

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2020.01.002

白云鄂博主矿霓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

张轰玉¹, 杨占峰^{1,2,3}, 焦登铭¹, 王振江^{2,3}

(1. 内蒙古科技大学 矿业研究院, 内蒙古 包头 014010; 2. 包头稀土研究院, 内蒙古 包头 014010; 3. 白云鄂博稀土资源研究与综合利用国家重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

摘要:运用化学分析、扫描电子显微镜、X射线能谱仪及自动矿物分析系统等分析方法对白云鄂博矿床主矿霓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进行研究, 研究表明, 主矿霓石型铌稀土铁矿石中稀土品位为 9.1%, 以氟碳铈矿和独居石为主, 且二者比例约为 2:1, 元素以轻稀土元素为主; 铌品位高达 0.27%, 铌矿物主要有易解石、烧绿石、铌铁金红石、铌铁矿和褐钨铌矿, 五种矿物中易解石含量最高为 0.30%; 铌独立矿物的赋存状态主要以细粒及微细粒包裹体存在于其他矿物中; 铌铁矿中铌元素质量占比最高, 最大可达 54.53%, 易解石中铌元素分布率最高为 31.80%, 五种铌矿物含铌量之和占该类矿石中铌总量的 80.59%。

关键词:白云鄂博; 霓石型铌稀土铁矿石; 铌; 分布规律; 富集状态

中图分类号:TD91 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-9492(2020)01-0006-07

Distribution Regularity and Enrichment State of Niobium in Independent Minerals in Aegirine-Type Niobium Rare Earth Iron Ore in Bayan Obo Main Mine

ZHANG Hongyu¹, YANG Zhanfeng^{1,2,3}, JIAO Dengming¹, WANG Zhenjiang^{2,3}

(1. Mining Research Institute, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia 014010, China;

2. Baotou Rare Earth Research Institute, Baotou Inner Mongolia 014010, China;

3. State Key Laboratory for Research and Comprehensive Utilization of Rare Earth Resources in Bayan Obo, Baotou Inner Mongolia 014010, China)

Abstract: Chemical analysis, scanning electron microscopy, X-ray energy dispersive spectrometer, and automatic mineral analysis system were used to study the distribution regularity and enrichment state of niobium in independent minerals in Aegirine-Type niobium-rare earth iron ore in Bayan Obo Main Mine, and the results show that the grade of rare earth in aegirine-type niobium-rare earth iron ore is 9.1%, the rare earth minerals are mainly bastnasite and monazite, and the ratio is about 2:1; the main elements are light rare earth elements; the grade of niobium is as high as 0.27%, the main niobium minerals are aeschynite, pyrochlore, nigrine, niobite and fergusonite, the highest content of aeschynite is 0.30% in the five minerals, and the occurrence state of niobium independent minerals mainly consists of fine and fine inclusions in other minerals; the mass ratio of niobium in niobite is the highest, up to 54.53%, the distribution rate of niobium in aeschynite is the highest, up to 31.80%, and the total niobium content of the five kinds of niobium minerals accounts for 80.59% of the total niobium content in this kind of ore.

Key words: Bayan Obo; aegirine-type niobium-rare earth iron ore; niobium; distribution regularity; enrichment state

白云鄂博矿是以铁、稀土、铌为主的复杂多金属 共生的巨型矿床, 铌储量占全国总量的 90% 以

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目(2012CBA01200)

收稿日期: 2019-05-26

作者简介: 张轰玉(1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事稀有金属资源综合利用。

上^[1-4]。到目前为止白云鄂博铌资源也未得到充分有效的利用,随尾矿直接排到尾矿库^[5-7]。白云鄂博尾矿库自1963年建成以来中途经加高扩容改造总容量达到亿立方米级,矿量之大致使其地位不可小觑,但大量铌资源残存于废弃的尾矿库,尾矿库中的有用矿物已经可以堪比白云鄂博矿床的含量,被称“人造稀土-铌矿”,是铌等资源的战略储备库。经济、合理、有效地采用新工艺利用白云鄂博矿中的铌资源不仅可以解决尾矿库尾矿综合利用的难题,还对提高我国矿产的资源利用具有重大意义^[8-10]。白云鄂博矿床铌的矿物种类多、嵌布粒度细、品位低,给选矿回收铌带来困难^[11],同时随着主矿开采深度的增加,对矿床深部不同类型铁矿石中铌元素的分布规律和赋存状态研究还不够充分,也制约了铌资源的开发利用。目前对于白云鄂博矿床铌的研究多以铌提取工艺为主^[12-14],铌元素在原生矿石中的赋存状态和分布规律却鲜有报道,因此查明白云鄂博矿不同类型矿石中铌的分布规律具有重要意义。为合理利用资源,在前人研究^[15-18]的基础上,采用化学分析、扫描电子显微镜、X射线能谱仪及自动矿物分析系统等分析方法对白云鄂博矿床主矿霓石型铌稀土铁矿石中铌元素在独立矿物中的富集状态和分布规律进行研究,不仅对成矿规律和矿床成因的研究有指导价值,同时还可以促进资源的合理高效利用,为白云鄂博铌资源的开发利用提供一定的理论依据。

1 样品和试验

1.1 样品采集及制备

本次矿样采集于主矿区范围内,以台阶为采集梯度,结合现场勘察和矿石在矿体中的分布以及生产勘探线确定取样中心点,对正在进行作业的采掘台阶进行重点采样。确定以50 m左右为间距布置采样点,在采样点中心的15 m范围内,采用网格取样法

表1 主矿霓石型铌稀土铁矿石多元素分析结果

成分	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	BaO	SiO ₂	TiO ₂	FeO	Sc ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	La ₂ O ₃	CeO ₂	Pr ₂ O ₃
含量	2.95	0.066	1.02	13.2	4.06	14.62	0.72	8.37	0.011	0.029	2.67	4.60	0.42
成分	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Eu ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Tb ₂ O ₃	Dy ₂ O ₃	P ₂ O ₅	F	S	TFe	磁铁矿	REO	Nb ₂ O ₅
含量	1.22	0.094	0.018	0.047	0.000 4	0.001	3.64	3.39	2.38	29.19	17.06	9.10	0.27

2.2 样品的矿物组成分析

由自动矿物分析软件得到样品中主要矿物组成及含量表2。从矿物组成来看,霓石型铌稀土铁矿石中铁矿物主要是磁铁矿、赤铁矿,脉石矿物主要是辉石、闪石、方解石、白云石、磷灰石、重晶石等,其他矿

进行采样,单个样品直径控制在40~60 mm,每个采样点重量控制在10 kg以内,采样点覆盖整个主矿采场范围。最后对满足要求的样品进行中、细破碎、混匀、缩分出最终样品,用研磨机磨至25~150 μm,再次进行混合、缩分出样品100 g一分为二,一份用于化学分析、另一份用冷镶制样机制备成镶嵌样用于场发射扫描电镜、能谱仪及自动矿物分析系统测试。

1.2 实验

用化学滴定法结合数据计算测定样品中FeO、TFe、磁性铁的含量,分光光度法测定SiO₂、P₂O₅, F、S用高频红外碳硫仪测定,Na₂O和K₂O用原子吸收光谱仪测定,Sc₂O₃、Tb₂O₃和Dy₂O₃用电感耦合等离子体质谱仪测定,MgO、CaO、BaO、TiO₂、Y₂O₃、La₂O₃、CeO₂、Pr₂O₃、Nd₂O₃、Sm₂O₃、Eu₂O₃、Gd₂O₃用电感耦合等离子体发射光谱仪测定,Nb₂O₅和REO用ICP-AES测得。

镶嵌样表面喷镀铂金后,采用Sigma-500型场发射扫描电子显微镜对矿物进行背散射电子图像分析,以及BRUKER XFlash6160型能谱仪对镶嵌样进行微区能谱分析,并结合(AMICS)自动矿物分析系统得出样品矿物组成及含量。

2 结果讨论

2.1 样品的化学成分

样品的多元素分析结果见表1。由检测数据可以得出石型霓铌稀土铁矿石中铁含量相对较高,全铁为29.19%,磁性铁为17.06%,SiO₂含量为14.62%,稀土总品位达到9.10%,以镧(La)、铈(Ce)、镨(Pr)、钕(Nd)、钐(Sm)、铕(Eu)轻稀土元素为主,含量占稀土总量的绝大部分,目标元素铌的品位为0.27%,样品中的稀土、铌的含量略高于白云鄂博矿区的平均含量,铁的含量相对偏低,按铁和稀土的含量可以划分为高稀土中低品位铁矿石。

物含量不多,多以伴生矿物硅酸盐类、碳酸盐类等脉石矿物为主,但是矿物种类比较多。稀土矿物主要以氟碳铈矿和独居石为主,氟碳铈矿含量占矿石总量6.43%、独居石占3.13%,两矿物比例约为2:1;铌矿物主要有易解石、烧绿石、铌铁金红石、铌铁矿、

褐钇铌矿分别占总量的 0.30%、0.11%、0.04%、0.02%、0.01%。由此可知霓石型铌稀土铁矿石中含铌最主要的矿物为易解石和烧绿石,其次是铌铁矿

金红石、铌铁矿和褐钇铌矿,同时这几种都是具有工业价值的铌矿物,因此本文主要研究这几种含铌矿物。

表 2 主矿霓石型铌稀土铁矿石中矿物组成及含量

Table 2 Mineral composition and content of main ore of aegirine niobium type rare earth iron ore /%

矿物	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
含量	25.18	7.21	2.93	0.11	0.02	0.55	0.01	6.43	0.78
矿物	独居石	褐帘石	易解石	包头矿	铌铁矿	铌铁金红石	烧绿石	褐钇铌矿	
含量	3.13	0.01	0.30	0.01	0.02	0.04	0.11	0.01	
矿物	黄河矿	闪石	辉石	萤石	云母	方解石	白云石	磷灰石	重晶石
含量	1.80	4.29	24.09	3.60	0.36	3.65	2.94	6.29	4.01
矿物	石英	长石	其他						
含量	1.11	0.03	0.98						

2.3 铌矿物的产出特征和能谱分析

筛选出具有代表性的样品进行场发射扫描电镜背散射电子图像及 EDS 分析,通过背散射电子图得出五种铌矿物的产出特征,为了数据可靠,能谱分析选取易解石、烧绿石、铌铁金红石、铌铁矿、褐钇铌五种铌矿物的不同区域进行取均值后得出元素含量。

在所有类型矿石中都有易解石的存在,较广泛地分布于霓石型铌稀土铁矿石和其他矿石中,大部分以连生体的形式存在,主要与萤石(图 1a)连生,少量与钠角闪石、霓石、钠长石、金云母、黄铁矿及稀土矿物(氟碳铈矿、独居石)等共生。易解石背散射电子图像和微区能谱见图 1b,能谱分析结果见表 3。由能谱分析结果得出易解石铌元素含量为 28.62%,同时易解石作为稀土矿物稀土含量也较高,以轻稀土元素为主。

2.3.1 易解石

易解石是本样品中的主要含铌矿物,种类也比较多,易解石类含铌矿物主要为易解石和铌易解石,

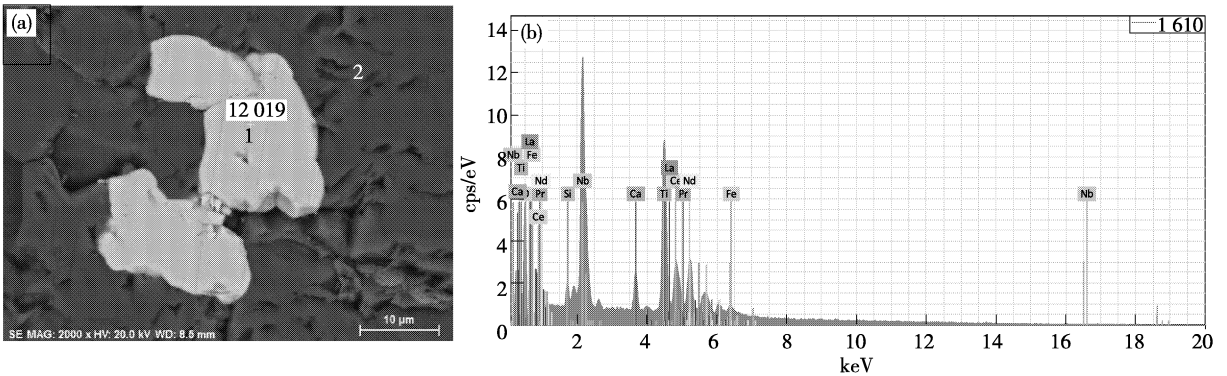


图 1 a. 易解石(1)与萤石(2)连生; b. 易解石能谱分析图

Fig. 1 a. Aeschnyrite(1) associated with fluorite(2); b. Energy dispersive spectrometer analysis of aeschnyrite

表 3 易解石能谱分析结果

Table 3 Energy dispersive spectrometer analysis results of aeschnyrite /%

元素	La	Ce	Pr	Nd	Ti	Fe	O	Nb
1	2.35	5.65	1.37	15.38	13.25	1.33	22.50	27.35
2	2.43	4.23	1.86	15.30	12.20	1.25	22.85	30.81
3	2.23	5.54	1.15	15.85	13.37	1.10	23.19	27.68
4	1.98	4.01	0.78	14.84	11.72	1.94	21.78	28.64
平均值	2.25	4.86	1.29	15.34	12.63	1.41	22.58	28.62

2.3.2 烧绿石

烧绿石含量较少,基本上以连生体方式出现,主要与霓石、萤石连生,其次与闪石、氟碳铈矿(图 2)连生,还有少量与磁铁矿、磷灰石、方解石及独居石、易解石、铌铁矿等连生。烧绿石背散射电子图像和微区能谱见图 2b,能谱分析结果见表 4。由分析数据可以得出烧绿石中铌元素的占比相对易解石较大,达到 38%以上。

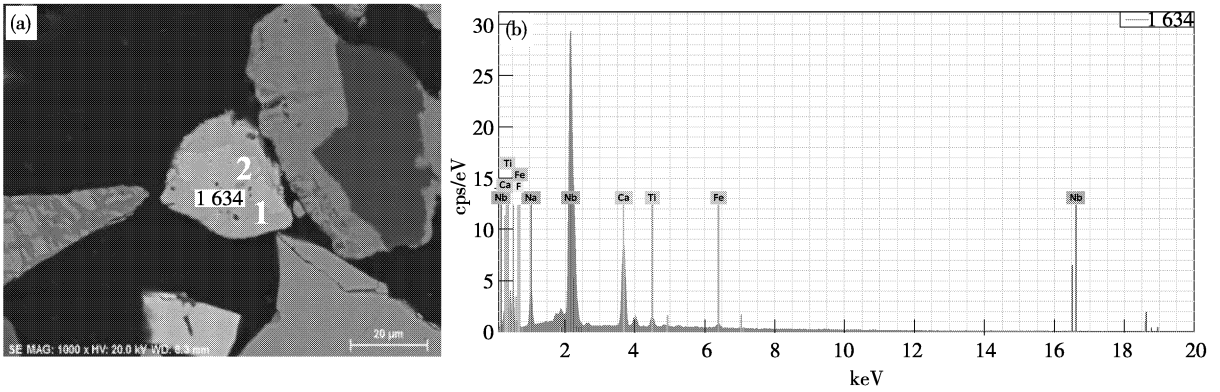


图 2 a. 烧绿石(1)与氟碳铈矿(2)连生;b. 烧绿石能谱分析图

Fig. 2 a. Pyrochlore (1) associated with Bastnaesit-(Ce)(2); b. Energy dispersive spectrometer analysis of pyrochlore

表 4 烧绿石能谱分析结果

Table 4 Energy spectrum analysis results of pyrochlore

元素	F	O	Nb	Ca	Na	Ti	Fe
1	3.40	22.88	36.43	12.62	5.42	1.78	1.17
2	3.35	21.64	41.54	11.02	4.69	1.66	1.36
3	3.65	22.13	40.76	11.32	5.54	1.23	1.23
4	4.02	20.64	34.45	10.68	4.85	1.54	1.47
平均值	3.61	21.82	38.29	11.41	5.13	1.55	1.31

2.3.3 铌铁金红石

铌铁金红石含量相对较少,大部分以连生体方式出现,多呈粒状,粒径一般为 10~200 μm 不等,常与萤石、稀土矿物(图 3)等共生。铌铁金红石背散射电子图像和微区能谱见分析图 3b,能谱分析结果见表 5,由分析数据可以得出铌元素的含量占比在

10%左右,相比烧绿石和易解石两种铌矿物含量偏低,特有元素钛含量较高为 48%左右,为金红石产出特征。

2.3.4 铌铁矿

铌铁矿是铁矿石的连生矿物,铌铁矿的粒度较细,多成粒状,呈浸染、星散型分布于大部分铁矿物中和其它矿物中,矿物共生关系复杂,镶嵌十分紧密。铌铁矿的矿物含量相对来说较低,但矿物中铌的含量相对较高,是高炉还原提取铌的主要矿物原料。铌铁矿背散射电子图像和微区能谱见分析图 4b,能谱分析结果见表 6,由分析数据可以得出铌元素的含量占比非常高为 53%左右,相比烧绿石、易解石和铌铁金红石三种铌矿物含量高很多,是主要的含铌矿物。

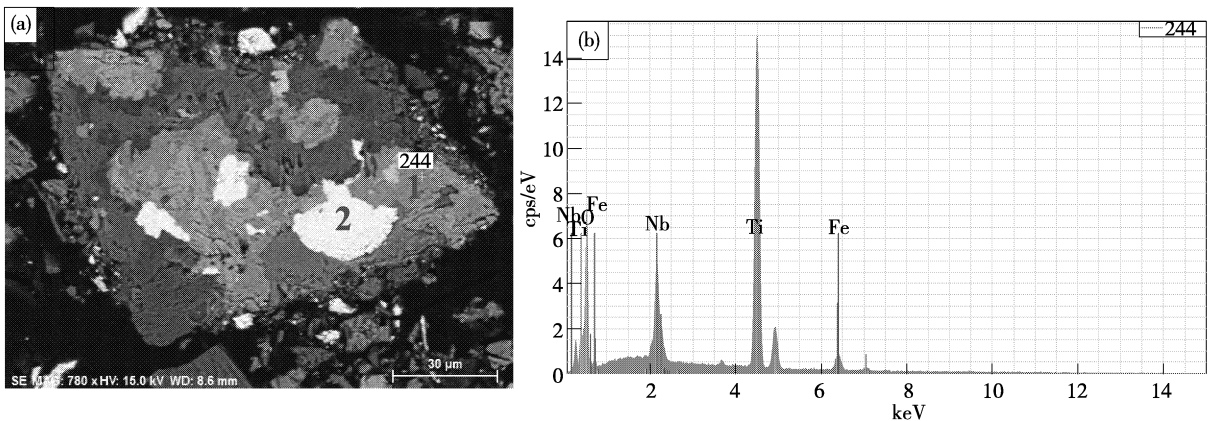


图 3 a. 铌铁金红石(1)与独居石(2)连生;b. 铌铁金红石能谱分析图

Fig. 3 a. Ilmenorutile (1) associated with monazite (2); b. Energy dispersive spectrometer analysis of ilmenorutile

表 5 铌铁金红石能谱分析结果

元素	Fe	O	Nb	Ti
1	5.61	33.07	9.16	48.25
2	6.11	34.47	10.15	49.27
3	5.84	32.54	11.62	47.53
4	5.91	33.34	9.64	48.58
平均值	5.87	33.36	10.14	48.41

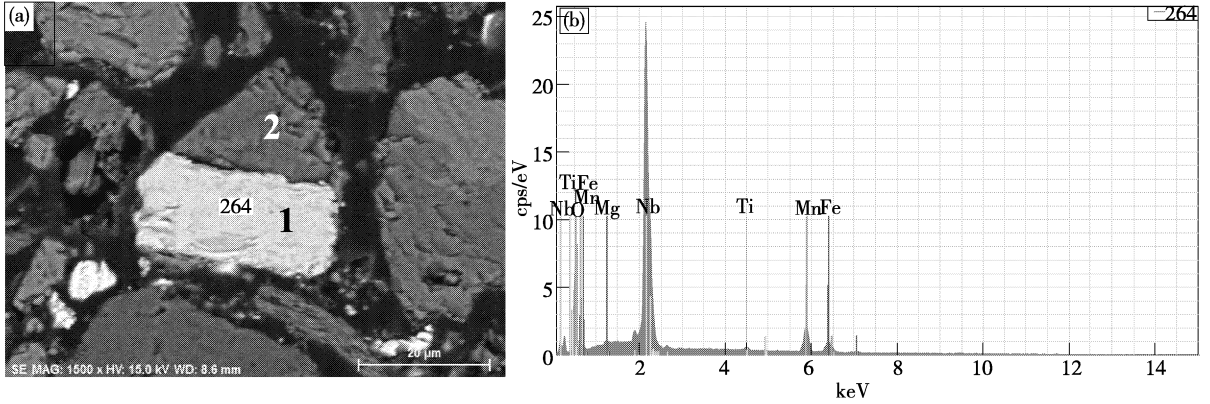


图 4 a. 铌铁矿(1)与铁矿物(2)连生;b. 铌铁矿能谱分析图

Fig. 4 a. Niobite (1) associated with iron mineral (2); b. Energy dispersive spectrometer analysis of niobite

表 6 铌铁矿能谱分析结果

元素	Fe	O	Nb	Ti	Mn
1	6.29	22.38	54.53	1.04	15.38
2	6.35	21.57	52.34	1.24	14.65
3	5.96	22.63	53.16	1.14	15.16
4	6.18	20.84	52.47	1.08	14.95
平均值	6.19	21.86	53.13	1.13	15.04

矿物出现,属于稀土铌酸盐矿物,通常为粒状集合体包裹与其它矿物中,伴生矿物较多,常与稀土矿物(独居石、氟碳铈矿)、金云母、烧绿石、闪石等矿物伴生。褐钇铌矿背散射电子图像和微区能谱见分析图5b,能谱分析结果见表7,由检测数据可以看出褐钇铌矿中铌元素含量较高为35%左右,相比于铌铁矿和烧绿石含量偏低,特有元素钇含量相对较高为20%左右。

2.3.5 褐钇铌矿

褐钇铌矿含量较少,种类比较多,基本上以连生

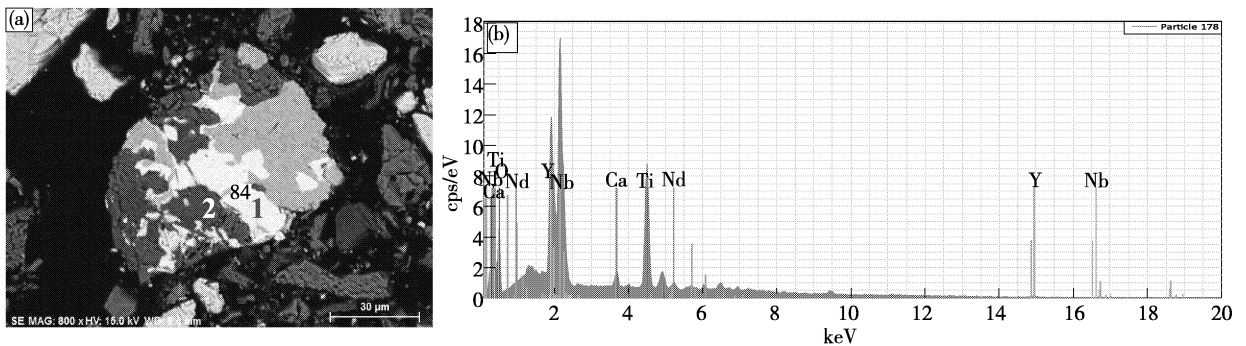


图 5 a. 褐钇铌矿(1)与闪石(2)连生;b. 褐钇铌矿能谱分析图

Fig. 5 a. Fergusonite (1) associated with amphibole (2); b. Energy dispersive spectrometer analysis of fergusonite

表7 褐钇铌矿能谱分析结果

元素	Nd	O	Nb	Ti	Y
1	3.28	6.68	34.85	18.01	27.73
2	3.54	6.43	35.67	19.33	26.75
3	3.67	6.28	33.73	20.45	25.68
4	3.19	6.37	36.48	21.54	26.76
平均值	3.42	6.44	35.18	19.83	26.73

2.4 铌矿物赋存状态

各种矿物中都星散存在着铌矿物的微细粒包裹体,铌矿物的赋存状态主要以细粒及微细粒包裹体存在于其它矿物中。在铁矿物、稀土矿物、硅酸盐矿物中的铌矿物主要为细粒包裹体;而在萤石、碳酸盐、重晶石、石英中,主要以微细粒铌矿物包裹体存在。

2.5 铌元素的分布规律

综合上述实验和检测结果得出白云鄂博主矿霓石型铌稀土铁矿石中铌矿物及铌元素分配结果见表8,铌平均含量由多次能谱分析结果取均值得出,铌元素总含量由分子式及 Nb_2O_5 含量推算得出,各类铌矿物在矿物中的占比见表2。

表8 铌元素在铌矿物中的分配计算结果

矿物	铌元素 平均值	矿物 含量	矿物 Nb 总含量	铌的 分布率
易解石	28.62	0.30		47.10
烧绿石	38.29	0.11		23.39
铌铁金红石	10.14	0.04	0.18	2.25
铌铁矿	53.13	0.02		5.90
褐钇铌矿	35.18	0.01		1.95
总计				80.59

由计算结果可以明显看出各矿物中铌元素的平均含量大小关系为 $53.13\% > 38.29\% > 35.18\% > 28.62\% > 10.14\%$,即铌铁矿 > 烧绿石 > 褐钇铌矿 > 易解石 > 铌铁金红石,铌铁矿中铌元素质量占比最高达 54.53% ;铌元素分布率大小关系为 $31.80\% > 15.60\% > 3.94\% > 1.50\% > 1.30\%$,即易解石 > 烧绿石 > 铌铁矿 > 铌铁金红石 > 褐钇铌矿。五种铌矿物含铌量之和占该类矿石中铌总量的 80.59% 。

3 结论

1)主矿霓石型铌稀土铁矿石中铁含量较高,铌品位 0.27% ,比白云鄂博矿区铌平均品位高,稀土品位 9.10% ,稀土元素以轻稀土为主,稀土矿物以氟碳铈矿和独居石为主,比例约为 $2:1$ 。

2)主矿该类矿石中铌矿物主要有易解石、烧绿石、铌铁金红石、铌铁矿和褐钇铌矿,五种矿物中易解石含量最高为 0.30% 。

3)矿石中铌矿物的赋存状态主要以细粒及微细粒包裹体存在于其它矿物中。在铁矿物、稀土矿物、硅酸盐矿物中的铌矿物主要以细包裹体存在;而在萤石、碳酸盐、重晶石、石英中,主要以微细粒铌矿物包裹体存在。

4)该类矿石所包含的五种铌矿物铌元素质量占比大小关系为:铌铁矿 > 烧绿石 > 褐钇铌矿 > 易解石 > 铌铁金红石,铌铁矿中质量占比最高,最大可达 54.53% ,铌元素分布率大小关系为:易解石 > 烧绿石 > 铌铁矿 > 铌铁金红石 > 褐钇铌矿,易解石中元素分布率最高为 47.10% 。五种铌矿物含铌量之和占该类矿石中铌总量的 80.59% 。

5)铌矿物分选难度大,较大程度是由于对铌矿物磨矿细度的把控颇具难度,铌矿物本身粒度微小,过细的磨矿细度会因为泥化导致分选困难;其次铌矿物赋存形式复杂,未经有效回收就进入尾矿,降低了回收率。因此,为提高铌矿石选矿指标,推荐采用阶段磨矿阶段选别结合重选—浮选—磁选—湿法冶金联合流程进行矿物分离。为了对铌资源进行科学高效利用,研发新的工艺、技术、设备等才能实现矿物有效地回收,提高铌矿物资源的综合利用水平。

参考文献

- [1]余永富,陈泉源.白云鄂博铌选矿研究现状及展望[J]. 矿冶工程,1992(01):62-65.
YU Yongfu, CHEN Quanyuan. Present situation and Prospect of niobium beneficiation research in Bayan Obo [J]. Mining and Metallurgy Engineering, 1992 (01): 62-65.
- [2]郭财胜,李梅,柳召刚,等.白云鄂博稀土、铌资源综合利用现状及新思路[J]. 稀土,2014,35(01):96-100.
GUO Caisheng, LI Mei, LIU Zhaogang, et al. Comprehensive utilization of rare earth and niobium resources in Bayan Obo and new ideas [J]. Rare earth, 2014,35 (01): 96-100.
- [3]刘玉宝.浅议白云鄂博矿铌资源开发及展望[J]. 稀土信息,2015(09):30-31.
LIU Yubao. Development and prospect of niobium resources in Bayan Obo mine [J]. Rare earth information, 2015 (09): 30-31.
- [4]何季麟,王向东,刘卫国.钽铌资源及中国钽铌工业的发展[J]. 稀有金属快报,2005(06):1-5.
HE Jilin, WANG Xiangdong, LIU Weiguo. Tantalum and niobium resources and the development of tantalum and niobium industry in China [J]. Rare Metals Express,

- 2005 (06): 1-5.
- [5]张培善,陶克捷,杨主明,等.白云鄂博稀土-铌钽矿物及其成因探讨[J].中国稀土学报,2001(02):97-102.
ZHANG Peishan, TAO Kejie, YANG Zhuming, et al. Rare earth, niobium tantalum and their genesis in Bayan Obo [J]. Chinese Journal of Rare Earth, 2001 (02): 97-102.
- [6]张培善.白云鄂博超大型稀土-铁-铌矿床矿物学研究[J].中国稀土学报,1991(04):350.
ZHANG Peishan. Mineralogical study of the super large rare earth iron niobium deposit in Bayan Obo [J]. Chinese Journal of Rare Earth, 1991 (04): 350.
- [7]杨占峰,柳建勇.白云鄂博稀土矿床探矿的必要性与可行性探讨[J].稀土,2007,28(6):84.
YANG Zhanfeng, LIU Jianyong. Discussion on the necessity and feasibility of the exploration of the Bayan Obo rare earth deposit [J]. Rare Earth, 2007, 28 (6): 84.
- [8]段利平,王文才,沈茂森.白云鄂博矿选铁尾矿中铌矿物的工艺矿物学研究[J].内蒙古科技大学学报,2015,34(01):9-12.
DUAN Liping, WANG Wencai, SHEN Maosen. Study on process mineralogy of niobium in iron tailings of Bayan Obo mine [J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2015,34 (01): 9-12.
- [9]杨占峰,马莹,王彦.稀土采选与环境保护[M].北京:冶金工业出版社,2018.
YANG Zhanfeng, MA Ying, WANG Yan. Rare earth mining and environmental protection [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018.
- [10]余永富.白云鄂博矿稀土-铌资源综合利用研究意义重大[J].稀土信息,2007(08):8-9.
YU Yongfu. Research on comprehensive utilization of rare earth and niobium resources in Bayan Obo mine is of great significance [J]. Rare Earth Information, 2007 (08): 8-9.
- [11]侯晓志,杨占峰,王振江,等.白云鄂博铌精矿矿物组成特征及铌的分布规律研究[J].有色金属(选矿部分),2018(02):4-7,11.
HOU Xiaozhi, YANG Zhanfeng, WANG Zhenjiang, et al. Study on mineral composition characteristics and distribution regularity of niobium in Bayan Obo niobium concentrate [J]. Nonferrous Metals (Minreal Processing Section), 2018 (02): 4-7, 11.
- [12]段建军,姜立峰,贾艳.白云鄂博矿选铌的工艺研究[J].包钢科技,2009,35(增刊1):28-31.
DUAN Jianjun, JIANG Lifeng, JIA Yan. Technological research on niobium separation in Bayan Obo mine [J]. Baogang Technology, 2009,35 (S1): 28-31.
- [13]徐淑香.从白云鄂博尾矿中综合回收铌的初步探索[J].矿产综合利用,1983(04):35-38.
XU Shuxiang. Preliminary exploration on comprehensive recovery of niobium from Bayan Obo tailings [J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 1983 (04): 35-38.
- [14]陈泉源,余永富,丰于惠,等.白云鄂博铌资源选矿新工艺工业分流试验[J].矿冶工程,1996(01):22-24.
CHEN Quanyuan, YU Yongfu, FENG Yuhui, et al. Industrial diversion test of new niobium resource beneficiation process in Bayan Obo [J]. Mining and Metallurgy Engineering, 1996 (01): 22-24.
- [15]张去非.白云鄂博矿床铌资源矿物学基本特征的分析[J].有色金属,2005(02):111-113.
ZHANG Qufei. Analysis of basic mineralogical characteristics of niobium resources in Bayan Obo deposit [J]. Nonferrous Metals, 2005 (02): 111-113.
- [16]张培善,陶克捷.中国稀土矿物学[M].北京:科学出版社,1998.
ZHANG Peishan, TAO Kejie. China rare earth mineralogy [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [17]张国忠,于广泉.白云鄂博矿矿冶工艺学(上)[M].包头:包头钢铁公司科学技术处,1995.
ZHANG Guozhong, YU Guangquan. Mining and smelting technology of Bayan Obo mine (I) [M]. Baotou: Science and Technology Department of Baotou Iron and Steel Company, 1995.
- [18]张去非,穆晓东.白云鄂博东部接触带含铌白云岩矿物组成及 Nb_2O_5 赋存状态的研究[J].金属矿山,2006(2):49-52.
ZHANG Qufei, MU Xiaodong. Mineral composition and Nb_2O_5 occurrence state of niobium bearing dolomite in the eastern contact zone of Bayan Obo [J]. Metal Mine, 2006 (02): 49-52.