Effect of pulp pH value on flotation indices of iron concentrate

### 3.1.2 抑制剂用量对浮选指标的影响

试验所用抑制剂为苛化淀粉,它通过抑制铁矿物与药剂结合达到提高铁矿物回收率的目的。矿浆pH值11.0,其他条件不变,考察了抑制剂苛化淀粉用量对铁精矿浮选指标的影响,结果如图3所示。由图3可知,随着苛化淀粉用量增加,精矿铁品位和铁回收率均呈先上升后下降的趋势。综合考量后确定适宜的抑制剂苛化淀粉用量为600 g/t。

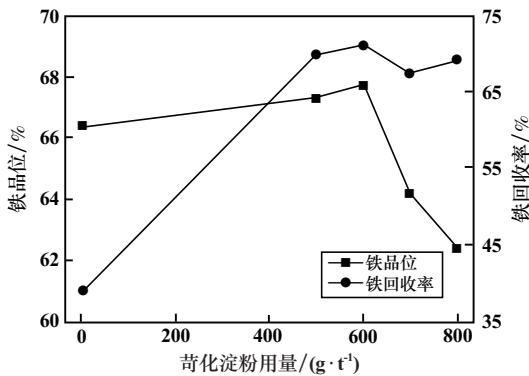


图3 苛化淀粉用量对铁精矿浮选指标的影响

Fig.3 Effect of causticized starch dosage on flotation indices of iron concentrate

### 3.1.3 活化剂用量对浮选指标的影响

活化剂氧化钙中的Ca<sup>2+</sup>可优先在石英表面O处发生吸附<sup>[7]</sup>,形成易于捕收剂吸附的表面,进而提高石英可浮性,达到脱硅效果。苛化淀粉用量600 g/t,其他条件不变,考察了活化剂氧化钙用量对铁精矿浮选指标的影响,结果如图4所示。由图4可知,氧化钙

用量增加,铁品位先大幅增加后趋于平稳,铁回收率先快速下降后缓慢下降。综合考虑药剂成本与浮选指标等因素,确定适宜的氧化钙用量为750 g/t。

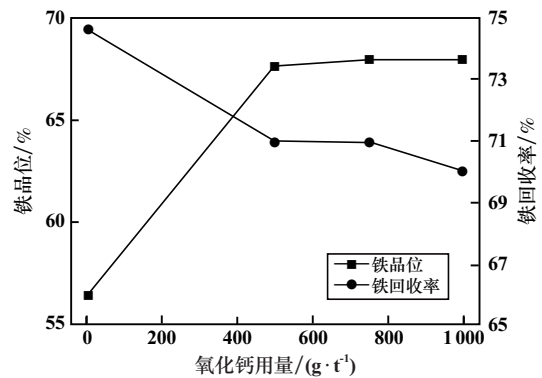


图4 氧化钙用量对铁精矿浮选指标的影响

Fig.4 Effect of CaO dosage on flotation indices of iron concentrate

### 3.1.4 捕收剂用量对浮选指标的影响

氧化钙用量750 g/t,其他条件不变,考察了捕收剂CH用量对铁精矿浮选指标的影响,结果如图5所示。由图5可知,随着捕收剂CH用量增加,精矿铁品位整体呈上升趋势,铁回收率则呈下降趋势。适宜的捕收剂CH用量为1050 g/t,该条件下可获得铁品位68.32%、铁回收率70.76%的铁精矿。

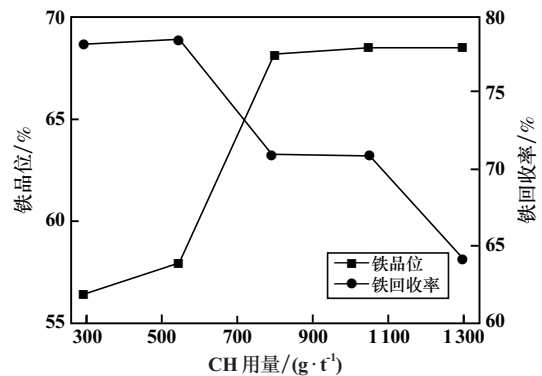


图5 CH用量对铁精矿浮选指标的影响

Fig.5 Effect of CH dosage on flotation indices of iron concentrate

## 3.2 闭路试验

在条件试验基础上,采用一粗一精三扫反浮选流程进行了捕收剂CH常温和低温反浮选闭路试验,并与传统阴离子捕收剂油酸钠的反浮选闭路试验结果进行了对比,闭路试验流程见图6,结果见表4。

矿浆温度25℃时,使用油酸钠作为捕收剂可获得铁品位66.26%、铁回收率82.24%的铁精矿;使用CH作为捕收剂则可获得铁品位67.31%、铁回收率85.45%的铁精矿。常温下采用传统阴离子捕收剂油酸钠与耐低温捕收剂CH均可获得优良的浮选指标,CH的浮选

指标略优于油酸钠。

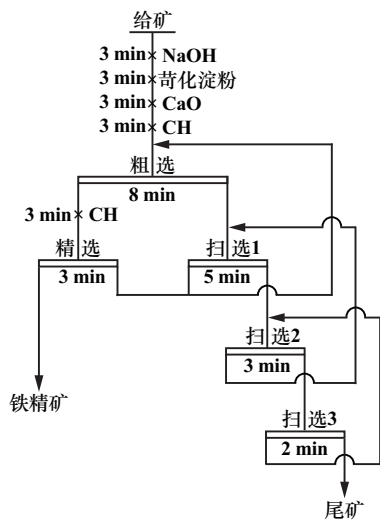


图6 闭路试验流程

Fig.6 Flowchart of closed-circuit test

表4 闭路试验结果

Table 4 Results of closed-circuit tests

捕收剂种类	矿浆温度/℃	产品名称	产率/%	铁品位/%	铁回收率/%
油酸钠	25	铁精矿	56.87	66.26	82.24
		铁尾矿	43.13	18.87	17.76
		给矿	100.00	45.82	100.00
	10	铁精矿	54.36	62.38	75.69
		铁尾矿	45.64	23.86	24.31
		给矿	100.00	44.80	100.00
CH	25	铁精矿	58.24	67.31	85.45
		铁尾矿	41.76	15.98	14.55
		给矿	100.00	45.87	100.00
	10	铁精矿	57.21	66.32	85.14
		铁尾矿	42.79	15.47	14.86
		给矿	100.00	44.56	100.00

矿浆温度 10 ℃ 时,使用油酸钠作为捕收剂可获得铁品位 62.38%、铁回收率 75.69% 的铁精矿,铁尾矿铁品位为 23.86%;使用 CH 作为捕收剂时可获得铁品位 66.32%、铁回收率 85.14% 的铁精矿,铁尾矿铁品位仅 15.47%。相比于传统捕收剂油酸钠,低温下新型捕收剂 CH 所得铁精矿品位提高 3.94 百分点,铁回收率提高 9.45 百分点,尾矿品位降低 8.39 百分点,CH 在低温下仍具有良好的捕收能力。

## 4 机理分析

### 4.1 红外光谱分析

CH 作用前后石英的红外光谱如图 7 所示。由图 7 可知,1 070.14  $\text{cm}^{-1}$  处为 Si—O 不对称伸缩振动吸收峰,即纯矿物石英的第一特征吸收峰<sup>[8]</sup>;787.95

和 689.83  $\text{cm}^{-1}$  处为石英 Si—O—Si 对称伸缩振动吸收峰<sup>[9]</sup>;451.31  $\text{cm}^{-1}$  处为石英 Si—O 弯曲振动吸收峰,此处为纯矿物石英的第二特征吸收峰<sup>[10]</sup>。与 CH 作用后,3 402.01  $\text{cm}^{-1}$  处 O—H 键特征吸收峰向高波数方向偏移至 3 434.35  $\text{cm}^{-1}$  处,说明捕收剂 CH 与石英表面存在氢键吸附作用,氢键效应减弱了 O—H 键的振动,降低了其化学键力。Si—O—Si 对称伸缩振动吸收峰分别从 787.95 和 689.83  $\text{cm}^{-1}$  处偏移至 786.00 和 690.53  $\text{cm}^{-1}$  处,偏移量较小,这也表明 CH 与石英表面存在氢键吸附作用;石英的第一特征吸收峰和第二特征吸收峰分别向高波数方向偏移了 15.09 和 11.58  $\text{cm}^{-1}$ ,说明加入捕收剂 CH 后,Si—O 键能量增加,键振动增强,CH 在石英表面发生了键合吸附。

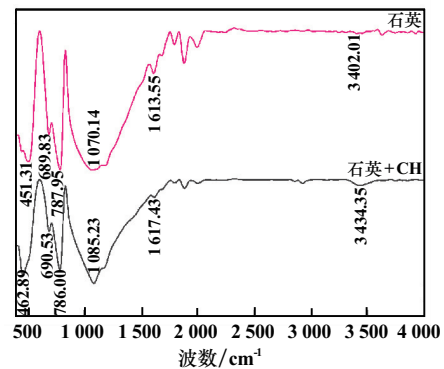


图7 CH 作用前后石英的红外光谱

Fig.7 Infrared spectra of quartz before and after interaction with collector CH

### 4.2 接触角测试

pH=11、CH 和油酸钠质量浓度均为 20 mg/L 时,纯矿物石英与药剂作用前后接触角的变化如图 8 所示。由图 8 可知,石英原矿接触角为 18.47°,说明纯矿物石英与捕收剂作用前表面亲水。油酸钠和 CH 作用后的石英表面接触角分别增至 50.69°和 104.38°,表明油酸钠和 CH 均在石英表面发生了吸附,且 CH 的吸附能明显高于油酸钠。新型捕收剂 CH 能克服传统油酸钠在低温下溶解性和分散性差的问题,进而提高捕收剂对石英的吸附作用,实现铁矿物与石英矿物的分离。

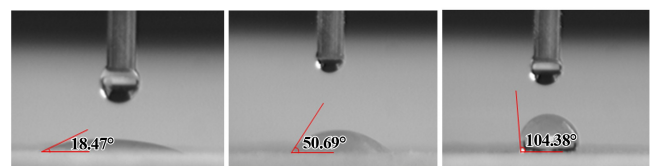


图8 石英与捕收剂作用前后的接触角

Fig.8 Contact angle of quartz before and after interaction with collectors

### 4.3 表面张力分析

降低表面张力和在溶液中形成胶束是捕收剂的两个重要性质<sup>[11]</sup>,一般临界胶束浓度(CMC)越小,捕收能力越强。10℃时捕收剂质量浓度对石英表面张力的影响如图9所示。

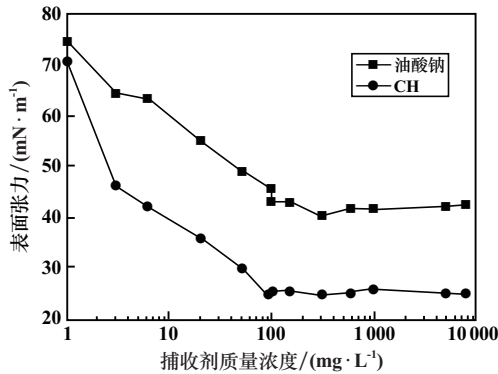


图9 捕收剂质量浓度对石英表面张力的影响

Fig.9 Effect of collector concentration on quartz surface tension

随着捕收剂质量浓度逐渐增大,石英表面张力整体呈下降趋势。油酸钠药剂体系中,油酸钠质量浓度达到310 mg/L时,石英表面张力最小,为40.45 mN/m;继续增大油酸钠浓度,石英表面张力有缓慢上升的趋势,表明10℃时油酸钠的CMC为310 mg/L,最低表面张力为40.45 mN/m。CH药剂体系中,石英表面张力变化趋势与油酸钠体系类似,其CMC为97 mg/L,最低表面张力为25.12 mN/m。不难发现,CH的CMC显著低于油酸钠的CMC,且在临界胶束浓度下CH的最低表面张力也低于油酸钠的最低表面张力,表明CH形成胶团和降低表面张力的能力更强,疏水性更好,气泡稳定性强,捕收效果较传统捕收剂油酸钠更佳。

## 5 结论

1) 采用新型耐低温捕收剂CH,低温(10℃)条件下,在矿浆pH值11.0、抑制剂苛化淀粉用量600 g/t、活化剂氧化钙用量750 g/t、捕收剂CH用量1050 g/t、矿浆浓度30%时,一粗一精开路浮选试验可获得铁品位68.32%、铁回收率70.76%的铁精矿;一粗一精三扫低温闭路浮选试验可获得铁品位66.32%、回收率85.14%的铁精矿;常温(25℃)闭路浮选试验可获得铁品位67.31%、回收率85.45%的铁精矿。捕收剂CH在低温和常温下均可取得较好的浮选效果,在实际生产中可适用于各个季节,为后续应用于工业生产奠定了基础。

2) 红外光谱检测结果表明,CH在石英表面发生了键合吸附,且伴有氢键形成。CH相较于传统油酸钠具有更低的临界胶束浓度和表面张力,有助于增加

气液界面的吸附量,从而提高矿物回收率。经CH作用后的石英接触角为104.38°,表明CH在石英表面有较强的吸附作用,进而增强石英表面疏水性,实现石英与铁矿物的分离。

### 参考文献(References):

- [1] 董振海,智慧,满晓霏,等. 新型低温捕收剂反浮选齐大山选厂混磁精矿工艺研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):52-56.  
DONG Zhenhai, ZHI Hui, MAN Xiaofei, et al. Reverse flotation of mixed magnetic concentrate in Qidashan concentrator with new low-temperature collector [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(2):52-56.
- [2] 李孝龙. 某微细粒嵌布磁铁矿选矿工艺研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(4):57-60.  
LI Xiaolong. Processing flowsheet optimization for fine-grained magnetite ore beneficiation [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(4):57-60.
- [3] 张斌,陈雪,张凇,等. 某难选铁矿磁—重—浮联合选矿试验研究[J]. 金属矿山, 2024(7):99-103.  
ZHANG Bin, CHEN Xue, ZHANG Lin, et al. Study on magnetic separation-gravity separation-flotation combined beneficiation test for a refractory iron mine[J]. Metal Mine, 2024(7):99-103.
- [4] 谷晓恬,朱一民,刘杰,等. 新型低温捕收剂DGT-P对齐大山铁矿石的反浮选应用研究[J]. 矿产综合利用, 2023(2):1-6.  
GU Xiaotian, ZHU Yimin, LIU Jie, et al. Research on the application of a new low-temperature collector DGT-P in Qidashan iron ore reverse flotation process [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(2):1-6.
- [5] 高平. 巴基斯坦某铁矿反浮选试验研究[J]. 烧结球团, 2020,45(4):65-70.  
GAO Ping. Experimental research on reverse flotation of an iron ore in Pakistan [J]. Sintering and Pelletizing, 2020,45(4):65-70.
- [6] 龚豪. 新型捕收剂H-27A在李楼铁矿反浮选中的试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2020,40(4):114-117.  
GONG Hao. Experimental research on a new collector H-27A in the reverse flotation of Lilou Iron Ore [J]. Mining Research and Development, 2020,40(4):114-117.
- [7] 郭文达,朱一民,韩跃新,等. 钙离子对脂肪酸类捕收剂浮选石英的影响机理[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018,39(3):409-415.  
GUO Wenda, ZHU Yimin, HAN Yuexin, et al. Effects and activation mechanism of calcium ion on the flotation of quartz with fatty acid collector [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018,39(3):409-415.
- [8] 杨晓峰,马玉宁,陈宇,等. 组合捕收剂DYN-3在铁矿石浮选脱硅中的性能研究[J]. 金属矿山, 2023(4):103-109.  
YANG Xiaofeng, MA Yuning, CHEN Yu, et al. Study on the performance of combined collector DYN-3 in iron ore desilication flotation [J]. Metal Mine, 2023(4):103-109.

(下转第109页)

## 参考文献(References):

- [1] JANKOVIC A, SUTHERS S, WILLS T, et al. Evaluation of dry grinding using HPGR in closed circuit with an air classifier[J]. Minerals Engineering, 2015, 71:133-138.
- [2] CHELGANI S C, PARIAN M, PARAPARI P S, et al. A comparative study on the effects of dry and wet grinding on mineral flotation separation: A review[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(5):5004-5011.
- [3] 朱泊翰,张鹏羽,欧乐明,等. 高压辊磨对低品位金矿浮选的影响研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(3):80-83.  
ZHU Bohan, ZHANG Pengyu, OU Leming, et al. Influence of high-pressure roller grinding on flotation performance of low-grade gold ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(3):80-83.
- [4] ALTUN D, GEROLD C, BENZER H, et al. Copper ore grinding in a mobile vertical roller mill pilot plant[J]. International Journal of Mineral Processing, 2015, 136:32-36.
- [5] OGONOWSKI S, WOLOSIEWŁCZ-GLĄB M, OGONOWSKI Z, et al. Comparison of wet and dry grinding in electromagnetic mill[J]. Minerals, 2018, 8(4):138.
- [6] PELTONIEMI M, KALLIO R, TANHUA A, et al. Mineralogical and surface chemical characterization of flotation feed and products after wet and dry grinding[J]. Minerals Engineering, 2020, 156:106500.
- [7] WANG C T, LIU R Q, ZHAI Q L, et al. Exploring the effect of pulp aeration and lime-aid grinding on pyrrhotite-rich type copper sulfide ore flotation separation[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 311:123268.
- [8] LIU J, HAN L, CORIN K C, et al. A study of the effect of grinding environment on the flotation of two copper sulphide ores[J]. Minerals Engineering, 2018, 122:339-345.
- [9] MU Y F, PENG Y J. The role of sodium metabisulphite in depressing pyrite in chalcopyrite flotation using saline water[J]. Minerals Engineering, 2019, 142:105921.
- [10] BU X Z, CHEN F F, CHEN W, et al. The effect of whey protein on the surface property of the copper-activated marmatite in xanthate flotation system[J]. Applied Surface Science, 2019, 479(15):303-310.
- [11] MENG X Y, ZHAO H B, SUN M L, et al. The role of cupric ions in the oxidative dissolution process of marmatite: A dependence on  $\text{Cu}^{2+}$  concentration[J]. Science of the Total Environment, 2019, 675:213-223.
- [12] 傅开彬,董发勤,陈道前,等. 四川某低品位尾矿中铜、锌硫化物生物浸出研究[J]. 矿冶工程, 2017, 37(1):81-84.  
FU Kaibin, DONG Faqin, CHEN Daoqian, et al. Bioleaching of copper and zinc sulphides in a low-grade tailings from Sichuan Province[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37(1):81-84.
- [13] QIU H X, WU B Z, CHEN J H, et al. Selective depression of marmatite by sodium alginate in flotation separation of galena and marmatite[J]. Minerals Engineering, 2023, 201:108229.
- [14] LYU X, ZHAO H B, LIU Z L, et al. Comparative study on biotic system and abiotic system of marmatite at high cupric ions concentration[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(6):14887-14894.
- 引用本文:傅开彬,李贺,刘泽铭,等. 干磨过程中抑制剂对铁闪锌矿表面性质的影响研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(3):104-109.  
FU Kaibin, LI He, LIU Zeming, et al. Effect of depressant on surface properties of marmatite during dry grinding[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(3):104-109.
- (上接第 103 页)
- [9] 郭颖,刘文宝,刘文刚,等. 月桂酰胺丙基甜菜碱对赤铁矿反浮选性能及机理研究[J]. 金属矿山, 2023(8):74-79.  
GUO Ying, LIU Wenbao, LIU Wengang, et al. Study on reverse flotation performance and mechanism of lauramidopropyl betaine for hematite[J]. Metal Mine, 2023(8):74-79.
- [10] 张弘,高鹏鑫,高卿楠. 热红外反射光谱技术在石英含量评价中的应用[J]. 岩矿测试, 2021, 40(5):710-719.  
ZHANG Hong, GAO Pengxin, GAO Qingnan. Application of thermal infrared reflectance spectroscopy in the evaluation of quartz content[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(5):710-719.
- [11] 王纪镇,程雅芝,肖雨辰,等. 油酸钠/TX-100 组合药剂对白钨矿的捕收性能及机理研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(1):100-104.  
WANG Jizhen, CHENG Yazhi, XIAO Yuchen, et al. Collecting performance of mixed NaOL/TX-100 for scheelite flotation and its mechanism[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(1):100-104.
- 引用本文:郑业超,赵通林,依爽,等. 新型耐低温捕收剂对齐大山铁矿石的反浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(3):99-103.  
ZHENG Yechao, ZHAO Tonglin, YI Shuang, et al. Experimental study on reverse flotation of Qidashan iron ore with novel low-temperature collector[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(3):99-103.