

放射性物品运输容器栓系系统安全分析方法探究

张煜航, 庄大杰*, 孙谦, 王长武, 李国强

(中国辐射防护研究院, 太原 030024)

摘要: **目的** 根据容器特点提出栓系方法, 在栓系系统建立、受力分析以及结构优化等有限元使用方面给出建议, 为放射性物品运输的力学安全评价提供参考。**方法** 根据不同运输容器的栓系方式特点, 将栓系系统分为4类: 栓系绳栓系、支座固定栓系、运输格架栓系以及挤压约束栓系。采用组合加速度因子作为载荷条件, 选取代表性栓系结构进行有限元分析, 给出运输容器、栓系组件的受力特点和危险区域。**结果** 对放射性物品运输活动中的栓系系统进行了总结和归纳, 针对不同栓系方式提出改进方案。**结论** 力学分析结果具有包络性, 4类栓系方式能够适应大部分运输容器在道路、铁路以及水路条件下的运输要求, 为放射性物品运输栓系系统设计和安全评价提供了参考。

关键词: 运输容器; 栓系系统; 有限元分析; 放射性物品

中图分类号: TB485.3; TL931 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)21-0055-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.21.009

Safety Analysis Method on the Retention System of Radioactive Material Transport Package

ZHANG Yuhang, ZHUANG Dajie*, SUN Qian, WANG Changwu, LI Guoqiang

(China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030024, China)

ABSTRACT: The work aims to put forward the retention system according to the package characteristics and give suggestions on the establishment of retention system, stress analysis and structural optimization, so as to provide reference for the mechanical safety evaluation of radioactive material transport. According to the retention characteristics of the different transport packages, the retention systems were classified into four categories: tie, baseplate, framework and array. The finite element analysis was conducted to the typical retention systems under the combined acceleration factor load condition, to obtain stress characteristics and danger zones of the packages and retention members. The retention systems in the transportation of radioactive materials were summarized, and the improvement schemes were proposed according to different retention methods. The mechanical analysis results are enveloping, and the four types of retention methods can meet the transportation requirements of most transport packages under the conditions of roads, railways and waterways, which provides a reference for the design and safety evaluation of the retention system for radioactive material transport.

KEY WORDS: transport package; retention system; finite element method; radioactive material

随着我国能源政策的不断优化,“碳达峰”“碳中和”目标的提出,核能作为低碳的基础性能源,已经进入快速发展期^[1-2]。放射性物品运输是指通过交通工具将放射性物品进行空间转移的活动,是一项重要

的核实践活动,是核能开发和核技术应用的重要条件保障。放射性物品运输安全的核心理念是采取可行的方式将放射性物品安全地从启运地送至目的地。陈磊等^[3]设计了一种用于运输工业辐照用特殊形式放射

收稿日期: 2024-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(12202414)

*通信作者

源的运输容器,采用试验和仿真分析相结合的方法验证了容器的力学安全性能。李娜等^[4]开展了C型货包内容器密封结构设计,采用数值计算方法进行密封结构的校验和选型,并开展冲击试验验证其合理性,为运输容器的密封结构设计提供了方案。栓系系统是由运输容器、运输工具以及连接组件构成的系统,其作用是将运输容器牢固地固定在运输工具上。王晓鹏等^[5]建立了包含运输容器和栓系设计的放射性物品公路运输系统,采用仿真计算方法对运输容器的栓系系统进行强度校核,分析了在规定当量加速度载荷下的应力和位移。王勇等^[6]对核燃料组件运输容器在运输过程中受到的纵向冲击进行了安全性分析,讨论了冲击作用对捆绑带拉力和组件加速度的影响。

栓系安全性能评价中,目前普遍采用国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA) 2012年版咨询材料的特定安全导则 SSG-26^[7]中的推荐方法,基于理论力学中静力学空间任意力系的平衡方程^[8]进行计算,即满足任一方向上的合力为0,任一平面内的合力矩为0的一般要求^[9]。近年来,随着计算机技术的迅猛发展,有限元分析方法进入高速发展阶段。其由于理论基础扎实、通用性强的特点,现已成为工程问题数值仿真的主要工具,并在工程应用中取得了巨大的成功^[10-13],在核工业领域各个方面也有重要应用^[14-18]。有限元分析方法与 SSG-26 中的推荐方法的相同点是均基于静力学基本原理,满足静力学平衡方程。同时,有限元分析方法能够更加直观地体现栓系系统的应力分布,为结构的进一步优化提供了精确且直观的依据。

本文基于过往放射性物品运输安全研究基础和实际工程经验,总结了4类栓系方式:栓系绳栓系、支座固定栓系、运输格架栓系以及挤压约束栓系。对每种栓系方式从栓系特点、应用场景以及注意事项等多个方面进行分析。针对每类栓系方式给出实际应用中的典型事例,采用有限元分析方法进行安全性分析,从模型建立、受力分析和结构优化等角度探究了有限元分析方法在栓系系统中的应用价值,并给出合理建议,为今后容器栓系系统的设计以及放射性物品运输的安全评价提供参考。

1 栓系系统

栓系系统安全性是衡量栓系系统设计是否可用的最基本指标,也是运输活动中对于栓系最关注的内容之一。SSG-26 中引入加速度因子(Acceleration Factor)这一概念用于反映货包的惯性力,将惯性力等效为作用在质心处的当量静态作用力。表1为IAEA SSG-26 中给出的不同运输方式下货包及其栓系系统设计所用的加速度因子。我国国家标准《放射性物品安全运输规程》(GB 11806—2019)^[19]从货包角度对

栓系的要求是“应把货包上的任何栓系附件设计成在正常运输条件和运输事故条件下其受力均不会降低该货包满足本标准要求的能力。”放射性物品运输容器栓系系统作为放射性物品运输活动中必不可少的组成部分,是保证容器安全的第一道安全措施。

表1 货包及其栓系系统加速度因子指标
Tab.1 Acceleration factors for package and its retention system

运输方式	加速度因子		
	纵向	横向	垂直方向
道路运输	2g	1g	2g(向上), 3g(向下)
铁路运输	5g	2g	2g(向上), 2g(向下)
海运或水运	2g	2g	2g(向上), 2g(向下)
空运	1.5g(向前9)	1.5g	2g(向上), 6g(向下)

2 结果与分析

2.1 栓系绳栓系

栓系绳栓系采用栓系绳将容器与运输工具相连接,其受力特点为依靠栓系绳拉力抵抗容器在运输过程中可能产生的惯性力。运输容器的吊耳作为栓系绳的锚固点,运输工具侧壁或底板需安装有固定环,要求固定环高度低于容器锚固位置高度,以产生用于抵抗容器向上的加速度的垂向分力。

新燃料运输容器主要用于运输核电站用新燃料组件,容器最大外形尺寸为5 000 mm×1 142 mm×1 270 mm(长×宽×高),满载后货包总质量约为3 600 kg。该容器运输时采用集装箱装载,容器单层平行摆放,每层摆放2个容器,装入集装箱就位后,采用多条尼龙捆绑带进行捆绑固定,容器装载的三维模型如图1所示。新燃料运输容器国内主要采用道路运输方式,根据表1的加速度因子,容器栓系校核采用的加速度因子组合为(2g, 1g, 2g)。

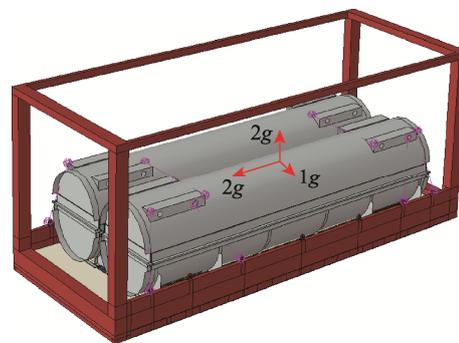


图1 新燃料运输容器装载和加载示意图
Fig.1 Diagram of new fuel transport package loading

为验证有限元模型的有效性,将理论计算的载荷值与仿真分析结果约束处的支座反力值进行对比,

以此说明有限元加载的正确性和计算结果的有效性。

有限元模型加载方式为整体加载, 在前进方向、水平侧向、垂直方向分别向模型施加 2g、1g、2g 的重力加速度 (出于保守计算考虑, 重力加速度 g 取 10 m/s^2)。栓系系统约束位于集装箱的角件位置, 与实际运输时约束位置保持一致。栓系系统总质量为 $18\,720 \text{ kg}$, 根据 $F=ma$, 前进方向理论计算合力为 $F_{前}=ma_{前}=374.4 \text{ kN}$; 水平侧向理论计算合力为 $F_{侧}=ma_{侧}=187.2 \text{ kN}$; 垂直方向理论计算合力为 $F_{垂}=ma_{垂}=374.4 \text{ kN}$ 。

提取约束处在前进方向、水平侧向、垂直方向 3 个方向的支座反力, 如图 2 所示。有限元模型 3 个方向支座反力分别为 374.29、186.92、373.95 kN。有限元模型与理论计算的载荷值基本一致, 说明了计算模型的有效性。

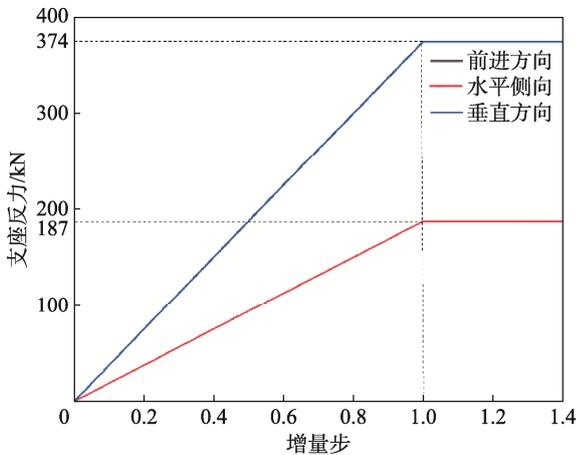


图 2 有限元支座反力计算结果
Fig.2 Reaction force calculation result of baseplate by finite element

运输容器有限元分析应力结果如图 3 所示, 有限元分析结果显示, 应力较大位置主要集中在容器底部的加固角钢与加固斜角板的连接处。在容器设计时, 力学设计和安全评价更加关注内部燃料组件的包容, 底部支撑结构由于质量占比小, 不具有缓冲吸能功能, 不是结构设计关注的重点。但在栓系系统分析中, 支撑结构是承担惯性力的主要部件, 特别是支撑结构的变截面处或连接处, 容易发生局部屈曲, 栓系设计时应关注其承载能力。基于有限元分析结果, 对新燃料运输容器提出改进方案: 1) 在运输容器结构设计阶段考虑运输栓系方式对容器局部强度的影响, 对支撑底座进行局部加强; 2) 增加支撑底座与容器下壳体的接触面积, 分散容器对支撑底座的压应力, 减少支撑底座的应力集中区域。

2.2 支座固定栓系

支座固定栓系通过增加独立的支座将运输容器与运输工具进行连接固定。支座应根据容器的外形尺寸和质量进行设计, 并考虑支座与容器、运输工具的

连接方式。支座与运输工具之间采用螺栓或焊接的固定方式。支座固定栓系方式常见于大型圆柱形运输容器, 如乏燃料运输容器、MOX 运输容器以及六氟化铀运输容器。

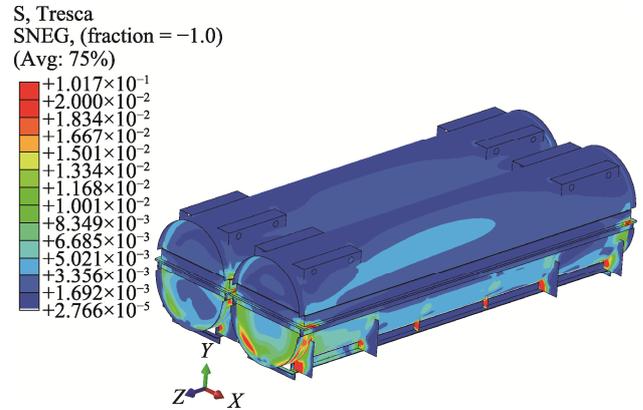


图 3 新燃料运输容器道路组合
加速度因子下应力云图
Fig.3 Stress cloud map of new fuel transport package under combined acceleration factors of roads

六氟化铀运输容器用于运输天然六氟化铀, 容器最大外形尺寸为 $3\,114 \text{ mm} \times 1\,500 \text{ mm} \times 1\,380 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高), 满载后货包总质量约为 $10\,000 \text{ kg}$ 。运输时, 容器平卧在马鞍形支座上, 容器纵轴线与车辆纵向中心线一致, 容器与支座通过螺旋套和螺栓固定, 支座与车底板通过螺栓固定。运输容器装载三维模型如图 4 所示。IAEA SSG-26 对于六氟化铀运输容器给出特定的栓系系统加速度因子组合, 如表 2 所示。运输容器不涉及空运, 故采用最大加速度组合 (2g, 1g, 2g)。

有限元模型加载方式为整体加载, 在前进方向、水平侧向、垂直方向分别向模型施加 2g、1g、2g 的重力加速度, 如图 4 所示。栓系系统约束位于底部螺栓位置, 与实际运输时约束位置保持一致。栓系系统总质量为 $11\,960 \text{ kg}$, 根据 $F=ma$, 前进方向理论计算合力为 $F_{前}=ma_{前}=239.2 \text{ kN}$; 水平侧向理论计算合力为 $F_{侧}=ma_{侧}=119.6 \text{ kN}$; 垂直方向理论计算合力为 $F_{垂}=ma_{垂}=239.2 \text{ kN}$ 。

提取底部螺栓在前进方向、水平侧向、垂直方向 3 个方向的支座反力, 如图 5 所示。有限元模型 3 个方向支座反力分别为 240.62、120.36、239.42 kN。有限元模型与理论计算的载荷值基本一致, 说明了计算模型的有效性。

六氟化铀运输容器有限元计算应力结果如图 6 所示, 各个部件计算结果均低于其材料的屈服应力, 栓系系统满足运输安全要求。应力较大的位置位于容器与支座的连接处以及螺栓和螺孔的接触处。根据有限元计算结果, 对六氟化铀运输容器栓系系统提出改进方案: 1) 增

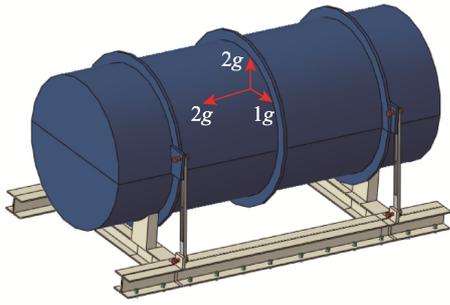


图4 六氟化铀运输容器装载及加载三维模型
Fig.4 3D model of uranium hexafluoride transport package loading

表2 六氟化铀运输容器加速度因子指标
Tab.2 Acceleration factors for uranium hexafluoride transport packages

运输方式	加速度因子		
	纵向	横向	垂直方向
道路/铁路	2g	1g	±1g
海运	2g	1g	±2g
空运	3g	1.5g	±2g

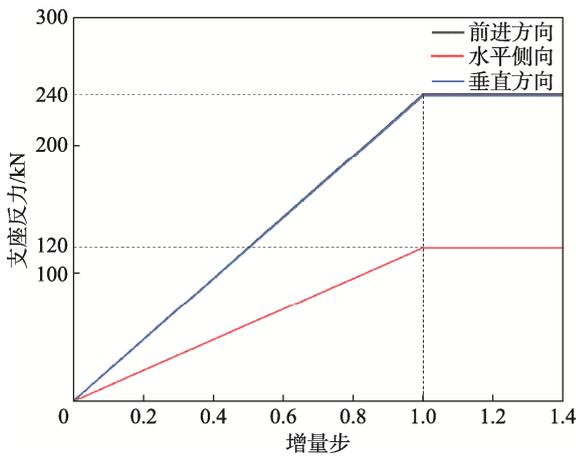


图5 六氟化铀运输容器有限元支座反力计算结果
Fig.5 Reaction force calculation of uranium hexafluoride transport package by finite element

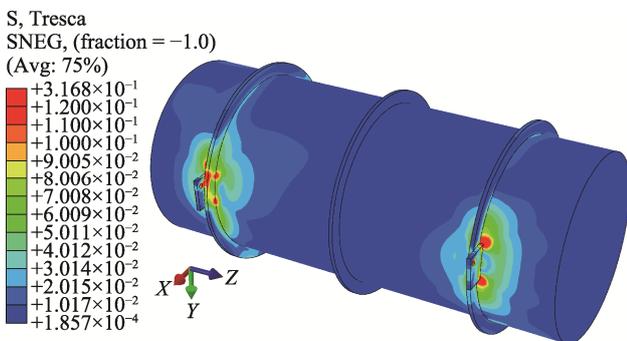


图6 道路组合加速度因子作用下六氟化铀运输容器应力分布云图
Fig.6 Stress distribution cloud map of uranium hexafluoride transport package under combined acceleration factors of roads

加容器筒体与吊耳上下端部连接处的厚度,保证吊耳与筒体的连接强度;2)将吊耳板由单个螺栓孔改为双螺栓孔,增加吊耳板与螺旋套的连接螺栓数量,降低单个螺栓与螺栓孔的接触应力。

2.3 运输格架栓系

运输格架栓系通过增加独立的格架结构将运输容器稳定地限制在车厢内。运输格架使用螺栓或者焊接的方式与车体相连。

框架式运输格架的三维模型如图7所示,运输格架装载容器后总质量约为4500kg。

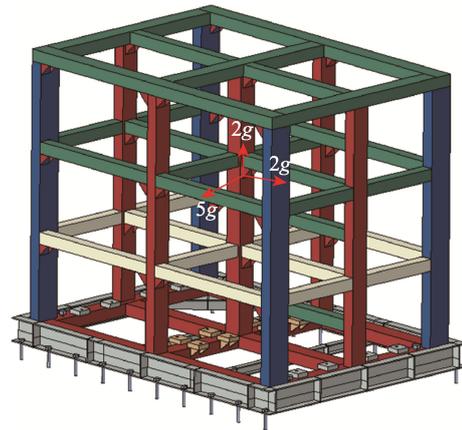


图7 运输格架三维模型
Fig.7 3D model of transport framework

有限元模型加载方式为整体加载,在前进方向、水平侧向、垂直方向分别向模型施加5g、2g、2g的重力加速度。栓系系统约束位于底部螺栓位置,与实际运输时约束位置保持一致。栓系系统总质量为4900kg,根据 $F=ma$,前进方向理论计算合力为 $F_{前}=ma_{前}=245\text{ kN}$;水平侧向理论计算合力为 $F_{侧}=ma_{侧}=98\text{ kN}$;垂直方向理论计算合力为 $F_{垂}=ma_{垂}=98\text{ kN}$ 。

提取底部螺栓在前进方向、水平侧向、垂直方向3个方向的支座反力,如图8所示。有限元模型3个方向支座反力分别为244.93、97.97、97.97kN。有限元模型与理论计算的载荷值基本一致,说明了计算模型的有效性。

运输格架设计过程中根据有限元分析结果进行优化,形成最终的格架结构设计(图中不同颜色代表不同截面属性,对应不同截面厚度)。首次设计时,运输格架有限元分析结果如图9所示,最大应力为266MPa,位于格架底部与底座连接处,并且在格架梁与柱的搭接位置,均会出现较大应力值。在此基础上进行设计改进,改进方案包括:1)优化梁、柱的截面厚度,使顶部角处柱厚度大于中间柱,梁厚度小于柱厚度,顶部梁厚度小于底部梁厚度;2)在梁、柱搭接区域增加三角板,增加格架抗变形能力,降低搭接处的应力。运输格架设计运输方式为道路、铁路和水路,组合加速度因子(5g,2g,2g)为运输活动中最

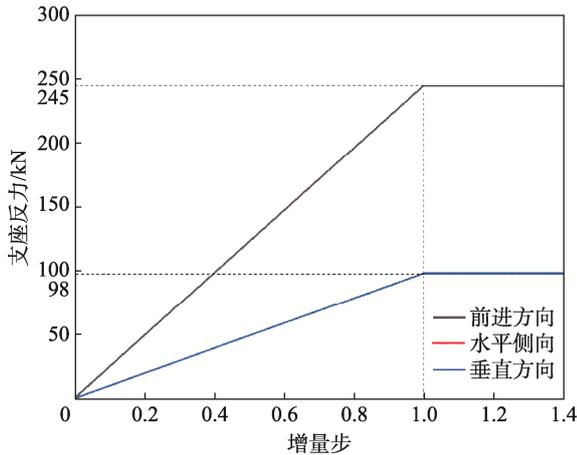


图 8 格架有限元支座反力计算结果
Fig.8 Reaction force calculation results of framework by finite element

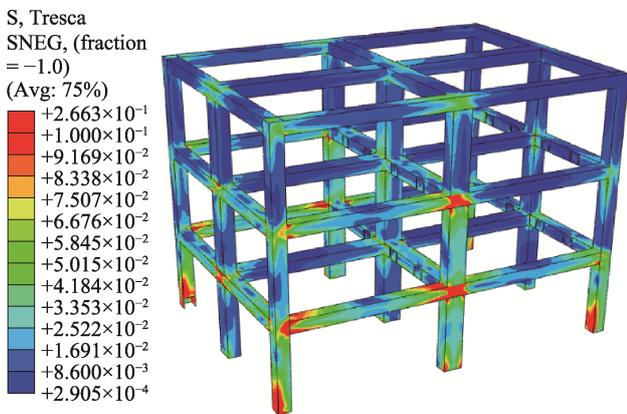


图 9 首次设计运输格架应力分布云图
Fig.9 Stress distribution cloud map of transport framework of the first design

严酷加速度组合, 优化设计后, 运输格架的有限元计算结果如图 10 所示。柱梁交叉处应力大幅降低, 格架最大应力为 44.74 MPa, 远小于材料的屈服强度, 满足铁路运输对于栓系系统的安全要求。

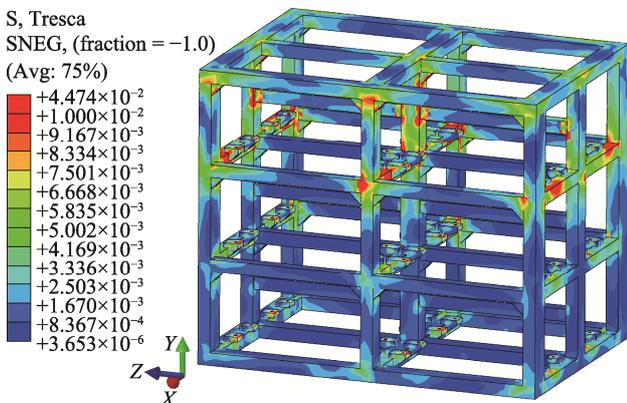


图 10 铁路组合加速度因子作用下运输格架应力分布云图
Fig.10 Stress distribution cloud map of transport framework under combined acceleration factors of railways

2.4 挤压约束栓系

挤压约束栓系依靠容器与容器之间的无间隙排列, 使容器之间形成相互约束以限制容器位移。为保证车厢内的容器成为一个整体, 容器与容器、容器与车厢的间隙用木材等轻质缓冲材料压紧填实。

铀酸盐运输容器三维模型如图 11 所示, 容器材质为 S30408 级不锈钢, 外形为规则的长方形, 上下一致。校核计算时, 相邻容器作为约束施加在容器边缘。运输容器设计运输方式为道路、铁路和水路, 组合加速度因子 (5g, 2g, 2g) 为运输活动中最严酷的加速度组合, 容器应力分布如图 12 所示。应力最大位置位于箱体中心, 最大应力为 27.14 MPa, 小于材料的屈服强度 (220 MPa)。挤压约束主要依靠容器自身结构强度承受加速度载荷, 根据有限元分析结果, 对运输容器提出改进方案: 1) 容器外围设置包角等防护结构, 避免容器与容器相互接触对于容器主体结构的磨损; 2) 容器沿高度方向具有相同的外围尺寸, 增加容器之间的接触面积。

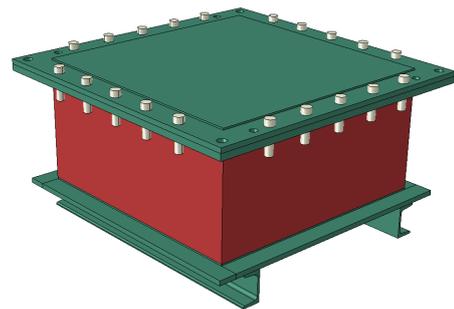


图 11 铀酸盐运输容器三维模型图
Fig.11 3D model of uranate transport package

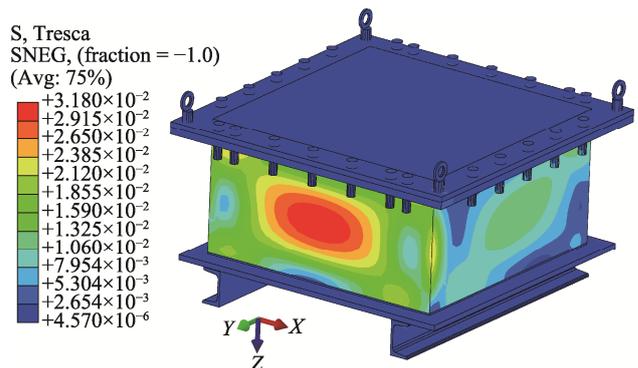


图 12 铁路组合加速度因子作用下铀酸盐运输容器应力分布云图
Fig.12 Stress distribution cloud map of uranate transport packages under combined acceleration factors of railways

放射性物品运输根据容器结构特点、运输方式以及载具特点选取不同类型的栓系方式进行安全运输, 基于 4 个典型运输容器栓系的有限元分析结果, 对于 4 种栓系方式的总结如表 3 所示。

表3 不同栓系方式栓系特点汇总
Tab.3 Summary of characteristics of different retention methods

栓系方式	应用场景	受力特点	危险区域	优势	局限
栓系绳栓系	容器、车厢有栓系绳固定位置,且低于容器重心	栓系绳拉力	栓系绳与容器连接处、容器支撑结构	工器具方便易得、栓系成本低	占用空间大
支座固定栓系	单个容器外形尺寸大、质量大	连接件固定:螺栓、压杆等	容器与支座连接处、支座与车厢连接处	连接稳固	单独设计、制造,成本高;要求车板可开孔或可焊接;不具备兼容性
运输格架栓系	单个容器尺寸小、质量小,可堆积	连接件固定、结构约束	格架梁柱的交叉连接处	固定稳固、装载容器数量多	单独设计、制造,成本高,要求车板可开孔或可焊接
挤压约束栓系	容器外形尺寸规则,自身具有稳定性	相邻容器相互约束	容器刚度相对较低区域,例如薄壁壳体	单次运输量大,空间利用率高	无额外约束限制,稳定性差

3 结语

栓系系统力学分析是放射性物品运输安全性分析中的重要组成部分,针对不同运输容器的结构特点和运输需求,提出了栓系绳、支座固定、运输格架以及挤压约束等4种典型的运输栓系方式,采用有限元方法对运输容器栓系系统进行力学分析。分析结果表明:

- 1) 运输容器支撑底座、吊耳、螺栓孔为栓系力学分析中主要受力区域,应在容器结构设计中予以加强。
- 2) 增加运输容器与栓系连接部件的接触面积,避免形成应力集中可作为栓系系统设计的力学原则。
- 3) 通过有限元分析得到栓系系统的薄弱区域,为优化栓系方案提供依据,最终实现放射性物品运输活动的最优化。

参考文献:

- [1] 刘新华. 放射性物品安全运输概论[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 1-15.
LIU X H. Introduction to Safe Transportation of Radioactive Materials[M]. Beijing: Science Press, 2015: 1-15.
- [2] 徐健, 万力, 宗自华, 等. 乏燃料贮存技术与管理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2020: 1-16.
XU J, WAN L, ZONG Z H, et al. Spent Nuclear Fuel Storage and Management[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2020: 1-16.
- [3] 陈磊, 庄大杰, 孟东原, 等. 放射源运输容器力学设计和试验验证[J]. 包装工程, 2024, 45(7): 260-266.
CHEN L, ZHUANG D J, MENG D Y, et al. Mechanical Design and Experimental Validation of Radioactive Sources Transport Containers[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(7): 260-266.
- [4] 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 N, ZHANG Q P, ZHANG S C, et al. Sealing Structural Design and Performance of Radioactive Material Type C Packages[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(1): 180-185.
- [5] 王晓鹏, 张煜航, 庄大杰, 等. 一种放射性物品公路运输系统力学安全性研究[J]. 包装工程, 2023, 44(13): 268-276.
WANG X P, ZHANG Y H, ZHUANG D J, et al. Mechanical Safety of Road Transport System for Radioactive Material[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(13): 268-276.
- [6] 王勇, 曾京, 陈盈, 等. 核燃料组件铁路运输容器系统在纵向冲击下的安全性分析[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(4): 487-489.
WANG Y, ZENG J, CHEN Y, et al. Safety Analysis for Railway Conveying Vessel System of Nuclear Fuel Assemblies Subject to Longitudinal Impact[J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 23(4): 487-489.
- [7] Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material[M]. Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA), 2014: 355-370.
- [8] 李海龙. 燃料组件铁路运输栓系系统安全分析[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(S2): 700-703.
LI H L. Safety Analysis of Fuel Assemblies Transport by Train[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(S2): 700-703.

- [9] 史治宇. 变分原理及有限元[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 1-10.
SHI Z Y. Variational Principle and Finite Element Method[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 1-10.
- [10] YUAN Z S, ZENG H X, XU W, et al. Reverse Engineering for Estimation of Shear Modulus for Yarn Models in Finite Element Modelling for Ballistic Impact[J]. Composite Structures, 2021, 274: 114371.
- [11] JIMÉNEZ S, CORNEJO A, BARBU L G, et al. Failure Pressure Analysis of a Nuclear Reactor Prestressed Concrete Containment Building[J]. Engineering Structures, 2021, 236: 112052.
- [12] YAN B J, CHENG L, LI B Q, et al. Bi-Directional Prediction of Structural Characteristics and Effective Thermal Conductivities of Composite Fuels through Learning from Finite Element Simulation Results[J]. Materials & Design, 2020, 189: 108483.
- [13] 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 G Q, ZHANG J G, LUO X W, et al. Assessment Technology on Mechanical Test of Package for Radioactive Material Transport[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(4): 762-768.
- [14] BOUHJITI D E M, BAROTH J, DUFOUR F, et al. Probabilistic Analysis of Concrete Cracking Using Stochastic Finite Element Methods: Application to Nuclear Containment Buildings at Early Age[J]. Materials and Structures, 2020, 53(4): 93.
- [15] 黄辉, 王时龙, 马驰, 等. 乏燃料剪切机气固两相流分析及结构优化[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(10): 1969-1978.
HUANG H, WANG S L, MA C, et al. Gas-Solid Two-Phase Flow Analysis and Structure Optimization of Spent Fuel Shearing Machine[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54(10): 1969-1978.
- [16] 贾红锋, 曲晓宇, 焦利辉, 等. 核安全压力容器非径向接管的应力特性研究[J]. 核安全, 2019, 18(5): 73-78.
JIA H F, QU X Y, JIAO L H, et al. Stress Characteristic Study of Non-Radial Nozzle of Nuclear Safety Pressure Vessel[J]. Nuclear Safety, 2019, 18(5): 73-78.
- [17] 黄涛, 张涛, 董占发, 等. 大型商用飞机撞击核安全壳的动力响应分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(20): 8-14.
HUANG T, ZHANG T, DONG Z F, et al. An Analysis of the Dynamic Response of Nuclear Containment under the Impact of a Large Commercial Aircraft[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(20): 8-14.