某乏燃料运输容器减震器设计及验证

兰天宝,朱思琪,刘轩

(中国核电工程有限公司,北京 100840)

摘要:目的 研发用于某运输容器的减震器,同时探究减震器尺寸和填充材料的分散性对减震器设计的 影响。方法 开展减震器尺寸对运输容器减震效果的分析计算,通过木材抗压强度试验获取木材压缩强 度分散性,并使用有限元方法对运输容器进行9m过重心角跌落分析,并进行9m过重心角跌落测试验 证。结果 一般来说减震器尺寸越大,其吸收能量越多,但其尺寸超过某临界点后减震效果反而下降; 低抗压强度的填充木材吸能力不如较高抗压强度的,但填充木材抗压强度较大时,减震器偏硬会导致较 大的容器刚体加速度。结论 该减震器设计合理,满足规范要求。填充木材的力学性能分散性,偏大或 偏小都会对设计产生影响,因此,使用木材作为缓冲填充材料,设计时需要充分考虑木材压缩强度分散 性对缓冲效果的影响。

关键词:减震器;填充材料;木材分散性;跌落分析;减震吸能 中图分类号:TB485.1;O328 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2023)07-0294-07 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.07.034

Design and Verification of Shock Absorber for a Spent Fuel Cask

LAN Tian-bao, ZHU Si-qi, LIU Xuan

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

ABSTRACT: The work aims to develop a shock absorber for a transport cask and investigate the effects of the size of the shock absorber and the dispersion of the filling material on the design of the shock absorber. The effect of shock absorber size on the damping effect of the transport cask was analyzed and calculated. The dispersion of wood compression strength was obtained by compressive strength test of wood, and the 9 m over center of gravity angle drop analysis of the transport container was carried out through the finite element method. And the 9 m over center of gravity angle drop test was carried out for verification. Generally speaking, the larger the size of the shock absorber, the more energy it absorbed; but if its size exceeded a certain point, the damping effect decreased instead. The filling wood of low compressive strength absorbed less energy than that of high compressive strength. But when the compressive strength of the filling wood was large, the rigid shock absorber would lead to the peak acceleration of the rigid cask body. The shock absorber is well designed and meets the specification requirements. The mechanical property dispersion of the filling material, the impact of wood compressive strength dispersion of the cushioning effect should be considered.

KEY WORDS: shock absorber; filling material; wood dispersion; drop analysis; shock and energy absorption

乏燃料运输容器是运输反应堆乏燃料的专用设备,随着我国核电能源的发展及新堆型的研发,乏燃

料运输容器的需求不断增长^[1-2],例如高温气冷堆核 电站采用含有 UO₂的球形燃料元件作为燃料,燃料元

收稿日期: 2022-08-20 作者简介: 兰天宝 (1990—), 男, 工程师。 件的结构和尺寸与其他堆型相比完全不同,现有的新 燃料运输容器已不能用于运输高温气冷堆新燃料元 件,需要研制新的新燃料运输容器^[3]。核乏燃料具有 放射性,并且运输距离较长,装载、运输过程可能会 造成容器的破坏。设计需要确保在严重事故下运输容 器包容边界的完整性,考虑运输容器受冲击、碰撞等 影响,避免放射性物质泄漏,因此,乏燃料运输容器 的减震器设计极为关键。减震器的功能是确保运输容 器在受到外部载荷冲击作用时能够吸收能量,缓解冲 击载荷对容器内容物造成的影响,最终保证运输容器 包容边界的完整性。

作为关键部件,减震器主要由内部的填充材料与 包覆的钢板组成,内部填充材料的主要功能为缓冲吸 能,在受到外部载荷冲击作用时,填充材料发生塑性 变形从而吸收能量,外部的钢板起到包覆内部填充材 料的作用,保证减震器结构的完整性^[4]。减震器的设 计应遵循国际原子能机构《放射性物质安全运输规 程》和 GB 11086—2019 相应的规定^[5-6],常用的标准 为 9 m 跌落测试^[7-8]。减震器的设计要合理,尺寸要 适当,其中填充材料必须要有一定的强度与塑性,同 时满足支撑防护和减震吸能的特点。

减震器的填充材料是影响减震器性能的主要因 素。目前,常用的填充材料有木材、聚氨酯泡沫和蜂 窝铝等。木材成本低,但力学性能受纹理及湿热条件 影响:同样体积的聚氨酯泡沫吸能效果不如木材,设 计受限于体积;蜂窝铝承载能力只能在某一特定方 向,隔热效果不如木材和聚氨酯泡沫。木材作为减 震器的填充材料的技术已十分成熟,法国 TN 系列运 输容器的填充材料均为木材;美国 NAC 系列运输容 器的填充材料采用红木和杉木^[9];我国 RY 型运输容 器的填充材料采用泡桐木^[10]。相比聚氨酯泡沫和蜂 窝铝,木材材料是应用最多、最广泛的减震器材料, 木材吸能缓冲的研究内容较为丰富,研究者对杉木、 橡木在不同温度与不同加载速度和加载方向的结果 进行了分析,获得了各类木材在不同载荷、环境条 件下的应力-应变曲线。研究人员发现木材含水率对 能量吸收和压缩强度有一定影响,含水率下降横纹 压缩强度、吸能能力呈上升趋势^[11]。李继承等^[12]从 密度、含水率、温度、构造与缺陷、服役时间等方 面对木材力学性能影响开展研究,并从宏观观察与 微观分析两方面进行阐述。木材微观上是由聚合物 胞元构成, 胞元的排列方式导致其在宏观上的力学 性能为各向异性,形成了顺纹、径向、弦向 3 个方 向^[13],一般弦向与径向力学性能近似。由于木材生 长受温度、阳光、雨水等环境因素导致其聚合胞元 尺寸及形态不一, 宏观上展现就是纹理的变化, 这 给木材的力学性能带来了很大分散性,一般通过对 大量木材进行筛选均匀纹理, 剔除杂质, 这也只能 尽量降低分散性。所以使用木材作为填充材料需要考 虑其分散性对设计的影响。

1 减震器尺寸对缓冲的影响

在运输、安置等过程中,减震器的体积越小越有 利于操作,因此应对减震器设计进行优化,能够以较 小尺寸的减震器完全吸收跌落产生的动能,确保容器 的应力在允许的限度内,并保证容器结构完整和密封 性等要求。如图1所示,乏燃料运输容器的减震器一 般安装在容器上下两端,与容器组成类似哑铃的结 构,减震器在正常或事故工况可以变形吸能,起到保 护容器本体的作用。



图 1 某运输容器结构 Fig.1 Structure schematic of a cask

如图 2 所示,减震器的尺寸主要考虑 2 个截面方向上的厚度,这 2 个方向的尺寸会影响容器在垂直和 水平跌落的应力及加速度。减震器的变形影响容器的 冲击加速度和应力水平,因此,在设计减震器时要确 保跌落产生的动能完全被减震器的变形吸收。



图 2 减震器关键尺寸 Fig.2 Key dimensions of shock absorber

本文采用有限元方法,通过改变减震器轴向高度 和径向厚度参数进行优化设计,并进行容器最大应力 分析。运输容器分析模型由上下减震器、容器本体、 内部吊篮等组成,其中上下减震器的填充材料为木 材,由不锈钢板外包,其中不锈钢外包壳采用壳单 元建模,填充木材、容器本体、螺栓、耳栓等结构 采用实体单元进行建模,对模型施加初速度和重力加 速度。

容器受到的冲击力与减震器材料的屈服强度和 撞击时的接触面积相关,二者决定了容器受到冲击的 最大幅度和持续时间,减震器的2个方向的尺寸直接 影响接触面积,因此,在计算时保持另一方向尺寸不 变。在图3中,通过对容器的9m垂直跌落分析,显 示了容器的应力是如何受减震器轴向高度 h 变化的 影响。在垂直跌落事故工况分析中,正如可以预料的 那样,缓冲器在轴向的高度变化直接影响容器最大应 力值。在水平跌落工况中,减震器径向受到压缩,图 3显示了减震器径向厚度δ和高度 h 对容器最大应力 的影响。





由图 3 可以看出, 在垂直跌落中, 容器的应力最初 随着减震器的轴向厚度增加而减少, 直到达到 300 mm 后,随着厚度的增加, 应力也随之增加, 这种趋势也 同样出现在水平跌落的情况下。这是由于过于充裕的 缓冲材料导致只有部分缓冲材料参与了吸能作用, 过 多的缓冲材料反而会增加整个运输容器的质量。在满 足运输等其他要求条件下, 该运输容器的减震器的厚 度尺寸可以在 200~300 mm 内进行选择。

2 木材分散性对减震器影响

木材的分散性直接影响着木材的抗压强度,木材 的吸收能力与木材压缩应力-应变曲线包络的面积相 关,曲线的形状代表了弹性阶段、平台阶段、致密阶 段。木材材料典型的压缩应力-应变曲线如图4所示, 其中平台阶段主要决定了吸能包络面积大小,是减震 材料十分关键的参数,平台阶段决定了木材能够传递 的最大的持续力,木材从压缩到压缩破坏的比变形能 起到缓冲作用,分散性会影响木材的抗压强度及比变 形能。探究木材压缩应力-应变曲线分散性对木材缓 冲器的影响很有必要,考虑木材力学性能分散性使得 运输容器跌落数值仿真计算更为可靠。由于运输容器 的减震器设计主要利用木材的顺纹方向特性,重点对 顺纹方向的分散性进行研究。

2.1 试验描述

试验材料:泡桐木,密度为282 kg/m³,含水率 为9.9%,样件是尺寸为50 mm×50 mm×30 mm 立方 体,长度方向为顺纹。

试验条件:环境温度为 20~22 ℃,相对湿度为 35%。 试验方法:参照 GB/T 1935—2009 木材顺纹抗压 强度试验方法,加载方向为木材顺纹方向,其中顺纹 剪切强度测试方法根据特定的试件样式消除了剪切 面的正应力影响^[14]。

试验仪器: 105D 万能试验机。

2.2 试验结果

选取了减震器用到的木材批次,经过20组测试, 木材的压缩-应变曲线较为分散,木材的抗压屈服强 度的平均值为17 MPa,标准差为3 Mpa。如图4所 示,试件的比变形能分散性不大,因此可以忽略。为 此选取压缩屈服强度为14、17、20 MPa的3种曲线 进行数值模拟计算,比较不同抗压屈服强度的木材对 运输容器简体刚体加速度的影响。



图 4 木材顺纹抗压应力-应变曲线 Fig.4 Compressive stress-strain curve of wood along grain

2.3 仿真分析

根据 GB 11086—2019《放射性物品安全运输规 程》要求,需要考虑最危险的跌落姿态,一般为水 平跌落、轴向垂直跌落、角跌落等危险跌落工况。 为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样件的

薄弱位置, 以确保整机试验具有保守性和包络性^[15]。 过重心角跌落会对减震器造成严重的变形和破坏, 为了验证减震器的效果,取过容器重心9m角跌落 计算为例进行验证。

由于减震器不锈钢外壳厚度较薄,木材吸能占主 导作用。经过计算分析,容器刚体加速度如图5所示, 可以看出抗压屈服强度为 20 MPa 的填充木材在 0.015~0.02 s 内对容器造成更大的冲击; 在接触面积相 同时接触反馈更大的作用力,导致容器刚体加速度峰值 最大约为 900 m/s²。抗压屈服强度为 14 MPa 的填充木 材反馈的作用力较屈服强度 20 MPa 的木材小,容器刚 体峰值加速度是最小的,约为800m/s²。显然在减震器 吸能充足的情况下,抗压强度为 14 MPa 的填充木材缓 冲效果是最好的,通过更多的压缩行程来缓解跌落对 容器本体造成的冲击,较充分地利用了木材压缩的平 台区域;而抗压强度为 20 MPa 的填充木材,由于较 高的屈服强度平台吸收了能量,导致压缩行程比抗压 强度为 14 MPa 的填充木材的小,木材的压缩平台区 没有起到充分利用或没有压缩更多木材区域。



3种压缩强度木材的容器本体刚体 图 5 加速度时程对比 Fig.5 Time-history comparison of rigid cask body acceleration of three kinds of compressive strength wood

3种压缩强度的减震器的压缩行程如图 6 所示,可 以明显得出低抗压缩强度的填充木材压缩行程最大,压 缩点距离接触地面的位移由 308 mm 减小至 128 mm, 压缩了 180 mm。



在考虑木材分散性的前提下,容器跌落的刚体加 速度仍能够满足设计者提出的过重心角跌落刚体加 速度小于 150g 的要求,因此该减震器设计合理,可 应用到实际工程中。

3 减震器试验验证

为了验证减震器的设计,同时开展了9m过重心 角跌落试验测试^[16]。经过9m自由下落后,上减震器 先着地,上减震器发生严重变形,下减震器的变形较 小。上减震器在冲击力的作用下发生压缩,触地端被 压缩,同时上减震器顶部出现鼓包,如图7和图8所 示。容器本体基没有发生变形,螺栓没有变形,减震 器未脱落,说明减震器起到了吸能作用。



b 试验模型跌落结果

图 7 运输容器跌落后外形对比 Fig.7 Shape comparison of cask after dropping



图 8 上减震器跌落后外形对比 Fig.8 Shape comparison of upper shock absorber after dropping

通常有限元结果与实际试验结果必然存在误差。 对于跌落分析,主要通过结构变形差异来对比仿真计 算和试验结果,从而使仿真和试验互相验证。最终选 取木材平均抗压屈服强度为 17 MPa 的模型与试验进 行对照,是因为该模型上的减震器跌落后计算变形与 试验测量基本吻合。试验容器上共设置 12 个加速度 测点(A—L),A、B、C、D点布置在筒体上,加速 度计测点布置如图 9 所示。





以A测点为例,其加速度时程曲线对比见图 10。 曲线包含了原始测量数据和滤波后的数据,滤波采 用 150 Hz 的 Butterworth 滤波器将高频过滤。计算和 试验的测点加速度时程波形及峰值加速度均基本一 致,并且冲击持续时间范围也一致,峰值加速度为 $952 \sim 1~010~m/s^2{}_{\odot}$



图 10 测点 A 加速度对比 Fig.10 Comparison of acceleration at measurement point A

容器跌落后,对容器的密封性进行氦气检漏,满 足规范 GB 11086—2019 的要求。试验表明该运输容 器的减震器能够满足设计要求,并且验证了仿真分析 的合理性。

4 结语

本文针对某运输容器的减震进行优化设计,开展 了有限元分析和试验验证,得出结论如下: 1)研究给出了减震器合适的尺寸范围,并发现 减震器并不是越大减震效果越好。

2) 在对木材填充材料的减震设计时需要考虑木 材分散性带来的影响。在木材能够充分吸收跌落产生 的动能时,低抗压强度的填充木材可以充分利用压缩 的平台区,使得更多的木材进入压缩平台区,会有更 好的缓冲效果。

3)低抗压强度的填充木材吸收能量不如较高抗 压强度的,设计时需要考虑填充木材能否完全吸收能量,需要留有一定的保守裕量,防止木材由于分散性 导致抗压强度低而不能完全吸能。

4)当填充木材抗压强度较大,跌落时会导致容器本体刚体的加速度峰值变大,因此设计时需要保守考虑峰值加速度带来的影响。

综上,填充木材的分散性偏大或偏小都会对设计 产生影响,设计时需要提前考虑这种因素。最终试验 结果与仿真结果吻合,验证了减震器设计合理,该减 震器能够应用于工程中。

参考文献:

- [1] 汪海,童明炎,孙胜,等. 乏燃料运输容器研究进展
 [J]. 机械工程师, 2015(12): 65-69.
 WANG Hai, TONG Ming-yan, SUN Sheng, et al. Research Progress of Spent Fuel Transport Container[J].
 Mechanical Engineer, 2015(12): 65-69.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] NEFFATI A, KALCK C, ISSARD H. Development of Innovative Solutions for High Performance Impact Limiters on Transport Casks[C]// Proceedings of the 18th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, 2016: 1-10.
- [5] 汪佳明. IAEA TS-R-1《放射性物质安全运输条例》
 (2009 版)对其 1996 版(2003 修订版)的变更[J]. 辐射防
 护, 2011, 31(1): 57-61.

WANG Jia-ming. Changes of IAEA TS-R-1 Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2009 Edition) Relative to Its 1996 Edition (As Amended 2003)[J]. Radiation Protection, 2011, 31(1): 57-61.

- [6] 刘新华. 《放射性物质安全运输规程》(GB 11806) 实用指南[M]. 北京:科学出版社, 2015: 1-32.
 LIU Xin-hua. Guide for Regulations for the Safe Transport of Radioactive Substances[M] Beijing: Science Press, 2015: 1-32.
- [7] 李越,肖德涛,刘新华,等.我国乏燃料运输现状探 讨[J]. 辐射防护,2016,36(1):31-39.
 LI Yue, XIAO De-tao, LIU Xin-hua, et al. Discussion on the Present Situation of Spent Fuel Transportation in China[J]. Radiation Protection, 2016, 36(1): 31-39.
- [8] WEINER R F, AMMERMAN D J. Spent Fuel Transportation Risk Assessment: Transportation Accident Analysis[J]. Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material, 2013, 24(3): 147-157.
- [9] 邢攸冬,杨思一,安钰坤,等. 核乏燃料运输容器减 震器填充材料研究进展[J]. 包装工程, 2019, 40(21): 111-117.
 XING You-dong, YANG Si-yi, AN Yu-kun, et al. Research Progress in Impact Limiter Filling Materials for

Nuclear Spent Fuel Transport Casks[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(21): 111-117.

- [10] 周玉清. RY-I 型乏燃料运输容器设计,试验概况[J]. 辐射防护通讯, 1991, 11(5): 51-58.
 ZHOU Yu-qing. Design and Testing of RY-I Spent Fuel Cask [J]. Radiation Protection Bulletin, 1991, 11(5): 51-58.
- [11] 徐朝阳, 徐德良, 贾翀, 等. 硬松类木材横纹压缩时 能量吸收特性研究[J]. 包装工程, 2014, 35(17): 11-14. XU Zhao-yang, XU De-liang, JIA Chong, et al. Study on Energy Absorption Characteristics of Hard Pine Wood during Transverse Compression[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(17): 11-14.
- [12] 李继承,张斌,谢若泽,等.软木材料力学行为及其 缓冲吸能特性研究进展综述[J].装备环境工程,2021, 18(5):68-78.

LI Ji-cheng, ZHANG Bin, XIE Ruo-ze, et al. Research Advance on the Mechanical Behaviors and Energy Absorption of Soft Wood[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(5): 68-78.

[13] 钟卫洲,邓志方,魏强,等.不同加载速率下木材失效行为的多尺度数值分析[J].中国测试,2016,42(10):79-84.
ZHONG Wei-zhou, DENG Zhi-fang, WEI Qiang, et al. Multi-Scale Numerical Analysis on Failure Behavior of

Wood under Different Speed Loading Conditions[J]. China Measurement & Testing Technology, 2016, 42(10): 79-84.

[14] 四川省建筑科学研究所结构室木材组. 木材顺纹剪切 强度试验方法的研究[J]. 建筑技术科研情报, 1976(3): 21-36.
Sichuan Institute of Building Science. Study of a Test Method for Smooth Grain Shear Strength of Wood[J]

Building Technology Research Information, 1976(3): 21-36.

[15] 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. Analysis Technology of Falling Attitude of Fuel Transport Container[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 20-24.

[16] 中国核电工程有限公司. 2203ZHB02 A 版 RY-IA 运输容器延寿分析评价报告(安全分析报告)[R]. 北京:中国核电工程有限公司, 2022.
China Nuclear Power Engineering Co. 2203ZHB02 the RY-IA Transport Vessel Life Extension Analysis Evaluation Report (Safety Analysis Report)[R]. Beijing: China Nuclear Power Engineering Co., 2022.

责任编辑:曾钰婵