

# 某含铬海滨砂矿选矿试验研究<sup>①</sup>

廖乾, 张胜广, 张建文, 马崇振, 梁汉

(长沙矿冶研究院有限责任公司, 湖南长沙 410012)

**摘要:** 对 TiO<sub>2</sub> 品位 3.33%、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 品位 0.36% 的某海滨砂矿进行了选矿试验研究。采用重选-弱磁选-中强磁选预处理和焙烧-干式磁选再处理成套选矿技术, 可获得 TiO<sub>2</sub> 品位 47.72%、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 品位 0.071%、TiO<sub>2</sub> 回收率 64.76% 的钛精矿产品, 实现了提钛降铬、生产合格钛精矿的目标。

**关键词:** 海滨砂矿; 钛铁矿; 铬铁矿; 选矿; 重选; 磁选; 焙烧; 钛精矿

中图分类号: TD92

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.01.010

文章编号: 0253-6099(2025)01-0057-04

## Experimental Research on Beneficiation Technology of Chrome-Bearing Beach Placer

LIAO Qian, ZHANG Shengguang, ZHANG Jianwen, MA Chongzhen, LIANG Han

(Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha 410012, Hunan, China)

**Abstract:** A complete set of mineral processing technology was proposed for beneficiation tests of a beach placer with TiO<sub>2</sub> grade of 3.33% and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content of 0.36%. After a pre-concentration comprised of a gravity separation, a low intensity magnetic separation and a medium intensity magnetic separation, the rough concentrate was processed by roasting followed by dry magnetic separation, producing a titanium concentrate with TiO<sub>2</sub> grade of 47.72%, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> grade of 0.071% and TiO<sub>2</sub> recovery of 64.76%. It is concluded that the goal to prepare qualified titanium concentrate by extracting titanium and reducing chromium can therewith be achieved.

**Key words:** beach placer; ilmenite; chromite; beneficiation; gravity separation; magnetic separation; roasting; titanium concentrate

钛铁矿是生产海绵钛、制备钛白粉的主要原料,也是生产钛铁合金和电焊条不可缺少的原料<sup>[1]</sup>。具有工业应用价值的钛矿床主要有岩浆钛铁矿床及钛砂矿床两大类,海滨砂矿是最具工业应用价值的钛砂矿床<sup>[2-3]</sup>。随着国家“走出去”战略实施,大批中资企业赴海外开展海滨砂矿资源开发利用研究<sup>[4-5]</sup>。本文针对国外某海滨砂矿,开展了钛铁矿回收选矿工艺技术研究,开发了“原矿螺旋溜槽重选-弱磁选-强磁选预处理-钛粗精矿焙烧-干式磁选再处理”的成套选矿工艺技术,获得了理想的选矿技术指标,实现了提钛降铬、生产合格钛精矿的目标。研究成果可为该海滨砂矿规模化开发提供可靠的设计依据和技术支持,在类似海滨砂矿资源开发中起到很好的技术引领作用。

### 1 矿石性质

国外某海滨砂矿原矿主要化学成分及钛化学物相分析结果分别见表1和表2,采用MLA(矿物参数自动分析系统)统计的主要矿物组成见表3。可供选矿回收的主要组分为TiO<sub>2</sub>、Fe、ZrO<sub>2</sub>和Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>可作为综合利用对象。脉石组分主要为SiO<sub>2</sub>,次为Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,有害杂质P和S含量均较低,预计对钛铁矿精矿质量的影响有限。以钛铁矿形式产出的TiO<sub>2</sub>占77.18%,分布于金红石中的TiO<sub>2</sub>为7.81%,赋存在钛磁铁矿和硅酸盐矿物中的TiO<sub>2</sub>分别占8.41%和6.60%。该海滨砂矿主要组成矿物种类较为简单,钛矿物主要为钛铁矿,次为金红石;铁矿物包括钛磁铁矿、赤铁矿和少量褐铁

① 收稿日期: 2024-08-21

基金项目: 中国五矿科技专项计划(2022ZX01)

作者简介: 廖乾(1985—),男,湖北荆州人,硕士,主要从事选冶工艺技术及智能化技术研究工作。E-mail:184542784@qq.com

矿;铬矿物部分为铬铁矿,部分为铬铁尖晶石;锆矿物主要为锆石,偶见斜锆石;脉石矿物主要为石英,次为蒙脱石、辉石、长石等。

表1 原矿主要化学成分分析结果(质量分数)

Table 1 Main chemical composition analysis results of raw ore %

TiO <sub>2</sub>	TFe	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	TREO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
3.33	6.04	2.71	5.62	0.030	0.36	0.21	0.04	79.38	4.47
CaO	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P	S	C	Ig	
0.004 6	0.045	0.77	0.063	0.25	0.020	0.036	0.11	2.17	

表2 钛化学物相分析结果

Table 2 Analysis results of chemical phase of titanium

钛物相	质量分数/%	分布率/%
钛铁矿中 TiO <sub>2</sub>	2.57	77.18
钛磁铁矿中 TiO <sub>2</sub>	0.28	8.41
金红石中 TiO <sub>2</sub>	0.26	7.81
硅酸盐矿物中 TiO <sub>2</sub>	0.22	6.60
合计	3.33	100.00

表3 原矿主要矿物组成(质量分数)

Table 3 Main mineral composition of raw ore %

钛铁矿	金红石	钛磁铁矿	赤铁矿	褐铁矿	铬矿物	锆石	独居石	磷钇矿
4.83	0.21	1.93	2.85	0.08	0.83	0.32	0.02	0.02
石英	长石	辉石	蒙脱石	云母	绿泥石	滑石	尖晶石	其他
70.29	2.37	2.50	12.67	0.24	0.18	0.60	0.01	0.05

钛铁矿除少数呈微细片状微晶作为固熔体析出物分布在部分钛磁铁矿晶粒中,多为磨圆度较好、棱角不甚明显的椭圆形粒状,部分为半自形板柱状,绝大部分呈单体状态产出,粒度一般0.04~0.25 mm。部分钛铁矿已发生不同程度赤铁矿化和金红石化,局部伴有轻微的榴石化。铬矿物分布较为零星,除极个别与脉石毗连镶嵌外,基本为单体粒状,与钛铁矿、钛磁铁矿、赤铁矿直接嵌连者极为少见,次生变化微弱,粒度较钛磁铁矿、钛铁矿略为细小,少数可至0.3 mm左右,一般0.04~0.2 mm。脉石矿物中绝大部分石英、辉石和长石均为单体粒状,预计解离程度对钛精矿质量影响甚微。在绝大部分粒状矿物(钛铁矿、钛磁铁矿、赤铁矿、铬矿物和锆石等)边缘及粒间常见由蒙脱石组成并夹杂高岭石和绿泥石等黏土的矿物集合体呈皮壳状分布,其厚度一般0.02~0.06 mm。

绝大部分目的矿物呈单体状态产出是获得理想选矿技术指标的必要条件。采用MLA对原矿样品中钛铁矿、铁矿物(包括钛磁铁矿、假象赤铁矿和赤铁矿)、

铬矿物和锆石解离度进行了测定,结果见表4。钛铁矿、铁矿物、铬矿物、锆石等呈单体产出的比例均接近或超过95%,其中钛铁矿单体解离度达到95.05%,铬矿物和锆石单体解离度达到98%以上,据此判断,不需要进一步磨矿,直接处理该海滨砂矿原矿,理论上即可获得较高TiO<sub>2</sub>品位的钛铁矿精矿。

表4 主要目的矿物解离度测定结果

Table 4 Determination of liberation degree of main minerals

矿物名称	单体/%	连生体/%			
		>3/4	3/4~1/2	1/2~1/4	<1/4
钛铁矿	95.05	1.75	1.59	1.16	0.45
铁矿物	94.38	2.42	1.86	1.02	0.32
铬矿物	98.28	0.30	0.57	0.75	0.10
锆石	98.58	0.27	0.01	0.83	0.31

分析影响选矿指标的矿物学因素,主要包括:①尽管原矿样品中钛磁铁矿解离程度较高,但由于大部分晶粒内部含有呈类质同象形式存在的TiO<sub>2</sub>或由固熔体分离作用析出形成的微细钛铁矿片晶,预计通过弱磁选工艺分选得到的钛磁铁矿精矿中TiO<sub>2</sub>品位偏高,一定程度上会影响钛精矿的回收率;②采用弱磁选工艺分选钛磁铁矿过程中,钛铁矿、赤铁矿和铬矿物等将与脉石一起进入弱磁选尾矿;③钛铁矿与铬铁矿密度、比磁化系数、导电性等主要物理性质较为接近,预计从弱磁选尾矿中进一步富集钛铁矿时,采用常规重选、磁选、电选等工艺很难实现与铬矿物的有效分离,只能获得一种含有钛铁矿、铬矿物的富钛、富铬混合型中间产品。

## 2 选矿方案

海滨砂矿中有价矿物品位一般较低,在海滨砂矿实际资源化开发实践中,一般对原矿进行重选预富集处理,钛矿物、铁矿物、铬矿物和锆矿物等重矿物进入重选精矿产品中;对重选精矿产品采用磁选进行再处理,铁矿物进入弱磁选精矿中,钛铁矿和铬铁矿进入中强磁选精矿中,获得钛粗精矿产品<sup>[6-7]</sup>。

根据工艺矿物学研究结果,拟采用焙烧工艺对含有钛铁矿和铬铁矿的钛粗精矿进行处理,通过转变矿相,人为扩大钛铁矿和铬铁矿的物化性质差异,钛铁矿氧化生成FeTiO<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的M<sub>2</sub>O<sub>3</sub>型固溶体和金红石微晶,这种矿相重构较大提高了钛铁矿的比磁化系数,有利于钛铁矿与铬铁矿和非磁性硅酸盐矿物的磁选分离,是可工程化的降低钛铁矿精矿中铬含量的有效技

术方法<sup>[8-9]</sup>。该海滨砂矿选矿原则流程图见图 1。

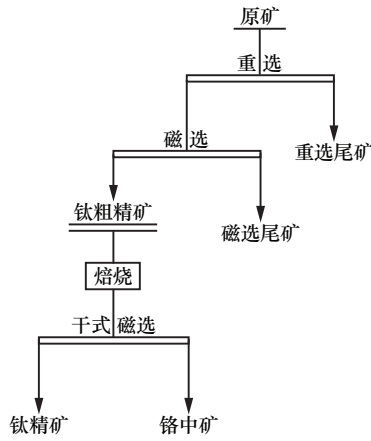


图 1 选矿原则流程

Fig. 1 Principle flowchart of beneficiation

### 3 选矿试验研究

#### 3.1 重选-磁选预处理

根据确定的选矿原则流程,采用重选(螺旋溜槽)对海滨砂矿原矿进行预富集处理,采用弱磁选+中强磁选流程对重选精矿产品进行进一步处理。

确定了螺旋溜槽重选预富集合适的工艺条件为:流程结构为一次粗选一次精选;粗选和精选设备分别为  $\Phi 680$  mm 螺旋溜槽和  $\Phi 1\ 200$  mm 螺旋溜槽;粗选给矿浓度 25%~30%、单台螺旋溜槽处理能力 3~6 t/h。

采用磁选进一步处理重选精矿产品。磁选流程为一次弱磁选、一次中强磁选,采用 CRIMM YCS 918 弱磁选机将强磁性的钛磁铁矿分离出来,再采用 SLON 1500 型脉动高梯度磁选机进一步富集钛铁矿和铬矿物。SLON 1500 型脉动高梯度磁选机适宜的工艺参数为:磁感应强度 0.5~0.6 T、冲次 225 次/min、转速 3.5 r/min、漂洗水量 7.22 m<sup>3</sup>/h。

在确定的重选预富集-磁选预处理合适的工艺和流程结构条件下,进行重选-磁选预处理试验,试验流程见图 2,结果见表 5。

针对该海滨砂矿原矿,搅拌调浆后,经过螺旋溜槽一次粗选、一次精选重选预处理,可获得产率 10.97%、TiO<sub>2</sub> 品位 28.61%、TiO<sub>2</sub> 回收率 90.97% 的重选精矿产品;重选尾矿产率 89.03%,TiO<sub>2</sub> 损失率 9.03%,尾矿中 TiO<sub>2</sub> 主要以金红石、含钛硅酸盐及细粒级钛铁矿形式存在。重选精矿经过一次弱磁选和一次中强磁选预处理,可得到产率 6.58%、TiO<sub>2</sub> 品位 39.15%、TiO<sub>2</sub> 回收率 74.63% 的钛粗精矿产品;弱磁选精矿铁品位 56.59%、

TiO<sub>2</sub> 品位 13.50%,主要为钛磁铁矿,可作为后续铁冶金的原料;磁选尾矿 TiO<sub>2</sub> 品位 10.45%,主要以金红石形式存在,可作为后续进一步采用电选等选矿方法回收其中金红石等含钛矿物以及锆矿物的原料。

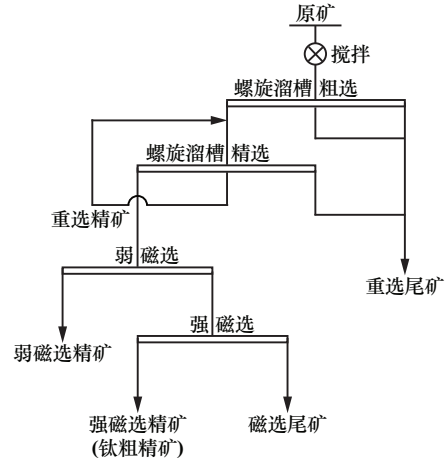


图 2 重选-磁选预处理试验流程

Fig. 2 Flowchart for pretreatment experiment with gravity separation and magnetic separation

表 5 重选-磁选预处理试验结果

Table 5 Experimental results of pretreatment with gravity separation and magnetic separation

产品名称	产率/%	TiO <sub>2</sub> 品位/%	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 品位/%	TiO <sub>2</sub> 回收率/%
重选精矿	10.97	28.61	—	90.97
重选尾矿	89.03	0.35	—	9.03
弱磁选精矿 <sup>1)</sup>	3.46	13.50	—	13.53
强磁选精矿	6.58	39.15	3.78	74.63
磁选尾矿	0.93	10.45	—	2.81
原矿	100.00	3.45	0.38	100.00

1) 弱磁选精矿铁品位 56.59%。

#### 3.2 焙烧-干式磁选再处理

采用 Y2236 回转窑焙烧系统对钛粗精矿产品进行焙烧得到焙烧产品,再采用  $\Phi 400$  mm×1 200 mm 永磁双筒干式磁选机对焙烧产品进行磁选得到钛精矿产品。回转窑焙烧合适的工艺条件为:焙烧温度 600~700 °C、转速 0.5~0.7 r/min、处理量 3.0~4.0 t/h、焙烧时间 20~30 min;干式磁选合适的工艺条件为:磁场强度 0.4 T、转速 50~60 r/min、处理量 3.0~4.0 t/h。在该焙烧和干式磁选工艺条件下进行了钛粗精矿焙烧-干式磁选再处理连续试验研究,试验流程见图 3,试验结果见表 6。连续试验可获得产率 71.58%、TiO<sub>2</sub> 品位 47.72%、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 品位 0.071%、TiO<sub>2</sub> 作业回收率 86.78% 的钛精矿产品。钛精矿产品中 TiO<sub>2</sub> 对原矿回收率达到 64.76%;铬中矿中 TiO<sub>2</sub> 对原矿损失率为 9.87%。

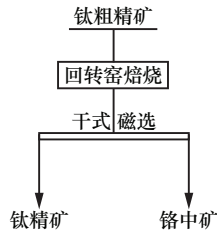


图3 焙烧-干式磁选试验流程

Fig.3 Flowchart for experiment with roasting and dry magnetic separation

表6 焙烧-干式磁选试验结果

Table 6 Experimental results of roasting and dry magnetic separation

产品名称	产率/%	品位/%		作业回收率/%		TiO <sub>2</sub> 对原矿回收率/%
		TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
钛精矿	71.58	47.72	0.071	86.78	1.34	64.76
铬中矿	28.42	18.31	13.17	13.22	98.66	9.87
焙烧矿	100.00	39.36	3.80	100.00	100.00	74.63

## 4 结论

1) 某海滨砂矿中 TiO<sub>2</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 品位分别为 3.33%、0.36%，TiO<sub>2</sub> 在钛铁矿和金红石中的分布率合计为 84.99%。主要脉石组分为 SiO<sub>2</sub>，钛矿物等主要目的矿物解离度均接近或超过 95%，无须进一步磨矿提高解离度。

2) 原矿通过螺旋溜槽一次粗选、一次精选重选预处理，可获得 TiO<sub>2</sub> 品位 28.61%、TiO<sub>2</sub> 回收率 90.97% 的重选精矿产品，抛尾产率达到 89.03%、TiO<sub>2</sub> 损失率为 9.03%。重选精矿经过一次弱磁选和一次中强磁选预处理，可得到 TiO<sub>2</sub> 品位 39.15%、TiO<sub>2</sub> 回收率 74.63% 的钛粗精矿产品，弱磁选精矿中铁品位为 56.59%，主要为钛磁铁矿；重选尾矿和磁选尾矿 TiO<sub>2</sub> 回收率合计为 11.84%，主要以金红石、含钛硅酸盐和细粒级钛铁矿形式存在。钛粗精矿经过焙烧-干式磁选再处理，可获得 TiO<sub>2</sub> 品位 47.72%、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 品位 0.071%、TiO<sub>2</sub> 作业回收率 86.78%、对原矿回收率 64.76% 的钛精矿产品。

3) 本研究开发的“重选-弱磁选-中强磁选预处理、焙烧-干式磁选再处理”成套选矿工艺技术，实现了提钛降铬、生产合格钛精矿的目标，可为该海滨砂矿资源规模化开发利用提供技术依据。

## 参考文献(References):

[1] 董天颂. 钛选矿[M]. 北京:冶金工业出版社, 2009.  
DONG Tiansong. Titanium separation[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.

[2] 安登气,陈志强. ZCLA 选矿机在海滨砂矿中的应用研究[J]. 世界有色金属, 2016,41(8):117-118.  
AN Dengqi, CHEN Zhiqiang. The application research ZCLA separator at the beach sands[J]. World Nonferrous Metals, 2016,41(8):117-118.

[3] 龙运波,张裕书,周满庚,等. 海南万宁海滨砂矿选矿试验研究[J]. 矿产综合利用, 2011(4):14-17.  
LONG Yunbo, ZHANG Yushu, ZHOU Mangeng, et al. Experimental research on mineral processing of beach placer from Wanning in Hainan Province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2011(4):14-17.

[4] 张华,潘炳,李欣,等. 国外某细粒级海滨砂矿多金属综合回收选矿工艺研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):104-108.  
ZHANG Hua, PAN Bing, LI Xin, et al. Comprehensive recovery of multi-metallic resources from overseas fine-grained beach placer by beneficiation process [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(6):104-108.

[5] 彭程,周迎春,李国杰,等. 马拉维湖滨型钛铁矿选矿分离试验研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(4):52-56.  
PENG Cheng, ZHOU Yingchun, LI Guojie, et al. Enrichment of lakeside ilmenite placer at Malawi with beneficiation and metallurgy methods[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(4):52-56.

[6] 廖乾,龚文勇,张建文,等. 某海滨砂矿重选预富集试验研究[J]. 湖南有色金属, 2020(1):15-17.  
LIAO Qian, GONG Wenyong, ZHANG Jianwen, et al. Experimental study on pre-enrichment by gravity separation in a beach placer[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2020(1):15-17.

[7] 廖乾,龚文勇,张华,等. 莫桑比克某海滨砂矿重选-磁选工艺试验研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(6):53-61.  
LIAO Qian, GONG Wenyong, ZHANG Hua, et al. Experimental study on gravity and magnetic separation process for coastal placer in Mozambique[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(6):53-61.

[8] 马崇振,张建文,廖乾,等. 国外某难选钛铁矿选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(5):92-97.  
MA Chongzhen, ZHANG Jianwen, LIAO Qian, et al. Experimental study on beneficiation of a refractory ilmenite ore abroad[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(5):92-97.

[9] 李家林,余永富,陈雯,等. 某含铬钛铁矿强磁粗精矿闪速焙烧试验研究[J]. 金属矿山, 2019(8):83-87.  
LI Jialin, YU Yongfu, CHEN Wen, et al. Flash-magnetic roasting experiments study on high intensity magnetic concentrate which contained chromite[J]. Metal Mine, 2019(8):83-87.

引用本文: 廖乾,张胜广,张建文,等. 某含铬海滨砂矿选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(1):57-60.

LIAO Qian, ZHANG Shengguang, ZHANG Jianwen, et al. Experimental research on beneficiation technology of chrome-bearing beach placer [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):57-60.