

低品位钛铁矿选矿工艺研究

杨道广

(钒钛资源综合利用国家重点研究室,攀钢集团研究院有限公司,四川 攀枝花 617000)

摘 要:某低品位钒钛磁铁矿, TiO_2 品位为 6.15%, 矿物组成复杂, 为充分回收其中的钛铁矿, 针对钛的赋存状态及粒级分布特点, 制定了强磁磁选预抛尾、重选提质、细磨弱磁选除铁、反浮选脱硫与一粗一扫两精浮钛组合工艺流程, 研究了磁感应强度、磁介质大小、脉动冲程、磨矿浓度、磨矿时间、浮选调整剂及捕收剂用量等的影响, 在获得最优工艺条件的基础上, 按“一段强磁抛尾—两段重选抛尾—磨矿—除铁—浮选”的工艺流程进行了闭路试验。试验获得了 TiO_2 品位 48.22%, 回收率为 35.19% 的钛精矿。矿石中主要有用的矿物钛铁矿得到了有效的回收。

关键词: 钛铁矿; 强磁选; 重选; 浮选

中图分类号: TF823, TD92

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)03-0111-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.03.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Study on beneficiation process of a low grade ilmenite in Panxi

Yang Daoguang

(State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: The TiO_2 content of a low grade ilmenite in Panxi is 6.15% and its mineral composition is complex. In order to fully recover ilmenite, mineral processing experiments were carried out. According to the occurrence state and particle size distribution characteristics of titanium, the combined technological processes of pre-tail dumping by strong magnetic separation, quality improvement by gravity separation, iron removal by fine grinding and low intensity magnetic separation, reverse flotation desulfurization and one roughing-one scavenging-two cleaning titanium flotation were formulated. The effects of magnetic induction intensity, magnetic medium size, pulsating stroke, grinding concentration, grinding time, flotation regulator and collector dosage were studied. The experimental results show that after the ore dressing test is carried out by the process of "one strong magnetic throwing tail-two segment redressing-grinding-removing iron-flotation", the TiO_2 grade of 48.22% and the recovery rate of 35.19% can be obtained. The main useful mineral in the ore is ilmenite, which has been effectively recovered.

Key words: ilmenite, strong magnetic separation, gravity separation, flotation

0 引言

钛具有密度低、抗腐蚀、低阻尼、超导电性等特点, 广泛应用于航空航天、生物医药、石油化工、信

息技术、高端装备制造等领域, 被誉为“太空金属”、“海洋金属”和“未来金属”^[1]。钛的应用是衡量国家发达程度的标志之一, 美国将钛列为 35 种关键矿产目录, 欧盟将钛列入 61 种关键原材料目录。我国

收稿日期: 2022-01-01

作者简介: 杨道广(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事钒钛磁铁矿选矿相关科研工作, E-mail: 365794635@qq.com。

也因钛的优良特性,将其列为中国制造 2025 和《新材料产业发展指南》中的重点^[2-3]。我国钛资源主要以钛铁矿为主,约占钛资源储量的 98%,只有 2% 左右为金红石。钛铁矿资源中又以钛铁矿岩矿为主,约为 92%,钛铁矿砂矿约占 8%^[4]。随着资源的不断开发利用,中国优质钛铁矿资源越来越少,因此对低品位钛铁矿资源的利用势在必行。由于钛铁矿中一些矿物的可选特性相似,且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^[5-6],如何提高低品位钛铁矿的分选效率,是摆在选矿工作者面前亟待解决的问题。为此,笔者开展了低品位钛铁

矿选矿工艺研究。

1 试验原料

试验原料取自攀西地区某低品位钛铁矿岩矿。原料中主要有用矿物为钛铁矿,其次为钛磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿等;脉石矿物以含钛普通辉石为主,其次为斜长石等。钛主要分布在钛铁矿中,少量分布在钛磁铁矿、含钛普通辉石、角闪石和斜长石等硅酸盐脉石矿物中。铁主要分布在钛铁矿、钛磁铁矿、含钛普通辉石中。对试验原料进行多元素分析、钛的物相分析、矿物组成分析和粒度筛析,结果如表 1~4 所示。

表 1 原矿化学多元素分析
Table 1 Chemical elements analysis of raw ore

%

TFe	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₅
17.14	13.52	4.78	6.15	0.042	0.54	36.93	10.75	0.061

表 2 钛的化学物相分析
Table 2 Phase analysis of titanium

%

	含量	分布率
钛铁矿	4.26	69.27
钛磁铁矿	0.69	11.27
硅酸盐	1.20	19.51
合计	6.15	100.00

表 3 矿物组成分析
Table 3 Analysis of mineral composition

%

钛磁铁矿	钛铁矿	硫化物	钛辉石	斜长石	绿泥石等
4.76	8.64	1.45	41.22	35.87	8.06

表 4 试验原料筛析结果
Table 4 Screening results of test material

粒级/mm	粒级产率/%	粒级品位/%	金属分布率/%
0.450	11.05	1.69	3.07
-0.450 ~ 0.280	16.14	3.18	8.44
-0.280 ~ 0.180	21.75	5.33	19.07
-0.180 ~ 0.154	17.02	8.09	22.65
-0.154 ~ 0.100	15.49	9.72	24.77
-0.100 ~ 0.074	4.13	5.33	3.62
-0.074 ~ 0.045	8.57	8.4	11.85
-0.045 ~ 0.038	2.68	4.72	2.08
-0.038	3.17	8.53	4.44
合计	100	6.07	100

由表 1 可知,原矿中有回收价值的元素为钛和铁,综合化学成分特点,该矿属于原生低品位钛铁矿岩矿。由表 2、3 可知,钛的分布相对较为集中,69.27% 的钛分布在钛铁矿中,少量分布在钛磁铁矿和硅酸盐脉石矿物中。

由表 4 可知,原矿粒度较粗,其中+0.18 mm 粒级含量为 48.94%,金属分布率为 30.58%;-0.074 mm 粒级含量为 14.42%,金属分布率为 18.37%,其中 0.045 ~ 0.074 mm 粒级金属分布率为 11.85%,TiO₂ 主要分布在中间粒级。

2 试验方案

由于原矿中的矿物组成复杂,原矿品位低的特点,所以考虑能收早收,能抛早抛的方案。主要有用矿物钛铁矿是弱磁性矿物,而斜长石等脉石矿物是非磁性矿物,考虑强磁抛尾;其次钛铁矿和脉石矿物普通辉石都是弱磁性矿物,但比重分别为 4.7 和 3.2,可考虑重选抛尾;抛尾以后将 TiO₂ 品位提高到 20% 左右,以达到浮选要求。综合考虑有用矿物和脉石矿物性质上的差异,结合多年从事选矿工作经验,笔者采用“一段强磁抛尾—两段重选抛尾—磨矿—除铁—浮选”的工艺,可从原矿品位 6% 左右的原料中获得总回收率为 35.19%,TiO₂ 品位为 48.22% 的钛精矿,使钛铁矿得到了充分的回收。

2.1 强磁抛尾试验

2.1.1 磁场强度条件试验

首先进行强磁抛尾,以抛掉原矿中的脉石矿物。备,在 1.2、1.0、0.8 T 和 0.6 T 磁场强度下进行磁场以 Slon-100 周期式脉动高梯度磁选机作为试验设强度条件试验,试验结果如表 5 所示。

表 5 磁场强度条件试验
Table 5 Condition tests of Magnetic field intensity

磁场强度/T	原矿品位/%	精矿品位/%	尾矿品位/%	精矿产率/%	回收率/%
1.2	6.22	7.98	1.38	73.33	94.08
1.0	6.22	8.05	1.25	73.09	94.59
0.8	6.22	8.61	1.12	68.09	94.25
0.6	6.22	10.61	1.28	52.95	90.32

从试验结果可以看出,随着磁场强度的降低,精矿品位逐渐增加,精矿回收率缓慢降低。控制磁场强度为 0.6 T 时,强磁精矿产率为 52.95%,TiO₂ 回收率为 90.32%,精矿中 TiO₂ 的富集比达到 1.71 倍,即在该磁场强度下既可以较好的控制精矿产率,又能保证强磁精矿的回收率,综合考虑确定强磁选磁场强度为 0.6 T。

2.1.2 磁介质对比试验

不同粗细的磁介质会产生不同的磁场梯度,通常不同粒度组成的矿物所需最佳磁介质粗细由试验确定。试验以 SLon-500 立环脉动高梯度磁选机作为试验设备,固定磁场强度为 0.60 T,固定转环转速为 2 r/min,固定冲次为 300 次/min,进行 3、4 mm 磁介质的对比试验,结果如表 6 所示。

表 6 磁介质对比试验
Table 6 Contrast tests of magnetic medium

磁介质尺寸/mm	原矿品位/%	精矿品位/%	尾矿品位/%	精矿产率/%	回收率/%
3	6.22	10.78	2.49	44.99	77.98
4	6.22	10.34	2.56	47.04	78.20

从试验结果可知,3 mm 磁介质相比 4 mm 磁介质,强磁精矿回收率基本相当,强磁抛尾率更高,精矿 TiO₂ 品位更高,因此确定选用 3 mm 磁介质进行下一步试验。

2.1.3 磁选机脉动冲次试验

当鼓膜在冲程箱的驱动下作往复运动时,分选室的矿浆便作上下往复运动,脉动流体力使矿粒群

在分选过程中始终保持松散状态,从而有效地消除非磁性颗粒的机械夹杂,最佳的冲次需要由试验确定。试验以 SLon-500 立环脉动高梯度磁选机作为试验设备,固定磁场强度为 0.60 T,以 3 mm 磁介质作为选别介质,固定转环转速为 2 r/min,在 200、250、300 次/min 和 350 次/min 条件下进行冲次条件试验。试验结果如表 7 所示。

表 7 脉动冲次条件试验
Table 7 Condition tests of pulsating impulse

脉动冲次/(次·min ⁻¹)	原矿品位/%	精矿品位/%	尾矿品位/%	精矿产率/%	回收率/%
200	6.22	9.77	2.78	49.21	77.30
250	6.22	10.34	2.53	47.25	78.54
300	6.22	10.78	2.49	44.99	77.98
350	6.22	10.54	2.61	45.09	77.14

从试验结果可以看出,随着冲次的增加,强磁精矿 TiO₂ 品位逐渐提高,尾矿品位略有降低,然后略有回升。当强磁机脉动冲次为 300 次/min 时,精矿品位最高,尾矿品位最低,抛尾率最高,因此确定强

磁选机的脉动冲次为 300 次/min。

2.2 重选试验

经过强磁抛尾以后,试验原料 TiO₂ 品位从 6.22% 提高到了 10 % 左右,还不足以进行浮选试验,

这主要是由于脉石矿物中的普通辉石是弱磁性矿物,用强磁机难以抛除,而普通辉石的比重为 3.2,钛铁矿的比重为 4.7,可以利用重选抛尾。下面以强磁精矿作为原料进行重选抛尾试验。试验原料在磁场强度 0.60 T 以下,以 3 mm 磁介质作为选别介质,固定

转环转速为 2 r/min,脉动冲程为 300 次/min 条件下进行试验,获得品位为 10.58%,TiO₂ 回收率 78.00% 的强磁精矿作为重选抛尾原料。试验结果如表 8 所示,试验流程如图 1 所示。

表 8 重选试验结果
Table 8 Results of gravity separation test

试验条件	原矿品位	精矿品位	尾矿品位	精矿产率	回收率
一段重选	10.58	16.34	5.73	45.71	70.60
二段重选	16.34	23.12	7.48	56.65	80.16

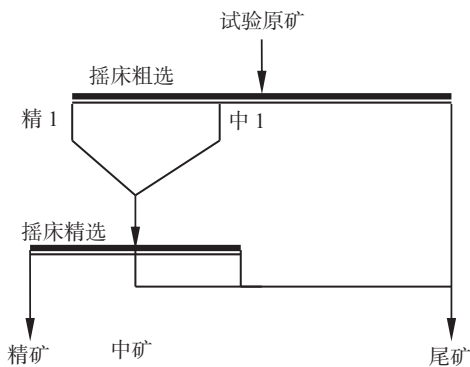


图 1 重选试验流程
Fig. 1 Flow chart of gravity separation test

从试验结果可知,强磁精矿经一段摇床重选以后,可抛掉 55.29% 的尾矿,获得品位为 16.34% 重选粗精矿,再经过二段摇床重选,可抛掉 43.35% 的尾矿,获得精矿品位为 23.12% 的重选精矿。

2.3 磨矿试验

经过重选以后,重选精矿品位达到 23.12%,满足浮选品位要求。但原矿粒度太粗,+0.18 mm 粒级含量达到 42.52%,需要先进行磨矿处理。以上述重选精矿为原料,在 XMQ-Ø240 x90 锥形球磨机上进行磨矿试验,试验结果如下。

2.3.1 磨矿浓度

固定磨矿时间为 3 min,进行磨矿浓度对比试验,试验结果如表 9 所示。

表 9 3 min 磨矿浓度对比试验
Table 9 Contrast tests of 3 min grinding concentration

粒级/mm	粒级含量/%		
	原矿	70%浓度	80%浓度
+0.18	42.52	16.07	2.91
+0.1	15.79	31.43	39.69
0.074	16.85	33.39	17.85
-0.074	16.28	19.11	39.55
合计	100	100	100

从表 9 可知,磨矿 3 min 条件下,磨矿浓度为 80% 时,难浮选粒级+0.18 mm 粒级含量为 2.91%,而 70% 磨矿浓度时,难浮选粒级+0.18 mm 的粒级含量为 16.07%,因此考虑磨矿效果对浮选段的影响,确定磨矿的磨矿浓度为 80%。

2.3.2 磨矿时间

配制矿浆浓度为 80%,在磨矿时间 2、3、5 min 和 8 min 条件下进行试验,结果如表 10 所示。

表 10 磨矿浓度 80% 条件下不同磨矿时间试验结果
Table 10 Test results of grinding time under grinding concentration of 80%

粒级/mm	不同磨矿时间下粒度分布比例 /%				
	原矿	2 min	3 min	5 min	8 min
+0.18	42.52	6.54	2.91	0.38	0.83
+0.1	15.79	45.33	39.69	30.20	18.68
0.074	16.85	17.84	17.85	21.11	19.59
-0.074	16.28	30.30	39.55	48.31	60.90
合计	100	100	100	100	100

从试验结果来看,随着磨矿时间的增加,磨矿时间达到 3 min 以上时,难浮粒级+0.18 mm 粒级的含量明显减少,基本达到浮选要求。同时考虑-0.074 mm 粒级矿物含量不宜过多,以免导致浮选段药剂用量偏高,精矿品位偏低等问题,综合考虑确定磨矿浓度为 80% 时,磨矿时间 3 min 比较合适。

2.4 除铁试验

由于重选精矿中含有少量钛磁铁矿,在进行浮选试验之前先进行除铁,试验如下:重选精矿经磨矿以后,在 XCRS-Ø400x240 电磁湿法多用鼓型磁选机上进行除铁,控制磁场强度 2 500 Gs(0.250 T),除铁结果如表 11 所示。

表 11 重选精矿除铁试验

Table 11 Iron removal tests of concentrate by gravity separation %

产品	产率	TiO ₂ 品位	TFe品位
原矿	100	23.12	
铁精矿	8.90	16.45	41.85
除铁尾矿	91.10	23.77	

从表 11 可知,重选精矿经细磨以后在 0.250 T 磁强强度下弱磁选,可获得 TFe 品位为 41.85%,产率为 8.9% 的铁精矿。除铁后浮选原矿的 TiO₂ 品位

略微提高到 23.77%。

2.5 浮选试验

重选精矿经磨矿除铁以后进行浮选试验,浮选条件试验流程如图 2 所示。

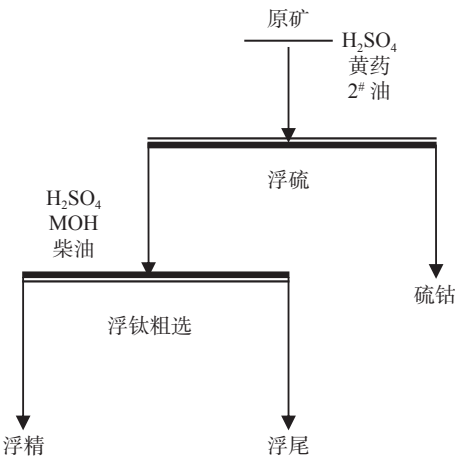


图 2 浮选流程示意
Fig. 2 Flow chart of flotation

2.5.1 浮钛硫酸用量试验

重选精矿经磨矿除铁以后进行选钛粗选试验,固定捕收剂 MOH 用量 1 800 g/t 条件下进行 H₂SO₄ 用量 800、1 000、1 300 g/t 和 1 500 g/t 4 个用量试验,浮选结果如表 12 所示,浮选流程如图 2 所示。

表 12 浮钛粗选硫酸用量条件试验

Table 12 Tests of sulfuric acid dosage for coarse separation of floating titanium

硫酸用量/(g·t ⁻¹)	产品	品位/%	产率/%	回收率/%
800	浮硫精矿	10.75	3.98	1.80
	钛精矿	32.48	67.63	92.41
	尾矿	4.89	28.39	5.84
	原矿	23.77	100	100.00
1 000	浮硫精矿	10.75	3.46	1.56
	钛精矿	36.68	57.88	89.23
	尾矿	5.66	38.66	9.21
	原矿	23.77	100.00	100.00
1 300	浮硫精矿	10.27	4.21	1.82
	钛精矿	39.31	50.52	83.42
	尾矿	7.75	45.27	14.76
	原矿	23.77	100	100.00
1 600	浮硫精矿	11.03	3.27	1.52
	钛精矿	41.64	44.22	77.43
	尾矿	9.53	52.51	21.05
	原矿	23.77	100.00	100.00

从表 12 可知,随着 H_2SO_4 用量的增加,浮钛粗选精矿 TiO_2 品位逐渐升高, TiO_2 回收率逐渐降低,当 H_2SO_4 用量为 1 000 g/t 时,浮选精矿品位为 36.68%,浮选回收率为 89.23%,浮选效果较优,确定浮钛粗选硫酸添加量为 1 000 g/t 进行后续试验。

2.5.2 浮钛捕收剂用量试验

固定硫酸用量为 1 000 g/t 条件下进行捕收剂用量试验,选取 1 200、1 500、1 800 g/t 和 2 000 g/t 4 个条件进行试验,浮选结果如表 13 所示,浮选流程如图 2 所示。

表 13 浮钛粗选捕收剂 MOH 用量条件试验
Table 13 Tests of MOH dosage for coarse separation of floating titanium

捕收剂用量/(g·t ⁻¹)	产品	品位/%	产率/%	回收率/%
1 200	浮硫精矿	11.23	3.78	1.79
	钛精矿	42.36	45.45	81.00
	尾矿	8.28	50.77	17.68
	原矿	23.77	100	100.00
1 500	浮硫精矿	10.81	3.46	1.55
	钛精矿	39.86	51.50	86.36
	尾矿	6.38	45.04	12.09
	原矿	23.77	100	100.00
1 800	浮硫精矿	10.75	3.46	1.56
	钛精矿	36.68	57.88	89.23
	尾矿	5.66	38.66	9.21
	原矿	23.77	100.00	100.00
2000	浮硫精矿	10.70	3.27	1.47
	钛精矿	32.57	67.85	92.97
	尾矿	4.68	28.88	5.56
	原矿	23.77	100	100.00

由表 13 可知,随着捕收剂用量的增加,浮钛粗选的精矿及尾矿 TiO_2 品位逐渐降低,精矿产率和回收率逐渐升高,当捕收剂用量为 1 800 g/t 时,可获得回收率 89.23%, TiO_2 品位为 36.68% 的钛精矿,浮选效果较优,因此确定捕收剂添加量为 1 800 g/t。

2.5.3 一粗两精开路试验

固定浮钛粗选硫酸用量 1 000 g/t,捕收剂用量 1 800 g/t 条件下进行一粗两精浮选试验,结果如表 14 所示,试验流程如图 3 所示。

表 14 一粗两精开路试验

Table 14 Open circuit test of one rough-two fine flotation %

产品	品位	产率	回收率
浮硫精矿	10.6	3.65	1.62
钛精矿	48.17	39.63	79.74
中1	10.32	9.52	4.10
中2	28.13	4.23	4.96
尾矿	5.34	42.97	9.57
原矿	23.94	100	100

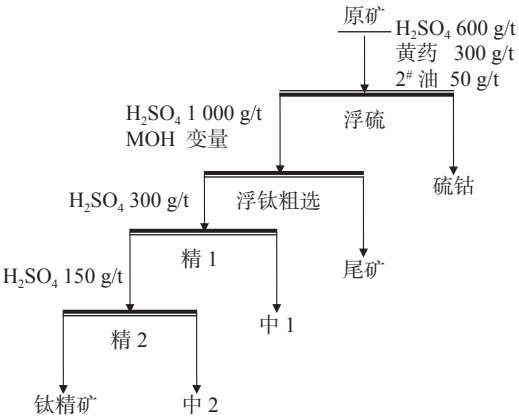


图 3 一粗两精浮选流程示意

Fig. 3 Flow chart of one rough-two fine flotation

从表 14 试验结果可知,当浮钛粗选 MOH 捕收剂用量为 1 800 g/t、硫酸用量为 1 000 g/t,浮钛精一硫酸添加量为 300 g/t,浮钛精二硫酸添加量为 150 g/t 时,可获得 TiO_2 品位为 48.17%,回收率为 79.74% 的钛精矿。

2.6 全流程选矿试验

在开展了大量条件试验的基础上进行了全流程试验,试验流程如图 4 所示,试验结果见表 15。

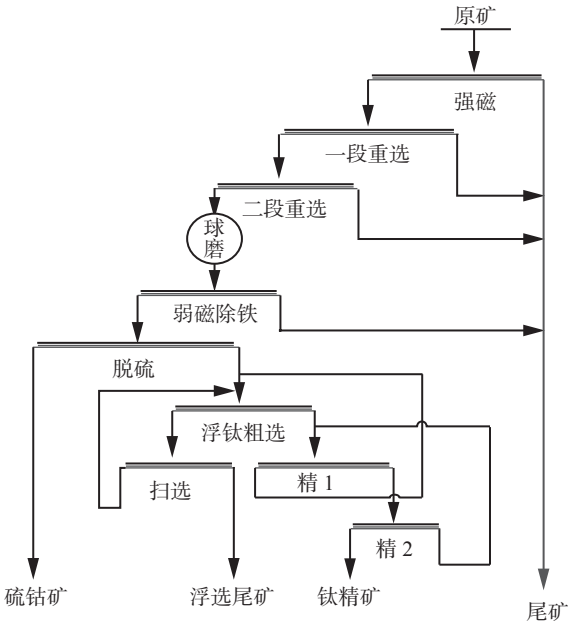


图 4 全流程试验工艺流程
Fig. 4 Flow chart of the whole process

表 15 全流程试验结果
Table 15 Results of the whole process %

产品名称	产率	TiO ₂ 品位	回收率
钛精矿	4.58	48.22	35.19
尾矿	95.42	4.26	64.81
原矿	100.00	6.27	100.00

从表 15 可以看出,原矿经“一段强磁—两段重选—磨矿—除铁—浮选”处理以后,最终可获得精矿 TiO₂ 品位为 48.22%,回收率为 35.19% 的钛精矿。

3 结论

1) 试验原料在磁场强度为 0.60 T,以 3 mm 磁介质作为选别介质,固定转环转速为 2 r/min,脉动冲程为 300 次/min 条件下,经一段强磁选可抛掉 55.01% 的尾矿,获得精矿品位为 10.78%,回收率为 77.98% 的强磁精矿。

2) 强磁精矿经一段摇床重选以后,可抛掉 55.29% 的尾矿,获得品位为 16.34% 重选粗精矿,再经过二段摇床重选,可抛掉 43.35% 的尾矿,获得精矿品位为 23.12% 重选精矿。

3) 重选精矿经磨矿除铁以后进行浮选,在浮选粗选 MOH 捕收剂用量为 1 800 g/t、硫酸用量为 1 000 g/t,浮选精一硫酸添加量为 300 g/t,浮选精二硫酸添加量为 150 g/t 时,获得 TiO₂ 品位为 48.17%,回收率为 79.74% 的钛精矿。

4) 试验原料经一段强磁选—两段重选—磨矿浮选以后,可获得总回收率为 35.19%,TiO₂ 品位为 48.22% 的钛精矿,较好地回收了原料中的主要有用矿物钛铁矿。

参考文献

[1] Deng Guozhu. World titanium resources and their development and utilization[J]. *Progress of Titanium Industry*, 2002, (5): 9–12.
(邓国珠. 世界钛资源及其开发利用[J]. *钛工业进展*, 2002, (5): 9–12.)

[2] USDI, USGS. Critical mineral resources of the United States—economic and environmental geology and prospects for future supply[R]. 2017.

[3] Chong Xiaoxiao, Luan Wenlou, Wang Fengxiang, *et al.* Overview of global titanium resources and titanium consumption trend in China[J]. *Mineral Protection and Utilization*, 2020, 40(2): 162–170.
(崇霄霄, 栾文楼, 王丰翔, 等. 全球钛资源现状概述及我国钛消费趋势[J]. *矿产保护与利用*, 2020, 40(2): 162–170.)

[4] Sun Renbin, Wang Qiushu, Yuan Chunhua, *et al.* Analysis of global titanium resource situation[J]. *China Mining*, 2019, 28(6): 1–6, 12.
(孙仁斌, 王秋舒, 元春华, 等. 全球钛资源形势分析[J]. *中国矿业*, 2019, 28(6): 1–6, 12.)

[5] Deng Chenxiong. Basic research on flotation separation of low-grade ilmenite based on mineral interaction [D]. Shenyang:Northeast University, 2015.
(邓陈雄. 基于矿物交互影响的低品位钛铁矿浮选分离基础研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.)

[6] Xiao Liangchu, Wang Yong. Analysis of separation difficulties of Panzhuhua Baima low grade ilmenite[J]. *Modern mining*, 2016, 32(3): 58–62.
(肖良初, 王勇. 攀枝花白马低品位钛铁矿选别难点分析[J]. *现代矿业*, 2016, 32(3): 58–62.)