

综合评述

赤铁矿浮选工艺及药剂研究进展

杜云翔^{1,2}, 蓝卓越^{1,2,3}, 李雄^{1,2}, 李云川^{1,2}, 杨琬婷^{1,2}, 李行^{1,2}

- 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
- 复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093;
- 金属矿尾矿资源绿色综合利用国家地方联合工程研究中心, 云南 昆明 650093

中图分类号: TD951.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2025)04-0123-12
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2025.04.010

摘要 赤铁矿在我国铁矿资源中占据重要地位, 浮选已成为赤铁矿分离提纯的主要方法。综合评述了赤铁矿浮选工艺中正浮选、反浮选、纳米气泡浮选及絮凝浮选的研究现状, 详细阐述了赤铁矿浮选中捕收剂与调整剂的研究进展以及存在的不足。随着复杂难选赤铁矿的开发与利用, 纳米气泡浮选与絮凝浮选等新工艺逐渐得到重视, 但其相关机理研究仍然不足, 且浮选作为赤铁矿提铁降杂的主要方法, 高效的药剂制度对于浮选效果至关重要。其中, 新型捕收剂的研发显得尤为关键, 开发新型阴阳离子捕收剂和利用阴阳离子组合捕收剂协同增效是赤铁矿浮选的重点研究方向。

关键词 赤铁矿; 浮选; 浮选药剂; 捕收剂; 调整剂

引言

我国是钢铁生产大国, 也是钢铁消费大国。2023 年我国钢材产量超过 13.6 亿 t^[1], 巨大的钢材产量拉动了对铁矿石的需求。然而, 尽管我国铁矿储量丰富, 截至 2022 年底已达 162.5 亿 t^[2], 但实际铁矿石原矿年产量不足 10 亿 t^[3], 无法满足国内市场需求, 从而导致对含铁金属及铁矿原料进口依赖程度逐年增加。赤铁矿资源占我国铁矿资源的 18% 左右^[4], 但其品位低、选别难度大等特点, 导致赤铁矿的开发利用率较低, 因此, 加强难选赤铁矿选别技术的研究和提高低品位赤铁矿的利用率对于实现我国可持续发展战略至关重要。

我国赤铁矿嵌布粒度较细, 常与脉石矿物紧密连生, 单一重选和单一磁选的效果并不理想, 而针对难处理的复杂矿石, 浮选工艺优势明显^[5]。本文综述了赤铁矿浮选工艺及药剂发展现状, 分析了赤铁矿浮选工艺特点及发展趋势, 以期为赤铁矿选矿技术的发展以及铁矿资源的综合利用提供参考。

1 资源概况

赤铁矿主要存在于前寒武系岩石中, 矿床的主要成因有变质成因、热液与风化成因等。全球七大洲均有大型赤铁矿床, 除南极洲外都有开采和利用赤铁矿的生产实践, 例如美国的苏必利尔湖矿床和克林顿矿床, 俄罗斯的克里沃伊洛格赤铁矿矿床, 以及巴西的迈那斯格瑞斯赤铁矿矿床。国内西北、东北、华中、华北均有大型赤铁矿矿床分布, 其中包括甘肃镜铁山、辽宁鞍山、湖北大冶和河北宣化等地。我国赤铁矿原生铁品位仅为 30% 左右, 嵌布粒度细, 矿物成分复杂, 不同产地产出的矿石结构差异大, 且具有块状、条带状、鲕状以及浸染状等多种构造。

2 浮选工艺

赤铁矿浮选主要分为正浮选和反浮选, 针对微细粒赤铁矿还有纳米气泡浮选、絮凝浮选等新工艺。另外, 对于难选矿物常采用联合工艺进行选别。

2.1 正浮选

正浮选工艺应用较为广泛, 无需脱泥即可在较

收稿日期: 2024-10-16

基金项目: 云南省科技厅科技计划项目(202202AB080012)

作者简介: 杜云翔(2000—), 男, 辽宁本溪人, 硕士研究生, 主要从事资源综合利用、浮选理论与工艺等方面工作, E-mail: d64104290@163.com。

通信作者: 蓝卓越(1976—), 男, 广西来宾人, 博士, 教授, 主要从事资源综合利用、浮选理论与工艺等方面工作, E-mail: xingdakg@126.com。

粗粒度下抛尾,具备工艺流程简单、操作便捷、生产成本较低等显著优势^[6],但其夹带严重导致其精矿指标偏低,常用于选别低品位、单一赤铁矿。王海燕等^[7]采用一粗四精二扫的闭路流程进行正浮选,最终获得铁品位 59.43%、铁回收率 72.74% 的铁精矿。孙炳泉等^[8]提出双介质正浮选工艺,这一工艺融合了酸性与碱性介质下浮选的优势,在给矿品位 31.59% 的情况下,可以得到铁品位 62.89%、铁回收率 68.22% 的精矿指标。吕虹序等^[9]对强磁精矿进行一粗一精二扫正浮选,在实现抛尾的同时提高品位,得到铁精矿品位 43.54%、铁回收率 84.11% 的指标。

赤铁矿正浮选工艺虽然已有一定的发展,但仍面临诸多挑战,主要存在浮选指标偏低及酸性介质环境下对矿泥高度敏感等问题。酸性介质正浮选工艺应用较早,但关于常温下高选择性捕收剂的相关研究较少,导致其实际应用受限。另一方面,在碱性条件下,赤铁矿的性质很大程度上决定了浮选的效果,不同粒度的赤铁矿选别效果相差较大。随着双介质浮选等新工艺的应用,赤铁矿正浮选所面临的问题逐渐得到解决。未来应当加强正浮选技术的基础研究工作,并对赤铁矿性质展开深入研究,以确定最佳的赤铁矿正浮选工艺。

2.2 反浮选

赤铁矿品位较高且脉石矿物易浮时,可用反浮选将脉石矿物从精矿中除去。

2.2.1 鲕状赤铁矿

鲕状赤铁矿平均铁品位 30%~45%,但其含磷较高且嵌布粒度极细,针对此类难选赤铁矿,反浮选优势明显。刘万峰等^[10]利用反浮选法进行提铁降磷,使铁品位提高了 5.24 百分点,磷含量由 0.92% 降至 0.28%。刘文宝^[11]进行赤铁矿反浮选脱硅实验,当加入的淀粉在 10.0 mg/L 时,石英回收率在 90.0% 左右,赤铁矿的回收率低于 5.0%,使得石英与赤铁矿成功分离。庞玉荣等^[12]对某鲕状赤铁矿直接进行反浮选,将铁精矿铁品位由 43.25% 提升至 57%、铁回收率为 76%。张芹等人^[13]将选择性絮凝与脱泥有机结合到阴离子反浮选流程中,获得的铁精矿铁品位 56.23%、铁回收率 75.28%、磷含量仅为 0.098%,效果良好。针对矿石性质特别复杂且矿物嵌布粒度极细的赤铁矿,长沙矿冶研究院发现选择性絮凝—反浮选工艺表现出良好的效果,同

时 SA-2 絮凝剂的应用可更好实现强化絮凝,获得理想的技术指标^[14-15]。

磷是鲕状赤铁矿中主要的有害元素,通过反浮选可以使脉石矿物初步分离。与正浮选相比,反浮选提铁降杂药剂用量小且相对稳定,但其仅对含磷矿物为磷灰石的赤铁矿效果好,而大多数高磷矿物为胶磷矿,胶磷矿往往与赤铁矿紧密共生且嵌布关系复杂,单使用浮选工艺无法达到理想指标,需要联合其他工艺进行选别。目前,赤铁矿反浮选捕收剂的发展较为滞后,传统反浮选捕收剂在实践中往往存在气泡量大、泡沫黏稠、不易消泡等严重缺点,未来应加强新型高效捕收剂的研发,或通过矿物表面改性来优化浮选条件,加强难选赤铁矿资源的开发与利用。

2.2.2 鞍山式赤铁矿

鞍山式赤铁矿(沉积变质型赤铁矿)是我国十分重要的一种铁矿资源,其储量大、埋藏不深、易于开采。但鞍山式赤铁矿多为贫矿,脉石矿物石英含量较高,且嵌布粒度较细,此类难选微细粒赤铁矿也常用反浮选进行选别。王陆新^[16]对东鞍山选矿厂的磁选精矿采用一粗一精三扫反浮选进行选别,使赤铁矿得到了充分回收,但对磁铁矿的回收效果较差。任鹏园等^[17]对鞍山式烧结厂的磁选精矿展开实验研究,通过优化药剂制度,采用一次正浮选,一粗一精三扫反浮选的工艺流程,精矿铁品位 65.58%、铁回收率 71.97%。同时,反浮选在尾矿再选方面也表现出色。张江宁等^[18]对某浮选尾矿进行了回收工艺研究,在尾矿全铁品位 22.82% 的条件下,采用磁选—反浮选联合工艺获得总铁品位 62.43%、铁回收率 55.10% 的铁精矿,有效回收了浮选尾矿中的铁矿物。鞍山式贫赤铁矿尾矿堆积量巨大,加强铁尾矿中有用矿物回收利用意义巨大。马艺闻等^[19]对某铁尾矿开展铁回收工艺实验,尾矿中赤铁矿含量为 9.47%,而脉石石英含量高达 73.02%,经过磁选预富集后采用阴离子反浮选进行提铁降杂,最终获得铁品位 60.56%、铁回收率 41.76% 的铁精矿。

鞍山式赤铁矿资源量逐年减少,导致入选矿石品位逐年降低。单一浮选工艺不能使赤铁矿得到充分利用,如今工业上通常采用磁浮联合工艺对鞍山式赤铁矿进行选别,而增加选别工艺往往带来高投入、低收益,随之而来的还有尾矿堆积量逐年增

加。为提高资源的利用率、减少铁矿物流失,未来赤铁矿的选矿工艺应聚焦在高效选矿药剂的研发,以及尾矿资源的综合利用。同时,应加强对原矿性质的研究,把重心放在破碎、磨矿等预处理环节,探明铁矿物的物质流向,提高赤铁矿资源的利用率。

2.2.3 含碳酸盐赤铁矿

含碳酸盐赤铁矿在我国分布十分广泛,碳酸盐主要以菱铁矿(FeCO_3)形式存在于铁矿资源中。菱铁矿是弱磁性矿物,易泥化,铁矿石浮选指标随着菱铁矿含量的增加而下降。当矿石中菱铁矿的含量大于3%时,单一浮选无法实现分离。针对于此,鞍钢集团早在2006年就提出“分步浮选”^[20],首先通过正浮选将菱铁矿选出,随后在强碱条件下对赤铁矿通过反浮选进行选别。

马自飞等^[21]对鞍山式含碳酸盐赤铁矿开展实验研究,通过一粗一精阴离子反浮选的实验流程对分步浮选中矿进行反浮选选别,中矿总铁含量42.94%、石英含量22.96%,最终获得铁品位56.2%、铁回收率57.1%的铁精矿,实现了分步浮选中矿的高效利用。东鞍山烧结厂的某赤铁矿混磁精矿中的菱铁矿含量为4.04%,为了增强后续分选效果,宋保莹等^[22]通过分步浮选成功脱除了菱铁矿,随后通过反浮选获得铁品位66.37%、铁回收率62.93%的铁精矿。吴文红等^[23]对分步浮选工艺流程进行了优化,磁选精矿在经过一粗一精正浮选选别后进入反浮选作业,经一粗一精三扫的工艺进行选别可进一步提升精矿的回收率。

含碳酸盐赤铁矿矿物组成相对复杂且嵌布粒度较细,使用常规单一反浮选技术往往无法实现对该类型矿石的综合利用。但随着分步浮选技术的出现,充分利用含碳酸盐赤铁矿变得可能。目前如何更加高效地回收含碳酸盐赤铁矿中的有用矿物将成为未来的主流方向,研究重点应着眼于研究碳酸盐矿物的物理化学性质、缩短工艺流程、降低生产成本。

2.3 纳米气泡浮选

常规正浮选、反浮选常依赖较大尺寸的气泡,而微细粒赤铁矿因其嵌布粒度细、成分复杂等性质,导致传统浮选工艺在微细颗粒的分选上具有一定的局限性。相比之下,纳米气泡具有较低的离心力与加速度,可以降低矿物的脱附概率,并增加矿粒与气泡间的碰撞概率,从而提升浮选效率。目前,

纳米气泡的形成机制、制备工艺、稳定性等在矿物加工和环境治理等领域已有研究^[24]。

Deng等^[25]对纳米气泡增强微细粒赤铁矿反浮选的机理进行了深入研究,发现与常规浮选相比,纳米气泡浮选可以使反浮选脱硅时间缩短180 s,并且可以提高微细粒赤铁矿的回收率(约5个百分点),主要原因为纳米气泡通过与颗粒间的碰撞(图1)促进 Ca^{2+} 在石英表面的吸附,为捕收剂的二次吸附提供更多的活性位点,从而提高反浮选的脱硅率。吴中贤等^[26]通过响应曲面法确定了最优的赤铁矿纳米气泡浮选条件,仅一次粗选就获得铁品位67.32%、铁回收率82.27%的铁精矿。徐冬林等^[27]对纳米气泡浮选与常规浮选进行了比较,发现纳米气泡能够优先在疏水表面析出,并借助其特有的桥毛细作用力增强疏水性颗粒之间的架桥作用,实现选择性团聚,显著提升了分选效率。张旭瑜^[28]针对鞍山式赤铁矿开展纳米气泡强化反浮选实验研究,通过与常规浮选对比发现,纳米气泡浮选可以大幅缩减浮选时间,精矿铁品位由64.97%提升至65.82%,铁回收率由69.03%提升至81.68%。

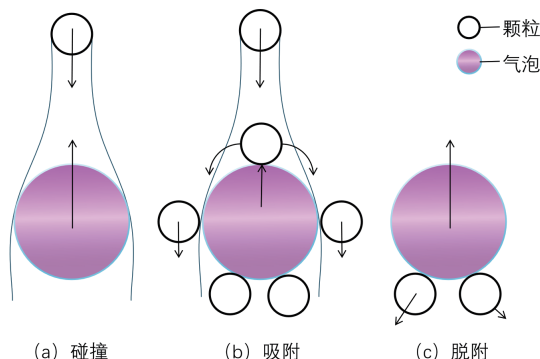


图1 气泡与颗粒作用过程

Fig. 1 Process of bubble and particle interaction

随着难选微细粒赤铁矿的开发与利用,纳米气泡浮选工艺逐渐得到重视。纳米气泡具有比表面积大、表面能高等特性,在一定程度上可以提高浮选效率。然而,近年来对纳米气泡的成核机理及纳米药剂等方面的研究较少,且纳米气泡的设备成本与运行成本相对较高,导致其应用受限。未来应深入探索,明确影响纳米气泡稳定性的关键因素,并探索降低设备投资和运行成本的有效途径,以提高该工艺的经济性和竞争力。

2.4 絮凝浮选

絮凝浮选也是高效浮选微细粒矿物的方法之

一。絮凝浮选通过选择性絮凝矿粒形成絮团,再通过浮选分离絮团,从而消除微细粒矿物间的粒度效应,与传统浮选相比,可以减少气泡与矿粒碰撞的概率,从而降低夹带对浮选效果的影响。

高岭石是影响赤铁矿浮选效率的主要脉石之一,王俪赢等^[29]通过加入聚氧化乙烯(PEO)使高岭石选择性絮凝,进而增强反浮选脱硅效果。信晓飞等^[30]研究了油酸钠体系中赤铁矿絮凝体的浮选行为,发现油酸钠的加入可以使絮凝体具备疏水性。有学者发现,金属离子与有机絮凝剂组合使用可以有效提高絮凝效果,杨志超等^[31]发现 Ca(II) -XG [Ca(II) 与黄原胶的配合物] 与石英和赤铁矿均存在化学吸附作用,但其对赤铁矿的化学作用更加强烈,从而实现选择性絮凝赤铁矿;相似地, Fe(III) -XG 也可以达到选择性絮凝的效果^[32]。针对某些性质复杂、单一絮凝剂效果不理想的矿石,有学者提出“异步絮凝”,即多絮凝剂分别絮凝目的矿物与脉石矿物。杨诚等人^[33]使用聚氧化乙烯和淀粉对赤铁矿展开异步絮凝实验研究,淀粉在抑制赤铁矿的同时,还起到一定的絮凝作用,PEO 则对石英选择性絮凝。加入 PEO 可使精矿铁回收率由 79.6% 提升至 81.2%,同时铁品位由 59.7% 提升至 60.5%。Li 等^[34]使用异步絮凝方法分离细粒赤铁矿和石英,同样以淀粉为抑制剂,在加入 50 g/t 的 PEO 后,铁精矿的品位与回收率较未添加 PEO 时分别提升了 2.3 和 2.9 百分点。

絮凝浮选作为一种高效的微细粒矿物浮选方法,显著提升了浮选效率。未来应继续深化对絮凝机理的研究,明确不同絮凝剂与矿物表面的相互作用机制,以及外界条件对絮凝效果的影响。此外,还应加强絮凝浮选的工业化应用研究,优化工艺流程,提高设备效率,降低生产成本。同时,与其他浮选技术的结合与互补,也将为矿产资源的高效开发和利用提供新的思路和途径。

2.5 小结

正浮选因其工艺简单、操作便捷、成本低廉等优势,常用于低品位、微细粒赤铁矿选别,但单一正浮选面临浮选指标偏低及对矿泥敏感等问题;反浮选则在高品位且脉石易浮的赤铁矿中表现优异,能有效提升铁品位并降低杂质含量;纳米气泡浮选凭借其在微细粒矿物分选中的独特优势,显著提高了分选效率和精矿质量,但在稳定性及成核机理上仍

需进一步研究;而絮凝浮选作为细粒矿物选别的新途径,为赤铁矿选别提供了新思路,展现出良好的应用前景,但需更多研究以完善其在赤铁矿选矿中的应用。

综上所述,未来应加强各浮选工艺的基础研究与技术优化,结合赤铁矿的具体性质,探索更加高效、经济的选矿方案,通过多元化技术手段的应用,进一步提升资源利用效率和经济效益,以实现难选微细粒赤铁矿的充分利用。

3 浮选药剂

3.1 正浮选药剂

3.1.1 捕收剂

赤铁矿正浮选常使用阴离子捕收剂,主要是脂肪酸(盐)类,常与多种调整剂协同作用。传统阴离子捕收剂在低温下易出现溶解性差、药效变差等情况,往往需要加温,导致对能源消耗较大;而新型阴离子捕收剂具有对矿石适应性好、成本低、浮选泡沫易碎等特点。

某公司采用强磁选—正浮选工艺回收尾矿中的赤铁矿时,使用常规脂肪酸类捕收剂进行浮选,浮选指标不稳定且受温度影响较大,而朱顺伟等^[35]对该工艺进行了优化,使用改性脂肪酸阴离子捕收剂 ZK-302 进行工业实验,原矿全铁平均品位为 32.23%,在 15 °C 矿浆温度下,产出铁精矿品位 51.37%、铁回收率 64.21%。罗光明^[36]在平均浮选温度 20 °C 条件下,使用 TA-19 捕收剂对李楼铁矿进行浮选实验及研究,成功得到铁品位 65.92%、铁回收率 85.63% 的铁精矿,其效果与加温浮选相近,有效降低了能耗。马艺闻等^[37]以地沟油为原料研制了新型阴离子捕收剂 KA-1,并在常温下进行了实验研究,浮选效果理想、使用简单、成本低、绿色无污染。夏夕雯等^[38]合成的新型常温捕收剂 DX-1,在处理赤铁矿时表现出优越的捕收能力,矿浆 pH 及温度对 DX-1 性能影响较小。谷晓恬等^[39]发现了新型高效氨基酸类捕收剂 α -EDA-LA 在不同 pH 下在 pH 6~12 范围内,石英回收率保持在 90% 以上,当 pH 为 6 时,赤铁矿的回收率大于 80%。

此外,还有一些新型药剂具有原料来源广、工艺简单、价格低廉等优点。梅建庭等^[40]在东鞍山烧结厂使用新型捕收剂 TD-II 与抑制剂 K6-1 进行工业实验,发现精矿铁品位比原浮选工艺提升了 0.18

百分点,浮选尾矿铁品位下降至2.3%,且对作业温度要求较低,此类新型药剂不仅浮选温度低,选择性还很强,有较好的经济效益。

正浮选作为赤铁矿选矿工艺中的重要部分,其捕收剂的发展尤为重要。近年来,随着新型阴离子捕收剂的研发与利用,不仅解决了传统捕收剂低温下易出现的问题,还提高了浮选效率与经济效益,为赤铁矿等矿物的浮选提供了更加环保、高效的技术手段。未来,随着新型药剂的不断研发和优化,赤铁矿的正浮选工艺将有望实现更加绿色、可持续的发展。

3.1.2 调整剂

在赤铁矿正浮选工艺中,常用的调整剂为絮凝剂和分散剂。分散剂用于阻止细粒矿物相互聚集,通过吸附在矿物表面形成保护层或增加颗粒间的静电斥力,使矿物颗粒保持单体解离状态,减轻浮选过程中的夹带。而在处理含泥量较高且嵌布粒度较细的赤铁矿时,经破碎与磨矿工艺处理后物料粒度往往过细,若直接进入浮选作业会导致夹带严重,且不利于后续的浓缩与脱水,引入絮凝剂可促进细粒矿物加速沉降,从而缩短固液分离所需时间^[41-42]。

(1)分散剂

赤铁矿正浮选工艺常用的无机分散剂包括水玻璃、磷酸盐和硅酸盐,而柠檬酸则作为有机分散剂被广泛应用。但无机分散剂效果差、用量大;有机分散剂选择性差。左倩^[43]研究表明六偏磷酸钠、硅酸钠、焦磷酸钠与三聚磷酸钠在处理微细粒赤铁矿时,表现出良好的分散能力,其分散效率均稳定在32%以上;其中三聚磷酸钠及焦磷酸钠用量相对较少,在质量浓度为40 mg/L时即可达到最佳分散状态。针对超细粉磨后微细粒菱铁矿覆盖在赤铁矿与石英表面的问题,朱巨建等^[44]提出了“分散浮选”技术以消除矿物间的相互干扰,该技术已成功应用于工业实践;实验结果显示,加入分散剂NM-3后,微细粒菱铁矿对赤铁矿和石英的罩盖明显减少,进而可得到铁品位56.60%、铁回收率53.89%的铁精矿产品。王乃玲等^[45]以含碳酸盐铁矿石为研究对象,在最佳药剂制度条件下,添加CMC后可将铁精矿品位由62.89%提升至63.36%,铁回收率由72.68%提升至74.08%。在油酸钠体系中,绿泥石与赤铁矿吸附紧密,而引入柠檬酸后,绿泥石与

赤铁矿间的总作用能由负转正,意味着二者之间的吸引力转变为斥力,实现了有效分散,进而提升绿泥石的去除率;人工混合矿沉降实验及激光粒度分析结果证实了柠檬酸的分散作用^[46]。

在分散剂的使用过程中,应根据赤铁矿的性质与分选流程的差异,选择或针对性地开发适宜的分散剂来改善整体浮选效果,同时在满足分散效果的前提下优先使用环保型分散剂,注重多种药剂之间的协同作用并优化使用条件,从而提高浮选效率。

(2)絮凝剂

絮凝剂主要包括无机与有机两类,其中有机高分子絮凝剂在铁矿石絮凝浮选中的应用较为普遍,例如淀粉、聚丙烯酰胺及壳聚糖等,此类絮凝剂以其用量小、环境友好以及快速絮凝等优势;相较于有机絮凝剂,无机絮凝剂在成本方面有显著的优势,是当前研究领域的热点之一,我国科研团队已成功开发出包括聚合硫酸铁、聚合磷酸铝在内的多种复合型无机高分子絮凝剂,其应用前景广泛,但在铁矿浮选过程中的应用尚显不足。

周亮^[47]深入探讨了淀粉在微细粒赤铁矿絮凝过程中的作用机制,发现玉米淀粉与木薯淀粉在絮凝中表现优异,且适当提高矿浆温度能显著增强絮凝效果。有学者指出,海藻酸钠与聚丙烯酰胺的接枝共聚物^[40]作为高效絮凝剂,在赤铁矿的絮凝浮选过程中表现出色。信晓飞等^[30]合成了淀粉-丙烯酰胺的接枝共聚物,并将其应用在赤铁矿絮凝浮选中,发现赤铁矿絮凝体在油酸钠体系中疏水性较好,在最佳实验条件下,可以得到回收率为92%的絮凝体精矿。石英是赤铁矿选矿过程中常见的脉石矿物,有学者分别用淀粉絮凝赤铁矿和聚氧化乙烯(PEO)絮凝石英,淀粉仅选择性地絮凝赤铁矿,但PEO对石英和赤铁矿都有一定的絮凝作用,先添加淀粉溶液使赤铁矿絮凝,再添加PEO来絮凝石英,从而达到异步絮凝浮选的效果^[48]。除淀粉外,有机高分子絮凝剂与金属离子的组合使用也有较多报道。例如,将Ca(II)与黄原胶组合使用可以形成带有正电的配合物,相较于单黄原胶的絮凝效果,该配合物所形成的絮凝体更加密实,且与赤铁矿之间的化学吸附作用更强,从而增强絮凝浮选效果^[31]。总体来说,絮凝剂的作用在于调节细粒矿物之间的表面电荷,降低矿物之间的斥力,或通过桥联效应促使微细粒矿物聚集成较大颗粒或簇团,从而实现有效的固液分离^[49-50]。絮凝剂在赤铁矿的选别中应用较少,

但随着细粒难选赤铁矿的开发利用,絮凝剂的作用与潜力得以充分发挥。

目前,铁矿絮凝剂的研究焦点主要聚集在有机絮凝剂的改性上,特别是针对淀粉的改性、聚丙烯酰胺的接枝等,旨在进一步提升现有絮凝剂的选择性,从而提高选矿效率。对于赤铁矿来说,絮凝剂的选择除需考虑具体的生产指标外,还需考虑环保问题、成本问题等。

3.2 反浮选药剂

3.2.1 捕收剂

反浮选捕收剂往往使用阳离子型捕收剂,在某些情况下,也会使用阴阳离子组合捕收剂。阳离子捕收剂具有药剂制度简单、加药方便、易于操作等优点,且阳离子捕收剂浮选通常处于中性条件,对设备的腐蚀较弱,且对精矿的过滤更方便,有助于降低产品含水量,从而减少生产成本。

王春梅等^[51]使用阳离子捕收剂 GE-609 对硅酸盐矿物进行反浮选,该捕收剂具有选择性好、耐低温、泡沫脆、易消泡等优点,且浮选可在常温下进行,最终得到品位 67.12%、回收率 83.55% 的铁精矿。周永锋等^[52]发现十二胺、GE-609、十二烷基三甲基氯化铵与 N-十二烷基乙二胺四种阳离子捕收剂对石英与赤铁矿均有一定的捕收作用,但对石英的捕收效果更佳;通过单矿物实验表明,以十二烷基三甲基氯化铵和 GE-609 作为捕收剂时,精矿铁品位与回收率均优于其他两种捕收剂。刘文宝^[11]设计了 HDMEA、PDDA、DPDA、NHDE、DMPDA 5 种阳离子捕收剂,它们比 DDA(十二胺)具有更高的表面活性。在实验室条件下,5 种捕收剂对于混合矿(赤铁矿与石英质量比为 2:3)均具有良好的分选效果。Silva 等^[53]在不添加抑制剂的情况下,使用 N-[3-(二甲氨基)丙基]十二酰胺作为捕收剂,该捕收剂对石英的选择性极佳,且在 pH 为 10 的条件下对赤铁矿和高岭石同时存在抑制效果。

阳离子捕收剂虽然在赤铁矿的选别方面有很广的应用前景,但存在泡沫黏、难消泡、现有种类偏少、选择性差等缺点,导致其实际应用并不广泛。而阴阳离子组合捕收剂在确保捕收效果的同时,有效降低阳离子捕收剂泡沫的稳定性,从而解决单一阳离子捕收剂应用时所面临的问题。周永锋^[52]发现在 pH 为 7、捕收剂用量 0.05% 条件下,以质量比 2:1 混合的十二胺与十二烷基磺酸钠组合捕收

剂相较于单纯十二胺捕收剂,泡沫半衰期缩短了 29 s;相同条件下,十二烷基磺酸钠与十二烷基三甲基氯化铵组合使用相较于后者单独使用,泡沫半衰期减少了 34 min,两种组合捕收剂均可以缓解单独使用时泡沫难消的问题。何建聪等^[54]分别研究了十二胺以及十二胺+十二烷基磺酸钠组合捕收剂对赤铁矿浮选指标的影响,结果表明:单独使用十二胺作捕收剂时的泡沫更多、气泡尺寸小而密集、破裂速度慢;相比之下,组合捕收剂优势明显,在适宜条件下使用,具有提升浮选指标、优化泡沫性能、降低泡沫黏性的优势。曹少航等^[55]通过单矿物浮选实验,发现将 CW-3、CW-4 这两种阴离子型表面活性剂分别与 LTS(脂肪酸类捕收剂)配合使用,可有效解决赤铁矿反浮选需加温的问题。

此外,在某些特定情况下,阴离子捕收剂也会有良好的表现。例如,于慧梅等^[56]利用由餐饮废油加工制得的脂肪酸类捕收剂 JZQ-F 对鞍山式赤铁矿磁选精矿进行反浮选脱硅实验,使得铁品位从 43.91% 提升到 66.58%,铁回收率 73.63%。与阴离子反浮选工艺相比,采用阳离子反浮选成本更低,研发高选择性阳离子捕收剂在提高资源的综合利用率和矿山的可持续发展方面都十分重要。

在赤铁矿浮选过程中,捕收剂的选择性对浮选效果至关重要。正浮选常使用阴离子捕收剂,新型阴离子捕收剂以其良好的适应性、低成本及环保性逐渐取代传统药剂,提升了浮选效率并降低了能耗。反浮选则多使用阳离子捕收剂,其操作简便、对设备腐蚀小。然而,单一捕收剂存在泡沫稳定性、选择性差等问题,限制了其广泛应用。因此,组合捕收剂成为研究热点,通过阴阳离子捕收剂的协同作用,不仅优化了浮选效果,还弥补了单一捕收剂的不足。未来,应加强对组合捕收剂的研究与开发,探索更多高效、环保的捕收剂,促进可持续发展。

3.2.2 调整剂

在赤铁矿反浮选体系中,常用的调整剂为抑制剂和活化剂。抑制剂对浮选的总体效果起着决定性的作用,通过增强矿物的亲水性,并阻断与捕收剂的相互作用,从而抑制非目的矿物的可浮性,有助于在复杂矿石中实现多金属的有效分离;常用活化剂促进石英与硅酸盐类等脉石矿物的活化过程,增强其与捕收剂的相互作用,从而使得在浮选分离过程中可以更有效地脱除脉石矿物。

(1) 抑制剂

在赤铁矿反浮选体系中,淀粉及其衍生物常被用作抑制剂^[57]。在十二胺体系中,可溶性淀粉、玉米淀粉、马铃薯淀粉和大米淀粉对赤铁矿的可浮性均有一定的抑制效果,红外光谱分析揭示了淀粉分子中的羟基与赤铁矿发生键合作用,从而实现对赤铁矿的抑制,其中可溶性淀粉的抑制效果最好^[58]。Rocha等^[59]用玉米淀粉及木薯淀粉对赤铁矿进行浮选实验,发现两种淀粉的抑制效果相近,而木薯淀粉对赤铁矿 Zeta 电位和等电点的降低幅度更大。Bai等^[60]发现可溶性淀粉主要通过化学吸附作用附着在赤铁矿表面,而对磷灰石则主要表现为物理吸附,淀粉过量会导致磷灰石被抑制,反而使分离难度增加。在阳离子浮选体系中,矿浆中 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 等阳离子的存在会抑制铁矿石的浮选^[61]。Yue等^[62]研究了不同金属离子 (Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+}) 与淀粉的络合物对赤铁矿的抑制作用,其中, Zn^{2+} 淀粉的抑制能力最好,而经 Fe^{3+} 淀粉抑制后获得的铁品位最高。但淀粉类抑制剂对含铁硅酸盐类脉石矿物效果不佳。Poperechnikova等^[63]对含铁硅酸盐类铁矿展开研究,发现玉米淀粉及其衍生物对矿浆 pH 值的变化不够敏感,因此并不适合作为铁矿石的选择性抑制剂;虽然 CMC 在硅酸盐类矿物表面未展现出明显的吸附能力,但经针对性地改性处理后,其吸附能力显著提升。除淀粉类抑制剂外,有些新型抑制剂对赤铁矿的抑制效果也尤为不错。Yehia等^[64]将新型绿色抑制剂真菌纤维素酶应用在赤铁矿反浮选中,真菌纤维素酶通过培养基进行生产,具有价格便宜和无毒环保等优势,其通过物理作用吸附到疏水位点,达到抑制赤铁矿的目的。Han等^[65]使用可得然胶选择性抑制赤铁矿,可得然胶以静电吸附的形式吸附在赤铁矿表面,阻断油酸钠和 Ca^{2+} 在赤铁矿表面的吸附,进而通过反浮选回收赤铁矿。此类新型抑制剂在浮选实验中表现良好,但其在实际生产中的应用仍有待商榷。

经抑制剂作用后的矿石很难被活化,所以抑制剂的选择性和抑制效果至关重要。淀粉类抑制剂凭借其诸多优势被广泛应用,但其在含铁硅酸盐类铁矿中的效果却不尽人意,尤其在低温环境下溶解性受限。加强天然高分子抑制剂研究,研发绿色高效的新型抑制剂,探索不同抑制剂之间的协同作用,将是处理复杂难选赤铁矿浮选分离的核心课题。

(2) 活化剂

石灰(Ca^{2+})为赤铁矿反浮选中常用的活化剂,具有价格低廉、使用方便等优点,但其只对石英效果较好,在使用某些特定捕收剂时对绿泥石也有一定活化效果,而对硅酸盐类矿物则无显著活化作用,且矿浆内 Ca^{2+} 的富集会对后续的选别造成影响。有学者对 Ca^{2+} 的活化机理进行了深入研究,发现 Ca^{2+} 在溶液中水解生成的 $\text{Ca}(\text{OH})^+$ 能有效附着于石英表面,当加入油酸钠后,油酸根离子与 $\text{Ca}(\text{OH})^+$ 结合,实现对石英的有效活化,而 Ca^{2+} 对赤铁矿浮选过程的影响微乎其微^[66-67]。另有研究发现, Ca^{2+} 可以与海藻酸钠发生螯合作用,并吸附在石英表面,从而减弱油酸离子的位阻,进而增强了油酸钠在石英表面的附着能力^[68]。而在绿泥石和赤铁矿进行浮选分离过程中,赤铁矿经苛性钠淀粉抑制后,加入活化剂 CaCl_2 可以使绿泥石的回收率由 20% 提高至 85%^[69]。

石灰作为赤铁矿阴离子反浮选中最常见的有效活化剂,可大幅度降低石英对精矿回收率的影响。但加入石灰后会使得矿浆呈碱性,使得后续步骤难以处理,对环境也会产生一定的影响,且石灰对硅酸盐类矿物活化效果并不明显。对于含铁硅酸盐类矿物而言,阴离子反浮选活化剂的研究尚显不足,未来的研究应将重点放在硅酸盐类矿物的高效活化与铁矿物的抑制上,进一步提升铁矿物与脉石矿物的分离效率。

4 建议与展望

赤铁矿浮选工艺技术因其高效、节能、降耗的特点,在提铁降杂中获得越来越多的重视,其中的正浮选工艺、反浮选工艺以及磁浮联合工艺等已被广泛研究与应用,但由于赤铁矿资源的贫细杂化,赤铁矿浮选工艺的发展也面临着一系列挑战。为进一步提高我国铁矿资源综合利用率,解决低品位赤铁矿利用率低的问题,应着重加强以下三方面的研究工作:

(1) 加强赤铁矿资源的物性研究和改性研究。我国的赤铁矿资源矿石性质复杂,嵌布粒度细,易泥化,特别是多种铁矿物共生的时候,加大了选矿分离的难度。当前应利用工艺矿物学研究手段,揭示矿石的物性特点,拟定合理的选矿工艺技术路线,避免盲目地试错。对于难选的鲕状赤铁矿、赤褐铁矿等复杂资源,可考虑采用选冶或化学选矿新技术进行分选,提高选别效率和资源利用率。

(2)加强新工艺与联合工艺的研究。传统或单一的选别工艺难以胜任复杂矿石资源的分选,对于复杂赤铁矿资源的利用,需要研发新工艺或采用联合工艺进行处理。细粒浮选技术,如絮凝浮选、纳米气泡浮选、粗粒载体浮选、强化分散浮选等仍需深入研究,重磁浮联合工艺以及综合力场的选矿工艺也值得不断探索。

(3)高效浮选药剂是赤铁矿浮选工艺技术革新的关键。无论是正浮选或反浮选,都面临着如药剂选择性差、适应性差、泡沫量大以及药剂用量大等问题,针对不同的矿石特点,采用改性捕收剂、组合捕剂可获得较好的选别效果,是当前研究的主要方向。在研发高效捕收剂的同时,调整剂的选择也显得尤为重要。

参考文献:

- [1] 董添. 2023 年我国钢材产量超 13.6 亿吨[N]. 中国证券报, 2024-01-19.
DONG T. In 2023, China's steel output exceeded 1.36 billion tons[N]. China Securities Journal, 2024-01-19.
- [2] 2023 年中国自然资源公报(摘登)[N]. 中国自然资源报, 2024-02-29.
Bulletin of China's natural resources in 2023 (excerpt)[N]. China Natural Resources News, 2024-02-29.
- [3] 谭亚敏. 大商所多举措助力“基石计划”[N]. 期货日报, 2024-02-26.
TAN Y M. Many measures taken by the big business office help the "cornerstone plan"[N]. Futures Daily, 2024-02-26.
- [4] 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 Resources Information, 2023(1): 2.
- [5] 贾蓓繁, 罗溪梅, 王云帆, 等. 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 L F, LUO X M, WANG Y F, et al. 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.
- [6] 刘亚辉, 孙炳泉. 赤铁矿的正-反浮选研究[J]. 金属矿山, 2004(1): 39-41.
LIU Y H, SUN B Q. Study on direct-indirect flotation of hematite ore[J]. Metal Mine, 2004(1): 39-41.
- [7] 王海燕, 孙敬锋, 樊丽丽, 等. 难选赤铁矿浮选试验研究[J]. 湿法冶金, 2012, 31(2): 92-94.
WANG H Y, SUN J F, FAN L L, et al. Test research on flotation of refractory hematite[J]. Hydrometallurgy of China, 2012, 31(2): 92-94.
- [8] 孙炳泉, 黄福根. 东鞍山贫赤铁矿碱性-酸性双介质正浮选工艺研究[J]. 金属矿山, 2000(12): 34-36.
SUN B Q, HUANG F G. Study on the positive flotation technology of Donganshan lean hematite in both alkaline and acidic mediums[J]. Metal Mine, 2000(12): 34-36.
- [9] 吕虹序, 侯英, 谢冬冬, 等. 鞍千选矿厂强磁选精矿正浮选试验研究[J]. 现代矿业, 2024, 40(3): 167-170.
LYU H X, HOU Y, XIE D D, et al. Experimental study on positive flotation of concentrate from high intensity magnetic separation in Anqian concentrator[J]. Modern Mining, 2024, 40(3): 167-170.
- [10] 刘万峰, 王立刚, 孙志健, 等. 难选含磷鲕状赤铁矿浮选工艺研究[J]. 矿冶, 2010, 19(1): 13-18.
LIU W F, WANG L G, SUN Z J, et al. Study on flotation technology of refractory oolitic hematite containing phosphorus[J]. Mining and Metallurgy, 2010, 19(1): 13-18.
- [11] 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. Study and flotation performance of high selective collector for hematite reverse flotation[D]. Shenyang: Northeastern University, 2020.
- [12] 庞玉荣, 郭秀平, 李朝晖, 等. 某鲕状赤铁矿矿石反浮选试验研究[J]. 国外金属矿选矿, 2008(7): 22-25.
PANG Y R, GUO X P, LI C H, et al. Experimental study on reverse flotation of an oolitic hematite ore[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 2008(7): 22-25.
- [13] 张芹, 张一敏, 胡定国, 等. 湖北巴东鲕状赤铁矿选矿试验研究[C]//2006 年全国金属矿节约资源及高效选矿加工利用学术研讨与技术成果交流会论文集. 《金属矿山》杂志社, 2006: 206-208.
ZHANG Q, ZHANG Y M, HU D G, et al. Experimental research on beneficiation of oolitic hematite ore of Badong iron mine, Hubei[C]//Proceedings of the 2006 National Symposium on Resource Saving and Efficient Mineral Processing and Utilization of Metal Mines. Metal Mines Magazine, 2006: 206-208.
- [14] PANDA L, BANERJEE P K, BISWAL S K, et al. Performance evaluation for selectivity of the flocculant on hematite in selective flocculation[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2013, 20(12): 1123-1129.
- [15] 刘志兴. SA-2 絮凝剂在微细粒赤铁矿分选中的应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2013(6): 83-85.
LIU Z X. Application of SA-2 flocculant in the separation of fine-grained hematite[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2013(6): 83-85.
- [16] 王陆新. 东鞍山贫赤铁矿选矿工艺流程物质流向研究[J]. 现代矿业, 2019, 35(2): 131-135.
WANG L X. Study on material flow direction of Donganshan lean hematite beneficiation process[J].

- Modern Mining*, 2019, 35(2): 131–135.
- [17] 任鹏园, 侯英, 赵通林, 等. 东鞍山磁选混合精矿浮选选铁试验[J]. *现代矿业*, 2023, 39(2): 9–11.
REN P Y, HOU Y, ZHAO T L, et al. Flotation iron test of Donganshan magnetic separation mixed concentrate[J]. *Modern Mining*, 2023, 39(2): 9–11.
- [18] 张江宁, 丛树双, 杨光. 东鞍山烧结厂含碳酸盐浮选铁尾矿再选铁试验[J]. *现代矿业*, 2023, 39(10): 120–123.
ZHANG J N, CONG S S, YANG G. Experiment on re-concentration of iron from carbonate-containing flotation iron tailings in Donganshan sintering plant[J]. *Modern Mining*, 2023, 39(10): 120–123.
- [19] 马艺闻, 张伦旭, 刘杰, 等. 鞍山式贫赤铁矿尾矿预先分级-再选试验研究[J]. *金属矿山*, 2024(11): 88–93.
MA Y W, ZHANG L X, LIU J, et al. Experimental study on pre-classification-reconcentration of Anshan-type lean hematite tailings[J]. *Metal Mine*, 2024(11): 88–93.
- [20] 邵安林. 鞍山式含碳酸盐赤铁矿石高效浮选技术研究[Z]. 鞍山: 鞍钢集团矿业公司, 2011–01–07.
SHAO A L. Study on efficient flotation technology of Anshan-type carbonate-containing hematite ore[Z]. Anshan: Angang Group Mining Company, 2011–01–07.
- [21] 马自飞, 杨会利, 杨光. 含碳酸盐赤铁矿石分步浮选中矿技术研究[J]. *矿业工程*, 2014, 12(6): 22–25.
MA Z F, YANG H L, YANG G. Study on step-by-step flotation technology of carbonate-containing hematite ore[J]. *Mining Engineering*, 2014, 12(6): 22–25.
- [22] 宋保莹, 袁立宾, 韦思明. 含碳酸盐赤铁矿分步浮选工艺研究及生产实践[J]. *矿冶工程*, 2015, 35(5): 63–67.
SONG B Y, YUAN L B, WEI S M. Research and production practice of step-by-step flotation process of carbonate-containing hematite[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2015, 35(5): 63–67.
- [23] 吴文红, 梅灿国, 刘盛辰, 等. 东鞍山碳酸盐贫赤铁矿选别工艺优化研究[J]. *矿业工程*, 2019, 17(6): 14–17.
WU W H, MEI C G, LIU S C, et al. Study on optimization of beneficiation process for carbonate-poor hematite in Donganshan[J]. *Mining Engineering*, 2019, 17(6): 14–17.
- [24] 杨晓, 陶东平, 邵怀志, 等. 纳米气泡浮选技术研究进展[J]. *矿产综合利用*, 2024, 45(5): 123–132.
YANG X, TAO D P, SHAO H Z, et al. Research progress of nanobubble flotation technology[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2024, 45(5): 123–132.
- [25] DENG L, MA F. Study on dynamic behavior and mechanism of reverse flotation of micro-fine hematite (MFH) enhanced by nanobubbles (NBs)[J]. *JOM*, 2024, 76(12): 7387–7397.
- [26] 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试验研究[J]. *黄金*, 2023, 44(2): 38–45.
WU Z X, YANG X, YU X B, et al. Experimental study on optimizing reverse nanobubble flotation of hematite by response surface methodology[J]. *Gold*, 2023, 44(2): 38–45.
- [27] 徐冬林, 陶东平, 吴中贤, 等. 纳米气泡在鞍山式铁矿反浮选中效果探索[J]. *金属矿山*, 2020(8): 83–90.
XU D L, TAO D P, WU Z X, et al. Exploration of effects of nanobubble in reverse flotation of anshan-type iron ore[J]. *Metal Mine*, 2020(8): 83–90.
- [28] 张旭瑜. 纳米气泡表征及其在赤铁矿反浮选中的应用[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2020.
ZHANG X Y. Characterization of nanobubbles and its application in reverse flotation of hematite[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2020.
- [29] 王俪赢, 郝晓宇, 姚金, 等. 聚氧化乙烯絮凝微细粒高岭石强化赤铁矿反浮选脱硅机理研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(1): 110–116.
WANG L Y, HAO X Y, YAO J, et al. Mechanism study of enhanced hematite reverse flotation desilication by flocculation of micro fine kaolinite with polyoxyethylene oxide[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2023, 44(1): 110–116.
- [30] 信晓飞, 张晋霞. 油酸钠体系中赤铁矿絮凝体浮选行为研究[J]. *中国矿业*, 2021, 30(5): 161–167.
XIN X F, ZHANG J X. Study on flotation behavior of hematite flocs in sodium oleate system[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(5): 161–167.
- [31] 杨志超, 韩英棋, 滕青, 等. Ca(II)-XG配合物选择性絮凝赤铁矿与石英的作用机理[J]. *金属矿山*, 2023(5): 129–136.
YANG Z C, HAN Y Q, TENG Q, et al. Mechanism of selective flocculation of hematite and quartz with Ca(II)-XG complexes[J]. *Metal Mine*, 2023(5): 129–136.
- [32] 韩英棋, 杨志超, 滕青, 等. Fe(III)-XG配合物选择性絮凝微细粒赤铁矿与石英及其机理研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2024(1): 116–125.
HAN Y Q, YANG Z C, TENG Q, et al. Fe(III)-XG complex selective flocculation of fine-grained hematite and quartz and its mechanism[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2024(1): 116–125.
- [33] 杨诚, 李明阳, 龙红明, 等. 微细粒石英/赤铁矿异步絮凝浮选分离研究[J]. *矿产保护与利用*, 2022, 42(5): 82–87.
YANG C, LI M Y, LONG H M, et al. Study on asynchronous flocculation flotation separation of fine

- quartz/hematite[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(5): 82–87.
- [34] LI M, XIANG Y, CHEN T, et al. Separation of ultra-fine hematite and quartz particles using asynchronous flocculation flotation[J]. Minerals Engineering, 2021, 164: 106817.
- [35] 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 S W, LI X L, LI Y L, et al. Experiment on hematite recovery from beneficiation tailings by a novel collector[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(4): 71–76+98.
- [36] 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 ore mine[J]. Mining Engineering, 2020, 18(5): 41–44.
- [37] 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.
- [38] 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 flotation performance of a new collector DX-1 for hematite at room temperature[J]. Metal Mine, 2018(6): 75–79.
- [39] 谷晓恬, 朱一民, 李艳军, 等. 含碳酸盐难选铁矿石新型氨基酸类捕收剂的捕收机理[C]//中国金属学会. 第十一届中国钢铁年会论文集——S01. 炼铁与原料. 东北大学资源与土木工程学院, 东北大学 2011 钢铁共性技术协同创新中心, 辽宁省难采选铁矿石高效开发利用技术工程实验室, 2017: 9.
- GU X T, ZHU Y M, LI Y J, et al. Collecting mechanism of a novel amino-acid based collector for carbonate-containing refractory iron ores[C]// China Society of Metals. The 11th China Iron and Steel Annual Conference Proceedings–S01. Ironmaking and raw materials. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University; northeastern University 2011 Steel Generic Technology Collaborative Innovation Center; technical Engineering Laboratory for Efficient Development and Utilization of Refractory Iron Ore in Liaoning Province, 2017: 9.
- [40] 梅建庭, 曹翠, 郭海英, 等. 新型捕收剂 TD-II 和抑制剂 K6-1 在东鞍山赤铁矿反浮选中的应用[J]. 现代矿业, 2016, 32(7): 95–96.
- MEI J T, CAO C, GUO H Y, et al. Application of new collector TD-II and inhibitor K6-1 in reverse flotation of Donganshan hematite[J]. Modern Mining, 2016, 32(7): 95–96.
- [41] PANDA L, BISWAL SK, VENUGOPAL R, et al. Recovery of ultra-fine iron ore from iron ore tailings[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2018, 71(2): 463–468.
- [42] GIBSON B, WONYEN DG, CHELGANI SC. A review of pretreatment of diasporic bauxite ores by flotation separation[J]. Mineral Engineering, 2017, 114: 64–73.
- [43] 左倩, 张芹, 邓冰, 等. 3 种调整剂对微细粒赤铁矿分散行为的影响[J]. 金属矿山, 2011(2): 54–56.
- ZUO Q, ZHANG Q, DENG B, et al. Influence of sodium carbonate, sodium hydroxide and sodium silicate on dispersion of ultrafine hematite[J]. Metal Mine, 2011(2): 54–56.
- [44] 朱巨建, 印万忠, 侯英, 等. 东鞍山含碳酸盐中矿分散浮选试验研究[J]. 中国矿业, 2015, 24(7): 72–77.
- ZHU J J, YIN W Z, HOU Y, et al. Experimental study on dispersion flotation of Donganshan middling containing carbonate[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(7): 72–77.
- [45] 王乃玲, 卢冀伟, 印万忠, 等. 有机分散剂对含碳酸盐铁矿石浮选的影响[J]. 矿冶, 2014, 23(2): 23–27.
- WANG N L, LU J W, YIN W Z, et al. Effect of organic dispersant on flotation of carbonate-bearing iron ore[J]. Mining and Metallurgy, 2014, 23(2): 23–27.
- [46] YIN W Z, FU Y F, YAO J, et al. Study on the dispersion mechanism of citric acid on chlorite in hematite reverse flotation system[J]. Minerals, 2017, 7(11): 221.
- [47] 周亮. 淀粉对微细粒赤铁矿絮凝行为及机理研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.
- ZHOU L. Study starch on flocculation behavior and mechanism of hematite fines[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015.
- [48] LEITE AMC, REIS EL. Cationic starches as flocculants of iron ore tailing slime[J]. Mineral Engineering, 2020, 148: 106195.
- [49] 张晋霞, 刘飞, 牛福生, 等. 基于异步絮凝调控下微细粒赤铁矿/石英浮选分离试验研究[J]. 有色金属工程, 2024, 14(9): 116–122.
- ZHANG J X, LIU F, NIU F S, et al. Experimental study on flotation separation of fine hematite / quartz based on asynchronous flocculation regulation[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(9): 116–122.
- [50] TRIPATHY T, BHAGAT RP, Singh RP. The flocculation performance of grafted sodium alginate and other polymeric flocculants in relation to iron ore slime suspension[J]. European Polymer Journal, 2001, 37(1): 125–130.

- [51] 王春梅, 葛英勇, 王凯金, 等. GE-609 捕收剂对齐大山赤铁矿反浮选的初探[J]. 有色金属(选矿部分), 2006(4): 41-43.
WANG C M, GE Y Y, WANG K J, et al. The original research into the reverse flotation of hematite in Qidashan by cationic collector GE-609[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2006(4): 41-43.
- [52] 周永锋. 阴阳离子组合捕收剂对赤铁矿和石英浮选及泡沫性能的影响[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
ZHOU Y F. Effect of combined collector of anion and cation on flotation and foam properties of hematite and quartz[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [53] SILVA K, FILIPPOV L O, PIÇARRA A, et al. New perspectives in iron ore flotation: Use of collector reagents without depressants in reverse cationic flotation of quartz[J]. Minerals Engineering, 2021, 170: 107004.
- [54] 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的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.
- [55] 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. Applied research of mixed collectors in hematite reverse flotation at normal temperature[J]. Metal Mine, 2016(12): 77-81.
- [56] 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试验研究[J]. 金属矿山, 2017(11): 64-69.
YU H M, WANG H J, SUN C Y. Preparation of JZQ-F collector with hogwash oil in reverse flotation tests of hematite[J]. Metal Mine, 2017(11): 64-69.
- [57] AL-DHUBAIBI A M A, HUSEYIN V, SONER T. Effective processing of specularite ore by wet magnetic separation and reverse flotation techniques[J]. Hittite Journal of Science & Engineering, 2019, 6: 201-208.
- [58] KAR B, SAHOO H, RATH S S, et al. Investigations on different starches as depressants for iron ore flotation[J]. Minerals Engineering, 2013, 49: 1-6.
- [59] ROCHA G M, MACHADO N R D S, PEREIRA C A. Effect of ground corn and cassava flour on the flotation of iron ore tailings[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8: 1510-1514.
- [60] BAI S J, DING Z, FU X Y, et al. Investigations on soluble starch as the depressant of hematite during flotation separation of apatite[J]. Physicochem Probl Miner Process, 2019, 55(1): 38-48.
- [61] VELOSO C H, FILIPPOV L O, FILIPPOVA I V, et al. Investigation of the interaction mechanism of depressants in the reverse cationic flotation of complex iron ores[J]. Minerals Engineering, 2018, 125: 133-139.
- [62] YUE T, WU X. Depressing iron mineral by metallic-starch complex (MSC) in reverse flotation and its mechanism[J]. Minerals, 2018, 8(3): 85.
- [63] POPERECHNIKOVA O Y, FILIPPOV L O, SHUMSKAYA E N, et al. Intensification of the reverse cationic flotation of hematite ores with optimization of process and hydrodynamic parameters of flotation cell[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 879: 012016.
- [64] YEHA A, ABD EL-HALIM S, SHARADA H, et al. Application of a fungal cellulase as a green depressant of hematite in the reverse anionic flotation of a high-phosphorus iron ore[J]. Minerals Engineering, 2021, 167: 106903.
- [65] HAN W, ZHU Y, GE W, et al. Curdlan as a new depressant of hematite for quartz-hematite reverse flotation separation[J]. Minerals Engineering, 2022, 185: 107708.
- [66] HAO H, LI L, YUAN Z, et al. Molecular arrangement of starch, Ca^{2+} and oleate ions in the siderite-hematite-quartz flotation system[J]. Journal of Molecular Liquids, 2018, 254: 349-356.
- [67] 刘星, 张晋霞, 徐亮, 等. 金属离子对赤铁矿、石英、绿泥石可浮性的影响[J]. 西部探矿工程, 2016, 28(7): 93-95+98.
LIU X, ZHANG J X, XU L, et al. Effect of metal ions on the flotability of hematite, quartz and chlorite[J]. West-China Exploration Engineering, 2016, 28(7): 93-95+98.
- [68] FU Y F, YIN W Z, YANG B, et al. Effect of sodium alginate on reverse flotation of hematite and its mechanism[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2018, 25(10): 1113-1122.
- [69] JIANG W L, ZHOU Y L, ZHANG Y M. The effect of new modified fatty acid (CY-23) collector on chlorite/hematite separation[J]. Journal of Chemistry, 2018: 1-6.

Progress in Flotation Technology and Reagent of Hematite

DU Yunxiang^{1,2}, LAN Zhuoyue^{1,2,3}, LI Xiong^{1,2}, LI Yunchuan^{1,2}, YANG Wanting^{1,2}, LI Hang^{1,2}

1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

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

3. Yunnan Province Engineering Research Center for Reutilization of Metal Tailings Resources, Kunming 650093, Yunnan, China

Abstract: Hematite occupies a critical position in China's iron ore resources, and flotation has become the dominant method for its separation and purification due to the increasing exploitation of complex and refractory hematite ores. This paper provides a comprehensive review of advancements in hematite flotation technologies, including direct flotation, reverse flotation, nano-bubble flotation, and flocculation flotation, with a focus on the development of collectors and regulators. The study emphasizes the necessity of improving iron recovery and reducing impurities through innovative flotation processes and optimized reagent systems. Traditional direct and reverse flotation methods remain foundational, where direct flotation selectively floats hematite using anionic collectors, while reverse flotation targets gangue minerals with cationic collectors. Recent advancements highlight the emergence of nano-bubble flotation, which leverages the unique physicochemical properties of nanoscale bubbles to improve particle-bubble collision efficiency, thereby enhancing flotation kinetics. Flocculation flotation, another developing technique, employs polymeric flocculants to aggregate ultrafine hematite particles, addressing challenges in fine-particle recovery. Experimental studies of these methods have demonstrated their potential for processing complex ores, though mechanistic understanding remains incomplete. Significant progress has been made in collector research, particularly in the development of hybrid anionic-cationic collectors that exhibit synergistic effects. However, limitations persist, including high cost, environmental concerns, and inconsistent performance under varying water hardness conditions. Results indicate that nano-bubble flotation achieves higher hematite recovery rates compared to conventional methods, due to improved surface hydrophobicity and reduced particle entrainment. Flocculation flotation further improves recovery of sub-10 μm particles, which are typically lost in traditional processes. Despite these advancements, challenges such as reagent stability, energy consumption in nano-bubble generation, and scalability of flocculation systems require further investigation. In conclusion, the sustainable development of hematite beneficiation relies on the integration of novel flotation technologies and eco-friendly reagent formulations. Future research should prioritize the design of low-cost, biodegradable collectors and the elucidation of interfacial mechanisms in nano-bubble and flocculation systems. Additionally, adaptive process optimization, considering factors such as water quality and ore variability, will be essential for industrial application. This holistic approach will ensure efficient utilization of China's hematite resources while addressing environmental and economic constraints.

Keywords: hematite; flotation; flotation reagent; collecting agent; adjusting agent

引用格式: 杜云翔, 蓝卓越, 李雄, 李云川, 杨琬婷, 李行. 赤铁矿浮选工艺及药剂研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2025, 45(4): 123-134.

DU Yunxiang, LAN Zhuoyue, LI Xiong, LI Yunchuan, YANG Wanting, LI Hang. Progress in flotation technology and reagent of hematite[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2025, 45(4): 123-134.

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

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn