

氧化对黄铜矿可浮性的影响及机理分析^①

董丽鑫, 代淑娟, 李鹏程, 刘子源, 杨方圆, 栾靖淳

(辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 将黄铜矿分别置于空气、水中进行氧化试验,在适宜的矿浆 pH 值和捕收剂用量条件下分别对氧化后黄铜矿进行单矿物浮选试验,并通过接触角、红外光谱和 Zeta 电位等检测手段揭示氧化对黄铜矿可浮性的影响规律及其作用机理。结果表明:某甲酯 JXZZ 对氧化后黄铜矿的回收率高于丁基黄药 DJHY 和某丙烯酯 BXZX;经空气和水氧化后,黄铜矿表面疏水性增强;CO₂ 吸收峰面积随着空气氧化时间、空气氧化温度和水中氧化时间增大而增大,3 种捕收剂在黄铜矿表面均发生了化学吸附;与未氧化黄铜矿相比,氧化后的黄铜矿零电点发生正向偏移,其中水中氧化效果更稳定。可以通过氧化来调控黄铜矿的可浮性。

关键词: 黄铜矿; 氧化; 浮选; 可浮性; 作用机理

中图分类号: TD923

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.04.013

文章编号: 0253-6099(2025)04-0073-06

Effect and Mechanism of Oxidation for Floatability of Chalcopyrite

DONG Lixin, DAI Shujuan, LI Pengcheng, LIU Ziyuan, YANG Fangyuan, LUAN Jingchun

(School of Mining Engineering, University of Science and Technology of Liaoning, Anshan 114051, Liaoning, China)

Abstract: Single mineral flotation tests of chalcopyrite oxidized respectively in air and water were carried out under optimized conditions such as pulp pH and collector dosage. The mechanism for oxidation bringing effect to the floatability of chalcopyrite was studied by measuring contact angle and Zeta potential, and using infrared spectroscopy. The results show that the recovery of oxidized chalcopyrite with collector JXZZ is higher than those using DJHY and BXZX; the surface hydrophobicity of chalcopyrite oxidized in air and water can be improved; the area of CO₂ absorption peak increases with the increase of air oxidation time, air oxidation temperature and water oxidation time, and all the three collectors can be chemisorbed on chalcopyrite. After oxidation, point of zero charge of oxidized chalcopyrite shifts positively, while the oxidation state of chalcopyrite in water is comparatively stable. It can be concluded that the floatability of chalcopyrite can be regulated by surface oxidation of this ore.

Key words: chalcopyrite; oxidation; flotation; floatability; reaction mechanism

铜具有良好的导电性、导热性、耐腐蚀性和延展性,广泛应用于冶金、机械设备和化工等领域^[1]。硫化矿占据了世界铜矿资源的 90%,其中黄铜矿(CuFeS₂)是储量最大、分布最广的硫化铜矿^[2]。

黄铜矿具有良好的天然可浮性,常用的选别方法是浮选法^[3]。黄铜矿具有氧化特性,表面氧化会改变矿物的表面性质,从而影响矿物可浮性。因此,研究氧化对黄铜矿可浮性的影响十分重要。近年来已有诸多学者研究了氧化对硫化矿可浮性的影响^[4-6],研究内容多为黄铜矿浮选药剂和工艺^[7-12]。本文首先在空气和水中对黄铜矿进行氧化试验,并通过单矿物浮选试验

探究氧化条件对黄铜矿可浮性的影响规律;通过接触角、红外光谱、Zeta 电位等检测手段研究氧化对黄铜矿可浮性影响规律以及作用机理,对黄铜矿后续的选别与工艺研究具有一定指导和借鉴意义。

1 试验原料及方法

1.1 试验原料

试验原料为黄铜矿单矿物。矿样经手选除杂后,用锤子和 XZM-1 振动磨进行碎磨,对磨细后的矿样进行筛分,+0.074 mm 粒级产品继续研磨直至所有矿样通过 0.074 mm 标准筛,混合缩分后得到黄铜矿单矿物

① 收稿日期: 2025-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(52174254);2024 年辽宁省教育厅高校基本科研项目(LJ212410146034)

作者简介: 董丽鑫(1998—),女,辽宁丹东人,硕士研究生,主要研究方向为菱镁矿选矿。E-mail:1595813927@qq.com

样品。为防止样品氧化,将样品用牛皮纸密封保存,避免与空气和水分接触。

黄铜矿单矿物 X 射线荧光光谱分析结果见表 1。

表 1 黄铜矿单矿物 X 射线荧光光谱分析结果(质量分数)

Table 1 Analysis results of chalcopyrite single mineral with X-ray fluorescence spectrometry %

SiO ₂	SO ₃	Fe ₂ O ₃	CuO	ZnO	As ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	PbO
1.14	50.30	25.63	22.55	0.11	0.01	0.16	0.07

由表 1 可知,黄铜矿单矿物纯度较高,主要金属元素为 Cu 和 Fe,基本不含其他伴生矿物。黄铜矿样品满足单矿物试验要求。

1.2 试验方法

1.2.1 氧化试验

空气氧化试验:每次取黄铜矿单矿物 4 g,均匀平铺在培养皿中,设置不同氧化时间和氧化温度,制备空气氧化样品,用于浮选试验与机理分析。

水中氧化试验:每次取黄铜矿单矿物 4 g,放入装有 20 mL 去离子水的烧杯中,矿浆浓度(质量分数)为 16.67%,固定氧化温度为 20 ℃,设置不同氧化时间,用磁力搅拌器以转速 400 r/min 进行水中氧化^[6]。采用循环水式真空泵对氧化后样品进行过滤,并在 20 ℃ 真空干燥箱中进行干燥,制备水中氧化样品,用于浮选试验与机理分析。

1.2.2 浮选试验

分别取氧化前后的黄铜矿单矿物样品 4 g,在浮选槽中加去离子水 20 mL,固定浮选机搅拌转速 1 992 r/min,按图 1 所示流程进行单矿物浮选试验。

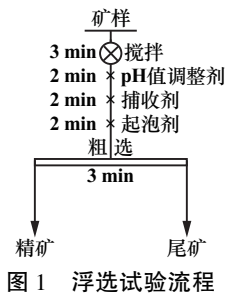


图 1 浮选试验流程

Fig. 1 Flowchart of flotation test

试验试剂包括 pH 值调整剂盐酸、氢氧化钠,捕收剂丁基黄药(DJHY)、某丙烯酸酯(BXZX)、某甲酰胺酯(JXZZ),起泡剂 2[#]油等。试验用水为去离子水。

1.3 检测方法

采用 JC2000-C1 接触角检测仪检测氧化前后黄铜矿的接触角,每组矿样测量 3 次,取平均值。采用

NICOLET 380 FT-IR 红外光谱仪检测氧化前后黄铜矿的红外光谱,测定 2 360 和 2 340 cm⁻¹处的 CO₂ 吸收峰并进行积分,计算得到双峰峰面积,用于判断黄铜矿氧化程度。采用 JS94H 微电泳仪测量氧化前后黄铜矿的 Zeta 电位,每个样品测量 3 次,取平均值。

2 试验结果及分析

2.1 未氧化黄铜矿浮选试验

2.1.1 矿浆 pH 值对未氧化黄铜矿可浮性的影响

在捕收剂用量 100 g/t、2[#]油用量 100 g/t 条件下,研究了矿浆 pH 值对未氧化黄铜矿可浮性的影响,结果如图 2 所示。由图 2 可知,矿浆 pH 值对黄铜矿可浮性有很大影响。随着 pH 值升高,捕收剂 DJHY、BXZX、JXZZ 作用后黄铜矿上浮率均先减小后缓慢增大,pH 值 8 时对应的上浮率分别为 57.75%、56.00%、74.50%,均达到最小值;相同 pH 值条件下,3 种捕收剂对未氧化黄铜矿的捕收效果由大到小为:JXZZ>DJHY>BXZX。pH 值 6 时,3 种捕收剂体系下未氧化黄铜矿的上浮率均超过 60%,选择矿浆 pH 值 6 进行后续浮选试验。

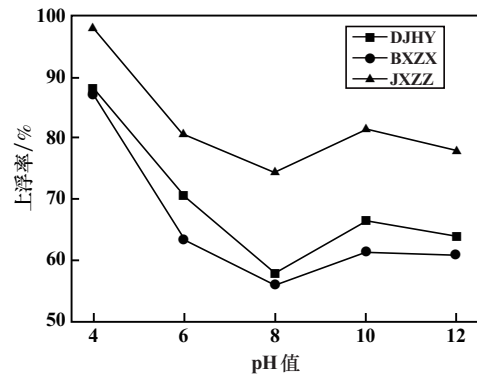


图 2 pH 值对未氧化黄铜矿可浮性的影响

Fig. 2 Effect of pH on floatability of unoxidized chalcopyrite

2.1.2 捕收剂用量对未氧化黄铜矿可浮性的影响

矿浆 pH 值为 6、2[#]油用量 100 g/t 条件下,考察了捕收剂用量对未氧化黄铜矿可浮性的影响,结果如图 3 所示。由图 3 可知,以 DJHY 为捕收剂时,随着捕收剂用量增加,黄铜矿上浮率缓慢增大,DJHY 用量 150 g/t 时黄铜矿上浮率达到最大值,为 70.75%;以 BXZX 为捕收剂,在其用量 75 g/t 时黄铜矿上浮率达到最大值,为 66.75%,BXZX 用量大于 75 g/t 后,黄铜矿上浮率不断减小;以 JXZZ 为捕收剂时,随着捕收剂用量增加,黄铜矿上浮率不断增大,在 JXZZ 用量 150 g/t 时黄铜矿上浮率达到最大值,为 85.75%。捕收剂用量为 100 g/t 时,以 DJHY、JXZZ 为捕收剂的黄铜矿上浮率均超过 60%,确定后续浮选试验捕收剂 DJHY、BXZX、

JXZZ 用量分别为 100、75、100 g/t。

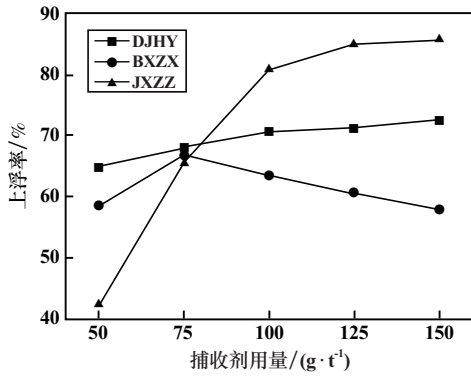


图 3 捕收剂用量对未氧化黄铜矿可浮性的影响
Fig.3 Effect of collector dosages on floatability of unoxidized chalcopyrite

上浮率不断减小后稳定在 35.00%左右;以 JXZZ 为捕收剂时,黄铜矿上浮率一直维持在 80.00%左右。

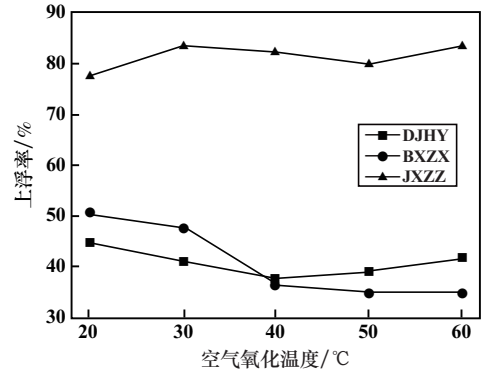


图 5 空气氧化温度对黄铜矿可浮性的影响
Fig.5 Effect of air oxidation temperature on floatability of chalcopyrite

2.2 氧化后黄铜矿浮选试验

2.2.1 空气氧化对黄铜矿可浮性的影响

空气氧化温度 20 °C,在矿浆 pH 值为 6,2#油用量 100 g/t,捕收剂 DJHY、JXZZ 用量均为 100 g/t, BXZX 用量 75 g/t 条件下进行浮选,考察了空气氧化时间对黄铜矿可浮性的影响,结果如图 4 所示。由图 4 可知,空气氧化时间对黄铜矿可浮性影响很大,随着空气氧化时间增加,黄铜矿上浮率呈现下降趋势。空气氧化时间 6 h 时,以 DJHY 为捕收剂时,黄铜矿上浮率达到最小值 40.00%,以 BXZX 为捕收剂的黄铜矿上浮率为 53.00%;以 JXZZ 为捕收剂时,黄铜矿上浮率在空气氧化时间 12 h 时达到最小值,为 69.50%。确定适宜的 空气氧化时间为 6 h。

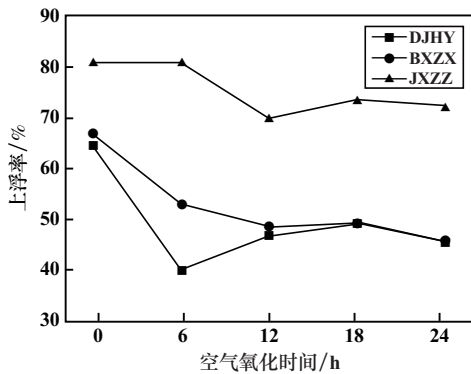


图 4 空气氧化时间对黄铜矿可浮性的影响
Fig.4 Effect of air oxidation time on floatability of chalcopyrite

空气氧化时间 6 h,其他条件不变,考察了空气氧化温度对黄铜矿可浮性的影响规律,结果见图 5。由图 5 可知,随着空气氧化温度升高,以 DJHY 为捕收剂时,黄铜矿上浮率先减小后增大,在空气氧化温度 40 °C 时达到最小值 37.50%;以 BXZX 为捕收剂时,黄铜矿

以 DJHY 和 BXZX 为捕收剂时,经过空气氧化的黄铜矿上浮率均有所减小,可浮性降低;空气氧化时间 6 h,以 JXZZ 为捕收剂的黄铜矿上浮率与以 BXZX、DJHY 为捕收剂的黄铜矿上浮率差值最大,分别为 27.75、40.75 百分点;空气氧化温度 40 °C,以 JXZZ 为捕收剂的黄铜矿上浮率与以 BXZX、DJHY 为捕收剂的黄铜矿上浮率差值分别为 45.50、44.75 百分点。

2.2.2 水中氧化对黄铜矿可浮性的影响

水中氧化温度 20 °C,在矿浆 pH 值为 6,2#油用量 100 g/t,捕收剂 DJHY、JXZZ 用量均为 100 g/t, BXZX 用量 75 g/t 条件下,水中氧化时间对黄铜矿可浮性的影响如图 6 所示。由图 6 可知,随着水中氧化时间增加,以 DJHY 为捕收剂时,黄铜矿上浮率先减小后缓慢增大,在水中氧化时间 1.0 h 时达到最小值 40.75%;以 BXZX 为捕收剂时,水中氧化时间 0.5 h 时黄铜矿上浮率达到最小值 54.82%;以 JXZZ 为捕收剂时,随着氧化时间增加,黄铜矿上浮率稳定在 82.00%左右。

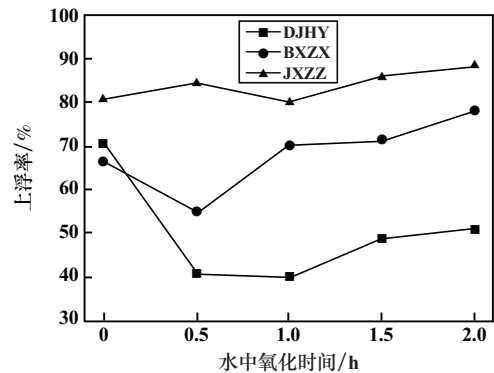


图 6 水中氧化时间对黄铜矿可浮性的影响
Fig.6 Effect of time oxidation in water on the floatability of chalcopyrite

3 机理分析

3.1 接触角分析

接触角可以反映矿物的润湿性和可浮性,接触角越大,矿物疏水性越强,可浮性越好。测定了不同氧化条件下黄铜矿的接触角,结果如图7所示。由图7可知,黄铜矿原矿接触角为 23.90° 。20℃下空气氧化时,随着空气氧化时间增加,接触角逐渐增大,但增幅不大,在空气氧化时间24 h时达到最大值 33.19° ;空气氧化时间6 h时,随着空气氧化温度增加,接触角增大,空气氧化温度20℃时接触角最小,为 28.46° ,空气氧化温度60℃时,接触角达到最大,为 49.47° ;空气氧化温度40℃时黄铜矿接触角减小,可浮性降低,这与空气氧化浮选试验结果相符;20℃水中氧化时,随着水中氧化时间增加,接触角不断增大,最后保持在 43° 左右。接触角变化趋势说明黄铜矿经过水中氧化后表面疏水性有所增强,这与水中氧化浮选试验结果一致。

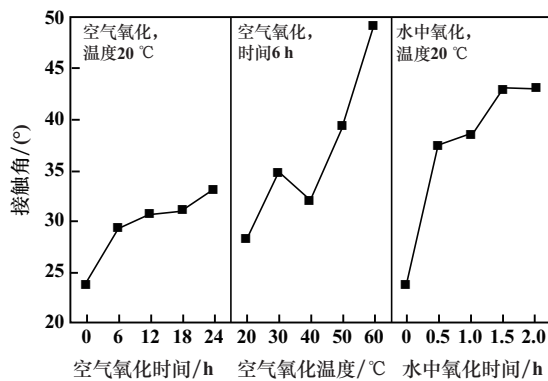


图7 不同氧化条件下黄铜矿的接触角

Fig.7 Contact angles of chalcopyrite under different oxidation conditions

3.2 红外光谱分析

通过红外光谱测定 2360 和 2340 cm^{-1} 处的 CO_2 吸收峰并进行积分计算吸收峰峰面积,可判断不同氧化条件下黄铜矿的氧化程度变化规律,不同氧化条件下黄铜矿的 CO_2 峰面积结果见图8,与捕收剂作用前后黄铜矿的红外光谱分析结果如图9所示。

氧化过程中,黄铜矿中的硫被氧化成硫酸盐,同时会产生 CO_2 , CO_2 产生量越多,氧化程度越大,所对应的红外光谱中的吸收峰峰面积越大。因此,通过红外光谱测定并计算 CO_2 吸收峰峰面积可以判断黄铜矿的氧化程度^[5]。由图8可以观察到,3种氧化条件下,随着氧化时间延长和氧化温度升高,黄铜矿的 CO_2 双峰峰面积均呈增大的趋势,说明黄铜矿的氧化程度

随之增大。黄铜矿未被氧化时, CO_2 吸收峰峰面积为64.85,空气氧化时间24 h时, CO_2 吸收峰峰面积增大至378.9。

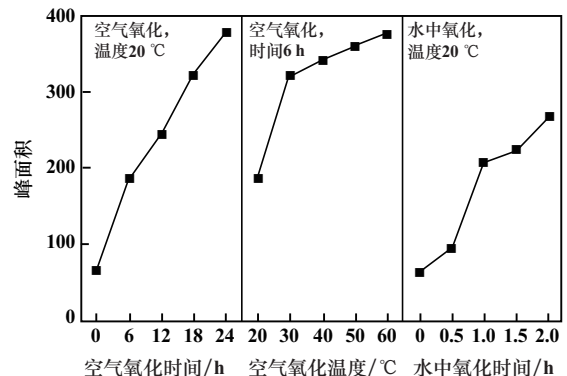


图8 不同氧化条件下黄铜矿的 CO_2 峰面积

Fig.8 CO_2 peak area of chalcopyrite under different oxidation conditions

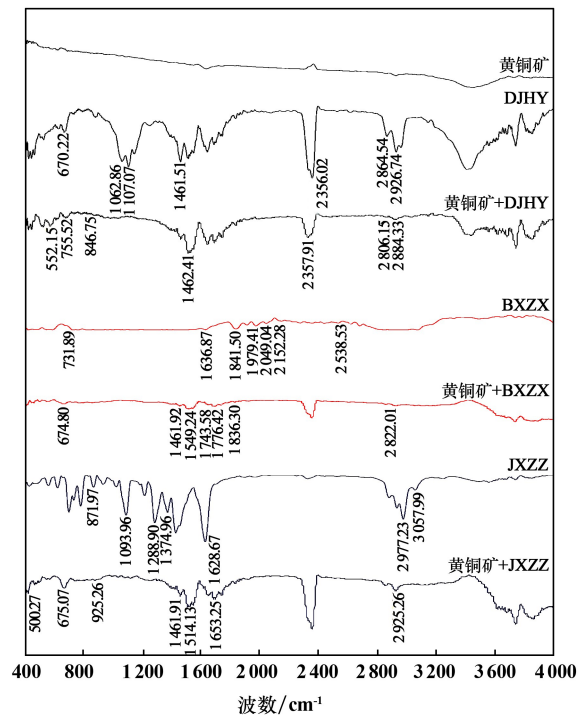


图9 捕收剂作用前后黄铜矿的红外光谱

Fig.9 Infrared spectra of collectors before and after interaction with chalcopyrite

由图9可知:黄铜矿与捕收剂DJHY作用后, C—O—C 和 C=S 的伸缩振动峰分别偏移到 846.75 和 755.52 cm^{-1} 处,并且在 2357.91 cm^{-1} 处出现了新的双黄药 C—S—S—C 的对称伸缩振动峰,表明DJHY在黄铜矿表面存在化学吸附;捕收剂BXZX在 2538.53 cm^{-1} 处的峰为巯基 S—H 产生的伸缩振动峰,黄铜矿与BXZX作用后, N=C=S 、 C=O 、 C=C 、

C—S 的伸缩振动峰分别偏移到 1 776.42、1 549.24、1 461.92、674.80 cm^{-1} 处,在 2 822.01 cm^{-1} 处出现了巯基 S—H 的伸缩振动峰,表明 BXZX 在黄铜矿表面存在化学吸附;黄铜矿与捕收剂 JXZZ 作用后,C—H、C=O、C—C 的伸缩振动峰分别偏移到 925.26、1 653.25、500.27 cm^{-1} ,表明 JXZZ 在黄铜矿表面存在化学吸附。

3.3 Zeta 电位分析

分别取未氧化黄铜矿、不同氧化条件下氧化后黄铜矿样品,分别进行 Zeta 电位检测,探究不同氧化条件对黄铜矿 Zeta 电位的影响,结果如图 10 所示。由图 10 可知,未氧化黄铜矿原矿的零电点为 2.26,随着 pH 值增大,未氧化黄铜矿 Zeta 电位逐渐降低;黄铜矿

在空气中氧化 6、12、18、24 h 的零电点分别为 2.45、2.57、2.76、2.79,相比于未氧化黄铜矿,零电点均呈现正向偏移的趋势,且随着空气氧化时间增大,零电点正向偏移程度增大;黄铜矿在空气氧化温度 20、30、40、50、60 $^{\circ}\text{C}$ 下的零电点分别为 2.45、2.61、2.69、2.82、2.93,相比于未氧化黄铜矿,零电点均正向偏移,且零电点随着空气氧化温度升高呈现增大趋势,零电点正向偏移程度增大;黄铜矿在水中氧化 0.5、1.0、1.5、2.0 h 的零电点分别为 2.30、2.34、2.35、2.37,相比于未氧化黄铜矿,零电点均正向偏移,且随着水中氧化时间增大,零电点正向偏移程度增大。这说明氧化对黄铜矿的 Zeta 电位有一定影响。

随着 pH 值增大,黄铜矿经过空气氧化和水中氧化后,Zeta 电位相较于未氧化黄铜矿整体上均正向偏移,这可能是因为经过氧化后,黄铜矿表面生成了铁或铜的氧化物。黄铜矿经过空气氧化后的零电点比水中氧化后的零电点变化更明显,但过度氧化会抑制黄铜矿的可浮性;黄铜矿经过水中氧化后的零电点变化不明显,氧化效果更稳定,与浮选试验结果吻合,证明在一定的水中氧化条件下,可提高黄铜矿可浮性,有利于黄铜矿浮选。

4 结论

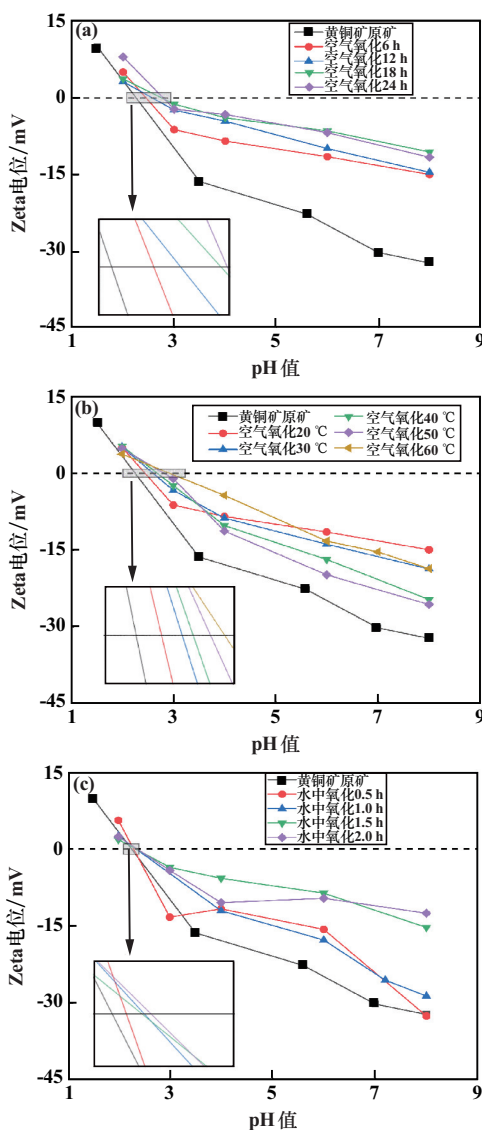
1) 对未氧化黄铜矿进行浮选试验,确定黄铜矿适宜的浮选条件为:矿浆 pH 值 6,捕收剂 JXZZ、DJHY、BXZX 的适宜用量分别为 100、100、75 g/t。

2) 氧化后的黄铜矿在捕收剂 JXZZ 作用下上浮率高于捕收剂 DJHY、BXZX;轻微氧化能提高黄铜矿可浮性,过度氧化会抑制其上浮。

3) 机理分析结果表明:黄铜矿经过空气氧化、水中氧化后,表面疏水性和可浮性有所提高,这可能是由于黄铜矿经过氧化后表面产生了疏水性的氧化产物; CO_2 吸收峰峰面积随着空气氧化时间、空气氧化温度和水中氧化时间增大而增大;3 种捕收剂在黄铜矿表面均存在化学吸附作用;与未氧化黄铜矿相比,氧化后的黄铜矿零电点均正向偏移,其中水中氧化的零电点变化不明显,氧化效果更稳定,可以通过氧化来调控黄铜矿的可浮性。

参考文献 (References):

- [1] 任彦瑛. 中国铜矿资源的现状及潜力分析[J]. 中国金属通报, 2021(1):5-6.
REN Yanying. Analysis of the current situation and potential of copper ore resources in China[J]. China Metal Bulletin, 2021(1):5-6.
- [2] PIETRZYK S, TORA B. Trends in global copper mining: A review[C]//



(a) 空气氧化时间; (b) 空气氧化温度; (c) 水中氧化时间

图 10 不同氧化条件对黄铜矿 Zeta 电位的影响

Fig. 10 Zeta potential of chalcopyrite under different oxidation conditions

- IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2018,427(1):012002.
- [3] 孙若凡,刘丹,杜钰,等.黄铜矿、方铅矿分离研究现状及进展[J].矿产综合利用,2021(4):80-86.
SUN Ruofan, LIU Dan, DU Yu, et al. Research status and development of separation of chalcopyrite and galena[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(4):80-86.
- [4] 刘子源,代淑娟,李鹏程,等.氧化对闪锌矿可浮性的影响及机理[J/OL].矿产综合利用,1-10[2024-11-12].
LIU Ziyuan, DAI Shujuan, LI Pengcheng, et al. Effect of oxidation on floatability of sphalerite and its mechanism[J/OL]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 1-10[2024-11-12].
- [5] 陈瑜,代淑娟,李洪祥,等.黄铁矿的氧化特性及氧化对其可浮性的影响[J].金属矿山,2024(2):163-170.
CHEN Yu, DAI Shujuan, LI Hongxiang, et al. Study on the oxidation of pyrite and its effect on mineral floatability[J]. Metal Mine, 2024(2):163-170.
- [6] 李洪祥,代淑娟,赵英杰.氧化对毒砂可浮性的影响[J].矿冶工程,2021,41(6):10-12.
LI Hongxiang, DAI Shujuan, ZHAO Yingjie. Effect of oxidation on floatability of arsenopyrite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(6):10-12.
- [7] 牛晓鹏.方铅矿、黄铜矿和黄铁矿表面氧化与可浮性研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所),2019.
NIU Xiaopeng. Correlation of surface oxidation of galena, chalcopyrite and pyrite with their floatability[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences), 2019.
- [8] 华晓鸣.黄铜矿在氨性溶液中氧化浸出机理研究[D].沈阳:东北大学,2019.
HUA Xiaoming. Mechanism for oxidative leaching of chalcopyrite in ammonia-ammonium chloride solution[D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.
- [9] 黄鹏亮,杨丙桥,胡杨甲,等.氧化预处理对铜钼浮选分离效果的影响[J].矿冶工程,2021,41(3):46-50.
HUANG Pengliang, Yang Bingqiao, HU Yangjia, et al. Influence of oxidation pretreatment on chalcopyrite-molybdenite flotation separation efficiency[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(3):46-50.
- [10] 程平轩.某大型铜钼矿提高微细粒铜回收率试验研究[J].矿冶工程,2023,43(2):78-80.
CHENG Pingxuan. Improving flotation recovery of fine copper minerals in large copper-molybdenum mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(2):78-80.
- [11] 王进明,董发勤,王肇嘉,等.四川某微细粒铜铁矿选矿试验研究[J].矿冶工程,2021,41(2):48-51.
WANG Jinming, DONG Faqin, WANG Zhaojia, et al. Beneficiation of fine-grained copper-iron ore in Sichuan[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(2):48-51.
- [12] 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-sulfer copper ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):185-188.
- 引用本文:董丽鑫,代淑娟,李鹏程,等.氧化对黄铜矿可浮性的影响及机理分析[J].矿冶工程,2025,45(4):73-78.
DONG Lixin, DAI Shujuan, LI Pengcheng, et al. Effect and mechanism of oxidation for floatability of chalcopyrite [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):73-78.

(上接第72页)

- [13] 王运敏,田嘉印,王化军,等.中国黑色金属矿选矿实践[M].北京:科学出版社,2008.
WANG Yunmin, TIAN Jiayin, WANG Huajun, et al. Beneficiation practice of ferrous metal ore in China[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [14] 张汉泉.烧结球团理论与工艺(第2版)[M].北京:化学工业出版社,2018.
ZHANG Hanquan. Theory and technology of sintered pellets[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2018.
- [15] WANG Z X, ZHENG Y X, HUANG X, et al. Gravity separation tests of a complex rutile ore[J]. Minerals, 2024,14(1):68.
- 引用本文:史耘澎,梁斌,李世维,等.某钛铁矿磁选-重选联合工艺回收钛、铁试验研究[J].矿冶工程,2025,45(4):68-72.
SHI Yunpeng, LIANG Bin, LI Shiwei, et al. Experimental study on combined process of magnetic separation and gravity separation for an ilmenite ore [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(4):68-72.