



新疆某钛铁矿重选粗精矿浮选提质试验

罗 衡, 严建喜, 杨 斌, 李 杨, 杨 帅

(新疆湘和新材料科技有限公司, 新疆 哈密 839099)

摘要:新疆某钛铁矿重选粗精矿中金属矿物主要为钛铁矿、磁铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿,脉石矿物主要为斜方辉石、辉石、镁闪石、滑石、长石、绿泥石等。钛铁矿矿物中平均Ti质量分数低于理论值1.76%,多含有Mn、Mg等杂质元素,且与磁铁矿、脉石矿物嵌布粒度微细。为实现该钛铁矿重选粗精矿的高效分选,进行浮选提质试验研究。结果表明:对于TiO₂质量分数为33.38%、TFe品位为36.24%的钛铁矿重选精矿,采用磨矿-弱磁除铁-脱硫-一粗一扫五精浮钛的工艺流程,在矿样磨矿细度<0.074 mm粒级质量分数为85%和氟硅酸钠助选剂+DTX-A捕收剂的药剂体系下,最终可以获得钛精矿产率为46.34%、TiO₂品位为45.10%、回收率为62.60%的良好指标,同时可以获得产率为26.71%、TFe品位为47.74%、回收率为35.19%、TiO₂质量分数为29.34%的副产品铁粗精矿。本文成果可为该类型钛铁矿矿石分选提供技术依据。

关键词:钛铁矿; 重选粗精矿; 浮选; DTX-A捕收剂

中图分类号:TD951

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)11-0001-08

doi:10.13402/j.gcjs.2024.11.141

Experimental on flotation and quality improvement of rough gravity concentrates of an ilmenite in Xinjiang

LUO Heng, YAN Jianxi, YANG Bin, LI Yang, YANG Shuai

(Xinjiang Xianghe New Material Technology Co., Ltd., Hami 839099, Xinjiang, China)

Abstract: The metal minerals in the rough concentrate of ilmenite gravity separation in Xinjiang are mainly ilmenite, magnetite, pyrite and pyrrhotite, and the gangue minerals are mainly orthopyroxene, pyroxene, tschermakite, talc, feldspar, chlorite, etc. The average Ti mass fraction in ilmenite minerals is lower than the theoretical value of 1.76%, and most of them contain impurity elements such as Mn and Mg, and the particle size is fine with magnetite and gangue minerals. In order to realize the efficient separation of rough concentrate by ilmenite gravity separation, the flotation and quality improvement test is carried out. The results show that for the ilmenite gravity separation concentrate with TiO₂ mass fraction of 33.38% and TFe grade of 36.24%, the process flow of ore grinding-weak magnetic iron removal-desulfurization-one rough and one sweeping five fine floating titanium is adopted, under the reagent system of grinding fineness of ore samples of <0.074 mm and sodium fluorosilicate adjuvant + DTX-A collector, a good index of 46.34% titanium concentrate, 45.10% TiO₂ grade and 62.60% recovery rate can be obtained, and a by-product iron rough concentrate with a yield of 26.71%, a TFe grade of 47.74%, a recovery rate of 35.19% and a TiO₂ mass fraction of 29.34% can be obtained. The results can provide a technical basis for the separation of this type of ilmenite ore.

Key words: ilmenite; rough gravity concentrate; flotation; DTX-A collector

钛作为中国战略性新兴产业所需的矿产资源, 相关产业链已被列入《中国制造2025》和《新材

收稿日期: 2024-06-07

基金项目: 新疆维吾尔自治区科学技术厅创新型产业集群项目(2022LQ01006)

作者简介: 罗 衡(1983—),男,工程师,从事选矿工艺与选矿工程方面的研究。

料产业发展指南》中。根据 2024 年美国地质调查局 (USGS) 公布的资料, 我国钛资源储量约为 2.3 亿吨, 占全球总储量的 28.00%, 位居世界第一位^[1]。随着世界经济环境形势的发展, 钛应用高端领域需求旺盛和钛精矿供应紧张。目前我国已经成为世界上钛产品最大的生产国和消费国, 但受限于钛矿资源原矿品位低、矿物性质复杂、分选技术限制等因素, 钛精矿生产率低, 致使十分依赖进口, 对外依存度高达 60%, 供应风险处于中高级^[2]。我国四川攀枝花、河北承德、新疆等地区均蕴含着丰富的钛铁矿资源, 但不同地区钛铁矿矿石分选性能存在差异, 适配分选工艺和钛资源利用率不尽相同^[3-5]。为缓解国内钛精矿供给短缺现状, 提高钛铁矿资源利用率, 开发钒钛磁铁矿石中钛铁矿高效分选工艺势在必行。

现阶段钛铁矿分选研究, 采取的方法有磁选、重选、电选、浮选及其联合工艺^[6-9]。针对攀西红格矿区橄辉岩型钒钛磁铁矿石中脉石矿物种类繁多、蚀变严重、表面元素与钛铁矿相似的问题, 郑禹等^[10]以选铁尾矿的强磁选精矿为研究对象, 采用一粗两扫四精的工艺流程, 获得 TiO_2 品位为 46.10%、回收率为 56.35% 的钛精矿。针对承钢黑山铁矿选铁尾矿矿物组分繁杂且矿物各组分嵌布粒度细等特点, 朱俊士^[11]采用强磁选-粗精矿再磨-螺旋重选-电选流程处理粗粒级钛铁矿, 获得钛精矿 TiO_2 品位为 47.26%、回收率为 41.06%, 但整体细粒级分选效果较差。针对攀西地区钛铁矿嵌布粒度细、易泥化、含钛铁硅酸盐脉石等特点, 杜雨生等^[12]采用阶段磨矿-弱磁除铁-浮选富集钛-强磁提质的工艺流程处理钛铁矿重选精矿, 最终获得钛精矿 TiO_2 品位为 46.77%、回收率为 54.38% 的选别指标。针对微细粒级钛铁矿可分选性差的特

点, 朱阳戈等^[5,13]研究表明, 通过“分级磁选-载体/聚团浮选”工艺流程, 可从入选物料 TiO_2 品位为 9.81% 的原矿, 获得钛精矿 TiO_2 品位为 47.93%、回收率为 52.11% 的良好指标。

新疆某地钛铁矿重选粗精矿, 矿样偏粗, $< 74 \mu\text{m}$ 粒级质量分数为 18.59%; 该矿样中钛铁矿 Ti 理论质量分数低、嵌布粒度细、内部包裹 $1 \mu\text{m}$ 以下的磁铁矿。针对这一矿石特性, 本文拟通过分选工艺、浮选药剂及浮选流程系统试验研究, 获得钛铁矿高效分选工艺和技术指标, 以期为同类型钛铁矿矿石的分选利用提供技术支撑。

1 试验材料

1.1 矿石化学成分

钛铁矿重选粗精矿 X 荧光光谱半定量和化学多元素分析结果如表 1、2 所示。由表 1、2 可知: 矿样中 Fe、Ti 金属元素质量分数较高, 其次是 Si、Mg、Ca 等杂质元素; 该钛铁矿重选精矿 TFe 质量分数为 36.24%, TiO_2 质量分数为 33.38%。

1.2 矿石矿物成分

钛铁矿重选粗精矿中主要矿物成分分析结果如表 3 所示。Ti 元素在矿物中的分配规律如表 4 所示。由表 3、4 可知: 矿样中金属矿物质量分数为 88.57%, 其中钛铁矿、磁铁矿质量分数分别为 76.22%、10.40%; 脉石矿物质量分数为 11%, 其中闪石、辉石、长石、绿泥石等质量分数为 9%, 氧化钛及榍石质量分数为 0.58%, 碳酸盐、石英、蛇纹石等其它矿物质量分数约为 2%; 矿样中 Ti 元素主要分布于钛铁矿中, 硅酸盐矿物中含钛较少, 仅为 0.42%。钛铁矿平均 Ti 质量分数为 29.82%, 低于钛铁矿理论 Ti 质量分数 1.76%, 且钛铁矿中多含有 Mn、Mg 等元素。

表 1 矿样 X 荧光光谱半定量分析结果 (质量分数)

								%
Fe_2O_3	TiO_2	SiO_2	MgO	CaO	Al_2O_3	P_2O_5	SO_3	MnO
43.476	30.591	9.519	5.328	4.911	2.618	1.454	0.774	0.781
V_2O_5	K_2O	ZrO_2	ZnO	Na_2O	CuO	SrO	Cl	烧损
0.281	0.076	0.033	0.025	0.023	0.011	0.007	0.004	0.890

表 2 矿样主要元素化学成分分析结果 (质量分数)

TFe	TiO_2
36.24	33.38

表 3 矿样矿物成分分析结果(质量分数) %

矿物组	矿物名称	相对质量分数
金属矿物	磁黄铁矿	0.07
	黄铁矿	1.86
	钛铁矿	76.22
	磁铁矿	10.40
	褐铁矿	0.02
硅酸盐矿物	镁闪石	1.63
	辉石	2.42
	长石	0.94
	斜帘石	0.03
	绿泥石	0.84
	滑石	2.77
	黑云母	0.14
碳酸盐矿物	方解石	0.02
	白云石	0.01
含钛、铁副矿物	氧化钛	0.35
	榍石	0.23
其它矿物	石英	0.04
	蛇纹石	0.01
	硅灰石	0.01
	高岭土	0.01
	锆石	0.02
	磷灰石	1.85
	其它	0.11

表 4 钛元素在矿物中的分布估算结果 %

矿物名称	矿物质量分数	金属		
		质量分数	金属量	分布率
钛铁矿	76.22	29.82	22.728 8	99.03
镁闪石	1.63	1.41	0.023 0	0.10
辉石	2.42	0.29	0.007 0	0.03
黑云母	0.14	1.55	0.002 2	0.01
氧化钛	0.35	35.79	0.125 3	0.55
榍石	0.23	28.54	0.065 6	0.28

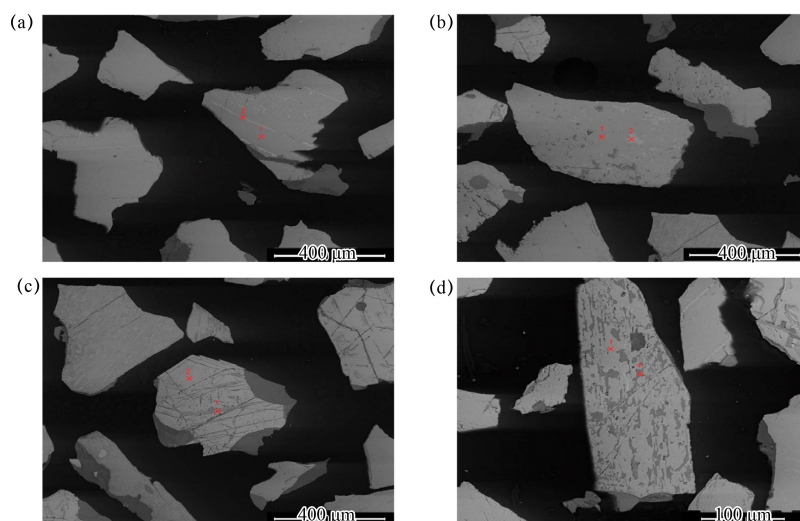
1.3 钛矿物 SEM – EDS 分析

钛矿物的 SEM – EDS 分析结果如图 1 所示。粗精矿中含钛金属矿物主要包含钛铁矿、钛磁铁矿。钛铁矿多为它形碎粒，结构致密，部分颗粒解理发育。钛铁矿内部无熔离体，部分钛铁矿内可见磁铁矿呈脉状沿钛铁矿解理裂隙充填[图 1(a)]，或呈粒状包裹于钛铁矿中[图 1(b)]，钛铁矿中磁铁矿脉宽度大多在 1 μm 以下，部分钛铁

矿呈脉状沿磁铁矿解理裂隙充填交代[图 1(c)]，少量钛铁解理裂隙发育，沿裂隙充填有脉石[图 1(d)]。钛铁矿和钛磁铁矿、脉石矿物紧密共生且嵌布微细，解离分选难度较大。

2 结果与讨论

根据矿石性质分析结果，矿样中含有钛铁矿、含钛磁铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿等矿物。含钛磁



(a) 磁铁矿呈脉状沿钛铁矿解理裂隙充填；(b) 磁铁矿呈团粒状包裹于钛铁矿中；
(c) 钛铁矿呈脉状沿磁铁矿解理裂隙充填交代；(d) 钛铁矿中沿解理裂隙充填磁石

图 1 钛矿物 SEM-EDS 分析

铁矿为强磁性矿物，钛铁矿和脉石矿物磁性相对较弱，浮选是脱除硫化矿、富集钛铁矿的有效方法。基于此，考虑在磨矿-弱磁除铁-浮选脱硫的条件下进行浮选选钛试验研究。在钛铁矿浮选试验过程中，以 DTX-A 作为选钛捕收剂，详细研究磨矿细度、药剂用量和流程结构等因素对钛铁矿浮选指标的影响。

2.1 磨矿细度条件试验

钛铁矿重选粗精矿浮选提质与其解离情况密切相关。采用磨矿-弱磁-脱硫-浮选提质工艺流程，考查磨矿细度条件对钛铁矿浮选指标的影响，以期寻找适宜的选钛入浮粒度。磨矿细度分别选取 <0.074 mm 粒级质量分数为 75%、80%、85%、90% 和 95%。试验流程如图 2 所示，分选试验结果如表 5 所示。

由表 5 可知：随着磨矿细度的增加，浮选粗精矿 TiO_2 品位呈现先增加后降低的变化趋势。当磨矿细度由 <0.074 mm 粒级质量分数为 75% 增加到 85% 时，粗精矿 TiO_2 品位由 39.54% 增至 41.58%，回收率保持在 64% 左右；继续增加磨矿细度，浮选粗精矿 TiO_2 品位和回收率呈现不同程度的下降趋势。因此，钛铁矿浮选选择磨矿细度 <0.074 mm 粒级质量分数为 85% 为宜，钛铁矿粗精矿产率为 51.24%， TiO_2 品位为 41.58%、回收率为 64.00%。与此同时，弱磁选获得产率为 26.01%， TiO_2 质

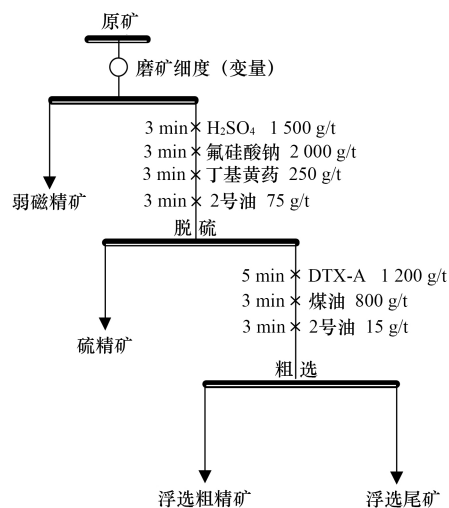


图 2 不同磨矿细度条件下浮选试验流程

量分数为 29.34%、回收率为 22.84% 的弱磁精矿；浮选脱硫产率为 4.11%， TiO_2 质量分数为 16.06%、回收率为 1.98%；经弱磁-浮选脱硫工艺流程，脱硫尾矿（选钛入浮料）的 TiO_2 品位为 35.97%、回收率为 74.48%，后续在此条件下进行钛铁矿浮选药剂试验研究。

2.2 钛铁矿浮选药剂条件试验

在以 DTX-A 为选钛捕收剂的浮选体系中，氟硅酸钠为助选剂，煤油为辅助捕收剂，2 号油为起泡剂，浮选粗选适宜的矿浆 pH 值约为 5.0。实验室试验过程中为增加氟硅酸钠的调浆时间，选择在浮选脱硫环节添加，试验流程如图 3 所示。

表 5 不同磨矿细度条件下浮选试验结果

磨矿细度 <0.074 mm 粒级质量分数	样品名称	产率	TiO ₂ 品位	TiO ₂ 回收率
75	弱磁精矿	27.13	29.78	24.25
	硫精矿	4.03	16.01	1.94
	浮选粗精矿	54.19	39.54	64.33
	浮选尾矿	14.65	21.56	9.48
80	弱磁精矿	26.94	29.56	23.90
	硫精矿	4.05	16.05	1.95
	浮选粗精矿	52.69	40.56	64.14
	浮选尾矿	16.32	20.44	10.01
85	弱磁精矿	26.71	29.34	23.54
	硫精矿	4.11	16.06	1.98
	浮选粗精矿	51.24	41.58	64.00
	浮选尾矿	17.94	19.45	10.48
90	弱磁精矿	26.01	29.23	22.84
	硫精矿	4.12	16.05	1.99
	浮选粗精矿	51.84	40.45	63.01
	浮选尾矿	18.03	22.44	12.16
95	弱磁精矿	25.98	29.15	22.73
	硫精矿	4.13	16.05	1.99
	浮选粗精矿	50.91	40.11	61.28
	浮选尾矿	18.98	27.22	15.50

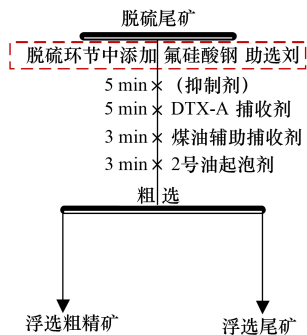


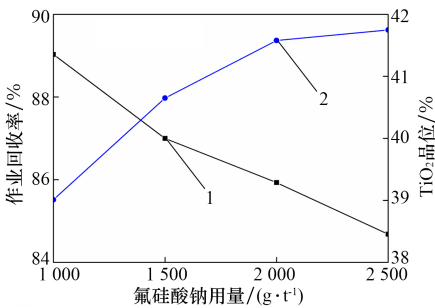
图 3 钛铁矿浮选药剂条件试验流程

2.2.1 氟硅酸钠助选剂用量试验

在磨矿细度 < 0.074 mm、粒级质量分数为 85%、DTX - A 捕收剂用量为 1 200 g/t、煤油用量为 800 g/t 条件下，氟硅酸钠用量分别选择 1 000、1 500、2 000、2 500 g/t，考查其对钛铁矿浮选分离效果的影响，浮选试验结果如图 4 所示。

由图 4 可知：随着氟硅酸钠用量的增加，浮选粗精矿 TiO₂ 品位呈现逐渐增加的变化趋势，作业回收率呈现逐渐降低的变化趋势。当氟硅酸钠用量由 1 000 g/t 增加到 2 000 g/t 时，精矿 TiO₂ 品位

由



1—作业回收率；2—TiO₂ 品位。

图 4 氟硅酸钠用量对钛铁矿浮选指标的影响

39.01% 增至 41.58%，TiO₂ 作业回收率由 89.03% 降至 85.93%；继续增加氟硅酸钠用量，浮选粗精矿 TiO₂ 品位变化不明显，但 TiO₂ 作业回收率呈现降低趋势。在兼顾钛铁矿浮选粗精矿回收率和品位的情况下，氟硅酸钠助选剂用量为 2 000 g/t 较为适宜。

2.2.2 抑制剂种类及用量试验

腐殖酸钠和水玻璃是钛铁矿浮选中常用的脉石矿物抑制剂。在磨矿细度 < 0.074 mm 粒级质量分数为 85%、氟硅酸钠用量为 2 000 g/t、DTX -

A 捕收剂用量为 1 200 g/t、煤油用量为 800 g/t 条件下, 腐殖酸钠用量分别选择 0、250、500、750、1 000 g/t 和水玻璃用量分别选择 0、100、300、500、800 g/t, 考查抑制剂对钛铁矿浮选分离效果的影响, 浮选试验结果如图 5 所示。

由图 5(a)可知: 随着腐殖酸钠抑制剂用量的增加, 浮选粗精矿 TiO_2 品位缓慢增加, 但整体变化并不明显, 作业回收率呈现逐渐降低的变化趋势。在腐殖酸钠用量为 1 000 g/t 时, 浮选粗精矿 TiO_2 品位为 41.83%, 仅提高了 0.25%, 而作业回收率为 73.99%, 降低了 11.94%。由图 5(b)可知: 随着水玻璃抑制剂用量的增加, 浮选粗精矿 TiO_2 品位缓慢增加, 基本维持在 41.60% ~ 42.00%, 作业回收率呈现不断降低的变化趋势。可以看出, 添加腐殖酸钠和水玻璃抑制剂对于提升浮选粗精矿分选指标效果不佳。

2.2.3 DTX-A 捕收剂用量试验

在磨矿细度 <0.074 mm 粒级质量分数为 85%、氟硅酸钠用量为 2 000 g/t、煤油用量为 800 g/t 条件下, DTX-A 捕收剂用量分别选择 1 000、1 200、

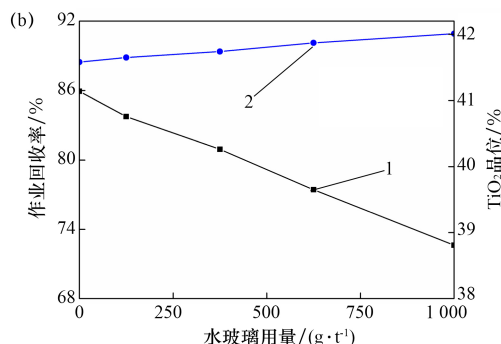
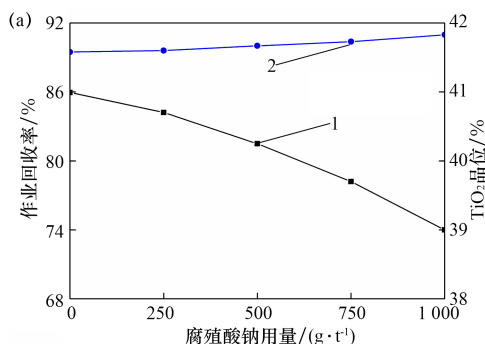
1 400、1 600、1 800 g/t, 考查捕收剂用量对钛铁矿浮选分离效果的影响, 浮选试验结果如图 6 所示。

由图 6 可知: 随着 DTX-A 捕收剂用量的增加, 浮选粗精矿 TiO_2 品位呈现降低的变化趋势, 作业回收率呈现逐渐增加的变化趋势。DTX-A 捕收剂用量由 1 000 g/t 增加到 1 600 g/t 时, 粗精矿 TiO_2 品位由 41.98% 降至 41.48%, 作业回收率则从 68.95% 增至 89.52%; 继续增加 DTX-A 捕收剂用量, 浮选粗精矿 TiO_2 品位降至 40.76%。在兼顾钛铁矿浮选粗精矿回收率和品位的情况下, DTX-A 捕收剂用量选择 1 600 g/t 较为适宜。

2.2.4 煤油用量试验

在磨矿细度 <0.074 mm 粒级质量分数为 85%、氟硅酸钠用量为 2 000 g/t、DTX-A 捕收剂用量为 1 600 g/t 条件下, 煤油用量分别选择 200、400、600、800 g/t, 考查煤油辅助捕收剂对钛铁矿浮选分离效果的影响, 浮选试验结果如图 7 所示。

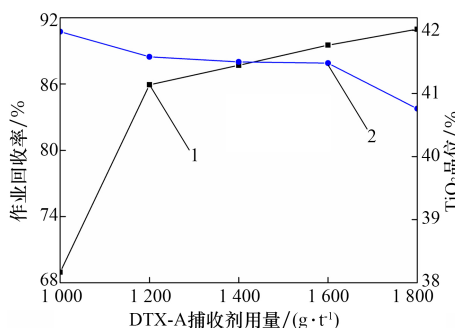
由图 7 可知: 随着煤油用量的增加, 浮选粗精矿 TiO_2 品位呈现先降低后趋于稳定的变化趋势, 作业回收率呈现先增加后趋于稳定的变化趋势。



(a) 腐殖酸钠; (b) 水玻璃

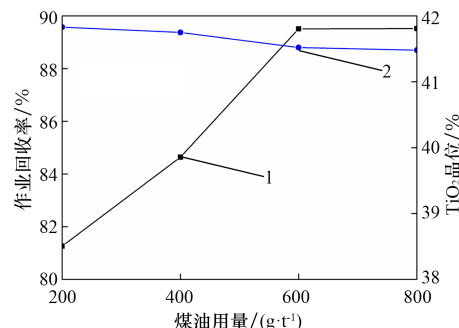
1—作业回收率; 2— TiO_2 品位。

图 5 抑制剂用量对钛铁矿浮选指标的影响



1—作业回收率; 2— TiO_2 品位。

图 6 DTX-A 捕收剂用量对钛铁矿浮选指标的影响



1—作业回收率; 2— TiO_2 品位。

图 7 煤油用量对钛铁矿浮选指标的影响

势。煤油用量由 200 g/t 增加到 600 g/t 时，精矿 TiO₂ 品位由 41.83% 降至 41.52%，作业回收率由 81.26% 增至 89.51%；继续增加煤油用量时，精矿 TiO₂ 品位和回收率变化不明显。在兼顾钛铁矿浮选粗精矿回收率和品位的情况下，煤油辅助捕收剂用量选择 600 g/t 较为适宜。

2.3 浮选开路试验

在钛铁矿粗选条件试验研究基础上，通过对精选流程和分选指标的优化，确定磨矿-弱磁除铁-脱硫-一粗一扫五精选钛的试验流程。在磨矿细度<0.074 mm 粒级质量分数为 85%、氟硅酸钠助选剂用量为 2 000 g/t、DTX-A 捕收剂用量为 1 600 g/t、煤油用量为 600 g/t 的粗选条件下进行开路浮选试验。试验流程及药剂制度如图 8 所示，试验结果如表 6 所示。由表 6 可知：钛铁矿重选粗精矿经磨矿-弱磁除铁-脱硫-一粗一扫五精选浮选开路流程获得浮选精矿产率为 36.13%、TiO₂ 品位为 45.65% 和回收率为 49.29% 的分选指标。

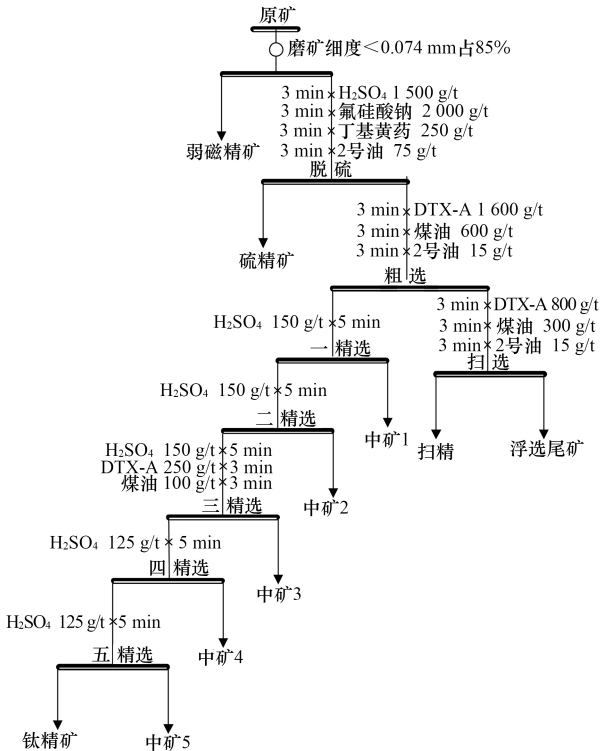


图 8 钛铁矿开路浮选试验流程

2.4 浮选闭路试验

根据钛铁矿开路浮选试验结果，进行磨矿-弱磁除铁-脱硫-一粗一扫五精选浮选闭路试验，浮选闭路试验药剂制度及流程如图 9 所示，浮选

闭路试验结果如表 7 所示。由表 7 可知：钛铁矿重选粗精矿经磨矿-弱磁除铁-脱硫-一粗一扫五精选浮选闭路流程，可获得钛精矿产率为 46.34%、TiO₂ 品位为 45.10% 和回收率为 62.60% 的分选指标。

表 6 钛铁矿开路浮选试验结果

样品名称	产率	TiO ₂ 品位	TiO ₂ 回收率
弱磁精矿	26.71	29.34	23.42
硫精矿	4.11	16.06	1.97
钛精矿	36.13	45.65	49.29
中矿 5	1.53	42.13	1.93
中矿 4	2.59	41.03	3.18
中矿 3	3.36	39.12	3.93
中矿 2	4.23	34.31	4.34
中矿 1	5.34	26.59	4.24
扫精	6.43	25.05	4.81
浮选尾矿	9.57	10.14	2.90

表 7 钛铁矿闭路浮选试验结果

样品名称	产率	TiO ₂ 品位	TiO ₂ 回收率
弱磁精矿	26.71	29.34	23.48
硫精矿	4.28	16.15	2.07
钛精矿	46.34	45.10	62.60
浮选尾矿	22.67	17.46	11.85

3 结 论

(1) 钛铁矿重选粗精矿 TFe 质量分数为 36.24%，TiO₂ 质量分数为 33.38%。矿样中金属矿物主要为钛铁矿、含钛磁铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿等；脉石矿物主要为斜方辉石、辉石、镁闪石、滑石、长石、绿泥石等；金属矿物质量分数约为 89%，以钛铁矿为主，脉石矿物质量分数约为 11%；钛铁矿平均 Ti 质量分数为 29.82%，低于钛铁矿理论 Ti 质量分数 1.76%。钛铁矿和含钛磁铁矿、脉石矿物紧密共生且嵌布偏细是导致钛铁矿分选提质困难的主要原因。

(2) 根据工艺矿物学研究结果，结合矿物物化性质差异，确定了在磨矿-弱磁除铁-浮选脱硫-浮选选钛的工艺流程。分选试验结果表明：采用磨矿-弱磁-脱硫-一粗一扫五精的工艺流程及在氟硅酸钠助选剂+DTX-A 捕收剂药剂体系下，闭路试验可获得钛精矿产率为 46.34%、

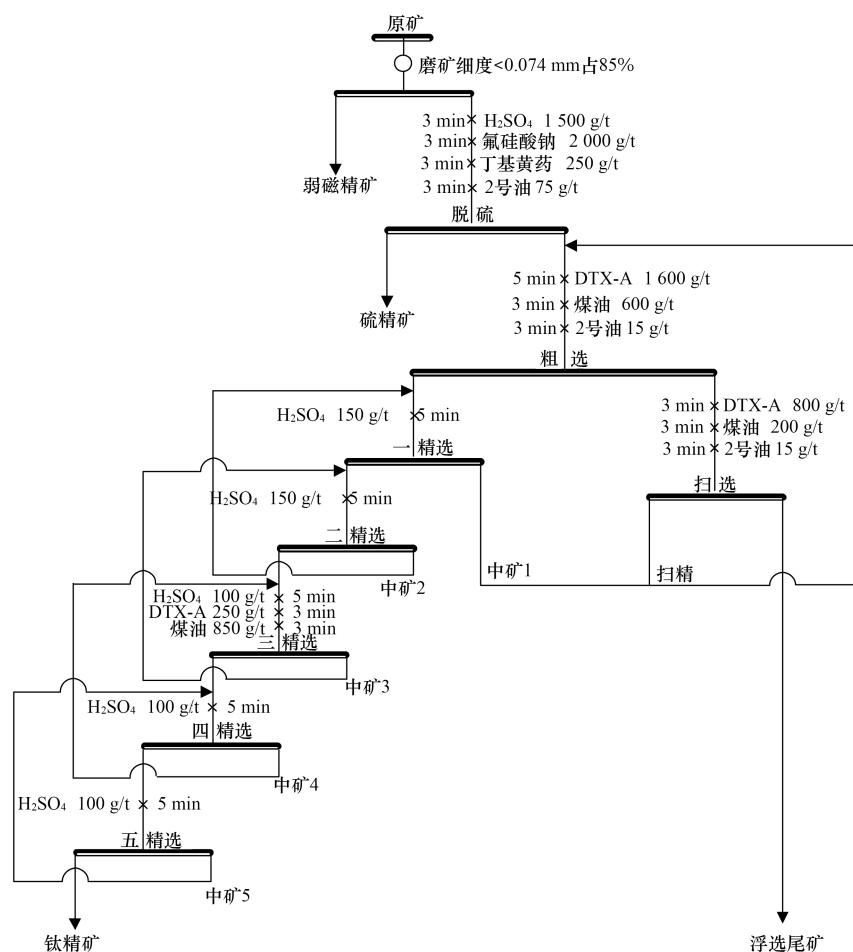


图9 钛铁矿闭路浮选试验流程

TiO₂ 品位为 45.10% 和回收率为 62.60% 的分选指标,同时可以获得产率为 26.71%, TFe 品位为 47.74%、回收率为 35.19%, TiO₂ 质量分数为 29.34% 的副产品铁精矿,为该类型钛铁矿矿石分选提供了技术依据。

参考文献:

- [1] USGS. Mineral Commodity Summaries[EB/OL]. [2024-01-31]. <https://www.usgs.gov/media/images/mineral-commodity-summaries-2024-cover-page>.
- [2] 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.
- [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.
- [4] 刘伟军. 红格矿区钛铁矿与含硅脉石矿物浮选分离机理与工艺研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2016.
- [5] 朱阳戈. 微细粒钛铁矿浮选理论与技术研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
- [6] 张翔宇,朱华磊. 钛铁矿选矿技术研究与应用探析[J]. 世界有色金属,2016(1):160-161.
- [7] 韦连军,黄庆柒,廖江南. 云南文山某细粒钛铁矿选矿试验研究[J]. 金属矿山,2010(7):51-54.
- [8] 袁源明. 浅谈 SLon 立环脉动高梯度磁选机在黑山选钛厂的应用[J]. 江西有色金属,2002(9):19-21.
- [9] 刘琴. 我国钛矿选矿概述[J]. 四川有色金属,2021(1):6-8.
- [10] 郑禹. 红格橄辉岩型钛铁矿浮选分离理论与工艺研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2019.
- [11] 朱俊士. 钒钛磁铁矿选矿及综合利用[J]. 金属矿山,2000(1):1-5.
- [12] 杜雨生,马龙秋,孟庆有,等. 四川攀西某难选钛铁矿重选精矿浮选试验研究[J]. 金属矿山,2019(4):82-87.
- [13] 朱阳戈,张国范,冯其明,等. 微细粒钛铁矿的自载体浮选[J]. 中国有色金属学报,2009,19(3):554-560.