

# 广东某低品位钽铌铷铍多金属矿石工艺矿物学研究\*

李美荣<sup>1,2,3\*</sup>, 邱显扬<sup>1,2,3</sup>, 梁冬云<sup>1,2,3</sup>, 李波<sup>1,2,3</sup>, 孟庆波<sup>1,2,3</sup>, 蒋英<sup>1,2,3</sup>

(1. 广东省资源综合利用研究所, 广东 广州 510650; 2. 稀有金属分离与综合利用国家重点实验室, 广东 广州 510650; 3. 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:**以广东省某低品位钽铌铷铍多金属矿为研究对象,采用先进矿物定量检测技术与传统工艺矿物学研究手段相结合的方法,对矿石进行工艺矿物学研究,以期对多金属矿石综合回收提供指导。结果表明,本矿石属强钠长石化和云英岩化花岗岩型钽铌铷铍矿石,原矿中主要有价金属为钽、铌、铷、铍、镓和银。以钽铌铁矿矿物形式存在的钽和铌分别占总含量的68.51%、62.72%;以绿柱石和硅铍石矿物形式存在的铍分别占原矿总含量的71.01%和20.29%;赋存于云母和长石中的铷分别占总含量的74.94%和20.24%;镓主要富集在黏土矿物中,银主要以螺状硫银矿形式赋存于硫化矿物中。采用重磁浮联合选矿流程,可实现有用元素和尾矿的综合回收。

**关键词:**稀有多金属矿;工艺矿物学;钽;铌;铷;铍

**中图分类号:**TD91 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0076(2019)02-0047-07

**DOI:**10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.02.009

## Process Mineralogy Study of a Low-grade Rare and Polymetallic Ore of Tantalum-niobium-rubidium-beryllium from Guangdong

LI Meirong<sup>1,2,3\*</sup>, QIU Xianyang<sup>1,2,3</sup>, LIANG Dongyun<sup>1,2,3</sup>, LI Bo<sup>1,2,3</sup>, MENG Qingbo<sup>1,2,3</sup>, JIANG Ying<sup>1,2,3</sup>

(1. Guangdong Institute of Resources Comprehensive Utilization, Guangzhou 510650, China; 2. State Key Laboratory of Rare Metal Separation and Comprehensive Utilization, Guangzhou 510650, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Development & Comprehensive Utilization of Mineral Resources, Guangzhou 510650, China)

**Abstract:** The rare metals, tantalum and niobium, beryllium and rubidium, are commonly associated with each other on earth. They have been recognized as important strategic resources in recent years. In this paper, the occurrence research of niobium-tantalum-beryllium-rubidium on a low-grade and micro-fine disseminated rare metals deposit from Guangdong province was carried out, by combining advanced mineralogical determination technology with traditional process mineralogy methods. In order to provide a clarified guidance to process selection of subsequent mineral separation and comprehensive recovery of the ore. As a result, the ore is classified into tantalum-niobium-beryllium-rubidium granite type ore with strong alteration of albitization and greisenization. In the ore, the valuable metals include tantalum, niobium, rubidium, beryllium, gallium and silver. Tantalum and niobium in the form of columbite-tantalite account for 68.51% and 62.72%, respectively. The beryllium in the form of beryl and phenacite account for 71.01% and 20.29%, respectively. The rubidium occurred in muscovite and feldspar account for 74.94% and 20.24%, respectively. While gallium in the ore is mainly concentrated in clay minerals, and silver is mainly present in sulfide minerals in the form of acanthite. The comprehensive recovery of valuable metals and tailing can be achieved by using combined process of gravity separation, magnetic separation and flotation.

\* 收稿日期:2018-11-15

基金项目:广东省科学院实施创新驱动发展能力建设专项资金项目(2017GDASCX-0301,2017GDASCX-0838);广东省自然科学基金项目(2017A030310555,2017A030303051)

作者简介:李美荣(1990-),女,山东菏泽人,硕士,工程师,主要从事工艺矿物学研究, E-mail:happy\_199002@126.com。

**Key words:** rare metals deposit; process mineralogy; tantalum; niobium; rubidium; beryllium

## 引言

钽、铌、铍、铷在自然界中常伴生产出,属于稀有金属,是重要的战略资源,已广泛应用于冶金、原子能、航空航天、军工、电子、生物、化学以及超导材料和医疗仪器等方面<sup>[1-5]</sup>。

我国钽铌资源具有矿石品位低、嵌布粒度细而分散、多金属伴生、钽铌矿床区域分布集中等突出特点,多为花岗伟晶岩型钽铌矿和复杂铌稀土多金属矿,比较典型的包括江西宜春钽铌矿床、江西横峰钽铌矿、福建南平大型花岗伟晶岩钽铌矿床、可可托海稀有金属花岗岩矿床、广东横山钽铌矿以及白云鄂博铁-稀土-铌综合性矿床等<sup>[6,7]</sup>。

铍的主要矿物为绿柱石、蓝柱石、羟硅铍石、硅铍石,其次为日光榴石、金绿宝石和兴安石等。国内铍资源比较典型的包括新疆可可托海稀有金属花岗岩矿床、湖南郴州条纹岩铍矿和大兴安岭碱性花岗岩铍矿<sup>[8-11]</sup>。

铷矿资源储量丰富,却无独立矿物,主要以类质同象替代钾的方式分散于一些钾矿物中,包括钾长石、云母、钾盐和光卤石等。我国铷矿资源非常丰富,比较典型的有湖北江汉平原地下卤盐资源、西藏扎布耶盐湖、广州从化红坪山铷矿、内蒙古锡林郭勒超大型铷矿。

本文以广东省某低品位细粒钽铌铍铷稀有多金属矿作为研究对象,采用矿物自动定量检测系统(MLA)详细查明矿石的矿物组成,通过显微镜观察测定查明矿石中钽铌铍铷矿物的嵌布粒度以及其在矿石中的嵌布状态。利用人工重砂、磁选、浮选和镜下精拣等方法进行主要矿物提纯分离,查明钽铌铍铷在矿石中的赋存状态,以期为后续选矿作业的设置以及金属综合回收提供明确指导<sup>[12]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品原料及耗材

矿样来自广东某地区,包含五个矿体的样品,碎矿前拣取少量块矿作为矿石鉴定样品,每种类型按适当比例进行破碎混匀缩分,得到-2 mm 矿粉作为试验样品。耗材包括环氧树脂、固化剂、石墨、抛光液和火漆等。

### 1.2 试验仪器及方法

试验仪器包括检测设备和装置。检测设备主要包括矿物自动定量分析系统(MLA 650)、扫描电子显微镜(FEI Quanta200)、X 射线荧光光谱仪(Axios mAX)、原子吸收分光光度计(WFX-110B)、体视显微镜(Leica M125、Leica 36E)、偏光显微镜(Leica DMRXP、ZEISS Axio Scope A1)、电磁分选机(WCF-3);制样装置主要包括切片机(XQPI-66A)、单盘磨片机(DPM-300)、自动电子液压镶嵌机(Cito-Press-10)、研磨抛光给液系统(FegraDser-5)、三头研磨机(XPM-120\*3)。

试验方法:从来样中缩分 100 g -0.2 mm 的代表性样品,通过筛分和水析获得四个粒度产品(+100  $\mu\text{m}$ , -100+40  $\mu\text{m}$ , -40+20  $\mu\text{m}$ , -20  $\mu\text{m}$ ),烘干后分别用环氧树脂进行两次冷镶,制成直径 30 mm 的三个光片,经研磨抛光后进行 MLA 测试,总测试颗粒近 30 万粒。将拣取的代表性块矿样品进行切割、研磨、粘片、抛光,得到 30 mm×30 mm 的光片和 20 mm×30 mm×0.03 mm 薄片样品,进行显微镜鉴定和检测,研究矿石的结构、构造和主要矿物的嵌布粒度。缩取代表性样品,对矿石中的主要有价元素进行磁性分区、密度分布以及赋存状态等工艺矿物学特性进行研究。

## 2 结果与讨论

### 2.1 矿石结构、构造

本矿石属花岗岩型钽铌铍铷矿石,矿石呈残余花岗岩结构,块状构造。岩石蚀变包括强钠长石化、强云英岩化、钾长石化和高岭土化。

岩石具较强蚀变,钾长石呈自形晶-半自形晶板状结构,多具云雾状包含物,且被钠长石交代,呈残余结构,石英多呈他形晶结构充填于长石空隙中,可见残余花岗岩结构(图 1a);次生的钠长石呈自形晶板柱状结构或半自形晶粒状结构,密集分布(图 1b);云英岩化的他形微晶和重结晶的自形晶石英明显可见,白云母为云英岩化产物,呈叠片状自形晶结构或叶片状,常与石英共生(照片图 1c,1d);部分长石蚀变为高岭土和三水铝石,呈微细粒土状集合体充填于矿物颗粒间隙。

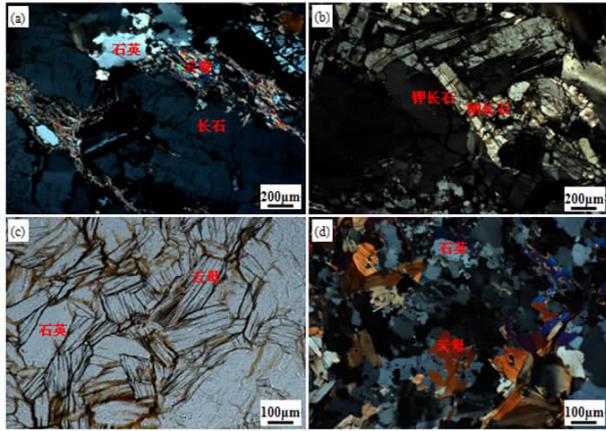


图 1 矿石结构、构造

Fig. 1 The texture and structure of ore

## 2.2 原矿的物质组成

### 2.2.1 原矿化学组成

原矿多元素化学分析结果如表 1 所示,可以看出,原矿中主要有价金属为钽、铌、铷、铍、镓和银,其中铷达到工业品位要求,钽、铌、铍、镓均略低于工业品位,可综合回收。

表 1 原矿多元素化学分析结果 /%

Table 1 Results of multi-element chemical analysis

元素	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Rb <sub>2</sub> O	BeO	Ag	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sn
含量	0.009	0.011	0.14	0.044	1.33	48	0.012
元素	WO <sub>3</sub>	Cu	Zn	Li <sub>2</sub> O	Cs <sub>2</sub> O	Fe	S
含量	<0.01	0.017	0.012	0.008	0.005	0.28	0.016
元素	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	
含量	3.36	3.35	18.06	70.87	0.13	0.16	

注:Ag、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 单位为 g/t,参考《矿产资源工业要求手册》2014 年修订版,铷的工业品位为 Rb<sub>2</sub>O 0.1% ~ 0.2%。参考《选矿工程师手册(第四册)》2015 年版,钽铌的工业品位为 (Ta, Nb)<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.024% ~ 0.028%,铍的工业品位为 BeO 0.10% ~ 0.14%。

### 2.2.2 原矿的矿物组成

采用 MLA 测定原矿的矿物组成及含量,其结果如表 2 所示。

表 2 原矿矿物组成及含量

Table 2 The mineralogical composition of raw ore

矿物	含量/%	矿物	含量/%	矿物	含量/%
钽铌铁矿	0.017	石英	34.872	高岭土	4.443
绿柱石	0.241	钾长石	10.434	三水铝石	3.776
硅铍石	0.020	钠长石	28.397	其他	1.319
硫化物	0.052	云母	16.427	合计	100.000

从表 2 可以看出,该矿石中钽铌矿物主要为钽铌铁矿,铍矿物主要为绿柱石,少量硅铍石;少量硫化物,包括闪锌矿、辉铜矿、磁黄铁矿、黄铜矿等和微量螺状硫铁矿;脉石矿物主要由石英、钠长石、钾长

石和白云母组成,其次为高岭土和三水铝石,少量绿泥石和黑云母。因此,该矿石中主要回收的矿物为钽铌铁矿、白云母(铷载体矿物),可综合回收绿柱石、黏土矿物以及石英、钠长石和钾长石。

## 2.3 主要有用矿物的嵌布特征

### 2.3.1 有用矿物的嵌布粒度

结合 MLA 检测和显微镜鉴定获得主要有用矿物的嵌布粒度分布,结果如图 2 所示。

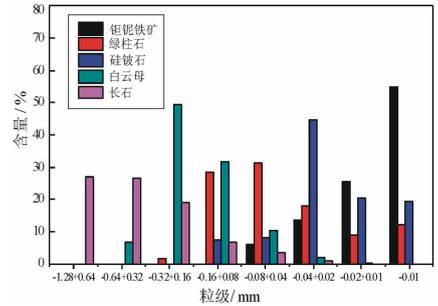


图 2 主要矿物的嵌布粒度

Fig. 2 The Disseminated size of valuable minerals

由图 2 可以看出,矿石中钽铌铁矿的嵌布粒度(短径)较微细,主要集中于 -40 μm 的粒度范围内,粒度分布率为 93.86%,其中 -10 μm 的粒度分布率为 54.61%。钽铌铁矿多呈长条状嵌布,矿物颗粒的平均长径比为 4.13。绿柱石嵌布粒度相对较粗,且分布极不均匀,硅铍石的粒度分布较细, -40 μm 粒度分布率为 84.37%。云母主要分布于 -0.32 + 0.08 mm 粒度范围内,长石粒度相对较粗,主要分布于 -2.56 + 0.16 mm 粒度范围内。

### 2.3.2 有用矿物的嵌布状态

#### (1) 钽铌矿物

本矿石中的钽铌矿物属于富铁系列的钽铌铁矿,多数为富铌贫钽的钽铁矿,少数为富钽贫铌的钽铁矿,其化学成分能谱分析结果分别如图 3 所示。

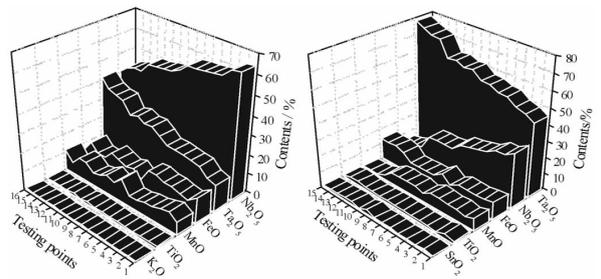


图 3 钽铌矿物能谱分析结果

Fig. 3 Results of chemical composition by EDS (Energy Dispersive Spectrometer)

由图3可以看出,矿物中钽与铌、铁与锰呈现出此消彼长的替代关系,铌铁矿  $Nb_2O_5$  40.44% ~ 64.55%,  $Ta_2O_5$  14.17% ~ 41.54%; 钽铁矿  $Ta_2O_5$  46.13% ~ 78.21%,  $Nb_2O_5$  5.00% ~ 34.01%。

该矿石中钽铌铁矿多呈板状、薄板状、薄片状,有时可见环带结构,钽铌铁矿晶粒表面为富钽外环。钽铌铁矿多呈包裹体嵌布,主要呈微细粒嵌布于云母中(图4a),少量钽铌铁矿包含于石英、长石等矿物颗粒内部(图4b),其次可见嵌布于云母、长石和石英等脉石矿物之间(图4c,4d)。

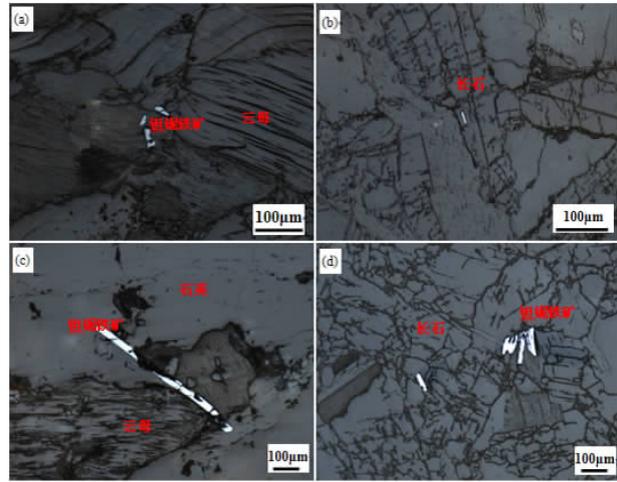


图4 钽铌铁矿的嵌布状态 偏光显微镜 反光  
Fig.4 The dissemination of columbite

(2) 铍矿物

绿柱石和硅铍石是本矿石中主要的铍矿物,绿柱石有少量碱金属铷、铯、钠代替铍,少量铁代替铝,硅铍石则有少量铝、铁、钾等杂质混入。矿石中绿柱石主要呈自形-半自形晶粒状,嵌布于石英、长石等颗粒间隙(图5a,5b),或见绿柱石呈溶蚀状,被三水铝石等黏土矿物包含或充填。硅铍石粒度微细,主要呈不规则粒状嵌布于白云母和绿泥石等矿物中,其次与钠长石连生(图5c,5d)。

(3) 含铷矿物

矿石中的云母和长石是铷的主要赋存矿物,云母以白云母为主,少量黑云母,长石以钠长石和钾长石为主,金属铷主要赋存于钾长石中,钠长石基本不含铷。白云母中普遍含有数量不等的铁,FeO 含量 0.90% ~ 3.99%,  $Rb_2O$  含量 0.20% ~ 1.21%, 平均  $Rb_2O$  含量 0.69%, 个别含铯; 钾长石含  $Rb_2O$  0.63% ~ 0.94%, 平均  $Rb_2O$  含量 0.71%, 个别含少量  $Cs_2O$ ; 钠长石仅含少量钙和钾,不含铷、铯。

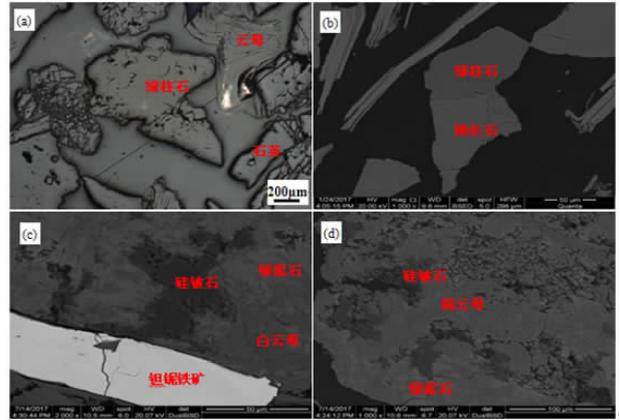


图5 铍矿物的嵌布状态 扫描电镜 BSE 图像  
Fig.5 The dissemination of beryl and phenacite

矿石中云母主要呈片状、叶片状,少数呈鳞片状集合体,可见与石英、长石连生或沿矿石空隙充填,呈叠片状集合体(图6a,6b)。钠长石常见呈板条状或不规则粒状,多具聚片双晶,钾长石多呈板状,表面高岭土化浑浊,双晶不明显,少数见卡氏双晶,常与石英、云母呈复杂连生嵌布于矿石中(图6c,6d)。

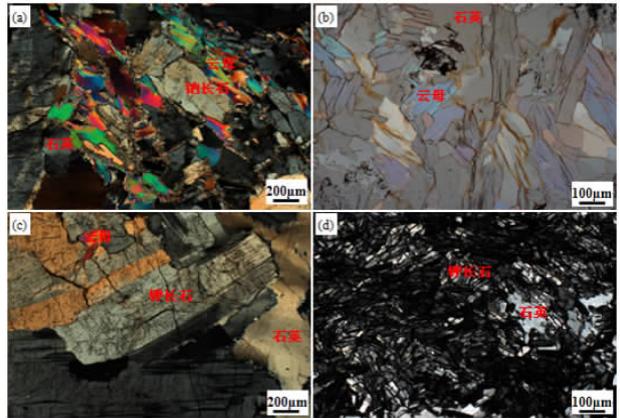


图6 含铷矿物的嵌布状态 偏光显微镜 偏光  
Fig.6 The dissemination of rubidium minerals

结果表明,矿石中钽铌矿物嵌布粒度较细,多呈薄板状和薄片状,嵌布于脉石矿物颗粒间隙,或以与解理面垂直或斜交的形式包裹于叠片状云母内部,这种嵌布关系使得钽铌矿物在磨矿过程中比较容易从脉石矿物中解离。另外,钽铌矿物与连生矿物之间明显的磁性和比重差异为选矿分离提供了便利。铍矿物含量相对较少,绿柱石嵌布于长石和石英中,硅铍石则呈细粒浸染状分布于白云母和绿泥石中,与脉石矿物之间相似的物理性质以及复杂的嵌布关系导致铍矿物选矿回收的困难。含铷矿物白云母和钾长石矿物含量相对较高,矿物嵌布粒度基本处于

易选粒级( +0.08 mm),可结合尾矿综合利用进行选择回收。另外,黏土矿物在矿石中占有一定的比例,矿物嵌布粒度多数小于 0.04 mm,而且基本不含有价元素,可考虑预先洗选脱除。

## 2.4 原矿中主要有价元素的分布状态

### 2.4.1 有价元素的磁性分布

为研究该矿石中各矿物的磁性差异以及磁选对有用矿物与脉石矿物的分离作用,缩聚解离程度较

高的粒级产品( -0.074 mm +0.043 mm)进行磁性分析试验,有价元素的磁性分布结果如表 3 所示。可以看出,钽铌在 450 ~ 1 100 mT 磁性产品中有明显富集,钽和铌回收率分别为 73.87% 和 59.00%; 铷和铍在 1 100 ~ 2 000 mT 磁性产品中品位有明显提高,但多数进入非磁产品中,回收率均为 88.61%。显微镜观察,磁性产品中主要矿物为大量金云母、铁染的白云母,少量钽铌矿物、钛铁矿、褐铁矿、磁铁矿、石榴石等。

表 3 有价元素的磁性分布

Table 3 The magnetic distribution of valued elements

磁级/mT	产率/%	品位/%				回收率/%			
		Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Rb <sub>2</sub> O	BeO	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Rb <sub>2</sub> O	BeO
250	2.87	0.010	0.018	0.10	0.037	2.99	3.18	2.85	2.58
450	1.13	0.019	0.022	0.091	0.039	2.22	1.52	1.01	1.06
650	1.11	0.44	0.63	0.091	0.042	50.77	43.04	1.00	1.13
1 100	1.24	0.18	0.21	0.094	0.066	23.10	15.96	1.15	1.98
2 000	2.36	0.008	0.018	0.23	0.081	1.96	2.62	5.38	4.64
Nonmagnetic	91.29	0.002	0.006	0.098	0.04	18.96	33.68	88.61	88.61
Total	100.00	0.010	0.016	0.101	0.041	100.00	100.00	100.00	100.00

由此可知,磁选对于有价元素的分离回收具有显著的效果。主要脉石矿物石英、长石和白云母基本进入非磁产品中,一方面,铷和铍在非磁产品中得到有效回收,另一方面,磁选尾矿脱除了大量脉石矿物,有效减少了后续精选作业的给矿压力。钽铌矿物在磁选过程中与脉石矿物有效分离的同时,磁性产品中主要杂质矿物云母多具片状,而解离出来的钽铌铁矿多呈板状或粒状,颗粒形态和矿物比重的

差异明显,可采用重选将云母分离;另外,钽铌铁矿与磁性干扰矿物铁矿物和石榴石等也表现出不同的磁性分区,可通过磁选精选进一步分离富集。

### 2.4.2 钽铌重液试验

重选是钽铌选矿分离的重要方法,为探究重选对钽铌矿物的分离效果以及确定合适的重选入选粒级,获取原矿不同粒级产品进行重液分析(重介质:三溴甲烷),结果如表 4 所示。

表 4 原矿重液试验结果

Table 4 Results of heavy liquid test

粒级/mm	产率/%	品位/%		产率/%		轻品位/%		重品位/%		重回收率/%	
		Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	轻	重	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
+0.32	2.75	0.007	0.022	88.48	11.52	0.006	0.017	0.012	0.060	20.76	31.63
-0.32 +0.2	6.36	0.007	0.013	84.69	15.31	0.004	0.007	0.021	0.046	48.67	51.33
-0.2 +0.1	23.03	0.006	0.009	92.44	7.56	0.001	0.002	0.071	0.092	85.33	78.99
-0.1 +0.074	15.60	0.009	0.011	94.87	5.13	0.001	0.001	0.149	0.196	88.97	91.38
-0.074 +0.043	17.62	0.009	0.013	93.78	6.22	0.001	0.002	0.128	0.179	89.46	85.57
-0.043 *	34.64	0.012	0.018	/	/	/	/	/	/	/	/
Total	100.00	0.009	0.014	60.43	4.93	0.002	0.003	0.083	0.117	44.70	42.12

\*注: -0.043 mm 粒级重矿物颗粒不易沉降,重液分离效果较差。

由表 4 可以看出,重液对于钽铌矿物具有明显的分离效果,随着粒度逐渐变细,重产品中钽铌的品位逐渐提高, -0.2 mm 粒度范围内,钽铌基本富集于重产品中, -0.1 +0.043 mm 范围内各粒级产品中钽和铌的回收率均达到 85% 以上。显微镜观察

发现,重产品以云母为主,可见云母与钽铌铁矿的连生体,少量的石榴石、尖晶石、磁黄铁矿、闪锌矿、褐铁矿等。

分析可知,钽铌矿物的解离程度是决定重选分离效果的关键因素, -0.1 +0.043 mm 粒级产品中

钽铌得到有效的分选回收,是重选过程中可以选择的合适入选粒级。在合适的入选粒级下,重产品中钽铌的回收率远远高于磁性产品,因此,重选是将钽铌矿物与云母分离,实现钽铌高效回收的有效方法。

### 2.4.3 有价元素的赋存状态

根据原矿的矿物组成和各主要矿物中钽、铌、铷和铍的含量(单矿物在 $-0.04\text{ mm}$ 粒度范围内完成最后提取),作出元素在原矿中的平衡分配,如表5所示。可以看出,以钽铌铁矿矿物形式存在的钽和铌分别占总含量的68.51%和62.72%;以微细钽铌矿物包裹体分散于云母、长石、黏土矿物(包括高岭土和三水铝石)、石英中的钽和铌分别占总含量的19.66%、4.65%、3.01%、4.17%和30.75%、1.58%、

4.10%、0.85%。赋存于云母和长石中的铷分别占总含量的74.94%和20.24%,赋存于黏土矿物中的铷占总含量的4.49%。以绿柱石和硅铍石矿物形式存在的铍分别占原矿总含量的71.01%和20.29%,赋存于长石和黏土矿物中的铍分别占总含量的2.57%和5.00%。

由此可知,从原矿中分离钽铌矿物,钽和铌的理论回收率分别为68.51%和62.72%,其中将近20%的钽和30%的铌损失于云母中。从原矿中分离云母可获得最高品位 $\text{Rb}_2\text{O}$  0.70% 铷精矿,理论回收率为75%左右,其中约20%的铷进入长石产品中。从原矿中分离绿柱石,可获得 $\text{BeO}$  最高品位为13.46%的铍精矿,理论回收率为70%左右。

表5 原矿中有价元素的平衡分配表  
Table 5 Allocation rates of valued elements in the ore

矿物	含量/%	品位/%				分布率/%			
		$\text{Ta}_2\text{O}_5$	$\text{Nb}_2\text{O}_5$	$\text{Rb}_2\text{O}$	$\text{BeO}$	$\text{Ta}_2\text{O}_5$	$\text{Nb}_2\text{O}_5$	$\text{Rb}_2\text{O}$	$\text{BeO}$
钽铌铁矿	0.017	34.21	46.06	/	/	68.51	62.72	/	/
绿柱石	0.241	/	/	0.064	13.46	/	/	0.10	71.01
硅铍石	0.020	/	/	/	44.89	/	/	/	20.29
云母	16.427	0.010	0.023	0.700	0.001	19.66	30.75	74.94	0.36
长石	38.830	0.001	0.000 5	0.080	0.003	4.65	1.58	20.24	2.57
黏土	8.398	0.003	0.006	0.082	0.027	3.01	4.10	4.49	5.00
石英	34.872	0.001	0.000 3	0.001	0.001	4.17	0.85	0.23	0.77
其他	1.196	/	/	/	/	/	/	/	/
合计	100.00	0.008	0.012	0.153	0.045	100.00	100.00	100.00	100.00

## 2.5 工艺矿物学研究的指导意义

### (1) 资源综合利用评估

原矿中存在有价金属钽铌、铷、铍、镓和银,其中铷达到工业品位,钽铌和铍略低于工业品位,镓和银则赋存于黏土矿物和硫化物中,可综合回收。从原矿中分离钽铌矿物、云母和绿柱石,钽、铌、铷和铍的理论回收率分别为68.51%、62.72%、74.94%和71.01%。尾矿产品为黏土矿物、石英长石,可作为陶瓷原料有效利用。

### (2) 选矿综合回收

高梯度湿式预磁选。磁性分析结果表明,钽铌在450~1 100 mT磁性产品中富集明显,而铷、铍、石英长石则多数分布于非磁产品中,因此在选矿流程选择过程中,可考虑高梯度湿式磁选预先富集钽铌,磁选尾矿进行铷、铍的浮选回收,浮选尾矿即为石英长石产品。

重选原则流程的确定。显微镜观察磁性产品中

杂质主要为云母,其次为铁矿物、硫化物及石榴石等磁性脉石矿物,而重选是分离钽铌矿物与云母的有效方法。因此考虑对预磁选精矿进行摇床粗选,将云母作为重选尾矿分离出去;同时,为消除硫化物对钽铌矿物重选分离的干扰,可对摇床粗精矿进行浮选脱硫;粗精矿脱硫处理后,为进一步提高钽铌的品位,可对脱硫钽铌粗精矿进行摇床精选,得到钽铌摇床精矿。

干式磁选精选富集。针对钽铌摇床精矿的矿物构成简单以及矿物颗粒形状规则、粒度大小均一的形态特征,根据不同矿物的磁性分区,进行阶段性干式磁选,去除铁屑和磁铁矿等强磁性矿物(100 mT),分离磁性脉石石榴石(100~500 mT),从而实现钽铌铁矿(500~1 100 mT)的分选富集。

云母的分选。工艺矿物学研究表明,铷主要赋存于云母中,而且主要是弱磁性的白云母,因此可对摇床尾矿及磁选尾矿分别浮选回收云母,作为铷的精矿产品。

铍的回收。尾矿产品中,绿柱石与长石的物理性质近似,且矿物含量与脉石矿物对比悬殊,因此采用常规的酸法工艺或碱法工艺浮选绿柱石分选效果有效,应根据当前的经济技术条件,考虑选冶联合方案,选择性地回收铍和长石产品。

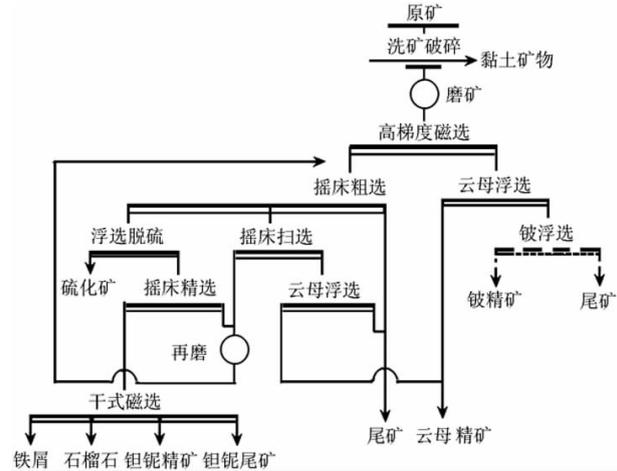


图 7 选矿原则流程图

Fig. 7 The principle flowsheet of beneficiation

具体选矿原则流程如图 7 所示。采用重磁浮联合选矿流程,可实现有用元素钽铌、铷和铍以及尾矿中黏土矿物和石英长石产品的综合回收。

### 3 结论

(1) 矿石中主要有价金属为钽、铌、铷、铍、镓和银,其中铷达到工业品位要求,钽、铌、铍、镓均略低于工业品位,可综合回收。该矿石中主要回收的矿物为钽铌铁矿、云母(铷载体矿物),可综合回收绿柱石、石英长石等。

(2) 矿石中钽铌矿物嵌布粒度较细,多呈薄板状和薄片状嵌布于脉石矿物颗粒间隙,或包裹于叠片状云母内部。绿柱石嵌布于长石和石英中,硅铍石则呈细粒浸染状分布于白云母和绿泥石中。含铷矿物白云母和钾长石矿物嵌布粒度基本处于易选粒级。

(3) 从原矿中分离钽铌矿物,钽和铌的理论回收率分别为 68.51% 和 62.72%,其中将近 20% 的钽和 30% 的铌损失于云母中。从原矿中分离云母可获得最高品位  $Rb_2O$  0.70% 铷精矿,理论回收率为 75% 左右,其中约 20% 的铷进入长石产品中。从原矿中分离绿柱石,可获得  $BeO$  最高品位为 13.46% 的铍精矿,理论回收率为 70% 左右。采用重磁浮联合选矿流程,可实现有用元素钽铌、铷和铍以及尾矿中黏土矿物和石英长石产品的综合回收。

### 参考文献:

- [1] 程征,伍喜庆,杨平伟. 我国钽铌资源的特征及选矿技术[J]. 金属矿山, 2013, 445(7): 97-100.
- [2] 高玉德,邹霓,董天颂. 钽铌矿资源概况及选矿技术现状和进展[J]. 材料研究与应用, 2004, 14(2): 87-92.
- [3] Gong W J, Wu C F, Tian H, et al. Corrosion behavior of Zr-Nb-Cr cladding alloys[J]. Rare metals, 2009, 32(5): 480-485.
- [4] 丘德镛. 钽铌选矿理论与实践[J]. 世界有色金属, 2001, 11(1): 27-30.
- [5] Xu Kuangdi, Ren Zhongming, Li Chuanjun. Progress in application of rare metals in superalloys[J]. Rare metals, 2014, 33(2): 111-126.
- [6] 梁冬云,何国伟. 蚀变花岗岩型钽铌矿石的工艺矿物学研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2004, 1(1): 1-4.
- [7] 梁冬云,李波. 稀有金属工艺矿物学[M]. 北京:冶金工业出版社, 2015: 138-140.
- [8] 陈勇,宋永胜,温建康,等. 某含稀土、锆复杂钽矿的选矿试验研究[J]. 稀有金属, 2013, 37(3): 429-436.
- [9] 吕子虎,卫敏,吴东印,等. 钽铌矿选矿技术研究现状[J]. 矿产保护与利用, 2010(5): 44-47.
- [10] 梁冬云,喻莲香,张永进,等. 花岗伟晶岩型钽铌矿石的工艺矿物学研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2004(5): 1-3.
- [11] 熊玉旺. 云南某钽铌矿中钽、铌的赋存状态研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2014, 1(1): 1-4, 20.
- [12] Yuan Z T, L J W, Wu H F, et al. Mineralogical characterization and comprehensive utilization of micro-fine tantalum-niobium ores from songzi[J]. Rare metals, 2015, 34(4): 282-290.

引用格式:李美荣,邱显扬,梁冬云,等. 广东某低品位钽铌铷钽多金属矿石工艺矿物学研究[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(2): 47-53.

LI Meirong, QIU Xianyang, LIANG Dongyun, et al. Process mineralogy study of a low-grade rare and polymetallic ore of tantalum-niobium-rubidium-beryllium from Guangdong[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(2): 47-53.