

可溶性淀粉选择性分离磁铁矿 与角闪石的试验研究

李万兴¹, 朱思宇², 陆泽通^{3*}, 刘双安¹, 张琦¹, 张鹏羽⁴, 李洪强²

(1. 鞍钢集团矿业设计研究院有限公司, 辽宁 鞍山 114004; 2. 武汉工程大学, 湖北 武汉 430205; 3. 湖北宜化环保科技有限公司, 湖北 宜都 443311; 4. 中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410205)

摘 要: 角闪石为含铁硅酸盐矿物, 与磁铁矿性质接近难以分离。通过单矿物浮选、人工混合矿浮选及实际矿物浮选试验探究了可溶性苛化淀粉 TF 作为磁铁矿抑制剂的可行性, 并利用接触角、Zeta 电位、傅里叶红外光谱 (FTIR) 和 X 射线光电子能谱 (XPS) 分析手段揭示了 TF 在磁铁矿表面的作用机制。结果表明, 在 pH=7、捕收剂 609 用量 7.5 mg/L、TF 用量 10 mg/L 的条件下, TF 能有效抑制磁铁矿, 但对角闪石抑制效果不明显。实际矿石浮选试验进一步证实, TF 不仅可作为磁铁矿与角闪石分离的高效抑制剂, 还可缓解泡沫量过多的现象。TF 吸附在磁铁矿表面, 使其亲水性显著提高, 并通过其分子结构中 -COOH、-OH 等含氧基团与磁铁矿表面的 Fe 原子形成配位键, 产生化学吸附, 有效阻碍了捕收剂 609 在磁铁矿表面的吸附。

关键词: 磁铁矿; 角闪石; 浮选; 抑制剂; 化学吸附

中图分类号: TD913

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)03-0189-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.03.022

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Study on the selective separation of magnetite and hornblende using soluble starch

LI Wanxing¹, ZHU Siyu², LU Zetong^{3*}, LIU Shuang'an¹, ZHANG Qi¹, ZHANG Pengyu⁴, LI Hongqiang²

(1. An Steel Mining Engineering Corporation, Anshan 114004, Liaoning, China; 2. Wuhan institute of Technology, Wuhan 430205, Hubei, China; 3. Hubei Yihua Environmental Protection Technology Co., Ltd., Yidu 443311, Hubei, China; 4. Zhongye Changtian International Engineering Co. Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: Hornblende is a ferrous silicate mineral with similar floatability to magnetite, making the two minerals difficult to separate. The feasibility of Soluble Causticized Starch (TF) as depressant of magnetite was assessed in the single-mineral, artificial-mixed-ore and natural ore flotation test. Meanwhile, the adsorption mechanisms of TF on magnetite surface were investigated through contact angle measurement, Zeta potential measurement, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The flotation test results showed that under the condition of pH=7, 7.5 mg/L collector 609 and 10 mg/L TF could effectively depress magnetite, but the depression effect on hornblende was not obvious. Flotation tests on raw ore further confirmed that TF not only could be used as an depressant for the separation of magnetite and hornblende, but also alleviate excessive foam formation. TF adsorbs on the surface of magnetite, thereby significantly increasing its hydrophilicity. Oxy-

收稿日期: 2025-11-22; 修回日期: 2025-12-24; 接受日期: 2025-12-29

基金项目: 国家自然科学基金 (51974205); 武汉工程大学研究生教育创新基金项目 (CX2024064)。

作者简介: 李万兴, 1994 年出生, 男, 辽宁海城人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为矿物分选方面, E-mail: 228861250@qq.com; * 通信作者: 陆泽通, 1996 年出生, 男, 甘肃兰州人, 硕士研究生, 研究方向为矿产资源综合利用, E-mail: luzt@hbyihua.cn。

gen-containing functional groups -COOH, -OH forming coordination bonds with surface Fe of magnetite via chemical adsorption hinders the adsorption of collector 609 on magnetite surface effectively.

Key words: magnetite; hornblende; flotation; depressant; chemical adsorption

0 引言

铁矿作为汽车、船舶等制造业的核心原料,是我国国民经济发展的基础性战略资源。我国铁矿“贫细杂”的特点难以满足作为全球最大铁矿石需求国兼钢铁产量大国的需求,进口依赖度长期居高不下,2024年进口铁矿石达6.1亿t(同比增长6.2%)^[1]。澳大利亚已探明铁矿石储量占全球30%(500亿t),是我国第一大铁矿石进口国^[2]。为突破国际矿企垄断、降低成本,鞍山钢铁集团与澳大利亚金达必金属公司合资开发卡拉拉铁矿,该矿已探明可开采储量14亿t、预计总储量超20亿t,年产磁铁矿石2100万t^[3]。

卡拉拉铁矿主要金属矿物为磁铁矿,脉石为角闪石、石英等硅酸盐类。当前“提铁降硅”研究多聚焦石英与磁铁矿分离,技术相对成熟,而角闪石与磁铁矿分离研究较少且难度更高。具体难点体现在:①角闪石为长柱状晶形,机械破碎难度大,常以 $<10\mu\text{m}$ 细粒嵌布于磁铁矿中,单体解离困难;②角闪石为含铁硅酸盐矿物,虽密度($3.0\sim 3.5\text{ g/cm}^3$)与磁铁矿差异较大,但弱磁选脱除时随尾矿排出导致含铁量偏高,需经两段磨矿(粒度 $<0.2\text{ mm}$)或高梯度磁选才能初步分离;③角闪石结构中 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 等阳离子可发生类质同象置换,零电点高于石英且与磁铁矿相近,捕收剂对其与磁铁矿的选择性较差,往往需借助抑制剂实现有效分离。当前铁矿石反浮选常使用的抑制剂为淀粉,因其来源广泛、价格低廉,环境友好等优点广泛使用^[4]。但淀粉是一种大分子碳水化合物,在室温中性水中溶解性较差,使用前需通过“糊化”将半结晶颗粒淀粉转化为无定形形态^[5]。“糊化”是通过加热/苛化处理或两者结合的方式进行,其中苛化处理常用氢氧化钠。“糊化”淀粉存在以下问题:淀粉“糊化”颗粒降解不完全,抑制效果欠佳;氢氧化钠成本高;因抑制性能低,“糊化”淀粉消耗量大;过量使用“糊化”淀粉会对硅酸盐脉石产生同步抑制,导致浮选精矿铁品位降低。基于此,研究人员对“糊化”淀粉不断进行改性和优化,如通过酯化等化学反应提高溶解度;采用其他药剂取代氢氧化钠降低成本,如采用亚硫酸钠对淀粉“糊化”后可以适当降低淀粉分子量,增加直链淀粉含量,使其对赤铁矿具有更强的吸附能力,赋予赤铁矿表面更高的亲水性,诱导赤铁矿高效选

择性絮凝^[6];此外,研究人员基于淀粉大量羟基与铁矿物中的Fe离子形成螯合物,从而赋予铁矿物亲水性的抑制机理,还开发了羧甲基壳聚糖^[7]、黄原胶^[8]、木质素磺酸钙^[9]等抑制剂。然而,上述改性方法在实际工业应用中仍面临诸多挑战。一方面,采用亚硫酸钠等试剂进行糊化改性,会不可避免地体系中引入无机盐离子(如 Na^+ 、 SO_3^{2-}),这些离子是否会干扰矿物表面的双电层结构,以及亚硫酸根的还原性是否会对复杂浮选体系的药剂稳定性产生影响还有待进一步研究;另一方面,黄原胶等生物高分子抑制剂制备成本较高,难以大规模在工业生产中推广;而羧甲基壳聚糖、木质素磺酸钙对石英等脉石矿物也存在一定的非选择性抑制,容易导致精矿品位下降。因此,开发一种制备工艺简单、环保、不引入杂质离子,且兼具低成本与高选择性的抑制剂,仍是当前亟待解决的关键问题。

针对以上问题,首次以来源广泛、兼具食品级安全性与易降解特性的多糖聚合物为原料,采用工艺简单、成熟的苛性糊化反应对其进行活化改性,以克服常规抑制剂溶解性差、选择性差等缺陷,开发了一种高效可溶性苛化淀粉类抑制剂TF。在此基础上,以磁铁矿和角闪石为对象,采用课题组自制醚二胺609作捕收剂,利用其含有两个胺基官能团,具有更强捕收能力的特性,与新型抑制剂TF联合使用,以达到进一步提高精矿品位的目的。通过浮选试验、接触角测试、Zeta电位测试、红外光谱(FTIR)分析和X射线光电子能谱(XPS)分析,探究了抑制剂TF对磁铁矿的浮选行为及抑制机理,通过优化浮选药剂制度取得了较好的选别指标,解决了阳离子反浮选选择性差、泡沫难消的问题,为该类型铁矿石高效分选提供了技术支撑。

1 试验矿样

纯矿物购自广州市花都区花东叶氏石头标本商行,经玛瑙研钵研磨后,磁铁矿与角闪石分别采用乙醇、盐酸进行清洗净化,真空干燥后分级,粒度范围为 $-0.074\sim +0.037\text{ mm}$ 用于纯矿物浮选试验, -0.037 mm 用于机理研究。

实际矿物浮选矿样来自澳大利亚卡拉拉铁矿(-0.074 mm 占94.92%),经化学滴定法测定其TFe为57.59%。矿物颗粒形貌(见图1)结合XRD结果可知:铁矿物主要为磁铁矿,占矿物组成含量的

76%;脉石矿物主要是角闪石(10%)、石英(10%)和黑云母(4%)。

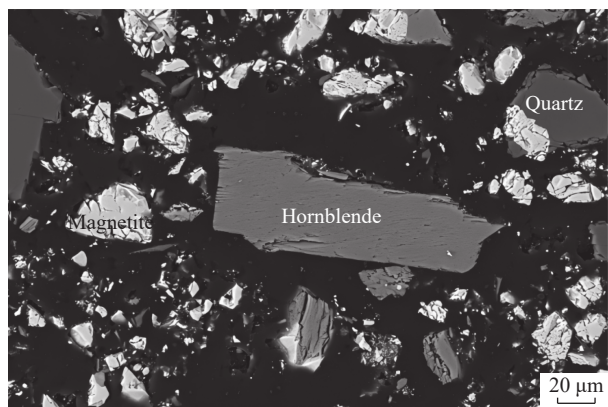


图1 铁矿物中主要矿物颗粒典型形貌

Fig. 1 Typical morphologies of major mineral grains in iron-bearing minerals

2 试验方法

为验证 TF 对磁铁矿的选择性抑制能力,开展单矿物、人工混合矿、实际矿石浮选试验。为揭示 TF 与矿物界面作用机制,采用接触角、Zeta 电位、FTIR、XPS 系统表征。

2.1 纯矿物浮选试验

采用 XFD 型挂槽式浮选机,在转速为 1 200 r/min、室温条件下,取一定质量的纯矿物(单矿物 2 g;人工混合矿按质量比 $m(\text{磁铁矿}):m(\text{角闪石}):m(\text{石英})=7.5:1:1$ 混合配制 3 g,加入去离子水后在 100 mL 浮选槽中调浆搅拌 2 min,调节矿浆 pH 值后每隔 2 min 依次加入抑制剂、捕收剂,充气刮泡 3 min,将泡沫与槽内产品分别烘干、称重,计算上浮率,上浮率计算公式如式(1)所示。

$$\text{上浮率} = \frac{\text{上浮产物质量}}{\text{初始矿样质量}} \times 100\% \quad (1)$$

2.2 实际矿石浮选试验

采用 0.75 LXFG 型单槽浮选机,转速为 1 800 r/min。矿样为 300 g,按照 pH 调整剂、抑制剂和捕收剂的顺序添加药剂,在室温条件下进行一次粗选试验,浮选试验流程如图 2 所示。

2.3 接触角测量

采用上海中晨数字技术设备公司 JC2000DM 型接触角测量仪测定 609、TF 分别与磁铁矿、角闪石作用前后的接触角变化。每个试验测量 3 次后取平均值。

2.4 Zeta 电位测量

分别称取 0.100 0 g($\pm 0.000 5$ g)粒径为 -0.023 mm

的磁铁矿与角闪石样品,加入去离子水,以 1×10^{-3} mol/L 的 KCl 溶液作为电解质,磁力搅拌 5 min,调节 pH 值,添加 7.5 mg/L 捕收剂、5 mg/L 抑制剂,搅拌 5 min,静置 2 min 后取样,在 Nano ZS90 Zeta 电位分析仪(英国马尔文仪器公司)上进行矿物表面 Zeta 电位测量,每个试验测量 3 次后取平均值。

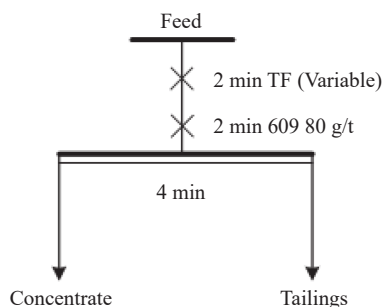


图2 实际矿石粗选试验流程

Fig. 2 Actual ore roughing testing process

3 结果与分析

3.1 纯矿物试验

3.1.1 单矿物试验

单矿物试验在以 609 为捕收剂的基础上,分别考查了捕收剂浓度、矿浆 pH 值以及抑制剂 TF 的浓度对磁铁矿和角闪石上浮率的影响。

图 3 为自然 pH($\text{pH}=8.20$)、无抑制剂条件下,捕收剂 609 浓度对磁铁矿和角闪石上浮率影响规律。由图 3 可知,在整个试验浓度范围内,捕收剂 609 对角闪石的捕收能力始终优于磁铁矿,特别是在低浓度,二者上浮率差异最为显著。当 609 浓度从 4.0 mg/L 升至 7.5 mg/L 时,角闪石上浮率从 66.00% 线性升至 93.84%,而磁铁矿上浮率仅从 6.35% 增加至 35.42%。捕收剂 609 浓度继续增加至 15 mg/L 时,磁铁矿上浮率达到 68.47%,之后随捕收剂浓度增加持续上升,而角闪石的上浮率则趋于平稳,二者差值逐渐缩小。综合考虑二者上浮率差异及角闪石上浮率,确定捕收剂 609 最佳用量为 7.5 mg/L。

捕收剂 609 浓度为 7.5 mg/L,无抑制剂条件下,矿浆 pH 对单矿物上浮率的影响见图 4。由图 4 可知,609 浓度为 7.5 mg/L 时,整个 pH 范围内,捕收剂 609 对角闪石的捕收作用均强于磁铁矿。此外,pH 对磁铁矿和角闪石的影响规律较为一致,二者均是碱性及酸性条件下上浮率低,中性条件(pH 为 7)时上浮率高且二者上浮率差值达到最大 58.42%,说明 TF 在中性 pH 下即可实现强选择性抑制,无需高碱环境,在该条件下进一步探索抑制剂用量试验。

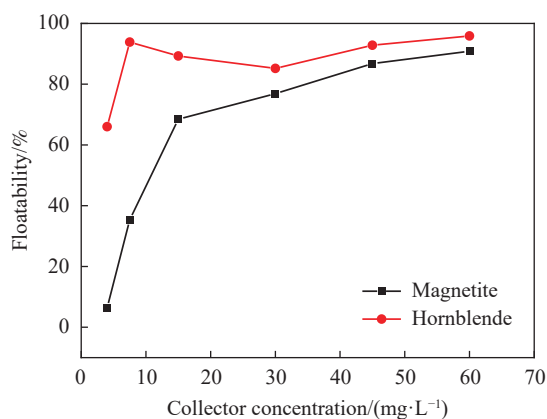


图3 捕收剂 609 浓度对单矿物上浮率的影响

Fig. 3 Effect of collector 609 concentration on single mineral flotation rate

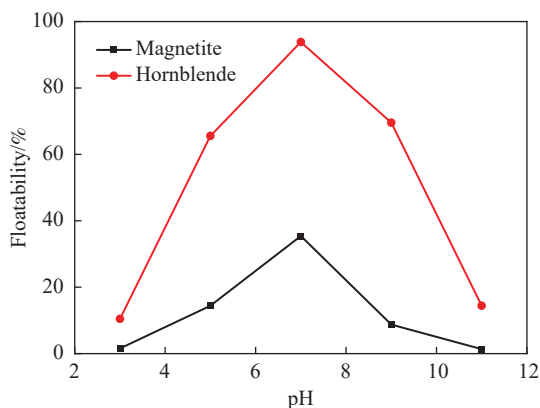


图4 矿浆 pH 对单矿物上浮率的影响

Fig. 4 Effect of pulp pH on single mineral flotation rate

图5为捕收剂 609 浓度为 7.5 mg/L, pH 为 7 时,抑制剂 TF 对磁铁矿和角闪石浮选行为的影响。由图5可知,磁铁矿和角闪石的上浮率均随抑制剂 TF 浓度升高而下降,角闪石上浮率始终高于磁铁矿。特别是在抑制剂 TF 用量增至 10 mg/L 后,磁铁矿上浮率 $\leq 0.7\%$,基本不上浮,而角闪石上浮率稳定在 40% 左右。结果表明,TF 对磁铁矿的抑制作用强于角闪石。

3.1.2 人工混合矿试验

由于单矿物试验体系未涉及实际矿物中共生矿物的相互作用,TF 对磁铁矿的选择性抑制效果及实际应用价值需通过混合矿浮选进一步验证与探讨。在捕收剂 609 用量为 7.5 mg/L,矿浆 pH 为 7 时,对铁品位 57.36% 的人工混合矿进行抑制剂用量试验,结果如图6所示。

由图6可以看出,不加抑制剂时铁品位较高(69.86%),但回收率低,仅 75.30%,说明仅添加捕收剂无法较好实现磁铁矿与角闪石的分离,部分磁铁矿会随硅酸盐矿物一起上浮,在尾矿中损失。加入抑制剂 TF 后,磁铁矿得到了有效抑制,铁精矿回收

率随着 TF 用量增加持续提高,铁品位则是随 TF 用量增加先升后降。TF 用量达到 10 mg/L 时,铁品位达到最高 70.40%,但 TF 用量继续增加,TF 抑制磁铁矿的同时也对硅酸盐矿物开始抑制,导致铁品位下降。该变化规律与单矿物浮选试验结论一致。因此,合理控制 TF 用量可实现磁铁矿和硅酸盐脉石(石英、角闪石)的有效分离。

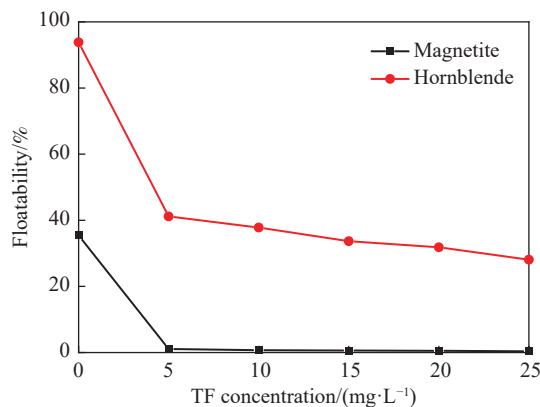


图5 抑制剂 TF 浓度对单矿物上浮率的影响

Fig. 5 Effect of inhibitor TF concentration on single mineral flotation rate

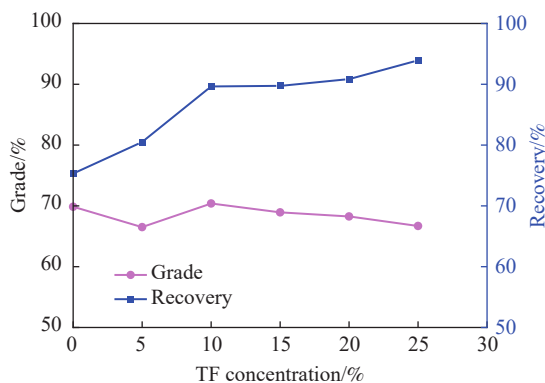


图6 抑制剂 TF 用量对人工混合矿浮选试验结果影响

Fig. 6 Effect of inhibitor TF dosage on flotation test results of artificial mixed ore

3.2 实际矿物浮选

基于纯矿物浮选结果,在矿浆 pH 为 7,捕收剂 609 用量为 80 g/t 的条件下,考查了抑制剂 TF 用量对实际矿物粗选试验结果及泡沫量的影响,结果如表1所示。

表1数据表明,当 TF 用量 200 g/t 时,TF 可以选择性抑制磁铁矿在浮选槽底部,使得铁品位、回收率分别由不加抑制剂时的 66.4%、72.35% 升高至 66.63%、74.64%。当 TF 用量增加至 500 g/t 时,此时过量的抑制剂 TF 会非选择性地吸附在角闪石表面,削弱角闪石与捕收剂 609 的结合,导致部分角闪石也被抑制在浮选槽底部,铁品位下降,而回收率仍然上升。该变化趋势与人工混合矿物浮选结果一

致。因此,TF 用量在 200 g/t 时,对磁铁矿体现了较好的选择性抑制作用。此外,由泡沫量结果可以看出,随着抑制剂 TF 的用量增加,浮选泡沫体积逐渐降低,抑制剂 TF 与捕收剂 609 联合使用可以改善泡沫量过多的问题。

表 1 抑制剂 TF 用量对实际矿物粗选试验及泡沫量的影响

Table 1 Effect of inhibitor TF dosage on actual ore roughing test results and froth quantity

TF/(g·t ⁻¹)	Yield/%	Grade/%	Recovery/%	Foam volume/mL
0	61.81	66.4	72.35	2 600
200	65.18	66.63	74.64	2 500
500	69.08	65.96	79.13	1 900

3.3 TF 选择性抑制机理研究

3.3.1 润湿性分析

图 7 反映了磁铁矿、角闪石在不同药剂制度下的润湿性变化特征。由图 7 可知,在未添加任何试剂时,磁铁矿、角闪石的接触角分别为 46.34°和 63.52°,均体现为亲水性。仅与捕收剂 609 作用时,磁铁矿的接触角微弱升至 47.28°,润湿性无明显变化,而角闪石的接触角则大幅增至 74.18°,疏水性显著增强,说明捕收剂 609 主要与角闪石相互作用。当矿物与抑制剂 TF+捕收剂 609 体系分别作用后,对比单一捕收剂体系,可以看出:在“抑制剂 TF + 捕收剂 609”的药剂制度下,磁铁矿的接触角由 47.28°骤降至 28.32°,变得更加亲水,而角闪石仅下降至 73.42°,仍为疏水性,说明淀粉类抑制剂 TF 在磁铁矿表面发生强烈的吸附作用,在其表面形成亲水膜,有效阻碍了捕收剂 609 在磁铁矿上的吸附,从而实现了对磁铁矿的高效抑制。

3.3.2 Zeta 电位分析

图 8 为磁铁矿与角闪石在不同 pH 值下与不同药剂体系作用前后的 Zeta 电位结果。从图 8 可以

看出,在 pH 为 3~11 时,角闪石与磁铁矿均荷负电性,角闪石因表面电负性更强,更易与阳离子捕收剂发生静电吸附作用,因此与阳离子捕收剂 609 作用后,其 Zeta 电位升高幅度与磁铁矿相比更大。当 pH 为 7 时,二者与 609 作用后,角闪石 Zeta 电位上升了 13.30 mV,而磁铁矿仅上升 2.9 mV,说明 609 主要吸附于角闪石表面。当体系中引入抑制剂 TF 后,由图 8(b)可以看出,角闪石 Zeta 电位在 pH 为 4~11 时与仅加 609 相比有所下降,但仍高于未加药剂时角闪石的 Zeta 电位。但图 8(a)显示,引入抑制剂 TF 后,磁铁矿的 Zeta 电位整体负移至未加药剂时磁铁矿 Zeta 电位的下方,说明淀粉类抑制剂 TF 的存在不仅有效阻碍了 609 的吸附,甚至在磁铁矿表面进行了强烈的吸附作用,占据大量吸附位点。TF 分子结构中的羟基、羧基等基团带来的负电性使得磁铁矿 Zeta 电位比不加药剂时更低,使其亲水性增加,最终导致磁铁矿可浮性下降,与 3.1.1 TF 作抑制剂时磁铁矿上浮率小于角闪石的结果一致。

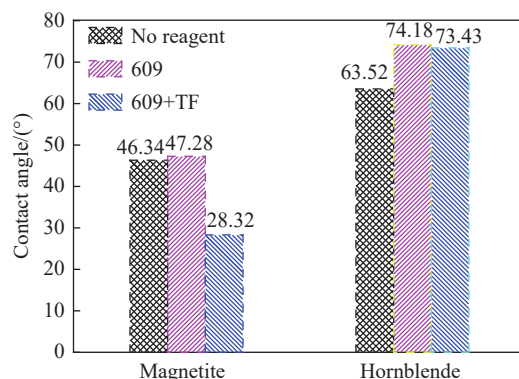
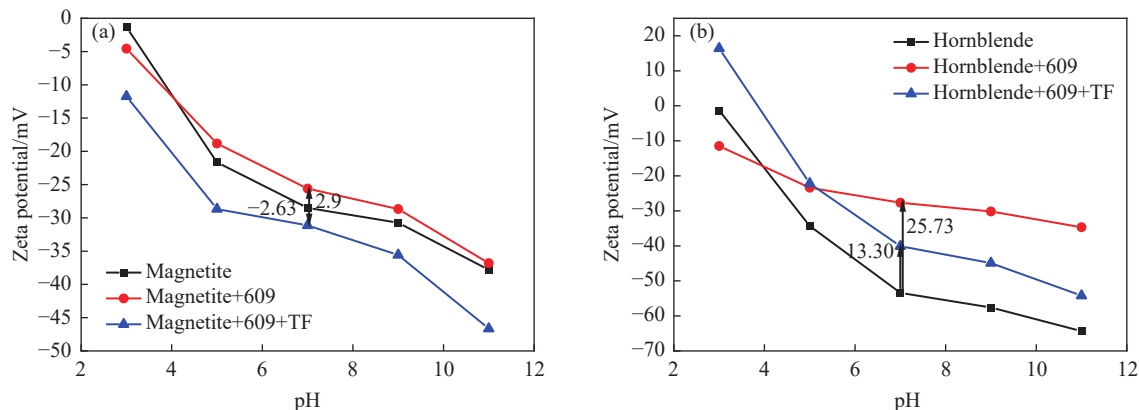


图 7 磁铁矿和角闪石在不同条件下的接触角(609=75 mg/L, TF=50 mg/L, pH=7)

Fig. 7 Contact angles of magnetite and amphibole under different conditions (609 = 75 mg/L, TF = 50 mg/L, pH = 7)



(a) 磁铁矿; (b) 角闪石

图 8 磁铁矿和角闪石与 609、609+TF 分别作用前后的 Zeta 电位

Fig. 8 Zeta potential of magnetite and amphibole before and after interaction with 609 and 609+TF, respectively

3.3.3 红外光谱分析

由图9(a)淀粉类抑制剂TF与磁铁矿红外光谱图分析可知, 564、569 cm^{-1} 处为磁铁矿的Fe-O振动吸收峰。与淀粉类抑制剂TF作用后, 在664 cm^{-1} 处出现了新的特征吸收峰, 该处是由TF改性淀粉分子中的-COO基团上的氧原子提供孤对电子, 与磁铁矿表面缺电子的铁离子形成了配位键, 发生化学吸附, 形成了Fe-O-C键, 说明羧酸根-COO参与吸附作用, 与磁铁矿发生化学

吸附^[10]。磁铁矿与改性淀粉TF作用后, 除了磁铁矿在3 421、3 424 cm^{-1} 处原有的O-H伸缩振动吸收峰外, 在3 628、3 595 cm^{-1} 处又出现了两个O-H伸缩振动峰^[11]。这两个峰为孤立、未形成氢键的O-H伸缩振动, 是因TF中的含氧官能团(如羧基)与磁铁矿表面的铁位点发生配位反应后破坏了原有的氢键网络, 产生了处于新化学环境下的-OH, 进一步说明TF与磁铁矿之间发生了化学吸附。

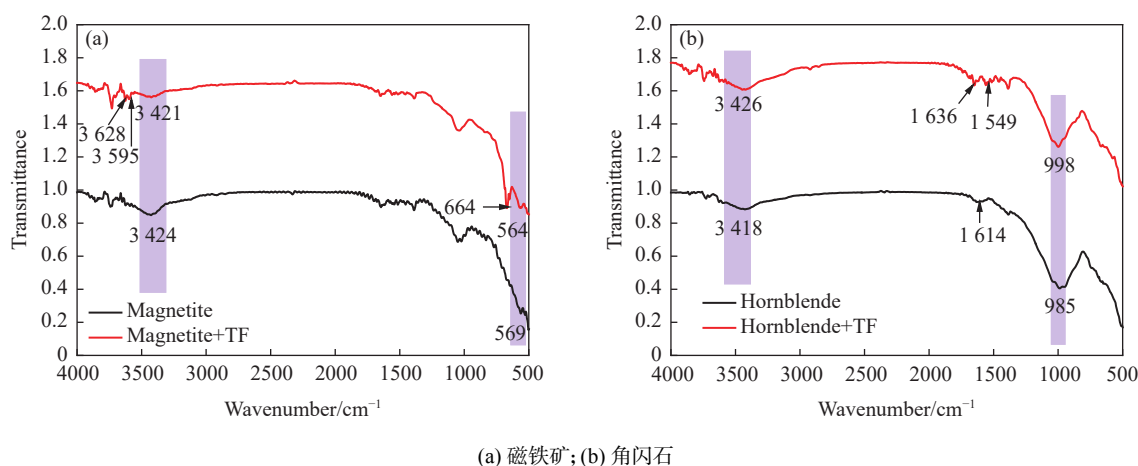


图9 药剂处理前后磁铁矿、角闪石的红外光谱
Fig. 9 Infrared spectra of magnetite and amphibole before and after chemical treatment

图9(b)为角闪石与TF作用前后的红外光谱。图中, 985、998 cm^{-1} 处为角闪石中的Si-O-Si(桥氧)反对称伸缩峰, 3 426、3 418 cm^{-1} 为角闪石的羟基(-OH)单键伸缩振动峰。角闪石原本在1 614 cm^{-1} 附近较宽的羧酸根离子(-COO⁻)的反对称伸缩振动峰, 与改性淀粉作用后变为1 636 cm^{-1} 和1 549 cm^{-1} 两个尖锐峰, 这是由于羧酸根(-COO⁻)与角闪石表面水合阳离子发生强烈的静电吸附。因此, 磁铁矿与TF发生的是化学吸附, 而角闪石与TF发生的是物理吸附。

3.3.4 XPS分析

为了进一步揭示改性淀粉TF对磁铁矿的抑制机理, 进行了XPS研究, 结果如图10所示。由图10(a)所知, 磁铁矿中可以发现C 1s, O 1s和Fe 2p三种元素; TF作用后, O 1s的含量由23.27%增加到39.99%, 表明改性淀粉TF中的含氧基团可能吸附至磁铁矿表面, 在其表面形成了牢固的亲水层, 从而抑制其上浮。

由图10(b)可知, 磁铁矿原样中C 1s可拟合为3个峰, 分别为C-C/C-H键(284.80 eV), C-O-C/C-H

键(286.31 eV)和C=C(288.82 eV)^[12]。TF作用后, C 1s谱图中各峰值没有明显变化, 表明磁铁矿表面的C 1s没有参与TF作用过程。对O 1s而言(图10(c)), 磁铁矿中的O 1s可分为Fe-O(529.73 eV), Fe-OH(531.63 eV)和残留CO₂中的C=O(533.24 eV)^[13-14]; TF作用后, Fe-O和Fe-OH的峰值分别从529.73、531.63 eV增加至530.17、531.83 eV, 偏移值均大于0.20 eV, 证明磁铁矿的表面化学环境在TF的作用下发生了显著变化, 即TF与磁铁矿表面的晶格Fe位点发生了强烈的化学吸附, Fe-O和Fe-OH中的Fe向TF中的含氧基团提供空轨道, 获得电子, 导致Fe-O和Fe-OH的峰值向高电场移动。由图10(d)可知, 磁铁矿原样中Fe 2p包含两个峰: Fe 2p_{3/2}(710.06 eV)和Fe 2p_{1/2}(723.58 eV), 其中Fe 2p_{1/2}为Fe 2p_{3/2}的伴随峰^[15]; TF作用后, Fe 2p_{3/2}和Fe 2p_{1/2}的峰值均向高电场方向移动(+0.34~0.53 eV), 进一步表明磁铁矿表面Fe的电子云环境发生了改变, TF通过与磁铁矿表面的Fe位点发生了化学作用, 进而抑制了磁铁矿的上浮, 这与O 1s图谱的分析结果是一致的。

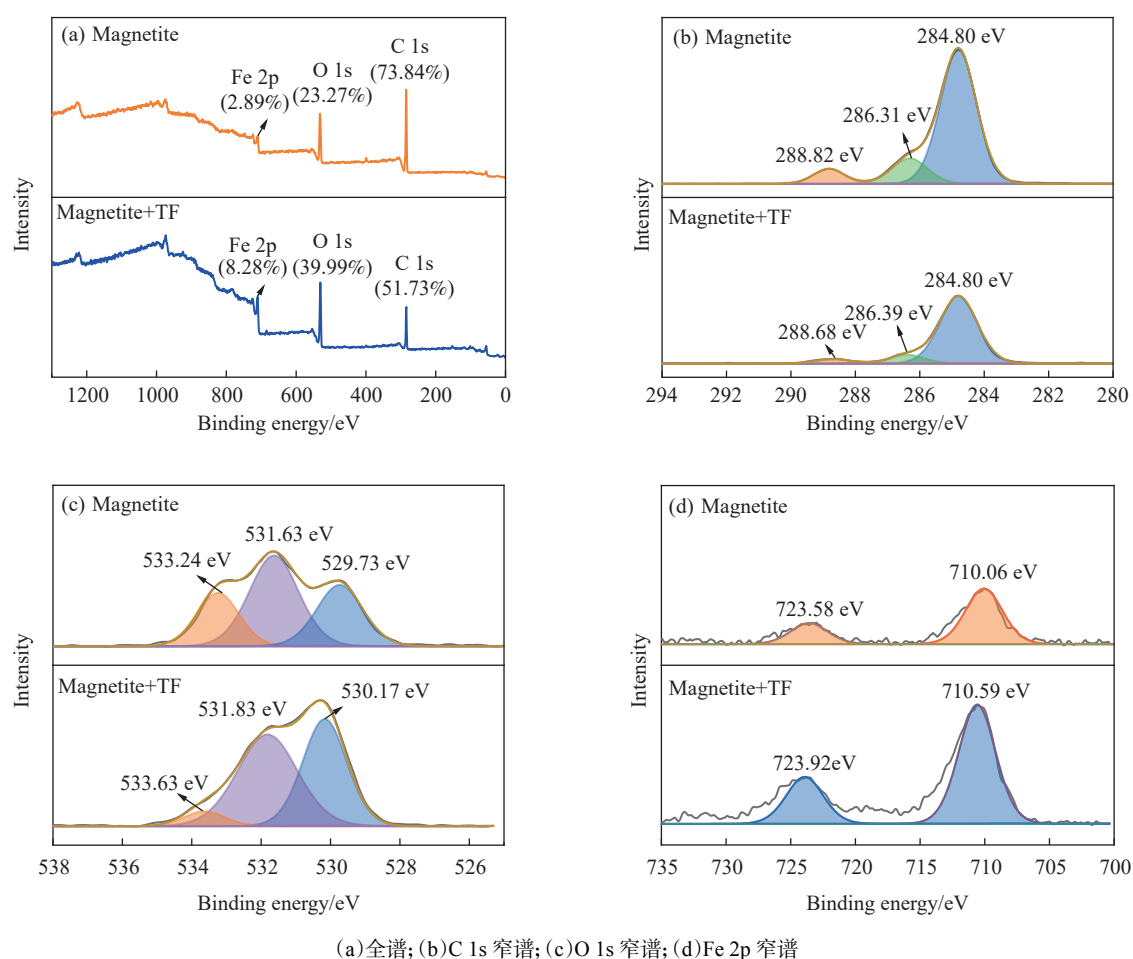


图10 可溶性淀粉作用前后的磁铁矿的全谱、C 1s窄谱、O 1s窄谱和 Fe 2p窄谱

Fig. 10 Full spectrum, C 1s narrow spectrum, O 1s narrow spectrum, and Fe 2p narrow spectrum of magnetite before and after soluble starch treatment

4 结论

1) 矿物浮选结果表明, 矿浆 pH 为 7 时, 捕收剂 609 对角闪石有较强的捕收能力, 在用量为 7.5 mg/L 时, 角闪石、磁铁矿上浮率分别为 93.84%、35.42%。TF 对磁铁矿的抑制作用大于角闪石, 在 TF 用量增至 10 mg/L 后, 磁铁矿上浮率可降低至 0.7% 以下, 角闪石上浮率在 40% 左右。人工混合矿试验证明了 TF 具有较好的选择性抑制效果, 可以在有效提高铁精矿回收率的同时, 使铁品位达到 70.40%。

2) 实际矿物浮选结果表明, TF 用量在 200 g/t

时, 不仅对磁铁矿体现了较好的选择性抑制作用, 还可以改善泡沫量过多的问题。

3) 接触角结果表明, 在“抑制剂 TF + 捕收剂 609”的药剂制度下, 磁铁矿的接触角从 47.28°骤降至 28.32°, TF 吸附在磁铁矿表面, 能显著提高其亲水性, 有效增加了磁铁矿与角闪石润湿性差异。Zeta 电位结果显示, 与 TF 作用后, 磁铁矿表面 Zeta 电位偏移幅度明显高于角闪石, 进一步证明 TF 能选择性吸附在磁铁矿表面。FTIR 和 XPS 结果表明, TF 通过结构中 -COOH、-OH 等含氧基团与磁铁矿表面的 Fe 原子形成配位键产生化学吸附作用, 有效阻碍了捕收剂 609 在磁铁矿表面的吸附。

参考文献

- [1] China Mining Network. China's iron ore supply outlook for 2025: Domestic production to remain steady, imports may decline by 3% [EB/OL]. (2025-05-07) [2024-06-11]. <http://chinamining.org.cn/index.php/news/4/9629>.
(中国矿业网. 2025 年我国铁矿石供给预期—国产矿持稳进口量或降 3% [EB/OL]. (2025-05-07) [2024-06-11].

<http://chinamining.org.cn/index.php/news/4/9629>.)

- [2] YANG Z J, XIE B L, ZHONG S L, *et al.* Process mineralogy and mineral processing tests of an australian iron ore deposit[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(6): 115-120.
(杨招君, 谢宝华, 钟森林, 等. 澳大利亚某铁矿工艺矿物学及选矿试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(6): 115-120.)
- [3] WANG B K, CHEN G M, CHANG Z P. Ansteel successfully forms joint venture for australian large-scale iron ore mine[N]. Economic Information Daily, 2007-09-25(6).
(王炳坤, 陈光明, 常志鹏. 鞍钢成功合资澳大利亚大型铁矿[N]. 经济参考报, 2007-09-25(6).)
- [4] WEN Q B, TENG Q, YANG Z C, *et al.* Study on the effect and mechanism of acid-treated starch in the flotation separation of magnetite and muscovite[J]. Mineral Protection and Utilization, 2020, 40(2): 62-69.
(温全宝, 滕青, 杨志超, 等. 苛化淀粉对磁铁矿和金云母浮选分离的影响及机理研究[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(2): 62-69.)
- [5] ANDRADE E C, CHELGANI S C, LAURINDO D S L F. A systematic study on gelatinization efficiency of starch by NaOH for enhanced hematite depression[J]. Minerals Engineering, 2024, 209: 108621.
- [6] GUAN Y, LI Y H, LIANG P, *et al.* Effect of sodium sulfite on the depressive performance of heating-digested starch in fine hematite reverse flotation[J]. Minerals Engineering, 2025, 228: 109314.
- [7] BI Y X. Study on selective flotation separation of chalcopyrite and pyrite under low alkalinity conditions[D]. Kunming: Kunming university of science and technology, 2022.
(毕云霄. 低碱度下黄铜矿与黄铁矿选择性浮选分离研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.)
- [8] ZHANG Y X, LIU C, YANG S Y. Effect of xanthan gum on the flotation separation of pyrite and fine-grained chlorite and its mechanism of action[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2025, 16(6): 965-971.
(张煜熙, 刘诚, 杨思原. 黄原胶对黄铁矿与微细粒绿泥石浮选分离的影响及作用机理[J]. 有色金属科学与工程, 2025, 16(6): 965-971.)
- [9] GUO F F, ZHU Z C, ZHANG P P, *et al.* Application of novel inhibitor calciumlignosulfonate in the flotation separation of hematite and chlorite[J]. Metal Mines, 2024(7): 87-93.
(郭风芳, 朱智超, 张鹏鹏, 等. 新型抑制剂木质素磺酸钙在赤铁矿和绿泥石浮选分离中的应用[J]. 金属矿山, 2024(7): 87-93.)
- [10] YANG Z C, HENG Y J, GAO N, *et al.* Hydrophilic Fe_3O_4 nanoparticles coatings with starch and citric acid for efficient flotation separation of quartz from magnetite[J]. Minerals Engineering, 2025, 233: 109626.
- [11] LI K Y, ZHAO L X R, LIU S, *et al.* Hydroxypropyl distarch phosphate as a green depressant for the flotation separation of chalcopyrite from pyrite under low-alkalinity conditions[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2025, 726(3): 137970.
- [12] MOREIRA G F, PEÇANHA E R, MONTE M B M, *et al.* XPS study on the mechanism of starch-hematite surface chemical complexation[J]. Minerals Engineering, 2017, 110: 96-103.
- [13] GAO N, YANG Z C, TENG Q, *et al.* Study on behavior and mechanism of reverse flotation desilication of magnetite enhanced by magnetic amylopectin[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 361 (1): 131286.
- [14] BIESINGER M C, PAUNE B P, GROSVENOR A P, *et al.* Resolving surface chemical states in XPS analysis of first row transition metals, oxides and hydroxides: Cr, Mn, Fe, Co and Ni[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(7): 2717-2730.
- [15] TAO Y Y, LIU J, GE W C, *et al.* Study on the effect and mechanism of coarse magnetite on the flotation of fine-grained hematite[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 359(Part1).

编辑 唐肖