燃料运输容器跌落姿态分析技术

许艳涛,马渊睿,李晨,周岩,潘捷,谢永诚

(上海核工程研究设计院有限公司,上海 200233)

摘要:目的 总结燃料运输容器跌落分析流程,设计合理的姿态分析方案,通过分析使燃料运输容器设 计满足 GB 11806 规定的跌落试验要求。方法 使用动力有限元方法对新燃料运输容器进行多姿态多工况 的跌落分析,并根据试验结果对分析结果进行验证,将分析和试验经验总结成完整的分析流程。结果 通 过分析,新燃料运输容器在正常运输条件下的最不利跌落姿态为 9°小角度跌落,该工况下容器外壳最 大变形量为 49 mm。事故运输条件下最不利跌落姿态为正向垂直跌落,燃料组件最大冲击力为 1.78 MN。 结合分析和试验结果总结了容器最不利跌落姿态的分析流程和技术要点。结论 结合分析和试验结果, 得到了新燃料运输容器各跌落试验的最不利跌落姿态,并总结了燃料运输容器跌落分析的通用流程。 关键词:新燃料;运输容器;跌落姿态;分析流程

中图分类号: TB485.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2017)21-0020-05

Drop Gesture Analysis of the Fuel Transport Cask

XU Yan-tao, MA Yuan-rui, LI Chen, ZHOU Yan, PAN Jie, XIE Yong-cheng (Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

ABSTRACT: The work aims to summarize the fuel transport cask drop analysis process, design the reasonable gesture analysis scheme, and make sure that the design of fuel transport cask can meet the requirements of GB 11806 rules for drop test through analysis. The method of dynamic FEA was used to analyze the drop of multi-position and multi-mode new fuel transport cask, and the analysis results were verified based on the test results. The analysis and test experience were summarized into the complete analysis process. Through the analysis, the worst drop gesture of the new fuel transport cask under normal transport conditions was 9° small angle drop, and the maximum deformation of cask shell under the condition was 49 mm. The worst drop gesture under accident transport conditions was forward vertical drop and the biggest impact force of fuel assemblies was 1.78 MN. In combination with the analysis and test results, the most unfavorable drop gesture of the new fuel transport cask is obtained, and the general analysis flow of the fuel transport cask drop is summarized.

KEY WORDS: new fuel; transport cask; drop gesture; analysis process

随着国内核电机组的增加,核电产业内对各种燃料运输容器的需求相应增长。由于国外燃料运输容器造价昂贵,研制国产化燃料运输容器迫在眉睫。研制国产化新燃料运输容器是燃料运输容器国产化中的一个重要组成部分。完成新燃料运输容器的国产化首先需要依据 GB 11806《放射性物质安全运输规程》

完成设计取证,而容器跌落试验是取证中的一个考核 重点。国标对容器跌落试验中的初始位置、容器跌落 撞击目标和容器跌落试验后的包容、屏蔽、临界等提 出了明确要求,但没有规定容器跌落时具体的跌落姿 态。通常燃料运输容器体积大,制造工艺复杂,造价 昂贵,直接进行跌落试验的研发费用很高,如果容器

收稿日期: 2017-08-26

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX06002004)

作者简介:许艳涛(1987-),男,工程师,主要研究方向为反应堆结构力学。

中装载模拟燃料组件,则费用会更加昂贵。选择最不利的跌落姿态进行取证试验,以减少不必要的试验研究内容,并使试验结果具有保守性和包络性,有非常大的经济效益。

目前,国内燃料运输容器研究包括结构设计与验 证^[1-3]、仿真分析^[4-9]、安全分析^[10-12]和试验测量^[13-15] 等多个方面。不同类型的燃料运输容器各有特点,需 求差别很大,在这种情况下,已有的研究结果均带有 一定的局限。尤其在仿真分析研究中不利跌落姿态的 选择方面,已有的工作主要集中在某一型号容器的姿 态选择,分析方法和结论适用性不强。这里以新燃料 运输容器的最不利跌落姿态分析为例,尝试总结燃料 运输容器最不利跌落姿态的分析流程和技术要点,并 依据该分析流程得到新燃料运输容器各跌落试验的 最不利跌落姿态,为新燃料运输容器国产化跌落取证 试验提供技术依据,同时可为其他运输容器的国产化 提供分析思路和参考。

1 新燃料运输容器分析模型

新燃料运输容器分析模型由上部外壳模型、下部 外壳模型、内壳模型、燃料组件模型及连接单元组成。 整个新燃料运输容器有限元模型有节点 428 427 个, 单元 335 087 个。上部外壳和下部外壳钢质腔体采用 Shell 163 单元进行建模,使用分段线性塑性材料模型 (*MAT 024), 腔体内充的聚氨酯泡沫采用 Solid 164 单元进行建模,使用可压泡沫材料模型 (*MAT 063)。铝制内壳采用 Solid 164 单元进行建 模,使用分段线性塑性材料模型(*MAT 024)。燃 料组件采用 Solid 164 单元进行建模,上下管座使用 分段线性塑性材料模型(*MAT 024),燃料组件主 体部分使用刚体材料模型(*MAT 020)。各部件之 间的接触使用自动单面接触进行模拟,焊接部分采用 面面固连接触模拟。螺栓连接部分使用梁进行模拟, 减震器部分使用弹簧单元进行模拟。新燃料运输容器 有限元模型见图 1。在跌落姿态分析中,对模型施加 初速度和重力加速度载荷,初速度等于模型由试验高 度自由下落到近地面位置的速度。

2 最不利跌落姿态分析流程

基于 GB 11806 的试验要求,设计燃料运输容器 最不利跌落姿态的分析流程,见图 2,容器完成设计 后,需要设计预分析与试验方案,多是部件和材料的 分析和试验,用来获得经初步验证的有限元模型,并 根据 GB 11806 的试验要求筛选典型跌落姿态,确定 分析评价标准,然后进行跌落分析和评价获得最不利 的跌落姿态。如果最不利跌落姿态的分析和整机试验 结果一致,则有限元模型可通过最终验证,原分析结 论有效,反之,修正模型后继续完成最不利跌落姿态的 选择。其中获得经验证的有限元模型、典型跌落姿态 和分析评价标准是整个分析流程中的技术要点和难点。



图 2 燃料运输容器最不利跌落姿态的分析流程 Fig.2 Most unfavorable drop gesture analysis process of fuel transport cask

3 分析流程中的技术要点

3.1 验证分析模型

为保证容器跌落分析结果和试验结果的一致性, 进行最不利跌落姿态分析的有限元模型必须是经过 验证的模型。因为容器跌落分析在整机试验之前,可 通过预分析和试验获得经初步验证的有限元模型,预 分析和试验包括但不限于部件试验和分析、材料试验 和分析等。根据工程经验,当模型满足以下3个要求 时,通常有限元模型可以通过最终验证:保留有主要 的几何特征,包括主体结构、支承结构、连接部件等; 使用经过预分析和试验验证的材料模型和参数;使用 经过预分析和试验验证的控制参数,包括积分方程、 接触算法等。根据以上要求建立了新燃料运输容器有 限元模型,见图1,并根据图2的流程开展新燃料运 输容器 9 m 跌落分析,分析和试验结果见图 3,分析 和试验结果匹配,模型通过验证,说明以上 3 个要求 是有效的,图 2 的流程是适用和可靠的。





3.2 典型的跌落姿态

GB 11806 中规定了不同跌落试验的跌落高度和 跌落目标,并没有规定跌落姿态。从力学角度讲,获 得最不利的跌落姿态即在一定冲击能量下,通过调整 跌落姿态将跌落能量尽可能分配到关注的薄弱位置, 以确保整机试验具有保守性和包络性。

不同的跌落试验关注的受损部件不同,受损部件 的薄弱位置也可能有多个,针对这些薄弱位置选择的 跌落姿态称为典型跌落姿态。比如正常运输条件下对 容器有屏蔽性能要求,容器的屏蔽能力主要和外形尺 寸相关,因此外壳是正常运输条件下关注的受损部 件。针对外壳封头、加强肋等薄弱位置的各种不利的 跌落姿态是正常运输条件下的典型跌落姿态。确定典 型的跌落姿态进行分析能够有效地减少工作量,迅速 获得最不利的跌落姿态。结合分析经验,确定新燃料 运输容器各跌落试验典型跌落姿态的流程,见图 4。

3.3 分析评价标准

分析评价标准是确定最不利跌落姿态最直接的 依据,需要依据 GB 11806 中的具体要求来制定。对 于新燃料运输容器,GB 11806 要求其能满足正常和 事故运输条件下的包容和防止燃料组件临界的能力, 且在正常运输条件下跌落变形不能使容器的任何外 表面上的辐射水平提高 20%以上。因辐射防护能力与 容器屏蔽层厚度直接相关,在跌落过程中,屏蔽层的





厚度可能变化,导致屏蔽防护能力减弱,故以屏蔽层 厚度减弱 20%为限计算跌落过程中容器外壳允许的 变形尺寸,然后通过跌落分析后的外壳的变形情况判 断容器是否满足要求。

因事故运输条件下的9m跌落和1m穿刺试验相 比于正常运输条件下的1.2m跌落和1m落棒试验对 新燃料运输容器更危险,当容器具有事故运输条件下 的包容和防止燃料组件次临界的能力时,正常运输条 件下的试验要求也是可以满足的。正常运输条件下的 跌落分析标准以屏蔽为主,以新燃料运输容器为例, 容器在正常运输条件下的跌落分析评价标准为外壳 整体变形长度方向不超过 20 mm,径向减少不超过 30 mm。

容器包容能力的分析评价标准为强度准则。以新 燃料运输容器为例,只要上、下外壳组件之间的连接 螺栓保持闭合,即连接螺栓的剪切应力强度满足要求 时,容器即可保持闭合。连接螺栓的剪切应力分析和 评定结果见表 1,表明容器在各跌落姿态下能够保持 闭合,其中比值=最大剪切应力/限值。

表 1 外壳连接螺栓的剪切应力分析评定 Tab.1 Shear stress analysis and evaluation of shell connection bolt

9 m 跌落姿态	剪切应力/MPa	限值/MPa	比值
正向垂直跌落	55	420	0.13
反向垂直跌落	71	420	0.17
正向侧跌落	21	420	0.05
反向侧跌落	21	420	0.05
65°角跌落	88	420	0.21
72°角跌落	103	420	0.25
79°角跌落	51	420	0.12

容器保持燃料组件处于次临界的能力主要和各部件的变形有关,包括燃料组件、慢化剂板、中子吸收板的变形等。燃料组件的变形受限于模型难以获取,新燃料运输容器分析中,主要关注其他临界相关部件的变形,而使用碰撞力指标来判断燃料组件的受损程度。

4 各试验最不利的跌落姿态

根据图 3 分析流程确定了新燃料运输容器在各 试验下的最不利跌落姿态。其中 1.2 m 跌落试验的最 不利跌落姿态为新燃料运输容器轴线与水平方向有 9° 夹角,称为 9° 小角度跌落; 1 m 落棒试验的最不 利跌落姿态为钢棒跌落到新燃料运输容器上部两加 强肋中间的外壳区域,称为上筒体落棒; 9 m 跌落试 验的最不利跌落姿态为新燃料运输容器正向垂直跌 落,称为正向垂直跌落; 1 m 穿刺试验的最不利跌落 姿态为新燃料运输容器与水平方向有 21° 夹角,且 跌落位置在铰链,称为 21° 铰链跌落。各跌落试验 下的最不利跌落姿态分析模型见图 5。



Fig.5 Most unfavorable drop gesture analysis model for the new fuel transport cask in each drop test

4.1 1.2 m 跌落试验

9°小角度跌落是新燃料运输容器 1.2 m 跌落试验的最不利跌落姿态,其最大变形局部剖视见图 6,



图 6 小角度跌落容器最大变形局部剖视 Fig.6 Partial section of the maximum cask deformation after small angle drop

量取最大变形截面最大变形位置的尺寸为 49 mm,该 值大于正常运输条件下的分析评价标准,为最不利的 跌落姿态。小角度跌落过程中,容器受二次跌落影响 较大,这主要是因为小角度跌落过程中容器在初次碰 撞时,碰撞区域较小,局部变形不能吸收所有的跌落 动能,残余的动能和重力势能转化为容器以初始撞击 位置为支点的旋转动能。因为容器较长,远离碰撞位 置的加强肋受到的冲击速度最大,残余的动能主要靠 该位置的变形吸收,该位置壳体损伤最为严重。通常 会产生二次跌落的小角度跌落为 1.2 m 跌落试验最不 利的跌落姿态,对该试验分析过程中应注意二次跌落 的影响。

4.2 1m 落棒试验

新燃料运输容器是钢制外壳,1m落棒试验对容器损伤极其有限,故选择将棒落在新燃料运输容器上 部筒体无支承位置。

4.3 9 m 跌落试验

正向垂直跌落是新燃料运输容器 9 m 跌落试 验的最不利跌落姿态。各典型跌落姿态下,内外壳 保持闭合。相对于其他跌落姿态,垂直跌落对外壳、 内壳损伤都较大。正向垂直跌落燃料组件最大碰撞力 为 1.78 MN,反向垂直跌落燃料组件最大冲击力为 1.69 MN,见图 7。正向最大冲击力大于反向,且 整个时程中平均应力也更大,正向垂直跌落更具危 险性。



图 7 9 m 垂直跌落燃料组件所受冲击力时程曲线 Fig.7 Impact force time-history curve of fuel assembly in the 9 m vertical drop

4.4 1m 穿刺试验

21° 铰链斜跌落是新燃料运输容器 1 m 穿刺试 验的最不利跌落姿态。1 m 穿刺试验典型跌落姿态中 容器外壳最大的塑性变形为 14%,小于不锈钢材料的 延伸率 20%。铰链位置本身有制造间隙,穿刺如果扩 大间隙则对新燃料运输容器更不利,故经过分析后, 选择了 21° 铰链斜跌落。

5 结语

结合工程经验,总结了燃料运输容器最不利跌落 姿态选取的分析流程和技术要点。最不利跌落姿态分 析中重点关注分析模型的验证要求及典型跌落姿态 和分析评价标准的确定。得到了新燃料运输容器的各 跌落试验最不利跌落姿态,为新燃料运输容器国产化 跌落取证试验提供了技术支持,为其他运输容器国产 化提供了分析思路和参考依据。

参考文献:

- 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.
- [2] 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 Transport Cask[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(11): 1992—1997.
- [3] 殷勇,李其朋,马庆俊.高燃耗乏燃料运输容器结构 设计研究[J]. 核科学与工程, 2017, 37(2): 308—313.
 YIN Yong, LI Qi-peng, MA Qing-jun. Study on the Structural Design of High Burnup Spent Fuel Transport Cask[J]. Nuclear Science and Engineering, 2017, 37(2): 308—313.
- [4] 李楠, 韩治, 汪军, 等. 新燃料元件运输容器跌落试 验的有限元分析[J]. 核动力工程, 2015, 36(5): 18—21.
 LI Nan, HAN Zhi, WANG Jun, et al. FEM Analysis for Dropping Test of Fresh Fuel Cask[J]. Nuclear Power Engineering, 2015, 36(5): 18—21.
- [5] 陈志华, 聂羽飞. 基于 Ansys/LS-DYNA 的运输容器 跌落分析[J]. 包装与食品机械, 2016, 34(6): 35—38. CHEN Zhi-hua, NIE Yu-fei. Dropping Analysis of Shipping Container Based on Ansys/LS-DYNA[J]. Packaging and Food Machinery, 2016, 34(6): 35—38.
- [6] 汪军, 王志豪, 衣大勇, 等. YG-1 型运输容器跌落分 析与结构优化[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(10): 1853—1858.
 WANG Jun, WANG Zhi-hao, YI Da-yong, et al. Dropping Analysis and Structure Optimization of YG-1 Cask[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(10): 1853—1858.
- [7] 胡名玺, 陈煜, 杜振杰, 等. 基于 Ansys/LS-DYNA 的 包装件跌落仿真分析[J]. 包装工程, 2007, 28(11):

53—57.

HU Ming-xi, CHEN Yu, DU Zhen-jie, et al. Simulate of Packaging Drop Based on Ansys/LS-DYNA[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(11): 53—57.

- [8] 谢涛.关键部件跌落冲击响应研究[J].包装工程, 2005, 26(2): 77—78.
 XIE Tao. Research on the Dropping Shock Response of the Key Parts[J]. Packaging Engineering, 2005, 26 (2): 77—78.
- [9] 曾京, 邬平波. 核燃料组件运输容器隔振系统的振动分析[J]. 核动力工程, 2003, 24(4): 375—379. ZENG Jing, WU Ping-bo. Vibration Isolation Analysis for Conveying Vessel System of Nulcear Fuel Assemblies[J]. Nuclear Power Engineering, 2003, 24(4): 375— 379.
- [10] 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. Research on Key Technology of Spent Fuel Transport Cask Based on the Safety Analysis[D].
 Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [11] 田英男, 陈义学, 杨寿海. 乏燃料运输容器二维辐射屏 蔽优化分析[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(S): 176—178.
 TIAN Ying-nan, CHEN Yi-xue, YANG Shou-hai. Two-Dimensional Radiation Shielding Optimization Analysis of Spent Fuel Transport Container[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(S): 176—178.
- [12] 薛娜,赵博.蒙特卡罗方法在乏燃料运输容器屏蔽 中的应用[J].辐射防护,2007,27(2):65—71.
 XUE Na, ZHAO Bo. Application of Monte Carlo Method in the Shielding Calculation for the Spent Fuel Transport Cask[J]. Radiation Protection, 2007, 27(2):65—71.
- [13] 孙洪超,李国强,闫峰,等. 乏燃料运输容器屏蔽性 能检测技术[J]. 同位素,2015,28(4):270-274.
 SUN Hong-chao, LI Guo-qiang, YAN Feng, et al. Shielding Performance Measurements of Spent Fuel Transport Cask[J]. Journal of Isotopes, 2015, 28(4): 270-274.
- [14] 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.
- [15] 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(4):283—285.
 HE Ruo-yi, PU Xiao-bing, CHEN Zhi-qiang, et al. Analysis and Study of Vibration Data in Transportation of CNFC-3G Nuclear Fuel Containers[J]. Logistics Technology, 2015, 34(4):283—285.