

二氧化铀粉末运输容器假想跌落事故下的安全设计与试验验证

张振雨^{1,2}, 陈孟¹, 庄小东², 沈光耀¹, 邵长磊¹, 沈勇坚¹, 陈秀明¹, 袁广银²
(1.上海核工程研究设计院有限公司, 上海 200233; 2.上海交通大学, 上海 200240)

摘要: **目的** 设计易裂变二氧化铀粉末运输容器, 证明容器在最危险姿态下, 可以满足9 m跌落的核临界、屏蔽安全和放射性物质包容相关设计准则。**方法** 设计外柔内刚的三层密封容器, 内外壳之间填充聚氨酯减振吸能材料, 建模分析容器多种姿态下的结构与功能材料动态响应, 确定最危险跌落姿态。针对最危险工况开展实际跌落测试试验, 证明容器在假想事故下的安全性。**结果** 容器在最危险跌落工况下, 聚氨酯材料减振吸能效果与设计计算相符, 中子吸收板、中子慢化板等功能材料位置和缺损量符合要求。二氧化铀粉末的密封性得以保障。**结论** 以有限元分析为基础的容器仿真分析与样机试验结果匹配度较高, 试验样机通过了相关跌落试验, 证明了容器在危险姿态下的9 m跌落安全性能。

关键词: 放射性物品运输; 跌落试验; 二氧化铀粉末; 跌落动力学

中图分类号: TB485.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)01-0273-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.01.032

Safety Design and Test Verification of Uranium Dioxide Powder Transport Container under Imaginary Drop Accident

ZHANG Zhenyu^{1,2}, CHEN Meng², ZHUANG Xiaodong², SHEN Guangyao¹,
SHAO Changlei¹, SHEN Yongjian¹, CHEN Xiuming¹, YUAN Guangyin²

(1. Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200233, China;
2. Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: The work aims to design a transport container for fissionable uranium dioxide powder and prove that the container can meet the design criteria of nuclear criticality, shielding safety and radioactive material containment under a 9 m drop in the most dangerous posture. A three-layer sealed container that was flexible on the outside and rigid on the inside was designed, the vibration-reducing and energy-absorbing polyurethane materials were filled between the inner and outer shells, the dynamic response of the structure and functional materials of the container under various postures was established and analyzed, and the most dangerous dropping posture was determined. An actual drop test was carried out for the most dangerous working conditions to prove the safety of the container under imaginary accidents. Under the most dangerous dropping condition of the container, the vibration-reducing and energy-absorbing effect of polyurethane materials was consistent with the design calculation, and the position and defect amount of functional materials such as neutron absorption plate and neutron moderator plate met the requirements. The tightness of uranium dioxide powder was guaranteed. The container simulation analysis based on finite element analysis has a high matching degree with the

prototype test results. The prototype has passed the relevant drop test, proving the safety performance of the container in a dangerous posture under a 9 meter drop.

KEY WORDS: radioactive material transport; drop test; uranium dioxide powder; drop dynamics

二氧化铀属于带辐射、易裂变危险品,一旦发生运输事故,将会造成核爆炸、放射性污染、核材料外泄等重大事故,故国内外对二氧化铀粉末的运输安全性尤为关注。

二氧化铀粉末具有放射性且颗粒度小,因而跌落等事故工况下的密封和保护是运输容器研发的难点。通常可考虑在容器中增加跌落缓冲措施以达到防冲的目的。

上海核工程研究设计院开发的 STC-NF1A 新燃料运输容器采用了聚氨酯减振器,该减振器外壳包附了一层不锈钢外壳,安装在新燃料运输容器内部;法国 ENSA 公司开发的 ENUN 32 乏燃料运输容器采用了蜂窝铝和聚氨酯复合型减振器,减振器采用外部聚氨酯,内部泡沫铝的双层结构,可以有效保证大吨位乏燃料跌落的安全性;中核二院开发的 RY-1A 型乏燃料运输容器采用木头作为减振器填充材料,也能保证大吨位下运输容器的跌落安全。

目前,二氧化铀运输容器的相关研究较少,公开文献中也未见二氧化铀容器减振器的详细内容。本研究提出一种二氧化铀运输容器的结构,重点选取二氧化铀运输容器 9 m 跌落事故进行分析,从聚氨酯减振结构设计、跌落动力学仿真、最危险姿态选取和样机跌落试验测试的角度进行介绍。相关研究对国内外放射性物品运输领域的工作有一定的借鉴作用。

1 容器结构与跌落验证方法

1.1 结构概述

容器设计有外壳、内壳和粉末桶的三层结构,各层之间均有密封,相关结构见图 1。其中内外壳之间填充聚氨酯,主要用于承受跌落工况下的吸能。运输容器内壳起到跌落下支撑粉末桶周围空间的作用,内部安装有中子吸收板和中子慢化板,用于控制事故下的临界和屏蔽安全。同时运输容器内部安装有慢化剂板等非金属材料,在正常运输工况和事故运输工况条件下起到保护内容物的功能。

1.2 跌落验证方法

根据 GB 11806 要求,容器研发需采用最危险工况进行 9 m 跌落的实际试验,但是标准并没有介绍最危险工况的确定方法。由于容器造价较高,采用多个试验样机分别进行跌落是不经济的。本研究采用有限元方法进行动力学分析,判断容器在各种典型跌落姿态下的宏观变形、冲击加速度和应变情况,

综合确定容器的最危险跌落姿态。进一步采用最危险跌落姿态进行样机实际的试验,比对理论分析值和实际测试值的差别,进而证明容器最危险跌落姿态下的安全性。

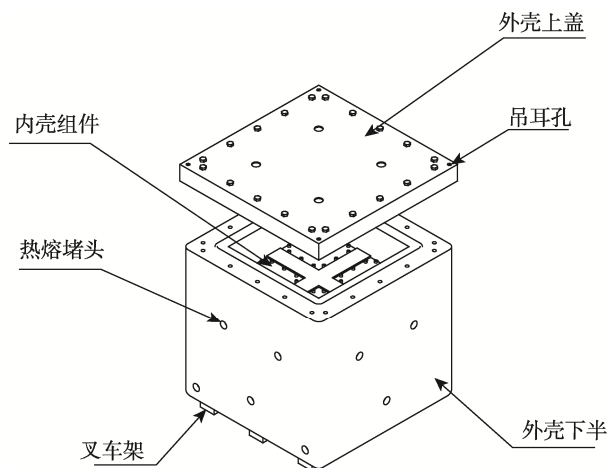


图 1 二氧化铀粉末运输容器简图
Fig.1 Schematic diagram of uranium dioxide powder transport container

2 基于跌落动力学仿真方法的最危险工况确认

2.1 分析方法介绍

使用 ANSYS 和 LS-PrePost 的前处理功能建立二氧化铀粉末运输容器的有限元模型,包括外壳、内壳和试验撞击目标刚性面 3 个部分,如图 2 所示。对二氧化铀粉末运输容器划分薄壳单元和实体单元。

分析中采用了弹性本构模型假设,不锈钢包壳采用分段线性动态硬化本构模型,聚氨酯泡沫采用泡沫材料本构,三元乙丙橡胶采用橡胶材料本构。运输容器外壳与外壳盖通过连接螺栓进行连接,内壳筒体与内壳盖也通过连接螺栓进行连接,连接螺栓使用关键字为*CONSTRAINED_NODE_SET 的方式进行模拟。确定底面垂直跌落等 8 种具体姿态进行分析。

2.2 分析结果

容器外壳的宏观变形将对容器的屏蔽和密封产生影响。通过有限元分析,将各跌落姿态下的二氧化铀粉末运输容器 9 m 跌落冲击响应时间、最大塑性应变和材料断后伸长率计算结果列于表 1。

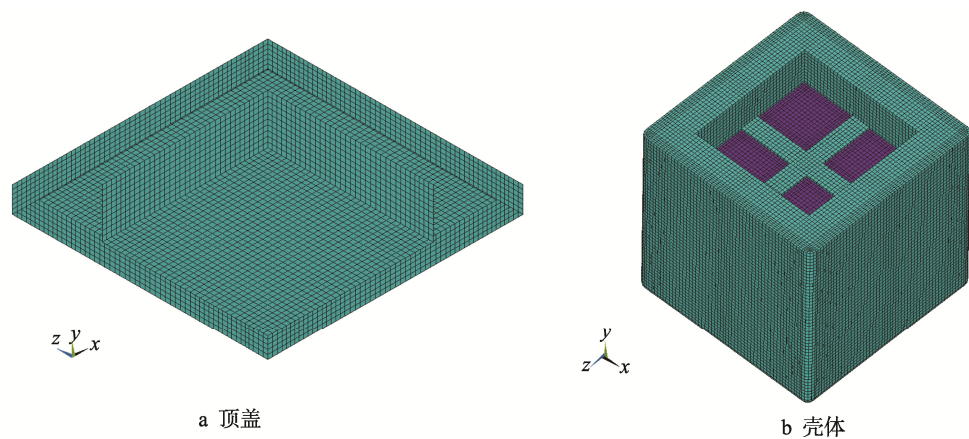


图 2 运输容器顶盖与壳体有限元模型
Fig.2 Finite element model of the transport container cover and shell

表 1 运输容器各跌落姿态下的形变结果汇总

Tab.1 Summary of deformation results of transport container under each dropping posture				
工况	姿态	跌落时间/s	外壳不锈钢最大塑性应变	材料断后伸长率
自由下落 试验 I	底面垂直跌落	0.011	0.215	0.4
	顶面垂直跌落	0.005	0.152	0.4
	侧面水平跌落	0.011	0.211	0.4
	底边倾斜跌落	0.023	0.352	0.4
	侧边倾斜跌落	0.028	0.356 (外壳)、0.741 (上盖)	0.4
	顶边倾斜跌落	0.014	0.264	0.4
	底角跌落	0.037	0.592	0.4
	顶角跌落	0.031	0.554 (外壳)、0.609(上盖)	0.4

根据分析结果,二氧化铈粉末运输容器在侧边倾斜跌落、底角跌落和顶角跌落姿态下的塑性应变较大,分别达到 0.741、0.592 和 0.609。其中侧边倾斜跌落姿态下,由于上盖侧边未与外壳侧边完全贴合,因此未贴合的部分壳体发生了较大的局部变形;底角跌落和顶角跌落姿态下外壳和上盖壳体发生了较大的局部变形。从最大塑性应变结果来看,二氧化铈粉末运输容器在所有跌落姿态下的最大塑性应变结果均在失效应变范围内,仅有侧边倾斜跌落和顶角跌落的上盖局部区域的塑性应变超过了失效应变的范围,局部区域可能发生局部结构失效,但区域很小。从结构来看,上盖为方形,而外壳的边缘处倒圆角,侧边倾斜跌落和顶角跌落时均为上盖凸出来的部分位置最先承受冲击载荷,因此造成此处的变形较大。

二氧化铈粉末运输容器外壳聚氨酯泡沫在各跌落姿态下原厚度及变化后的厚度见表 2。根据分析结果,底角跌落后聚氨酯泡沫的厚度最小,最小厚度约为 38 mm,仍能满足屏蔽要求。

二氧化铈粉末运输容器内壳的变相量将对容器的密封性能产生影响,通过有限元分析,容器在各跌落姿态下塑性应变结果见表 3。其中顶面垂直跌落的应变值最大,为 0.002 4。

表 2 运输容器外壳聚氨酯泡沫厚度变化结果汇总

Tab.2 Summary of variation results of polyurethane foam thickness for the container shell				
工况	姿态	变化位置	原厚度/mm	跌落后的厚度/mm
自由下落 试验 I	底面垂直跌落	底面	245	168
	顶面垂直跌落	顶面	200	162
	侧面水平跌落	侧面	168	88
	底边倾斜跌落	底边	245	107
	侧边倾斜跌落	侧边	168	70
	顶边倾斜跌落	顶边	168	142
	底角跌落	底角	245	38
	顶角跌落	顶角	168	47

表 3 运输容器内壳最大塑性应变结果汇总
Tab.3 Summary of plastic strain results of inner shell of transport container

工况	姿态	塑性应变
自由下落 试验 I	底面垂直跌落	0.000 5
	顶面垂直跌落	0.002 4
	侧面水平跌落	0.000 9
	底边倾斜跌落	0.001 4
	侧边倾斜跌落	0.001 2
	顶边倾斜跌落	0.002 3
	底角跌落	0.001 3
	顶角跌落	0.001 5

顶面垂直跌落状态下内壳的最大整体刚体加速度时程见图 3, 最大加速度为 $618g$ 。通过与其他姿态下整体刚体加速度时程曲线的比较可得, 该姿态下内壳的整体刚体加速度最大。结合前序分析, 确定为容器的最危险试验姿态, 执行后续实际试验。

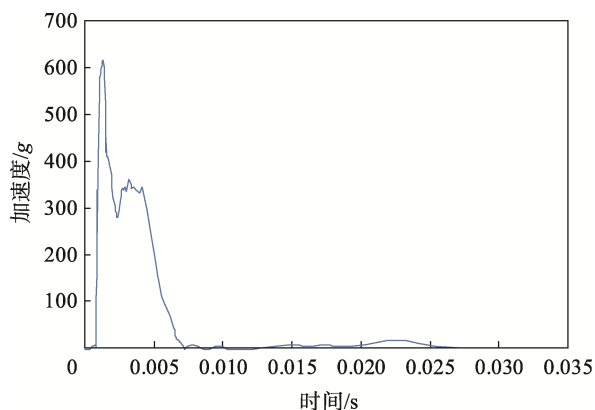


图 3 顶面垂直跌落内壳的整体刚体加速度时程

Fig.3 Overall rigid body acceleration of inner shell under vertical dropping of top surface

3 试验设计与实施

3.1 传感器布置

为获得自由下落试验中部分位置处的试验数据, 以便后续的比对和分析。本次试验将在试验容器的内、外布置一定数量的测点。除永久变形外, 加速度和应变需要布置专门的加速度传感器和应变片进行测量。加速度传感器相关测点总计 7 个 (其中 7 号为三向传感器, 三向标记为 A7X、A7Y 和 AYZ)。应变片相关测点总计 6 个 (其中 S6 在正面

和侧面分别布置了传感器, 记为 S6-0°和 S6-90°)。测点布置见图 4 与图 5。

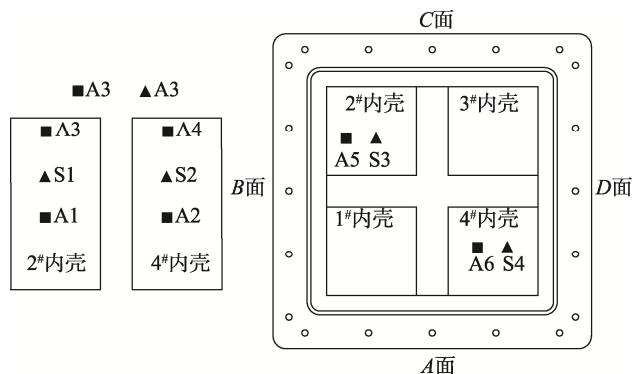


图 4 传感器布置示意图 1

Fig.4 Schematic diagram of sensor layout 1

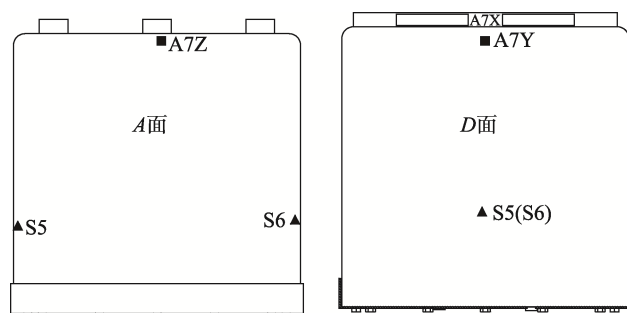


图 5 传感器布置示意图 2

Fig.5 Schematic diagram of sensor layout 2

3.3 试验实施比对

测量与比对结果与分析结果比对如下。

在宏观变形量方面, 图 6 显示了实际试验后的结果, 其中样机上盖产生了外突变形, 最大变形量为 3 mm, 器核心功能部件完整, 未出现二氧化铈模拟粉末泄漏的迹象。与图 7 和图 8 对比可知, 实际样机试验与有限元分析模型分析的变形趋势相符。



图 6 样机 9 m 跌落试验结果

Fig.6 Test results of prototype under a 9 m drop

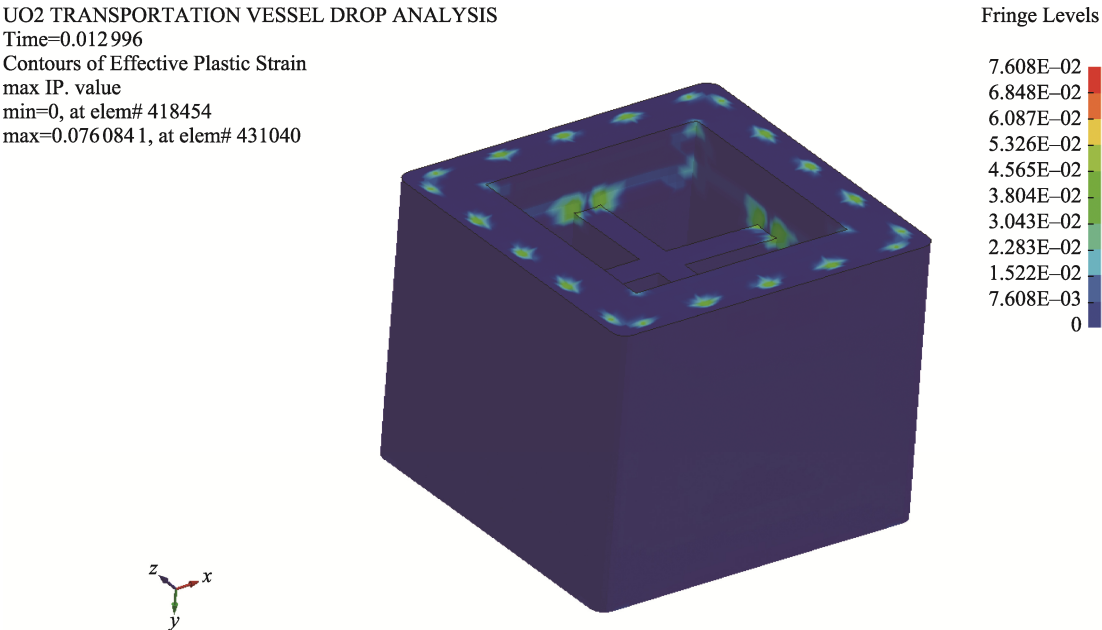


图 7 有限元分析示意图 1
Fig.7 Schematic diagram of finite element analysis 1

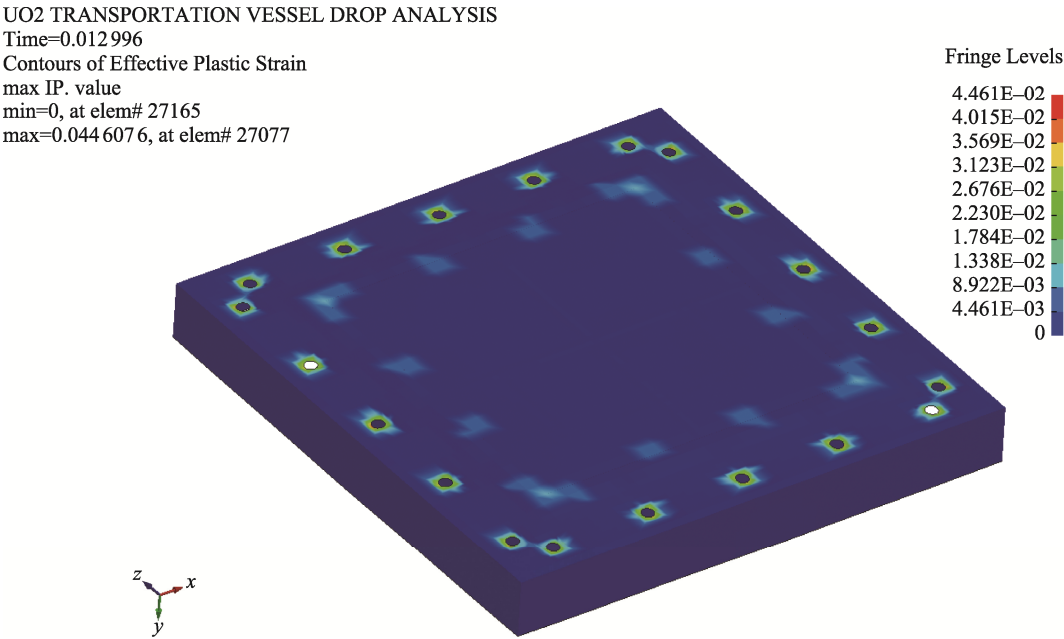


图 8 有限元分析示意图 2
Fig.8 Schematic diagram of finite element analysis 2

在加速度测量方面, 试验过程中 A2/A5/A6 加速度传感器出现故障, 显示异常, 剔除异常传感器数据后的加速度时程曲线见图 9。将试验测试曲线(图 9)与理论分析曲线(图 3)比对可知, 传感器 A7X/A4/A1 实测曲线与计算结果趋势基本一致, 最大加速出现在 11.478 s, 对应峰值加速度为 669g, 与理论分析的 618g 非常接近。传感器 A3 在 11.479 s 时出现高峰, 与其他传感器峰值中心线距离较远, 疑似为高频冲击响应的测量噪声, 对试验结果无影响。上述分析证明了容

器设计阶段数值模拟计算的准确性。

在应变测量方面, S1/S3/S4 应变传感器出现故障, 显示异常, 剔除异常传感器数据后的时程曲线见图 10。将实际试验曲线(图 10)与理论分析值(表 3 顶面垂直跌落)比对可知, 传感器 S2/S5/S6 实测曲线与计算结果趋势基本一致, 最大应变值出现在 11.478 s 附近, 最大应变值为 0.001 03。最大应变值较理论分析值小, 证明了设计阶段数值模拟计算是保守的。

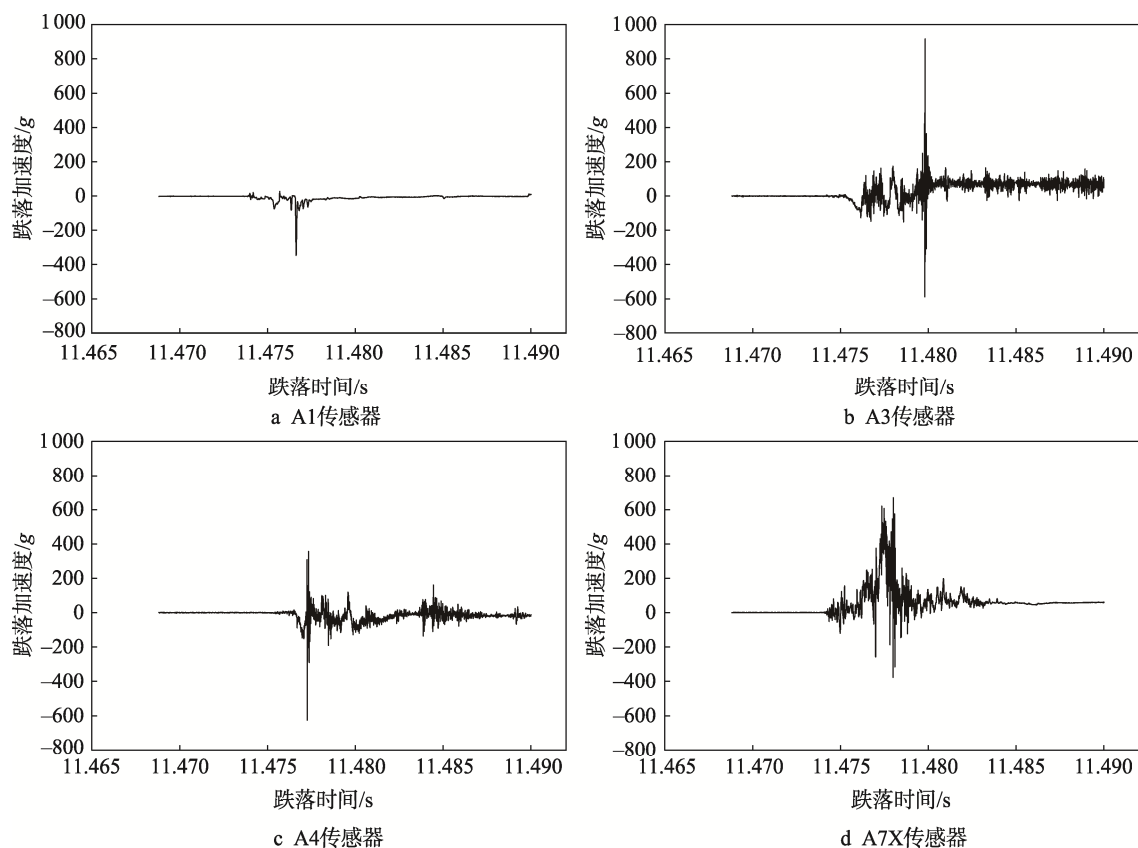


图9 跌落加速度响应曲线
Fig.9 Drop acceleration response curve

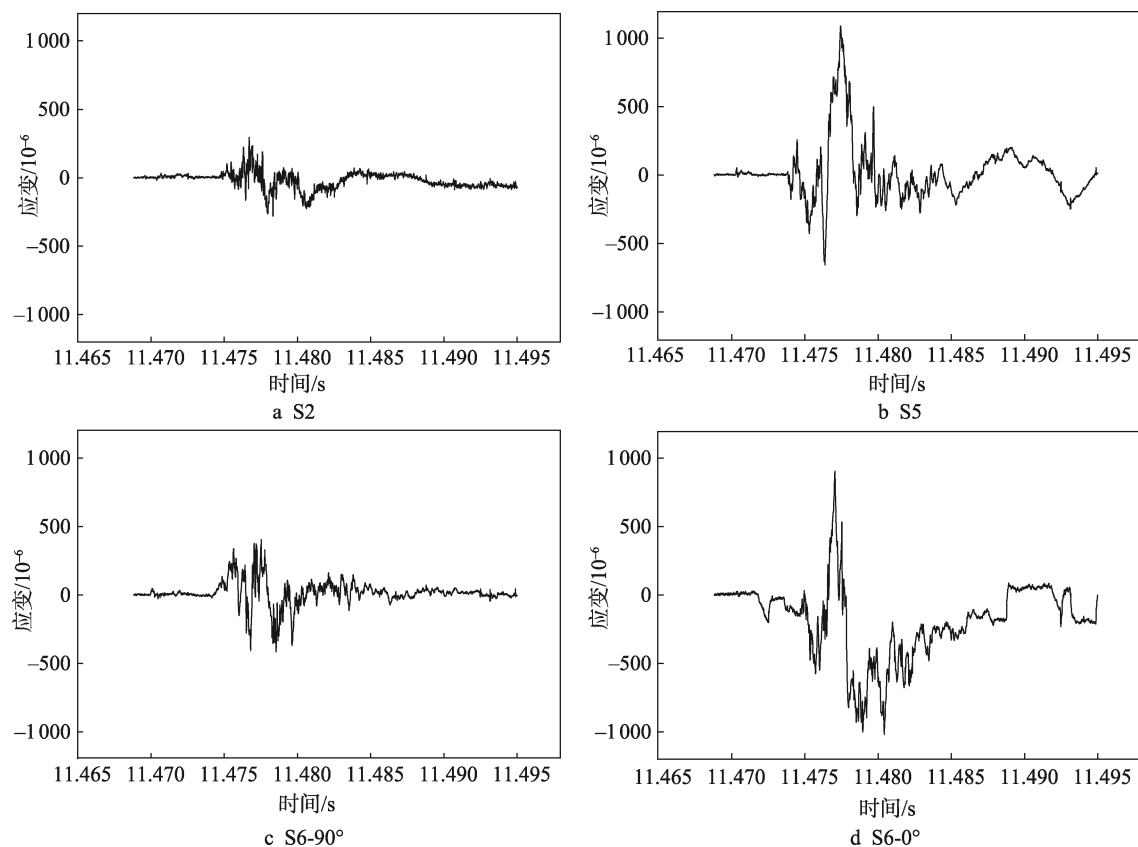


图10 跌落应变响应曲线
Fig.10 Drop strain response curve

4 结语

本文介绍了二氧化铀粉末运输容器的跌落安全设计理念,选取了易破损聚氨酯材料作为跌落缓冲材料。通过跌落动力学仿真确认了容器最危险跌落姿态。通过实际试验验证,验证了最危险跌落姿态下的安全性。

容器在最危险跌落工况下,聚氨酯材料减振吸能效果与设计计算相符,二氧化铀粉末的密封性得以保障。二氧化铀粉末运输容器在加速度、应变等物理量的数值模拟与实际试验结果匹配性较好,理论计算具有一定的保守性。

综上所述,以有限元分析为基础的容器仿真分析与样机试验结果匹配度较高,试验样机通过了相关跌落试验,证明了容器在危险姿态下的9 m跌落安全性。该研究为小吨位核材料9 m跌落试验提供了成功案例,也为其他危险品包装设计与分析验证工作提供了参考。

参考文献:

- [1] CHOI S, BURGESS G. Practical Mathematical Model to Predict the Performance of Insulating Packages[J]. Packaging Technology and Science, 2007, 20(6): 369-380.
- [2] 罗亚军, 谢石林, 张希农. 基于多层压电作动器的蜂窝夹层板的振动主动控制研究[C]// 第九届全国振动理论及应用学术会议论文摘要集, 杭州, 2007: 246-255.
LUO Y J, XIE S L, ZHANG X N. Vibration Control of Honeycomb Sandwich Panel Using Multi Layer Piezoelectric Actuator[C]// Proceedings of the 9th National Conference on Vibration Theory and Application. Hangzhou, 2007: 246-255.
- [3] 于洋. 基于层叠式压电作动器的薄壁结构的形状控制技术[D]. 西安: 西安交通大学, 2008.
YU Y. A Study of Shape Control for Thin Walled Structure Based on Laminated Piezoelectric Actuators[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2008.
- [4] BURGESS G. Practical Thermal Resistance and Ice Requirement Calculations for Insulating Packages[J]. Package Technology and Science, 1999, 12: 75-80.
- [5] QIAN J. Mathematical Models for Insulating Packages and Insulating Packaging Solutions[D]. TN: University of Memphis, 2010.
- [6] 郭晓娟, 钱静. 基于 ANSYS 保温包装球壳模型的建立[J]. 包装工程, 2011, 32(5): 43-48.
GUO X J, QIAN J. Spherical Shell Models for Insulating Packages Based on ANSYS[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(5): 43-48.
- [7] 张朝晖. ANSYS 热分析教程与实例解析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
ZHANG C H. ANSYS Thermal Analysis Course and Example Analysis[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007.
- [8] 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 Y T, MA Y R, LI C, et al. Drop Gesture Analysis of the Fuel Transport Cask[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 20-24.
- [9] 李荣博, 刘晓强, 龚巍, 等. 新燃料运输容器聚氨酯泡沫填充材料性能研究[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 10-14.
LI R B, LIU X Q, GONG Y, et al. Properties of Polyurethane Foam Filled in New Fuel Transport Cask[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 10-14.
- [10] 杨文峰. AP1000 新燃料运输容器国产化分析[C]// 中国核能行业协会 2010 年中国核能可持续发展论坛, 2010, 38(21): 10-14.
YANG W F. Analysis of Localization of AP1000 New Fuel Transport Container[C]// China Nuclear Energy Industry Association 2010 China Nuclear Energy Sustainable Development Forum, 2010, 38(21): 10-14.
- [11] 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: 72-73.
Ministry of Ecology and Environment, State Administration for Market Regulation. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material: GB 11806—2019[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2019.
- [12] ZHANG B R, LU K K. 乏燃料贮存运输容器热传导试验装置设计研究[J]. Science & Technology Vision, 2021(17): 78-80.
张白茹, 卢可可. 乏燃料贮存运输容器热传导试验装置设计研究[J]. 科技视界, 2021(17): 78-80.
- [13] 刘晓强, 邓志华, 毛飞, 等. 反应堆堆腔用中子屏蔽材料耐热性能研究[J]. 核技术, 2021, 44(8): 85-90.
LIU X Q, DENG Z H, MAO F, et al. Investigation on the Heat Resistance of Neutron Shielding Materials for Reactor Cavity[J]. Nuclear Techniques, 2021, 44(8): 85-90.

- [14] 庄亚平, 马柏松. 反应堆压力容器屏蔽组件设计改进[J]. 核动力工程, 2020, 41(5): 185-188.
ZHUANG Y P, MA B S. Design Improvement of Reactor Vessel Shielding Component[J]. Nuclear Power Engineering, 2020, 41(5): 185-188.
- [15] ALRAWASH S, MUTH B, YOO S U, et al. Sensitivity Study on Criticality Safety Analysis of Multiple Misloading within the Spent Fuel Storage Cask[J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 144: 107516.
- [16] POSKAS P. Comparison of Gamma and Neutron Dose Rate Variations with Time for Cast Iron and Metal-Concrete Casks Used for RBMK-1500 Spent Fuel Storage[J]. Applied Sciences, 2021, 11(16): 7362.
- [17] NAMBIAR S, YEOW J T W. Polymer-Composite Materials for Radiation Protection[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2012, 4(11): 5717-5726.
- [18] SOLOV'EV V P, RYABOV A A, ROMANOV V I, et al. Safety Validation of the TUK-109T Large-Size Container for Transporting Spent Nuclear Fuel[J]. Atomic Energy, 2020, 127(3): 181-185.
- [19] SWINNEY MATHEW W, SANTOSH B, DAVIDSON GREGORY G, et al. Multiphysics Modeling of a Critical Dual-Purpose Canister in a Saturated Geological Repository[J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, 175: 109204.
- [20] 樊丽丽. 基于天然橡胶的磁流变减振材料的性能及应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
FAN L L. Study on Properties and Application of Magnetorheological Damping Materials Based on Natural Rubber[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [21] 王学新, 潘玉婷, 庄大杰, 等. 乏燃料容器设计中组件包壳的氢脆特性影响分析[J]. 包装工程, 2021, 42(3): 93-99.
WANG X X, PAN Y T, ZHUANG D J, et al. Influence of Hydrogen Ductile-Brittle Transition Characteristics of Cladding on Design of Spent Fuel Transport Container[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(3): 93-99.