核燃料组件运输容器应用现状概述

孙谦, 庄大杰, 孙洪超, 张煜航, 王学新, 徐潇潇, 李国强 (中国辐射防护研究院, 太原 030006)

摘要:目的 充分了解国内外核燃料组件运输容器的主要应用现状,通过对照国外发展经验,为更好地 实现国内运输容器自主化发展提出意见建议。方法 调研和分析国际上主要核大国代表性核燃料组件运 输容器的技术现状,以及国内容器的研发、应用状况,梳理了自主化发展中仍需改进的方向。结果 国 际上主要核大国利用核能技术较早,均已针对本国的反应堆技术开发了成熟的运输容器产品,相比之下, 目前国内在引进和吸收国外先进技术的基础上,也已逐渐实现了部分核燃料组件运输容器的国产化,并 针对高温气冷堆开发了新型运输容器。结论 建议注重核燃料组件运输容器的系列化发展,增加攻克关 键技术的投入,继续推进容器设计评价软件开发与试验验证平台的建设。

关键词: 核燃料组件; 运输容器; 容器设计; 自主化发展

中图分类号: TB485.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2022)13-0142-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.13.018

Overview of Application Status for Nuclear Fuel Assembly Transport Package

SUN Qian, ZHUANG Da-jie, SUN Hong-chao, ZHANG Yu-hang, WANG Xue-xin, XU Xiao-xiao, LI Guo-qiang

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

ABSTRACT: The work aims to fully understand the main application status of nuclear fuel assembly transport packages at home and abroad and put forward suggestions based on the experience of foreign countries so as to realize the independent development of domestic transport packages. The technical status of representative fuel transport packages in major nuclear countries as well as the domestic R&D and application status were surveyed and analyzed. The directions that still need to be improved in independent development were viewed. Main nuclear countries in the world developed the nuclear energy industry earlier and have formed mature transport package products for their own reactor technologies. At present, on the basis of introducing and absorbing foreign advanced technology, the domestic development of some nuclear fuel assembly transport packages had been gradually realized. The new type transport package for high-temperature gas-cooled reactor fuel assembly had been developed. It is recommended to pay more attention to the serialized development of transport packages and increase the investment in overcoming key technologies. The development of package structure design software and the construction of the test platform need to be strengthened.

KEY WORDS: nuclear fuel assembly; transport package; package design; independent development

核燃料组件作为核反应堆中提供能量的部件,主要包括2种:将天然六氟化铀进行富集,或直接加工成为核燃料组件;通过后处理流程,将乏燃料加工成

为 MOX 新燃料。核燃料组件运输容器是实现核燃料 组件从元件制造厂到反应堆安全转移,保障运输过程 中内容物结构完整、临界安全和货包屏蔽性能满足

收稿日期:2021-12-20 作者简介:孙谦(1994—),男,硕士,研究实习员,主要研究方向为放射性物品运输安全。

标准要求的关键设备。我国商用核电站分布于沿海 地区,元件制造厂地处内陆,核燃料组件运输路程 较长、路况复杂,因此高质量的核燃料组件运输容 器极为重要。

随着我国核能产业的快速发展,核电装机总量不断增加,新燃料运输需求增加,同时也对核燃料组件运输容器性能提出了更高要求。截至 2020 年底,我国大陆运行的核电机组共有 49 台,额定装机容量为5 102.716 万 kW,在建机组 16 台。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》^[1]指出,到 2025 年我国核电运行装机容量达到 7 000 万 kW。

1 核燃料组件运输容器简介

核燃料组件运输容器用于装载未经辐照、未发生 核链式反应的燃料组件,能够满足放射性危险货物安 全运输的要求^[2]。运输容器应确保具有足够的刚度, 主要由外部支撑部件和包容结构、减震器、托架、吊 耳等部件构成。其中,减震器用于减缓核燃料组件在 运输过程中受到的振动、冲击等,材质通常为橡胶、 木材等。考虑到新燃料组件辐射水平通常较低,因此 运输容器一般不需要设置专门的γ射线屏蔽层。为满 足在运输过程中对核燃料组件加速度监测的需求,运 输容器内部还可安装加速度计。

根据我国《放射性物品分类和名录》(修订征求 意见稿)^[3]的规定,反应堆新燃料属于一类放射性物 品,装载该内容物的运输容器多属于 AF 型货包。国 际原子能机构(IAEA)发布的《放射性物质安全运 输条理》(SSR-6)对运输容器的设计作出了推荐规 定,我国也基于此制定了《放射性物品安全运输规程》 (GB 11806—2019)^[4]。除此之外,我国《压水堆核 电厂新燃料组件运输容器通用技术条件》(NB/T 20184—2012)^[2]从行业标准的角度对压水堆核电厂 新燃料组件运输容器的设计、制造、试验和运输提出 技术要求。在我国,新设计的核燃料组件运输容器须 满足 GB 11806 的要求,经受正常运输条件和运输事 故条件下的安全验证试验,包括自由下落试验、耐热 试验、水泄漏试验等,最终获得我国核安全监管部门 的设计与制造许可后,方可申请运输。

2 国外技术现状

相较于国内,国际上主要核大国核能产业发展较早,在新燃料运输方面经验丰富,且部分容器在国际上应用广泛。当前,我国也引进了一部分国外进口运输容器用于核燃料组件运输,主要来自法国、美国、俄罗斯等国家。进口容器均适配于国外引进的反应堆燃料组件,例如 VVER-1000 堆燃料组件运输容器由俄罗斯设计,M310 堆燃料组件运输容器由法国设计等^[5]。

2.1 主要核大国的代表性运输容器

2.1.1 法国

法国是国际上核电大国,全国约 70%的电力来自核能发电,核电装机容量达 61 370 MW。在法国国内,每年大约有 100~120 次以公路方式运输新燃料组件 以及 20~30 次以铁路方式运输新燃料组件^[6]。为满足 新燃料组件安全运输的要求,法国主管部门批准了 FCC3 型和 FCC4 型运输容器,属于 IP2 型货包,容 器见图 1^[8]。国内台山核电站引进法国第 3 代核电 EPR 技术,同时引进了法国 TN International 公司设计、生产的 FCC4–V1 型运输容器用于新燃料运输^[7],该 容器运输指数为 0.6。



a FCC3 型运输容器



b FCC4 型运输容器 图 1 FCC3 型和 FCC4 型运输容器 Fig.1 FCC3 and FCC4 transport packages

在 MOX 新燃料组件运输方面,早期法国采用 FS65、FS69 型运输容器装运,其中 FS65 仅能装载 1 组 PWR 燃料组件或 2 组 BWR 燃料组件,FS69 仅能 装载 2 组燃料组件。考虑到容器容量较小,运输经济 性差,TN international 公司设计研发了 MX6、MX8 2 种新型 MOX 燃料组件运输容器^[9],容器结构见图 2。 MX6 和 MX8 型运输容器属于 B(U)F 型货包,主要由 内部燃料篮和外部容器体组成。外部容器体为双层钢 结构,外层能够提供足够的机械强度,内层作为安全 壳,内外层之间填充有中子屏蔽树脂和散热铜片。容 器两端固定有直径较大的木材减震器,保护容器在冲 击事故条件下的完整性。为降低容器装卸过程中对人 员的辐射影响,设计和开发了屏蔽板。MX6 运输容器能够装载 6 组 PWR 燃料组件或 16 组 BWR 燃料组件, MX8 运输容器能够装载 8 组燃料组件,大大提高了内容物装载量,目前在法国、德国、瑞士等国家使用。



b MX8 型运输容器

图 2 MX6 型和 MX8 型运输容器 Fig.2 Schematic diagrams of MX6 and MX8 transport packages

2.1.2 美国

美国作为世界上最大核能发电国,核能发电量占 全球核电的 30%,装机容量为 95 523 MW^[10]。在美 国国内,用于装运未经辐照的新燃料组件的运输容器 均依据 10CFR 第 71 部分,经美国 NRC 批准为 A(F) 或 B(F)型货包,且均采用卡车运输的方式。美国境内 装运 BWR 新燃料组件采用 TNB1 型,SP1、2、3 型 运输容器,装运 PWR 新燃料组件采用 MAP12/13 型、 Traveller 运输容器等^[8]。

以 TNB1 型运输容器^[11]为例,该容器在美国被批 准装运 2 种 BWR 新燃料组件,且²³⁵U 富集度不大于 5%。该运输容器外形为矩形,由内、外两部分构成, 内容器设置有隔热板和泡沫聚乙烯缓冲板,外容器为 一个覆盖着钢板的角框架,TNB1 型运输容器结构见 图 3。

美国西屋公司设计了 Traveller 系列运输容器装运 PWR 燃料组件,该容器具有标准(STD)、XL 和 VVER 3 个版本^[11],在美国境内其装载富集度授权为²³⁵U 的富集度≤5%,容器结构见图 4。该运输容器为圆柱形外筒与矩形箱体内筒构成的管状结构,并设置 有聚氯乙烯慢化块和中子吸收板用于控制临界状态。 国内早期为满足 AP1000 堆新燃料组件的运输需求, 三门核电引进了美国西屋公司设计、美国哥伦比亚高 科技公司制造的 Traveller XL 型燃料组件运输容器 ^[12]。该运输容器外筒与内筒间填充有硬质聚氨酯泡 沫,构成"钢—泡沫塑料—钢"结构,运输指数为 0.2, 临界安全指数为 0.7。XL 版本运输容器的内筒尺寸较 长,能够同时满足装载较长和横截面较大核燃料组件 的要求,可以通过添加铝垫块的方法来装载长度较短 的核燃料组件,装载横截面较小的核燃料组件时可以 在 V 型定位板中添加组件垫圈。



图 3 TNB1 型运输容器示意图 Fig.3 Schematic diagram of TNB1 transport package



图 4 Traveller 型标准版本容器 Fig.4 Schematic diagram of Traveller transport package (standard version)

2.1.3 俄罗斯

作为较早利用核能的国家,俄罗斯正在稳步推进 核能技术的发展,包括开发新的反应堆技术^[13]。在俄 罗斯国内,早期采用 TK-C5 型运输容器运输 VVER-1000型新燃料组件,并能够用于航空运输^[14], 容器结构见图 5。该容器于 1993 年获得俄方设计批 准,按照 IAEA-85 Regulations 对 B(F)型货包的设 计要求,完成了正常运输条件(喷淋、1.2 m自由下 落、堆积、落棒试验)和运输事故条件(9 m自由下 落、贯穿、压碎、火烧、水浸没试验)下的验证试验。 在 TK-C5 型运输容器的基础上,俄罗斯做过多次设 计升级。例如,为满足 IAEA 对航空运输货包新的设 计要求,2001 年 TK-C5 型运输容器设计更新为 TK-C5-B型。更新后的运输容器适用于所有运输方式,能够满足速度为 90 m/s的冲击试验和 60 min 火烧试验(800 ℃以上)的要求。



图 5 TK-C5 型运输容器 Fig.5 Schematic diagram of TK-C5 transport package

在国内,田湾核电站先后引进了 TK-C5 型、 TK-C5-M 型核燃料组件运输容器^[15],用于 VVER-1000型反应堆 TVS-2M燃料组件的运输,均 由俄罗斯新西伯利亚化学浓缩物厂设计和制造^[16]。 TK-C5-M 型燃料组件运输容器是 TK-C5 型运输容 器的改进版,运输指数为 0.3。该容器结构相对简单, 外壳为 2 个钢管的焊接结构,顶部和底部设有支架和 定位孔等,便于固定和堆码,容器没有设置中子屏蔽 层,因此单个容器的临界安全指数较高(CSI 值为 8.34)。由于容器没有缓震结构,为了保证核燃料组 件安全,容器须安装在特制的缓震装置上进行运输。

除此之外,俄罗斯也开发了多种用于装运研究堆 新燃料组件的运输容器。为运输 RA、RB 试验反应 堆的 TWR-S 型燃料组件,俄罗斯设计开发了 TK-S16 型运输容器^[17-18]。该容器由双层钢制外壳和盖子组 成,能够装载²³⁵U 富集度最高为 80%的新燃料组件。 国内引进了 TK-C57 型运输容器开展实验快堆新燃 料的运输,该容器由俄罗斯开放式股份公司机器制造 厂设计和制造,装载富集度不大于 65%,运输指数小 于 10,临界安全指数为 1^[19-20]。

2.2 小结

1)美、法、俄等主要核电大国利用核能技术较 早,已针对各自掌握的反应堆技术研制和形成了技术 成熟的核燃料组件运输容器产品。

2)美国按照 A(F)或 B(F)型货包的要求进行核燃料组件运输容器设计,在力学、临界安全等方面的考虑更充分,而俄罗斯 TK-C5 型、TK-C5-M 型等运输容器结构相对简单,没有进行临界安全、减震等方面的设计。

3)国外核燃料组件运输容器装载兼容性和系列 化程度较高。

3 国内技术现状

近些年,为满足我国新燃料组件运量增加的需 求,国内自主设计了多款新燃料组件运输容器,取得 了审管部门的设计、制造许可,适用于装载盖压水堆、 高温气冷堆、研究堆等新燃料组件。

3.1 国内代表性运输容器

3.1.1 中国核电工程有限公司

中国核电工程有限公司在放射性物品运输容器的设计方面积累了丰富经验,成功研制了 RY-I 型、 "龙舟-CNSC"等技术难度较大的乏燃料运输容器^[21]。 在核燃料组件运输容器设计方面,针对国内应用较多 的压水堆,中国核电工程有限公司与中核建中核燃料 元件有限公司共同设计研发了 CNFC-3G 燃料组件运 输容器^[15]。该运输容器主要由外壳、内件和撑杆等部 件构成,使用硼不锈钢 304B7 作为中子吸收材料,能 够装载 2 组 AFA3G、CF 或 STEP-12 型新燃料组件, 运输指数为 0.5,临界安全指数为 0^[22-23]。西安核设 备有限公司取得了 CNFC-3G 燃料组件运输容器制造 方法的发明专利^[24],实现了该设备的自主制造,达到 降低成本、提高制造水平的目的。

在此基础上,中国核电工程公司设计了用于装载 FA300 新燃料组件的 CNFC-300 燃料组件运输容 器。该容器与 CNFC-3G 燃料组件运输容器结构、 材料、外形尺寸相似,运输指数为 0.3^[25]。CNFC-3G 和 CNFC-300燃料组件运输容器均采用标准集装架 进行栓系和运输,能够满足公路和铁路安全运输的 要求。

高温气冷堆作为我国掌握的新一代核电技术,具 有广阔的应用前景。为满足国内运输需求,中国核电 工程公司自主设计了适用于装运高温气冷堆燃料组 件的 CNFC-HTR 燃料组件运输容器^[26]。该容器主要 由外容器、内容器、吊篮和集束管组成,容器结构见 图 6。考虑到运输过程中振动和火烧事故可能对核燃 料组件造成的影响,外容器采用了不锈钢填充硬质聚 氨酯泡沫的结构,起到减震阻燃的作用。为了保证运 输过程中核燃料组件的临界安全,在吊篮外层设置了 铝基中子吸收材料^[27-28]。



图 6 CNFC-HTR 燃料组件运输容器 Fig.6 Schematic diagram of CNFC-HTR fuel assembly transport package

3.1.2 中广核研究院

中广核研究院有限公司作为中国广核集团的企业技术中心,自主设计研发了适用于装载压水堆 STEP-12 系列和 AFA 3G 系列新燃料组件的 ANT-12A型燃料组件运输容器^[29]。运输容器主要由 上壳体、下壳体、浮床和门组件构成。其中上、下壳 体均为双层结构,主体材料为 SA-240M 304 不锈钢, 并填充纳米孔复合绝热毡作为隔热材料,浮床的主要 材料为 SA-479M 304 不锈钢。为减轻运输过程中产 生的振动和碰撞,容器上壳体和浮床处分别安装有轻 木材料减震器和橡胶减震器,并采用铝基碳化硼作为 中子吸收材料来保证临界安全。

3.1.3 上海核工程研究设计院有限公司

上海核工程研究设计院有限公司于 2017 年完成 了 AP1000 燃料组件装运容器——STC-NF1A 燃料组 件运输容器的国产化设计^[30],该容器主体结构材料为 304 不锈钢和 6000 系列铝合金,能够装载一组改进 型 RFA-XL 型新燃料组件(²³⁵U 富集度≤4.95%),类 型为 A(F)型。2018 年南通中集能源装备有限公司 取得了 STC-NF1A 燃料组件运输容器的制造许可, 2019 年完成了首批运输容器的制造,并配合容器使 用单位开展了道路运输试验、加速度试验、淋雨试验 等多种试验,最终确认 AP1000 燃料组件国产化运输 容器满足实际道路运输要求^[31]。

3.1.4 中国原子能科学研究院

国内除商用核电站反应堆外,还运行着研究堆、 实验堆等小型反应堆,其新燃料组件也需要专用的 运输容器装载。为满足某实验堆新燃料组件的运输 需求,中国原子能科学研究院设计了YJ-1型运输容 器^[32]。该容器为箱式结构^[33],主要由外壳和内部材 料组成,外壳的箱盖和箱体通过 M16 螺栓连接,内 部由隔热材料、软木板和缓冲材料等填充。

针对中国实验快堆(CEFR)使用的混合氧化物 MOX 新燃料组件,中国原子能科学研究院设计开发 了 CEFR-MOX 新燃料组件运输容器^[34]。CEFR-MOX 新燃料组件运输容器的结构见图 7,容器外形为圆柱 形,主要由缓冲器、第1层压紧端盖、第2层压紧端 盖、筒体组件和中间贯穿件 5 个部分构成,主体材料 为 16MnDR 和 16MnD^[35]。由于 CEFR-MOX 新燃料 组件的富集度和放射性活度较高,根据《放射性物品 分类和名录》的规定,装载了该燃料组件的运输容器 属于 B(U)F 型货包,该容器也经受了 GB 11806 要求 的相关验证试验^[36]。

3.1.5 核燃料组件运输容器的主要安全问题

依据 GB 11806 的要求,核燃料组件运输容器在 设计时须具备能够承受一定堆积压力荷载的能力。在 运输条件下,考虑到临界和运输安全要求,核燃料组 件运输容器须采用专用的栓系方式在车辆上进行固 定,控制容器的堆码形式和间距,确保货包在运输过 程中不会发生位移。



(缓冲器; 2.第1层压紧端盖; 3.第2层压紧端盖;
 4.简体组件; 5.中间贯穿件。



为确保栓系强度及吊装操作的便捷,核燃料组件 运输容器通常在合适的位置设计有吊耳,并按照一定 的安全裕度进行验证。运输容器在投入使用后,需要 定期开展维修维护和安全性能评价工作,确保吊耳没 有变形、扭曲和裂纹发生,以保证吊耳强度满足安全 吊装要求。

除此之外,核燃料组件运输容器在运输中还需满 足 IAEA《放射性物质安全运输规程咨询材料》推荐 的加速度设计要求,因此为减轻运输过程中产生的振 动,核燃料组件运输容器多使用橡胶、木材等进行减 震设计,否则必须配备专用的缓冲装置进行运输。

核燃料组件运输容器装载的未经辐照的核燃料 组件,主要由 UO₂ 芯块制成,其射线能量较弱,辐 射水平相对较低,因此核燃料组件运输容器通常不 需要设置专门的辐射屏蔽层,主要利用钢制外壳起 到一定的屏蔽作用。核燃料组件运输容器的运输指 数较小,因此在运输活动中对人员和环境的辐射影 响相对较小。

在临界安全方面,核燃料组件运输容器通常设置 中子吸收层来保证临界安全,使得单个容器的临界安 全指数尽量低。GB 11806 规定,非独家使用的单个 车辆上装载货包的临界安全指数总和不超过 50,若 单个容器的临界安全指数过大,则会在一定程度上增 加运输难度。建议增加对容器临界安全设计的考虑, 使得单个容器临界安全指数尽量小,便于运输时增加 单个车辆中容器的装载数量,提高运输经济性。

3.2 国内容器设计计算与试验能力

与核大国相比我国核能产业发展较晚,因此早期 国内使用的核燃料组件运输容器均由国外引进。近些 年,在消化吸收国外技术的基础上实现了部分型号燃 料组件运输容器的自主化发展,这得益于放射性物品 运输容器设计和计算能力的提高,以及相关试验平台 的建设。

3.2.1 设计计算能力发展

核燃料组件运输容器设计主要包括结构安全设计、 热工安全设计、临界安全设计等方面。在结构安全设计 方面,国内运输容器设计单位通常采用 ANSYS/LS-DYNA、ABAQUS 等成熟的商用有限元分析软件进行 运输容器建模^[37-38],分析和评价力学试验对运输容器 造成的影响。仿真计算的结果还能够确定造成容器变 形量最大的跌落角度^[39],作为开展角下落试验的下落 姿态,能够极大地节省试验资源。CFX、FLUENT 等 流体力学计算软件被用于放射性物品容器的热工安 全分析^[40-41],分析计算 GB 11806 要求的正常运输及 运输事故条件下容器的温度场分布,确定各部分工作 温度是否满足许用限值。为节约计算资源,在考虑运 输容器结构对称性的前提下,可以采用对容器一定比 例扇区进行建模的方法进行热工分析^[42]。

在容器临界安全设计方面,国内多采用蒙特卡洛 方法进行计算分析^[43],还可通过可视化软件获得模型 的集合图像。目前,西安交通大学核工程计算物理实 验室研发了蒙特卡洛-确定论耦合粒子输运计算软件 NECP-MCX^[44-45],其计算精度与国外同类软件相当, 在屏蔽深穿透问题方面的计算效率更高,有效地推动 了临界安全计算软件的自主化发展。

3.2.2 试验平台建设

根据 GB 11806 的要求,放射性物品运输容器的 验证试验主要包括力学试验、耐热试验、水浸没试验、 堆积试验、密封试验等,我国相关单位已具备了满足 B 型货包安全试验验证要求的能力。中国辐射防护研 究院^[46-48]具有开展 130 t 容器力学试验的能力,具备 150 kPa 水浸没试验和 2 MPa 强化水浸没试验的条 件,已承担了新燃料组件、放射源、六氟化铀、乏燃 料等多种运输容器的设计取证和试验评价任务,并在 国内首次完成了大型放射性物品运输容器原型样机 的力学试验。

3.3 小结

1)我国已经掌握了国内部分型号压水堆、小型 堆燃料组件运输容器的设计、制造技术,且开发设计 了适用于高温气冷堆燃料组件运输的 CNFC-HTR 运 输容器,为我国新一代核电技术的应用和发展提供了 保障。

2)我国放射性物品运输容器的仿真计算能力与 试验验证平台的建设均得到加强,具备开展 B 型货包 设计与安全评价工作的能力。

4 结语

主要核大国研制核燃料组件运输容器较早,我国 早期开展容器设计、制造的能力较弱,但随着核工业 的发展,我国已经成功实现了部分燃料组件运输容器 的国产化和自主化。综上所述,对我国燃料组件运输 容器自主化发展有如下建议。

1)增加容器设计单位之间的交流,增强运输容器的装载兼容性,更好地实现核燃料组件运输容器的系列化发展。

2)重视容器安全评价计算软件的国产化开发, 推进更全面的试验验证平台的建设,努力实现运输容器设计与安全评价的完全自主化。

3)针对新一代核电技术,增加对相应核燃料组件运输容器的研制投入,研究和攻克关键技术,争取 技术领先。

参考文献:

 [1] 新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四 个五年规划和 2035 年远景目标纲要[J]. 中国水利, 2021(6): 1-38.

Xinhua News Agency. The Outline of the 14th Five-Year Plan(2021—2025) for National Economic and Social Development and the Long-Range Objectives through the Year 2035 of P. R. China[J]. China Water Resources, 2021(6): 1-38.

[2] NB/T 20184—2012, 压水堆核电厂新燃料组件运输容器通用技术条件[S].
 NB/T 20184—2012, General Specification on Transport Vessel for Fresh Fuel Assembly of PWR Nuclear Power Plants[S].

- [3] 生态环境部.关于公开征求《放射性物品分类和名录》 (修订征求意见稿)意见的通知[EB/OL].(2020-04-29)
 [2021-12-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/ xxgk06/202005/t20200506_777840.html.
 Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Notice on Public Solicitation of "Classification and List of Radioactive Materials" (Revised Draft for Solicitation of Comments) [EB/OL].
 (2020-04-29)[2021-12-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/ xxgk/xxgk06/202005/t20200506_777840.html.
- [4] GB 11806—2019, 放射性物品安全运输规程[S].
 GB 11806—2019, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material[S].
- [5] 段春辉,黄新东,谷明非,等.一种新燃料组件运输 容器设计研究[J]. 机械, 2020, 47(5): 54-59.
 DUAN Chun-hui, HUANG Xin-dong, GU Ming-fei, et al. Design and Research on one New Fuel Assembly Transport Cask[J]. Machinery, 2020, 47(5): 54-59.
- [6] World Nuclear Association. Nuclear Power in France [R/OL]. (2021-10-01)[2021-12-20]. https://www.world-nuclear. org/information-library/country-profiles/countries-a-f/fr ance.aspx.

[7] 国家核安全局.关于批准台山核电合营有限公司
FCC4-V1 新燃料运输容器使用批准书有效期延续的
通知 [EB/OL]. (2018-11-13)[2021-12-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk07/201811/t2018
1119_674269.html.

National Nuclear Safety Administration. Notice on Approval of Extension of Validity of Approval for Use of FCC4-V1 New Fuel Transport Container of Taishan Nuclear Power Joint Venture Co., Ltd.[EB/OL]. (2018-11-13)[2021-12-20].

https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk07/20181 1/t20181119 674269.html.

- [8] SHELTON C. Packaging and Transport of Unirradiated Uranium Dioxide Fuel and Nonirradiated Mixed Oxide Fuel[M]. United States: Woodhead Publishing, 2015: 183-197.
- [9] OTTON C, LALLEMANT T. Transport of MOX Fuel: Continuous Challenge[J]. Packaging, transport, storage & security of radioactive material, 2010, 21(1): 46-50.
- [10] World Nuclear Association. Nuclear Power in the USA [R/OL]. (2021-10-01)[2021-12-20]. https://www.worldnuclear.org/information-library/country-profiles/countriest-z/usa-nuclear-power.aspx.
- [11] HALL R, MARSHALL W, WIESELQUIST W. Assessment of Existing Transportation Packages for Use with HALEU[R]. Tennessee: Oak Ridge National Lab, 2020: 9-49.
- [12] 国家核安全局.关于颁发三门核电有限公司一类放射 性物品运输容器使用批准书的通知[EB/OL]. (2013-01-04)
 [2021-12-20]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/ haq/201301/t20130107_244758.htm.
 National Nuclear Safety Administration. Notice on Issuing Approval for the Use of Containers for Transport of Radioactive Materials of San-men Nuclear Power Co., Ltd. [EB/OL]. (2013-01-04)[2021-12-20]. https:// www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/haq/201301/t20130107
- [13] World Nuclear Association. Nuclear Power in Russia [R/OL]. (2021-12-01)[2021-12-20]. https://www.worldnuclear.org/information-library/country-profiles/countrieso-s/russia-nuclear-power.aspx.

244758.htm.

- [14] ROZHKOV V, ENIN A, SINNIKOV Y, et al. Development of Design of WWER-1000 FA and Facilities for Fuel Transportation to NPP[C]// International conference on WWER fuel performance, modelling and experimental support, Albena, 2005: 20796239.
- [15] 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 Shu-tang, ZENG Liang, LI Guo-qiang, et al. Reg-

ular Evaluation and Experience Feedbacks for PWR Fuel Assembly Transport Containers in China[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(23): 105-110.

[16] 国家核安全局.关于批准江苏核电有限公司 TK-C5-M新燃料运输容器使用批准书有效期延续的 通知[EB/OL]. (2020-04-24)[2021-12-20]. https:// www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk09/202004/t2020 0426_776343.html.

National Nuclear Safety Administration. Notice on Approving the Extension of the Validity Period of the TK-C5-M New Fuel Transport Container Approval for Jiangsu Nuclear Power Co., Ltd. [EB/OL]. (2020-04-24)[2021-12-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk09/202004/t20200426_776343.html.

- [17] PESIC M, STELJIC M, ANTIC D. Criticality Safety Evaluation for TWR-S Fuel Assembly Transportation Using TK-S16 Containers[C]// International Yugoslav Nuclear Society Conference, Belgrade, 2003: 359-362.
- [18] LJUBENOV V, STELJI M, PEŠI M. Criticality Safety Study of Fresh HEU Fuel Elements in TK-S15 and TK-S16 Transportation Packages[C]// 7th International Topical Meeting on Research Reactor Fuel Management, Aix-en-Provence, 2003: 230-234.
- [19] 国家核安全局.关于批准中国原子能科学研究院 TK--C57 新燃料运输容器使用批准书限值变更的通知 [EB/OL]. (2018-10-11)[2021-12-20]. https://www. mee.gov.cn/ xxgk2018/xxgk/xxgk09/201810/t20181015_ 662199.html.

National Nuclear Safety Administration. Notice on Approving the Change of the Limits of the TK-C57 New Fuel Transport Container Use Approval Letter of the Chinese Academy of Atomic Energy[EB/OL]. (2018-10-11)[2021-12-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk09/201810/t20181015_662199.html.

[20] 国家核安全局.关于颁发中国原子能科学研究院 TK-C57 新燃料运输容器使用批准书的通知
[EB/OL]. (2019-06-11)[2021-12-20]. https://www. mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk09/201906/t20190614_ 706568.html.

National Nuclear Safety Administration. Notice on Issuing Approval for Use of TK–C57 New Fuel Transport Container of China Academy of Atomic Energy[EB/OL]. (2019–06–11)[2021–12–20]. https://www. mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk09/201906/t20190614_ 706568.html.

[21] 汪海, 童明炎, 孙胜, 等. 乏燃料运输容器研究进展
[J]. 机械工程师, 2015(12): 65-69.
WANG Hai, TONG Ming-yan, SUN Sheng, et al. Research Progress of Spent Fuel Transport Container[J].
Mechanical Engineer, 2015(12): 65-69.

• 149 •

[22] 国家核安全局. CNFC-3G 新燃料运输容器设计批准 书[EB/OL]. (2011-10-27)[2021-12-20]. https://code. fabao365.com/law_572830.html.
National Nuclear Safety Administration. CNFC-3G New Fuel Transport Container Design Approval[EB/OL]. (2011-10-27)[2021-12-20].

https://code.fabao365.com/law_572830.html.

[23] 国家核安全局.关于批准 CNFC-3G 新燃料运输容器 设计批准书限值变更的通知[EB/OL]. (2019-06-11) [2021-12-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/ xxgk09/201906/t20190614_706578.html?tdsourcetag=s pcqq_aiomsg.

National Nuclear Safety Administration. Notice on Approval of Changes in the Limits of CNFC-3G New Fuel Transport Container Design Approval[EB/OL]. (2019-06-11)[2021-12-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk09/201906/t20190614_706578.htm l?tdsourcetag=s_pcqq_aiomsg.

- [24] 王丛杰,王菊,闫海军,等.一种 CNFC-3G 新燃料运 输容器制造方法:中国,104751925A[P].2015-07-01.
 WANG Cong-jie, WANG Ju, YAN Hai-jun, et al. A Manufacturing Method for CNFC-3G New Fuel Transport Container: China, 104751925A[P].2015-07-01
- [25] 国家核安全局.关于颁发中国核电工程有限公司 CNFC-300 新燃料运输容器设计批准书的通知 [EB/OL]. (2017-12-19)[2021-12-20]. https://www.mee. gov.cn/gkml/sthjbgw/haq/201712/t20171222_428451.htm. National Nuclear Safety Administration. Notice on Issuing CNFC-300 New Fuel Transport Container Design Approval to China Nuclear Power Engineering Co., Ltd.[EB/OL]. (2017-12-19)[2021-12-20]. https://www. mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/haq/201712/t20171222_4284 51.htm.
- [26] 国家核安全局.关于批准 CNFC-HTR 新燃料运输容器设计批准书有效期延续的通知[EB/OL]. (2021-02-09)
 [2021-12-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk09/202102/t20210218_821475.html.

National Nuclear Safety Administration. Notice on Extending The Validity of CNFC-HTR New Fuel Transport Container Design Approval[EB/OL]. (2021-02-09)[2021-12-20]. https://www.mee.gov.cn/ xxgk2018/xxgk/xxgk09/202102/t20210218_821475.html.

 [27] 李颖虹,黄灏,周荣生,等.高温气冷堆新燃料元件运输容器临界安全分析[J].核动力工程,2019,40(6): 64-71.

LI Ying-hong, HUANG Hao, ZHOU Rong-sheng, et al. Criticality Safety Calculation and Analysis of Fresh Fuel Element Transport Containers for High Temperature Gas-Cooled Reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(6): 64-71.

[28] 李宁, 张洪军, 徐小刚. CNFC-HTR 新燃料运输容器

结构设计与验证[J]. 科技视界, 2016(8): 204-205.

LI Ning, ZHANG Hong-jun, XU Xiao-gang. Structural Design and Verification of the CNFC-HTR New Fuel Transport Container[J]. Science & Technology Vision, 2016(8): 204-205.

 [29] 国家核安全局.关于颁发中广核研究院有限公司 ANT-12A 型新燃料运输容器设计批准书的通知
 [EB/OL]. (2020-11-26)[2021-12-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk09/202012/t20201203_ 811424.html.

National Nuclear Safety Administration. Notice on Issuing the ANT-12A New Fuel Transport Container Design Approval to CGN Research Institute Co., Ltd[EB/OL]. (2020-11-26)[2021-12-20]. https://www. mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk09/202012/t20201203_ 811424.html.

[30] 国家核安全局.关于颁发上海核工程研究设计院有限公司 STC-NF1A 新燃料运输容器设计批准书的通知
 [EB/OL]. (2017-12-11)[2021-12-20]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/haq/201712/t20171214_4279
 42.htm.

National Nuclear Safety Administration. Notice on Issuing the STC-NF1A New Fuel Transport Container Design Approval to Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co., Ltd[EB/OL]. (2017-12-11)[2021-12-20]. https://www.mee.gov.cn/ gkml/sthjbgw/haq/201712/t20171214_427942.htm.

[31] 中集集团. 中集制造的首批国产化新燃料运输容器正式 投 用 [EB/OL]. (2019-09-02)[2021-12-20].
 http://www.cimc.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=65&id=2747.

CIMC. The First Batch of Domestically-made New Fuel Transport Containers Manufactured by CIMC was Officially Put into Use[EB/OL]. (2019-09-02)[2021-12-20]. http://www.cimc.com/index.php?m=content&c=index& a=show&catid=65&id=2747.

- [32] 衣大勇, 汪军, 郭春秋, 等. YJ-1 型新燃料组件运输 容器的研制[J]. 科技视界, 2015(26): 339.
 YI Da-yong, WANG Jun, GUO Chun-qiu, et al. Development of YJ-1 New Fuel Assembly Transport Container[J]. Science & Technology Vision, 2015(26): 339.
- [33] 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 Chun-qiu, ZOU Jia-xun, YI Da-yong, 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.
- [34] 曹攀,周科源,张强,等. CEFR-MOX 新燃料组件运输 货包临界安全计算[J]. 辐射防护, 2019, 39(2): 89-94.

CAO Pan, ZHOU Ke-yuan, ZHANG Qiang, et al. Criticality Safety Analysis on Transport Package of Fresh CEFR-MOX Fuel Assembly[J]. Radiation Protection, 2019, 39(2): 89-94.

- [35] 国家核安全局.关于颁发中国原子能科学研究院CEFR-MOX-N01 型运输容器设计批准书的通知
 [EB/OL]. (2017-11-08)[2021-12-20]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/haq/201711/t20171113_426114.htm.National Nuclear Safety Administration.Notice on Issuing CEFR-MOX-N01 Type Transport Container Design Approval to China Institute of Atomic Energy
 [EB/OL]. (2017-11-08)[2021-12-20]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/haq/201711/t20171113_426114.htm.
- [36] 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 Zhao-yang, LI Xiao-xuan. Analysis and Validation of the CEFR-MOX Fuel Assemblies Transport Cask Experiment[J]. Science & Technology Vision, 2017(1): 27-29.
- [37] 李国强,李志强,罗晓渭. 一种医疗放射源运输容器冲 击试验和数值仿真[J]. 辐射防护, 2020, 40(1): 52-57.
 LI Guo-qiang, LI Zhi-qiang, LUO Xiao-wei. Impact Test and Numerical Simulation on a Model Container for Transport of Medical Radioactive Sources[J]. Radiation Protection, 2020, 40(1): 52-57.
- [38] 孙洪超,李国强,庄大杰,等.放射源运输容器安全 设计有限元分析方法[J]. 核电子学与探测技术, 2019, 39(5): 582-586.
 SUN Hong-chao, LI Guo-qiang, ZHUANG Da-jie, et al. Finite Element Analysis Method for Safety Design Ver-

ification of Transport Package of Radioactive Sources[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2019, 39(5): 582-586.

- [39] 许艳涛, 马渊睿, 李晨, 等. 燃料运输容器跌落姿态 分析技术[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 20-24.
 XU Yan-tao, MA Yuan-rui, LI Chen, et al. Drop Gesture Analysis of the Fuel Transport Cask[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 20-24.
- [40] 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: 62-74.
 CAI Chuang-guang. Thermal Safety Numerical Simulation and Analysis of Horizontal Spent Fuel Dry Storage[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2019: 62-74.
- [41] 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: 19-31.

WANG Jun. Thermal Safety Analysis of CNSC-24 Spent Fuel Transportation and Storage Cask[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017: 19-31.

- [42] 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 Yang, WANG Jun. Heat Transfer Simulation of Fuel Transport Cask for High Temperature Gas Cooled Reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2017, 38(5): 160-163.
- [43] 王学新, 庄大杰, 曹芳芳, 等. AP1000 新燃料组件运 输货包的临界安全计算[J]. 辐射防护, 2014, 34(2): 97-101.
 WANG Xue-xin, ZHUANG Da-jie, CAO Fang-fang, et al. Criticality Safety Analysis to Transport Package of

al. Criticality Safety Analysis to Transport Package of Intact AP1000 Fuel Assembly[J]. Radiation Protection, 2014, 34(2): 97-101.

- [44] 郑琪, 沈炜, 贺清明, 等. 基于 NECP-MCX 的蒙特卡 罗-确定论耦合及权窗网格粗化方法研究[J]. 核动力 工程, 2021, 42(2): 202-207.
 ZHENG Qi, SHEN Wei, HE Qing-ming, et al. Research on Hybrid Monte-Carlo-Deterministic and Weight-Window Mesh-Coarsening Method Based on NECP-MCX[J].
 Nuclear Power Engineering, 2021, 42(2): 202-207.
- [45] HE Qing-ming, ZHENG Qi, LI Jie, et al. NECP-MCX: A Hybrid Monte-Carlo-Deterministic Particle-Transport Code for the Simulation of Deep-Penetration Problems[J]. Annals of Nuclear Energy, 2021, 151: 107978.
- [46] 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 Guo-qiang, ZHANG Jian-gang, LUO Xiao-wei, et al.

Assessment Technology on Mechanical Test of Package for Radioactive Material Transport[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(4): 762-768.

- [47] 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 Guo-qiang, ZHAO Bing, ZHANG Jian-gang, et al. Test for Radioactive Material Transport Package Safety[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(S1):668-670.
- [48] 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 Jian-gang, LI Guo-qiang, SUN Hong-chao, et al. Safe Test Experience on Radioactivematerial Transport Packages[J]. Radiation Protection, 2018, 38(5):422-427.

责任编辑:曾钰婵