

# 还原焙烧—磁选工艺回收马拉维某钛粗精矿中的钛和铁

彭程<sup>1</sup>, 周迎春<sup>1</sup>, 李国杰<sup>1</sup>, 吉榆师<sup>1</sup>, 喻连香<sup>2</sup>, 汤优优<sup>2</sup>

1. 海南国际资源(集团)股份有限公司, 海南 海口 570206;  
2. 广东省资源综合利用研究所, 广东 广州 510650

中图分类号: TD925+.7; TD924 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2022)01-0150-08  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.01.022

**摘要** 由于马拉维钛铁矿资源中铁和钛矿物关系复杂, 用常规的重选、磁选和电选方法难以直接分离, 不能选出合格的钛精矿, 仅能获得低品级的钛粗精矿。本研究用 MLA(矿物定量自动检测系统)和 SEM(扫描电镜)等测试手段对钛粗精矿进行了工艺矿物学研究, 研究结果表明, 该钛粗精矿中钛赤铁矿和赤铁矿合计含量为 16.33%, 钛铁矿含量为 79.49%, 由于钛与铁呈固溶分离或氧化蚀变形成了钛赤铁矿, 导致钛粗精矿中钛、铁难以有效分离, 因此, 采用焙烧工艺将赤铁矿还原成磁铁矿, 利用磁铁矿与钛铁矿的磁性差异特征进行磁选分离, 有效回收利用钛粗精矿中的铁和钛。钛粗精矿经过还原焙烧—磁选工艺处理后获得铁精矿和钛精矿, 铁精矿中 Fe 含量为 56.71%、回收率 13.50%, 钛精矿中的 TiO<sub>2</sub> 含量为 49.10%、产率为 65.57%、回收率为 77.57%。该试验使钛粗精矿中钛铁矿与赤铁矿得到高效分离, 为马拉维钛铁矿资源高效综合利用提供了技术途径。

**关键词** 钛铁矿; 赤铁矿; 磁铁矿; 工艺矿物学; 还原焙烧

马拉维钛铁矿资源丰富, 主要围绕马拉维湖分布, 但马拉维钛铁矿经螺旋溜槽重选—磁选联合流程处理后得到的钛粗精矿中铁和钛含量较低, 难以满足工业要求, 达不到开采价值而未得到有效利用。

本研究针对马拉维钛粗精矿进行了详细的工艺矿物学研究, 在查明矿物组成、产出特征和磁性特征等矿物学特征基础上, 进行了不同焙烧方式、冷却方式和焙砂磁选等条件试验, 最终确定还原焙烧—磁选工艺方案, 获取了合格的钛精矿和铁精矿。

## 1 钛粗精矿物质组成

试样取自马拉维滨湖砂矿通过螺旋溜槽重选—磁选工艺得到的钛粗精矿; 该钛粗精矿化学多元素分析和矿物组成分析结果分别见表 1 和表 2。

表 1 钛粗精矿化学多元素分析结果 /%

**Table 1** Results of chemical multi-element analysis of Ti rough concentrate

TiO <sub>2</sub>	Fe	P	S	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Mn
42.20	38.76	0.03	<0.005	0.20	0.62	0.82	2.29	0.83

表 2 钛粗精矿矿物组成分析结果 /%

**Table 2** Results of mineral phase analysis of Ti rough concentrate

Mineral phase	Content	Content of TiO <sub>2</sub>	Distribution of TiO <sub>2</sub>	Content of Fe	Distribution of Fe
Ilmenite	79.49	48.84	93.49	34.00	72.28
Haploypite	11.09	17.8	4.75	56.04	16.62
Hematite	5.24	1.88	0.24	66.78	9.35
Rutile	0.04	97.13	0.10	1.18	<0.01
Leucoxene	0.75	71.01	1.28	16.34	0.33
Sphene	0.01	36.18	0.01	2.22	<0.01
Pyroxene	0.39	1.17	0.01	21.50	0.22
Hornblende	0.86	3.33	0.07	15.50	0.36
Garnet	1.61	1.14	0.05	19.43	0.84
Other	0.52	-	-	-	-
Total	100	41.53	100.00	37.39	100.00

表 1 和表 2 分析结果表明, 钛粗精矿中有益元素主要为钛和铁, 其他有益元素和杂质含量较低; 铁和钛元素集中在钛铁矿、钛赤铁矿和赤铁矿中。

收稿日期: 2021-01-20

作者简介: 彭程(1988-), 工程师, E-mail: 352496100@qq.com。

通信作者: 喻连香(1968-), 博士, 教授级高级工程师, E-mail: ylxgz@126.com。

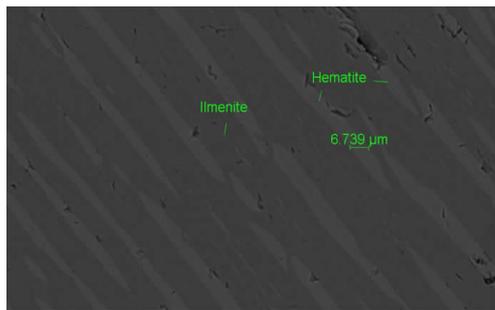


图 1 钛铁矿中的赤铁矿片晶  
Fig. 1 Distribution of hematite in ilmenite

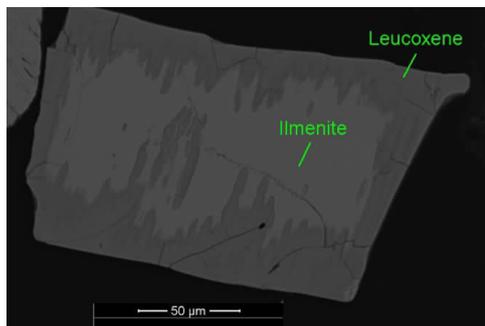


图 2 钛铁矿部分氧化蚀变为白钛石  
Fig. 2 Partial oxidation and alteration of ilmenite become leucoxene

## 2 主要矿物的产出特征

### 2.1 钛铁矿

钛铁矿呈棱角~次棱角状及自形~半自形晶粒结构。大多数以单体颗粒形式存在。部分发生蚀变,蚀变矿石中以钛铁矿赤铁矿化为主,主要是由钛铁固溶分离和氧化蚀变作用导致,形成钛铁矿与赤铁矿(图 1)的贫连生体,赤铁矿在钛铁矿晶体颗粒中呈条带状、板状、片状及粒状嵌布,且赤铁矿含量变化比较大;少部分钛铁矿发生金红石化,主要是钛铁矿表生风化作用过程中铁离子被淋滤后氧化蚀变形成白钛石,白钛石交代在钛铁矿边缘(图 2)。少部分发生金红石化;极少数钛铁矿中含薄板状钽铁矿、微细粒锆石等包裹体。

钛铁矿的能谱分析结果见表 3。

表 3 钛铁矿的能谱分析结果 /%

Table 3 Energy spectrum analysis results of ilmenite							
TiO <sub>2</sub>	FeO	MnO	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
48.84	48.57	1.57	0.02	0.44	0.12	0.36	0.07

结果表明,钛铁矿化学成分稳定,TiO<sub>2</sub> 和 FeO 平均含量分别为 48.84% 和 48.57%,其他成分类质同象现象较少。

### 2.2 (钛)赤铁矿

钛粗精矿中赤铁矿和钛赤铁矿一般呈次圆状,多为正常赤铁矿,少数为钛赤铁矿,由钛和铁固溶分离形成的连晶或片晶,以赤铁矿占主体(图 3)。赤铁矿、钛赤铁矿和钛磁铁矿的能谱分析结果见表 4。

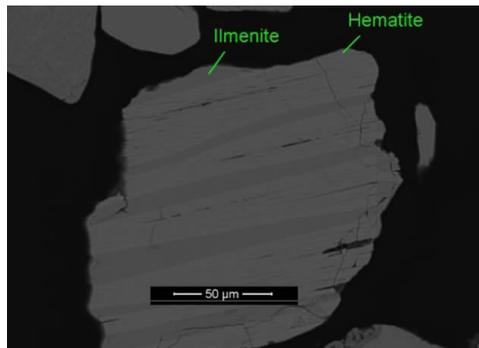


图 3 以赤铁矿占主体钛赤铁矿  
Fig. 3 Hematite accounts for the main ilmenite

表 4 其他主要矿物的能谱分析 /%

Table 4 Energy spectrum analysis of other main minerals									
Constituent	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Hematite	95.41	-	1.88	0.18	-	1.03	1.14	0.35	0.01
Haploypite	80.05	-	17.80	0.18	0.09	0.86	0.47	0.47	0.08
Titano-magnetite	-	77.21	20.13	0.31	0.15	0.71	0.84	0.58	0.06

### 2.3 主要矿物的粒度特征和解离度

钛粗精矿中的钛铁矿和(钛)赤铁矿粒度分析见图 4。

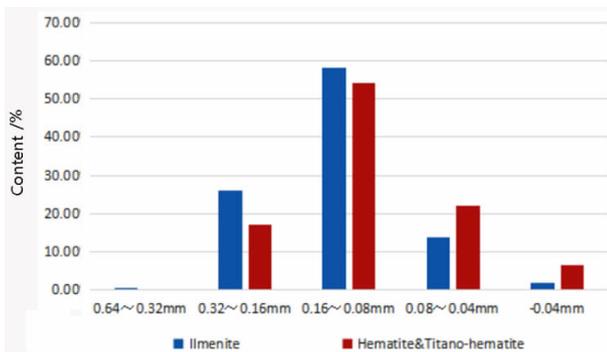


图 4 钛粗精矿的粒度筛析结果  
Fig. 4 Particle size analysis results of Ti rough concentrate

结果表明,钛粗精矿中的钛铁矿和(钛)赤铁矿主要以中细粒为主,属于易选范围;钛铁矿和(钛)赤铁矿 + 0.080 mm 粒级累计产率 84.56%。钛粗精矿的解离度按照大于 0.150 mm 和小于 0.150 mm 两个粒级进行分析,分析结果见表 5。

表 5 主要矿物的解离度测定 /%

Table 5 Determination of liberation degree of main minerals

Size class/mm		+0.150	-0.150	合计
yield		59.54	40.46	100.00
Content	Ilmenite	80.77	77.61	79.49
	Hematite	3.552	7.77	5.24
	Titano-hematite	12.74	8.67	11.09
Liberation degree	Ilmenite	84.32	85.68	84.87
	Hematite	90.40	91.92	91.00
	Titano-hematite	7.25	16.04	10.76

结果表明,粒度对钛铁矿和赤铁矿解离度影响不大,且钛铁矿和赤铁矿解离度高,钛赤铁矿解离度较低。

表 6 钛粗精矿中铁和钛元素在不同场强磁性产物中分布情况 /%

Table 6 Distribution of Fe and Ti element in magnetic products with different field strengths in Ti rough concentrate

Magnetic field intensity/T	yield	TiO <sub>2</sub>	Fe	Main minerals
0.10	1.43	29.80	47.92	Ilmenite, hematite and titano-hematite
0.12	11.89	37.08	41.64	Ilmenite, hematite, titano-hematite
0.23	45.73	43.00	40.18	a few leucoxene, garnet and monazite
0.42	12.06	44.40	36.80	Ilmenite, hematite, titano-hematite
0.48	20.74	37.54	36.04	a few leucoxene, garnet, monazite and gangue
0.52	7.85	35.37	37.38	Gangue
Nonmagnetic minerals	0.31	16.10	11.76	
Total	100.00	40.46	38.89	

### 3 选矿工艺流程的确定

#### 3.1 钛铁矿磁性分析

采用 WCF-3 电磁分选仪分析了钛粗精矿中铁和钛矿物的磁性分布情况,结果见表 6。

结果表明,钛粗精矿中 0.10~0.42 T 场强为赤铁矿、钛赤铁矿和钛铁矿的共存磁性段,随着场强增加, TiO<sub>2</sub> 含量增加, Fe 含量降低; 0.42~0.52 T 场强为脉石等其他矿物磁性段, TiO<sub>2</sub> 和 Fe 含量均降低。

表 7 焙烧方式对比试验结果 /%

Table 7 Comparison tests of roasting methods

Calcination mode	Product	Yield	Content		Rate of recovery	
			TiO <sub>2</sub>	Fe	TiO <sub>2</sub>	Fe
Direct magnetic separation	Iron concentrate	0.02	27.34	51.32	0.01	0.02
	Ilmenite concentrate	99.98	42.63	39.08	99.99	99.98
Oxidation roasting test	Iron concentrate	8.19	37.22	37.51	7.15	7.94
	Ilmenite concentrate	91.81	43.08	38.79	92.85	92.06
Reduction roasting	/Iron concentrate	28.67	29.44	49.35	19.75	35.89
	Ilmenite concentrate	71.33	48.07	35.43	80.25	64.11
Feed of titanium rough concentrate		100.00	42.65	39.10	100.00	100.00

### 3.2 流程

由于赤铁矿与钛铁矿磁性、密度和电性相似,导致钛粗精矿中铁、钛分离困难,主要影响因素有:(1)赤铁矿和钛赤铁矿存在共存磁性段,磁选难以分离钛铁矿和赤铁矿单体;(2)钛铁矿与磁铁矿或赤铁矿共生形成贫连生体;(3)钛铁矿赤铁化和钛赤铁矿单体的影响,钛粗精矿采用一般的选矿方式难以分离钛、铁。

在马拉维含难分离赤铁矿的钛粗精矿工艺矿物学及分离新技术的研究<sup>[1]</sup>试验基础上,采取还原焙烧—磁选工艺将赤铁矿和钛赤铁矿还原成为具强磁性的磁铁矿和钛磁铁矿,利用磁铁矿和钛磁铁矿场强与赤铁矿和钛铁矿场强存在明显差异<sup>[1]</sup>,采用弱磁选将磁铁矿和钛磁铁矿等强磁性、含铁量高的物质单独回收,达到高效分离铁、钛的效果。

## 4 试验结果及讨论

### 4.1 焙烧方式对比试验

为了比较钛粗精矿通过不同的焙烧方式焙烧后磁选回收效果,主要进行了不焙烧、氧化焙烧和还原焙烧对比试验。(1)还原焙烧:矿样 40 g,装入 50 mL 镍坩锅中,加入 5% 还原炭粉混合均匀后,放入 875 °C 马弗炉中保温 15 min 后,水淬脱炭。(2)氧化焙烧:矿样 40 g,装入 50 mL 镍坩锅中,放入 800 °C 马弗炉中保温 30 min 后,水淬。然后分别采用筒式磁选在 0.15 T 磁场强度下进行钛、铁矿物分离。试验结果见表 7。

结果表明,钛粗精矿直接湿式磁选,在 0.15 T 磁场强度下,铁精矿产率仅为 0.02%,说明钛铁混合粗精矿中基本不含强磁性矿物。钛粗精矿通过氧化焙烧和还原焙烧后,矿物磁性均发生了改变:其中氧化焙烧得到的钛精矿 TiO<sub>2</sub> 品位仅 43.08%,提高幅度很小;还原焙烧得到钛精矿 TiO<sub>2</sub> 品位达到 48.07%, TiO<sub>2</sub> 回收率为 80.25%,还原焙烧后的钛、铁矿物分选效果明显优于氧化焙烧效果。因此,以下试验焙烧方式均采用还原焙烧方式,不再采用氧化焙烧或氧化—还原焙烧方式。

### 4.2 冷却方式对比试验

为了考察不同冷却方式对还原效果的影响,采用 40 g 的钛粗精矿在焙烧和磁选条件不变情况下,选择了自然冷却和水淬两种方式进行冷却方式试验,试验结果见表 8。

表 8 还原焙烧的冷却方式对比试验结果 /%

Table 8 Comparison tests of cooling methods for reduction roasting

Cooling mode	Product	Yield	Content	rate of recovery
Slow - air cooling	Iron concentrate	28.74	29.29	19.73
	Ilmenite concentrate	71.26	48.08	80.27
Water quenching	Iron concentrate	28.67	29.44	19.75
	Ilmenite concentrate	71.33	48.07	80.25
Feed of titanium rough concentrate		100.00	42.66	100.00

结果表明:在保持还原气氛下自然冷却,冷却时间较短,与水淬效果相差不大。为了还原焙烧后矿样中矿物性质尽量保持不变,本试验均采用水淬方式进行后续试验。

### 4.3 还原焙烧条件对比试验

在钛粗精矿精选分离试验<sup>[1]</sup>基础上,固定其他试验条件不变,分别调整各还原焙烧的还原剂种类(表 9)、还原剂用量(图 5)、还原温度(图 6)和还原时间(图 7)进行条件对比试验,将矿样从 40 g 扩大至 1.1 kg 后进行扩大试验还原时间(图 8)条件对比试验,水淬后分别用筒式磁选在 0.15 T 磁场强度下进行钛、铁矿物分离。

表 9 还原焙烧的还原剂种类试验结果 /%

Table 9 Type tests of reducing agents

Type of reducing agent	Product	Yield	Content	Rate of recovery
Lignite	Iron concentrate	13.00	29.20	8.88
	Ilmenite concentrate	87.00	44.75	91.12
Anthracite (0.5 ~ 1 mm)	Iron concentrate	18.71	29.90	13.11
	Ilmenite concentrate	81.29	45.62	86.89
Anthracite (<0.5 mm)	Iron concentrate	20.13	30.61	14.41
	Ilmenite concentrate	79.87	45.85	85.59
Carbon powder	Iron concentrate	27.51	27.63	17.80
	Ilmenite concentrate	72.49	48.43	82.20
Feeding of crude titanium concentrate		100.00	42.68	100.00

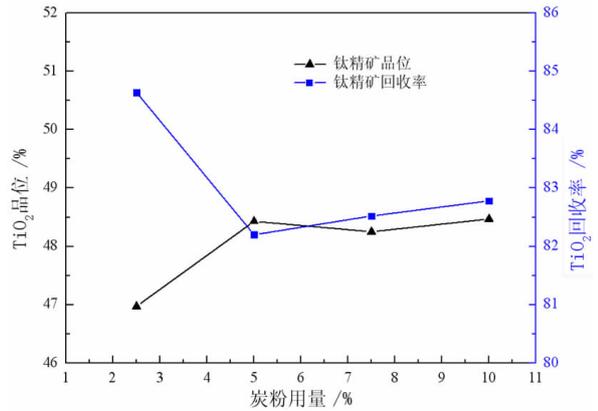


图 5 炭粉用量试验结果

Fig. 5 Tests of the amount of carbon powder

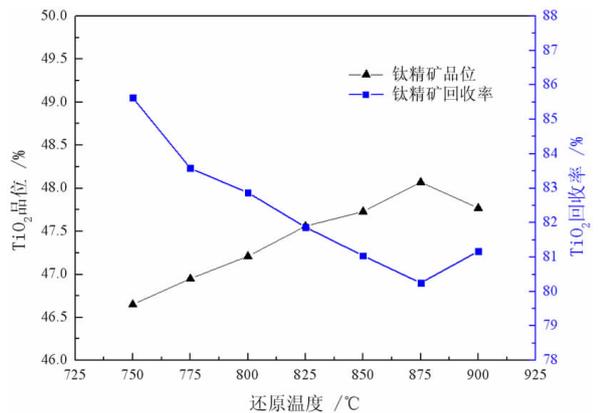


图 6 还原焙烧温度试验结果

Fig. 6 Temperature tests of reduction roasting

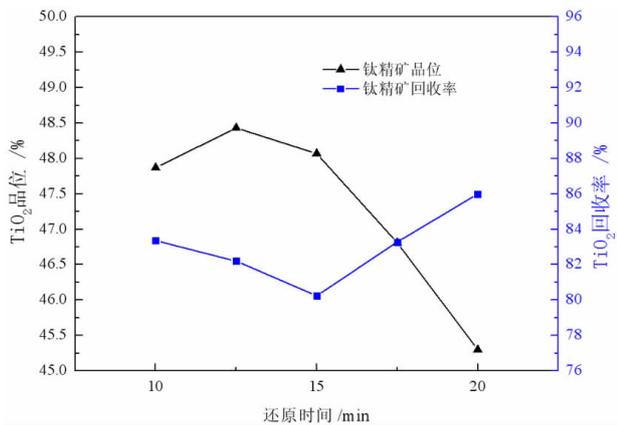


图 7 还原焙烧时间试验结果

Fig. 7 Time tests of reduction roasting

结果表明,钛粗精矿还原焙烧过程中,还原剂种类中炭粉、细粒无烟煤、粗粒无烟煤和褐煤粉的还原效果依次变差,同时随着炭粉用量从 2.5% 增加到 5%,钛精矿品位升高;炭粉用量超过 5% 后,还原效果相差不大。还原温度在 750 °C 到 875 °C 区间,随着还原温度的提高,钛精矿产率随之降低,TiO<sub>2</sub> 含量增高;当温度达

到 900 ℃ 时,钛精矿产率又开始上升、TiO<sub>2</sub> 含量开始降低,钛铁矿过还原现象生成了没有磁性的富氏体 FeO。在还原温度为 875 ℃ 条件下,还原时间从 10 min 到 12.5 min 时,钛精矿产率降低、TiO<sub>2</sub> 品位提升;当还原时间超过 12.5 min 后,出现过还原现象。将矿样从 40 g 扩大到 1.1 kg 后,还原时间从 10 min 到 55 min 时,钛精矿产率降低、TiO<sub>2</sub> 品位提升;当还原时间超过 55 min 后,出现过还原现象。通过单因素条件试验确定了还原焙烧工艺参数:还原剂种类为炭粉,炭粉用量为 5%,还原温度为 875 ℃,还原时间为 12.5 min,扩大试验还原时间为 55 min。

#### 4.4 磁选条件对比试验

##### 4.4.1 干式和湿式磁选对比试验

永磁筒式磁选机分为干式和湿式两种,为了考察两种磁选机对磁选的影响,其他条件不变情况下开展对比试验,结果见表 10。

表 10 干式和湿式弱磁选机对比试验结果 /%

Table 10 Comparison tests of dry and wet weak magnetic separators

Type of magnetic separator	Product	Yield	Content	rate of recovery
Wet drum type weak magnet separator	Iron concentrate	28.67	29.44	19.75
	Ilmenite concentrate	71.33	48.07	80.25
Dry drum type weak magnet separator	Iron concentrate	28.91	29.56	19.99
	Ilmenite concentrate	71.09	48.11	80.01

结果表明,干式和湿式弱磁选机分选本试验物料效果接近,但湿式永磁筒式弱磁选机具有处理能力大、磁选成本低、容易操作维护、生产环保的优点,因此,后续试验采用湿式磁选。

##### 4.4.2 磁选机型对比试验

固定还原焙烧条件,采用顺流和逆流两种不同湿式鼓筒磁选机型对比试验,结果见表 11。

结果表明:逆流式滚筒磁选机和顺流式滚筒磁选

机的磁选的效果差别不大,从能耗和处理量能力角度考虑,试验采用顺流型磁选机进行。

表 11 磁选机机型试验结果 /%

Table 11 Test results of magnetic separator model

Type of magnetic separator	Product	Yield	Content rate of recovery	
Concurrent	Iron concentrate	27.51	27.63	17.80
	Ilmenite concentrate	72.49	48.43	82.20
Counter - Current	Iron concentrate	28.85	27.53	18.60
	Ilmenite concentrate	71.15	48.85	81.40

##### 4.4.3 扫选磁场强度试验

固定还原焙烧条件进行钛粗精矿焙烧后水淬,采用湿式筒式磁选通过一次粗选(0.15 T)和一次扫选磁选,采用不同扫选磁场强度对比试验,结果见表 12。

表 12 扫选磁场强度试验结果 /%

Table 12 Test results of scanning magnetic field strength

Magnetic field intensity/T	Product	Yield	Content	Rate of recovery
0.20	Iron concentrate	27.45	27.74	17.84
	Secondary titanium concentrate	0.53	39.17	0.49
	Ilmenite Concentrate	72.02	48.40	81.67
0.30	Iron concentrate	27.53	27.67	17.83
	Secondary titanium concentrate	1.75	39.62	1.62
	Ilmenite Concentrate	70.72	48.67	80.55
0.45	Iron concentrate	27.51	27.63	17.80
	Secondary titanium concentrate	5.31	40.55	5.04
	Ilmenite Concentrate	67.18	49.05	77.16

结果表明,0.15 T 场强条件下磁选所获得的非磁产品中含少量钛铁矿或钛赤铁矿连生体,其磁性主要分布于 0.3 ~ 0.45 T 磁场强度之间,扫选磁场强度为 0.45 T 时,可获得 TiO<sub>2</sub> 含量 49% 以上钛精矿,因此,本次试验选择扫选磁场强度为 0.45 T。

#### 4.5 铁粗精矿磨矿细度试验

MLA 及显微镜检测结果表明,铁精矿中主要矿物为磁铁矿和钛磁铁矿,其中钛磁铁矿大多以包裹或连生微细粒的形式存在,导致铁精矿中 Fe 含量较低。对还原焙烧一两次磁选工艺中弱磁铁粗精矿和中磁铁精矿合并,对合并铁粗精矿进行磨矿—弱磁选—中磁选试验,试验结果见表 13。

表 13 合并铁粗精矿磨矿细度试验结果 /%

Table 13 Grinding fineness test results of combined iron coarse concentrates

Grinding fineness	Product	Yield	Content		rate of recovery	
			TiO <sub>2</sub>	Fe	TiO <sub>2</sub>	Fe
-0.075 mm 90%	Iron concentrate	64.54	25.10	54.52	52.13	70.81
	Secondary iron concentrate	8.73	38.65	43.33	10.86	7.61
	Secondary titanium concentrate	26.73	43.04	40.14	37.01	21.58
-0.045 mm 90%	Iron concentrate	42.16	21.73	56.73	29.86	48.23
	Secondary iron concentrate	25.14	27.65	51.45	20.65	23.76
	Secondary titanium concentrate	32.70	43.12	39.45	49.49	28.01
Feed of titanium rough concentrate		100.00	30.84	49.58	100.00	100.00

结果表明,铁粗精矿通过再磨磁选,铁精矿品位可提高 7.27 百分点,次钛精矿回收率为 23.76%。

### 4.6 全流程扩大试验

在钛粗精矿试料扩大试验中,还原温度 875 °C,炭粉用量 5%,进行了还原时间试验(图 8),最终确定扩大试验还原时间为 55 min。还原焙烧后磁选流程为一次粗选(0.15 T)和一次扫选(0.45 T),试验流程见图 9,试验结果见表 14。

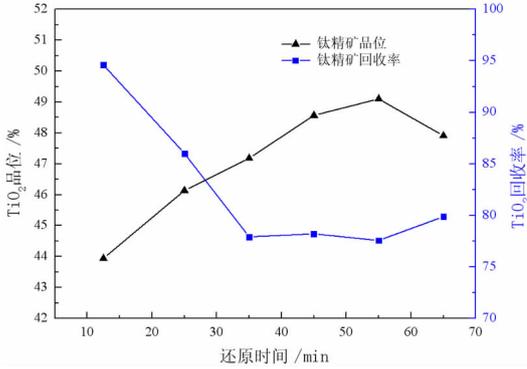


图 8 扩大试验中还原时间对钛精矿的影响  
Fig. 8 The impact of the kilogram scale expansion test on the titanium concentrate

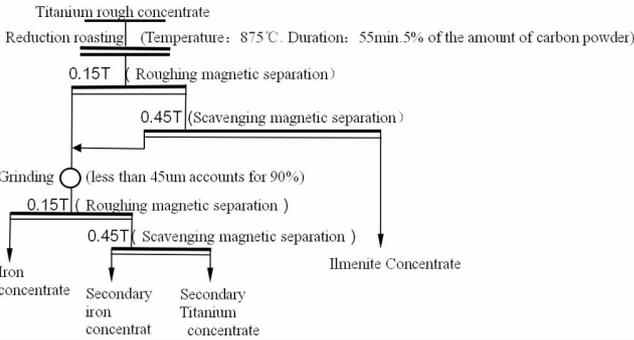


图 9 全流程试验  
Fig. 9 Flowsheet of the whole process

表 14 全流程试验结果 /%

Product	Yield	Content		Rate of recovery	
		TiO <sub>2</sub>	Fe	TiO <sub>2</sub>	Fe
Iron concentrate	13.50	21.40	56.71	6.75	19.16
Secondary iron concentrate	8.05	27.16	51.08	5.11	10.29
Secondary titanium concentrate	10.88	41.51	39.16	10.57	10.67
Ilmenite Concentrate	67.57	49.10	35.40	77.57	59.88
Feeding of crude titanium concentrate	100.00	42.77	39.95	100.00	100.00
Combined iron concentrate	21.55	23.55	54.61	11.86	29.45
Combined titanium concentrate	78.45	48.05	35.92	88.14	70.55

### 4.7 产品分析

#### 4.7.1 钛精矿产品分析

钛精矿产品的化学分析结果见表 15,镜下矿物观察见图 10,矿物物相分析结果见表 16。

表 15 钛精矿的化学分析 /%

Constituent	TiO <sub>2</sub>	P	CaO	MgO	S	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO
Content	49.10	0.022	0.27	0.76	<0.005	5.37	1.56

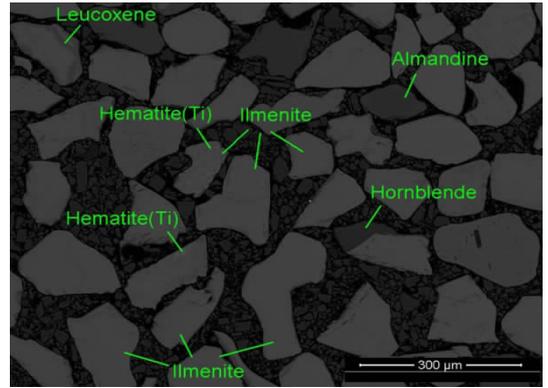


图 10 扫描电镜下的钛精矿  
Fig. 10 The scanning electron microscope of Titanium concentrate

表 16 钛精矿矿物组成分析结果 /%

Minerals	Content	Minerals	Content	Minerals	Content
Ilmenite	92.869	Titano-hematite	0.628	Garnet	2.213
Leucoxene	1.365	Hematite	0.006	Hornblende	1.444
Pyroxene	0.835	Limonite	0.007	Zircon	0.101

钛精矿的化学分析结果表明,钛精矿各杂质含量均满足人造金红石、钛铁合金和高钛渣五级品标准要求,满足钛白用二级品标准二类产品要求。物相分析结果结合显微镜观察表明,钛精矿主要是磁性脉石矿物影响钛精矿品位提高,钛精矿产品中钛铁矿含量高达 92.869%,赤铁矿和钛赤铁矿含量低至 0.634%,少数富铁钛铁矿白钛石化,脉石可见石榴石,还可见角闪石与钛铁矿连生。

## 4.7.2 铁精矿产品分析

铁精矿产品的化学分析结果见表 17。

表 17 铁精矿的化学分析 /%

Table 17 Chemical analysis of iron concentrate

Constituent	TFe	SiO <sub>2</sub>	S	P	Cu	Pb	Zn	Sn	As
Content	56.71	0.54	0.006	0.019	0.005	<0.001	0.03	0.05	<0.005

结果表明,铁精矿各成分含量均满足烧结用铁矿粉一级品标准要求。由显微镜下分析可知,铁精矿中主要含部分钛磁铁矿而影响铁精矿品位。

## 5 结论

(1) 钛粗精矿主要含铁和钛两种有用元素,主要矿物是钛铁矿、钛赤铁矿和赤铁矿,其含量分别为 79.49%、11.09% 和 5.24%,解离度分别为 84.87%、91.00% 和 10.76%,脉石矿物主要为石榴石、角闪石、辉石和石英等。

(2) 钛铁矿中钛、铁固熔分离和氧化还原蚀变导致钛铁矿赤铁矿化,部分形成钛赤铁矿。钛铁矿赤铁矿化中的赤铁矿片晶定向分布,钛赤铁矿中以赤铁矿占主体,为钛铁矿与赤铁矿固熔体分离形成的连晶或片晶,也可见微细粒钛铁矿呈定向排列。钛铁矿、赤铁矿和钛赤铁矿通过常规的磁选、电选和重选等选矿方法均难以有效分离。

(3) 根据铁钛矿物以上矿物性质特点,试验针对 TiO<sub>2</sub> 含量 42% 左右的钛粗精矿进行了详细的条件试验,优化出了较佳还原条件和磁选条件,采用还原焙烧—磁选工艺流程选别,使钛粗精矿中钛铁矿与钛赤铁矿和赤铁矿有效分离。试验结果:钛精矿中 TiO<sub>2</sub> 含量 49.10%,回收率为 77.57%。铁粗精矿(焙砂经弱磁粗选和中磁扫选得到的产品合并)再磨至 -0.045 mm 占 90% 时,磁选可得到铁精矿,其 Fe 含量 56.71%、回收率 19.16%。

## 参考文献:

- [1] 喻连香,周吉奎,刘军,等. 马拉维含难分离赤铁矿的钛锆粗精矿工艺矿物学及分离新技术的研究[J]. 矿产保护与利用, 2019(12): 171-178.  
YU L X, ZHOU J K, LIU J, et al. Study on process mineralogy and separation technology of titanium-zirconium rough concentrate with refractory hematite in Malawi [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resource. 2019 (12): 171-178.
- [2] 王利珍,刘洋,曹佳宏,等. 某钛铁矿石的工艺矿物学特征[J]. 金属矿山, 2016(5): 91-93.  
WANG L Z, LIU Y, CAO J H, et al. Mineralogical characteristics features of an ilmenite ore [J]. Metal Mine, 2016(5): 91-93.
- [3] 刘星,李成秀,刘飞燕,等. 甘肃大滩某低品位钛铁矿石选矿试验[J]. 金属矿山, 2014(12): 75-78.  
LIU X, LI C X, LIU F Y, et al. Beneficiation technology for a low-grade ilmenite ore in Datan of Gansu Province [J]. Metal Mine, 2014 (12): 75-78.
- [4] 吴雪红. 攀西某超细粒级钛铁矿选矿试验[J]. 金属矿山, 2015(7): 56-59.  
WU X H. Beneficiation experiments on a ultra fine grained ilmenite in western Panzhihua [J]. Metal Mine, 2015(7): 56-59.
- [5] 余永富. 国内外铁矿选矿技术进展及对炼铁的影响[J]. 矿冶工程, 2004(5): 25-29.  
YU Y F. Advance in iron ore dressing technology at home and abroad and their influence on iron-smelting [J]. The Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 2004(5): 25-29.
- [6] 杨佳,李奎,汤爱涛,等. 钛铁矿资源综合利用现状与发展[J]. 材料导报, 2003(8): 44-46.  
YANG J, LI K, TANG A T, et al. Comprehensive utilization of ilmenite: resources present status and future prospects [J]. Materials Review, 2003(8): 44-46.
- [7] 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(6): 131-135.  
YANG Y H, HUI B, YAN W P, et al. Research on process mineralogy of fine ilmenite in Panxi Area [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6): 131-135.
- [8] 刘建国,张军,于丽丽,等. 陕西某难选原生钛铁矿选矿工艺研究[A]. 矿产综合利用, 2014(6): 24-27.  
LIU J G, ZHANG J, YU L L, et al. Technological research on beneficiation for a refractory primary ilmenite in Shaanxi [A]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2014(6): 24-27.
- [9] 董天颂. 钛选矿[M]. 北京:冶金工业出版社, 2009.  
DONG T S. Titanium beneficiation [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.

# Recovery of Titanium and Iron from Titanium Rough Concentrate in Malawi by Reduction Roasting – Magnetic Separation Process

PENG Cheng<sup>1</sup>, ZHOU Yingchun<sup>1</sup>, LI Guojie<sup>1</sup>, JI Yushi<sup>1</sup>, YU Lianxiang<sup>2</sup>, TANG Youyou<sup>2</sup>

1. Hainan International Resources Group Co., Ltd, Haikou 570206, Hainan, China;

2. Guangdong Institute of Resources Utilization, Guangzhou 510650, Guangdong, China

**Abstract:** Due to the complexity of iron and titanium minerals in Malawian, only low grade titanium concentrate can be obtained by conventional gravity separation, magnetic separation and electric separation. Through MLA (automatic quantitative analysis system of mineral parameters) and SEM (scanning electron microscope), the process mineralogy of titanium rough concentrate was studied. The results showed that the content of Ti – hematite and hematite in Ti rough concentrate was 16.33%, ilmenite content was 79.49%. It is difficult to effectively separate titanium and iron in titanium rough concentrate due to hematite formed by oxidation and alteration. Therefore hematite is reduced to magnetite by roasting and then magnetic separation is carried out in virtue of magnetic difference between magnetite and ilmenite. Iron and titanium in titanium rough concentrate can be effectively recovered and utilized. Iron concentrate and titanium concentrate were obtained by reduction roasting and magnetic separation process. At the same time, secondary iron concentrate and secondary titanium concentrate were comprehensively recycled. Fe content in iron concentrate was 56.71%, recovery rate was 13.50%.  $TiO_2$  content in titanium concentrate was 49.10%, yield was 65.57%. Fe content in secondary iron concentrate was 51.08%, recovery rate was 10.29%.  $TiO_2$  content in secondary titanium concentrate was 41.51%, yield was 10.57%. The tests solved the technical problem of separating ilmenite from hematite in titanium rough concentrate, and provided a technical way for comprehensive and effective recovery and utilization of Malawian ilmenite.

**Keywords:** ilmenite; hematite; magnetite; process mineralogy; reduction roasting

引用格式:彭程,周迎春,李国杰,吉榆师,喻连香,汤优优. 还原焙烧—磁选工艺回收马拉维某钛粗精矿中的钛和铁[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(1): 150 – 157.

PENG Cheng, ZHOU Yingchun, LI Guojie, JI Yushi, YU Lianxiang, TANG Youyou. Recovery of titanium and iron from titanium rough concentrate in Malawi by reduction roasting – magnetic separation process[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2022, 42(1): 150 – 157.

投稿网址: <http://kebh.cbpt.cnki.net>

E – mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)