新型常温捕收剂MY对赤铁矿反浮选行为影响研究*

姚富兴[1],马艺闻[1],刘杰[2],李洋[1],孙欣[1],孙竞珲[1],郑梦可[1]

(1.辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山市 114051;
2.东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:鞍山式赤铁矿在我国已探明的铁矿资源总储量中占比约为55.20%,其在浮选时一般需采用加温(约35 ℃以上)条件,增加了生产成本。采用自研的新型捕收剂MY进行赤铁矿、石英浮选行为研究,并与油酸钠浮选体系进行了对比,通过接触角、Zeta电位和红外光谱等检测分析手段,探讨了MY在矿物表面的作用机理。单矿物浮选结果表明:MY在15~35 ℃温度范围内,pH为11.5,捕收剂用量为200 mg/L条件下,石英、赤铁矿回收率分别可达87.25%、92.50%以上。在25 ℃时,在淀粉、CaO、捕收剂3种药剂相互作用下,MY浮选体系下,石英、赤铁矿单矿物回收率最大差值为89.25个百分点,相较于油酸钠浮选体系(回收率最大差值为56.25个百分点)明显提高。机理分析结果表明,MY捕收剂在石英矿物表面发生了静电吸附、氢键作用以及化学键合作用等多效协同吸附作用,在赤铁矿表面以分子吸附、静电吸附作用为主。MY因其结构中存在S═O、—NH_2、C═O等多种活性基团,可形成多活性位点的耦合协同作用,增强其对石英的捕收能力,并增大了石英与赤铁矿间的可浮性差异,在常温反浮选体系中可有效促进赤铁矿与石英的分离。

关键词:赤铁矿;新型常温捕收剂;反浮选;石英

中图分类号:$TD923^+.14$ **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0264-09

Study on the Effect of a New Room-Temperature Collector MY on the Reverse Flotation Behavior of Hematite

YAO Fuxing[1], *MA Yiwen*[1], *LIU Jie*[2], *LI Yang*[1], *SUN Xin*[1], *SUN Jinghui*[1], *ZHENG Mengke*[1]

(1.School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning 114051, China;
2.School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: Anshan-type hematite accounts for about 55.20% of the total identified iron ore resources in China, and its flotation generally requires high temperature (about 35 ℃ or more) conditions, which increases the production cost. Therefore, the flotation behavior of hematite and quartz was studied with a self-developed MY-type collector and compared with the sodium oleate flotation system. Utilizing detection and analysis techniques such as contact angle, Zeta potential and infrared spectroscopy analysis, the action mechanism of MY on mineral surface was discussed. The results of single-mineral flotation experiments show that under the temperature range of 15-35 ℃, the pH of 11.5, and the dosage of 200 mg/L, the MY-type collector can achieve recovery rate of quartz and hematite exceeding 87.25% and 92.50% respectively. At 25 ℃, under the interaction of the three agents of starch, CaO, and collector, the maximun difference in single mineral recovery rate of quartz and hematite is 89.25 percentage points under the MY flotation system, which significantly improves the difference in the flotation of quartz and hematite compared to the sodium oleate flotation system (the maximun difference in recovery rate is 56.25 percentage points). The mechanism analysis results indicate that MY collector exhibits multifaceted synergistic adsorption effects on quartz mineral surfaces, including electrostatic adsorption, hydrogen bonding, and chemical bonding, while on hematite surfaces, it primarily involves molecular adsorption and electrostatic adsorption. Due to the presence of multiple active groups such as S═O, —NH_2 and C═O in its structure, MY forms coupled synergistic interactions across multiple active sites, enhancing its quartz recovery capability. This also amplifies the floatability difference between quartz and hematite, effectively promoting the separation of hematite and quartz in the room-temperature reverse flotation system.

Key words: Hematite, New room-temperature collector, Reverse flotation, Quartz

* **收稿日期**:2025-01-03
基金项目:辽宁省"揭榜挂帅"科技攻关项目(2023JH1/10400011)
作者简介:姚富兴(1998—),男,河南三门峡人,硕士研究生,研究方向为浮选药剂结构设计。E-mail:xing3213653676@163.com
通信作者:马艺闻(1985—),女,辽宁鞍山人,博士,副教授,主要从事矿产资源综合利用、浮选理论与浮选药剂研发等研究。E-mail:memyw@ustl.edu.cn

0 引言

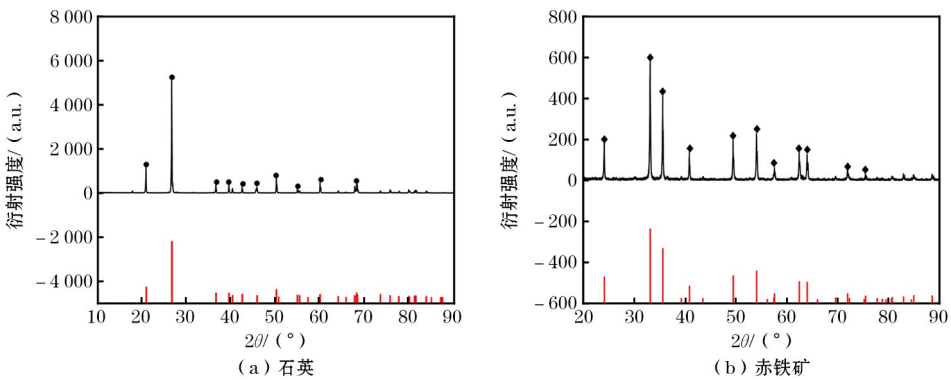
我国铁矿石资源丰富，但铁矿石资源禀赋相对不佳，富矿远少于贫矿，存在品位低、矿石组成复杂、嵌布粒度细、开发难度大等特点[1-5]。随着我国钢铁工业的迅速发展，对铁矿石的需求不断增加，而国内高品位铁矿石资源的供应远远不能满足需求，导致我国不得不大量进口高品位铁矿石[6-7]。在我国优质铁矿石资源严重短缺的背景下，高效合理利用贫铁矿资源已成为一项重大课题。浮选作为重要的铁矿石选别手段，对实现贫铁矿合理高效利用具有重要意义。传统的选矿工艺在低温环境下往往面临诸多挑战，尤其是捕收剂的性能受到显著影响。随着全球气候的变化以及部分选矿地区冬季寒冷气候的限制，当下选矿厂使用的传统捕收剂已逐渐无法满足对贫赤铁矿的高效选别，且存在浮选温度高、药剂选择性差和消耗量大等问题，选矿厂经济效益无法保证且不利于绿色节能发展，故开发适用于常温/低温条件的赤铁矿捕收剂成为了亟待解决的问题[8-12]。新型常温捕收剂因具有“卤素原子、醚胺类、多胺类、季铵盐类”等基团[13-17]，能够有效降低浮选温度和药剂用量，且药剂选择性较好，利于提高生产指标，进而推动选厂增效降耗的目标[18-20]。

本文采用自制新型常温捕收剂进行石英、赤铁矿单矿物试验[21]，并结合接触角检测分析、Zeta 电位检测分析和红外光谱检测分析，探索新型常温捕收剂 MY(后文简称 MY)与石英、赤铁矿的作用机理，以期能为新型常温捕收剂的研制和应用提供理论借鉴，进一步推动鞍山式赤铁矿的常温浮选研究进程，促进选矿厂生产的降耗增效。

1 试验原料与试验方法

1.1 试验原料与试剂

试验所用石英、赤铁矿取自辽宁鞍山地区块矿[22]，经手工破碎后使用干磨机磨至－0.045 mm 占 90%的细度，再经筛分处理后使用。采用酸洗法去除石英中的铁杂质，用稀释后的盐酸溶液将石英矿样反复浸泡 3 次，每次 24 h，烘干备用。赤铁矿磨至－0.045 mm 后经磁选管处理后，烘干备用[21]。采用 X 射线衍射将处理后的石英和赤铁矿矿样进行分析检测，分析结果表明，经处理后石英试样的主要衍射峰与 SiO_2 标准卡(PDF＃97-003-9830)高度吻合，其特征峰位 $2\theta=26.62°$、$20.84°$，与石英晶体结构特征一致，可判定为典型石英相；赤铁矿处理样在 $2\theta=33.16°$、$35.64°$、$49.47°$ 处呈现显著特征峰，与 Fe_2O_3 赤铁矿标准卡(PDF＃04-003-2900)高度匹配，证实其物相组成为赤铁矿。两试样均未检测到明显杂质峰，主矿物相纯度均超过 95%。由 X 射线衍射可知，经过处理的石英、赤铁矿样品满足单矿物试验要求[22]，结果如图 1 所示。



(a) 石英　　(b) 赤铁矿

图 1 石英、赤铁矿单矿物 XRD 谱图

Fig.1 XRD spectrum of pure minerals of quartz, hematite

试验所用捕收剂为 MY 和油酸钠。淀粉和氧化钙配制成 2.5%的溶液；pH 调整剂使用 1%的 NaOH 和 HCl 溶液，均为分析纯。试验用水为去离子水。

1.2 试验药剂合成

本试验采用自主合成的新型常温/低温捕收剂 MY，它是一种含有 S═O、—NH_2、C═O、—OH 等多种极性基团的两性捕收剂。其合成方法为：将

氨基磺酸铵与油酸进行一定比例的混合,混合后放置于温度 130～180 ℃的油浴锅中反应 30 min。

1.3 试验方法

1.3.1 单矿物浮选试验

称取 4.0 g 矿样至 20 mL 浮选机浮选槽中,量取 15 mL 去离子水,搅拌 3 min 后,用 1%浓度的 HCl 或 NaOH 标准溶液调节矿浆至所需 pH,然后加入 MY 或油酸钠捕收剂,继续搅拌 3 min,刮泡至矿浆呈水泡状态,对精矿、尾矿烘干后称量,进而计算回收率。最后在最佳药剂用量条件下(其他条件一致),依次加入抑制剂、活化剂和捕收剂进行石英、赤铁矿浮选试验,对精矿、尾矿烘干后称量,计算回收率。

1.3.2 接触角检测分析

采用 JC2000 型接触角测量仪测量接触角。将浮选前后的矿样压片,通过相机拍摄静止状态下的液滴与压片缓慢接触的照片,然后利用图像分析软件来分析和测定相片中所记录的接触角[21]。

1.3.3 Zeta 电位分析

采用 Zetasizer Nano Puls 型电位测定仪进行 Zeta 电位检测。在不同 pH 条件下,分别制备石英和赤铁矿单矿物的矿石试样,取 20 mg 至烧杯中,加入 20 mL 去离子水,经磁力搅拌器搅拌后静置,将上层清液用注射器抽吸到离心管中备用,然后进行 Zeta 电位测试。

1.3.4 红外光谱分析

采用 Vertex 70v 傅里叶变换红外光谱仪对药剂作用前后的矿物样品进行测定,分析捕收剂与矿物间的作用形式。将少量矿样与 KBr 按 1∶100 比例进行混合,使用玛瑙研钵研磨后压片,将样品腔放气后置入样品,抽真空,检测得到对应的红外光谱图。

2 试验结果及讨论

2.1 单矿物浮选试验结果

2.1.1 矿浆溶液 pH 影响

在浮选矿浆温度为 25 ℃、捕收剂用量为 200 mg/L 的条件下,考察 pH 对石英和赤铁矿浮选效果的影响,试验结果如图 2 所示。

由图 2 可知,随着 pH 增加,在 MY 和油酸钠两种捕收剂体系下,石英、赤铁矿回收率在 pH 为 8～12 范围内均呈现先上升后稳定的趋势。在 pH 为 11.5 时,MY 和油酸钠两种捕收剂体系下石英、赤铁矿回收率均趋于相对稳定,此时石英与赤铁矿回收率差值均达到最大,分别为 4.25 和 5.00 个百分点。由此可见,MY 和油酸钠对赤铁矿的捕收效果明显优于石英,且 MY 的捕收性明显优于油酸钠。MY 作为捕收剂时的适宜 pH 为 11.5。

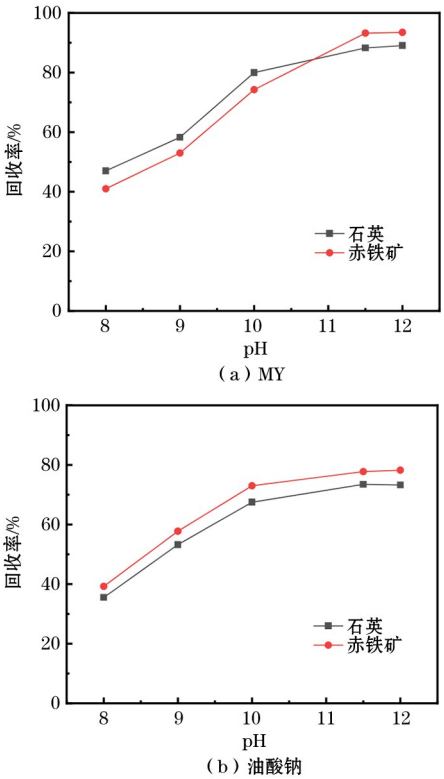


图 2 不同 pH 条件下 MY 和油酸钠对石英、赤铁矿的浮选效果

Fig.2 Flotation effect of MY and sodium oleate on quartz and hematite under different pH conditions

2.1.2 捕收剂用量影响

在浮选矿浆温度为 25 ℃、pH 为 11.5 的条件下,考察捕收剂用量对石英和赤铁矿浮选效果的影响,试验结果如图 3 所示。

由图 3 可知,随着捕收剂用量的增加,在 MY 和油酸钠两种捕收剂体系下,石英、赤铁矿回收率在药剂用量为 100～300 mg/L 的范围内总体呈先增长后稳定的趋势,且 MY 对石英的捕收效果明显高于油酸钠。在 MY 和油酸钠用量均为 200 mg/L 时,石英、赤铁矿回收率达到相对最大值,分别为 88.25%和 93.25%、73.50%和 77.75%,此时石英、赤铁矿回收率差值分别为 5.0 和 4.25 个百分点。赤铁矿的浮选效果明显优于石英,MY 的捕收性更优,其选择性也略优于油酸钠。综合考虑石英、赤铁矿回收率,MY 的适宜药剂用量为 200 mg/L。

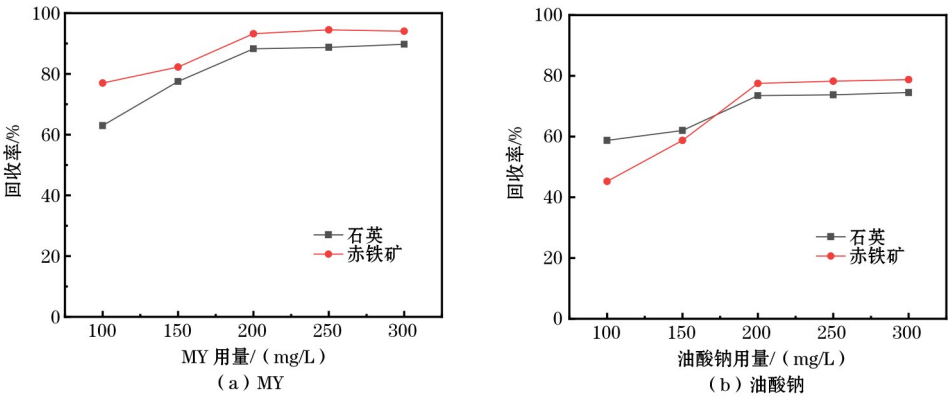


图 3　不同捕收剂用量条件下 MY 和油酸钠对石英、赤铁矿浮选效果的影响

Fig.3　Influence of MY and sodium oleate on the flotation effect of quartz and hematite under the condition of different dosages of collector

2.1.3　浮选温度影响

在矿浆 pH 为 11.5、捕收剂用量为 200 mg/L 的条件下，考察温度对石英和赤铁矿浮选效果的影响，试验结果如图 4 所示。

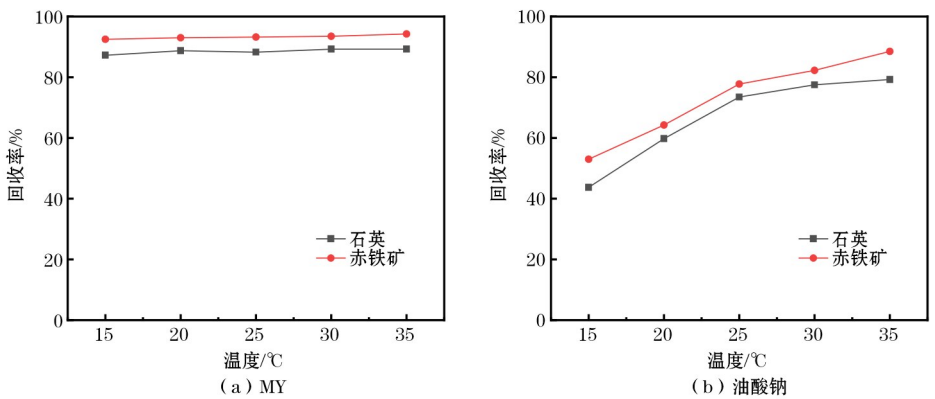


图 4　不同温度条件下 MY 和油酸钠对石英、赤铁矿浮选效果的影响

Fig.4　Influences of MY and sodium oleate on the flotation of quartz and hematite under different temperature conditions

由图 4 可知，随着温度的升高，在温度为 15～35 ℃，选用 MY 作为浮选捕收剂时，石英、赤铁矿回收率总体呈平稳趋势，在 15～35 ℃范围内，石英、赤铁矿的最低回收率分别为 87.25%和 92.50%；油酸钠作为捕收剂时，石英、赤铁矿回收率呈快速增长趋势，且在 35 ℃时，石英、赤铁矿回收率分别达到 79.00%和 88.00%。结合以上试验结果分析可知，MY 对温度的适应性较油酸钠更好（在 25 ℃时浮选效果最佳），赤铁矿的捕收效果优于石英，更有利于进行赤铁矿常温浮选。

2.1.4　MY 浮选体系下石英和赤铁矿单矿物浮选行为差异

根据 MY 捕收剂在 pH 为 11.5、温度为 25 ℃、用量为 200 mg/L 的条件下，浮选石英、赤铁矿单矿物的试验结果可知，加入 MY 捕收剂后，石英、赤铁矿的回收率显著提高，但其差值仅为 5.00 个百分点，浮选差异较小，即采用正浮选无法将石英、赤铁矿有效分离，因此可先采用淀粉抑制赤铁矿、再使用 CaO 活化石英、最后加入 MY 捕收石英的反浮选工艺，增加石英和赤铁矿的浮选差异，提高其浮选分离效果。在矿浆 pH 为 11.5、捕收剂用量 200 mg/L、25 ℃的条件下，依次加入淀粉、CaO、捕收剂，考察浮选药剂相互作用对石英和赤铁矿浮选效果的影响，试验结果见图 5。

由图 5 可知，在淀粉、CaO、捕收剂 3 种药剂相互作用下，MY 和油酸钠捕收剂对应的石英、赤铁矿回收率分别为 92.75%和 3.50%、75.00%和 18.75%，回收率差值分别为 89.25 和 56.25 个百分点。在 MY 和油酸钠捕收剂浮选体系下，石英与 3 种药剂相互作用，加入淀粉、CaO、捕收剂（MY 或油酸钠）时石英的回收率较单一油酸钠或 MY 作用略有升高；相反，赤铁矿回收率大幅下降。由此可见，淀粉、

CaO、捕收剂 3 种药剂相互作用对石英回收效果产生的影响较小,而赤铁矿因被淀粉强烈抑制,回收率大幅降低,进而石英和赤铁矿的选择性差异较前面加单一捕收剂时选择性差异增大。因此,MY 捕收剂在淀粉、CaO 药剂的相互作用下,可更好地规避掉淀粉对石英的抑制作用,故采用赤铁矿反浮选可更好地增加赤铁矿和石英的选择性差异,更有利于反浮选体系下赤铁矿的常温富集。

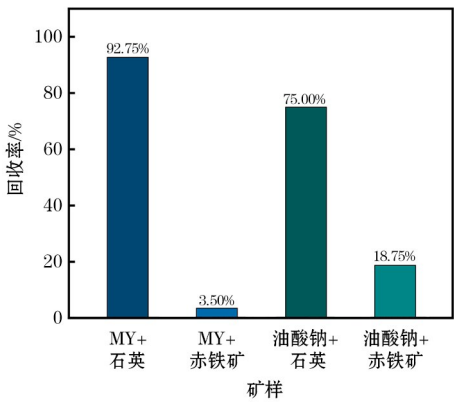


图 5 淀粉、CaO、捕收剂作用下 MY 和油酸钠与石英、赤铁矿作用后浮选差异的影响

Fig.5 Effect of flotation differences between MY and sodium oleate after interaction with quartz and hematite in the presence of starch CaO, and collectors

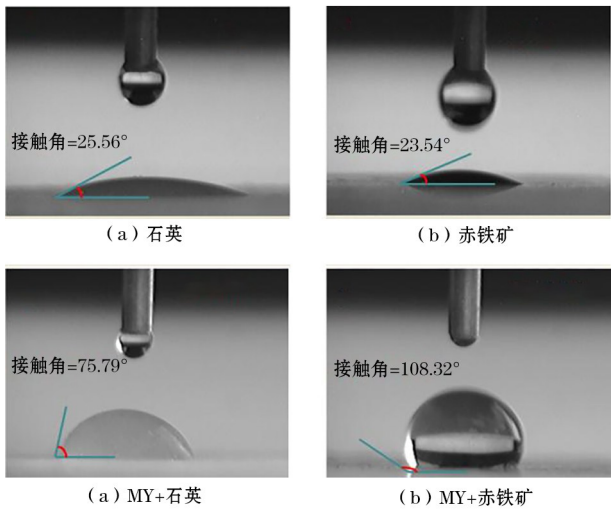
综上,两种捕收剂对石英和赤铁矿浮选效果均为:MY 强于油酸钠,在 15～35 ℃范围内,采用 MY 为捕收剂进行赤铁矿反浮选时,石英与赤铁矿的浮选选择性差异更大,且在 25 ℃时浮选效果最适宜。MY 可作为赤铁矿反浮选的常温捕收剂使用。

2.2 MY 与矿物表面作用机理分析

2.2.1 接触角检测结果分析

在浮选过程中药剂与矿物发生作用,使得矿物表面的润湿性发生变化,从而改变矿物的可浮性[23]。在矿浆温度为 25 ℃、pH 为 11.5、捕收剂用量为 200 mg/L 的条件下,比较 MY 对石英和赤铁矿表面疏水性的影响,结果见图 6。

由图 6 可知,MY 与石英、赤铁矿作用后表面接触角均有不同程度增大,MY 与石英作用后接触角由 25.56°提高到 75.79°,与赤铁矿作用后接触角由 23.54°提高到 108.32°;MY 与石英、赤铁矿作用后,接触角分别提高了 50.23°和 84.78°。由单矿物浮选结果可知,在 MY、淀粉、CaO 3 种药剂共同作用下,赤铁矿回收率大大降低,石英回收率反而略有升高。综上,石英与 MY 作用后其表面接触角有明显提高,有效提高了石英表面的疏水性,更有利于石英浮选。



(a) 石英 (b) 赤铁矿

(a) MY+石英 (b) MY+赤铁矿

图 6 MY 与石英、赤铁矿作用前后接触角变化

Fig.6 The change of contact angle before and after the interaction of MY with quartz and hematite

2.2.2 Zeta 电位分析

在浮选过程中,药剂在矿浆中由于水解或电离作用产生的活性离子会吸附在矿物表面,使得矿物表面的电性发生变化。在矿浆温度为 25 ℃、pH 为 11.5、捕收剂用量为 200 mg/L 的条件下,研究 MY 对石英和赤铁矿表面电性的影响,Zeta 电位检测结果如图 7 所示。

由图 7 可知,石英和赤铁矿单矿物在零电点的 pH 分别为 3.98 和 3.99,随着 pH 的增大,石英和赤铁矿表面动电位逐渐变小。石英与 MY 作用后,零电点从 3.98 变为 6.27,在 pH 为 11.5 时,电位由 −27.71 mV 变化到 −16.50 mV。当矿浆 pH 较低时,捕收剂中的$—CH_3^+$、$—NH_3^+$ 不断以静电作用与矿物表面的—Si—O^- 发生静电吸附作用;随着矿浆 pH 的增大,MY 中的$—CH_3^+$、$—NH_3^+$ 以分子形式存在,MY 吸附到石英表面形成半胶束,代替与“荷正电的 Si”结合成“—OH、S═O、C═O”等活性基团[24],所以 MY 与石英作用后的电位提高,故 MY 在石英表面存在静电吸附;赤铁矿与 MY 作用后,零电点从 3.99 变为 6.01,在 pH 为 11.5 时,电位由 −25.33 mV 变化到 −30.58 mV。当矿浆 pH 在 2～10 时,MY 中的$—NH_3^+$ 发挥主要作用,不断以静电吸附作用于矿物表面的 Fe—O;在 pH 为 10～12 时,MY 中的 C═O、S═O 等阴离子活性基团发挥主要作用,MY 在吸附到赤铁矿表面的同时形成了半胶束吸附,由于 Fe 可与—OH 形成配位键[25],吸附在赤铁矿表面的 MY 中带有的负电荷使得赤铁矿电位下降,故 MY 在赤铁矿表面存在静电吸附。

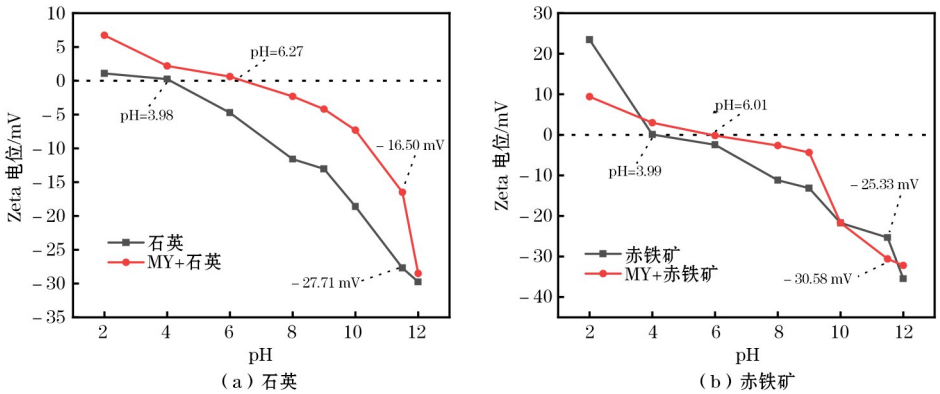


图 7　MY 浮选体系下石英、赤铁矿作用前后的 Zeta 电位图

Fig.7　Zeta potential of quartz and hematite before and after the action of MY flotation system

综上可知，石英和赤铁矿与 MY 间均存在静电吸附作用，从静电吸附强弱角度分析，由于配位作用强于分子吸附[26]，故赤铁矿的静电吸附作用稍强，佐证了接触角的分析结果。

2.2.3　红外光谱结果分析

捕收剂在矿浆溶液中会水解或电离出某些活性基团，与石英、赤铁矿表面发生化学键合吸附或氢键吸附等，进而影响矿物的可浮性。在温度为 25 ℃、pH 为 11.5、捕收剂用量为 200 mg/L 的条件下，研究 MY 与石英、赤铁矿表面的吸附机理。红外光谱检测结果如图 8 所示。

由图 8(a)可知，MY 红外光谱中，3 440.29 cm^{-1}处为—OH 伸缩振动吸收峰[27]，2 854.89 cm^{-1}和 2 923.71 cm^{-1}处为甲基和亚甲基反对称和对称伸缩振动峰，1 414.92 cm^{-1}处为有机硫酸酯中 S═O 伸缩振动吸收峰，1 562.68 cm^{-1}处为酰胺基中的—NH_2 键的弯曲振动峰，1 635.82 cm^{-1}处为酮基中 C═O 键的伸缩振动吸收峰，781.34 cm^{-1}处和 690.29 cm^{-1}处是 Si—O—Si 对称伸缩振动吸收峰，463.43 cm^{-1}处是 Si—O 弯曲振动吸收峰，以上是石英第二特征吸收峰[27]。石英与 MY 作用后，3 634.32 cm^{-1}处生成了 SiO—H 的伸缩振动峰，峰值较强，所以此处有较强的氢键吸附作用，2 854.89 cm^{-1}和 2 923.71 cm^{-1}处为甲基和亚甲基反对称和对称伸缩振动峰[28-29]，说明捕收剂 MY 可能以分子形式吸附在石英表面，1 882.83 cm^{-1}和 1 796.26 cm^{-1}处为原 1 562.68 cm^{-1}处酰胺基中的—NH_2 键与石英作用后生成的铵盐，1 616.41 cm^{-1}处为原 1 635.82 cm^{-1}处的酮基中 C═O 与石英作用后生成的二酮[28]，786.56 cm^{-1}处为原 1 414.92 cm^{-1}处的 S═O 键与石英作用后形成的 Si—O—S 桥联键，新出现的峰均来自于 MY，证明石英与 MY 之间存在较强化学作用。加入淀粉和 CaO 后，石英与捕收剂的作用更强，MY 对石英捕收性增强，印证了前文单矿物浮选试验的结果。

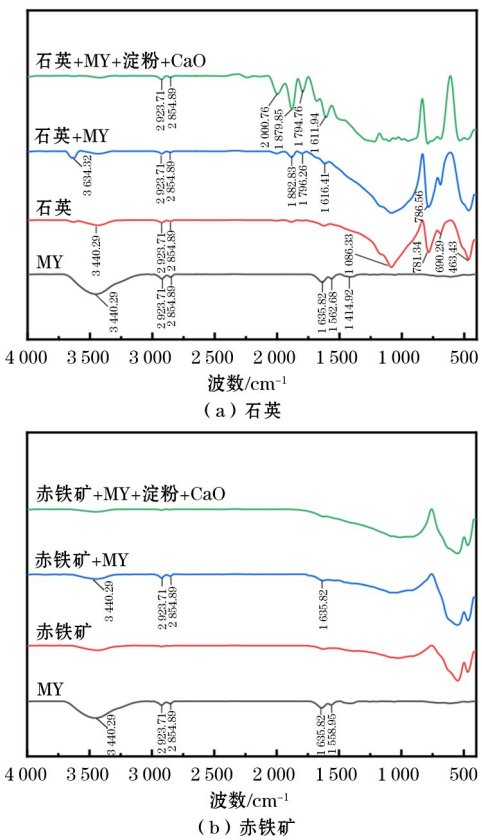


图 8　MY 浮选体系下石英、赤铁矿作用前后的红外光谱图

Fig.8　Infrared spectra of quartz and hematite before and after the action in MY flotation system

如图 8(b)所示，赤铁矿与 MY 作用后，原 3 440.29 cm^{-1}的—OH 的伸缩振动峰被削弱，证明存在氢键效应使得—OH 键振动减弱，化学键力降低[28]，原 2 854.89 cm^{-1}和 2 923.71 cm^{-1}处出现了甲基和亚甲基反对称和对称伸缩振动峰，说明捕收

剂 MY 可能以分子形式吸附在赤铁矿表面,1 635.82 cm^{-1}出现了酮基中的 C═O 键伸缩振动吸收峰,说明 MY 中酮基与赤铁矿发生了化学键合作用,故药剂在赤铁矿表面存在化学吸附作用。加入淀粉和 CaO 后,捕收剂与赤铁矿的作用峰消失,MY 对赤铁矿捕收性减小,印证了单矿物浮选试验的结果。

综上,MY 与石英表面发生了氢键吸附作用和化学键合作用等,与赤铁矿表面存在较强的分子吸附作用和稍弱化学键合作用,MY 发生化学键合作用的活性基团种类多、作用强,且 MY 与淀粉、CaO 的药剂协同作用更强,因而赤铁矿反浮选效果更佳,更有利于赤铁矿反浮选,与前文单矿物浮选试验结果一致。

2.3 MY 型捕收剂与石英、赤铁矿作用机理

通过接触角、Zeta 电位以及红外光谱检测综合分析得出:MY 与石英作用后矿物表面接触角显著增大,并存在静电吸附作用和氢键作用,同时吸附过程中石英表面可与 MY 中的—OH、C═O、$—NH_2$ 以及 S═O 等多种活性基团发生较强化学键合作用,且生成了较稳定的 SiO—H,MY 在石英表面发生了多活性位点的耦合协同作用[28]。MY 与赤铁矿作用存在较强的静电吸附作用和稍弱化学键合作用,MY 中发生化学键合作用的活性基团种类多、作用强,且与淀粉、CaO 的药剂协同作用更强,使其浮选差异增大,同时 MY 捕收剂存在 S═O、$—NH_2$、C═O 等活性基团,增强了其在常温条件下的可溶性,更有利于赤铁矿常温反浮选。MY 型捕收剂与石英、赤铁矿作用机理拟合模型如图 9 所示。

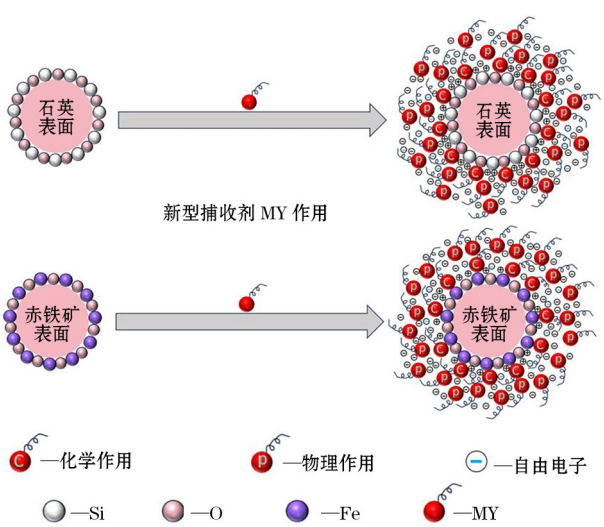


图 9 捕收剂作用机理模型

Fig.9 Modelling of the action mechanism of MY collector

3 结论

本文将油酸和氨基磺酸铵两种药剂在 130～180 ℃条件下反应制得 MY 捕收剂,进行单矿物浮选行为研究,并结合接触角、Zeta 电位和红外光谱机理检测分析 MY 与石英、赤铁矿的作用机理,得出以下结论。

(1) 在浮选温度为 25 ℃条件下,MY 对石英单矿物的浮选效果明显优于油酸钠的浮选效果,在淀粉、CaO 药剂的相互作用下,油酸钠和 MY 对石英、赤铁矿回收率差值最大分别为 56.25 和 89.25 个百分点,故 MY 较油酸钠有较好的常温赤铁矿反浮选效果。

(2) MY 因结构中存在 S═O、$—NH_2$、C═O、—OH 等活性基团,可溶性增强,与石英作用时可形成多活性位点的耦合协同作用,即在其表面发生了静电吸附、氢键吸附和化学键合作用的协同吸附作用,增强了对石英的捕收作用;MY 与赤铁矿表面作用时以分子吸附、静电吸附为主,增大了赤铁矿与石英的浮选差异,具有了较高的选择性,更有利于赤铁矿反浮选。

(3) MY 在常温(15～25 ℃)条件下对赤铁矿反浮选效果明显优于油酸钠,可作为赤铁矿常温反浮选捕收剂使用,为赤铁矿反浮选常温捕收剂的研发与应用提供了借鉴。

参考文献(References):

[1] 左更.加强国内铁矿资源保障能力,确保钢铁工业高质量发展[J].冶金管理,2024(6):18-21.
ZUO Geng. Strengthen the support capacity of domestic iron ore resources to ensure the high-quality development of the iron and steel industry[J].China Steel Focus,2024(6):18-21.

[2] 张超凡,余青瑶,曹亦俊,等.钛铁矿浮选药剂及其表面改性的研究进展[J].中国有色金属学报,2021,31(12):3675-3689.
ZHANG Chaofan,YU Qingyao,CAO Yijun,et al.Research progress of ilmenite flotation reagents and their surface modification methods[J].The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2021,31(12):3675-3689.

[3] 刘航涛,吕振福.国内外铁矿资源利用状况及发展趋势研究[J].中国矿业,2025,34(7):315-323+2.
LIU Hangtao, LYU Zhenfu. Utilization status and development trend of iron ore resources at domestic and abroad[J]. China Mining Magazine,2025,34(7):315-323+2.

[4] 秦洁璇."十五五"铁矿行业发展趋势及企业规划思路研究[J].冶金经济与管理,2025(4):21-25.
QIN Jiexuan. Research on the development trends and strategic planning of iron ore industry in the China's 15th Five-Year Plan [J]. Metallurgical Economy and Management,2025(4):21-25.

[5] 张恩泽，王永刚.超微细嵌布铁矿选矿技术研究[J].甘肃冶金，2024，46(5)：6-11.
ZHANG Enze，WANG Yonggang. Research on beneficiation technology of micrograined iron ore[J].Gansu Metallurgy，2024，46(5)：6-11.

[6] 孟瑞敏.低品位铁矿选矿工艺研究[J].山西冶金，2024，47(9)：91-93.
MENG Ruimin. Research on the beneficiation process of low-grade iron ore[J]. Shanxi Metallurgy，2024，47(9)：91-93.

[7] 万军营，陈铁军，周仙霖，等.细粒级镜铁矿磁化焙烧产品选别流程优化研究[J].矿业研究与开发，2024，44(10)：257-264.
WAN Junying，CHEN Tiejun，ZHOU Xianlin，et al. Separation process optimization for magnetizing roasting products of fine-grained specularite[J].Mining Research and Development，2024，44(10)：257-264.

[8] 孙浩然.铁矿的选矿工艺流程及改进措施研究[J].中国金属通报，2024(8)：35-37.
SUN Haoran. Study on the beneficiation process flow and improvement measures of iron ore[J].China Metal Bulletin，2024(8)：35-37.

[9] 王鹃鹃.阴阳离子组合捕收剂在赤铁矿反浮选脱硅的应用及机理研究[D].长沙：中南大学，2024.
WANG Juanjuan. Study on the application and mechanism of mixed anionic/cationic collectors for reverse flotation desiliconization of hematite[D]. Changsha：Central South University，2024.

[10] 黄恩铭，宋宝旭，南楠，等.新型脂肪酸类捕收剂在鞍山式铁矿低温浮选脱硅中的实验研究[J].矿产保护与利用，2024，44(2)：80-85.
HUANG Enming，SONG Baoxu，NAN Nan，et al. Novel fatty acid-based collector in low-temperature desilication of iron ore by flotation in Anshan City[J].Conservation and Utilization of Mineral Resources，2024，44(2)：80-85.

[11] 王涛.安徽李楼铁矿常温浮选药剂应用之路[J].现代矿业，2020，36(7)：107-110.
WANG Tao. Application of flotation reagent at room temperature in Lilou Iron Mine of Anhui[J]. Modern Mining，2020，36(7)：107-110.

[12] 赵媛媛，徐伟，石波，等.季铵盐类捕收剂在矿物浮选脱硅中的研究进展[J].矿产保护与利用，2021，41(2)：34-43.
ZHAO Yuanyuan，XU Wei，SHI Bo，et al. Research progress of cationic quaternary ammonium salts collector in mineral flotation desilication[J].Conservation and Utilization of Mineral Resources，2021，41(2)：34-43.

[13] 宋水祥.胺类捕收剂对赤铁矿和石英浮选行为及其泡沫稳定性的影响[D].昆明：昆明理工大学，2020.
SONG Shuixiang. Effect of amine collectors on flotation behavior and foam stability of hematite and quartz[D]. Kunming：Kunming University of Science and Technology，2020.

[14] 苏欢欢，程敢，马俊伟，等.胺类捕收剂对铝硅矿物反浮选脱硅试验[J].轻金属，2021(8)：5-9.
SU Huanhuan，CHENG Gan，MA Junwei，et al. Experiment on desilication by reverse flotation of aluminum silicate minerals with amine collectors[J].Light Metals，2021(8)：5-9.

[15] 赵军.胺类表面活性剂协同脂肪酸捕收剂 MON-135 浮选锂辉石及机理研究[D].武汉：武汉工程大学，2024.
ZHAO Jun. Study on the mechanism of amine surfactants and fatty acid collector MON-135 for flotation of spodumene[D].Wuhan：Wuhan University of Engineering，2024.

[16] 李昃霖.分子模拟胺类混合捕收剂在石英表面的吸附机理[D].成都：成都理工大学，2023.
LI Zhelin. Molecular simulations of the adsorption mechanisms of mixedamine collectors on quartz surface[D]. Chengdu：Chengdu University of Technology，2023.

[17] 罗溪梅，吴雪僮，齐琳萍，等.四种胺类捕收剂体系中两相泡沫和赤铁矿/石英三相泡沫的稳定性[J].有色金属工程，2022，12(12)：84-90.
LUO Ximei，WU Xuetong，QU Linping，et al. Foam stability of two phase and hematite/quartz three phase in four amine collector systems[J]. Nonferrous Metals Engineering，2022，12(12)：84-90.

[18] 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. Effects of four kinds of cationic collectors on flotation of hematite and quartz[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2020，40(2)：56-61.

[19] 杨晓峰，马玉宁，陈宇，等.组合捕收剂 DYN-3 在铁矿石浮选脱硅中的性能研究[J].金属矿山，2023(4)：103-109.
YANG Xiaofeng，MA Yuning，CHEN Yu，et al. Study on the performance of combined collector DYN-3 in iron ore desilication flotation[J].Metal Mine，2023(4)：103-109.

[20] 朱顺伟，李孝龙，李永利，等.新型捕收剂在尾矿中赤铁矿回收的应用试验[J].烧结球团，2022，47(4)：71-76+98.
ZHU Shunwei，LI Xiaolong，LI Yongli，et al. Experiment on hematite recovery from beneficiation tailings by a novel collector[J].Sintering and Pelletizing，2022，47(4)：71-76+98.

[21] 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+17.
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+17.

[22] 张伦旭.基于响应曲面法优化的鞍山式铁矿尾矿中铁矿物分级-再选试验研究[D].鞍山：辽宁科技大学，2024.

ZHANG Lunxu. Experimental study on classification-reconcentration of iron minerals in Anshan iron ore tailings based on response surface method optimization[D].Anshan: Liaoning University of Science and Technology,2024.

[23] 赵通林.浮选[M].北京:冶金工业出版社 2018.
ZHAO Tonglin. Flotation [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018.

[24] 叶子涵,刘胜,陈伟,等.数据驱动的浮选捕收剂分子设计构想与研究进展[J].有色金属(选矿部分),2025(2):8-32.
YE Zihan, LIU Sheng, CHEN Wei, et al. Concepts and research advances on data-driven molecule design of flotation collectors [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2025(2):8-32.

[25] 毛亚纯,文杰,曹旺,等.基于鞍山式铁矿成像光谱的融合算法研究[J].光谱学与光谱分析,2024,44(9):2620-2625.
MAO Yachun, WEN Jie, CAO Wang, et al. Fusion algorithm research based on imaging spectrum of Anshan Iron Ore[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2024,44(9):2620-2625.

[26] 夏夕雯,梁广泉,朱一民.新型常温捕收剂 DX-1 对石英的浮选性能研究及机理分析[J].矿产保护与利用,2018(4):69-73.
XIA Xiwen, LIANG Guangquan, ZHU Yimin. Study on the flotation performance of a new type of atmospheric collector DX-1 for quartz[J].Conservation and Utilization of Mineral Resouces,2018(4):69-73.

[27] 陈建华,朱阳戈,李玉琼,等.有色金属硫化矿浮选配位化学[J].有色金属(选矿部分),2024(8):1-17+30.
CHEN Jianhua, ZHU Yangge, LI Yuqiong, et al. Flotation coordination chemistry of nonferrous metal sulfide ores[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2024(8):1-17+30.

[28] 朱一民,刘杰,李艳军.非硫化矿浮选药剂作用原理[M].北京:北京冶金工业出版,2021.
ZHU Yimin, LIU Jie, LI Yanjun. Principle of flotation reagents for unsulfide ores [M]. Beijing: Beijing Metallurgical Industry Press,2021.