

我国伴生放射性废渣特点及处置案例

冀 东 杜 娟 张贺飞 刘晓超

(中核第四研究设计工程有限公司 石家庄 050021)

摘要 伴生放射性废渣具有核素半衰期长、放射性水平范围宽等特点。我国的伴生放射性废渣涉及行业多、来源广、种类多、数量大,已制约该行业的健康发展。由于该类废渣存在物理化学性质复杂、区域分布及处理处置现状差异大等问题,需提出有效的安全处置措施。本文通过与危险废物、中低放废物、铀矿冶废物等进行对比分析,为我国伴生放射性废渣的监管理念提供技术支持;通过系统性介绍我国当前针对该类废渣的处理处置方法、设计要求、适用场景、优缺点及应用实例等,提出了我国伴生放射性废渣的处置策略。同时以某区域处置场项目为典型案例,深刻剖析了项目及废渣特点,给出了解决的对策,为相关处置工作提供参考。在上述工作基础上,进一步提出了推动我国伴生放射性废渣最终处置的建议。

关键词 伴生放射性废渣, 特点, 处置案例, 处置策略

中图分类号 TD983

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.010005

Characteristics and disposal cases of associated radioactive waste residues in China

Ji Dong DU Juan ZHANG Hefei LIU Xiaochao

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

Abstract The associated radioactive waste residue has characteristics of long half-life of nuclides, wide range of radioactive levels, and so on. There are many industries involved in associated radioactive waste in China with wide sources, large types and quantities, hence restrict the healthy development of the industry. This study aims to propose effective safety disposal measures suitable for the complex physical and chemical properties of such waste residues, large differences in regional distribution and disposal status. Through comparison and analysis with hazardous waste, medium and low level radioactive waste, uranium mining and smelting waste, the technical support for the regulatory concept of associated radioactive waste residue was provided. The current disposal methods, design requirements, applicable scenarios, advantages-disadvantages and application examples of this kind of waste residue were systematically introduced, and the disposal strategies of associated radioactive waste residue were suggested. Meanwhile, a typical case of a regional disposal site project was taken as example, the characteristics of the project and waste residue were deeply analyzed, and the countermeasures were given to provide reference for relevant disposal work. Finally, based on above work, some suggestions are put forward to promote the final disposal of associated radioactive waste residue in China.

Key words Associated radioactive waste, Characteristics, Disposal cases, Disposal strategy

我国矿产资源丰富,部分矿产资源与铀、钍等天然放射性核素共生,这类矿产资源在采选、冶炼加工等开发利用过程中,放射性核素多被富集在固体废物中,形成了大量含有放射性的固体废渣;2020

第一作者:冀东,男,1983年出生,2020年于中国原子能科学研究院获博士学位,辐射防护及环境保护专业,主要从事辐射防护及环境保护相关的设计科研工作

通信作者:刘晓超, E-mail: liuxiaochao96@126.com

收稿日期:2022-09-15, 修回日期:2022-12-31

First author: Ji Dong, male, born in 1983, graduated from China Institute of Atomic Energy with a doctoral degree in 2020, major in radiation protection and environmental protection, focusing on radiation protection and environmental protection-related design and research work

Corresponding author: LIU Xiaochao, E-mail: liuxiaochao96@126.com

Received date: 2022-09-15, revised date: 2022-12-31

年生态环境部发布了《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)^[1],明确了伴生放射性固体废物的概念为:非铀(钍)矿产资源开发利用活动中产生的铀(钍)系单个核素含量超过 $1 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 的固体废物,包括采选及冶炼过程中产生的尾矿、尾渣和其他残留物等。

近年来,人为活动引起天然放射性物质(Naturally Occurring Radioactive Material, NORM)的辐射及环保问题已日益受到国际及国内社会的关注^[2-3],我国陆续发布了“国环规辐射[2018]1号”^[4]、“公告2020年第54号”^[5]、“公告2021年第28号”^[6]、“HJ 1114—2020”^[1]等多项法规标准来规范共伴生放射性矿产资源的管理,相关监管体系也在不断完善过程中。在此背景下,由于我国伴生放射性废渣来源广、种类多、数量巨大且性质复杂^[5-6]、多数处于暂存状态且无最终处置去向,因此,制约了共伴生放射性矿产企业的健康、可持续发展,成为了当前我国伴生放射性矿监管领域亟待解决的问题。鉴于此,本文在充分调研的基础上,整理了我国伴生放射性废渣的特点,分析了其与危险废物、中低放废物、铀矿冶废物等处理处置方面的区别,总结了当前存在的问题;针对其特点,进行了典型伴生放射性废渣处置案例分析,在此基础上,提出我国伴生放射性废渣的处置建议和处置策略,为相关工作做参考。

1 我国伴生放射性废渣的特点及存在的问题

1.1 我国伴生放射性废渣的特点

1) 含天然放射性核素,衰变周期长
任何矿产都含有伴生天然放射性核素,本文重

点关注铀(钍)系单个核素含量超过 $1 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 的采选及冶炼固体废物,²³⁸U、²³²Th等核素的半衰期在数十亿年以上,因此,属于长寿命的放射性废物。

2) 涉及行业多、来源广

矿产资源开发利用涉及的行业多,国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)将产生NORM的行业划分为11大类^[7],欧盟将产生NORM废物的行业划分为17类^[8],2020年我国生态环境部出台的《矿产资源开发利用辐射环境监督管理名录》^[5](公告2020年第54号),将稀土、铌/钽、锆石和氧化锆、锡、铅/铋矿、铜、铁、钒、磷酸盐、煤、铝、钼、金、锑、钛、镍等16种矿产类别列入了辐射环境监督管理名录。同年生态环境部颁布了《2020年全国伴生放射性矿开发利用企业名录》^[6],涉及全国23个省、自治区、直辖市的15种矿产资源类别的363家企业,采选及冶炼企业分布见图1。

3) 种类多、放射性水平范围宽、数量巨大

伴生放射性废渣的种类繁多,单稀土行业冶炼就有水浸渣(混合型矿)、优溶渣、酸溶渣(离子型矿)、镭钡渣(独居石碱法处理)、铁钒渣铅渣(氟碳铈矿冶炼)、污水处理沉渣等^[9-10];各行业产生的废物类型以及其主要的核素活度浓度范围见表1。由表1可知,不同废物的放射性核素分布范围极广,一般采选尾矿(渣)的放射性核素活度浓度较低,在 $1 \sim 5 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,经过冶炼加工后的废渣特别是稀土、铌钽、锆及氧化锆等行业的冶炼废渣中核素活度浓度较高,甚至高达数百 $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$;由于涉及行业多,来源广,使得矿产资源开发利用含放射性废渣的产生量巨大,根据《第二次全国污染源普查公报》^[11],2017年末,全国累积贮存量为20.30亿t,其中放射性活度浓度超过 $10 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 的固体废物总量为225万t,另外还有数万吨超过 $400 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 的固体废物。

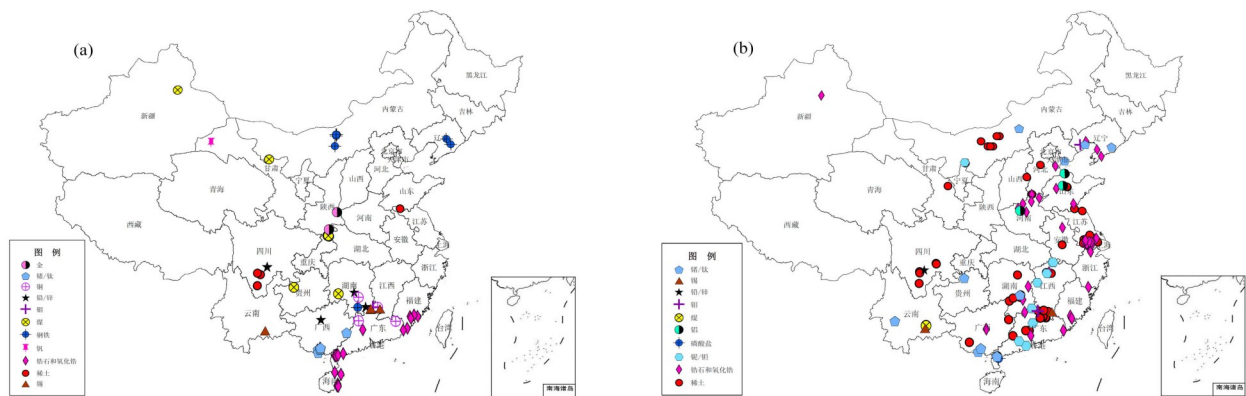


图1 我国共伴生放射性矿采选(a)及冶炼加工(b)企业分布图
Fig.1 Distribution of mining (a) and processing enterprises (b) of associated radioactive ore in China

表1 不同行业产生的废物类型以及其主要的核素活度浓度范围一览表^[12]
Table 1 List of waste types generated by different industries and main nuclide activity concentration ranges^[12]

行业 Industry	主要废物类型 Main waste types	活度浓度 Activity concentration / Bq·g ⁻¹
稀土、铌/钽、锆和氧化锆工业 Rare earth, niobium/tantalum, zirconium and zirconia industries	尾矿、尾渣; 冶炼渣、沉淀渣、污水渣 Tailings, tail slag; smelting slag, sediment slag, sewage slag	1~1 800
锡、铜、铝、锌、铅、铁和钢的生产 The production of tin, copper, zinc, lead, iron and steel	尾矿、尾渣、炉渣、沉积尘 Tailings, tail slag, slag, sedimentary dust	0.2~55
磷酸盐工业 Phosphate industry	磷石膏、浮选渣、硫酸镭沉淀 Phosphogypsum, flotation residue, radium sulfate precipitation	0.1~160
氧化铝 Alumina	赤泥 Red mud	0.1~8
锗/钛生产 Germanium/titanium production	酸性沉渣、结垢、沉积尘 Acid sediment, scale, sediment dust	1~65
燃煤工业 The coal industry	炉渣及煤灰 Slag and coal ash	0.4~50

4) 物理化学特性复杂

由于来源范围广,伴生放射性废渣的理化性质较为复杂,部分废渣酸碱度相差较大,例如冶炼废物的pH大多在3以下,冶炼废物中通常含有大量的酸根、氯离子、重金属等,由于废渣未进行中和处理,核素极具浸出性。

废渣含水率各不相同,部分高达80%,例如一些选矿尾矿等;废渣的粒径大小不一,部分为微米级,部分则为厘米级;不同的酸碱度、粒度及含水率等导致废渣的堆存状态不同,有散料、有泥状的,也有板结的。

5) 区域分布差异大^[12]

根据初步统计,我国伴生放射性废渣年产生量及贮存量较大的地区主要包括内蒙古、广西、辽宁、四川、湖南、云南、江西、广东等省份,分布见图2;其中内蒙古地区的废渣量巨大,主要为含钍的铁选尾矿、稀土冶炼废渣等;广西有一家铝矿加工企业,年产赤泥上百万吨,其赤泥中铀、钍含量略超过1 Bq·g⁻¹;辽宁及云南各有一家铁选企业,铁选尾矿中²³⁸U含量超过1 Bq·g⁻¹,数量超百万吨;四川主要为稀土选矿尾矿及冶炼废渣;湖南、江西、广东等省

份则主要是稀土、锆及氧化锆、铌钽等行业产生的冶炼废渣。

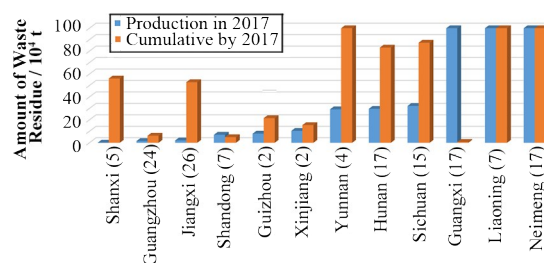


图2 我国伴生放射性固体废物产生及累计贮存分布情况
Fig.2 Production and cumulative storage distribution of associated radioactive solid waste in China

6) 处理处置现状不同

由于涉及的行业、企业众多,废渣的来源和数量各不相同,各企业对该类废物的处理处置方式也各不相同,目前,对于核素活度浓度较高的冶炼废渣,全国除内蒙古包头建设有集中的稀土冶炼废渣库以外,其他省份绝大部分均在企业内部处于暂存状态,但暂存方式各不相同,有半敞开式的、有地坑贮存的、有库房内散料堆存的,见图3。对于数量巨大的选矿废渣则多数以露天尾矿库的形式堆存。



图3 各企业不同废渣的贮存方式
Fig.3 Different waste residue storage methods of various enterprises

7) 具有不同程度的回收价值

部分废渣中的铀含量达到了铀矿开采的经济品

位,该部分废渣应进行铀资源的回收。

1.2 我国伴生放射性废渣当前存在的问题

1)在国家相关标准出台之前,伴生放射性矿采选尾矿(渣)等通常是作为一般工业固体废物按照尾矿(渣)库或一般固体废物库的相关设计规范进行的贮存及堆填,其库区防渗、运行管理、封场设计、监管维护等均未考虑放射性的问题。

2)HJ 1114出台后,由于提出了较严格的废渣库选址、建设、填埋运行等要求,绝大部分伴生矿企业特别是废渣年产量较低的冶炼加工企业选择在企业内部对废渣进行暂存,但贮存方式各不相同,长时间的贮存给企业造成了库容、环保、职业安全、监管等多重压力,亟需对该类废渣进行最终的处置。

2 我国伴生放射性固废的监管理念

2.1 对《放射性废物分类》的分析

2017年,三部委联合发布了《放射性废物分类》(原环保部公告2017年第65号)^[13],根据该标准以及IAEA的GSG-1报告,伴生放射性固废属于放射性

废物范畴。参考其分类准则以及我国伴生放射性废渣核素活度特点,大多数矿产资源开发利用过程产生的伴生放射性废渣可以归为低水平废物、极低水平废物和低水平废物。根据放射性核素活度浓度的不同,矿产资源开发利用含放射性废渣的最终处置方式可以采取近地表处置或地表工程掩埋处置。

2.2 与其他废物的对比分析

鉴于我国伴生放射性废渣的特点,分别从废物来源、废物特点以及现有处理处置方式上与危险废物、中低放废物、铀矿冶废物等进行了对比分析,见表2。

对于危险废物、低中放废物、铀矿冶废物等,我国有较为完整的监管体系,与危险废物相比,伴生放射性废渣长期存在放射性是最主要的区别;与核设施产生的中低放废物相比,伴生放射性废渣来源广、数量大且含有天然放射性核素、衰变周期长是基本的区别;与铀矿冶废物相比,伴生放射性废渣的种类多、理化性质复杂是最主要区别。

表2 不同废物来源、特点及处理处置方式对比分析
Table 2 Comparative analysis of different waste sources, characteristics and treatment methods

要素 Element	危险废物 Hazardous waste	低中放废物 Low-intermediate level radioactive waste	铀矿冶废物 Uranium mining and metallurgy waste	伴生放废物 Other radioactive solid waste
来源 Source	国家危险废物名录,规定危废鉴别标准 National hazardous waste list, hazardous waste identification standard	核设施营运单位、核技术利用单位产生的废物 Wastes generated by units operating nuclear facilities and using nuclear technology	铀(钍)矿开发利用单位产生的废物 Wastes generated by uranium mining development and utilization units	非铀(钍)矿产资源开发利用活动中产生的铀(钍)系单个核素活度浓度超过 $1 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 的固体废物 Solid wastes of uranium (thorium) series with a single nuclide activity concentration exceeding $1 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ generated from the exploitation and utilization of non-uranium (thorium) mineral resources
废物特点 Characteristics	种类繁多、性质复杂、数量大 Wide variety, complex nature and large quantity	来源广,种类繁多;多为寿命相对较短的人工核素;与伴生放废物相比,数量有限 Wide sources and various types; most of them are artificial nuclides with relatively short life; compared with associated radioactive waste, the quantity is limited	与伴生废物相比,来源及种类相对单一,性质相对简单 Compared with the associated waste, the source and type are relatively simple and the nature is relatively simple	来源广,种类繁多、活度范围大、数量大、性质复杂;含天然放射性核素、半衰期长 A wide range of sources, various types, large range of activity, large quantity, complex nature; contains natural radionuclides, long half-life
处理处置方式 Disposal method	综合利用、焚烧或填埋处置 Comprehensive utilization, incineration or landfill disposal	整备、暂存、近地表处置、中地质处置 Servicing, temporary storage, near surface disposal, medium geological disposal	尾矿库或尾渣库 Tailings pond or dry tailings pond	资源综合回收、暂存、填埋 Comprehensive resource recovery, temporary storage and landfill

2.3 伴生放射性废渣监管理念

根据上述特点与对比分析,我国放射性废物有严格的定义和管理程序,而矿物开采、加工处理过程中产生的伴生放射性废渣,虽属于放射性废物范畴,但由于其放射性活度相对较低、衰变周期长、数量大、天然存在等特点,需要采取不同的管理方式。

1)大多数含天然放射性核素的废物可以在地表填埋设施中处置,对于少量放射性活度较高的固体废物,应关注填埋过程中的职业防护问题,按照 HJ 1114—2020,铀(钍)系单个核素含量超过 $400 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 的固体废物处置需要采取更为严格的环境保护措施。

2)国家允许伴生放射性矿开发利用单位按照国家有关规定自行建设伴生放射性固体废物处置设施,同时也鼓励有能力的单位建设集中处置设施,鼓励省、自治区、直辖市开展处置区域合作,共享伴生放射性固体废物处置设施。鼓励利用铀(钍)矿冶设施处置伴生放射性固体废物。

3)伴生放射性固体废物处置单位应当建立处置情况记录档案,并实施年报制度。

4)伴生放射性固体废物处置设施关闭后应进行监护,监护的时间需要足够长,从而确保废物处置的长期安全稳定。

3 我国伴生放射性废渣处理处置策略

3.1 我国伴生放射性废渣处理处置方法对比分析

废渣的处理处置方式总体可分为资源综合回收、场内外暂存、填埋处置和井下处置等几类:

资源综合回收是指从废渣中回收有用金属资源,适用于有价金属达到一定回收品位的废渣,要求其工艺先进、环保及经济可行;优点是可实现资源的回收利用,缺点是废渣经处理后仍需进行最终处置,当前湖南共伴生铀资源综合利用项目利用稀土废渣及独居石等回收铀及稀土资源,为典型的资源综合回收项目。

场内外暂存是废物的临时贮存,适用于废渣数量有限、暂时无处置去向的小型企业,废渣贮存应设置隔离、防雨设施,采取防腐防渗、防尘抑尘等措施,采用库房贮存的还应设置通风系统;该方法的优点是暂存设施的建造及运行较简单、快捷,能保证废渣不对外环境造成污染,但贮存是权宜之计,暂存过程是监管的重点,且仍需进行最终的处置,当前江西、湖南、广东等地多数伴生矿企业的废渣属于暂存状态。

填埋处置包括柔性结构和钢筋混凝土单元形式两种,“HJ 1114—2020”出台后,对柔性填埋处置有较为明确的要求,适用于放射性核素活度浓度较低、数量较大的废渣,区域地下水位较深或降雨量较小较易选址的项目;设计建设过程需做好防渗、中场覆盖、截排洪、坝体安全稳定、封场覆盖、辐射防护等工作,该方法的优点是库容较大;工程建设投资相对较低;但存在选址条件要求较高、无法杜绝外界雨水浸入,封场后维护量较大、较难实现全程自动化等问题;当前内蒙古、甘肃等地的稀土废渣库属于该建设类型。

钢筋混凝土单元形式的填埋场适用于放射性核素活度浓度较高、数量有限的冶炼废渣以及区域降水量较大或者地下水位较浅不易选址的项目;设计建设过程需做好防雨、防渗、废渣稳定化、截排洪、封场覆盖、辐射防护等工作;该方法的优点是易于实现自动化;能有效阻断雨水入渗;对场址的要求相对较低;封场关闭后的监护工作相对较简单,缺点是工程建设及运营成本相对较高,处置废物量有限;当前拟建广东处置场属于该类型。

废物处置场井下处置包括井下充填处置和井下岩洞处置两种处置方式,应重点关注对地下水的长期影响,目前正在探索过程中。适用于有条件优越的合适场址的项目;设计建设过程需进行严格的水文地质条件分析和评估,需做好必要的工程屏障、导排水等设计,加强地下水的长期监测;该方法可解决废渣堆放侵占场地及污染环境的问题,能确保较长时间的放射性隔离,安全性较高;但对场址条件要求高,需要经过严格的评估且处置成本相对较高;当前云南某锆煤矿井下充填火法冶炼废渣项目,至今对地下水环境的影响无定论。

3.2 我国伴生放射性废渣处理处置策略

根据上述对比分析,结合我国伴生放射性废物的特点,提出以下废渣处理处置策略:

1)对于铀/钍含量较高或其他有价金属铀回收利用价值的,对废渣中的有价金属进行回收利用。

2)对于南方多雨且地下水位较高的地区,对于数量有限、放射性活度浓度较高的冶炼加工后的伴生放废物,建议采用钢筋混凝土单元处置或刚柔相结合的形式,设置雨棚,阻止雨水进入,减少运行期以及退役后渗水的产生,同时有利于降低运行过程对工作人员的辐射影响。

3)对于产生量较大、核素活度浓度较低的冶炼加工伴生放射性废渣,建议采用近地表柔性填埋的方式进行处置,其选址设计应符合 HJ 1114 的相关要求,南方地区应做渗水收集池,运行过程中应尽量进

行膜覆盖,做好管理措施,减少渗水外排。

4)对于产生数量巨大、核素活度浓度较低(小于 $10 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$)、当地地下水位较深(或蒸发量远大于降雨量)的采选类伴生放射性废渣,优先推荐近地表柔性填埋方式,其防渗措施可较HJ 1114相对简单。

4 我国典型伴生放射性废渣处理处置案例

结合我国伴生放射性废渣的特点,开展了某省区域性废渣处置场典型案例分析,建设过程中考虑的项目特点以及对应解决的对策如下^[14]:

1)区域性集中处置:根据前述我国伴生放射性废渣的区域分析,该省份纳入辐射监管的伴生矿企业多为稀土、铌钽、钨及氧化锆行业的冶炼加工企业,民营企业居多,其废渣年产生数量有限,但废渣中的放射性核素活度浓度较高,目前,多处于企业内部暂存状态;鉴于该特点,由第三方建设区域性的集中废渣填埋处置场是适宜的。

2)预处理:由于要收储企业中贮存多年的遗留废渣,废渣多数未进行中和处理,酸碱度差异较大,且废渣粒度不同,部分有板结情况,考虑上述特点,废渣在填埋处置前需要进行破碎、中和、搅拌等预处理。

3)分区贮存:由于部分废渣中尚存在有回收价值的资源,例如铀资源,因此,在废渣的预处理区合并建设暂存区,废渣经分类后,有资源综合回收价值的废渣单独贮存,定期外运回收有价金属。

4)防水设计:由于废渣来源广、种类多、酸碱度不一,为减免渗滤液的产生及后续处理,设计中采取了多种防水措施:a)挡雨设施:废渣库上方建设全覆盖式张拉膜挡雨设施,防止雨水进入;b)防渗系统:库区底部及周边采取人工及天然材料防渗措施,阻止地下水浸入;c)地下水导排系统:库区防渗系统底部设置地下水导排系统,降低地下水水位;d)截排洪系统:填埋场周边根据相关标准规范设置截排洪系统,防止外部地表水进入。

5)防渗结构:由于废渣中伴生有长寿命天然放射性核素,且理化性质相差较大,因此,要求防渗系统适应能力强、性质稳定,使用年限尽量长,鉴于此,库区底部防渗采用双人工衬层+天然材料防渗层的防渗结构,根据HJ 1114—2020,天然材料防渗层厚度应根据天然放射性核素特征和天然材料防渗层核素阻滞性能确定。另受场址条件影响,场地有限且需要进行基坑深挖,在考虑施工安全(需边坡支护)、库容保障以及技术和经济可行的前提下,该废渣库边坡采用灌注桩+双人工衬层的防渗结构。库区底部及周边防渗结构见图4。

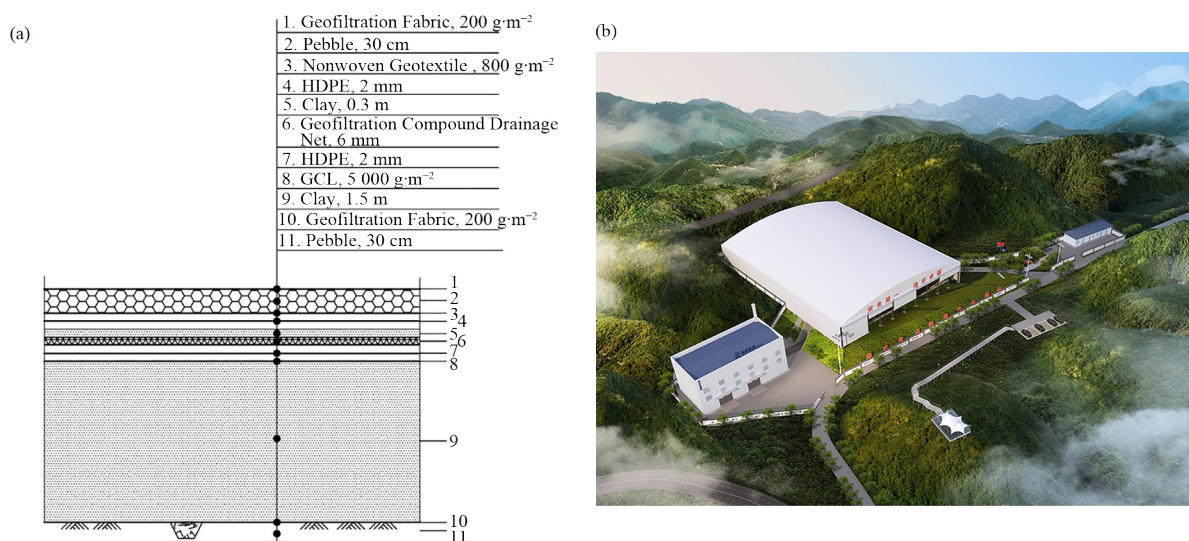


图4 废渣填埋库底部防渗结构(a)及库区整体效果(b)示意图

Fig.4 Schematic diagram of anti-seepage structure at the bottom of waste residue landfill (a) and overall effect of the reservoir area (b)

6)自动化工艺:由于废渣中放射性核素活度浓度通常在十几到几十 $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,甚至高达上百 $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$,为避免工人长期大范围接触受到较高的照射剂量,废渣的接收、吊装、预处理、转运、倾倒、压实等工序尽量采用自动化程度高的工艺及设备,尽量

实现远程操作。废渣库自动化运行示意图见图5。

7)散料堆填:处置单元内采用散料堆存并压实的方式,以防止后期不均匀沉降,这也是与中低放废物的区别。

8)封场覆盖:该类废渣填埋封场设计与危废不

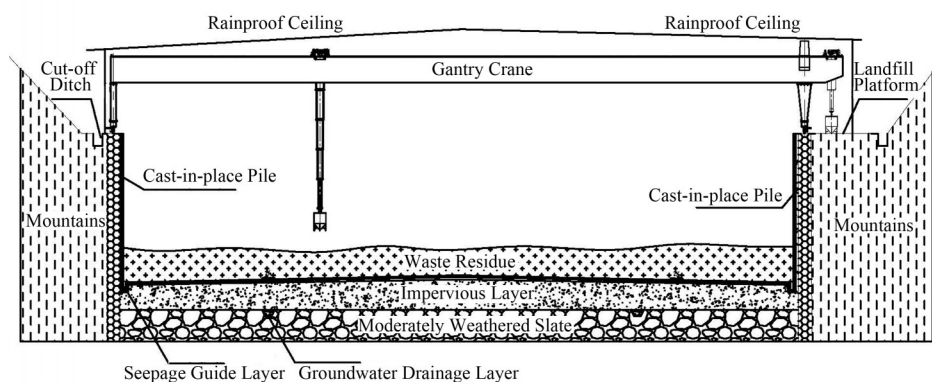


图5 废渣库自动化运行示意图
Fig.5 Schematic diagram of automatic operation of waste slag warehouse

同,没有排气层;由于半衰期长,与中低放废物也不同,其覆盖工程措施需考虑足够的天然材料,因此该项目封场使用多层覆盖,结构层包括氢(钍)屏蔽层

(兼做天然防渗层)、人工防渗衬层、排水层、防生物侵扰层、植被恢复层等。伴生放射性废渣库封场示意图见图6。



图6 伴生放射性废渣库封场效果示意图
Fig.6 Schematic diagram of the closed associated radioactive solid waste repository

5 结语

综上,伴生放射性废渣具有放废物来源广、数量大、核素放射性活度浓度范围宽、半衰期长、理化性状复杂等特点。当前,国家对于该类废渣的监管尚处于起步阶段,大量的伴生放射性废渣亟待处置。建议根据废渣特点进行分类处置,考虑废渣的放射性水平、数量、考虑有价金属的未来利用及回取、考虑实施的可操作性等要素,制定适宜的处理和处置方法。同时,从监管角度,建议建立明确的处理处置机制,鼓励采取集中处置,明确政策要求,加强地方管控、探索市场机制、研究处置技术,做好宏观规划,从而推进我国伴生放射性废物的长期安全处置。

作者贡献声明 冀东:负责论文结构设置及撰写思路;杜娟:负责论文起草;张贺飞:负责提供伴生放射性废渣处置案例;刘晓超:负责最终版修订。

参考文献

- 1 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.
Ministry of Ecology and Environment, PRC. Technical specifications of radiation environmental protection for other radioactive material's storage and solid waste's landfill (Trial): HJ 1114—2020[S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing & Media Co., 2020.
- 2 刘新华, 马成辉, 孔祥金, 等. 对人为活动引起的天然放射性明显增加设施辐射监管技术体系的几点建议[J]. 辐射防护, 2011, 31(6): 328-333.
LIU Xinhua, MA Chenghui, KONG Xiangjin, et al. Some proposals on technical system for regulation of industrial activities involving NORMs[J]. Radiation Protection, 2011, 31(6): 328-333.
- 3 刘福东, 刘永叶, 王亮, 等. NORM管理现状及建议[J]. 辐射防护通讯, 2013, 33(194): 23-28.

- LIU Fudong, LIU Yongye, WANG Liang, *et al.* Management situation and suggestion on NORM[J]. Radiation Protection, 2013, **33**(194): 23–28.
- 4 中华人民共和国生态环境部. 伴生放射性矿开发利用企业环境辐射监测及信息公开办法(试行)[Z]. 北京: 生态环境部办公厅, 2018.
Ministry of Ecology and Environment, PRC. Measures for environmental radiation monitoring and information disclosure of enterprises developing and utilizing associated radioactive ore (Trial) [Z]. Beijing: General Office of the Ministry of Ecology and Environment, 2018.
- 5 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.
Ministry of Ecology and Environment, PRC. Directory of radiation environmental supervision and administration for the exploitation and utilization of mineral resources [Z]. Beijing: General Office of the Ministry of Ecology and Environment, 2020.
- 6 中华人民共和国生态环境部. 2020年全国伴生放射性矿开发利用企业名录[Z]. 北京: 生态环境部办公厅, 2021.
Ministry of Ecology and Environment, PRC. List of enterprises for development and utilization of associated radioactive mines in China (2020) [Z]. Beijing: General Office of the Ministry of Ecology and Environment, 2021.
- 7 International Atomic Energy Agency. Assessment the need for radiation protection measurement in work involving minerals and raw material[R]. Safety Report Series No.49, IAEA, 2006.
- 8 Directorate-General Environment of European Commission. Practical use of the concepts of clearance and exemption Part II: application of the concepts of exemption and clearance to natural radiation sources[R]. Radiation Protection 122, 2001.
- 9 李潇雨, 惠博, 熊文良, 等. 白云鄂博稀土资源综合利用现状概述[J]. 矿产综合利用, 2021, **5**(10): 17–24. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6532.2021.05.003.
LI Xiaoyu, HUI Bo, XIONG Wenliang, *et al.* Multipurpose utilization of rare earth resources in Bayan Obo[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021, **5**(10): 17–24. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6532.2021.05.003.
- 10 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.
SHUAI Xing. Output and property and disposal of solid waste from rare earth industry in maoniuping mine area in Mianning, Sichuan[J]. Environmental Science Survey, 2015, **34**(6): 76–80.
- 11 中华人民共和国生态环境部, 国家统计局, 中华人民共和国农业农村部. 第二次全国污染普查公报[Z]. 北京: 生态环境部办公厅, 2020.
Ministry of Ecology and Environment, PRC, National Bureau of Statistics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, PRC. Bulletin of the second national pollution census[Z]. Beijing: General Office of the Ministry of Ecology and Environment, 2020.
- 12 中核第四研究设计工程有限公司. 第二次全国污染源普查伴生放射性矿普查数据统计分析报告[R]. 2020.
The Fourth Research and Design Engineering Corporation, CNNC. Report of statistical analysis of data from the second national census of pollution Sources associated with radioactive ore survey[R]. 2020.
- 13 原环境保护部, 工业和信息化部, 国家国防科技工业局. 放射性废物分类[Z]. 北京: 原环境保护部办公厅, 2017.
Ministry of Ecology and Environment, PRC, Ministry of Industry and Information Technology, PRC, State Administration of Science, Technology and Industry for National Defence, PRC. Classification of radioactive waste[Z]. Beijing: General Office of the Ministry of Ecology and Environment, 2017.
- 14 中核第四研究设计工程有限公司. 江西伴生放射性固体废物处置项目[R]. 2022.
The Fourth Research and Design Engineering Corporation, CNNC. The associated radioactive solid waste disposal project in Jiangxi Province[R]. 2022.