微细粒铁精矿细磨深选尾矿浮选钛铁矿试验研究*

李维斯[1,2],严伟平[1,2],杨耀辉[1,2],曾小波[1,2],邓建[1,2],李伦[1,2],张博远[1,2]

(1.中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041;
2.自然资源部战略性矿产综合利用工程技术创新中心, 四川 成都 610041)

摘要:以攀西地区某厂微细粒铁精矿细磨深选尾矿为研究对象,其TiO_2品位为19.51%,脉石矿物主要为辉石、绿泥石和闪石等。针对该矿石特点,研发了BY系列抑制剂,搭配捕收剂MOH使用,通过抑制剂筛选试验、抑制剂用量试验、捕收剂用量试验和pH条件试验,确定最优药剂用量,并进行浮选闭路试验。结果表明:综合考虑钛精矿品位及回收率指标,确定以BY-3作抑制剂,其最优用量为1 500 g/t,捕收剂MOH最优用量为2 500 g/t,粗选时pH控制在3.5左右;通过"一粗一精脱硫—一粗一扫四精,中矿顺序返回选钛"的闭路流程,可获得产率为30.98%、TiO_2品位为46.94%、TiO_2回收率为74.54%的钛精矿,以及TiO_2品位5.27%的尾矿。研究结果可为同类型矿石高效回收利用提供参考。

关键词:微细粒钛铁矿;尾矿;浮选;抑制剂;捕收剂;闭路试验

中图分类号:TD952 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)09-0251-08

Experimental Study on Flotation of Ilmenite from Fine Grinding Deep Separation Tailings of Micro-Fine Iron Concentrate

LI Weisi[1,2], *YAN Weiping*[1,2], *YANG Yaohui*[1,2], *ZENG Xiaobo*[1,2], *DENG Jian*[1,2], *LI Lun*[1,2], *ZHANG Boyuan*[1,2]

(1.Institute of Mineral Estatement of the Chinese Academy of Geological Science, Chengdu, Sichuan 610041, China;
2.Technology Innovation Center for Comprehensive Utilization of Strategic Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Taking the fine grinding deep separation tailings of micro-fine iron concentrate in a factory in Panxi area as the research object, the TiO_2 grade is 19.51%, and the gangue minerals are mainly pyroxene, chlorite and amphibole. According to the characteristics of the ore, BY series inhibitors were developed and used with MOH collector. The optimal reagent dosage was determined by inhibitor screening test, inhibitor dosage test, collector dosage test and pH condition test, and the flotation closed-circuit test was carried out. The results show that considering the grade and recovery rate of titanium concentrate, it is determined that BY-3 is used as inhibitor, the optimal dosage is 1 500 g/t, the optimal dosage of MOH collector is 2 500 g/t, and the pH is controlled at about 3.5 during roughing. Through the closed-circuit process of "one coarse, one fine and desulfurization, combining one coarse, one sweep and four fine, as well as returning the intermediate ore in sequence for titanium selection", the ilmenite concentrate with a yield of 30.98%, a TiO_2 grade of 46.94% and a TiO_2 recovery of 74.54% and the tailings with a TiO_2 grade of 5.27% can be obtained. The research results can provide a reference for the efficient recovery and utilization of the same type of ore.

Key words: Micro-fine ilmenite, Tailing, Flotation, Inhibitor, Collector, Closed-circuit test

---

* **收稿日期**:2024-09-27

基金项目:新疆维吾尔自治区重大科技专项项目(2023A03003-4);国家自然科学基金战略性矿产资源开发利用专项项目(2021YFC2900800);攀西试验区第五批重大科技攻关项目(ZHS-QR-22-102);四川省经信厅揭榜挂帅项目(LB-SK-HT23-0334);中国地质调查项目(DD20242129)

作者简介:李维斯(1993—),男,四川成都人,硕士,助理工程师,主要从事战略性矿产综合回收利用研究工作。E-mail:649702647@qq.com

通信作者:严伟平(1984—),男,江西万载人,硕士,副研究员,主要从事战略性矿产资源的高效开发与利用研究。E-mail:yanweiping_imumr@163.com

0 引言

我国是全球钛资源储量最大的国家,其中,攀枝花-西昌地区(以下简称攀西地区)蕴藏着我国90%以上的钛矿资源储量[1],且以多金属共存的钒钛磁铁矿为主体[2-3]。攀西地区钒钛磁铁矿中可回收的钛资源主要以钛铁矿($FeTiO_3$)的形式存在[4]。钒钛磁铁矿需先经"阶段磨矿—阶段弱磁选"的工艺流程处理,得到铁精矿和选铁尾矿[5],选铁尾矿再经"强磁预富集+浮选"工艺处理,最终得到钛精矿[6-7]。然而,随着采矿深度的增加,矿石中有用矿物嵌布粒度逐渐细化,且市场对铁精矿品位的要求日益提升,为了保证铁精矿的品质,通常需要对入选物料进行细磨深选处理,由此产生了大量的微细粒钛铁矿[8-11]。

矿物颗粒粒径越小,相对表面积越大,不仅会增加药剂消耗量[12],还会减弱药剂对微细粒矿物颗粒的选择性吸附,致使脉石矿物易夹杂精矿上浮,进而影响精矿品位。同时,微细粒矿物的表面能和溶解度随之增大,一方面导致其可浮性降低,另一方面使浮选矿浆中溶解组分增多,进一步增加了浮选难度。微细粒矿物分选性能差、选矿效率低,是当前我国选矿行业亟待解决的难题[13-15]。

本研究所用微细粒钛铁矿为攀西地区某厂铁精矿提质尾矿经强磁预富集后的强磁精矿,其TiO_2品位为19.51%,脉石矿物主要为辉石、绿泥石和闪石等。针对该矿石的性质特点,研发了BY系列抑制剂,搭配捕收剂MOH使用。通过抑制剂筛选试验、抑制剂用量试验、捕收剂用量试验和pH条件试验等,确定该物料的较优药剂制度,进行了钛铁矿开路试验及浮选闭路试验,并对闭路试验获得的钛精矿进行产品检查。研究结果对同类型微细粒钛铁矿的浮选回收具有借鉴意义。

1 原矿性质

1.1 原矿的化学组成和筛分分析

试验所用原矿样品为攀西地区某厂铁精矿提质尾矿经强磁预富集后的强磁精矿,为某萤石-方解石共生矿,原矿多元素化学分析结果见表1。

表1 原矿的多元素化学分析结果

Table 1 Multi-element chemical analysis results of raw ore

%

TiO_2	TFe	S	MgO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	其他
19.51	20.57	1.35	10.04	21.33	9.42	5.72	12.06

由表1可知,样品中TiO_2品位为19.51%,TFe品位为20.57%;MgO、SiO_2、Al_2O_3、CaO品位分别为10.04%、21.33%、9.42%、5.72%;S的品位较高,达到了1.35%。

为了解该样品的粒度分布情况,对矿样进行了筛分分析,结果见表2。

表2 筛分分析结果

Table 2 Screening analysis results

粒级/mm	产率/%	负累积产率/%	TiO_2品位/%	TiO_2分布率/%	TiO_2负累积分布率/%
+0.075	4.98	100.00	5.41	1.38	100.00
−0.075～+0.038	20.89	95.02	17.63	18.88	98.62
−0.038～+0.019	28.67	74.13	22.78	33.48	79.74
−0.019	45.46	45.46	19.85	46.26	46.26
原矿	100.00	—	19.51	100.00	—

由表2可知,样品−0.038 mm含量占比为74.13%,−0.019 mm含量占比为45.46%,整体粒度微细。在−0.038～+0.019 mm粒级范围内,TiO_2品位最高,为22.78%。TiO_2在−0.038 mm分布率可达79.74%,在−0.019 mm分布率可达46.26%。

1.2 原矿的工艺矿物学研究

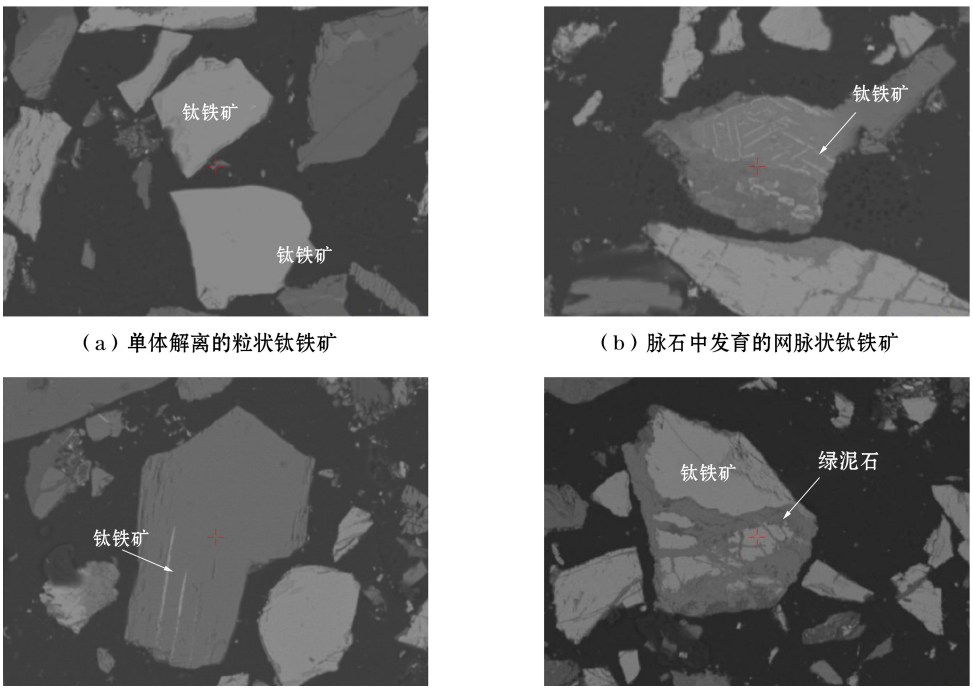
对原矿进行了工艺矿物学研究,得到原矿中主要矿物的含量,见表3。

表3 原矿中主要矿物的含量

Table 3 Content of main minerals in raw ore %

钛铁矿	钛磁铁矿	磁黄铁矿	辉石	绿泥石	闪石	其他
35.80	0.71	3.13	16.22	13.40	12.33	18.41

通过扫描电镜试样,得到原矿中主要矿物的解离度分布情况,如图1所示。由图1可知,原矿样品中的钛铁矿多呈粒状,粒度较细,单体解离度较好,同时也常见钛铁矿呈微细粒包体或微细网脉赋存于辉石等脉石中,形成嵌晶(或包含)结构,这种钛铁矿粒度微细,一般在10 μm以下,难与脉石解离,且含量不高,属于选矿的合理损失;样品中的钛铁矿常发生绿泥石化交代作用,绿泥石沿钛铁矿晶体边界或晶内裂隙进行交代,与钛铁矿紧密连生,且粒度微细,解离难度较大,若混入精矿会增加钛精矿中硅等杂质元素的含量。



(a) 单体解离的粒状钛铁矿　(b) 脉石中发育的网脉状钛铁矿

(c) 脉石中的细脉状钛铁矿　(d) 钛铁矿中的绿泥石化蚀变

图 1　钛铁矿电子显微镜 BSE 图像

Fig.1　BSE images of ilmenite under electron microscope

2　浮选试验

2.1　脱硫条件试验

原矿中含有部分硫化矿,且 S 品位为 1.35%,在浮钛前需对这一部分硫化矿进行脱除,脱硫试验流程如图 2 所示。依据图 2 开展脱硫捕收剂筛选试验、脱硫捕收剂用量试验和脱硫活化剂筛选试验。

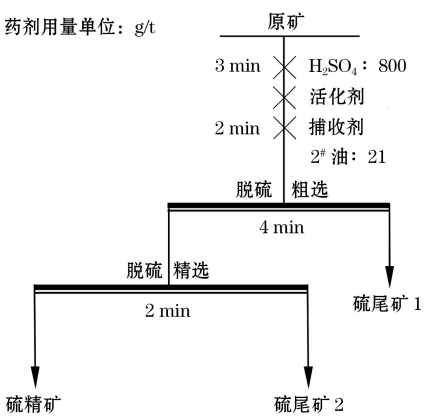


图 2　脱硫条件试验流程

Fig.2　Process of desulfurization condition test

2.1.1　脱硫捕收剂筛选试验

固定 H_2SO_4 用量为 800 g/t,捕收剂用量为 200 g/t,2# 油用量为 21 g/t,改变捕收剂种类,进行脱硫捕收剂筛选试验,结果见表 4。

表 4　脱硫捕收剂筛选试验结果

Table 4　Test results of desulfurization collector screening

脱硫捕收剂种类	产品名称	产率/%	S 品位/%	S 回收率/%
丁基黄药	硫精矿	5.79	7.83	34.91
	硫尾矿 2	10.81	2.19	18.22
	硫尾矿 1	83.40	0.73	46.87
	原矿	100.00	1.30	100.00
戊基黄药	硫精矿	6.57	6.67	33.00
	硫尾矿 2	9.50	2.03	14.52
	硫尾矿 1	83.93	0.83	52.48
	原矿	100.00	1.33	100.00
丁铵黑药	硫精矿	5.65	3.22	14.19
	硫尾矿 2	8.84	1.71	11.79
	硫尾矿 1	85.51	1.11	74.02
	原矿	100.00	1.28	100.00

由表 4 可知,丁基黄药作脱硫捕收剂时,硫精矿中 S 品位达 7.83%,S 回收率达 34.91%,均高于戊基黄药(S 品位和 S 回收率分别为 6.67%、33.00%)和丁铵黄药(S 品位和 S 回收率分别为 3.22%、14.19%),因此,确定脱硫捕收剂为丁基黄药。

2.1.2　脱硫捕收剂用量试验

固定 H_2SO_4 用量为 800 g/t,2# 油用量为 21 g/t,改变丁基黄药用量,进行脱硫捕收剂筛选试验,结果如图 3 所示。

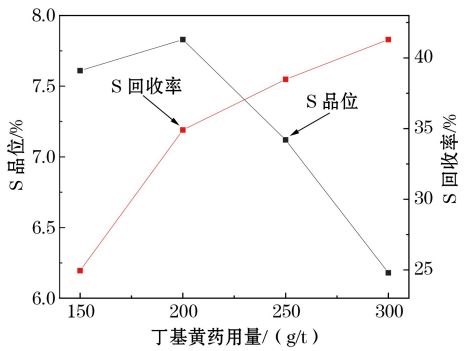


图 3 脱硫捕收剂用量试验结果

Fig.3 Test results of desulfurization collector dosage

由图 3 可知,随着丁基黄药用量的增加,硫精矿 S 品位先增加后减少,S 回收率逐渐增加。综合考虑硫精矿品位及回收率指标,确定丁基黄药用量为 200 g/t。

2.1.3 脱硫活化剂筛选试验

固定 H_2SO_4 用量为 800 g/t,丁基黄药用量为 200 g/t,2# 油用量为 21 g/t,改变活化剂种类,进行脱硫活化剂筛选试验,结果见表 5。

表 5 脱硫活化剂筛选试验结果

Table 5 Test results of desulfurization activator screening

活化剂种类	产品名称	产率/%	S 品位/%	S 回收率/%
WP318	硫精矿	7.71	8.13	48.61
	硫尾矿 2	15.17	1.67	19.67
	硫尾矿 1	77.12	0.53	31.72
	原矿	100.00	1.29	100.00
EM506	硫精矿	11.78	5.63	49.03
	硫尾矿 2	18.19	1.48	19.90
	硫尾矿 1	70.03	0.60	31.07
	原矿	100.00	1.35	100.00
Na_2S	硫精矿	8.21	6.86	41.10
	硫尾矿 2	18.90	1.80	24.84
	硫尾矿 1	72.89	0.64	34.06
	原矿	100.00	1.37	100.00
FT-1	硫精矿	6.60	8.11	40.29
	硫尾矿 2	16.72	1.81	22.78
	硫尾矿 1	76.68	0.64	36.93
	原矿	100.00	1.33	100.00

由表 5 可知,WP318 作为脱硫活化剂时,硫精矿中 S 品位为 8.13%,S 回收率为 48.61%,指标高于 EM506、Na_2S、FT-1 活化剂,因此,确定脱硫活化剂为 WP318。

2.2 脱硫全流程试验

根据脱硫条件试验结果,确定脱硫浮选流程为一次粗选+一次精选,中矿顺序返回闭路脱硫,药剂选用 WP318 作为活化剂,H_2SO_4 作为调整剂,丁基黄药作为捕收剂,2# 油作为起泡剂,硫尾矿作为选钛入浮。脱硫浮选流程如图 4 所示。脱硫浮选全流程试验结果见表 6,后续条件试验直接以硫尾矿进行浮钛作业。

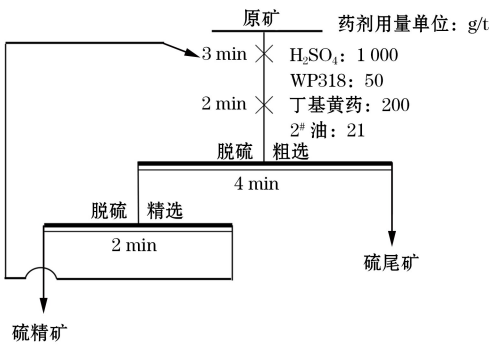


图 4 脱硫浮选流程

Fig.4 Desulfurization flotation process

表 6 脱硫浮选全流程试验结果

Table 6 Whole process test results of desulfurization flotation

产品名称	产率/%	S 品位/%	S 回收率/%
硫精矿	9.67	8.06	57.73
硫尾矿	90.33	0.63	42.27
原矿	100.00	1.35	100.00

2.3 浮钛粗选条件试验

试验以 MOH 为浮钛捕收剂,并根据原矿性质研发了 BY 系列抑制剂。为确定适宜的浮钛粗选条件,开展了抑制剂筛选试验、抑制剂用量试验、捕收剂用量试验和 H_2SO_4 用量试验。浮钛粗选条件试验流程如图 5 所示。

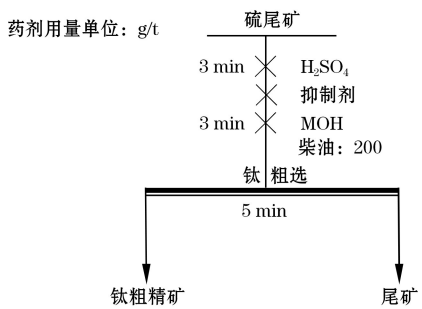


图 5 浮钛粗选条件试验流程

Fig.5 Roughing condition test process of titanium flotation

2.3.1 浮钛粗选抑制剂筛选试验

固定 H_2SO_4 用量为 3 400 g/t,捕收剂用量为 2 000 g/t,柴油用量为 200 g/t,改变抑制剂种类及用量,进行浮钛粗选抑制剂筛选试验,结果见表 7。

表 7 浮钛粗选抑制剂筛选试验结果

Table 7 Test results of inhibitor screening for rough separation of floating titanium

抑制剂种类及用量/(g/t)	产品名称	产率/%	TiO_2 品位/%	TiO_2 回收率/%
无抑制剂	钛粗精矿	57.41	23.97	69.74
	尾矿	42.59	14.02	30.26
	硫尾矿	100.00	19.73	100.00
草酸(200)	钛粗精矿	64.06	28.72	93.17
	尾矿	35.94	3.75	6.83
	硫尾矿	100.00	19.74	100.00
氟硅酸钠(1 000)	钛粗精矿	65.53	28.29	94.07
	尾矿	34.47	3.39	5.93
	硫尾矿	100.00	19.71	100.00
水玻璃(1 000)	钛粗精矿	62.70	29.14	92.56
	尾矿	37.30	3.94	7.44
	硫尾矿	100.00	19.74	100.00
BY-1(1 000)	钛粗精矿	67.07	27.94	94.87
	尾矿	32.93	3.08	5.13
	硫尾矿	100.00	19.75	100.00
BY-2(1 000)	钛粗精矿	63.78	29.01	93.69
	尾矿	36.22	3.44	6.31
	硫尾矿	100.00	19.75	100.00
BY-3(1 000)	钛粗精矿	67.36	27.89	95.19
	尾矿	32.64	2.91	4.81
	硫尾矿	100.00	19.74	100.00

由表 7 可知,与无抑制剂相比,各类抑制剂均能显著提升钛粗精矿的 TiO_2 品位及回收率。其中,BY-3(1 000 g/t)表现最优,钛粗精矿 TiO_2 回收率达 95.19%,为所有抑制剂中最高,尾矿 TiO_2 品位仅 2.91%,说明其抑制脉石效果最强,钛粗精矿 TiO_2 品位(27.89%)略低于水玻璃和 BY-2,但综合回收率及尾矿指标,确定 BY-3 为最优抑制剂。

2.3.2 抑制剂用量试验

固定 H_2SO_4 用量为 3 400 g/t,捕收剂用量为 2 000 g/t,柴油用量为 200 g/t,改变抑制剂用量,进行抑制剂用量试验,结果如图 6 所示。

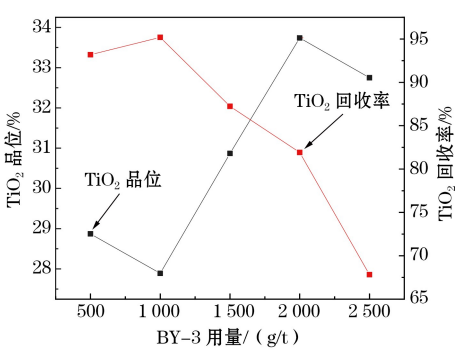


图 6 浮钛粗选抑制剂用量试验结果

Fig.6 Test results of inhibitor dosage for rough separation of floating titanium

由图 6 可知,随着 BY-3 用量的增加,钛粗精矿 TiO_2 品位呈降低—增加—降低的变化趋势,回收率则先增加后降低。综合考虑,确定 BY-3 用量为1 500 g/t。

2.3.3 捕收剂用量试验

固定 H_2SO_4 用量为 3 400 g/t,BY-3 用量为 1 500 g/t,柴油用量为 200 g/t,改变 MOH 用量,进行捕收剂用量试验,结果如图 7 所示。

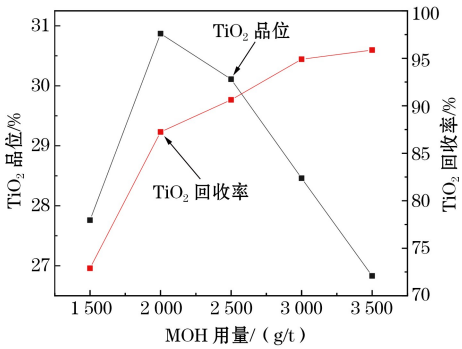


图 7 浮钛粗选捕收剂用量试验结果

Fig.7 Test results of collector dosage for rough separation of floating titanium

由图 7 可知,随着捕收剂 MOH 用量的增加,钛粗精矿 TiO_2 品位先增加后降低,回收率则逐渐增加。综合考虑钛精矿品位及回收率指标,确定捕收剂 MOH 用量为 2 500 g/t 时较为合适。

2.3.4 pH 条件试验

固定 BY-3 用量为 1 500 g/t,MOH 用量为 2 500 g/t,柴油用量为 200 g/t,改变 H_2SO_4 用量,进行 pH 条件试验,结果如图 8 所示。

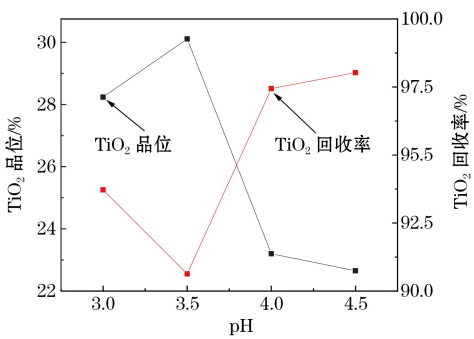


图 8 pH 条件试验结果

Fig.8 Results of pH condition test

由图 8 可知,随着 pH 增大,钛粗精矿 TiO_2 品位先增加后降低,回收率则先降低再升高。综合考虑钛精矿品位及回收率指标,确定粗选的 pH 控制在 3.5 左右。

2.4 开路试验

通过钛铁矿条件试验研究,确定了该钛铁矿的开路试验流程和药剂制度。开路试验流程如图 9 所示,试验结果见表 8。

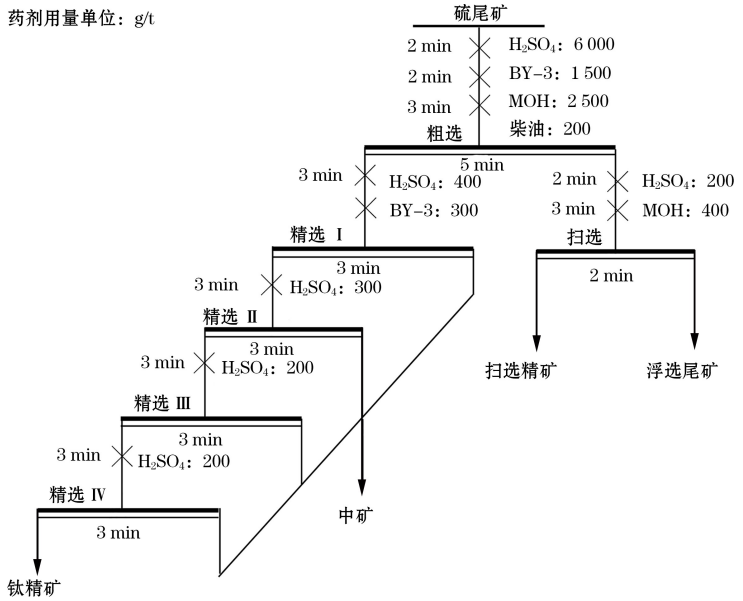


图 9 开路试验流程

Fig.9 Open circuit test process

表 8 开路试验结果

Table 8 Open circuit test results

产品名称	产率/%	TiO_2 品位/%	TiO_2 回收率/%
钛精矿	20.83	47.19	50.22
中矿	40.88	17.68	36.92
扫选精矿	4.63	20.83	4.92
浮选尾矿	33.66	4.61	7.93
硫尾矿	100.00	19.57	100.00

由表 8 可知，开路试验获得了 TiO_2 品位 47.19%，TiO_2 回收率 50.22%的钛精矿。

2.5 闭路试验

在条件试验和开路试验的基础上，进行了浮选闭路试验，闭路试验流程如图 10 所示，闭路试验结果见表 9。

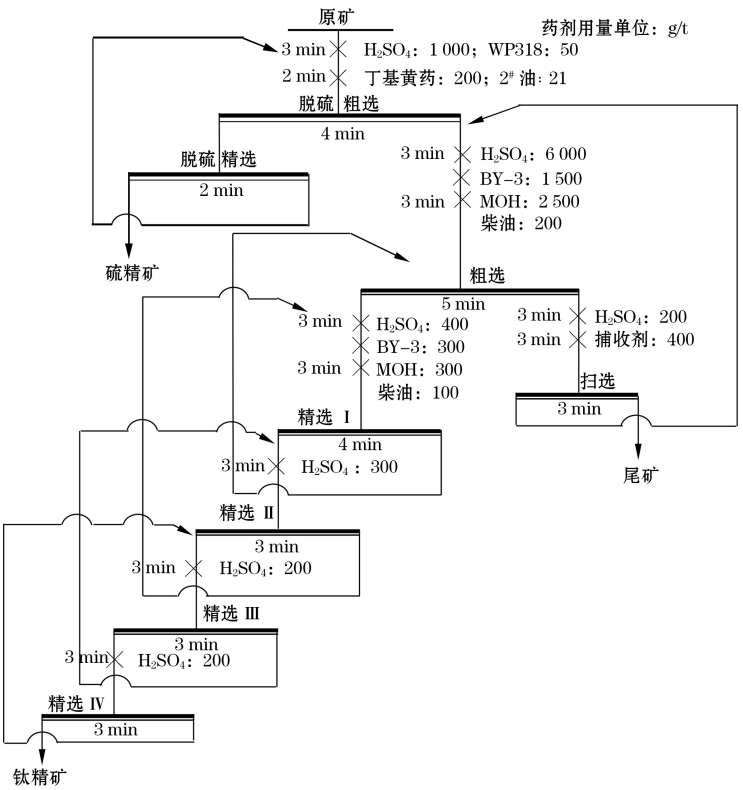


图 10 闭路试验流程

Fig.10 Closed circuit test process

表 9 闭路试验结果

Table 9 Closed circuit test results

产品名称	产率/%	TiO_2 品位/%	TiO_2 回收率/%
钛精矿	30.98	46.94	74.54
尾矿	59.30	5.27	16.01
硫精矿	9.72	18.97	9.45
原矿	100.00	19.51	100.00

由表 9 可知,通过闭路试验可获得产率为 30.98%、TiO_2 品位为 46.94%、回收率为 74.54%的钛精矿,TiO_2 品位为 5.27%的尾矿。

2.6 产品检查

2.6.1 多元素化学分析

钛精矿多元素化学分析结果见表 10。

表 10 钛精矿多元素化学分析结果

Table 10 Results of multi-element chemical analysis of titanium concentrate %

TFe	TiO_2	MnO	S	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2	其他
32.11	46.94	0.68	0.53	0.37	4.49	1.10	1.27	12.52

由表 10 可知,钛精矿中 TiO_2 品位为 46.94%,TFe 品位为 32.11%,主要的杂质元素为 MgO,含量为 4.49%,精矿中含 S 较多,S 含量为 0.53%,SiO_2、Al_2O_3 和 CaO 品位分别为 1.27%、1.10%和 0.37%。

2.6.2 筛分分析

钛精矿粒度分析结果见表 11。

表 11 钛精矿粒度分析结果

Table 11 Particle size analysis results of titanium concentrate

粒级/mm	产率/%	负累积产率/%	TiO_2 品位/%	TiO_2 分布率/%	TiO_2 负累积分布率/%
+0.038	10.87	100.00	46.27	10.70	100.00
−0.038～+0.019	31.67	89.13	47.43	31.95	89.30
−0.019	57.46	57.46	46.93	57.35	57.35
原矿	100.00	—	47.02	100.00	—

由表 11 可知,钛精矿粒度较细,主要集中在−0.019 mm 粒级,TiO_2 分布率为 57.35%。

2.6.3 产品检查

对钛精矿进行工艺矿物学产品检查,得出钛精矿中的主要矿物为钛铁矿,含量高达 92.7%,另外含有 0.9%的钛磁铁矿和 1.3%的硫化物,脉石含量仅为 5.1%。钛精矿中的钛铁矿粒度分布较均匀,主要介于 20～70 μm 之间,单体解离度较好,在 90%以上,未解离的钛铁矿主要与长石、辉石、橄榄石等脉石连生。混入钛精矿中的脉石矿物含量较低,粒度在 10～50 μm 之间,单体解离度在 60%以上;混入钛精矿中的硫化物的粒度在 20～70 μm 之间,单体解离度在 80%以上。整体来看,钛精矿混入的脉石矿物含量低,但精矿中含有部分硫化物,且硫化物解离度较高。

3 结论

(1) 原矿样品中绿泥石含量较高,为 13.40%。基于该性质,研发了 BY 系列抑制剂,试验研究表明,BY 系列抑制剂实现了对辉石、绿泥石等脉石矿物的选择性抑制,搭配捕收剂 MOH 使用,可获得 TiO_2 品位大于 46%的钛精矿。

(2) 对于 TiO_2 品位为 19.51%的原矿,采用 MOH 作为捕收剂,BY-3 作为抑制剂,通过“一粗一精脱硫——一粗一扫四精,中矿顺序返回选钛”的闭路流程,可获得产率为 30.98%、TiO_2 品位为 46.94%、回收率为 74.54%的钛精矿和 TiO_2 品位为 5.27%的尾矿。

(3) 基于多元素化学分析结果可知,钛精矿中 TiO_2 品位为 46.94%,S 品位为 0.53%。根据《钛精矿(岩矿)》(YB 4031—2015)标准可知,钛精矿中 S 品位需小于 0.35%才可达到 TJK46 品质。且硫化物粒度微细,难以通过磁选和浮选等手段剔除。考虑到原矿在生产现场的产量很低,可将该钛精矿与主流程钛精矿混合后销售。

参考文献(References):

[1] 刘伟,方一兵,柯家骏.中国科学院对攀枝花钒钛磁铁矿综合利用之化工冶金研究回顾[J].工程研究——跨学科视野中的工程,2021,13(4):381-391.
LIU Wei, FANG Yibing, KE Jiajun. Overview of comprehensive utilization research on chemical metallurgy from Panzhihua mineral resources by Chinese Academy of Sciences[J]. Journal of Engineering Studies,2021,13(4):381-391.

[2] 吴贤,张健.中国的钛资源分布及特点[J].钛工业进展,2006(6):8-12.
WU Xian, ZHANG Jian. Distribution and characteristics of titanium resources in China [J]. Titanium Industry Progress,2006(6):8-12.

[3] 朱福兴,焦钰,李亮,等.攀西钒钛磁铁矿的选矿技术现状及发展趋势[J].矿冶,2021,30(4):26-32+40.
ZHU Fuxing, JIAO Yu, LI Liang, et al. The status and trends of mineral processing technology for vanadic titanomagnetite in Pan-xi area[J]. Mining and Metallurgy, 2021,30(4):26-32+40.

[4] 陈海彬,周振华,张作金,等.钒钛磁铁矿综合回收研究进展[J].现代矿业,2023,39(1):7-9.

CHEN Haibin, ZHOU Zhenhua, ZHANG Zuojin, et al. Research progress in the comprehensive recovery of vanadium-titanium magnetite[J]. Modern Mining,2023,39(1):7-9.

[5] 张金梁,卢萍,范兴祥,等.还原—磨选工艺在有色冶金中的应用研究现状及展望[J].昆明冶金高等专科学校学报,2019,35(5):1-9.
ZHANG Jinliang, LU Ping, FAN Xingxiang, et al. Research status and prospect of reduction-grinding & magnetic separation process in nonferrous metallurgy[J]. Journal of Kunming Metallurgy College,2019,35(5):1-9.

[6] 邓建,杨耀辉,严伟平,等.攀西某超微细粒物料中钛铁矿选矿回收实验研究[J].矿产综合利用,2023(4):27-34.
DENG Jian, YANG Yaohui, YAN Weiping, et al. Recovery of ilmenite from an ultrafine fine particle material in Panxi [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023 (4):27-34.

[7] 严伟平,李维斯,杨耀辉,等.攀西地区超微细粒级钛铁矿资源选矿工艺研究[J].矿产综合利用,2023(4):55-61.
YAN Weiping, LI Weisi, YANG Yaohui, et al. Research on mineral processing technology of ultrafine ilmenite resources in Panzhihua-Xichang area[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2023(4):55-61.

[8] 崔毅琦,王凯,童雄,等.难选微细粒钛铁矿资源的回收利用研究概述[J].矿冶,2014,23(6):14-17+21.
CUI Yiqi, WANG Kai, TONG Xiong, et al. Study overview of recovering refractory fine ilmenite resource[J]. Mining and Metallurgy,2014,23(6):14-17+21.

[9] 杨耀辉,惠博,严伟平,等.攀西微细粒钛铁矿工艺矿物学研究[J].矿产综合利用,2020(3):131-135.
YANG Yaohui, HUI Bo, YAN Weiping, et al. Research on process mineralogy of fine ilmenite in Panxi area [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020 (3): 131-135.

[10] 计志雄,刘胜华,贺建强,等.新白马公司一期钒钛铁精矿提质研究与实践[J].矿业研究与开发,2024,44(7):251-257.
JI Zhixiong, LIU Shenghua, HE Jianqiang, et al. Research andpractice on improving the quality of vanadium titanium iron concentrate in the first phase of New Baima company [J]. Mining Research and Development, 2024, 44 (7): 251-257.

[11] 朱智超,张少平,兰舟,等.海南某铁矿工艺矿物学特征及磁选工艺优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(1):197-201.
ZHU Zhichao, ZHANG Shaoping, LAN Zhou, et al. Study on process mineralogical characteristics and optimization of magnetic separation process of an iron ore mine in Hainan [J]. Mining Research and Development, 2024, 44 (1): 197-201.

[12] 印万忠,龙恺云,张西山,等.矿物捕收剂滑石对孔雀石的捕收作用及其机理[J].金属矿山,2023(8):50-57.
YIN Wanzhong, LONG Kaiyun, ZHANG Xishan, et al. Collecting effect and mechanism of mineral collector talc on malachite[J]. Metal Mine,2023(8):50-57.

[13] MIETTINEN T, RALSTON J, FORNASIERO D. The limits of fine particle flotation[J]. Minerals Engineering, 2010,23(5):420-437.

[14] 严伟平.攀西某微细粒难选钛铁矿的选矿新工艺研究[J].有色金属工程,2020,10(8):76-82.
YAN Weiping. Study on new beneficiation technology for a refractory ultrafine ilmenite ore in Panxi[J]. Nonferrous Metals Engineering,2020,10(8):76-82.

[15] 刘四清,庄故章.表面力与微细粒矿物分选研究现状及展望[J].昆明理工大学学报,1997(2):36-39.
LIU Siqing, ZHUANG Guzhang. General situation and strategy of the role of surface force in ultrafine mineral particle seperation[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology,1997(2):36-39.