

运载撞击事故场景下复杂结构冲击响应数值模拟分析

张斌^{1,2}, 张青平^{1,2}, 陈建良^{1,2}, 颜怡霞^{1,2}, 何丽灵^{1,2},
李继承^{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 发展跨大尺度协同大规模建模数值模拟技术, 获得复杂结构在运载撞击事故场景中的冲击响应特征, 为结构冲击安全性评估提供支撑。方法 针对复杂结构实际几何形状和尺寸, 提出包含“车-包装容器-部件”的大尺度协同大规模有限元建模方法, 并基于相关方法开展了受包装容器保护的复杂结构在汽车运载撞击、高速列车运载撞击等事故场景中结构响应的数值模拟分析, 分析系统整体和关键部件的运动、变形和破坏等特征。结果 数值模拟结果与相关试验结果符合较好, 在汽车运载撞击和高速列车运载撞击条件下, 系统整体的运动过程及内部结构的变形和破坏情况与试验结果基本一致, 验证了相应有限元建模与分析方法的合理性和实用性。结论 所发展的跨大尺度协同大规模有限元建模与分析方法可较好地解决复杂结构冲击响应分析中存在的几何跨尺度、时间跨尺度、多尺度强非线性等方面困难, 为复杂结构在运载撞击事故场景中的冲击安全性分析提供有效支撑。

关键词: 复杂结构; 运载撞击; 冲击响应; 有限元模拟; 跨尺度协同

中图分类号: TB122

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)19-0102-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.19.009

Numerical Simulation of Dynamic Response of Complex Structures in Transportation Collision Accidents

ZHANG Bin^{1,2}, ZHANG Qingping^{1,2}, CHEN Jianliang^{1,2}, YAN Yixia^{1,2},
HE Liling^{1,2}, LI Jicheng^{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 develop a multi-scale collaboration (MSC) modeling and simulation methods for massive model simulation to obtain the dynamic response characteristics of complex structure in transportation collision accidents, which benefits the safety evaluation of structure under dynamic loading. A finite element model including transportation vehicle, packaging container and complex structure was built by the developed multi-scale collaboration modeling method according to the actual shape and size of structures. Based on the developed method, numeric simulations were conducted on complex structure protected by packaging containers in truck collision accident and high speed train collision accident. The motion, deformation and damage characteristics of the overall system and key components were analyzed. Numerical simulation results, such as the motion process of the overall system as well as the deformation and damage of the inner

收稿日期: 2024-08-20

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

structure, were in good agreement with experimental results both in truck and high speed train collision accidents, verifying the accuracy and practicality of the finite element modeling and analysis method. The developed multi-scale collaboration modeling method effectively addresses challenges in complex structure impact response analysis, including multi-geometry-scale, multi-time-scale and multi-scale nonlinear complexities and provides effective support to the analysis of the dynamic safety of complex structure in transportation collision accidents.

KEY WORDS: complex structure; transportation collision accident; dynamic response; finite element simulation; multi-scale collaboration

工程装备在生产与使用过程中常需经历运输过程, 可能发生汽车与列车等运载工具的撞击事故^[1]。在运载撞击事故中, 装备的复杂结构可能在巨大的冲击载荷作用下发生较大变形甚至破坏, 严重时出现安全性事故, 尽管关键结构常使用包装容器防护^[2-3], 但在强冲击作用下结构安全性依然面临风险。

为评估相关结构在运载撞击事故场景中的安全性, 需对结构的具体冲击响应特征开展系统分析。一般来说, 实物试验是最直接和有效的安全性评估方法, 但常面临试验时间与经济成本高昂、加载和测试困难等方面挑战, 甚至可能存在一定危险性^[4-6]。随着计算机软硬件技术的发展和非线性有限元模拟技术的进步, 数值模拟分析在复杂结构的运载撞击响应分析中得到了广泛应用, 相关分析手段具有经济、便捷、操作性和重复性强的特点, 可有效克服实物试验面临的诸多难题^[6-8]。

研究者针对汽车撞击与列车撞击事故场景中的结构响应开展了大量工作, 其中汽车碰撞模拟技术广泛应用于汽车撞击性能预测^[9], 能获得被撞击物的变形破坏情况^[8], 并深入分析汽车自身的运动、变形与破坏机理, 有助于汽车结构安全性的设计优化^[10]; 再者, 还可深入分析汽车撞击事故中驾乘人员的安全性^[11-12]、电动汽车车载动力电池的安全性^[13-14]等。同样地, 列车撞击响应分析也广泛使用数值模拟方法, 其中使用多刚体动力学模拟方法可对编组列车撞击过程中的长时运动变形过程进行分析^[15]; 基于有限元模拟可分析列车通过塑性大变形吸收碰撞能量的车厢位置、各车厢变形程度、碰撞界面撞击力, 以及加速度、速度、部件及整车的吸能情况等一系列响应特征, 可为列车撞击安全设计的优化奠定基础^[16-17]。此外, 在有限元模型中建立乘员及内饰模型, 还可对列车撞击过程中乘员的响应及内饰与乘员的相互作用进行深入分析, 评估列车撞击过程中乘员安全性^[1,18]。

目前针对汽车与列车撞击响应方面的数值模拟研究, 分析对象多为被撞击物、运载工具或乘客等相对单一的对象, 各结构之间的尺寸接近, 在有限元建模时部件网格易于相互匹配, 但针对单一对象的模拟分析难以真实全面地描述实际撞击载荷传递到所考察对象的具体过程及其变化特征。对于工程装备在运

载撞击条件下的安全性分析, 研究对象包括运载工具、包装容器、复杂结构部件自身等组成的“车-包装容器-部件”系统, 而且在撞击过程中撞击载荷逐层向内传递, 最终到达所考察的关键结构, 因此, 在相关数值模拟分析中, 需对整个系统进行精细有限元建模。然而, 完整的“车-包装容器-部件”系统存在结构几何特征复杂、部组件尺寸跨度大、连接关系多样等特点, 对有限元建模与分析提出了较大的挑战。

本文面向受包装容器保护的复杂结构在运载撞击事故场景中的安全性评估, 发展了跨大尺度协同的“车-包装容器-部件”大规模有限元建模方法, 并开展汽车撞击与高速列车运载撞击 2 种事故场景中的结构冲击响应数值模拟分析, 获得了整体系统与各结构部件的运动特征与变形破坏特性等信息。相关方法有助于针对复杂结构在运载撞击事故场景中冲击安全性的量化评估。

1 有限元建模方法

1.1 几何模型网格离散

有限元建模的关键步骤之一为基于结构几何模型, 采用合适的单元类型进行网格离散, 也常简称为“几何离散”。在有限元网格离散前, 需对几何模型进行清理与简化处理, 其处理质量将直接影响后续的有限元离散效率、方法与网格质量。对于模型中的几何干涉与过盈装配, 则应根据结构的实际形状、响应特征与表征方法进行合适的处理, 例如若不考虑预应力则删除过盈配合部分, 而若考虑预应力则保留相关过盈配合。为保证简化后的结构反映真实结构的载荷传递路径、力学响应特征等, 简化前应先基于结构力学与冲击动力学相关理论分析进行初步评估, 并对不影响载荷主要传递路径和关键部件响应特征的结构进行合理简化。

对于运载撞击事故冲击响应分析, 研究对象为“车-包装容器-部件”的整体系统。其中汽车或高速列车等运载工具的结构尺寸量级通常高达 10 m, 而对于工程装备内部关键部组件的结构尺寸量级可能低至 10^{-3} m, 因此, 整个系统具有典型的尺寸跨度大 ($10^{-3} \sim 10$ m) 的特点, 有限元建模时各部组件之间的网格匹配存在较大的困难。汽车或高速列车等运载工

具在运载撞击场景中的运动变形时间可达 10^{-1} s, 而对于工程装备内部关键部组件, 其结构响应时间可能低至 10^{-6} s, 因此, 整个系统同时具有典型的时间跨度大(10^{-6} ~ 10^{-1} s)的特点。再者, “车-包装容器-部件”系统还存在几何结构复杂、连接关系多样、模型规模庞大、计算求解时间长、非线性特征突出等特点, 对有限元建模提出了较大挑战。

针对上述挑战, 在“车-包装容器-部件”系统有限元建模过程中, 将以结构的实际几何特征为基础, 以反映结构力学响应特性为目标, 综合采用几何离散与物理建模方法。一般来说, 为确保有限元模拟精度, 模型几何离散过程中对于形状与载荷状态均相对复杂的结构, 采用实体单元进行网格离散, 且采用六面体单元以保证显式动力学分析的精度, 如图 1a 所示。对于尺寸大、形状简单, 且受力状态与变形模式简单的结构, 可以使用大尺寸的网格进行离散; 对于尺寸小、形状复杂, 且受力状态与变形模式复杂的结构, 应使用更精细的网格进行离散, 从而在保证计算精度的前提下, 提高计算效率; 而对于网格尺寸差异较大的区域, 应选择合适大小的过渡区, 使得网格尺寸平滑过渡, 防止相邻网格尺寸突变导致网格畸形及单元阻抗失配, 如图 1b 所示, 相关离散方法可较好地反映复杂结构的结合特征和实际变形特征, 但容易导致模型网格规模偏大, 进而增加计算求解成本。因此, 对于小截面的细长结构, 可以使用梁单元进行离散, 并指定截面的形状与尺寸, 如图 1c 所示; 而对于表面尺寸较大、厚度较薄、变形过程中厚度无明显变化的结构, 可使用薄壳或厚壳单元进行离散, 如图 1d 所示。在有限元建模过程中综合采用“梁-壳-实体”单元, 可有效降低模型的规模, 并保证模型的计算精度。

上述“梁-壳-实体”单元相结合的网格离散方法在针对汽车和高速列车等大型运载结构进行网格划分时, 仍常面临计算规模庞大的困难, 在可反映结构的冲击动力学响应特性前提下, 还可进一步使用特定方法或算法对模型进行表征, 相应建模方式也常称为物理建模。例如, 对于只需考虑质量惯性效应、不必考虑同其他结构相互作用的部件, 可使用质量点进行表

征, 如图 2a 所示; 对于运载工具中的减震、轴承等结构, 可使用弹簧单元与铰链进行表征, 如图 2b 所示。另外, 使用合适的约束与连接方式, 还可对几何尺度相差较大的结构之间进行约束处理, 进而解决结构几何跨尺度的难题, 如图 2c 所示。物理建模方法可更进一步减小有限元模型的规模, 同时更加合理地表征减震、轴承等特殊结构的运动和变形过程。

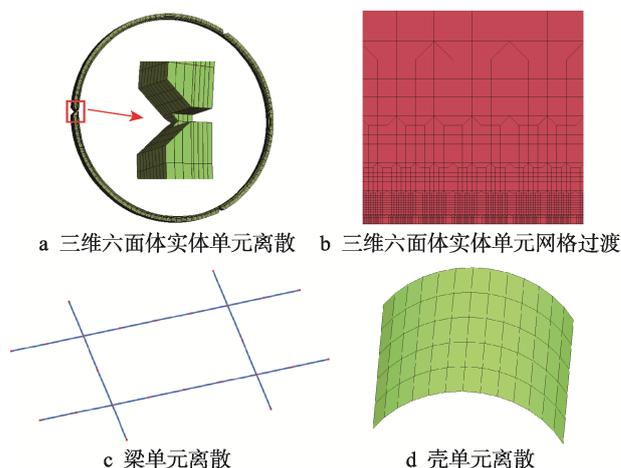


图 1 有限元几何模型网格离散单元示例
Fig.1 Sketch of element types for finite element discretization

因此, 对于运载撞击事故场景中复杂结构冲击响应的数值模拟, 在建模时应以结构的实际几何特征为基础, 以反映结构的冲击动力学响应特性为目标, 将几何离散与物理建模 2 种方法有机融合, 根据结构的不同几何特征和力学响应特性选择合适的建模方法, 进而可建立高质量的有限元模型。

1.2 材料本构模型

材料在撞击等动态载荷作用下的力学行为非常复杂, 例如非线性压力响应、应变和应变率硬化/软化效应、热软化效应、断裂破坏、各向异性等。对于复杂结构的运载撞击场景, 分析对象的材料种类繁多, 包括金属、橡胶、木材、泡沫与混凝土等。不同类型的材料, 其力学性能通常差异较大, 因此对于复

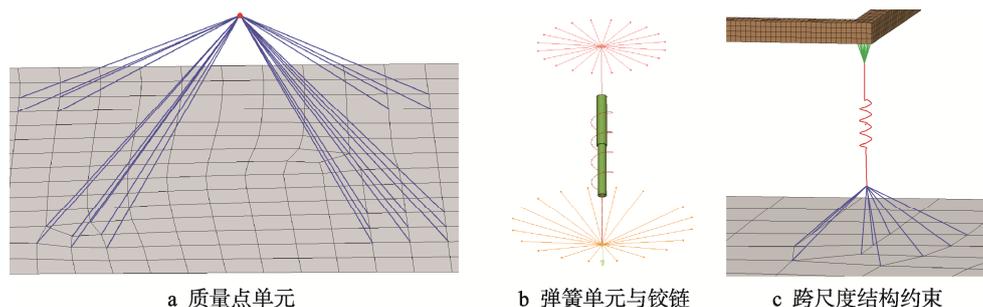


图 2 物理建模方法示例
Fig.2 Sketch of physical modeling methods

杂结构的冲击响应数值模拟分析, 需针对不同材料类型、材料状态和变形条件, 选择合适的材料本构模型。

对于金属材料, 可表征其力学行为的本构方程较多^[19], 考虑到模型材料参数获取的难易程度, 主要选用弹塑性随动强化模型与 Johnson-Cook (JC) 本构模型。弹塑性随动强化模型可描述材料的随动强化塑性行为; JC 本构模型利用变量乘积关系描述应变、应变率和温度等因素对材料变形和破坏的影响, 可较好地模拟金属材料在宽温宽应变率范围内的大变形行为^[19]。

对于橡胶材料, 其力学行为通常表现出超弹性特征, 因此采用 Mooney-Rivlin 模型进行描述, 仅需 2 个参数即可^[20]。

对于混凝土, 其力学行为采用 Holmquist-Johnson-Cook (HJC) 模型进行描述。HJC 模型可较好地体现混凝土等脆性材料的力学性能, 模型考虑了大应变、高应变率和高压力等情况, 同时还考虑了材料内部孔隙坍塌后的体积压缩量与压力的关系^[21]。

对于木材、泡沫等其他非金属材料, 结合相关的力学性能试验数据, 并基于分段线性塑性模型、可压缩泡沫模型等, 确定材料的本构模型及相应的材料参数^[2]。

在运载撞击事故场景中, “车-包装容器-装备”系统通常会发生大变形与破坏, 因此在数值模拟分析中还指定了材料的失效模型与参数。

2 运载撞击事故场景冲击响应分析

2.1 汽车撞击

基于本文第一章介绍的相关有限元建模方法和材料模型, 综合考虑有限元计算规模, 针对试验车体、包装容器与结构部件建立了精细的三维有限元模型, 如图 3a 所示。该模型中, 汽车车体及车舱、包装容器外壳等结构主要为薄壳结构, 在撞击变形过程中厚度变化不明显, 因此主要采用壳单元进行网格划分; 结构件和装卸平台等主要为实体结构, 且在撞击过程中变形形式复杂, 因此主要采用三维六面体单元进行网格离散; 车轮减震结构主要沿轴向发生大的往复运动, 因此采用弹簧单元与铰链进行表征, 如图 3b 所示; 汽车大梁等结构主要受到轴向力作用, 并发生弯曲变形与轴向伸缩, 采用“工”字截面梁单元进行表征。

基于所建立的有限元模型, 通过显式动力学求解软件计算获得了汽车高速撞击混凝土靶过程中“车-包装容器-部件”系统的运动与变形过程, 其中典型时刻的数值模拟结果如图 4 所示, 撞击结束之后车体内部包装容器局部结构最终变形形貌的模拟结果和试验结果如图 5 所示, 从 2 图中可看出, 数值模拟得到

的结构变形与破坏情况同试验结果基本一致。整体系统的运动与变形破坏过程大致为: 汽车保险杠最先开始撞靶, 保险杠、驾驶室、主车架前段迅速被挤压变形并发生破坏; 随后车舱前端开始撞靶, 当汽车压缩变形程度达到最大, 系统整体开始发生反弹。汽车头部结构的剧烈变形和破坏吸收了大量的能量, 对内部结构起到了较好的缓冲作用, 包装容器撞击方向前端蒙皮仅产生了轻微的局部变形。

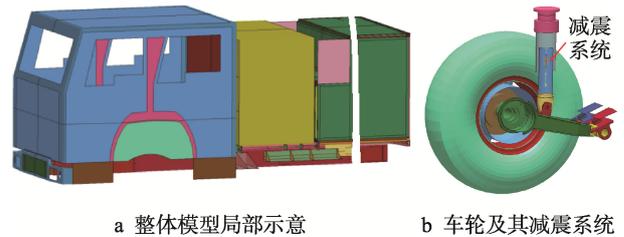


图 3 汽车撞击有限元模型
Fig.3 Finite element model of truck for impact condition



图 4 汽车高速撞击混凝土靶典型时刻变形与破坏形貌数值模拟结果
Fig.4 Deformation and failure morphology of truck after high-speed impact onto a concrete target

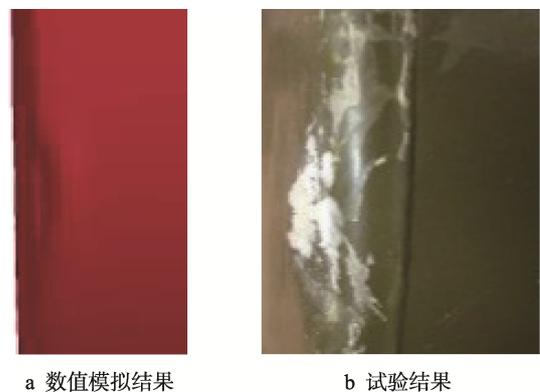


图 5 汽车高速运载撞击混凝土靶条件下包装容器局部变形与破坏形貌
Fig.5 Local deformation and failure morphology of packaging container after high-speed impact of truck onto a concrete target

2.2 高速列车撞击

类似地,针对模拟列车车体、包装容器与结构部件建立了精细的三维有限元模型如图 6a 所示,由于高速列车车厢结构更为复杂,在建模过程中对其进行相应简化处理。车厢承力结构主要包含底架、侧墙、端墙和车顶 4 大部分,有限元建模过程中保留了车厢的主要承力结构、缓冲吸能结构及载荷传递路径结构。车厢车体主要为薄壳结构,在撞击过程中厚度变化不明显,在不影响车厢主要响应特征的前提下,对车厢侧墙、端墙和车顶等结构利用壳单元进行离散;非载荷传递路径上的电气、人员座位、装饰等非承力设备,并不会与关键结构发生相互作用,而主要对车厢施加质量惯性效应,因此使用离散质量单元进行等效;包装容器外壳为薄壳状结构,也使用壳单元进行离散;结构件和装卸平台为实体结构,在撞击过程中的应力应变状态非常复杂,采用三维六面体单元进行网格离散;包装容器与车体之间的绳索结构在撞击过程中主要施加轴向拉力,因此使用可失效的弹簧模型进行表征。结构中典型的物理建模情形分别如图 6b 和图 6c 所示。

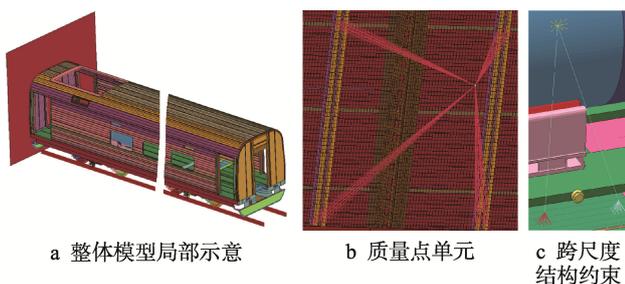


图 6 高速列车模拟车厢撞击有限元模型
Fig.6 Finite element model of equivalent high-speed train carriage for impact condition

通过显式动力学求解软件,同样计算得到模拟高速列车车厢高速撞击混凝土靶条件下的车厢、包装容器与内部结构件等运动和变形破坏规律。图 7 展示了最终时刻的数值模拟结果与试验结果,同样可看出数值模拟得到的结构变形与破坏情况同试验结果符合较好,表明相关模拟较好地再现了高速列车运载撞击过程中“车-包装容器-部件”系统的载荷传递规律与变形破坏规律。车厢前端撞击刚性墙后,靠近撞击端的车体迅速发生大变形与破坏,造成前端门框被压溃;与此同时,包装容器由于限位机构发生破坏而向刚性墙方向运动;由于车厢地板在撞击过程中翘曲,使包装容器前端与翘曲的车厢地板发生碰撞并被不断抬升;包装容器爬升至翘曲地板最高点与地板分离,此后在自身惯性作用下继续向前与向上运动,并与车厢前端墙发生碰撞并反弹;反弹后包装容器仍然保持向上的运动并从天窗跳起。最终车厢撞击端发生严重的挤压弯曲与卷曲变形,局部被压溃,车厢地板出现

明显的弯曲与折叠,而远离撞击端的车厢结构变形较小。数值计算得到的车厢撞击端压缩变形量约 1.56 m,与试验结果 1.7 m 之间的误差约为 8.2%。由于车厢车体与包装容器的大变形吸收了大量的能量,故对内部结构件起到了较好的缓冲与防护作用。

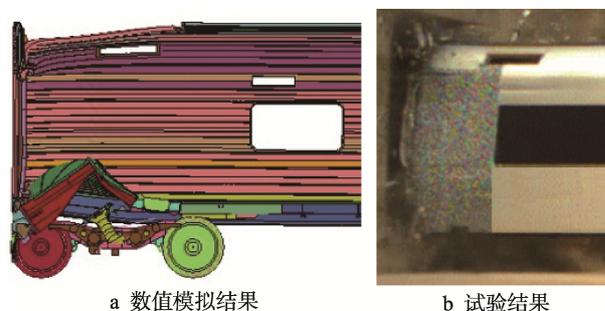


图 7 高速列车模拟车厢高速撞击混凝土靶之后局部变形和破坏形态

Fig.7 Local deformation and failure morphology of equivalent high-speed train carriage after high-speed impact onto a concrete target

3 结语

本文发展了跨大尺度协同的“车-包装容器-部件”大规模有限元建模方法,并开展了汽车撞击与高速列车运载撞击 2 种事故场景中的复杂结构冲击响应数值模拟分析,数值模拟得到的结构变形与破坏情况同试验结果一致,较好地再现了整体系统在运载撞击过程中的载荷传递规律与变形破坏规律。相关工作获得如下几点认识。

1) 在“车-包装容器-部件”复杂结构系统的有限元建模过程中,可将几何离散与物理建模方法有机融合,进而建立高质量的有限元模型并有效减小模型求解计算规模,相关大规模有限元建模与分析方法也可供其他类型撞击事故场景中的复杂结构冲击响应分析参考。

2) 汽车撞击过程中,汽车头部结构的剧烈变形和破坏吸收了大量的能量,对内部结构起到了较好的缓冲作用。

3) 在高速列车模拟车厢撞击场景中,车厢撞击端发生严重的挤压弯曲与卷曲变形,局部被压溃,而远离撞击端的车厢结构变形较小,车厢车体与包装容器的大变形可对内部结构件起到较好的缓冲与防护作用。

参考文献:

- [1] 敬霖,刘凯,王成全. 列车碰撞被动安全性与司乘人员冲击生物损伤研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(12): 135-167.
JING L, LIU K, WANG C Q. Recent Advances in the Collision Passive Safety of Trains and Impact Biological Damage of Drivers and Passengers[J]. Explosion and

- Shock Waves, 2021, 41(12): 135-167.
- [2] 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.
- [3] 李娜, 刘剑钊, 张思才, 等. 抗事故包装箱碰撞过程靶体等效方法研究[J]. 包装工程, 2016, 37(1): 25-28.
LI N, LIU J Z, ZHANG S C, et al. Equivalent Method for the Targets in Impact Process of Accident-Resistant Packaging Container[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(1): 25-28.
- [4] 陈崇石. 与设备包装有关的冲击试验要求的探讨[J]. 包装工程, 2000, 21(2): 40-42.
CHEN C S. Research of Impact Test Requirements Concerning Equipment Package[J]. Packaging Engineering, 2000, 21(2): 40-42.
- [5] ATAHAN A O, YÜCEL A Ö, ERDEM M M. Crash Testing and Evaluation of a New Generation L1 Containment Level Guardrail[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 38: 25-37.
- [6] 雷成, 肖守讷, 罗世辉, 等. 轨道车辆耐碰撞性研究进展[J]. 铁道学报, 2013, 35(1): 31-40.
LEI C, XIAO S, LUO S H, et al. State-of-the-Art Research Development of Rail Vehicles Crashworthiness[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(1): 31-40.
- [7] LIANG R, LIU X, HU Y Z, et al. An FSRW Numerical Simplification Approach for Vehicle Frontal Crashworthiness Analysis[J]. International Journal of Crashworthiness, 2022, 27(6): 1798-1812.
- [8] 陈林, 曾玉焯, 颜泽峰, 等. 车辆撞击下钢筋混凝土桥墩的动力响应及损伤特征[J]. 振动与冲击, 2019, 38(13): 261-267.
CHEN L, ZENG Y Y, YAN Z F, et al. Dynamic Response and Damage Characteristics of a RC Pier under Vehicle Impacting[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(13): 261-267.
- [9] 赵华, 吴英龙, 王萌. 汽车碰撞仿真研究进展[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2012, 17(4): 27-33.
ZHAO H, WU Y L, WANG M. The Status Quo of Fem Simulation on Vehicle Collision[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2012, 17(4): 27-33.
- [10] 刘祯耀, 郭斌, 王林平. 基于 LS-DYNA 的车辆碰撞数值分析[J]. 力学季刊, 2020, 41(1): 179-186.
LIU Z Y, GUO B, WANG L P. Numerical Simulation of Vehicle Crashes Based on LS-DYNA[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2020, 41(1): 179-186.
- [11] 雷正保, 杨兆. 汽车撞击护栏时乘员的安全性研究[J]. 振动与冲击, 2006, 25(2): 5-11.
LEI Z B, YANG Z. Study on the Passenger Safety during the Impact Process of Automobile Against Fence[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(2): 5-11.
- [12] WU H Q, HOU H B, SHEN M, et al. Occupant Kinematics and Biomechanics during Frontal Collision in Autonomous Vehicles—Can Rotatable Seat Provides Additional Protection?[J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2020, 23(5): 191-200.
- [13] WANG Z P, SHI S J, WANG Y, et al. The Simulation Analysis on Side Collision Safety of Electric Buses[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 121/122/123/124/125/126: 1130-1137.
- [14] 陈涛, 李宁宁, 李卓, 等. 侧面柱碰撞条件下电动汽车电池系统结构优化[J]. 中国机械工程, 2020, 31(9): 1021-1030.
CHEN T, LI N N, LI Z, et al. Structural Optimization of Electric Vehicle Battery Systems under Pole Side Impacts[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(9): 1021-1030.
- [15] DIAS J P, PEREIRA M S. Optimization Methods for Crashworthiness Design Using Multibody Models[J]. Computers & Structures, 2004, 82(17/18/19): 1371-1380.
- [16] 李松晏, 郑志军. 高速列车吸能结构设计和耐撞性分析[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(2): 164-170.
LI S Y, ZHENG Z J. Energy-Absorbing Structure Design and Crashworthiness Analysis of High-Speed Trains[J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(2): 164-170.
- [17] GAO G J, ZHUO T Y, GUAN W Y. Recent Research Development of Energy-Absorption Structure and Application for Railway Vehicles[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(4): 1012-1038.
- [18] XIE S C, TIAN H Q. Dynamic Simulation of Railway Vehicle Occupants under Secondary Impact[J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51(12): 1803-1817.
- [19] 王强, 王建军, 张晓琼, 等. 金属热黏塑性本构关系的研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(9): 38-65.
WANG Q, WANG J J, ZHANG X Q, et al. Advances in the Research of Metallic Thermo-Viscoplastic Constitutive Relationships[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(9): 38-65.
- [20] 郭玲梅. 硅橡胶动态拉伸行为的测试和表征[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018: 1-18.
GUO L M. Testing and Characterization of Dynamic Tensile Behavior of Silicone Rubber[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018: 1-18.
- [21] MAHDAVI TALAROMI H, SAKHAEI F. Evaluation and Comparison of Concrete Constitutive Models in Numerical Simulation of Reinforced Concrete Slabs under Blast Load[J]. International Journal of Protective Structures, 2022, 13(1): 80-98.