

自动化与智能化技术

二维多孔材料缓冲性能仿真与优化设计软件的开发

张艺行¹, 孔令钰¹, 孙德强^{1*}, 张民泽¹, 祝子嘉¹, 聂希雅¹, 韩紫怡¹, 文秋雨¹

(1. 陕西科技大学 a. 轻工科学与工程学院 b. 轻化工程国家级实验教学示范中心

c. 3S 包装新科技研究所, 西安 710021)

摘要: **目的** 解决冲击作用下二维多孔材料计算机辅助缓冲性能评价和缓冲优化设计问题。**方法** 构建二维多孔材料缓冲性能分析有限元模型, 给出了相应的缓冲性能评价指标与数据处理方法。设计了软件的整体功能模块和系统数据库, 规划了软件的总体功能流程, 最终利用 C++ Builder 编程环境开发相关软件。**结果** 软件包括数据管理、前处理器、后处理器、优化设计等功能模块。前处理器输入基材种类、结构参数和载荷条件等, 自动生成各种二维多孔材料缓冲性能分析有限元模型文件, 并调用 ANSYS/LSDYNA 生成模型进行运算; 优化设计模块输入冲击体和基材相关参数, 得到相应二维多孔材料的最佳壁厚边长比等最佳结构参数; 数据管理模块可管理基材参数、材料缓冲性能分析和优化设计的结果。系统数据库包括基材规格尺寸、基材性能参数、缓冲性能分析结果、优化设计项目数据及其详细结果等数据表。**结论** 最终呈现了所开发软件的主界面及各模块的对应菜单项, 软件功能全面, 界面操作简便友好。

关键词: 二维多孔材料; 缓冲性能; 仿真建模; 优化设计; 软件开发

中图分类号: TB33, TB34, TB484 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2025)09-0189-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.09.021

Development of the Software for the Cushioning Simulation and Optimization Design of Two-dimensional Cellular Materials

ZHANG Yixing¹, KONG Lingyu¹, SUN Deqiang^{1*}, ZHANG Minze¹, ZHU Zijia¹,
NIE Xiya¹, HAN Ziyi¹, WEN Qiuyu¹

(1. a. College of Bioresources Chemical and Materials Engineering, b. National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education, c. 3S Research Institute of Novel Packaging Science and Technology, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to address the computer aided cushioning performance evaluation and optimization cushioning design of two-dimensional (2D) cellular materials under impact loading. The finite element model was created for the cushioning performance analysis of 2D cellular materials, and the cushioning performance evaluation indicators and their calculation methods were illustrated. The overall functional modules and system database were designed, the general functionality flow was planned, and the final software was developed with the C++ Builder development environment. The software consisted of four modules including data management, pre-processor, post-processor and optimization design. The pre-processor input the base material type, structural parameters and load conditions,

收稿日期: 2024-06-21

基金项目: 国家自然科学基金 (51575327); 国家级一流专业建设项目 (包装工程 2022); 陕西科技大学课程思政建设项目 (包装技术基础 (双语) 2022); 2024 年陕西省大学生创新训练计划 (创新训练项目, S202410708136)

*通信作者

automatically generated the finite element model files for the cushioning performance analysis of 2D cellular materials, and executed the corresponding computations by calling the ANSYS/LSDYNA software. The optimization design module produced the corresponding product cushioning optimization design file after inputting the relevant parameters of the impact body and base material. The data management module could manage base material parameters, results of cushioning performance analyses, and optimization design results. The system database was composed of data tables of base material specifications, performance parameters, cushioning performance analysis results, optimization design project data and detailed optimization results. The main interface of the developed software and its corresponding menu items for each module are presented, with comprehensive functionality and user-friendly windows.

KEY WORDS: two-dimensional cellular materials; cushioning performance; simulation modeling; optimization design; software development

多孔材料是一类由固体楞边或壁面组成的孔穴组合体,在人类生活和工程应用领域广泛存在,例如蜂窝、泡沫、木材、软木、海绵、珊瑚、骨骼等,甚至包括面包、馒头等很多食物。最简单也最常见的多孔材料是楞边或壁面呈二维多边形排列,像蜂窝一样堆积填充平面区间的材料,称为“二维多孔材料”。工程使用的二维多孔材料大多具有规则的周期性结构,常见者如图 1 所示,有三角形、四边形、六边形、X 形、圆形、椭圆形、瓦楞形、正弦波形等,具有比重小、比刚度大等特性,其基材有金属、聚合物、纸等多种。二维多孔材料具有优良的能量吸收性能,常作为缓冲材料广泛应用于航空、包装、军事、建筑、家具、交通工具制造等领域^[1-9]。影响二维多孔材料共异面缓冲性能的因素包括构型、单元结构参数、基材材质、冲击速度等^[10-16]。

关于二维多孔材料缓冲性能的测试与评价,1984 年 Maiti 等^[1]提出了多孔材料能量吸收图,由缓冲材料在不同应变率(或温度)条件下的动态压缩应力应变曲线得到。1997 年 Gibson 等详细介绍了基于能量吸收图的缓冲优化设计算法。该方法虽然考虑了多孔材料的相对密度和应变率(或温度)对其缓冲性能的影响,部分克服了相关国际标准中缓冲性能评价方法的缺点,但其是以宏观角度、在冲击速度不高的情况,认为影响多孔材料缓冲性能的因素是相对密度和应变率(或温度)。随着冲击速度增加,二维多孔材料共异面响应的动态应力急剧增加且波

动幅度越来越大^[2-3];假设缓冲材料的响应应力随着应变的增加而增加,那么用“缓冲系数-最大应力曲线”和“能量吸收图”评价材料缓冲性能仍属“类静态冲击”载荷条件下的响应曲线处理方法,所以无法用来评价高速冲击载荷作用下二维多孔材料的共异面动态缓冲性能。

基于上述研究基础,可将传统缓冲性能测试试验方法中的载荷条件变为“某一速度下的匀速冲击”,建立获取二维多孔材料动态缓冲性能的指标体系和方法。本文以不同构型的二维多孔材料为研究对象,利用有限元数值模拟方法构建分析其缓冲性能的有限元模型,基于此建立一种新的二维多孔材料动态缓冲性能测试方法和各指标的计算方法,克服传统方法无法评价高速冲击载荷作用下二维多孔材料共异面动态缓冲性能的弊端。本文对二维多孔材料缓冲性能仿真与优化设计软件进行整体功能分析和模块划分,设计系统数据库,规划软件总体功能流程,最终利用 C++ Builder 开发了环境开发相关软件。

1 相关理论与方法

1.1 缓冲性能分析的有限元模型

本软件相关有限元模型的冲击载荷条件为“某一速度下的匀速冲击”,该速度可达 300 m/s 以上。图 2 所示为二维多孔材料冲击仿真有限元模型。一定尺寸

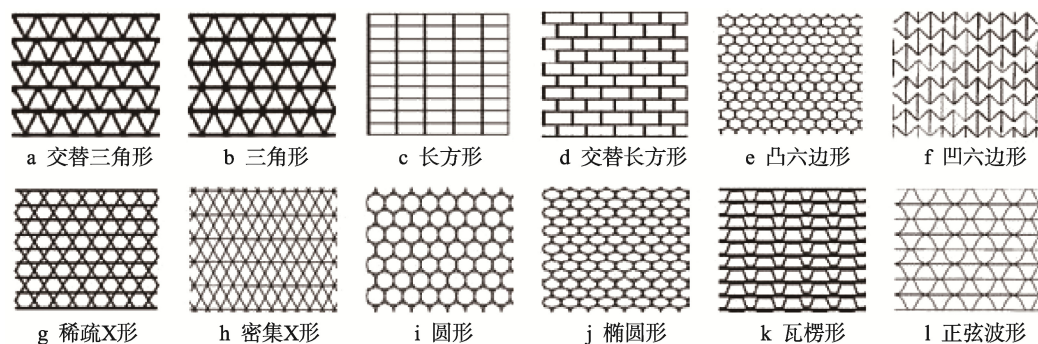


图 1 二维规则多孔材料的构型形式
Fig.1 Configurations of 2D cellular materials

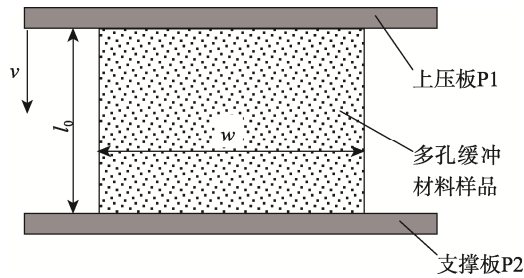


图 2 二维多孔材料冲击仿真有限元模型

Fig.2 Finite element model for impact simulation of 2D cellular materials

的二维多孔材料样品放在水平设置的上压板 P1 和固定支撑板 P2 之间, 上压板 P1 和固定支撑板 P2 均为刚性材质, 使上压板 P1 以速度 v 匀速向下运动, 向该样品施加冲击载荷。利用 Belytschko 类型的壳单元 Shell163 划分网格, 定义整个模型单面无摩擦自动接触, 二维多孔材料样品与上压板 P1 和固定支撑板 P2 之间存在摩擦力, 静动摩擦因数都为 0.02。

1.2 缓冲性能评价方法

建立二维多孔材料的冲击仿真有限元模型以后, 启动 ANSYS/LS-DYNA 软件进行计算, 计算完毕利用 LSPREPOSTD 对计算结果进行后处理, 可得冲击力位移曲线 $F-u$ 、动能位移曲线 $K-u$ 、内能位移曲线

$U-u$ 和总能量吸收位移曲线 $E-u$; 对 $F-u$ 进行积分得到功位移曲线 $W-u$ 和功冲击力曲线 $W-F$ 。由这些曲线可得二维多孔材料缓冲性能评价指标参数值。

图 3 为低速冲击载荷条件下某二维多孔材料典型的响应曲线图, 其中图 3a 为 $F-u$ 曲线, 图 3b 为 $K-u$ 、 $U-u$ 、 $E-u$ 和 $W-u$ 曲线。图 4 为高速冲击载荷条件下该二维多孔材料典型的响应曲线图, 图 4a 为 $F-u$ 曲线, 图 4b 为 $K-u$ 、 $U-u$ 、 $E-u$ 和 $W-u$ 曲线。

假设样品冲击方向的长度为 l_0 , $F-u$ 曲线上初始位移 u_0 对应的应变为初始应变 ε_0 , 则初始应变 ε_0 的计算见式 (1)。

$$\varepsilon_0 = u_0 / l_0 \quad (1)$$

样品密实化位移 u_D 对应的应变为密实化应变 ε_D , 其计算见式 (2)。

$$\varepsilon_D = u_D / l_0 \quad (2)$$

初始位移 u_0 对应的冲击力称为初始峰力 F_0 , 相应的应力为初始峰应力 σ_0 , 见式 (3)。

$$\sigma_0 = F_0 / (w \times b) \quad (3)$$

其中, w 和 b 分别为冲击方向上样品横截面的长度和宽度, 则平台应力 σ_P 见式 (4)。

$$\sigma_P = (W_D - W_0) / [(u_D - u_0) \times w \times b] \quad (4)$$

其中, W_D 和 W_0 分别为相应于 u_D 和 u_0 的冲击载荷对样品所做的功。

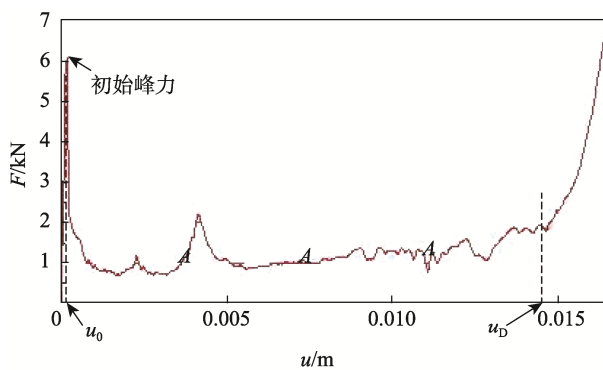
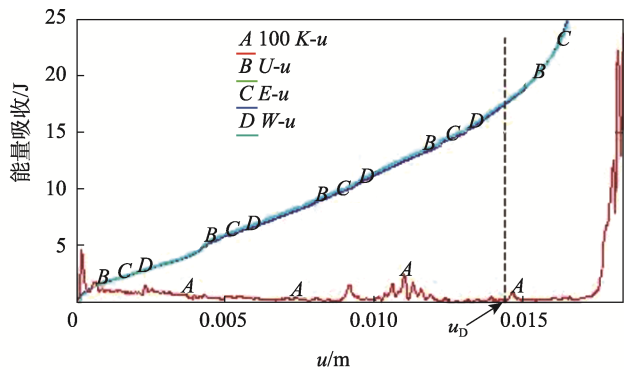
a $F-u$ 曲线b $E-u$ 、 $U-u$ 和 $K-u$ 曲线

图 3 低速冲击下某二维多孔材料典型的响应曲线
Fig.3 Typical response curves of a kind of 2D cellular material under low-velocity impact

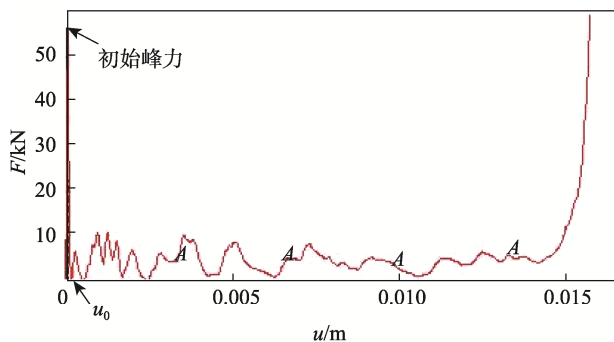
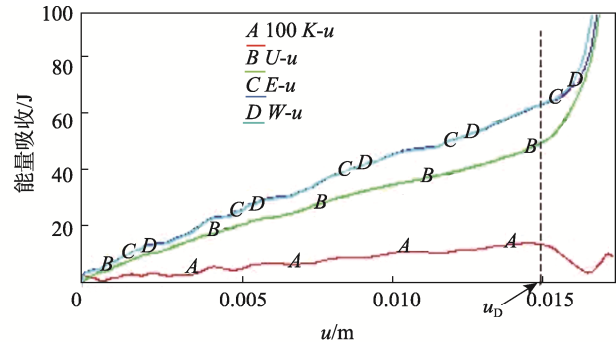
a $F-u$ 曲线b $E-u$ 、 $U-u$ 和 $K-u$ 曲线

图 4 高速冲击下某二维多孔材料典型的响应曲线
Fig.4 Typical response curve of a kind of 2D cellular material under high-velocity impact

该模块主要包括了“由 $W-F$ 得到 $C-F$ 曲线”“显示各类曲线并求其冲击参数”“显示各类曲线并获取能量参数”“任一冲击下缓冲性能分析”“读取结果文件的左右列”“查询蜂窝材料冲击性能”等子菜单项。

由 $W-F$ 得到 $C-F$ 曲线功能, 基于经典的“缓冲系数-最大应力”曲线法, 得到 $C-F$ 曲线。所有曲线通过 OpenGL 编程技术实现绘制, 均以文本数据文件形式存放。显示曲线之后可通过提取各个关键点坐标计算各项冲击性能参数, 并存入数据库。最后可设定查询条件, 有基材种类、壁厚规格和冲击方向 3 个条件, 查询到同时满足设定查询条件的所有冲击项目, 并获得项目相关的基本信息及其相应的缓冲性能参数值。

2.2.4 优化设计模块

在优化设计模块, 用户可新建缓冲优化设计项目, 并输入缓冲优化设计所需要的冲击体脆值、质量、初速度、承载面积、冲击方向等参数, 指定基材。优化结果会以文本形式显示和存储, 每个优化设计项目及其优化设计结果都会存入数据库。后期用户可打开已有设计项目进行查看、修改、重新设计等操作。

该模块主要包括“新设计项目参数输入”“修改设计项目参数”“保存最终优化设计结果文件”“查询优化设计项目优化结果”等子菜单项。

打开新设计项目参数输入后, 可输入缓冲优化设计所需的冲击体信息、结构参数、载荷条件、基材及其壁厚等已知条件, 根据设计参数自动生成优化设计文件并保存。

2.3 相关数据库设计

完成系统以上功能, 数据库所需主要数据表有: 缓冲性能分析项目数据表、优化设计项目数据表、冲击方向数据表、基材性能参数数据表、基材规格尺寸数据表等。

3 软件功能实现

利用 C++ Builder 编程环境进行软件开发, 最终软件的主界面及其对应模块菜单项, 以及各个模块菜单项组合, 如图 6 所示。

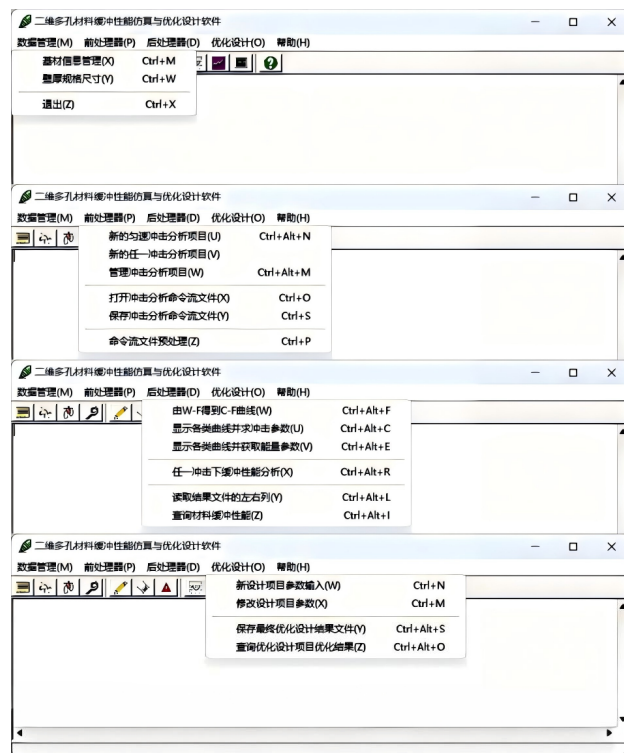


图 6 软件主界面及其对应模块菜单

Fig.6 Main interface and corresponding module menus of software

3.1 前处理及后处理

打开前处理器创建新的匀速冲击分析项目, 选择二维多孔材料种类并输入具体参数, 生成缓冲性能测试模型的命令流文件, 在后处理器打开文件, 得到二维多孔材料的缓冲性能参数, 主要相关界面如图 7 所示。

3.2 优化设计

打开优化设计模块, 可输入并管理项目参数, 点击确定后程序会根据输入的设计条件, 调取数据库中已有的冲击参数数据, 自动进行优化设计, 并将结果显示到主窗口的客户区, 操作界面如图 8 所示。

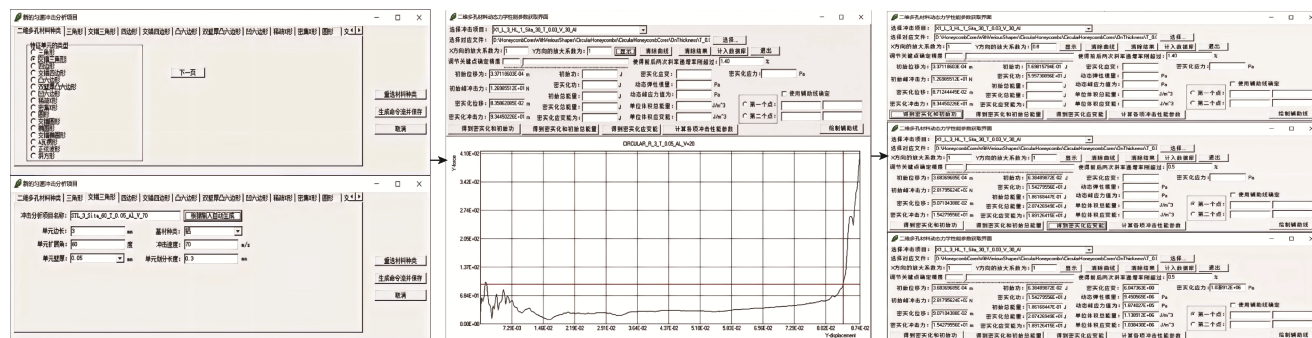


图 7 软件前处理及后处理流程

Fig.7 Pre-processing and post-processing procedures of software

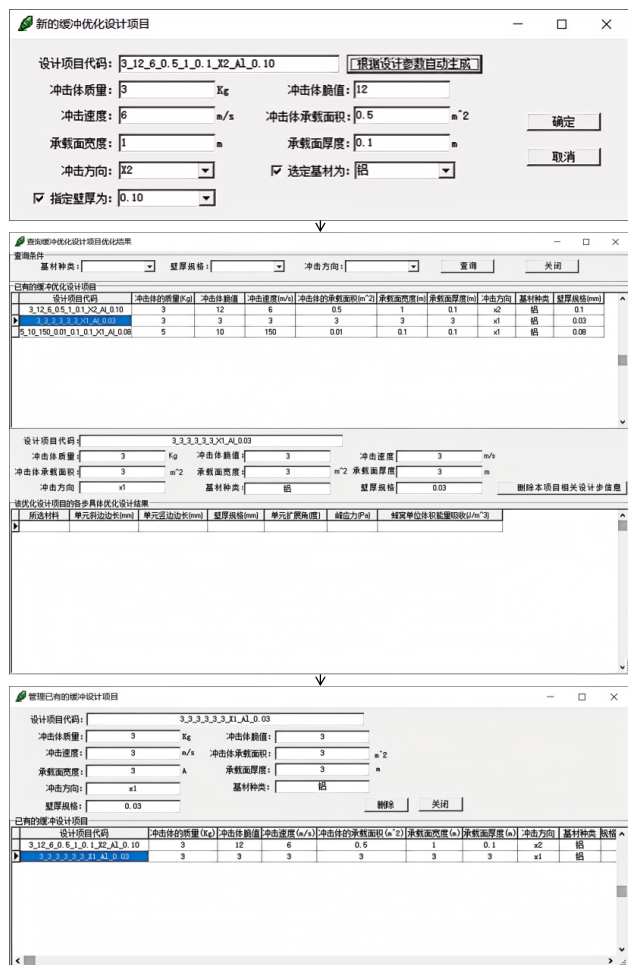


图8 软件优化设计流程

Fig.8 Optimization design process of software

4 结语

基于虚拟仿真技术和缓冲性能评价新方法,实现二维多孔材料的冲击仿真建模与缓冲优化设计,并开发相关软件。借助 C++ Builder 编程环境开发了相关软件,软件可根据冲击载荷条件建立二维多孔材料冲击仿真有限元模型,调用 ANSYS/LSDYNA 软件对模型进行仿真模拟计算,得到各冲击载荷作用下的冲击力、位移、动能、内能等曲线,可直接显示并提取相应的缓冲性能评价指标值,并存入数据库。软件还可管理系统数据库中的数据,针对各二维多孔材料进行优化设计。进行优化设计时,先输入已知基材参数,随后创建新的冲击项目,对二维多孔材料的密度和壁厚进行优化设计,并保存结果。软件功能全面,界面操作简单较友好,提高了二维多孔材料缓冲性能分析和缓冲优化设计的效率。

参考文献:

[1] MAITI S K, GIBSON L J, ASHBY M F. Deformation

and Energy Absorption Diagrams for Cellular Solids[J]. Acta Metallurgica, 1984, 32(11): 1963-1975.

[2] SUN D Q, ZHANG W H, WEI Y B. Mean Out-of-Plane Dynamic Plateau Stresses of Hexagonal Honeycomb Cores Under Impact Loadings[J]. Composite Structures, 2010, 92(11): 2609-2621.

[3] SUN D Q, ZHANG W H. Mean In-Plane Plateau Stresses of Hexagonal Honeycomb Cores Under Impact Loadings[J]. Composite Structures, 2009, 91(2): 168-185.

[4] LIU Y, ZHANG X C. The Influence of Cell Micro-Topology on the In-Plane Dynamic Crushing of Honeycombs[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 98-109.

[5] QIU X M, ZHANG J, YU T X. Collapse of Periodic Planar Lattices Under Uniaxial Compression, Part I: Quasi-Static Strength Predicted by Limit Analysis[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(10/11): 1223-1230.

[6] QIU X M, ZHANG J, YU T X. Collapse of Periodic Planar Lattices Under Uniaxial Compression, Part II: Dynamic Crushing Based on Finite Element Simulation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(10/11): 1231-1241.

[7] HU L L, YU T X. Dynamic Crushing Strength of Hexagonal Honeycombs[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(5): 467-474.

[8] ZHANG X T, WANG R Q, LI X G, et al. Energy Absorption Performance of Open-Cell Aluminum Foam and Its Application in Landing Buffer System[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(8): 6132-6145.

[9] DUNCAN O, BAILLY N, ALLEN T, et al. Effect of Compressive Strain Rate on Auxetic Foam[J]. Applied Sciences, 2021, 11(3): 1207.

[10] YANG S P, WANG Z W. Influence of Relative Humidity on Energy Absorption of Honeycomb Paperboard[C]//The 21st IAPRI World Conference on Packaging(IAPRI 2018). Zhuhai, Guangdong: Zhuhai International Convention and Exhibition Center, 2018: 24374.

[11] 范东宇, 苏彬豪, 彭辉, 等. 多孔泡沫牺牲层的动态压溃及缓冲吸能机理研究[J]. 力学学报, 2022, 54(6): 1630-1640.

FAN D Y, SU B H, PENG H, et al. Research on Dynamic Crushing and Mechanism of Mitigation and Energy Absorption of Cellular Sacrificial Layers[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,

- 2022, 54(6): 1630-1640.
- [12] 赵诗婷, 王习文. 泡沫成形法天丝纤维多孔缓冲材料的制备及其性能研究[J]. 中国造纸, 2024, 43(1): 93-100.
- ZHAO S T, WANG X W. Preparation and Characterization of Lyocell Fiber Porous Buffer Materials by Foam Forming[J]. China Pulp & Paper, 2024, 43(1): 93-100.
- [13] 张锦明, 张合, 戴可人, 等. 多孔弹性复合材料研制及其吸能缓冲特性[J]. 兵工学报, 2022, 43(1): 159-168.
- ZHANG J M, ZHANG H, DAI K R, et al. Preparation of Elastic Porous Composite Material and Its Energy-Absorption Characteristics[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(1): 159-168.
- [14] RUMIANEK P, DOBOSZ T, NOWAK R, et al. Static Mechanical Properties of Expanded Polypropylene Crushable Foam[J]. Materials, 2021, 14(2): 249.
- [15] 孙德强, 常露, 邢月卿, 等. 米字形填充正方形蜂窝异面平台应力[J]. 包装工程, 2024, 45(1): 281-289.
- SUN D Q, CHANG L, XING Y Q, et al. Out-of-Plane Plateau Stress of Honeycombs Filled with Mix of Squares and Triangles[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(1): 281-289.
- [16] MIRALBES R, HIGUERA S, RANZ D, et al. Comparative Analysis of Mechanical Properties and Energy Absorption Capabilities of Functionally Graded and Non-Graded Thermoplastic Sheet Gyroid Structures[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2022, 29(26): 5142-5155.
- [17] 何若益, 蒲小兵, 陈志强, 等. CNFC-3G 型核燃料容器在运输中的振动数据分析与研究[J]. 物流技术, 2015, 34(7): 283-285.
- HE R Y, PU X B, CHEN Z Q, et al. Analysis and Study of Vibration Data in Transportation of CNFC-3G Nuclear Fuel Containers[J]. Logistics Technology, 2015, 34(7): 283-285.