

磁化处理水对微细粒赤铁矿浮选的影响

李凤久, 孔亚然, 赵留成

(华北理工大学矿业工程学院, 河北 唐山 063210)

摘要: 这是一篇矿物加工工程领域的文章。为促进磁化处理在铁矿浮选中的应用, 为磁化处理理论体系的构建提供一定依据, 研究了磁化处理水对赤铁矿和石英纯矿物浮选的影响, 并从润湿性和吸附量方面进行了机理分析, 进行了动力学验证实验。磁化场强 150 mT, 磁化时间 6 min, 1 号磁场位型时, 赤铁矿回收率为 82.85%, 提高了 28.20%。磁化处理水有利于油酸钠在赤铁矿表面的吸附作用, 降低了赤铁矿表面的润湿性, 对石英无影响。磁化处理浮选用水后, 赤铁矿浮选速率常数由 0.54 提高至 0.61, 较大回收率由 57.18% 提高至 85.63%。表明磁化处理后赤铁矿浮选效果优于未磁化时, 磁化处理可以提高赤铁矿浮选速率和回收率。条件实验、机理分析及动力学验证实验结果一致。

关键词: 矿物加工工程; 磁化处理; 微细粒赤铁矿; 磁化方式; 浮选用水

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.02.021

中图分类号: TD91;TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 02-0127-06

引用格式: 李凤久, 孔亚然, 赵留成. 磁化处理水对微细粒赤铁矿浮选的影响[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(2): 127-132.

LI Fengjiu, KONG Yaran, ZHAO Liucheng. Effect of magnetized treated water on flotation of fine hematite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(2): 127-132.

随着铁矿资源贫、细、杂特点的日益加剧, 传统选别工艺难以满足矿物加工行业的需求, 在此背景下, 热处理、冷冻处理、超声处理、磁化处理、酸浸等预处理技术迅速发展^[1-4]。磁化处理因其成本低、设备稳定、无化学污染等优点引起广泛关注^[5-6]。陈向等^[7]研究了磁化处理浮选用水对细粒钽铌矿浮选的影响, 与常规浮选相比, 磁化处理水时可以提高精矿品位和回收率, 且减少药剂用量。朱巨建^[8]发现, 磁化处理水增强了药剂与矿物的作用效果, 提高了浮选效率。向军^[9]发现, 磁化处理水增强了油酸钠在赤铁矿表面的作用, 有利于赤铁矿和石英的浮选分离。但由于长期以来磁化处理的理论研究和实验研究的不完善, 磁化处理的机理研究至今仍处于论证和假设的交替阶段, 尚未形成一套完整的理论体系。为促进磁化处理在铁矿浮选中的应用, 为磁化处理

理论体系的构建提供一定依据, 本文研究了磁化处理水对赤铁矿和石英纯矿物浮选的影响, 并从润湿性和吸附量方面进行了机理分析, 用人工混合矿进行了验证。

1 实验

1.1 实验原料

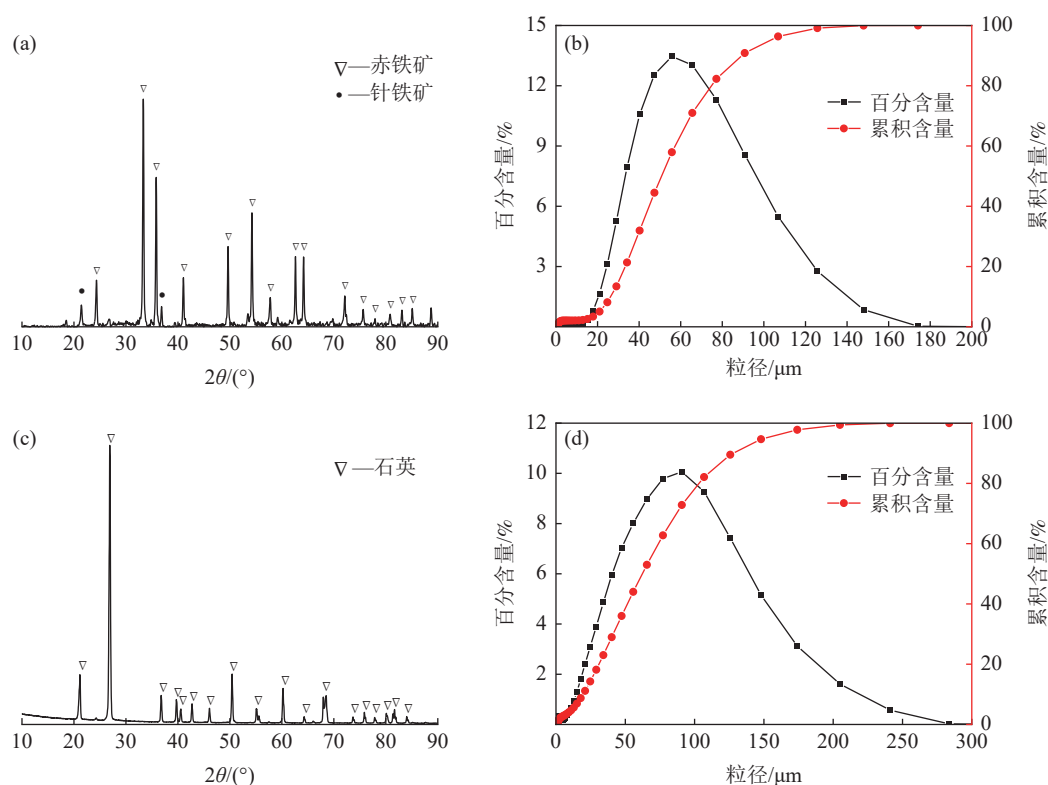
赤铁矿原矿样 TFe 品位为 66.11%, 纯度 94.52%。对其进行 XRD 分析和激光粒度分析, 结果见图 1。赤铁矿纯矿物的 D50 为 50.64 μm , 主要成分为赤铁矿, 还含有微量针铁矿。比重瓶法测得其真密度为 4.94 g/cm^3 。

石英原矿样纯度 99.99%, 含铁小于 0.3 g/t, 含铝小于 14 g/t。对其进行 XRD 分析和激光粒度分析, 结果见图 1, 石英纯矿物的 D50 为 62.24 μm , 未发现其他杂质存在。比重瓶法测得其真密度为 2.61 g/cm^3 。

收稿日期: 2021-11-12

基金项目: 河北省自然基金项目: (E2022209123); 河北省中央引导地方科技发展资金项目 (226Z4102G; 236Z4109G); 河北省高等学校科学技术研究项目 (ZD2020132)

作者简介: 李凤久 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为复杂难选矿分选理论与工艺。



(a) —赤铁矿 XRD 分析; (b) —赤铁矿粒度分析; (c) —石英 XRD 分析; (d) —石英粒度分析。

图 1 原料性质测试

Fig.1 Testing of raw material properties

1.2 实验药剂及仪器设备

实验所用药剂均为分析纯, NaOH 和 HCl 作 pH 值调整剂, 油酸钠作赤铁矿的捕收剂; 浮选用水为超纯水。

所用主要设备为 XFG_{II5} 挂槽浮选机, 磁化处

理由实验室自制磁化装置实现, 浮选用水磁化通过调节激磁电流和两个磁极的间距来改变中心位置的磁化场强, 更换磁场位型 (图 2) 来改变磁化区域的磁场分布。

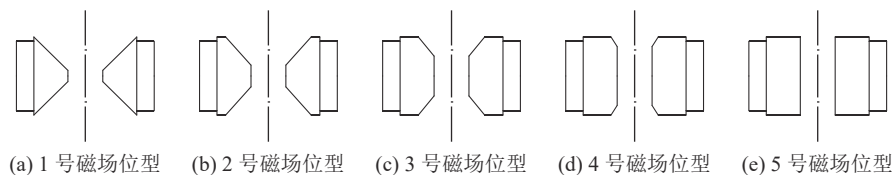


图 2 磁场位型示意

Fig.2 Schematic of magnetic field configuration

1.3 实验方法

(1) 磁化处理

首先将磁化对象 (pH 值=9 的超纯水 60.0 mL) 放入烧杯, 置于磁化区域内, 开启搅拌器进行均匀搅拌, 搅拌转速为 600 r/min; 接着打开激磁电源, 调整电流大小改变两磁极中心位置的磁感应强度。磁化一定时间后, 关闭电源, 取出试样。磁场位型条件实验通过调整磁极类型改变磁场位型和磁场分布。

(2) 浮选实验

在 XFG_{II5} 挂槽浮选机浮选槽内加入 5.000 g 赤铁矿/石英纯矿物, 并加入 45.0 mL 一定 pH 值的超纯水, 搅拌 3 min, 加入油酸钠, 搅拌 3 min, 手动刮泡 5 min。所得产品过滤、烘干、称重, 计算回收率。

(3) 吸附量测试

取 20 mL 矿化矿浆, 离心, 过滤, 利用 UV-5200PC 紫外可见分光光度计在波长 225 nm^[10] 条件下测量

滤液的吸光度，计算油酸钠在矿物表面的吸附量。

(4) 润湿性测试

取 20 mL 矿化矿浆过滤、烘干，研磨至 $-20\ \mu\text{m}$ ，取 0.3 g 在 30 MPa 条件下压片 2 min。将压好的片置于 CA100B 接触角测量仪载物台上，滴加一滴与制样时所用一致的水，测量接触角。

2 实验结果及分析

2.1 浮选参数确定

为了给研究磁化处理对赤铁矿浮选的影响提供良好的实验条件，进行了前期实验，确定浮选机转速为 2100 r/min，pH 值=9，油酸钠用量为 $2\times 10^{-4}\ \text{mol/L}$ [11]。

2.2 磁化处理水对浮选的影响实验

磁化处理水对浮选的影响受到许多因素的影响，本节考察了磁化场强、磁化时间、磁场位型等磁化处理水的条件对赤铁矿浮选的影响。

2.2.1 磁化场强对浮选的影响

在磁化时间 8 min，1 号磁场位型，弛豫时间 1 min 条件下研究磁化场强对赤铁矿和石英浮选的影响，其结果见图 3。由图 3 可知，无论磁化场强如何变化，石英的回收率几乎不变，认为磁化处理不影响石英的浮选。随着磁化场强的增大，赤铁矿回收率增大，磁化处理水对赤铁矿浮选的促进作用增强，磁化场强为 150 mT 时，赤铁矿回收率达到较大值，为 74.86%，增加 20.21 个百分点。继续增大磁化场强，赤铁矿回收率降低，磁化处理水对赤铁矿浮选的促进作用减弱，场强 400 mT 时，回收率低于未磁化时，说明当场强过高时，磁化处理水可能对赤铁矿的浮选起抑制作用。磁化场强定为 150 mT。

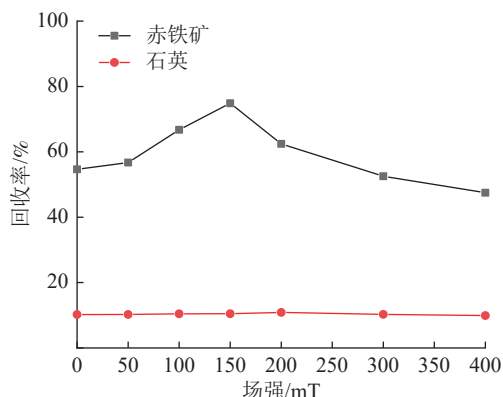


图3 磁化场强对浮选的影响

Fig.3 Effect of magnetization field strength on flotation

2.2.2 磁化时间对浮选的影响

在磁化场强 150 mT，1 号磁场位型，弛豫时间 1 min 条件下研究磁化时间对赤铁矿和石英浮选的影响，其结果见图 4。由图 4 可知，无论磁化时间如何变化，石英的回收率几乎不变，认为磁化处理不影响石英的浮选。随着磁化时间的延长，赤铁矿回收率增大，磁化处理水对赤铁矿浮选的促进作用增强，磁化时间为 6 min 时，赤铁矿回收率达到较大值，为 82.85%，增加 28.20 个百分点。继续增长磁化时间，赤铁矿回收率缓慢减小，磁化处理水对赤铁矿浮选的促进作用减弱。磁化时间定为 6 min。

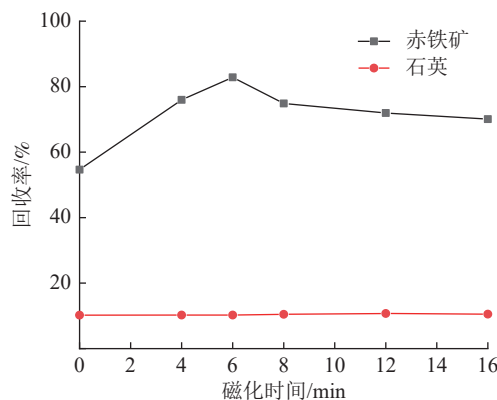


图4 磁化时间对浮选的影响

Fig.4 Effect of magnetization time on flotation

2.2.3 磁场位型对浮选的影响

在磁化场强 150 mT，磁化时间 6 min，弛豫时间 1 min 条件下研究磁场位型对赤铁矿和石英浮选的影响，其结果见图 5。由图 5 可知，无论磁场位型如何变化，石英的回收率几乎不变，认为磁化处理不影响石英的浮选。1 号磁场位型条件下，赤铁矿的回收率较高，为 82.85%，磁化处理水对赤铁矿浮选的促进作用较强。磁场位型定为 1 号磁场位型。

2.2.4 磁化处理的记忆效应

磁化处理的记忆效应即磁化处理的弛豫性，其实质是磁化处理时无序状态的介质分子有序化，离开磁场，在分子热运动的影响下，介质分子再次恢复到之前的无序状态 [8]。在 1 号磁场位型，磁感应强度 150 mT，磁化时间 6 min 条件下研究弛豫时间对细粒赤铁矿浮选的影响。弛豫时间从 1 min 到 120 min，赤铁矿和石英的回收率均无明显变化，对其进行电导率、表面张力测试，也无显著变化。认为磁化处理的记忆时间不小于

120 min。较长的弛豫时间可以为后续测试提供充足的时间。

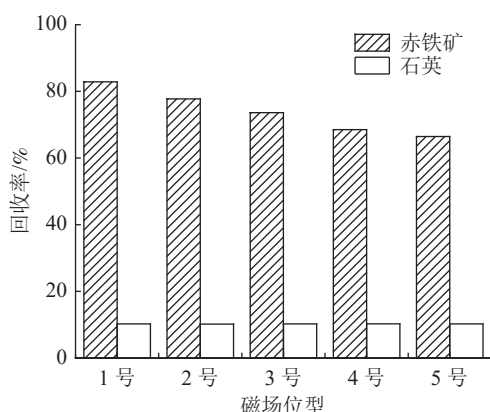


图5 磁场位型对浮选的影响

Fig.5 Effect of magnetic field configuration on flotation

2.3 机理分析

磁化处理后矿物对浮选药剂的吸附作用发生了改变。苏联科学家H.Φ.祖勃科娃和P.Л.波波夫研究了闪锌矿和方解石等矿物的可浮性和黄原酸酯的吸附作用。矿物的可浮性提高，然而黄原酸酯在矿物上的吸附量降低，处于矿物表面的药剂的疏水性增大^[12]。贾清梅等^[13]研究了磁化处理对磁铁矿可浮性的影响，磁化处理后，捕收剂在矿物表面的吸附量增大，磁铁矿接触角减小。为了研究磁化处理水对赤铁矿浮选的作用机理，在不同条件下磁化处理浮选用水，进行了润湿性测试和吸附量测试。其结果见图6~8。

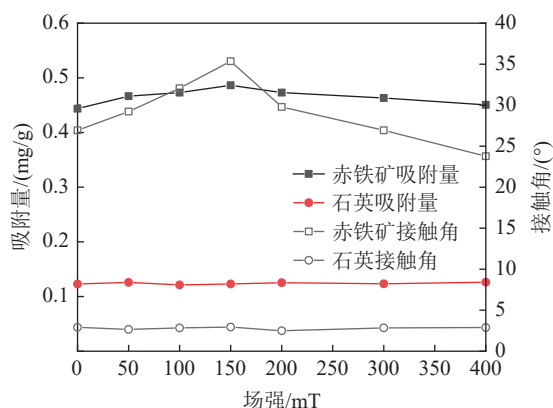


图6 磁化场强对赤铁矿/石英吸附量、接触角的影响

Fig.6 Effect of magnetization field strength on adsorption capacity and contact angle of hematite/quartz

由图6可知，磁化场强从0增长到150 mT，油酸钠在赤铁矿表面的吸附量从0.444 mg/g增加到0.486 mg/g，浮选用水在赤铁矿表面的接触角从26.93°增加到35.36°，继续增大磁化场强，油酸

钠在赤铁矿表面的吸附量和浮选用水在赤铁矿表面的接触角不升反降。由图7可知，磁化时间从0增加到6 min，油酸钠在赤铁矿表面的吸附量从0.444 mg/g增加到0.492 mg/g，浮选用水在赤铁矿表面的接触角从26.93°增加到39.53°，继续增加磁化时间，油酸钠在赤铁矿表面的吸附量和浮选用水在赤铁矿表面的接触角不升反降。由图8可知，1号磁场位型条件下，油酸钠在赤铁矿表面的吸附量较大，为0.492 mg/g，浮选用水在赤铁矿表面的接触角较大，为39.53°。无论磁场如何变化，油酸钠在石英表面的吸附量和浮选用水在石英表面的接触角几乎不变。

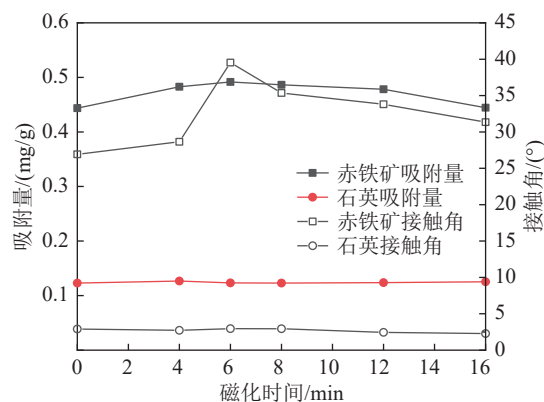


图7 磁化时间对赤铁矿/石英吸附量、接触角的影响

Fig.7 Effect of magnetization time on adsorption capacity and contact angle of hematite/quartz

接触角的变化趋势表明，磁化处理水可以增大赤铁矿表面的疏水性，使赤铁矿保持良好天然可浮性，石英疏水性不发生变化，有利于赤铁矿和石英的浮选分离。吸附量的变化趋势表明，磁化处理水有利于药剂在赤铁矿表面的吸附。有研究表明，磁化处理有利于油酸钠的水解^[9, 12]，且对磁化处理后矿浆的Zeta电位进行检测，磁化处理后矿浆Zeta电位增大，较佳磁化条件下磁化处理水时的Zeta电位可从未磁化时的-35.24 mV增长到-56.58 mV，说明磁化处理水有利于油酸根在赤铁矿表面的吸附，从而提高赤铁矿浮选效果。油酸钠在石英表面的吸附量不变，磁化处理水对石英的浮选无影响。与浮选实验结果一致。

2.4 磁化处理对赤铁矿浮选动力学的影响

为进一步探索磁化处理对赤铁矿浮选的影响，对比了磁化处理浮选用水、磁化处理浮选药剂与未磁化时的浮选分离效果，回收率随浮选时间的变化见图9，同时根据经典一级浮选动力学模

型对实验数据进行了拟合。

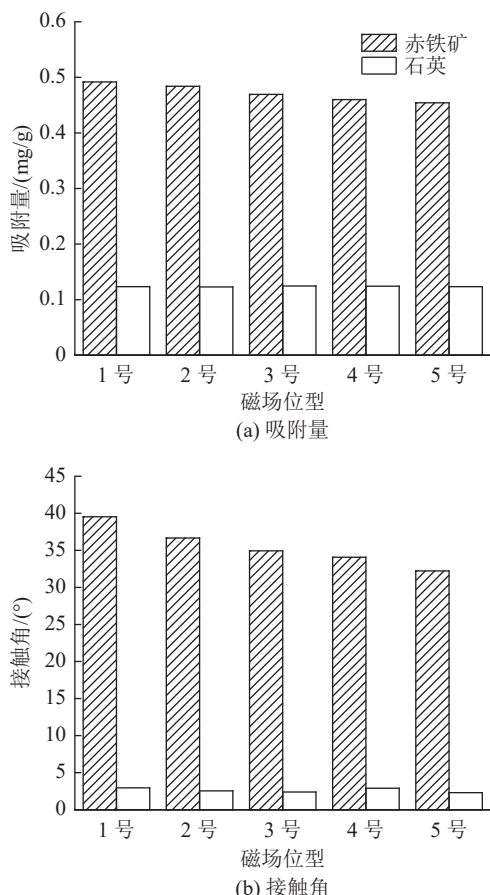


图8 磁场位型对赤铁矿/石英吸附量、接触角的影响

Fig.8 Effect of magnetic field potential on adsorption capacity and contact angle of hematite/quartz

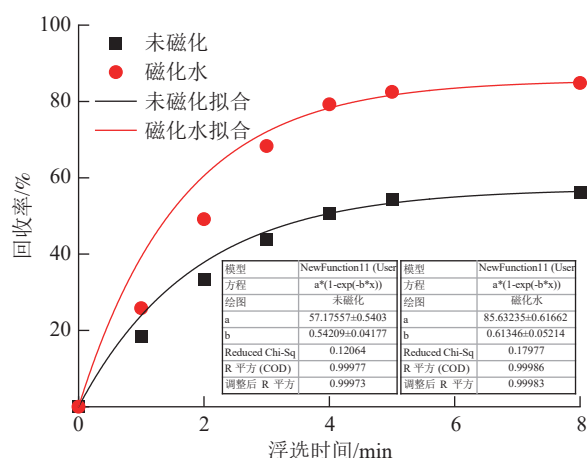


图9 磁化处理对赤铁矿浮选动力学影响

Fig.9 Effect of magnetization treatment on flotation kinetics of hematite

由图9可知， R^2 均在 0.999 以上，所选模型合适。磁化处理浮选用水后，浮选速率常数由 0.54 提高至 0.61，较大回收率由 57.18% 提高至

85.63%。表明磁化处理后浮选效果优于未磁化时，磁化处理可以提高赤铁矿浮选速率和回收率。

3 结论

(1) 适宜的磁化场强和磁化时间磁化处理水有利于赤铁矿和石英的浮选分离，磁化场强 150 mT，磁化时间 6 min，1 号磁场位型时，赤铁矿回收率为 82.85%，提高了 28.20%。

(2) 润湿性测试和吸附量测试结果表明，磁化处理水有利于油酸钠在赤铁矿表面的吸附作用，降低了赤铁矿表面的润湿性，对石英无影响，有利于赤铁矿和石英的浮选分离，与浮选实验结果一致。

(3) 磁化处理浮选用水后，浮选速率常数由 0.54 提高至 0.61，较大回收率由 57.18% 提高至 85.63%。表明磁化处理浮选效果优于未磁化时，磁化处理可以提高赤铁矿浮选速率和回收率。

参考文献：

- [1] 罗立群, 闫昊天. 含铁矿物的微波热处理技术现状[J]. 中国矿业, 2012, 21(8):104-109.
- LUO L Q, YAN H T. Current situation of microwave heat treatment technology on iron ore[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(8):104-109.
- [2] 程翔宇, 钱功明, 蔡先炎, 等. 复杂难选铁矿石预处理方法的研究进展[J]. 金属矿山, 2020(12):1-11.
- CHENG X Y, QIAN G M, CAI X Y, et al. The research progress of pretreatment technology for complex refractory iron ore[J]. Metal Mine, 2020(12):1-11.
- [3] 李凤久, 孔亚然, 贾清梅, 等. 磁化处理影响浮选的机理及其在浮选中的应用[J]. 矿产综合利用, 2021(3):120-126.
- LI F J, KONG Y R, JIA Q M, et al. Mechanism of magnetization effect on flotation and its application in flotation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(3):120-126.
- [4] LIANG G, ZHAO Q, LIU B, et al. Treatment and reuse of process water with high suspended solids in low-grade iron ore dressing[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278:123493.
- [5] 柳林, 王威, 刘红召, 等. 磁化焙烧—磁选回收某褐铁矿中铁的实验研究[J]. 矿产综合利用, 2019(4):33-37.
- LIU L, WANG W, LIU H Z, et al. Research on recovery of iron from limonite by magnetization roasting and magnetic separation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,

2019(4):33-37.

[6] 宛鹤, 何廷树, 谢建宏, 等. 磁化处理技术在矿物加工中的应用[J]. 黄金, 2011, 32(1):53-55.

WAN H, HE T S, XIE J H, et al. Application of magnetizing treatment technology in mineral processing[J]. Gold, 2011, 32(1):53-55.

[7] 陈向, 廖德华. 磁处理对细粒钽铌尾矿浮选实验影响[J]. 矿产综合利用, 2021(5):86-91.

CHEN X, LIAO D H. Effect of magnetic treatment on flotation test of fine tantalum niobium tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5):86-91.

[8] 朱巨建. 水的磁化处理对赤铁矿、石英浮选性能影响的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 1999.

ZHU J J. Study on the effect of magnetization treatment of water on the flotation performance of hematite and quartz [D]. Shenyang: Northeastern University, 1999.

[9] 向军. 磁化处理对微细粒赤铁矿分选的影响及机理研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2020.

XIANG J. Research on the effect and mechanism of magnetization treatment on the sorting of microfine-grained hematite [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2020.

[10] 宁江峰, 李茂林, 崔瑞, 等. $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 与水玻璃组合抑制剂对萤石、方解石浮选分离的影响[J]. 矿产综合利用, 2020(6):186-192.

NING J F, LI M L, CUI R, et al. Effect of $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ and sodium silicate as combination inhibitors on flotation separation of fluorite and calcite[J]. Mineral Resources, 2020(6):186-192.

[11] 李凤久, 孔亚然, 赵留成, 等. 药剂的磁化处理对赤铁矿浮选的影响及机理研究[J]. 金属矿山, 2022(9):87-93.

LI F J, KONG Y R, ZHAO L C, et al. Effect of magnetization treatment on hematite flotation and its mechanism[J]. Metal Mine, 2022(9):87-93.

[12] 克拉辛 B. И. 磁化水[M]. 毛钜凡, 译. 北京: 计量出版社, 1982.

Krasin V I. Magnetized water [M]. Mao Juifan, Translation. Beijing: Measurement Press, 1982.

[13] 贾清梅, 李凤久, 尚新月, 等. 磁场强度对磁铁矿反浮选过程的影响[J]. 矿产综合利用, 2020(3):84-88.

JIA Q M, LI F J, SHANG X Y, et al. Influence of magnetic field strength on reverse flotation process of magnetite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(3):84-88.

Effect of Magnetized Treated Water on Flotation of Fine Hematite

LI Fengjiu, KONG Yaran, ZHAO Liucheng

(College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: This is an article in the field of mineral processing engineering. In order to promote the application of magnetization treatment in iron ore flotation and provide a certain basis for the construction of magnetization treatment theoretical system, the influence of magnetization treatment water on the flotation of pure minerals of hematite and quartz was studied, and the mechanism was analyzed from the aspects of wettability and adsorption capacity, and dynamic verification experiments were conducted. With a magnetization field strength of 150 mT and a magnetization time of 6 minutes, the recovery rate of hematite was 82.85%, an increase of 28.20%, at the position of the 1st magnetic field. Magnetization treatment of water is beneficial for the adsorption of sodium oleate on the surface of hematite, reducing its wettability and having no effect on quartz. After magnetization treatment of flotation water, the flotation rate constant of hematite increased from 0.54 to 0.61, and the maximum recovery rate increased from 57.18% to 85.63%. It indicates that the flotation effect of hematite after magnetization treatment is better than that without magnetization, and magnetization treatment can improve the flotation rate and recovery rate of hematite. The results of the condition test, mechanism analysis, and dynamic verification test are consistent.

Keywords: Mineral processing engineering; Magnetization treatment; Fine grained hematite; Magnetization mode; Flotation water