

## 云南某钛铁矿的工艺矿物学研究

陆显志<sup>1</sup>, 路沛瑶<sup>1</sup>, 陈英杰<sup>1</sup>, 丁湛<sup>1</sup>, 余攀<sup>1</sup>, 柏少军<sup>1,2</sup>(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;  
2. 复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093)

**摘要:** 对云南某钛铁矿进行了工艺矿物学研究。结果表明: 矿石中钛品位为 5.62%, 主要有用金属矿物为钛铁矿和钒钛磁铁矿, 分别占总钛的 61.39% 和 11.03%。脉石矿物主要是斜长石和钛辉石, 脉石矿物中主要成分为  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 其含量分别为 42.35% 和 12.53%。矿样中粗粒钛铁矿多与钒钛磁铁矿和榍石及硅酸盐紧密共生, 其集合体的粒度主要集中在 0.02~0.30 mm。赋存于榍石与硅酸盐矿物中的钛多达 27.58%。探索性实验结果表明: 弱磁-强磁选可以有效地回收矿石中的强磁性矿物, 并抛出大量的脉石矿物, 实现钛铁矿的富集。因此, 该矿石属于低品位难选钛铁矿, 实现钛铁矿物的有效回收对该资源的开发利用具有重要的实践意义。

**关键词:** 钛铁矿; 钒钛磁铁矿; 钛辉石; 嵌布粒度; 工艺矿物学

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.02.036

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 02-0206-05

钛及钛合金具有很多优良性能(如高强度、抗腐蚀、耐高温等)而广泛用于航空航天、海洋开发、化工、医疗等多领域<sup>[1]</sup>。近年来, 钛制品工业的发展日益扩大, 充分回收利用钛资源显得更加紧迫<sup>[2-3]</sup>。中国是钛铁矿石储量和钛的生产大国, 并位于世界前列。我国钛矿床的矿石工业类型比较齐全, 分为原生矿和次生矿, 原生钒钛磁铁矿为我国的主要工业类型, 主要分布在四川攀枝花和承德等地区<sup>[4-6]</sup>。钛铁矿占我国钛资源总储量的 98%, 其储量达  $7.07 \times 10^7 \text{ t}$  (以  $\text{TiO}_2$  计), 主要分布于海南、河北和云南, 矿点多, 分布分散; 我国金红石的储量约占世界总储量的 20%, 但品位低, 产量很小, 不易开采。

云南的钛资源比较丰富, 有钛铁矿砂矿、钒

钛磁铁矿和钛磁铁矿。其中以钛铁矿砂矿为主, 集中分布于弥勒、大理、腾冲、景洪等地区。本文以云南某钛铁矿砂矿为研究对象, 原矿  $\text{TiO}_2$  品位为 5.65%, 主要有用矿物钛铁矿的嵌布粒度不均, 且分布比较分散, 钛主要赋存于钛铁矿砂矿中, 也有部分赋存于钒钛磁铁矿中, 其他钛被脉石矿物包裹着, 赋存在脉石矿中的钛高达 27.58%, 属低品位难选矿石<sup>[7]</sup>。

## 1 矿石性质

## 1.1 原矿的主要化学成分

矿石主要化学成分分析结果见表 1, 钛的物相见表 2。

表 1 矿石主要化学成分分析结果/%

Table 1 Main chemical analysis results of the run-of-mine ore

$\text{TiO}_2$	Fe	$\text{V}_2\text{O}_5$	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	$\text{Na}_2\text{O}$	S	P
5.62	17.35	0.09	42.35	12.53	3.2	1.35	0.32	0.02

收稿日期: 2020-04-24

基金项目: 云南省万人计划项目(微细粒级钛铁矿铜组元诱导改性强化浮选机理研究)

作者简介: 陆显志(1997-), 男, 本科生。

通信作者: 柏少军(1983-), 男, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为浮选理论与资源综合利用, E-mail: baishaojun830829@126.com。

表 2 钛物相分析结果  
Table 2 Analysis results of Ti-distribution among mineralogical phase

钛物相	钛铁矿中钛	钒钛磁铁矿中的钛	榍石中钛	硅酸盐中钛	总钛
含量/%	3.45	0.62	0.42	1.13	5.62
分布率/%	61.39	11.03	7.47	20.11	100.00

由表 1、2 可以看出，矿石中 TiO<sub>2</sub> 的赋存较为分散，以钛铁矿和钒钛磁铁矿形式存在的钛占总钛的 72.42%，这即为选矿富集钛矿物 (TiO<sub>2</sub>) 的理论回收率；11.03% 的钛赋存于钛磁铁矿中，以钛磁铁矿形式进入铁精矿中，而在后续高炉渣中，这部分钛的回收比较困难。另外，占总钛 27.58% 的钛以含钛硅酸盐-榍石形式存在，这部分钛在选矿中将随脉石一起排入尾矿中。

### 1.2 矿石的矿物组成分析

表 3 给出了原矿石的矿物组成结果。从表 3 可以看出，矿石中 有用矿物为钛铁矿、磁铁矿，含量分别为 9.55% 和 1.32%，其次是少量的黄铁矿。主要脉石矿物为斜长石和钛辉石，其中钛辉石的含量达到 34.85%。由于钛辉石与钛铁矿具有类似的矿物表面性质，实现两者的有效分离对提升钛铁矿精矿的品质将十分关键。

表 3 矿石的矿物组成  
Table 3 Mineral composition analysis results of the ore

矿物	钛铁矿	榍石	磁铁矿	角闪石	钛辉石	黑云母
含量/%	9.55	1.45	1.32	2.15	34.85	微量
矿物	斜长石	方解石	黄铁矿	黄铜矿	石英	萤石
含量/%	43.53	1.2	0.78	微量	1.56	1.35

## 2 矿石中主要矿物的嵌布特征及赋存状态

### 2.1 金属矿物

原矿主要金属氧化物矿物有钛铁矿、磁铁矿及钒钛磁铁矿；主要金属硫化物矿物为黄铁矿，次为黄铜矿。

#### 2.1.1 钛铁矿

钛铁矿是矿石中主要的含钛矿物，多与斜长石、辉石构成集合体。分子式为 FeTiO<sub>3</sub>，黑色，不透明。在镜下观察，钛铁矿呈板片状，他形粒状及其集合体沿硅酸盐矿物的颗粒间隙或孔隙充填呈星散状嵌布，构成浸染状构造，尚可见熔蚀穿切硅酸盐矿物的现象 (见图 1)，显示钛铁矿形成时间晚于硅酸盐矿物。

矿样中钛铁矿主要有以下几种嵌布形式：其一，粗粒钛铁矿与黄铁矿紧密共生，辉石多分布在钛铁矿与黄铁矿形成的集合体边缘，粒度一般为 0.02~0.30 mm；其二是呈固溶体分离结构的微细粒钛铁矿多被辉石、斜长石、榍石包裹，其粒度一般在 0.074 mm，这部分钛铁矿的单体解离困难，往往会损失在尾矿中。另外，根据矿样粒度统计结果 (见表 4) 可知，钛铁矿、含钛辉石与榍石主要以集合体形式存在。粗粒钛铁矿的粒度主要

集中在 0.02~0.30 mm，磨细工序则不利于矿样中钛铁矿的回收。因此，应尽量在粗粒状态下回收钛铁矿。

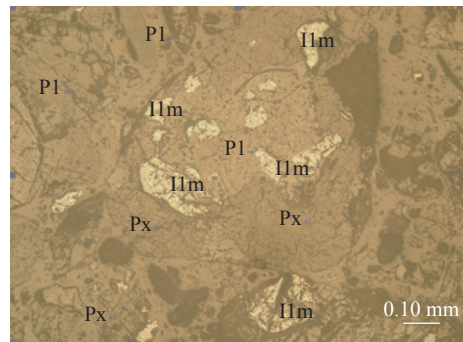


图 1 钛铁矿 (Ilm) 呈粒状、板状沿斜长石 (pl)、辉石 (px) 等矿物颗粒间隙间分布

Fig.1 Ilmenite distributed in granular and plate shape along the interstices of plagioclase and pyroxene.

#### 2.1.2 黄铁矿

矿样中黄铁矿 (FeS<sub>2</sub>) 呈浅黄色，具有高硬度，反射率高，均质性。黄铁矿呈半自形—他形微粒状，多以不规则细脉状产出，粒度在 0.01~0.30 mm。黄铁矿与辉石、钛铁矿、磁铁矿紧密共生 (见图 2)。由此可知，原矿中钛铁矿和磁铁矿的富集过程中，黄铁矿将易进入铁精矿和钛精矿中而影响精矿的品质。

表 4 矿石中矿物成分和嵌布粒度分析  
Table 4 Mineral composition and dissemination size of the ore

矿物名称	分子式	矿物粒度/mm
钛铁矿	$FeTiO_3$	0.02~0.30
斜长石	$NaAlSi_3O_8$	0.02~0.15
含钛辉石	$Ca(Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Ti, Al)[Si, Al]_2O_6$	0.02~0.30
黄铁矿	$FeS_2$	0.01~0.30
角闪石	$Ca_2Na(Mg, Fe)_4(Al, Fe^{3+})[(Si, Al)_4O_{11}]_2(OH)_2$	<0.006

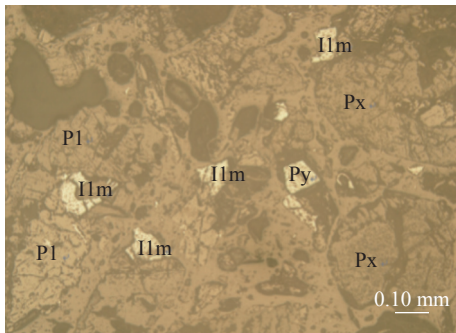


图 2 黄铁矿 (Py) 呈残余状分布于黑色孔洞中  
Fig.2 Pyrite distributed in blackporesin forms of residuals.

### 2.1.3 磁铁矿

磁铁矿 ( $Fe_3O_4$ ) 是矿样中的有用矿物之一, 约占原矿矿物组分的 0.78%, 呈灰色深灰色, 反光镜下微带棕色, 呈半自形他形粒状; 多数磁铁矿矿物为独立矿物, 部分磁铁矿以集合体形式与钛铁矿共生, 或局部交代钛铁矿。因此, 采用磨矿-弱磁选即可回收这部分磁铁矿。

### 2.1.4 黄铜矿

黄铜矿 ( $CuFeS_2$ ) 微量存在于原矿中, 为铜黄色, 以他形微粒状, 呈星点状不均匀散布于矿石中, 多被榍石包裹。由于其含量比较低, 暂不考虑回收, 若黄铜矿在铁精矿和钛精矿中富集将容易造成精矿硫含量超标。

## 2.2 脉石矿物

矿样中脉石矿物主要以斜长石 ( $NaAlSi_3O_8$ ) 为主, 其次是辉石、黑云母、角闪石、萤石以及榍石、方解石和石英等。

### 2.2.1 斜长石

原矿中含有大量斜长石 ( $NaAlSi_3O_8$ ), 斜长石在表面产生细而且平行的条纹, 部分斜长石表面发生蓝色和绿色的晕彩, 这是由于它们的双晶结构引起 (见图 3)。呈自形~半自形柱状, 正突起低, 其相对折射率大于树脂。正交下斜长石呈双晶、卡钠双晶发育, 且双晶结合面为

(010) 面, 粒度在 0.02~0.15 mm 之间。在 (010) 切面上, 卡钠双晶测定消光角  $Np' \wedge (010) = 17^\circ$  和  $36^\circ$ , 矿物种为  $An=65\% \pm$  的钠长石, 其含量小于 50%。

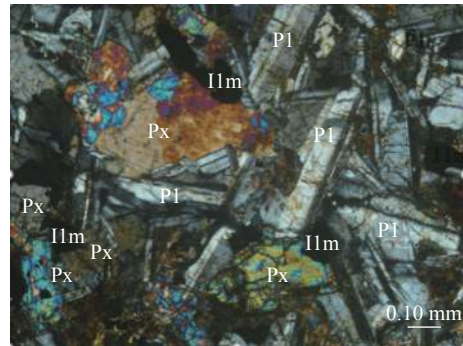


图 3 辉绿结构由自形柱状斜长石 (Pl)、辉石 (Px) 及钛铁矿 (Ilm) 组成

Fig.3 Diabase structure composed of euhedral plagioclase, pyroxene and ilmenite.

### 2.2.2 含钛辉石

原矿中含钛辉石 ( $Ca(Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Ti, Al)[Si, Al]_2O_6$ ) 呈淡紫红色, 半自形~它形等轴粒状、柱状, 正突起高, 具一组完全解理。正交下最高二级红干涉色, 斜消光  $c \wedge Ng = 40^\circ$ , 可见简单双晶, 少量边缘有阳起石化, 其含量约占 40%, 呈灰绿色、玻璃光泽。矿石中它形粒状含钛辉石分布于长石颗粒之间, 粒度在 0.02~0.30 mm 之间。经单矿物化学分析, 其中含  $TiO_2$  1.88%。这部分钛是以类质同像的形式存在, 为目前选矿工艺不可选的含钛矿物 (见图 4)。

### 2.2.3 角闪石

角闪石是矿石中的主要脉石矿物之一, 呈不规则柱状集合体, 粒径一般小于 0.006 mm, 部分角闪石发生了轻微至中等程度的绿泥石化。角闪石性状为淡褐色, 柱状, 具多色性, 褐色~淡黄褐色, 正突起高, 具一组完全解理, 正交下褐色异常干涉色, 斜消光  $c \wedge Ng = 18^\circ$ 。大颗粒内常有不定量的残余状绿泥, 含量 <3%。



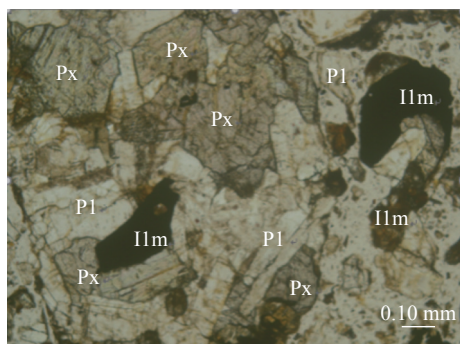


图 4 矿样中含钛辉石 (px), 钛铁矿 (Ilm) 和斜长石 (pl) 组成辉绿结构

Fig.4 Pyroxene, plagioclase and ilmenite constitute the diabase structure in raw sample

### 2.2.4 黑云母

原矿中的黑云母呈褐色，片状，多色性显著。深褐色~淡褐色的黑云母正突起中，具一组极完全解理，正交下褐色异常干涉色，平行消光。黑云母呈不规则片状，多分布在角闪石颗粒中或沿角闪石的解理缝分布，并交代角闪石，也可见部分黑云母包裹细粒椭石和钛铁矿，含量少。

## 3 原矿样粒度筛析

原矿样粒度筛析可以查明不同粒级中  $TiO_2$  的含量和金属分布率情况，它是选矿过程中控制磨矿细度的重要因素。原矿样粒度筛析结果见表 5。

原矿样粒度筛析结果表明，钛在各个粒级中

分布不均匀，原矿有价金属  $TiO_2$  品位为 5.65%，在 +0.5 mm 粒级中，产率为 12.54%，钛金属分布率仅有 4.94%；在 -0.019 mm 粒级的产率为 4.1%，钛金属分布率只有 0.74%；在 -0.5 + 0.074 mm 粒级中，钛铁矿有相对富集趋势，其  $TiO_2$  产率达 68.08%， $TiO_2$  品位和 Ti 金属分布率相对集中。因此，预先脱除 +0.5 mm 和 -0.019 mm 部分有利于后续的选别工艺。

## 4 弱磁-强磁选探索性实验

原矿工艺矿物学研究表明，试样中存在少部分强磁性铁矿物，可以先进行弱磁选以获得铁精矿。矿泥可以通过强磁选预先脱除并实现钛铁矿的富集。在磨矿细度为 -0.074 mm 85%、弱磁场强度 0.1 T、强磁场强度 1.0 T 的条件下进行了弱磁-强磁选探索性实验，实验结果见表 6。

表 6 数据表明，通过弱磁-强磁选探索性实验可以获得铁品位 54.50%，回收率 94.29% 的铁精矿。由于原矿中强磁性铁矿物主要为钒钛磁铁矿，这是造成铁精矿品位偏低的重要原因。铁精矿的提质需要进一步优化磨矿细度和弱磁分选条件。强磁选可以脱除大量的脉石矿物，精矿中  $TiO_2$  品位提升到 8.70%，回收率为 85.51%。显而易见，从强磁精矿中获得合格的钛精矿 ( $TiO_2 \geq 47%$ ) 不仅需要优化强磁分选工艺和条件，还需联

表 5 原矿样粒度筛析结果

Table 5 Screen analysis results of the raw ore

粒级/mm	产率/%		$TiO_2$ 品位/%	Ti金属分布率/%	
	个别	累计		个别	累计
+0.5	10.54	12.54	2.65	4.94	4.94
-0.5+0.2	32.45	42.99	8.45	48.52	53.46
-0.2+0.1	25.25	68.24	7.42	33.15	86.62
-0.1+0.074	10.38	78.62	4.45	8.17	94.79
-0.074+0.037	9.13	87.75	1.65	2.67	97.46
-0.037+0.019	8.15	95.9	1.25	1.80	99.26
-0.019	4.10	100.00	1.02	0.74	100.00
合计	100.00		5.65	100.00	

表 6 弱磁-强磁选探索性实验结果

Table 6 Exploratory experimental results of low intensity-high intensity magnetic separation

作业	产品	产率/%	Fe品位/%	Fe回收率/%
弱磁	精矿	0.30	54.50	94.29
	尾矿	99.70	0.99	5.71
	原矿	100.00	17.34	100.00
		产率/%	$TiO_2$ 品位/%	$TiO_2$ 回收率/%
强磁	精矿	57.20	8.70	85.51
	尾矿	42.50	0.89	6.49
	合计	99.70	5.82	92.00

合其他分选方法、如重选、浮选等，开展详细的深度精选实验。

## 5 结 论

(1) 云南某钛铁矿原矿  $\text{TiO}_2$  含量为 5.62%，61.39% 的钛分布于钛铁矿中，11.03% 的  $\text{TiO}_2$  赋存于钒钛磁铁矿中。矿样中榍石及硅酸盐中钛含量较高可达 27.58%，该矿石属低品位难选矿石。

(2) 矿石中主要有用矿物是钛铁矿，含量低、分散程度高且多被脉石矿物榍石、斜长石及辉石包裹着。因此，需要通过细磨才能使钛铁矿得到有效的回收。

(3) 弱磁-强磁选可以有效地回收矿石中的强磁性矿物，并抛出大量的矿泥，实现钛铁矿的富集。其中铁精矿品位 54.50%，回收率为 94.29%，强磁精矿中  $\text{TiO}_2$  品位提升到 8.70%，回收率为 85.51%。合格钛精矿 ( $\text{TiO}_2 \geq 47\%$ ) 的制备需要开展详细的深度精选实验。

## 参考文献:

- [1] 邓孝纯, 李慧, 王鹏程, 等. 金属钛的制备工艺[J]. *矿产综合利用*, 2020(1):39-42.  
DENG X C, LI H, WANG P C, et al. Preparation process of metal titanium[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(1):39-42.

[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):91-94.

WANG L Z, LIU Y, CAO J H, et al. Technological mineralogical characteristics of a certain ilmenite ore[J]. *Metal Mine*, 2016(5):91-94.

[3] 马驰, 卫敏, 卞孝东, 等. 山东某钛铁矿石工艺矿物学研究[J]. *金属矿山*, 2016(3):103-106.

MA C, WEI M, BIAN X D, et al. Research on process mineralogy of an ilmenite ore in Shandong[J]. *Metal Mine*, 2016(3):103-106.

[4] 薛忠言, 曾令熙, 刘应冬. 太和钒钛磁铁矿中硫化物的工艺矿物学研究[J]. *矿产综合利用*, 2019(3):78-81.

XUE Z Y, ZENG L X, LIU Y D. Process mineralogy of the sulfide in the Taihe vanadium titanomagnetite[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(3):78-81.

[5] 李城, 王伟之. 钒钛磁铁矿中钛的柱机联合全浮工艺实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2019(3):40-43.

LI C, WANG W Z. Experimental study on the combined full-floating process of titanium in vanadium-titanium magnetite[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(3):40-43.

[6] 邓冰, 张渊, 杨永涛, 等. 攀西某钒钛磁铁矿选铁尾矿选钛试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2018(2):91-96.

DENG B, ZHANG Y, YANG Y T, et al. Experimental study on the beneficiation of iron tailings from a vanadium-titanium magnetite mine in Panxi[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(2):91-96.

[7] 宋涛, 王祖旭, 朱冰龙, 等. 风化型钛铁矿矿物学与选矿工艺的研究[J]. *云南冶金*, 2013, 42(6):13-22.

SONG T, WANG Z X, ZHU B L, et al. Research on weathered ilmenite mineralogy and beneficiation process[J]. *Yunnan Metallurgy*, 2013, 42(6):13-22.

## Study on Process Mineralogy of Ilmenite in Yunnan Province

Lu Xianzhi<sup>1</sup>, Lu Peiyao<sup>1</sup>, Chen Yingjie<sup>1</sup>, Ding Zhan<sup>1</sup>, Yu Pan<sup>1</sup>, Bai Shaojun<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, China; 2. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming, Yunnan, China)

**Abstract:** The process mineralogy of an ilmenite in Yunnan Province was studied. The results showed that the grade of titanium in the ore sample was 5.62%. The main metal minerals in the ore were ilmenite and vanadium ilmenite, which occupied for 61.39% and 11.03% of the total titanium, respectively. The gangue minerals were plagioclase and titanite. The contents of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  were 42.35% and 12.53%, respectively. Most of the coarse ilmenite minerals in the samples were closely associated with vanadium ilmenite, sphene and silicate. Meanwhile, the particle size of the aggregation was mainly concentrated in 0.02~0.30 mm, whereas, 27.58% of titanium occurred in sphene and silicate minerals. Exploratory experimental results of low intensity-high intensity magnetic separation indicated that the strong magnetic minerals could be recovered and plenty of gangue minerals could be removed effectively, resulting in the concentration of ilmenite minerals. Thus, the ore belonged to a low grade refractory ilmenite and it will be significant importance to recover the ilmenite effectively for the exploitation and utilization of this resource.

**Keywords:** Ilmenite; Vanadium ilmenite; Titanite; Dissemination size; Process mineralogy