

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2024.08.014

川西低品位钛铁矿磁-浮联合选别工艺试验研究

周凌志^{1,2,3}, 谢 贤^{1,2,3}, 漆 静^{1,2,3}, 李 蒋^{1,2,3}, 陈杰江^{1,2,3}, 夏虎潇^{1,2,3}, 孙代馨^{1,2,3}

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 昆明 650093;

3. 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, 昆明 650093)

摘 要:以川西地区某低品位钛铁矿为研究对象, 针对该钛铁矿品位低、矿物组成成分复杂、有价矿物之间共生关系密切、且嵌布粒度细等问题, 采用磁-浮混合工艺对该难选钛铁矿进行选矿工艺试验研究。通过试验研究, 优化选矿工艺流程和药剂制度, 为低品位钛铁矿的开发利用提供理论依据和技术支撑。结果表明: 对 TiO_2 品位为 7.45% 的钛铁矿原矿, 通过强磁-浮选联合工艺, 并采用新型高选择性羧酸捕收剂 TOH 精选后, 可获得 TiO_2 品位为 43.50%、回收率为 74.30% 的钛精矿。

关键词: 钛铁矿; 浮选; 磁选; 捕收剂

中图分类号: TD922; TD923

文献标志码: A

文章编号: 2095-1744(2024)08-0121-09

Experimental Study on Magnetic-Flotation Combined Separation Process of Low-Grade Ilmenite in Western Sichuan

ZHOU Lingzhi^{1,2,3}, XIE Xian^{1,2,3}, QI Jing^{1,2,3}, LI Jiang^{1,2,3}, CHEN Jiejiang^{1,2,3},

XIA Huxiao^{1,2,3}, SUN Daixin^{1,2,3}

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

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

3. National & Regional Engineering Research Center for green comprehensive Utilization of Gangue Resources from Metal Mines, Kunming 650093, China)

Abstract: This article takes a low-grade ilmenite in the western Sichuan region as the research object. In response to the low grade, complex mineral composition, close symbiotic relationship between valuable minerals, and fine embedded particle size of the ilmenite, a magnetic-flotation mixed separation process was used to beneficiate ilmenite. Through the experimental study, the beneficiation process and regime of agent are optimized, which provides theoretical basis and technical support for the development and utilization of low-grade ilmenite. The experimental results show that magnetic-flotation combined process performed excellent effect on the ilmenite ores with TiO_2 grade of 7.45%, and titanium concentrate with TiO_2 grade of 42.6% and recovery of 77.51% can be obtained by using a highly-selective carboxylic acid collector TOH.

Key words: ilmenite; flotation; magnetic separation; collector

收稿日期: 2024-06-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51764025)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation Project(51764025)

作者简介: 周凌志(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为矿产资源综合利用、浮选理论与工艺。

通信作者: 谢 贤(1981—), 男, 博士, 教授, 研究方向为浮选理论与工艺、尾矿资源二次利用、矿产资源综合利用。

引用格式: 周凌志, 谢贤, 漆静, 等. 川西低品位钛铁矿磁-浮联合选别工艺试验研究[J]. 有色金属工程, 2024, 14(8): 121-129.

ZHOU Lingzhi, XIE Xian, QI Jing, et al. Experimental Study on Magnetic-Flotation Combined Separation Process of Low-Grade Ilmenite in Western Sichuan[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(8): 121-129.

钛铁矿是一种由氧化铁和氧化钛组成的矿物,化学式为 FeTiO_3 ,通常呈黑色或钢灰色,具有弱磁性,主要用于航空航天、舰船、涂料等领域^[1]。此外,钛的重要化合物二氧化钛(钛白粉)也用途广泛^[2]。在我国,钛资源储量为所有金属资源储量的第4位,仅次于铁、铝以及镁^[3]。钛铁矿储量占我国钛资源的比例高达98%^[4],钛铁矿是提取钛的重要矿石,是制造二氧化钛的主要原料。目前,钛铁矿的进口量逐年呈上升趋势,我国对外依存度已超过60%。考虑到当前的国际政治经济形势,预计未来相当长的一段时间内,国际钛铁矿资源贸易都将受到影响。因此,加强我国钛矿资源的开发利用研究具有重要的战略意义^[5]。

钛铁矿与其伴生脉石矿物的可选特性相似,在选别过程中存在交互影响,因此给钛铁矿的分选带来了困难^[6],为了更有效地利用钛铁矿资源,其选矿技术成为研究的重点之一。选矿作为一种重要的矿石处理技术,对于提高矿石品位、减少废弃物产生以及降低生产成本有关键作用。钛铁矿表面活性位点主要为 $\text{Mn}(\text{II})$ 和 $\text{Fe}(\text{II})$,活性较低,可浮性较差。因此,单一的浮选工艺流程并不适用于有效富集钛铁矿。同时,钛铁矿具有密度大、弱磁性和导电性等特点。在大多数情况下,采用联合工艺进行处理是更为合适的选择^[7]。原生钛铁矿普遍采用磁选-浮选联合工艺、重选-磁选-电选联合流程、重选-磁选联合流程、磁选流程、重选-强磁-浮选流程^[8]。

攀西某钛铁矿矿石主要可回收矿物为钛铁矿, TiO_2 品位仅为7.45%,脉石矿物主要为角闪石、钠长石和绿闪石。针对该矿石的性质特点,本文研究了磨矿细度、磁场强度、浮选药剂用量等条件对钛精矿品位及回收率的影响,最终采用磁选-浮选联合工艺流程获得了合格的钛精矿,对于低品位钛铁矿选矿具有借鉴意义。

1 矿石工艺矿物学研究

1.1 化学元素分析

X射线荧光光谱半定量分析(XRF)可有效识别矿样中的元素种类和组成,为后续化学多元素分析提供基础。钛铁矿原矿的X射线荧光光谱半定量分析(XRF)结果见表1。

根据X-荧光光谱半定量分析结果,对矿石进行主要化学元素分析,结果见表2。

表1 XRF分析结果

Table 1 XRF analysis results /%			
Elemental	Content	Elemental	Content
Si	14.84	P	1.33
Fe	9.41	S	0.38
Ca	7.67	K	0.23
Al	6.99	Mn	0.13
Mg	5.97	Sr	0.09
Ti	5.16	Cl	0.06
Na	1.34	Cu	0.01

表2 化学多元素分析结果

Table 2 Chemical multi-element analysis results /%					
Elemental	TiO_2	Fe	S	SiO_2	Al_2O_3
Content	7.45	11.6	0.45	32.05	12.98
Elemental	MgO	CaO	P		
Content	7.59	8.6	0.928		

从表2可知,原矿中 TiO_2 的品位为7.45%,属于低品位钛铁矿;脉石矿物 SiO_2 含量为32.05%, Al_2O_3 为12.98%,CaO为8.6%,MgO为7.59%,脉石类型属于高硅低碱性脉石;有害元素S含量较高,在浮选过程中可能与浮选剂发生竞争吸附,降低了浮选剂对钛铁矿的选择性,导致选矿效果下降。指定选矿工艺时,应考虑S的影响^[9]。

1.2 X-射线衍射分析

矿物X射线衍射(XRD)图谱表明除了钛铁矿外,其它主要矿物包括钠长石、角闪石、斜闪石、绿闪石和二氧化硅等脉石矿物,分析结果见图1。

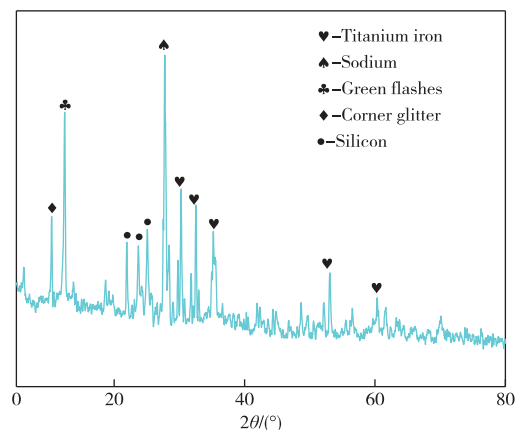


图1 矿样XRD分析图谱

Fig. 1 XRD analysis pattern of mineral sample

2 选矿试验研究

2.1 磁选试验

钛铁矿是一种弱磁性矿物,其比磁化系数和密度均高于脉石矿物,且在相同粒度下,钛铁矿的体积磁化强度更大。在一定磁场强度下进行磁选时,钛铁矿中的脉石矿物和部分细粒含铁硅酸盐矿物通常会被排入尾矿中^[10]。因此,采用强磁选的方法可以有效地分离钛铁矿和脉石矿物,减少进入浮选的数量,避免后续大量矿泥覆盖在目标矿物上,从而节约浮选药剂用量、减少选矿成本和降低能耗。因此,本试验首先对钛铁矿原矿进行了磁选条件试验研究。

2.1.1 高梯度磁选机强磁粗选条件试验

根据比磁化系数可知,钛铁矿是弱磁性矿物,需用高梯度磁选机强磁选别富集。强磁选别主要步骤是磨矿、选别、沉淀、过滤、烘干、称重,送样到检测机构测 TiO_2 品位,最后计算相应产品的回收率,试验流程见图 2。

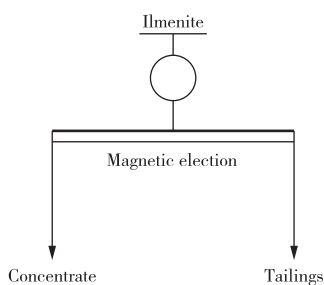


图 2 强磁粗选试验流程图

Fig. 2 Strong magnetic rough selection test flow chart

2.1.2 磨矿细度对强磁粗选影响的条件试验

磨矿细度对钛铁矿选矿指标起着至关重要的作用。磨矿细度较粗,导致钛铁矿与脉石解离不完全,

磨矿细度过细,泥化严重,浮选回收率低。试验流程如图 2 所示,以磨矿细度为变量,磁场强度为 1.2 T,脉冲为 20 Hz 的条件下强磁粗选试验,试验结果见图 3。

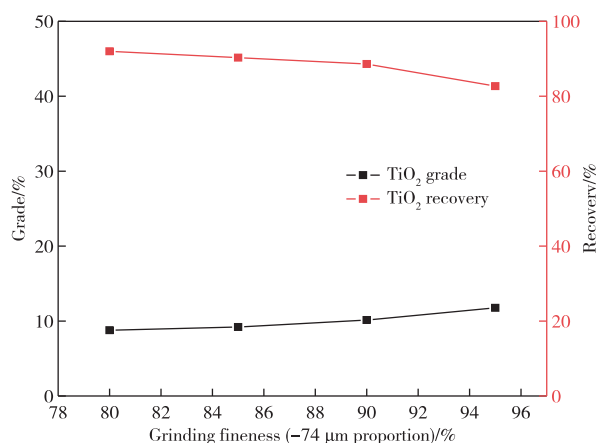


图 3 磨矿细度试验结果

Fig. 3 Grinding fineness test results

从图 3 可以看出,随着磨矿细度增加, TiO_2 品位不断增加,但是回收率呈现下降趋势。在磨矿细度 -0.074 mm 占比 90% 时, TiO_2 品位为 10.18%, TiO_2 回收率为 88.10%。因此,优选磨矿细度为 -0.074 mm 占比 90%。

2.1.3 磁场强度条件试验

试验流程如图 2 所示,在磨矿细度 -0.074 mm 占 90%、脉动冲次 20 Hz 的条件下考察磁场强度对强磁粗选试验的影响,分别研究磁场强度为 1.2 T、1.5 T 及 1.7 T 时的磁选效果,试验结果见表 3。

从图 4 可以看出,随着磁场强度升高, TiO_2 品位逐渐下降,回收率逐渐升高。磁场强度为 1.7 T 时, TiO_2 品位为 10.56%, TiO_2 回收率为 88.37%。因此,优选磁场强度为 1.7 T。

表 3 磁场强度试验结果

Table 3 Magnetic field strength test results

Magnetic field strength/T	Product/%	Yield/%	TiO ₂ grade/%	TiO ₂ recovery/%
1.2	Concentrate	60.09	10.72	86.47
	Tailings	39.91	2.53	13.53
	Feed	100.0	7.45	100.0
1.5	Concentrate	60.98	10.64	87.12
	Tailings	39.02	2.46	12.88
	Feed	100.0	7.45	100.0
1.7	Concentrate	63.52	10.56	88.37
	Tailings	36.48	2.42	11.63
	Feed	100.0	7.59	100.0

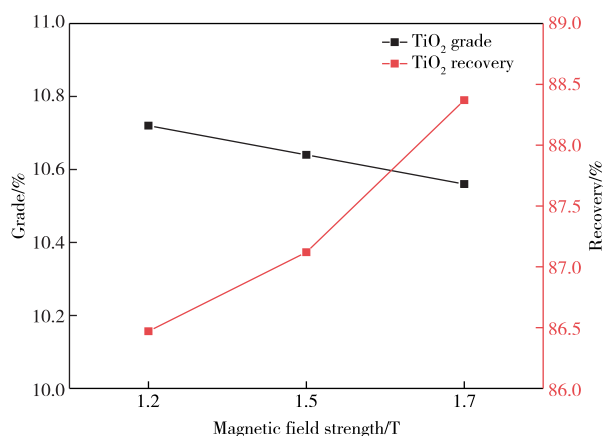


图 4 磁场强度对强磁粗选的影响

Fig. 4 Effect of magnetic field strength on strong magnetic roughing

2.1.4 脉动冲次条件试验

在操作高梯度磁选设备过程中,脉冲次数对分选效果有显著影响。脉冲水流的重复作用能够利用矿物间的磁性差异,有效地将非磁性矿物排入尾矿,实现与有价矿物的分离。不仅提升了分选效率,还减少了磁性矿物在磁介质中的累积。

试验流程如图 2 所示,在磨矿细度 -0.074 mm 占 90%、磁场强度 1.7 T 的条件下考察脉动冲次对强磁粗选试验的影响,分别研究脉动冲次为 100、200、300 次/分的磁选效果,试验结果见图 5。

由图 5 所示,当脉冲次数为每分钟 100 次时,由于水流较为平缓,一些非磁性的矿物与有磁性的有价矿物未能有效分离,影响了精矿中钛的纯度。当脉冲次数增加到每分钟 200 次, TiO₂ 的品位和回收率得到了显著提升, TiO₂ 品位 10.5%, TiO₂ 回收率 80.1%。进一步将脉冲次数提高到每分钟 300 次,虽然品位仍然小幅度提升,但是回收率下降明显。因此,优选脉冲次数为 200 次/分。

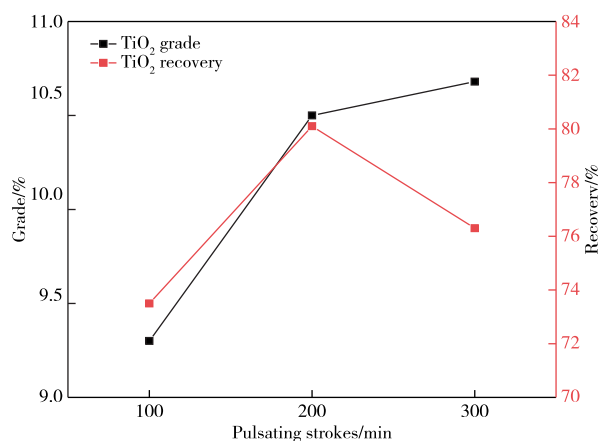


图 5 脉动冲次试验结果

Fig. 5 Pulse test results

2.1.5 高梯度强磁扫选试验

为了提高强磁作业 TiO₂ 的回收率,以确保后期浮选试验的正常进行,在上述较优的条件下,拟增加 2 次扫选试验,试验流程见图 6。

由表 4 可以看出,使用“一粗两扫”的开路磁选流程,可以得到产率为 63.39%、TiO₂ 品位为 10.64%、回收率为 90.54% 的磁选精矿产品。通过磁选抛尾可去除部分脉石矿物,但由于单一的磁选作业 TiO₂ 品位提高有限,难以达到资源高效利用的目的。因此,针对磁选精矿进一步进行浮选试验研究。

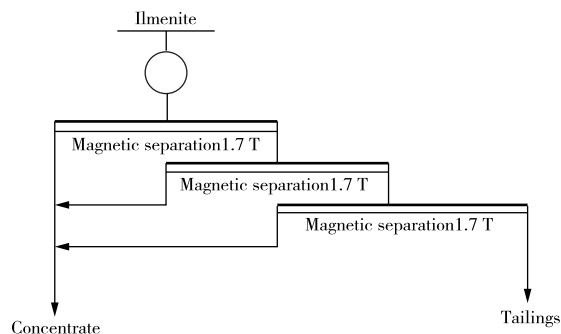


图 6 磁选试验流程

Fig. 6 Magnetic separation test process

表 4 磁选精矿扫选试验结果

Table 4 Magnetic concentrate sweeping test results

/%

Flow	Product	Yield	TiO ₂ grade	TiO ₂ recovery
One roughing, Two scavenging	Concentrate	63.39	10.64	90.54
	Tailings	36.61	1.93	9.48
	Feed	100.0	7.45	100.0

2.2 磁选钛精矿浮选提纯试验研究

由表 4 可知,磁选工艺得到 TiO₂ 为 10.64% 的精矿,需要进一步进行提纯达到标准。对于磁选粗

精矿进行浮选粗选条件试验探索,采用“浮硫+浮钛”的工艺流程,粗选选矿流程见图 7。

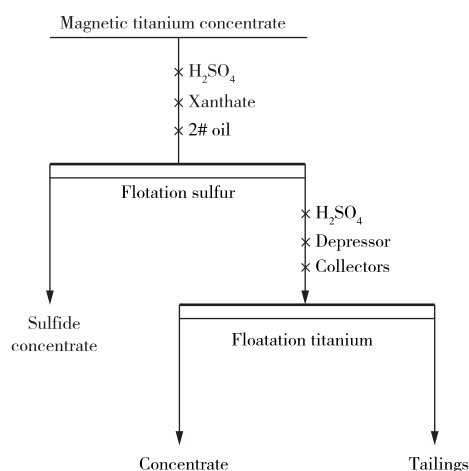


图 7 浮选试验研究流程图

Fig. 7 Flotation test research flow chart

2.2.1 抑制剂种类及药剂制度试验

钛铁矿浮选时常用的抑制剂有 CMC、草酸、六偏磷酸钠、淀粉、水玻璃等,本试验选用 CMC、草酸以及水玻璃作为抑制剂,考察这 3 种抑制剂对钛铁矿浮选效果的影响,试验固定条件为:以抑制剂种类为变量,用量固定为 200 g/t,磨矿细度为 -0.074 mm 含量占 90%,油酸钠用量 2 000 g/t,2# 油用量 20 g/t,试验流程见图 7,试验结果见表 5。

通过表 5 对比试验结果,当使用 CMC 为抑制剂时,相比其他两种抑制剂而言,浮选精矿中 TiO_2 品位以及 TiO_2 回收率均为最高,此时, TiO_2 品位为 16.64%,回收率为 83.08%,说明 CMC 对矿样中的脉石成分有较好的抑制作用。因此,本试验选取 CMC 作抑制剂,接下来对 CMC 的用量进行进一步的探究,试验结果见图 8。

表 5 抑制剂种类条件试验结果

Table 5 Inhibitor dosage condition test results

/%

Depressants	Product	Yield	TiO_2 grade	TiO_2 recovery
Sodium silicate	Sulfur concentrate	5.65	8.25	4.37
	Concentrate	26.97	10.09	25.55
	Tailings	67.38	11.08	70.07
	Feed	100.0	10.65	100.0
CMC	Sulfur concentrate	5.70	8.05	4.32
	Concentrate	53.08	16.64	83.08
	Tailings	41.22	3.25	12.60
	Feed	100.0	10.63	100.0
Oxalate	Sulfur concentrate	5.39	8.01	4.07
	Concentrate	32.60	12.93	39.73
	Tailings	62.01	9.62	56.20
	Feed	100.0	10.61	100.0

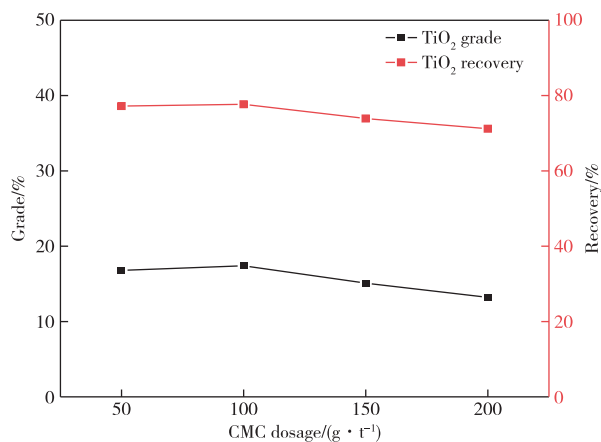


图 8 抑制剂用量与选别指标关系

Fig. 8 Relationship between inhibitor dosage and selection index

本试验进一步考查了 CMC 用量为 50、100、150 及 200 g/t 时,钛铁矿的浮选回收率及精矿品位变化。由图 8 可以看出,当 CMC 用量从 50 g/t 增至 100 g/t 时,粗精矿中 TiO_2 品位呈现上升趋势,并且在用量为 100 g/t 时出现明显的峰值,此时, TiO_2 品位为 17.45%,回收率为 77.63%。说明当 CMC 用量为 100 g/t 时对脉石矿物的抑制效果最好,所以综合考虑,优选 CMC 用量为 100 g/t。

2.2.2 浓硫酸用量试验

矿浆 pH 值是影响矿物表面电性和药剂分子活性的主要因素,本试验选用浓硫酸作为调整剂调节 pH。对磁选粗精矿进行浮选粗选试验研究,分别考察浓硫酸用量为 1 000、1 500、2 000、2 500 和 3 000 g/t 时对钛铁矿浮选性能的影响,具体工艺流程见图 7,试验结果见表 6。

表 6 浓硫酸用量条件试验结果

Table 6 Test results of concentrated sulfuric acid dosage conditions

Concentrated sulfuric acid dosage/(g · t ⁻¹)	Product	Yield/%	TiO ₂ grade/%	TiO ₂ recovery/%
1 000	Sulfur concentrate	9.96	8.05	7.56
	Concentrate	71.46	11.84	79.82
	Tailings	18.58	7.20	12.61
	Feed	100.0	10.60	100.0
1 500	Sulfur concentrate	8.71	8.03	6.55
	Concentrate	71.30	11.87	79.24
	Tailings	19.99	7.59	14.21
	Feed	100.0	10.68	100.0
2 000	Sulfur concentrate	8.79	8.02	6.59
	Concentrate	69.55	12.16	79.04
	Tailings	21.66	7.10	14.37
	Feed	100.0	10.70	100.0
2 500	Sulfur concentrate	9.60	8.08	7.27
	Concentrate	64.34	13.10	78.99
	Tailings	26.06	5.63	13.74
	Feed	100.0	10.67	100.0
3 000	Sulfur concentrate	10.02	8.05	7.58
	Concentrate	62.75	13.30	78.43
	Tailings	27.23	5.46	13.99
	Feed	100.0	10.64	100.0

从图 9 可以看出,随着浓硫酸用量的增加, TiO₂品位不断缓慢上升,回收率不断下降。当浓硫酸用量为 2 500 g/t 时, TiO₂的品位为 13.10%,回收率为 78.99%。由于该作业段为浮钛粗选段试验,需要综合考虑粗选精矿中的 TiO₂品位和回收率,以便实现钛铁矿资源的高效回收利用,因此,确定浮钛粗选最佳浓硫酸用量为 2 500 g/t。

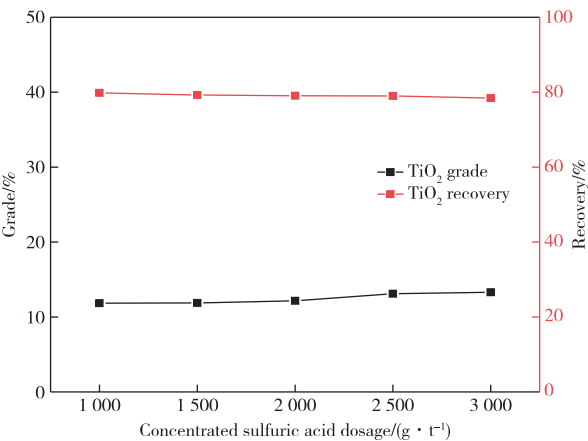


图 9 浓硫酸用量与选别指标关系

Fig. 9 The relationship between the dosage of concentrated sulfuric acid and the selection index

2.2.3 捕收剂条件试验研究

油酸钠作为钛铁矿浮选最常用的捕收剂之一,

具有捕收性强、价格低等特点。本试验选用 NaOL 作为粗选阶段的捕收剂对磁选粗精矿进行浮选粗选试验研究,分别考察 NaOL 用量为 1 500、2 000 和 2 500 g/t 时对钛铁矿浮选性能的影响,具体工艺流程见图 7,试验结果见表 7。

由图 10 可以看出,随着 NaOL 用量的增加, TiO₂品位呈现逐渐下降趋势, TiO₂回收率呈现先增加再下降趋势,在 NaOL 用量为 2 000 g/t 时, TiO₂回收率达到最大值并且 TiO₂品位下降不多,因此,优选捕收剂 NaOL 用量为 2 000 g/t。

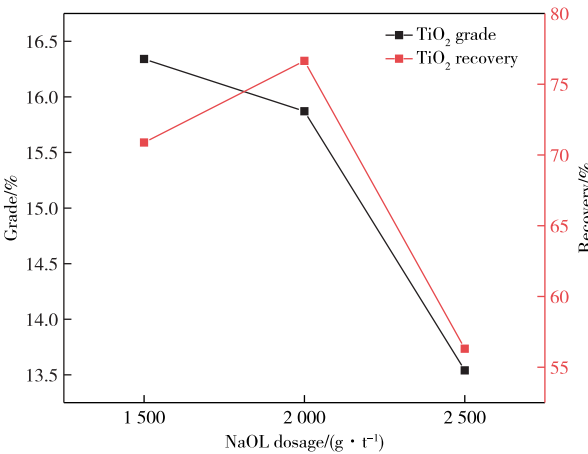


图 10 NaOL 用量与选别指标关系

Fig. 10 Relationship between NaOL dosage and selection index

表 7 NaOL 用量试验结果
Table 7 Collector dosage test results

Catcher dosage/(g·t ⁻¹)	Product	Yield/%	TiO ₂ grade/%	TiO ₂ recovery/%
1 500	Sulfur concentrate	10.73	8.03	8.03
	Concentrate	46.56	16.34	70.88
	Tailings	42.71	5.30	21.09
	Feed	100.0	10.73	100.0
2 000	Sulfur concentrate	11.70	8.05	8.75
	Concentrate	52.04	15.87	76.65
	Tailings	36.26	4.34	14.61
	Feed	100.0	10.77	100.0
2 500	Sulfur concentrate	14.15	7.99	10.69
	Concentrate	43.99	13.54	56.31
	Tailings	41.86	8.34	33.00
	Feed	100.0	10.58	100.0

2.3 开路试验

2.3.1 开路试验

对磁选粗精矿进行浮选精选试验,分别采用 NaOL 和 TOH 为浮选捕收剂,探索浮选精选试验效果。试验流程如图 11 所示,试验结果见表 8。采

用 NaOL 为捕收剂时,经五次精选可获得产率 25.83%、TiO₂ 品位 31.98%、回收率 77.38% 的钛精矿。采用新型捕收剂 TOH,经五次精选可获得产率 18.41%、TiO₂ 品位 45.50%、回收率 78.79% 的钛精矿。

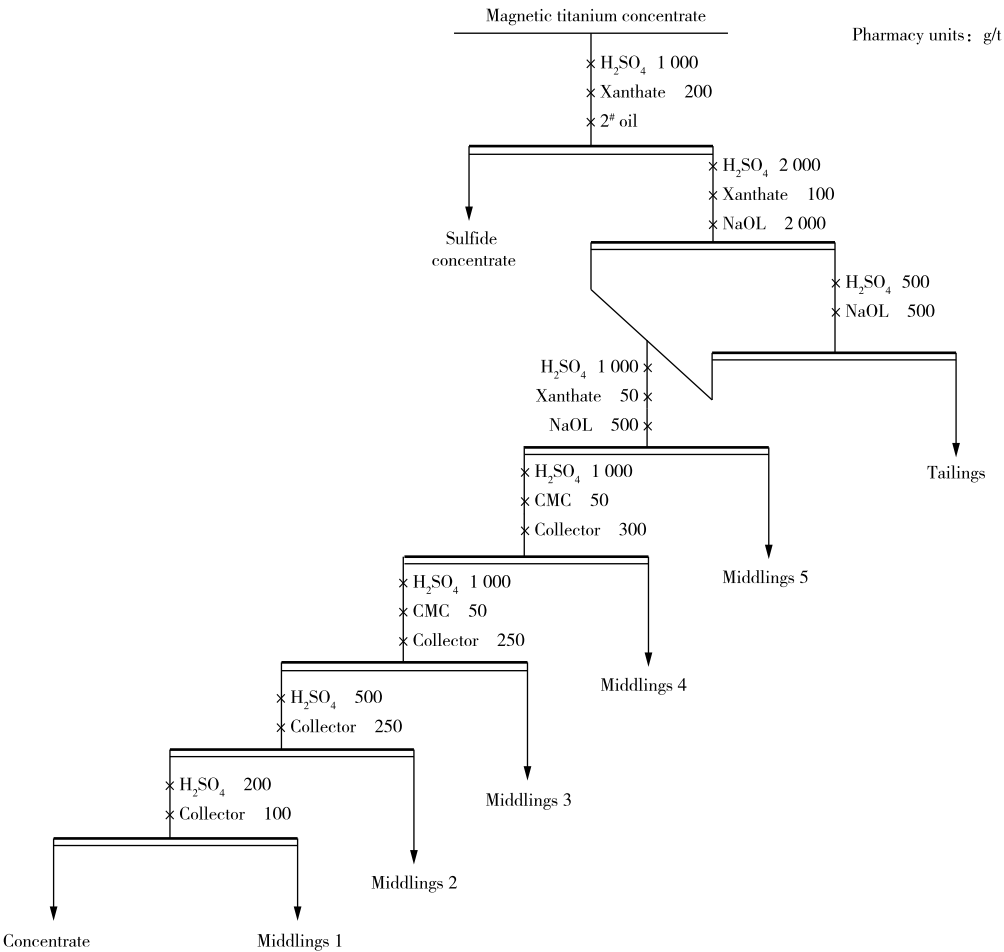


图 11 开路试验流程图
Fig. 11 Open circuit test flow chart

表 8 开路试验结果

Table 8 Open circuit test results /%

Collectors	Product	Yield	TiO ₂ grade	TiO ₂ recovery
NaOL	Sulfur concentrate	3. 87	8. 06	2. 93
	Concentrate	25. 83	31. 98	77. 38
	Tailings	70. 30	2. 99	19. 69
	Feed	100. 0	10. 67	100. 0
TOH	Sulfur concentrate	3. 85	8. 08	2. 92
	Concentrate	18. 41	45. 50	78. 79
	Tailings	77. 74	2. 50	18. 28
	Feed	100. 0	10. 63	100. 0

从表 8 可知,磁选钛精矿采用“浮硫+浮钛(一粗一扫五精)”的开路试验流程选别后,可获得 TiO₂ 品位为 45.50%、TiO₂ 回收率为 78.79% 的较好指标。

2.3.2 闭路试验

在浮选开路试验基础上,进行浮选闭路试验,试验采用“浮硫+浮钛(一粗一扫五精)”、中矿顺序返回的浮选工艺流程,粗选段采用 NaOL 为捕收剂,精选段采用 TOH 为浮选捕收剂,试验流程如图 12 所示,试验结果见表 9。

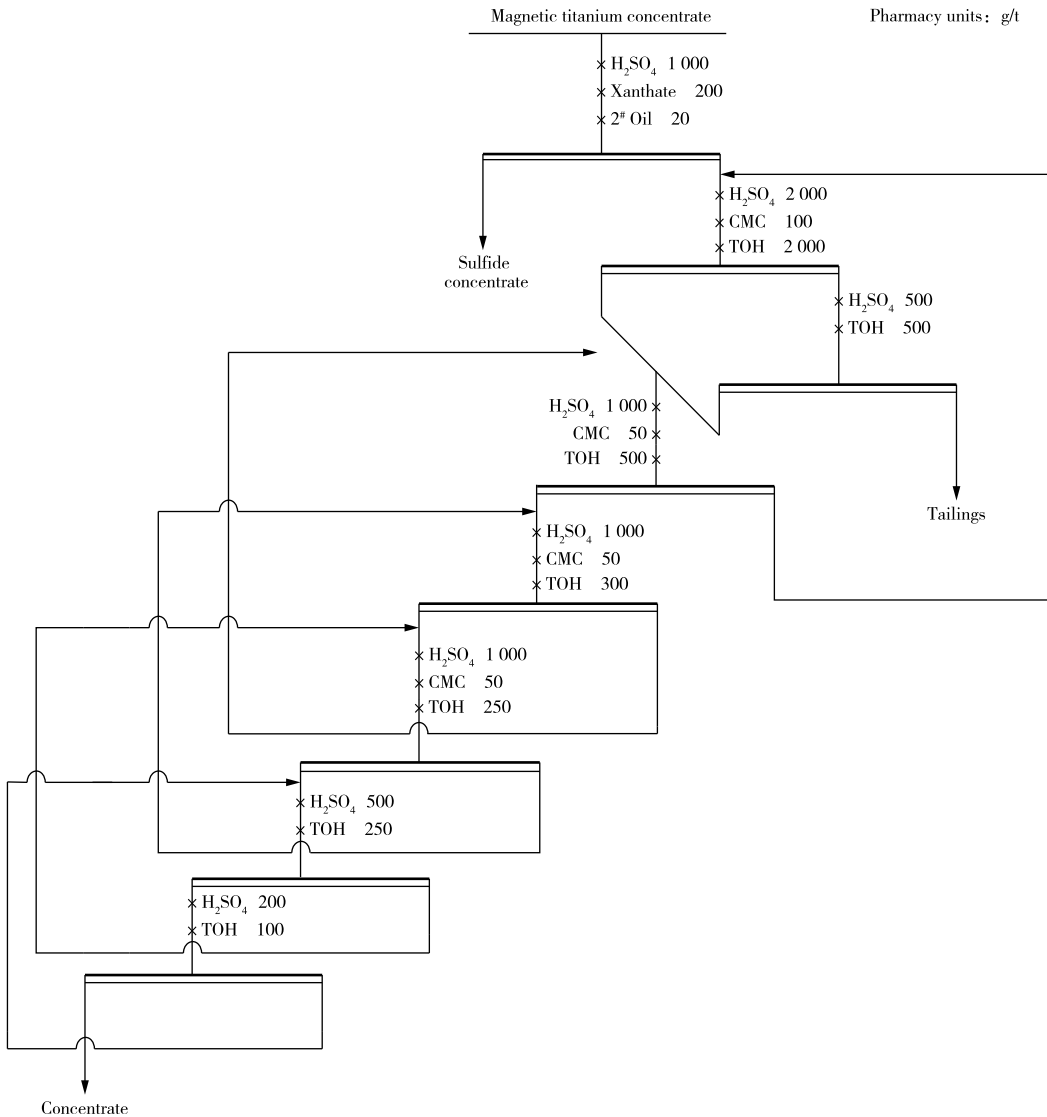


图 12 闭路试验流程图

Fig. 12 Closed circuit test flow chart

表9 闭路试验结果

Product	Yield	TiO ₂ grade	TiO ₂ recovery
Sulfur concentrate	3.77	8.08	2.87
Coarse concentrate	20.03	43.50	82.06
Tailings	76.20	2.10	15.07
Feed	100.0	10.62	100.0

由表9可知,原矿粗磨后经磁选得到粗精矿,粗精矿经过脱硫后进行一粗一扫五精选浮选闭路试验,最终的钛精矿 TiO₂ 品位达 43.5%、TiO₂ 回收率达 82.06%。

3 结论

本项目首先对钛铁矿样进行工艺矿物学研究,然后进行选矿试验研究,所开展的探索试验结论如下:

1)原矿含 TiO₂ 品位低,仅有 7.45%,主要赋存于钛铁矿中。脉石矿物主要为角闪石、钠长石和绿闪石等,属于高硅低碱性脉石,并且有害元素 S 含量较高。

2)试验原料在磨矿细度为 -0.074 mm 占 90%、磁场强度为 1.7 T、脉冲为 200 次/分的条件下,钛铁矿原矿经“一粗两扫”磁选后获得产率为 63.39%、TiO₂ 品位为 10.64%、TiO₂ 回收率为 90.54%的钛精矿。

3)原矿经磁选抛尾,通过“浮硫+浮钛”,中矿顺序返回的浮选闭路试验工艺流程,可得 TiO₂ 品位达 43.50%、TiO₂ 回收率达 82.06%的钛精矿。

4)试验原料经过“磁选抛尾+浮选提纯”的磁-浮联合选别工艺选矿流程后,可获得 TiO₂ 品位为 43.50%、回收率为 74.30%的钛精矿,为开发利用该矿产资源提供了技术支撑。

5)由于钛铁矿资源性质复杂,单一的捕收剂难以达到理想的选别指标,本文采用“脂肪酸类捕收剂 NaOL+新型高选择性羧酸捕收剂 TOH”的组合捕收剂,成功达到了理想指标。

参考文献:

- [1] 张礼,王长福. 钒钛磁铁矿资源选矿技术及综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用,2023,43(5):127-137.
ZHANG Li, WANG Changfu. Research progress on separation technology and comprehensive utilization of vanadium-titanium magnetite resources[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(5): 127-137.
- [2] 吴奕彤,章晓林. 四川某低品位钛铁矿选矿工艺研究[J]. 矿冶,2020,29(3):40-44.

- WU Yitong, ZHANG Xiaolin. Study on mineral processing technology of a low-grade ilmenite in Sichuan[J]. Mining and Metallurgy, 2020, 29(3): 40-44.
- [3] 赵文迪,章晓林,景满,等. 钛铁矿选别工艺进展[J]. 有色金属(选矿部分),2020(2):50-56.
ZHAO Wendi, ZHANG Xiaolin, JING Man, et al. Progress of ilmenite separation process[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2020(2): 50-56.
- [4] 吴贤,张健. 中国的钛资源分布及特点[J]. 钛工业进展,2006,23(6):8-12.
WU Xian, ZHANG Jian. Geographical distribution and characteristics of titanium resources in China[J]. Titanium Industry Progress, 2006, 23(6): 8-12.
- [5] 胡渝杰,叶国华,唐悦,等. 云南某钛铁矿选矿试验研究[J]. 钢铁钒钛,2021,42(4):33-38.
HU Yujie, YE Guohua, TANG Yue, et al. Experimental study on beneficiation of a titaniferous iron ore in Yunnan[J]. Steel Vanadium Titanium, 2021, 42(4): 33-38.
- [6] 杨道广. 低品位钛铁矿选矿工艺研究[J]. 钢铁钒钛,2022,43(3):111-117.
YANG Daoguang. Study on beneficiation process of a low grade ilmenite in Panxi[J]. Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(3): 111-117.
- [7] 官长平,翟计划,陈攀. 钛铁矿选矿工艺及表面改性强化浮选研究现状[J]. 四川有色金属,2023(4):41-44.
GUAN Changping, ZHAI Jihua, CHEN Pan. Research status of ilmenite mineral processing technology and surface modification enhanced flotation[J]. Sichuan Non-ferrous Metal, 2023(4): 41-44.
- [8] 谢宝华,罗云波,王丰雨,等. 国外某难选钛铁矿选矿试验研究[J]. 钢铁钒钛,2023,44(5):36-40.
XIE Baohua, LUO Yunbo, WANG Fengyu, et al. Experimental study on beneficiation of a foreign refractory ilmenite ore[J]. Steel Vanadium Titanium, 2023, 44(5): 36-40.
- [9] 申帅平,袁致涛,马龙秋,等. 攀西微细粒钛铁矿工艺矿物学特征[J]. 东北大学学报(自然科学版),2019,40(4):580-584.
SHEN Shuaiping, YUAN Zhitao, MA Longqiu, et al. Mineralogy features of micro-fine ilmenite in Panxi region[J]. Journal of Northeast University (Natural Science Edition), 2019, 40(4): 580-584.
- [10] 王飞旺,崔毅琦,童雄,等. 钛铁矿选矿技术研究与应用[J]. 矿产综合利用,2016,37(1):1-6.
WANG Feiwan, CUI Yiqi, TONG Xiong, et al. Research and application of beneficiation process for ilmenite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resource, 2016, 37(1): 1-6.