

装备防护

放射性物品运输包装容器安全试验简述

李国强, 孙谦, 庄大杰, 王长武, 张建岗, 孙洪超, 张煜航, 王智鹏
(中国辐射防护研究院, 太原 030006)

摘要: 介绍了放射性物品运输安全特点, 总结了国内外对放射性物品包装容器的监管要求, 详细论述了各项安全验证试验要求。分析了放射性物品运输包装容器在常规运输条件、正常运输条件和运输事故条件下验证试验的各项技术要求, 以及试验设置的主要原因, 阐述了开展相关试验的具体实践方法和试验装置。放射性物品运输包装容器须试验和评价其适应环境影响, 抵御碰撞、火灾、落水等意外事件损伤的能力, 并须进行泄漏检测、屏蔽性能检测以评估其屏蔽和密封包容安全性能。目前中国辐射防护研究院已建成符合 IAEA SSR-6 和我国 GB 11806—2019 等标准要求的九大类放射性物品包装容器试验装置, 能够开展最大 150 t 级包装容器的设计研究试验、性能验证试验和许可证明试验。

关键词: 放射性物品; 运输; 包装容器; 监管; 试验

中图分类号: TB485.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)07-0234-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.07.027

Overview of Safety Test for Radioactive Materials Transport Packages

LI Guoqiang, SUN Qian, ZHUANG Dajie, WANG Changwu, ZHANG Jianguang,
SUN Hongchao, ZHANG Yuhang, WANG Zhipeng

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

ABSTRACT: The characteristics in safe transportation of radioactive materials were introduced, and the regulatory requirements for the packages in China and abroad were summarized. The requirements for various safety verification tests were discussed in detail. Specifically, the technical requirements for verification tests under routine conditions, normal conditions, and accident conditions as well as the main reasons for the test setup were analyzed. The specific practical methods and experimental devices for tests were elaborated. Therefore, radioactive materials transport packages must be tested and evaluated for their ability to adapt to environmental impacts, including the ability to withstand accidental events such as collision, fire and falling. The leakage detection and shielding performance testing should be conducted to evaluate its shielding and sealing safety performance. At present, China Institute for Radiation Protection has built nine categories of radioactive material package testing devices that meet the requirements of IAEA SSR-6 and GB 11806—2019 standards, so that design research tests, performance verification tests, and license certification tests for packages with a maximum capacity of 150 tons can be conducted.

KEY WORDS: radioactive materials; transport; package; regulatory; test

作为核能发展与核技术应用必不可少的环节, 各类放射性物品运输发挥了关键的作用。在核燃料循环中, 前端工艺中通常包括黄饼、六氟化铀、二氧化铀、

燃料芯块、新燃料组件等, 后端工艺中主要有乏燃料、MOX 燃料以及各类废物, 均需通过运输活动实现在不同核燃料循环设施间的转移。国际核能组织

(WNA)的数据显示^[1],全球每年约完成1500万次放射性物品运输活动,是核燃料循环中实现各类核工业产品地域间转移的不可或缺环节。医疗、农业、工业、教育、科研等领域的核技术应用中需要开展的放射性物品运输活动更加广泛,涵盖各类放射性同位素。

放射性物品作为第7类危险品,具有特殊的危险性质,保障其运输活动的安全性格外重要。在各类安全措施中,包装容器为放射性物品运输提供了最重要的安全保障,在运输过程中承担了包容放射性内容物、控制容器外部辐射水平、防止临界和防止热损害的安全功能^[2]。根据国际原子能机构(IAEA)及我国相关法规、标准要求^[3],运输容器设计应考虑常规运输、正常运输和运输事故条件下的振动、冲击、火烧、水浸等影响,应通过试验验证等方式,对设计的放射性物品运输容器的安全性能进行评价。

1 放射性物品安全运输特点

运输活动安全是放射性物品运输的首要要求^[4],遵循纵深防御的原则,从多方面确保实施安全,主要包括以下几个方面。

1) 固有安全性。部分放射性物品自身具有一定抵御外部损伤的能力,可以在一定程度上保障产品和外部安全,例如特殊形式放射源。

2) 被动安全性。运输包装容器能够为待运放射性物品提供充足的安全保障,即使在出现运输事故条件下,也能依靠包装容器的安全性能,来确保周围人员和环境的安全。

3) 主动安全性。通过各项管理要求和组织措施,增强常规运输条件下整个运输活动的安全性,最大限度避免运输事故的发生。

在多层次保障方式中,运输容器的安全性能最为关键,是抵御外部损伤的重要屏障^[5]。放射性物品具有放射性的特殊性质,IAEA《放射性物质安全运输条例》(SSR-6)指出,运输容器应能够满足以下4个方面的性能要求。

1) 包容放射性内容物,实现放射性内容物在容器内的包容安全,防止放射性物质释放到外部环境。

2) 控制运输容器的外部辐射水平,减小内容物的辐射危害。

3) 防止临界,对于装载易裂变材料内容物的货包设计,应从结构、中子吸收材料、密封等方面开展次临界安全综合设计。

4) 在热工安全方面,防止内、外部热载荷导致容器安全功能部件受损,安全功能失效。因此,放射性物品运输容器从力学、热工、包容、屏蔽、临界等多个方面发挥重要的安全保障作用,须通过开展运输容器综合设计实现预期功能。

2 国内外包装容器的监管

2.1 国际监管

IAEA将放射性物品运输安全列为四大安全领域之一,从安全基本法则(Safety Fundamentals, SF)、安全要求(Specific Safety Requirements, SSR)、安全导则(Specific Safety Guide, SSG)3个层次进行规范,为各成员国运输活动的管理和实践提供指导。其中,《放射性物质安全运输条例》(SSR-6)规定了放射性物品运输包装容器的安全要求,《放射性物质安全运输条例咨询材料》(SSG-26)^[6]结合国际上的良好实践,就如何满足SSR-6安全要求给出建议。

IAEA运输相关法规被国际民用航空组织(ICAO)、国际海事组织(IMO)、区域运输组织等采用,例如《危险物品安全航空运输技术细则》(ICAO)^[7]、《国际海运危险货物规则》(IMO)^[8]、《国际铁路运输危险货物规则》(OTIF)^[9]等。IAEA运输相关法规已被成员国广泛纳入国家法规、标准。例如,美国在联邦法规10CFR§71部分对放射性物品的包装和运输进行规定,欧洲国家遵循ADR、RID等国际运输法规,并依据SSR-6制定本国相关导则文件,我国《放射性物品安全运输规程》(GB 11806—2019)等同采用了SSR-6对包装容器的相关要求。以上法规对放射性物品包装容器的安全要求均依据IAEA,因此对放射性物品包装容器的统一、一致的安全要求,既有力保障了放射性物品安全运输,又便利了国际运输活动的开展。

2.2 国内监管

我国从法律、法规、部门规章、国家标准等层次实现对放射性物品运输的监管。《中华人民共和国核安全法》规定国家对核材料、放射性废物、乏燃料等的运输实行分类管理,加强对公路、铁路、水路等运输的管理,国务院核安全监督管理部门负责批准核材料、放射性废物运输包装容器的许可申请。《放射性物品运输安全管理条例》(国务院第562号令)^[10]对放射性物品包装容器的设计、制造、使用作出了规定。生态环境部、交通运输部等制定了部门规程,例如《放射性物品运输安全许可管理办法》《放射性物品道路运输管理规定》等,以上体系制度为国内放射性物品运输包装容器的安全提出了明确的监管要求。

我国制定了相应的标准文件来明确放射性物品运输活动中的技术要求。《放射性物品安全运输规程》(GB 11806—2019)作为放射性物品运输领域的重要强制标准,从运输限值、放射性物品要求、包装和货包要求、运输要求等多个方面给出了技术要求。运输容器作为保障运输活动安全的重要安全屏障,GB 11806—2019规定了验证运输容器不同安全性能的试验项目和要求,包括验证力学、热工、包容、辐射屏蔽安全性能等。其中,针对乏燃料运输容器的特殊要

求,国内发布了《乏燃料运输容器设计要求》(HJ 1355—2024)。

运输容器安全试验方法的相关国家标准正在陆续制定。目前已发布《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)^[11]、《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)^[12]等,作为指导开展运输容器安全验证试验的推荐标准。

3 运输容器安全验证试验要求

放射性物品运输容器必须具备抵御常规运输条件、正常运输条件和运输事故条件下损伤的能力^[13],以保障运输安全。我国某次放射源长途运输中,由于包装不合格,导致正常运输颠簸后木箱破损、源罐翻倒、盖子脱落,造成放射源漏出丢失^[14]。

IAEA的SSR-6和我国GB 11806—2019等规章标准中设定了模拟不同工况的试验项目,以此验证运输容器设计和制造的安全性和可靠性^[15]。根据放射性内容物种类、活度的不同,放射性物品运输容器被划分为例外货包、工业货包(IP-1、IP-2、IP-3)、A型货包、B型货包、C型货包、易裂变材料货包、六氟化铀货包。表1给出了不同类型货包的试验验证要求。

表1 不同类型货包的试验要求

Tab.1 Test requirements for different types of packages

货包类型	常规运输 条件	正常运输 条件	运输事故 条件
例外货包	√	—	—
IP-1型货包	√	—	—
IP-2型货包	√	√ (仅自由下落、 堆积试验)	—
IP-3型货包	√	√	—
A型货包	√	√	—
B(U)型货包	√	√	√
C型货包	√	√	√ (C型货包试验)
易裂变货包	√	√	√
六氟化铀货包	√	√	√

3.1 常规运输条件

常规运输条件下货包应满足振动、提吊、受热、受冷、升压、减压、栓系可靠性等安全性要求,可通过试验进行设计性能验证。

在振动评估方面,GB 11806—2019 7.2.7节要求包装容器部件性能不受常规运输条件下振动影响,主要目的是确保运输容器在常规运输条件下的可靠性,特别是确保密封包容功能完好。可通过开展容器样机

的振动试验进行分析评估,对于有密封设计要求的容器,还可在振动试验前后开展泄漏检测试验。

在受热、受冷评估方面,GB 11806—2019 7.3.3节要求包装容器各部件应能够满足-40~70℃条件下的使用要求,目的是验证运输容器在经受自然环境中冰冻、曝晒等影响时能保持良好性能。可采用环境试验箱开展高温和低温条件下的热传输试验进行分析评估,也可作为力学或热工性能验证试验的前处理。

针对以上试验要求,中国辐射防护研究院(以下简称“中辐院”)建设有最大负载150t级的热传输试验装置,试验温度范围为-50~70℃,可满足乏燃料等大型容器的试验和性能研究。建设的负载150t级震动试验台,可开展路谱振动试验和地震谱振动试验,检验容器的疲劳性能和对路谱响应行为、地震条件下的安全性能。

3.2 正常运输条件

正常运输条件下的验证试验项目包括喷水试验、自由下落试验、堆积试验、贯穿试验,目的是评估运输容器在受到雨淋、堆积、较低高度摔落、尖锐物穿刺等影响后的安全可靠性能。

喷水试验通常作为其他试验的预处理试验,要求试验容器在5cm/h的模拟降雨条件中持续1h。该试验主要为了考验吸水性较强包装材料的结构强度变化,例如纸箱、木箱等,对于钢制容器的影响极小。

GB 11806—2019要求对单个容器试样叠加开展自由下落试验、堆积试验和贯穿试验,且在每种试验前均应经受喷水试验。自由下落试验模拟货包由车板或搬运过程掉落地面的事故情景,对于质量不超过5000kg的运输容器,自由下落试验高度为1.2m,而在通常情况下较重的货包不会在较高的高度装卸,因此随容器质量增加,要求的试验高度降低。为实现自由下落试验条件,通常采用吊车或专门建设的试验塔架将货包吊至预定高度,利用释放装置使得货包冲击至专用靶台,要求靶台为刚性靶、不能发生形变^[16]。除此之外,高精度、合适的测量技术手段也极为重要。在试验过程中,可使用应变、加速度传感器对容器试样冲击瞬间的力学变化进行测量,使用高速摄像机对冲击过程中容器试样的形态变化进行分析^[17]。中辐院的150t级下落试验设施如图1所示,该试验设施配备上述要求的所有测量手段,能够开展大型运输容器的原型样机试验。

堆积试验用于模拟验证长期堆积载荷是否会造造成不利影响,因此试验要求压力载荷为货包最大质量的5倍和13kPa与货包竖直投影面积乘积的较大者。在货包结构无法实现堆积的条件下,可免除堆积试验的考验。堆积试验中,可直接采用对应堆积质量的模拟载荷置于试样上,但对于较大质量的货包可采用液压方式,不同方式均应保证施加载荷的均匀性。



图 1 下落试验设施
Fig.1 Drop test facility

贯穿试验的目的是验证容器试样受细长物体冲击后, 包容系统或屏蔽系统的安全性。GB 11806—2019 要求直径为 3.2 cm、冲击端部呈半球形的 6 kg 棒落在容器试样的最薄弱部位, 下落高度要求为 1 m, 期望对试样造成最严重的影响。对于钢制容器, 可通过评估材料厚度来预估试验影响, 通常情况下不会对包容或屏蔽功能造成影响。

3.3 运输事故条件

运输事故条件下的验证试验项目包括力学试验(自由下落试验 I、II、III)、耐热试验/强化耐热试验、水浸没试验/强化水浸没试验、击穿-撕裂试验、撞击试验。该系列试验的目的是模拟典型严重事故对容器试样造成的损坏。

运输事故条件下的试验项目应对一个试样按顺序开展(水浸没及强化水浸没试验除外), 以实现力学、热工等的损伤累积。力学试验考虑了不同的事故情景^[18], 自由下落试验 I 模拟了 9 m 下落高度、刚性冲击目标和最具破坏姿态带来的综合影响, 该试验条件较实际条件下软性目标(如土壤、车辆等)冲击更加保守。在此基础上, 自由下落试验 II 考虑了运输容器撞击不平坦物体时发生的穿刺影响, 特别是容器的薄壁夹层设计、阀门、排气口等, 容易在穿刺冲击下出现失效, 造成包容系统破坏。因此, 试验要求容器试样在 1 m 高度自由下落至贯穿靶, 贯穿靶为直径(15.0±0.5) cm、长 20 cm 的圆形实心低碳钢。然而对于自身质量较轻的运输容器, 自由下落试验 I、II 模拟的碰撞情景不是影响最大的事故类型, 运输事故中造成的挤压载荷对容器的影响更加突出。因此, 自由下落试验 III 要求质量为 500 kg 的低碳钢板由 9 m 高度自由下落至容器试样, 模拟运输事故中的动态挤压载荷。

耐热试验模拟了运输过程中发生的火灾事故, 并且为了考验容器经受累积损伤后的安全性, 要求在力学试验后叠加开展耐热试验。耐热试验要求容器试样暴露在特定热环境中 30 min, 该热环境条件包括平均温度不低于 800 °C、最小火焰发射系数为 0.9、容器表面吸收系数为 0.8 等, 以上技术要求是考虑运输过程中油罐车泄漏燃烧事故情景提出的。耐热试验通常采用池火试验、炉火试验、电热辐射试验等 3 种方式满足技术要求, 目前由于环境保护、大型货包尺寸受限等原因, 主要采用炉火试验方式开展耐热试验。中辐院建设的耐热试验装置如图 2 所示, 能够实现均匀的温度场控制, 配备多通道传感器实现对指定位置温度、热流密度的测量, 满足开展百吨级乏燃料运输容器耐热试验的技术要求。



图 2 耐热试验设施
Fig.2 Fire test facility

水浸没试验主要考验完好货包掉入河流、湖泊等水中是否能够承受水压影响, 根据工程设计经验, 选择 15 m 水深作为具有代表性的水浸没试验条件, 浸没时间不少于 8 h。因此, 水浸没试验允许使用一个完好的容器试样, 无需考虑叠加影响。对于装载内容物活度较大的 B、C 型货包, 应开展更严苛的强化水浸没试验, 要求 200 m 水深和 1 h 浸没时间。中辐院建设了 2 套水浸没试验装置, 配备 2 个不同尺寸的压力仓, 均采用水浸没+水压的试验方式, 工作压力能够满足标准的最高要求。试验时, 将容器试样置于水压力仓中, 通过控制仓内压力来模拟不同水深试验条件。

3.4 检测试验

作为验证放射性物品运输容器满足安全准则的重要检验手段, 泄漏检测和屏蔽性能检测分别检验容器试样的密封包容性能、辐射屏蔽性能。

针对内容物为非特殊形式的包装容器, 在常规运输条件、正常运输条件和运输事故条件试验的前后设

置了泄漏率要求,为确认容器的密封包容性能,需要通过开展泄漏检测试验进行确定,试验方法主要参照《放射性物质安全运输 货包的泄漏检验》(GB/T 17230—1998)^[19]。为量化确定泄漏率,通常采用定量检测方法,例如包层充气-气体探测器法、包层抽真空-气体探测器法,并以氦气作为探测气体。其中,氦质谱检漏仪是核心的检测设备,通过与待测容器连接管路,形成试验系统。中辐院建设有整套全自动的泄漏检测试验装置,设置3个不同尺寸的检测仓,能够满足大、中、小型放射性物品运输容器快速、高精度的泄漏检测需求。

对于易裂变货包,应在力学试验、耐热试验后叠加开展水泄漏试验,要求受损试样处于0.9 m水深,并浸没不少于8 h,目的是评估容器试样的进水情况,以开展临界安全分析。水泄漏试验采用与水浸没试验相同的装置。

GB 11806—2019 提出关于容器的屏蔽性能要求,包括外表面辐射剂量率限值、运输指数、经受正常运输条件试验后容器表面剂量率最大升高不超过20%和经受运输事故条件试验后距货包表面1 m处剂量率不超过10 mSv/h等。除采用计算的方法外,直接的屏蔽检测是最直接、真实、有效的手段。屏蔽性能检测试验考虑容器装载内容物种类和活度,选择合适放射性活度的 γ 源或中子源,以及相匹配的探测器开展试验。中辐院屏蔽性能检测试验装置拥有中子源、钴-60源,配备高精度探测器,能够满足对百吨级乏燃料运输容器开展中子、伽马屏蔽性能检测的试验要求。

4 结语

放射性物品作为第7类危险物品,其运输活动在核燃料循环及核技术应用领域涉及面广泛,运输安全在国际和国内均受到重视。放射性物品运输安全秉持纵深防御原则从多方面实现,其中运输容器安全是保障运输活动安全的最重要屏障。

根据IAEA及国内法规、标准要求,放射性物品运输容器根据货包类型和相关设计要求,必须能够抵御常规运输条件、正常运输条件或运输事故条件下的试验损伤影响。目前国内已建设起满足IAEA SSR-6和我国GB 11806—2019等标准相关技术要求的试验装置,中国辐射防护研究院拥有九大类放射性物品包装容器试验设施,能够开展最大150 t运输容器的设计研究试验、性能验证试验和许可证明试验。

随着科技进步和运输场景丰富,未来放射性物品包装容器安全试验方法也将进一步完善。一是试验规范及标准关注新型运输场景,进一步细化相关试验条件要求,提高验证包装容器安全设计的可靠性。二是采用精度更高、便捷性更强的测量技术,获得更加完

整的试验分析数据,进一步提高论证科学性。三是加强高精度仿真分析技术与试验技术的结合,做好“预试验”与“试验后处理”。

参考文献:

- [1] World Nuclear Association. Transport of Radioactive Material[EB/OL]. (2024-08-23)[2024-9-24]. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/transport-of-nuclear-materials/transport-of-radioactive-materials#challenges-in-radioactive-material-transport>.
- [2] International Atomic Energy Agency. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2018 Edition): SSR-6[S]. Vienna: IAEA, 2018.
- [3] 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. State Administration for Market Regulation. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material: GB 11806—2019[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2019.
- [4] 曹芳芳, 阙骥, 张敏, 等. 加强放射性物品运输安全管理的几点建议[J]. 核安全, 2012, 11(3): 17-20. CAO F F, QUE J, ZHANG M, et al. The Problems and Suggestions on Supervision of the Radioactive Material Transport[J]. Nuclear Safety, 2012, 11(3): 17-20.
- [5] 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.
- [6] International Atomic Energy Agency. Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2018 Edition): SSG-26[S]. Vienna: IAEA, 2022.
- [7] International Civil Aviation Organization. Technical Instructions for the Safe Transport of Dangerous Goods by Air: Doc 9284[S]. Montreal: ICAO, 2023.
- [8] International Maritime Organization. International Maritime Dangerous Goods Codes: IMDG Code[S]. London: IMO, 2022.
- [9] Intergovernmental Organisation for International Carriage by Rail. Regulations Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail: RID[S]. Bern: OTIF, 2023.
- [10] 中华人民共和国国务院. 放射性物品运输安全管理条例[S]. 北京: 中华人民共和国国务院, 2010. The State Council of the People's Republic of China.

- Regulations on the Safety Management of Transport of Radioactive Materials[S]. Beijing: The State Council of the People's Republic of China, 2010.
- [11] 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, Standardization Administration of the People's Republic of China. Safety Test Methods for Transport Packages of Radioactive Material: Part 1: General: GB/T 43257.1—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [12] 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, Standardization Administration of the People's Republic of China. Safety Test Methods for Transport Packages of Radioactive Material: Part 6: Thermal Test: GB/T 43257.6—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [13] 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.
- [14] 刘新华. 放射性物品安全运输概论[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 9-11. LIU X H. Introduction to Safe Transportation of Radioactive Materials[M]. Beijing: Science Press, 2015: 9-11.
- [15] 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.
- [16] 陈磊, 庄大杰, 孟东原, 等. 放射源运输容器力学设计和试验验证[J]. 包装工程, 2024, 45(7): 260-266. CHEN L, ZHUANG D J, MENG D Y, et al. Mechanical Design and Experimental Validation of Radioactive Sources Transport Containers[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(7): 260-266.
- [17] 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(S1): 668-670. LI G Q, ZHAO B, ZHANG J G, et al. Test for Radioactive Material Transport Package Safety[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(S1): 668-670.
- [18] 李国强, 张建岗, 罗晓渭, 等. 放射性物质运输货包力学试验评价技术[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(4): 762-768. LI G Q, ZHANG J G, LUO X W, et al. Assessment Technology on Mechanical Test of Package for Radioactive Material Transport[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(4): 762-768.
- [19] 国家技术监督局. 放射性物质安全运输 货包的泄漏检验: GB/T 17230—1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004. State Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. Safe Transport of Radioactive Material Leakage Testing on Packages: GB/T 17230—1998[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.