

## 国外某难选冶钒钛铁矿石工艺矿物学特征

洪秋阳, 李美荣, 李波, 梁冬云, 刘超, 张海亮

(广东省科学院资源综合利用研究所, 稀有金属分离与综合利用国家重点实验室, 广东省矿产资源开发和综合利用重点实验室, 广东 广州 510650)

**摘要:** 对某钒钛铁矿石进行工艺矿物学研究, 分析影响矿石开发利用的矿物学因素。研究表明, 矿石中的有价元素为钒、钛、铁, 杂质元素主要是铝和硅; 主要铁、钛矿物分别为磁铁矿-假象赤铁矿-(钛)赤铁矿、褐铁矿和和钛铁矿。铁、钛矿物与脉石连生关系不紧密, 且密度、磁性差异较大, 易与脉石矿物分离, 但是铁、钛矿物之间具有复杂的连生界面, 磁性变化大, 磁性范围重叠, 采用常规磁选工艺难以实现铁、钛的有效分离。采用磁化焙烧-磁选工艺, 从磁铁矿-假象赤铁矿-(钛)赤铁矿中回收铁和钒, 理论品位为 Fe 64.23% 和  $V_2O_5$  1.29%, 理论回收率分别为 60.29% 和 72.54%; 从钛铁矿中回收钛, 理论品位为  $TiO_2$  52.70%, 理论回收率为 65% 左右。

**关键词:** 钒; 废催化剂; 选钒尾矿; 含钒废水; 研究现状; 展望

doi: 10.3969/j.issn.1000-6532.2020.06.009

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2020) 06-0048-08

钒钛磁铁矿是一种以铁、钒、钛为主, 伴生铬、钴、镍、铜、钨等多种有价元素的多元共生铁矿, 主要分布于俄罗斯、南非、中国、美国、加拿大、澳大利亚和新西兰等国家<sup>[1]</sup>。钒钛磁铁矿的开发利用, 首先是矿石的分离富集。利用矿石中不同矿物的物理化学等性质差异, 通过矿物加工技术富集成为各类精矿, 如钒钛磁铁矿精矿、钛铁矿精矿等<sup>[2]</sup>。目前国内外对钒钛磁铁矿资源的冶炼工艺可分为高炉法和非高炉法。高炉法实现了钒钛磁铁矿规模化利用, 但是该工艺只利用了其中的铁和钒, 钛进入炉渣形成高钛型炉渣<sup>[3]</sup>。非高炉法处理低钛型钒钛磁铁矿, 主要利用其中的钒、铁资源, 未对工艺过程产生的低钛型炉渣中的铁资源进行处理利用; 非高炉工艺处理高钛型钒钛磁铁矿, 可同时利用其中的铁、钒和钛资源, 具有很好的发展前景<sup>[4]</sup>。钛铁矿精矿则进一步冶炼

生产海绵钛、钛白粉等产品<sup>[5]</sup>。本文针对国外某难选冶钒钛铁矿石进行工艺矿物学研究, 在考察矿物组成、有用矿物的嵌布状态及有价元素在矿石中赋存状态的基础上, 分析影响该钒钛铁矿石选矿回收有价元素的矿物学因素, 为该钒钛铁矿石的开发利用提供参考。

## 1 试验

### 1.1 试验样品

试验样品为来自澳大利亚某钒钛铁矿床, 呈褐色粉末, 由砂砾和泥质粉末组成, 粒度多小于 2 mm。样品经过混匀、缩分后制备选冶试验综合样和化学分析样品。

### 1.2 试验仪器

Empyrean 瑞影系列 2 X 射线衍射仪 (XRD), Leica DMRXP 偏光显微镜, FEI MLA650 矿物自

收稿日期: 2020-08-20

基金项目: 广东省科学院建设国内一流研究机构行动专项资金项目 (2020GDASYL-20200302009); 广东省科技计划项目 (2017B030314046)

作者简介: 洪秋阳 (1987-), 男, 工程师, 硕士, 矿物加工工程专业, 主要从事工艺矿物学研究。

动分析系统 (MLA)。

### 1.3 矿物定量方法

MLA 矿物自动分析系统包括 QUANTA 650 扫描电镜和 BRUKER XFlash5010 X 射线能谱仪及 MLA 软件。MLA 软件包括测量、图像处理、矿物编辑和数据输出四部分。MLA 矿物定量检测原理是：依靠扫描电镜逐帧获取样品的背散射电子图像，再以获取的背散射图像为基础，借助 X 射线能谱仪对不同灰度区域收集能谱数据，利用灰度值的差异和能谱成分区分不同的矿物相及其边

界，实现快速鉴定矿物种类<sup>[6-9]</sup>。通过统计大量的样品颗粒，从而获取每种矿物的面积百分含量及质量百分含量等信息。可见，MLA 测定的是每一种矿物相的含量。对于具有复合相的铁矿物的含量，采用显微镜线测法统计定量<sup>[9]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 化学组成

试验样品的多元素化学分析结果见表 1。

表 1 矿石多元素化学分析结果 /%

Table 1 Aanalysis results of chemical composition of the ore

Fe	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Mn	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	S	P	FeO	烧失量
43.82	0.69	13.38	8.25	9.61	0.18	0.024	0.22	0.030	0.50	0.030	<0.01	3.97	5.79

结果表明，矿石中的有价元素为钒、钛、铁，品位均较高。影响铁矿原料的杂质元素主要是铝和硅，硫、磷含量较低。

### 2.2 矿物种类及含量

原矿 XRD 结果见图 1。解谱表明样品中的主要矿物为赤铁矿、钛铁矿、针铁矿和高岭石。采用 MLA 结合显微镜线测法对矿石的矿物组成进行定量检测，结果见表 2。

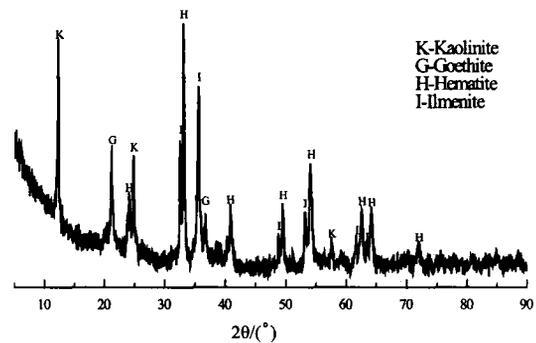


图 1 原矿 XRD

Fig. 1 XRD spectrum of the ore

表 2 矿石的矿物种类及含量 /%

Table 2 Mineralogical types and contents of the ore

磁铁矿	假象赤铁矿	赤铁矿	钛赤铁矿	褐铁矿	钛铁矿	白钛石	金红石	粘土矿物	石英	其他	合计
0.13	10.36	18.51	11.86	22.95	15.82	0.22	0.01	19.26	0.22	0.66	100.00

矿石中的铁矿物主要是磁铁矿、假象赤铁矿<sup>[11]</sup>、赤铁矿、钛赤铁矿以及褐铁矿；钛矿物主要是钛铁矿，微量白钛石和金红石；脉石矿物主要是粘土类矿物，包括大量的高岭石，少量至微量的伊利石、蛇纹石、蒙脱石、叶腊石等。

一般而言，钒钛磁铁矿床中钛铁矿常呈多种形式存在，包括粒状、晶架状、结状、微片状、板状等，能够分选出独立工业精矿的主要是粒状钛铁矿<sup>[12]</sup>。研究表明，矿石中的钛铁矿主要呈粒

状、板状和微片状，包含于铁矿物中或与铁矿物连生。微片状钛铁矿包含于赤铁矿中，在磨矿过程中难以解离，将此类赤铁矿-钛铁矿片晶（小于 5 μm）复合相称为钛赤铁矿<sup>[13]</sup>（图 2）；其他粒状、板状等在细磨下可能分选出独立工业精矿的钛铁矿纳入表中的钛铁矿相。矿石中部分钛铁矿局部或全部发生蚀变，相比于正常钛铁矿，蚀变后的钛铁矿钛含量升高，铁含量降低，显微镜下反射色带灰蓝色调（图 3）。

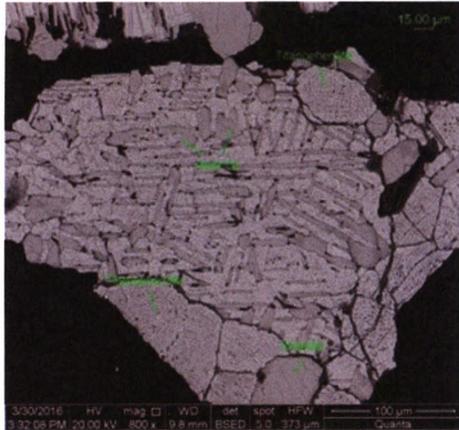


图 2 SEM, BSE 图像, 矿石中的钛赤铁矿和呈粒状、板状、微片状的钛铁矿  
Fig. 2 SEM, BSE image, the titanohematite and the ilmenite occurring as granular, platy or, lamellar

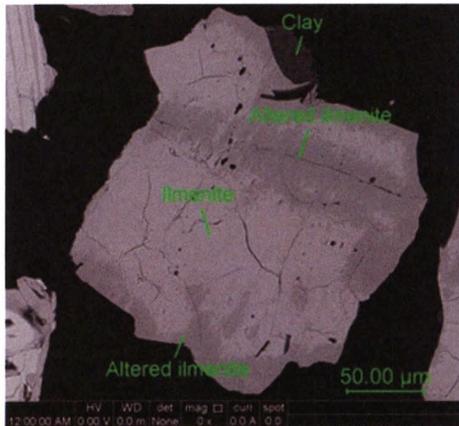


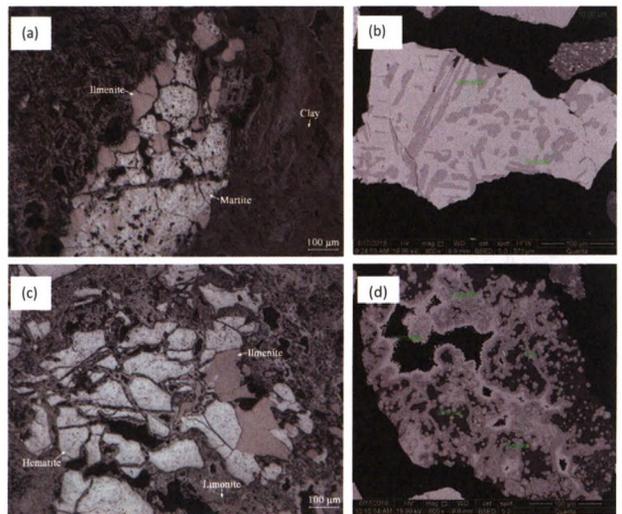
图 3 SEM, BSE 图像, 矿石中的钛铁矿部分蚀变  
Fig. 3 SEM, BSE image, the partly altered ilmenite

### 2.3 主要矿物的物理化学性质及嵌布状态

#### 2.3.1 铁矿物

由于氧化蚀变程度深, 矿石中的磁铁矿基本都已蚀变为假象赤铁矿或赤铁矿。研究发现磁铁矿、假象赤铁矿、赤铁矿以及钛赤铁矿的磁性由强到弱呈连续变化, 富集在磁场场强 30 ~ 650 mT 下的磁性产品中; 而褐铁矿富集于磁场场强为 500 ~ 900 mT 下的磁性产品中。能谱检测结果表明磁铁矿-假象赤铁矿-(钛)赤铁矿中普遍含钒, 且含少量铬、锰、硅、铝等; 褐铁矿的成分较复杂, 除含数量不等的硅、铝之外, 普遍含钒及铬、锰等, 部分褐铁矿含铜、锌、硫。根据矿物的磁性、比重等物理性质,

采用物理选矿方法难以将磁铁矿、假象赤铁矿、赤铁矿和钛赤铁矿分别单独分选, 因此将这几种铁矿物合并为磁铁矿-假象赤铁矿-(钛)赤铁矿, 富集在一起作为一个单矿物提纯, 褐铁矿单独富集提纯。单矿物分析结果为: 磁铁矿-假象赤铁矿-(钛)赤铁矿含  $V_2O_5$  1.29%、 $TiO_2$  5.90%、Fe 64.23%; 褐铁矿含  $V_2O_5$  0.54%、 $TiO_2$  6.00%、Fe 45.11%。矿石中的铁矿物与钛矿物嵌布关系十分密切, 常见磁铁矿-假象赤铁矿-(钛)赤铁矿呈不规则粒状与钛铁矿连生, 其次与褐铁矿连生, 铁、钛矿物连生界面普遍弯曲不平整(图 4(a)(b))。褐铁矿一般呈胶态状、疏松多孔状, 除了交代赤铁矿之外, 更多与粘土密切共生, 常包含大量粘土, 或呈微细粒浸染状包含于粘土中(图 4(c)、(d))。



(a) 显微镜, 反光, 假象赤铁矿与钛铁矿连生; (b) 扫描电镜, 背散射电子图像, 赤铁矿包含板状、粒状钛铁矿; (c) 显微镜, 反光, 褐铁矿呈疏松多孔状, 包含粒状赤铁矿和钛铁矿; (d) 扫描电镜, 背散射电子图像, 褐铁矿呈微细粒状浸染分布于粘土中。

图 4 铁矿物在矿石中的嵌布状态

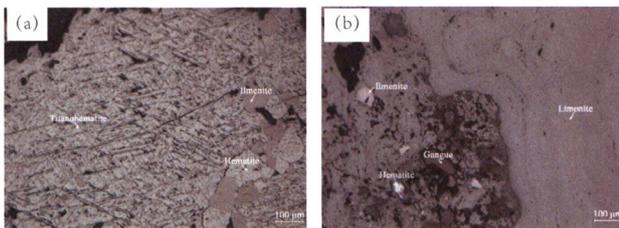
Fig. 4 Occurrence of iron minerals in the ore

#### 2.3.2 钛矿物

矿石中的钛矿物包括钛铁矿、白钛石和金红石, 可分选出独立工业精矿的钛矿物只有钛铁矿。能谱检测结果(随机检测 21 个点)表明, 钛铁矿含  $Ti_3$  0.96%、Fe 35.42%、Mn 0.86%、Mg 0.74%。发生蚀变的钛铁矿化学成分能谱检测结果见表 3。

表3 发生蚀变的钛铁矿化学成分能谱检测结果/%  
Table 3 Chemical composition of altered ilmenite determined by EDS

测点	Ti	Mn	Fe	Mg	Ni	Cu	Zn	Al	Si	O
1	33.62	0.61	32.98	0.18	0.00	0.00	0.00	0.07	0.12	32.42
2	33.67	0.62	30.25	1.92	0.01	0.13	0.00	0.20	0.18	33.02
3	33.84	0.96	32.25	0.24	0.00	0.00	0.00	0.12	0.09	32.50
4	33.99	1.14	30.75	1.14	0.00	0.00	0.00	0.10	0.08	32.80
5	34.12	1.29	31.53	0.24	0.00	0.18	0.00	0.03	0.09	32.52
6	34.26	0.84	31.80	0.22	0.00	0.00	0.00	0.08	0.16	32.64
7	34.31	0.92	31.33	0.36	0.00	0.00	0.00	0.21	0.12	32.75
8	34.38	0.87	29.77	1.77	0.00	0.00	0.00	0.03	0.11	33.07
9	34.50	1.22	30.89	0.32	0.00	0.00	0.00	0.12	0.18	32.77
10	34.59	0.89	30.00	1.11	0.01	0.17	0.18	0.01	0.12	32.92
11	34.61	0.74	29.12	1.89	0.02	0.05	0.05	0.19	0.09	33.24
12	34.68	0.87	28.95	1.74	0.00	0.00	0.00	0.34	0.12	33.30
13	34.99	1.03	29.34	1.11	0.00	0.00	0.00	0.24	0.12	33.17
14	35.36	0.26	31.01	0.11	0.00	0.00	0.00	0.07	0.21	32.98
15	37.04	0.27	27.92	0.63	0.00	0.00	0.00	0.26	0.19	33.69
16	37.53	0.16	28.04	0.22	0.00	0.00	0.00	0.24	0.14	33.67
17	37.72	0.85	26.75	0.39	0.00	0.00	0.00	0.28	0.18	33.83
18	38.64	0.06	26.95	0.02	0.00	0.00	0.00	0.19	0.19	33.95
平均	35.10	0.76	29.98	0.76	0.00	0.03	0.01	0.15	0.14	33.07



(a) 显微镜, 反光, 钛铁矿呈不规则粒状与钛赤铁矿连生; (b) 显微镜, 反光, 钛铁矿呈不规则粒状包含于褐铁矿中。

图5 钛矿物在矿石中的嵌布状态  
Fig.5 Occurrence of ilmenite in the ore

相比于正常的钛铁矿, 蚀变的钛铁矿中的钛含量增加, 铁含量降低。蚀变的钛铁矿的磁性弱于正常钛铁矿, 两者主要富集于磁场场强为 250 ~ 650 mT 下的磁性产品中。矿石中钛、铁矿物密切连生, 常见钛铁矿与假象赤铁矿、(钛)赤铁矿连生, 部分钛铁矿呈细粒包含于褐铁矿中, 少量钛铁矿嵌布于粘土中 (图 5)。

#### 2.4 主要矿物的粒度特征

矿石中具有经济价值的铁、钛矿物分别为磁铁矿 - 假象赤铁矿 - (钛)赤铁矿和钛铁矿, 显微镜下测定它们的粒度分布, 结果见图 6。

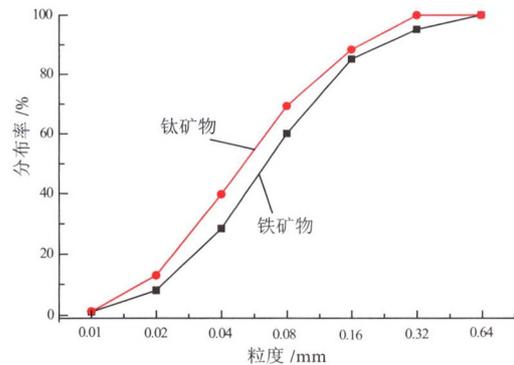


图6 原矿中铁、钛矿物的粒度累积分布  
Fig.6 Grain cumulative distribution of iron and titanium minerals

结果表明，铁、钛矿物的主要粒度范围均为 0.01 ~ 0.32 mm，相比之下钛矿物的粒度略粗，铁、钛矿物的解离度及其连生关系见表 4 和表 5。钛矿物的粒度基本处于选矿可选范围。

表 4 不同磨矿细度下铁矿物的解离度测定结果\*  
Table 4 Liberation degree of iron minerals at different grinding fineness\*

磨矿细度	粒级 /mm	产率 /%	品位 Fe/%	磁铁矿 - 假象赤铁矿 - (钛) 赤铁矿解离度 /%	与钛铁矿连生 /%	与褐铁矿连生 /%	与脉石连生 /%
-0.075mm 85.80%	+0.1	4.53	48.34	43.73	49.35	3.05	3.87
	-0.1+0.075	9.67	49.89	56.63	38.45	2.47	2.45
	-0.075+0.038	22.97	49.07	78.05	19.63	1.03	1.29
	-0.038+0.01	43.43	47.03	93.42	6.15	0.43	0.00
	-0.01	19.41	28.45	100.00	0.00	0.00	0.00
	合计	100.00	44.23	83.85	14.48	0.88	0.79
-0.075mm 95.93%	+0.075	4.07	47.42	60.42	31.82	3.85	3.91
	-0.075+0.038	21.22	46.87	79.39	17.43	1.42	1.76
	-0.038+0.01	50.17	47.76	94.89	3.86	0.69	0.56
	-0.01	24.55	30.42	100.00	0.00	0.00	0.00
	合计	100.00	43.30	90.67	7.56	0.88	0.89

\* 由于铁、钛矿物嵌布关系复杂，测量过程将磁铁矿 - 假象赤铁矿 - (钛) 赤铁矿面积含量大于 95% 的颗粒视为单体。

表 5 不同磨矿细度下钛矿物的解离度测定结果\*  
Table 5 Liberation degree of titanium minerals at different grinding fineness\*

磨矿细度	粒级 /mm	产率 /%	品位 TiO <sub>2</sub> /%	钛铁矿解离度 %	与钛铁矿	与褐铁矿	与脉石
-0.075mm 85.80%	+0.1	4.53	12.90	56.47	33.08	4.34	6.11
	-0.1+0.075	9.67	13.83	77.29	17.17	2.74	2.80
	-0.075+0.038	22.97	15.27	85.35	9.26	2.24	3.16
	-0.038+0.01	43.43	14.83	95.58	3.96	0.46	0.00
	-0.01	19.41	7.40	100.00	0.00	0.00	0.00
	合计	100.00	13.31	89.80	7.53	1.28	1.38
-0.075mm 95.93%	+0.075	4.07	13.73	78.03	13.87	2.79	5.31
	-0.075+0.038	21.22	14.64	89.08	7.03	2.23	1.66
	-0.038+0.01	50.17	14.95	96.20	2.26	1.54	0.00
	-0.01	24.55	8.00	100.00	0.00	0.00	0.00
	合计	100.00	13.13	94.31	3.54	1.53	0.62

\* 由于铁、钛矿物嵌布关系复杂，测量过程将钛矿物面积含量大于 95% 的颗粒视为单体。

结果表明，磁铁矿 - 假象赤铁矿 - (钛) 赤铁矿的解离性较差，主要是与钛铁矿连生；钛铁矿的解离性比铁矿物稍好，主要是与赤铁矿连生。当磨矿细度为 -0.075 mm 85.80% 时，铁、钛矿物的解离度分别为 83.85% 和 89.80%；当磨矿细度为 -0.075 mm 95.93% 时，铁、钛矿物的解离度分

别为 90.67% 和 94.31%。

### 2.5 有价元素的赋存状态

根据原矿矿物定量结果以及各矿物中铁、钛、钒的含量，对各有价元素的分布进行平衡计算，表 6 结果表明，有价元素钒主要赋存于铁矿物中，磁铁矿 - 假象赤铁矿 - (钛) 赤铁矿中的钒

占原矿总钒的72.54%。褐铁矿中的钒占原矿总钒的17.06%。若从磁铁矿-假象赤铁矿-(钛)赤铁矿中回收铁和钒,理论品位为Fe 64.23%和V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1.29%,理论回收率分别为60.29%和72.54%;从钛铁矿中回收钛,理论品位为52.70%,理论回收率为65%左右。

表6 各有价元素在矿石中的平衡分布  
Table 6 Distribution of the valuable elements

矿物	矿物含量 /%	有价元素含量 /%			占有率 /%		
		V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe
磁铁矿-假象赤铁矿-(钛)赤铁矿	40.86	1.29	5.90	64.23	72.56	18.77	60.34
褐铁矿	22.95	0.54	6.00	45.11	17.06	10.72	23.80
钛铁矿	15.82	0.19	52.70	34.22	4.14	64.90	12.45
白钛石*	0.22	0.24	74.11	16.88	0.07	1.27	0.09
金红石*	0.01	0.00	100.00	0.00	0.00	0.08	0.00
脉石矿物	19.48	0.23	2.81	7.44	6.17	4.26	3.33
其他	0.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
合计	100.00	0.73	12.85	43.50	100.00	100.00	100.00

注: \*1. 由于白钛石含量较低难以分离提取单矿物, 故白钛石的各有价元素含量采用能谱检测结果; 2. 金红石的钛含量为理论值; 3. 单矿物在-0.038 mm 粒度下提纯。

## 2.6 影响矿石选冶的矿物学因素分析

矿石中的有价元素包括铁、钛和钒, 综合利用价值较高。根据各元素在矿石中的赋存状态研究结果, 钒主要赋存于铁矿物中, 因此对本矿石的回收利用关键在于回收其中的铁和钛。由于矿石的矿物组成相对较简单, 主要是铁矿物(包括磁铁矿、假象赤铁矿、(钛)赤铁矿和褐铁矿)、钛矿物(钛铁矿)和脉石矿物(以高岭石为主), 结合铁、钛矿物的解离度分析, 矿石中的铁、钛矿物与脉石连生关系不紧密, 且密度差、磁性差较大, 可采用磁选或重选将铁钛矿物与脉石矿物分离, 获得铁钛混合精矿。选矿探索试验采用磁选工艺, 对给矿品位 Fe 43.18%、V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.68%、TiO<sub>2</sub> 13.17%, 获得高品位铁精矿品位 Fe 60.28%、V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.99%、TiO<sub>2</sub> 10.08%, 回收率分别为

8.15%、8.56%、4.47%以及铁钛混合精矿品位 Fe 49.48%、V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.77%、TiO<sub>2</sub> 15.60%, 回收率分别为78.37%、77.94%、81.03%。从铁矿石冶炼的角度来看, 高TiO<sub>2</sub>含量会造成矿石的低还原度、液相渣温度的变化、渣精炼能力降低、炉渣粘度偏离较佳参数等问题<sup>[14]</sup>。对于攀西式钒钛磁铁矿一般要求TiO<sub>2</sub>小于13%。试验获得的高品位铁精矿钛含量符合要求, 但是回收率低, 整体经济效益差。

工艺矿物学研究表明, 矿石中铁矿物与钛矿物之间具有复杂的连生界面, 铁、钛矿物之间元素互含, 磁性变化大, 磁性范围重叠(磁铁矿-假象赤铁矿-(钛)赤铁矿富集于磁场场强30~650 mT下的磁性产品中; 钛铁矿富集于磁场场强250~650 mT下的磁性产品中; 褐铁矿富集于磁场场强500~900 mT下的磁性产品中。)采用常规磁选工艺难以实现铁、钛矿物的有效分离。磁化焙烧-磁选是指将铁矿石在一定温度和气氛条件下焙烧, 使矿石中弱磁性铁矿物转变为强磁性铁矿物, 再利用铁矿物与其他矿物之间的磁性差异进行磁选获得铁精矿, 是一种从复杂难选铁矿石中回收铁矿物行之有效的方法<sup>[14]</sup>。对原矿开展磁选预富集-粗精矿磁化焙烧-焙砂磁选全流程试验, 获得了TFe 59.22%、V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1.00%、TiO<sub>2</sub> 8.38%的含钒铁精矿, 回收率分别为74.14%、77.30%、33.68%, 同时, 获得TFe 30.45%、V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.23%、TiO<sub>2</sub> 50.32%的钛精矿(高品位钛铁矿), 回收率分别为5.64%、2.72%、31.13%。

褐铁矿也是矿石的主要组成矿物之一, 在磁化焙烧过程中也可转化为磁性铁, 但硅、铝含量高的褐铁矿磁性较弱, 焙烧后的磁性与钛铁矿相近而易进入钛精矿, 影响钛精矿品位。为了确保钛精矿品位TiO<sub>2</sub>大于45%, 必须在还原焙烧之前脱除褐铁矿。由于褐铁矿铁含量低且硅、铝杂质含量高, 进入铁精矿将导致铁精矿品质下降; 作为单独的产品在现有技术条件下也难以进行烧结

利用。因此尽管矿石中 17% 的钒赋存于褐铁矿中，但是这部分钒只能随着褐铁矿进入尾矿。

### 3 结 论

(1) 矿石中的有价元素为钒、钛、铁，品位均较高。影响铁矿原料的杂质元素主要是铝和硅，硫、磷含量较低。矿石中有价矿物为磁铁矿 - 假象赤铁矿 - (钛) 赤铁矿和和钛铁矿。

(2) 磁铁矿 - 假象赤铁矿 - (钛) 赤铁矿单矿物含  $V_2O_5$  1.29%、 $TiO_2$  5.90%、Fe 64.23%，钛铁矿单矿物含  $V_2O_5$  0.19%、 $TiO_2$  52.70%、Fe 34.22%。采用还原磁化焙烧 - 磁选工艺从磁铁矿 - 假象赤铁矿 - (钛) 赤铁矿中回收铁和钒，理论品位为 Fe 64.23% 和  $V_2O_5$  1.29%，理论回收率分别为 60.29% 和 72.54%；从钛铁矿中回收钛，理论品位为  $TiO_2$  52.70%，理论回收率为 65% 左右。

(3) 矿石中的铁、钛矿物与脉石连生关系不紧密，且密度差、磁性差较大，可采用磁选或重选将铁、钛矿物与脉石矿物分离，获得铁钛混合精矿。但是铁矿物与钛矿物之间具有复杂的连生界面，铁与钛矿物之间元素互含，磁性变化大，磁性范围重叠，采用常规磁选工艺难以实现铁、钛的有效分离，建议采用磁化焙烧 - 磁选工艺回收其中的有价元素。

### 参考文献：

- [1] 郭宇峰. 钒钛磁铁矿固态还原强化及综合利用研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- Guo Y F. Study on solid reduction strengthening and comprehensive utilization of vanadium-titanium magnetite [D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [2] 吕超. 攀枝花钒钛磁铁矿精矿制备中钛渣的技术和理论研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- Lv Ch. Technical and theoretical Study of titanium slag in the preparation of Panzhihua vanadium-titanium magnetite concentrate [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [3] 张明博. 低钛高炉渣资源化利用研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- Zhang M B. Research on resource utilization of low-titanium furnace slag [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.
- [4] 张以敏. 高铬型钒钛磁铁矿还原钠化熔分耦合新技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- Zhang Y M. Research on the new technology of reductive sodium melt coupling of high chromium vanadium-titanium magnetite [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [5] 廖鑫. 钛铁矿氧化球团制备及其冶炼钛渣工艺研究 [M]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- Liao X. Study on the preparation of titanite oxide pellet and its smelting process of titanium slag [M]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [6] Jordens A, Marion C, Grammatikopoulos T, Waters K.E. Understanding the effect of mineralogy on muscovite flotation using QEMSCAN. [J] International Journal of Mineral Processing, 2016 (155): 6-12.
- [7] Rolf F, Ying G, Debra B, Kurt M. Modern SEM-based mineral liberation analysis. [J] International Journal of Mineral Processing, 2007 (84): 310-320.
- [8] Ying G. Automated scanning electron microscope based mineral liberation analysis. [J] Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2003 (2): 33-41.
- [9] 于宏东, 齐涛, 王丽娜, 等. 临沂低品位钛矿的矿物组成及铁钛元素的分布状态 [J]. 过程工程学报, 2015, 15 (5): 813-818.
- Yu H D, Qi T, Wang L N, et al. Mineral composition and distribution of iron and titanium elements in low-grade titanium deposits in linyi [J]. Journal of process engineering, 2015, 15 (5): 813-818.
- [10] 梁冬云, 李波. 稀有金属矿工艺矿物学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015. 18-20.
- Liang D Y, Li B. Rare metal ore process mineralogy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015. 18-20.
- [11] Paul Duuring, Steffen G. Hagemann, Carsten Laukamp, Laura Chiarelli. Supergene modification of magnetite and hematite shear zones in banded iron-formation at Mt Richardson, Yilgarn Craton, Western Australia. [J] Ore Geology Review, 2019 (111): 1-16.
- [12] 洪秉信, 傅文章, 刘飞燕. 钛铁矿固溶体分解结构和磁性研究 [J]. 矿产综合利用, 2010(6): 22-24.
- Hong B X, Fu W Zh, Liu F Y. Studies on the decomposition

structure and magnetic properties of ilmenite solid Solution [J].  
Comprehensive Utilization of Mineral Resources,2010(6): 22-24.  
[13] 罗小军. 攀枝花钒钛磁铁矿矿床韵律层特征及其研究意义 [D]. 成都: 成都理工大学, 2003.  
Luo X J. Prosodic layer characteristics and research significance of Panzhihua vanadium-titanium magnetite Deposit [D].  
Chengdu: Chengdu University of Technology, 2003.  
[14] 王振阳. 海砂矿钛铁资源分级利用研究 [D]. 北京: 北

京科技大学, 2017.  
Wang Zh Y. Hierarchical Utilization of Titanium and iron resources in Haisha Mine [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.  
[15] 韩跃新, 孙永升, 李艳军, 等. 我国铁矿选矿技术最新进展 [J]. 金属矿山, 2015(2): 1-11.  
Han Y X, Sun Y Sh, Li Y J, et al. Recent Progress of Iron ore dressing technology in China [J]. Metal Mines, 2015(2): 1-11.

## Process Mineralogical Characteristics of a Foreign Refractory Vanadium-titanium Iron Ore

Hong Qiuyang, Li Meirong, Li Bo, Liang Dongyun, Liu Chao, Zhang Hailiang

(Guangdong Institute of Resources Comprehensive Utilization, Guangdong Academy of Sciences State Key Laboratory of Rare Metals Separation and Comprehensive Utilization, Guangdong Provincial Key Laboratory of Development and Comprehensive Utilization of Mineral Resources, Guangzhou, Guangdong, China)

**Abstract:** Based on the process mineralogy of a vanadium-titanium iron ore, the mineralogical factors affecting the development and utilization of the ore were analyzed. The results show that the valuable elements of the ore are vanadium, titanium and iron, all of which are high grade, and the impurity elements are aluminum and silicon. The main iron and titanium minerals are magnetite-martite-titanohematite, limonite and ilmenite. The iron and titanium minerals are not closely related to gangue, and the density and magnetism are quite different, so they are easy to be separated from gangue. Because of the complicated associated interface between iron and titanium minerals, the variable magnetism and the overlapping magnetism ranges, it is difficult to effectively separate iron minerals from titanium minerals by using conventional magnetic separation processes. By magnetization roasting-magnetic separation process, the theoretical grade of iron and vanadium is Fe 64.23% and  $V_2O_5$  1.29% with the theoretical recovery being 60.29% and 72.54% respectively if they are recovered from magnetite-martite-titanohematite, and the theoretical grade of titanium is  $TiO_2$  52.70% with the theoretical recovery being about 65% if the titanium is recovered from ilmenite.

**Keywords:** Vanadium-titanium-iron ore; Martite; Titanohematite; Ilmenite; Magnetization roasting-magnetic separation process

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告