

新燃料运输容器运输多根小型组件的跌落分析

沈勇坚, 沈光耀, 艾卫江, 张振雨, 陈秀明
(上海核工程研究设计院股份有限公司, 上海 200233)

摘要: **目的** 通过跌落分析, 确认 STC 容器可用于运输多根小型组件。**方法** 设计一个可装载多根小型组件的运输内胆, 并从外形尺寸、质量、安装方式、重心位置等维度对内胆组件和新燃料组件进行比较, 从而明确运输多根小型组件时 STC 容器的跌落姿态——与运输新燃料组件时一致。最后, 比较 STC 容器在装载 2 种组件时的跌落分析。**结果** 跌落分析表明, 在各种工况下的跌落中, 相较于运输新燃料组件, STC 容器运输多根小型组件的变形量要小。**结论** 通过内容物比对和跌落分析, 证明了 STC 容器不仅可用于运输新燃料组件, 还可以用于运输多根小型组件。该运输方案满足了跌落验收标准, 确保了容器在各工况下跌落的闭合状态, 从而提高了设计效率, 节约了研制成本。

关键词: STC 容器、跌落分析、小型组件、新燃料组件

中图分类号: TB485.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)13-0285-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.13.034

Drop Analysis of Transporting Multiple Small Assemblies with New Fuel Transport Casks

SHEN Yong-jian, SHEN Guang-yao, AI Wei-jiang, ZHANG Zhen-yu, CHEN Xiu-ming

(Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

ABSTRACT: The work aims to confirm that the STC transport cask can be used to transport multiple small assemblies through drop analysis. A transport inner liner that can load multiple small assemblies was designed. The inner liner and new fuel assemblies were compared from the dimensions of external size, weight, installation method, and center of gravity position to clarify the drop posture of the STC cask when transporting multiple small assemblies, which was consistent with that of transporting new fuel assemblies. Finally, drop analysis of the STC transport cask when loading two types of assemblies was compared. The drop analysis showed that the deformation of the STC cask when transporting multiple small assemblies was smaller than that of transporting new fuel assemblies under various working conditions. Through content comparison and drop analysis, it is proved that the STC cask can not only be used to transport new fuel assemblies, but can also be reused to transport multiple small assemblies. This transportation scheme meets the drop acceptance standards, ensures the closed state of the cask during drops under various working conditions, improves design efficiency, and saves development costs.

KEY WORDS: STC cask; drop analysis; small assemblies; new fuel assemblies

根据《放射性物品分类和名录》规定, 新燃料组件(未经受过辐射照射富集度低于 5% 的核燃料组件)属于一类放射性物品, 新燃料运输容器用于运

输新燃料组件, 属于一类放射性物品运输容器^[1-2]。国务院令 第 562 号文规定, 一类放射性物品运输容器的设计, 应当在首次用于制造前报国务院核安全

收稿日期: 2023-01-09

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX06002004)

作者简介: 沈勇坚(1980—), 男, 硕士。

监管部门审查批准。同时需要遵循 GB 11806—2019 进行设计和试验。

运输不同的组件，一般需要匹配不同的运输容器，但一种运输容器从原型样机设计、多专业协同分析、原型样机制造及试验到最终设计定型和取证需要较高的成本和时间。因此开展成熟运输容器运输不同组件的研究很有意义，是提高设计效率、节约研制成本的有效途径。

本文从现有的 STC 新燃料运输容器着手，对其展开了跌落分析。

1 需求分析

1.1 容器简述

我国目前在新燃料运输容器有多种^[3-5]，其中 STC 新燃料运输容器（下文简称 STC 容器）是我国某设计院设计的新燃料运输容器，可运输一组三代核电的新燃料组件。

容器主要分为外壳和内壳，外壳主要作用是保护燃料组件和隔热。同时它也在运输过程中起到提升、堆放以及栓系作用。内壳主要作用是保护组件及限制组件的移位。图 1 为 STC 容器的三维图。

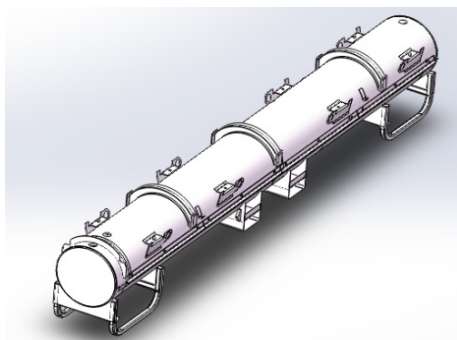


图 1 STC 新燃料运输容器三维图
Fig.1 3D image of STC new fuel transport cask

1.2 原内容物

STC 容器的原内容物为一根 CAP/AP 系列的新燃料组件^[6]。

1.3 新内容物

有一种小型组件^[7]需要运输，圆棒形组件结构形式如图 2 所示。小型组件由三部分组成：顶端结构、中间结构和底端结构。

2 运输分析

2.1 内胆结构

根据小型组件外形尺寸和质量，STC 容器可装载多根小型组件。设计一种运输内胆，内胆中放置多根小型组件，形成内胆组件，整个内胆组件可放置在 STC 容器内壳中运输。

运输内胆方案设计如下：运输内胆外形尺寸与燃料组件保持一致，内胆为长方形壳体，采用厚度为 10 mm 的不锈钢材料；整体分为左中右三部分，左右两端分为上下 2 层结构，设置组件放置格架，格架上放置橡胶垫减震，格架可拆卸，满足不同位置组件安装的需要；中间为单层设计；总共可放置 9 根小型组件。小型组件在 STC 容器中的布置方案参见图 3。

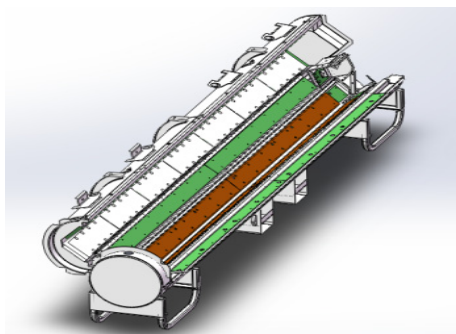


图 2 小型组件
Fig.2 Small assembly

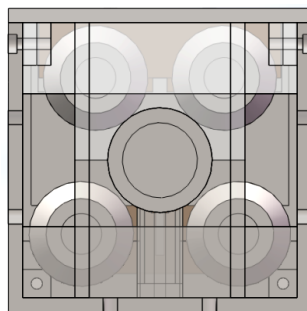


图 3 内胆运输多根小型组件方案
Fig.3 Transport scheme of multiple small fuel assemblies in inner liner

2.2 参数比对

三代核电新燃料组件和内胆组件 2 种不同内容的参数比对见表 1。2 种不同内容物的三维模型图见图 4, 其中图 4a 为内胆组件, 图 4b 为新燃料组件。

表 1 2 种不同内容物参数比对
Tab.1 Parameter comparison of two contents

组件	质量/kg	富集度/%
新燃料组件	890	4.95
运输内胆 (含 9 根小型组件)	585 (含 9 根组件)	3.50

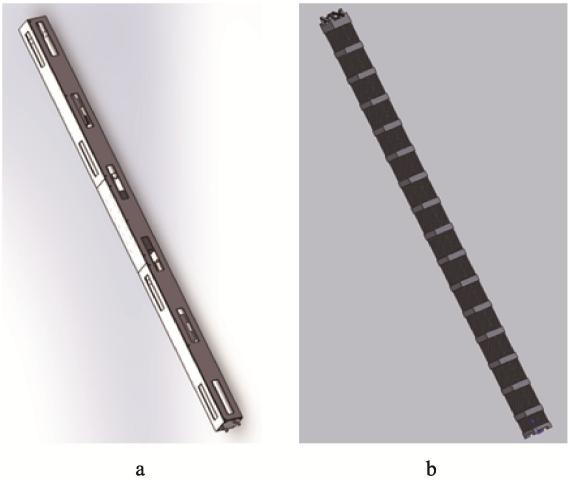


图 4 内胆组件及燃料组件
Fig.4 Inner liner assembly and fuel assembly

STC 容器在装载新燃料组件和内胆组件时的重心位置在高度方向上保持一致, 在水平方向略有偏差。重心位置的示意参见图 5 和图 6。

2 种不同内容物在 STC 容器内的位置如图 7 所示。

内胆组件下端放置在容器内壳底部, 内胆组件上端通过容器内壳顶杆进行固定; 安装方式与新燃料组件在内壳内的安装方式保持一致。

STC 容器在运输新燃料组件和内胆组件时, 对比如下:

1) 2 种内容物固定方式相同, 与运输容器间接

触和边界条件相同。

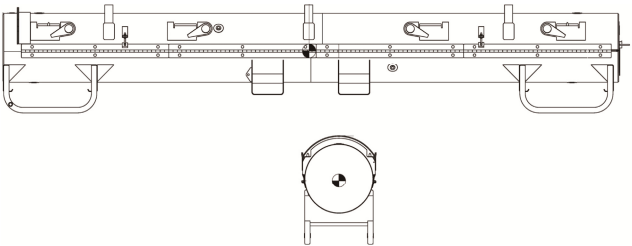


图 5 装载新燃料组件时的重心位置
Fig.5 Center of gravity position when loading fuel assembly

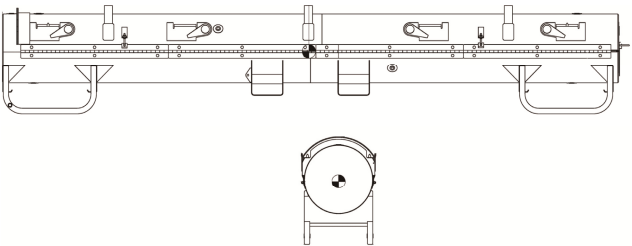


图 6 装载内胆组件时的重心位置
Fig.6 Center of gravity position when loading inner liner assembly

2) 内胆组件比新燃料组件质量减小了 34%, 对运输容器冲击载荷减小。

3) 内胆壳体由 10 mm 厚钢板围成, 壳体刚度好, 不易变形。

4) 小型组件在内胆中放置时有橡胶填充, 增加了缓冲性能。

5) 2 种内容物重心位置基本一致。

3 跌落分析

根据 GB 11806—2019 的要求^[8], 跌落包括验证运输正常条件能力的自由下落试验 (1.2 m)、贯穿试验 (1 m 落棒)、验证运输事故条件能力的自由下落试验 I (9 m) 和自由下落试验 II (1 m 穿刺)。验收标准为在运输事故条件下, 运输容器内外壳保持闭合, 保证燃料组件处于次临界状态。正常运输条件能力的试验后, 还需要确保容器屏蔽防护能力减弱小于 20%^[9]。

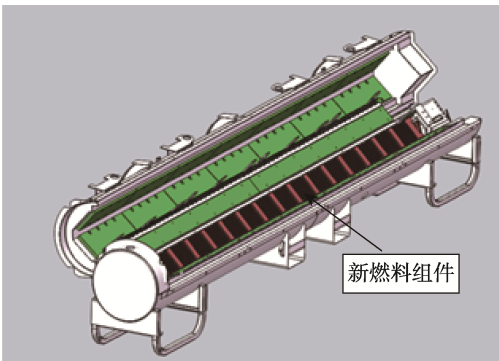
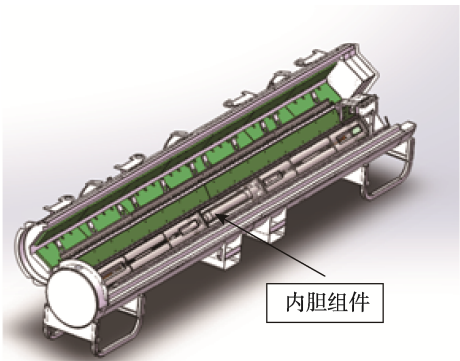


图 7 2 种内容物在 STC 容器中的位置示意
Fig.7 Positions of two different contents in STC cask

跌落分析是针对薄弱位置选择的跌落分析,确保容器的设计满足 GB 11806—2019 的要求。跌落分析采用 LS-DYNA 有限元方法进行动力学分析^[10-11],判断容器在各跌落姿态下能够保持闭合,并由分析结果确定最危险的跌落姿态进行试验。跌落试验是为证实计算的特定跌落角度的结构分析是正确的^[12-14]。通过外推法,未经试验的跌落角度的分析也是有效的^[15]。

自由下落试验(1.2 m)分析发现,9°小角度跌落时外壳的径向变形最大,对屏蔽分析的影响最大,同时考虑二次跌落的影响,选取9°小角度跌落姿态是最危险姿态^[16]。

贯穿试验(1 m 落棒)对容器损伤很小,因此选择容器外壳支撑薄弱环节进行试验。

运输事故条件能力考虑对次临界作用的保持,在自由下落试验 I(9 m)时,分析发现正向垂直跌落姿态下外壳、内壳和燃料组件的下管座损伤最大,燃料组件包壳受到的冲击最大。组件包壳完整性是验证是否次临界的关键指标,因此选择正向跌落作为最危险试验姿态。

自由下落试验 II(1 m 穿刺)分析发现,铰链跌落会导致外壳间隙增大,在后续耐热试验中增加热流

道,对慢化剂影响更大,因此姿态更危险,选择铰链跌落姿态进行 1 m 穿刺试验。

根据 3.2 节 2 种不同内容物的参数比对和跌落分析的验收准则,STC 容器运输内胆组件和新燃料组件 2 种不同内容物时可采用的同样的跌落分析姿态。

3.1 分析模型

建立新燃料运输容器的有限元模型,包括外壳、内壳部分,模型图参见图 8 和图 9。整个新燃料运输容器的有限元模型节点为 428 427 个、单元为 335 087 个。模型使用 SOLID164 和 SHELL163 单元建成,除部分刚性部件采用刚体材料模型*MAT020 外,其余主要采用分段线性弹塑性模型*MAT024 进行建模。

3.2 分析结果比对

1) 1.2 m 跌落,采用小角度 9°跌落姿态。STC 容器运输新燃料组件时,变形最大处为外壳加强筋,理论变形量为 49 mm;STC 容器运输内胆组件时,变形最大处为外壳加强筋,理论变形量为 46.7 mm。分析图参见图 10。



图 8 STC 容器有限元模型
Fig.8 FEA models for STC cask

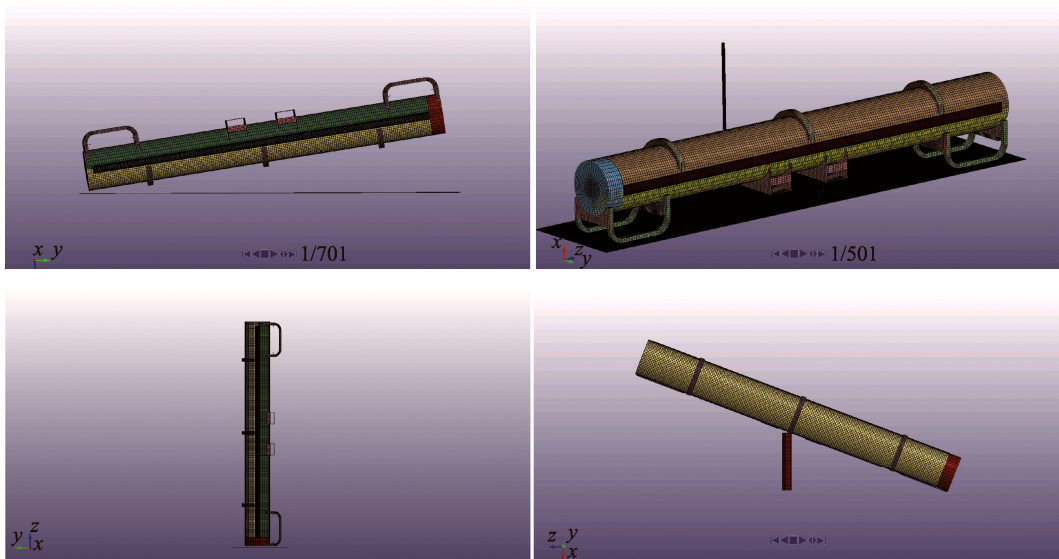


图 9 各跌落有限元模型
Fig.9 FEA models in different drop tests

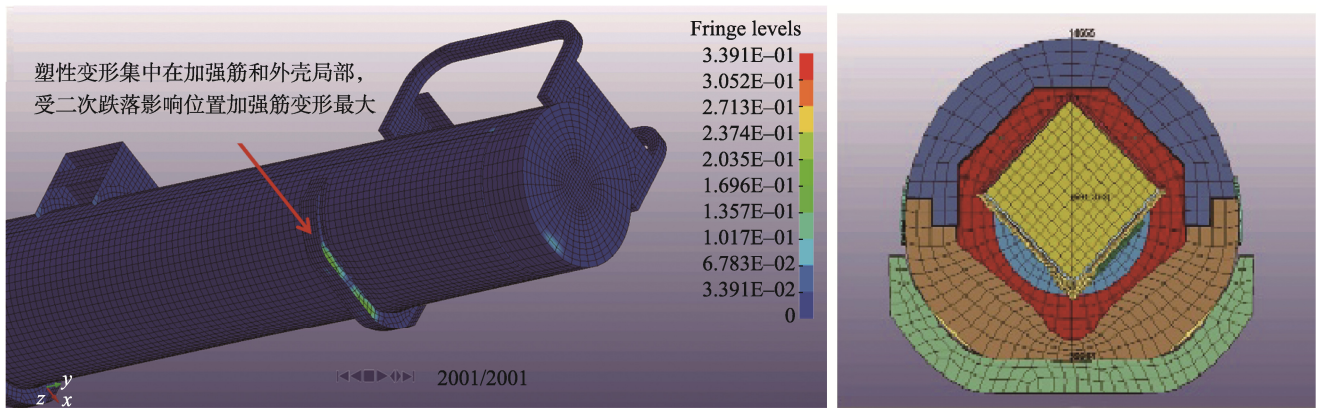


图 10 1.2 m 跌落分析结果
Fig.10 Analysis results of 1.2 m drop

STC 容器运输新燃料组件时,进行了 1.2 m 跌落试验,试验结果表明运输容器仍然能够保证结构完整性,未发生部件断裂或脱落,仅发生局部塑性变形。变形最大处为外壳加强筋,变形量小于理论变形量 (49 mm),试验图参见图 11。



图 11 1.2 m 跌落试验
Fig.11 Test of 1.2 m drop

2) 1 m 落棒。落棒垂直跌落到运输容器外壳无支承位置,结构与外壳有关,与内容物无关,因此运输 2 种组件的变形量一致。理论分析凹陷深度为 6 mm。分析图参见图 12。

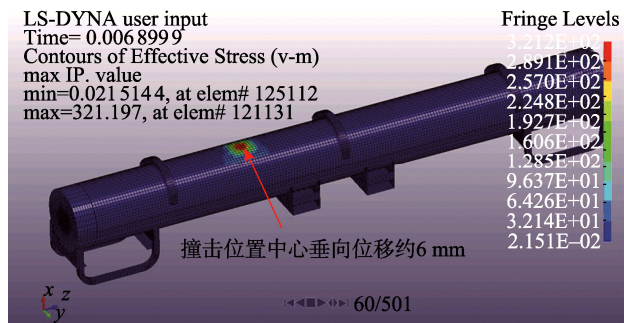


图 12 1 m 落棒跌落分析结果
Fig.12 Analysis results in 1 m rod drop

STC 容器运输新燃料组件时,进行了 1 m 落棒试验。试验结果表明凹陷深度小于 6 mm。分析图参见图 13。



图 13 1 m 落棒试验
Fig.13 Test of 1 m rod drop

3) 9 m 跌落,跌落姿态采取正向垂直跌落姿态。STC 容器运输新燃料组件时,封头轴向压缩最大变形量为 52 mm,燃料组件所承受的最大冲击力为 1.78 MN。STC 容器运输内胆组件时,封头轴向压缩最大变形量为 50.8 mm,内胆组件所承受的最大冲击力为 1.53 MN。分析图参见图 14。

2 种内容物跌落时,内壳组件均保持完整,中子吸收材料未见破损,燃料组件的活性区仍在容器内壳的中子吸收范围内。

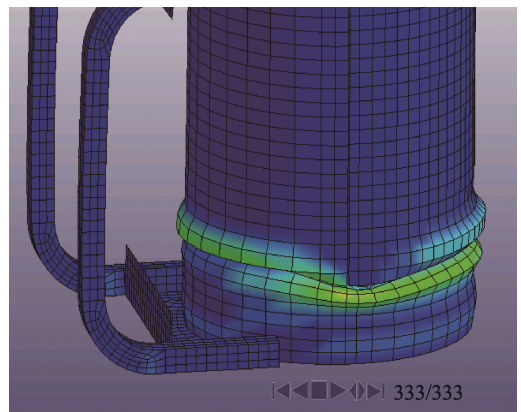


图 14 9 m 跌落分析结果
Fig.14 Analysis results of 9 m drop

STC 容器运输新燃料组件进行了 9 m 自由下落试验。试验结果显示,运输容器仍然能够保证结构完整性,未发生部件断裂或脱落,仅发生局部塑性变形。封头轴向压缩最大变形量未超过理论变形量(52 mm)。试验图参见图 15。



图 15 9 m 跌落试验
Fig.15 Test of 9 m drop

4) 穿刺试验,采取铰链角穿刺姿态。STC 容器运输新燃料组件时,分析显示撞击铰链部位凹坑深度为 67 mm; STC 容器运输内胆组件时,分析显示撞击铰链部位凹坑深度为 64.3 mm。分析图参见图 16。

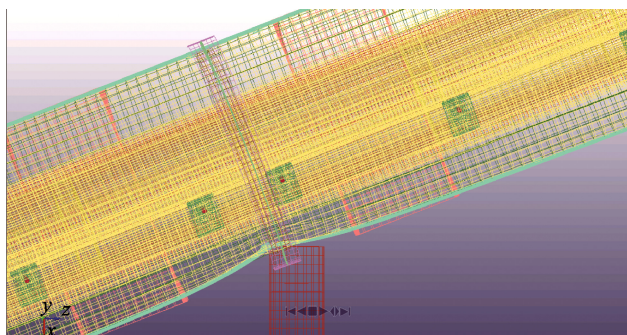


图 16 1 m 穿刺分析结果
Fig.16 Analysis results of 1 m puncture

STC 容器运输新燃料组件进行了 1 m 穿刺试验。试验结果显示,运输容器仍然能够保证结构完整性,未发生部件断裂或脱落,仅在撞击铰链部位发生局部塑性变形,凹坑深度小于理论分析变形量(67 mm)。试验图参见图 17。



图 17 1 m 穿刺试验
Fig.17 Test of 1 m puncture

跌落分析结果表明,在各种跌落工况下,STC 容器运输内胆组件时的变形量均不大于运输新燃料组件时的变形量,因此容器的屏蔽防护能力满足减弱不超过 20%的要求。同时结果也表明,STC 容器运输内胆组件的方案是满足跌落分析验收准则的。

4 结语

STC 容器在设计取证时,遵循法规条例,完成了各专业的理论分析,制造了样机并完成了容器功能试验以及满足 GB 11806—2019 要求的运输正常条件和运输事故条件下的验证试验。

本文通过设计内胆运输多个小型组件的跌落分析研究表明,STC 容器运输内胆装载多根小型组件的跌落结果是满足验收准则。该研究为其他燃料组件的运输提供了一种参考的方法,即采用成熟的容器进行运输跌落分析。通过设计内部结构匹配燃料组件和容器的方式,可有效提高设计效率,降低研制成本,为后续分析研究提供基础。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院. 第 562 号令 放射性物品运输安全管理条例[Z]. 2009.
State Council of the People's Republic of China. Decree. No.562 Regulations on the Safety of the Transportation of Radioactive Material[Z]. 2009
- [2] HAF 701—2010, 放射性物品运输安全许可管理办法[S].
HAF 701—2010, Measures for the Administration of Safety Permit of the Transportation of Radioactive Articles[S].
- [3] 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 Qian, ZHUANG Da-jie, SUN Hong-chao, et al. Overview of Application Status for Nuclear Fuel Assembly Transport Package[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(13): 142-150.
- [4] 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.
- [5] 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. Regular Evaluation and Experience Feedbacks for PWR Fuel Assembly Transport Containers in China[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(23): 105-110.

- [6] 林诚格. 非能动安全先进压水堆核电技术[M]. 北京: 原子能出版社, 2010.
LIN Cheng-ge. Passive Safe Advanced PWR Nuclear Power Technology[M]. Beijing: Atomic Press, 2010.
- [7] 梁双令, 吴婉烨. 海洋环境下浮动核电站堆内燃料组件结构安全分析[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(12): 2405-2412.
LIANG Shuang-ling, WU Wan-ye. Structural Safety Analysis of Fuel Assembly for Floating Nuclear Plant under Marine Environment[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(12): 2405-2412.
- [8] 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].
- [9] RYU S, CHUN J, PARK N, et al. Effect of Drop Orientation on Structural Integrity of a Shipping Container for Nuclear Fresh Fuel[J]. E3S Web of Conferences, 2020, 162: 03002.
- [10] 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 Verification of Transport Package of Radioactive Sources[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2019, 39(5): 582-586.
- [11] PETKEVICH P, ABRAMOV V, YUREMENKO V, et al. Simulation of the Nuclear Fuel Assembly Drop Test with LS-Dyna[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 269: 136-141.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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 Radioactive Material Transport Packages[J]. Radiation Protection, 2018, 38(5): 422-427.
- [15] 刘新华. 放射性物品安全运输概论[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
LIU Xin-hua. Introduction to Safe Transportation of Radioactive Materials[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [16] 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.

责任编辑: 曾钰婵