

# 赤铁矿常温/低温浮选捕收剂研究进展

姚富兴, 马艺闻, 张伦旭, 金丹, 孙欣

辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051

中图分类号: TD923.1; TD951.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)06-0130-10  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.08.007

**摘要** 目前我国应用的赤铁矿浮选捕收剂多数因含有较长烃链而水溶性差, 在浮选作业时常需要对矿浆进行加热处理, 增加了选厂生产能耗和成本。基于“双碳”背景研发赤铁矿常温捕收剂、低温捕收剂是优化赤铁矿浮选药剂制度、增效降耗的关键途径之一。归纳总结了近年来赤铁矿浮选体系的常温/低温新型捕收剂和复配型捕收剂的研究进展, 阐述了有利于实现赤铁矿常温/低温浮选过程的药剂特征活性有机基团及其对生产指标的影响, 旨在总结并拓宽赤铁矿新型常温/低温浮选捕收剂设计思路, 推动赤铁矿常温/低温浮选药剂的研发与应用, 进而逐步实现赤铁矿浮选过程的增效降耗。

**关键词** 赤铁矿; 浮选; 常温/低温捕收剂; 捕收剂; 组合药剂

## 0 引言

我国铁矿石资源丰富, 但存在品位低、矿石组成复杂、嵌布粒度细、开发难度大、共生关系复杂等特点, 产品质量难以满足钢铁厂要求, 导致我国铁矿资源供应不足<sup>[1-2]</sup>, 大量依赖进口, 极大地制约着我国经济发展<sup>[3]</sup>。鉴于我国铁矿石资源特点, 制备符合要求的铁精矿时浮选技术的重要性逐渐凸显<sup>[4]</sup>, 而捕收剂在浮选过程中起着至关重要的作用。目前, 在赤铁矿实际浮选生产过程中常采用脂肪酸类捕收剂, 其捕收效果受温度的影响较大, 通常在 35 °C 左右才能得到较好的分选指标<sup>[5]</sup>, 极大地增加了选矿的成本。为满足“碳达峰、碳中和”目标, 研究新型常温捕收剂对优化浮选药剂制度、降低实际生产成本具有重要意义。基于此, 本文探讨了赤铁矿常温/低温捕收剂的研究进展和未来面临的挑战, 旨在为其设计与研究拓展思路, 进一步推动赤铁矿常温/低温浮选药剂的研发和应用, 实现赤铁矿浮选过程的增效降耗。

## 1 赤铁矿常温浮选和传统赤铁矿捕收剂

### 1.1 赤铁矿常温浮选

捕收剂主要作用于固液界面, 改善矿物的疏水性,

增加矿物表面的抗剪切能力, 使得矿物表面的液体不容易移动, 进而阻止矿物表面完全润湿<sup>[6]</sup>。传统的赤铁矿捕收剂主要有油酸、月桂酸、豆蔻酸、软脂酸、亚油酸、亚麻酸等。浮选捕收剂按有用成分存在形式可分为阴离子捕收剂、阳离子捕收剂和两性捕收剂三大类<sup>[7]</sup>, 阴离子捕收剂通常用于正浮选富集铁矿物, 多为脂肪酸类、膦酸、膦酸等<sup>[8]</sup>; 阳离子捕收剂主要用于反浮选富集以石英为主的脉石矿物, 多使用胺类捕收剂, 如脂肪胺、十二胺、醚胺、季铵盐、氧化胺等<sup>[9]</sup>; 两性捕收剂主要为氨基酸类捕收剂, 如烷基氨基酸类、烷基氨基磺酸类等。赤铁矿等氧化矿物捕收剂大多分子链较长, 通常碳的个数在 8 个以上, 碳链过长会使捕收剂溶解性降低, 矿浆温度降低会增大捕收剂的黏度<sup>[10]</sup>, 要使捕收剂能够在常温/低温条件下和矿物进行作用通常需要加温处理; 赤铁矿的主要脉石矿物为石英, 现行常用捕收剂对赤铁矿和石英的选择性较差, 需采用反浮选才能将赤铁矿和石英有效分离。因此, 赤铁矿常温/低温捕收剂也应同时具备良好的溶解性、选择性和捕收性, 通过探索构建浮选药剂的结构、改性浮选药剂的性质, 如引入醚基、酰胺基等活性基团, 可有效地改善赤铁矿浮选捕收剂在常温条件下的溶解性, 改善常温/低温条件下捕收剂与矿物表/界面的物理、化学作用, 从而增强分选效果, 提高生产指标, 实现浮选过程中的增效降耗<sup>[11-12]</sup>。

收稿日期: 2023-09-15

基金项目: 辽宁科技大学研究生科技创新项目(LKDYC202226)

作者简介: 姚富兴(1998—), 男, 河南三门峡人, 硕士研究生, 研究方向铁矿浮选药剂, E-mail: xing3213653676@163.com。

通信作者: 马艺闻(1985—), 女, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 从事药剂构效设计与应用等研究方向, Email: me-myw@ustl.edu.cn。

## 1.2 传统赤铁矿捕收剂

传统捕收剂的捕收效果受温度因素影响较大,且要求矿浆溶液 pH 值、捕收剂用量的最佳适应范围也较窄。任爱军等人<sup>[13]</sup>采用油酸钠作捕收剂,研究变性淀粉对赤铁矿石的影响,结果表明变性淀粉对氯化钙活化的石英浮选可以产生抑制作用,但需要 pH 值为 11.5,捕收剂用量为 200 mg/L 才能取得较好的浮选效果。李志彬等人<sup>[14]</sup>利用研制的石油磺酸钙为主的磺酸盐捕收剂 M203 进行鞍山贫赤铁矿浮选工业实验,发现即使在 35 ℃ 的情况下得到的精矿铁品位和回收率均在 65% 以下。郑贵山等人<sup>[15]</sup>用十二烷基磺酸钠作捕收剂对赤铁矿浮选情况进行研究,捕收剂需要使用前加热到 30 ℃,调控矿浆 pH 值为 3~4 时方达到较好的浮选效果,获得铁品位为 61%、回收率为 56.25% 的铁精矿。许洪刚等人<sup>[16]</sup>利用研制的 HD202 捕收剂对鞍山式贫赤铁矿进行浮选实验,结果显示只有在 pH 值为 3.5、温度为 30 ℃ 的条件下浮选效果较好,获得铁品位为 66.24%、回收率为 87.25% 的铁精矿。于慧梅等人<sup>[17]</sup>利用餐饮废油制备的脂肪酸类捕收剂 JZQ-F 进行赤铁矿反浮选实验研究,浮选温度需要控制在 30 ℃ 左右,才可得到铁品位为 66.58%、铁回收率为 73.63% 的铁精矿。吴中贤等人<sup>[18]</sup>利用捕收剂 TD-II (脂肪酸类捕收剂),在 35 ℃ 条件下浮选赤铁矿,实验可获得铁品位 67.32%、铁回收率 82.27% 的精矿指标。任建伟等人<sup>[19]</sup>利用捕收剂 GS1 对赤铁矿进行浮选实验,在 30 ℃ 条件下可获得铁品位 69% 以上、铁回收率 90% 以上的精矿指标。邹春林等人<sup>[20]</sup>用两性捕收剂对齐大山混磁精矿进行浮选实验,可得到铁品位 67.31%、回收率 87.90% 的精矿指标。上述传统捕收剂的浮选效果比较如表 1 所示。

表 1 传统捕收剂的浮选效果  
Table 1 Flotation effects of conventional traps

捕收剂	适用浮选类型	铁品位/%	铁回收率/%	浮选温度/℃
M203 <sup>[14]</sup>	正浮选	61.62	62.02	30~35
十二烷基磺酸钠 <sup>[13]</sup>	正浮选	61.00	56.25	30
HD202 <sup>[16]</sup>	正浮选	66.24	87.25	30
JZQ-F <sup>[17]</sup>	反浮选	66.58	73.63	约 30
TD-II <sup>[18]</sup>	反浮选	67.32	82.27	35
GS1 <sup>[19]</sup>	反浮选	69.00	90.00	30

由表 1 可知,使用传统的赤铁矿捕收剂,要达到较好的捕收效果往往需要对矿浆加温到 30~35 ℃,再进行浮选操作,浮选效果及稳定性受温度影响较大。因此研发药剂用量少、捕收效率高、温度适应性广的常温/低温捕收剂成为研究赤铁矿浮选药剂的突破方向。

## 2 常温/低温捕收剂

近几年来,新型捕收剂的研究越来越多,如新型阴离子捕收剂(如 DX-1、CY 阴离子捕收剂等)、新型阳离子捕收剂(如醚胺类、季铵类阳离子捕收剂等)、组合捕收剂(CW-3、VM-1 组合捕收剂等),这些捕收剂在浮选时大多受温度影响较小,且捕收效果也相对较好。

### 2.1 新型阴离子捕收剂

阴离子捕收剂具有捕收效果好、选择性好<sup>[21]</sup>等特点,然而传统阴离子捕收剂也存在温度适应性差<sup>[22]</sup>、不易溶解、用量较大等缺点,在铁矿浮选过程产生了诸多问题。因此,为解决阴离子捕收剂的这些问题,可添加某种活性基团或引入活性基团来改变捕收剂的捕收性能<sup>[23]</sup>。对阴离子捕收剂进行改性,改性后的捕收剂具有较好的选择性和水溶性,增加了矿物表面捕收剂的活性位点和捕收剂的 LogP 值,降低了与矿物作用后的电位,增强了矿物表面的吸附作用,使捕收剂与矿物在常温条件下即可紧密结合,提高捕收剂的捕收性能和选择性<sup>[24-25]</sup>。

张行荣等人<sup>[26]</sup>通过化学改性和复配制备了一种耐低温型脂肪酸类捕收剂 BK427,对齐大山磁选精矿进行反浮选脱硅实验,在 15 ℃ 的条件下得到铁品位 65.20%、回收率 86.60% 的铁精矿,且该捕收剂具有较好的温度适应性。朱顺伟等人<sup>[27]</sup>针对选矿尾矿中的赤铁矿所使用捕收剂对温度敏感及原料性质多变等问题,研制了一种改性脂肪酸阴离子捕收剂 ZK-302,通过工业实验,在 15 ℃ 条件下,可获得铁品位 51.37%、回收率 64.21% 的铁精矿。夏夕雯等人<sup>[28]</sup>利用“在脂肪酸的非极性基上引入-O-对其进行改性”研制的新型常温捕收剂 DX-1 在 20 ℃ 条件下进行浮选实验,赤铁矿回收率可达 99.50%。

有机酸类可通过加成反应、取代反应及其副反应与脂肪酸类发生作用,反应后的混合物可作为一种新型捕收剂,弥补了阴离子捕收剂浮选温度高的缺点。闵程等人<sup>[29]</sup>以“有机羧酸类与小部分脂肪酸的混合物”为原料经过氯化反应得到 915BM 捕收剂,经过反浮选实验发现,捕收剂 915BM 在 25 ℃ 时具有良好的捕收效果,可获得铁品位 55.90%、铁回收率 80.73% 的铁精矿。董怡斌等人<sup>[30]</sup>采用“油酸类化合物为主体的有机酸和有机酸酯”经过氧化、取代等反应生成 QD 捕收剂,并进行赤铁矿的反浮选实验研究,在 20~25 ℃ 条件下,可得到铁品位在 52% 以上、回收率在 72% 以上的铁精矿。

科研人员对赤铁矿的亚种矿物镜铁矿及难选鲕状赤铁矿的低温浮选也进行了相关探索。王涛等人<sup>[31]</sup>

利用 CY 脂肪酸类捕收剂对安徽李楼镜铁矿进行反浮选实验研究, 结果表明, 在 20 ℃ 条件下可获得铁品位 66.61%、回收率 93.50% 的铁精矿。罗光明等人<sup>[32]</sup> 研发出新型耐低温捕收剂 TA-19, 药剂包含大量高度不饱和的脂肪酸, 并在脂肪酸分子上引入了“-O-、-SO<sub>3</sub>H 或 -OSO<sub>3</sub>H”官能团, 经过浮选实验获得了铁品位在 65% 以上、回收率在 85% 以上的铁精矿。为提高捕收剂的低温溶解性和低温适应性, 李文风等人<sup>[33]</sup> 以工业脂肪酸为原料, 引入“酰胺基、羧基”等活性基团制成捕收剂 CY-411, 通过对镜铁矿进行浮选实验, 获得铁品位 67.23%、回收率为 92.96% 的铁精矿, 有效提高了捕收剂的低温适应性和溶解性。高野等

人<sup>[34]</sup> 针对难选的鲕状赤铁矿, 研制出阴离子捕收剂 OMC-1, 该捕收剂中存在有“甲基、亚甲基、有机磷酸酯”等成分, 利用该捕收剂对宣龙鲕状赤铁矿进行反浮选实验, 结果显示捕收剂 OMC-1 对石英有较好的捕收效果, 可获得铁品位 65.39%、回收率 84.68% 的铁精矿。

以脂肪酸、有机酸、有机酸酯等为基础, 通过加入甲基、亚甲基、羟基、羧基、酰胺基以及磺酸基等基团, 经加成、取代或氯化等反应可制备出浮选性能优良的低温新型阴离子捕收剂, 制备流程如图 1 所示, 不同新型阴离子捕收剂对浮选指标和温度影响的差异如表 2 和图 2 所示。

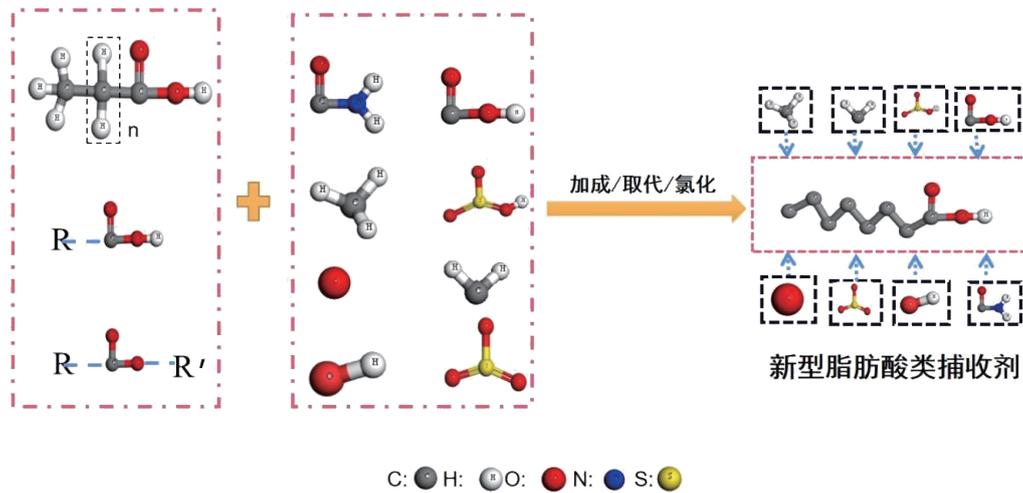


图 1 新型脂肪酸类阴离子捕收剂制备流程示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of preparation process of novel fatty acids

表 2 新型阴离子捕收剂的浮选指标  
Table 2 Flotation index of the new anionic collector

捕收剂	适用浮选类型	精矿铁品位/%	精矿回收率/%	浮选温度/℃	Δ℃
CY <sup>[31]</sup>	反浮选	66.61	93.50	20	15
Bk427 <sup>[26]</sup>	反浮选	65.20	86.60	15	20
Zk-302 <sup>[27]</sup>	正浮选	51.37	64.21	15	20
TA-19 <sup>[32]</sup>	反浮选	65.92	85.63	20	15
CY-411 <sup>[33]</sup>	反浮选	67.23	92.96	15	20
OMC-1 <sup>[34]</sup>	反浮选	65.39	84.68	12~15	20~23
915BM <sup>[29]</sup>	反浮选	55.90	80.73	25	10
QD <sup>[30]</sup>	反浮选	52↑	72.00	20~25	10~15

注: Δ℃表示温度与 35℃ 的差值, ↑表示某个数据以上。

综上, 新型阴离子捕收剂相比于传统捕收剂的水溶性增加, 浮选温度也较传统捕收剂温度有所降低, 一定程度上解决了传统捕收剂需要对矿浆进行加温的问题。由表 2 可知, 新型阴离子捕收剂的浮选温度较传统捕收剂的 35 ℃ 最大可以降低 23 ℃ 左右, 且在

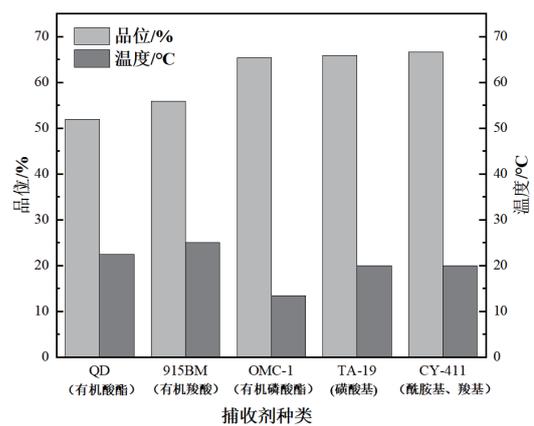


图 2 不同活性基团对新型阴离子捕收剂的浮选效果与温度影响差异

Fig. 2 Flotation effect of the new anion trap after the introduction of the group

低温下捕收剂的浮选效果也相对较好; 由图 2 可知, 甲基和羧基的加入均可提高精矿品位, 磺酸基、酰胺基、有机磷酸酯、有机酸类的引入在保障较好浮选效果的同时均可一定程度降低浮选温度, 有机磷酸酯、

酰胺基的引入使捕收剂在保证浮选效果的前提下有效降低浮选温度; 如有机磷酸酯、甲基、磺酸基、酰胺基、羧基的引入可使温度降低到 20 °C 以下, 精矿品位达到 65% 以上, 这些活性基团的引入可使捕收剂的溶解度增大、凝固点降低, 使得捕收剂在低温条件下能够有更好的适应性<sup>[35]</sup>。

## 2.2 新型阳离子捕收剂

我国阳离子捕收剂种类偏少, 具有进一步研发的潜力<sup>[36]</sup>。传统阳离子捕收剂具有选择性差、容易起泡、泡沫黏、消泡难、合成成本高以及对矿泥敏感等缺点<sup>[37-39]</sup>, 往往不能取得很好的捕收效果。阳离子捕收剂大部分是含氮的表面活性剂, 作为硅酸盐矿物的有效捕收剂, 在赤铁矿反浮选脱硅等方面的应用较多<sup>[40]</sup>。近年来, 阳离子的开发不再局限于脂肪胺和醚胺等领域, 胺类捕收剂的种类也由单一的脂肪胺发展到多种胺类, 例如醚胺、酰胺、多胺、缩合胺、芳香胺、吗啉及其季铵盐等, 在季铵盐、亚胺脲、酰胺基等领域开始不断地推陈出新, 如十八烷基二甲基苄基氯化铵、十六烷基三甲基溴化铵、十二烷基三甲基氯化铵、十四烷基三甲基氯化铵、甲萘胺等<sup>[41]</sup>。新型阳离子捕收剂具有对温度适应性强、与矿物作用快、分选效果好、药剂制度简单、工业操作可靠等优点<sup>[42-43]</sup>。

王伟之等人<sup>[44]</sup>在司家营铁矿阳离子反浮选实验降硅实验时, 使用 GE-609 烷基多胺醚捕收剂, 实验结果表明, 经过一粗一精两扫流程, 可获得铁品位 65.10%、回收率 85.39% 的铁精矿。杨雪<sup>[45]</sup>用新型捕收剂 GE-601 对尖山铁精矿进行反浮选实验, 可得到精矿铁品位为 69.41%、回收率为 98.42% 的优良指标。王春梅等人<sup>[46]</sup>利用 GE-609 阳离子捕收剂对含硅量较高的齐大山赤铁矿进行反浮选实验, 该捕收剂是烷基多胺醚,

由烷基单胺醚经过聚合、加氢等反应合成<sup>[47]</sup>, 浮选实验可以得到精矿铁品位 67.12%、回收率 83.55% 的优良指标。为解决使用传统阴离子捕收剂需要对矿浆加温的问题, 朱一民等人<sup>[48]</sup>研制出了一种醚胺类阳离子捕收剂 DCZ, 该捕收剂存在有  $-CH_2$ 、 $-NH_2$  等基团, 并用该捕收剂以石英、赤铁矿、磁铁矿为试样进行浮选性能研究, 结果表明了对赤铁矿有较好的浮选效果。

十二烷基胺类捕收剂作为一种常见的铁矿选别捕收剂应用广泛。佟柯霖等人<sup>[49]</sup>以“N, N-十二烷基二乙醇胺(BHDA)和 N, N-双(2-羟乙基)-N-甲基十二烷基氯化铵(BHMDC)”进行赤铁矿浮选实验研究, 可获得铁品位为 63.08%、回收率 66.02% 的铁精矿。周永锋等人<sup>[50]</sup>发现十二烷基三甲基氯化铵作为捕收剂时对赤铁矿和石英的分离效果较好, 可获得铁精矿品位在 50% 左右、回收率在 80% 左右。刘文刚等人<sup>[51]</sup>探讨了 N-十二烷基乙二胺(ND)在赤铁矿反浮选中的应用效果, 在常温条件下, 经过一粗一精两扫, 可获得铁品位为 66.72%、回收率为 93.46% 的铁精矿。王本英等人<sup>[52]</sup>发现向十二烷基胺类阳离子捕收剂中引入羟基或氨基官能团, 羟基有利于对石英的吸附, 利于赤铁矿的反浮选过程。

综上, 以十二烷基胺类、十二胺、季铵盐类为主体通过引入甲基、羟基、氨基、氮原子、氧原子、单胺醚、乙二胺、氯化铵等经过聚合、加氢、取代、加成、氯化反应可以得到新型阳离子捕收剂, 制备流程如图 3 所示, 不同新型阳离子捕收剂对浮选指标和温度影响的差异如表 3 和图 4 所示。

综上, 新型阳离子捕收剂药剂溶解性较好, 浮选温度也普遍较低。由表 3 可知, 浮选温度最多可降低至 5 °C, 比传统捕收剂需要加温浮选的温度降低了 30 °C 左右(与 35 °C 对比), 从而大大降低了矿浆温度过高

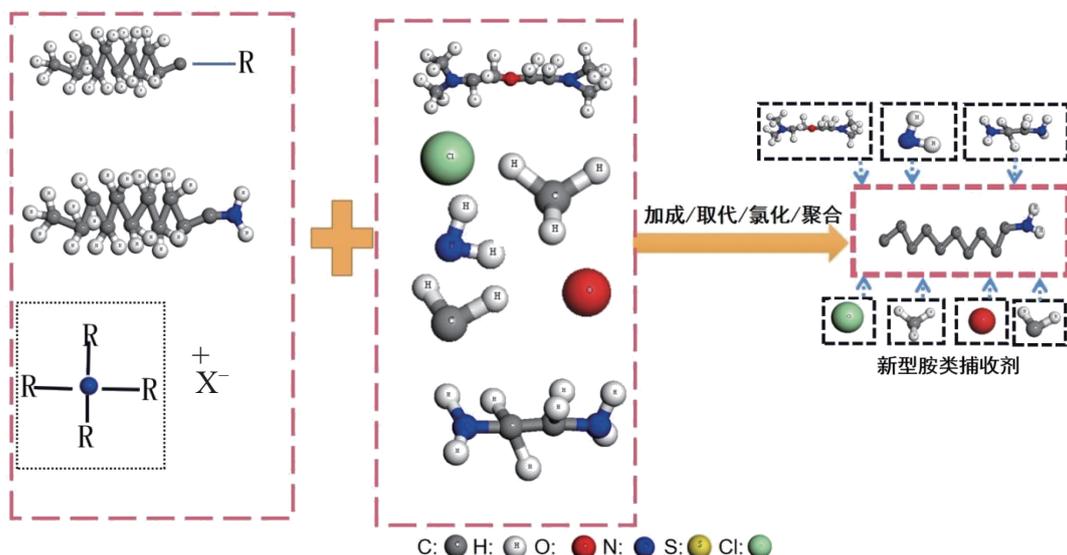


图 3 新型胺类阳离子捕收剂制备过程

Fig. 3 Preparation process of the novel amine cation collector

表 3 新型阳离子捕收剂的浮选效果

Table 3 Flotation effects of the new cationic traps

捕收剂	适用浮选类型	精矿铁品位/%	精矿铁回收率/%	浮选温度/℃	Δ℃
GE-601 <sup>[45]</sup>	反浮选	69.41	98.42	8~25	10~27
GE-609 <sup>[46]</sup>	反浮选	67.12	83.55	10~25	15~25
DCZ <sup>[48]</sup>	反浮选	67.39	99.00	5~35	0~30
BHMDC <sup>[49]</sup>	反浮选	63.08	66.02	12~18	17~23
十二烷基三甲基氯化铵 <sup>[50]</sup>	反浮选	50.00±2	80.00±2	25左右	10
ND <sup>[51]</sup>	反浮选	66.72	93.46	25	10

注：Δ℃表示温度与35℃的差值。

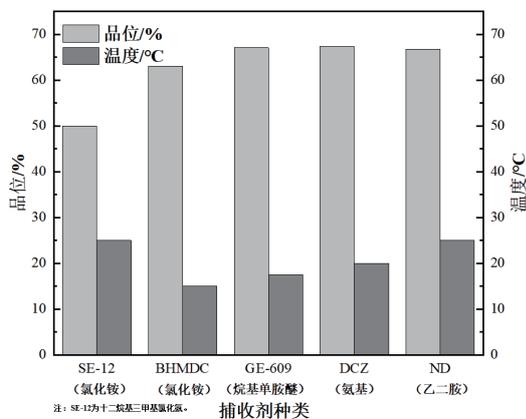


图 4 引入基团后新型阳离子浮选效果

Fig. 4 Effect of novel cation flotation after introducing introduction

而引起的浮选能耗,在较低温度下也可使用。且表 3 中的新型阳离子捕收剂的浮选效果与传统捕收剂的浮选效果基本一致。

由图 4 可知,烷基单胺醚通过聚合、加氢反应引入捕收剂中以及氨基和氯化铵的引入均可降低浮选温度,但烷基单胺醚的引入对浮选温度的降低幅度较大;氯化铵的引入可使药剂具有更好的选择性,有利于赤铁矿与石英的分离,且可以降低浮选温度;甲基的引入对捕收剂降低温度和提提高精矿品位作用较小。由此可知,烷基单胺醚通过聚合、加氢反应引入捕收剂中可较好地降低浮选温度和提提高精矿品位;氯化铵、烷基单胺醚、氨基的引入可使铁精矿品位达到 60% 以上。

综上所述,新型阴离子捕收剂和新型阳离子捕收剂都较传统捕收剂的浮选温度有了较大的降低,且新型阳离子捕收剂因其水溶性较好,浮选温度较新型阴离子捕收剂的浮选温度低,但新型阳离子捕收剂较阴离子捕收剂的选择性差,且易跑槽。因此,后续新型低温捕收剂的研究应进一步探索捕收剂极性基团和非极性结构对捕收效果与浮选温度的影响及构效关系。

### 3 组合捕收剂

为强化铁矿浮选效果,满足工业要求,组合捕收剂也成为主要的研究方向之一。组合药剂的重要特性是协同效应<sup>[53]</sup>,由不同捕收剂按照一定比例组成的组合捕收剂会产生共吸附、疏水端加长、改善溶液表面张力等作用,从而产生协同效应,使其具有比单一捕收剂更好的捕收效果<sup>[54]</sup>。组合捕收剂还具有改善生产指标、扩大药剂原料来源、减少药剂用量、降低环境污染以及降低药剂毒性的特点<sup>[55-57]</sup>,比合成新型捕收剂工序简便,且可获得较好的生产效益。组合捕收剂可将两个甚至多个捕收剂的性能进行组合,其组合方式主要有同型同类捕收剂组合、同型异类捕收剂组合、异型捕收剂组合<sup>[58-60]</sup>,将捕收剂进行组合后的浮选效果往往比组合前有明显的改善<sup>[61]</sup>。

为进一步提高铁矿分选指标,相关学者对组合捕收剂展开了大量的研究。组合捕收剂主要有捕收剂和表面活性剂组合以及主捕收剂和副捕收剂组合两种方式。姜永良等人<sup>[62]</sup>利用聚氧丙烯-聚氧乙烯枝杈型表面活性剂和链长为 C<sub>12</sub>~C<sub>20</sub> 的混合脂肪酸,在酸酯 160、皂化值 175、碘值 95 的条件下组合,表面活性剂与混合脂肪酸按质量比为 1:20 到 1:6 的比例自配成捕收剂,聚氧丙烯-聚氧乙烯枝杈型表面活性剂的加入增强了石英的疏水性,使其接触角增大,用该捕收剂进行浮选实验,结果显示,在 21℃ 时,该捕收剂作用下石英的疏水性明显提高,反浮选后得到铁精矿铁品位 68.16%、回收率 89.93% 的优良指标。朱一民等人<sup>[63]</sup>利用脂肪酸 LJ(其中主要基团有-CH、-CH<sub>2</sub>、-CH<sub>3</sub> 以及羧基中的羰基)与含 N 螯合捕收剂 LB 按 2:1 的比例配成组合捕收剂 TL-5,其中脂肪酸 LJ 可与赤铁矿作用,发生化学吸附生成脂肪酸铁,螯合捕收剂 LB 可与赤铁矿生成稳定的螯合物,两者相互作用使赤铁矿表面有了更多的活性位点,增强了捕收剂的选择性,浮选实验表明,组合捕收剂 TL-5 对赤铁矿有较好的捕收效果,可得到较高的回收率,且捕收剂用量较少,在 26℃ 条件下,可获得铁品位 40.47%、回收率 92.50% 的铁精矿,浮选温度比使用油酸钠捕收剂时降低了 4℃。脂肪酸类阴离子捕收剂(LTS)与阴离子表面活性剂(CW-3)组合后的捕收效果比单一药剂浮选效果有了明显的改善,表面活性剂 CW-3 可提高捕收剂的低温溶解性,从而使捕收剂 TL-5 实现了低温浮选。曹少航等人<sup>[64]</sup>将其分别组合并用于实验研究,经过浮选实验显示,在 10℃ 下,CW-3 和 LTS 按质量比 1:1 混合时对石英有较好的浮选效果,可获得铁品位 80%、回收率 80% 的铁精矿,赤铁矿精矿铁品位提高了 5.41 百分点。

为研究复合捕收剂在铁矿反浮选中的协同作用, 徐小草等人<sup>[65]</sup>将新型捕收剂 DJW-II 与辅助捕收剂 JW-4 组合, 辅助捕收剂 JW-4 可有效地改善浮选泡沫的体积, 使泡沫大小更利于浮选, 利用该组合捕收剂含有的 N-H 和 O-H 基团以及长链混合烃, 将该组合捕收剂进行浮选实验研究, 在 21 °C 条件下, 可获得铁品位 68.08%、回收率 69.85% 的铁精矿。王小飞等人<sup>[66]</sup>将一种自制的螯合捕收剂和油酸钠组成一种新型的复合捕收剂 WM-1, 并进行浮选实验, 自制的螯合捕收剂有效弥补了油酸钠低温下选择性差的缺点, 在 25 °C 的条件下, 可获得铁品位为 50.62%、回收率为 90.22% 的铁精矿。为提高超贫微细赤铁矿的选矿回收率, 祁忠旭等人<sup>[67]</sup>利用石油磺酸钠和塔尔油组合使

用以及纪振明<sup>[68]</sup>将氧化石蜡皂和塔尔油按照 1 : 1 的比例形成组合捕收剂并应用于难选赤铁矿实验, 有效提高了组合捕收剂的溶解性, 增强了浮选效果, 通过浮选实验可得, 较原有选别工艺有了大幅度的提高, 可分别获得铁品位为 60.00% 和 60.50%、回收率为 72.59% 和 80.95% 的铁精矿, 其中前者较原有选别工艺铁精矿品位提高了 8.37 百分点, 回收率提高了 20.42 百分点。

综上所述, 通过将表面活性剂与捕收剂复配或将两种捕收剂组合, 组成具有多元活性组分的新型捕收剂, 其相较于单一的捕收剂有着选择性好、疏水性强和温度适应性广等优点, 捕收剂的复配/组合如图 5 所示, 不同组合捕收剂的浮选效果如表 4 所示。

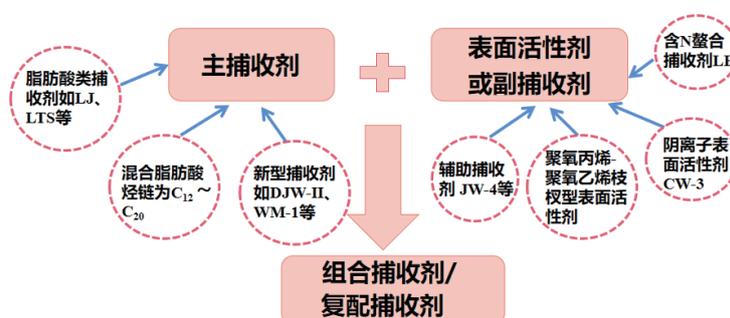


图 5 组合捕收剂制备流程

Fig. 5 Flow chart of combined collector preparation

表 4 组合捕收剂的浮选效果

Table 4 Flotation effects of the combined traps

捕收剂	适用浮选类型	精矿铁品位/%	精矿铁回收率/%	浮选温度/°C	Δ/°C
聚丙烯-聚氧乙烯枝杈型表面活性剂和混合脂肪酸链为C <sub>12</sub> ~C <sub>20</sub> 组合 <sup>[63]</sup>	反浮选	68.16	89.93	21	14
TL-5 (脂肪酸LJ与含N螯合捕收剂LB按2 : 1组合) <sup>[63]</sup>	正反选	40.47	92.50	26	19
CW-3和LTS按1 : 1混合 <sup>[64]</sup>	反浮选	80.00±2	80.00±2	10	25
DJW-II 与 JW-4组合 <sup>[65]</sup>	反浮选	68.08	69.85	21	14
WM-1 <sup>[66]</sup>	正浮选	50.62	90.22	25	10

注: Δ°C表示温度与35°C的差值。

由表 4 可知, 组合捕收剂浮选铁矿指标相对较好, 其中 CW-3(阴离子表面活性剂)和 LTS(脂肪酸类阴离子捕收剂)按质量比 1 : 1 混合, 较传统捕收剂的浮选温度降低程度较大, 降低幅度达到了 25 °C; 且表面活性剂与捕收剂的组合较捕收剂与捕收剂组合的浮选效果要好。

综上, 组合捕收剂通过增加多活性基团(氨基、羟基、羰基等), 在保证生产指标的同时有效降低了浮选温度, 可在一定程度上解决使用传统捕收剂浮选赤铁矿的加温问题, 推进了赤铁矿的绿色高效浮选。

## 4 结论

新型常温/低温捕收剂较传统捕收剂能有效地改善在浮选过程中矿浆加温控温、能耗过大的问题。甲基和羧基的引入均可提高精矿品位, 磺酸基、有机酸类、烷基单胺醚、氨基和氯化铵的引入可降低浮选温度, 有机磷酸酯、酰胺基的引入使捕收剂在保证较好的浮选效果前提下降低浮选温度; 氯化铵的引入还可使药剂具有更好的选择性, 有利于赤铁矿与石英的分离。有机磷酸酯、甲基、磺酸基、酰胺基、羧基的适当

引入可使赤铁矿浮选温度降低到 20 ℃ 以下, 铁品位达到 65% 以上, 而氯化铵、烷基单胺醚、氨基的适当引入可使铁品位达到 60% 以上。

因此, 在捕收剂结构中或矿浆中引入上述活性基团可有效降低赤铁矿浮选温度, 并达到生产指标要求。为了有力践行“绿水青山就是金山银山”的可持续发展战略和“双碳目标”, 降低浮选生产成本, 可进一步开展以下研究: (1) 适于多温度范围调控的新型捕收剂的研制; (2) 微细粒难选铁矿物浮选的新型捕收剂的研发; (3) 新型常温/低温捕收剂药剂构效关系机理研究; (4) 绿色高效新型常温捕收剂的工业化应用等。

### 参考文献:

- [1] 宋仁峰, 李维兵, 刘华艳, 等. 我国铁矿石反浮选技术发展综合评述[J]. 金属矿山, 2009(9): 13-18.  
SONG R F, LI W B, LIU H Y, et al. Comprehensive review on the development of reverse flotation technology of iron ore in China[J]. Metal Mine, 2009(9): 13-18.
- [2] 刘军, 靳淑韵. 中国铁矿资源的现状与对策[J]. 中国矿业, 2009, 18(12): 1-2+19.  
LIU J, JIN S Y. Current situation and countermeasures of iron ore resources in China[J]. China Mining, 2009, 18(12): 1-2+19.
- [3] ALINE PEREIRA LEITE NUNES, CLÁUDIO LÚCIO LOPES PINTO, GEORGE EDUARDO SALES VALADO, et al. Floatability studies of wavellite and preliminary results on phosphorus removal from a Brazilian iron ore by froth flotation[J]. Minerals Engineering, 2012(39): 206-212.
- [4] 余永富, 陈雯, 麦笑宇. 提高铁精矿质量实现高炉节能减排增效[J]. 矿产保护与利用, 2009(1): 13-16.  
YU Y F, CHEN W, MAI X Y. Improve the quality of iron concentrate to achieve blast furnace energy conservation and emission reduction efficiency[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2009(1): 13-16.
- [5] 吴文红, 吴承优, 王秋林, 等. 高效低温捕收剂选别关宝山铁矿实验[J]. 现代矿业, 2018, 34(1): 136-138+144.  
WU W H, WU C Y, WANG Q L, et al. High-efficiency low-temperature collector selection test of Guanbaoshan Iron Mine[J]. Modern Mining, 2018, 34(1): 136-138+144.
- [6] 孟晓光. 捕收剂和起泡剂作用机理分析[J]. 煤炭加工与综合利用, 2017(5): 44-46.  
MENG X G. Mechanism analysis of collector and foaming agent[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2017(5): 44-46.
- [7] 贺寒冰, 何廷树, 王鑫, 等. 矿浆温度对方铅矿浮选效果的影响及机理研究[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(6): 88-94.  
HE H B, HE T S, WANG X, et al. Study on the effect and mechanism of pulp temperature on galena flotation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(6): 88-94.
- [8] 杨茂麟, 邓朝勇, 徐本军. 铁矿石浮选药剂的研究现状[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(11): 1-3+46.  
YANG M L, DENG C Y, XU B J. Research status of iron ore flotation reagents[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 23(11): 1-3+46.
- [9] 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 T. Application of flotation reagent at normal temperature in Lilou Iron Mine, Anhui Province[J]. Modern Mining, 20, 36(7): 107-110.
- [10] 肖玮, 邵延海, 尉佳怡, 等. 钛铁矿浮选药剂研究现状及展望[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(5): 160-167.  
XIAO W, SHAO Y H, WEI J Y, et al. Research status and prospect of flotation reagents for ilmenite[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(5): 160-167.
- [11] 余攀, 丁湛, 李春龙, 柏少军, 等. 我国钛铁矿矿石浮选药剂研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(2): 82-87.  
YU P, DING Z, LI C L, BAI S J, et al. Research progress on flotation reagents for ilmenite ore in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(2): 82-87.
- [12] 张朝宏, 戴惠新. 铁矿石反浮选捕收剂现状及未来发展趋势[J]. 矿产综合利用, 2012(2): 3-6.  
ZHANG C H, DAI H X. Present situation and future development trend of iron ore reverse flotation collector[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2012(2): 3-6.
- [13] 任爱军, 孙传尧. 油酸钠作捕收剂时变性淀粉对赤铁矿及石英可浮性的影响[J]. 矿冶, 2018, 27(3): 1-6+12.  
REN A J, SUN C Y. Effect of modified starch on floatability of hematite and quartz when sodium oleate is used as collector[J]. Mining and Metallurgy, 2018, 27(3): 1-6+12.
- [14] 李志彬, 马洪显. M203捕收剂浮选东鞍山高亚铁难选贫赤铁矿工业实验[J]. 金属矿山, 1994(1): 37-40.  
LI Z B, MA H X. Industrial test on flotation of high ferrous refractory lean hematite in Donganshan by M203 collector[J]. Metal Mine, 1994(1): 37-40.
- [15] 郑贵山, 刘炯天. 十二烷基磺酸钠浮选赤铁矿的研究[J]. 金属矿山, 2009(9): 70-73.  
ZHENG G S, LIU J T. Study on flotation of hematite with sodium dodecyl sulfonate[J]. Metal Mine, 2009(9): 70-73.
- [16] 许洪刚, 刘桂云. HD202捕收剂在鞍山式贫赤铁矿酸性正浮选工艺中的实验研究[J]. 金属矿山, 2009(1): 74-77.  
XU H G, LIU G Y. Experimental study on acidic positive flotation process of Anshan-type lean hematite with HD202 collector[J]. Metal Mine, 2009(1): 74-77.
- [17] 于慧梅, 王化军, 孙传尧. 餐饮废油制备JZQ-F捕收剂反浮选赤铁矿石实验研究[J]. 金属矿山, 2017(11): 64-69.  
YU H M, WANG H J, SUN C Y. Experimental study on reverse flotation of hematite ore by JZQ-F collector from waste cooking oil[J]. Metal Mine, 2017(11): 64-69.
- [18] 吴中贤, 杨晓, 于晓兵, 等. 响应曲面法优化赤铁矿纳米气泡反浮选实验研究[J]. 黄金, 2023, 44(2): 38-45.  
WU Z X, YANG X, YU X B, et al. Optimization of reverse flotation of hematite nanobubbles by response surface methodology[J]. Gold, 2023, 44(2): 38-45.
- [19] 任建伟, 王毓华. 铁矿反浮选脱硅的实验研究[J]. 矿产保护与利用, 2004(1): 31-34.  
REN J W, WANG Y H. Experimental study on reverse flotation desilication of iron ore[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2004(1): 31-34.
- [20] 邹春林, 张范春, 朱一民, 等. 用新型捕收剂DA-1反浮选齐大山选厂混磁精[J]. 金属矿山, 2012(3): 63-65.  
ZOU C L, ZHANG F C, ZHU Y M, et al. Reverse flotation of mixed magnetic concentrate from Qidashan Concentrator with a new collector DA-1[J]. Metal Mine, 2012(3): 63-65.
- [21] 宋仁峰, 郭客, 张长奎, 等. 新型LKD阴离子反浮选捕收剂的研究[J]. 金属矿山, 2010(3): 57-61.  
SONG R F, GUO K, ZHANG C K, et al. Study on a new LKD anionic

- reverse flotation collector[J]. *Metal Mines*, 2010(3): 57-61.
- [22] 马艺闻,徐冬林.赤铁矿常温浮选的阴离子捕收剂研制与实验[J].*矿冶工程*,2014,34(6):53-55.  
MA Y W, XU D L. Development and test of anionic collector for hematite flotation at room temperature[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2014, 34(6): 53-55.
- [23] 徐冬林,王长艳,张玲.赤铁矿常温浮选的阴离子捕收剂研制与实验[C]//中国矿业科技文汇—2014,2014:670-672.  
XU D L, WANG C Y, ZHANG L. Development and test of anionic collector for hematite flotation at room temperature[C]//*China Mining Science and Technology Wenhui—2014*, 2014: 670-672.
- [24] 张月.几种新型脂肪酸类捕收剂改性药剂介绍[J].*盐湖研究*,2007(2):34-37.  
ZHANG Y. Introduction of several new fatty acid collectors[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2007(2): 34-37.
- [25] 王福良.铜铅锌铁主要硫化氧化矿物浮选的基础理论研究[D].沈阳:东北大学,2011.  
WANG F L. Basic theoretical study on flotation of main sulfide oxide minerals of copper, lead, zinc and iron[D]. Shenyang: Northeast University, 2011.
- [26] 张行荣,刘崇峻,艾晶,等.新型耐低温捕收剂BK427在赤铁矿反浮选脱硅中的应用[J].*中国矿业*,2014,23(S2):270-272.  
ZHANG X R, LIU C J, AI J, et al. Application of a novel low-temperature tolerant collector BK427 in reverse flotation desilication of hematite[J]. *China Mining Magazine*, 2014, 23(S2): 270-272.
- [27] 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实验[J].*烧结球团*,2022,47(4):71-76+98.  
ZHU S W, LI X L, LI Y L, et al. Application test of new collector in hematite recovery from tailings[J]. *Sintered Pellets*, 2022, 47(4): 71-76+98.
- [28] 夏夕雯,梁广泉,朱一民.新型常温捕收剂DX-1对赤铁矿的浮选性能研究[J].*金属矿山*,2018(6):75-79.  
XIA X W, LIANG G Q, ZHU Y M. Study on the flotation performance of a new normal temperature collector DX-1 for hematite[J]. *Metal Mines*, 2018(6): 75-79.
- [29] 闵程,胡向梅,张汉泉.复配阴离子捕收剂在高磷鲕状赤铁矿反浮选中的应用[J].*矿冶工程*,2017,37(2):49-53.  
MIN C, HU X M, ZHANG H Q. Application of compound anionic collector in reverse flotation of high phosphorus oolitic hematite[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2017, 37(2): 49-53.
- [30] 董怡斌,强敏,段正义,等.QD捕收剂对鄂西高磷鲕状赤铁矿的反浮选效果[J].*金属矿山*,2010(2):62-65.  
DONG Y B, QIANG M, DUAN Z Y, et al. Reverse flotation effect of QD collector on high phosphorus oolitic hematite in western Hubei[J]. *Metal Mine*, 2010(2): 62-65.
- [31] 王涛,龚豪,武利朔,等.安徽李楼镜铁矿低温捕收剂反浮选实验研究[J].*矿产保护与利用*,2015(3):34-37.  
WANG T, GONG H, WU L S, et al. Experimental study on low temperature collector reverse flotation of Anhui Lilou specularite[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2015(3): 34-37.
- [32] 罗光明.耐低温捕收剂TA-19在李楼铁矿的研究及应用[J].*矿业工程*,2020,18(5):41-44.  
LUO G M. Research and application of low temperature resistant collector TA-19 in Lilou Iron Mine[J]. *Mining Engineering*, 2020, 18(5): 41-44.
- [33] 李文凤,刘旭.铁矿低温捕收剂CY-411的研制与应用实验研究[J].*金属材料与冶金工程*,2014,42(4):42-44+54.  
LI W F, LIU X. Development and application of low temperature collector CY-411 for iron ore[J]. *Metallic Materials and Metallurgical Engineering*, 2014, 42(4): 42-44+54.
- [34] 高野,张亚辉,周南,等.新型捕收剂在宣龙鲕状赤铁矿反浮选中的实验研究[J].*矿产保护与利用*,2017(5):34-37+43.  
GAO Y, ZHANG Y H, ZHOU N, et al. Experimental study of new collectors in reverse flotation of Xuanlong oolitic hematite[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2017(5): 34-37+43.
- [35] 朱一民,刘杰,李艳军.非硫化矿浮选药剂作用原理[M].北京:冶金工业出版社,2021.  
ZHU Y M, LIU J, LI Y J. Action principle of non-sulfide ore flotation reagent[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2021.
- [36] 刘文宝.赤铁矿反浮选高选择性阳离子捕收剂的合成及浮选性能研究[D].沈阳:东北大学,2020.  
LIU W B. Synthesis and flotation performance of highly selective cationic collector for reverse flotation of hematite[D]. Shenyang: Northeast University, 2020.
- [37] Weidi Z, Shuang L, Qilong R, et al. Proposing a novel factor influencing flotation collector abilities to collect minerals by comparing two cationic collectors N, N-bis(2-hydroxy-3-chloropropyl) dodecylamine and dodecylamine[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 640.
- [38] Weichao L, Wenbao L, Kelin T, et al. Synthesis and flotation performance of a novel low-foam viscous cationic collector based on hematite reverse flotation desilication system[J]. *Minerals Engineering*, 2023, 201.
- [39] Zhongxian W, Dongping T, Youjun T, et al. A novel cationic collector for silicon removal from colophane using reverse flotation under acidic conditions[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2023, 30(6):1038-1047.
- [40] 刘文宝,刘文刚,段浩,等.阳离子捕收剂及其分子结构设计理论研究进展[J].*金属矿山*,2019(9):15-21.  
LIU W B, LIU W G, DUAN H, et al. Research progress of cationic collector and its molecular structure design theory[J]. *Metal Mine*, 2019(9): 15-21.
- [41] 余新阳,钟宏,刘广义.阳离子反浮选脱硅捕收剂研究现状[J].*轻金属*,2008(6):6-10.  
YU X Y, ZHONG H, LIU G Y. Research status of cationic reverse flotation desilication collector[J]. *Light Metals*, 2008(6): 6-10.
- [42] 张永,钟宏,谭鑫,等.阳离子捕收剂研究进展[J].*矿产保护与利用*,2011(3):44-49.  
ZHANG Y, ZHONG H, TAN X, et al. Research progress of cationic collectors[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2011(3): 44-49.
- [43] PANXING Z, WENGANG L, WENBAO L, et al. Novel low-foam viscous cationic collector 2-[2-(Tetradecylamino)ethoxy]ethanol: Design, synthesis, and flotation performance study to quartz[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 307. DOI.org/10.1016/j.seppur.2022.122633.
- [44] 王伟之,刘泽伟,王立宇,等.司家营铁矿阳离子反浮选降硅正交实验[J].*矿产综合利用*,2016(6):35-38.  
WANG W Z, LIU Z W, WANG L Y, et al. Sijiaying iron ore cationic reverse flotation orthogonal test[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2016(6): 35-38.
- [45] 杨雪.新型捕收剂在尖山铁精矿反浮选中的实验探讨[J].*华北国土资源*,2012(3):127-129.  
YANG X. Experimental study of new collectors in reverse flotation of Jianshan iron concentrate[J]. *North China Land Resources*, 2012(3):

- 127-129.
- [46] 王春梅, 葛英勇, 王凯金, 等. GE-609捕收剂对大赤铁矿反浮选初探[J]. 有色金属(选矿部分), 2006(4): 41-43.  
WANG C M, GE Y Y, WANG K J, et al. Preliminary study on reverse flotation of Qidashan hematite with GE-609 collector[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2006(4): 41-43.
- [47] 葛英勇. 新型捕收剂烷基多胺醚(GE-609)的合成及浮选性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.  
GE Y Y. Synthesis and flotation performance of a new collector alkyl polyamine ether ( GE-609 ) [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [48] 朱一民, 乘舟越洋, 骆斌斌. 一种新型阳离子捕收剂DCZ浮选性能研究[J]. 矿产综合利用, 2017(1): 32-36.  
ZHU Y M, CHENG Z Y Y, LUO B B. Study on flotation performance of a new cationic collector DCZ[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017(1): 32-36.
- [49] 佟柯霖, 刘文宝, 刘文刚, 等. 季铵化对阳离子捕收剂N,N-十二烷基二乙醇胺性能的影响研究[J]. 金属矿山, 2021(12): 28-33.  
TONG K L, LIU W B, LIU W G, et al. Effect of quaternization on the performance of cationic collector N, N-dodecyl diethanolamine[J]. Metal Mine, 2021(12): 28-33.
- [50] 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. Effects of four cationic collectors on flotation behavior of hematite and quartz[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(2): 56-61.
- [51] 刘文刚, 魏德洲, 崔宝玉, 等. 新型捕收剂在赤铁矿反浮选中的应用[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(4): 575-578.  
LIU W G, WEI D Z, CUI B Y, et al. Application of new collectors in reverse flotation of hematite[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2011, 32(4): 575-578.
- [52] 王本英, 徐新阳, 陈熙, 等. 十二烷基胺类捕收剂的取代基基因特性对其浮选性能的影响研究[J]. 金属矿山, 2020(6): 31-35.  
WANG B Y, XU X Y, CHEN X, et al. Study on the effect of substituent gene characteristics of dodecylamine collectors on their flotation performance[J]. Metal Mines, 2020(6): 31-35.
- [53] 王纪镇, 印万忠, 刘明宝, 等. 浮选组合药剂协同效应定量研究[J]. 金属矿山, 2013(5): 62-66.  
WANG J Z, YIN W Z, LIU M B, et al. Quantitative study on synergistic effect of flotation combined reagents[J]. Metal Mines, 2013(5): 62-66.
- [54] 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 new combined collectors for lepidolite, albite and quartz[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(3): 34-42.
- [55] 卢颖. 关于组合药剂在浮选工艺应用的探讨[J]. 中国矿业, 2000(S1): 269-271.  
LU Y. Discussion on the application of combined reagents in flotation process[J]. China Mining Magazine, 2000(S1): 269-271.
- [56] 卢颖, 孙胜义. 组合药剂的发展及规律[J]. 矿业工程, 2007(6): 42-44.  
LU Y, SUN S Y. The Development and Law of Combined Reagents[J]. Mining Engineering, 2007(6): 42-44.
- [57] Qiang L, Yating L, Jiyan S, et al. Synergistic detoxification by combined reagents and safe filling utilization of cyanide tailings[J]. Chemosphere, 2022, 312(P1).
- [58] 刘述忠, 李晓阳, 徐晓军, 等. 捕收剂组合使用的研究概况[J]. 云南冶金, 2002(4): 17-20.  
LIU S Z, LI X Y, XU X J, et al. Research on the combination of collectors[J]. Yunnan Metallurgy, 2002(4): 17-20.
- [59] MAITI, K, BHATTACHARYA, SC, MOULIK, SP, et al. Physicochemistry of the binary interacting mixtures of cetylpyridinium chloride (CPC) and sodium dodecylsulfate (SDS) with special reference to the catanionic ion-pair (coacervate) behavior[J]. Colloids and Surfaces, A. Physicochemical and Engineering Aspects, 2010, 355(1/3): 88-98.
- [60] Qian Y, Ding W, Wang Z, et al. New combined depressant/collectors system for the separation of powellite from dolomite and the interaction mechanism[J]. Minerals, 2020, 10(3): 291.
- [61] QIONGYIN M, HANYU Z, LEMING O. Flotation separation of chalcopyrite and talc using calcium ions and calcium lignosulfonate as a combined depressant[J]. Metals, 2021, 11(4): 651.
- [62] 姜永良, 付泳贺, 姜效军, 等. 组合阴离子捕收剂对石英的吸附机理研究[J]. 金属矿山, 2020(11): 118-123.  
JIANG Y L, FU Y H, JIANG X J, et al. Adsorption mechanism of quartz by combined anionic collectors[J]. Metal Mines, 2020(11): 118-123.
- [63] 仝丽娟, 朱一民, 李艳军, 等. 组合药剂TL-5对东鞍山赤铁矿的捕收性能研究[J]. 现代矿业, 2010, 26(8): 34-37.  
TONG L J, ZHU Y M, LI Y J, et al. Study on the collecting performance of combined reagent TL-5 for Donganshan hematite[J]. Modern Mining, 2010, 26(8): 34-37.
- [64] 曹少航, 印万忠, 姚金, 等. 组合捕收剂在赤铁矿常温反浮选中的应用[J]. 金属矿山, 2016(12): 77-81.  
CAO S H, YIN W Z, YAO J, et al. Application of combined collectors in reverse flotation of hematite at room temperature[J]. Metal Mine, 2016(12): 77-81.
- [65] 徐小革, 乘舟越洋, 朱一民, 等. 复合捕收剂在铁矿石反浮选中的协同作用[J]. 金属矿山, 2019(2): 92-96.  
XU X G, CHENG Z Y Y, ZHU Y M, et al. Synergistic effect of composite collectors in reverse flotation of iron ore[J]. Metal Mine, 2019(2): 92-96.
- [66] 王小飞, 米金月, 陈先龙, 等. 组合捕收剂WM-1对东鞍山赤铁矿的捕收性能[J]. 金属矿山, 2010(8): 51-54.  
WANG X F, MI J Y, CHEN X L, et al. Collection performance of combined collector WM-1 for Donganshan hematite[J]. Metal Mine, 2010(8): 51-54.
- [67] 祁忠旭, 韩远燕, 孙大勇, 等. 提高云南某超贫微细赤铁矿选矿回收率的研究[J]. 烧结球团, 2020, 45(5): 59-62.  
QI Z X, HAN Y Y, SUN D Y, et al. Study on improving the recovery rate of an ultra-low fine hematite in Yunnan[J]. Sintered pellets, 2020, 45(5): 59-62.
- [68] 纪振明. 云南某难选赤铁矿选矿实验[J]. 现代矿业, 2018, 34(11): 103-105+123.  
JI Z M. Mineral processing test of a refractory hematite in Yunnan[J]. Modern Mining, 2018, 34(11): 103-105+123.

## Development of Room-temperature and Low-temperature Collectors for Hematite Flotation: a Comprehensive Review

YAO Fuxing, MA Yiwen, ZHANG Lunxu, JIN Dan, SUN Xin

*School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning 114051, China*

**Abstract:** The majority of hematite flotation collectors currently utilized in China exhibit poor water solubility due to their long hydrocarbon chains. Consequently, the slurry frequently necessitates heating during flotation operations, which increases energy consumption and costs in processing plants. Developing hematite collectors that are effective at normal and low temperatures is one of the pivotal approaches to optimizing the hematite flotation reagent system enhancing efficiency, and reducing consumption, especially within the framework of the "dual carbon" goals. By meticulously analyzing the recent research findings on new normal and low-temperature collectors and compound collectors in the hematite flotation system, the characteristics of reagents conducive to normal and low-temperature flotation processes were elucidated, focusing on the active organic groups and their impact on production indicators. The objective is to summarize and expand upon the design ideas for new types of normal and low-temperature hematite flotation collectors, promoting the research, development, and application of these reagents in hematite flotation processes and gradually achieving enhanced efficiency and reduced consumption.

**Keywords:** hematite ore; flotation; ambient/low temperature; trapping agent; combination agent

引用格式: 姚富兴, 马艺闻, 张伦旭, 金丹, 孙欣. 赤铁矿常温/低温浮选捕收剂研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(6): 130-139.

YAO Fuxing, MA Yiwen, ZHANG Lunxu, JIN Dan, SUN Xin. Development of room-temperature and low-temperature collectors for hematite flotation: a comprehensive review[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(6): 130-139.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)