

乏燃料运输容器木材减震器设计

兰天宝^{1,2}, 白旭娟¹, 冯天佑¹, 盛锋^{1,*}, 卢可可¹

(1. 中国核电工程有限公司, 北京 100840; 2. 天津大学 化工学院, 天津 300350)

摘要: 为解决木材作为乏燃料运输容器减震器填充材料时力学性能中的分散性和尺寸效应问题, 本文开展了小尺寸木材压缩试验和足尺寸构件压缩试验; 采用 LS-DYNA 有限元分析软件建立了试验构件模型, 并对比了足尺寸构件模拟结果与压缩试验结果; 基于小尺寸木材和足尺寸构件试验获得的泡桐木力学性能数据开展了运输容器跌落分析; 通过运输容器原型样机的过重心角跌落测试验证减震器设计。计算和试验结果表明, 在泡桐木的弹性和平台阶段, 模拟结果与试验数据吻合较好, 且基于小尺寸木材性能的仿真结果可以包络足尺寸构件试验结果。运输容器的自由跌落模拟结果表明, 减震器结构设计合理。9 m 过重心角跌落试验结果与仿真结果吻合, 验证了选用的泡桐木本构模型合理准确。应用高斯分布衡量木材屈服平台应力数据能提高减震器的可靠性, 该方法可以替代足尺寸构件试验, 从而减少研发成本。

关键词: 泡桐木; 运输容器; 减震器; 构件试验; 数值模拟

中图分类号: TL99; TB485.1; O328

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2024)11-2428-09

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0075

Design of Wood Impact Limiter for Spent Fuel Transportation Casks

LAN Tianbao^{1,2}, BAI Xujuan¹, FENG Tianyou¹, SHENG Feng^{1,*}, LU Keke¹

(1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: A fuel transport cask is a critical piece of equipment utilized for transporting radioactive substances. Its safety performance is directly linked to public safety and environmental protection. The spent fuel transport casks play a vital role in effectively preventing the leakage of radioactive substances and ensuring the safety of the transport process. The impact limiter in the spent fuel transport cask is a crucial component that effectively reduces vibration and shock during the transport process. It also protects the radioactive materials in the container from high acceleration loads. Researchers commonly use wood as a filler material for impact limiters to improve the damping effect of spent fuel transport casks. Wood, being a natural material, possesses good shock absorption properties. However, due to the dispersion of its mechanical properties and size effects, it requires thorough study and analysis. Therefore, in this study a small-scale compression test was initially conducted, and the Gaussian stress distribution of the yield platform of paulownia wood was obtained through the experiment to lay the foundation for subsequent research. Secondly, a full-scale compression test on wood components was conducted, and a test component model was established using LS-DYNA finite element analysis

software. Through comparing and analyzing the test results, the simulation results were obtained. The results indicate that in the elastic and plastic stages, the simulation results are in good agreement with experimental data. It is observed that the compression-displacement results of the full-size can be approximated by the yield platform data of the small size with a 75% confidence interval. Finally, the design of the wooden impact limiter was analyzed, and a 9 m free drop simulation of the transport cask was conducted. Through simulation analysis, it is found that the design of the impact limiter structure is reasonable because it can effectively reduce the impact of the free drop. A drop test of the prototype from a height of 9 m above its centre of gravity was conducted. The test results are consistent with the simulation, further confirming the reasonableness and accuracy of the selected Constitutive model. Applying Gaussian distribution to measure the stress data of wood yield platform can improve the reliability of impact limiter, which can replace full-scale component testing and reduce research and development costs. This is beneficial for reducing research and development costs and enhancing the safety performance of transport casks. The research results are highly significant for enhancing the safety of radioactive materials during transportation.

Key words: paulowina wood; transport cask; impact limiter; component test; numerical simulation

随着我国核电行业的快速发展,核电站乏燃料累计存量将在2025年突破14 000吨^[1]。为缓解核电站乏燃料的贮存压力,乏燃料需要及时外运,乏燃料运输容器是运输或管理乏燃料组件的专用设备,确保放射性物质安全运输和避免放射性物质泄漏,其安全设计十分重要。运输容器的设计要满足现行的《放射性物品安全运输规程》^[2],规程中对事故工况要求之一:容器由9 m高度自由跌落后,仍能保持容器结构完整性和密封性。减震器的功能是吸收冲击的能量来保护容器,因此减震器设计是影响运输容器的主要因素之一,减震缓冲材料的开发和应用一直是各类运输容器的重点研究内容^[3]。

乏燃料运输容器减震器的填充材料需要具备优异能量吸收、限制过载、密度低且受环境影响较小等特性。木材具有取材容易、加工方便、成本低廉、节能环保等优点,且相比泡沫铝和聚氨酯泡沫,有较高的比吸能量(单位重量吸收的能量),因此成为乏燃料运输容器减震器填充材料的首选材料。目前运输容器减震材料以泡桐木、杉木、白毛杨为主,如法国的TN系列运输容器,其减震器所用填充材料为木材^[4]。运输容器的减震器通过木材压缩吸收能量,因此需要关注木材的大变形和压溃特性。木材作为一种自然材料,其力学性能存在分散性,从而会影响其减震、吸能特性。为节省研发成本,通常采用小尺寸试验获得

木材基本材料性能数据,但小尺寸的木材力学性能与工程应用的足尺寸木材的实际情况偏差大。为解决分散性和尺寸效应问题,提高减震器吸能效果的可靠设计,本研究采用概率方法进行减震器设计,通过对泡桐木屈服应力平台进行概率分布统计获得其高斯分布,并开展小尺寸试验和足尺寸构件试验,对比试验结果,为减震器的设计提供依据。

1 材料模型及试验

1.1 小尺寸木材试验

试验材料取自制作减震器的泡桐木的同一批木材,试验材料采集完成后进行锯解和干燥。减震器对木材的气干密度和湿度有严格要求,因此对烘干后的木材进行筛选,剔除木材木结、髓心等材质不均匀部位。将试验件制作成 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ ($R\times T\times L$, R 表示横纹径向, T 表示横纹弦向, L 表示顺纹方向)的试验件,如图1所示。



图1 试验木材结构示意

Fig. 1 Illustration of test wood sample

采用英斯特朗 8800 型万能力学试验机, 参照《木材横纹抗压试验方法》^[5] 和《木材顺纹抗压强度试验方法》^[6] 开展横纹和顺纹抗压试验, 静态压

缩速率控制在 1 mm/min, 每组试验次数不低于 30 次, 最终获得的泡桐木的应力-应变曲线如图 2 所示。

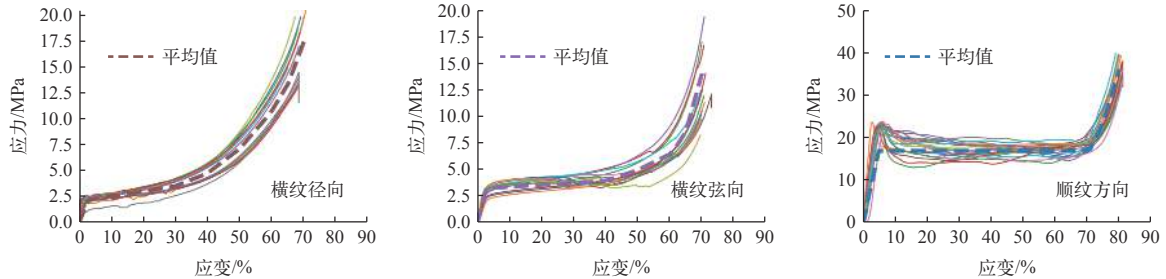


图 2 泡桐木木材的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of paulowina wood

图 2 显示, 泡桐木的性能可以认为是横纹(径向和弦向)各向同性的, 与顺纹相异, 泡桐木受压吸能时其应力-应变曲线分弹性阶段、屈服阶段和压实阶段。木材的吸能与木材压缩应力-应变曲线包络的面积相关, 其中屈服平台应力和压缩应变决定了吸能包络面积, 是减震材料的关键参数, 平台屈服应力决定了木材能够传递的最大持续力, 材料的平台阶段越长越有利于缓解冲击载荷^[7]。

1.2 压缩本构模型选取

为获得木材吸能特性, 有必要选取或开发一个合适的本构模型。木材的本构模型是木材受力全过程中应力-应变关系的函数关系。目前, 基于对木材全过程受力行为的认识, 已逐渐建立了两类典型本构模型: 经验本构模型和理论本构模型^[8], 其中经验本构模型基于试验应力-应变曲线, 采用数据拟合法建立, 应用更广泛。基于所采用力学理论不同, 理论本构模型可分为弹性本构模型、弹塑性本构模型、弹性损伤本构模型和弹塑性损伤本构模型。已有学者建立了木材的本构模型, 如 Valipour 等^[9] 将木材视为复合材料, 其增强材料在拉伸和压缩下的机械性能不同; Li 等^[10] 认为, 木材径向和弦向的力学性能与顺纹相比相差较大, 但径向和弦向的力学性能近似; Aimene 等^[11] 认为, 木材的横纹压缩行为是由细胞的弹性和弹塑性屈曲导致的, 可将木材简化为各向同性多孔材料。

通过对泡桐木大变形压缩试验结果分析, 发现泡桐木在静态压缩载荷作用下表现出的力学特

性符合多孔材料的特征。Liu 等^[12] 建立的多孔材料本构方程, 较好地描述了多孔材料的压缩力学特性和宏观应力应变关系, 本文参考 Liu 等提出的多孔材料本构方程:

$$\sigma(\varepsilon) = A \frac{e^{\alpha\varepsilon} - 1}{B + e^{\beta\varepsilon}} + e^C (e^{\gamma\varepsilon} - 1) \quad (1)$$

式中: ε 为压应变; σ 为压应力; A 、 B 、 C 、 α 、 β 、 γ 均为材料参数, 与材料的屈服行为、变形阶段、应力强化有关。

为了降低问题的复杂性, 本研究做以下假设:

1) 泡桐木是一种横向各向同性的连续材料; 2) 材料模型能体现木材的压溃特性, 即能反映弹性阶段、屈服平台阶段、致密阶段; 3) 在无横向约束的情况下, 木材压溃时的应力状态为单轴应力状态。

结合以上分析, 最终在弹性阶段以不同方向弹性模量和剪切模量建立表征参数; 屈服阶段假设为完全可压缩过程, 采用应变-应力对应关系描述; 屈服平台阶段由压缩率阈值和屈服平台应力描述; 压溃阶段当作完全理想塑性材料。为获取合理、可靠的材料本构模型参数, 根据式(1)对泡桐木的压缩试验数据平均值进行拟合, 结果如图 3 所示。由图 3 可见, 式(1)能较好地拟合泡桐木的应力-应变试验数据, 其对泡桐木横纹径向、横纹弦向、顺纹压缩试验数据拟合的可决系数 R^2 分别为 0.990、0.997 和 0.901。

木材在使用过程中会承受冲击载荷, 应考虑应变率对其性能的影响, 高应变率下的木材压溃平台应力相比静态增长 10%~20%, 结合小尺寸测

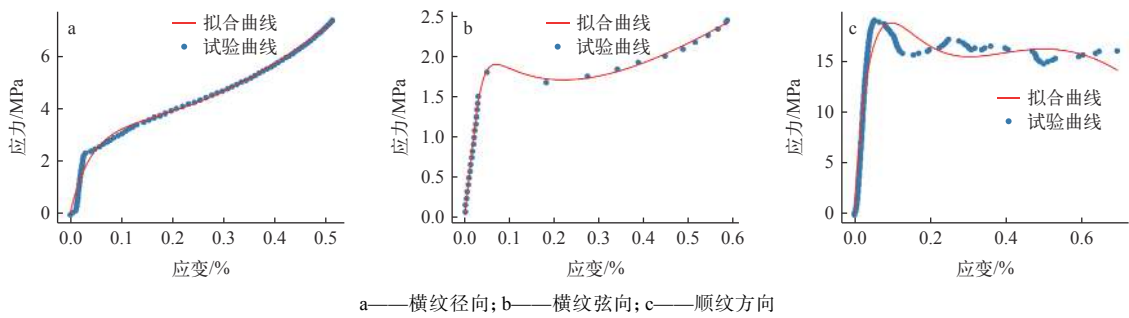


图3 泡桐木木材的不同方向应力-应变拟合曲线
Fig. 3 Stress-strain fitting curve for paulowina wood

试数据,其影响因素已被木材分散性包络。Palamidi等^[13]利用分离式霍普金森杆装置开展了泡桐木的动态性能测试,分别测试了泡桐木横纹弦向、横纹径向、顺纹3个方向的应力-应变曲线,如图4所示。可见在泡桐木顺纹方向屈服平台的应力增加更明显,横纹屈服应力受应变率影响较小。

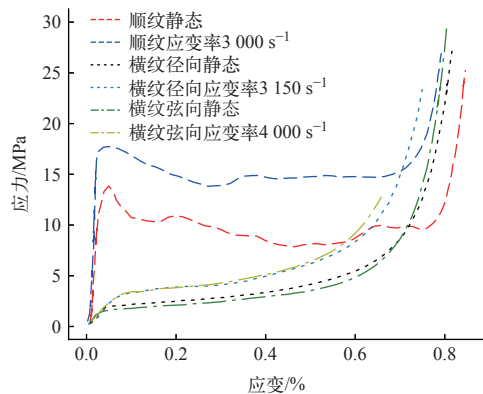


图4 Palamidi等^[13]获得的泡桐木动态特性曲线
Fig. 4 Dynamic characteristic curves of paulowina wood obtained by Palamidi et al^[13]

关于应变率对工程材料屈服应力的影响,由试验数据整理所得的经验公式主要有两类:幂函数律和对数律^[14],其表达式分别如式(2)、(3)所示:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^n \quad (2)$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 1 + \lambda \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \quad (3)$$

式中: σ 为屈服应力; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为静态应变率,可取 0.001 s^{-1} ; σ_0 为准静态试验 ($\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0$) 下的屈服应力; n 和 λ 为表征材料应变率敏感性的常数。

本文应用 Palamidi 等^[13]的数据,分别采用对

数律和幂函数律预估应变率对泡桐木顺纹方向应力屈服平台的影响,忽略横纹方向的应变率强化影响。根据图4不同应变率下的屈服平台增强数据可得 n 和 λ 分别为 0.03 和 0.04,可见相比金属材料,应变率对泡桐木应力强化影响较小。后续将开展跌落测试验证,考虑成本和木材分散性等影响,不再额外进行材料动态特性测试,直接采用式(2)进行本构模型修正。

减震器主要利用的是木材顺纹方向的吸能能力,本文忽略木材其他参数的分散性影响,主要考虑木材顺纹抗压强度,采用正态分布(高斯分布)模型对木材顺纹屈服平台数据进行概率分布拟合,并采用最小二乘法确定相关概率分布模型的关键参数。基于已有试验数据,发现高斯分布能够得到泡桐木顺纹应力平台数据的最佳拟合。本文参考木材相关力学性能关于强度标准值的研究,选取 75% 的置信区间作为参考^[15],根据拟合的高斯概率模型得到木材屈服应力 75% 和 95% 置信区间分别为 [15.8, 20.1] 和 [14.3, 21.6],平均值为 17.9 MPa。可以看出,在 75% 的置信区间内,木材约有 10% 的分散性,在 95% 的置信区间内,木材约有 20% 的分散性。

1.3 足尺寸构件试验与仿真结果对比

运输容器冲击跌落时,木材外部包覆一层较薄的不锈钢外壳,因此填充木材的实际受力可能不仅包含单向压缩力,还包含来自外壳的约束力。因此木材的实际受力状态是多轴的,为保持与实际受力状态一致,开展足尺寸构件试验研究多轴应力下木材的压缩特性。由于木材的孔隙特性,小体积木材实际上比大体积的强度略高,因此足尺寸构件试验的木材体积与运输容器减震器填充木材体积更接近。

足尺寸构件由圆柱形泡桐木和不锈钢外壳组成。圆柱形泡桐木装在圆柱钢板筒内,并与不锈钢外壳外沿齐平,上、下面通过焊接方式与外筒连接。足尺寸构件分为3种:横纹构件、顺纹构件和斜纹(45°)构件,分别反映木材的纹理方向,如

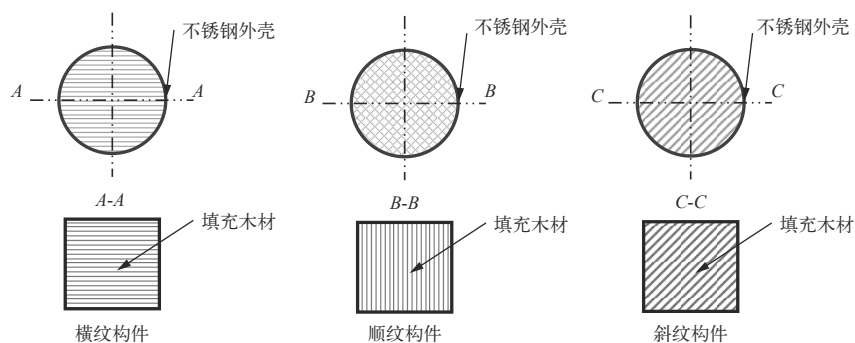
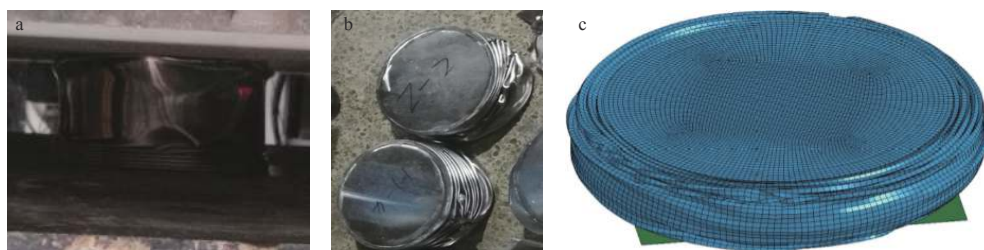


图5 足尺寸构件示意图

Fig. 5 Schematic diagram of full-size components

图5所示。每类构件开展5组大变形压缩试验。

对足尺寸构件进行压缩方向的承载试验,并使其最终失效,可得到载荷-变形关系曲线和失效载荷。足尺寸构件最终被压溃为饼形,如图6所示。



a——构件准静态压缩中的变形;b——构件压缩完形貌;c——仿真构件压缩完形貌

图6 足尺寸构件失效形式

Fig. 6 Failure form of full-size components

为了确定足尺寸构件的变形行为和验证木材本构模型,开展了横纹、顺纹及45°方向的仿真计算,使用Cowper-Symonds模型描述金属弹塑性表现,相关参数参见文献[16]。为快速获得计算结果,可以通过提高加载速率来缩短计算时间,或通过提高计算模型的质量来增大显式分析时间步长。准静态压缩中,系统能量随时间的变化如图7所示。分析图7可知,系统的能量主要由木材和金属外壳的变形能构成,动能可忽略,因此放大模型的质量不会对计算结果产生偏差,本研究采用增加模型质量的方式来缩短计算时间。

采用LS-DYNA显式仿真程序对足尺寸压缩过程进行模拟,图6c显示足尺寸构件最终被压溃为饼形,与试验结果一致,这初步说明之前的假设和选取的本构模型是合理的。

为了进一步验证本构模型的精确性,比较了

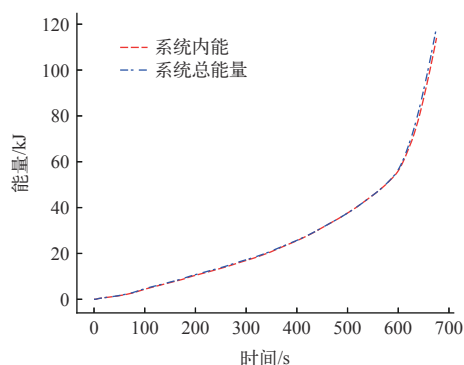


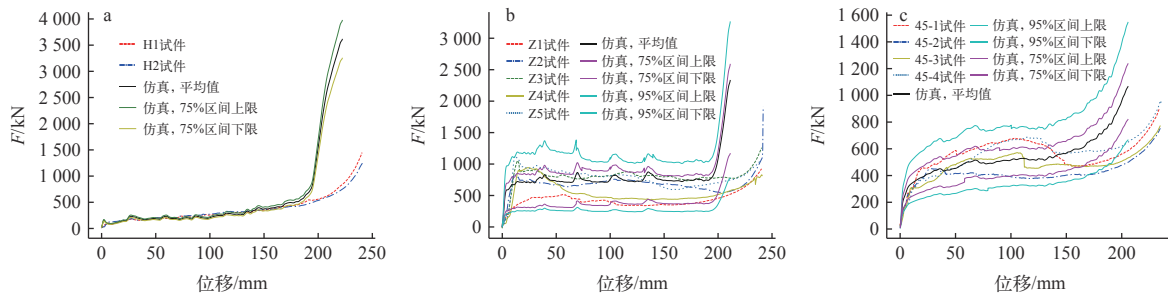
图7 准静态压缩系统能量

Fig. 7 System energy of quasi-static compression

3种类型构件的力-位移计算曲线与试验曲线,开展了5组3个方向试验,即横纹H-1~H-5试件(顺纹为Z-1~Z-5,45°斜纹为45-1~45-5;H-1~H-5、Z-1~Z-5、45-1~45-5分别为横纹、顺纹和斜纹木材编号),但试验过程,部分构件发生倾斜偏

转, 导致数据异常, 因此本文仅列出试验正常开展、可供参考的数据。试验结果与仿真结果如图 8 所示。由图 8 可见, 在压缩行程 200 mm 内, 仿真结果与试验结果吻合较好, 但在 200 mm 行程后, 仿真结果偏离试验结果, 存在较大误差。导致该

现象的原因为, 200 mm 行程后木材已被压实, 有限元模型中的木材网格质量较差, 但运输容器减震器仅利用木材压溃平台阶段, 避免木材进入压实阶段, 因此在关注的区域阶段, 该本构模型能满足工程需要。



a——横纹构件; b——顺纹构件; c——45°方向构件
图 8 构件压缩力-位移曲线

Fig. 8 Compressive force-displacement curve of wood in stainless steel tank

对比分析可以发现, 足尺寸构件的力-位移曲线基本被 75% 置信区间的泡桐木抗压屈服强度包络, 95% 的置信区间更保守, 这是因为足尺寸构件是由多组木材构成的宏观整体, 相比小尺寸试件, 足尺寸构件材料性能更平均, 因此表现出的性能可以被极端的小尺寸试验所包络。因此在进行运输容器初步分析设计时, 可采用木材抗压屈服强度的平均值进行初步设计, 后续再进行敏感性分析或可靠性设计。

已有研究^[17]建立了屈服强度(σ)和纤维负载角 α 之间的关系, 如式(4)所示:

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_{\parallel}\sigma_{\perp}}{\sigma_{\parallel}\sin^2\alpha + \sigma_{\perp}\cos^2\alpha} \quad (4)$$

式中: σ_{\parallel} 表示平行于纤维方向, 适用于木材时即为顺纹; σ_{\perp} 表示垂直纤维方向, 即木材横纹。

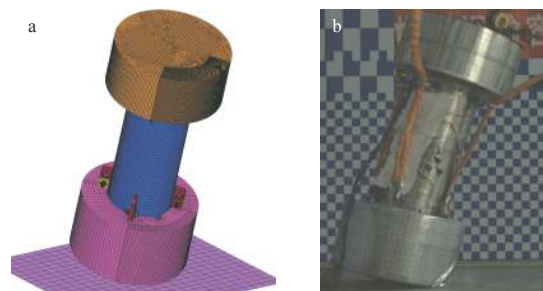
45°方向的木材屈服平台应力与式(4)计算的数值较为吻合, 验证了屈服强度和纤维角度的关系。

2 仿真分析及讨论

2.1 模型简介

基于小尺寸试件和足尺寸构件的试验数据, 完善运输容器数值模型。运输容器模型由上下减震器、容器本体、内部吊篮等主要部件组成, 分析模型如图 9 所示。采用 LS-DYNA 显式仿真程序计算得 9 m 自由跌落冲击响应, 其中上下减震器

的填充材料为泡桐木, 外部包覆不锈钢薄壁, 主要部件的单元类型和数量如表 1 所列。



a——运输容器 9 m 角跌落仿真模型; b——上减震器触地
图 9 运输容器 9 m 角跌落示意

Fig. 9 Schematic for 9 m corner drop analysis of transport cask

表 1 主要部件信息

Table 1 Description of key components in cask

部件	单元类型	单元数量	材料
容器本体	实体单元	143 564	0Cr18Ni9
填充木材	实体单元	107 856	泡桐木
减震器外壳	壳单元	36 709	0Cr18Ni9
吊篮	壳单元	70 631	0Cr18Ni9
螺栓	实体单元	86 183	0Cr17Ni4Cu4Nb

对模型施加初速度 13.4 m/s 和重力加速度等初始条件, 速度值为物体由 9 m 高度自由下落到近地面时的值。减震器触地时, 接触区域将会发

生较大变形,为了获得精确的变形,减震器的网格在接触区域进行了细化。

2.2 仿真结果

模型系统能量随时间分布的仿真计算结果如图10所示。由图10可见,忽略容器在自重下的做功,整个系统能量守恒,系统的沙漏能控制在5%以下,表明模型参数、接触等设置准确可靠。

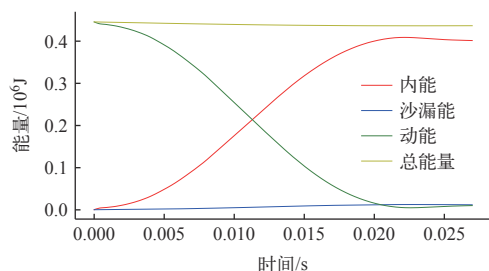


图10 运输容器9 m角跌落过程中容器总能量、动能及应变能的历程

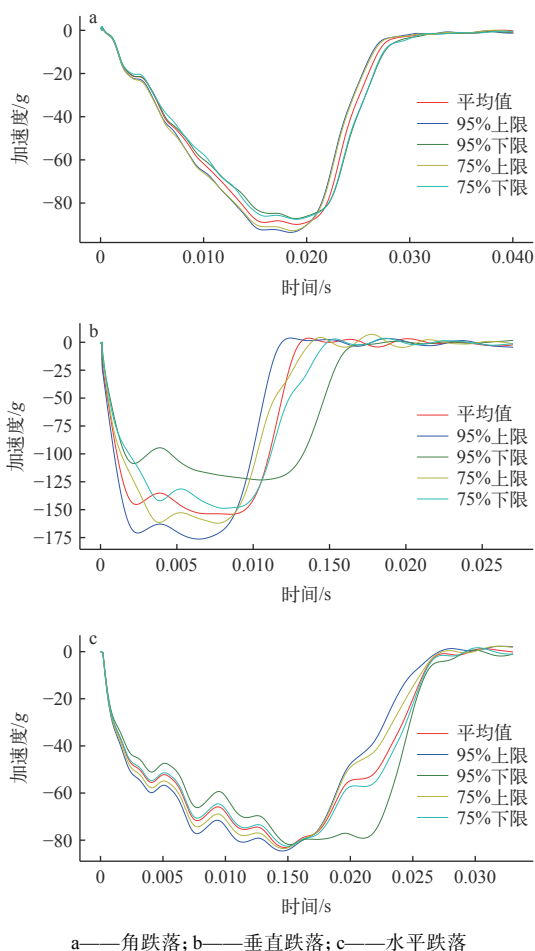
Fig. 10 Time history of total energy, kinetic energy and internal energy of cask

运输容器在跌落时会产生各种姿态,通常可以分为3类:轴向垂直跌落、水平跌落、角跌落,这就要求减震器能承受各个方向的冲击,全方位地保护运输容器。本研究对3种工况进行了讨论分析。为研究木材屈服平台对运输容器跌落动态响应的影响,分别采用75%置信区间(16、20 MPa)、95%置信区间(14、21.6 MPa)和均值18 MPa的屈服平台应力开展9 m角跌落分析、垂直跌落分析及水平跌落分析,结果示于图11。其中加速度 $g = 9.82 \text{ m/s}^2$ 。由图11a可见,角跌落工况下,木材屈服平台对运输容器刚体加速度的影响不大,各置信区间的加速度响应接近。

由图11b可见,不同的置信区间,木材的分散性在垂直跌落工况下的区别较明显,75%置信区间下垂直跌落时,与平均值相比,运输容器筒体刚体加速度响应相差可达约6%,而95%置信区间下相差可达20%。

由如图11c可见,水平跌落工况木材的分散性不如垂直跌落工况明显,但木材屈服平台应力较小时,会出现吸能不足的情况。木材分散性对各方向的跌落响应影响主要受木材顺纹在减震器的布置方向决定。

因此,木材的抗压屈服强度是运输容器设计的关键参数,较小抗压屈服强度的填充木材会获



a——角跌落; b——垂直跌落; c——水平跌落

图11 不同抗压强度下运输容器跌落时筒体刚体的加速度响应

Fig. 11 Rigid-body acceleration response of containers with different compressive strengths in corner drop

得更好的减震效果,但其压缩行程较大,在水平跌落时有可能出现筒体触地的风险;较大的抗压强度填充木材,其压缩变形较小,但其筒体峰值加速度响应较大。即“小强度”有“宽波形”“低峰值”的特点,“大强度”有“窄波形”“高峰值”的特点。低强度的木材,会有更好的缓冲效果,但容易被压实,高强度木材有一定冗余,但会增大容器加速度响应。

仿真计算表明,减震器能够满足设计要求,未发生脱落分离,对容器本体起到保护作用。计算的容器刚体加速度小于200g,满足技术规格书的设计要求,因此可以开展样机试验,验证仿真的合理性。

3 跌落试验及对比

3.1 跌落试验

为了验证减震器的设计,同时开展等比例模

型 9 m 过重心角跌落试验, 试验中确保容器开口端朝下。试验容器上共设置 12 个加速度测点 (A~L) 布置在筒体上, 采样频率为 200 kHz。加速度计布点如图 12 所示, 加速度计最大量程为 10 000g, 频率响应范围为 1~5 000 Hz。

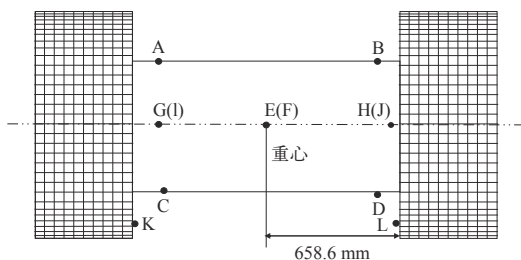


图 12 加速度计测点布置示意图
Fig. 12 Accelerometer measurement point arrangement

3.2 试验与仿真对比

通过高速摄像机记录容器跌落时的状态, 如图 9a 所示, 经过 9 m 自由下落后, 上减震器(容器开口端)首先触地, 发生严重变形, 随后容器发生翻转, 下减震器触地, 下减震器的变形较小。上减震器在触地区域产生褶皱大变形; 跌落, 观察发现容器本体没有发生明显的塑性变形, 减震器未脱离运输容器本体, 说明减震器起到了吸能和容器保护的作用。容器跌落时上减震器变形仿真结果与试验结果的对比如图 13 所示, 可见减震器触地端发生压缩, 形成褶皱, 木材未发生

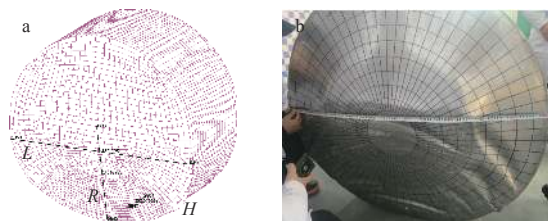


图 13 容器跌落时上减震器变形仿真结果(a)与试验结果(b)的对比

Fig. 13 Comparison of simulation results (a) with experimental results (b) of upper impact limiter deformation

大变形压缩, 上减震器跌落, 计算所得变形与试验测量结果基本吻合, 实测变形范围为 $L \times R \times H = 1\ 100\ \text{mm} \times 590\ \text{mm} \times 200\ \text{mm}$ 。

因 G 和 I 测点的信号线在跌落过程中被容器压断, 导致其测量失效, 因此缺失这两个测点的数据。采用 150 Hz 的 Butterworth 滤波器对原始数据滤波, 得到的加速度时程曲线如图 14 所示。经受冲击后, 试验测点数据发生零飘, 即冲击结束后加速度归零发生偏移, 但不影响冲击前的信号记录, 因此可仅参考零飘发生前的数据。

由图 14 可见: 计算值能够包络试验值; 各测点的加速度时程曲线形状基本一致, 且冲击持续时间也一致, 峰值加速度在 $90g \sim 100g$ 之间。试验结果表明, 该运输容器的减震器满足设计要求, 同时验证了仿真分析的准确性。仿真和试验结果均验证了减震器可以有效吸收自由跌落的冲击能

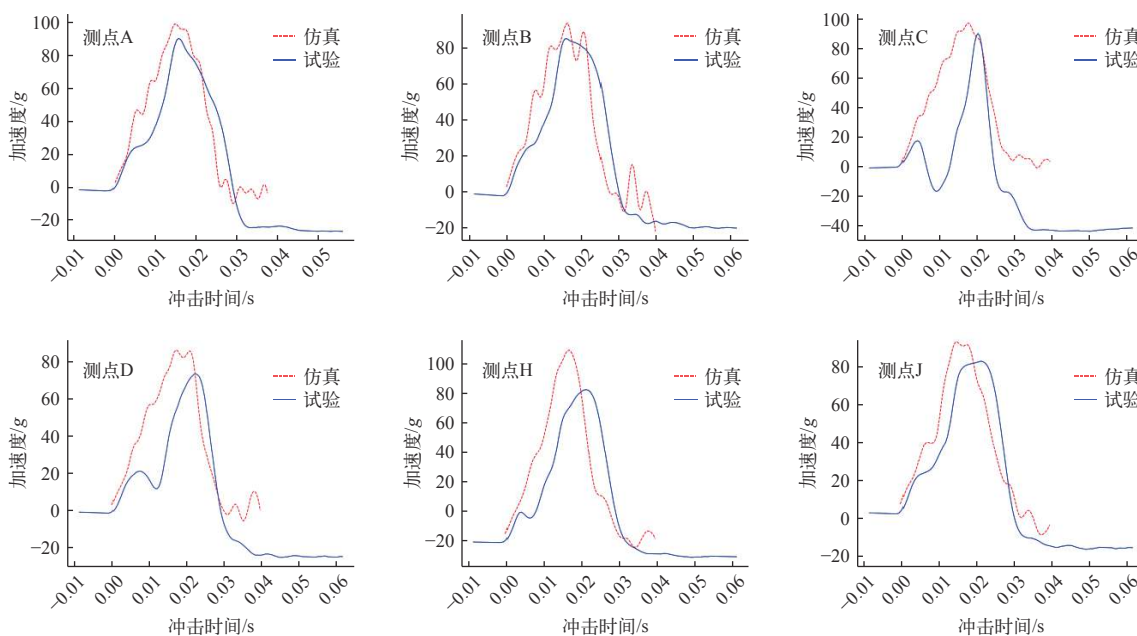


图 14 各测点加速度计算值与试验值对比

Fig. 14 Comparison of calculated and experimental values of acceleration at each measuring point

量,发挥了限制过载的作用。

4 结论

本文对泡桐木试样开展了样件大变形压缩试验、足尺寸构件试验、等比例运输容器样机跌落试验,选取合适的木材压缩本构模型,并开展相应的仿真分析及对比,得到以下结论。

1) 泡桐木材料的应力-应变曲线显示,木材力学性能存在较大分散性,初步设计时可按其平均值考虑,但工程应用时应综合其考虑上下限的影响,且每批次采购的木材均应进行材料性能分散性测试。

2) 考虑了材料方向、多轴应力状态、尺寸效应影响的足尺寸构件试验表明,选用的本构模型的模拟结果与试验结果符合良好。为节省材料,可依据 75% 置信区间进行设计,其可包络构件的响应结果。

3) 样机跌落测试的结果与仿真计算结果吻合,表明减震器可以有效吸收自由跌落的冲击能量,限制过载,再次验证选取的泡桐木力学本构模型准确合理。采用泡桐木材料屈服平台应力平均值的模拟计算与跌落试验最为接近,木材的分散性在垂直和水平跌落方向影响较大。

参考文献:

- [1] HJ 1355—2024 压水堆乏燃料运输容器设计要求[S]. 北京: 生态环境部, 2024.
- [2] GB 11806—2019 放射性物品安全运输规程[S]. 北京: 生态环境部, 2009.
- [3] 孙谦, 庄大杰, 孙洪超, 等. 核燃料组件运输容器应用现状概述[J]. 包装工程, 2022, 43(13): 142-150.
SUN Qian, ZHUANG Dajie, SUN Hongchao, et al. Overview of application status for nuclear fuel assembly transport package[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(13): 142-150(in Chinese).
- [4] 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 Youdong, YANG Siyi, AN Yukun, et al. Research progress in impact limiter filling materials for nuclear spent fuel transport casks[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(21): 111-117(in Chinese).
- [5] GB/T 1939—2009 木材横纹抗压试验方法[S]. 北京: 全国木材标准化技术委员会, 2009.
- [6] GB/T 1935—2009 木材顺纹抗压试验方法[S]. 北京: 全国木材标准化技术委员会, 2009.
- [7] 兰天宝, 朱思琪, 刘轩. 某乏燃料运输容器减震器设计及验证[J]. 包装工程, 2023, 44(7): 294-300.
LAN Tianbao, ZHU Siqi, LIU Xuan. Design and verification of shock absorber for a spent fuel cask[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(7): 294-300(in Chinese).
- [8] 张利朋, 谢启芳, 吴亚杰, 等. 木材本构模型研究进展[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(5): 286-304.
ZHANG Lipeng, XIE Qifang, WU Yajie, et al. Research progress on constitutive model for wood[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(5): 286-304(in Chinese).
- [9] VALIPOUR H, KHORSANDNIA N, CREWS K, et al. A simple strategy for constitutive modelling of timber[J]. Construction and Building Materials, 2014, 53: 138-148.
- [10] LI P, GUO Y B, SHIM V P W. A constitutive model for transversely isotropic material with anisotropic hardening[J]. International Journal of Solids and Structures, 2018, 138: 40-49.
- [11] AIMENE Y E, NAIRN J A. Simulation of transverse wood compression using a large-deformation, hyperelastic-plastic material model[J]. Wood Science and Technology, 2015, 49(1): 21-39.
- [12] LIU Q, SUBHASH G. A phenomenological constitutive model for foams under large deformations[J]. Polymer Engineering & Science, 2004, 44(3): 463-473.
- [13] PALAMIDI E, HARRIGAN J J. An investigation of balsa wood over a range of strain-rates and impact velocities[J]. Journal de Physique IV (Proceedings), 2006, 134: 225-230.
- [14] 谢若泽, 郭玲梅, 李尚昆, 等. 毛白杨静态压缩力学性能研究及吸能分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(5): 106-112.
XIE Ruoze, GUO Lingmei, LI Shangkun, et al. Investigation of quasi-static compression mechanical properties of populus tomentosa[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(5): 106-112(in Chinese).
- [15] 钟永, 武国芳, 任海青, 等. 基于正态随机样本确定结构用木质材料强度标准值的方法[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(11): 129-138.
ZHONG Yong, WU Guofang, REN Haiqing, et al. Determination method of characteristic strength for structural wood materials based on normal distribution and random sampling[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(11): 129-138(in Chinese).
- [16] LAN T, DONG J, SHENG F. Experimental and numerical investigation of scale model used in the development of a spent nuclear fuel transport cask[J]. Journal of Vibration and Control, 2024. doi: 10775463241237632.
- [17] HANKINSON R L. Investigation of crushing strength of spruce at varying angles of grain[J]. Air Service Information Circular, 1921, 3: 130.