

周期性层级多孔复合结构的力学性能研究

王鑫

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年5月11日; 录用日期: 2025年6月3日; 发布日期: 2025年6月11日

摘要

本文以三维周期性点阵结构为对象, 系统探究层级化设计对其冲击力学性能的调控规律。通过理论建模、数值仿真与实验验证相结合的方法, 揭示了层级结构在面内与面外载荷下的变形机理与能量吸收特性。本研究构建了体心立方、面心立方和八面体三种结构的单层级与多层级周期性点阵构型, 探索层级化设计对三维结构压溃行为的调控机制。研究发现, 多层级设计有效提升了结构的稳定性、抗冲击能力和能量吸收水平, 层级设计方案为开发新型高性能多孔复合结构提供了重要参考。

关键词

多孔材料, 多层级结构, 耐撞性能, 有限元分析

Study on Mechanical Properties of Periodic Hierarchical Porous Composite Structures

Xin Wang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: May 11th, 2025; accepted: Jun. 3rd, 2025; published: Jun. 11th, 2025

Abstract

This paper focuses on a three-dimensional periodic lattice structure as the object and systematically explores the regulatory laws of hierarchical design on its impact mechanical properties. Through the combination of theoretical modeling, numerical simulation and experimental verification, the deformation mechanism and energy absorption characteristics of the hierarchical structure under in-plane and out-of-plane loads are revealed. This study constructs single-level and multi-level periodic lattice configurations of body-centered cubic, face-centered cubic and octahedral structures, and explores the regulatory mechanism of hierarchical design on the collapse behavior of three-dimensional structures. The research finds that multi-level design effectively

enhances the stability, impact resistance and energy absorption level of the structure. The hierarchical design scheme provides an important reference for the development of new high-performance porous composite structures.

Keywords

Porous Materials, Hierarchical Structure, Crashworthiness, Finite Element Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

周期性层级多孔复合结构因其独特的几何拓扑与力学特性,近年来受到学术界与工业界的广泛关注,而且多孔材料还具有高比强度、高能量吸收效率等优势。周期性多孔材料的设计和研发中,层级结构的引入是近年来的一项创新。层级多孔结构通过在不同尺度上结合多个不同尺寸的孔隙,进一步优化了其力学性能和能量吸收性能。周期性层级多孔复合结构在承受冲击载荷时,能通过多个层次的孔隙结构逐步吸收和分散冲击能量,从而有效提高结构的抗冲击能力和抗压缩性能。

周期性多孔复合结构的力学性能在碰撞、冲击、减震等领域具有重要应用价值。Zhang [1]等优化了泡沫填充双管结构,研究了其在碰撞载荷下的变形模式和能量吸收能力。Sun [2]等通过实验研究了碳纤维增强塑料(CFRP)管填充泡沫和蜂窝材料的吸能特性,发现填充材料能够显著提高结构的抗冲击性能。赵雪[3]等通过实验研究了多层金属多孔复合结构在面外压缩下的吸能特性,发现层级设计能够提高结构的变形协调性和能量吸收能力。缪林昌[4]等探讨了周期性结构复合材料的减振特性,并分析了其在工程中的应用前景。张武昆[5]等对轻质多孔结构在能量吸收和振动控制方面的研究进展进行了综述,并指出未来的发展方向。

本研究主要围绕三维点阵结构展开系统性研究,重点分析其在耐撞性和冲击载荷下的表现。研究内容包括理论建模、数值模拟和实验验证等方面,旨在探讨不同结构参数对力学性能的影响,系统探究其耐撞性机理与优化策略,并提出优化设计方案,总结适用于该类结构的耐撞性分析方法,为工程应用提供理论支持。

2. 耐撞性评价指标及受载响应特性

2.1. 耐撞性能评价指标

在多孔结构冲击力学研究中,耐撞性评价指标为定量分析结构在碰撞过程中的能量吸收及载荷分布提供了依据。常用的评价指标如下:

总吸能 EA 是指结构在整个碰撞过程中吸收和耗散的能量总量,是衡量结构抗撞击能力的核心指标。比吸能 SEA 是总吸能与结构质量的比值,用以评估材料或结构单位重量所能吸收的能量。SEA 和 EA 的差别在于是否考虑结构的质量对吸能的影响,由于本研究中都是考虑同质量同体积的情况进行结构耐撞性比较,因此 SEA 和 EA 具有相同评价意义,所以本研究选用 EA 作为对吸能多少的评价指标[6],其数学表达式如下:

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad (1)$$

其中：

$$EA = \int_0^d F(x) dx \tag{2}$$

式中 d 为压溃位移， $F(x)$ 为瞬间碰撞力。

峰值碰撞力 PCF (Peak Crushing Force)：结构在冲击过程中所承受的最大瞬时载荷，是衡量结构抗冲击性能的重要指标。过高的峰值碰撞力可能引发局部损伤或断裂，因此在设计阶段通常力求降低这一峰值，以减小对敏感部位的冲击危害。

2.2. 多孔结构的受载响应特性

一般来说，多孔材料在受到外界载荷作用下的加载过程会呈现特征分明的三个阶段：弹性阶段、平台阶段和压实阶段，其碰撞力 - 应变响应曲线如图 1 所示。在弹性阶段，碰撞力 - 应变关系通常近似线性增长，随着应变增大，碰撞力也相应增大，这一阶段结束点通常出现在材料内部孔壁或支撑开始发生屈服或局部塌陷之前，碰撞力达峰值后迅速下降，继而进入平台阶段。某些强度刚度较小的蜂窝体系在特定载荷方向上可能表现出非典型响应，其应力曲线可不经显著峰值由弹性阶段直接过渡到平台阶段。这时，材料内部孔壁、肋条或蜂窝单元开始塌陷或屈服，形成明显的“折叠”或“坍塌带”，在这一阶段，尽管应变不断增大，但碰撞力却不会大幅度上升，而是维持在相对稳定或缓慢上升的水平上，曲线呈现“平台”特征，材料不断吸收外部能量。最后进入压实阶段，材料逐渐达到“致密化”状态，材料内部的孔隙基本被压缩殆尽，已经无法继续通过“塌陷”来吸收能量，碰撞力 - 应变曲线急剧上升。曲线下方直至锁定应变与 X 轴围成的面积代表材料在整个压缩过程中的总能量吸收量，对于吸能材料而言，希望在可接受的最大碰撞力范围内尽可能提高这一面积，从而在冲击或碰撞时吸收更多的能量，减少传递给其他部件或人员的冲击载荷。

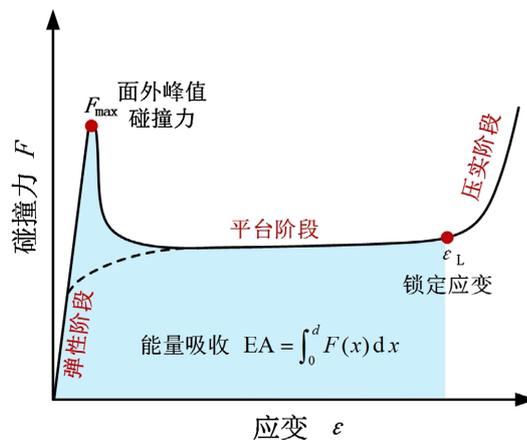


Figure 1. Schematic diagram of impact force response of porous materials during loading
图 1. 多孔材料加载过程的碰撞力响应示意图

3. 仿真模型

3.1. 三维周期性点阵结构的几何模型介绍

本节建立了一系列三维点阵结构的几何模型，分别为体心立方、面心立方和八面体型。图 2 展示了三种单层级点阵结构及其对应多层级点阵结构的等轴视图，图 3 呈现了相应的俯视图。为便于区分，对其中(a)~(c)的单层级点阵结构分别命名为 RBL、RFL 和 ROL，(d)~(f)的多层级点阵结构分别命名为 HBL、

HFL、HOL。

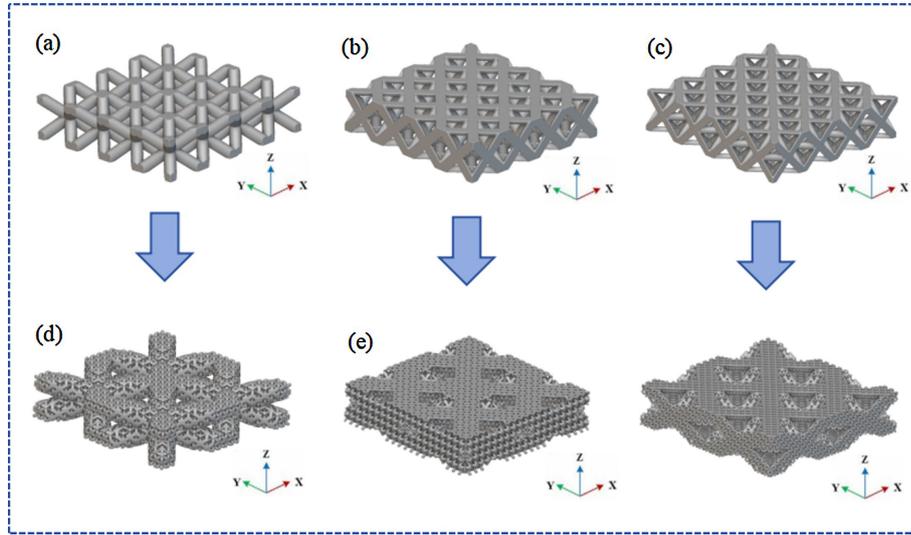


Figure 2. Isometric views of three single-layer lattice structures and corresponding multi-layer lattice structures
图 2. 三种单层级点阵结构与对应多层级点阵结构的等轴视图

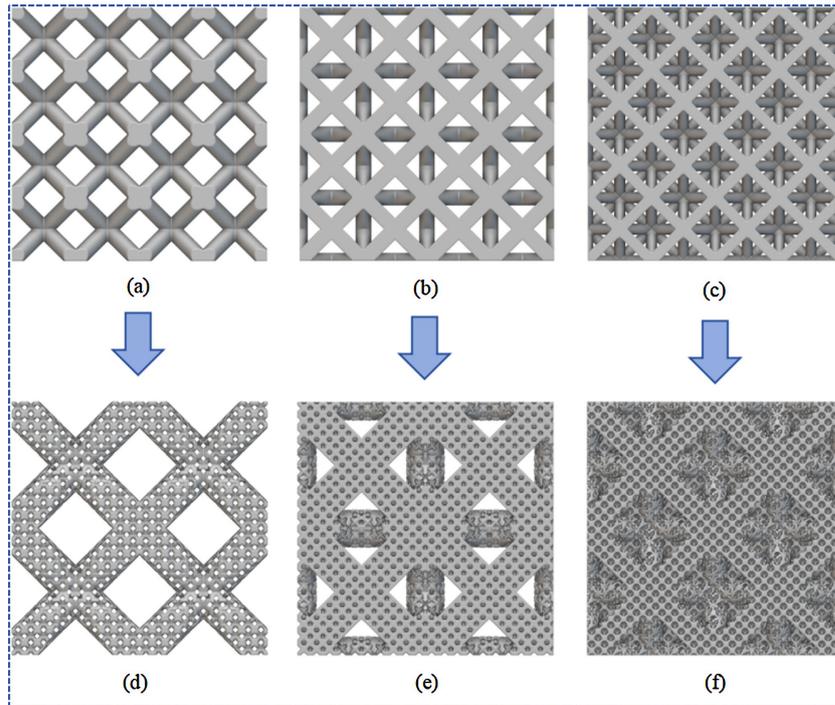


Figure 3. Top view of three single-layer lattice structures and corresponding multi-layer lattice structures
图 3. 三种单层级点阵结构与对应多层级点阵结构的俯视图

图(a)体心立方单层级点阵结构(RBL)以 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的体心立方(BCC)单胞为单元，BCC单胞通过将杆件连接至立方体的中心及各顶点，形成较为对称且力学分布均匀的骨架；进而衍生图(d)的体心立方多层级点阵结构(HBL)在体心立方母单元内嵌入自相似子结构，构建三维嵌套层级，提升微观拓扑复杂度，重构力学传递路径，为了控制网格数量及结构密度，调整其内层单胞尺寸为 $10\text{ mm} \times$

10 mm × 5 mm。

图(b)面心立方单层级点阵结构(RFL)以 5 mm × 5 mm × 5 mm 的面心立方(FCC)单胞为核心,沿空间三轴阵列,面心与顶点的连接赋予结构规则对称性,FCC 单胞在立方体的顶点与各面中心位置布置节点,因连接度更高,整体具有紧密的杆件网络;图(e)的面心立方多层级点阵结构(HFL)同样调整其内层单胞尺寸为 10 mm × 10 mm × 5 mm,在母单元边、面引入子结构,形成多尺度空间层级体系,既保留周期性特征,又通过子结构叠加增强空间结构致密性,调控面内、面外力学性能。

图(c)的八面体单层级点阵结构(ROL)以 5 mm × 5 mm × 5 mm 的八面体(Octet)型单胞排列,Octet 单胞由交叉斜杆构建的八面体单元构成,因其对角连接的特殊拓扑,在强度与刚度方面具有一定优势;图(f)的八面体多层级点阵结构(HOL)同样调整其内层单胞尺寸为 10 mm × 10 mm × 5 mm,对八面体母单元边、面进行层级化重构,引入密集子结构阵列,在保留八面体空间布局的同时,通过微观层级细化提升结构复杂度,为优化比强度、比刚度等力学性能提供结构支撑。

3.2. 有限元模型的建立

本文采用工程模拟有限元分析软件 Abaqus 建立有限元模型,以精确捕捉不同点阵构型在各加载方向下的响应。点阵结构所用的材料本构为分段线性塑性本构模型 MAT_24,用以刻画材料塑性变形阶段的力学行为。冲击板和刚性墙使用刚性材料本构模型 MAT_20 进行模拟。在处理冲击板、刚性墙与点阵结构的模拟接触中,利用自动单面接触(Automatic Single Surface)和自动点面接触(Automatic Node to Surface),精准捕捉点阵结构压溃过程中自身构件的自接触行为,以及与刚性板之间的相互作用。为反映实际工况中存在的摩擦阻力,设定冲击过程的摩擦系数为 0.2。

本文所研究的点阵结构选用 316 L 不锈钢作为其本体材料,该材料具有高韧性、耐腐蚀性等特点。其关键力学参数为:密度 $\rho = 7930 \text{ kg/m}^3$,杨氏模量 $E = 190 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.3$ 以及屈服强度 $\sigma_y = 529 \text{ MPa}$,材料的应力应变关系如图 4 所示[7]。

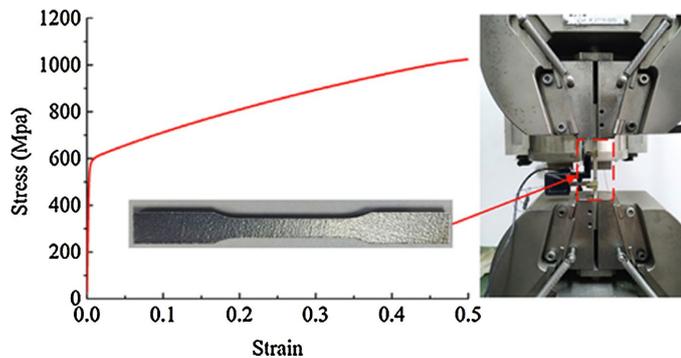


Figure 4. Stress strain relationship of 316 L stainless steel
图 4. 316 L 不锈钢的应力应变关系

3.3. 有限元模型的验证

为了验证点阵结构有限元模型的可靠性,本节对面心立方单层级点阵结构及其对应衍生的多层级结构进行准静态压缩实验,并将实验结果和有限元仿真结果进行比较,如图 5 所示。图中可以明显看出,两种结构的实验和仿真结果曲线高度吻合,两者碰撞力的波动幅度、变化频率基本一致,斜率、增长速率也呈现相似规律。由此可以说明有限元模型能精准复现多孔结构在碰撞过程中的力学响应特征,模型对结构变形机制、力学响应的数值刻画与实际实验结果较接近,可作为后续深入研究的有效工具。

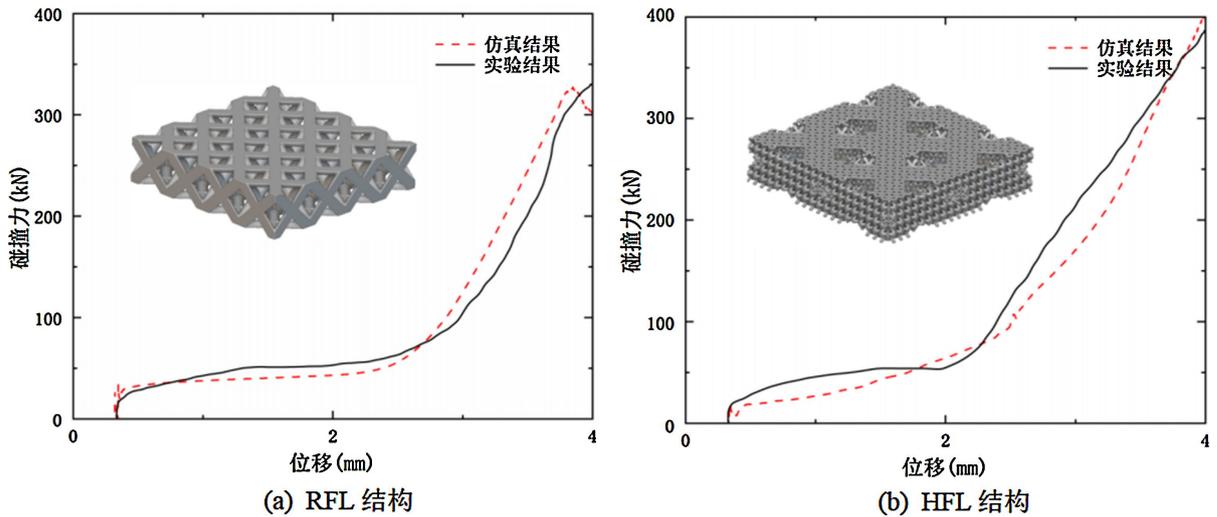


Figure 5. Comparison of collision force displacement curves between experiment and simulation of triangular honeycomb structure

图 5. 三角形蜂窝结构实验与仿真的碰撞力 - 位移曲线对比

4. 仿真结果分析

4.1. 面内冲击变形模式

为了探究三维周期性点阵结构的耐撞性特性，本节阐述点阵结构在面内冲击下的变形模式。三种单层级点阵结构与对应多层级点阵结构在面内方向的变形模式如图 6 所示，从图片可以发现，多层级设计与单层级相比展现了更复杂的局部失稳与整体稳定度差异。多层级设计在压缩初期便能同时激活多个坍塌带，使得支撑杆受力相对分散，其中 HOL 结构凭借其内部子结构的层级构造，整体变形模式较稳定。相较之下，ROL 结构出现了“X”型剪切带，产生了较为明显的横向位移，且单层级结构在变形过程中，往往会在结构单元的桁架部分出现明显弯曲或屈曲特征，变形集中于特定节点与杆件或单元交界处。由此可见，三类结构中，多层级点阵结构因内部子结构的层级布局，在面内压溃时通过子结构协同变形，使母结构变形稳定性高于单层级，且变形分布更均匀，而单层级结构变形集中于特定部位，呈现较明显的局部屈曲特征。

4.2. 面内冲击碰撞力响应与能量吸收

为了深入研究点阵结构的碰撞力响应与能量吸收，图 7~9 所示为三种单层级点阵结构与对应多层级点阵结构在面内方向的碰撞力 - 位移曲线、吸能 - 位移曲线和吸能量。观察曲线可知，单层级点阵结构和多层级点阵结构在面内方向的力学表现存在显著差异。单层级点阵结构在面内方向的碰撞力整体处于较低水平，随着位移增加其波动幅度较小。相比之下，多层级点阵结构展现出较为优异的碰撞力响应，尤其在位移后期，多层级结构碰撞力显著升高，特别是 HOL 曲线在大位移阶段碰撞力快速攀升，远超单层级结构，显示出其优异的承载能力。

4.3. 面外冲击变形模式

本节进一步研究点阵结构在面外方向的冲击特性，图 10 为三种单层级点阵结构与对应多层级点阵结构在面外方向的变形模式。从图中可以看出，单层级点阵结构在单元交叉处往往最早出现屈曲，随后沿平面扩展形成塌陷带，局部区域变化相对明显。相比之下，多层级设计通过多重堆叠使得每层结构在

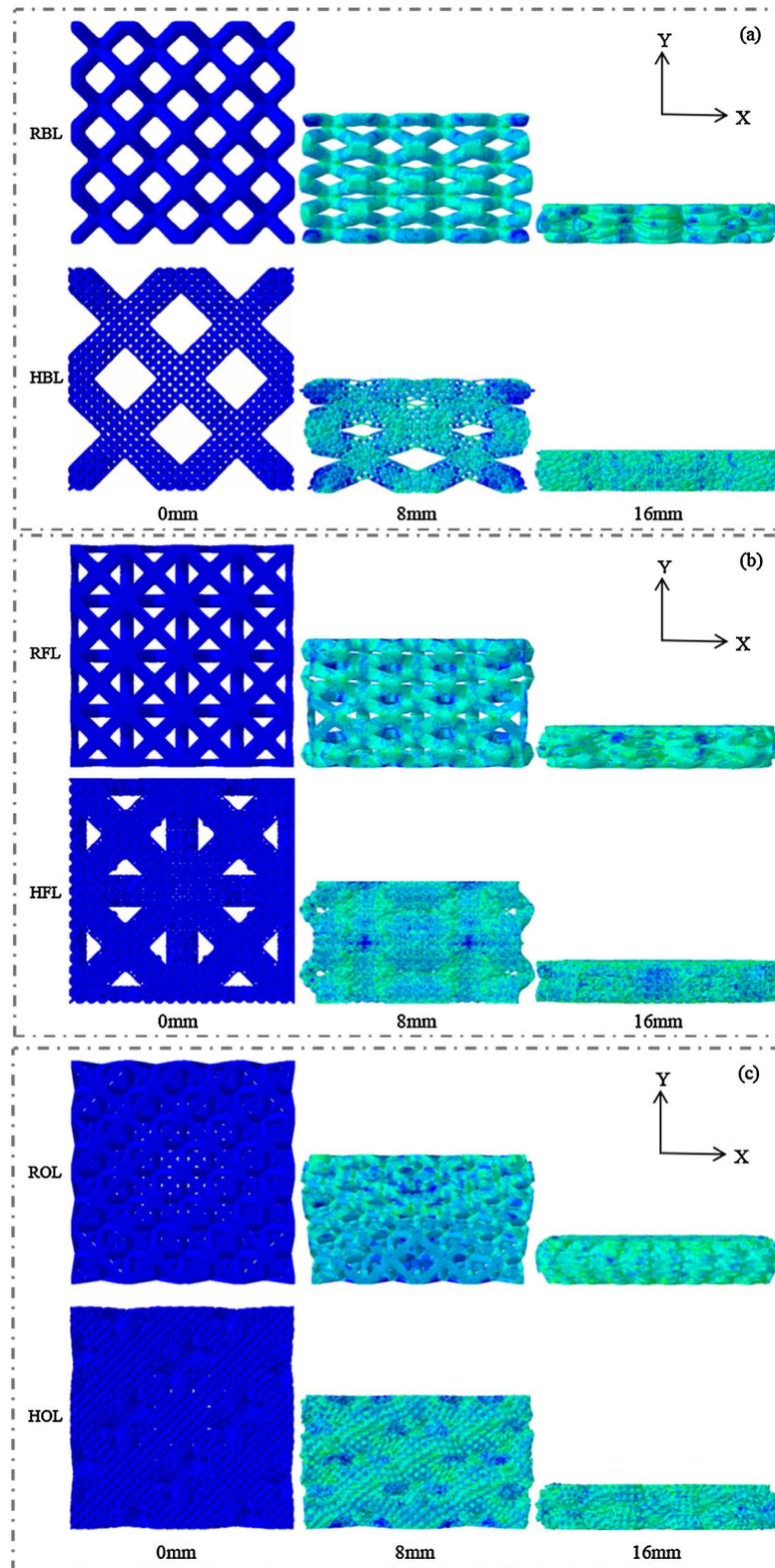


Figure 6. Three deformation modes of single-layer lattice structure and corresponding multi-layer lattice structure in the in-plane direction: (a) Body centered cubic type; (b) Face centered cubic type; (c) Octahedron

图 6. 三种单层级点阵结构与对应多层级点阵结构在面内方向的变形模式：(a) 体心立方型；(b) 面心立方型；(c) 八面体型

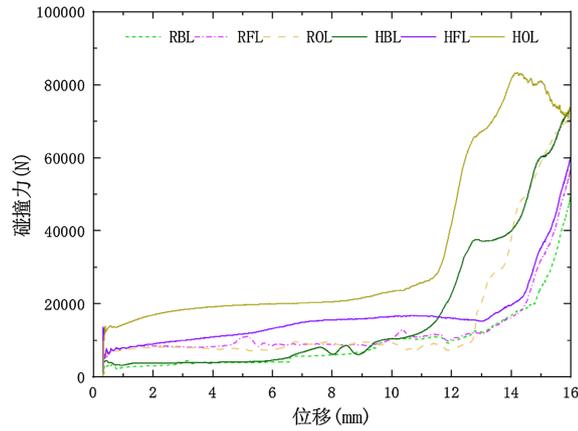


Figure 7. In plane collision force displacement curves of three single-layer lattice structures and corresponding multi-layer lattice structures

图 7. 三种单层级点阵结构与对应多层级点阵结构在面内方向的碰撞力 - 位移曲线

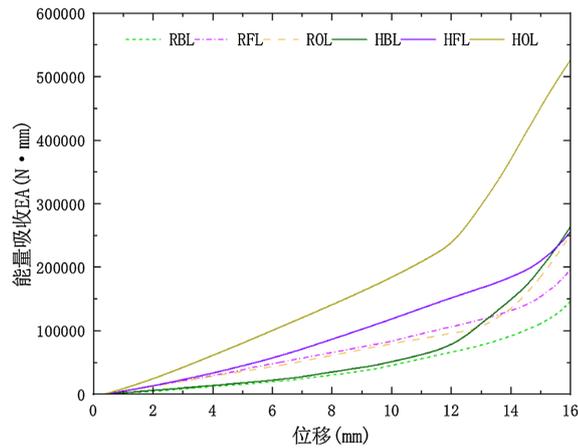


Figure 8. Energy absorption displacement curves of three single-layer lattice structures and corresponding multi-layer lattice structures in the in-plane direction

图 8. 三种单层级点阵结构与对应多层级点阵结构在面内方向的吸能 - 位移曲线

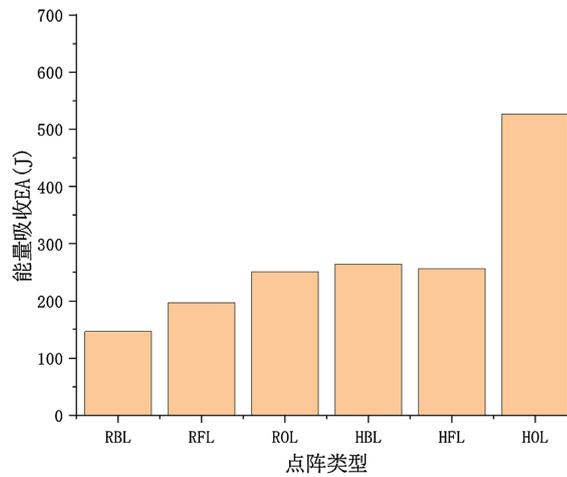


Figure 9. Energy absorption of three single-layer lattice structures and corresponding multi-layer lattice structures in the in-plane direction

图 9. 三种单层级点阵结构与对应多层级点阵结构在面内方向的吸能量

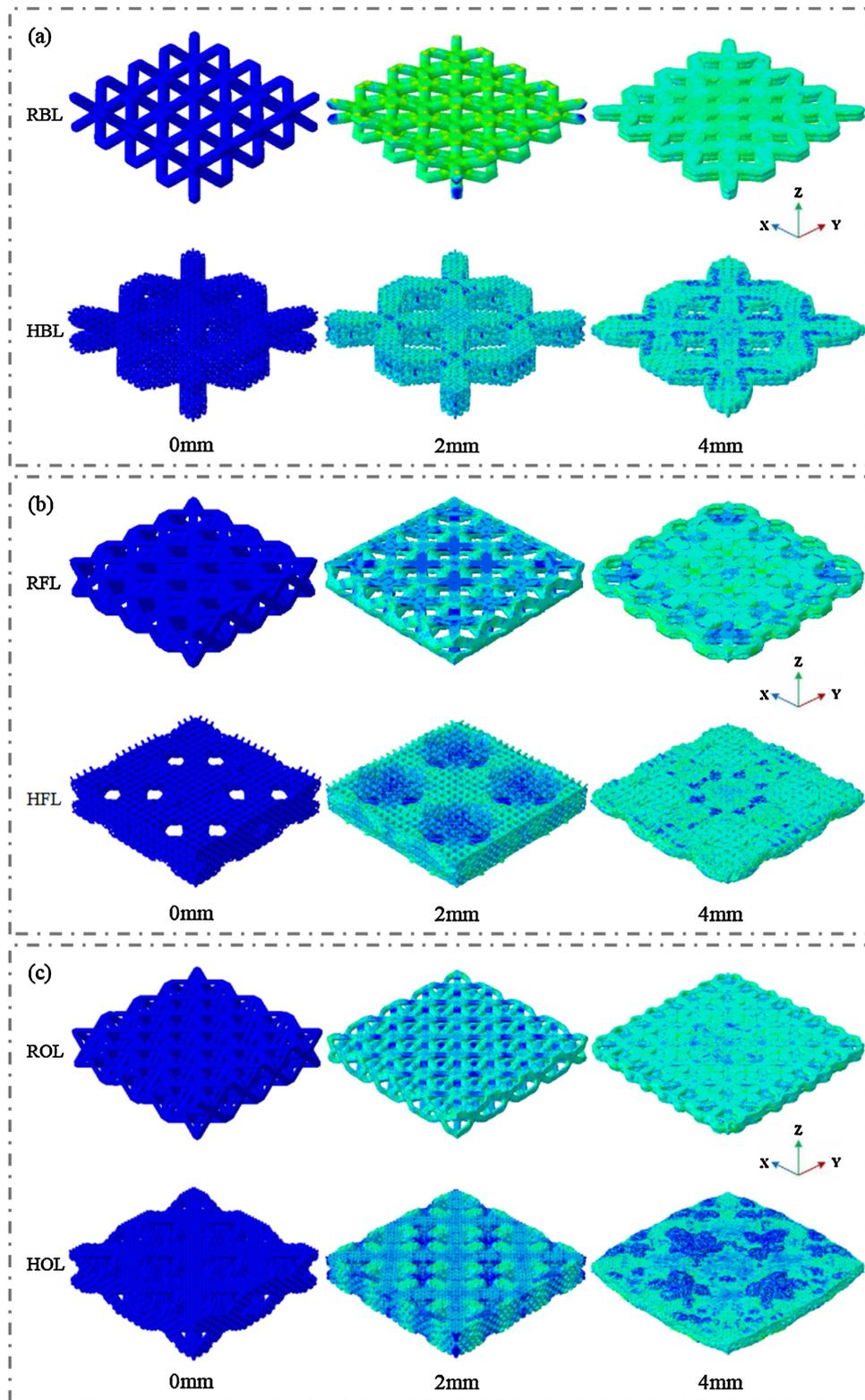


Figure 10. Three kinds of out of plane deformation modes of single-layer lattice structure and corresponding multi-layer lattice structure: (a) Body centered cubic type; (b) Face centered cubic type; (c) Octahedron

图 10. 三种单层级点阵结构与对应多层级点阵结构在面外方向的变形模式: (a) 体心立方型; (b) 面心立方型; (c) 八面体型

受力时依次进入塑性折叠，折叠波长更短且分布更为规则，材料在变形阶段的参与度随之提高。由此可见，多层级点阵结构在面外载荷下，因结构层次丰富，能有效协调各部分变形，相比单层级结构，其变形更均匀、稳定，体现出更优的变形模式与材料利用特性。

4.4. 面外冲击碰撞力响应与能量吸收

同样地，为了深入探究点阵结构的碰撞力响应与能量吸收特点，图 11~13 分别展示了三种单层级点阵结构与对应多层级点阵结构在面外方向的碰撞力 - 位移曲线、吸能 - 位移曲线和吸能量。观察碰撞力曲线可以发现，单层级结构在平台阶段都维持较低的水平，在将要进入致密化阶段才出现明显的上升，

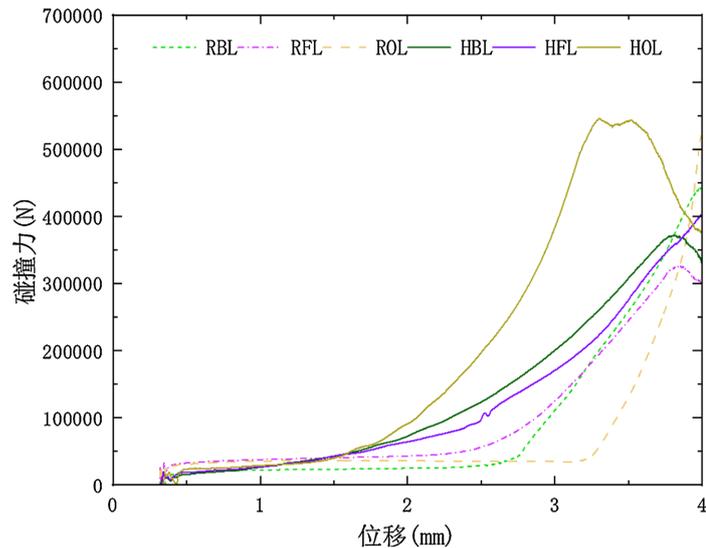


Figure 11. Impact force displacement curves of three single-layer lattice structures and corresponding multi-layer lattice structures in out of plane direction

图 11. 三种单层级点阵结构与对应多层级点阵结构在面外方向的碰撞力 - 位移曲线

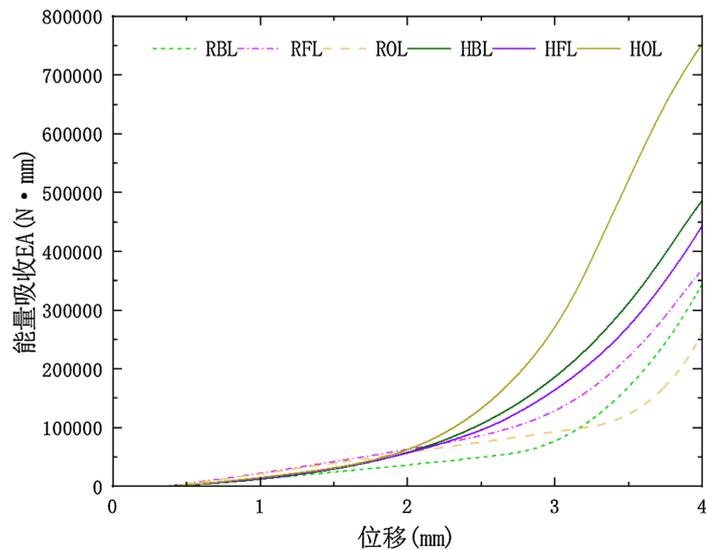


Figure 12. Energy absorption displacement curves of three single-layer lattice structures and corresponding multi-layer lattice structures in the out of plane direction

图 12. 三种单层级点阵结构与对应多层级点阵结构在面外方向的吸能 - 位移曲线

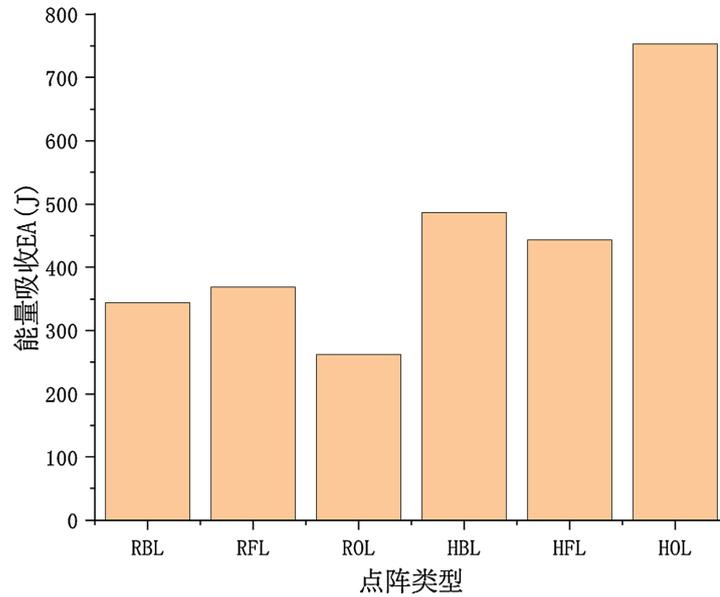


Figure 13. Energy absorption of three single-layer lattice structures and corresponding multi-layer lattice structures in the out of plane direction

图 13. 三种单层级点阵结构与对应多层级点阵结构在面外方向的吸能量

其整体碰撞力低且稳定性差。相比而言，多层级点阵结构的曲线斜率较大，碰撞力随位移增加呈现更显著的上升趋势，最终达到更高的碰撞力水平，尤其是 HOL 结构，虽然在末期呈现明显下降趋势，但在进入压实阶段前，HOL 结构能够维持较高的碰撞力区间，显示出最佳的抗冲击能力。

从能量吸收方面来看，与碰撞力 - 位移曲线规律相近，多层级点阵结构的能量吸收曲线斜率更高、随位移增加累积更快，且最终能量吸收总量明显高于单层级结构。特别是 HOL 结构，其能量吸收能力遥遥领先于其他结构。这说明多层级结构在面外方向具有更优的能量吸收能力，能够更有效地耗散冲击能量，这在抗冲击设计中具有重要意义。上述结果说明层级设计能有效提升面外冲击性能，为工程设计方面的优化提供了有价值的参考。

5. 总结

本研究以周期性层级多孔复合结构为对象，构建了一系列新颖的二维蜂窝结构与三维点阵结构，探讨其在冲击载荷下的变形模式、能量吸收机制及耐撞性优化策略。通过理论建模、数值仿真与实验验证相结合的方法，揭示了层级结构对材料力学性能的调控规律，全文得出以下主要结论：

(1) 建立了多孔结构冲击力学理论框架，明确了总吸能、峰值碰撞力、平均碰撞力及载荷效率等耐撞性评价指标。同时，基于 Abaqus 平台构建了适用于动态显式有限元求解的数值模型，确保了复杂冲击过程中的非线性行为与接触问题能够得到合理模拟。然后通过实验与仿真的对比验证，证明了所建立有限元模型的准确性和可靠性。

(2) 针对三角形、四边形和六边形蜂窝结构，通过引入层级化设计，本文详细对比了单层级与多层级结构在面内与面外冲击下的变形模式、碰撞力 - 位移响应及能量吸收特性。研究表明，相较于传统单层级蜂窝结构，多层级设计显著提升了结构的耐撞性能。在面内方向，四边形和六边形结构吸能曲线更加平稳且增长迅速；在面外方向，六边形结构在加载后期碰撞力数值大，能量吸收性能优越。总的来说，多层级蜂窝结构能有效改善局部应力集中、提高变形协调性，并在能量吸收上具有显著优势，为轻量化设计和高效能量耗散提供了新的设计思路。

(3) 对于体心立方、面心立方和八面体三种构型的三维周期性层级点阵结构, 研究发现多层次结构在面外冲击下表现出优异的承载能力, 尤其在大位移阶段能够迅速累积高吸能值。进一步分析表明, 八面体型结构能够充分发挥多层次设计的优势, 既实现了高耐撞性能, 也具备出色的轻量化水平, 其平均碰撞力最高和能量吸收最高且稳定。研究结果证实了层级化设计在提升多孔结构比强度、能量吸收效率及各向承载能力方面的有效性, 为轻量化吸能元件的工程设计提供了理论依据与技术路径。

(4) 研究成果为新能源汽车电池舱、电机防护、航天器缓冲结构等领域提供了轻量化解决方案。例如, 多层次蜂窝结构在面外冲击中的高效吸能特性, 可显著提升汽车碰撞安全性; 三维点阵结构的各向承载能力优化, 为复杂工况下的结构设计提供了新思路。

参考文献

- [1] Zhang, Y., Sun, G., Li, G., Luo, Z. and Li, Q. (2012) Optimization of Foam-Filled Bitubal Structures for Crashworthiness Criteria. *Materials & Design*, **38**, 99-109. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.028>
- [2] Sun, G., Li, S., Liu, Q., Li, G. and Li, Q. (2016) Experimental Study on Crashworthiness of Empty/Aluminum Foam/Honeycomb-Filled CFRP Tubes. *Composite Structures*, **152**, 969-993. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.06.019>
- [3] 赵雪, 闫雷雷, 卢天健, 等. 多层金属多孔复合结构面外压缩吸能特性实验[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 4(18): 28-33.
- [4] 缪林昌, 厉超, 雷利剑, 等. 周期性结构复合材料减振性状与工程应用前景[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1139-1144.
- [5] 张武昆, 谭永华, 高玉闪, 等. 周期性轻质多孔结构在能量吸收和振动方面的研究进展[J]. 振动与冲击, 2023, 42(8): 1-19.
- [6] 周俊. 3D 层级多孔结构的耐撞性分析与优化设计[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- [7] Yin, H., Zheng, X., Wen, G., Zhang, C. and Wu, Z. (2021) Design Optimization of a Novel Bio-Inspired 3D Porous Structure for Crashworthiness. *Composite Structures*, **255**, Article ID: 112897. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112897>