不同磁化时间对微细粒赤铁矿反浮选行为的影响机理*

李凤久[1,2],王航宇[1],朱令起[3],贾清梅[1,2],赵留成[1,2]
(1.华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山市 063210;
2.河北省矿产资源绿色开发与生态修复协同创新中心, 河北 唐山市 063210;
3.华北理工大学 应急管理与安全工程学院, 河北 唐山市 063210)

摘要:为探究不同磁化时间对微细粒赤铁矿反浮选的影响,分别对水、药剂、矿浆进行不同时间的磁化处理。通过检测不同磁化时间下溶液的电导率和表面张力、溶液与矿浆的黏度、以及矿粒表面的红外光谱和拉曼光谱的变化,揭示磁化时间对赤铁矿反浮选的作用机理。结果表明,在磁化时间为8 min时,磁化效果最优,经磁化处理的水、淀粉和矿浆可使赤铁矿回收率分别提升2.3个百分点、4.16个百分点、3.84个百分点,而磁化十二胺使赤铁矿回收率下降3.56个百分点。磁化处理使溶液电导率上升,增加药剂的溶解度和溶液内电解质的浓度;还会使黏度增大,强化抑制剂效果,阻止赤铁矿颗粒上浮;减小了溶液的表面张力,使石英更易与气泡黏附,提高赤铁矿反浮选的回收率。红外光谱分析结果显示,磁化作用对药剂与矿物表面的相互作用产生影响,改变药剂在矿物表面的吸附量。

关键词:磁化时间;赤铁矿反浮选;电导率;表面张力;黏度
中图分类号:TD924 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)03-0281-10

Mechanism of the Effect of Different Magnetization Times on the Reverse Flotation Behavior of Fine-Grained Hematite

LI Fengjiu[1,2], *WANG Hangyu*[1], *ZHU Lingqi*[3], *JIA Qingmei*[1,2], *ZHAO Liucheng*[1,2]
(1.College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China;
2.Hebei Collaborative Innovation Center for Green Development and Ecological Restoration of Mineral Resources, Tangshan, Hebei 063210, China;
3.School of Emergency Management and Safety Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China)

Abstract: To investigate the effect of varying magnetization times on the reverse flotation of fine-grained hematite, water, reagents, and slurry were subjected to magnetization treatments of differing durations. By measuring the conductivity and surface tension of the solution, the viscosity of the solution and slurry, and the changes in infrared and Raman spectra of the mineral particle surfaces at different magnetization times, the mechanism by which magnetization time influences the reverse flotation of hematite was revealed. Results indicate that the magnetization effect is optimal at an 8-minute magnetization time. Magnetized water, starch and slurry can enhance hematite recovery rates by 2.3 percentage points, 4.16 percentage points and 3.84 percentage points respectively, whereas magnetized dodecyl amine reduces hematite recovery by 3.56 percentage points. Magnetization increases the solution's electrical conductivity, enhancing the solubility of reagents and the concentration of electrolytes within the solution. It also elevates viscosity, thereby strengthening the inhibitor's efficacy and preventing hematite particles from floating. Furthermore, it reduces the solution's surface tension, facilitating the adhesion of quartz to bubbles and improving the recovery rate in hematite reverse flotation. Infrared spectroscopy analysis indicates that magnetization influences the interaction between the reagent and the mineral surface, altering the amount of reagent adsorbed onto the mineral surface.
Key words: Magnetization time, Reverse flotation of hematite, Electrical conductivity, Surface tension, Viscosity

0 引言

我国铁矿石资源颇为丰富,整体储量约200亿t,在全球储量排名中位居第四。但由于矿石资源的大规模开采,矿石的特性趋向于低品位、细粒度、成分复杂,处理难度加大,由此造成的破碎、磨矿能耗大、

* **收稿日期**:2025-04-06
基金项目:河北省自然科学基金项目(E2022209123,E202209079);河北省中央引导地方科技发展资金项目(226Z4102G,236Z4109G,246Z4102G)
作者简介:李凤久(1977—),男,河北唐山人,博士,教授,主要从事复杂难选矿物高效分选理论与工艺方面的研究。E-mail:tslifengjiu@126.com
通信作者:王航宇(2000—),男,河北石家庄人,硕士,研究方向为矿物分选理论及工艺。E-mail:whyu0702@163.com

浮选成本高的问题日益突显[1]。在我国,反浮选工艺主要有阴/阳离子型两种技术方法,阴离子反浮选的应用相对广泛,但存在药剂体系复杂、费用高、需进行矿浆加热预处理以及强碱性矿浆对设备造成腐蚀等问题[2-4]。相对而言,阳离子反浮选优势明显,无需进行矿浆加热预处理,药剂简单,还具备一定的起泡性能。基于这些特性,阳离子反浮选吸引了众多学者的目光,日益成为研究热点。

随着磁化处理研究的不断深入,出现了大量与矿业浮选相结合的研究。朱巨建等[5]指出经过磁化后液体的表面张力发生变化,其润湿能力和黏结力都会发生变化。LI Hui 等[6]从分散性角度指出,磁化作用改善了其在矿浆中的分散性,有效降低了煤油的黏度。磁化处理导致液体表面活性分子与水分子间形成的氢键被破坏,增加了气液界面表面活性剂分子数量,降低了表面张力和黏度[7]。袁致涛等[8]对磁化后溶液中的氢键进行研究,分析结果表明,磁化后溶液电导率和表面张力增大,氢键被削弱或破坏,增强了矿物表面的药剂吸附能力。众多研究表明[9-12],磁化处理会影响药剂和溶液的物化性质,对目标矿物的回收率产生影响。然而,不同磁化时间对矿物反浮选影响的研究却较少,对此,开展磁化时间对赤铁矿反浮选作用机理的研究,有助于深入探究并完善磁化处理技术在赤铁矿浮选过程中的影响机理。

本文主要研究了不同磁化时间下磁化水、磁化药剂、磁化矿浆对十二胺-木薯淀粉反浮选体系中的赤铁矿和石英纯矿物回收率的影响,通过对电导率、黏度、表面张力等性质变化的检测,揭示不同磁化时间对赤铁矿反浮选的影响及作用机理。

1 试验原料及试验设备

1.1 试验矿样

本研究所用矿样为赤铁矿纯矿物和石英纯矿物,试验前进行了原矿样的制备,并对其纯度和粒度进行了测试。赤铁矿原矿品位为 64.38%,SiO_2 含量为 2.25%,经过破碎、磨矿及重选处理后,制得 TFe 品位为 67.34%,纯度为 96.2%的赤铁矿纯矿物,D_{50}值(指颗粒群中累计分布百分数达到 50%时对应的特征粒径)为 28.26 μm,达到微细粒粒级标准,真密度为 4.94 g/cm³。石英为高纯石英,其铁、铝杂质含量分别低于 0.3 mg/kg 和 14 mg/kg,D_{50}值为 62.24 μm,真密度为 2.61 g/cm³。图 1 为原矿样品的 X 射线衍射和激光粒度测试结果。

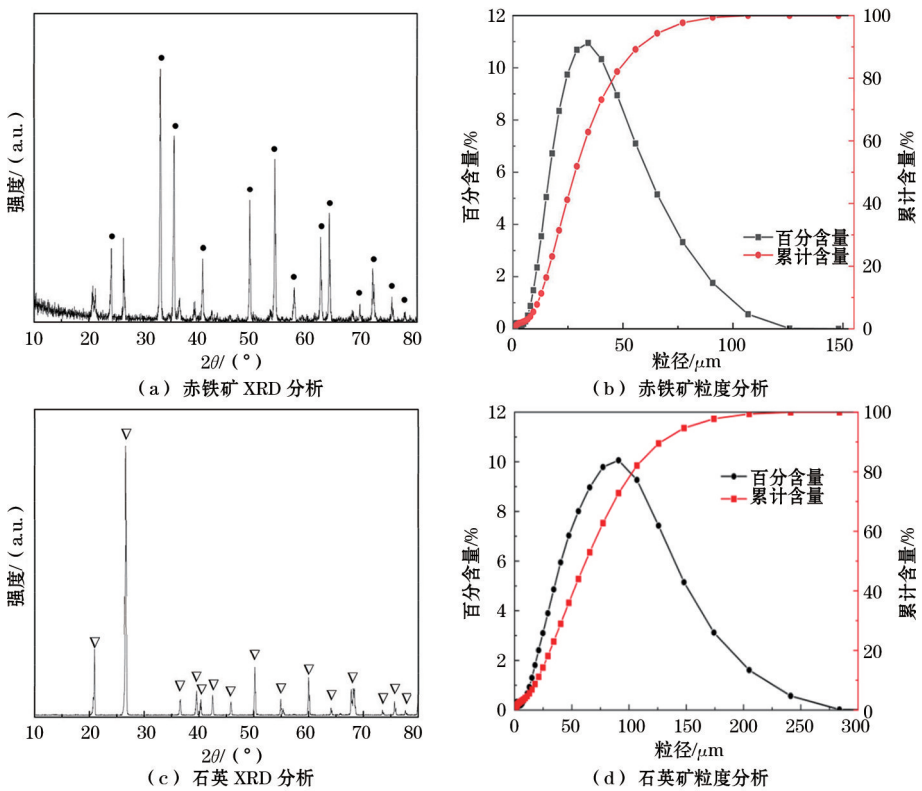


图 1 赤铁矿及石英纯矿物性质检测

Fig.1 Property tests of hematite and quartz pure mineral

1.2 试验药剂

本研究采用碳酸钠和盐酸作为 pH 调节剂,十二胺为捕收剂,木薯原淀粉、红薯原淀粉和玉米原淀粉为抑制剂,超纯去离子水。

1.3 试验装置

磁化过程是由自行设计制作的磁化设备来完成的,设备结构示意见图 2,磁化区域示意见图 3。该装置可以依据试验需要,通过变化激磁电流的大小,灵活调控两个磁极间的磁感应强度。

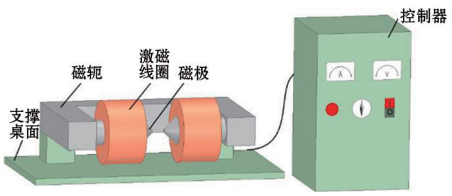


图 2 磁化装置结构示意

Fig.2 Schematic structure of magnetizing device

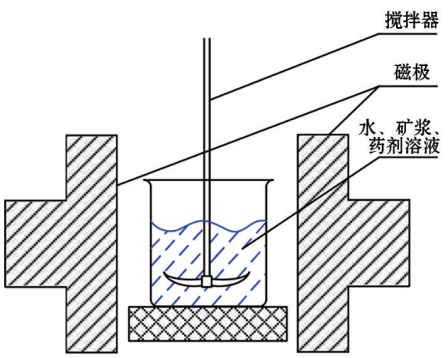


图 3 磁化区域示意

Fig.3 Schematic diagram of magnetized area

1.4 试验方法

1.4.1 磁化方法

首先将磁化对象(浮选药剂/水 35 mL、50%浓度矿浆 5 g)置于烧杯中,并放置在磁化区,以 610 r/min 的转速搅拌;激磁后,依据试验需要对电流大小进行调节,以此改变磁感应强度。完成磁化后,关闭电源并取出试样。

1.4.2 纯矿物浮选

向槽内注入 35 mL 水,加入 5 g 矿浆后搅拌 1 min,按顺序和特定剂量依次加入药剂。持续搅拌 1 min 后,以每分钟 30 次的频率刮泡,持续 4 min,将刮取的泡沫烘干后称量质量,计算回收率。所有试验重复 3 次,取平均值。

2 磁化处理影响赤铁矿反浮选试验研究

2.1 反浮选工艺参数试验

2.1.1 抑制剂条件

为了确定抑制剂淀粉的种类及用量参数,在浮选机转速为 2 100 r/min、pH 为 9、十二胺用量为 20 mg/L 的基础上,分别加入不同浓度玉米、红薯及木薯淀粉进行反浮选试验,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,木薯淀粉对赤铁矿的抑制性能最为突出,其抑制效果优于玉米淀粉与红薯淀粉。赤铁矿的回收率与淀粉的添加量成正相关,当抑制剂用量超过 800 g/t 时,回收率增速趋于平缓,考虑到实际生产需要和药剂资源的最优化利用,确定 800 g/t 为淀粉的最佳用量。

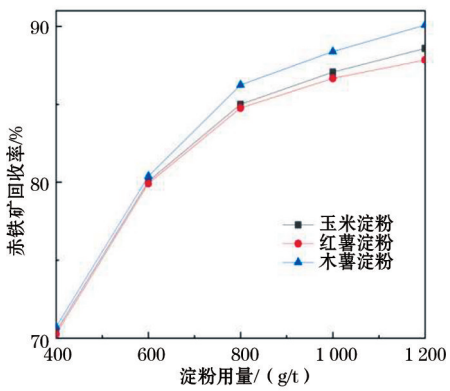


图 4 三种淀粉的用量试验

Fig.4 Dosage test of three starches

2.1.2 捕收剂条件

本试验采用的捕收剂是十二胺[13]。在浮选机恒定转速为 2 100 r/min、木薯淀粉掺量为 800 g/t、pH 调控至 9 的工艺条件下,开展了不同浓度下十二胺的反浮选对比试验,结果如图 5 所示。图 5 表明,矿物的回收率与捕收剂十二胺的用量呈正相关,当十二胺用量增至 20 mg/L 时,两种矿物的回收率均达到最大值并趋于稳定,表明此时药剂与矿物表面作用达到饱和状态。因此确定 20 mg/L 为十二胺的最佳添加用量。

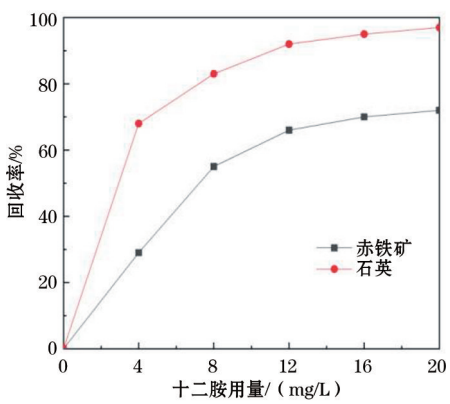


图 5 十二胺的用量试验

Fig.5 Dosage test of dodecylamine

2.1.3 浮选机转速条件

在 pH 为 9,淀粉用量为 800 g/t,十二胺用量为 20 mg/L 的工艺条件下,开展浮选机转速优化试验,结果见图 6。由图 6 可知,随着转速的增加,赤铁矿回收率迅速上升,转速增加到 2 100 r/min 后,回收率增速明显放缓并趋近稳定状态。综合考虑浮选效率与能耗两方面因素,最终确定 2 100 r/min 为浮选机的最佳转速。

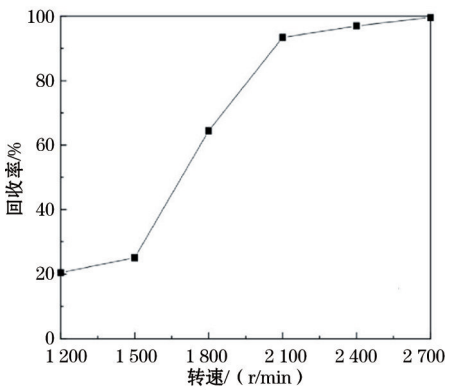


图 6 浮选机转速试验

Fig.6 Flotation machine speed test

2.1.4 pH 条件

在浮选机转速为 2 100 r/min,淀粉用量为 800 g/t,十二胺用量为 20 mg/L 的基础上,开展 pH 的优化试验。由图 7 数据可知,溶液 pH 的增加会导致赤铁矿和石英的回收率升高,当 pH 提升至 9 时,两种矿物的回收率均达到峰值,超过该临界值后,回收率趋于稳定,所以确定该浮选体系的 pH 为 9。

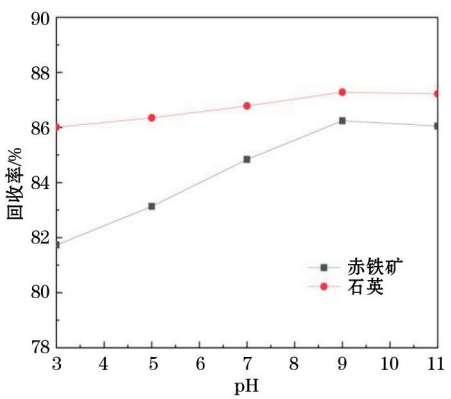


图 7 溶液 pH 调整试验

Fig.7 Solution pH adjustment test

综合上述 4 组条件试验结果,反浮选工艺参数最终选择为:浮选机转速 2 100 r/min,pH=9,淀粉用量 800 g/t,十二胺用量 20 mg/L。

2.2 磁化时间对反浮选的影响

大量研究证明,磁化处理会改变物质的一些物理化学性质[14-15],从而影响浮选效果。通过单因素试验,对水、药剂和矿浆分别进行不同磁化时间的处理,以探讨磁化时间对赤铁矿反浮选行为的影响。以下试验均在 pH 为 9,浮选机搅拌转速为 2 100 r/min,淀粉抑制剂添加量为 800 g/t,捕收剂十二胺用量为 20 mg/L 的基础上进行,旨在研究不同磁化时间对赤铁矿-石英反浮选的影响。其中抑制剂和水以 150 mT 的场强进行磁化,十二胺和矿浆以 100 mT 的场强进行磁化。未磁化条件下,赤铁矿纯矿物反浮选初始回收率为 86.24%。

2.2.1 磁化时间对木薯淀粉的影响

为了研究木薯淀粉在不同磁化时间下对反浮选过程的影响,对木薯淀粉进行不同时间的磁化处理,并进行反浮选试验,结果如图 8 所示。

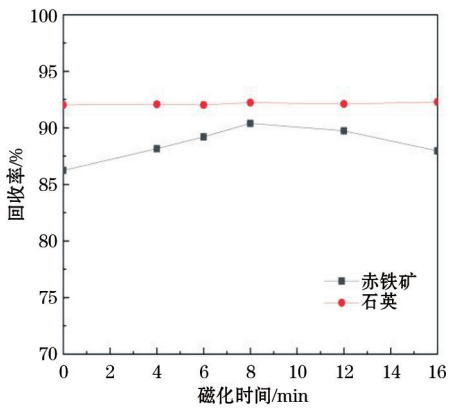


图 8 磁化时间对木薯淀粉抑制效能的影响

Fig.8 Effect of magnetization time on inhibition of cassava starch

赤铁矿回收率最初随着磁化时间的增长而上升,此时磁化处理对木薯淀粉抑制效果的影响增大,并在磁化时间为 8 min 时达到极大值 90.4%,较未磁化增加了 4.16 个百分点。赤铁矿的回收率在磁化时间超过 8 min 临界值后呈下降趋势,木薯淀粉的抑制效果衰减。石英回收率随磁化时间的增长基本不变,保持在 92.1%左右,表明不同磁化时间下的木薯淀粉对石英可浮性影响较小。因此,确定木薯淀粉的最优磁化时长为 8 min。

2.2.2 磁化时间对水的影响

为了研究水在不同磁化时间下对反浮选过程的影响,对水进行不同时间的磁化处理,并进行反浮选试验,结果如图 9 所示。

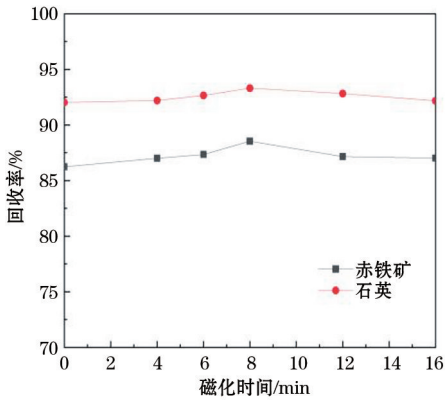


图 9 磁化时间对水的影响

Fig.9 Effect of magnetization time on water

图 9 试验数据显示,随着磁化时间的延长,赤铁矿的回收率先逐渐上升,当磁化时间为 8 min 时,回收率达到最大值 88.54%,较未磁化增加了 2.3 个百分点。当超过该临界点后,其回收率逐渐降低。在 0～16 min 的磁化时间范围内,石英的回收率在 8 min 时略有增加。故水的最佳磁化时间为 8 min。

2.2.3 磁化时间对矿浆的影响

为了研究矿浆在不同磁化时间下对反浮选过程的影响,对矿浆进行不同时间的磁化处理,并进行反浮选试验,结果如图 10 所示。

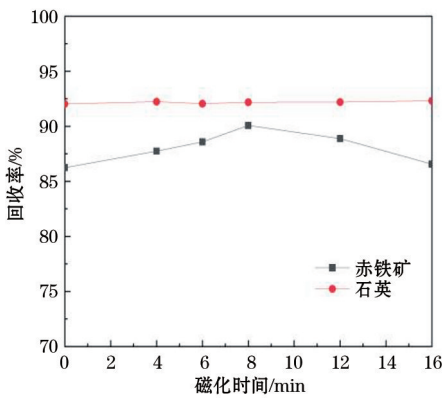


图 10 磁化时间对矿浆的影响

Fig.10 Effect of magnetization time on the slurry

由图 10 可知,与磁化木薯淀粉和磁化水相似,赤铁矿回收率随矿浆的磁化时间延长呈现先增后减的变化趋势,在磁化时间为 8 min 时达到最大值 90.08%,较未磁化增加了 3.84 个百分点。在 0～16 min 的磁化时间内,石英的回收率基本保持不变,认为不同时间下的磁化矿浆对石英可浮性影响不大。故矿浆的最佳磁化时间为 8 min。

2.2.4 磁化时间对十二胺的影响

为了研究不同磁化时间下十二胺对反浮选过程的影响,对其进行不同时间的磁化处理,并进行反浮选试验,结果如图 11 所示。

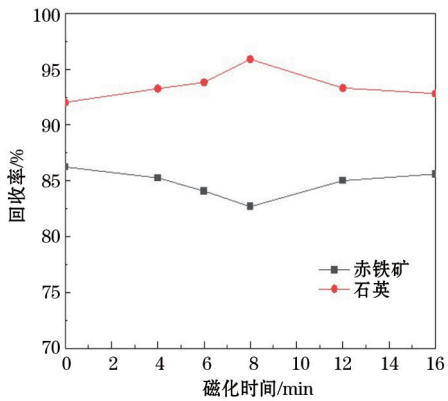


图 11 磁化时间对十二胺捕收性能的影响

Fig.11 Effect of magnetization time on the harvesting performance of dodecylamine

由图 11 可知,赤铁矿的回收率在 0～8 min 内呈递减趋势,并在 8 min 时降至最低值,较未磁化降低了 3.56 个百分点,超过该临界点后,其回收率开始回升。与此相反,石英回收率在 0～8 min 的区间内呈递增趋势,在 8 min 时升至峰值,较未磁化上升了 3.86 个百分点,超过该临界点后,回收率缓慢降低。因此,确定十二胺的最佳磁化时间为 8 min。

2.3 磁化处理对浮选时间的影响

在 150 mT 的磁场强度下对试样磁化 8 min,开展不同时间的反浮选试验,结果见图 12。试验结果表明,磁化处理对抑制剂、矿浆、水均有不同程度的影响,提升了反浮选效率。其中,磁化后的木薯淀粉对反浮选效果的影响最为显著,其次是磁化矿浆,而磁化水影响相对较弱。在浮选时间达到 4 min 时,回收率变化幅度趋于平缓,故在此反浮选体系中最佳时间为 4 min。

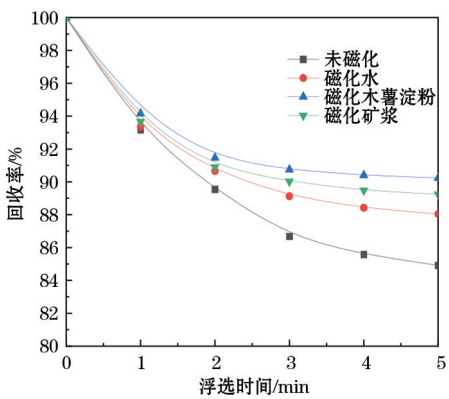


图 12 磁化处理对反浮选效率的影响

Fig.12 Effect of magnetization treatment on the efficiency of reverse flotation

3 磁化处理机理分析

3.1 磁化时间影响溶液电导率

以不同磁化时间对水、药剂进行磁化处理,测试赤铁矿反浮选体系下溶液整体的电导率,结果如图13所示。

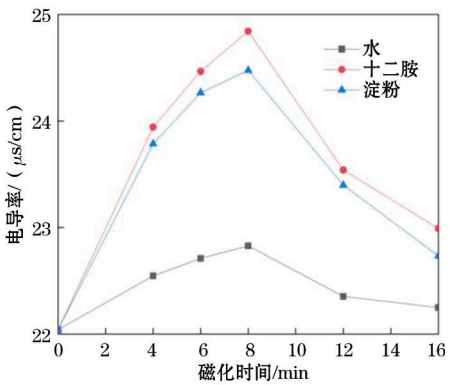


图13 电导率随磁化时间的变化规律

Fig.13 Changes of conductivity with magnetization time

图13结果表明,溶液电导率与磁化时间的变化关系呈现明显的阶段性特征,当磁化时间从0增长到8 min时,磁化水与磁化药剂的溶液电导率逐渐增加并在8 min达到峰值,超过该临界点后,电导率开始逐渐下降,但始终高于未磁化时的电导率。其中磁化水对电导率的提升效应相对较弱,其电导率只增加了0.79 μs/cm;而磁化药剂对电导率的影响较为显著,磁化淀粉和十二胺的电导率分别提高了2.44 μs/cm和2.8 μs/cm。

电导率的提升是由于水分子之间氢键网络磁化处理后被重构,部分氢键断裂或变形,水分子间的范德华力减弱,降低了分子间的黏聚力和水化离子对的结合能,增加了溶液中药剂的溶解度。电导率的增大会影响矿物表面的双电层结构,改变电荷分布,增强药剂分子在矿物表面的吸附。

3.2 磁化时间影响溶液与矿浆的黏度

在不同磁化时间下对两相浮选溶液和三相浮选矿浆进行磁化,测试溶液和矿浆的黏度,结果如图14所示。

由图14可知,溶液黏度和矿浆黏度均随磁化时间的延长而增大,并在8 min时趋近于最大值,继续增加磁化时间,溶液的黏度变化幅度减小,趋于稳定状态。磁化处理水、药剂对溶液黏度影响相对较小,黏度波动幅度较小,而磁化处理矿浆对矿浆黏度影响相对较大。

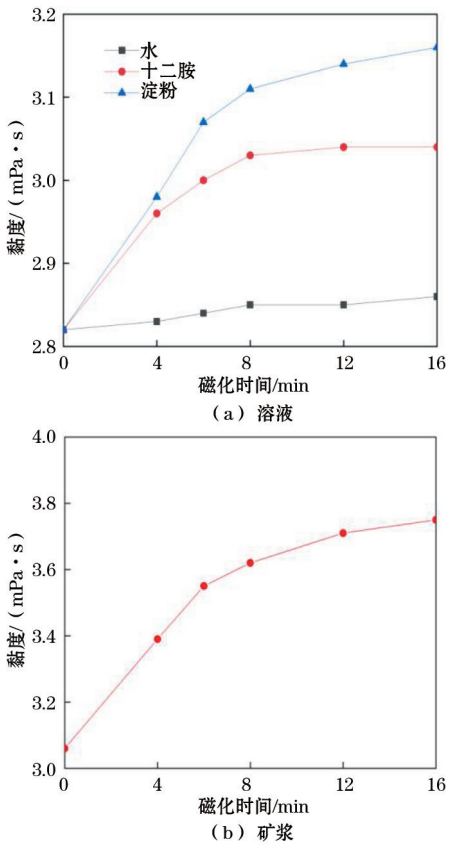


图14 溶液和矿浆黏度随磁化时间的变化规律

Fig.14 Changes of solution and slurry viscosity with magnetization time

黏度的测试结果与反浮选中药剂的作用效果和反浮选回收率具有对应关系。试验结果表明,磁化处理使药剂分子有序化,强化了分子间的相互作用与摩擦阻力,磁化8 min后,分子间作用力基本饱和,黏度变化不再明显。磁化矿浆的黏度变化最大,说明磁化处理导致颗粒表面的电荷重排或双电层压缩促进矿浆中颗粒的团聚,形成更大的絮团,导致黏度增加。解释了单因素反浮选中磁化时间持续增加后,回收率出现反弹的现象。所以磁化处理对水、药剂溶液及矿浆溶液在黏度方面的影响有利于赤铁矿反浮选指标的优化。

3.3 磁化时间影响溶液的表面张力

以不同磁化时间对水、药剂进行磁化处理,测试水系的表面张力,研究磁化时间对浮选溶液表面张力的影响,结果如图15所示。

随着磁化时间从0延长至8 min,浮选用水经磁化后,表面张力下降了5.87 mN/m;十二胺溶液在磁化后,表面张力同样有所降低,下降了3.72 mN/m;淀粉溶液在磁化后表面张力下降了3.01

mN/m。磁化时间超过 8 min 后,3 种溶液的表面张力趋于稳定。

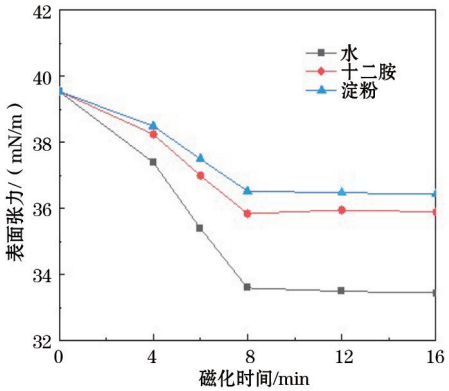


图 15 表面张力随磁化时间的变化规律

Fig.15 Variation of surface tension with magnetization time

经测试发现,磁化对水的表面张力产生影响,进而影响浮选效果,特别是对赤铁矿的反浮选回收率影响更为显著。随着磁化时间的延长,溶液内分子逐渐形成定向有序排列,削弱了表层分子之间的范德华力相互作用,导致液体表面张力呈递减趋势。在磁化过程中,水分子通过吸收能量实现平均热运动能的显著提升,与此同时,磁场对水分子相互间的分散力、诱导作用、氢键作用都有一定的削弱影响,经过磁化处理后的水展现出了更低的表面张力,导致石英颗粒更易与气泡发生黏附,有助于提高赤铁矿的反浮选效率。

3.4 磁化时间影响矿物表面的药剂吸附量

通过对水、药剂和矿浆进行不同时间的磁化处理,利用 TOC 总有机碳分析仪对药剂的吸附量进行测试,分别研究磁化作用对药剂吸附量的影响,每次试验仅加入一种药剂进行检测,探究药剂在赤铁矿颗粒表面的吸附状况。

磁化水对吸附量的影响如图 16 所示。

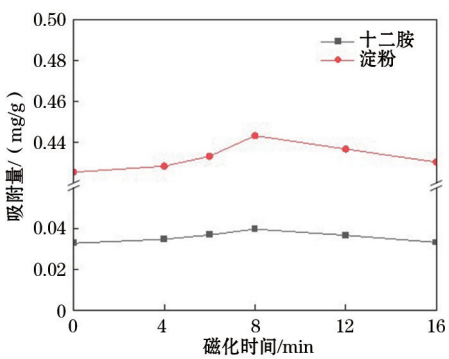


图 16 磁化水对吸附量的影响

Fig.16 Effect of magnetized water on adsorption

由图 16 可知,磁化水后,十二胺和淀粉在赤铁矿表面的吸附量均先增加后降低,且磁化后的吸附量始终高于未磁化时的吸附量。在 0~8 min 范围内,十二胺的吸附量由 0.032 mg/g 增加到 0.039 mg/g,提升了 21.9%;淀粉吸附量从 0.425 mg/g 增加到 0.443 mg/g,提升了 4.2%,继续增加磁化时间,吸附量会有所下降。

一方面,磁化作用使水表面张力降低,促进淀粉分子链舒展,暴露出更多的羟基(—OH),有利于与赤铁矿表面的 Fe^{3+} 形成配位键,使赤铁矿表面的淀粉吸附量增多;过量磁化可能导致淀粉链断裂,降低其吸附能力。另一方面,磁化水增加了捕收剂分子的溶解度,促进十二胺质子化,阳离子浓度增加,通过静电吸附在赤铁矿表面,十二胺吸附量增加;而过量磁化将诱导氧化还原反应,Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+},导致静电作用减弱,吸附量降低。

磁化药剂对药剂吸附量的影响如图 17 所示。

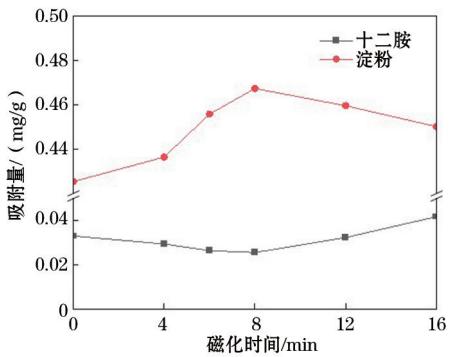


图 17 磁化药剂对药剂吸附量的影响

Fig.17 Effect of magnetizing agent on the amount of agent adsorption

由图 17 可知,磁化十二胺的吸附量随磁化时间的增加先降低,在 8 min 时达到最小值,由 0.032 mg/g 降至 0.025 mg/g,下降了 21.9%,当磁化时间大于 8 min 时,十二胺吸附量开始增大。磁化淀粉的吸附量随磁化时间的增加先增大,在 8 min 时达到最大值,从 0.425 mg/g 增至 0.467 mg/g,提升了 9.9%,继续延长磁化时间,淀粉的吸附量降低。

磁化处理淀粉使其舒展为线性结构,暴露出的羟基通过氢键和配位键吸附在赤铁矿表面,吸附量增加;磁化时间持续增加后淀粉分子间的羟基通过氢键网状交联,形成絮团结构,难以吸附在矿物表面,吸附量有所降低。短时间的磁化处理导致十二胺分子偶极矩定向排列形成分子簇,氨基被烷基链包裹,减少与赤铁矿表面的静电作用位点,吸附量降低;长时间的磁化处理破坏分子簇结构,氨基完全暴露,与赤铁矿表面 Fe^{3+} 的

配位作用和静电吸附增强,吸附量增加。

磁化矿浆对药剂吸附量的影响如图 18 所示。

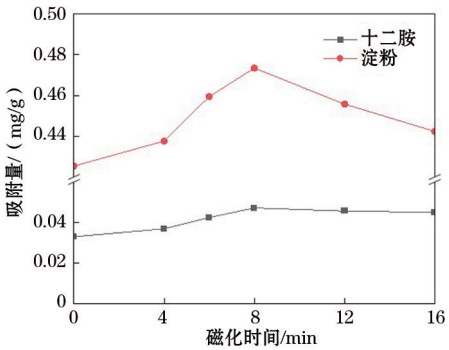


图 18 磁化矿浆对药剂吸附量的影响

Fig.18 Effect of magnetized slurry on the adsorption of pharmaceuticals

由图 18 可知,磁化矿浆时,十二胺的吸附量在 8 min 前由 0.032 mg/g 增大至 0.047 mg/g,提升了 46.9%,继续延长磁化时间对吸附量影响不大;淀粉的吸附量从未磁化时的 0.425 mg/g 增加至 0.473 mg/g,提升了 11.3%,继续增加磁化时间将降低淀粉吸附量。

磁化初期(0～8 min),磁场作用使赤铁矿颗粒发生磁畴重排,矿物表面的活性位点暴露增多,促进淀粉分子的吸附作用,同时,磁化处理使颗粒分散,比表面积增大,提升吸附效率;超过 8 min 后,可能导致颗粒磁团聚,有效吸附面积减少,长时间的磁化作用还可能导致赤铁矿表面氧化,增加表面疏水性,与亲水性淀粉的亲和力下降。同时,十二胺作为阳离子,通过静电作用吸附于赤铁矿表面,短时间内的磁化处理增强矿物表面负电荷密度,加速十二胺的吸附;磁化 8 min 后,矿物表面电荷分布达到动态平衡,吸附量不再显著变化。

3.5 磁化前后矿物颗粒表面红外光谱分析

研究水、淀粉、十二胺和矿浆磁化处理 8 min 后对捕收剂十二胺和抑制剂淀粉附着于赤铁矿和石英上的红外光谱的影响,结果如图 19、图 20 所示。

图 19 展示了磁化前后赤铁矿表面的红外光谱对比图。赤铁矿表面—OH 弯曲振动吸收峰在 1 424.4 cm^{-1}、1 618.6 cm^{-1}和 3 400 cm^{-1}附近分别对应羟基(—OH)的对称弯曲振动特征峰和缔合伸缩振动峰[16-17]。由图 19 可知,磁化后在 1 593.2 cm^{-1}处的峰向低波数方向移动,表明磁化对药剂的吸附作用产生明显改变,促进极性分子更有效地附着于赤铁矿表面,进而改变其表面电荷分布及 Fe—O 键的振动特性。在 3 100～3 600 cm^{-1}之间的波段宽度增加,其中磁化淀粉与十二胺的峰值改变最明显,表明赤铁矿表面羟基密度的提升,导致羟基(—OH)振动峰展宽。

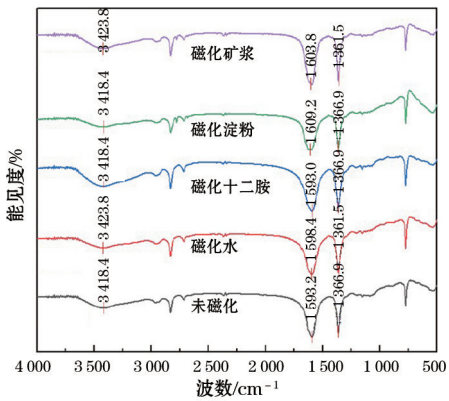


图 19 磁化前后赤铁矿的红外光谱对比分析

Fig.19 Comparative analysis of infrared spectra of hematite before and after magnetization

图 20 展示了磁化前后石英表面的红外光谱对比图。在 799.13 cm^{-1}处为 Si—O 键的伸缩振动峰,1 620.87 cm^{-1}处出现的吸收峰是由石英表面吸附水的弯曲振动所产生,3 435.02 cm^{-1}处的宽频吸收揭示了硅羟基(Si—OH)的缔合效应,其氢键网络扩展导致 O—H 伸缩振动频域展宽[18]。此外,2 851.08 cm^{-1}处亚甲基(—CH_2^-)的伸缩振动峰及 3 300 cm^{-1}附近为胺基(—NH_2)的伸缩振动峰,表明十二胺分子通过氨基与石英表面硅羟基吸附[19-20]。由图 20 可知,磁化处理浮选用水/浮选药剂后,在 2 830 cm^{-1}处的亚甲基对称伸缩振动峰增强,这一现象表明药剂分子中烷基链的排列有序性提高;在 3 100～3 600 cm^{-1}之间的波段宽度增大,这与药剂在石英表面的相互作用有关,表明磁化处理提升了药剂分子在石英表面的吸附效率,有利于形成更紧密的吸附层。

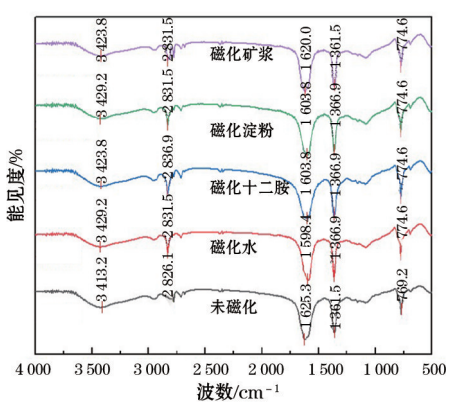


图 20 磁化前后石英的红外光谱对比分析

Fig.20 Comparative analysis of infrared spectra of quartz before and after magnetization

4 结论

(1) 对赤铁矿纯矿物的反浮选中,最优的磁化时间为 8 min,此时磁化处理水、淀粉、矿浆可使浮选回收率分别增加 2.3 个百分点、4.16 个百分点、3.84个百分点;而磁化十二胺将抑制淀粉在赤铁矿表面吸附,对赤铁矿反浮选起抑制作用,回收率降低了 3.56%。

(2) 随着磁化时间的增加,磁化水、十二胺、淀粉的电导率均呈现先增加后降低的趋势,在 8 min 时达到最大值。磁化水对电导率的影响较小,从 22.04 μs/cm 增长到 22.83 μs/cm;而磁化十二胺和淀粉的影响较大,分别从 22.04 μs/cm、22.04 μs/cm 增长到 24.84 μs/cm、24.48 μs/cm。电导率的提高说明磁化处理增强了药剂分子的溶解度,增大了溶液中电解质的浓度。

(3) 在 0～16 min 的范围内,磁化水、药剂和矿浆的黏度均随着磁化时间的增加而不断增大,并在 8 min 之后趋于平缓。其中磁化时长对矿浆黏度的影响较大,对水和药剂的影响相对较小。黏度的增大强化了矿物对药剂的吸附能力,并在一定程度上强化了抑制剂效果,阻止了矿物颗粒上浮,从而提高反浮选回收率。水和药剂经过磁处理后表面张力均下降,致使石英更易吸附在气泡上,提高了赤铁矿反浮选的效率。结合红外光谱测试结果,磁化处理减弱了水系中氢键作用和分子间作用力,使表面层水分子间的结合力减弱,表面张力下降。

(4) 随着磁化时间的增加,磁化水中淀粉和十二胺的吸附量均先增加后减少,在 8 min 时达到峰值;磁化淀粉使其在赤铁矿表面的吸附量先增后减,而磁化十二胺的吸附量先减后增;磁化矿浆使淀粉的吸附量先增后减,十二胺的吸附量先增加后稳定不变。

参考文献(References):

[1] 杜凤梅,王金玮,齐晓娜.微细粒矿物分选技术研究进展[J].世界有色金属,2021(11):178-179.
DU Fengmei, WANG Jinwei, QI Xiaona. Research progress on separation technology of fine minerals [J]. World Nonferrous Metals,2021(11):178-179.

[2] 任爱军,孙传尧,朱阳戈.磷酸酯淀粉在赤铁矿阳离子反浮选脱硅中的抑制作用及 QCM-D 吸附研究[J].有色金属(选矿部分),2019(4):99-104.
REN Aijun, SUN Chuanyao, ZHU Yangge. Depression and QCM-D adsorption study of phosphate ester starch in the reverse flotation of quartz from hematite with cationic collector [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2019(4):99-104.

[3] 纪振明.云南某难选赤铁矿选矿试验[J].现代矿业,2018,34(11):103-105+123.
JI Zhenming. Beneficiation experiment on a refractory hematite in Yunnan Province[J]. Modern Mining,2018,34(11):103-105+123.

[4] 伍喜庆,曹玉川,段云峰.新型阳离子捕收剂 DHPA 的浮选及泡沫性能研究[J].矿冶工程,2012,32(6):33-36.
WU Xiqing, CAO Yuchuan, DUAN Yunfeng. Effect of new cationic collector DHPA on froth characteristics and flotation performance of iron ore [J]. Mining and Metallurgical Engineering,2012,32(6):33-36.

[5] 朱巨建,李晓安,陈炳辰.磁化处理技术的发展及其在矿物浮选中的应用[J].国外金属矿山,1997(3):52-56.
ZHU Jujian, LI Xiaoan, CHEN Bingchen. Development of magnetization processing technology and its application in mineral flotation[J]. Foreign Metal Mining Magazine,1997(3):52-56.

[6] LI Hui, XIAO Wei, JIN Jianping, et al. Influence mechanism of magnetized modified kerosene on flotation behavior of molybdenite [J]. Minerals, 2021, 12(1):245405762.

[7] WANG Hetang, CHEN Xinyi, XIE Ying, et al. Experimental study on improving performance of dust-suppression foam by magnetization[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,2019,577:370-377.

[8] 袁致涛,许元凯,孟庆有,等.用磁处理油酸钠溶液浮选钛铁矿及增效机理研究[J].东北大学学报(自然科学版),2020,41(8):1195-1200.
YUAN Zhitao, XU Yuankai, MENG Qingyou, et al. Mechanism of enhancing separation performance of ilmenite by magnetic treatment of sodium oleate solution[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2020,41(8):1195-1200.

[9] 张鹏,王志强.磁化煤油-AEO9 捕收剂的性质及其浮选效果研究[J].矿产综合利用,2021(3):51-56.
ZHANG Peng, WANG Zhiqiang. Study on properties and flotation performance of magnetized kerosene-AEO9 collector[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2021(3):51-56.

[10] 石旭.磁化改性煤油捕收剂提高辉钼矿浮选效果的试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.
SHI Xu. Study on improving the flotation efficiency of molybdeniteby magnetized kerosene collector[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2017.

[11] 周文波,李赛,陶黎明,等.磁化对油酸钠溶液物化性质和矿物浮选的影响[J].金属矿山,2020(4):93-98.
ZHOU Wenbo, LI Sai, TAO Liming, et al. Effect of magnetization on physicochemical properties of sodium oleate solution and mineral flotation[J]. Metal Mine,2020(4):93-98.

[12] 李海鹏.药剂磁化处理对煤泥浮选效果的影响[D].太原:太原理工大学,2019.

LI Haipeng. Effect of pharmaceutical magnetization treatment on the flotation effect of coal slurry[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2019.

[13] 周永锋,罗溪梅,宋水祥,等.四种阳离子捕收剂对赤铁矿和石英浮选行为的影响[J].矿产保护与利用,2020,40(2):56-61.
ZHOU Yongfeng, LUO Ximei, SONG Shuixiang, et al. Effect of four kinds of cationic collectors on flotation of hematite and quartz[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2020,40(2):56-61.

[14] 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]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2024,45(2):127-132.

[15] 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 Fengjiu, KONG Yaran, ZHAO Liucheng, et al. Effect of reagents magnetization treatment on hematite flotation and its mechanism[J]. Metal Mine,2022(9):87-93.

[16] 王帅,王楠,李翠兰,等.赤铁矿和三羟铝石吸附 Cu^{2+} 的红外光谱研究[J].光谱学与光谱分析,2011,31(9):2403-2406.
WANG Shuai, WANG Nan, LI Cuilan, et al. FTIR spectroscopic analysis of Cu^{2+} adsorption on hematite and bayerite[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2011,31(9):2403-2406.

[17] XU Yuankai, YUAN Zhitao, MENG Qingyou, et al. Enhancing the flotation performance of ilmenite with the magnetic treatment of water[J]. Separation Science and Technology,2021,57(1):1-11.

[18] 郝保红.超细粉磨时粉石英化学键变化的红外光谱分析[J].矿冶工程,2001(4):64-66.
HAO Baohong. IR analysis of the chemical bond changes in quartz powder during superfine milling[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2001(4):64-66.

[19] BROWN A G, THUMAN W C, MCBAIN J W. The surface viscosity of detergent solutions as a factor in foam stability[J].Journal of Colloid Science,1953,8(5):491-507.

[20] LIMA R M F, BRANDÃO P R G, PERES A E C. The infrared spectra of amine collectors used in the flotation of iron ores[J].Minerals Engineering,2005,18(2):267-273.