萘基羟肟酸对钛铁矿与钛辉石浮选的影响*

冯程[1,2],祁忠旭[1,2],孙大勇[1,2],欧阳林莉[1,2],李杰[1,2],肖舜元[1,2],刘佳燕[1,2]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.湖南省矿山固废综合利用工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012)

摘要:钛铁矿和钛辉石性质相近,浮选分离难度较大。通过浮选试验、Zeta电位测试和吸附量测试,探讨了萘基羟肟酸在钛铁矿和钛辉石矿物表面的吸附方式和作用机制,明确影响浮选性能的关键因素。结果表明,萘基羟肟酸在钛铁矿表面的吸附量显著高于钛辉石,对钛铁矿表面电位的影响比对钛辉石表面电位的影响大,这种吸附差异增加了钛铁矿与钛辉石的浮选差异。实际矿石浮选试验结果表明,使用萘基羟肟酸作为钛铁矿捕收剂,浮选闭路试验可以得到 TiO_2 品位47.26%、回收率为80.60%的钛精矿,实现了钛铁矿和钛辉石的浮选分离。研究结果可为钛铁矿新型浮选药剂的开发和钛矿浮选工艺的优化提供理论支撑。

关键词:萘基羟肟酸;钛铁矿;钛辉石;浮选

中图分类号:TD923 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)05-0261-07

Effect of Naphthyl Hydroxamic Acid on the Flotation Separation of Ilmenite and Titanaugite

Feng Cheng[1,2], *Qi Zhongxu*[1,2], *Sun Dayong*[1,2], *Ouyang Linli*[1,2], *Li Jie*[1,2], *Xiao Shunyuan*[1,2], *Liu Jiayan*[1,2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.Hunan Engineering and Technology Research Center for Comprehensive Utilization of Mine Solid Waste, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: Ilmenite and titanaugite have similar physicochemical properties, and their flotation separation is difficult to achieve. Through flotation tests, Zeta potential measurements and adsorption capacity tests, the adsorption mode and action mechanism of naphthyl hydroxamic acid on the surfaces of ilmenite and titanaugite were investigated, and the key factors affecting flotation performance were clarified. The results show that the adsorption capacity of naphthyl hydroxamic acid on ilmenite is significantly higher than that on titanaugite, and its influence on the surface potential of ilmenite is greater than that on titanaugite. Such adsorption differences increase the flotation difference between ilmenite and titanaugite. The results of actual ore flotation tests show that when naphthyl hydroxamic acid is used as the collector for ilmenite, a titanium concentrate with TiO_2 grade of 47.26% and recovery rate of 80.60% can be obtained in the closed-circuit flotation test, achieving the flotation separation of ilmenite and titanaugite. The research results can provide theoretical support for the development of novel flotation reagents for ilmenite and the optimization of titanium ore flotation processes.

Key words: Naphthyl hydroxamic acid, Ilmenite, Titanaugite, Flotation

0 引言

钛作为一种重要的战略金属,广泛应用于航空航天、海洋工程、医疗器械及高端化工等众多领域[1],但我国的钛需求对外依存度长期居高不下。随着全球经济的发展和科技的进步,全球对钛金属的需求也持续增长。钛铁矿($FeTiO_3$)是提取钛金属及其化合物的重要来源矿物[2],因此,高效开发利用低品位、复杂共生的钛铁矿资源已成为矿物加工领域的重点研究课题。我国钛铁矿资源禀赋条件差,多与钛辉石、绿泥石等脉石矿物紧密共生,传统工艺回收率低且能耗高。浮选是目前应用最广泛、最有效的钛铁矿选矿方法之一[3]。作为钛铁矿的典型伴生矿物,钛辉石(如 $CaTiSiO_5$ 等)因其晶体结构、表面性质与钛铁矿高度相似[4],在浮选过程中易与目标矿物竞争吸附捕收剂,导致二者分离效率低、

* **收稿日期**:2025-04-28
基金项目:新疆维吾尔自治区重大科技专项项目(2025A03002)
作者简介:冯程(1989—),女,湖北仙桃人,硕士,高级工程师,主要从事选矿技术研究。E-mail:1060213867@qq.com

精矿品位不达标。在钛铁矿和钛辉石的浮选分离过程中,浮选药剂的选择和使用至关重要,直接影响着浮选指标和精矿质量[5]。传统浮选工艺中,脂肪酸类或磺酸盐类捕收剂虽有一定的效果,但选择性不足,且易受矿浆 pH、离子浓度等条件限制,难以满足高精度分选的需求[6-7]。因此,开发新型高效、选择性强的浮选药剂,实现钛铁矿与钛辉石的高效分离,对回收钛铁矿中的钛资源具有重要意义。

羟肟酸是一类新型的浮选药剂,具有选择性好、捕收能力强等优点[8],在有色金属和稀有金属矿的浮选中得到了广泛的应用。近年来,羟肟酸类化合物因其独特的螯合能力与表面吸附特性[9],在钛铁矿浮选中展现出优异的选择性捕收性能,越来越多的研究表明,羟肟酸在钛矿浮选中表现出了良好的应用前景[10-11]。研究表明,羟肟酸可与金属离子(如 Fe^{3+}、Ti^{4+} 等)形成稳定络合物,在矿物表面定向吸附,从而增强目标矿物的疏水性[12-13]。然而,关于羟肟酸对钛铁矿与钛辉石浮选影响的研究还不够系统和深入。钛铁矿和钛辉石的晶体结构、表面性质存在一定差异,钛铁矿与钛辉石的 Fe/Ti 配位环境及表面活性位点可能导致羟肟酸吸附行为的显著不同,羟肟酸与这两类矿物的作用机制以及在不同浮选条件下可取得的浮选效果仍有待进一步明确。此外,羟肟酸分子结构(如碳链长度、取代基类型)[14]对浮选行为的影响、与抑制剂/活化剂的协同效应等问题亦缺乏系统性研究。通过开展羟肟酸对钛铁矿与钛辉石浮选影响的研究,研究羟肟酸在钛铁矿与钛辉石浮选中的选择性调控机制,揭示羟肟酸对钛铁矿与钛辉石的选择性作用机制,可开发高效浮选体系,提高钛精矿品位与回收率,推动低品位钛资源的高值化利用,为钛铁矿浮选药剂的设计、优化钛矿浮选工艺、提高钛资源回收率提供理论支撑。对促进钛资源高效开发、推动选矿技术进步具有重要意义。

本文通过单矿物浮选试验,研究了采用萘基羟肟酸作为捕收剂对钛铁矿和钛辉石浮选规律的影响,通过动电位测试、吸附量测试等分析手段查明萘基羟肟酸在矿物表面的吸附形式及作用机理,并通过实际矿石浮选试验实现钛铁矿和钛辉石的浮选分离,为钛铁矿浮选生产提供理论依据和技术支持。

1 试验样品及药剂

钛铁矿和钛辉石样品来自攀西地区某选钛厂浮硫尾矿,经实验室摇床重选、磁选方法反复提纯,最终由人工在显微镜下挑选去杂得到钛铁矿和钛辉石单矿物。单矿物纯度均达到 92%以上,满足单矿物要求。

实际矿石样品为攀西地区某选钛厂浮硫尾矿,该矿样的多元素分析和物相分析结果分别见表 1 和表 2,给矿 TiO_2 品位为 18.35%,脉石组分以镁硅酸盐为主,TiO_2 在钛铁矿中的分布率为 81.85%。

试验用试剂萘基羟肟酸、油酸钠、硫酸、氢氧化钠、MIBC 等均为分析纯试剂。

表 1 矿样多元素化学分析结果

Table 1 Multi-element chemical analysis results of raw ore

%

TiO_2	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P	S	CaO	TFe	V_2O_5
18.35	7.13	6.84	34.68	0.024	0.004	7.35	19.26	0.16

表 2 钛的物相分析结果

Table 2 Chemical phase analysis results of titanium %

钛相	含量	分布率
钛铁矿中的 TiO_2	15.02	81.85
钛磁铁矿中的 TiO_2	1.94	10.57
硅酸盐中 TiO_2	1.39	7.58
总 TiO_2	18.35	100.00

2 试验方法

2.1 浮选试验

(1) 单矿物浮选试验。每次称取 2.0 g 钛铁矿或钛辉石单矿物样品,置于 XFG 型挂槽式浮选机中,在常温条件下采用硫酸或氢氧化钠溶液调节矿浆 pH。依据试验设计要求,按先后顺序依次加入相应的浮选药剂,进行充气刮泡作业。浮选结束后,将精矿与尾矿分别烘干称重,依据产率数据计算回收率。

(2) 实际矿石浮选试验。每次称取 600.0 g 实际矿样放置于 1.0LXFD 型单槽浮选机中,根据试验条件按先后顺序加入相应的浮选药剂,然后进行充气刮泡,精选采用 0.75 L 和 0.5 L 的 XFD 型单槽浮选机,根据各产品的产率和 TiO_2 品位计算各作业回收率。

2.2 Zeta 电位测试

采用 Malvern Zeta 电位分析仪测试 Zeta 电位。测试前,将钛铁矿或钛辉石纯矿物样品经玛瑙研钵研磨至粒径 $-2\ \mu m$ 后置于 105 ℃烘箱中干燥 12 h。称取 0.03 g 矿样置于烧杯中,加入 50 mL 超纯水超声分散处理 10～15 min,采用稀盐酸或氢氧化钠溶液调节体系 pH 至预设范围。在不同的药剂条件

下,在恒温磁力搅拌器中搅拌 30 min,静置 10 min 后取上层清液放置于 Zeta 电位分析仪中测试 ζ 电位,为提高测试结果的准确性,每个样品平行测定 3 次,取 3 次的平均值作为最终结果。

2.3 吸附量测试

采用分光光度法测定捕收剂萘基羟肟酸吸附量。通过测量吸附前后捕收剂溶液浓度的变化,根据溶液体积计算出捕收剂吸附量。先按设定的浓度配制一系列捕收剂溶液,测量其在特定波长下的吸光度,绘制吸光度-浓度标准曲线。将钛铁矿或钛辉石纯矿物加入捕收剂溶液中进行吸附反应,达到吸附平衡后,分离出溶液。测量分离后溶液在特定波长下的吸光度,根据标准曲线计算剩余吸附质的浓度。根据吸附前后捕收剂溶液浓度的变化和溶液体积,计算吸附量。

3 单矿物浮选试验研究

采用萘基羟肟酸作为捕收剂,考查 pH 对钛铁矿和钛辉石浮选行为的影响,试验结果如图 1 所示,其中萘基羟肟酸用量为 200 mg/L,起泡剂 MIBC 用量为 20 mg/L。

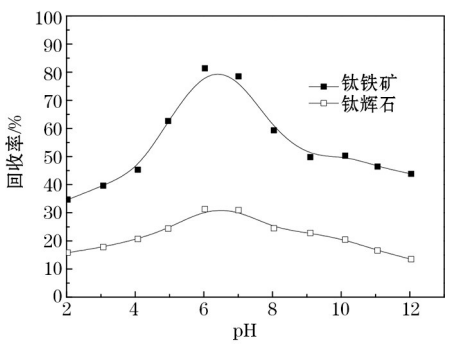


图 1 pH 对钛铁矿和钛辉石浮选的影响

Fig.1 Effect of pH on the flotation of ilmenite and titanaugite

从图 1 可以看出,使用 200 mg/L 的萘基羟肟酸作捕收剂时,钛铁矿与钛辉石的浮选行为与矿浆 pH 之间呈现较为密切的关联性,在 pH 低于 6 的弱酸性至中性区间内,钛铁矿和钛辉石的回收率逐渐增加,其中钛铁矿的浮选回收率高于钛辉石,两者的回收率差值呈现增大的趋势,回收率差值由初始的 18.9%逐步扩大至 pH=6 时的峰值 50.11%。当 pH 超过 6 进入弱碱性区间后,钛铁矿和钛辉石的回收率呈现下降趋势,两者的回收率差值呈现减小的趋势。在 pH 为 2~12 的区间范围内,钛铁矿和钛辉石的回收率差值在 pH=6 时达到最大。说明通过调节矿浆 pH 可实现两种矿物的有效分离,这为钛铁矿与钛辉石的高效分选提供了理论依据。

在 pH=6 的条件下考查萘基羟肟酸用量对钛铁矿和钛辉石浮选规律的影响,试验结果如图 2 所示。

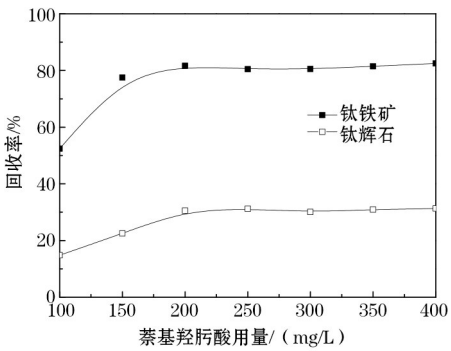


图 2 捕收剂用量对钛铁矿和钛辉石浮选的影响(pH=6)

Fig.2 Effect of collector dosage on the flotation of ilmenite and titanaugite (pH=6)

由图 2 可知,钛铁矿与钛辉石的浮选分离效果受捕收剂萘基羟肟酸用量的显著影响。在 pH=6 的浮选体系中,随着萘基羟肟酸添加量从 100 mg/L 逐步提升至 200 mg/L,钛铁矿的回收率呈现持续上升趋势,当药剂用量达到 200 mg/L 时,钛铁矿回收率达到 80%以上,随着捕收剂萘基羟肟酸用量的增加,钛辉石的回收率虽同步增长,但增幅相对平缓,回收率维持在 30%左右。当药剂用量超过临界值 200 mg/L 后,两种矿物的回收率增长幅度明显变小,钛铁矿和钛辉石的回收率差值在萘基羟肟酸用量为 200 mg/L 时达到最大值,为 50.85 个百分点。

4 萘基羟肟酸对钛铁矿和钛辉石的作用机理研究

通过矿物表面 Zeta 电位测定和吸附量测定探讨萘基羟肟酸对钛铁矿和钛辉石作用的机理。在萘基羟肟酸用量为 200 mg/L、pH 为 6 的条件下,药剂作用前后钛铁矿和钛辉石表面 ζ 电位与 pH 关系分别如图 3 和图 4 所示。

从图 3 可以看出,钛铁矿的零电点位于 pH 约为 5.4 处。在 pH 低于 5.4 时,钛铁矿表面呈现正电性,这是由于钛铁矿表面富含的钛或铁氧化物基团在酸性条件下形成带正电荷的$—OH_2^+$ 基团;而当 pH 超过 5.4 后,钛铁矿表面电位为负,这是因为矿物表面羟基质子解离程度增强,表面负电荷逐渐占优。当钛铁矿与萘基羟肟酸作用时,在试验设定的

pH 范围内(2～12),其表面 ζ 电位始终低于零电位阈值,且呈现明显的负向偏移。这种电位现象表明,萘基羟肟酸分子与钛铁矿表面的金属离子发生配位螯合作用,形成稳定的化学吸附层,导致表面电荷密度显著降低。萘基羟肟酸在钛铁矿的表面发生较明显的吸附,表明萘基羟肟酸与钛铁矿作用较强。与之对比,钛辉石的零电点较低,位于 pH=3.3 处,其表面电位在 pH<3.3 时呈正电性,而在 pH>3.3 时转为负电性。钛辉石与萘基羟肟酸作用后,钛辉石的 ζ 电位虽也呈现负向移动趋势,但偏移幅度较小,说明在试验的 pH 范围内萘基羟肟酸在钛辉石表面的吸附量变化较小。这种差异性吸附行为表明,萘基羟肟酸在钛铁矿表面的吸附强度显著高于钛辉石,这与两种矿物表面金属活性位点的分布差异密切相关,钛铁矿表面更高密度的钛离子或铁离子位点为萘基羟肟酸的螯合吸附提供了更优的界面反应条件。

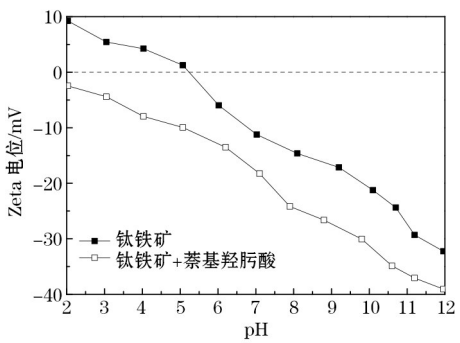


图 3 萘基羟肟酸对钛铁矿表面电性的影响

Fig.3 Effect of naphthohydroxamic acid on Zeta potential of ilmenite

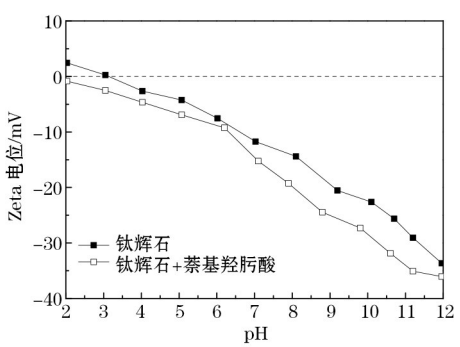


图 4 萘基羟肟酸对钛辉石表面电性的影响

Fig.4 Effect of naphthohydroxamic acid on Zeta potential of titanaugite

综合电位分析结果可知,经萘基羟肟酸作用后,钛铁矿与钛辉石的表面电位差值增加,证实捕收剂萘基羟肟酸对钛铁矿表面性质的改性效果更为显著,与钛辉石相比,钛铁矿表面电位差降低更多,说明捕收剂萘基羟肟酸的吸附作用对钛铁矿表面性质影响更大。这种选择性吸附特性为钛铁矿与钛辉石的浮选分离提供了重要的电化学调控依据,尤其在弱酸性矿浆条件下,通过优化萘基羟肟酸的吸附动力学可有效提升钛铁矿的浮选回收率。

通过分光光度法测量捕收剂萘基羟肟酸在钛铁矿和钛辉石表面的吸附量,考查了萘基羟肟酸的浓度对钛铁矿和钛辉石表面吸附行为的影响,试验结果见图 5。

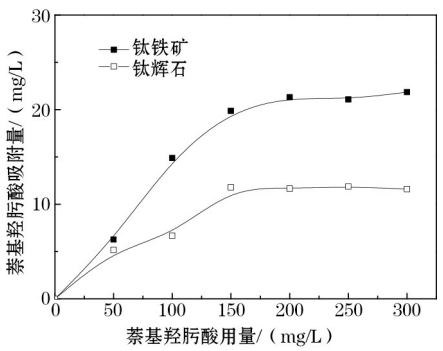


图 5 萘基羟肟酸在矿物表面吸附量的变化

Fig.5 Change of adsorption capacity of naphthohydroxamic acid on mineral surface

从图 5 可以看出,随着萘基羟肟酸添加量的梯度增加,钛铁矿与钛辉石表面吸附量均呈现显著的正相关性增长。在相同药剂浓度下,捕收剂萘基羟肟酸在钛铁矿表面吸附量始终高于在钛辉石表面的吸附量。另外,在 50～200 mg/L 用量区间内,钛铁矿吸附量增幅达 240%,而钛辉石增长幅度为 125%,钛铁矿的吸附量增加幅度显著大于钛辉石的吸附量增幅。这种差异性吸附行为与两种矿物的表面化学特性密切相关。萘基羟肟酸分子中肟基官能团优先与钛铁矿表面的金属离子活性位点发生吸附作用,形成的稳定螯合物可有效增强矿物表面疏水性[13,15],而对钛辉石表面活性位点的吸附作用则相对较弱。这种选择性吸附差异导致钛铁矿表面疏水性提升幅度较钛辉石高,进一步证实萘基羟肟酸显著改变了钛辉石表面的吸附行为,对钛铁矿具有更强的选择性捕收作用,而对钛辉石的表面改性效果相对有限。

5 实际矿石浮选试验研究

5.1 萘基羟肟酸用量试验研究

通过实际矿石浮选试验验证萘基羟肟酸对钛铁

矿和钛辉石浮选的影响。对浮硫尾矿进行了萘基羟肟酸用量试验,硫酸用量为 1 500 g/t,采用萘基羟肟酸+油酸钠组合捕收剂,在油酸钠用量为 1 500 g/t 的条件下考察萘基羟肟酸用量对钛铁矿浮选指标的影响,浮选试验结果如图 6 所示。

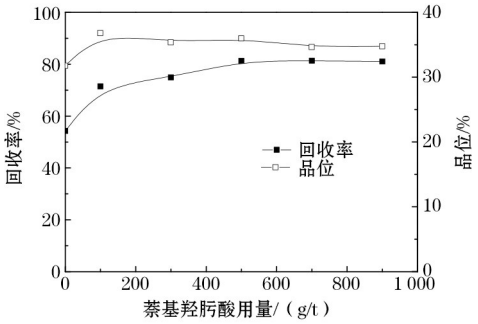


图 6 萘基羟肟酸用量试验结果

Fig.6 Test results of sodium tripolyphosphate dosage

由图 6 可知,在未添加萘基羟肟酸的条件下,粗精矿 TiO_2 品位仅达到 31.76%,这主要是由于钛铁矿与钛辉石的可浮性差异较小,两种矿物难以高效分离。钛辉石表面存在的类质同象现象使其与钛铁矿具有相近的疏水性,在常规捕收剂作用下易产生共吸附现象,致使精矿中杂质含量升高,影响了精矿品位。试验数据表明,当萘基羟肟酸用量增至 500 g/t 时,粗精矿 TiO_2 品位显著提升至 35.98%,增幅达 13.29%。表明萘基羟肟酸作为捕收剂,通过差异化的表面作用机制,对钛铁矿起到了较好的选择性捕收作用,可有效实现钛铁矿矿物和钛辉石的浮选分离。

5.2 闭路对比试验研究

为进一步验证萘基羟肟酸对钛铁矿和钛辉石浮选的影响,进行了不使用萘基羟肟酸和使用萘基羟肟酸作为捕收剂的闭路试验,闭路试验工艺流程如图 7 所示,闭路试验结果见表 3。表 3 中的浮选试验数据表明,在未添加萘基羟肟酸的对照组中,钛铁矿精矿 TiO_2 品位为 44.14%,回收率达到 81.34%;当添加 500 g/t 的萘基羟肟酸作为钛铁矿特效捕收剂时,精矿 TiO_2 品位显著提升至 47.26%,回收率小幅下降至 80.60%。对比数据显示,添加萘基羟肟酸可在降低 0.74 个百分点回收率的条件下,实现了精矿品位 3.12 个百分点的显著提升。萘基羟肟酸对钛铁矿的选择性捕收作用明显,该药剂对钛铁矿表面具有强选择性吸附作用,其分子结构中的肟基官能团能与钛铁矿表面金属离子形成稳定络合物,而对钛辉石的吸附能力较弱。这种选择性捕收机制可实现钛铁矿与钛辉石在浮选过程中高效分离。

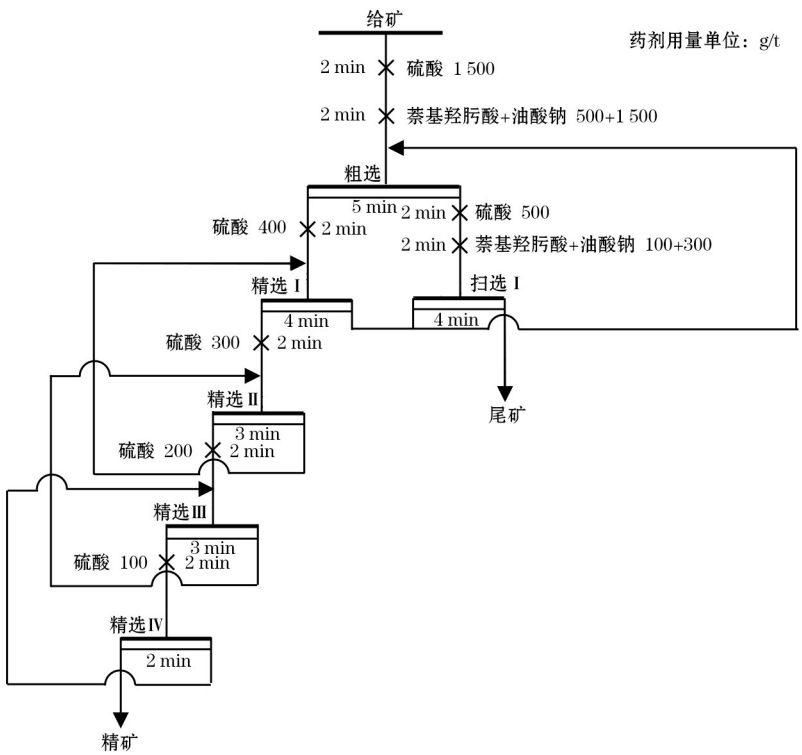


图 7 闭路试验工艺流程

Fig.7 Flowsheet of closed-circuit test

表 3 闭路试验结果

Table 3 Results of closed circuit test

试验条件	产品名称	产率/%	TiO_2 品位/%	回收率/%
萘基羟肟酸+油酸钠 (0+2 000) g/t	精矿	33.67	44.14	81.34
	尾矿	66.33	5.14	18.66
	给矿	100.00	18.27	100.00
萘基羟肟酸+油酸钠 (500+1 500) g/t	精矿	31.25	47.26	80.60
	尾矿	68.75	5.17	19.40
	给矿	100.00	18.32	100.00

6 结论

(1) 单矿物浮选试验表明,以萘基羟肟酸为捕收剂,在 pH 为 2～12 的区间范围内,钛铁矿的回收率高于钛辉石的回收率,钛铁矿和钛辉石的回收率呈现先上升后下降的趋势,两者的回收率差值在 pH 为 6 时达到最大;在萘基羟肟酸用量为 200 mg/L 时,钛铁矿与钛辉石的可浮性差异较大。

(2) 矿物表面 Zeta 电位测定和吸附量测定表明,萘基羟肟酸与钛铁矿作用较强,与钛辉石作用较弱,萘基羟肟酸能显著增强钛铁矿的吸附行为,对钛辉石的吸附行为影响小,萘基羟肟酸可以影响钛铁矿和钛辉石表面的吸附差异,从而增大钛铁矿与钛辉石的可浮性差异。

(3) 实际矿石浮选试验表明,添加 500 g/t 的萘基羟肟酸作为钛铁矿捕收剂,并与油酸钠组合使用,经浮选分离可以得到 TiO_2 品位 47.26%、回收率为 80.60%的钛精矿。

参考文献(References):

[1] 李政,陈从喜.全球钛资源行业发展现状[J].地球学报,2021,42(2):245-250.
Li Zheng, Chen Congxi. Development status of global titanium resources industry[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021,42(2):245-250.

[2] Zhai Jihua, Chen Pan, Sun Wei, et al. A review of mineral processing of ilmenite by flotation [J]. Minerals Engineering,2020,157:106558.

[3] 李海兰,周倩,安奇强,等.新型阴离子捕收剂浮选钛铁矿试验研究[J].矿业研究与开发,2021,41(3):98-101.
Li Hailan, Zhou Qian, An Qiqiang, et al. Experiment study on flotation of ilmenite with a new anion collector[J]. Mining Research and Development,2021,41(3):98-101.

[4] 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.
Qi Sainan, Meng Qingyou, Yuan Zhitao, et al. Difference in flotation behavior between ilmenite and titanaugite by ternary combination collector[J]. Metal Mine,2025(1):112-119.

[5] 李维斯.微细粒钛铁矿浮选螯合剂的遴选与作用机理研究[D].长沙:中南大学,2022.
Li Weisi. Study on selection and mechanism of chelating agent for flotation of fine ilmenite[D]. Changsha: Central South University,2022.

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

[7] 杨招君,谢宝华,梁焘茂,等.油酸与苯甲羟肟酸对钛铁矿浮选作用的差异[J].钢铁钒钛,2023,44(5):23-27.
Yang Zhaojun, Xie Baohua, Liang Taomao, et al. Differences between oleic acid and benzohydroxamic acid in flotation performance of ilmenite[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2023,44(5):23-27.

[8] 李金辉,邵延海,刘承杰,等.基于苯甲羟肟酸的三元组合捕收剂浮选分离钛铁矿与橄榄石机理研究[J].矿产保护与利用,2024,44(3):57-62.
Li Jinhui, Shao Yanhai, Liu Chengjie, et al. Study on the mechanism of separating ilmenite and olivine by flotation with a ternary combination of benzohydroxamic acid-based traps [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2024,44(3):57-62.

[9] 杨招君,王丰雨,钟森林,等.苯甲羟肟酸浮选钛铁矿的作用机理[J].钢铁钒钛,2022,43(4):24-27.
Yang Zhaojun, Wang Fengyu, Zhong Senlin, et al. Flotation mechanism of ilmenite with benzohydroxamic acid [J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2022,43(4):24-27.

[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 Wei, Shao Yanhai, Yu Jiayi, et al. Research status and prospect of ilmenite flotation reagents[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2021,41(5):160-167.

[11] 董文超,刘建,白旭,等.钛铁矿浮选药剂作用机理及进展[J].矿产保护与利用,2019,39(4):159-164+171.
Dong Wenchao, Liu Jian, Bai Xu, et al. Action mechanism and progress of ilmenite flotation reagents[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2019,39(4):159-164+171.

[12] 徐彩丽,池汝安,吕仁亮,等.辛基羟肟酸浮选行为的研究进展[J].武汉工程大学学报,2019,41(6):566-572.
Xu Caili, Chi Ru'an, Lyu Renliang, et al. Progress in flotation behavior of octyl hydroxamic acid[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology,2019,41(6):566-572.

[13] 刘文刚,王本英,代淑娟,等.羟肟酸类捕收剂在浮选中的应用现状及发展前景[J].有色矿冶,2006,22(4):25-27.

Liu Wen'gang, Wang Benying, Dai Shujuan, et al. Current application and development prospect of hydroximic acid in flotation[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2006, 22(4): 25-27.

[14] Xu Haifeng, Zhong Hong, Tang Qing, et al. A novel collector 2-ethyl-2-hexenoic hydroxamic acid: Flotation performance and adsorption mechanism to ilmenite[J]. Applied Surface Science, 2015, 353: 882-889.

[15] 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.
Zhu Shiman, Li Yifei, Zhang Zheyi, et al. Flotation characteristics and mechanism of rutile with hydroxamic acid collectors [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(4): 59-63.