

# 阴阳离子组合捕收剂对微细粒赤铁矿与石英浮选分离的研究

贾落繁<sup>1</sup>, 罗溪梅<sup>1,2</sup>, 王云帆<sup>2,4</sup>, 宋振国<sup>3</sup>, 周永锋<sup>1</sup>, 蒋旺强<sup>1,2</sup>, 洪欣<sup>1</sup>

- 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南昆明 650093;
- 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南昆明 650093;
- 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 100160;
- 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 云南昆明 650093

中图分类号: TD923<sup>7</sup>.14; TD951.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)01-0033-07  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.01.004

**摘要** 考察了十二烷基磺酸钠(SDS)、十二烷基硫酸钠(SLS)、十二烷基苯磺酸钠(SDBS)以及油酸钠(NaOL)四种阴离子捕收剂分别与阳离子捕收剂十二胺(DDA)组合对浮选分离微细粒(-18 μm)赤铁矿和石英的影响。单矿物实验表明,与单一 DDA 相比,四种阴离子捕收剂分别与 DDA 组合使用能够降低赤铁矿的浮选回收率,有利于减少赤铁矿的抑制剂用量。十二胺与阴离子捕收剂组合使用时,四种阴离子捕收剂对微细粒赤铁矿和石英分离效果为: SDS>NaOL>SLS/SDBS。其中,DDA+SDS 组合捕收剂在一定质量比例条件下组合使用的效果最优,在最佳浮选条件下(pH=7,捕收剂用量为 20 mg/L,  $m(\text{DDA}) : m(\text{SDS}) = 2 : 1$ ,抑制剂用量为 20 mg/L),泡沫产品中石英回收率达到 91.05%,赤铁矿回收率仅为 6.7%,有利于赤铁矿反浮选。人工混合矿物浮选实验结果表明,使用 DDA+SDS 组合捕收剂( $m(\text{DDA}) : m(\text{SDS}) = 2 : 1$ )获得精矿 Fe 品位为 45.7%、回收率为 87.0%,与单一 DDA 相比,分别提高了 1.7、18.6 个百分点,有利于提高赤铁矿和石英的分离效果,DDA+SDS 可作为微细粒赤铁矿和石英浮选分离的优良阴阳离子捕收剂。

**关键词** 赤铁矿; 石英; 十二胺; 阴阳离子组合捕收剂; 浮选

## 1 引言

铁矿石在自然界中储量丰富,资源分布也较为集中,全球范围内的铁矿石资源按储量大小依次为澳大利亚、巴西、俄罗斯和中国<sup>[1-2]</sup>。随着钢铁行业的快速发展,我国对铁矿石的需求不断增加,矿山开采规模不断扩张,优质铁矿资源逐渐减少,铁矿资源存在禀赋差、品位低、开发成本高等问题,因此对现有的低品位铁矿石资源的高效利用尤为关键<sup>[3]</sup>。浮选技术在分选贫、细、杂等难处理矿石方面有一定优势,在微细粒赤铁矿的浮选工艺中,捕收剂是提高赤铁矿浮选精矿铁品位和回收率的关键,对矿物浮选分离起着决定性作用<sup>[4]</sup>。目前常用的赤铁矿反浮选捕收剂分为阴离子捕收剂和阳离子捕收剂。用于赤铁矿反浮选工

艺的阴离子捕收剂以脂肪酸类为主,脂肪酸类捕收剂浮选指标好,但也存在着许多不足,例如不易溶解、需要加温等<sup>[5]</sup>。阳离子捕收剂多以胺类捕收剂为主,常用于赤铁矿反浮选脱硅,可以有效地将硅酸盐矿物分选出来,有着药剂制度简单、耐低温、成本低等优点,但也存在泡沫发黏、对矿泥敏感等缺点<sup>[6-7]</sup>。

然而,面对贫、细、杂矿石的复杂浮选体系,单一捕收剂无法取得较好的浮选指标。多项研究表明,将具有不同官能团的药剂混合可以使组合药剂产生优于药剂单独使用的效果<sup>[8-10]</sup>。组合捕收剂可能由一种或多种机理共同作用,且在不同的浮选环境中的作用机理也不尽相同。组合捕收剂通常有以下几种作用机理<sup>[11]</sup>: 共吸附机理、电荷补偿机理、功能互补机理以及降低临界胶束浓度等。这些机理使得组合捕收剂

收稿日期: 2023-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(52364029; 52264030); 矿物加工科学与技术国家重点实验室开放基金资助项目(BGRIMM-KJSKL-2023-10); 云南省科技厅昆明理工大学“双一流”创建联合专项面上项目(202201BE070001-048)

作者简介: 贾落繁(2000—),女,河北邯郸人,硕士,从事选矿理论与技术研究, E-mail: jialufan\_f@163.com。

通信作者: 罗溪梅(1986—),女,四川绵阳人,教授,博士,从事选矿理论与技术研究, E-mail: 85128225@163.com; 王云帆(1985—),男,山东威海人,讲师,博士,从事选矿理论与技术研究, E-mail: asc\_cloud@aliyun.com。

对浮选效果的优化主要体现在改善药剂的选择性、提高溶液表面张力、减少药剂用量等方面。其中,电荷补偿机理主要指阴阳离子组合药剂在使用时,其中一种捕收剂吸附在矿物表面后,会通过静电作用加强另一种带有相反电荷的捕收剂的吸附能力,从而提高对矿物的捕收效果。许多学者已将阴阳离子组合捕收剂应用在锂辉石、云母及石英等氧化矿的浮选分离中<sup>[12-14]</sup>。BAI Y 等人<sup>[15]</sup>研究了三种阴离子捕收剂与十二胺组合捕收剂在气/液界面处的界面行为,发现阴离子表面活性剂的极性基团与十二胺之间的相互作用降低了十二胺阳离子之间的静电斥力,提高了组合捕收剂的吸附能力。白阳等人<sup>[16]</sup>在浮选试验中发现,阴阳离子型药剂组合时两者之间产生的协同作用优于单一捕收剂,其表面活性更强,对锂云母会产生更好的捕收作用及选择性。WANG L 等人<sup>[17]</sup>发现以十二胺与油酸钠组合药剂作捕收剂时,十二胺可以通过静电相互作用优先与油酸钠相互作用,只有少数十二胺分子通过氢键直接吸附于石英上,可以抑制石英的上浮。罗柳等人<sup>[18]</sup>利用多种阴离子捕收剂与十二胺组合来探究各体系对锂辉石与长石、石英的分离,研究表明,在碱性条件下,油酸的添加会增强锂辉石矿物表面的吸附能力,从而实现很好的分离效果。张钊等人<sup>[19]</sup>将十二胺和十二烷基磺酸钠作为组合捕收剂研究长石和石英的分离,结果表明,组合捕收剂可以在长石表面同时存在物理吸附和氢键作用,有利于长石的优先浮选。LI M 等人<sup>[20]</sup>将油酸钠、十二胺混合作为阴阳离子捕收剂,探索其对萤石和方解石浮选分离的效果,结果表明,在油酸钠与十二胺质量配比为 9:1 时,表现出较好的捕收能力和选择性,这是因为此时阴阳离子组合捕收剂呈现出最佳的协同效果。ZHANG ZY 等人<sup>[21]</sup>研究了纳米气泡与微细粒锂云母在阴阳离子组合捕收剂下的相互作用,发现阴阳离子组合捕收剂降低了溶液的表面张力,提高了纳米气泡的稳定性,从而促进了锂云母的浮选。

本文研究了四种阴离子捕收剂(十二烷基磺酸钠、十二烷基硫酸钠、十二烷基苯磺酸钠、油酸钠)分别与阳离子捕收剂十二胺的组合药剂对浮选分离微细粒赤铁矿和石英的效果。通过单矿物浮选实验确定浮选最佳 pH 值、捕收剂用量、药剂配比及抑制剂用量。在单矿物浮选实验的基础上进行人工混合矿实验,进一步分析在最佳浮选条件下四种阴离子捕收剂对十二胺体系浮选分离微细粒赤铁矿和石英的影响。

## 2 实验材料与方法

### 2.1 实验试剂

本实验所用阳离子捕收剂为十二胺( $C_{12}H_{27}N$ , DDA), 四种阴离子捕收剂分别为十二烷基磺酸钠( $C_{12}H_{25}SO_3Na$ , SDS)、十二烷基硫酸钠( $C_{12}H_{25}SO_4Na$ , SLS)、十二烷基苯磺酸钠( $C_{18}H_{29}NaO_3S$ , SDBS)以及油酸钠( $C_{18}H_{33}NaO_2$ , NaOL), pH 调整剂为盐酸(HCl, 化学纯)和氢氧化钠(NaOH, 化学纯), 采用淀粉( $(C_6H_{10}O_5)_n$ , 工业品)作为赤铁矿的抑制剂, 采用去离子水作为实验用水。所有试剂均为分析纯, 购买于药剂公司。

### 2.2 实验原料

本文浮选实验所用矿物为赤铁矿和石英。将购买的赤铁矿和石英块矿破碎、拣选, 采用球磨机进行磨矿并对其提纯, 最后通过水析获得 $-18\ \mu m$  粒级矿样。其中, 赤铁矿需通过摇床重选、磁滚筒和高梯度磁选提纯, 石英需采用盐酸酸浸除铁, 经去离子水洗涤、过滤、风干后使用。对制得的两种矿物进行了 XRD 分析(图 1), 赤铁矿纯度高于 98%, 石英纯度高于 99%, 满足实验要求。

### 2.3 浮选实验方法

#### 2.3.1 单矿物浮选实验

单矿物浮选实验所用设备为 XFG II 型实验室用

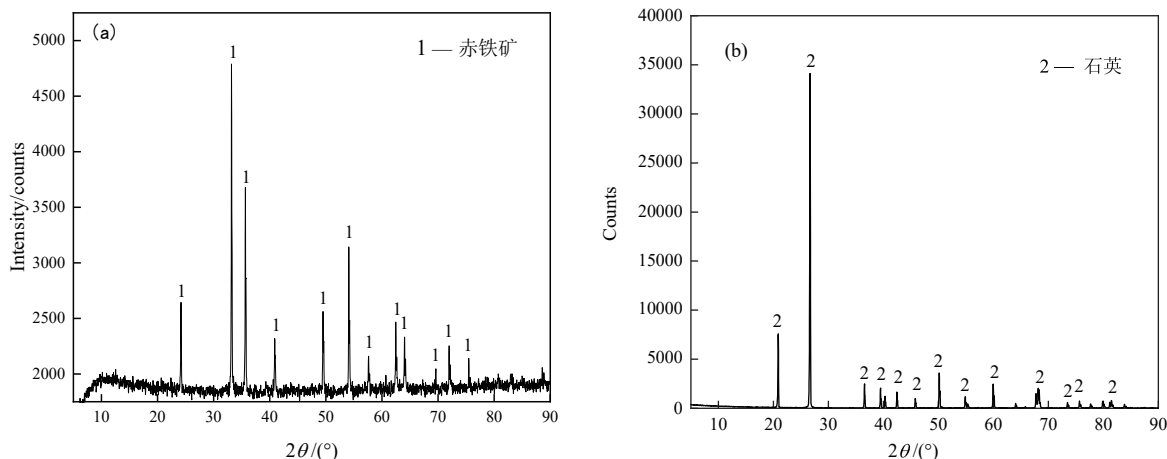


图 1 赤铁矿(a)和石英(b)的 X 射线衍射图  
Fig. 1 XRD patterns of hematite (a) and quartz (b)

挂槽浮选机, 浮选机的主轴转速为 1 500 r/min, 浮选实验温度为室温。精确称取 2.0 g 矿样放入 40 mL 的浮选槽中, 加入 25 mL 去离子水, 调浆 2 min 后分别加入 pH 调整剂、淀粉和捕收剂, 各阶段均搅拌 2 min, 充气刮泡时间为 3 min。浮选结束后, 将获得的精矿产品及尾矿产品分别进行烘干、称重, 并计算泡沫产品中石英和赤铁矿的回收率。

### 2.3.2 混合矿物浮选实验

将 1.5 g 石英和 1.2 g 赤铁矿混合矿物放入浮选槽中, 加入适量去离子水, 按照浮选流程依次加入药剂进行实验, 并将充气刮泡时间调整为 5 min。根据单矿物浮选实验结果确定各捕收剂体系的用量及配比、pH 值以及淀粉的用量。浮选刮出的泡沫产品为尾矿, 槽内剩余的矿浆产品为精矿, 浮选结束后, 分别将精矿产品和尾矿产品进行烘干、称重, 对精矿和尾矿分别进行化验, 并计算出精矿产品的 Fe 回收率。

## 3 结果与讨论

### 3.1 阴阳离子组合捕收剂对单矿物浮选的影响

#### 3.1.1 pH 值对单矿物浮选的影响

不同捕收剂体系中, pH 值对石英和赤铁矿回收率的影响结果如图 2 所示。由图 2 可知, 随着 pH 值的升高, 各捕收剂体系下, 石英和赤铁矿的回收率均

呈现出先增大后减小的趋势。与单一 DDA 相比, 分别加入四种阴离子捕收剂后, 石英和赤铁矿的回收率均表现出不同程度的降低, 且在大部分 pH 值范围内, 石英的回收率均高于赤铁矿。除 DDA+NaOL 组合捕收剂在弱酸性条件下石英回收率保持较高水平外, 其余捕收剂体系下的石英回收率均在中性或弱碱性条件下达到最高。而对于赤铁矿回收率来说, 除 DDA+SDS 组合捕收剂在 pH 为弱碱性条件时达到最高外, 其余捕收剂体系均在中性条件下达到最高值。综合考虑, 确定 DDA、DDA+SDS、DDA+SLS、DDA+SDBS、DDA+NaOL 捕收剂体系的最佳浮选 pH 值分别为 7、7、7.3、5.5、4。

#### 3.1.2 捕收剂用量对单矿物浮选的影响

在最佳 pH 值条件下, 捕收剂用量对各捕收剂体系下石英和赤铁矿回收率的影响如图 3 所示。由图 3 可知, 随着捕收剂用量的增加, 不同捕收剂体系中, 石英回收率均呈现先增加后基本保持不变的趋势。而各捕收剂体系下赤铁矿的回收率的变化趋势却各不相同, DDA+SDS 组合捕收剂体系中, 在捕收剂用量试验范围内赤铁矿回收率均保持较低水平, 不超过 20%。其余四种捕收剂体系的赤铁矿回收率则在一定捕收剂用量范围内呈现随捕收剂用量增加而增加的现象。综合考虑, 确定 DDA、DDA+SDS、DDA+SLS、DDA+SDBS、DDA+NaOL 捕收剂体系的捕收剂总用量分别为 15、20、30、20、25 mg/L。

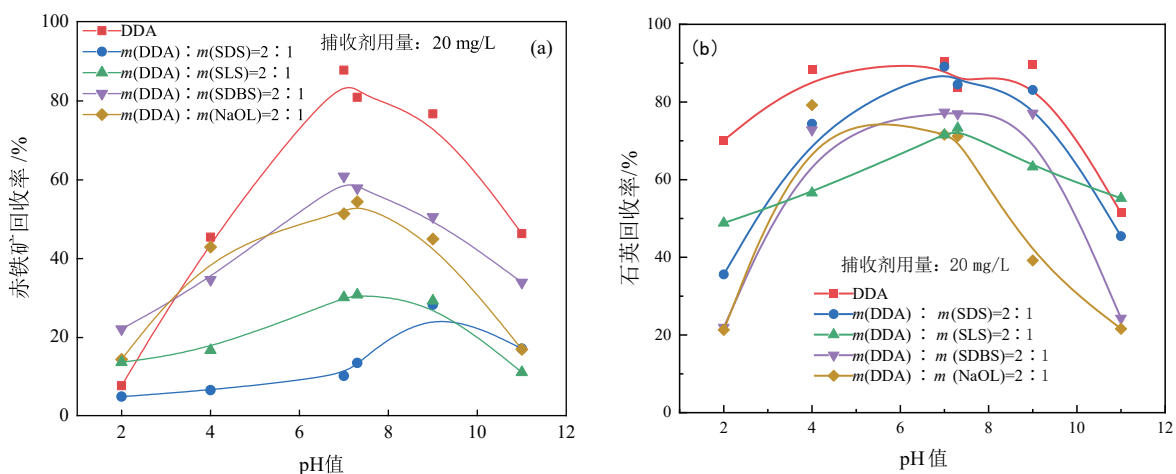


图 2 不同捕收剂体系中 pH 值对赤铁矿(a)和石英(b)回收率的影响

Fig. 2 Effects of pH value on recovery of hematite (a) and quartz (b) in different collector systems

#### 3.1.3 组合捕收剂配比对单矿物浮选的影响

DDA 与四种阴离子捕收剂的质量比对赤铁矿和石英回收率的影响结果如图 4~图 7 所示。由图 4 可知, 在 DDA+SDS 的组合捕收剂体系中, 随着 SDS 比例的增大, 赤铁矿回收率呈现先逐渐降低后稍升高的趋势, 石英回收率呈现先保持平缓后大幅度降低的趋

势。当  $m(\text{DDA}) : m(\text{SDS})$  为 4 : 1、2 : 1 和 1 : 1 时, 石英和赤铁矿的回收率呈现明显差异, 石英能够保持在较高的回收率水平, 而赤铁矿回收率大幅度降低, 对石英和赤铁矿的分离有利。当  $m(\text{SDS})$  大于  $m(\text{DDA})$  (即  $m(\text{DDA}) : m(\text{SDS})=1 : 1, 1 : 2, 1 : 4$ ) 时, 赤铁矿和石英的回收率均大幅度降低, 分离效果较差。说明适

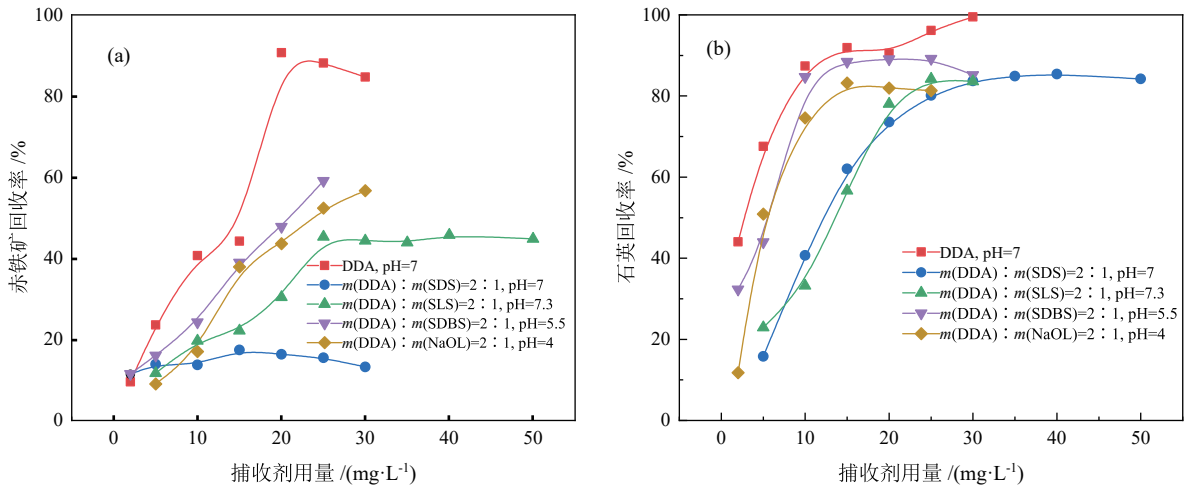


图3 不同捕收剂体系中捕收剂用量对赤铁矿(a)和石英(b)回收率的影响  
Fig. 3 Effects of collector dosage on recovery of hematite (a) and quartz (b) in different collector systems

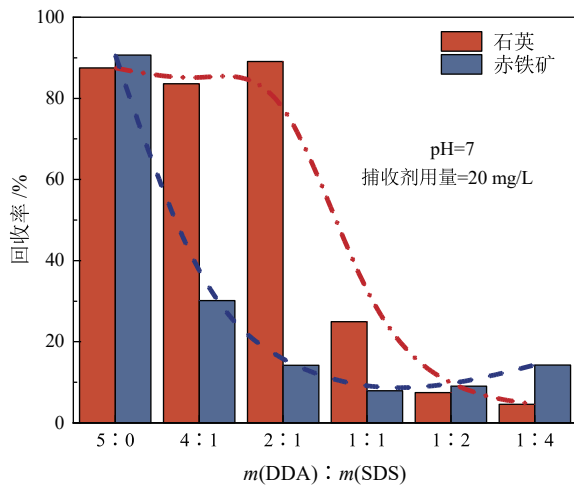


图4 十二胺与十二烷基磺酸钠的质量比对赤铁矿和石英回收率的影响  
Fig. 4 Effects of mass ratio of DDA and SDS on the recovery of hematite and quartz

当加入 SDS 可以提高 DDA 体系下赤铁矿和石英的浮选分离效果,有利于降低赤铁矿的抑制剂用量。当  $m(\text{DDA}) : m(\text{SDS})=2 : 1$  时,赤铁矿和石英的浮选分离效果最好,石英回收率保持在 89% 左右,赤铁矿回收率从 90.65% 降低至 14.20%,降低了 76.45 百分点,有利于赤铁矿的反浮选。

由图 5 可知,随着 SLS 比例的增大,石英回收率呈现先小幅度降低后大幅度降低的趋势,而赤铁矿回收率呈现先逐渐降低后小幅度提高的趋势。与单一 DDA 相比,当  $m(\text{DDA}) : m(\text{SLS})=2 : 1$  时,石英回收率可维持在较高水平,赤铁矿回收率可降低至 43.15%,有利于减少赤铁矿抑制剂用量。

由图 6 可知,随着 SDBS 比例的增大,石英回收率呈现先降低后小幅度升高的趋势,而赤铁矿回收率呈现大致逐渐降低的趋势。与单一 DDA 相比,当  $m(\text{DDA})$  大于  $m(\text{SDBS})$  时,组合捕收剂对石英和赤铁矿的回收率影响不大,当  $m(\text{DDA})$  小于或等于  $m(\text{SDBS})$

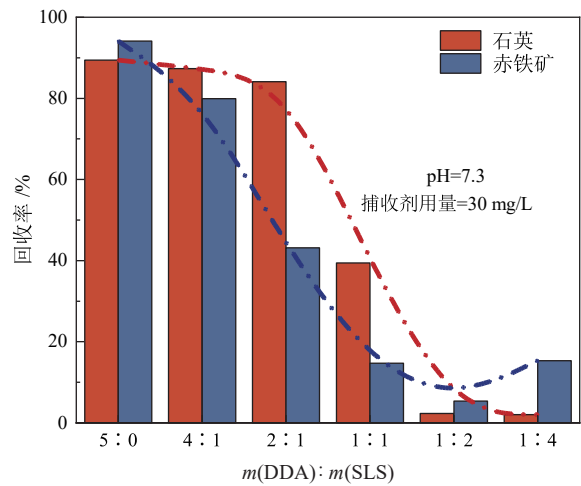


图5 十二胺与十二烷基硫酸钠的质量比对赤铁矿和石英回收率的影响  
Fig. 5 Effects of mass ratio of DDA and SLS on the recovery of hematite and quartz

时,石英和赤铁矿的回收率均有明显降低。当  $m(\text{DDS}) : m(\text{SDBS})=2 : 1$  时赤铁矿和石英的分离效果相对较好,石英回收率保持在 85% 以上,赤铁矿回收率降低了 12.3 百分点。

由图 7 可知,在 pH=4、捕收剂用量为 25 mg/L 的条件下,在 DDA 体系中添加 NaOL 会不同程度地降低石英和赤铁矿的回收率,当  $m(\text{DDA}) : m(\text{NaOL})$  大于 1 : 1 后降低幅度明显。当  $m(\text{DDA}) : m(\text{NaOL})=2 : 1$  时,石英回收率为 82.7%,赤铁矿回收率为 33.4%。

综上所述,DDA 与四种阴离子捕收剂在质量比为 2 : 1 的条件下,四种阴离子捕收剂对石英回收率影响相对较小,对赤铁矿回收率影响明显,降低幅度不同,说明四种阴离子组合捕收剂均能在不同程度上提高 DDA 体系下对赤铁矿和石英的选择性。相比较而言,DDA+SDS 组合捕收剂的效果最佳,既能保持较高的石英回收率,又能大幅度降低赤铁矿的回收率,



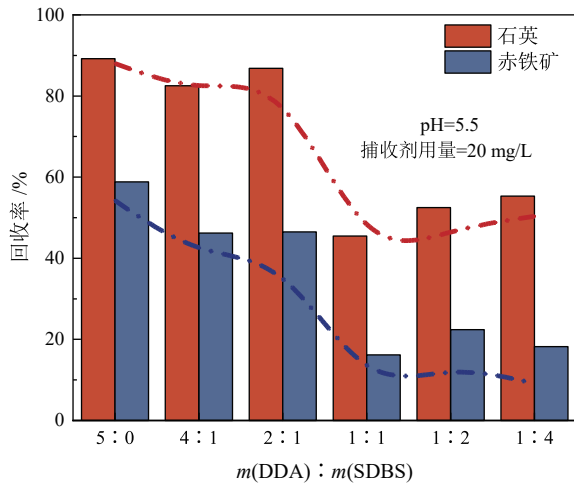


图 6 十二胺与十二烷基苯磺酸钠的质量比对赤铁矿和石英回收率的影响

Fig. 6 Effects of mass ratio of DDA and SDBS on the recovery of hematite and quartz

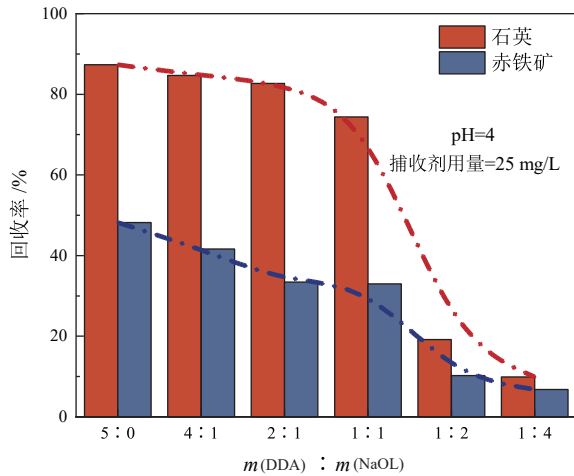
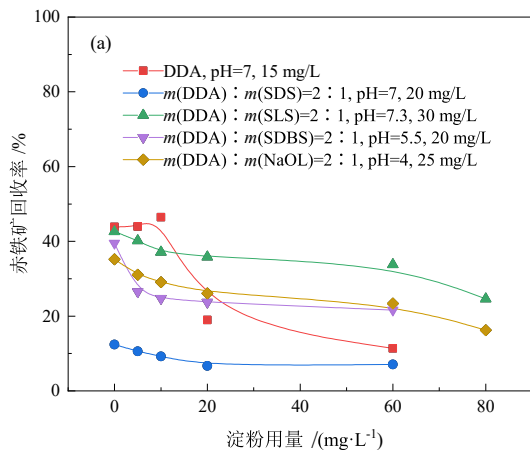


图 7 十二胺与油酸钠的质量比对赤铁矿和石英回收率的影响

Fig. 7 Effects of mass ratio of DDA and NaOL on the recovery of hematite and quartz

有利于减少赤铁矿抑制剂的用量, 提高反浮选赤铁矿的效果。



### 3.1.4 抑制剂用量对单矿物浮选的影响

采用淀粉作为赤铁矿抑制剂, 在各体系最佳 pH、捕收剂用量和质量比的条件下, 研究了抑制剂淀粉用量对石英和赤铁矿回收率的影响, 结果如图 8 所示。可知, 随着抑制剂用量的增加, 对各捕收剂体系下石英回收率影响相对较小。淀粉对赤铁矿回收率影响明显, 各捕收剂体系的赤铁矿回收率随淀粉用量增加均呈现不同程度的降低。还可以看出, DDA 与阴离子捕收剂组合使用时, 四种阴离子捕收剂对微细粒赤铁矿和石英分离效果为: SDS>NaOL>SLS/SDBS。尤其可以发现, 在 DDA+SDS 体系中, 当抑制剂用量为 20 mg/L 时, 赤铁矿的回收率达到较低值, 回收率仅为 6.7%, 而石英回收率保持在 90% 左右。可预测, DDA+SDS 组合捕收剂能够提高微细粒赤铁矿和石英的分离效果。

### 3.2 人工混合矿物浮选实验

在单矿物浮选实验的基础上 (pH=7, 捕收剂用量=20 mg/L, 淀粉用量=20 mg/L) 进行了 DDA+SDS 不同质量比的人工混合矿物浮选实验, 结果如图 9 所示。由图 9 可知, 与单一 DDA 相比, 当  $m(\text{DDA}) : m(\text{SDS}) = 4 : 1$  时, 得到的精矿 Fe 品位相近, 而 Fe 回收率提高了 6.9 个百分点; 当  $m(\text{DDA}) : m(\text{SDS}) = 2 : 1$  时, 精矿 Fe 品位提高了 1.7 个百分点, Fe 回收率提高了 18.6 个百分点。而当其比例小于等于 1 : 1 后, 浮选精矿指标大幅度下降, 不能有效实现赤铁矿与石英的分离。由结果可知, DDA 单独作捕收剂时, 精矿 Fe 品位为 44.0%, Fe 回收率为 68.4%; 当  $m(\text{DDA}) : m(\text{SDS})$  大于 1 : 1 (即 4 : 1 和 2 : 1) 时, 均可以获得优于单一捕收剂 (DDA) 的浮选指标。这说明在浮选分离微细粒赤铁矿和石英中, DDA 对分离效果起主要作用, SDS 的添加产生了协同作用, 提高了泡沫产品中石英的浮选回收率, 因此使得精矿产品中赤铁矿的品位和回收率得到提

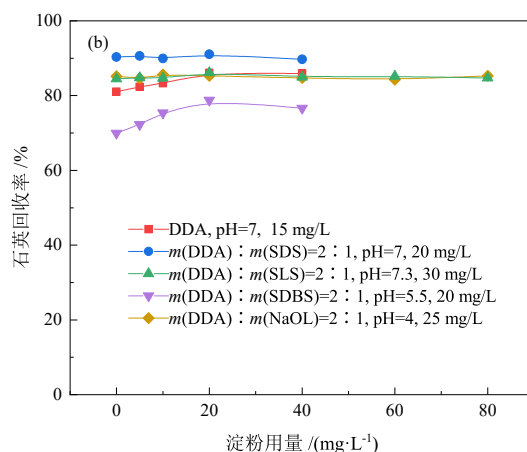


图 8 不同捕收剂体系中淀粉用量对赤铁矿 (a) 和石英 (b) 回收率的影响

Fig. 8 Effects of starch dosage on recovery of hematite (a) and quartz (b) in different collector systems

升。由此可知,  $m(\text{DDA}) : m(\text{SDS})$  的最佳质量比为 2 : 1, 可以作为提升微细粒赤铁矿和石英浮选分离效果的优良阴阳离子组合捕收剂。

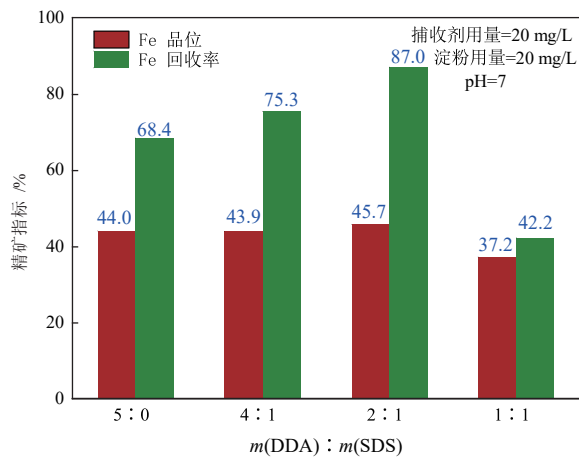


图9 人工混合矿物浮选结果  
Fig. 9 Flotation results of mixed minerals

## 4 结论

(1) 单矿物浮选实验表明, 与单一 DDA 相比, 四种阴离子捕收剂分别与 DDA 组合使用能够降低泡沫产品中赤铁矿的浮选回收率, 有利于减少赤铁矿的抑制剂用量。四种阴阳离子组合捕收剂在各自最佳浮选条件下, 赤铁矿和石英的分离效果均在 DDA 与阴离子捕收剂质量比为 2 : 1 时达到最优。十二胺与阴离子捕收剂组合使用时, 四种阴离子捕收剂对微细粒赤铁矿和石英分离效果依次为:  $\text{SDS} > \text{NaOL} > \text{SLS/SDBS}$ 。DDA 与 SDS 组合使用效果最优, 在  $\text{pH}=7$ 、捕收剂用量为 20 mg/L、 $m(\text{DDA}) : m(\text{SDS})=2 : 1$ 、抑制剂用量为 20 mg/L 的条件下, 泡沫产品中石英回收率可达 91.05%, 而赤铁矿回收率仅为 6.7%, 与单一 DDA 相比, 有利于提高赤铁矿反浮选的精矿指标。

(2) 人工混合矿物浮选实验表明, 在最佳浮选条件下, 当  $m(\text{DDA}) : m(\text{SDS})=2 : 1$  时, 精矿 Fe 品位及回收率分别为 45.7% 和 87.0%, 与单独添加 DDA 相比, 精矿 Fe 品位和回收率分别提高了 1.7 和 18.6 个百分点。该研究表明, 在 DDA 体系下添加一定比例的 SDS 可以产生协同作用, 与单一 DDA 作捕收剂相比, 可以降低赤铁矿抑制剂的用量, 并提高赤铁矿和石英的分离效果。因此, DDA+SDS 组合捕收剂可作为提高浮选分离微细粒赤铁矿和石英效果的优良阴阳离子组合捕收剂。

## 参考文献:

[1] 刘梦飞, 刘育明. “基石计划”对我国铁矿石资源开发格局的影响分析[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(5): 6-10.  
LIU M F, LIU Y M. Effect analysis of "Foundation Plan" on China's iron

ore resources development pattern[J]. China Mine Engineering, 2022, 51(5): 6-10.

[2] 中国矿产资源报告2022[J]. 自然资源情报, 2023(1): 2.  
China mineral resources report 2022[J]. Natural Resource Information, 2023(1): 2.

[3] 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 X M, WU X T, QI L P, 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.

[4] 王荣林, 李明军, 常鲁平, 等. 国外某赤铁矿选矿工艺研究[J]. 现代矿业, 2023, 39(1): 172-175.  
WANG R L, LI M J, CHANG L P, et al. Study on beneficiation technology of a hematite abroad[J]. Modern Mining, 2023, 39(1): 172-175.

[5] 马艺闻, 徐冬林. 赤铁矿常温浮选的阴离子捕收剂研制与试验[J]. 矿冶工程, 2014, 34(6): 53-55.  
MA Y W, XU D L. Development and evaluation of anionic collector KA-1 for hematite flotation at room temperature[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2014, 34(6): 53-55.

[6] 何建聪, 罗溪梅, 蒋旺强, 等. 十二胺与十二烷基磺酸钠组合捕收剂对赤铁矿浮选优化及其泡沫性能调控[J]. 有色金属工程, 2023, 13(5): 75-83.  
HE J C, LUO X M, JIANG W Q, et al. Optimization of mixed collector of DDA and SDS on flotation and foam during hematite flotation[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(5): 75-83.

[7] 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 Y F, LUO X M, SONG S X, 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.

[8] TSAVE P K, KOSTOGLU M, KARAPANTSIOS T D, et al. Enhancing fines recovery by hybrid flotation column and mixed collectors[J]. Minerals, 2023, 13(7): 849.

[9] XU L, HU Y, TIAN J, et al. Selective flotation separation of spodumene from feldspar using new mixed anionic/cationic collectors[J]. Minerals Engineering, 2016, 89: 84-92.

[10] 刘文宝, 甘琦强, 刘文刚, 等. 新型组合捕收剂对锂云母、钠长石和石英的浮选性能研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(3): 34-42.  
LIU W B, GAN Q Q, LIU W G, et al. Study on the flotation performance of a new combined collector for lepidolite, albite and quartz[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(3): 34-42.

[11] 常自勇, 李玉娇, 沈政昌, 等. 微细粒矿物浮选捕收剂的应用及其机理研究进展[J]. 工程科学学报, 2023, 45(11): 1807-1819.  
CHANG Z Y, LI Y J, SHEN Z C, et al. Advancements in the application and mechanism of fine-grained mineral flotation collectors[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(11): 1807-1819.

[12] LIU Y, XU R, SUN N, et al. Effect of metal ions on the flotation separation of biotite from quartz using mixed anionic/cationic collectors[J]. Chemical Engineering Science, 2023, 281: 119184.

[13] ZHANG N N, PANG T, HAN R, et al. Insight into anionic and cationic flotation discrepancy of quartz with altered surface roughness by acid etching[J]. Journal of Molecular Liquids, 2023, 381: 121816.

[14] ZHAO J, LUO H, LIU Y, et al. Mechanistic study and application of anionic/cationic combination collector ST-8 for the flotation of

- spodumene[J]. Minerals, 2023, 13(9): 1177.
- [ 15 ] BAI Y, WEN W, GAO Y, et al. Molecular dynamics simulations of the structure–property relationships of DDA/anionic surfactant mixtures at the air/water interface[J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 368: 120804.
- [ 16 ] 白阳, 崔万顺, 文伟翔, 等. 阴阳离子组合捕收剂在锂云母浮选气液界面的协同作用机理[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(1): 44–49.
- BAI Y, CUI W S, WEN W X, et al. Synergistic mechanism of mixed anionic/cationic collectors at gas–liquid interface in lepidolite flotation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(1): 44–49.
- [ 17 ] WANG L, LIU R, HU Y, et al. Adsorption behavior of mixed cationic/anionic surfactants and their depression mechanism on the flotation of quartz[J]. Powder Technology, 2016, 302: 15–20.
- [ 18 ] 罗柳, 王毓华, 朱广丽, 等. 混合捕收剂浮选锂辉石的应用及作用机理[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(3): 675–683.
- LUO L, WANG Y H, ZHU G L, et al. Application and interaction mechanism of mixed collector in flotation of spodumene[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(3): 675–683.
- [ 19 ] 张钊, 冯启明, 王维清, 等. 十二胺和十二烷基磺酸钠在长石石英表面的吸附[J]. 非金属矿, 2012, 35(4): 8–11, 15.
- ZHANG Z, FENG Q M, WANG W Q, et al. Adsorption of dodecyl amine and sodium dodecyl sulfonate on feldspar and quartz[J]. Non-metallic Mines, 2012, 35(4): 8–11, 15.
- [ 20 ] LI M, LIU Z, WANG B, et al. Selective flotation separation of fluorite from calcite using mixed anionic/cationic collectors[J]. Minerals Engineering, 2022, 178: 107423.
- [ 21 ] ZHANG Z Y, WEI Q, JIAO F, et al. Role of nanobubbles on the fine lepidolite flotation with mixed cationic/anionic collector[J]. Powder Technology, 2023, 427: 118785.

## Research on the Flotation Separation of Fine-grained Hematite and Quartz by Combined Cation–anion Collectors

JIA Lufan<sup>1</sup>, LUO Ximei<sup>1,2</sup>, WANG Yunfan<sup>2,4</sup>, SONG Zhenguo<sup>3</sup>, ZHOU Yongfeng<sup>1</sup>, JIANG Wangqiang<sup>1,2</sup>, HONG Xin<sup>1</sup>

1. Kunming University of Science and Technology, College of Land and Resources Engineering, Kunming 650093, Yunnan, China;

2. State Key Laboratory of Clean Utilization of Complex Non-ferrous Metal Resources, Kunming 650093, Yunnan, China;

3. State Key Laboratory of Mineral Processing Science and Technology, Beijing 100160, China;

4. Kunming University of Science and Technology, College of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming 650093, Yunnan, China

**Abstract:** The influence of four anionic collectors, namely sodium dodecyl sulfate (SDS), sodium lauryl sulfate (SLS), sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS), and sodium oleate (NaOL), in combination with the cationic collector dodecylamine (DDA), on the flotation separation of fine-grained (–18 μm) hematite and quartz was investigated. Single mineral experiments indicated that each of the four anionic collectors in combination with DDA reduced the flotation recovery of hematite in the foam product compared to DDA alone, thus favoring a reduction in the depressant dosage for hematite. When DDA was combined with anionic collectors, the order of separation effectiveness for fine-grained hematite and quartz was SDS > NaOL > SLS/SDBS. Among them, the DDA+SDS combined collectors exhibited the best performance under certain mass ratio conditions. Under the optimal flotation conditions (pH=7, collector dosage of 20 mg/L,  $m(\text{DDA}) : m(\text{SDS})=2 : 1$ , depressant dosage of 20 mg/L), the quartz recovery in the foam product reached 91.05%, while the hematite recovery was only 6.7%, facilitating hematite reverse flotation. Artificial mixed mineral flotation experiments showed that the DDA+SDS combined collectors ( $m(\text{DDA}) : m(\text{SDS})=2 : 1$ ) achieved a concentrate with Fe grade of 45.7% and a recovery rate of 87.0%. Compared to DDA alone, this represented an increase of 1.7 and 18.6 percentage points, respectively, contributing to an improved separation efficiency of hematite and quartz. DDA+SDS can be considered an excellent anionic–cationic collectors for the flotation separation of fine-grained hematite and quartz.

**Keywords:** hematite; quartz; dodecylamine; combined cation–anion collector; flotation

引用格式: 贾露繁, 罗溪梅, 王云帆, 宋振国, 周永锋, 蒋旺强, 洪欣. 阴阳离子组合捕收剂对微细粒赤铁矿与石英浮选分离的研究[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(1): 33–39.

JIA Lufan, LUO Ximei, WANG Yunfan, SONG Zhenguo, ZHOU Yongfeng, JIANG Wangqiang, HONG Xin. Research on the flotation separation of fine-grained hematite and quartz by combined cation–anion collectors[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(1): 33–39.