

某燃料运输容器在多过程序贯冲击条件下的 动态力学响应特征

颜怡霞^{1,2}, 魏强^{1,2}, 张青平^{1,2}, 李继承^{1,2*}, 陈军红^{1,2},
张怡晨^{1,2}, 郝志明^{1,2}, 李明海^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999;
2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘要: **目的** 识别某燃料运输容器在国标规范要求的多过程序贯冲击条件下的冲击响应特性, 为运输容器的安全设计及防护措施等提供参考。**方法** 开展运输容器在 1.2 m 高度侧跌、钢棒 1 m 高度贯穿、500 kg 重物 9 m 高度冲砸和 1 m 高度穿刺等 4 种事故场景顺序叠加作用条件下的多过程序贯冲击试验, 同时开展相应的冲击损伤累积有限元模拟分析, 研究运输容器结构在多种冲击载荷序贯叠加作用下的动态响应特征。**结果** 模拟结果同试验结果符合较好, 验证了冲击损伤累积有限元模拟方法的正确性和实用性。试验结果和数值模拟结果均显示在多过程序贯冲击条件下, 容器缓冲结构起到很好的防护作用, 可对燃料部件产生有效防护, 且结构功能保持完好。**结论** 燃料运输容器具有很好的缓冲性能, 可以满足国标规定的多过程序贯冲击条件下的防护要求。冲击损伤累积有限元模拟方法可较准确地分析复杂结构在多过程序贯冲击条件下的动态响应特征, 具有较好的实用性。

关键词: 运输容器; 缓冲设计; 多过程序贯冲击; 冲击损伤累积; 有限元模拟

中图分类号: TB122

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)19-0092-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.19.008

Dynamic Response Characteristics of a Fuel Transport Cask in Multi-process Sequential Impact Condition

YAN Yixia^{1,2}, WEI Qiang^{1,2}, ZHANG Qingping^{1,2}, LI Jicheng^{1,2*}, CHEN Junhong^{1,2},
ZHANG Yichen^{1,2}, HAO Zhiming^{1,2}, LI Minghai^{1,2}

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621999, China;
2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province,
Sichuan Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the dynamic response characteristics of a fuel transport cask under multi-process sequential impact scenarios required by related national standards to support the structural safety design and the protective technology for the cask. Firstly, multi-process sequential impact tests on the cask were conducted regarding to four accident scenarios, i.e., lateral drop at 1.2 m height, steel rod penetration at 1 m height, 500 kg weight impact at 9 m height, and puncture at 1 m height, etc. and then the corresponding finite element simulations considering impact damage accumulation were conducted integrated with the experiments. The dynamic response characteristics of fuel transport cask

收稿日期: 2024-08-15

基金项目: 四川省自然科学基金杰出青年科学基金项目 (2023NSFSC1913)

*通信作者

under the sequential impact condition of four accident scenarios were analyzed in detail. Related analysis showed that the simulation results agreed well with the experiment results, and thus the correctness and practicality of finite element simulation approach with cumulative impact damage were verified. Both the test results and numerical simulation results showed that the buffer structure of the cask played a very good role in protecting the fuel components under the condition of excessive penetration impact, and the structure and function remained intact. The fuel transport cask has good cushioning performance and can meet the protection requirements under the multi-process sequential impact condition. The impact damage accumulation finite element simulation method can accurately analyze the dynamic response characteristics of complex structures under multiple sequential impact conditions, and has good practicability.

KEY WORDS: transport cask; cushioning design; sequential impact; impact damage accumulation; finite element simulation

核燃料组件等产品从研制到使用通常会经历交通运输、装卸等过程,在此过程中可能面临意外跌落、碰撞以及冲击、挤压等异常事故,产品将经受严酷的冲击载荷并可能发生破坏,进而带来巨大经济损失甚至安全风险。为防止风险和降低损失,所采用的包装结构是确保产品安全性和可靠性的有效手段,其中核燃料组件的主要包装防护结构是燃料运输容器^[1-3]。大型燃料运输容器的防护效能一般通过填充式减震器来实现^[4-5],小型燃料运输容器的防护形式则较为多样^[6-8],近期清华大学采用多级防护思想,设计了一种小型燃料运输容器^[9],容器的缓冲吸能主要通过其外部的金属吸能结构实现,缓冲设计中考虑了冲击防护的万向性。

为确保核燃料组件的安全性,运输容器的设计需满足放射性危险货物安全性运输的要求,相应地需要进行国家标准《放射性物质安全运输 货包的泄漏检验(GB/T 17230—1998)》中规定的安全验证试验^[1],标准中所规定的运输事故条件试验验证场景包括自由跌落、贯穿、重物冲砸和穿刺等多种冲击试验。在进行试验验证之前,一般需要利用数值模拟分析运输容器的力学响应,进而设定最终试验条件;试验之后也需要借助数值模拟更为全面而深入地评估容器缓冲防护能力,并优化结构设计。相关方法可降低试验成本和风险,并有助于缩短产品设计周期。

近年来,数值模拟分析在燃料运输容器设计及安全性评估中得到越来越广泛的应用,逐渐成为识别运输容器响应特征、支撑运输容器试验验证及结构设计改进的有效手段^[10-17]。例如,钟卫洲等^[12]针对某放热性热源包装容器开展了不同姿态撞击钢靶的数值模拟研究,分析了包装容器的抗冲击性能和能量耗散机制;徐伟芳等^[13]基于有限元模拟分析,建立了抗事故包装箱的冲击分析技术,获得了包装箱模型件高速碰撞时的动力学响应;刘广东等^[15-16]对某乏燃料运输容器9 m侧跌的工况开展了数值模拟分析,结合模拟结果对运输容器完成了应力校核,并分析了运输容器密封特性。然而,目前针对运输容器等包装结构的冲击

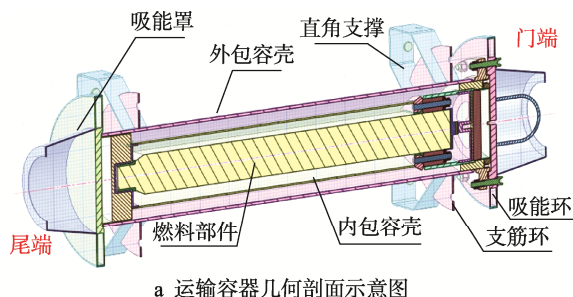
响应模拟分析大多只针对单次冲击状态,仍鲜见多种冲击载荷序贯加载条件下的结构动态力学响应研究。尽管也有研究者发展了冲击损伤累积方面的有限元模拟方法^[18-19],但相关分析结构和冲击工况仍相对简单,仍需要开展更多复杂结构和载荷条件下响应特性的数值模拟和分析工作。

本文针对清华大学设计的某燃料运输容器^[3]在事故运输各类冲击载荷作用下的力学响应,开展了1.2 m高度侧跌、钢棒1 m高度贯穿、500 kg重物9 m高度冲砸和1 m高度穿刺等4种事故场景顺序叠加作用的多过程序贯冲击试验;结合相关试验,发展了多过程冲击损伤累积有限元模拟分析,模拟过程中利用有限元完全重启动计算方法,将前1冲击场景的应力和变形,作为后1个冲击场景的初始条件,进而实现对4个冲击场景序贯加载的模拟分析,获得了多过程序贯冲击载荷作用下运输容器的力学响应;结合试验数据和有限元模拟结果,系统分析运输容器在多种冲击载荷序贯叠加作用下的动态响应特征。相关结论可为运输容器的安全设计及防护措施、安全性验证试验的条件设定等多方面提供参考。

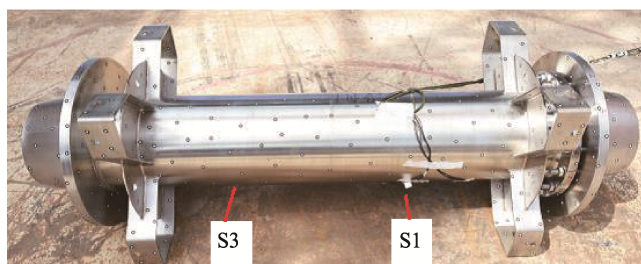
1 多过程序贯冲击试验

1.1 运输容器结构

燃料运输容器主要由外包容壳、内包容壳、内外包容壳间隔热缓冲结构、外包容壳外支撑缓冲结构等组成,结构示意图及真实试验件如图1所示。外包容壳外支撑缓冲结构包含吸能罩、吸能环、直角支撑及支筋环等,均为金属吸能结构件,其中内外包容壳的材质主要为06Cr19Ni10钢,外包容壳连接螺栓材质主要为A4-80钢。另外,运输容器为燃料部件设计了多道实体防护屏障,涉及松木、隔热复合纤维(硅酸铝复合纤维)、尼龙、丁腈橡胶、软木纸等多种非金属材料。从图1a中容器剖面图示可看出,右侧门端区域附近装配有对燃料部件进行固定和防护的复杂结



a 运输容器几何剖面示意图



b 运输容器试验件及测点位置

图1 某燃料运输容器结构
Fig.1 Structure of a fuel transport cask

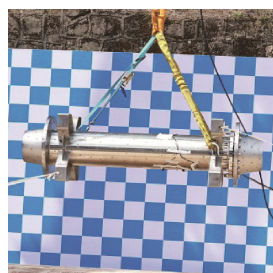
构,容器受撞击时冲击载荷可从外壳体区域经该结构较快地传递到达燃料部件,此外结构自身也容易发生局部损伤和破坏,因此该区域为容器中相对薄弱的部位。运输容器的安全设计要求为在运输过程中内部燃料部件不发生破坏,外包容壳和内包容壳主体不发生贯穿性破坏。

1.2 试验过程及结果

根据《放射性物质安全运输 货包的泄漏检验》(GB/T 17230—1998),利用运输容器开展了1.2 m高度侧面自由跌落、钢棒1 m高度贯穿、500 kg重物9 m高度冲砸和1 m高度穿刺等4种事故场景顺序叠加试验。相关试验场景如图2所示,各场景的具体冲击工况如下。1)跌落冲击:运输容器以水平姿态在1.2 m高度自由下落,侧面撞击刚性靶板。2)贯穿冲击:直径为3.2 cm、质量为6 kg的半球头钢棒在1 m高度自由竖直下落至运输容器薄弱部位(门端附近区域)。3)重物冲砸:质量为500 kg、截面尺寸为1 m×1 m的钢板在9 m高度坠落冲砸运输容器。4)穿刺冲击:运输容器在1 m高度跌落于截面尺寸为20 cm×20 cm的钢砧。试验中除观测运输容器的变形和破坏形貌,同时还测试关键位置的应力响应演化历程,通过安装在容器外壳体关键测点的应变仪来测量和记录应变时程曲线,具体安装情况如图1b所示,按安装位置和测量方向将其编号分别命名为“S1-0”“S1-90”“S3-0”和“S3-90”等,其中“0”表示沿容器初始轴线方向,而“90”表示沿容器中心轴纵截面方向,后文相关分析将沿用相应编号名称。

每一轮试验之后运输容器的变形形貌分别如图3所示,相应关键位置的应变变化特征将在后文同有限元模拟结果具体对比分析。从图3中可看出,运输容器顺序经历了4种冲击载荷之后,外包容壳、内包容壳、外包容壳连接螺栓等结构产生了不同程度的塑性变形,但均未发生破坏;内部燃料部件也基本无塑性变形,整体形状保持较好。在最终穿刺试验之后,对运输容器进行拆解、检查,结果显示运输容器结构均无严重损坏、脱焊,外包容壳和内包容壳结构主体完好,内部的燃料部

件可以正常取出,且无损伤、变形。试验结果说明运输容器结构强度满足相关安全性设计要求。



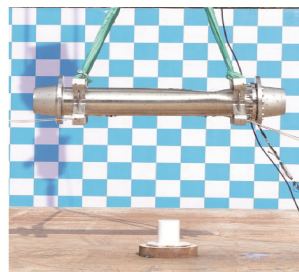
a 1.2 m高度侧面自由跌落



b 钢棒1 m高度贯穿



c 500 kg重物9 m高度冲砸

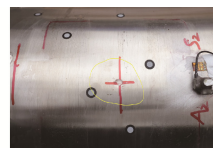


d 1 m高度穿刺

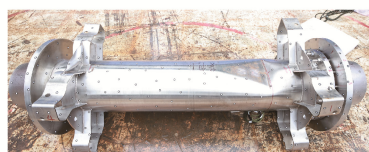
图2 运输容器4种冲击事故场景顺序叠加试验
Fig.2 Sequential impact tests for transport cask considering four accident scenarios



a 1.2 m高度侧面自由跌落



b 钢棒1 m高度贯穿



c 500 kg重物9 m高度冲砸



d 1 m高度穿刺

图3 运输容器在顺序经历各轮冲击加载之后的变形形貌
Fig.3 Deformation morphologies of cask after each round in sequential impact tests

2 冲击损伤累积有限元模拟分析

2.1 有限元几何模型

结合图1中运输容器结构和尺寸, 利用建模软件建立相应三维有限元几何模型。建模过程中对结构倒角、螺纹、U形提手等不影响主要承力和传力特征的细小结构进行了合理简化, 并采用六面体单元对结构进行网格划分, 其中螺纹连接简化为结构之间的共节点连接。按照实际情况建立各组件之间的装配关系, 例如外包容壳、隔热材料、内包容壳以及燃料部件之间设置为接触关系; 对于外包容壳、内包容壳等结构的螺栓连接, 相应地建立光螺杆连接结构模型, 鉴于强冲击条件下螺栓预紧力对其响应特征影响较小^[20], 模型中忽略相应螺栓预紧力; 对于焊接结构, 考虑实际焊接深度设置相应连接状态, 使其符合实际焊接状

态。所建立的有限元几何模型如图4所示, 可看出模型不仅较好地体现了实际运输容器的主要结构特征, 而且可较好地体现容器结构在冲击条件下的主要力学响应行为。

2.2 材料本构模型

针对容器结构中的金属材料, 采用弹塑性随动强化模型来描述其力学行为; 对于结构中的非金属材料, 由于无普适和相对成熟的材料模型, 先针对松木、隔热复合纤维、软木纸和丁腈橡胶等相关材料开展了大量静动态力学性能试验, 得到应力-应变曲线如图5所示, 之后基于分段线性塑性模型、可压缩泡沫模型等材料的本构模型, 结合相关材料的力学性能试验数据, 确定了各材料的本构模型及其材料参数。

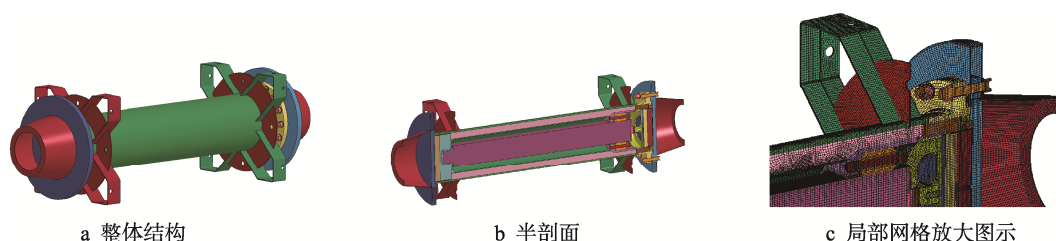


图 4 运输容器有限元几何模型

Fig.4 Finite element geometrical model of fuel transport cask

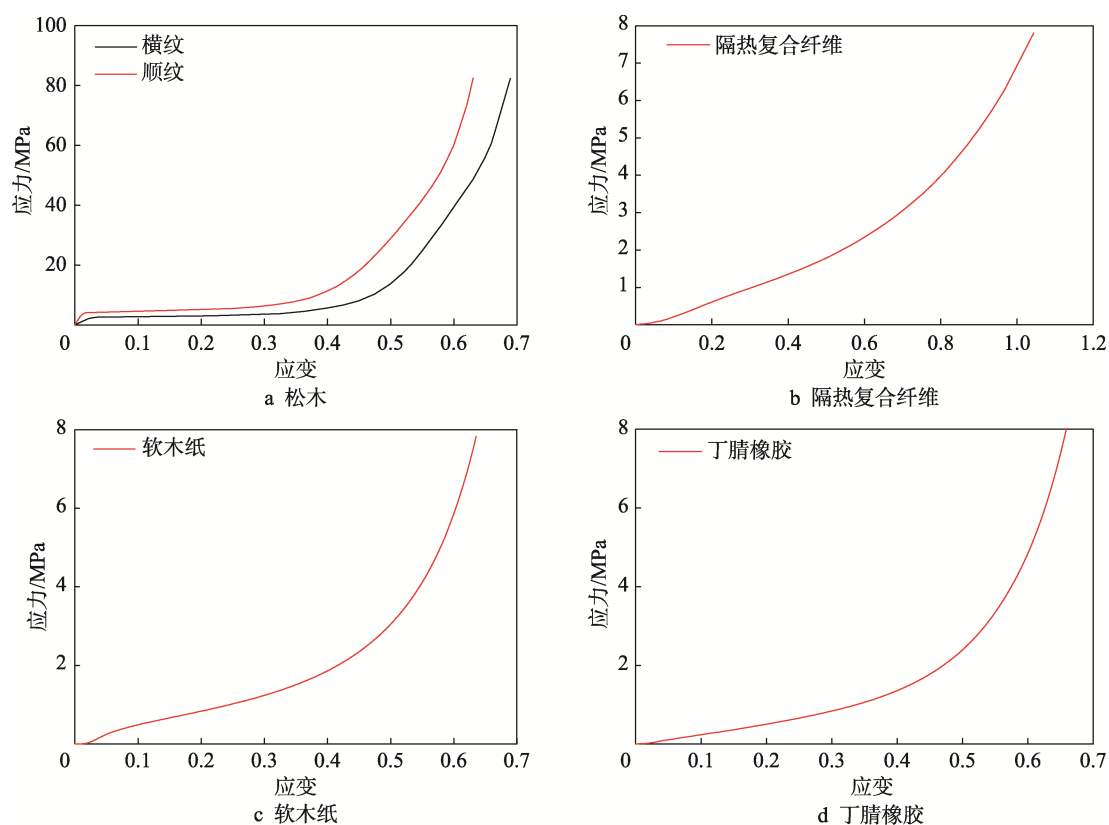


图 5 运输容器中典型非金属材料应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of typical nonmetallic materials in fuel transport cask

2.3 多过程序贯冲击损伤累积有限元模拟方法

针对结构多过程序贯冲击损伤累积效应的模拟,关键在于实现不同冲击过程响应之间的相互联系以及几何结构、载荷、约束、变形等模型信息的传递特征,并建立适用于不同冲击过程衔接的模型输入量/输出量。一般来说,采用有限元显式算法求解首次冲击载荷作用下的结构响应,并将瞬态响应参量(结构应力、应变和尺寸等)通过网格映射方法(Point Interpolation Method, PIM)传递到结构的瞬态变形几何,包括网格平移和旋转等,同时运用隐式算法进行回弹分析,利用动力松弛方法消除结构振动不稳定性影响,得到结构在下阶段冲击之前的变形状态、残余应力和塑性应变等状态参量。利用有限元完全重启计算的方法,在前一阶段冲击计算结果基础上,对计算结果的几何模型、约束条件和载荷条件等进行重新定义,并通过对单元节点位置、速度、应力和应变等参量的初始化,实现变形和损伤状态参量的传递和更新,进一步开展下一阶段冲击工况计算,并得到相应求解结果。通过同样的循环计算方法,得到结构在多次冲击作用之后的应力状态、累积塑性应变和损伤等。由于相应模拟方法、结构几何和材料等非线性因素的影响,可实现非线性损伤的传递,且可更全面和准确地描述结构多过程冲击条件下的损伤特征。

针对图2中4种冲击场景顺序叠加的试验,将前一个场景的计算结果作为后一个场景的初始条件开展计算,即前一个场景计算得到的结构应力和变形作为后一个场景的初始载荷,在后一个场景计算中根据试验状态进一步调整计算模型的边界条件。在第1轮针对跌落的分析中,在运输容器下方建立靶板结构,并对靶板底面施加约束,之后对运输容器施加1.2 m跌落高度对应的初始速度4.85 m/s,如图6a所示;第2轮针对贯穿的分析中,在第1轮有限元计算中跌落碰靶后的运输容器模型试验基础上,增加细长钢棒几何模型,并对钢棒施加1 m跌落高度对应的初始速度4.43 m/s,同时对地面底端施加约束,运输容器则处于自由状态,如图6b所示;第3轮针对重物冲砸的分析中,在第2轮有限元计算中贯穿冲击变形后的模型基础上增加钢板几何模型,对钢板施加9 m跌落高度对应的初始速度13.28 m/s,并对地面底端施加约束,运输容器处于自由状态,如图6c所示;在第4轮针对穿刺冲击的分析中,在第3轮重物冲砸变形后的模型基础上增加钢砧模型,并对运输容器施加1 m跌落高度对应的初始速度4.43 m/s,并约束钢砧底面,如图6d所示。

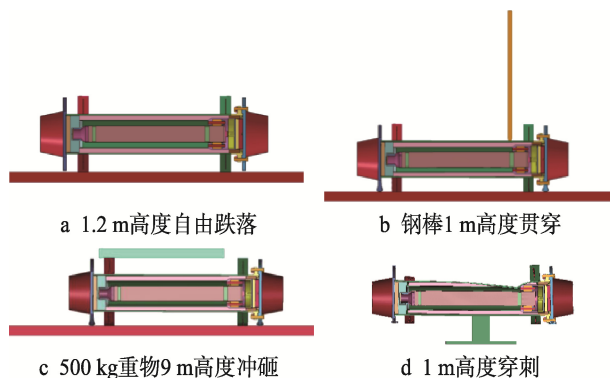


图6 多过程序贯冲击模拟分析中不同阶段冲击场景有限元模型初始状态
Fig.6 Initial situations of finite element models in each round of multi-process sequential impact tests

2.4 模拟结果及分析

2.4.1 场景1: 跌落冲击

运输容器在1.2 m高度侧面跌落碰靶后的变形形貌及其等效塑性应变分布情况如图7所示,可看出模拟结果同图3a中的试验结果符合较好。运输容器变形主要集中在撞击端直角支撑和吸能环结构内,直角支撑和吸能环碰靶位置均出现不同程度的凹陷,发生局部区域失效;而运输容器其余结构未发生明显变形,外包壳连接螺钉仍能保证端盖与法兰之间的连接牢固可靠。这表明直角支撑、吸能环等缓冲结构对运输容器起到了较好的缓冲减振作用。

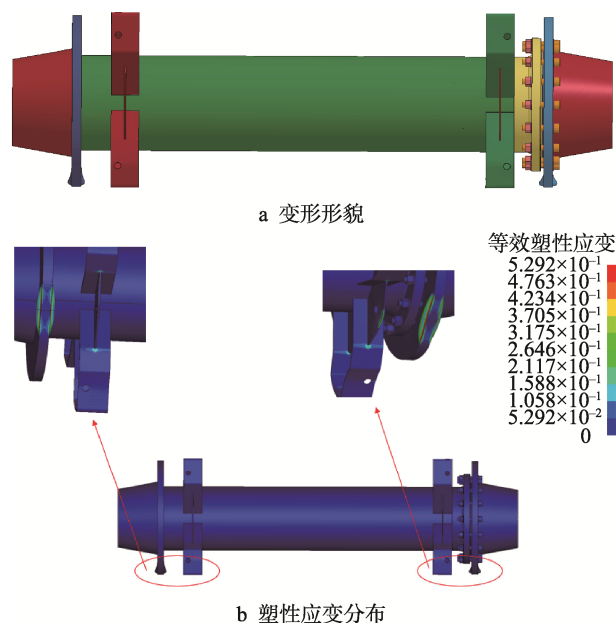


图7 运输容器1.2 m高度自由跌落后的变形形貌及其等效塑性应变分布特征
Fig.7 Deformation morphology and corresponding distribution of effective plastic strain in cask after lateral drop at 1.2 m height

图8进一步给出跌落之后运输容器4个直角支撑的变形局部放大图示, 其中同时列出图2a和图3a试验的测量结果。由图8a和8c可看出, 有限元模拟结果中运输容器直角支撑变形后的宽度约为104 mm, 相应的运输容器高度由于直角支撑受压变形而再次减小, 最终高度为502 mm左右; 而图8b和8d显示, 直角支撑变形后宽度的试验测量值介于101~106 mm之间, 容器最终高度约为510 mm。因此可知, 有限元模拟结果同试验测量结果的最大偏差不超高3%, 这验证了相关有限元模拟方法的合理性和实用性。

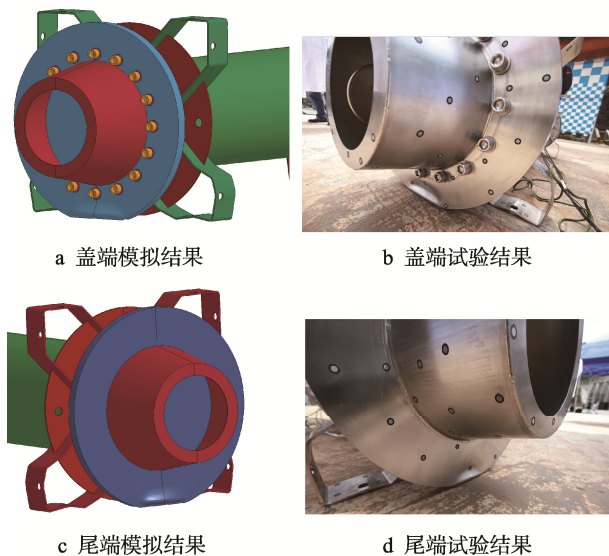


图 8 运输容器 1.2 m 高度自由跌落局部变形形貌有限元模拟结果与试验结果对比

Fig.8 Comparison between numerical and experimental results of deformation morphologies in cask after lateral drop at 1.2 m height

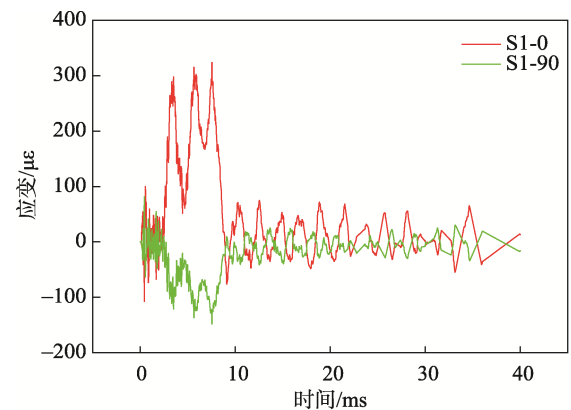
再对比分析运输容器中“S1-0”和“S1-90”2 个关键测点的应变响应特征, 应变时程曲线的模拟结果和试验结果分别如图 9a、9b 所示, 应变幅值均在容器碰靶撞击初期迅速升高, 且“S1-0”关键点的应变变化更为显著; 在跌落冲击后期, 应变下降到较低的幅值并持续发生震荡。总体来说, 模拟结果与试验数据也符合较好, 两者之间仅在最大幅值方面有所差别, 其误差主要来源于有限元模型中对螺纹连接、螺栓和倒角结构等方面进行结构简化所带来的误差, 以及试验测试误差等多方面误差的综合影响, 总体来说有限元模拟结果较好地体现了试验中应变变化的主要变化规律, 再次验证了相关有限元模型及其参数的合理性和实用性。

2.4.2 场景 2: 贯穿冲击

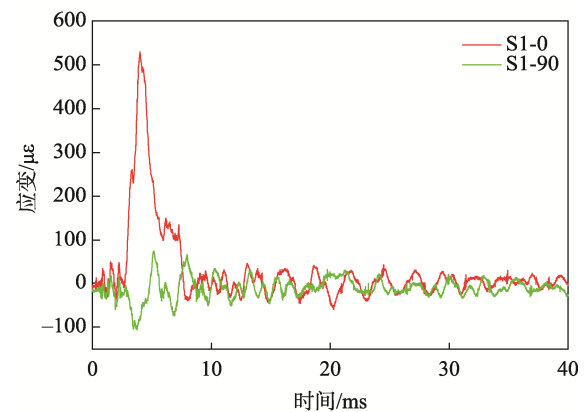
运输容器在钢棒以 1 m 高度贯穿后的变形形貌及

其等效塑性应变分布如图10a所示, 便于对比分析, 同时将图3b试验结果变形区域的局部放大图示列于图10b中。可看出模拟结果也同试验结果较为相符, 钢棒从 1 m 高度跌落撞击运输容器后, 运输容器仅在外包容壳撞击区域产生微小塑性变形, 形成 1 个小凹坑, 容器其余位置未发生明显变形。具体对比图 10 中的结果可知, 图10a模拟结果的塑性变形区范围为 8~12 mm, 塑性凹坑深度约为 0.6 mm; 图10b中试验测量得到的凹坑直径约为 8 mm, 深度为 0.3 mm。

再将 2 个测点的应变响应时程曲线列出如图 11 所示, 可看出模拟结果也较好地体现了试验测试结果的主要变化规律和趋势。应变幅值也在钢棒撞击初期迅速升高, 其中“S1-90”关键点的应变变化更为显著, 之后应变幅值也下降到较低取值并发生震荡特征。



a 有限元模拟结果



b 试验结果

图 9 运输容器 1.2 m 高度自由跌落过程中测点应变响应时程曲线

Fig.9 Strain response history curves in measuring points during lateral drop at 1.2 m height

2.4.3 场景 3: 重物冲砸

运输容器在 500 kg 钢板以 9 m 高度冲砸之后的变形形貌及其等效塑性应变分布如图12所示, 相应形貌也同图3c中的试验结果吻合较好。在重物冲砸之后,

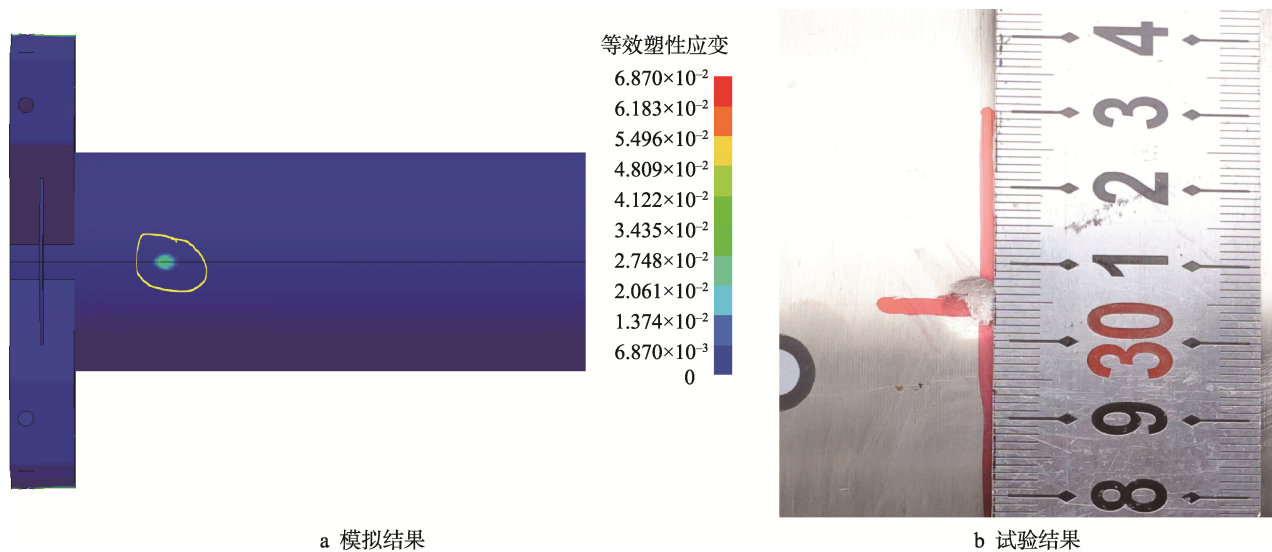


图 10 运输容器在钢棒 1 m 高度贯穿后的变形形貌有限元模拟结果与试验结果对比
Fig.10 Comparison between numerical and experimental results of deformation morphology in cask after steel rod penetration at 1 m height

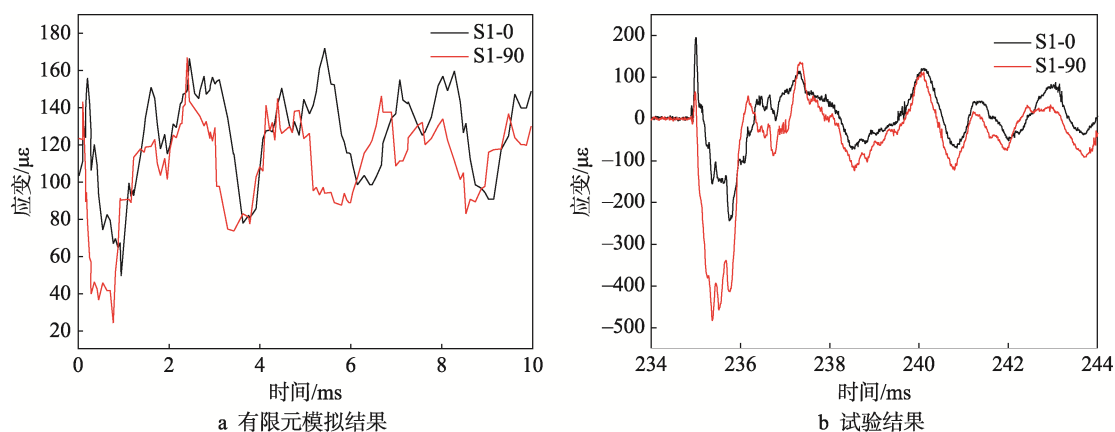


图 11 运输容器钢棒 1 m 高度贯穿过程中测点应变响应时程曲线
Fig.11 Strain response history curves in measuring points during steel rod penetration at 1 m height

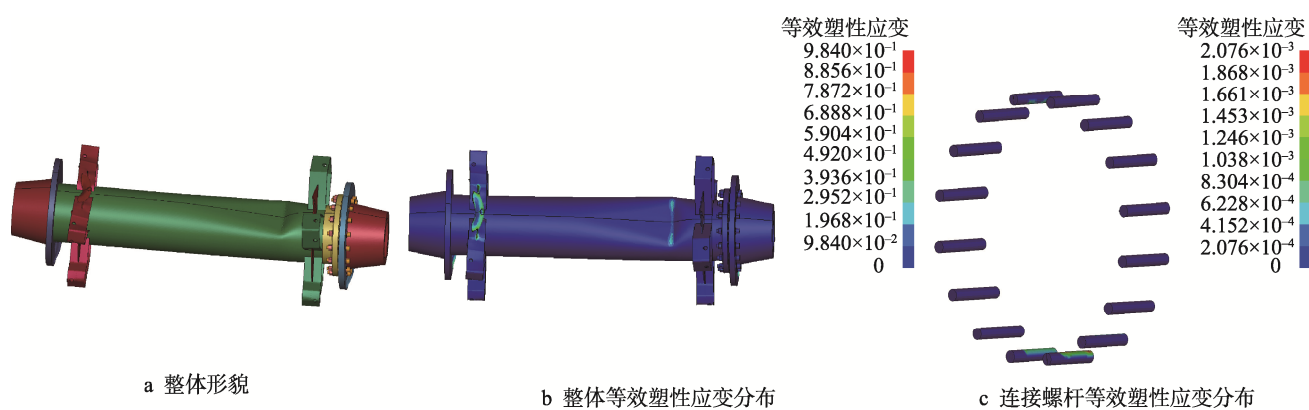


图 12 500 kg 重物以 9 m 高度冲砸后运输容器变形形貌及其等效塑性应变分布特征
Fig.12 Deformation morphology and corresponding distribution of effective plastic strain in cask after impact of 500 kg weight at 9 m height

运输容器产生了较大变形, 但外包壳并未发生破坏。外包壳表面在重物直角棱边冲砸位置出现明显压痕, 呈现三角形凹坑, 且越靠近过法兰一侧凹坑越深, 在重物直角棱边冲砸位置深度最大。有限元模拟得到的外包壳凹坑最大宽度和深度分别为 215 mm 和 42.5 mm, 相应的试验测量结果分别为 219 mm 和 45.9 mm, 两者之间最大偏差为 7.4%。

将容器局部变形形貌和测点应变响应历程进一步列出如图 13 和图 14 所示, 可看出模拟结果和试验结果之间也较为相符。运输容器尾端直角支撑上边缘被冲砸发生皱褶变形, 盖端和尾端的吸能环下边缘由于地面挤压而发生底面扁平的褶皱变形, 外包壳法兰有部分连接螺栓发生松动, 有限元模拟结果也显示部分螺杆出现塑性变形, 如图 12c 所示。另外, 应变幅值也是在冲砸之后迅速升高, 最终有所下降并保持相对稳定的取值, 且 2 个关键点的应变最终取值正好相反。

2.4.4 场景 4: 穿刺冲击

运输容器在 1 m 高度穿刺之后的变形形貌如图 15 所示, 分别对比图 15a 和图 3d、图 15b 和图 15c 的模拟结

果和试验结果可知, 两者之间也较为相符。在穿刺冲击之后, 运输容器外包壳仅在穿刺位置产生相对较

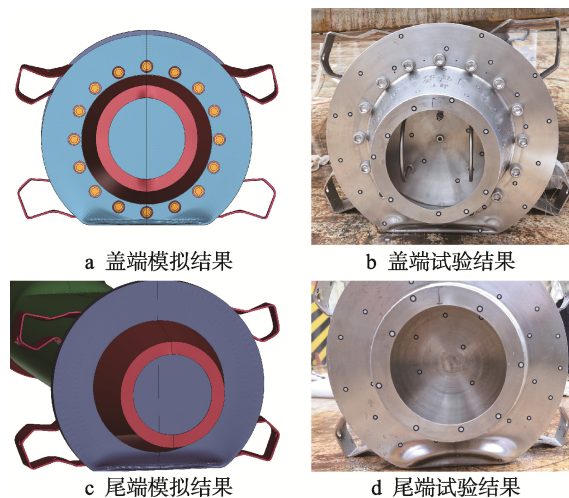


图 13 500 kg 重物以 9 m 高度冲砸后运输容器的局部变形形貌有限元模拟结果与试验结果对比

Fig.13 Comparison between numerical and experimental results of deformation morphologies in cask after impact of 500 kg weight at 9 m height

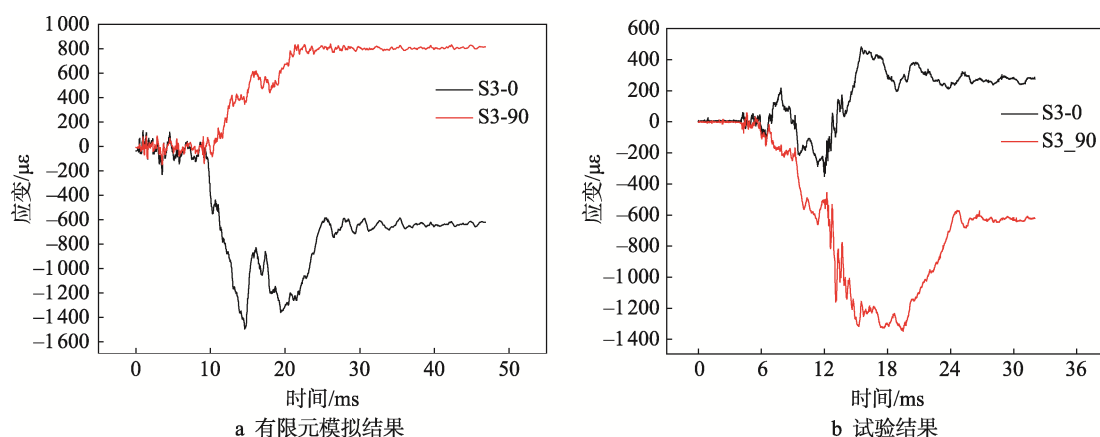


图 14 500 kg 重物以 9 m 高度冲砸后过程中运输容器测点应变响应时程曲线

Fig.14 Strain response history curves in measuring points during impact of 500 kg weight at 9 m height

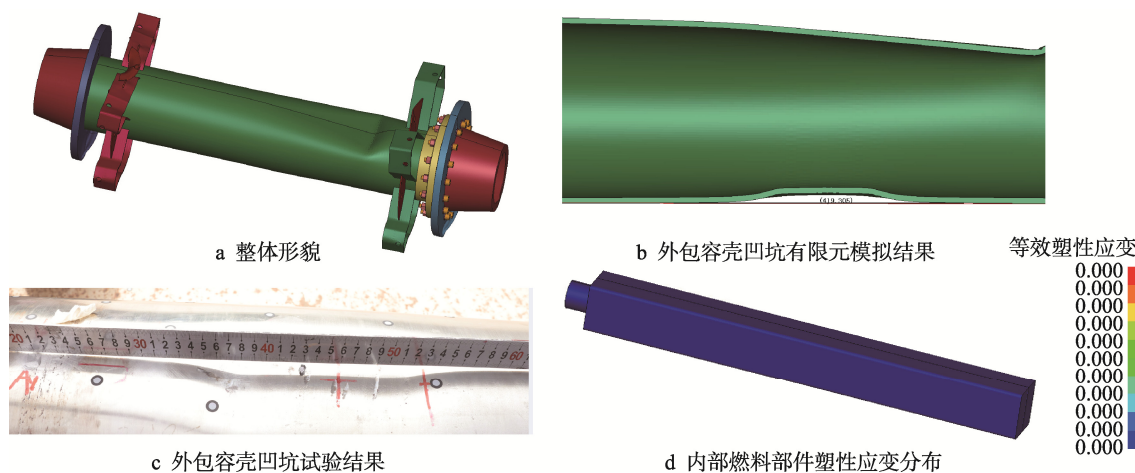


图 15 1 m 高度穿刺后运输容器变形形貌

Fig.15 Deformation morphology of cask after puncture impact at 1 m height

浅的凹坑,其中有限元模拟得到的凹坑最大宽度和深度分别为419 mm和11 mm,而试验测量所得的凹坑相应最大取值分别为400 mm和8 mm。从图15d中的燃料部件等效塑性应变分布情况可看出,运输容器经过4种冲击载荷作用之后,内部燃料部件未发生塑性变形,即外壳体结构起到了较好的防护作用。

本节结合有限元模拟结果和试验观测的分析得出,燃料运输容器结构具有很好的缓冲性能,在4种事故场景顺序叠加作用下可对燃料部件产生有效防护,结构强度满足安全设计要求。

4 结 论

本文开展了某燃料运输容器在1.2 m高度侧跌、钢棒1 m高度贯穿、500 kg重物9 m高度冲砸和1 m高度穿刺等4种事故场景顺序叠加作用下的多过程序贯冲击试验;同时,利用有限元完全重启动计算方法,开展多过程序贯冲击试验的冲击损伤累积有限元模拟分析,获得序贯冲击载荷作用下运输容器的力学响应。此外,结合试验观测和系统有限元模拟分析,深入研究了运输容器在多过程序贯冲击条件下的动态响应特征,并评估其承载能力。主要结论如下:

1) 燃料运输容器结构具有很好的缓冲性能,其直角支撑和吸能环结构在冲击条件下可对容器起到很好的缓冲减振效果,在多种冲击场景下均能对燃料部件产生有效防护。

2) 运输容器在经历跌落、贯穿、冲砸和穿刺等4种事故场景顺序叠加作用之后,其结构功能仍保持完好,外包装壳和内包容壳的结构完整,容器内部的燃料部件不会发生破坏和泄漏,结构满足设计要求。

3) 通过冲击损伤累积有限元模拟方法,将前一个冲击场景的应力和变形,作为后一个冲击场景的初始条件,可有效地分析运输容器在多过程序贯冲击条件下的动态响应特征,具有较好的准确性和实用性。

4) 相关研究方法和结论可为运输容器、包装箱等复杂装备结构的安全设计及防护措施、安全性验证试验的条件设定等多方面提供参考。

参考文献:

- [1] 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 Q, ZHUANG D J, SUN H C, et al. Overview of Application Status for Nuclear Fuel Assembly Transport Package[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(13): 142-150.
- [2] 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 H, TONG M Y, SUN S, et al. Research Progress

- of Spent Fuel Transport Container[J]. Mechanical Engineer, 2015(12): 65-69.
- [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 Y, LI Q P, MA Q J. Study on the Structural Design of High Burnup Spent Fuel Transport Cask[J]. Nuclear Science and Engineering, 2017, 37(2): 308-313.
- [4] 孙谦,庄大杰,孙洪超,等.乏燃料运输容器减震器应用及研究现状[J].包装工程,2023,44(5):282-290.
SUN Q, ZHUANG D J, SUN H C, et al. Application and Research Status of Spent Fuel Transport Cask Impact Limiters[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(5): 282-290.
- [5] 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 T B, ZHU S Q, LIU X. Design and Verification of Shock Absorber for a Spent Fuel Cask[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(7): 294-300.
- [6] 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 C H, HUANG X D, GU M F, et al. Design and Research on One New Fuel Assembly Transport Cask[J]. Machinery, 2020, 47(5): 54-59.
- [7] 申展,罗俊杰,卓毅.某型包装箱的低密度聚乙烯缓冲结构设计与分析[J].包装工程,2018,39(21):54-57.
SHEN Z, LUO J J, ZHUO Y. Design and Analysis of Low Density Polyethylene Cushioning Construction of a Packaging Box[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(21): 54-57.
- [8] 沈勇坚,沈光耀,艾卫江,等.新燃料运输容器运输多根小型组件的跌落分析[J].包装工程,2023,44(13):285-291.
SHEN Y J, SHEN G Y, AI W J, et al. Drop Analysis of Transporting Multiple Small Assemblies with New Fuel Transport Casks[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(13): 285-291.
- [9] 蒋跃元,张亚军,王鼎渠,等.新燃料组件运输容器的外包装壳及新燃料组件运输容器:CN116697252A[P].2023-09-05.
JIANG Y Y, ZHANG Y J, WANG D Q, et al. Outside the Transportation Container for New Fuel Components Container and New Fuel Assembly Transport Container: CN116697252A [P]. 2023-09-05.
- [10] 田静敏,黄秀玲.包装件跌落冲击研究现状[J].包装工程,2016,37(11):199-203.
TIAN J M, HUANG X L. Status of Package Dropping Impact Research[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(11):

- 199-203.
- [11] LO FRANO R, PUGLIESE G, NASTA M. Structural Performance of an IP2 Package in Free Drop Test Conditions: Numerical and Experimental Evaluations[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 280: 634-643.
- [12] 钟卫洲, 张则熊, 刘小刚, 等. 多层包装箱冲击缓冲效应数值分析[J]. 中国测试, 2018, 44(10): 184-188.
- ZHONG W Z, ZHANG Z X, LIU X G, et al. Numerical Analysis on Impact Cushion Behavior of Multilayer Container[J]. China Measurement & Test, 2018, 44(10): 184-188.
- [13] 徐伟芳, 谢若泽, 钟卫洲. 抗事故包装箱的跌落冲击分析技术[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 25-30.
- XU W F, XIE R Z, ZHONG W Z. Drop Impact Analysis Technique of Accident-Resistant Container[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 25-30.
- [14] 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.
- [15] 刘广东, 吴维亮, 朱贺, 等. 事故工况下乏燃料运输容器跌落分析[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 31-34.
- LIU G D, WU W L, ZHU H, et al. Drop Analysis of the Spent Nuclear Fuel Transport Cask under Accident Conditions[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 31-34.
- [16] 刘广东. 乏燃料运输容器事故工况密封分析研究[J]. 包装工程, 2023, 44(17): 298-303.
- LIU G D. Analysis and Research on Sealing of Spent Fuel Transportation Cask under Accident Conditions[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(17): 298-303.
- [17] LI X X, WANG C, SATO J. Framework for Dynamic Analysis of Radioactive Material Transport Packages under Accident Drop Conditions[J]. Nuclear Engineering and Design, 2020, 360: 110480.
- [18] 林久标, 屈福政. 动力蓄电池包冲击累积损伤数值模拟研究[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(6): 938-942.
- LIN J B, QU F Z. Numerical Simulation of Impact Cumulative Damage for Power Battery Pack[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(6): 938-942.
- [19] 王国春, 周泽. 基于网格映射的非线性损伤累积研究[J]. 企业科技与发展, 2019(7): 38-42.
- WANG G C, ZHOU Z. Research on Nonlinear Damage Accumulation Based on Grid Mapping[J]. Sci-Tech & Development of Enterprise, 2019(7): 38-42.
- [20] 杨璞, 谢若泽, 陈刚, 等. 冲击载荷下螺栓预紧力对应力波影响分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(5): 113-120.
- YANG P, XIE R Z, CHEN G, et al. Influence of Preload in Bolt on Stress Wave under Impact-Load[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(5): 113-120.