某型新燃料运输容器结构设计及安全分析研究

李馨楠,张白茹

(中国核电工程有限公司 北京核工程研究设计院核设备所,北京 100840)

摘要:目的 确定新燃料运输容器设计准则和容器主体方案,研究容器的接口要求和结构形式,完成新 燃料运输容器安全分析,使容器能保证新燃料组件的运输安全。方法 在研究新燃料运输容器设计准则 的基础上,结合法规和用户的要求,为使容器结构保证正常运输条件和运输事故条件下新燃料运输的安 全,容器设置了阶梯吸能结构和泡沫铝材料大量吸收冲击和振动能量;容器设计了阻燃隔热结构保证容 器在火烧事故条件下内容物的安全,设置了合适的吊篮结构保证组件的临界安全,设置了弹性缓冲结构 保证燃料组件在常规运输条件下满足加速度要求。结果 完成新燃料运输容器结构的研究,通过容器力 学、热工、临界、屏蔽分析,表明了容器结构设计的合理性。结论 保证了运输新燃料组件处于次临界 状态,符合容器的设计准则。

关键词: CNFC-FN; 新燃料; 运输容器; 放射性物品 中图分类号: TL93 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)21-0040-08 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.21.007

Structural Design and Safety Analysis of Fresh Fuel Transport Cask

LI Xinnan, ZHANG Bairu

(Nuclear Equipment Division, Beijing Institute of Nuclear Engineering, China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

ABSTRACT: The work aims to select fresh fuel transportation cask design criteria, determinate the main structure of the cask, study the interface requirements and structural forms of the cask, complete the cask safety analysis, and ensure the safety of fresh fuel transportation. Based on the research of fresh fuel transportation cask design criteria, combined with regulations and user requirements, in order to ensure the safety of fresh fuel transportation under normal transportation conditions and accident conditions during transportation, the cask was equipped with multi-cushioning structures, formed aluminum and other parts that could absorb a lot of impact and vibration energy. The cask was designed with flame-retardant and heat insulation structure to ensure the safety of the contents of the cask under fire accident conditions. The appropriated loading space was designed to ensure the critical safety of the assembly, and the flexible structure was set to ensure the acceleration of the contents of the cask under routine transportation conditions. The study on fresh fuel transport cask structure was finished. The structural design rationality of the cask was indicated by analyzing cask mechanics, thermal engineering, criticality, and shielding. The transport fresh fuel is maintained subcritical. The cask design criteria is met.

KEY WORDS: CNFC-FN; fresh fuel; transport cask; radioactive material

核燃料的安全运输是核电站安全长期运行的重要 保障,而运输容器是实现核燃料安全运输的关键设备。 目前,国内主流堆型的新燃料运输容器有运输 M310 堆型核电站新燃料的 CNFC-3G 新燃料运输容 器^[1]、运输 VVER 核电站新燃料的 TK-C5 新燃料运输容器^[2]、运输 AP1000 核电站新燃料的 Traveller 新燃料运输容器^[3]等。由于某小型压水堆核燃料组 件结构设计与现有商用核电站堆型燃料的尺寸和结 构有很大差异,现有的运输容器不能满足该型核燃 料组件的运输需求。因此,需针对该小型压水堆燃 料组件特点及运输需求,开展适用的新型运输容器 研究。

容器需满足 GB11806—2019《放射性物品安全运输规程》^[4](以下简称"《规程》")和国际原子能机构安全标准丛书 SSR-6《放射性物质安全运输条例》^[5]的要求,即经规程中规定的正常运输条件和运输事故条件下的各项试验后,容器能满足规程临界、热工、屏蔽、包容等各方面的要求。同时,容器设计要满足燃料组件加速度限值的要求和燃料组件装卸料工艺的相关要求。本文开展了小型压水堆核燃料组件的新型运输容器结构设计的研究。

1 设计要求分析

1.1 功能要求分析

CNFC-FN 新燃料运输容器应具备燃料组件的装载功能,实现安全运输燃料。

CNFC-FN 新燃料运输容器内容物为某小型压水 堆新燃料组件,为长圆棒结构,主要部件包括上接头 部件、导向管部件、元件盒、定位板、燃料棒、定位 格架、下接头部件等,如图1所示。新燃料组件可搭 载可燃毒物组件运输。运输时,可燃毒物组件插入新 燃料组件内。可燃毒物组件结构包括上接头、上端塞、 外包壳管、内包壳管、可燃毒物芯块、下端塞、下接 头、压紧管,其上接头部件结构如图2所示。



图 2 可然每初组件及其上按关示息图 Fig.2 Schematic diagram of burnable poison assembly and upper joint

为发挥新燃料组件的装载功能,容器宜采用开放 式吊篮设计,使新燃料组件的抓具能张开并与上接头 部件配合以实现装卸料操作。

对新燃料组件进行临界分析计算,计算结果如表 1 所示。新燃料组件间距越小,反应性越大。在水淹工 况下,当组件间距为 45 mm 时,燃料组件有效增值系 数 k_{eff}±σ 为 0.905 5±0.000 5,为次临界状态。因此,为 保证临界安全,进行容器结构设计时,应合理设置组件 间距,将装载新燃料组件的组件间距设置为>45 mm。

表 1 水淹工况下有效增值系数计算结果 Tab.1 Calculation result of k_{eff}±σ under water immersion condition

组件间距/mm	$k_{ m eff}{\pm}\sigma$	
0	1.375 8±0.000 5	
20	1.209 6±0.000 5	
40	$0.963\ 7{\pm}0.000\ 5$	
45	$0.905 \ 5{\pm}0.000 \ 5$	
80	0.601 5±0.000 5	
150	$0.388\ 4{\pm}0.000\ 5$	
200	$0.353\ 4{\pm}0.000\ 5$	

1.2 法规要求分析

根据《放射性物品运输安全管理条例》(国务院 第562号令)和《放射性物品安全运输许可管理办法》 (原环境保护部令第11号),容器内容物含易裂变核 素,且装载易裂变核素的总量超过0.25g,属于易裂变 材料,因此,容器属于一类放射性物品运输容器^[4,6-7], 货包类型为A型易裂变货包(AF型货包)^[4]。

新燃料运输容器的设计应满足《规程》中对装载 易裂变材料的 AF 型货包在结构、临界、力学、热工 和屏蔽性能方面的相应要求:

 1)易裂变材料货包在运输的常规、正常和事故 条件下,应始终保持次临界状态。

2)正常运输条件试验后,货包外表面辐射水平 增加不超过 20%。

3)容器应能经受正常运输条件和运输事故条件下 9m跌落和1m击穿试验、耐热试验^[8],试验后容器筒 体与容器盖不分离,燃料组件不散落到容器外部。

4)容器及其附件之间以及与内容物和环境之间 相容。

5)容器应便于吊装并能稳妥固定于运输工具上, 吊耳和栓系装置应有足够的强度。

我国现行的法规标准中,对在运输过程中保证新 燃料组件完整性没有明确要求。从保守的角度考虑,为 使新燃料组件被反应堆接收,对于容器设计不允许燃料 组件发生破损,要保证燃料组件的完整性,保证燃料组 件不散落到容器外部,并且满足临界假设的要求。

在正常运输条件和运输事故条件下,容器结构应 能确保新燃料组件运输的安全。新燃料组件未经辐 照,无衰变热和放射性气体释放,因此,临界安全是 新燃料运输容器设计在安全方面最关键的一点。而保 证临界安全即应保证容器在经受《规程》规定的正常 运输条件的试验和运输事故条件的试验后,易裂变材 料的运输货包必须是次临界安全的。从结构设计的角 度考虑,即要保证容器的结构尺寸、燃料组件间距等 因素不突破临界安全分析中的假设条件,从而保证临 界计算输入条件的有效性。

1.3 加速度分析

结合 IAEA No.SSG-26 附录 IV^[9]中关于常规运输 条件中的加速度相关内容,保守考虑将新燃料组件在 常规运输条件下加速度限值确定为纵向 15g,横向 9g (g 表示重力加速度)。因此,容器设计中应设置相 应保护结构,保证在常规运输条件下,新燃料组件的 加速度在安全限值内。而在正常运输条件和运输事故 条件下,通过力学计算及力学试验^[10]验证新燃料组件 的加速度是否造成组件破坏。

2 容器结构设计准则确定

根据法规要求及接口要求分析,结合容器装载燃料组件特点以及设计经验,确定以下设计准则:

1)容器操作工艺,以及容器外形尺寸、质量满 足用户使用需求。

2)在经受正常运输条件和运输事故条件试验后, 容器的变形量控制在临界计算分析的限值之内, 即: 在满足临界假设的条件下, 单个货包和货包阵列处于 最佳慢化条件, 且考虑到燃料组件和容器主要零部件 的尺寸和公差, 其有效增殖系数 k_{eff}≤0.95。

3)在经受正常运输条件和运输事故条件试验后, 容器盖和容器筒体不分离,燃料组件不散落到容器外。

4)在常规运输时,组件的最大横向加速度不得超过9g,最大纵向加速度不得超过15g。

5)正常运输条件试验后,货包外表面的辐射水 平提高不超过 20%。

3 容器结构设计研究

3.1 总体结构设计思路

为满足容器结构的设计要求,新燃料运输容器主 要部件包括容器盖、容器筒体及吊篮3个部分:吊篮 应具备对燃料组件的装载功能,满足在常规运输时燃 料组件吊装操作要求,应合理设置组件间距和装载 量;容器盖及容器筒体结构设计应在正常运输条件及 运输事故条件下起到吸能减震的作用,满足包容放射 性物质功能要求和临界假设条件要求;容器在经历各 运输条件的试验后,主要功能部件不因温度过高或过 低而失去设计功能。 设计完成的 CNFC-FN 新燃料运输容器(图3)的外形尺寸为 ø1 420 mm×2 497 mm; 空载容器质量为 2 087 kg; 满载容器质量为 2 538 kg。



图 3 CNFC-FN 新燃料运输容器 Fig.3 CNFC-FN fresh fuel transport cask

3.2 吊篮装载功能研究

为进行装载操作,吊篮设计为开放式结构,吊篮 中设置适配燃料组件外形的装载管,并设置合适的装载 管长度,使燃料组件的上接头部件露出。在装卸料操作 时,当抓具与燃料组件上接头部件啮合时,具备足够的 操作空间。容器吊篮设计应有一定的强度和刚度,能支 撑组件装载管。吊篮支撑结构采用焊接连接,顶板、支 撑板、底板、支撑杆组成吊篮的支撑结构,如图4所示。



图 4 容器吊篮结构 Fig.4 Basket structure of fresh fuel transport cask

为保障临界安全,应设置合理的组件间距。根据 1.1 节,为保证临界安全,吊篮中装载新燃料组件的 组件间距最小为 45 mm,保守考虑燃料组件中心距最 小为 120 mm。

吊篮装载方案还应考虑集装箱中的布置。若吊篮 装载燃料组件数量过多,则容器质量大、尺寸大,一 个集装箱内运输容器的数量有限;若吊篮装载燃料组 件过少,则会降低核燃料运输的效率,影响经济性。 因此,应综合考虑吊篮中装载燃料组件的数量。

根据既有新燃料组件运输经验,采用 1AAA 型集装箱,集装箱内部最小宽度 2 330 mm,最小长度 11 998 mm, 最小高度 2 655 mm。为尽可能装载更多燃料组件, 容器在集装箱内的布置方案如图 5 所示。若每台容器 装载 18 根燃料组件,燃料组件的中心距为 200 mm, 满足临界安全的要求,如图 6 所示。2 个集装箱共可运 输 16 台容器,对应 288 根新燃料组件。可对集装箱加 以改造,集装箱采用顶开式,在放置容器的集装箱内 部设置栓系装置,以防容器在运输过程中发生移动。



图 5 容器在集装箱内的布置方案 Fig.5 Layout scheme of casks in container



图 6 吊篮装载布置示意图 Fig.6 Schematic diagram of basket loading arrangement

3.3 容器吸能减震结构设计

容器盖及容器筒体设计应在正常运输条件及运输事故条件下具备吸能减震的功能,满足包容放射性物质功能要求和临界假设条件要求,即容器盖和容器筒体不分离,燃料组件不散落到容器外部。通过在容器中设置足够吸收冲击能量的部件,确保燃料组件不会遭受过大的冲击;为满足燃料组件在常规运输条件下加速度限值的要求,容器设置有合理的隔震吸能部件。为此,在容器设计过程中包括了以下内容。

3.3.1 容器筒体及容器盖设计

容器筒体及容器盖是主要吸能和隔热部件,容器 盖和容器筒体通过 24 个 M24 螺栓连接。为保证容器 在事故工况下起到保护组件安全的作用,在《规程》 要求的不同姿态跌落事故中吸收能量,在火烧事故中 阻隔热量,保护燃料组件不散落到容器外部,保证容 器满足设计准则要求。容器筒体与容器盖由耐腐蚀性 能较强的 S2205 双相钢板组焊成空腔结构,内部填充 缓冲材料泡沫铝,并设置多级缓冲减震结构,以降低 加速度峰值。

3.3.2 吸能减震材料选用

泡沫铝材料由纯铝或铝合金熔铸而成,泡沫铝因 独特的多孔结构而具有优异的力学性能。力学性能主 要体现在压缩过程中,泡沫铝材料应力-应变曲线的平 台屈服变形阶段,泡沫铝的孔洞以变形、坍塌、破裂、 胞壁摩擦等形式做功^[11],消耗了大量能量而达到吸能缓 冲的作用。同时,泡沫铝具有非常高的耐热能力,其阻 燃性能达到 A1 级(GB 8624—2006《建筑材料级制品 燃料性能分级》),具有不燃特性;由于泡沫铝的孔隙中 存在导热系数较低的空气介质,因此其导热系数仅为纯 铝的 1/5~1/150,而且在发泡过程中生产的氧化层较 稳定,能支撑泡沫铝的多孔结构^[11],可在运输事故条 件下的火烧试验中发挥良好的隔热作用。

容器选用泡沫铝材料密度为 0.3~0.4 g/cm³, 相对于 使用木材作为减震材料的容器, 可减少容器重量, 有利 于容器轻量化设计, 便于操作。泡沫铝材料封焊在容器 内部,本身作为铝基金属材料, 性质稳定, 耐蚀性好, 不存在其他减震材料面临的老化问题, 如图 7 所示。



图 7 泡沫铝材料示意图 Fig.7 Schematic diagram of foam aluminum material

容器筒体及容器盖内部填充泡沫铝材料,不仅可 以吸收大量冲击能量,在正常运输条件及运输事故条 件下保护燃料组件^[12];而且可通过泡沫铝的隔热作 用,减少耐热试验中进入容器内部的热量,满足阻燃 隔热功能要求。

3.3.3 顶部吸能减震设计

为吸收角跌落时和顶部向下垂直跌落时的外部 冲击载荷,保护容器盖与容器筒体连接螺栓,避免事 故条件容器盖与容器筒体脱开,容器盖顶部设计为双 层外凸台结构,容器盖顶板、容器盖上围板 I、容器 盖上围板 II、容器盖上环板均为 3 mm 的钢板,拼焊 成空腔,内部填充泡沫铝泡沫,如图 8 所示。



图 8 容器盖结构示意图 Fig.8 Schematic diagram of cask lid

对比图 9 与图 10, CNFC-FN 新燃料运输容器的 容器盖双凸台结构使得容器在顶部向下跌落时,首个 凸台及第 2 个凸台相继变形,延长内部结构受力冲击 时程,更好地发挥泡沫铝吸能减震的作用。相对于单 层凸台的容器盖设计,容器盖的双层凸台结构,可降 低法兰处的加速度峰值,减小容器盖与容器筒体连接 螺栓的弯矩,避免连接螺栓在正常运输条件下产生塑 性变形。



图 9 正常运输条件 1.2 m 容器顶部向下跌落变形情况 Fig.9 Deformation of cask in top-down 1.2 m free drop test under normal conditions of transport



图 10 容器盖单层凸台结构 1.2 m 容器 顶部向下跌落变形情况 Fig.10 Deformation of cask with single-deck structure in top-down 1.2 m free drop test

对于角跌落工况的吸能减震结构设计如下: 如图 11 所示,设置缓冲板,焊接在容器筒体法 兰边缘处,对于容器角跌落时冲击载荷具有吸能减震 作用,保护容器盖与容器筒体的连接螺栓。

将吊耳角度设置为吊耳长边与容器筒体径向垂 直,相对于吊耳长边与容器筒体径向平行的结构,其 增大角跌落时与靶面接触面积,增加吊耳变形量,优 先于法兰及筒体变形吸能,降低加速度峰值,在容器 角跌落时起到更好的吸能减震效果。

将容器简体法兰外缘的厚度设计为 15 mm,缓冲 板的厚度设计为 10 mm,使简体法兰与缓冲板存在刚 度差异,在角跌落时简顶缓冲板优先吸收能量变形, 避免简体法兰在角跌落时发生较大变形,保护简体与 容器盖处连接螺栓。



图 11 简体缓冲结构示意图 Fig.11 Schematic diagram of buffer structure of cask shell

3.3.4 周向吸能减震设计

为吸收容器水平跌落时的冲击载荷,在容器外筒体处设置4条筒外筋板,由厚度3mm的钢板组焊成空腔,内部填充泡沫铝材料。筒外筋板与容器筒体中的泡沫铝材料相继变形,降低吊篮加速度峰值,可较好地吸收冲击能量,保护燃料组件。容器筒体结构示意图如图12所示。



图 12 容器筒体结构示意图 Fig.12 Schematic diagram of cask shell

3.3.5 底部吸能减震设计

将容器筒体底部填充泡沫铝去除直径 986 mm、 高度 80 mm 的泡沫铝材料,相对于泡沫铝完全装填 容器底部空腔的结构,其减少容器筒体底部整体刚 度,在容器底部设置泡沫铝材料变形台阶后可使泡沫 铝相继变形,增加变形时程,降低加速度峰值,增强 容器底部变形吸能减震的能力。

3.3.6 常规运输条件隔震结构设计

为在常规运输条件下使燃料组件加速度满足要求,在吊篮上、下设置有隔震功能的结构,选用柔性材料橡胶垫。吊篮上的缓冲橡胶垫用螺栓连接形式固定在容器盖底板上,顶部橡胶垫的结构适用于吊篮中燃料组件顶部露出的上接头部件形状,如图 13 所示。 容器盖底部上焊接有吊篮轴向限位—T型钢,该部件限制吊篮在常规运输时沿容器轴向的位移,可使冲击载荷不直接作用于燃料组件的上接头部件。



图 13 使用螺栓联接顶部橡胶垫与容器盖底板示意图 Fig.13 Schematic diagram of top rubber pad and bottom board of lid with bolted joint

设置在吊篮上、下的橡胶垫,具有隔震的功能, 但随使用时间的增加会有老化问题,容器结构设计应 考虑方便维修维护。吊篮下部的缓冲橡胶垫与吊篮底 板之间同样用螺栓连接形式固定,见图4容器吊篮结 构。固定吊篮顶部、底部橡胶垫的螺母分别点焊在容 器盖底板、吊篮底板上,螺栓使用内六角螺栓,可方 便更换缓冲橡胶垫。

3.4 容器结构设计安全分析

CNFC-FN 新燃料运输容器充分考虑满足容器使 用功能和安全功能 2 方面的需求,依据设计准则,完 成了结构设计。容器筒体和容器盖的减震结构设计起 到较好的效果,保障了容器在各跌落工况下连接螺栓 不断裂、燃料组件不散落到容器外部。容器在正常运 输条件和运输事故条件下各姿态跌落中吸收大量冲 击能量,容器筒体和容器盖在各姿态跌落试验中吸收 的能量占总能量的百分比见表 2。可以看出,该容器 达到了容器盖及容器筒体作为吸能减震主要部件的 设计目的。

表 2 容器筒体和容器盖吸收能量占总能量的百分比 Tab.2 Ratio of energy absorption of cask shell and lid in total impact energy

容器跌落 姿态	减震结构吸收 能量占总能量 的百分比/%	容器跌落 姿态	减震结构吸收 能量占总能量 的百分比/%
9m顶部向下	96	1.2 m 顶部向下	95.7
9m底部向下	95.8	1.2 m 底部向下	95.8
9 m 水平	92.8	1.2 m 水平	99.9
9 m 52°A	93.5	1.2 m 52°	99.8
9 m 52°B	98.8	9 m 15°	99.5

注: A 为吊耳正对靶面; B 为筒顶缓冲板正对靶面,吊耳与着 地点呈 22.5°夹角。

图 14 为容器 9 m 52°角跌落时螺栓应力和塑性应 变分布情况,部分螺栓发生塑性变形,但未发生断裂 现象,说明容器盖与容器筒体保持连接,燃料组件不 会从容器中脱落。

经力学分析计算, CNFC-FN 新燃料运输容器在 正常运输条件和运输事故条件下,容器盖和容器筒体 的螺栓断裂数量在各种跌落试验姿态下均为0, 燃料 组件不会散落到容器外,满足结构设计准则要求。

上述结果表明,容器经正常运输条件和事故运输 条件试验后,能满足临界计算假设条件。经临界分析评 价,根据 CNFC-FN 新燃料运输容器内容物新燃料组 件的特点,选取了相适应的临界基准实验^[13-14]以确定 分析程序的方法不确定性为 0.011 2。货包阵列事故工 况的 k_{eff}±σ 为 0.552 9±0.000 5,小于接受准则。容器的 临界安全指数(CSI)为0,满足容器设计临界准则^[15]。

经屏蔽分析计算,常规运输工况下容器表面最大剂量率为1.15×10⁻² mSv/h,小于规定限值0.5 mSv/h。 距容器表面1m处最大剂量率为2.33×10⁻³ mSv/h,根据《规程》,容器运输指数为0.23,货包类型属于II 级(黄)货包^[16]。容器在经受了《规程》中规定的正常运输条件试验后,其外表面辐射水平提高了3.5%, 说明容器设计能防止屏蔽完好性的丧失(货包的任何 外表面上的辐射水平提高20%以上),符合容器屏蔽 设计准则。

经热工分析,容器筒体内部整体结构由泡沫铝材 料组成,在《规程》中规定的正常运输条件下,太阳 曝晒、环境温度为 38 ℃时,燃料组件最高温度为 53.26 ℃;在《规程》中规定的运输事故条件下,靠 近筒体表面的泡沫铝层、靠近容器盖的泡沫铝层超过 了泡沫铝的熔点温度限值 660 ℃,但是由于采用的泡 沫铝材料本身不会着火,基于保守分析,火烧时泡沫 铝导热系数采用纯铝的导热系数,火烧后冷却时采用 干空气的导热系数,比热容采用纯铝的比热容×孔隙 率进行保守计算。热工计算的温度结果表明,在运输 事故条件下容器内腔温度最高≤85.39 ℃,燃料组件 的最高温度不会超过限值。说明在经受事故条件下的力



图 14 螺栓应力和塑性应变分布 Fig.14 Distribution of bolts stress and plastic strain

学试验继而经受耐热试验后,容器结构设计不会使燃料组件因温度过高而发生破损。

因此, CNFC-FN 新燃料运输容器达到了容器结构设计准则的要求, 能起到运输新燃料组件的安全保障作用。

4 结语

1)CNFC-FN 新燃料运输容器是为安全运输某小型压水堆新燃料组件而研制的专用设备。容器通过合理的结构设计和仿真模拟安全分析,保证了设计安全裕度,满足《规程》对于 AF 型II级(黄)货包的要求。

2)本文立足法规中对于临界、力学、热工、屏蔽、正常操作和运输等多方面要求,结合新燃料运输 容器内容物的特点,明确了容器设计准则,即保证容 器经《规程》中规定的正常运输条件和运输事故条件 下各项试验后容器盖与容器简体不分离,新燃料组件 不散落到容器外部,实现临界分析计算假设分析的有 效性,进而保证临界安全。

3)为满足上述设计准则和设计要求,容器设置 了多级凸台的减震结构,包括双凸台容器盖、容器筒 体外部筋板、底部泡沫铝台阶等部件;通过研究泡沫 铝性能,给容器减震结构设计提供思路,使容器在事 故条件下有良好的减震效果;通过设置合理的吊篮装 载管间距及减震结构,保证组件处于次临界状态,从 而满足容器的设计准则,即容器盖与容器筒体不分 离、燃料组件不散落到容器外部。

参考文献:

[1] 何若益, 蒲小兵, 陈志强, 等. CNFC-3G 型核燃料容 器在运输中的振动数据分析与研究[J]. 物流技术,

2015, 34(7): 283-285.

HE R Y, PU X B, CHEN Z Q, et al. Analysis and Study of Vibration Data in Transportation of CNFC-3G Nuclear Fuel Containers[J]. Logistics Technology, 2015, 34(7): 283-285.

[2] 孙树堂,曾亮,李国强,等. 我国 PWR 燃料组件运输
 容器定期评价与经验反馈[J].包装工程,2018,39(23):
 105-110.

SUN S T, ZENG L, LI G Q, et al. Regular Evaluation and Experience Feedbacks for PWR Fuel Assembly Transport Containers in China[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(23): 105-110.

- [3] HALL R, MARSHALL W, WIESELQUIST W. Assessment of Existing Transportation Packages for Use with HALEU[R]. Tennessee: Oak Ridge National Lab, 2020: 9-49.
- [4] 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, National Market Supervision Administration. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material: GB 11806—2019[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2019.

- [5] IAEA. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material: No.SSR-6-2018[S]. VIENNA: IAEA, 2018.
- [6] 中华人民共和国国务院办公厅.中华人民共和国国务院令第 562 号: 放射性物品运输安全管理条例[Z/OL].
 (2010-01-15)[2024-09-01].https://www.gov.cn/zwgk/2009-09/22/content_1423508.htm.
 General Office of the State Council of the People's Repub-

lic of China. Decree No.562 of the State Council of the

People's Republic of China: Regulations for the Safety Management of Radioactive Materials Transport[Z/OL]. (2010-01-15) [2024-09-01].https://www.gov.cn/zwgk/ 2009-09/22/content 1423508.htm.

 [7] 环境保护部. 原环境保护部令第 11 号: 放射性物品运输 安全许可管理办法[Z/OL]. (2010-11-15)[2024-09-01].
 https://www.gov.cn/gongbao/content/2011/content_179205
 4.htm.

The Ministry of Environmental Protection. Order No.11 of the Ministry of Environmental Protection: Measures for the Administration of Safety Licensing for the Transport of Radioactive Materials. [Z/OL]. (2010-11-15)[2024-09-01]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2011/content_179205 4.htm.

- [8] 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.
- [9] IAEA.Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material: No.SSG-26-2018[S]. VIENNA: IAEA, 2022.
- [10] 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.

[11] 张赞. 闭孔泡沫铝的压缩及吸/隔声性能调控机理研究[D]. 河北: 河北工业大学, 2017: 2-3.
 ZHANG Z. Research on Regulation Mechanism of

Compression and Sound Absorption/Insulation Properties of Closed-Cell Aluminum Form[D]. Hebei: Hebei University of Technology, 2017: 2-3.

- [12] 孙谦, 庄大杰, 孙洪超, 等. 乏燃料运输容器减震器 应用及研究现状[J]. 包装工程, 2023, 44(5): 282-290.
 SUN Q, ZHUANG D J, SUN H C, et al. Application and Research Status of Spent Fuel Transport Cask Impact Limiters[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(5): 282-290.
- [13] Briggs J B. The Activities of the International Handbook of Evaluated Project (ICSBEP)[J]. Journal of Nuclear Science & Technology, 2014, 30(2): 1427-1432.
- [14] CHAVES BARCELLOS L F F, BODMANN B E J, VILHENA M T M B. On a Comparison of a Neutron Monte Carlo Transport Simulation to a Criticality Benchmark Experiment[J]. Progress in Nuclear Energy, 2021, 134: 103652.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.反应堆外易裂变材料的核临界安全:GB 15146-2008[S].北京:中国环境出版社,2008.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of the People's Republic of China. Nuclear Criticality Safety for Fissile Materials Outside Reactor: GB 15146-2008[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008.

[16] 詹乐昌,包捷,郝慧杰,等.放射性物品分类方法研究[J]. 核技术,2023,46(1):43-49.
ZHAN L C, BAO J, HAO H J, et al. Research on Methodology of Radioactive Materials[J]. Nuclear Techniques, 2023, 46(1):43-49.

• 47 •