

乏燃料运输容器事故工况密封分析研究

刘广东

(中广核研究院有限公司, 广东 深圳 518031)

摘要: **目的** 为防止放射性物质泄漏, 要求乏燃料运输容器在事故工况下保证容器的密封。通过对乏燃料运输容器比例容器事故工况密封分析研究, 为乏燃料运输容器密封分析提供依据。**方法** 为验证假设事故工况乏燃料运输容器的密封性, 采用 LS-DYNA 分析软件, 开展乏燃料运输容器比例容器 9 m 跌落分析, 提取密封螺栓跌落过程中的载荷时程和密封面分离量, 并在比例容器跌落试验后开展气密性能试验。**结果** 跌落分析结果表明, 比例容器内、外盖在跌落过程中, 密封螺栓应力满足限值要求; 内、外盖密封面最大分离量小于密封结构有效回弹量。同时跌落后容器的气密性检查试验结果表明其密封性能良好。**结论** 乏燃料运输容器比例容器的跌落密封分析和气密性试验结果表明, 在事故工况下乏燃料运输容器货包能够保证密封要求, 该分析方法可用于乏燃料运输容器事故工况的密封分析。

关键词: 乏燃料运输容器; 比例容器; 跌落分析; 密封分析; 气密性试验

中图分类号: TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)17-0298-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.17.037

Analysis and Research on Sealing of Spent Fuel Transportation Cask under Accident Conditions

LIU Guang-dong

(China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518031, China)

ABSTRACT: The work aims to seal the spent fuel transportation cask under accident conditions in order to prevent the leakage of radioactivity materials and provide basis for the sealing analysis of the spent fuel transportation through the analysis and research on sealing of scale model of the spent fuel transportation cask under the accident conditions. To verify the sealing performance of the spent fuel transportation cask under hypothetical accident conditions, the 9 m drop analysis was carried out to the scale model of the spent fuel transportation cask under accident conditions by the LS-DYNA computer program. Then, the load history of sealing bolts and the separation of sealing surface during the drop process were extracted. Meanwhile, the sealing capability test was carried out after the drop test. The results of drop analysis indicated that the stress of the sealing bolts met the limit requirements during the drop process of inner and outer covers of scale model, and the maximum separation of sealing surfaces of inner and outer covers was less than the effective rebound of sealing structure. The air tightness test conducted after the drop test showed that the sealing performance was good. According to the results of drop sealing analysis and the air tightness test of scale model of spent fuel transportation cask, the spent fuel transportation cask can meet the sealing requirements under accident conditions and the method can be used for the sealing analysis of the spent fuel transportation cask under accident conditions.

KEY WORDS: spent fuel transportation cask; scale model; drop analysis; sealing analysis; air tightness test

乏燃料运输容器是运输包装乏燃料的屏蔽密封容器。由于乏燃料是一种具有较强放射性的特殊物质,为了把与放射性物质运输有关的人员、财产和环境受到的辐射危害、临界危害和热危害控制在可接受的水平,国际原子能机构和世界各国颁布了相关的条例,对放射性物质运输及设计提出严格的防护要求。为防止放射性物质泄漏,要求货包密封结构安全可靠,即在正常运输及运输事故条件下保证货包的密封性。

按 IAEA TS-R-1-2009^[1]和 GB 11806—2019^[2]相关规定,根据放射性内容物的特性、活度水平、比活度和运输方式对货包进行分类,乏燃料运输容器货包为 B(U)型货包。在正常运输条件下,能使放射性内容物的泄漏限制在每小时不大于 $10^{-6}A_2$,在经受运输事故条件试验(9 m 跌落、1 m 贯穿、耐热以及水浸没试验)后,能使 1 周内放射性内容物的累积漏失对 ^{85}Kr 限制在不大于 $10A_2$ 和对所有其他的放射性核素限制在不大于 A_2 。 A_2 为表征不同放射性材料放射性活度的参数,代表了某个核素在容器中可允许装载的最大放射性活度。根据产品的最大放射性活度值,参考放射性物质安全运输货包的泄漏检验^[3]进行源项估算,并考虑一定的安全裕度,正常运输条件下容许氦气标准化泄漏率为 $2 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

设计阶段,在容器制造完工后进行泄漏率验证试验^[4-8],利用氦质谱仪探测器进行检测,试验结果低于正常运输条件的泄漏率限值要求。由于 9 m 自由跌落冲击对结构最不利,为证明运输容器在事故工况下的密封性能,本文开展事故跌落工况下的密封性研究。试验验证是最直接的手段,可以获得全面可靠的数据,但开展乏燃料运输容器跌落试验成本昂贵,通常采用比例容器进行跌落试验,但是在比例模化中,密封圈尺寸和性能不符合比例模化条件,比例容器的密封检漏试验不能来量化全尺寸产品的泄漏率。因此需要开展比例容器跌落试验,并与有限元分析相结合,验证运输容器比例容器事故条件下是否能够保证密封要求,该分析方法可用于乏燃料运输容器事故工况的密封分析。

1 密封结构描述

乏燃料运输比例容器设置内盖密封和外盖密封,内盖密封圈设计为双 C 形金属密封圈,外盖密封圈设计为单道 C 形金属密封圈,可为运输容器提供冗余的密封功能,密封结构示意图如图 1 所示。

顶部锻件的内径圆周呈凹陷缘状,内盖能完全嵌入顶端锻件与凸缘吻合,并通过 42 个材质为 GH4169 的螺栓紧固在凸缘上。外盖通过 36 个材质为 GH4169 的螺栓紧固在顶端锻件的端面。内、外盖下侧面上有密封圈凹槽,该凹槽用来装配密封圈。

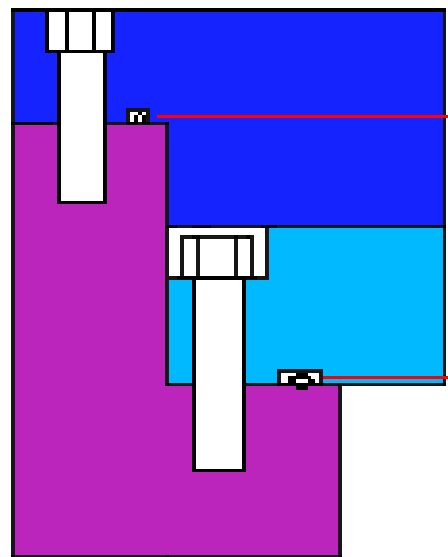


图 1 运输容器密封结构
Fig.1 Sealing structure of the transportation cask

C 形密封环的密封特性曲线如图 2 所示,其工作原理:通过螺栓预紧力来压紧内、外盖板和顶部锻件之间的密封环,使其产生压缩变形并与螺旋弹簧贴紧,依靠螺旋弹簧获得良好的回弹量和密封比压,包敷的密封银层可以填补密封面的微观不平,从而获得良好的密封效果。当盖板与顶部锻件密封面发生轴向分离时,被压缩的密封环就能产生足够的回弹量进行补偿并产生密封比压,保证运输容器具有良好的密封性能,达到良好的密封效果。图 2 中各物理量含义: Y_0 为达到初始密封状态时,密封环所需单位长度上的紧固载荷; Y_1 为从压缩状态 e_2 处卸载至密封失效时,密封环单位长度上的紧固载荷; Y_2 为保持密封且对应于压缩状态 e_2 时,密封环单位长度上的紧固载荷; e_0 为达到初始密封状态时,对应密封环的压缩量; e_1 为从压缩状态 e_2 处卸载至密封失效时,对应密封环的压缩量; e_2 为保持密封状态时,对应密封环的理论工作点压缩量。

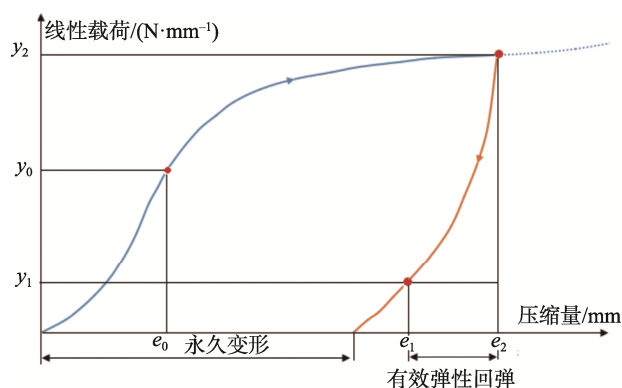
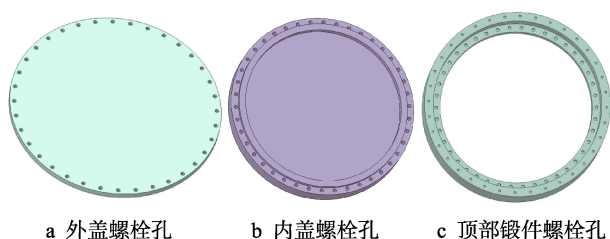


图 2 密封环载荷-位移特性曲线
Fig.2 Load-displacement characteristic curve of sealing ring

2 计算模型

2.1 模型简化

根据乏燃料运输比例容器设计图册,减震器采用螺栓固定于容器外盖及底板上,在分析过程中对其进行简化,将上、下减震器分别与容器外盖及底板进行绑定。根据吊篮与容器间隙设计,在容器内部使用等质量的圆柱体(外径与吊篮相同,圆柱体的质量为吊篮及燃料组件质量之和)对吊篮及燃料组件进行等效。内、外筒体间的铅层,容器内部的等效圆柱体,上、下中子屏蔽层与筒体四周设置接触。将最外层的中子屏蔽层质量附加于外筒体上^[9]。为模拟跌落过程中螺栓预紧力的变化,需建立螺栓模型,内、外盖和顶部锻件螺栓孔如图3所示。



a 外盖螺栓孔 b 内盖螺栓孔 c 顶部锻件螺栓孔

图3 螺栓孔位置图
Fig.3 Location of bolt holes

为便于螺栓与螺栓孔的连接和螺栓预紧力的加载,螺栓用梁单元等效,建立对应的线并赋予对应螺栓直径。螺栓(梁单元)与螺栓孔(实体单元)的连接,如图4所示。

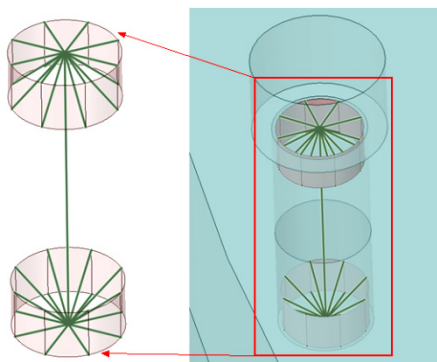


图4 螺栓与螺栓孔连接模型
Fig.4 Connection model between bolt and bolt hole

2.2 材料模型与参数

根据乏燃料运输比例容器各组件质量及简化后模型各组件体积,计算得到各组件材料密度。在跌落计算过程中,将筒体设置为弹性体,使用的材料模型为*MAT_ELASTIC,地面和螺栓连接杆使用刚性材料模型*MAT_RIGID;内、外盖螺栓使用点焊梁材料

模型*MAT_SPOTWELD。

筒体根据选材,从标准中查取相应材料参数。考虑到跌落计算中减震器会发生较大变形,计算过程中减震器木材及包壳使用的材料模型为弹塑性模型*MAT_MODIFIED_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY。减震器材料为轻木和杉木,其材料性能曲线如图5—6所示。

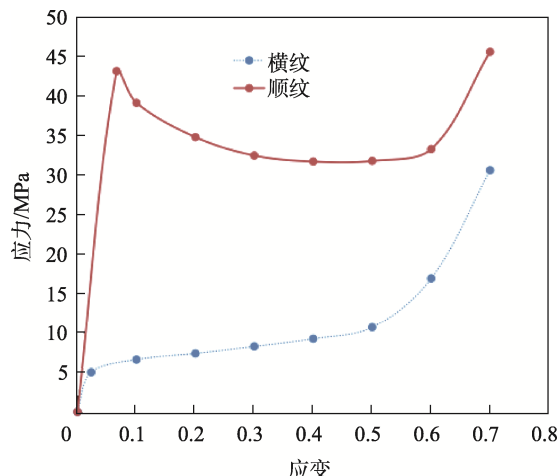


图5 杉木顺纹、横纹方向应力应变曲线
Fig.5 Stress-strain curves of China fir along rift grain and transverse grain

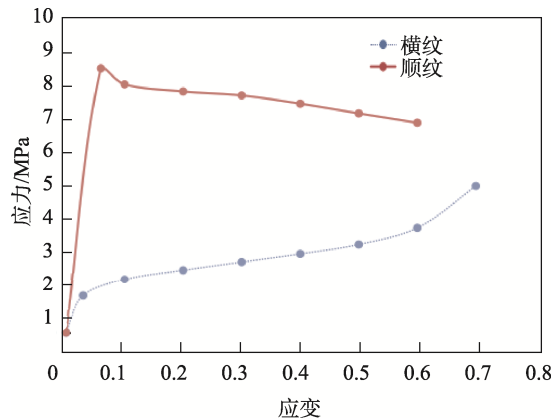


图6 轻木顺纹、横纹方向应力应变曲线
Fig.6 Stress-strain curves of blasa wood along rift grain and transverse grain

2.3 有限元模型

减震器包壳采用壳单元,螺栓采用梁单元,对应连接面采用壳单元并与梁单元共节点,地面采用壳单元,其余采用六面体实体单元。乏燃料运输比例容器跌落分析有限元模型如图7所示。

2.4 初始条件输入

根据密封圈性能曲线中的 Y_2 值、水压试验压力等参数,计算保障密封性的螺栓预紧力。内盖螺栓预紧力为4 489 964 N,共42个螺栓,每个内盖螺栓的

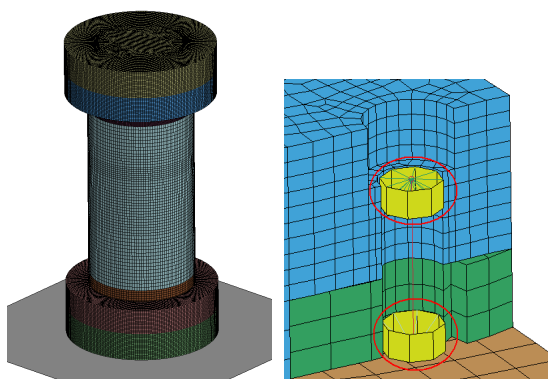


图 7 乏燃料运输比例容器(带减震器)

有限元分析模型

Fig.7 Finite element model of the scale cask for spent fuel transportation with the impact limiter

预紧力为 106 904 N;外盖螺栓预紧力为 3 545 262 N,共 36 个螺栓,每个外盖螺栓的预紧力为 98 480 N。通过动力松弛的方式加载螺栓预紧力,在跌落分析开始前就把预紧力加载到螺栓上,并且在整个跌落过程中都考虑螺栓预紧力的影响。在建模时,已为对应的内、外盖螺栓线模型分别赋予圆形截面形成梁模型来等效实际的螺栓模型,在螺栓预紧力加载时只需要对梁模型(Beam 单元)施加预拉力即可。

跌落分析初始条件输入还包含初速度、重力、容器内压以及地面的固定。为节省计算时间,将筒体与地面之间的距离设置为 10 mm,对筒体施加 13.3 m/s 的初速度以模拟 9 m 的跌落高度。

3 密封分析

3.1 跌落密封数值计算

考虑到跌落姿态的随机性,需要开展竖直跌落、侧跌、角跌分析^[10-15],根据跌落分析结果选择严酷的角度开展角跌试验、竖直跌落试验、侧跌试验和穿刺试验。不同姿态的跌落分析和跌落试验方法相同,本文以 9 m 竖直跌落为例,开展乏燃料运输比例容器跌落过程中的密封性分析和跌落后的气密性试验。

跌落分析计算完成后,提取容器的加速度时程曲线,如图 8 所示。由图 8 可知,容器在跌落过程中受到的最大冲击加速度为 651 m/s²,且受到最大冲击加速度的时间为 0.028 s,因此提取 0.1 s 前的跌落计算结果开展密封分析具有包容性。

提取各个螺栓的轴力时程曲线,通过比较,内盖螺栓中,轴力变化最大的螺栓轴力时程曲线如图 9 所示。由图 9 可知,在跌落开始时,将 106 904 N 预紧力加载到对应的内盖螺栓上,内盖螺栓轴力在跌落过程中的最大值为 114 210 N,最小值为 93 684 N。在

外盖螺栓中,轴力变化最大的螺栓轴力时程曲线如图 10 所示。由图 10 可知,外盖螺栓轴力在跌落过程中最大值为 120 240 N,最小值为 88 417 N。根据螺栓的应力截面积和轴力可计算得到螺栓的应力,计算结果显示螺栓的应力小于其许用应力。

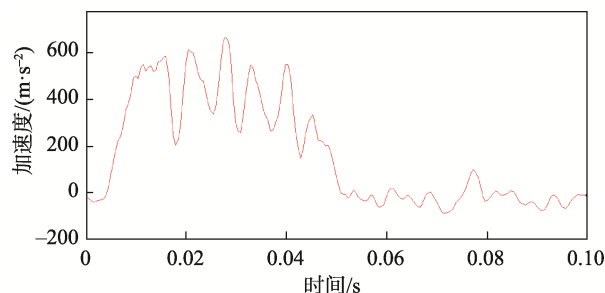


图 8 容器的加速度时程曲线

Fig.8 Acceleration-time curve of the cask

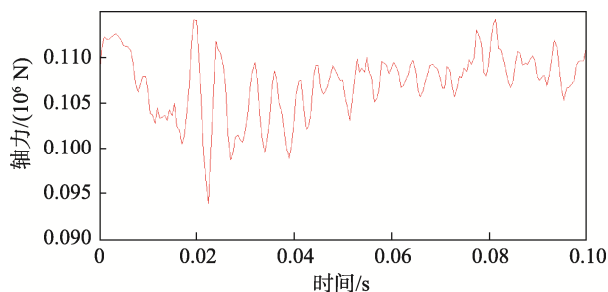


图 9 容器内盖螺栓轴力时程曲线

Fig.9 Axial force-time curve of bolt for inner cover

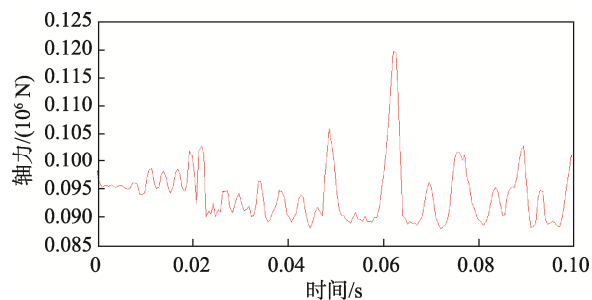


图 10 容器外盖螺栓轴力时程曲线

Fig.10 Axial force-time curve of bolt for outer cover

在密封面上、下面 8 个位置,提取各个节点的位移曲线,计算密封面对应位置上、下面节点的位移差,即为密封面的位移。内盖密封面位移曲线(即内盖与顶部锻件接触面相对位移曲线)如图 11 所示,在跌落过程中,内盖与顶部锻件接触面轴向分离量的最大值为 0.003 457 1 mm。容器下密封面位移曲线(即外盖与顶部锻件接触面相对位移曲线)如图 12 所示,在跌落过程中,外盖与顶部锻件接触面轴向分离量的最大值为 0.018 239 mm。内、外盖密封面在跌落过程中的位移远小于密封结构的有效回弹量,密封结构满足密封性能要求。

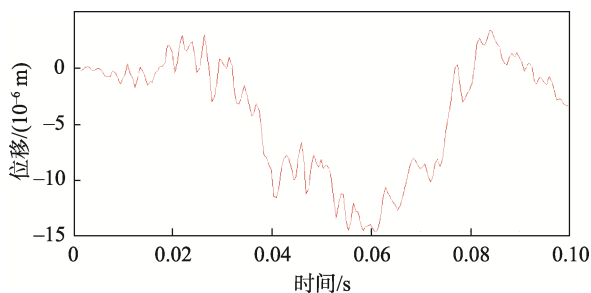


图 11 容器上密封面位移曲线

Fig.11 Displacement curve of upper sealing surface

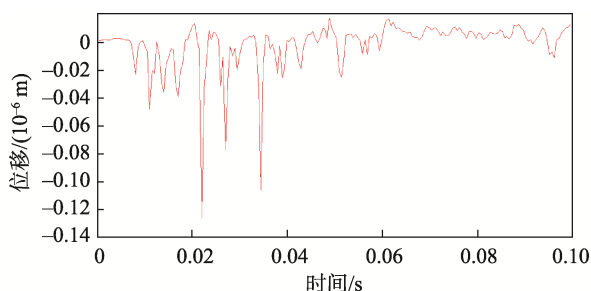


图 12 容器下密封面位移曲线

Fig.12 Displacement curve of lower sealing surface

3.2 跌落试验后气密性试验验证

各姿态跌落试验后,通过检查发现,容器盖、与之配合的密封面、密封螺栓从外观观测未见明显变形和损伤,螺栓尺寸正常,无永久变形。各姿态跌落试验后检查结果表明,容器盖、与之配合的密封面和密封螺栓结构完好。由容器制造完工后进行泄漏率试验可知,试验结果低于正常运输工况泄漏率限值,并且事故工况的泄漏率限值被正常运输工况泄漏率限值包络,证明容器密封结构在事故工况后能满足密封性要求。

为进一步验证密封结构是否满足密封性能,容器在跌落试验以及击穿试验前、后分别充压至 0.8 MPa,并维持 10 min 后进行内压测量。测量数据显示容器在进行跌落和穿刺试验后压力值未降低,表明事故工况后密封结构具有良好的保压能力。由于跌落试验场地不具备氦检漏试验条件,跌落试验后未开展泄漏率测试。工程实际中通常在比例容器制造完工后进行泄漏率试验,结合比例容器的有限元密封分析以及比例容器跌落试验后的气密性试验,证明了密封结构的可靠性。

4 结语

通过开展乏燃料运输容器比例容器的跌落密封分析和跌落试验后的气密性试验,验证在事故工况下乏燃料运输容器比例容器密封结构是否能够保证密

封性要求,具体结论如下:

1) 事故工况跌落分析结果表明,比例容器内、外盖在跌落过程中,密封螺栓应力满足限值要求;内、外盖密封面轴向最大分离量小于密封结构有效回弹量;密封结构在事故工况下能满足密封性要求。

2) 各姿态跌落试验后检查表明,容器内外盖及与之配合的密封面、密封螺栓从外观观测未见明显变形和损伤,螺栓尺寸正常,密封结构完好。结合容器制造完工后进行泄漏率试验的结果低于正常运输工况下的泄漏率,并且事故工况的泄漏率被正常运输工况的泄漏率包络,验证了容器密封结构在事故工况后能满足密封要求。

3) 在 9 m 跌落试验和 1 m 击穿试验前后对容器开展充压和保压测试,测试结果显示其压力值未降低,进一步验证了密封结构在事故工况后密封性能良好。

综上,该分析方法可用于乏燃料运输容器事故跌落工况的密封分析。

参考文献:

- [1] IAEA, Safety Standard Series No.TS-R-1. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material[M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009.
- [2] GB 11806—2019, 放射性物质安全运输规程[S]. GB 11806—2019, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material[S].
- [3] GB/T 17230—1998, 放射性物质安全运输货包的泄漏检验[S]. GB/T 17230—1998, Safe transport of radioactive material Leakage Testing on Packages[S].
- [4] ANSI N14.5—1997, Leakage Test on Packages For Shipment[S].
- [5] 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 Guo-qiang, WANG Xue-xin, ZHAO Bing. American Test Technology for the Transport of Radioactive Packages[J]. Radiation Protection, 2008, 28(5): 329-334.
- [6] 韩琰,刘兴悦,闫荣鑫,等. 典型双密封结构泄漏机理研究[J]. 真空, 2015, 52(6): 27-33. HAN Yan, LIU Xing-yue, YAN Rong-xin, et al. Research on Leakage Mechanism of Double Sealed Structure[J]. Vacuum, 2015, 52(6): 27-33.
- [7] 李娜,张思才,徐伟芳,等. 抗事故包装箱密封结构性能研究[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 1-5. LI Na, ZHANG Si-cai, XU Wei-fang, et al. Seal Struc-

- ture Performance of Accident-Resistant Packaging Container[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 1-5.
- [8] 李娜, 张青平, 张思才, 等. 放射性物品 C 型货包密封结构设计及性能研究[J]. 包装工程, 2020, 41(1): 180-185.
- LI Na, ZHANG Qing-ping, ZHANG Si-cai, et al. Sealing Structural Design and Performance of Radioactive Material Type C Packages[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(1): 180-185.
- [9] 刘广东, 吴维亮, 朱贺, 等. 事故工况下乏燃料运输容器跌落分析[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 31-34.
- LIU Guang-dong, WU Wei-liang, ZHU He, et al. Drop Analysis of the Spent Nuclear Fuel Transport Cask under Accident Conditions[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 31-34.
- [10] 李海龙, 孙造占, 孙树海, 等. 放射性物质运输容器的跌落冲击分析方法[J]. 核技术, 2013, 36(4): 340-343.
- LI Hai-long, SUN Zao-zhan, SUN Shu-hai, et al. Drop Impact Analysis Method of Radioactive Material Container[J]. Nuclear Techniques, 2013, 36(4): 340-343.
- [11] NAC International. NAC-STC NAC storage Transport Cask Safety Analysis Report[R]. Georgia: NAC International, 2011.
- [12] ENSA. Safety Analysis Report for the Spent Fuel Transportation Package ENUN 24P[R]. Spain: ENSA, 2015.
- [13] 徐超. 基于安全分析的乏燃料运输容器关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- XU Chao. Key Technology Research of Spent Nuclear Fuel Transportation Cask Based on Safety Analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [14] NUREG/CR-6007, Stress Analysis of Closure Bolts for Shipping Casks[S].
- [15] SHAPPERT L B. A Guide for the Design, Fabrication, and Operation of Shipping Casks for Nuclear Applications[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1970.

责任编辑: 曾钰婵