

核废物减容处理新技术

赫玲波¹, 王四芳¹, 王昕彤¹

摘要: 回顾核废物分类及处理现状, 重点阐述极具前景的核废物减容技术及其应用价值。根据不同核废物类别, 提出核废物减容的解决措施和解决方案。指出核电站运行中, 核废物的管理和减容处理系统的解决方案必须符合放射性废物管理的废物最少原则。

关键词: 核废物; 放射性; 减容

中图分类号: TL94 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-3355 (2018) 05-0001-06

Study on New Volume Reduction Technologies of Nuclear Waste

He Lingbo, Wang Sifang, Wang Xintong

Abstract: This paper introduces and reviews the present status of nuclear waste classification and treatment and focuses on the statement of promising volume reduction technologies of nuclear waste and its application value. The paper demonstrates the volume reduction measures and solutions of nuclear wastes based on different types of nuclear wastes. The paper puts forward that the solution of nuclear waste management and points out that the volume reduction processing system must comply with the minimum waste principle for the management of radioactive wastes.

Key words: Nuclear waste; Radioactive waste; Volume reduction

核电作为绿色高效的清洁能源, 在优化能源结构、促进经济可持续发展方面具有明显的优势。在我国整体电力结构中, 核能发电比例仅为 3.94%。《中国核能发展报告 (2018)》指出, 到 2030 年我国核电装机规模将达到 1.2 亿~1.5 亿 kW, 核能发电比例占 10%~12%, 接近当前全球核发电平均水平。然而, 核废物的处理是核电快速发展的主要制约因素。目前, 我国在运核电站暂存库日趋饱和, 最终处置场的规划尚不能满足核电发展需要。在国家最新颁布的《核安全与放射性污染防治“十三五”规划及 2025 远景目标》中明确指出, 要“加快早期核设施退役和废物治理”, “加快放射性废物处理能力建设, 基本完成历史遗留中低放废液固化处理, 处置一批中低放固体废物”, 并且要“推动核电放射性固体废物处理处置”。近年来, 国内外核电厂在废物最少化方面做了大量的工作^[1-4]。在核安全局编制的核安全

导则《核动力厂放射性废物最小化》(征求意见稿) 中明确提出滨海核电厂的单机组放射性固体废物预期年产量目标值为 50 m³。这一目标值对我国核电厂的废物管理和处置工作提出了新的要求。高效先进的核废物减容处理技术的引进和开发势在必行。

本文回顾了我国核电运行废物的处理现状, 对核废物减容技术及其应用情况进行阐述, 综合核废物类型及各减容技术的特点提出了核废物减容的技术路线, 为核电站运行中核废物的管理和减容处理提供解决方案。

1 核废物的分类及处理现状

核废物主要是指核电厂设备运行和检测维修过程中产生的放射性废物, 主要包括工艺废物和技术废物, 其中, 工艺废物分废液和废固两大类。

1. 一重集团大连工程技术有限公司高级工程师, 辽宁 大连 116600



1.1 废液

(1) 浓缩废液

浓缩废液是核电厂废物处置相关的液体废物之一，主要来自废液处理系统（TEU）和硼回系统（TEP）的蒸发器浓缩液。以红沿河核电厂为例，两台机组平均年产生浓缩液为 20 m³。对于此类废液，我国核电厂大都采用水泥固化包括水泥、沥青和热固性固化方式处置后暂存。

(2) 有机废液

有机废液主要在设备运行及维修中产生，包括废油、有机溶剂、闪烁液，以及清洗液等。我国核电厂大都采用水泥固化。

1.2 废固

(1) 废树脂

废树脂是核电厂运行中产生的主要固体废物，主要来自废液处理系统中的离子交换树脂床，包括蒸汽发生器排污系统（APG）、放射性废水处理系统（TEU）、硼回收系统（TEP）、化学和容积控制系统（RCV）等。由于废树脂尚没有成熟的处理技术，因此多数核电厂采用水泥固化、热态超级压实、高整体性容器直接包装等方式处置后暂存处理。

(2) 废过滤器

废过滤器来自于废水和废气的处理系统，包括废水处理中产生的机械过滤器滤芯，以及通风系统净化所涉及的过滤器芯和活性炭过滤器（用于碘吸附）。通常废过滤器芯子当外表面剂量率 ≥ 2 mSv/h 时，装入 400 L 金属桶然后用湿混料固定。外表面剂量率 ≤ 2 mSv/h 时，直接装入 200 L 金属桶内，运至废物辅助厂房进一步处理。

(3) 技术废物

技术废物是检修过程中产生的各种检修废物，包括塑料布、吸水纸、手套、抹布、报废的工作服、气衣、设备、零部件、保温材料、建筑材料

等。技术废物一般通过分拣、打包、压缩、暂存等方式处理。一般可压缩废物占 85%，用压缩机和超级压缩技术压缩在 200 L 金属桶内，不可压缩废物占 15%，暂存在 200 L 金属桶内。

1.3 核废物处理现状

目前，在役核电厂针对不同类型的放射性废物运行成熟的处理工艺中，固定方法主要包括水泥固化、混凝土固定等，压缩方法包括预压、超级压缩，最终装桶后隔离暂存（见图 1）。这些处理工艺对于大多数放射性废物而言，仅技术废物采用超级压缩为减容过程，增容比约 0.2，其他废物处理工艺均为增容处理，采用混凝土固定工艺处理废滤芯过程增容比达到 11.0^[9]，显然这不符合核电废物最小化原则。目前各核电厂废物库已经基本饱和，核废物外运难以实施，各核电厂通过管理优化、源头控制等方式，试图通过高效的管理做好放射性废物最小化^[9]。核电运行实践表明，树脂和水过滤器等工艺废物产量的多年统计值将逐步趋于同一水平，浓缩液废物有下降趋势，而技术废物等随着机组老化，出现增长趋势；通过管理改进实现废物减容的空间已非常有限。各类型核电中技术废物占比均在 50% 以上，构成复杂，其中可燃废物占比 70% 以上，具有很大的减容空间。即使采用最新的压缩技术，如热态压缩、超级压缩、高整体性容器等新技术仅能实现可压缩技术废物的减容，对整体核废物的处理来讲，尤其是放射性废树脂、废滤芯等工艺废物仍是个增容过程。因此，需考虑采取有效的减容策略，通过引进和开发先进的减容技术来应对该类废物的处理问题。

2 核废物减容处理技术

2.1 焚烧技术

焚烧技术是发展最早的核废物减容技术。早在上世纪 50 年代，国外就已经进行了核废物焚烧技

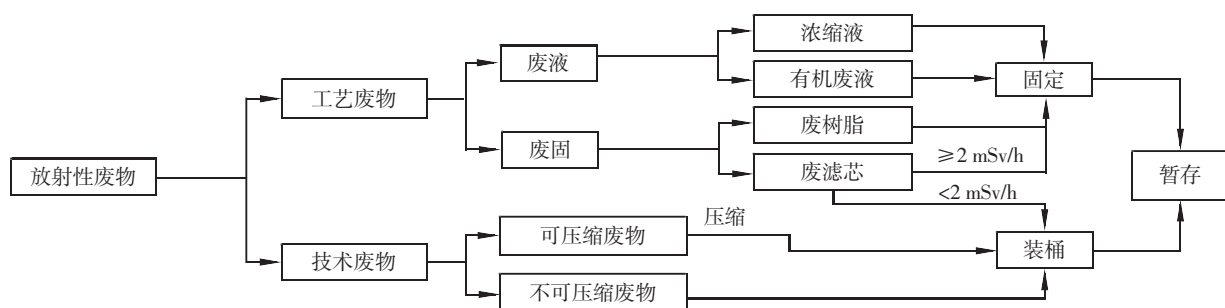


图 1 中低放射性核废物处理工艺路线

术的研究,陆续建立各种焚烧装置^[6]。

焚烧的原理是利用有机物可燃原理将放射性废物中有机组分在氧条件下燃烧或者在乏氧条件下分解,然后将分解气体燃烧,将有机物焚化为无机灰渣,进而降低废物体积。焚烧设备从对燃烧空气量的控制分为热解焚烧炉、过量空气焚烧炉、控制空气焚烧炉等。1965年,法国圣戈班新技术公司(SGN)在格勒诺布尔建立了第一座焚烧试验厂,确立了放射性废物焚烧领域的核心地位,过量空气焚烧技术则属于SGN开发的首批焚烧技术之一^[7]。法国原子能委员会(CEA)在多年的实践过程中,也开发了许多新技术,如固体废物焚烧(IRIS)技术,并在IRIS工艺的基础上建立了 α 废物焚烧炉,从而为放射性废物焚烧领域开创了新的前景。焚烧技术应用于废树脂和可燃废物的处理,可以最大程度地减容,放射性废树脂减容比可达7以上^[8],一般可燃废物减容系数可以达到80~120(包括二次污染物的处理)^[9]。

焚烧技术在国内核电厂尚未有实际工程应用。中国辐射防护研究院采用热解焚烧技术对固体废物、废树脂和废油等进行了热解焚烧实验,并开发了工程化焚烧装置^[10]。然而,焚烧技术普遍存在的问题是烟气中二次污染物的再处理,因此不适合高卤素含硫树脂、塑料、橡胶及易挥发核素的处理,而且尾气处理系统也很复杂。此外,焚化后的焚化灰需再次整备,一般采用二次固化处理或装高整体容器。

2.2 冷坩埚熔融技术

冷坩埚玻璃固化是第四代玻璃固化工艺技术,其原理是通过电磁感应对废物进行非接触式加热,使其熔融,通过高温分解、玻璃熔制达到有机废物减容和稳定化目的。法国是最早开展冷坩埚熔融技术的国家之一,于上世纪80年代开发了冷坩埚玻璃固化技术,历经原理装置、试验台架、冷坩埚设计及工业级试验台架的研究,至2010年建立了工业化装置并投入运行,进而发展了将等离子体炬和感应加热相结合的冷坩埚熔融技术^[11]。

九十年代以来,法国、意大利、韩国、俄罗斯等各国陆续建立冷坩埚熔融技术处理放射性废物的工程应用项目^[12,13]。俄罗斯于1990年开始建造冷坩埚玻璃固化工厂,并在1999年开始运行用于固化中低放废物。1997年,韩国NETEC与法国SGN、MOBIS就“冷坩埚玻璃固化技术处理韩国核

电废物的工业应用”进行了项目合作——采用冷坩埚玻璃化技术处理韩国Ulchin核电站产生的低中放废物,废物体积减容比为76,2008年完成调试,2009年投入商运^[12,13]。冷坩埚熔融技术废物适应性广,可用于树脂废物、可燃干杂技术废物、浓缩液、无机化学废液废物的高效减容。该技术对于放射性废物(Dry Active Waste, DAW)减容比可达90,废树脂减容比约21~35^[11]。

冷坩埚熔融技术可处理废物类型多,废物综合减容率高,设备体积较小,维修少,炉体寿命长。但是设备造价高、运行成本高、需连续废物供料运行,通常不适合高剂量率废物、玻璃配方工艺复杂、运行经验较少。

我国已经初步掌握冷坩埚玻璃固化技术,中国原子能科学研究院自主研制的500 mm冷坩埚玻璃固化实验装置已经完成24 h联动试验,成功产出440 kg模拟玻璃固化体^[14]。

2.3 等离子体熔融技术

等离子体熔融技术是利用等离子体电弧温度极高、能量集中的特性,处理可燃放射性废物及金属、沙石、水泥、灰渣、石棉等不可燃放射性废物,使有机成分通过高温热解成较为简单的分子,经尾气、除尘系统净化;无机成分及金属废物等则熔成熔浆并冷却成熔岩。采用热等离子体为热源,炉膛工作温度可达1 600℃,甚至更高,因此处理效率高。目前,国外等离子体熔融处理技术已经开始商业化运行,主要设施有:俄罗斯RADON等离子体气化熔融(Plasma Gasification Melting, PGM)技术,比利时ZWILAG的PACTTM-8系统、美国IET的PEMTM系统等^[12]。

等离子体熔融技术可适应各类干杂技术废物、有机、无机化学废物、低放树脂废物、通风过滤器废物、金属废物、混凝土、渣土废物,甚至完整包装桶废物的处理。特别适合含有不可燃无机物的混杂废物、历史积存桶装废物。根据废物的不同形态,设备的减容比可达4~8^[15]。我国中广核研究院开展了等离子体熔融技术相关研究,通过数值模拟和典型的放射性技术废物模拟玻璃化配方实验掌握了等离子体熔融技术,在限定的熔融温度条件下,得到符合我国核行业标准的玻璃固化体^[16]。

2.4 蒸汽重整减容技术

蒸汽重整是一种特殊的裂解处理技术,在石化和工业制氢领域应用成熟。蒸汽重整放射性废物处

理技术是将有机放射性废物通过流化媒介与水蒸气作用,有机物反应分解为无机物,进而实现减容的废物处理工艺,原理上属于放射性废物裂解焚烧处理的一个支类,在欧洲及美国均纳入焚烧炉管理范畴。1999年,瑞典 Studsvik 公司开始采用 THORSM 蒸汽重整技术在美国 Erwin 处理包括废树脂、废滤芯等在内的放射性废物^[17],废树脂减容比 5~10^[18]。至今已成功运行 15 年,处理了来自美国 42 个核电反应堆的树脂废物,以及自身运行中产生的技术可燃废物。蒸汽重整技术已被美国能源部(DOE)列入先进场址恢复技术(ART)之一,针对 Hanford 低放废物处置厂(Waste Treatment Plant, WTP)二次废物处理进行应用研究。

蒸汽重整减容技术属于无焰裂解,处理温度适宜(650~750℃),化学反应可控,核素不会被挥发,放射性物质、有毒有害物质主要在重整阶段截留,系统尾气净化负担小,不产生液体废物,减容比可达 15~50^[19]。该技术相对垄断,我国采用蒸汽重整技术用于放射性废物减容处理的研究尚处于起步阶段,公开报道中仅中国核动力研究院进行了数值模拟研究^[20]。

2.5 湿法氧化

湿法氧化的作用原理是在催化剂作用下利用氧化剂将有机物分解,最终废液由水泥固化。典型的湿法氧化法技术是利用芬顿试剂 Fe²⁺、Cu²⁺、Ni²⁺等金属离子作为催化剂,过氧化氢为反应介质产生的羟基自由基(OH·)与有机物作用,羟基自由基的强氧化性将有机物结构破坏,使高分子聚合物分解成线性大分子、小分子、直至无机物。从上世纪七八十年代开始,美国、日本、韩国等开始了将湿法氧化用于含有机物的化学废液处理,后期该技术被推广应用于放射性废树脂的处理^[21]。在我国国内,台湾在树脂湿法氧化方面也开展了大量的研究,并于 2013 年建成一套处理能力为 40L/h 的废树脂湿法氧化和废液水泥固化反应系统,废树脂减容比为 2.5^[22]。此外,清华大学、哈工大、中国辐射防护研究院等单位^[21,23-25]也陆续开展了废树脂湿法氧化处理工艺的研究,围绕芬顿试剂、反应条件等开展了工艺条件和机理研究,截至目前尚未有工业规模的处理设备。

2.6 超临界水氧化技术

超临界水氧化技术(Supercritical Water

Oxidation, SCWO)是利用水在超临界状态下(T_c=374.15℃,P_c=22.12MPa)所具有的特殊性质,使有机物完全溶解在超临界水中并发生均相氧化反应,迅速、彻底地将有机物转化成CO₂、N₂、H₂O等小分子化合物,氯转化成无机盐,硫转化成硫酸盐,磷转化成磷酸盐,重金属离子转化成稳定态的金属氧化物等无害化的无机物。SCWO技术属于国际先进性高浓度有机污染物分解技术,但超临界水氧化分解技术的高温、高压操作条件对设备材质提出严格要求,并且材料腐蚀和盐沉积问题严重。当前,国际上拥有成熟的超临界水氧化技术和成功商业运行经验的有美国 General Atomics (GA)公司及法国 Innoveox (伊诺维)公司,且多用于核电、军工、国防等高附加值领域有机废液处理^[26]。根据文献报道,韩国已经成功开发了 150 kg/h 的超临界水氧化中试装置用于处理放射性废树脂^[27]。日本东芝公司已成功将该技术应用于处理实验室规模的废萃取剂(磷酸三丁酯, TBP)、废树脂和液体闪烁计数器废液^[28]。

我国超临界水氧化技术仍停留在实验室阶段。中国原子能科学院研制了间歇式超临界水氧化设备^[29],对磷酸三丁酯的氧化分解进行了探究,确定了反应条件,尚未达到工程化水平。

3 核废物减容系统方案探讨

根据《核安全与放射性污染防治规划(2006-2020年)》的要求,核电站必须最大限度地减少放射性废物的产生量(废物最小化),《放射性废物安全管理条例(国务院令 第 612 号)》也提出放射性废物的安全管理应当坚持减量化、无害化和妥善处置、永久安全的原则。《核动力厂放射性废物最小化》(征求意见稿)明确提出滨海核电厂的单机组放射性固体废物预期年产量目标值为 50 m³,核电站放射性固体废物处理面临较大压力,现有水泥固化工艺增容比大,所有电厂均无法达到 50 m³的要求,核废物减容处理技术的引进和开发势在必行。在新技术工程应用论证过程中需要综合考虑其有效性、成熟性、安全性和经济性^[30]。经过对以上各技术的综合比较,笔者得到以下结果(见表 1)。

通过各减容技术的综合比较可以看出,焚烧法是最成熟的减容技术,但由于其后期处理工艺复杂,技术相对落后。其次,蒸汽重整的成熟度较

表 1 核废物减容新技术综合比较

减容技术	温度（℃）	适用性	排出物	减容比	后处理	成熟性
焚烧法	800~1 200	适用于大多数的有机无机废液、废树脂，不适合高卤素含硫树脂、塑料及橡胶处理，以及易挥发核素处理。	灰分、尾气	80~120（可燃废物） >7（废树脂）	焚化灰整备，尾气处理	成熟，法国技术已有 20~40 年运行管理经验，国内中辐院已掌握技术。
冷坩埚熔融	900~1 200	适用于大多数的有机无机废固、废树脂，不适用于有机废液。	玻璃固化体、尾气	>20	尾气处理	一般，韩国已有近 10 年运行经验；国内原子能院正在研制。
热等离子体熔融	1 200 ~1 600	适用于处置大多数中低放射性废物，尤其是不可燃废物。	固化体、尾气	4~8	尾气处理	一般，国外已经商业化，国内中广核研究院已掌握技术。
蒸汽重整	650~750	适用于大多数有机废物，如可燃技术废物、废树脂，少量固体废物以及含有高卤、硫等化学有害及腐蚀性有机材料的处理。	和废气	15~50	产物固化、废气处理	较成熟，美国已有 15 年成功运行经验。
湿法氧化	25~100	适用于 PVA 类有机废物、废树脂、有机废液等，处理高活度废树脂难度大。	酸性废液	>5	酸性废液处理	不成熟，美国已用于处理 PVA 废物，各国正在研究其用于处理废树脂等。
超临界水氧化	450~650	适用于有机废液、废树脂，不适用于无机废物。	少量废液	-	少量废液处理	不成熟，仅美国有少量工程应用案例，韩国、日本等多在工程化研究阶段。

高，并且适用性广泛，减容比高，具有一定的优势。再次，冷坩埚熔融及等离子体熔融技术相对成熟度一般，而其适用性较为广泛，在国外已经商业化并具备运行经验。湿法氧化和超临界水氧化工艺技术相对成熟度差，然而超临界水氧化工艺比其他热处理技术的反应温度低，特别适用于有机废液的

处理，被美国环保署誉为最有效的有机废液处理方案，具有良好的发展前景。综合各种减容技术的适用性、成熟性及先进性，笔者建议尽快发展高效、高减容比的先进技术，如超临界水氧化技术和冷坩埚熔融或等离子体熔融技术，实现我国核废物减容处理的综合治理目标(见图 2)。

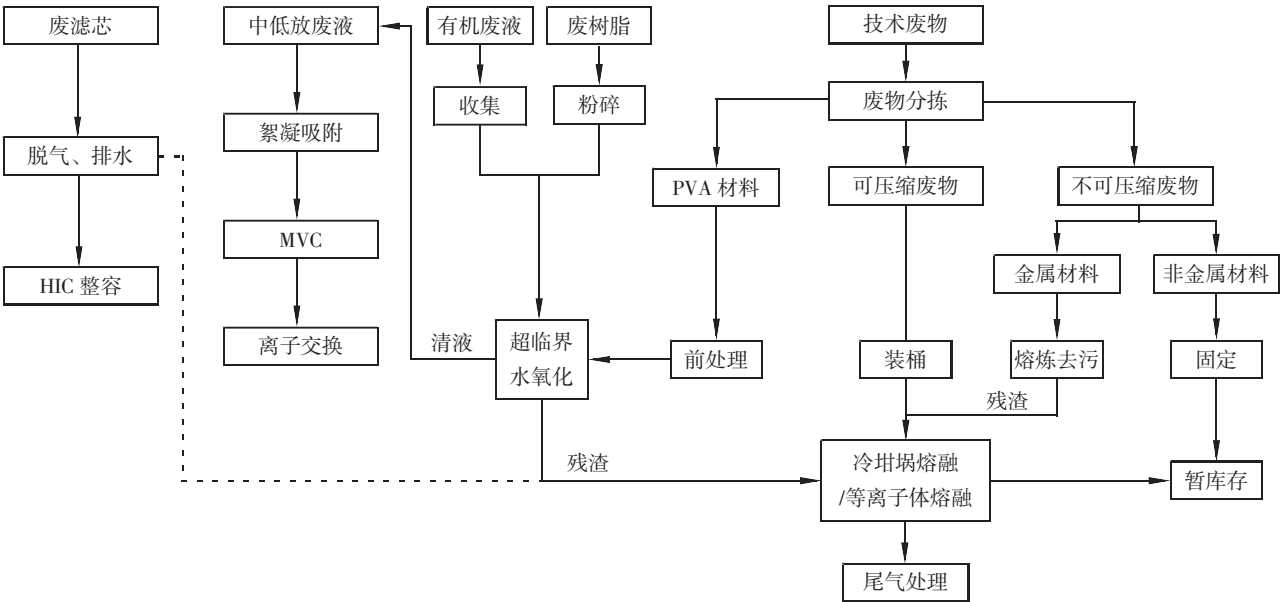


图 2 放射性废物减容处理综合治理技术路线（虚线代表可选路线）

4 结 语

作为一种清洁低碳、安全高效的能源，核电有助于推进我国能源体系绿色发展，建立绿色低碳循环发展的经济体系，预期在未来一定时期内将有很大的发展空间。核废物减容处理处置技术的提升是保障核电大规模利用的前提条件之一。从目前国内、外放射性废物减容技术的研究进展来看，焚烧技术已经应用成熟，但是由于焚烧灰需要二次整备，减容比略低，并且存在尾气处理复杂等问题，国外已经陆续发展起了更先进的减容技术，如冷坩埚熔融技术、等离子体熔融技术、超临界水氧化技术等，可实现核废物的有效减容，保证取得最大环境效益和经济效益。然而，由于国外先进技术相对垄断而形成技术壁垒，我国必须发展具有自主知识产权的先进减容技术满足我国核电的发展需要，推进核电厂放射性废物减容与清洁解控。

参考文献

- [1] 康云鼎.泰山核电基地放射性废物减容技术研究[J].核动力工程, 2012, 33 (6) :118-120.
- [2] 刘铁军, 孙学强.田湾核电基地废物最小化[J].辐射防护, 2018, 38 (1) :58-64.
- [3] 孙安.红沿河核电站大修放射性固体废物管理[J].辐射防护通讯, 2015, 35 (5) :40-42.
- [4] 蔡挺松, 严沧生.美国核电废物管理的变化和启示[J].辐射防护, 2014, 34 (1) :56-64.
- [5] 林鹏, 刘夏杰, 陈明周, 吕永红, 向文元.热处理技术在核电厂放射性废物处理中的应用研究进展[J].环境工程, 2013, 31 (S) :537-542.
- [6] 罗上庚.放射性废物的焚烧处理[J].1990, 13 (1) :1-8.
- [7] 杨丽莉, 王培义, 张晓斌.法国放射性废物焚烧技术[J].辐射防护通讯, 2008, 28 (6) :26-28.
- [8] 高帅, 郭喜良, 高超, 冯文东, 李洪辉, 贾梅兰.放射性废树脂处理技术[J].辐射防护通讯, 2014, 34 (1) :28-33.
- [9] 刘佩, 刘昱.应用焚烧技术处理核电厂放射性固体废物的技术经济分析[J].辐射防护, 2011, 31 (2) :109-114.
- [10] 王培义, 周连泉.多用途放射性废物焚烧系统工程验证试验[J].辐射防护, 2002, 22 (6) :334-342.
- [11] 刘丽君, 张生栋.放射性废物冷坩埚玻璃固化技术发展分析[J].原子能科学技术, 2015, 49 (4) :589-596.
- [12] 宋云, 陈明周, 刘夏杰, 吕永红.低中水平放射性固体废物玻璃固化熔融炉综述[J].工业炉, 2012, 34 (2) :16-20.

(上接第 69 页)

参考文献

- [1] 陈松.减速机故障分析与预防[J].新疆有色金属.2012 (2) :89-92.
- [2] 刘现全.核电起重机减速机的轴向窜动为题[J].起重运输机械.

- [13] 杨丽莉, 李晓海, 徐卫.冷坩埚玻璃固化技术及应用[J].辐射防护通讯, 2013, 33 (3) :37-41.
- [14] <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2018/11/419557.shtm>
- [15] 放射性废物等离子体减容设备的开发[J].日本:原子能视野, 2000, 6.
- [16] 林鹏, 陆杰, 刘夏杰, 陈明周, 吕永红.核电厂典型中低放射性废物等离子体熔融处理试验研究[J].中国材料进展, 2016, 35 (7) :504-508.
- [17] 李斗, 华伟, 廖能斌, 任力.蒸汽重整处理核电厂放射性废树脂的探讨[J].广州化工, 2015, 43 (15) :157-158.
- [18] 李江博, 王烈林, 谢华, 冯志强, 曾阳.湿法氧化处理放射性废离子交换树脂的方法[J].同位素, 2018, 1-8.
- [19] 李斗, 林力, 马兴均, 陈先林, 李文钰.放射性废物蒸汽重整处理及矿化技术发展现状及展望[J].科技创新导报, 2015, 18:6-10.
- [20] 林力, 陈先林, 李文钰, 马兴均.放射性废物蒸汽重整垂直管内流场反应耦合数值模拟研究[J].科学技术与工程, 2016, 16 (4) :200-204.
- [21] 郭喜良, 冯文东, 高超, 杨卫兵, 刘建琴, 安鸿翔.废树脂湿法氧化减容处理技术路线及问题探讨[J].辐射防护, 2015, 35 (5) :267-273.
- [22] 陈义平, 田景光.湿式氧化暨高效率固化系统之建置[C].成都:第三届两岸放射性废物管理研讨会会议文集, 2013:25-30.
- [23] 蹇兴起, 云桂春.放射性废离子交换树脂的过氧化氢湿法催化氧化技术研究[J].辐射防护, 1995, 15 (3) :203-209.
- [24] 魏晓婷.放射性废树脂的减容固化及机理研究[C].哈尔滨工业大学, 2015.
- [25] 梁志荣, 吴玉生, 刘学军.芬顿氧化法预处理放射性废离子交换树脂[J].核化学与放射化学, 2007, 29 (2) :71-74.
- [26] Philip A. Marrone Supercritical water oxidation-Current status of full-scale commercial activity for waste destruction[J].J. of Supercritical Fluids. 2013, 79: 283-288.
- [27] . Kyeongsok K., KwangSin K., Mihwa C., Soon H. S., Joo H. H. Treatment of ion exchange resins used in nuclear power plants by super- and sub-critical water oxidation -A road to commercial plant from bench-scale facility[J]. Chem. Eng. J., 2012, 189-190: 213-221.
- [28] 杨丽莉.放射性废 TBP 处理技术[J].辐射防护通讯, 2016, 36 (1) :40-44.
- [29] 杨林月, 张振涛.超临界水氧化技术处理磷酸三丁酯的实验研究[J].原子能科学技术, 2016, 50 (12) :2138-2144.
- [30] 严沧生, 梁永丰, 战仕全.放射性废树脂处理技术工程应用的选择[J].辐射防护, 2016, 36 (4) :232-239.

收稿日期: 2018-07-06

2015.

- [3] 李昌海.水泥磨主减速机高速轴窜动故障及其处理[J].工艺装备.2010.

收稿日期: 2018-05-27