

# 白云鄂博矿霓石型稀土矿石中铈的赋存状态与分布规律研究

秦玉芳, 王其伟, 金海龙, 李娜

包头稀土研究院白云鄂博稀土资源研究与综合利用国家重点试验室, 内蒙古 包头 014030

中图分类号: TD91 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2021)03-0144-05  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2021.03.021

**摘要** 采用多元素分析、偏光显微镜、场发射扫描电镜、微区能谱分析及 AMICS 自动矿物分析系统对白云鄂博矿床主、东矿内霓石型稀土矿石中的铈元素赋存状态及分布规律进行了系统分析。结果表明: 主、东矿霓石型稀土矿石中铈的品位( $Nb_2O_5$ )分别为 0.22% 和 0.14%, 主矿铈品位高于东矿。主、东矿霓石型稀土矿石中分别有 82.78%、80.21% 铈元素以独立矿物形式存在于易解石、铈铁矿、铈铁金红石、烧绿石及包头矿等铈矿物中。易解石和烧绿石为主、东矿霓石型稀土矿石中分布最广泛的两种铈矿物, 其中的铈元素分布率普遍高于铈铁矿、铈铁金红石等其他铈矿物。主矿易解石的矿物含量高于东矿, 烧绿石含量在主、东矿间无明显变化。根据上述研究结果, 建议采用重选、磁选、浮选和化学选矿联合的阶段磨矿阶段选别流程。

**关键词** 白云鄂博矿; 霓石型稀土矿石; 铈; 赋存状态; 分布规律

稀土元素和稀有金属元素铈在国际社会均被归为关键金属(Critical Metals), 是新能源、新材料、信息技术等新兴产业和国防军工不可替代的关键原材料<sup>[1-3]</sup>。目前全球铈的可用资源储量仅约 430 万 t<sup>[4]</sup>, 其中 95% 集中于巴西<sup>[5]</sup>, 我国铈的对外依存度超过 90%<sup>[6]</sup>。

白云鄂博矿床是我国最大、世界第二大铈矿床(660 万 t), 占全国铈储量的 70% 以上<sup>[7-9]</sup>。继 20 世纪 50 年代在白云鄂博发现铈矿物, 60 年代进行铈矿勘探, 全国有关科研单位即对白云鄂博矿石开展铈分选研究。但由于白云鄂博中铈矿物分散度大、嵌布粒度细、嵌布关系紧密而复杂、品位较低的特点, 白云鄂博矿中铈资源一直未能得到充分利用, 陷入“有铈不能用”的困境<sup>[10-11]</sup>。

白云鄂博矿床成矿过程复杂, 矿物种类繁多、结构特殊, 矿物组合纷繁多样, 元素赋存规律的研究难度很大。目前, 对白云鄂博矿床铈的研究较多, 但多以研究铈的选矿及冶炼分离工艺为主, 对白云鄂博不同类型矿石中铈的赋存状态的研究鲜有报道<sup>[12]</sup>, 而当前制约

白云鄂博矿床铈的高效分离与有效利用的主要因素之一是对白云鄂博矿不同矿石类型中铈的赋存状态和分布规律的研究不够充分, 因此, 为查清白云鄂博原生矿石中铈资源特性, 就需对白云鄂博不同类型矿石中铈的赋存状态和分布规律展开研究<sup>[13-14]</sup>。

白云鄂博主、东矿按矿石类型可划分为十余种矿石类型, 铈在不同矿石类型中含量有所差异<sup>[15]</sup>。本文以白云鄂博矿床典型矿石为研究对象, 采用场发射扫描电镜、微区能谱分析结合工艺矿物学参数自动定量分析测试系统 AMICS 对白云鄂博矿床主、东矿内霓石型稀土矿石中的铈元素赋存状态及分布规律进行了系统分析<sup>[16-17]</sup>, 为充分认识白云鄂博铈资源, 解决白云鄂博铈资源选矿和提取利用提供指导<sup>[18-21]</sup>。

## 1 样品采集与制备

### 1.1 样品采集

在主、东矿开采境界内, 参考矿山地质勘探网度, 以勘探线为基准, 沿勘探线对矿岩类型变化较大部位

收稿日期: 2021-05-16

基金项目: 内蒙古自然科学基金重大项目(2019ZD11); 内蒙古自治区科技创新引导项目(KCJB2018077)

作者简介: 秦玉芳(1986-), 女, 硕士, 高级工程师; 研究方向: 矿产资源综合利用。

通信作者: 王其伟, 高工, E-mail: wangqiwei71@163.com。

点距按 50 m 控制,含稀土白云岩点距按 100 m,板岩点距按 200 m 控制,采用拣块法采集铌稀土铁矿石、铌稀土矿石及围岩等代表性样品。每个采样点采集约 5 kg 矿样,矿块直径控制在 5 ~ 10 cm 左右,样品涵盖了主、东矿六种类型铁矿石及三种类型稀土矿石,具有代表性。

### 1.2 样品制备

将主矿和东矿满足霓石型稀土矿石的样品取等量后分别进行组合、混匀、缩分,对其中一份缩分样进行多元素化学分析检测,另一份缩分样品筛分为 +74 μm、-74 ~ +30 μm 和 -30 μm 3 个粒级,分别制备成镶嵌样,表面喷镀铂金,采用德国(ZEISS)公司生产的 Sigma-500 型场发射电镜对样品进行分析,能谱型号为(BRUKERXFlash6160),试验条件为:加速电压 20 kV,分辨率 0.8 nm,探针电流 40 ~ 100 nA。利用场发射电镜的背散射电子成像分析技术、微区能谱分析、工艺矿物学参数自动定量分析测试系统(AMICS),研究样品的物相组成和微区成分。

## 2 结果与分析

### 2.1 样品化学分析

采用 X 射线荧光光谱分析(XRF)、电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)、电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)等仪器分析方法结合化学分析对样品元素组成进行分析,其结果见表 1、表 2。由化学分析结果可知,主、东矿霓石型稀土矿石中 REO 品位分别为

8.67% 和 6.9%,铌的品位(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)分别为 0.22% 和 0.14%,主矿稀土和铌的品位均高于东矿。

表 1 主矿霓石型稀土矿石多元素分析结果

Table 1 Multi element analysis results of aegirine-type rare earth ore in main ore

元素	REO	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	BaO
含量/%	8.67	0.22	6.16	0.027	0.45	5.61	2.71
元素	TFe	mFe	FeO	MnO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
含量/%	11.74	4.45	19.77	0.35	35.00	0.42	0.28
元素	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	F	S	ThO <sub>2</sub>	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
含量/%	2.08	0.39	2.35	0.029	0.0052		

表 2 东矿霓石型稀土矿石多元素分析结果

Table 2 Multi element analysis results of aegirine-type rare earth ore in the east mine

元素	REO	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	BaO
含量/%	6.9	0.14	4.24	0.61	0.28	11.33	6.04
元素	TFe	mFe	FeO	MnO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
含量/%	13.78	7.07	2.83	1.86	25.14	0.35	0.25
元素	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	F	S	ThO <sub>2</sub>	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
含量/%	2.86	6.11	0.46	0.058	0.015		

### 2.2 矿物定量分析

采用光学显微镜、场发射扫描电子显微镜(FESEM)、能谱(EDS)、自动矿物分析系统(AMCS-Mining)等手段相结合,对试样的矿物组成进行分析,主、东矿霓石型稀土矿石主要矿物定量分析结果分别见表 3、表 4。

表 3 主矿霓石型稀土矿石矿物组成

Table 3 Mineral composition of aegirine-type rare earth ore in the main ore

矿物名称	磁铁矿	赤铁矿	黄铁矿	磁黄铁矿	菱铁矿	钛铁矿	金红石	氟碳铈矿	氟碳钙铈矿	黄河矿
含量/%	6.64	3.16	4.35	0.20	0.01	0.56	0.03	5.80	0.89	1.39
矿物名称	独居石	褐帘石	易解石	铌铁矿	铌铁金红石	烧绿石	褐钇铌矿	包头矿	石英	长石
含量/%	3.59	0.02	0.30	0.01	0.06	0.09	0.01	0.03	0.87	0.04
矿物名称	闪石	辉石	云母	方解石	白云石	萤石	磷灰石	重晶石	其他	
含量/%	6.85	42.64	0.29	4.74	3.17	3.28	5.95	4.10	1.02	

表 4 东矿霓石型铌稀土铁矿石矿物组成

Table 4 Mineral composition of aegirine-type niobium rare earth iron ore in the east mine

矿物名称	磁铁矿	赤铁矿	黄铁矿	磁黄铁矿	菱铁矿	钛铁矿	金红石	氟碳铈矿	氟碳钙铈矿	黄河矿
含量/%	25.18	7.21	2.93	0.11	0.02	0.55	0.01	6.43	0.78	1.80
矿物名称	独居石	褐帘石	易解石	铌铁矿	烧绿石	包头矿	石英	铌铁金红石	褐钇铌矿	长石
含量/%	3.13	0.01	0.21	0.02	0.11	0.01	1.11	0.04	0.01	0.03
矿物名称	闪石	辉石	云母	方解石	白云石	萤石	磷灰石	重晶石	其他	
含量/%	4.29	24.09	0.36	3.65	2.94	3.60	6.29	4.01	0.98	

由表3、表4可知,主、东矿霓石型稀土矿石主要含辉石、铁矿物、稀土矿物、萤石、重晶石、磷灰石、闪石及碳酸盐矿物等。铁矿物主要为磁铁矿、赤铁矿和黄铁矿;稀土矿物主要为氟碳铈矿、独居石、氟碳钙铈矿和黄河矿;铌矿物以易解石和烧绿石为主,少量铌铁矿、铌铁金红石、包头矿及褐钇铌矿。易解石和烧绿石是白云鄂博主、东矿区内分布最为广泛的两种铌矿物。表中可见,主矿易解石的矿物含量高于东矿,烧绿石含量在主、东矿间无明显差异。

### 2.3 铌元素的赋存状态

白云鄂博矿区铌的矿化范围和富集程度与稀土元素大致相当,从工业利用的角度考虑,铁的矿化较铌和稀土范围小。但是它们的富集程度和地段是紧密相关的。一方面,铁矿物是它们共同富集的最佳地段;另一方面,它们可共同富集于一种矿物之中,如铌铁矿、铌铁金红石、易解石、褐钇铌矿和褐钇铌矿族等。但是,无论在铁矿体内或铁矿体外含铌稀土的矿石中,元素的富集程度是显著变化的。如同铁的富矿石、中贫矿石、夹石和围岩一样,铌和稀土的含量也有较大幅度的变化,甚至在铁矿体内外出现若干铌和稀土的富集带。

#### 2.3.1 铌的独立矿物

为了得到更加精确的数据,试验数据采用多点取平均值的方法,主要对主、东矿霓石型铁矿石中的主要铌矿物进行探讨。选取区内霓石型稀土矿石中具有代表性的铌矿物,包括铌铁矿、铌铁金红石、易解石和烧绿石进行偏光显微镜下观测和 FESEM 背散射电子图像、EDS 元素定量分析。

##### (1) 铌铁矿 $(Fe, Mn)(Nb, Ti, Ta)_2O_6$

铌铁矿的 FESEM 背散射电子图像如图 1 所示,能谱分析元素含量数据见表 5。铌铁矿是白云鄂博矿区分布较广泛的铌矿物之一。由于其锰含量变化大,有少数分析为铌锰矿。铌铁矿为斜方晶系,呈细小的板状、柱状和不规则粒状,粒度  $0.002 \sim 0.1 \text{ mm}$ 。一般呈

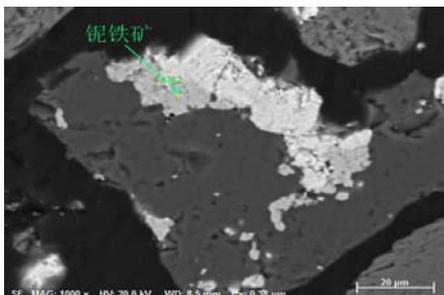


图 1 铌铁矿 FESEM 背散射电子图像  
Fig. 1 FESEM backscattered electron image of niobite

集合体,多呈星散状沿铁矿物、稀土矿物和萤石矿物组成的条带断续分布或嵌布在这些矿物的颗粒之间,部分呈包裹体出现在赤铁矿内部或呈细脉沿裂隙交代。颜色为黑色、红黑色,条痕为褐色。铌铁矿在各类型矿石中均有分布,其共生矿物有赤铁矿、萤石、重晶石、磷灰石、稀土矿物及铌铁金红石等。

表 5 铌铁矿能谱分析结果

Table 5 Energy spectrum analysis results of niobite

元素	Nb	O	Fe	Mn	Ti	Sc
含量/%	51.42	30.81	10.01	4.56	1.99	1.22

注:数据为多点能谱分析结果平均值。

##### (2) 铌铁金红石 $(Ti, Nb, Fe)O_2$

铌铁金红石的 FESEM 背散射电子图像如图 2 所示,能谱分析元素含量数据见表 6。铌铁金红石在矿区分布较广,该矿物为粒状集合体,粒径一般为  $0.005 \sim 0.04 \text{ mm}$ ,最小者仅  $0.002 \text{ mm}$ 。颜色往往随着五氧化二铌的含量增加而由浅变深,半金属光泽,条痕灰色。多呈不规则状集合体沿铁矿物、稀土矿物或脉石矿物颗粒间及边缘分布,部分呈细小粒状、针状包裹体出现,此外,也常见铌铁金红石与赤铁矿组成网脉状连晶。主要产在萤石较多的矿石中,尤以条带状铌稀土铁矿石中最为多见。其共生矿物有萤石、重晶石、氟碳铈矿、铌铁矿、黑云母、磁铁矿、霓石、磷灰石、独居石、烧绿石等。

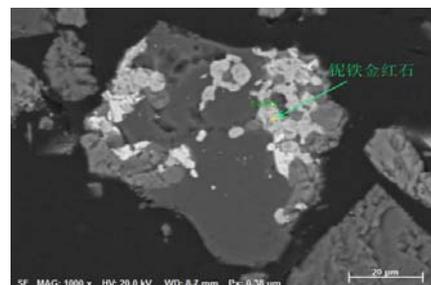


图 2 铌铁金红石 FESEM 背散射电子图像  
Fig. 2 FESEM backscattered electron image of ferroniobium rutile

表 6 铌铁金红石能谱分析结果

Table 6 Energy spectrum analysis results of ferroniobium rutile

元素	Nb	O	Ti	Fe
含量/%	39.79	25.35	17.89	16.97

注:数据为多点能谱分析结果平均值。

##### (3) 易解石 $(Ce, Nd)(Ti, Nb)_2O_5$

易解石的 FESEM 背散射电子图像如图 3 所示,能谱分析元素含量数据见表 7。易解石是白云鄂博矿中

最主要的含铈矿物<sup>[22-23]</sup>。该矿物为棕色或褐色,油脂光泽,半透明。具放射性。矿物晶体形态不一,多呈粒状、板状、针状。集合体多为不规则粒状、放射状、束状或团块状,零星分散于铁矿物、霓石、钠闪石和萤石等矿物颗粒间。粒度大小变化不定,小者粒径为0.05 mm,个别粒径可达1~2 cm。一般来说,易解石族矿是颗粒最大的铈矿物,最早被发现。易解石为分布最广的易解石族矿物。易解石和钽易解石是霓石型稀土矿石、霓石型铈稀土铁矿石、白云石型铈稀土矿石、白云石型铈稀土铁矿石以及块状铈稀土铁矿石和钠闪石型铈稀土矿石中主要的铈矿物之一。与其共生矿物有霓石、钠长石、稀土矿物和重晶石、萤石等。

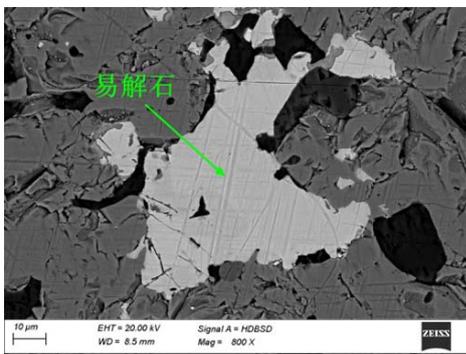


图3 易解石 FESEM 背散射电子图像  
Fig. 3 FESEM backscattered electron images of calcite

表7 易解石能谱分析结果

**Table 7** Energy spectrum analysis results of calcite

元素	O	Nb	Ti	Ca	Fe	Th	La	Ce
含量/%	22.49	27.89	12.78	1.52	1.46	2.39	2.19	5.04
元素	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y
含量/%	1.10	15.37	3.78	2.12	0.37	0.39	0.27	0.86

注:数据为多点能谱分析结果平均值。

(4) 烧绿石  $(Ca, Na, Ce)_2(Nb, Ti, Ta)_2O_6(F, OH)$

烧绿石的 FESEM 背散射电子图像如图 4 所示,能谱分析元素含量数据见表 8。烧绿石为铈铌的复杂氧化物。分布很普遍,与霓石型矿石关系密切,等轴粒状,有时可见呈八面体晶形,晶体内部通常较为浑浊。颜色为褐色或黄绿色,条痕淡褐或淡黄色。油脂-玻璃光泽,透明至半透明。通常呈不规则粒状或致密块状集合体,粒度 0.01~0.06 mm。在矿石中烧绿石多呈自形、半自形粒状零星嵌布在霓石、钠闪石、萤石等矿物颗粒间,部分呈包裹体分布在这些矿物内部,是霓石型稀土矿石、透辉石型铈矿石和白云石型铈稀土矿石中的主要铈矿物。

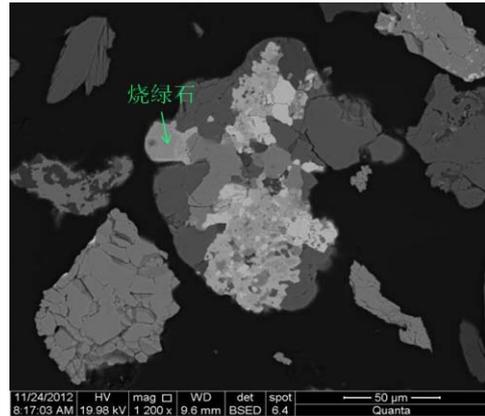


图4 烧绿石 FESEM 背散射电子图像  
Fig. 4 FESEM backscattered electron image of pyrochlore

表8 烧绿石能谱分析结果

**Table 8** Energy spectrum analysis results of pyrochlore

元素	O	Nb	Ti	Ca	Fe	F	Na
含量/%	21.89	45.60	1.45	11.17	1.29	3.50	5.12

注:数据为多点能谱分析结果平均值。

2.3.2 铈元素的存在形式

为查明铈元素在霓石型稀土矿石中的赋存状态,采用偏光显微镜、扫描电镜及能谱观测,对组成矿物进行了大量的测试分析,得出铈元素的赋存形式有两种:(1)主要以独立矿物的形式存在,铈元素载体矿物主要为易解石、铈铁矿、铈铁金红石、烧绿石、包头矿等;(2)少量以类质同象的形式赋存于其它矿物中。

白云鄂博迄今为止发现的铈矿物共有 7 个族 20 种,除包头矿系含铈的铁和钛的硅酸盐外,其余均为氧化物矿物。易解石族矿物和包头矿颗粒粗大,肉眼可见,烧绿石有时呈较大的晶体或细粒集合体外,其余铈矿物均呈细小颗粒产出,肉眼难以辨认。

霓石型稀土矿石中铈元素主要赋存于易解石、铈铁矿、铈铁金红石、烧绿石、包头矿中,在以上几种矿物中的累计分布率一般达到 80% 以上,其中易解石和烧绿石为最主要的两种载体矿物。铈元素在铈矿物中的分布率大小为:易解石 > 烧绿石 > 铈铁矿 > 铈铁金红石 > 其他稀土矿物。其余 20%  $Nb_2O_5$  分散在其它矿物中,其中部分为类质同象形式进入矿物晶格,另一部分可能以细小铈矿物包裹体存在。

2.4 铈元素在矿物中的分布特征

利用矿物定量分析数据及纯矿物的稀土含量及元素平衡计算铈元素在铈矿物及非(含)铈矿物中的分布率,结果见表 9。

表9 主、东矿霓石型稀土矿中 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 平衡计算结果 /%  
Table 9 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> equilibrium calculation results in aegirine - type rare earth ore of main and East mines

矿物	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	主矿			东矿		
		矿物含量	分布量	分布率	矿物含量	分布量	分布率
磁铁矿	0.0555	6.64	0.3685	1.89	25.18	1.3975	7.48
赤铁矿	0.0510	3.16	0.1612	0.82	7.21	0.3677	1.97
黄铁矿、 磁黄铁矿	0.0150	4.55	0.0683	0.35	3.04	0.0456	0.24
氟碳铈矿、 氟碳钙铈矿	0.0220	6.69	0.1472	0.75	7.21	0.1586	0.85
黄河矿	0.0047	1.39	0.0065	0.03	1.80	0.0085	0.05
独居石	0.0210	3.59	0.0754	0.39	3.13	0.0657	0.35
易解石	27.8950	0.30	8.3685	42.83	0.21	5.8580	31.34
铌铁矿	73.7200	0.01	0.7372	3.77	0.02	1.4744	7.89
铌铁金红石	12.7500	0.06	0.7650	3.92	0.04	0.5100	2.73
烧绿石	63.1000	0.09	5.6790	29.06	0.11	6.9410	37.14
包头矿	20.8300	0.03	0.6249	3.20	0.01	0.2083	1.11
闪石	0.2070	6.85	1.4180	7.26	4.29	0.8880	4.75
辉石	0.0200	42.64	0.8528	4.36	24.09	0.4818	2.58
云母	0.0440	0.29	0.0128	0.07	0.36	0.0158	0.08
方解石、 白云石	0.0022	7.91	0.0174	0.09	6.59	0.0145	0.08
萤石	0.0160	3.28	0.0525	0.27	3.60	0.0576	0.31
磷灰石	0.0290	5.95	0.1726	0.88	6.29	0.1824	0.98
重晶石	0.0027	4.10	0.0111	0.06	4.01	0.0108	0.06

注：表中各矿物 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 数据源于文献<sup>[15]</sup>。

结果表明,主、东矿霓石型稀土矿中铌元素主要存在于易解石和烧绿石中,其次在铌铁矿、铌铁金红石及包头矿等铌矿物中。主、东矿霓石型稀土矿中铌在易解石及烧绿石中分布率合计分别为 71.89%、68.48%,普遍高于铌铁矿、铌铁金红石等其他铌矿物。

主矿中有 82.78% 铌元素赋存于铌矿物中。有部分(17.22%)铌元素以类质同象置换或以细小铌矿物机械包裹体分散在铁矿物、含铁硅酸盐矿物、稀土矿物和萤石、磷灰石等其它矿物中。共有 3.06% 铌赋存于铁矿物中,有 11.69% 铌赋存于含铁硅酸盐中,有 1.25% 铌赋存于稀土矿物中,有 0.88% 铌赋存于磷灰石中,有 0.27% 铌赋存于萤石中。

东矿中有 80.21% 铌元素赋存于铌矿物中。有 19.79% 铌元素以类质同象置换或以细小铌矿物机械包裹体分散在其它非铌矿物中。其中,有 9.69% 铌赋存于铁矿物中,有 7.41% 铌赋存于含铁硅酸盐中,有 1.17% 铌赋存于稀土矿物中,有 0.98% 铌赋存于磷灰石中,有 0.31% 铌赋存于萤石中。

### 3 结论

(1)主、东矿霓石型稀土矿中稀土品位分别为 8.67% 和 6.9%,铌的品位(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)分别为 0.22% 和 0.14%,在此类型矿石中,主矿铌品位高于东矿。

(2)白云鄂博主、东矿霓石型稀土矿石中分布最为广泛的两种铌矿物为易解石和烧绿石,另外还有少量铌铁矿、铌铁金红石、包头矿及褐钇铌矿。主矿易解石的矿物含量高于东矿,烧绿石含量在主、东矿间无明显变化。铌矿物总含量≤0.5%,属于稀有矿物。

(3)白云鄂博主、东矿霓石型稀土矿石中铌元素主要以独立矿物形式存在于易解石、铌铁矿、铌铁金红石、烧绿石及包头矿等铌矿物中。主、东矿中分别有 82.78%、80.21% 铌赋存于铌矿物中。其中,易解石、烧绿石中铌元素分布率普遍高于铌铁矿、铌铁金红石等其他铌矿物。此外,有部分(约占 20%)铌元素以类质同象置换或以细小铌矿物机械包裹体分散在铁矿物、含铁硅酸盐矿物、稀土矿物和萤石、磷灰石等其它矿物中。

(4)由于白云鄂博霓石型稀土矿石中铌品位低,铌矿物嵌布粒度细,嵌布关系紧密而复杂,欲得到较高品位的铌精矿,首先要保证铌矿物解离度,这对磨矿细度要求较高,但高的磨矿细度会不可避免地出现过粉碎现象,在选矿过程中,一些细粒级的铌矿物流失在尾矿中,同时泥化现象也会给浮选带来不利。另外,由于铌矿物的种类多,主要含铌矿物的物理化学性质不尽相同,可选性差异大,铌矿物与其它脉石矿物之间共生关系密切,可选性差异小,选矿的难度较大。建议采用阶段磨矿阶段选别流程,选别方法以浮选为主,联合重选、磁选和化学选矿。此外,在浮选过程中研究各种铌矿物及主要伴生脉石矿物的浮游性,研制和筛选对几种铌矿物共同有效的捕收剂,同时加强对含铁硅酸盐矿物及萤石抑制剂的研究。

#### 参考文献:

- [1] CHAKHMOUEADIAN A R, SMITH M P, KYNICKY J. From "strategic" tungsten to "green" neodymium: A century of critical metals at a glance[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 64: 455 - 458.
- [2] 蒋少涌,温汉捷,许成,等.关键金属元素的多圈层循环与富集机理:主要科学问题及未来研究方向[J].中国科学基金,2019(33):112 - 118.
- [3] 翟明国,吴福元,胡瑞忠,等.战略性关键金属矿产资源:现状与问题[J].中国科学基金,2019(33):106 - 111.
- [4] MACKAY DAR, SIMANDL GJ. Geology, market and supply chain of niobium and tantalum - a review[J]. Mineralium Deposita, 2014. 49(8): 1025 - 1047.
- [5] MITCHELL RH. Primary and secondary niobium mineral deposits associated with carbonatites[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 64: 626 - 641.
- [6] 郑路,顾雪祥,章永梅,等.安哥拉 Huila 省 Bonga 碳酸岩型铌矿床烧绿石地球化学组成、演化及其与岩浆-热液作用过程的关系.地质

- 前缘,2014,21(5):69 - 89.
- [7] 于秀兰,刘嘉,王之昌.包钢选矿厂尾矿综合利用进展[J].矿产综合利用,2007(3):32 - 34.
- [8] 程建忠,侯运炳,车丽萍.白云鄂博矿床稀土资源的合理开发及综合利用[J].稀土,2007,28(1):70 - 74.
- [9] 何海洋,何敏,李建武.我国铌资源供需形势分析[J].中国矿业,2018,27(11):1 - 5.
- [10] 王维维,杨占峰,候少春,等.白云鄂博铌资源特征及开发利用新进展[J].矿产保护与利用,2020(11):49 - 53.
- [11] 王建英,文登学,贾艳.白云鄂博稀选尾矿中铌的回收试验[J].矿产综合利用,2019(3):121 - 126.
- [12] 张轰玉,杨占峰,焦登铭,等.白云鄂博主矿萤石型铌稀土铁矿石中铌在独立矿物中的富集状态和分布规律研究[J].有色金属(选矿部分),2020(1):6 - 12.
- [13] 侯晓志,杨占峰,王振江,等.白云鄂博萤石型铁矿石中铌的赋存状态及分布规律研究[J].中国稀土学报,2018,36(3):365 - 371.
- [14] 侯晓志,杨占峰,王振江,等.白云鄂博萤石型母型矿石中铌的赋存状态及分布规律研究[J].中国稀土学报,2018,36(5):633 - 640.
- [15] 张国忠.白云鄂博矿冶工艺学(上)[M].包头:包钢钢铁集团科技处,1995.
- [16] FRANDRICH, GU Y, BURROWS D, et al. Modern SEM - based mineral liberation analysis[J]. International Journal of Mineral Processing, 2007, 84: 310 - 320.
- [17] GU Y. Automated scanning electron microscope based mineral liberation analysis[J]. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2003(2): 33 - 41.
- [18] 王绍华,杨占峰,王振江.白云鄂博尾矿中铌、稀土的赋存状态研究[J].有色金属工程,2019,9(11):60 - 66.
- [19] 刘牡丹,刘勇,刘珍珍.复杂稀有金属伴生矿资源的综合利用现状[J].稀有金属与硬质合金,2015,43(6):24 - 27.
- [20] 徐广尧.包头铌资源综合利用关键技术研究[C]//2007年中国稀土资源综合利用与环境保护研讨会论文集.海口:中国稀土学会地选专业委员会,2007:16 - 21.
- [21] 张培善,杨志明,陶克捷.我国铌钽稀土矿物学及工业利用[J].稀有金属,2005,29(2):206 - 210.
- [22] 杨志明,宋仁奎,陶克捷,等.易解石族矿物的稀土成分变化特征[J].中国稀土学报,2003,21(6):716 - 720.
- [23] BAMB I A C J M, COSTANZO A, GONCALVES A O, et al. Tracing the chemical evolution of primary pyrochlore from plutonic to volcanic carbonatites: the role of fluorine[J]. Mineralogical Magazine, 2012, 76(2): 377 - 392.

## Occurrence and Distribution of Niobium in Aegirine - type Rare Earth Ore in Bayan Obo Mine

QIN Yufang, WANG Qiwei, JIN Hailong, LI Na

State Key Laboratory of Baiyun Obo Rare Earth Resources Researchs and Comprehensive Utilization, Baotou Research Institute of Rare Earths, Baotou 014030, China

**Abstract:** The occurrence and distribution of niobium in the aegirine - type rare earth ore in the main and east mines of Bayan Obo deposit were systematically analyzed by means of multi element analysis, Polarizing microscope, field emission scanning electron microscope, micro area energy spectrum analysis and AMICS automatic mineral analysis system. The results show that the grade of niobium ( $Nb_2O_5$ ) in the aegirine - type rare earth ore in the main and east mines is 0.22% and 0.14% respectively, and the grade of niobium in the main ore is higher than that in the east ore. There are 82.78% and 80.21% of Nb in the aegirine - type rare earth ore of the main and east ores respectively in the form of independent minerals, such as calcite, niobite, ferroniobium rutile, pyrochlore and Baotou ore. The two niobium minerals, mainly calcite and pyrochlore, are the most widely distributed in the aegirine - type rare earth ore of the main and east mines of Bayan Obo deposit, in which the distribution rate of niobium element is generally higher than that of niobite, ferroniobium rutile and other niobium minerals. The mineral content of calcite in the main ore is higher than that in the east ore, and there is no obvious change in pyrochlore content between the main ore and the east ore. According to the above research results, it is suggested to adopt the stage grinding stage separation process of gravity separation, magnetic separation, flotation and chemical separation.

**Key words:** Bayan Obo ore; aegirine - type rare earth ore; niobium; occurrence state; distribution law

引用格式:秦玉芳,王其伟,金海龙,李娜.白云鄂博萤石型稀土矿石中铌的赋存状态与分布规律研究[J].矿产保护与利用,2021,41(3):144 - 149.

Qin YF, Wang QW, Jin HL, and Li N. Occurrence and distribution of niobium in aegirine - type rare earth ore in Bayan Obo mine [J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2021, 41(3): 144 - 149.