

# 中国稀土废渣时空分布与区域处置策略研究

杜娟, 张贺飞, 柏学凯, 李利

(中核第四研究设计工程有限公司, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 稀土资源开发利用过程产生的部分废渣属于伴生放射性固体废物, 安全、有效处置该类废渣是当前稀土行业发展亟待解决的问题。采用调研分析方法, 按照稀土类型及来源, 对稀土采选过程产生废渣的种类、产率、产量和放射性核素活度水平分别进行了统计, 结合稀土行业发展规划, 初步估算了典型省(自治区)的稀土废渣存量和增量; 梳理了当前稀土伴生放射性废渣处理处置现状及存在的问题, 提出了区域填埋处置策略; 建议全国实行7+x形式, 参照内蒙古自治区包头市的处置形式, 建设稀土废渣库, 集中收集处置本省(自治区)的稀土伴生放射性废渣。基于废渣存量及增量估算, 本研究给出了各省(自治区)稀土废渣处置规模建议。

**关键词:** 稀土; 废渣; 伴生放射性固体废物; 区域处置; 集中处置; 7+x; 策略

**中图分类号:** X756; TL942 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)02-0090-06

**DOI:** 10.13426/j.cnki.yky.2023.11.08

中国稀土资源通常与天然放射性铀系、钍系等核素共伴生, 在其原矿、尾矿(渣)及其他残留物中, 铀(钍)系单个核素比活度一般大于1 Bq/g。因此, 稀土矿被列入生态环境部发布的《矿产资源开发利用辐射环境监督管理名录》<sup>[1]</sup>, 被作为伴生放射性矿进行辐射监管。在稀土的采选、冶炼等开发利用过程中, 放射性核素多被富集在固体废物中, 形成了大量的伴生放射性固体废物, 该类废物具有来源广、种类多、数量大、核素活度浓度范围宽等特点。

《伴生放射性物料贮存及固体废物填埋辐射环境保护技术规范(试行)》(HJ 1114—2020)<sup>[2]</sup>, 对伴生放射性固体废物填埋设施的选址、建设、运行、监护等提出了明确的要求。由于稀土废渣伴生天然放射性, 其最终处置存在填埋场选址困难、邻避效应、封场后维护量大、维护时间长等问题<sup>[3]</sup>, 使得大量废渣在企业内部暂存, 给企业带来了较大的库容压力, 稀土废渣成为制约当前稀土行业发展的关键问题。

为此, 以2017年生态环境部核与辐射安全监督管理技术支持项目“全国稀土废渣区域处置方案研究”为背景, 在调研的基础上, 对中国稀土废

渣的处理处置现状、存在的问题和拟处置的数量进行梳理和估算, 给出稀土废渣的处置策略, 为稀土伴生放射性废渣的安全处置提供思路, 以促进稀土行业的可持续发展。

## 1 稀土废渣产生特点与放射性水平

本研究中, 稀土废渣是指稀土生产过程中使用或产生的铀(钍)系单个核素比活度大于1 Bq/g的固体废物, 包括采选过程产生的尾矿(渣), 冶炼过程产生的废渣和其他残留物。

目前, 中国大量开采的稀土矿床主要有以包头为代表的混合型稀土矿(氟碳铈矿和独居石矿)、以四川冕宁为代表的氟碳铈矿、以江西和广东为代表的离子吸附型稀土矿等<sup>[4]</sup>。此外, 湖南和广东部分企业以独居石为原料进行稀土冶炼分离, 制备稀土化合物。

### 1.1 混合型稀土矿

包头白云鄂博矿床属于铁、稀土、钍共生矿, 天然放射性钍质量分数约0.04%, 其中有96%~98%的天然放射性钍进入废渣<sup>[5]</sup>。废渣包括选矿产生的尾矿、炼铁产生的高炉渣、稀土精矿冶炼产生的水浸渣、稀土合金火法冶炼产生的合金渣等,

收稿日期: 2023-11-08

基金项目: 生态环境部核与辐射安全监督管理技术支持项目(JD201753)。

第一作者简介: 杜娟(1982—), 女, 河北衡水人, 硕士, 高级工程师, 主要从事伴生矿及铀矿冶辐射防护和环境保护工作。

其中水浸渣渣量(干渣)约为稀土精矿量的 70%<sup>[6]</sup>,废渣中铀、镭含量低,但钍含量较高(<sup>232</sup>Th 比活度在 1~17 Bq/g)。当前,废渣主要在包头放射性废物库以及企业的自建库中填埋处置。甘肃稀土企业采用包头稀土精矿为原料,其产渣情况与包头相似。

### 1.2 氟碳铈矿

氟碳铈矿采选过程产生浮选尾矿、磁选尾矿,其单个核素比活度在 1 Bq/g 左右,一般以尾矿库的形式堆存。精矿冶炼过程中,除铁产生铁钍渣,硫化钠除铅产生铅渣,酸溶产生含钍的酸溶渣。根据相关调研结果<sup>[7]</sup>,各种废渣产量约为氧化稀土(REO)产量的 12%。

长期监测结果表明,稀土冶炼废渣中<sup>232</sup>Th 比活度为 1.5~8.7 Bq/g,<sup>226</sup>Ra 比活度为 1.2~5.4 Bq/g<sup>[8]</sup>,均超过了豁免水平。目前,大部分四川稀土企业建设了废渣暂存库,有通风、防渗、电离辐射标识等,管理较规范;部分企业将铅渣和冶炼过程产生的铈富集物作为副产品出售。

### 1.3 离子型稀土矿

离子吸附型(风化淋积型)稀土矿,主要分布在南方,目前主要采用原地浸出工艺,采矿过程产生少量除杂渣、渣头渣,产渣比例约为 REO 产量的 13%;废渣中核素的比活度与矿的来源相关,<sup>232</sup>Th 比活度为 0.02~85.6 Bq/g,均值约为 5.4 Bq/g<sup>[9]</sup>。冶炼过程产生酸溶渣产量是稀土氧化物冶炼分离产品量的 10%左右,其核素比活度一般大于豁免水平。废水处理产生中和渣的核素比活度也与产地及工艺有关,一般可豁免,但有少部分超过豁免水平。

南方各企业一般都按照环保部门的要求建设了废渣暂存库,暂存设施的建筑形式、规模、通风、防渗等做法各不相同。

### 1.4 独居石矿

独居石矿是生产稀土的原料之一,全国独居石生产加工量约 6 万 t<sup>[10]</sup>,主要原料为进口的独居石矿,以及国内自采、进口海滨砂或采砂等选矿产生的副产品等。采用酸液常压分解法冶炼,废渣主要来自矿石酸溶过程产生的铀钍渣(优溶渣),除镭过程产生的镭钍渣以及废水处理产生的中和渣。废渣总产生量约为独居石精矿量的 25%;废渣中的核素活度浓度较高,优溶渣的铀、钍放射性比活度达几十~几百 Bq/g,镭钍渣的放

射性比活度达上百 Bq/g<sup>[11]</sup>。

已调研的独居石矿企业对冶炼过程产生的废渣均进行了独立储存。

## 2 稀土废渣量及其时空分布特征

### 2.1 现有稀土废渣量及其分布

对伴生放射性废渣的监管是逐步完善的,目前尚难以得到各稀土冶炼大省准确的废渣存量数据。

内蒙古自治区的稀土冶炼废渣(主要为水浸渣)集中在包头放射性废物库、达茂旗自建库以及包钢稀土的自建库中。根据稀土行业公开资料统计,中国 1991—2023 年稀土冶炼分离产品的产量总计约 305 万 t,其中内蒙古地区稀土冶炼分离产品的产量约占总产量的 40%;水浸废渣量估算约 140 万 t,其中约 100 万 t 在包头放射性稀土废渣库中填埋(当前已封场),其他水浸废渣主要在企业的自建库中处置。甘肃省稀土废渣与包头地区的相似,均在甘肃省稀土废渣库中处置。

江苏省是稀土冶炼企业较多的省,有 10 余家稀土冶炼企业。初步统计至 2017 年,江苏稀土冶炼企业废渣存量累计约 4 万 t,包括中和渣约 3 万 t,酸溶渣约 1 万 t<sup>[12]</sup>。

另据了解,广东省历史遗留稀土废渣约数万吨,放射性水平较高的废渣在 2 万 t 以上。

自 2012 年起,四川省的各稀土冶炼企业将铁钍渣进行了单独暂存,按照理论产渣比进行估算,四川省近十余年的存量在 2 万 t 左右。

湖南省稀土企业主要分布在衡阳、益阳、永州等地,其主要以独居石为原料生产单一或复合稀土氧化物。益阳市原有的 10 余家稀土冶炼企业,目前绝大部分企业已关停;但部分关停的企业内部遗留了大量稀土废渣,已知的 2 家关停企业厂区中,放射性水平较高的废渣存量约 1.2 万 t<sup>[13]</sup>,还有受到放射性污染的土壤、底泥、道路、构筑物等。

### 2.2 稀土废渣量时空分布特征

2011 年,国务院颁布了《国务院关于促进稀土行业持续健康发展的若干意见》<sup>[14]</sup>,对稀土开采及冶炼量进行总量控制,至 2016 年底,六大稀土集团组建完成,基本实现了对全国稀土的采冶控制。

工业和信息化部自 2016 年起每年分两批下

达稀土生产总量控制计划,根据2016—2023年各年的稀土生产总量控制计划<sup>[15]</sup>,六大稀土集团的矿产品及稀土产品的份额基本保持稳定,平均增长率在15%左右。

国家对稀土采取总量控制,在未出台正式稀土行业发展规划的前提下,“十四五”期间的平均增长率按照15%考虑,至2025年预计冶炼配额在30万t左右。根据2016年企业的稀土冶炼分离产品总量计划分配表,可初步获得对应省的稀土采冶量及其比例。在此基础上结合各省稀土矿典型类型以及不同类型稀土矿采冶废渣产生比例,可以估算“十四五”末,内蒙古自治区和各省的采冶稀土废渣总量,合计约13.5万t。2025年内蒙古自治区和各省稀土伴生放射性废渣估算产生情况见图1。

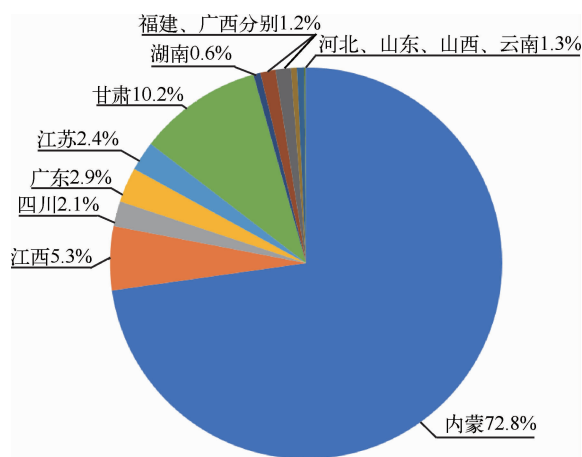


图1 规划年份稀土废渣产量分布

Fig. 1 Distribution of rare earth waste residue during the plan year

### 3 稀土废渣处置现状及存在的问题

#### 3.1 稀土废渣处置现状

绝大部分稀土废渣处于暂存状态。对于稀土伴生放射性废渣,目前国内只有内蒙古自治区曾建设专门的伴生放射性废渣处置库,由包头辐射环境管理处统一运行和监管,当前已封场整治。其他省市的稀土废渣,由于没有集中的处置场所,目前大部分处于企业内部暂存状态;各暂存库的主体构造形式、底部防渗层构造、通风状况、库内分区、废渣包装及堆放形式等各不相同。

稀土废渣处置不规范。《伴生放射性物料贮存及固体废物填埋辐射环境保护技术规范(试行)》(HJ 1114—2020)对处置场的选址及设计运行要求较严格,当前由于企业废渣库选址较困难,也有极少数企业在HJ 1114—2020标准出台前建设了填埋场<sup>[16]</sup>,使得在选址、防渗系统、截排洪系统、封场覆盖系统等方面与标准要求存在较大差异。

当前江西、湖南、广东等省均有核工业背景的企业,在建设区域伴生放射性固体废物处置场,可以收纳各省的稀土冶炼伴生放射性废渣。

#### 3.2 稀土废渣处置存在的问题

由于稀土矿属于伴生放射性矿的范畴,其废物处置涉及管理问题以及技术问题等。

1)废渣分散不利于辐射安全管理。全国稀土采冶伴生放射性废渣广泛分布于多个省及地区,且数量、种类、核素比活度水平,以及处理处置方式等差异性较大,核素半衰期长,不利于监管部门的有效管理。

2)辐射安全管理能力差异大。稀土种类及来源多种多样,企业的性质及实力也各不相同,因此在辐射安全管理重视水平及管理能力方面也存在较大的差异。部分企业,特别是民营企业,其对放射性相关知识和要求了解不足,辐射安全意识淡薄,导致辐射安全管理与宣传教育不到位。

3)造成一定的辐射环境影响。受辐射安全意识、管理能力等多方面因素的影响,稀土采冶废渣的不恰当处理处置给周围区域地表水、地下水、大气和土壤等产生了一定的放射性污染;污染物经过饮水、动植物等途径进入生物链,对公众健康带来隐患。

4)部分废渣防护要求高。部分废渣(例如独居石冶炼废渣)的放射性水平较高,需要采取辐射防护相关措施,以降低其对工作人员的辐射影响,因此防护要求较高。

### 4 稀土废渣区域处置策略

#### 4.1 稀土废渣处置原则

1)保护环境、保护人体健康及保护后代的原则。稀土伴生放射性废渣的处置应为保护环境、保护人类健康提供一种可接受水平的防护,同时不应给后代造成比当代所能接受的程度还高的影响。

2)就近集中处置的原则。由于稀土伴生放射性废渣中含天然放射性核素,半衰期长;为便于管理、有效监控、减轻企业运行及监管负担,以及防止伴生放废物处置场遍地开花,建议采用就近集中处置的原则,由具备辐射安全管理能力的单位运行和管理。

3)以点带面原则。区域内有多家稀土冶炼企业,若有一家企业建设了符合要求的处置库,可以收储区域内的同类废渣。

4)分类处置的原则。部分稀土伴生放射性废渣的核素比活度较高,周围剂量当量率较强,例如独居石冶炼过程产生的部分废渣其铀钍系单个核素比活度超过 400 Bq/g,需要对该类废渣进行分类处置。

#### 4.2 稀土废渣处置方式

废渣的处理处置方式总体可分为综合利用、填埋处置和井下处置。综合利用可从废渣中回收有用金属或将废渣用作建筑材料等。填埋处置主要是新建废渣地表处置设施,HJ 1114—2020 对填埋处置要求较为明确,但填埋处置存在选址困难、封场后维护量较大、维护时间长等问题。井下处置包括井下充填处置和井下岩洞处置,目前国内尚无成熟的使用案例。

参考 HJ 1114—2020,对铀质量分数 0.1%以上的废渣,建议进行铀资源回收利用;对铀(钍)系单个核素比活度较低、暂时无回收利用价值的废渣,建议选址新建稀土废渣填埋处置场;对废渣中

铀钍系单个核素活度浓度超过 400 Bq/g 的废渣需考虑混凝土屏蔽、远程控制等辐射防护及环境保护措施。

#### 4.3 稀土废渣处置分区规划

根据前文对废渣存量及增量的统计分析,稀土废渣重点分布于内蒙古自治区,以及甘肃、湖南、江西、广东、江苏、四川等省,这七个省(自治区)稀土废渣量约占全国总量的 95%。因此,对于稀土废渣的区域处置,建议全国实行 7+x 的形式,在主要的稀土大省参照内蒙古包头的形式分别建设稀土废渣库,集中收集处置本省以及邻近省的稀土伴生放射性废渣;同时在国内适当位置建设国家稀土废渣库,收集处理处置其他未建废渣库省的稀土废渣。

#### 4.4 废渣区域处置规模建议

废渣区域处置规模的确定需要对待处置废物量进行估算,待处置废物量包括各省稀土废渣现存量(主要统计 2013 年监管名录出台以后的数量)、设计年限内新增的废渣量以及稀土工业企业环境整治过程产生的比活度超过 1 Bq/g 的固体废物等 3 部分,设计年限考虑 10 年;“十四五”期间废渣平均增长率按照 15%估算,其余年份参照 2025 年进行估算;停产企业数量按照第二次污染源普查的关停稀土企业进行统计,同时假设平均每个稀土停产企业退役产生约 0.5 万 m<sup>3</sup>放射性废渣和受污染固体废物,从而得到主要稀土省(自治区)废物量结果(表 1)。

表 1 主要省(自治区)稀土废渣量估算  
Table 1 Estimation of rare earth waste residues in major provinces(autonomous region)

省(自治区)	设计年限内 产量/万 t	至 2023 年理论 存量/万 t	环境整治 废物/万 t	废渣量 合计/万 t	设计 规模/万 t
内蒙古自治区	87.0	140	6.50	283.3	/
江西省	8.90	5.00	5.50	20.4	22
四川省	3.90	1.90	2.50	8.30	9.0
广东省	5.40	2.70	2.50	10.6	12.0
江苏省	4.60	2.30	4.00	10.9	12.0
甘肃省	27.4	28.0	1.00	56.4	62.0
湖南省	7.50	2.70	13.6	23.7	26.0
山东省、福建省、广西壮族 自治区、陕西省、河北省	7.10	1.20	5.00	13.2	15.0
合计	151.8	183.7	40.6	426.9	

考虑到湖南省有多家独居石冶炼加工企业,建议对于接收独居石冶炼加工过程产生的镭钍渣等核素比活度超过 400 Bq/g 的废渣库,尽量采用自动化操作工艺,并采取措施屏蔽周围剂量当量率,以尽量降低对工作人员及环境的辐射危害。

#### 4.4 废渣处置库建设模式

根据 HJ 1114—2020,伴生放射性废物产生单位可按照标准要求自行建设伴生放射性固体废物填埋设施,也可将伴生放射性固体废物送至其他单位的设施填埋,该处置设施建设单位需配套必要的辐射安全管理机构、制度、人员、设施设备。

另一种建设模式是以省为单位建设集中区域处置库,由当地政府或生态环境主管部门支持,由具有辐射安全管理技术经验的专业单位投资建设并运营管理。

## 5 结论

中国稀土矿种类多样,通过对典型稀土矿包括混合型矿、氟碳铈矿、离子吸附型矿,以及独居石等采选及冶炼过程中废渣种类、数量、产渣比、活度水平的分析,总结了稀土废渣的时空分布特点。中国的稀土伴生放射性废渣主要分布在内蒙古自治区,以及甘肃、湖南、江西、广东、江苏、四川等省。

结合稀土总量控制指标及发展规划,初步估算了各典型省(自治区)稀土废渣现存量和设计年限内的产量,在此基础上给出了预估的设计规模,提出了  $7+x$  的区域处置策略;并结合当前标准要求及监管现状,提出了废渣处置库建设模式。研究结果为稀土伴生放射性废渣的安全处置提供了基本思路。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 矿产资源开发利用辐射环境监督管理名录[Z]. 北京:生态环境部办公厅,2020.
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 伴生放射性物料贮存及固体废物填埋辐射环境保护技术规范(试行):HJ 1114—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
- [3] 张贺飞,杜娟. 某稀土伴生放射性废渣库闭库封场设计[J]. 铀矿冶,2020,39(1):62-66.
- [4] 王国珍. 稀土冶炼“三废”及放射性污染现状及治理建议[J]. 稀土信息,2007,281(8):19-23.
- [5] 郭石磊,曹新生. 白云鄂博伴生放射性矿物的利用及污染防治[J]. 职大学报,2009(2):122-124.
- [6] 崔建国,贾涛,侯睿恩,等. 稀土高温酸法工艺放射性废渣资源性研究[J]. 稀土,2017,38(2):134-138.
- [7] 帅星. 四川冕宁牦牛坪矿区稀土行业固体废物产生量、属性与处理方式[J]. 环境科学导刊,2015,34(6):76-80.
- [8] 杨寿南. 四川省稀土生产中产生的含放射性废渣环境问题及安全处置建议[J]. 环境与发展,2018(7):69-72.
- [9] 罗建军,刘桂芳,孙庆红. 第一次全国污染源普查稀土行业天然放射性核素调查分析研究[J]. 辐射防护,2011,31(6):342-347.
- [10] 中核第四研究设计工程有限公司. 独居石加工生产稀土产品企业情况研究[R]. 石家庄:中核第四研究设计工程有限公司,2019.
- [11] 桑园,覃波. 独居石冶炼过程中的放射性污染与防护[J]. 有色冶金节能,2017,2(1):52-55.
- [12] 周程,朱晓翔,蒋若澄,等. 江苏省含低放射性废渣清洁解控技术规范探讨[J]. 环境监测管理与技术,2017,29(4):60-64.
- [13] 益阳市赫山区环境保护局. 湖南省益阳市赫山区金源稀土厂污染场地修复项目实施方案[R]. 益阳:益阳市赫山区环境保护局,2017.
- [14] 中华人民共和国国务院. 国务院关于促进稀土行业持续健康发展的若干意见:国发〔2011〕12号[R]. 北京:中华人民共和国国务院,2011.
- [15] 工业和信息化部、自然资源部. 工业和信息化部、自然资源部关于下达 2020 年稀土开采、冶炼分离总量控制指标的通知(工薪部联原〔2020〕103号)[R]. 北京:工业和信息化部、自然资源部,2020.
- [16] 董春明,张志和,刘峙嵘. 共伴生放射性废渣合理化处置探讨[J]. 铀矿冶,2017,36(1):46-50.

## Spatiotemporal Distribution and Regional Disposal Strategy of Rare Earth Waste Residue in China

DU Juan, ZHANG Hefei, BAI Xuekai, LI Li

(The Fourth Research and Design Engineering Corporation, CNNC, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** Part of the waste residue generated during the development and utilization of rare earth resources belongs to the associated radioactive solid waste. The safe and effective disposal of this type of waste residue is an urgent problem that needs to be solved in the current development of the rare earth industry. By the method of investigation and analysis, based on the types and sources of rare earths, statistics were conducted on the types, yields and radioactive nuclide activity levels of waste generated during the mining and selection process. Combined with the development plan of the rare earth industry, the stock and increment of rare earth waste in typical provinces(autonomous regions) were preliminarily estimated. And the current status and existing problems of the treatment and disposal of rare earth associated radioactive waste residue were sorted out. On this basis, a strategy for regional landfill disposal is proposed; it is recommended to implement a  $7+x$  model nationwide, and to build rare earth waste residue warehouses in major rare earth provinces(autonomous regions), with reference to the model of Baotou in Inner Mongolia, to collect and dispose of rare earth associated radioactive waste residues in the provinces(autonomous regions). Based on the estimated amount and increment of waste residues, suggestions for the scale of rare earth waste residue disposal in each province (autonomous region) are provided.

**Key words:** rare earth; waste residue; radioactive solid waste; regional disposal; centralized disposal;  $7+x$ ; strategy