

白云鄂博稀土资源综合利用现状概述

李潇雨^{1,2,3}, 惠博¹, 熊文良^{1,2}, 王越¹

(1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国地质调查局稀土资源应用技术创新中心, 四川 成都 610041; 3. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610000)

摘要: 白云鄂博矿床作为全球最大的稀土以及铁、铌等诸多金属资源的共生矿床, 据统计显示, 累计查明的稀土总量已经达到了1.8亿t, 保有资源的总储量达到了1.59亿t, 稳居全球首位。本文对白云鄂博稀土矿产资源综合利用现状进行调查和再认识, 充分掌握白云鄂博稀土资源的属性(矿物空间分布、矿石工艺类型、矿石可选性空间分布)、稀土资源的开发利用现状和前景(稀土选矿和稀土冶炼的精细化和智能化)、稀土资源的可持续利用(尾矿废渣综合回收和围岩废石的资源储备)等特性, 有利于查明白云鄂博矿床的稀土资源禀赋, 有效的指导资源综合开发评价, 并为促进稀土选矿和冶炼加工技术智能化发展、深入探讨含稀土尾矿的综合利用开发、实现白云鄂博稀土资源综合利用高效、可持续发展奠定坚实的基础。

关键词: 白云鄂博; 稀土; 综合利用

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2021.05.003

中图分类号: TD983 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2021) 05-0017-08

稀土具有“工业维生素”的美称, 在信息、生物、高新技术以及能源技术等方面有着不可或缺的作用。在稀土资源方面, 中国稀土资源的储量稳居世界前列, 目前已牢牢掌握三个世界第一, 即储量全球第一、生产规模位居全球第一、加工总量以及出口总量位居全球第一^[1]。

中国稀土在地域分布特点鲜明, 分布面较广但主要集中在南部, 呈现“北轻南重”的资源格局。由图1可知, 稀土矿物主要可分为两类, 即矿物型稀土矿和风化型稀土矿。其中, 氟碳铈矿和独居石分布广、含量多, 是矿物型稀土矿的主要成分, 矿物型稀土矿属轻稀土选择配分型矿床, 值得注意的是, 其轻稀土配分值高达86%。

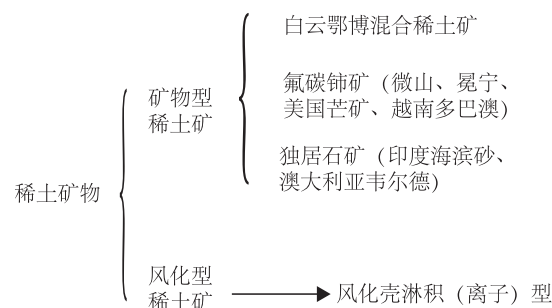


图1 稀土矿物分类^[1]

Fig. 1 Schematic diagram of the classification of rare earth minerals

白云鄂博铁、铌、稀土矿属于矿物型稀土矿的典型资源, 矿石中稀土矿物主要是氟碳铈矿和独居石, 两种矿物都已达到工业利用要求, 所以又称为混合稀土矿^[1]。

收稿日期: 2020-04-09

作者简介: 李潇雨(1981-), 女, 硕士, 主要从事岩石学、矿物学研究。

白云鄂博矿床是典型的矿物型稀土矿,更是华北轻稀土矿床的重要代表。它的稀土资源开采量、工业储量、远景储量都名居全国、世界前列,有着重要的战略地位——白云鄂博矿床是世界最大的稀土、铁和铌等多金属共(伴)生矿床,铁矿石储量 14 亿 t,据统计,累计查明的稀土资源总储量已经达到了 1.8 亿 t,保有资源总储量达到了 1.59 亿 t,稳居世界首位,约占世界储量 50%,我国的 90%。现有资料和调查结果表明,铌(Nb_2O_5)储量为 320.19 万 t,保有资源储量 277.75 万 t,以全球排行而言,铌储量稳居第二。钾的总资源量可达 16.74 亿 t,平均品位 K_2O 达 12.14% 左右,形成规模巨大的钾矿体,钍(ThO_2)估计资源量 104 万 t,萤石矿估计资源量 1.3 亿 t。

在对白云鄂博矿保护开发利用的同时,随着对白云鄂博矿区研究的深入,困扰多年的氟、磷、钾、钠等炼铁有害元素有了新的认识,以往的废石和围岩也将成为有价值的战略资源,而矿物学以及矿床学及岩石学等发展速度相对比较快,这也使得数字化、智能化的开采技术及分采分选工艺变得更加精准,为白云鄂博复杂共伴生矿床的研究、利用和经济评价等再认识奠定了良好的技术基础。另外,伴随国际形势不断变化,国内经济结构正在进行逐步调整,目前国家对关键金属和关键矿产资源更是表现出了空前的重视程度。

有鉴于此,需要对白云鄂博稀土矿产资源综合利用现状进行调查和再认识,充分掌握白云鄂博稀土资源的属性(矿物空间分布、矿石工艺类型、矿石可选性空间分布)、稀土资源的开发利用现状和前景(稀土选矿和稀土冶炼的精细化和智能化)、稀土资源的可持续利用(尾矿废渣综合回收和围岩废石的资源储备)等特性,查明白云鄂博矿床的稀土资源禀赋,有效的指导资源综合开发评价,并为促进稀土选矿和冶炼加工技术智能

化发展,深入探讨含稀土尾矿的综合利用开发,为实现白云鄂博稀土资源综合利用高效、可持续发展奠定坚实的基础。

1 白云鄂博稀土资源属性

白云鄂博矿床地理位置独特,其成因几十年来一直存在争议含矿白云岩的成因是建立整体成矿模式的关键,也是确定沉积、碳酸盐岩或热液源对白云鄂博稀土富集的相对贡献的关键。关于白云鄂博含矿白云岩的多种来源包括:与碳酸盐岩火山有关的喷溢-沉积过程中的海水混合^[3],碳酸盐岩侵入的地壳混染、后期改造或再结晶作用^[4];与碳酸盐岩相关流体沉积白云岩的后生改造^[5]。地质地球所最新研究发现,白云鄂博碳酸岩具有从铁质,到镁质,再到钙质的演化趋势,铁质在碳酸岩浆分异演化中的逐步分离很有可能是造成稀土元素在晚期岩浆中富集的关键控制因素^[6]。

矿化主要发育在宽沟斜南翼白云向斜两翼 H8 白云岩地层中与 H9 板岩地层的过渡带,向斜轴部由 H9 板岩组成。白云鄂博矿床包含了铁、稀土、铌等矿藏,其东西总长度约 16 km,由东部的都拉哈拉起,一直连接至西部阿布达;此外,其南北总宽度为 3 km,矿化带总体呈现出东西狭长的样貌。由于矿化带热液蚀变性质,产出部位及铁、稀土、铌矿化程度的不同,整个矿带自东向西可分为以下五个部分,即:东部接触带、东矿、主矿、西矿和北矿。其中,主、东矿的规模最大,铁、铌、稀土矿化最强,西矿的规模大小则次之。

(1) 东矿位于矿区的东部,其上下盘的结构有着明显差异,白云岩和板岩分布于上盘,而下盘中只有白云岩。此外,发现矿体中形成了大量的磁铁矿,这主要是由很强的铁的矿化作用导致的,其主要分布在中部近上盘区域,而下盘赤铁矿则比较发育。相对比主东两个矿,主矿中的氟

的交代作用非常强烈，而东矿钠的交代作用强烈。表现在矿物组成上，主矿中的钠辉石以及钠闪石总体含量少于东矿，而萤石相对含量少些，其他矿物含量也有一定的差异，但不显著^[6]。

(2) 主矿位于矿区中部，其磁铁矿和赤铁矿的含量较多，主要是由铁的矿化作用导致的，并广泛发育着氟和钠的交代作用。值得注意的是，主矿在矿物组成上特点鲜明，萤石、钠辉石、钠闪石等大量存在，氟强烈的交代作用是该现象的主要原因之一。稀土和稀土元素的矿化则与氟、钠交代作用密切相关，主要包含的矿物有五种，一是氟碳铈矿；二是独居石；三是钛铁金红石；四是易解石；五是黄绿石。

(3) 西矿矿段是指从主矿以西东西向排列的十数个小矿体的总称，东西长 10 km，南北宽约

1 km，由 12 个铁矿体组成，铁矿体有三种构造形态，一是层状；二是透镜状；三是具条带状构造。铁矿体与围岩界限不清，由品位圈定。西矿的矿化类型与主、东矿基本相似，只是矿化比较弱一些，矿石类型也比主矿和东矿简单。

白云鄂博矿区的矿石性质较为复杂，矿石结构及分布情况也有所不同，特别是铁、铌、稀土在不同的矿区矿石中也存在一定的差异，结合以上的条件及差异，可将该矿区的矿石分为八种不同的类型，分别为钠辉石型铌、稀土、铁矿石，钠闪石型铌、稀土、铁矿石，块状铌、稀土、铁矿石，条带状铌、稀土、铁矿石，白云石型铌、稀土、铁矿石，钠辉石型铌、稀土矿石，白云石型铌、稀土矿石及富钾板岩和云母化板岩等。表 1 为矿石的工业类型和成因类型划分对比。

表 1 矿石类型划分^[7]
Table 1 Classification of ore types

矿石	品级	TFe/%	工业类型		工艺类型	成因类型
			原生矿石 TFe/FeO ≤ 3.5	氧化矿石 TFe/FeO ≥ 3.5		
铁矿	富铁 铁矿石	≥ 45			块状富铁矿	块状铌稀土矿石
	中贫 铁矿石	20 ~ 44.99	磁铁矿矿石	假象半假象 赤铁矿石	萤石型铌 萤石型矿石 霓石型铌 霓石型矿石	萤石型铌稀土铁矿石 白云石型铌稀土铁矿石 霓石型铌稀土霓石型 水石钠闪石型稀土 铁矿石云母型稀土铁 矿石
围岩	铌稀 土矿石	边界品位		RE ₂ O ₃ ≥ 1	稀土白云岩	白云石型铌稀土矿石
		平均品位		RE ₂ O ₃ ≥ 2		
	边界品位		Nb ₂ O ₅ ≥ 0.1	含铌霓石岩	霓石型铌稀土矿石	
	平均品位		Nb ₂ O ₅ ≥ 0.3	含铌板岩	云母型铌稀土矿石	
富钾 板岩	平均品位	边界品位		Nb ₂ O ₅ ≥ 0.5		辉石型铌稀土矿石
		平均品位		Nb ₂ O ₅ ≥ 0.2		
				K ₂ O 约为 12.4%	富钾板岩	板岩

其中萤石型矿石中铁含量较低 (TFe 一般低于 30%)，而氧化稀土 (REO) 的含量很高，一般大于 7.2%^[8]，故又被称为高稀土萤石型矿石。

白云鄂博的稀土矿主要赋存于铁矿体和 H8 白云岩中，而高稀土矿石基本可以分为 3 种类型：高稀土萤石型赤铁矿矿石、高稀土萤石型磁铁矿

矿石、高稀土白云岩 (REO>4%)^[8]。

稀土总体在主、东矿体内富集程度较高，主、东矿体靠近下盘的高稀土萤石型赤铁矿石、磁铁矿是工业开采稀土矿的主要位置。在铁矿体的其他部位也零星产出一些稀土较高的矿石，如东矿中部的霓石型赤铁矿矿石，但一般矿体规模较

小,分布也比较零散^[8]。

白云鄂博铁矿矿石开采方面特点显著,其开采主要位于氧化带之上,且主要获得的是高稀土萤石型赤铁矿矿石,此外,开采深度的不断增加,矿石的产量也随之增多,高稀土萤石型赤铁矿和磁铁矿矿石的产出比在 1570 m 水平以下接近 1:1。在 1570 m 水平到 1230 m 水平的 300 m 深度范围内,现在高稀土氧化矿保有量约为数千万 t (2003 年约为 3200 万 t^[8]),但值得注意的是,高稀土矿带的分布随着开采深度的增加而呈分散状态。

杨占峰等对白云鄂博原生矿内萤石型铁矿石中稀土元素的分布做了分析,得出在该类型的矿石中,主矿的稀土品位要高于东矿(主矿为 8.1%,而东矿为 6.3%),但在主矿和东矿中,氟碳铈矿和独居石这两种稀土矿物的含量均为最高,且在主、东两矿间较为稳定,无明显差异。此外,与独居石的稀土含量相比,氟碳铈矿含量要更高一些。主矿中这两种矿物的 Pr、Nd 较东矿高,而 La、Sm 则较东矿低^[9]。

目前主矿、东矿稀土选矿已实现产业化,白云鄂博矿的开发基本遵循了“以铁为主,综合利用”的方针:矿石按氧化矿、磁铁矿两个品种分采、分选;岩石按稀土白云岩、含铈混合岩、霓石岩和废石四个品种分采、分堆,异体共生的稀土白云岩单独堆置于有用岩排土场。而西矿中的稀土品位较低(平均 1.18%),未进行稀土选矿,含稀土铁尾矿干堆于尾矿库^[1]。

2 白云鄂博稀土资源开发利用现状 (选矿、冶炼)

目前,稀土矿石已不从白云鄂博铁矿处获得,包钢所需的稀土原料主要来自氧化矿选铁尾矿。将稀土在选铁尾矿中进行回收,稀土精矿的品位约为 50%,回收率仅为 55% 左右,总体资源利用

率不到 17.9%^[1]。

2.1 稀土混合精矿选矿工艺

根据白云鄂博铁、稀土、铈复杂共伴生矿的矿石特性,制定了综合回收稀土矿物精矿的选矿工艺,经过以下 6 次工艺流程的研究^[10]:

- (1) 优先浮选萤石 - 稀土 - 铁流程;
- (2) 半优先半混合浮选 - 铁流程;
- (3) 优先浮选稀土 - 铁流程;
- (4) 混合浮选 - 泡沫分离 - 铁流程;
- (5) 弱磁 - 半优先半混合浮选 - 重选 - 浮选联合流程;
- (6) 弱磁 - 强磁 - 浮选联合流程。

其中,(1)、(2)是根据采用一般的脂肪酸类型捕收剂按其主要矿物的浮游顺序:重晶石 > 萤石 > 方解石(白云石) > 磷灰石 > 氟碳铈矿、独居石 > 铁矿物 > 硅酸盐矿物的规律和可浮性制定的。半工业实验早在 60 年代中期就已经开始进行,稀土精矿品位为 24.84% ~ 21.58%,回收率 37.39% ~ 24.81%^[10]。

1986 年包钢选矿厂与长沙矿冶研究院合作,研究弱磁 - 强磁 - 浮选综合回收铁、稀土和铈的选矿新工艺,在磨矿粒度 -0.076 mm 90% ~ 92% 条件下,采用 SHP-700 强磁选机从原矿弱磁选尾矿中回收赤铁矿物并分离稀土,除去大部分与稀土矿物可浮性接近的脉石矿物共计包含七种:一是萤石;二是重晶石;三是磷灰石;四是方解石;五是白云石;六是石英;七是矿泥,然后用强磁机精选,最后经过一粗二精浮选流程,稀土(REO)品位可由 7% 左右提高至 50%,稀土实际回收率 55% 左右^[11],比改造前提高了 33%。选矿工艺的不断发展和革新进一步促进了白云鄂博稀土工业的发展。新工艺实验的成功也是选矿技术的一项重大突破,但工艺自身的缺点也不容忽视,主要存在微细粒的弱磁性铁矿物回和强磁选中矿中稀

土回收率较低、稀土矿物会进入强磁尾矿、铁硅酸盐矿物在铁精矿中含量较高、处理难选型矿石时选别指标还有所波动等问题。

2.2 稀土混合精矿冶炼工艺

混合稀土精矿的品位约为 50% 左右，主要稀土矿物为氟碳酸铈矿与独居石，二者相对含量大约为 9:1 ~ 1:1，其他矿物在稀土精矿中存在的比例超出了 20% 其中包括萤石、铁矿物（赤铁矿、磁铁矿等）、磷灰石、闪石、石英、白云石、萤石和重晶石等其他矿物以及少量铈矿物。相对于独居石、磷钇矿等精矿中放射性元素含量而言，混合稀土精矿中的值要低得多，但钍的含量比氟碳酸铈矿精矿略高。

我国对于稀土的研究和开发利用进行的较早，从 20 世纪 70 年代开始，就已经开发了多种冶炼分离工艺流程。70 年代初使用的浓硫酸法分解混合稀土工艺主要针对当时 REO 20% ~ 35% 的混合稀土精矿设计，但其工艺流程长、固-液转换多，稀土的损失较大，化工试剂和能量的消耗也较多^[10]，在选矿流程改进、高品位混合稀土矿开始生产后，该工艺已被淘汰。

目前，工业应用的主要有硫酸法（第三代硫酸法）和烧碱法^[12]，自 20 世纪 80 年代以来，80% 以上的白云鄂博混合稀土精矿采用浓硫酸高温焙烧法工艺处理^[13]（图 2），首先将精矿进行酸浸（浓 H_2SO_4 ）处理，进入回转窑后，再进一步做高温焙烧处理，将矿物中目标元素转变易溶于水的硫酸盐，而独居石分解时产生磷酸，在高温下会脱水变成焦磷酸，进一步与硫酸钍反应生成焦磷酸钍。焙烧矿经水浸、中和除杂得到硫酸稀土溶液，铁、钍、磷等杂质元素进入水浸渣中。

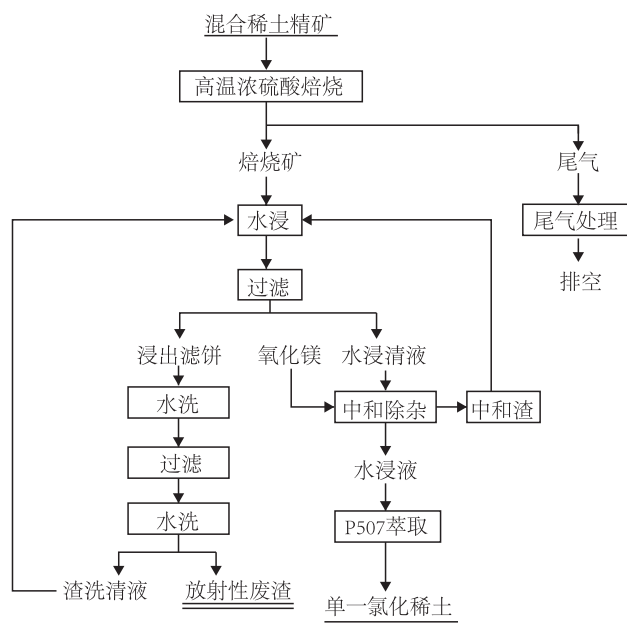


图 2 浓硫酸高温强化焙烧工艺流程^[7]

Fig. 2 Process flow of concentrated sulfuric acid high temperature intensified roasting

1967 年，包钢采用 P204 萃取法从包头稀土精矿碳酸钠焙烧硫酸浸出液萃取铈钍，制取含量为 99% 的氧化铈以及混合氯化稀土等产品；1982 年，完成 P507 盐酸体系轻中稀土全萃取连续分离工艺实验，得到镧、铈、镨、钆、钇、钆六种单一稀土产品（纯度为 99.00% ~ 99.95%）和 91% ~ 99% 的氧化镨^[7]，该工艺 1985 年投入生产，目前也被国内许多萃取分离厂采用，为我国单一稀土深加工产品的发展起到了促进作用。

3 白云鄂博稀土资源的可持续利用 (尾矿废渣综合回收和围岩废石的资源储备)

3.1 尾矿

白云鄂博尾矿也具有重要的研究价值，尾矿库自从 1963 年建成以来，也得到不断的发展和扩

建,目前扩容改造后已是亿立方米的总容量级别,其主要由包钢多年选铁、稀土后产生的废弃物构成。尾矿的价值在近近年来得到了广泛的关注和研究,尾矿库中大量残存的稀土以及有用矿物含量可观,有着“人造稀土矿”之称。在轻稀土、铈等资源的战略储备库方面也发挥着重要作用。

尾矿库中存在的稀土矿物以氟碳铈和独居石两种为主。而铈矿物则以铈铁矿、铈铁金红石、烧绿石、易解石为主,其他矿物的分布则较为分散。

2014 年底建成了“白云鄂博综合回收稀土、铁、铈、钐、硫和萤石选矿新工艺示范基地”项目。利用分组分选、易浮先选的原则,可以实现将稀土、萤石等矿物与铁、铈、硅酸盐矿物分离的效果,然后对铁、铈、硅酸盐矿物进一步处理达到分组分选的目的,从而逐步获得单一的矿物产品(如铁矿物、铈矿物等)。最后确定了主东矿氧化矿选铁、稀土尾矿综合回收铁、稀土、铈、萤石、钐、硫的工艺流程,并获得了相应的工业产品^[2]。具体回收工艺流程见图 3。

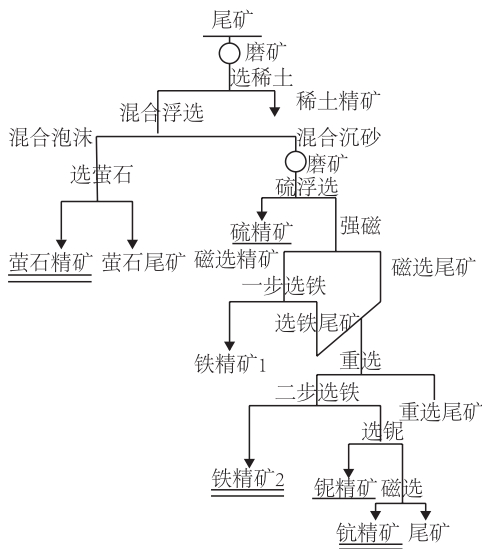


图 3 氧化矿资源综合回收工艺流程^[2]

Fig. 3 Process flow of comprehensive recovery of oxidized ore resources

3.2 水浸废渣

包头稀土研究院资源与环境研究所针对该稀

土水浸废渣进行了大量的研究,发现采用酸浸可以使渣中稀土和钍浸出。在不同酸体系、酸度条件下,水浸渣中钍元素较易溶出,稀土、钍浸出率分别达到 REO 约 60%, ThO₂ > 90%。并且对水浸渣进行 XRD 分析结果显示,主要成分为硫酸钙,还有少量硫酸钡,并且存在 Th(O)SO₄ 物相。这一研究发现与长期以来认为废渣中的钍是以焦磷酸钍的形式存在这一认知相悖。

崔建国等也对稀土放射性废渣进行了研究,并以资源特性作为出发点,对放射性废渣的特性和经济价值进行了分析,但目前对废渣中物质相组成以及稀土、钍等元素的赋存状态、和在各相中的分布规律缺乏全面、系统的认识,这使得水浸渣资源化利用的研究进程停滞不前^[13-14]。

目前,包头稀土研究院已开发了针对水浸渣提钍的工艺流程见图 4。

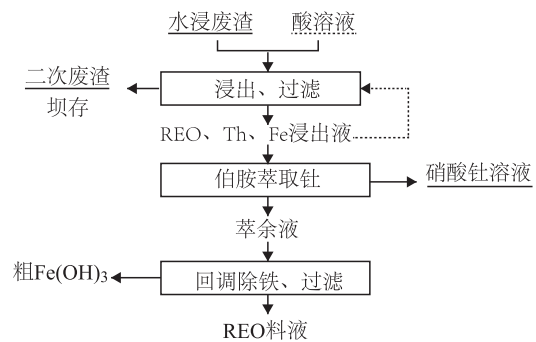


图 4 水浸渣综合利用工艺流程^[2]

Fig. 4 Process flow of comprehensive utilization of water leaching residue

通过本工艺处理,可实现废渣中铁、稀土和放射性钍元素溶出,REO 溶出率达 60% 左右, ThO₂ 溶出率 > 90%, Fe 溶出率 > 90%, 二次废渣重量减少到原渣的 50% 以下,二次废渣 ThO₂ 质量分数 ≤ 0.05%, 放射性比活度小于 7.4 × 10⁴ Bq/kg, 实现废渣资源综合回收利用同时解决环保问题^[2]。

3.3 异体共生的稀土白云岩综合利用现状

白云鄂博的稀土绝大部分赋存于 H8 白云岩中,由于其品位较低,进一步的开发利用还需要

持续的关注和研究。但是在矿体采剥范围内，也存在部分白云岩的稀土品位达到4%以上（也称高稀土白云岩），而这部分则具有一定的应用价值。

稀土镁硅铁合金在球墨铸铁和蠕墨铸铁的变质剂方面有着重要的应用价值，而白云鄂博高稀土白云岩是制备合金的重要原料之一。目前，国内90%以上的球墨铸铁都是用稀土镁硅铁合金作球化剂生产的，当然，这就需要大量的稀土富渣和金属镁，也是其生产成本较高的主要原因是。由于白云鄂博的高稀土白云岩含有4%的氧化稀土、10%左右的氧化镁，用其生产稀土镁硅铁合金可以大量减少稀土富渣和金属镁的用量，成本得到有效减少，经济效益逐渐上升，未来市场前景一片大好^[15]。

4 结 语

稀土是全球公认的一种非常珍贵的战略资源，是高新技术以及国防尖端技术等科技发展的必要核心，是21世纪新材料的宝库，是信息技术、生物技术、能源技术等高技术领域和国防建设的重要基础材料，同时为传统产业实现快速革新奠定了牢固的根基。我国各级政府从战略上对稀土的重要地位和作用都给予了充分肯定和高度重视，随着稀土传统产业的优化升级、稀土新材料的发展应用，稀土产业已成为我国在国际上具有一定话语权和重大影响力的产业之一。

白云鄂博稀土矿床综合利用产业的发展对实现白云鄂博矿产资源的可持续利用具有重大、深远的意义。调查和评估白云鄂博稀土矿床综合利用产业的发展现状，可以充分掌握白云鄂博稀土资源的属性（矿物空间分布、矿石工艺类型、矿石可选性空间分布）、稀土资源的开发利用现状和前景（稀土选矿和稀土冶炼的精细化和智能化）、稀土资源的可持续利用（尾矿废渣综合回收和围岩废石的资源储备）等特性，查明白云鄂博矿床的稀土资源禀赋，有效的指导资源综合开发评价，有利于长远的、全面的规划白云鄂博矿产资源保

护和可持续利用方案，促进将来实现铁、稀土、铌、萤石、钨、硫等重要资源的综合回收利用发展，带动白云鄂博稀土战略性产业的兴起，同时，也可以促进对尾矿、废渣、围岩废石的综合利用，使包钢尾矿坝每年减少排尾386万t^[1]，使尾矿库负荷减半，减轻稀土选矿对包头市区环境的污染。

参考文献：

- [1] 干勇, 张国成, 严纯华, 等. 稀土资源可持续开发利用战略研究 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.
GAN Y, ZHANG G C, YAN C H, et al. Strategic research on sustainable development and utilization of rare earth resources[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015.
- [2] 李春龙, 李小钢, 徐广尧. 白云鄂博伴生资源综合利用技术开发与产业化 [J]. 稀土, 2015,36(5):151-158.
LI C L, LI X G, XU G Y. Development and industrialization of comprehensive utilization technology of Bayan Obo symbiosis resources[J]. Rare Earth, 2015, 36(5): 151-158.
- [3] 白鸽, 袁忠信, 吴澄宇. 对白云鄂博矿床大地构造环境的几点认识 [J]. 地球学报, 1996 (S): 1-8.
BAI G, YUAN Z X, WU C Y. Some understandings of the geotectonic environment of the Bayan Obo deposit [J]. Acta Geosciences, 1996, S: P1-8.
- [4] 王希斌, 郝梓国, 李震, 等. 白云鄂博——一个典型的碱性-碳酸岩杂岩的厘定 [J]. 地质学报, 2002,76(4):501-521.
WANG X B, HAO Z G, LI Z, et al. Bayan Obo——Determination of a typical alkaline-carbonatite complex [J]. Acta Geology, 2002, 76(4): 501-521.
- [5] 杨晓勇, 赖小东, 柳建勇, 等. 白云鄂博铁-稀土矿床地球化学特征及成因探讨 [J]. 矿床地质, 2009,29:119-120.
YANG X Y, LAI X D, LIU J Y, et al. Discussion on the geochemical characteristics and genesis of the Bayan Obo iron-rare earth deposit[J]. Mineral Deposits, 2009,29:119-120.
- [6] 赖小东. 内蒙古白云鄂博REE-Nb-Fe矿床成因问题研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
LAI X D. Research on the genesis of the REE-Nb-Fe deposit in Bayan Obo, Inner Mongolia [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
- [7] 张国忠. 白云鄂博矿冶工艺学(上) [M]. 包头: 包头钢铁公司科学技术处, 1995.
ZHANG G Z. Bayan Obo mining and metallurgical technology (Part 1) [M]. Baotou: Science and Technology Department of Baotou Iron and Steel Company, 1995.
- [8] 肖国望, 邢光霞. 白云鄂博矿产资源综合利用的前景 [J]. 包钢科技, 2003,29(5):9-12.

XIAO G W, XING G X. Prospects of Comprehensive Utilization of Bayan Ebo Mineral Resources[J]. Baogang Science and Technology, 2003,29(5):9-12.

[9] 杨占峰, 李强, 王振江, 等. 白云鄂博矿床萤石型铁矿石中稀土分布规律研究 [J]. 中国稀土学报, 2017,35(4):520-527.

YANG Z F, LI Q, WANG Z J, et al. Study on the distribution of rare earths in fluorite-type iron ore of Bayan Obo deposit[J]. Journal of Rare Earths in China, 2017, 35(4): 520-527.

[10] 徐光宪. 稀土(上)[M]. 北京:冶金工业出版社, 2017.

XU G X. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2017.

[11] 赵春晖, 陈宏超, 岳学晨. 新型浮选药剂 LF-8、LF-6 在稀土选矿生产中的应用 [J]. 稀土, 2000,21(3):1-3+8.

ZHAO C H, CHEN H C, YUE X C. Application of new flotation reagents LF-8 and LF-6 in the production of rare earth minerals[J]. Rare Earths, 2000, 21(3): 1-3+8.

[12] 刘建亮, 罗明标, 平爱东, 等. 稀土精矿中钍的提取工艺研究进展 [J]. 稀有金属, 2012,36(4):651-658.

LIU J L, LUO M B, PING A D, et al. Research progress on the extraction technology of thorium in rare earth concentrates[J]. Rare Metals, 2012,36 (4): 651-658.

[13] 崔建国, 马莹, 张春新, 等. 一种对稀土酸法工艺废渣中

稀土、钍和铁的回收方法: CN 20131 0074514. 7[P]. 2013-07-03.

CUI J G, MA Y, ZHANG C X, et al. A recovery method of rare earth, thorium and iron in waste residue of rare earth acid process: CN 201310074514.7[P]. 2013-07-03.

[14] 张利成, 白丽娜, 王灵秀. 白云鄂博矿开发利用中放射性废渣对环境的污染及防治 [J]. 内蒙古环境保护, 2001,13(1):39-43.

ZHANG L C, BAIL N, WANG L X. Environmental pollution and prevention of radioactive waste residues in the development and utilization of Bayan Obo Mine[J]. Inner Mongolia Environmental Protection, 2001,13 (1): 39-43.

[15] 史美玲, 屈茹. 白云鄂博矿产资源概况及开发利用设想 [J]. 科教前沿, 2012,27:45-46.

SHI M L, QU R. General situation of Bayan obo mineral resources and assumption of developmeht and utilization.[J]. Frontiers of Science and Education. 2012,27:45-46.

[16] Kuifeng Yang, Hongrui Fan, Franco Pirajno, Xiaochun Li. The Bayan Obo (China) giant REE accumulation conundrum elucidated by intense magmatic differentiation of carbonatite. Geology, 2019, 47 (12): 1198-1202.

Multipurpose Utilization of Rare Earth Resources in Bayan Obo

Li Xiaoyu^{1,2,3}, Hui Bo¹, Xiong Wenliang^{1,2}, Wang Yue¹

(1 Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of geology Sciences, Chengdu, Sichuan, China; 2. China Geological Survey Bureau Rare Earth Resource Application Technology Innovation Center, Chengdu Sichuan, China; 3. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: Bayan Obo deposit is the largest paragenetic deposit of rare earth, iron, niobium and many other metal resources in the world, according to statistics, the total amount of rare earth identified has reached 180 million tons, and the total reserves of retained resources have reached 159 million tons, ranking first in the world. In this paper, the status quo of comprehensive utilization of rare earth mineral resources in Bayan Obo is investigated and re understood, and the attributes of rare earth resources (spatial distribution of minerals, ore process types, spatial distribution of ore washability), the status quo and prospects of development and utilization of rare earth resources (refinement and intelligence of rare earth mineral processing and rare earth smelting) in Bayan Obo are fully grasped The sustainable utilization of rare earth resources (comprehensive recovery of tailings and waste rock and resource reserve of surrounding rock) and so on, it is helpful to find out the rare earth resource endowment of Bayan Obo deposit and effectively guide the comprehensive development and evaluation of resources, It also lays a solid foundation for promoting the intelligent development of rare earth mineral processing and smelting processing technology, deeply exploring the comprehensive utilization and development of rare earth tailings, and realizing the efficient and sustainable development of the comprehensive utilization of rare earth resources in Bayan Obo.

Keywords: Bayan Obo; Rare earth; Multipurpose utilization