Fe^{3+} 对磁铁矿反浮选脱除黑云母的作用及机理①

郝佳乐[1]，汤家焰[1,2,3,4]，赵芳[1]，赵宇睿[1]，王介良[1,2,3,4]，曹钊[1,2,3,4]
（1.内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院，内蒙古 包头 014010；2.内蒙古自治区矿业工程重点实验室，内蒙古 包头 014010；3.内蒙古自治区煤炭安全开采与利用工程技术研究中心，内蒙古 包头 014010；4.内蒙古煤炭绿色开采与绿色利用协同创新中心，内蒙古 包头 014010）

摘 要：针对白云鄂博磁选铁精矿中含有黑云母的现状，提出用可溶性淀粉抑制磁铁矿、Fe^{3+}活化黑云母的油酸钠反浮选工艺，并通过纯矿物试验、Zeta 电位测试、吸附量检测和红外光谱分析验证了浮选效果及药剂作用机理。结果表明，Fe^{3+}能小幅提高油酸钠及可溶性淀粉对磁铁矿的吸附作用，大幅提高油酸钠及可溶性淀粉对黑云母的吸附作用。在 Fe^{3+}浓度 1×10^{-3} mol/L 条件下，磁铁矿和黑云母人工混合矿（磁铁矿质量占比 70%）反浮选时，可获得黑云母回收率 62.76%、磁铁矿回收率 16.09%的分选指标，分离效果良好。

关键词：黑云母；磁铁矿；铁离子；浮选；抑制剂；油酸钠；反浮选
中图分类号：TD923　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.013
文章编号：0253-6099（2026）01-0080-05

Role and Mechanism of Fe^{3+} in Removal of Biotite by Reverse Flotation of Magnetite

HAO Jiale[1], TANG Jiayan[1,2,3,4], ZHAO Fang[1], ZHAO Yurui[1], WANG Jieliang[1,2,3,4], CAO Zhao[1,2,3,4]
(1.*School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *Inner Mongolia, China*; 2.*Inner Mongolia Key Laboratory of Mining Engineering, Baotou* 014010, *Inner Mongolia, China*; 3.*Inner Mongolia Engineering Research Center for Safe Mining and Utilization of Coal, Baotou* 014010, *Inner Mongolia, China*; 4.*Inner Mongolia Collaborative Innovation Center for Green Mining and Green Utilization of Coal, Baotou* 014010, *Inner Mongolia, China*)

Abstract: In consideration of biotite content in iron concentrate from magnetic separation, it was proposed that a reverse flotation process with sodium oleate was adopted, in which soluble starch was used to depress magnetite and ferric ions (Fe^{3+}) to activate biotite. And then, the flotation results and the mechanism of reagent interaction in flotation process were verified by performing a pure mineral test, zeta potential measurement, adsorption capacity detection and infrared spectra analysis. It is found that Fe^{3+} can slightly enhance adsorption of sodium oleate and soluble starch onto magnetite surfaces, but significantly enhance their adsorption onto biotite. With Fe^{3+} at concentration of 1×10^{-3} mol/L, a reverse flotation test of the artificially mixed ore of magnetite and biotite (with magnetite accounting for 70% by mass) can produce biotite at a recovery of 62.76% and magnetite at a recovery of 16.09%, indicating a good separation effect.

Key words: biotite; magnetite; ferric ion; flotation; depressant; sodium oleate; reverse flotation

磁铁矿的浮选方法有阳离子反浮选和阴离子反浮选[1]。阳离子反浮选具有药剂制度简单、对工艺流程适应性强的优点，但效率低，容易污染环境[2-3]。阴离子反浮选具有适应性和抗干扰能力强的特点[4-7]。但目前针对黑云母为脉石矿物的磁铁矿阴离子反浮选研究较少。本文在油酸钠体系下，以 Fe^{3+}活化黑云母、淀粉类药剂抑制磁铁矿，进行反浮选试验研究，并揭示相关药剂与矿物的作用机理，以期为白云鄂博磁选精矿

① **收稿日期**：2025-09-02
基金项目：国家自然科学基金（52264033，52364034）；国家重点研发计划（2021YFC2901000，2022YFC2905302）；内蒙古自治区高校基本科研业务费（2024QNJS077，2023RCTD013）；内蒙古自治区一流学科项目（YLXKZX-NKD-016，YLXKZX-NKD-004）；内蒙古杰青项目（2024JQ02）；内蒙古自然科学基金（2024QN05057，2024QN05021）
作者简介：郝佳乐（2000—），男，河北保定人，硕士研究生，主要研究方向为金属离子反浮选。E-mail：727704259@qq.com
通信作者：汤家焰（1989—），男，湖北荆州人，博士，讲师，主要研究方向为复杂矿产资源综合回收利用。E-mail：tangjiayan1205@126.com

提质降杂提供理论指导和技术支持。

1　试验材料及方法

1.1　矿样和药剂

试验所用纯矿物磁铁矿和黑云母均来自河北灵寿县。纯矿物经破碎、手工挑选、陶瓷球磨至-0.038 mm。矿物化学多元素分析结果见表 1。

表 1　磁铁矿与黑云母化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1　Multi-elemental analysis of magnetite and biotite　%

矿物名称	TFe	FeO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	K_2O
磁铁矿	67.23	27.38	2.70	0.18	0.83	—
黑云母	—	19.07	39.65	10.61	15.47	9.65

试验药剂包括六水三氯化铁、油酸钠、可溶性淀粉、氢氧化钠、盐酸等,均为分析纯。实验用水为去离子水。

1.2　浮选试验

在 XFD 5-35 挂槽浮选机中进行浮选试验,浮选机搅拌转速 1 996 r/min。每次试验称取 2.00 g 单矿物样品或人工混合矿(1.40 g 磁铁矿+0.60 g 黑云母),依次加入所需药剂,每次加药后搅拌 2 min,然后充气进行浮选。

1.3　测试及分析

采用 90 Plus PALS 电位及粒度分析仪测试药剂作用前后矿物的 Zeta 电位。采用 ICP-OES 检测分析矿物表面 Fe^{3+}吸附量,采用苯酚-硫酸法测定矿物表面可溶性淀粉吸附量。采用 Thermo Scientific Nicolet iS50 FT-IR 红外光谱仪对药剂作用前后矿物进行分析。

2　试验结果与讨论

2.1　浮选试验

pH 值为 6.8,考察了油酸钠体系下磁铁矿和黑云母的可浮性,结果见图 1。由图 1 可知,随着油酸钠浓度升高,磁铁矿回收率呈现先升高后降低的趋势,在油酸钠浓度 5×10^{-4} mol/L 时磁铁矿回收率达到峰值 93.92%;在油酸钠体系下黑云母浮选回收率基本维持在 14%左右。

pH 值为 6.8、油酸钠浓度 5×10^{-4} mol/L 条件下,考察了可溶性淀粉质量浓度对磁铁矿和黑云母浮选回收率的影响,结果见图 2。由图 2 可知,随着可溶性淀粉质量浓度升高,磁铁矿回收率持续降低,可溶性淀粉质量浓度 80 mg/L 时,磁铁矿回收率降至 16.99%;黑云母依旧不可浮。

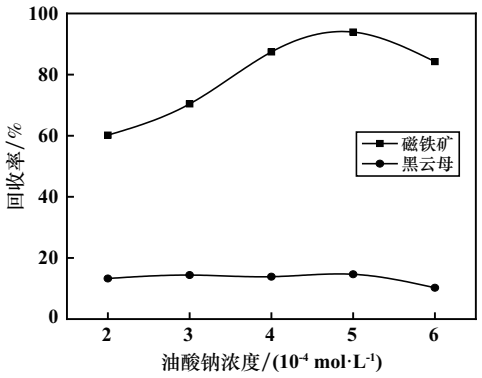


图 1　油酸钠体系下磁铁矿和黑云母的可浮性

Fig. 1　Floatability of magnetite and biotite in sodium oleate system

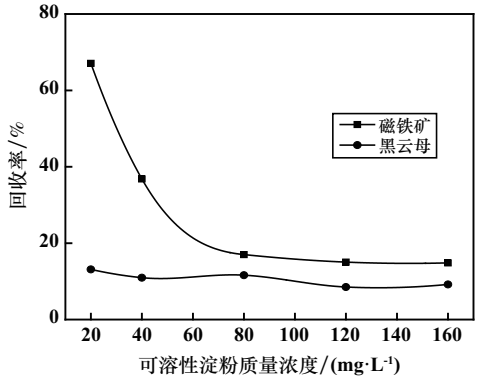


图 2　可溶性淀粉对磁铁矿和黑云母浮选回收率的影响

Fig. 2　Effect of soluble starch in flotation on recoveries of magnetite and biotite

pH 值为 6.8、油酸钠浓度 5×10^{-4} mol/L 条件下,考察了 Fe^{3+}对磁铁矿和黑云母浮选回收率的影响,结果见图 3。由图 3 可知,随着 Fe^{3+}浓度升高,磁铁矿回收率呈现逐渐降低的趋势,这可能是 Fe^{3+}消耗了捕收剂油酸钠所致;黑云母回收率呈现先升高后降低的趋势,这可能是因为较少的 Fe^{3+}能活化黑云母,但过多的 Fe^{3+}也会消耗捕收剂油酸钠。Fe^{3+}浓度3×10^{-3} mol/L

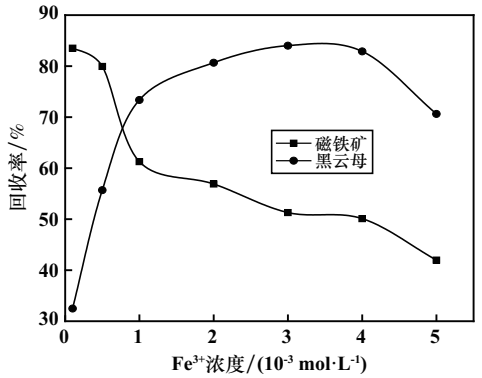


图 3　Fe^{3+}对磁铁矿和黑云母浮选回收率的影响

Fig. 3　Effect of Fe^{3+}in flotation on recoveries of magnetite and biotite

时,黑云母回收率达到峰值84.01%,此时磁铁矿回收率为51.29%。表明Fe^{3+}能降低磁铁矿回收率,对黑云母的活化效果显著。

为了进一步提高磁铁矿和黑云母的浮选差异性,在pH值为6.8、油酸钠浓度5×10^{-4} mol/L、Fe^{3+}浓度3×10^{-3} mol/L条件下,考察了可溶性淀粉用量以及Fe^{3+}加入顺序对磁铁矿和黑云母浮选回收率的影响,结果见表2。由表2可知,可溶性淀粉和Fe^{3+}的加入顺序对磁铁矿浮选回收率影响较小,可溶性淀粉用量增加,有助于抑制磁铁矿的浮选。先加可溶性淀粉后加Fe^{3+}时,黑云母浮选回收率要高于先加Fe^{3+}后加可溶性淀粉,且先加Fe^{3+}后加可溶性淀粉情况下,随着可溶性淀粉质量浓度增加,黑云母浮选回收率由49.75%降至33.26%。由此可见,先加可溶性淀粉后加Fe^{3+},且适当增加淀粉用量,有助于扩大磁铁矿和黑云母的可浮性差异。

表2 可溶性淀粉质量浓度及Fe^{3+}加入顺序对磁铁矿和黑云母浮选回收率的影响

Table 2 Effect of soluble starch dosage and Fe^{3+} addition order in flotation on recoveries of magnetite and biotite

可溶性淀粉质量浓度/(mg·L^{-1})	Fe^{3+}加入顺序	浮选回收率/%	
		磁铁矿	黑云母
80	先加Fe^{3+}	37.43	49.75
	后加Fe^{3+}	38.29	78.71
160	先加Fe^{3+}	22.95	33.26
	后加Fe^{3+}	23.57	73.70

在pH值为6.8、油酸钠浓度5×10^{-4} mol/L、可溶性淀粉质量浓度80 mg/L条件下,考察了Fe^{3+}浓度对人工混合矿(磁铁矿与黑云母质量比7∶3)反浮选分离效果的影响,结果见图4。由图4可知,在混合矿浮选过程中,随着Fe^{3+}浓度增加,黑云母和磁铁矿浮选回收率均先增加后减小;Fe^{3+}浓度1.0×10^{-3} mol/L时黑云母回收率达到峰值62.76%,Fe^{3+}浓度0.5×10^{-3} mol/L时磁铁矿回收率达到峰值32.07%。两者回收率差值的最大点出现在Fe^{3+}浓度1.0×10^{-3} mol/L时,相差46.67百分点,展现出良好的分选效果。

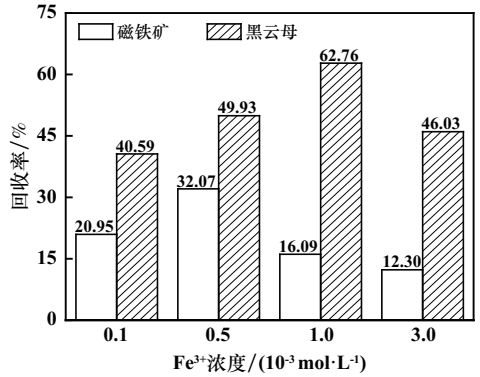


图4 Fe^{3+}浓度对人工混合矿反浮选分离效果的影响

Fig. 4 Effect of Fe^{3+} concentration on reverse flotation effect of artificially mixed ores

2.2 Zeta电位分析

在纯水、Fe^{3+}浓度1×10^{-3} mol/L的溶液、可溶性淀粉质量浓度80 mg/L的溶液以及油酸钠浓度5×10^{-4} mol/L的溶液中检测磁铁矿、黑云母的表面电位,结果见图5。由图5可知,纯水中磁铁矿的零电点在pH值6~7之间,黑云母的零电点在pH<2的区间;Fe^{3+}溶液作用后,磁铁矿和黑云母的表面电位均整体上移,且黑云母表面电位上移幅度远大于磁铁矿表面电位上移幅度。Fe^{3+}在磁铁矿表面有较少的吸附,在黑云母表面有较多的吸附,结合Fe^{3+}的溶液化学分析可知,碱性条件下,Fe^{3+}多以羟基络合物形式存在[8],且多带正电,因此该吸附应为物理吸附。可溶性淀粉、油酸钠作用后,磁铁矿表面电位均负移,二者在磁铁矿表面的吸附应为化学吸附;黑云母表面电位则基本没有改变,二者对黑云母表面没有吸附作用。经Fe^{3+}处理后的黑云母与可溶性淀粉或油酸钠作用后表面电位有较大负移,表明Fe^{3+}能促进黑云母对可溶性淀粉和油酸钠的吸附。

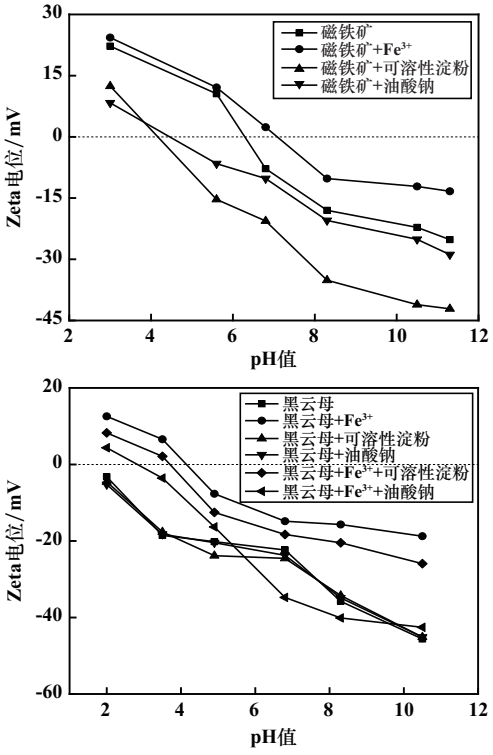


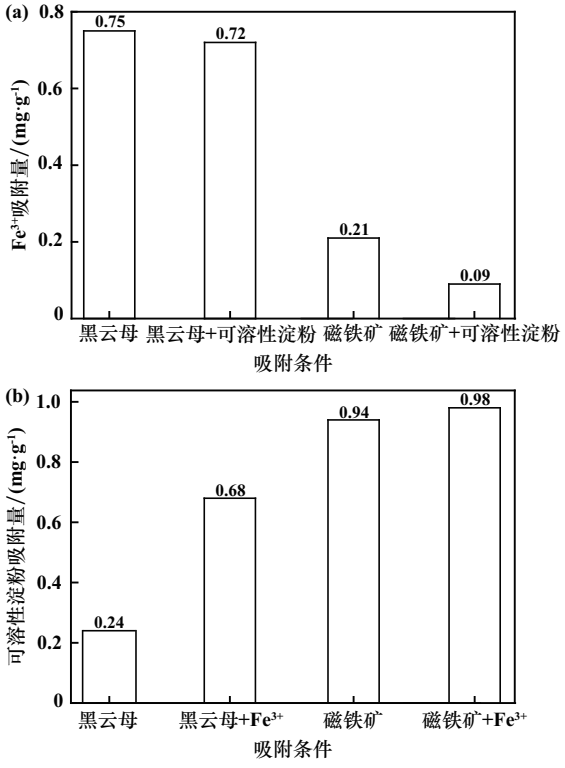
图5 磁铁矿和黑云母表面电位

Fig. 5 Zeta potentials of magnetite and biotite

2.3 吸附量分析

为了更好地分析Fe^{3+}和可溶性淀粉在磁铁矿和黑

云母表面的吸附程度,在 Fe^{3+}浓度 1×10^{-3} mol/L 和可溶性淀粉质量浓度 80 mg/L 的溶液中测试了磁铁矿和黑云母对 Fe^{3+}和可溶性淀粉的吸附量,结果见图 6。由图 6 可知,黑云母对 Fe^{3+}的吸附量达到了 0.75 mg/g,远大于磁铁矿对 Fe^{3+}的吸附量(0.21 mg/g);且可溶性淀粉作用后的黑云母对 Fe^{3+}的吸附量依旧高达 0.72 mg/g,说明先加可溶性淀粉后加 Fe^{3+}的加药方式无法阻止黑云母对 Fe^{3+}的吸附。磁铁矿对可溶性淀粉的吸附量达到了 0.94 mg/g,远大于黑云母对可溶性淀粉的吸附量(0.24 mg/g);且 Fe^{3+}作用后的磁铁矿对可溶性淀粉的吸附量进一步提高到 0.98 mg/g。Fe^{3+}作用后的黑云母对可溶性淀粉的吸附量也得到了较大幅度的提高,达到了 0.68 mg/g。Fe^{3+}吸附于黑云母和磁铁矿表面,有助于可溶性淀粉的吸附。



(a) Fe^{3+}; (b) 可溶性淀粉

图 6　磁铁矿和黑云母对 Fe^{3+} 和可溶性淀粉的吸附量

Fig. 6　Adsorption of Fe^{3+} and soluble starch onto magnetite and biotite

2.4　红外光谱分析

图 7 为油酸钠和可溶性淀粉的红外光谱。油酸钠红外光谱中,2 854.13 cm^{-1}和 2 924.04 cm^{-1}处为油酸钠的 C—H 对称和反对称伸缩振动吸收峰;1 706.69 cm^{-1}和 1 090.07 cm^{-1}处分别为油酸钠的 C ═ O 和 C—O 伸缩振动峰。可溶性淀粉红外光谱中,3 427.36 cm^{-1}处为氢键缔合的—OH 伸缩振动吸收峰,此处峰值较宽,说明可溶性淀粉分子中羟基种类多;2 930.78 cm^{-1}处为 C—H 的伸缩振动吸收峰,1 649.32 cm^{-1}处为层间水分子的弯曲振动峰,1 081.17 cm^{-1}处为 C—O 的伸缩振动吸收峰。

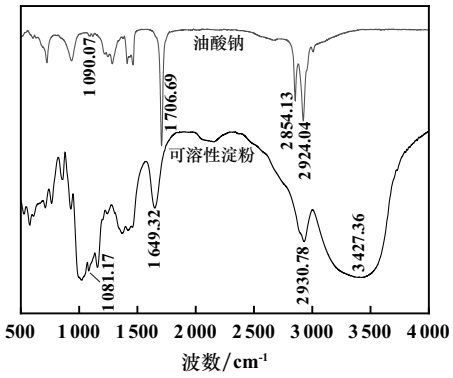
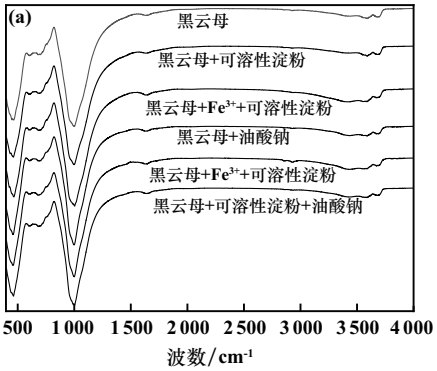


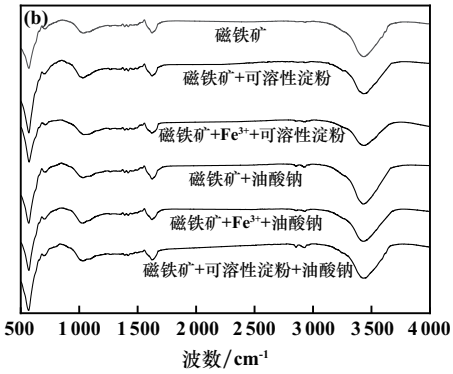
图 7　油酸钠和可溶性淀粉红外光谱

Fig. 7　Infrared spectra of sodium oleate and soluble starch

图 8 为黑云母和磁铁矿与药剂作用前后的红外光谱图。其中 463.01 cm^{-1}和 1 001.16 cm^{-1}处为黑云母的 Si—O—Si 键的弯曲、伸缩振动峰,3 588.22 cm^{-1}处为黑云母—OH 伸缩振动峰。黑云母与可溶性淀粉以及油酸钠作用后,并没有出现明显的峰偏移或产生新峰。黑云母与 Fe^{3+}和可溶性淀粉作用后,Si—O—Si 弯曲振动峰偏移至 464.27 cm^{-1}处,Si—O—Si 伸缩振动峰偏移至 1 002.62 cm^{-1}处;—OH 伸缩振动峰偏移至3 587.39 cm^{-1}处。黑云母与 Fe^{3+}和油酸钠作用后,Si—O—Si 弯曲振动峰偏移至 458.40 cm^{-1}处,Si—O—Si 伸缩振动峰偏移至 998.21 cm^{-1}处,—OH 伸缩振动峰偏移至3 589.46 cm^{-1}处,在 2 927.41 cm^{-1}处产生了新的峰,此峰为油酸钠的 C—H 反对称伸缩振动吸收峰。这说明,可溶性淀粉和油酸钠都不与黑云母作用,Fe^{3+}作用后的黑云母与油酸钠和可溶性淀粉发生了化学吸附,能提高黑云母的浮选回收率。571.22 cm^{-1}处为磁铁矿 Fe—O 键的伸缩振动吸收峰,1 622.67 cm^{-1}和 3 433.69 cm^{-1}处分别为磁铁矿吸附水中羟基的弯曲、伸缩振动吸收峰。磁铁矿与可溶性淀粉作用后,571.22 cm^{-1}处吸收峰偏移至 569.53 cm^{-1}处,3 433.69 cm^{-1}处吸收峰偏移至3 431.37 cm^{-1}处,1 622.67 cm^{-1}处吸收峰偏移至 1 621.51 cm^{-1}处;2 929.82 cm^{-1}处有新的峰产生,此峰为可溶性淀粉 C—H 的伸缩振动吸收峰。磁铁矿与 Fe^{3+}和可溶性淀粉作用后,有振动峰的偏移,2 929.34 cm^{-1}和 1 095.37 cm^{-1}处出现新峰,该峰为可溶性淀粉 C—H、C—O 的伸缩振动吸收峰。磁铁矿与油酸钠作用后,571.22 cm^{-1}处吸收峰偏移至 568.76 cm^{-1}处,3 433.69 cm^{-1}处吸收峰偏移至 3 429.28 cm^{-1}处,1 622.67 cm^{-1}处吸收

峰偏移至 1 621.94 cm^{-1}处;2 855.10 cm^{-1}和 2 928.38 cm^{-1}附近产生了新的峰,该峰应为油酸钠的 C—H 对称和反对称伸缩振动吸收峰。磁铁矿与 Fe^{3+}和油酸钠作用后,与磁铁矿和油酸钠作用后的光谱基本无变化。磁铁矿与可溶性淀粉和油酸钠作用后,571.22 cm^{-1}处吸收峰偏移至 569.59 cm^{-1}处,3 433.69 cm^{-1}处吸收峰偏移至 3 430.21 cm^{-1}处,1 622.67 cm^{-1}处吸收峰偏移至 1 621.11 cm^{-1}处,2 929.57 cm^{-1}处产生了新峰,此峰为可溶性淀粉的 C—H 反对称伸缩振动吸收峰。





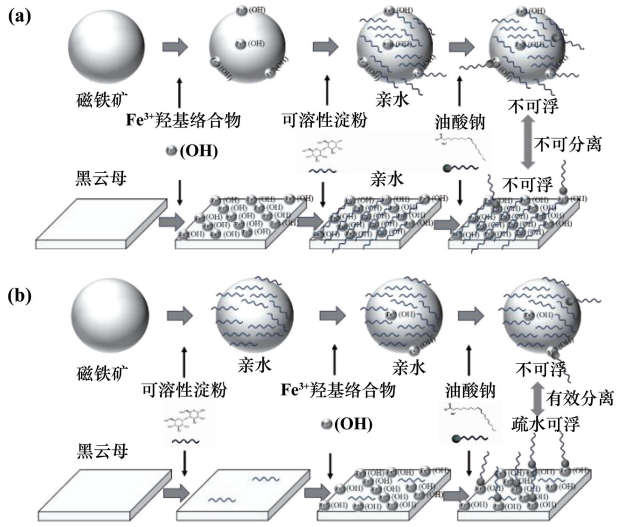
(a) 黑云母; (b) 磁铁矿

图 8 不同药剂作用下黑云母和磁铁矿红外光谱图

Fig. 8 Infrared spectra of biotite and magnetite with different reagents

2.5 作用机理示意图

先加 Fe^{3+}后加可溶性淀粉与先加可溶性淀粉后加 Fe^{3+}对磁铁矿反浮选分离黑云母的作用机理如图 9 所示。先加 Fe^{3+}会使 Fe^{3+}羟基络合物优先吸附在黑云母表面上,少量磁铁矿表面也会吸收部分 Fe^{3+}羟基络合物,此时,被 Fe^{3+}活化后的黑云母与磁铁矿一样,表面有了 Fe 活性位点,再加入可溶性淀粉,会导致黑云母和磁铁矿一样被抑制,在油酸钠体系中变得不可浮。先加可溶性淀粉,此时黑云母表面几乎没有 Fe 活性位点,可溶性淀粉只作用于磁铁矿表面,而不抑制黑云母;然后再加入 Fe^{3+},能活化黑云母,使黑云母在油酸钠体系中可浮。故先加可溶性淀粉后加 Fe^{3+}更有利于磁铁矿反浮选脱除黑云母。



(a) 先加 Fe^{3+}后加可溶性淀粉; (b) 先加可溶性淀粉后加 Fe^{3+}

图 9 磁铁矿反浮选分离黑云母的作用机理示意图

Fig. 9 Schematic mechanism of separation of biotite by magnetite reverse flotation

3 结论

1) 在 pH 值为 6.8、油酸钠浓度 5×10^{-4} mol/L、可溶性淀粉质量浓度 80 mg/L、Fe^{3+}浓度 1×10^{-3} mol/L 条件下,人工混合矿(磁铁矿与黑云母质量比 7∶3)反浮选时,黑云母回收率达到 62.76%,磁铁矿回收率仅 16.09%,两者回收率差 46.67 百分点,展现出良好的分离效果。

2) Fe^{3+}和可溶性淀粉的加入顺序对磁铁矿反浮选脱除黑云母有较大影响。先加 Fe^{3+}后加可溶性淀粉,被 Fe^{3+}活化后的黑云母与磁铁矿一样,表面有了 Fe 活性位点,也会被后加的可溶性淀粉抑制,二者在油酸钠体系中都变得不可浮,无法有效分离;先加可溶性淀粉后加 Fe^{3+},黑云母表面几乎没有 Fe 活性位点,可溶性淀粉只作用于磁铁矿表面,而不抑制黑云母,然后再加入 Fe^{3+},黑云母被活化,在油酸钠体系中,磁铁矿不可浮、黑云母可浮,有利于二者有效分离。

参考文献(References):

[1] 吕昊子,童雄,陈志强,等. 新型阴、阳离子捕收剂的选择性吸附行为研究[J]. 非金属矿, 2021,44(4):58-61.
LYU Haozi, TONG Xiong, CHEN Zhiqiang, et al. Investigation of selective adsorption behaviors about a new type of mixed anion-cation collectors[J]. Non-Metallic Mines, 2021,44(4):58-61.

(下转第 90 页)

[5] SONG P F, REN L Y, BAO S X, et al. Influence of SHMP concentration on rutile flotation in BHA system: Guiding the separation of rutile and hornblende[J]. Langmuir, 2024,40(45):23930-23938.
[6] 肖巍,杨娟,胡聪,等. 正辛醇对苯乙烯膦酸浮选金红石过程的影响[J]. 矿冶工程, 2019,39(6):35-38.
XIAO Wei, YANG Juan, HU Cong, et al. Influence of octanol on performance of styryl phosphoric acid in collecting rutile[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(6):35-38.
[7] 张立刚,欧阳崇钟,李文风. 新型捕收剂浮选山东某伴生铜矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(2):70-72.
ZHANG Ligang, OUYANG Chongzhong, LI Wenfeng. New flotation collector CYC-20 for beneficiation of associated copper minerals from a Shandong iron mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(2):70-72.
[8] ZHANG Z Y, REN L Y, ZHANG Y M. Role of nanobubbles in the flotation of fine rutile particles[J]. Minerals Engineering, 2021,172:107140.
[9] 苟浩然,曾海鹏,黄红军,等. 湖北某复杂低品位铜矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):85-88.
GOU Haoran, ZENG Haipeng, HUANG Hongjun, et al. Experimental study on flotation separation of low-grade copper ore from Hubei[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):85-88.
[10] 崔振坤,汪泰,李汉文,等. 新型高效浮选捕收剂在伟晶岩锂矿浮选中的应用[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):47-51.
CUI Zhenkun, WANG Tai, LI Hanwen, et al. Application of new high-efficient collector in flotation of pegmatite lithium ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(2):47-51.
[11] GONG P, REN L Y, BAO S X, et al. Flotation separation mechanism of rutile and chlorite using CMC as depressant[J]. Minerals Engineering, 2024,217:108957.
[12] ZHANG X Y, REN L Y, ZHANG Y M, et al. Effect of aluminum ion on rutile flotation[J]. Minerals Engineering, 2023,198:108083.
[13] 任浏祎,巩鹏,包申旭,等. 一种金红石与锆英石的浮选分离方法:CN202410919534.8[P]. 2024-09-24.
REN Liuyi, GONG Peng, BAO Shenxu, et al. A flotation separation method for rutile and zircon: CN202410919534.8[P]. 2024-09-24.

引用本文:任浏祎,楼思迪,张越博,等. 新型膦酸型捕收剂对锆英石与金红石的捕收性能及机理研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):85-90.
REN Liuyi, LOU Sidi, ZHANG Yuebo, et al. Collecting performance and mechanism of novel phosphonic acid type collectors for zircon and rutile[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):85-90.

(上接第84页)

[2] 翁孝卿,刘丹章,李洪强,等. 胺类阳离子捕收剂表面物理化学性能研究的综合实验[J]. 实验技术与管理, 2021,38(6):208-211.
WENG Xiaoqing, LIU Danzhang, LI Hongqiang, et al. Comprehensive experiment on surface physicochemical properties of amine cationic collector[J]. Experimental Technology and Management, 2021,38(6):208-211.
[3] 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.
[4] 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.
WEN Quanbao, TENG Qing, YANG Zhichao, et al. Effect and mechanism of causticized starch on flotation separation of magnetite and phlogopite[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020,40(2):62-69.
[5] 杨山龙,罗溪梅,周永锋,等. 阴离子捕收剂与DTAC浮选分离赤铁矿和石英研究[J]. 非金属矿, 2024,47(3):10-12.
YANG Shanlong, LUO Ximei, ZHOU Yongfeng, et al. Research on flotation separation of hematite and quartz using anionic collector and DTAC[J]. Non-Metallic Mines, 2024,47(3):10-12.
[6] 魏邦其,李解,曹钊,等. 酯化淀粉对方解石的抑制机理[J]. 矿冶工程, 2025,45(1):46-50.
WEI Bangqi, LI Jie, CAO Zhao, et al. Mechanism for depressing calcite with esterified starch[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):46-50.
[7] 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.
[8] 汤家焰. 高钙云母型钒页岩钒的焙烧-浮选预富集工艺及机理研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2017.
TANG Jiayan. Pre-enrichment process and mechanism of vanadium from high calcium mica-type vanadium-bearing shale by roasting-flotation process[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.

引用本文:郝佳乐,汤家焰,赵芳,等. Fe^{3+}对磁铁矿反浮选脱除黑云母的作用及机理[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):80-84.
HAO Jiale, TANG Jiayan, ZHAO Fang, et al. Role and mechanism of Fe^{3+} in removal of biotite by reverse flotation of magnetite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):80-84.