



移动扫码阅读

冯丹阳,刘丽霞,彭军.稀土尾矿的综合利用研究进展[J].能源环境保护,2022,36(4):12-17.

FENG Danyang, LIU Lixia, PENG Jun. Research progress on comprehensive utilization of rare earth tailings[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(4): 12-17.

稀土尾矿的综合利用研究进展

冯丹阳¹, 刘丽霞^{1,2,*}, 彭军^{1,2}

(1. 内蒙古科技大学 材料与冶金学院, 内蒙古 包头 014010;

2. 内蒙古先进陶瓷与器件重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

摘要:针对稀土尾矿有价元素残留问题,总结了稀土尾矿综合利用现状,探讨了资源二次利用的方法。分析认为:减量化处理主要针对铁、萤石等有价物质的回收;资源化手段包括胶凝材料、陶瓷、玻璃、催化剂的制备;无害化主要采用淋洗、植被修复等方法进行处理;今后研究应聚焦稀土尾矿有价组分高效、低成本、绿色分离,开发高附加值利用新途径。

关键词:稀土尾矿;回收金属;综合利用

中图分类号:X705

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)04-0012-06

Research progress on comprehensive utilization of rare earth tailings

FENG Danyang¹, LIU Lixia^{1,2,*}, PENG Jun^{1,2}

(1. College of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Advanced Ceramics and Devices, Baotou 014010, China)

Abstract: Aiming at the problem of valuable elements remaining in rare earth tailings, the present situation of comprehensive utilization of rare earth tailings was summarized. The methods of secondary utilization of resources were discussed. The analysis shows that the reduction treatment is mainly for the recovery of valuable elements such as iron and fluorite. Resource utilization means include the preparation of cementitious materials, ceramics, glass and catalysts. The harmless treatment mainly adopts leaching, vegetation restoration and other methods. Future research should focus on efficient, low-cost and green separation of valuable elements from rare earth tailings and developing new ways of high value-added utilization.

Key Words: Rare earth tailings; Recovery of metals; Comprehensive utilization

0 引言

众所周知,人类社会的发展过程中,矿产资源因其具有不可再生以及难以被替代的独特属性,成为我们不可或缺的资源之一。此外,矿产资源的综合转化利用也从一定程度上体现了国家科技实力与综合国力。我国江西赣南地区龙南稀土矿区、四川德昌冕宁矿区等都是稀土储量较大的矿

区。在国外,美国是世界稀土种类最齐全的国家^[1],欧盟国家认为稀土是欧洲经济、科技发展过程中不可或缺的一部分,瑞典以及葡萄牙的尾矿也富含稀土^[2]。稀土作为我国重要的战略物资,在我国的包头白云鄂博地区有着极为丰富的储量,也是包头钢铁集团重要的原料产区。包头白云鄂博矿区位于内蒙古自治区包头市北部,是一处以稀土矿为主、多金属共生的矿区,稀土储量占

收稿日期:2021-11-10;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:国家自然科学基金(51864041,51664044);国家重点研发计划(2020YFC1909105)

第一作者简介:冯丹阳(1997—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为冶金熔体。E-mail:FDY19970120@163.com

通讯作者简介:刘丽霞(1976—),女,内蒙古包头人,博士,副教授,主要研究方向为炼钢新技术。E-mail:llxokay@163.com

据全国稀土总量 97% 左右。白云鄂博矿是以铁、稀土为主且多金属共生的大型矿床,其中稀土氧化物储量在国内及世界都位列第一^[3]。包钢选矿厂将稀土矿进行铁和稀土的提取之后,剩余部分称为稀土尾矿。稀土尾矿中含有一定的锰、铝、铁以及稀土氧化物等有价矿物,是一种值得研究的固废资源。加之白云鄂博矿属于较复杂的伴生矿、共生矿,约 90% 的稀土矿物和许多其他有价值的矿物作为铁尾矿堆放而未得到综合利用^[4]。如果任由尾矿大量堆存,不仅容易污染环境,还造成了资源浪费。目前许多专家学者关注着稀土尾矿的再利用。稀土尾矿中含有的赤铁矿、萤石、氟碳铈矿、独居石等矿物,其中含有大量的铁元素、氟元素、稀土矿物等有价元素,都是可以二次利用的对象^[5],稀土氧化物更是高达 6%。目前在包钢尾矿坝中储存有近千万吨。由于稀土氧化物有着独特的变价特性,在催化材料领域较为受关注,是一种有着较大研究意义的物质,可将稀土尾矿回收再利用。本文总结了稀土尾矿现阶段的研究现状、制约稀土尾矿二次利用的瓶颈因素以及稀土尾矿在资源综合利用方面的主要用途,以期对之后稀土尾矿的处理提供一定的借鉴。

1 稀土尾矿的化学及物相组成

稀土尾矿的成分直接决定了该尾矿的利用价值高低,由于选矿按照不同的工艺需求进行操作,不同批次的稀土尾矿成分会有差别,但总体成分变化不大。稀土尾矿的主要化学成分有氟(F)、氧化钙(CaO)、二氧化铈(CeO₂)、三氧化二镧(La₂O₃)、五氧化二铌(Nb₂O₅)等。不同的处理方式可能会使得稀土尾矿有不同的化学组成。郑强^[6]等人简单归纳了稀土尾矿的处理方法,认为不同地域的尾矿以及不同处理方法使得处理后尾矿化学成分有差异,具体数据如表 1 所示。

表 1 不同地区稀土尾矿的主要化学成分
Table 1 Main chemical compositions of rare earth tailings in different areas

地区	主要化学成分/%								
	TFe	REO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	F	
包钢	13.46	5.51	20.98	13.79	0.96	5.14	0.89	12.94	
陕西	13.40	2.08	3.08	56.20	12.00	1.70	2.42	/	
江西	12.75	4.02	0.10	66.74	18.42	0.43	6.15	/	

从表 1 可以得出,不同地区由于稀土矿成分有着一定差异,尾矿成分在具体成分上以及不同矿物的含量上有较大差别,但在处理上有着类似的方法。例如包钢稀土尾矿基本来自白云鄂博矿,但矿物经化学分析发现,TFe 含量达 13.46%,SiO₂ 含量达到 13.79%,CaO 含量为 20.98%,另外超过 10% 的 F 含量有利于使用浮选工艺,进行萤石的回收。对白云矿(即包钢用矿石)样品进行分析可得,矿物主要成分为 Fe₂O₃ 及稀土氧化物,各种稀土矿物中的 Fe₂O₃ 与稀土氧化物的比例差别很大,其中稀土原矿里的 Fe₂O₃ 含量较高,质量分数超过 30%,Fe₂O₃ 与 REO 的比例为 5 : 1,稀土精矿的主要成分为稀土氧化物。因此可以对包钢所剩白云鄂博矿尾矿进行稀土元素及氟的回收利用,而江西矿中钾的含量较高,可以进行钾的提取利用研究,制取钾盐。目前,由于我国钾盐储量不大,农业生产上有大量缺额,故而钾元素的回收利用是非常有研究价值的。

由于不同企业对稀土矿有不同的用途,如选铁、选萤石等,使得稀土精矿在经过不同的处理路径后,遗留的稀土尾矿有着不同的矿物组成。杨合^[7]等从包钢选矿厂的浮选稀土尾矿中提取铁,其矿相主要为褐铁矿($n\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$)、赤铁矿(Fe₂O₃)、磁铁矿(Fe₃O₄);王宇斌^[8]等对陕西某稀土尾矿进行矿物回收,除几种常见铁矿石外,还存在有钛铁矿(FeTiO_x)、黄铁矿(FeS₂)、石英(SiO₂)、石榴石(Fe₃Al₂(SiO₄)₃)等;于秀兰^[9]等对包钢选矿厂未经过任何处理的稀土尾矿进行了 X 射线衍射分析,发现稀土尾矿的主要物相除赤铁矿外,还有二氧化硅、萤石等物质,如图 1 所示。

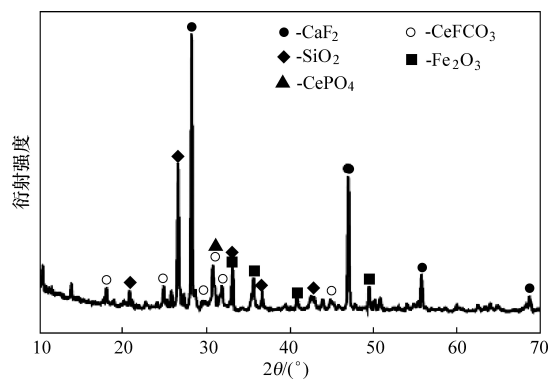


图 1 稀土尾矿的 X 射线衍射图

Fig.1 X-ray diffraction pattern of rare earth tailings

由白云鄂博矿矿物组成得知^[10],矿物中主要成分为萤石、铁以及稀土。陈福林等^[11]对四川某

稀土尾矿样品进行分析,该稀土尾矿 REO 品位约为 3%,有用矿物与脉石矿物伴随出现,可设计工艺对有用矿物进行剥离回收。同时,欧洲西部及北非地区(如喀麦隆等地)也在进行尾矿的回收利用研究,如有价元素的回收。

2 稀土尾矿的综合利用现状

2.1 减量化处理

我国稀土尾矿中含有一定量的有价金属,比较有代表性的有铁、铅、铈等金属以及稀土元素等,将这几种金属进行回收是稀土尾矿再利用的一条重要途径。

何超^[13]等人发现四川冕宁一带,有大量稀土矿物处理厂家,每年产生尾矿接近 20 万 t,稀土尾矿出现了严重的堆积问题。四川某稀土尾矿中含有大量的有用金属,其中以铅金属为主,存在一定的开发价值。通过试验研究,最终确定浮选工艺流程,进行闭路试验,铅回收率超过了 60%。通过浮选工艺较好地实现了稀土尾矿中铅资源的回收。某铁选矿厂尾矿不经磨矿直接采用弱磁选工艺,能获得铁品位 65% 以上的铁精矿产品,且可选性相对较好,其弱磁精矿产率在 8% 左右,具有一定的回收利用价值。对弱磁或中磁尾矿进行强磁选,可获得相对原矿产率约 16%、铁品位约 40% 的强磁精矿。

由于白云鄂博矿属于复杂共生矿,无论当作铁矿还是稀土矿开采,都是对资源的一大浪费,因而对于选铁尾矿中有价元素的回收利用就显得尤为重要。回收分为两大研究方向:一是铁矿物回收利用,二是稀土矿物回收利用。包钢尾矿中铁和稀土等有用矿物每年随着尾矿流失接近 24 万 t,可见如果将其成功转化为可用资源,对资源保护的意义巨大。

王维维等^[14]以白云鄂博矿霓石型低品位铁-稀土矿石为对象,在系统研究其矿石性质的基础上进行回收铁的选矿试验,通过磨矿—两段弱磁选—再磨—弱磁选的方法回收铁。通过一系列实验研究,采用磨矿—两段弱磁选—再磨—弱磁选的工艺,获得了较高品位的铁精矿,回收率接近 70%,杂质含量达到冶炼要求。

贺宇龙等^[15]针对包头市某选矿厂尾矿,采用浮选法改进稀土回收工艺,由于回收的稀土矿物与杂质存在磁性差异,故采取梯度磁选法回收稀土,原矿试样样品中可供回收的有用元素主要有

铁、稀土和铈,在选矿过程中需要除去大量的脉石矿物等杂质。选择合适的磁场强度进行磁选,达到了从尾矿中回收稀土的目的。

曹永丹等^[16]通过工艺矿物学方法,对白云鄂博尾矿进行分析,得知尾矿中含有铁、二氧化硅、氟化钙和少量的稀土氧化物、五氧化二铈等有价组分,矿物出现了大面积的包裹现象,不利于回收再利用。铁的处理方法是采用永磁磁选,已经进行选铁后的矿物,采用超导高梯度磁选的方法,将矿物中的稀土金属及其伴生的铈和钐分开。可以看出,白云鄂博尾矿中有价元素的分离提取,超导磁选法是一种高效的方法,可以有效分离矿物中磁性较弱的矿物与无磁矿物。本工艺为实现白云鄂博稀土尾矿高值化利用提供新路径,可用于实际生产。

2.2 资源化处理

2.2.1 制备胶凝材料

稀土尾矿中有较高含量的硅酸盐类化合物,而生产水泥时所用的黏土,其重要成分也为硅酸盐类化合物,二者成分有相似之处,加入少量稀土尾矿用以减少黏土用量,在保证原料中以硅酸盐为主的成分不发生改变的同时,提高水泥性能。

李世嵩等^[17]将鲁南地区产出的稀土尾矿作为生产配料制造水泥,方法是以稀土尾矿作为矿化剂进行配入,熟料产量较之提高了 8% 左右,每千克熟料生产所需热能消耗降低了 300 kJ 左右(总消耗量的 9%)。和春梅^[18]等将云南楚雄地区产出的稀土尾矿应用于水泥熟料的煅烧,用 50% 稀土尾矿取代黏土进行实验,对其抗压强度进行检测,较之使用黏土的空白组,加入 50% 稀土尾矿的对照组的抗压强度有所上升,故在减少黏土用量降低成本的同时,提升了产品的抗压强度,优化了使用性能。

2.2.2 制备多孔陶瓷

多孔陶瓷,也叫泡沫陶瓷。顾名思义是多孔材料中的陶瓷材料,其特点是有一定的化学稳定性,热导率低,耐热性好,稀土尾矿可用于陶瓷坯釉料的制备。申思月等^[20]将稀土尾矿应用于多孔陶瓷的制备当中,采用四川冕宁稀土生产中产生的稀土尾矿为主,与高岭土尾矿、高铁长石按 60 : 15 : 25 的比例进行烧结实验,后两者起到粘结剂与助熔剂的作用,可以得到气孔率高、抗折强度良好的多孔陶瓷材料。袁定华^[21]等以江西赣

南地区离子型稀土尾矿作为研究对象,进行陶瓷坯釉料的制备。邱廷省等^[22]采用稀土尾矿为原料,配入钨尾矿进行陶瓷釉坯的制备,实验表明,加入 65%~70% 稀土尾矿,其余部分以钨尾矿补足,在 1 100 °C 时进行烧结处理,烧成率达到了九成以上。得到的产物表面光滑,强度较只用稀土尾矿一种原料时更大,故而两种固废协同制备陶瓷具有可行性。

2.2.3 制备玻璃材料

微晶玻璃是目前尾矿综合利用技术发展过程中,相对来说较为高档的产品。稀土尾矿中的稀土氧化物若进入玻璃中,会起到改性的作用,微晶玻璃主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 等。由于稀土尾矿中含有较多的稀土氧化物,它们进入到微晶玻璃中时,会对此产品的生产工艺及成品性能产生影响,故而有着一一定的研究价值。目前主流的生产工艺有熔融法、烧结法等。

谢俊等^[23]根据微晶玻璃的基本物相组成(即 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$),向其中配入以 CaO 、 CeO_2 为主要成分的稀土尾矿,以 5% 为梯度,分别配入 10%~25% 的稀土尾矿,设计了四组对比,烧结后对产物进行 X 射线衍射分析。观察图谱后发现,微晶玻璃的烧结过程加入稀土尾矿后,烧结产物的主晶相为 β -硅灰石,通过对产物进行分析,发现 CeO_2 的加入不仅起到了改性的作用,还可以作为澄清剂,使得烧结产出的微晶玻璃外形更加美观,还可以降低转变温度,促进微晶玻璃晶化。在尾矿加入量超过 20% 的时候,有利于微晶玻璃的烧结制成。

陈国华等^[24]对比了熔融法与烧结法在工艺上的优劣。熔融法成型方式灵活,组织结构致密,但有着熔点高、生产工艺复杂的缺陷;而烧结法跳过了玻璃制造工艺中的成型阶段,相比于熔融法可以更好地生产高熔点微晶玻璃,无需使用晶核剂,极大地降低了生产成本,缺点在于其成品致密性相对于熔融法较差,原因是在烧结时粉末粒度细,不利于成品致密化。

赵喜伟等^[25]利用白云鄂博矿区产出的稀土尾矿,配入 Na_2CO_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 等物质进行微晶玻璃的制备,运用不同的检测方法对稀土尾矿微晶玻璃的抗折强度、耐酸碱腐蚀等性能进行了分析,并分析了 Al_2O_3 对微晶玻璃性能的影响。对实验样品在不同 Al_2O_3 含量下的抗折强度进行了测试。随着 Al_2O_3 含量的升高,微晶玻璃的抗折

强度呈现出先增加后降低的趋势,宏观抗折强度降低,耐酸性表现出先增加后降低的趋势,而耐碱性能先降低然后逐渐增加,耐碱性与耐酸性相反。

2.2.4 制备催化剂

由于稀土尾矿中含有一定量的稀土氧化物,其性质相较于常用催化剂原料中的氢氧化物更加稳定,可有效改善成品的催化性能,耐高温的属性也有明显提升,可以应用于工业生产。在大量实际生产中表明加入稀土尾矿可以有效提高催化剂的性能。稀土尾矿中的主要元素为稀土元素,其内部粒子排列结构与常见元素有所不同,在催化剂研制方面,将其产生较多位错缺陷的特点加以利用,外加与其他生产原料(如金属镁)协同处理,可以改善催化剂表面结构与性能。

俞秀金等^[26]研究了稀土尾矿在制备 FA401 型低温氨合成催化剂时的应用,以磁铁精矿为原料配入一定量的尾矿进行实验,以经精细加工的稀土尾矿作为主要配入料,添加包括铝、镁、锆等金属作为配料的方法来改进生产工艺。发现在实验过程中,配入稀土尾矿的催化剂相比于未配入稀土尾矿的催化剂更加容易还原,还原温度明显下降,氨合成率上升 10% 左右,催化剂低温活性得到了提高,强度及耐热性也明显提高。王磊等^[25]以尾矿中剩余稀土元素以及稀土氧化物为原料,制备稀土氧化物催化剂用于脱硝研究得出, Sm_2O_3 以及 Nd_2O_3 为主要原料的催化剂在反应温度为 450 °C 时,脱硝率超过 90%,即二者为主要原料的催化剂在 450 °C 时活性最好。

赵然等^[27]将白云鄂博尾矿在不同温度下煅烧,对低浓度甲烷进行催化燃烧试验。通过热重分析以及 X 射线光电子能谱(XPS)等手段对催化剂的理化性质进行了表征。与原矿样品相比, Fe_2O_3 的衍射峰强度增大,而 CeCO_3F 的衍射峰强度减小。催化剂在 600 °C 焙烧后出现多孔结构。此外,Fe、Ce、Ti 等金属元素在催化剂表面的分散性更强。 H_2 -TPR 结果显示,600 °C 焙烧催化剂的还原温度范围扩大,还原峰增加。XPS 分析表明,Ce 以 Ce^{3+} 和 Ce^{4+} 的氧化态存在,Fe 以 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的形式共存。此外,XPS 显示表面 Oads/Olatt 比率较高。

2.3 无害化处理

由于稀土尾矿的大量堆积,而其减量化、资源化处理无法将尾矿中的全部有价元素提取利用,

所以不可避免地造成了环境污染,如污染土壤、水体等。稀土尾矿的无害化处理研究已经成为相关从业者必须正视的问题。

秦磊等^[19]发现,由于尾矿成分与处理工艺的不同,尾矿中的氨、氮元素易进入土壤中污染环境,而采用淋洗法处理尾矿中的氨、氮是最优方案。将氯化钙、氯化镁以及二者混合配成的淋洗液作为三种不同的淋洗剂,探究淋洗剂种类和浓度不同的条件下对稀土尾矿中氨、氮元素去除效果的影响。经实验比对,得出三种淋洗液对氨的除去效果都超过50%,氯化钙效果最好,混合液次之,氯化镁效果最差。

贺强等^[31]总结我国对稀土尾矿治理的方法,发现主要有物理、化学方法和植物植被修护等方法。前者效果较好,但技术要求较高,且有着资金投入大,修复周期长的特点,而植物植被修复的方法虽然见效较慢,但操作难度低,且有效时间长,可以作为我国修复稀土尾矿的主流方法进行使用,为稀土尾矿的处理提供了一条崭新的技术路线。

3 尾矿资源利用的发展趋势

通过对国内外稀土尾矿利用现状的综合分析发现,主要可从以下几方面进一步利用稀土尾矿。

首先,是提高尾矿利用率,需要分析出尾矿的化学成分及其组织结构以便进行有价元素的提取。郭占成等研究发现^[28],在超重力作用以及相应的降水温度下,98.38%的(Ce)在超重力驱动下先富集到氟化物稀土中并从尾矿中分离出来。

其次,是开发尾矿的利用方法,设法实现多用途、高质量的利用。如何将稀土尾矿中的稀土元素及其他元素进行提取分离并进行二次利用,可否在制备水泥、催化剂、微晶玻璃等方面广泛应用,国内研究人员做了大量的研究工作,并取得了一定的成果,但想要形成完整的生产利用流程,还有很长的路要走。

最重要的一点是,由于我国早年间的开采利用技术受限,大量稀土矿开采不当导致了尾矿的大量囤积,有价元素大量流失,且尾矿的堆积占据了许多土地,使得土地资源浪费,尾矿中的贵金属等元素也对土地造成了严重的污染。在我国稀土金属矿产密集区,如内蒙古包头、江西赣州、四川冕宁等地,由于当地矿物开采使得大量尾矿无法处理,尾矿坝中贮存量极高,其中贵金属及稀土元

素随雨水渗入地面,污染了土壤。张军^[29]等通过对包头市白云鄂博矿区土壤采样研究发现,土壤稀土元素以及放射性元素(例如铀、钍)的出现,严重威胁着当地草地生态系统的健康与稳定。江西农业大学研究人员采用竹炭及粉煤灰协同处理的方法来修复被稀土尾矿侵蚀的土壤^[30],其他地区的尾矿处理方法不可一概而论,但为尾矿地的修复处理提供了很好的思路借鉴。

目前,我国对于稀土尾矿的处理正处于研究探索的阶段,对尾矿的减量化、资源化、无害化处理方面有许多行之有效的方法,但同时也存在着不足:诸如有价金属的回收造成药剂的浪费,提高了处理成本;制备水泥、陶瓷、微晶玻璃时无法除去尾矿中的杂质导致产品质量降低;植被修复被尾矿污染的土壤时,见效较慢;植被成活率难以控制。尾矿资源利用过程中还有着许多问题等待解决。

4 结 语

我国对于尾矿的利用量正在逐渐增加,但研究水平成为了高效利用的瓶颈,稀土尾矿作为一种含量大量有价值元素的固体废弃物,其二次利用便成了当务之急。

稀土尾矿是一种有着较高利用价值的资源。在减量化处理方面,我国目前对稀土尾矿的处理主要是回收其中稀土元素及铁元素。我国的分离技术尚不够完善,有价元素的残留导致浪费,这是我国稀土尾矿处理技术亟需改进的一点。在资源化处理方面,制备水泥、催化剂等材料有着良好的表现,技术的革新发展速度非常快。加大稀土尾矿的利用量、使尾矿利用途径更加广泛,对于冶金原料的改质作用使其有了更大的利用价值,其中稀土氧化物得到了更加广泛地利用;在无害化处理方面,缓解了我国各稀土矿区的环保压力,减少了进入土壤的重金属元素,从而避免了污染土壤及水体,符合我国绿色发展的大方向。

参考文献

- [1] 张苏江, 张立伟, 张彦文, 等. 国内外稀土矿产资源及其分布概述 [J]. 无机盐工业, 2020, 52 (1): 9-16.
- [2] Kossakowska K, Grzesik K. The significance of energy consumption in environmental impact of rare earth elements recovery from tailings and mining waste [J]. E3S Web of Conferences, 2019, 108 (9): 02011.
- [3] 赵瑞超, 张邦文, 布林朝克, 等. 从稀土尾矿中回收稀土的试验研究 [J]. 内蒙古科技大学学报, 2012, 31 (1): 9

- 13.
- [4] Zhang Y, Lin H, Dong Y B, et al. Coupling relationship between multicomponent recovery of rare earth tailings [J]. *Rare Metals*, 2017, 36 (3): 220-228.
- [5] 田子晨. 改性稀土尾矿基催化剂的制备及其对低浓度甲烷催化性能研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020: 1-19.
- [6] 郑强, 吴文远, 边雪, 等. 稀土尾矿“一步法”焙烧及弱磁选分离铁和稀土的研究 [J]. *稀土*, 2016, 37 (5): 27-34.
- [7] 杨合, 荣宜, 薛向欣, 等. 包头稀土尾矿回收铁的直接还原研究 [J]. *中国稀土学报*, 2012, 30 (4): 470-475.
- [8] 王宇斌, 雷大士, 彭祥玉, 等. 从某稀土尾矿中回收稀土试验研究 [J]. *湿法冶金*, 2016, 35 (5): 432-435.
- [9] 于秀兰, 安磊, 舒燕, 等. 包钢选矿厂尾矿中稀土提取的研究 [J]. *沈阳化工大学学报*, 2008, 22 (2): 100-103.
- [10] 黄小宾. 白云鄂博稀土尾矿萤石提质降杂试验研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2019: 10-18.
- [11] 陈福林, 杨晓军, 何婷, 等. 四川德昌大陆槽某稀土尾矿工艺矿物学分析 [J]. *现代矿业*, 2018, 34 (10): 103-105.
- [12] Ndjigui P D, Bassanak Ongboye P R, Ndong Bidzang F. TiO_2 -Zr-Th-Y-rare-earth elements ore deposit in unconsolidated fine-grained sediments from Tongo Gandima in the Bétaré Oya Gold district, Eastern Cameroon [J]. *Geological Journal*, 2021, 56 (5): 2676-2698.
- [13] 何翔. 四川某含铅稀土尾矿选矿试验研究 [J]. *现代矿业*, 2021, 37 (7): 147-148.
- [14] 王维维, 候少春, 李二斗, 等. 白云鄂博萤石型低品位铁-稀土矿石选矿试验研究 [J]. *中国矿业*, 2021, 30 (9): 132-138.
- [15] 贺宇龙, 王建英, 贾艳, 等. 某稀土浮选尾矿高梯度超导磁选富集稀土矿物试验研究 [J]. *中国稀土学报*, 2020, 38 (2): 251-256.
- [16] 曹永丹, 曹钊, 李解, 等. 白云鄂博稀土浮选研究现状及进展 [J]. *矿山机械*, 2013, 41 (1): 93-96.
- [17] 李世嵩. 稀土尾矿和铁砂尾矿在 1 200 l/d 预分解窑上的应用 [J]. *四川水泥*, 2009, 172 (2): 19-20.
- [18] 和春梅, 杨晓杰, 张嵩. 稀土尾矿对水泥熟料性能的影响 [J]. *昆明冶金高等专科学校学报*, 2014, 30 (3): 14-17.
- [19] 秦磊, 胡世丽, 宋晨曦, 等. 离子型稀土尾矿的氨氮淋洗去除 [J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31 (5): 1395-1404.
- [20] 中思月, 丁威, 黄阳, 等. 稀土尾矿制备多孔陶瓷及其性能 [J]. *非金属矿*, 2021, 44 (3): 1-4.
- [21] 袁定华. 稀土尾矿在陶瓷坯釉中的应用 [J]. *陶瓷研究*, 1991, 6 (3): 7.
- [22] 邱廷省, 卢继美. 尾矿应用于陶瓷材料的试验 [J]. *矿产综合利用*, 1996 (3): 46-48.
- [23] 谢俊, 程金树, 季守林. 烧结法稀土尾矿微晶玻璃装饰板的研究 [J]. *玻璃与搪瓷*, 2008, 36 (4): 9-12.
- [24] 陈国华, 刘心宇. 矿渣微晶玻璃的制备及展望 [J]. *陶瓷*, 2002, 158 (4): 16-20.
- [25] 赵喜伟, 高占勇, 常翔鸣, 等. Al_2O_3 对稀土尾矿微晶玻璃结构和性能的影响 [J]. *中国陶瓷*, 2013, 49 (3): 59-62.
- [26] 俞秀金, 林建新. 利用稀土尾矿制备高强度高活性氨合成催化剂 [J]. *稀土*, 2005, 26 (3): 47-51.
- [27] Zhao R, Tian Z C, Zhao Z. Effect of calcination temperature on rare earth tailing catalysts for catalytic methane combustion [J]. *Green Processing and Synthesis*, 2020, 9 (1): 734-743.
- [28] Lan X, Gao J, Li Y, et al. A green method of respectively recovering rare earths (Ce, La, Pr, Nd) from rare-earth tailings under super-gravity [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 367: 473-481.
- [29] Guo W, Fu R Y, Zhao R X, et al. Distribution characteristic and current situation of soil rare earth contamination in the Bayan Obo mining area and Baotou tailing reservoir in Inner Mongolia [J]. *Huan Jing Ke Xue*, 2013, 34 (5): 1895-1900.
- [30] Zhang Q, Wan G, Zhou C, et al. Rehabilitation effect of the combined application of bamboo biochar and coal ash on ion-adsorption-type rare earth tailings [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20 (9): 3351-3357.
- [31] 贺强, 郭礼荣, 曾庆远, 等. 稀土尾砂治理的研究进展 [J]. *环境保护与循环经济*, 2016, 36 (11): 37-39.