

放射性物品运输容器耐热试验研究现状概述

白聚莹, 孙谦, 孙洪超*, 陈磊, 王长武, 焦力敏, 庄大杰
(中国辐射防护研究院, 太原 030006)

摘要: **目的** 充分了解放射性物品运输容器耐热试验研究现状, 通过对比国内外耐热试验研究和实践的经验, 为国内耐热试验的发展提出意见与建议。**方法** 调研和分析国外耐热试验的技术现状, 以及国内耐热试验的实践经验和能力建设情况, 梳理我国耐热试验发展方向。**结果** 国际上核能大国核能产业发展起步较早, 开展了很多相关的耐热试验研究, 拥有多种类型的耐热试验装置, 方法和装置的适配度和成熟度较高。我国已经逐步掌握放射性物品运输容器耐热试验方法, 耐热试验仿真计算能力和试验平台建设取得了一定的成果。**结论** 建议重视耐热试验仿真计算能力建设, 有序开展系统性的耐热试验研究, 增加攻克关键难题的投入, 优化改进现有耐热试验方法和装置, 继续推进运输容器耐热试验和仿真计算平台建设。

关键词: 放射性物品运输容器; 耐热试验; 试验实践; 试验能力

中图分类号: TB485.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)03-0286-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.03.034

Overview of Status of Thermal Test for Radioactive Material Transport Containers

BAI Juying, SUN Qian, SUN Hongchao*, CHEN Lei, WANG Changwu,
JIAO Limin, ZHUANG Dajie

(China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China)

ABSTRACT: The work aims to fully understand the current research status of thermal test for transportation containers of radioactive materials, and put forward suggestions and opinions for the development of thermal test in China by comparing the experience of thermal test research and practice at home and abroad. The current status of thermal test technology abroad, as well as the practical experience and capacity building of thermal test in China were researched and analyzed, and the development direction of thermal test in China was sorted out. Main nuclear countries in the world developed the nuclear energy industry earlier and had carried out many related thermal test research. They have various types of thermal test devices, with high adaptability and maturity of methods and devices. In contrast, China has gradually mastered the thermal test methods for radioactive material transport containers, and has achieved certain results in thermal test simulation calculation capabilities and test platform construction. It is recommended to attach importance to the construction of thermal test simulation computing capabilities, carry out systematic thermal test research in an orderly manner, increase investment in tackling key challenges, optimize and improve existing thermal test methods and devices, and continue to promote the construction of thermal simulation computing and testing platforms for transportation containers.

KEY WORDS: radioactive material transport containers; thermal test; experimental practice; experimental ability

放射性物品运输是核能开发和核技术利用的重要保障, 放射性物品运输安全很大程度上依靠运输容器的安全设计提供保障, 以实现放射性内容物的临界安全、屏蔽、传热、包容等方面的控制^[1]。放射性物品运输容器的固有安全性是放射性物品运输安全的前提, 需经受正常运输条件和运输事故条件下各种试验的验证^[2-3]。例如, 对于装载一类放射源的 B 型货包, 除了要经受正常运输条件下进行的安全性能验证试验外^[4], 还需经受事故工况下耐热试验、水浸没试验等严苛的考验。

1 耐热试验简介

经受耐热试验的放射性物品运输容器, 其热工设计需满足在事故工况下, 能有效阻隔热环境对容器表面的热输入, 保护容器内部屏蔽材料和内容物等^[5]。耐热试验是验证货包经受运输事故条件能力的试验^[6], 旨在模拟油罐车或类似车辆上大量碳氢燃料泄漏的情况下引发火灾的运输事故, 导致货包在完全吞没的池火中暴露 30 min 的事故情景^[7]。耐热试验要求将试样置于全程平均温度 ≥ 800 °C 的高温环境中并达到规定时间, 通过营造的热辐射环境下测量的响应结果, 评价其受到的总热流是否达到或超过其在假想烃类燃料-空气火灾事故中所受到的总热流^[8]。

2 国外技术现状

2.1 耐热试验研究

2.1.1 池火耐热试验

池火耐热试验是一种将货包置于使用煤油或液态丙烷等碳氢燃料开放式燃烧营造的热环境中进行耐热试验的试验方法, 通常使用的是 JP-4 航空煤油等燃料^[9-10]。在池火条件下, 液体燃料燃烧产生高发射率火焰, 提供全吞没火焰, 并产生近黑体辐射传热环境^[11]。

英国温弗里思原子能研究所的 Fry^[12]对大型立方体容器进行池火试验, 研究表明: 容器池上高度对吸收热流的测量结果影响不大, 当池上高度 < 0.6 m 时, 容器底面的热流剧烈减少; 当燃料池由容器边缘 2 m 延展至 3 m 时, 容器热流密度无明显变化, 但当仅延展 1 m 时, 火焰完整性剧减。在池火试验中, 须保证火焰完全覆盖试验货包, 以满足“全吞没火焰”要求^[13]。

德国联邦材料测试中心 Droste 等^[11]对丙烷火焰耐热试验装置进行了试验, 证明丙烷火焰耐热试验设施可以很好地满足相应的耐热试验标准, 测得试验温度 > 800 °C, 估算火焰发射系数为 0.59。此研究表明, 耐热试验的关注重心是平均总热流密度^[7,11], 即使某一条件可能低于标准给出的参考值, 但其他条件的改变也能使试验结果达到标准要求的热流密度。

2.1.2 加热炉耐热试验

加热炉耐热试验是一种使用柴油、天然气或液化石油气等碳氢燃料提升炉温以模拟热环境的试验方法。加热炉试验装置的炉内传热过程 (图 1) 主要包括炉膛热交换和货包内部传热^[14], 主要关注炉气与货包表面的传热过程。一般选用炉膛内部表面积远大于货包外表面积或者具有高发射率内表面的炉子, 以得到高发射率的辐射源^[9]。

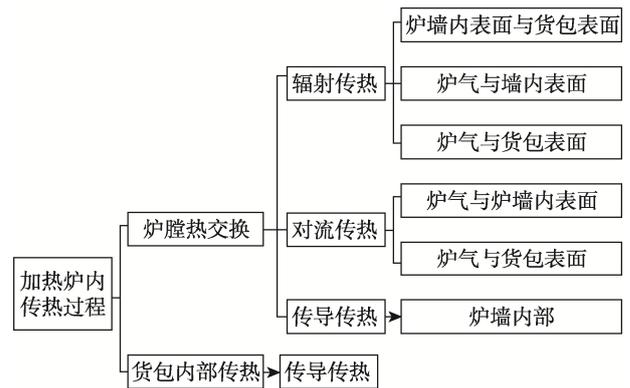


图 1 加热炉内传热过程

Fig.1 Heat transfer process inside heating furnace

美国桑迪亚国家实验室 Keltner 等^[15]和 Babrauskas 等^[16]对加热炉耐热试验的传热过程进行了研究, 经简化假设, 给出加热炉向货包传热的数学描述, 研究表明热流密度和温度与加热炉中气体发射系数存在较强的关联特性。

2.1.3 电热辐射耐热试验

电热辐射耐热试验是一种使用石英灯或其他加热元件辐射周围金属围板以模拟热环境的方法。美国萨凡纳河国家实验室 Smith 等^[17]对耐热试验中的辐射传热过程进行了研究, 通过理想化处理假设条件等方式, 证明了理想条件下电热辐射耐热试验和加热炉耐热试验辐射传热环境可等同于池火耐热试验的辐射传热环境。

2.2 试验能力建设

2.2.1 池火试验装置

池火试验装置一般由燃料站、供料管道、油池或丙烷燃烧器、点火装置及燃料控制系统组成, 在池火耐热试验过程中提供货包火焰包覆, 场地气象宜为静风气候, 必要时, 在场地周围设置防风栅栏和可移动式防雨棚^[9]。

2.2.1.1 典型池火试验装置

美国桑迪亚国家实验室从 20 世纪 60 年代开始开展货包遭受假想运输事故的安全性能验证试验, 采用池火试验方法进行货包耐热试验。敞式池火试验装置最大尺寸为 18 m \times 9 m, 周围围布一组 6 m 高的防风

栅栏,可将试验货包附近风速降低 70%~80%^[18]。该装置能试验的最大货包尺寸为 12 m×3 m×3 m,最大质量为 135 t,最多可进行 2 h 的持续试验^[19]。此外,该实验室也拥有一个封闭池火试验装置,在一个 6 m×6 m×6 m 的试验室中,有 3 m×3 m 的燃料池,采用变频鼓风机控制试验室内气体流动^[18-19]。

英国温弗里思原子能研究所^[20]池火试验装置尺寸为 9.5 m×6.5 m,最多可容纳 30 000 L 液体烃燃料,可进行长度≤7 m、最大质量≤100 t 的货包耐热试验。在货包同一水平面 4 个方向布置有热电偶,当各个方向测点温度均达到 800 °C 时开始计时 30 min,作为池火试验有效时间。

德国联邦材料测试中心^[21]采用丙烷燃烧试验装置进行货包耐热试验,符合国际原子能机构对货包耐热试验的要求(图 2)。将试验货包置于一个 8.5 m×5 m 的混凝土槽内,吞没火焰由丙烷燃烧产生。丙烷从环绕试验货包的管道中最多 32 个气体喷嘴中以液态释放,火焰峰值温度达 1 100 °C。管道可根据试验货包尺寸进行调整,通过改变压力、释放速率和喷嘴数量调节热输入强度。



图 2 德国联邦材料测试中心丙烷火焰耐热试验
Fig.2 Propane flame heat resistance test of German Federal Material Testing Center

2.2.1.2 池火试验装置现状

传统敞式池火耐热试验装置受限于环境条件,特别是风对试验的影响,可能导致时间成本增加等问题,这是池火试验装置的局限所在^[22]。一般通过增加防风栅栏、密闭设计、改变燃烧方式等方式,减弱环境因素对试验的影响。

2.2.2 加热炉试验装置

加热炉试验装置一般由燃料站、供油(气)系统、

炉膛、排烟系统、点火与燃烧系统、控制系统及快速装填机构等组成,在加热炉耐热试验过程中应保证炉气充满炉膛,炉气与货包表面有足够强的辐射换热和对流换热过程。

2.2.2.1 典型加热炉试验装置

澳大利亚核科学与技术组织^[23]拥有设计、开发、测试和制造放射性物质运输货包的能力。对于小型货包,耐热试验在 1 050 mm×750 mm×740 mm 的电加热炉内进行;对于较大货包,在 6 m×1.4 m×1.3 m 的燃气炉中进行,最高温度达 1 000 °C。

2.2.2.2 加热炉试验装置现状

耐热试验标准没有限定耐热试验的形式,任何可提供不低于要求的货包热流密度的试验方法都是允许的^[24]。加热炉耐热试验可满足规程要求,不受环境条件限制,可避免周围天气条件的影响。加热炉试验装置易于控制,可通过调节燃料输入或工作电压等控制加热工况,调节试验温度等,容易复现。

2.2.3 电热辐射试验装置

电热辐射试验装置一般由大功率变电站、开关柜、电源控制系统、不锈钢或铬镍铁合金金属围板、灯板阵列及其水冷却系统等组成。在电热辐射耐热试验过程中,装置完全包络试验货包,金属围板可在 1 min 内由室温升至满足热环境条件要求的温度。

2.2.3.1 典型电热辐射试验装置

美国桑迪亚国家实验室^[25]采用电热辐射试验装置进行耐热试验,拥有一个大型电热辐射试验装置,可进行最大长度为 2 m、最大外径为 0.8 m 的试验货包或组件的耐热试验,最大输入功率达 5 MW。

2.2.3.2 电热辐射耐热试验装置现状

电热辐射试验装置可通过调节热灯阵列模拟不同热源分布情况下的耐热试验工况,不受天气等环境因素影响,可重复性强。但由于可试验的货包尺寸受限,大多数局限于小型货包或组件的耐热试验,因此该装置在耐热试验中应用较少。

2.2.4 典型耐热试验装置分析

国外典型的耐热试验装置主要对应于 3 种主要的耐热试验方法,分为池火试验装置、加热炉试验装置以及电热辐射试验装置,各种装置的对比分析见表 1。

表 1 国外典型耐热试验装置对比
Tab.1 Comparative list of typical heating test devices abroad

典型耐热试验装置	优点	缺点	应用现状
池火试验装置	易提供要求的热环境,丰富的实践经验积累,简单易操作等	受环境条件限制,复现困难等	广泛用于各种货包试验,特别是大型货包试验
加热炉试验装置	不受环境条件制约,易于控制和复现	需对热环境精准测量,以保证提供试验所需的热环境	可用于各种货包耐热试验
电热辐射试验装置	不受环境条件制约,易于调节热环境,易于复现	需足够的能量输入,装置尺寸有限	仅可用于中小型货包或组件的试验

2.3 小结

1) 相较于国内, 国际上核能大国核能产业发展起步较早, 在运输容器设计和制造方面经验丰富, 开展了很多相关的耐热试验研究。

2) 核能大国拥有多种类型的耐热试验装置, 耐热试验开展的选择更多更充分, 可根据试验货包尺寸、环境要求等选择适宜的试验装置进行耐热试验。

3) 国外耐热试验的实践较多, 方法和装置的适配度和成熟度较高。

3 国内技术现状

近些年, 为满足我国放射性物品种类和运输量增加的需求, 国内自主开发和设计了多款运输容器^[26-27], 开展了包括耐热试验在内的一系列试验, 验证了容器的热工设计能满足运输要求, 符合《放射性物品安全运输规程》(GB 11806—2019) 的要求。

3.1 典型耐热试验实践

3.1.1 池火试验实践

上海核工程研究设计院有限公司^[28]对“国和一号”自主化新燃料运输容器进行了池火耐热试验, 试验表明“国和一号”自主化新燃料运输容器设计符合相关验收准则要求。在池火耐热试验过程中, 采用布置在火场外部的热成像仪进行初始温度及环境温度测量; 采用热电偶监测火场温度、货包表面温度以及货包内部功能材料的温度变化。

中国工程物理研究院^[29]设计开发了用于运输少量放射性材料的 TC-I 型运输容器, 采用云杉作为主要隔热材料, 陶瓷纤维毯和硬质聚氨酯泡沫材料作为辅助隔热材料。经历耐热试验后, 容器泄漏率满足设计准则要求, 可保证放射性材料在运输事故中保持包容安全性能。

3.1.2 加热炉耐热试验实践

中国原子能科学研究院^[27]对一种用于运输反应堆燃料的新燃料元件运输容器进行了加热炉耐热试验, 燃料元件的包壳最高温度远低于设计准则要求, 表明该运输容器可满足 GB 11806—2019 要求。耐热试验在容器周围布置热电偶测量炉温, 加热炉内壁面为保温棉, 燃料为柴油, 实时监测燃料元件表面温度变化。中国原子能科学研究院^[30]设计了 CFER-MOX 燃料组件运输容器, 并开展了安全性能验证试验, 在耐热试验中测得运输容器关键测点温度均低于设计准则要求, 安全性能得到了验证。

中国核电工程有限公司^[31]对运输工业用 Co-60 成品源和 Co-60 棒束的 GY-20 和 GY-40 大容量 Co-60 运输容器关键技术进行研究, 开展了加热炉耐热试验。GY-20 和 GY-40 大容量 Co-60 运输容器耐热试验

后容器各部件保持完好, 铅层完整, 包容边界完好, 容器的各项功能满足相关标准的要求。

中国辐射防护研究院^[32]对一种用于运输 Co-60 和 Cs-137 的医用放射源运输容器进行了加热炉耐热试验, 试验中容器本体的最高温度小于设计准则温度, 证明了该容器热工设计满足国家标准 GB 11806—2019 要求。耐热试验装置为台车式热处理炉, 煤气作为燃料, 燃气内腔为 7 m×4 m×2.8 m, 最高使用温度达 1 100 °C, 能试验的最大容器质量为 80 t, 试验装置原理如图 3 所示。中国辐射防护研究院^[5]设计开发了一种可装载 2×10^5 Ci 放射源的运输容器, 对该容器进行了热工设计并开展符合标准要求的耐热试验以评价其热工性能。经受标准规定的耐热试验后, 容器关键部件温度测试结果满足标准要求, 可保证容器的安全性能。

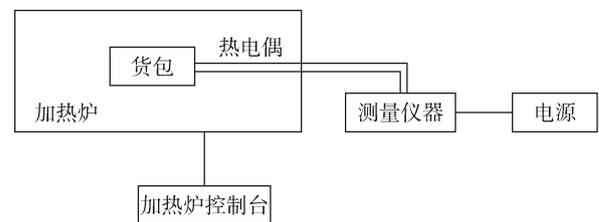


图 3 试验装置原理图

Fig.3 Schematic diagram of experimental device

3.1.3 耐热试验实践主要问题

依据 GB 11806—2019 规定, 耐热试验包括 3 种工况: T1 货包在环境温度为 38 °C 时处于热平衡状态; T2 暴露在热环境中 30 min, 强化耐热试验时间为 60 min; T3 货包在 38 °C 的环境温度下自然冷却。此外, 标准允许试验参数在试验前后和试验期间拥有不同的值, 但在对试验结果进行评定时应予以考虑。对于 T2 工况, 标准给出了热流密度的参考值, 试验中所提供的热流密度应不低于此值。热流密度参考值是在静止空气条件下, 烃类燃料燃烧产生的全吞没火焰的热流密度。标准对此火焰热环境进行了严格的界定, 包括最小平均火焰发射系数 0.9、平均温度 800 °C 以及货包表面吸收系数 0.8 或货包暴露在规定火焰环境中具有的实际值。

在现有试验条件下, 温度测量易于进行, 但火焰发射系数和货包表面吸收系数通常无法直接获得, 难以说明耐热试验是否满足这些参数要求。此外, 耐热试验中火焰发射系数的定义与测算尚未有明确的方法, 仅在美国 ASTM E2230-13《放射性材料 B 型货包的热鉴定标准试验规程》中基于火焰黑体环境假设给出了 2 种定义方法^[24]。根据耐热试验的实践经验, 火焰发射系数和货包表面吸收系数的要求本质就是热环境对货包表面辐射传热和对流传热的总热流密度的要求。实际试验过程中, 控制试验温度和试验时

间等试验条件,所测得的热流密度一般可满足标准的要求。对于耐热试验,货包初始条件的选择会对耐热试验结果产生显著影响^[33]。货包初始条件包括温度、包容压力、内容物、试验姿态等,对于不同用途、不同种类的试验货包,需选择对货包最不利的初始条件组合。

3.2 耐热试验能力建设

3.2.1 仿真计算能力发展

运输容器热工安全分析的工况包括 GB 11806—2019 要求的正常运输及运输事故条件工况。Fluent、CFX 等流体力学计算软件广泛用于运输容器热工分析^[34-35],特别是耐热试验过程中容器的温度场分布,可确定各部分工作温度是否超过许用限值,分析和评价耐热试验对运输容器造成的影响。由于运输容器结构复杂,部件繁多,一般需对其进行必要而合理的简化。若某部件对容器的传热过程影响很小,且不是主要的热工分析部件,在计算中可将其忽略。为提高分析精度,可对具有对称性结构的运输容器进行一定的简化,采用部分区域建模的方法进行耐热试验数值计算与模拟^[36]。

3.2.2 试验平台建设

在我国,烟气排放标准主要依据生态环境部等 5 个部门联合发布的政策文件《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》(环大气〔2019〕35号)规定,涵盖了各种污染物的排放限值和监测方法,旨在控制大气污染,保护环境^[37],适用于不同类型的燃烧设备和生产设施。放射性物品运输容器耐热试验装置是我国烟气排放标准的适用对象,池火试验装置一般将大量尾气直接排入空气,难以符合我国烟气排放标准,因此在我国的应用受限。相较于池火试验装置,加热炉试验装置可对尾气进行二次处理,易于控制烟气排放以符合烟气排放标准,在我国得到了很好的发展。

中国辐射防护研究院作为国内最早开展放射性物品运输安全研究的单位,拥有完备的放射性物品运输容器安全验证试验设施,具备开展百吨级容器安全性能研究的能力。其中,用于验证事故条件下耐热能力的耐热试验装置采用加热炉耐热试验方法,装置内产生的热流密度相当于在完全静止的环境中烃类燃料燃烧/空气火焰的热流密度,可在加热区对大型放射性物质运输容器进行耐热试验,如图 4 所示。该试验装置采用台车式炉体结构,炉衬结构采用耐火纤维复合纳米保温板结构。为保证供热均匀性及高速升温需求,燃烧器在炉体侧墙的上下、左右交错排布,同时能有效避免升温时因个别烧嘴的强供热造成货包局部表面温度过高的现象^[38]。烧嘴交错排布在炉侧墙上,单侧燃烧器高度低于货包位置,将侧燃烧器布置在货包上方,围绕货包形成均匀稳定的热源和火焰包裹。

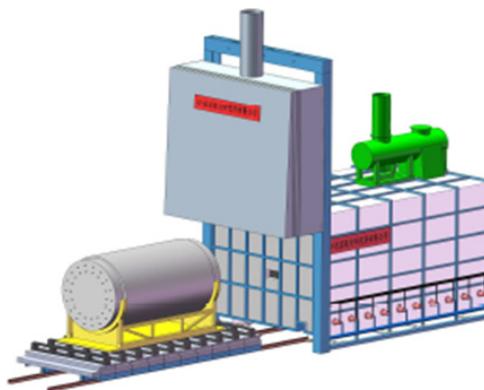


图 4 中国辐射防护研究院耐热试验装置示意图
Fig.4 Thermal test device of China Institute of Radiation Protection

3.3 小结

1) 我国已经逐步掌握放射性物品运输容器耐热试验方法,积极开展了运输容器耐热试验相关实践和研究工作,并取得了一定的成果。

2) 我国对于耐热试验的基础理论研究较少,耐热试验平台建设受到现有耐热试验方法和技术的制约。

4 结语

相较于国内,国际上核能强国的核能产业发展较早,放射性物品运输经验丰富,对耐热试验的研究和实践较多。我国早期开展运输容器安全验证试验的能力较弱,但随着核工业的发展,我国已经完成了一些运输容器耐热试验,具备了开展符合标准要求的耐热试验的能力。

综上所述,对我国放射性物品运输容器耐热试验的研究和发展有如下建议。

1) 重视耐热试验仿真计算能力建设,开发适应于实际工况的国产化软件,努力实现耐热试验仿真计算的完全自主化。

2) 围绕现有耐热试验中心,有序开展系统性的耐热试验研究,加强耐热试验研究的连续性,逐步增加耐热试验研究的深度和广度。

3) 优化改进现有耐热试验方法和装置,增加对相应基础研究的支持和投入,研究和攻克关键难题,争取确立领先地位。

参考文献:

- [1] 王学新,孙树堂,孟东原,等.放射性货包运输风险控制目标探讨[J].包装工程,2023,44(11):317-322.
WANG X X, SUN S T, MENG D Y, et al. Discussions on Risk Control Goals of Radioactive Material Trans-

- portation[J]. *Packaging Engineering*, 2023, 44(11): 317-322.
- [2] 张雷, 赵兵, 王学新, 等. 放射性物质运输货包试验工作进展[J]. *辐射防护通讯*, 2010, 30(6): 1-6.
ZHANG L, ZHAO B, WANG X X, et al. Progress in Demonstration Test for Radioactive Material Transport Packages[J]. *Radiation Protection Bulletin*, 2010, 30(6): 1-6.
- [3] 张建岗, 李国强, 孙洪超, 等. 放射性物品运输容器试验验证经验总结[J]. *辐射防护*, 2018, 38(5): 422-427.
ZHANG J G, LI G Q, SUN H C, et al. Safe Test Experience on Radioactive Material Transport Packages[J]. *Radiation Protection*, 2018, 38(5): 422-427.
- [4] 李国强, 赵兵, 张建岗, 等. 放射性物质运输货包安全试验[J]. *原子能科学技术*, 2012, 46(增刊 1): 668-670.
LI G Q, ZHAO B, ZHANG J G, et al. Safety Testing of Radioactive Material Transport Packages [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2012, 46(Sup.1): 668-670.
- [5] 李国强, 罗晓渭, 李志强, 等. 一种 ^{60}Co 运输容器热工设计和验证试验[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(33): 220-223.
LI G Q, LUO X W, LI Z Q, et al. Heat Structure Design and Verification Test of a Kind of ^{60}Co Transport Container[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(33): 220-223.
- [6] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 放射性物品安全运输规程: GB 11806—2019[S]. 北京: 中国环境出版社, 2019.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material: GB 11806-2019[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2019.
- [7] AMANO Y. Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material[J]. *Environmental Science, Physics, Engineering*, 1984: 131549400.
- [8] SHAW K. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material[J]. *Journal of Radiological Protection*, 1994, 18: 74678644.
- [9] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 放射性物品运输容器安全试验方法 第6部分: 耐热试验: GB/T 43257.6—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Safety Test Methods for Radioactive Material Transport Containers Part 6: Heat Resistance Test: GB/T 43257.6-2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [10] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 放射性物品运输容器安全试验方法 第1部分: 总则: GB/T 43257.1—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Safety Test Methods for Radioactive Material Transport Containers Part 1: General Principles: GB/T 43257.1-2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [11] DROSTE B, WIESER G, PROBST U. Thermal Test Requirements and Their Verification by Different Test Methods[C]// Conference on 1992 Packaging and Transportation of Radioactive Materials(PATRAM 92). Tokyo, Japan: Science and Technology Agency, 1992: 1263-1272.
- [12] FRY C J. An Experimental Examination of the IAEA Fire Test Parameters[C]// Conference on 1992 Packaging and Transportation of Radioactive Materials(PATRAM 92). Tokyo, Japan: Science and Technology Agency, 1992: 634-641.
- [13] 汪佳明. 解读《放射性物质安全运输规程》GB 11806—2004 中的货包试验[J]. *辐射防护*, 2009, 29(5): 346-351.
WANG J M. Summing-up and Explanation of Package Tests in GB 11806-2004[J]. *Radiation Protection*, 2009, 29(5): 346-351.
- [14] 李成. 火焰炉内炉壁定向辐射传热的基础研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2020.
LI C. Basic Study on Directional Radiation Heat Transfer of Furnace Wall in Flame Furnace[D]. Shenyang: Northeastern University, 2020.
- [15] KELTNER N R, MOYA J L. Defining the Thermal Environment in Fire Tests[J]. *Fire and Materials*, 1989, 14(4): 133-138.
- [16] BABRAUSKAS V, WILLIAMSON R B. Temperature Measurement in Fire Test Furnaces[J]. *Fire Technology*, 1978, 14(3): 226-238.
- [17] SMITH A C. Radiation Heat Transfer Environment in Fire and Furnace Tests of Radioactive Materials Pack-

- ages[C]// Proceedings of 2009 Pressure Vessels & Piping Conference(Volume 7): Operations, Applications and Components. Prague, Czech Republic: ASME, 2009: 63-71.
- [18] 李国强, 王学新, 赵兵. 美国放射性物质货包试验技术简介[J]. 辐射防护, 2008, 28(5): 329-334.
LI G Q, WANG X X, ZHAO B. American Test Technology for the Transport of Radioactive Packages[J]. Radiation Protection, 2008, 28(5): 329-334.
- [19] 李熙, 王莹. 圣迭戈实验室放射性物品运输包装试验设施研究[C]// 中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第八卷)中国核学会 2023 年学术年会论文集 第 7 册 核科技情报研究 同位素. 中国工程物理研究院科技信息中心; 2023: 8.
LI X, WANG Y. Research on the Transport and Packaging Testing Facility for Radioactive Materials in San Diego Laboratory [C]// Chinese Nuclear Society Report on the Progress of Nuclear Science and Technology in China (Volume 8) Volume 7 of the Proceedings of the 2023 Academic Annual Meeting of the Chinese Nuclear Society: Isotope Research in Nuclear Science and Technology Information Science and Technology Information Center of China Academy of Engineering Physics, 2023: 8.
- [20] GILLARD J E. Test Facilities for Radioactive Material Transport Packages (AEA Technology PLC, Winfrith, UK)[J]. International Journal of Radioactive Materials Transport, 2001, 12(2/3): 145-149.
- [21] DROSTE B, QUERCETTI T, GOGOLIN B. Test Facilities for Radioactive Materials Transport Packagings (BAM, Germany)[J]. International Journal of Radioactive Materials Transport, 2001, 12(2/3): 105-113.
- [22] KOSHI J A, KELTNER N R, SOBOLIK K B. Thermal Test Options: SAND92-2324[R]. New Mexico, USA: Sandia National Laboratories, 1993.
- [23] WALSH J, DEURA M. Test Facilities for Radioactive Material Transport Packages (Ansto, Australia)[J]. International Journal of Radioactive Materials Transport, 2001, 12(2/3): 97-100.
- [24] ASTM International. Standard Practice for Thermal Qualification of Type B Packages for Radioactive Material: E2230-13[S]. West Conshohocken, Pennsylvania, USA: ASTM International, 2013.
- [25] SORENSON K B, AMMERMAN D J, UNCAPHER W L. Test Facilities for Radioactive Materials Transport Packages at Sandia National Laboratories, USA[J]. International Journal of Radioactive Materials Transport, 2001, 12(2/3): 169-174.
- [26] 孙谦, 庄大杰, 孙洪超, 等. 核燃料组件运输容器应用现状概述[J]. 包装工程, 2022, 43(13): 142-150.
SUN Q, ZHUANG D J, SUN H C, et al. Overview of Application Status for Nuclear Fuel Assembly Transport Package[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(13): 142-150.
- [27] 郭春秋, 邹佳讯, 衣大勇, 等. 新燃料元件运输容器热工安全分析及试验验证[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(11): 1992-1997.
GUO C Q, ZOU J X, YI D Y, et al. Thermal Safety Analysis and Experimental Validation of New Fuel Element Transportation Container[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(11): 1992-1997.
- [28] 张振雨, 邵长磊, 沈光耀, 等. 国和一号自主化新燃料运输容器试验设计与验证[C]// 第十届全国压力容器学术会议论文集. 杭州: 中国机械工程学会, 2021: 1393-1400.
ZHANG Z Y, SHAO C L, SHEN G Y, et al. Experimental Design and Verification of Guohe No.1 Autonomous New Fuel Transport Container[C]// Proceedings of the 10th National Conference on Pressure Vessels. Hangzhou: Chinese Society of Mechanical Engineering, 2021: 1393-1400.
- [29] 陈治江, 蔡吉庆, 张志强, 等. TC-I型放射性材料运输容器的设计[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 6-9.
CHEN Z J, CAI J Q, ZHANG Z Q, et al. Design of TC-I Type Transport Cask for Radioactive Materials[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 6-9.
- [30] 刘兆阳, 李晓轩. CEFR-MOX 燃料组件运输容器的实验分析与验证[J]. 科技视界, 2017(1): 27-29.
LIU Z Y, LI X X. Analysis and Validation of the CEFR-MOX Fuel Assemblies Transport Cask Experiment[J]. Science & Technology Vision, 2017(1): 27-29.
- [31] 刘慧芳, 张鑫. GY-20 和 GY-40 型大容量钴-60 运输容器关键技术研究[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(B09): 749-752.
LIU H F, ZHANG X. Key Technology Studies of GY-20 and GY-40 High-Capacity Cobalt-60 Transport Casks[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(B09): 749-752.
- [32] 李国强, 张建岗, 赵兵, 等. FCo70-YQ 型放射源运输容器耐热试验[J]. 辐射防护, 2009, 29(5): 352-355.
LI G Q, ZHANG J G, ZHAO B, et al. Thermal Test of

- FCo70-YQ Container for Radioactive Sources Transport[J]. *Radiation Protection*, 2009, 29(5): 352-355.
- [33] VANSANT J H, CARLSON R W, FISCHER L E, et al. A Guide for Thermal Testing Transport Package for Radioactive Material: Hypothetical Accident Conditions: DE93 008624[R]. Germantown, Maryland, USA: United States Department of Energy, 1993.
- [34] 蔡创广. 乏燃料卧式干法贮存热工安全数值模拟与分析[D]. 广州: 中山大学, 2019.
- CAI C G. Numerical Simulation and Analysis of Thermal Safety for Horizontal Dry Storage of Spent Fuel[D]. Guangzhou: Sun Yatsen University, 2019.
- [35] 汪俊. CNSC-24 乏燃料干法贮运容器热工安全分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- WANG J. Thermal Safety Analysis of CNSC-24 Spent Fuel Dry Storage and Transportation Container[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [36] 刘杨, 汪俊. 高温气冷堆燃料运输容器热工计算分析[J]. *核动力工程*, 2017, 38(5): 160-163.
- LIU Y, WANG J. Heat Transfer Simulation of Fuel Transport Cask for High Temperature Gas Cooled Reactor[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2017, 38(5): 160-163.
- [37] 王永, 袁玲, 侯宏宇, 等. 热处理炉烟气超低排放控制浅析[C]//2020 年全国冶金能源环保技术交流会会议文集. 北京: 中国金属学会, 2020: 176-179.
- WANG Y, YUAN L, HOU H Y, et al. Analysis of Ultra-low Emission Control of Flue Gas From Heat Treatment Furnaces [C]// Proceedings of the 2020 National Metallurgical Energy Environmental Protection Technology Exchange Conference. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2020: 176-179.
- [38] 李振国. 燃气台车式热处理炉技术改造实践与应用[J]. *化学工程与装备*, 2008(4): 39-41.
- LI Z G. Practice and Application of Technical Transformation of Gas Trolley Heat Treatment Furnace[J]. *Chemical Engineering and Equipment*, 2008(4): 39-41.