

攀枝花某钒钛磁铁矿新型浮选捕收剂VTBJ-1 制备及分选实验研究

费之奎^{*#}, 张士举, 王录峰, 费娟, 曹佳译

攀枝花学院钒钛学院, 四川 攀枝花

收稿日期: 2025年11月7日; 录用日期: 2025年12月19日; 发布日期: 2026年1月26日

摘 要

攀枝花地区作为我国重要的钒钛磁铁矿资源基地, 其矿产资源丰富, 但传统的选矿工艺存在回收率低、精矿品位不稳定、药剂成本居高不下等问题。本文针对性地提出并设计一种新型浮选捕收剂VTBJ-1, 通过对其分子结构进行设计, 引入胺类活性基团与有机酸辅助基团, 实现了对钛铁矿表面的强吸附性与高选择性。实验表明, VTBJ-1捕收剂的分子结构稳定、可降解、纯度达到95%以上, 且在水相中分散性优异; 根据工艺流程确定其分选的最佳工艺条件为: 捕收剂用量1750 g/t, 矿浆浓度58%, 粗选pH值为5~6, 精选段pH值逐级降低。在此条件下, 钛精矿回收率和品位均达到最佳。与传统捕收剂相比, VTBJ-1显著提高了钛精矿的回收率和品位, 分别约为2.17%、2.10%。

关键词

浮选, 钒钛磁铁矿, 捕收剂, 品位, 回收率

Preparation and Flotation Separation Experiment of a Novel Flotation Collector VTBJ-1 for a Vanadium-Titanium Magnetite Ore in Panzhihua

Zhikui Fei^{*#}, Shiju Zhang, Lufeng Wang, Juan Fei, Jiayi Cao

School of Vanadium and Titanium, Panzhihua University, Panzhihua Sichuan

Received: November 7, 2025; accepted: December 19, 2025; published: January 26, 2026

^{*}第一作者。

[#]通讯作者。

文章引用: 费之奎, 张士举, 王录峰, 费娟, 曹佳译. 攀枝花某钒钛磁铁矿新型浮选捕收剂 VTBJ-1 制备及分选实验研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(1): 199-208. DOI: 10.12677/me.2026.141021

Abstract

As an important vanadium-titanium magnetite resource base in China, the Panzhihua area is rich in mineral resources, but traditional mineral processing technologies suffer from problems such as low recovery rate, unstable concentrate grade, and persistently high reagent costs. This paper proposes and designs a new type of flotation collector VTBJ-1 in a targeted manner. By designing its molecular structure and introducing amine-based active groups and organic acid auxiliary groups, strong adsorption and high selectivity on the surface of ilmenite are achieved. Experiments show that the VTBJ-1 collector has a stable and degradable molecular structure, a purity of over 95%, and excellent dispersibility in the aqueous phase. Based on the process flow, the optimal separation conditions are determined as follows: collector dosage of 1750 g/t, pulp concentration of 58%, pH value of 5~6 for roughing, and a gradual decrease in pH value for the cleaning section. Under these conditions, both the recovery rate and grade of ilmenite concentrate reach the optimal level. Compared with traditional collectors, VTBJ-1 significantly improves the recovery rate and grade of ilmenite concentrate by approximately 2.17% and 2.10% respectively.

Keywords

Flotation, Vanadium-Titanium Magnetite, Collector, Grade, Recovery Rate

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

攀枝花是我国重要的钒钛磁铁矿资源基地，其钒钛磁铁矿储量丰富，具有极高的经济价值和战略意义。攀枝花钒钛磁铁矿是一种典型的复杂多金属共生矿，其主要矿物成分包括钛铁矿、磁铁矿、橄榄石、辉石等。钛铁矿作为该矿石中的重要矿物之一，其钛含量较高，是提取钛金属的重要原料[1]。然而，由于钛铁矿与脉石矿物(如橄榄石、辉石等)嵌布关系复杂，且矿物表面性质相近，传统的选矿工艺在分选过程中存在诸多问题，如回收率低、精矿品位不稳定等[2]。传统的选矿工艺主要依赖于物理分选和化学浮选等方法。物理分选方法如重力分选和磁选，虽然操作简单、成本较低，但对于嵌布粒度细、矿物组成复杂的钒钛磁铁矿，其分选效果有限，难以有效分离钛铁矿和脉石矿物。化学浮选方法通过添加各种浮选药剂来实现矿物的选择性分离，但在实际应用中，传统浮选药剂存在选择性差、回收率低、精矿品位不稳定、成本较高(某工厂药剂成本 15,000 元/吨)等问题，难以满足现代选矿工艺对高效、环保、低成本的要求[3]。

因此，开发高效、绿色浮选捕收剂是提高钛铁矿回收率的关键。本文设计并研发一种新型浮选捕收剂不仅可以优化选矿工艺，降低生产成本，还可以提高资源利用率，减少尾矿排放，对推动攀西地区钒钛磁铁矿资源的可持续发展具有重要的现实意义。国内外学者围绕钒钛磁铁矿浮选工艺、捕收剂开发及矿物分离机制开展了大量研究，为攀枝花钒钛磁铁矿高效分选提供了理论参考[4]。本研究在借鉴国内外浮选理论与药剂开发经验的基础上，针对攀枝花钒钛磁铁矿的特殊性，通过捕收剂分子设计、工艺参数优化及性能对比，系统验证 VTBJ-1 的分选效能。

李凤久[5]论述了承德超贫钒钛磁铁矿铁、钛、磷选矿情况，分析了当前针对该类矿石选矿方面的研究现状、已取得的进展以及尚待突破的技术难点，对进一步完善超贫细钒钛磁铁矿的选矿工艺有着积极

的指导作用,针对攀西地区超微细粒级钛铁矿这一特殊资源,探索其选矿工艺,通过具体的试验研究等手段,为该难选矿物的有效分选提供了可行的工艺路线。Jiaqiao Yuan [6]等研究了新型捕收剂(2-乙基己基)膦酸单-2-乙基己基酯(HEHEHP)对钛铁矿捕收的可行性,展示了新型捕收剂在浮选中可在较宽的 pH 范围内对钛铁矿具有更优异的捕收性能。Lingzhi Zhou [7]研究了将 α -安息香肟(BO)作为一种新型高效的捕收剂用于从透辉石中选择性浮选钛铁矿,结果表明,在弱酸性至中性条件下,与苯甲羟肟酸(BHA)相比,BO 表现出更优异的捕收性能。齐赛男[8]等对新疆某钛铁矿选厂选铁尾矿采用“重选-弱磁-强磁”工艺进行分选,获得品位较高的强磁钛粗精矿,为高效回收强磁钛粗精矿,研发了一种新型捕收剂 WY-1 并进行了浮选试验研究。该捕收剂 WY-1 对低品位钛铁矿具有良好的捕收性能,且可有效提高低品位钛铁矿资源的回收率,为 VTBJ-1 捕收剂的配方设计提供了设计研发思路。刘佳[9]等人以废弃油脂为原料制备新型浮选捕收剂,并应用于炼焦煤浮选试验,研究表明该捕收剂能有效改善炼焦煤的浮选效果,提升精煤产率和质量,为捕收剂的绿色制备提供了新思路。肖建军[10]系统阐述了地沟油制备新型浮选捕收剂的研究进展,强调了利用废弃资源制备捕收剂在降低成本和环保方面的优势,为攀枝花钒钛磁铁矿捕收剂的制备提供了资源利用的参考方向。在金属矿浮选捕收剂研究方面,朱一民[11]等研发的新型捕收剂 DPY-4 应用于酒泉铁矿焙烧后的磁选精矿反浮选,显著提高了铁精矿品位和回收率。表明新型捕收剂在优化金属矿浮选指标上具有巨大潜力,为攀枝花钒钛磁铁矿捕收剂的研发提供了技术借鉴。刘文宝[12]等对锂云母浮选中新型阴阳离子组合捕收剂的泡沫性能进行研究,揭示了组合捕收剂在改善浮选泡沫特性、提高浮选效率中的作用机制,为 VTBJ-1 捕收剂的配方设计和性能优化提供了理论依据。在非金属矿浮选领域,蒋海勇[13]针对高钙萤石矿开展新型捕收剂 DA12 的浮选试验,有效实现了萤石与含钙矿物的分离,凸显了新型捕收剂在复杂矿物分离中的重要性。余娟[14]等利用新型 HY5 捕收剂浮选锌浸出渣中微细粒银,提高了银的回收效果,体现了新型捕收剂在回收伴生有价金属方面的价值,对于攀枝花钒钛磁铁矿中钒、钛等伴生元素的回收具有启示意义。从选煤厂应用角度看,赵佳[15]、李建光[16]、孙友彬[17]分别报道了新型浮选捕收剂在不同选煤厂的应用情况,证实了新型捕收剂能够有效提升选煤效率和经济效益,为新型捕收剂在工业生产中的推广应用提供了实践案例。余新阳、钟宏等[18]对铝硅酸盐矿物新型浮选捕收剂进行了研究,拓展了捕收剂的应用矿物种类,其研究方法和思路可为攀枝花钒钛磁铁矿捕收剂的研发提供参考。

综上所述,目前针对攀枝花钒钛磁铁矿的新型浮选捕收剂研究相对较少,需要对特定新型捕收剂如 VTBJ-1 的制备工艺、作用机理及分选效果等进行系统研究。因此,本研究开展了攀枝花某钒钛磁铁矿新型浮选捕收 VTBJ-1 的制备及分选实验研究,不仅是对现有浮选捕收剂研究的补充和拓展,也对提高攀枝花钒钛磁铁矿资源综合利用率、推动钒钛产业可持续发展具有重要的理论意义和现实价值。

2. 试验

2.1. 试验原料的主要成分

矿样来源:攀枝花某钒钛磁铁矿选矿厂(磁选尾矿)主要成分及含量如表 1 所示。

Table 1. Main chemical compositions of raw materials

表 1. 原料主要化学成分

元素	TFe	TiO ₂	SiO ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	CoO	P ₂ O ₅
含量(%)	18.94	11.15	37.03	10.11	9.90	8.62	0.142	0.01	0.42

根据表 1 可知,矿样中的元素基本上都是以氧化物的形式存在,是典型的氧化物。所提取的目标元素为矿物中的钛元素,其中 TiO₂ 含量仅为 11.15%,品位较低;脉石主要为硅铝钙酸盐, Si、Al、Ca、Mg

等“杂质”含量超高，属于典型的伴生矿，分选和冶炼均较为困难，通常情况下难以达到产品要求的品位指标(46%以上)。需要通过高效的富集手段，使 TiO_2 品位达到产品要求，因此，高效、绿色、低成本新型浮选捕收剂的研发显得尤为重要[19]。

2.2. 实验药剂

实验所用药剂如表 2 所示。

Table 2. Reagents used in the experiment
表 2. 实验用药剂

名称	学名	备注
氟硅酸钠	Na_2SiF_6	抑制剂
硫酸	H_2SO_4	浓度为 10%
2#油	/	起泡剂
柴油	/	辅助捕收剂
捕收剂 A	/	传统药剂
丁基黄药	$\text{C}_5\text{H}_9\text{OSK}$	脱硫药剂

氟硅酸钠(抑制剂): 主要用于抑制脉石矿物(如硅酸盐类矿物，如橄榄石、辉石等)的浮选。通过在脉石矿物表面吸附，增强其亲水性，阻止捕收剂与其结合，从而实现钛铁矿与脉石的分离[20]。

硫酸: 用于调节矿浆酸碱度，控制捕收剂解离度及矿物表面电荷。

2#油(起泡剂): 主要作用是降低水的表面张力，促使空气在矿浆中分散形成稳定气泡，为矿物附着提供载体。

捕收剂 A (传统药剂): 与新型药剂对比体现新型药剂的优越性。

柴油(非极性烃类油捕收剂): 非极性烃类化合物，可增强气泡的稳定性和矿物颗粒疏水性，同时对矿物颗粒(如钛铁矿)有一定辅助捕收作用[21]。

黄药: 主要成分为烷基二硫代碳酸盐，是硫化矿(如黄铁矿)的高效捕收剂。

2.3. VTBJ-1 捕收剂的制备

主要成分及作用:

胺类化合物: 作为活性基团，能够与钛铁矿表面的特定元素形成稳定的化学键合，增强矿物的疏水性。有机酸: 辅助基团，增强捕收剂的分散性和稳定性，同时参与矿物表面的化学作用。醇类化合物: 作为溶剂和助剂，提高捕收剂的溶解性和稳定性[22]。

主要配方比例: 十八胺: 30%~40%，油酸: 20%~30%，乙醇: 30%~40%，去离子水: 5%~10%。

制备步骤:

1) 原料准备

十八胺: 分析纯，市售试剂。油酸: 分析纯，市售试剂。乙醇(95%): 市售试剂。去离子水: 实验室自制[23]。

2) 合成步骤

溶解: 将十八胺和油酸分别溶解在适量的乙醇中，搅拌均匀。

混合: 将溶解好的十八胺溶液和油酸溶液按比例混合，搅拌 30 分钟，确保充分混合。

反应: 将混合溶液置于 60℃~70℃ 的水浴中，搅拌反应 3~4 小时。

- 3) 调整浓度：反应结束后，加入适量的乙醇和去离子水，调整溶液的浓度和粘度。
 - 4) 纯化：通过过滤和离心分离，去除反应过程中产生的杂质。
- 制作样品如图 1 所示。

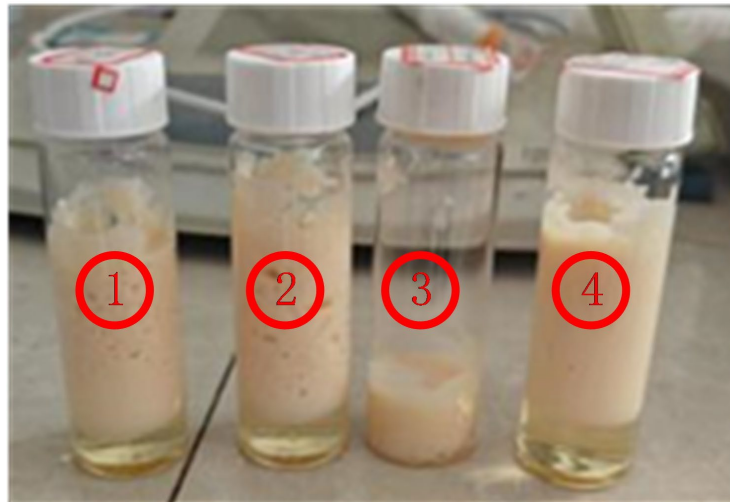


Figure 1. Collector sample
图 1. 捕收剂样品

2.4. 捕收剂作用机理

1) 化学吸附与键合作用

VTBJ-1 捕收剂的主要成分为胺类化合物和有机酸，主要通过化学吸附的方式与钛铁矿表面发生作用。胺类化合物中的胺基(-NH₂)具有孤对电子，能够与钛铁矿表面的金属阳离子(如 Ti⁴⁺、Fe³⁺)形成配位键。这种配位作用使得捕收剂分子牢固地吸附在矿物表面，形成一层稳定的化学吸附膜。油酸作为一种有机酸，其羧基团(-COOH)能够在矿物表面发生解离，与金属阳离子形成络合物，进一步增强捕收剂的吸附强度。化学吸附过程提高了钛铁矿表面的疏水性，增强了捕收剂与矿物表面的结合力，使钛精矿颗粒在浮选过程中更容易附着在气泡上并被高效富集[24]。

2) 疏水作用与气泡附着

捕收剂吸附在钛铁矿表面后，会改变矿物表面的疏水性。VTBJ-1 捕收剂分子中的疏水基团(如烷基链)朝向气泡内部，形成疏水性膜层，降低了矿物与气泡之间的接触角，增强了矿物与气泡之间的附着力。疏水作用使得钛精矿颗粒更容易附着在气泡上，并随气泡上升至矿浆表面[25]。

3) 浮选环境与稳定性

VTBJ-1 捕收剂在不同浮选环境条件下能保持稳定的浮选性能，捕收剂分子结构中的多功能基团能够保证捕收剂浮选的稳定。胺类和有机酸基团的协同作用使捕收剂能够在较宽的 pH 值范围内保持较高的吸附量和浮选效果，捕收剂分子中的醇类化合物提高了其在矿浆中的分散性和稳定性，减少了捕收剂在浮选过程中的损失。

2.5. 浮选实验工艺流程

取磁选尾矿 600 g，作为入浮料备用，浮选工艺流程图如图 2 所示[26]。

1) 粗选流程

脱硫预处理：将 600 g 矿样与 0.8 L 自来水加入 1 L 浮选槽，依次加入 17 μl 2#油(起泡剂)、0.18 g 黄

药(脱硫药剂), 搅拌 2 分钟后充气浮硫 3 分钟, 收集浮硫产物。

粗选操作: 向脱硫后的矿浆中加入 0.5 g 氟硅酸钠(抑制剂)、114 μl 柴油(辅助捕收剂)及 1.05 g VTBJ-1 捕收剂, 搅拌 2 分钟后充气进行粗选, 浮选时间 5~10 分钟, 收集粗选精矿和粗选尾矿。

2) 精选流程

粗选精矿依次进行四段精选, 每段精选均采用 0.5 L 浮选槽, 具体步骤如下:

精选一段: 粗选精矿调浆至矿浆浓度 58%, 用稀硫酸调节 pH 值至 4~5, 充气浮选 5~6 分钟, 收集精矿及尾矿。

精选二段至四段: 逐段降低 pH 值(精选二段: 3~4; 精选三段: 2~3; 精选四段: 1~2), 每段浮选时间逐步缩短(精选二段: 5 分钟; 精选三段: 3~5 分钟; 精选四段: 3 分钟), 最终获得钛精矿。

3) 尾矿处理

各阶段尾矿经浓缩、过滤后测定其钛精矿中 TiO_2 品位, 评估浮选效果。

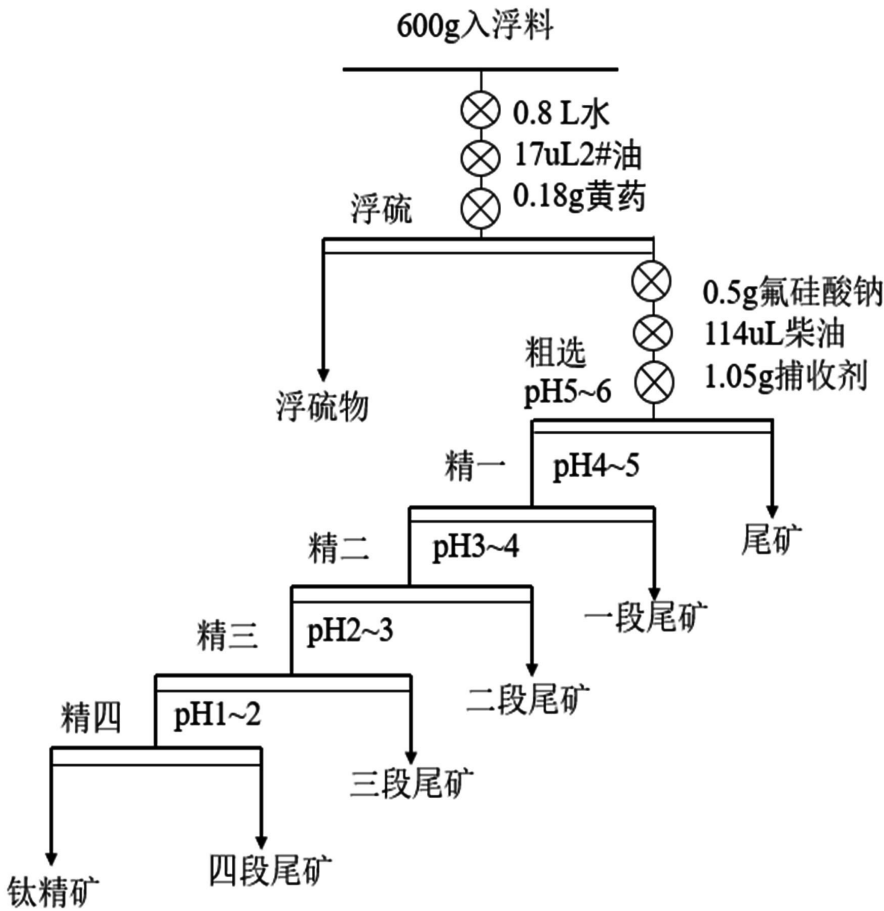


Figure 2. Flotation process flow chart
图 2. 浮选工艺流程图

2.6. 浮选评价指标

浮选实验结束后, 对浮选产物进行详细的分析, 以准确评估浮选效果[27]。主要测定指标包括:

1) 钛精矿 TiO_2 品位: 采用化学分析方法, 测定浮选精矿和尾矿中钛铁矿的品位, 计算其含量。

钛精矿 TiO_2 品位计算公式为:

$$\alpha_{\text{TiO}_2-j} = \frac{m_{\text{TiO}_2-j}}{m_j} \times 100\%$$

(1)

式中:

- α_{TiO_2-j} ——钛精矿 TiO_2 品位, %;
- m_{TiO_2-j} ——钛精矿中 TiO_2 质量, kg;
- m_j ——钛精矿质量, kg。

2) 钛精矿回收率: 根据浮选前后矿样中钛精矿的质量和原矿的质量, 计算钛精矿的回收率。
钛精矿回收率计算公式为:

$$\varepsilon_{\text{TiO}_2-j} = \frac{m_j}{m_y} \times 100\%$$

(2)

式中:

- $\varepsilon_{\text{TiO}_2-j}$ ——钛精矿回收率, %;
- m_j ——钛精矿质量, kg;
- m_y ——原矿质量, kg。

3. 试验结果与讨论

通过“一粗四精”的完整实验流程, 对传统药剂和新型捕收剂 VTBJ-1 两种不同的药剂分别进行实验, 对比两种不同药剂实验后所得到的钛矿回收率和钛精矿品位, 体现新型药剂 VTBJ-1 的优越性。传统药剂实验结果见表 3, VTBJ-1 实验结果见表 4。

Table 3. Experimental results of traditional reagents
表 3. 传统药剂实验结果

实验号	钛矿回收率%	钛精矿 TiO_2 品位%
1	6.78	44.61
2	6.14	45.28
3	6.39	45.15
4	6.67	45.96
5	6.66	46.12
6	6.35	45.83
7	6.78	44.38
8	6.43	44.91
9	6.98	45.17
10	6.51	45.29

Table 4. Experimental results of VTBJ-1
表 4. VTBJ-1 实验结果

实验号	钛矿回收率%	钛精矿 TiO_2 品位%
1	8.91	45.93
2	8.84	46.45
3	8.75	46.45

续表

4	8.66	45.98
5	8.46	46.56
6	8.53	47.12
7	8.49	46.89
8	8.67	46.61
9	8.73	47.02
10	8.68	46.84

在对 VTBJ-1 新型捕收剂与传统药剂的浮选效果进行对比分析时发现, VTBJ-1 新型捕收剂在钛铁矿浮选过程中浮选效果较好。表 3、表 4 实验数据表明, VTBJ-1 新型捕收剂在相同实验条件下, 钛矿回收率和钛精矿品位均高于传统药剂的回收率和精矿品位, 也进一步说明, VTBJ-1 新型捕收剂药剂分子设计合理, 捕收性能优于传统药剂, 也即 VTBJ-1 新型捕收剂能够有效提高钛矿的回收率和精矿品位, 有更佳的浮选性能和选择性[28] [29]。

1) 钛矿回收率:

传统药剂: 钛矿回收率在 6.14%到 6.98%之间波动, 平均回收率约为 6.5%左右。传统药剂在浮选过程中对钛铁矿的捕收能力有限, 导致回收率较低。

VTBJ-1 新型捕收剂: 钛矿回收率在 8.46%到 8.91%之间, 平均回收率约为 8.67%左右。VTBJ-1 新型捕收剂显著提高了钛铁矿的回收率, 比传统药剂高出约 2.17%。

2) 钛精矿 TiO₂ 品位:

传统药剂: 钛精矿 TiO₂ 位在 44.38%到 46.12%之间, 平均品位约为 45.25%左右。传统药剂在提高精矿品位方面能力有限, 且波动较大。

VTBJ-1 新型捕收剂: 钛精矿 TiO₂ 品位在 45.93%到 47.12%之间, 平均品位约为 46.55%左右, VTBJ-1 新型捕收剂不仅提高了精矿品位, 同时减少了实验结果的波动, 表现出更稳定的浮选效果。

3) 机理分析:

捕收剂的吸附行为: VTBJ-1 新型捕收剂的分子结构设计使其能够更有效地吸附在钛铁矿表面, 活性基团与钛铁矿表面形成稳定的化学键合, 增强了矿物的疏水性, 提高了浮选效率。VTBJ-1 新型捕收剂中的辅助基团增强了其分散性和稳定性, 减少了在矿浆中的损失, 提高了药剂的利用效率[30]。

浮选选择性: VTBJ-1 新型捕收剂在浮选过程中展现出更好的选择性。能够有效区分钛铁矿和脉石矿物, 减少了脉石矿物的误浮, 从而提高了精矿品位。相比之下, 传统药剂的选择性较差, 导致精矿中杂质含量较高。

4. 结论

1) VTBJ-1 捕收剂在浮选实验中表现出性能优势。在精选四阶段, pH 值为 1~2 时, 钛矿回收率达到 8.81%~8.34%, 第四段最终精矿品位达到 46.81%~47.13%。结果表明, VTBJ-1 新型捕收剂能够有效提高钛铁矿的回收率和精矿品位, 同时减少尾矿排放, 降低环境污染。与传统捕收剂相比, VTBJ-1 新型捕收剂在提高钛铁矿回收率和精矿品位方面具有显著优势。VTBJ-1 新型捕收剂浮选钛矿的回收率提高了 2.17%, 精矿品位提高了 2.1%, 展现出更佳的浮选性能和选择性。

2) 通过实验, 确定了 VTBJ-1 新型捕收剂的最佳浮选工艺条件: 捕收剂用量为 1750 g/t, 矿浆浓度为 58%, 粗选 pH 值为 5.5, 精选段 pH 值逐级降低(精选一至四段分别为 4~5、3~4、2~3、1~2)。钛铁矿的

回收率和精矿中 TiO_2 品位均达到最佳。实验结果表明, pH 值对浮选效果有显著影响。在第四段精选, pH 值为 1~2 时, 捕收剂与矿物表面的相互作用最强, 矿物的疏水性最佳, 浮选选择性最高, 尾矿品位最低。

3) VTBJ-1 新型捕收剂在酸性或中性条件下, VTBJ-1 均能够保持较为稳定的浮选性能, 为实际生产中应对复杂多变的矿石提供了可靠保障。在实际应用中, 通过精确控制浮选条件(如 pH 值、矿浆浓度、浮选时间等), 可以进一步优化浮选效果, 提高钛铁矿的回收率和精矿品位, 确保浮选工艺的稳定性 and 高效性。

4) 传统捕收剂成本超过 13,000 元/吨, VTBJ-1 新型捕收剂的综合成本在 12,750 元/吨, 较传统捕收剂降低 10%~15%。使用 VTBJ-1 新型捕收剂可以显著提高钛铁矿的回收率, 从而增加钛精矿的产量, 为企业带来更高的经济效益。

基金项目

四川省自然科学基金(青年基金)项目(2022NSFSC1021); 四川省自然科学基金(面上)项目(2025ZNSFSC0375); 钒钛关键战略材料四川省重点实验室项目(2019FTSZ07)资助。

参考文献

- [1] 程宏志, 张博. 我国煤泥浮选工艺的发展[J]. 选煤技术, 2024, 52(4): 56-61.
- [2] 张丽丽, 王倩, 李嘉, 等. 焙烧铁矿磁精矿细粒级的反浮选特性实验研究[J]. 矿业工程, 2024, 22(3): 28-31+35.
- [3] 张玲, 路永森, 薛晨, 等. 中国贫细杂难选铁矿分选技术研究进展[J]. 现代矿业, 2024, 40(3): 13-17+32.
- [4] 严伟平, 张博远, 扬耀辉, 等. 中国钒钛磁铁矿资源概况及中和利用技术发展[J]. 金属矿山, 2024(11): 70-80.
- [5] 李凤久, 黄文露, 赵留成, 等. 承德超贫钒钛磁铁矿铁、钛、磷选矿研究现状与进展[J]. 矿产综合利用, 2025: 1-16.
- [6] Yuan, J., Gong, X., Lu, H., Jiang, W., Lai, H., Wen, S., *et al.* (2025) Adsorption Mechanism of a Novel Collector (2-Ethylhexyl) Phosphonic Acid Mono-2-Ethylhexyl Ester for Selective Flotation Separation of Ilmenite from Titanite. *Minerals Engineering*, **228**, Article ID: 109340. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109340>
- [7] Zhou, L., Xie, X., Tong, X., Qi, J., Xie, R. and Tu, J. (2025) Selective Flotation of Ilmenite from Diopside Using A-Benzoin Oxime as a Novel Collector. *Applied Surface Science*, **700**, Article ID: 163238. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.163238>
- [8] 齐赛男, 孟庆有, 袁致涛, 等. 三元组合捕收剂对钛铁矿与钛辉石浮选行为的差异[J]. 金属矿山, 2025(1): 112-119.
- [9] 刘佳, 张德轲, 刘广山, 李云昌, 杨海昌. 废弃油脂制备新型浮选捕收剂及其浮选炼焦煤试验[J]. 金属矿山, 2025(2): 112-118.
- [10] 肖建军, 邱祖民, 饶荣, 罗春燕, 黄伟, 何维娟. 地沟油制备新型浮选捕收剂的研究进展[J]. 现代化工, 2015, 35(4): 57-59+61.
- [11] 朱一民, 丛璐, 陈培宇, 韩跃新, 刘杰. 新型捕收剂 DPY-4 反浮选酒泉铁矿焙烧后的磁选精矿[J]. 金属矿山, 2024(11): 81-87.
- [12] 刘文宝, 甘琦强, 陈猛强, 刘文刚, 沈岩柏. 在锂云母浮选中新型阴阳离子组合捕收剂的泡沫性能研究[J]. 金属矿山, 2024(7): 104-111.
- [13] 蒋海勇, 张辉, 张发明, 罗云波, 陈锐鹏. 新型捕收剂 DA12 对高钙萤石矿的浮选试验研究[J]. 非金属矿, 2025, 48(1): 1-5.
- [14] 余娟, 章晓林, 刘鑫鑫, 许兴隆, 陈星予, 杨娟, 刘殿文. 新型 HY5 捕收剂浮选锌浸出渣中微细粒银的试验研究[J]. 有色金属(中英文), 2025, 15(2): 281-287.
- [15] 赵佳. 新型浮选捕收剂在选煤厂的应用[J]. 矿业装备, 2023(8): 93-95.
- [16] 李建光, 刘向东, 张旭东, 张翠艳, 李军. 新型浮选捕收剂在赵各庄选煤厂的试验[J]. 选煤技术, 2005, 33(3): 9-11.

-
- [17] 孙友彬, 李勇. 新型浮选捕收剂在回坡底煤矿选煤厂的应用[J]. 能源与节能, 2022(5): 185-187.
- [18] 余新阳, 钟宏, 刘广义. 铝硅酸盐矿物新型浮选捕收剂的研究[J]. 江西理工大学学报, 2009, 30(5): 21-24.
- [19] 袁加巧, 丁湛, 余安美, 等. 钛铁矿表面改性浮选分离技术研究进展[J]. 有色金属工程, 2024, 14(9): 103-115.
- [20] Ye, F., Deng, H., Guo, Z., Wei, B. and Ren, X. (2023) Separation Mechanism and Experimental Investigation of Pulsating High Gradient Magnetic Separation. *Results in Physics*, **49**, Article ID: 106482. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2023.106482>
- [21] 成磊. 开放磁系永磁强磁选机用于钛铁矿分选研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(2): 100-103.
- [22] 张鹏, 施建平, 孟祥伟, 等. 氧化改性钛渣的磁选研究[J]. 中国钛业, 2013(2): 19-22.
- [23] 胡志波, 陈桃, 张子浩, 等. 攀西地区含钛高炉渣中钛的分选研究[J]. 化工矿物与加工, 2021, 50(10): 18-21.
- [24] 纪苏, 何起, 李秋菊, 等. 含钛渣中黑钛石相的重选分离试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2018, 39(3): 63-68.
- [25] 于雪峰, 孟浩, 包永义, 等. 反浮选氯化钾工艺关键控制探讨[J]. 盐科学与化工, 2022, 51(9): 35-37.
- [26] 朱诗曼, 李怡霏, 张喆怡, 等. 羟肟酸类捕收剂浮选金红石特性及其机理[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(4): 59-63.
- [27] 张晓年, 李家珍, 朱发军, 等. 湖北某地金红石选矿新工艺试验[J]. 矿产综合利用, 2016(1): 28-58.
- [28] 费之奎, 张士举, 王录峰, 等. 氧化改性钛渣含钛物相赋存状态及分选试验研究[J]. 冶金工程, 2025, 12(4): 199-207.
- [29] Liang, Y., Wang, J., Fei, Z., Peng, C., An, H. and Fan, Z. (2025) Effect of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ Solution Concentration on Bound Water Content in Ion Adsorption Rare-Earth Raw Ore. *Metals*, **15**, Article No. 1254. <https://doi.org/10.3390/met15111254>
- [30] 费之奎, 张士举, 王录峰, 等. 高钙镁钛精矿氧化改性——物理冶金分选协同提钛研究[J]. 冶金工程, 2025, 12(4): 213-224.