

## 多仿生中空曲边点阵结构压缩力学及吸能特性

刘正跑 徐峰祥 祝祎璠 邹震

### Compression mechanics and energy absorption characteristics of multi-bionic hollow curved lattice structure

LIU Zhengpao, XU Fengxiang, ZHU Yifan, ZOU Zhen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241128.001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 新型余弦函数基点阵材料变形吸能特性及结构梯度化设计

Deformation energy absorption characteristics and structure gradient design of novel cosine function-based lattice materials

复合材料学报. 2024, 41(11): 6215–6231 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240306.007>

#### X型点阵夹芯结构受局部冲击时动态力学性能试验与数值模拟

Experiment and numerical simulation of dynamic mechanical properties of X-lattice sandwich structure under local impact

复合材料学报. 2022, 39(7): 3641–3651 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210903.005>

#### 碳纤维增强环氧树脂复合材料金字塔点阵夹芯假脚结构在竖向载荷下的力学性能

Mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy composite pyramid lattice sandwich prosthetic foot structure under vertical load

复合材料学报. 2021, 38(3): 797–808 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200717.002>

#### 格构腹板增强泡沫夹芯复合材料准静态压缩吸能特性

Energy absorption behavior of foam-filled sandwich composite materials reinforced by lattice webs under quasi-static compression

复合材料学报. 2022, 39(8): 3965–3981 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211117.002>

#### 增材制造仿生结构的力学性能优化及其功能设计研究进展

Research progress on mechanical performance optimization and functional design of additive manufactured biomimetic structures

复合材料学报. 2024, 41(9): 4435–4456 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240423.004>

#### 连续纤维Octet-truss点阵夹芯结构制造及抗压缩性能

Fabrication and compression performance of continuous fiber Octet-truss lattice sandwich structure

复合材料学报. 2021, 38(6): 1767–1774 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201209.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

# 多仿生中空曲边点阵结构压缩力学及吸能特性



分享本文

刘正跑<sup>1,2</sup>, 徐峰祥<sup>\*1,2</sup>, 祝祎璠<sup>1,2</sup>, 邹震<sup>1,2</sup>

(1. 武汉理工大学 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 武汉 430070;

2. 武汉理工大学 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 武汉 430070)

**摘要:** 为开发出具有增强力学性能和卓越能量吸收能力的轻质结构, 提出了一种具备高平台应力、高刚度、高强度、高比吸能等特性的新型多仿生中空曲边 (Multi-bionic hollow curve, MHC) 点阵结构。利用 Ls-Dyna 软件建立了体心立方 (Body centered cubic, BCC) 点阵结构在准静态压缩下的有限元数值模型, 并通过试验与数值模拟结果的对比验证了模型的准确性。此外, 对 BCC、曲边体心立方 (Curve body centered cubic, CBCC)、中空体心立方 (Hollow body centered cubic, HBCC) 以及 MHC 点阵结构开展准静态单轴压缩下的力学及吸能特性研究。研究结果表明: MHC 点阵结构通过将中空与曲边的结合设计, 显著提高了该结构的截面惯性矩, 并呈现出支杆弯曲与薄壁压溃两种变形模式, 增加了压缩过程中的塑性铰的数量, 使其获得更强的力学性能。通过研究结构参数对 MHC 点阵结构力学及吸能特性的影响, 发现当振幅为 0.8 mm、壁厚为 0.5 mm、外径为 7.2 mm 时的 MHC 点阵结构相较于 BCC 点阵结构在平台应力、比吸能、比强度以及比刚度方面分别提升了 176.3%、231.3%、424.0% 和 716.8%。该多仿生特征集成方法为轻质高性能点阵结构的设计提供了创新策略, 具有重要的应用前景。

**关键词:** 多仿生超材料; 中空点阵; 数值模拟; 力学性能; 能量吸收

**中图分类号:** TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)09-5351-15

## Compression mechanics and energy absorption characteristics of multi-bionic hollow curved lattice structure

LIU Zhengpao<sup>1,2</sup>, XU Fengxiang<sup>\*1,2</sup>, ZHU Yifan<sup>1,2</sup>, ZOU Zhen<sup>1,2</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology of Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** To develop lightweight structures with enhanced mechanical properties and excellent energy absorption capabilities, the new multi-bionic hollow curve (MHC) lattice structure has been proposed. The MHC structure exhibits high plateau stress, stiffness, strength, and specific energy absorption. Finite element models of the body centered cubic (BCC) lattice structures under quasi-static compression were established using Ls-Dyna software. The accuracy of the numerical model was validated by comparing the experimental and simulation results. Additionally, the mechanical and energy absorption properties of BCC, curve body centered cubic (CBCC), hollow body centered cubic (HBCC), and MHC lattice structures under quasi-static uniaxial compression were studied. The results show that the MHC lattice structure, by combining hollow and curved designs, significantly enhances the moment of inertia of the structure's cross-section and exhibits two deformation modes: strut bending and thin-

收稿日期: 2024-09-10; 修回日期: 2024-11-03; 录用日期: 2024-11-22; 网络首发时间: 2024-11-28 14:49:00

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241128.001>

基金项目: 国家自然科学基金 (52475277)

National Natural Science Foundation of China (52475277)

通信作者: 徐峰祥, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为汽车车身智能设计方法、汽车新结构仿生设计 E-mail: [xufx@whut.edu.cn](mailto:xufx@whut.edu.cn)

引用格式: 刘正跑, 徐峰祥, 祝祎璠, 等. 多仿生中空曲边点阵结构压缩力学及吸能特性 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(9): 5351-5365.

LIU Zhengpao, XU Fengxiang, ZHU Yifan, et al. Compression mechanics and energy absorption characteristics of multi-bionic hollow curved lattice structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(9): 5351-5365(in Chinese).

walled crushing. This design increases the number of plastic hinges during compression, resulting in superior mechanical performance. Parametric studies show that when the amplitude is 0.8 mm, the wall thickness is 0.5 mm, and the outer diameter is 7.2 mm, the MHC lattice structure exhibits 176.3%, 231.3%, 424.0%, and 716.8% improvements in plateau stress, specific energy absorption, specific strength, and specific stiffness, respectively, compared to the BCC lattice structure. The integration of multiple biomimetic features offers an innovative strategy for designing lightweight, high-performance lattice structures with significant application potential.

**Keywords:** multi-bionic metamaterials; hollow lattice; numerical simulation; mechanical properties; energy absorption

近年来,超材料在汽车、交通船舶、航空航天、生物医药等领域展现出广泛的应用潜力<sup>[1-3]</sup>。点阵结构作为超材料的重要代表,凭借其轻质特性、优异的力学性能、较大的比表面积和高孔隙率,在轻量化设计、吸能、吸声、减振等方面具有突出功能性<sup>[4-7]</sup>。受化学分子结构的启发,研究人员设计了多种点阵构型,如简单立方<sup>[8]</sup>、体心立方<sup>[9]</sup>、面心立方<sup>[10]</sup>和十二面体组桁架<sup>[11]</sup>等。这些点阵材料通常根据节点连通性和初级变形模式分为拉伸主导和弯曲主导两类。其中,拉伸主导型点阵(如面心立方结构)因其高强度和高刚度而广泛用作承重结构构件;而弯曲主导型点阵(如体心立方结构)则凭借其相对较低但稳定的平台力,适用于吸收冲击动能<sup>[12]</sup>。

已有研究表明,体心立方(BCC)点阵材料通过优化结构可以进一步提升其力学性能和吸能特性<sup>[13-15]</sup>。根据支杆截面形状的不同,点阵结构研究可分为实心 and 空心两类。对于实心点阵结构的研究,孙非凡<sup>[16]</sup>通过增强节点处面积来缓解应力集中问题,提高其承载能力和比吸能。吕若萱等<sup>[17]</sup>提出了一种新型余弦函数胞元基点阵,这种弯曲设计既降低了应力集中,又提高了能量吸收能力。而Tancogne-Dejean等<sup>[4]</sup>通过理论计算和数值模拟开展了体心立方(BCC)点阵大应变压缩响应研究,发现使梁截面变细得到更高的力学性能,其中弹性模量和能量吸收分别增加70%和45%。在空心点阵结构研究方面,Zhao等<sup>[18]</sup>研究发现在相对密度一样,通过改变壁厚与孔径比值,空心点阵结构相比于实心点阵结构弹性模量提高598%~1460%。Xiao等<sup>[19]</sup>设计出由空心杆与空心球相结合的中空体心立方(HBCC)点阵结构,发现BCC无论在静态还是动态下,空心点阵结构在比强度方面均优于实心点阵结构。此外,Disayanan等<sup>[20]</sup>通过将空心与变截面加入到八角桁架结构中,在单轴压缩下能量吸收增加了173%,应力-应变更加平稳。这些研究表明:由于空心薄壁结构具有

较大的回转半径和优越的屈曲抵抗性能,在力学性能和能量吸收方面具有显著优势<sup>[21]</sup>。

除上述设计方法外,仿生学在设计点阵结构方面具有卓越指导能力。自然界中的生物结构,如竹子<sup>[22]</sup>、玻璃海绵的骨骼<sup>[23]</sup>、柚子<sup>[24]</sup>等,因其优异的物理力学性能(如高强度、高承载、高比吸能等)成为新型点阵结构设计的重要灵感来源<sup>[25]</sup>。如Wang等<sup>[26]</sup>提出了一种墨鱼骨点阵结构,通过准静态压缩试验,验证了其出色的能量吸收能力。Ma等<sup>[27]</sup>提出了一种具有两步变形体心立方点阵结构,该结构展现出双平台应力,相比于BCC点阵结构,其在能量吸收能力显著提升。Wang等<sup>[28]</sup>受二维深海玻璃海绵结构启发,提出了一种改性体心立方点阵结构,通过实验和数值模拟验证了其在能量吸收能力上的提升。孔祥清等<sup>[29]</sup>提出了一种双正弦波纹点阵结构,研究不同冲击速度对其变形模式以及能量吸收特性等方面的影响。在低速冲击时,呈现整体变形模式;中高速冲击时,结构向局部变形模式转换,且随着波纹数的增加,其承载能力和能量吸收能力均大幅度提高。此外,Wei等<sup>[30]</sup>通过将金属原子与骨骼这两种仿生结构相结合,设计出一种融合轻量化、高比强度的面心立方结构与高韧性的同心圆结构的新型多仿生点阵结构,提高了比强度和能量吸收能力。Wang等<sup>[12]</sup>提出了一种受玻璃海绵骨架系统启发的具有改良面心立方单元构型的多级圆形点阵超材料,相比于八位组点阵在比强度、比吸能、压溃载荷效率等方面分别提升了14.85%、53.28%和110.52%。目前,仿生BCC点阵结构的仿生对象种类及其功能较为单一,受上述玻璃海绵结构的启发,在BCC点阵结构中引入其他具有高力学性能、高能量吸收特性的仿生结构,从而获得具有两种仿生结构优点的多仿生超材料。

本文以自然界中的竹子和白肢野牛的牛棒骨为仿生对象,提取其中空和曲边结构特征,基于BCC点阵结构提出了一种多仿生中空曲边(Multi-

bionic hollow curve, MHC) 点阵结构。首先对 BCC 点阵结构的准静态压缩试验结果与数值模拟结果进行对比, 验证模型的准确性, 再与 BCC 点阵结构、曲边体心立方 (CBCC) 点阵结构以及 HBCC 点阵结构等进行数值模拟的准静态压缩试验及结果分析。在此基础上, 进一步研究了振幅  $A$ 、壁厚  $t$ 、外径  $D_1$  等结构参数对 MHC 点阵结构的力学特性及能量吸收特性的研究。此外, 还将所提出的 MHC 点阵结构的力学性能与已发表文献中的点阵构型进行了对比。结果表明, 该点阵结构具有优异的力学性能, 同时实现了高强度、高刚度、高能量吸收的力学特性。本文提出的一种多仿生点阵结构设计策略, 旨在为开发集成高力学性能和卓越能量吸收特性的轻质吸能材料提供新的设计思路。

1 设计与数值模拟

1.1 仿生灵感来源

竹子是自然界中典型具有优良力学性能的禾本科植物, 其直径可达 18 cm, 高达 20 m 以上。如图 1(a) 所示, 宏观上为中空结构, 由节间、竹节组成。白肢野牛是世界上最大的野牛品种, 体重可达 1 500 kg。图 1(b) 展示了白肢野牛的小腿牛棒骨结构, 其表面形状为曲边结构, 由皮质骨和松质骨两部分组成。

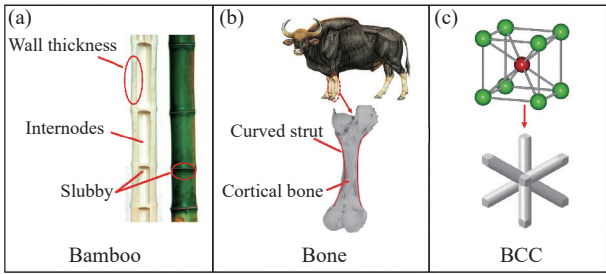


图 1 竹子、牛棒骨及体心立方 (BCC) 原子

Fig. 1 Bamboo, bovine bone and body centered cubic (BCC) atoms

1.1.1 功能相似性

当点阵结构受到压缩时, 通过自身弯曲变形、断裂、拉伸等破坏形式吸收能量。同样, 竹子进化出细长的中空管状结构且壁厚较薄, 其直径与长度的比值高达 1/250, 竹子所特有的竹节与中空结构的组合。通过自身的弯曲变形, 既可以增加承载面积, 提高抗弯、抗压性能和结构稳定性, 又可以降低自身质量<sup>[31]</sup>。牛棒骨作为白肢野牛的关键部位, 通过自身骨骼形状结构, 既能承受自身质量, 又能有效吸收奔跑过程中产生的能量。

1.1.2 载荷相似性

点阵结构作为一种超材料, 应用在汽车上的关键吸能、承载元件, 需承受来自不同方向, 不同角度的载荷。而竹子同样需承受来自自然生长环境中的多个方向的载荷, 例如大风、雨雪带来的扭转、弯曲、挤压载荷工况等。白肢野牛小腿中的牛棒骨的曲边支柱结构, 不但要承受来自高达 1 500 kg 的体重压力, 还要吸收奔跑过程中来自不同方向的冲击力, 减少对自身器官造成的损伤, 起到一定的减震作用。这种骨骼是一种特殊的生物组织, 其内部多孔结构具有轻质、刚性强、强度高且韧性良好等特点<sup>[32]</sup>。

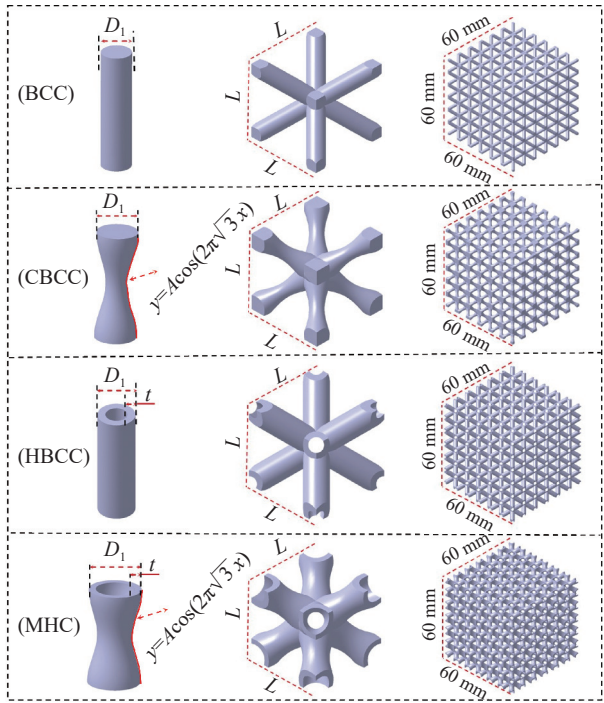
1.1.3 结构相似性

竹子宏观上呈圆柱中空结构, 牛棒骨为圆柱曲边结构。而图 1(c) 是受金属原子 BCC 排列启发的点阵结构, 其支杆为实心圆柱形, 与竹子和牛棒骨具有类似的结构特征。

在引言中已经充分说明, 对于 BCC 点阵结构研究和应用主要集中在增强力学性能或能量吸收能力。但目前通过多仿生的角度, 同时大幅度提升力学性能及能量吸收能力的体心立方点阵结构的研究较少。因此, 本文提取竹子的中空等壁厚结构和牛棒骨曲边支柱结构特征, 对 BCC 点阵结构进行多仿生增强设计。

1.2 仿生点阵结构设计

通过对牛棒骨曲边支柱结构的观察, 提取其边界轮廓线, 其轮形状近似于余弦函数曲线, 将曲线引入空心点阵结构, 设计出一种 MHC 点阵结构。支杆的形状由余弦函数  $y=A\cos(2\pi\sqrt{3}x)$  控制, 其中  $A$  是振幅,  $x$  为单胞体心为原点坐标到边的距离,  $L$  是单胞的长宽高,  $t$  是壁厚,  $D_1$  单胞的外径, 得到一个单胞支杆, 然后经过镜像生成一个 MHC 单胞点阵的胞元。MHC 点阵结构的胞元尺寸为  $L$ : 10 mm×10 mm×10 mm, 将这种单胞结构沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  3 个方向扩展, 形成 6×6×6 的阵列, 便构成了一个整体尺寸为 60 mm×60 mm×60 mm 的 MHC 点阵结构。为了充分分析 MHC 点阵结构的力学性能和能量吸收特性, 分别设计了如图 2 所示的以竹子的中空等壁厚结构为灵感的 HBCC 点阵结构; 以牛棒骨骨骼曲边支柱形状为灵感的 CBCC 点阵结构; 以及 BCC 点阵结构作为对照组, 4 种点阵结构的详细尺寸参数如表 1 所示。



CBCC—Curve body centered cubic; HBCC—Hollow body centered cubic; MHC—Multi-bionic hollow curve;  $D_1$ —Diameter;  $t$ —Thickness;  $L$ —Length;  $A$ —Amplitude

图2 不同类型点阵结构构型

Fig. 2 Different types of lattice structures

1.3 样品制造与试验

BCC 和 MHC 点阵模型选择光固化 (Stereo lithography appearance, SLA) 打印技术, 选用白色光敏树脂 (苏州中瑞智创三维科技股份有限公司) 作为原材料, 具体工艺参数为: 激光功率为 1 W, 制作速度为 100 g/h, 层厚为 0.05 mm, 打印设备为 iSLA660 型光固化 3D 打印机 (苏州中瑞智创三维科技股份有限公司)。利用紫外线对其照射 90 min 进行固化处理, 并放置半个月, 以增强材料的性能以及力学性能的稳定性, 再进行准静态压缩试验。BCC 及 MHC 样件的实际尺寸与质量如表 2 所示。

为了评估点阵结构设计策略的有效性, 需获得相应点阵结构的力学响应数据。点阵样品以及

表 1 4 种 BCC 类型单胞点阵结构详细尺寸参数

Table 1 Detailed dimensions of the lattice structures of the four BCC types

| Unit cell | $L/\text{mm}$ | $D_1/\text{mm}$ | $A/\text{mm}$ | $t/\text{mm}$ | $\rho/\%$ |
|-----------|---------------|-----------------|---------------|---------------|-----------|
| BCC       | 10            | 2.15            | —             | —             | 20.28     |
| CBCC      | 10            | 3.24            | 0.4           | —             | 20.32     |
| HBCC      | 10            | 2.86            | —             | 0.6           | 20.29     |
| MHC       | 10            | 4.64            | 0.4           | 0.6           | 20.36     |

Note:  $\rho$ —Relative density.

哑铃样品均在室温下用 SANS 公司的 CMT5205 系列微机控制电子万能试验机进行准静态压缩和单轴拉伸试验, 压缩试验设置如图 3 所示。将 BCC 和 MHC 点阵材料分别放置于下压盘上, 上压盘加载速率设定为 2 mm/min 恒定加载速度向下移动直到试样致密化为止<sup>[33]</sup>。并且在准静态试验机前方放置一台采集频率为 60 fps 的佳能 R10 数码相机进行采集试件的整个变形过程。拉伸试验中的加载速率设定为 1 mm/min<sup>[30]</sup>, 树脂材料参数均通过单轴拉伸试验获取, 拉伸性能采用哑铃样品符合 GB/T 1040.1—2018<sup>[34]</sup> 标准进行测试。材料的真实应力-应变曲线如图 4 所示, 线性阶段弹性模量由斜率决定, 屈服强度由拟合直线与平移 0.2% 后的应力-应变曲线交点确定。具体的材料参数: 弹性模量为 1 097 MPa、屈服强度为 46.4 MPa、泊松比为 0.4、密度为 1.14 g/cm<sup>3</sup>。

1.4 数值模型建立

图 5 为 1/4 点阵数值模型, 利用有限元软件 Hypermesh 和 Ls-Dyna 联合构建。在进行网格划分时, 依据 Gümrük 等<sup>[35]</sup>的研究结果, 当点阵结构的单杆直径与单胞边长比值大于 0.087 时, 实体单元优于梁单元, 本文选择六面体网格进行划分。通过网格敏感性分析, 当网格尺寸为 0.4 mm 时, 既能够满足网格质量要求, 又能显著的减少计算时间。鉴于点阵结构的对称性, 为了降低计算成本, 仅构建了全模型的 1/4, 并在 YOZ 以及 XOZ 平面上施加 Z 方向的位移, 约束 X 和 Y 方向

表 2 制造样品参数

Table 2 Manufacturing sample parameters

| Sample types        | No. | Design dimension/(mm×mm×mm) | Sample mass/g | Actual relative density $\rho_M/\%$ | Theoretical relative density $\rho_C/\%$ | Relative error of $\rho (\rho_M - \rho_C)/\rho_C \times 100\%$ |
|---------------------|-----|-----------------------------|---------------|-------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| BCC                 | 1   | 60×60×60                    | 49.51         | 20.11                               | 20.28                                    | −0.84                                                          |
|                     | 2   |                             | 50.21         | 20.38                               |                                          | +0.52                                                          |
| MHC (Reinforcement) | 1   | 60×60×60                    | 41.9          | 17.02                               | 17.67                                    | −0.65                                                          |
|                     | 2   |                             | 42.5          | 17.26                               |                                          | −0.41                                                          |

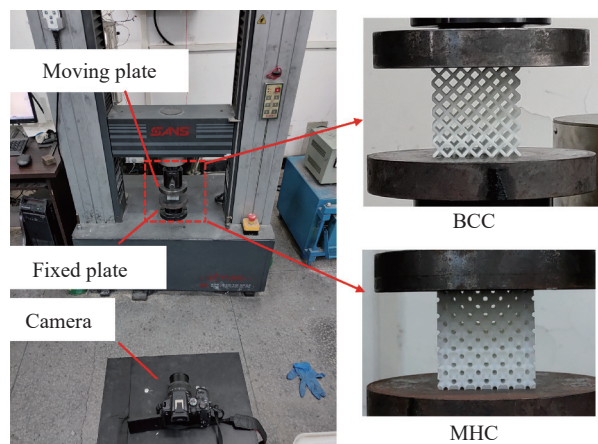


图3 BCC 样品准静态压缩试验

Fig. 3 Quasi-static compression test of BCC sample

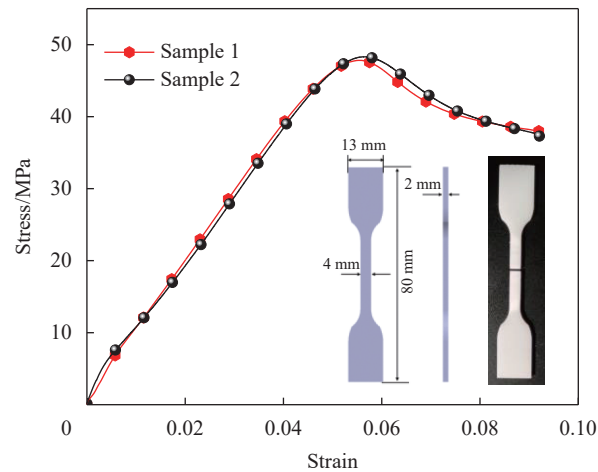


图4 材料真实应力-应变曲线

Fig. 4 Real stress-strain curves of material

的位移，从而大幅提升了计算效率。为准确模拟实际试验条件，本文采用两块刚性平板模拟试验机的两个压头。上部刚性板的  $X$  和  $Y$  方向的自由度均被约束，在  $Z$  方向以恒定速度  $v=1\,000\text{ mm/s}$  向下移动；而下部刚性板则通过约束所有自由度进行完全固定<sup>[36]</sup>。平板与点阵结构的摩擦因数为 0.2。此外，本文采用 Ls-Dyna 材料库中的弹塑性材料模型，在有限元模型中对应材料类型为 MAT\_24，并将材料真实应力-应变曲线输入到软件中。点阵结构与刚性墙之间采用面对面自动接触，点阵结构各单元之间设置单表面自动接触，以防止结构在破碎过程中互相穿透。

1.5 模型验证

为验证本文中建立的数值模型的准确性，选取 BCC 点阵结构来评估数值方法的有效性。在相同实验条件下，对 BCC 点阵样品进行 2 次重复试验，试验结果取均值与准静态压缩条件下的数值

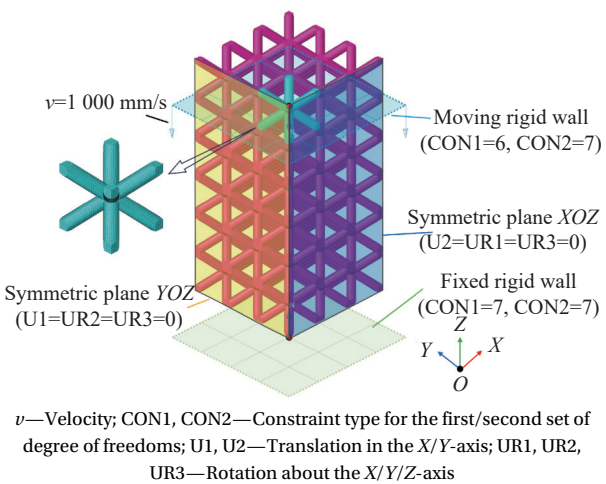


图5 准静态压缩 BCC 点阵结构数值模型

Fig. 5 Numerical model of quasi-static compressed BCC lattice structure

模拟结果进行对比分析。根据图 6 可知，试验与数值模拟的应力-应变曲线整体变化趋势基本一致。但受点阵材料本身特性以及制造中存在的缺陷的影响，且数值模拟是在理想条件下进行的，故数值模拟的应力-应变曲线结果高于试验测得的结果。根据如图 7 可以发现，BCC 点阵结构的准静态压缩试验过程与数值模拟结果较为吻合，在相同应变下，仿真结果与试验均呈现出相似的变形模式，均形成一对 X 型剪切带。通过数值模拟与试验数据的比较，验证了数值模拟的准确性和可靠性。因此，后续研究采用此数值模拟方法。

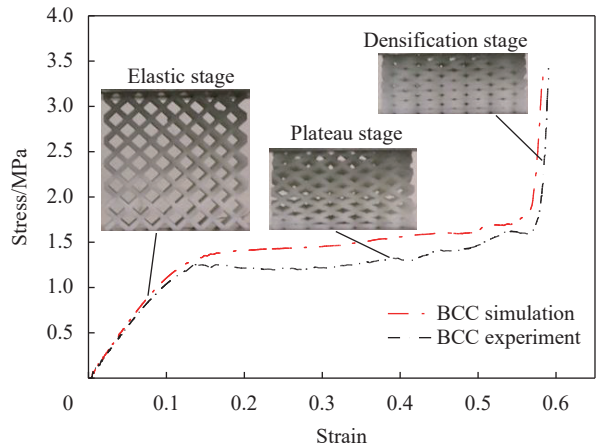


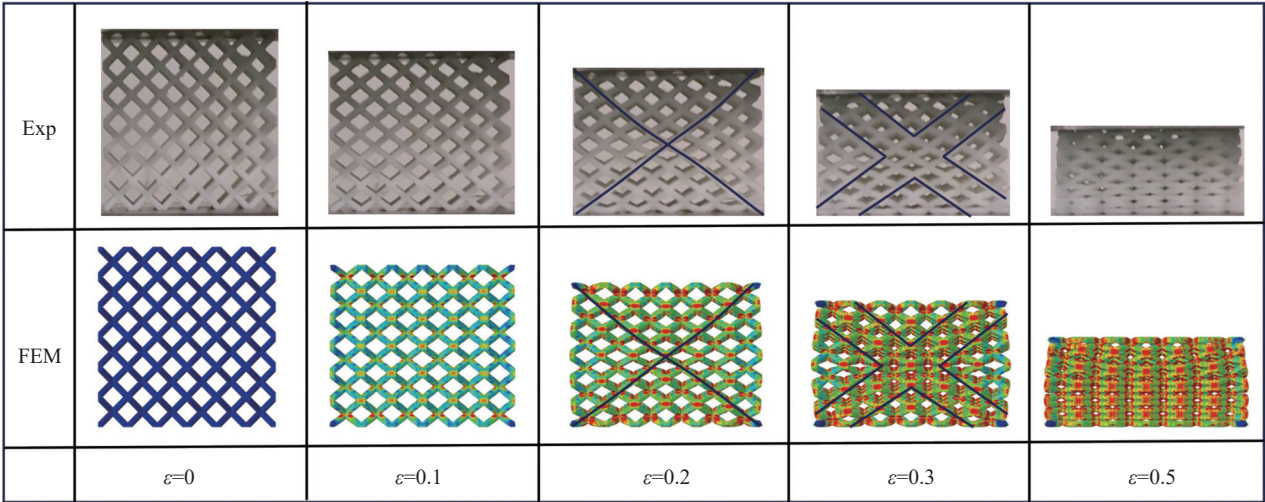
图6 BCC 的应力-应变曲线试验与模拟结果对比

Fig. 6 Comparison of stress-strain curves test and simulation results of BCC

2 数值模拟结果分析

2.1 准静态压缩响应变形模式

图 8 所示为 BCC、CBCC、HBCC 和 MHC 点



Exp—Experiment; FEM—Finite element method;  $\varepsilon$ —Strain  
图7 BCC点阵结构压缩过程试验与仿真对比

Fig. 7 Comparison of compression process test and simulation of BCC lattice structure

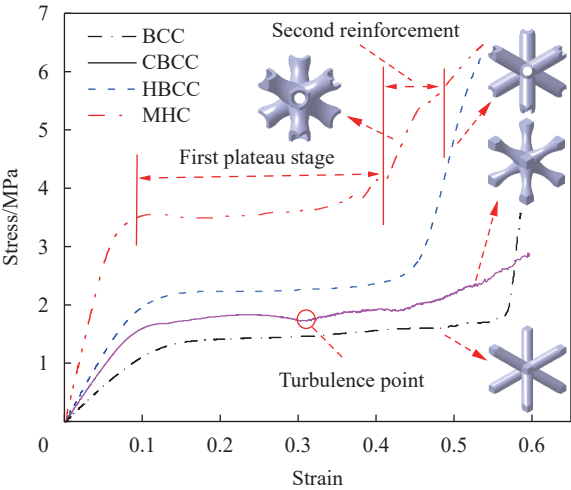


图8 4种点阵结构应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of four lattice structures

阵结构的准静态压缩条件下应力-应变曲线，通过曲线可以观察到BCC点阵结构具有代表性的3个变形阶段，即弹性变形阶段、塑性平台阶段和致密化阶段。图9为4种点阵结构压缩变形过程，BCC点阵结构随着应变的增加产生了塑性变形，位于最上层和最下层的单胞塑性变形最大，形成一对X型剪切带，且在塑性平台阶段应力-应变曲线呈现明显的稳定趋势。

对于CBCC点阵结构，从应力-应变曲线可以看出，其平台应力高于BCC点阵结构，但在应变为0.31时，出现应力曲线波动。如图9所示，由于两端较粗，抑制了该处塑性铰的出现，因而平台应力得以提升。同时，塑性铰的位置由交汇点

移至各杆中间，点阵结构整体变形模式发生变化，因此剪切带形式发生改变。从X型转变成一对弧形剪切带，有效的缓解了节点处的应力集中。

HBCC点阵结构的塑性平台曲线高于BCC和CBCC点阵结构，这是通过增大截面惯性矩来提升HBCC点阵结构的承载能力所实现的。截面惯性矩作为衡量结构抗弯能力的指标，其数值越大，抗弯性能越强。故具有较大惯性矩的结构在相同弯矩作用下，弯曲变形较小，能承受更高的载荷，显著降低了破坏风险。对图9进行对比分析表明，与BCC和CBCC点阵结构对比，HBCC点阵结构由于空心支杆结构使支柱抗弯的截面惯性矩更大，但随着支杆两端的直径的增大，虽增加了截面惯性矩，提高了支杆端部弯曲荷载的承载能力，但这也导致支杆间的相互作用更早发生，使致密化点提前。

MHC点阵结构的平台应力显著高于其他三种点阵结构。根据如图8所示的应力-应变曲线可知，该结构呈现两个平台阶段，第一平台阶段，MHC点阵结构的弹性模量和屈服强度明显高于其他结构，在塑性平台阶段，其平台应力更高，承载能力更好，有稳定的力学性能。这与竹子的结构稳定性以及牛棒骨的高承载特性相似，充分发挥了两种仿生对象的力学优势。通过图9可知，MHC点阵结构中的支杆由于采用余弦函数曲线形状，在图中箭头所指位置应力较大，在压缩工况中更容易产生弯曲变形，导致结构整体向外膨胀扩张塑性变形，并且上下形成了两条弧形剪切带。如

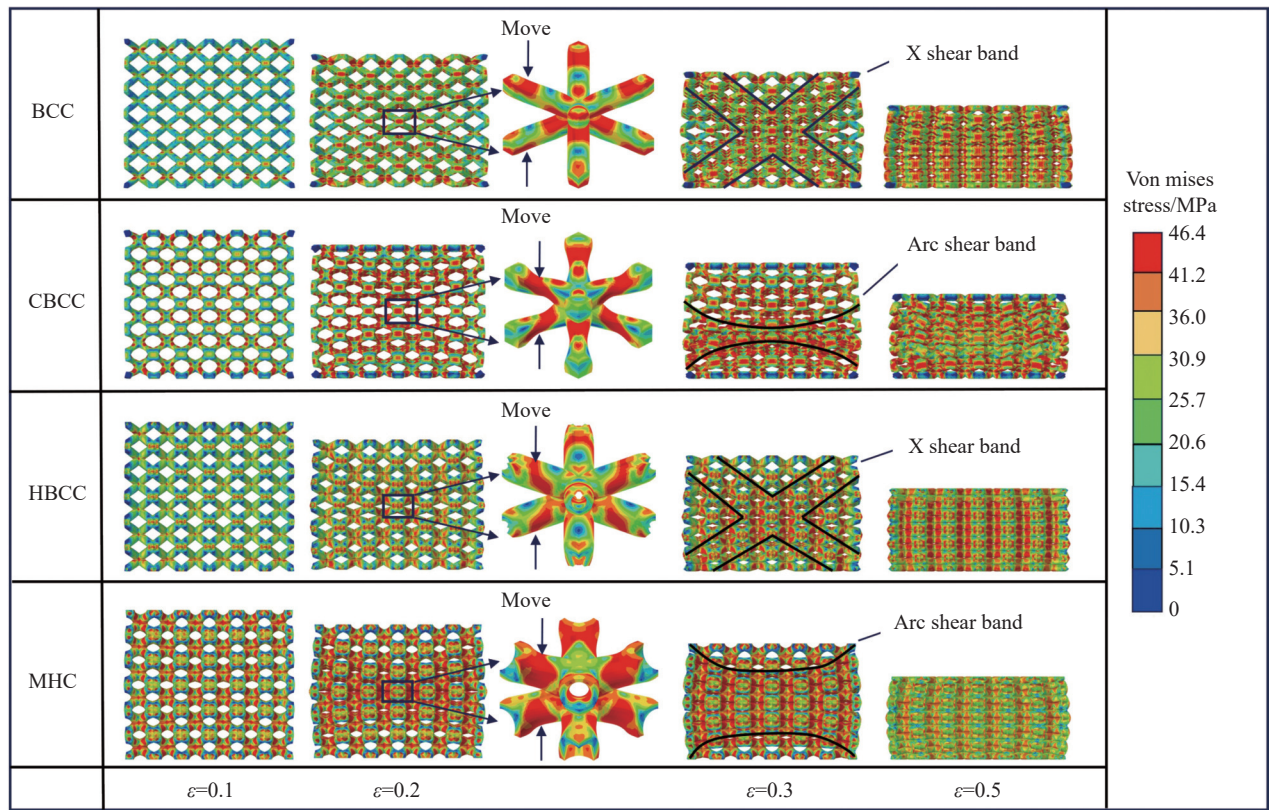


图9 4种点阵结构压缩变形过程  
Fig. 9 Compression deformation process of four lattice structures

图8中所示，当第一平台阶段达到致密化后，进入第二平台阶段，其应力水平更高，通过分析图9可知，在第二平台阶段，MHC点阵结构的空心支杆发生二次压溃变形，使最初的支杆弯曲变形转变成薄壁径向压溃变形。中心层的单胞由于塑性变形最大，最先形成局部致密化区域，随着应变的增加，MHC点阵结构从中间致密化逐渐向上下两端扩散。

2.2 准静态压缩响应4种点阵单胞支杆变形分析

通过上述图9可知，这4种点阵结构在整体压缩变形模式下表现出较为稳定的塑性平台阶段，有利于吸收能量。图10展示了4种点阵结构的塑性铰分布，塑性铰使材料进入塑性变形阶段，可以承受较大的变形而不会立即断裂，同时控制结构的变形模式，使能量在更大的区域被吸收，从而提高整体结构的能量吸收能力。因此，提高结构能量吸收能力的有效途径是在结构变形过程中增加塑性铰的数量以及区域面积。图11为4种点阵结构的单胞支杆应力分布图。BCC点阵通过支杆的弯曲变形进行吸收能量，其中节点处受力最大，形成一个塑性铰。在整个准静态压缩过程中，

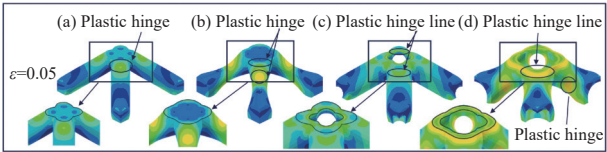


图10 4种点阵结构的塑性铰分布  
Fig. 10 Plastic hinge distribution of four lattice structures

BCC点阵结构的应力主要集中在节点处，而支杆中心部分受力较小，且支杆变形均匀，导致其应力-应变曲线呈现出较为平坦的特征。

如图11所示，CBCC点阵结构在整个变形过程中受支杆弯曲变形影响。其单胞的支杆形状为曲边，在承受压缩载荷时，可以缓解BCC点阵结构中的节点应力集中问题，使CBCC点阵结构具有较高的承载能力。由于节点处受力面积的增加，CBCC点阵结构相比于BCC点阵结构能够承受更高的载荷。随着载荷的增加，支杆最细处先受力，形成一个塑性铰并且产生弯曲变形。与BCC点阵结构相比，由最初的节点处受力转变成支杆中部最先受力，随后再将应力传递至节点。如图10(b)所示，这种支杆曲边结构设计通过增加节点区域面积，有助于缓解节点处应力集中，将应力更有

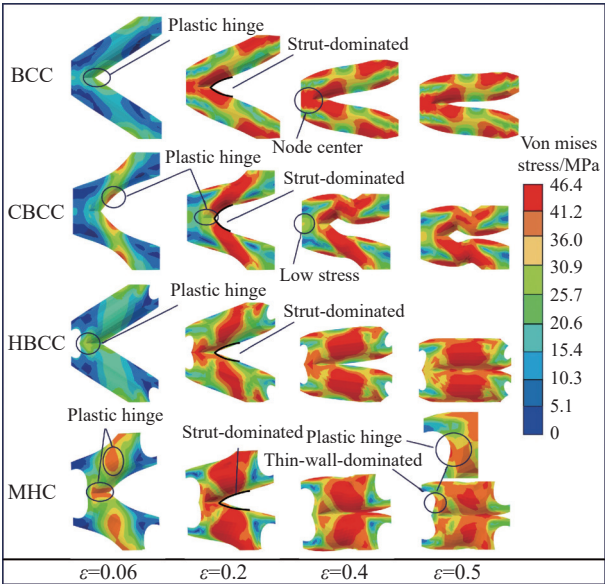


图 11 4 种单胞结构支杆应力云图

Fig. 11 Stress contours of struts of four cell lattice structures

效地转移到支杆的细处。相比于 BCC 点阵结构既增加一个塑性铰，又多形成一个弯曲变形处，从而提升了结构的能量吸收能力，使 CBCC 点阵在面对压缩载荷下展现出更优越的力学响应。

如图 10(c) 所示，HBCC 点阵结构由于其中空结构特性，高应力集中在支柱间的连接处。与 BCC 点阵结构相比，HBCC 点阵在支杆连接处形成两条塑性铰线，使塑性铰的区域更大，有利于提高能量吸收能力。HBCC 点阵的中空结构设计增加了支杆的转动惯量，减小弯曲应力，从而提高其力学性能。如图 11 所示，通过分析 HBCC 点阵结构的变形过程，发现其变形模式有两种，分别是前期以支杆弯曲变形为主；后期以薄壁压溃变形为主，当中空薄壁支杆压缩变形为水平状态并互相接触时，随着应变的进一步增加，中空薄壁支杆开始压溃变形，这种变形模式有效提升了平台应力和能量吸收能力。

MHC 点阵结构在压缩变形过程中有两种变形模式。前期通过支杆的弯曲变形吸收能量，由于其更大直径的空心支杆结构，相比于 HBCC 点阵结构有更大的支杆抗弯的截面惯性矩，从而有更高的载荷。在支杆主导的弯曲变形阶段，更大的直径会增强支杆端部弯曲荷载的承载能力。而余弦函数曲线形状不仅使支杆在压缩工况中更容易产生弯曲变形，且在支杆中间额外增加一个塑性铰。如图 10(d) 所示，由于直径的增大，在支杆连接处形成更长的塑性铰线，使塑性铰的区域面

积变大，从而极大地提升能量吸收能力。如图 11 所示，MHC 点阵结构通过结合竹子的中空薄壁以及牛棒骨的曲边支柱结构特征，这种弯曲支杆结构，在承受压缩载荷时，将最大弯曲应力产生的位置先在作用于薄壁圆环面上。随着变形的增加，节点处受力开始增加，这样有效的缓解应力集中在节点，应力分布更加均匀，提高 MHC 点阵结构的承载能力。后期当支杆变形为水平状态并互相接触时，MHC 点阵结构开始呈现出第二阶段以中空薄壁压溃变形为主的变形模式。随着应力-应变的增加，空心杆受到纵向挤压，中空薄壁支杆渐渐被压溃变形且每个支杆多增加 4 个塑性铰，随着塑性铰数量的增加极大提升了结构的能量吸收能力。

数值模拟表明，MHC 点阵结构可以改善 BCC 点阵结构在压缩载荷作用下力学性能。引入中空曲边设计相比于 BCC 点阵，既增加塑性铰数量，又增加横截面惯性力矩面积，从而增强了抵御弯曲变形能力；与 CBCC 点阵相比，增加了截面惯性矩；相比于 HBCC 点阵，增加了塑性铰的数量。因此，MHC 点阵结构通过将应力集中点分散到支杆截面中心和节点处，同时增加了节点处截面惯性矩和塑性铰数量，显著提高了整体的力学性能。

2.3 4 种点阵结构力学性能及能量吸收能力

为准确评估点阵结构的力学性能和能量吸收能力而引入的关键性能评估标准包括：弹性模量、屈服强度、比刚度、比强度、平台应力、总能量、比吸能等<sup>[37-38]</sup>，有必要确定相关参数。

弹性模量 (Elastic modulus,  $E$ ):  
$$E = \frac{\sigma_s}{\epsilon_s} \tag{1}$$

其中： $\sigma_s$  为屈服点应力； $\epsilon_s$  为屈服点的应变。

屈服强度 (Yield stress,  $\sigma_s$ ): 屈服点的应力。  
比刚度 (Specific stiffness,  $S_T$ ):

$$S_T = \frac{E}{P\rho} \tag{2}$$

其中： $E$  为弹性模量； $P$  为材料密度； $\rho$  为点阵结构相对密度。

比强度 (Specific strength,  $S_S$ ):  
$$S_S = \frac{\sigma_s}{P\rho} \tag{3}$$

压缩过程中总能量吸收 (Energy absorption,  $E_A$ ) 是最常用的表示其能量吸收能力的方法。其

表达式为

$$E_A = \int_0^s F(x)dx \tag{4}$$

其中： $F$ 为载荷； $s$ 为压缩过程中的变形位移。

比吸能 (Specific energy absorption,  $E_{SEA}$ ): 单位质量吸收的能量，其表达式为

$$E_{SEA} = \frac{E_A}{m} = \frac{\int_0^s F(x)dx}{m} \tag{5}$$

其中， $m$ 为质量。

平台应力 (Plateau stress,  $\sigma_p$ ): 是评价点阵材料能量吸收能力的重要参数，其表达式为

$$\sigma_p = \frac{\int_{\varepsilon_s}^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon)d\varepsilon}{\varepsilon_d - \varepsilon_s} \tag{6}$$

其中： $\sigma(\varepsilon)$ 为应力； $\varepsilon_d$ 为致密化应变。

通过数值模拟分析，得到 4 种点阵结构的应

力-应变曲线如图 8 所示，计算出弹性模量、屈服强度以及  $E_{SEA}$  等。如图 12 所示，在相同相对密度下比较 4 种点阵结构的比刚度、比强度、平台应力、 $E_{SEA}$ ，发现了 MHC 点阵结构的比刚度达到  $231.8 \text{ MPa}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ ，比强度达到  $13.18 \text{ MPa}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ ，平台应力为  $3.31 \text{ MPa}$  以及  $E_{SEA}$  达到  $5.95 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ ，由上述 2.2 节可知，MHC 点阵结构的变形模式在小变形下的支杆抗弯曲能力较强，在大变形下由支杆弯曲变形转变成薄壁压溃变形，产生第二平台阶段，极大地提升力学性能和能量吸收能力。与另外 3 种点阵结构相比，MHC 点阵结构表现出更强的承载能力、比刚度、比强度等力学性能以及优越的吸收能量特性。MHC 点阵相比于 BCC 点阵结构的比刚度、比强度分别提升了 361.7% 和 285.4%，平台应力和  $E_{SEA}$  分别提升了 152.7% 和 87.8%。

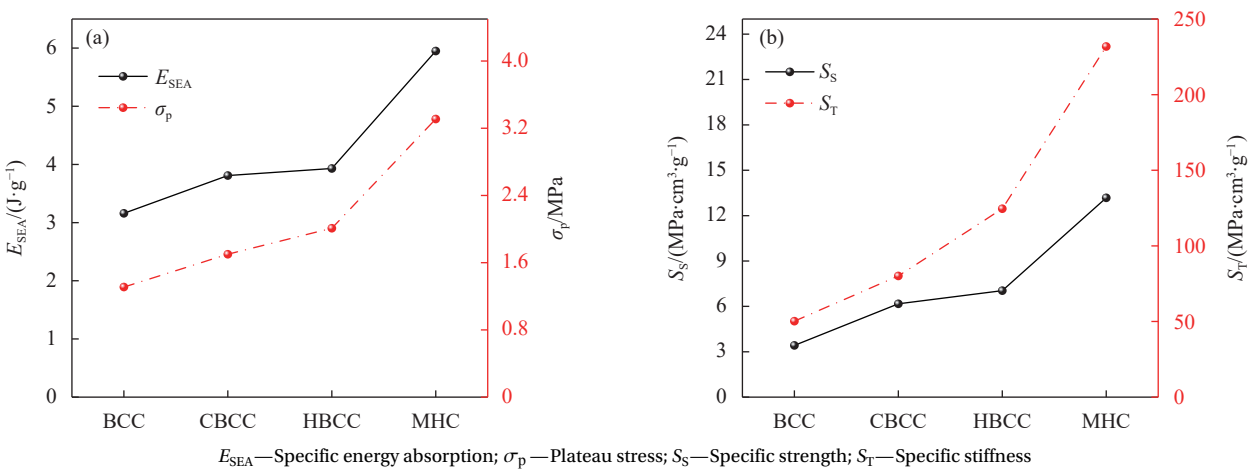


图 12 4 种点阵结构力学及吸能特性

Fig. 12 Mechanics and energy-absorbing characteristics of four lattice structures

3 MHC 性能参数分析

3.1 振幅  $A$  对 MHC 点阵结构的特性影响

由 2.3 节可知，MHC 点阵结构的力学性能与能量吸收能力均优于其他 3 种点阵结构。为进一步提升 MHC 点阵结构的这些特性，本节讨论了振幅  $A$  对 MHC 的应力-应变曲线变化及能量吸收能力的影响。选取 6 种不同振幅 (0.0 mm、0.2 mm、0.4 mm、0.6 mm、0.8 mm、1.2 mm)，其相对密度  $\rho$  均为 20.36%。

如图 13 所示，在一定范围内增大振幅  $A$  可以提高压缩过程中的平台应力以及  $E_{SEA}$ 。随着振幅  $A$  增加，平台应力呈现逐渐增大的趋势，且相邻振幅  $A$  之间的差值逐渐减小。 $E_{SEA}$  随着振幅  $A$  增

加，起初出现增加的趋势，当振幅  $A$  超过 0.8 mm 后逐渐下降，通过图 13(a) 可知，从  $A=0.8 \text{ mm}$  到  $A=1.2 \text{ mm}$ ， $E_{SEA}$  下降了  $0.8 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ ，且致密化点都在逐渐提前。如图 13(c) 所示，随着振幅  $A$  的增加导致外径  $D_1$  相应增大，既显著提升了抵抗弯曲变形的截面惯性矩，又增加了支杆连接处 (塑性铰线) 塑性铰的数量，为 MHC 点阵结构带来更高的平台应力和能量吸收能力。但支杆两端直径的增加导致互相作用时间更早，再加上随着振幅  $A$  增加，支杆表面的曲率逐渐变大，曲率大的位置更容易先致密化。振幅  $A=1.2 \text{ mm}$  时直径更大，但与  $A=0.8 \text{ mm}$  相比曲率更大，使致密化点大幅度提前，故  $E_{SEA}$  有所下降。当振幅  $A=0.8 \text{ mm}$  时，

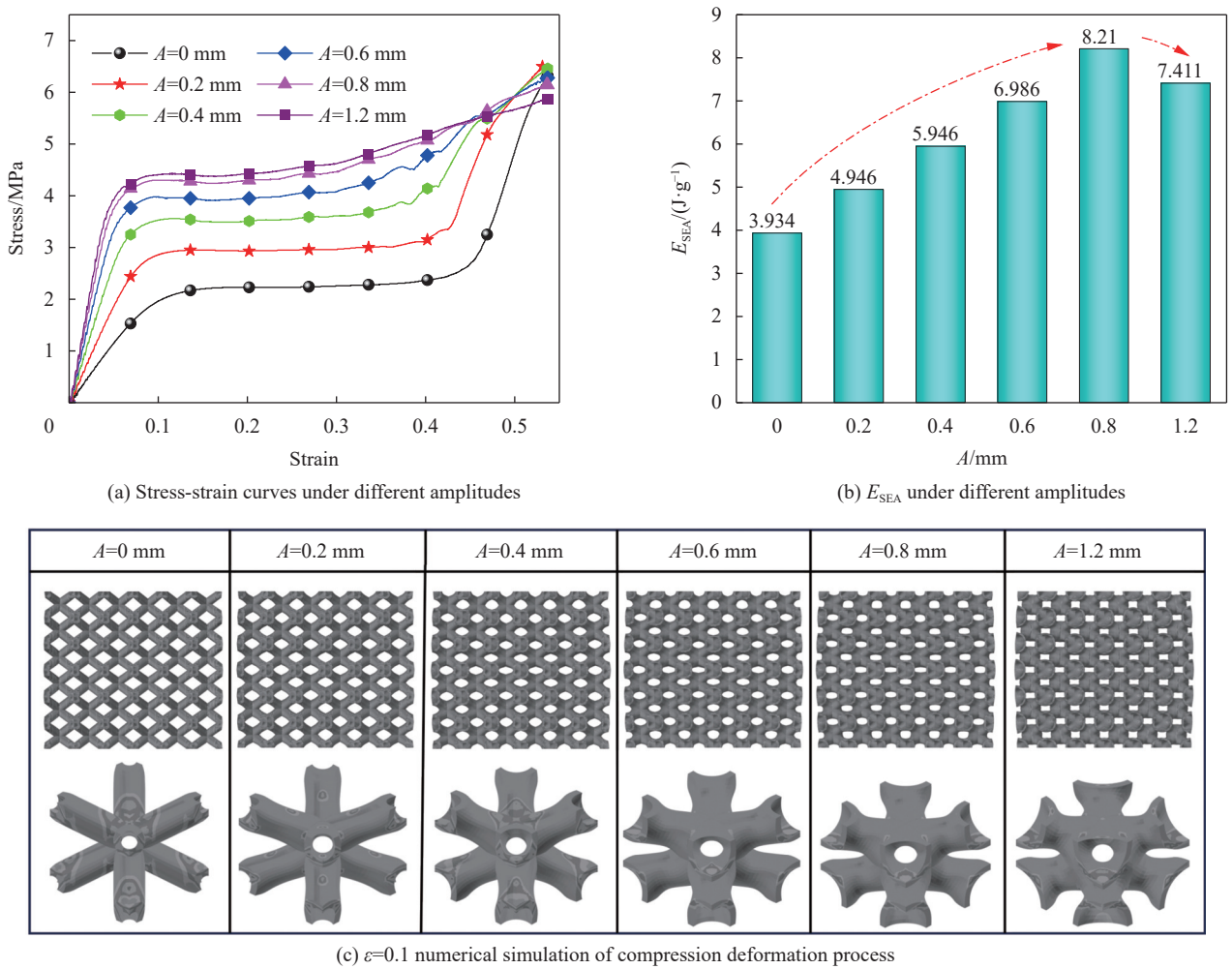


图 13 不同振幅下多仿生中空曲线 (MHC) 点阵结构力学及吸能特性

Fig. 13 Mechanical and energy absorption characteristics of multi-bionic hollow curve (MHC) lattice structure under different amplitudes

平台应力和  $E_{SEA}$  分别比振幅  $A=0.0$  mm 时, 增加了 105.5% 和 108.7%, 取振幅  $A=0.8$  mm 时, 能量吸收能力最佳。因此, 通过适当增加振幅  $A$ , 既提高结构的平台应力, 又能提升其能量吸收能力, 这对于结构在实际应用中的性能表现至关重要。

3.2 壁厚  $t$  对不同振幅  $A$  下点阵结构的影响

本节主要讨论在上述 3.1 节中最佳振幅  $A=0.8$  mm 下的 MHC 模型的影响参数, 讨论不同壁厚  $t$  (0.5 mm、0.6 mm、0.7 mm、0.8 mm、0.9 mm) 下的压缩性能和吸能影响, 其 5 种不同壁厚  $t$  的 MHC 点阵结构的相对密度  $\rho$  分别为 17.17%、20.38%、23.50%、26.49%、29.35%。

如图 14(a) 所示, 从应力-应变曲线上看, 增加支杆壁厚  $t$  引起截面接触面积的增加, 既可以显著改善平台应力又可以提高点阵结构的初始屈服强度和弹性模量。此外, 随着壁厚  $t$  增加, 呈

现出两种不同的能量吸收阶段, 即前期以支杆弯曲变形为主和后期以薄壁压溃变形为主。从图 14(a) 和 14(c) 中可以明显看出, 较小的壁厚  $t$  更容易产生薄壁压溃变形和更大的弧形剪切带; 而较大的薄壁厚度  $t$  阻碍了第二阶段的薄壁压溃变形, 更容易达到致密化, 降低了压缩行程。由于外径  $D_1$  相同, 壁厚  $t$  增加, 导致内侧的塑性铰线长度减少, 从而减少塑性铰数量, 对能量吸收能力产生不利影响。对于中空支杆较薄的点阵结构, 两种变形模式不太明显, 受力几乎处于同一种水平, 如图 14(a) 中的圆形标记线所示。但随着厚度  $t$  增加, 如图 14(a) 中六边形标记线所示, 前期以支杆弯曲变形为主, 后期以薄壁压溃变形为主。当厚度  $t$  较大, 如图 14(a) 中方形标记线所示, 支杆以弯曲变形为主。上述分析揭示了壁厚  $t$  对点阵结构变形模式和能量吸收行为的显著影响。

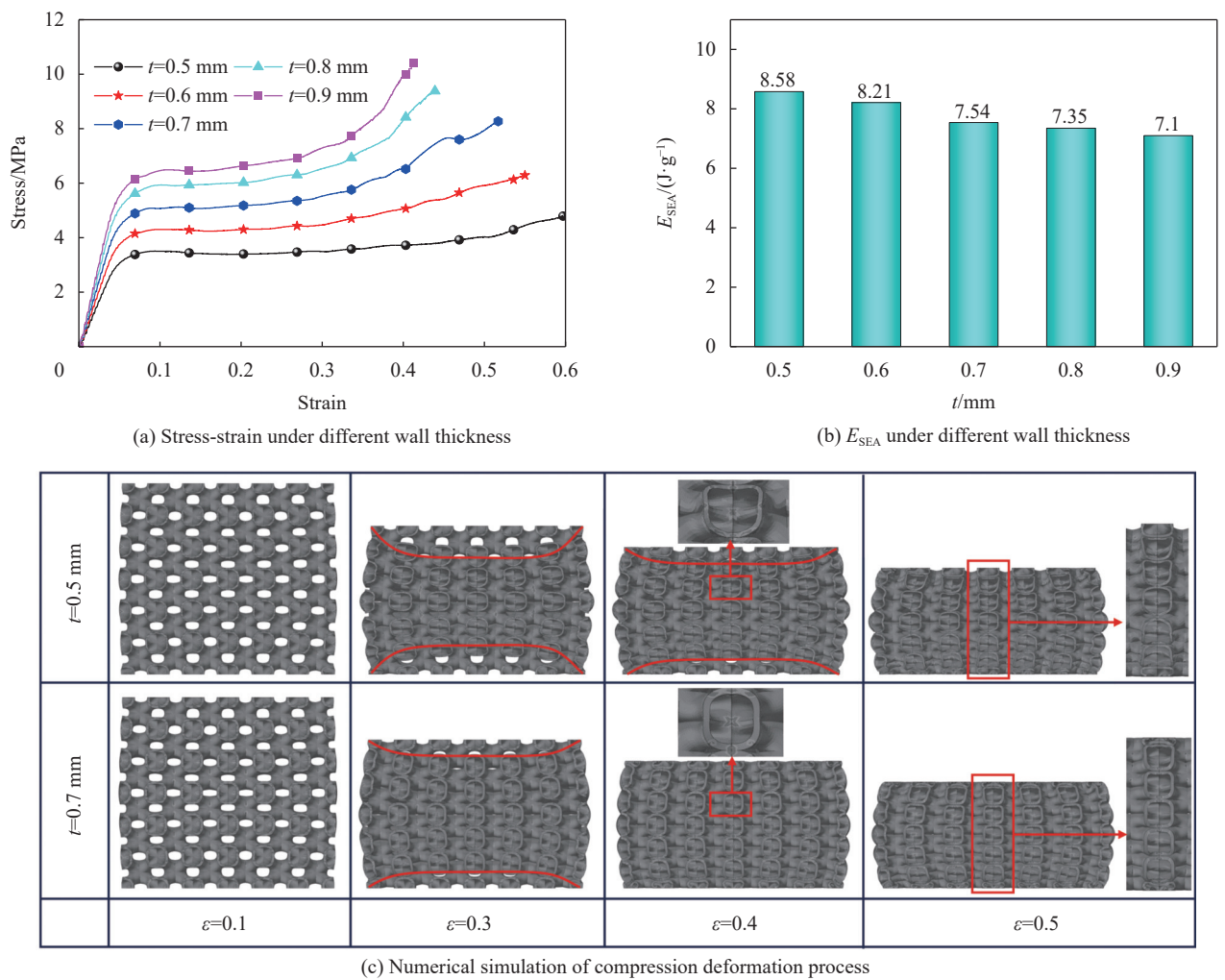


图 14 振幅  $A=0.8$  mm 时不同壁厚下 MHC 点阵结构的力学及吸能特性

Fig. 14 Mechanical and energy absorption characteristics of MHC lattice structure with different wall thicknesses when the amplitude  $A=0.8$  mm

如图 14(b) 所示为壁厚  $t$  与  $E_{SEA}$  的关系图揭示了薄壁支杆在较大压缩行程下具有更高的能量吸收能力。当振幅  $A=0.8$  mm, 厚度  $t=0.5$  mm 时, MHC 点阵结构展现出了卓越的能量吸收性能,  $E_{SEA}$  高达  $8.58 J \cdot g^{-1}$ 。然而较厚的支杆限制了以薄壁为主的二次变形, 尽管平台应力较大, 但  $E_{SEA}$  相对较低。增加空心管的厚度可以提高支撑的抗弯刚度, 但会导致结构质量过大, 不利于轻量化设计。因此, 选择适当的壁厚  $t$  对于提升材料的应力水平和能量吸收能力至关重要, 不仅涉及到提高承载能力, 还包括增加接触面积, 从而在保证结构轻量化的同时, 实现更高的能量吸收能力。

**3.3 相同振幅  $A$ 、壁厚  $t$  下对不同外径  $D_1$  点阵结构的影响**

由上述 3.2 节可知, 当振幅  $A=0.8$  mm, 壁厚  $t=0.5$  mm 时, MHC 点阵结构的吸能效果最佳。为

探究外径  $D_1$  对吸能特性的影响, 在上述 3.2 节基础上, 选取振幅  $A=0.8$  mm, 壁厚  $t=0.5$  mm 的 MHC 点阵模型。讨论不同外径  $D_1$  (5.6 mm、6.0 mm、6.4 mm、6.8 mm、7.2 mm) 对力学特性以及能量吸收方面的影响, 其 5 种不同外径的 MHC 点阵结构的相对密度  $\rho$  分别为 15.59%、16.51%、17.17%、17.56%、17.67%。

如图 15(a) 所示, 当外径  $D_1$  从 5.6 mm 扩大到 7.2 mm 时, 会显著增加截面惯性矩以及塑性铰的数量, 力学特性提升非常明显, 平台应力从 2.47 MPa 提升至 3.62 MPa。根据图 15(b) 可以看出, 当  $D_1=6.8$  mm 时,  $E_{SEA}$  为  $10.59 J \cdot g^{-1}$ , 此时最高。随着外径  $D_1$  增加, 弹性模量, 屈服强度, 平台应力均有所提升, 由于外径过大, 引起致密化点提前,  $D_1=7.2$  mm 的  $E_{SEA}$  下降到  $10.47 J \cdot g^{-1}$ 。但由于  $D_1=7.2$  mm 的比强度、比刚度分别为  $17.92 MPa \cdot cm^3 \cdot g^{-1}$ 、

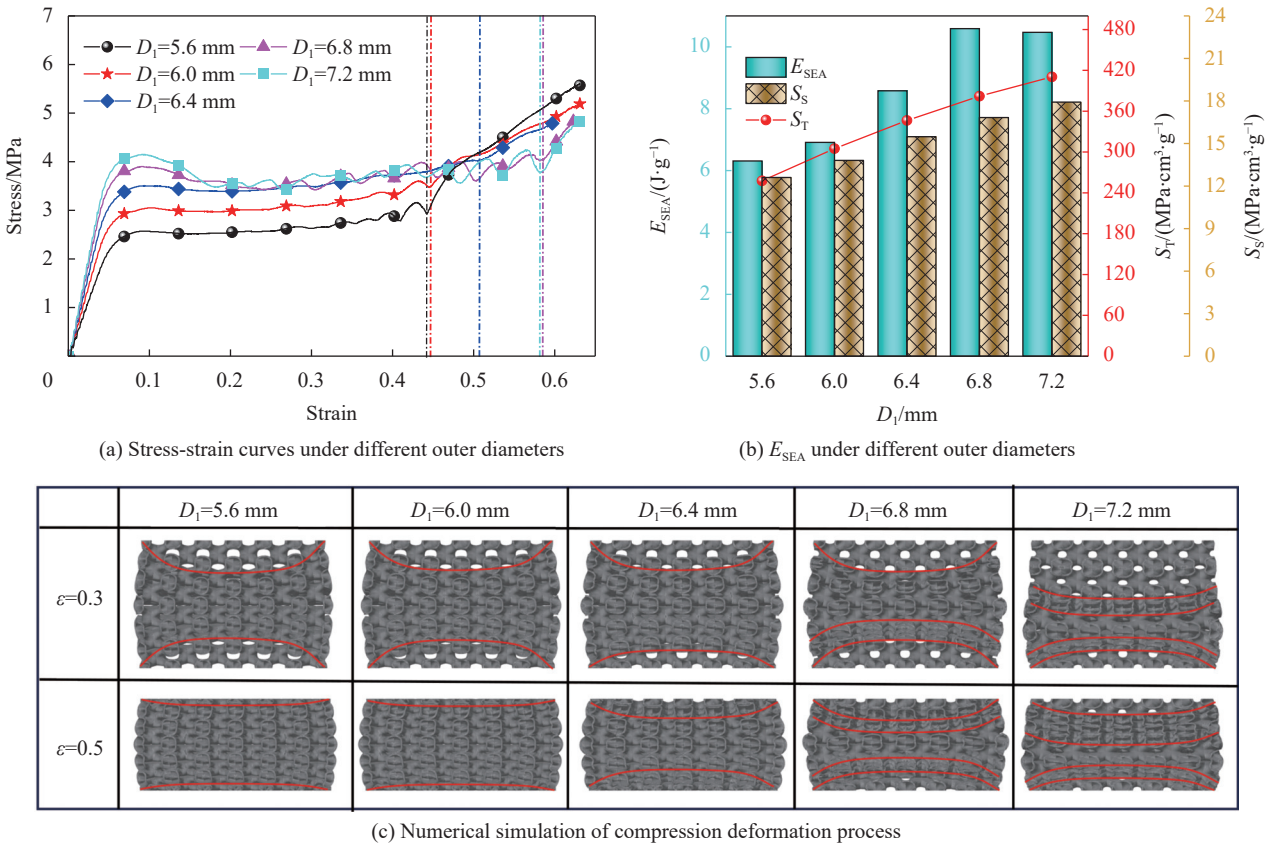


图 15 振幅  $A=0.8\text{ mm}$  时不同外径下 MHC 点阵结构力学及吸能特性

Fig. 15 Mechanical and energy absorption characteristics of MHC lattice structure under different outer diameters when the amplitude  $A=0.8\text{ mm}$

410.1  $\text{MPa}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ 、而  $D_1=6.8\text{ mm}$  的比强度、比刚度分别为  $16.84\text{ MPa}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $382.2\text{ MPa}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ 。综合考虑，当  $D_1=7.2\text{ mm}$  时，力学性能及能量吸收能力优于  $D_1=6.8\text{ mm}$ 。如图 15(c) 所示，为 5 种不同外径尺寸在应变为 0.3 和 0.5 下的变形过程，整体均受到弧形剪切带的影响。从图 15(a) 可知， $D_1$  为 5.6 mm 和 6.0 mm 的应力-应变曲线波动趋势基本一致；通过图 15(c) 可知，这两种尺寸的孔径变形过程基本一致，当  $\varepsilon=0.5$  时，中间五层变形模式均匀一致。当  $D_1=6.4\text{ mm}$ ，弧形剪切带加大，中间三层变形均匀，曲线非常平稳。当外径超过 6.4 mm 时，曲线出现波动幅度变大，是由于随着外径  $D_1$  增加，壁厚  $t$  不变，但载荷位移依然增加。下层单胞支杆难以承受更高的载荷，导致下层发生突然的弧形塌陷，因此出现曲线波动较大的现象。

3.4 增强后的 MHC 点阵结构的性能

通过将增强后的 MHC 与 BCC 点阵结构的试验与数值模拟结果进行了对比。图 16 是变形模式及应力-应变曲线的对比，MHC 点阵结构的试验

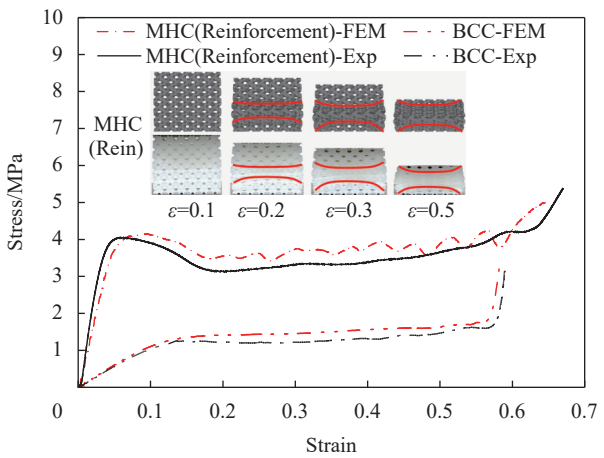


图 16 增强后 MHC 试验与数值模拟应力-应变曲线对比

Fig. 16 Comparison of stress-strain curves between enhanced MHC test and numerical simulation

样品变形模式与数值模拟的变形模式几乎一致，形成一对弧形剪切带，且应力-应变曲线吻合较好。既验证了 MHC 点阵结构数值模拟的准确性，又可以显著的突出增强后的 MHC 点阵结构的力学性能远高于 BCC 点阵结构。

通过上述参数分析可知，对于 MHC 点阵结构，

通过增大振幅  $A$ 、壁厚  $t$  与外径  $D_1$ ，整体趋势是提高力学性能以及能量吸收能力，但当这 3 种几何参数增加过大时，反而会降低能量吸收能力。如图 17 所示，通过参数分析发现，在一定范围内，当振幅  $A=0.8\text{ mm}$ 、壁厚  $t=0.5\text{ mm}$ ，孔径  $D_1=7.2\text{ mm}$  时为增强后的 MHC 点阵结构，其能量吸收能力达到  $10.47\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 。相较于 BCC 点阵结构的  $3.16\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ ， $E_{\text{SEA}}$  提升了 231.3%，且平台应力、比刚度、比强度分别提升了 176.3%、716.8%、424.0%；相较于增强前的 MHC 点阵结构，增强后的 MHC 点阵结构在比强度、比刚度和比吸能方面分别进一步提升了 76.9%、36.0% 和 76.0%。研究结果表明：设计 MHC 点阵结构时，对关键参数进行精确控制的重要性，以确保在不导致性能降低的临界点的前提下，实现力学性能和能量吸收能力的最大化。参数化研究进一步增强了 MHC 结构的力学性能，并提高了在受到冲击时的能量吸收能力。

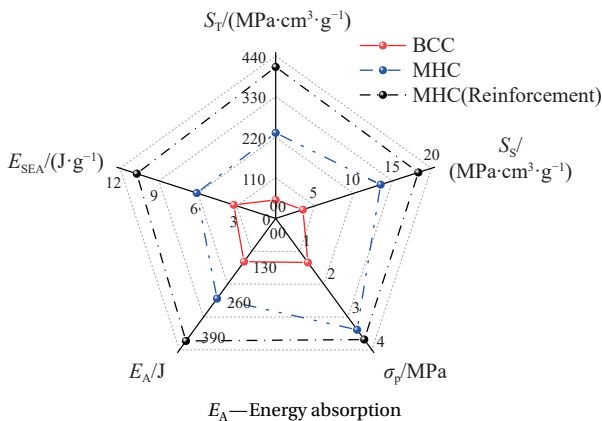


图 17 MHC 与 BCC 力学及  $E_{\text{SEA}}$  性能对比

Fig. 17 Comparison of mechanical and  $E_{\text{SEA}}$  properties between MHC and BCC

通过对上述 MHC 点阵结构参数化的分析，总结了不同结构参数下 MHC 点阵结构的  $E_{\text{SEA}}$ ，并与文献数据进行了对比。如图 18 所示，对比了文献 [16, 39-42]，包括不同点阵结构和材料类型的增材制造非金属点阵，MHC 点阵结构优势在于具有更高的  $E_{\text{SEA}}$ 。MHC 点阵结构的  $E_{\text{SEA}}$  高达  $10.59\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ ，相比于 CBCC 和 HBCC 点阵结构，其  $E_{\text{SEA}}$  提升幅度分别高达 178.0% 和 169.5%。这表明集合多种仿生对象特点于一体的点阵结构具有优异的能量吸收能力。

4 结论

提出一种新型的多仿生中空曲边 (MHC) 点阵

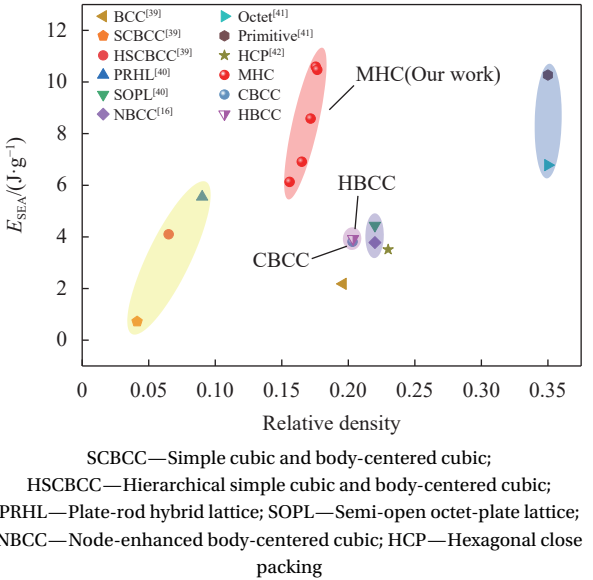


图 18 MHC 结构与其他现有构型的比吸能对比

Fig. 18 Comparison of specific energy absorption between MHC structure and other existing configurations

结构，通过与体心立方 (BCC)、曲边体心立方 (CBCC)、中空体心立方 (HBCC) 点阵结构的对比，基于数值模拟研究其力学性能以及吸能特性。采用白色树脂材料，通过选择性光固化 (SLA) 技术制备 BCC 点阵结构。在验证有限元模型基础上，进行设计变量参数化分析，优化了平台应力、比强度、比刚度和能量吸收能力等。可以得出以下结论：

(1) 在相同相对密度下，CBCC、HBCC 和 MHC 相比于 BCC 点阵结构的平台应力、比刚度、比强度、比吸能 ( $E_{\text{SEA}}$ ) 均有所提高。其中，MHC 点阵结构由于截面惯性矩更大且塑性铰数量更多，其力学性能和能量吸收能力提升幅度最大；

(2) 在相同相对密度下，随着振幅  $A$  增加，平台应力、弹性模量、 $E_{\text{SEA}}$  增长趋势趋于平缓。当振幅  $A$  超过某一定值时，虽然平台应力有所增加，但增幅较小， $E_{\text{SEA}}$  会有所下降，不利于能量吸收；

(3) 壁厚  $t$  对压缩变形行为有显著影响。MHC 点阵结构有 3 种不同的压缩变形模式：壁厚较小以薄壁压溃主导的变形模式、壁厚适中的支杆弯曲-薄壁压溃过渡模式以及壁厚较大的支杆弯曲变形模式。当振幅  $A=0.8\text{ mm}$ ，壁厚  $t=0.5\text{ mm}$  时，其能量吸收能力达到  $8.58\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ ；

(4) 随着外径  $D_1$  的增大，平台应力、比刚度、比强度呈现出正向增长的趋势。当外径  $D_1=7.2\text{ mm}$  时，MHC 点阵结构的能量吸收能力高达

10.47 J·g<sup>-1</sup>, 相比于 BCC 点阵结构, 在平台应力、比刚度、比强度、 $E_{SEA}$  方面分别提升了 176.3%、716.8%、424.0%、231.3%。

## 参考文献:

- [1] HAN S, LU G. A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 181: 107496.
- [2] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造 [J]. 中国激光, 2020, 47(5): 32-55.  
GU Dongdong, ZHANG Hongmei, CHEN Hongyu, et al. Laser additive manufacturing of aerospace high-performance metal material components[J]. *China Laser*, 2020, 47(5): 32-55(in Chinese).
- [3] WANG X, LI X, LI Z, et al. A ribbed strategy disrupts conventional metamaterial deformation mechanisms for superior energy absorption[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2024, 19(1): e2337310.
- [4] TANCOCNE-DEJEAN T, MOHR D. Stiffness and specific energy absorption of additively-manufactured metallic BCC metamaterials composed of tapered beams[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 141: 101-116.
- [5] WANG D W, WEN Z H, GLORIEUX C, et al. Sound absorption of face-centered cubic sandwich structure with micro-perforations[J]. *Materials & Design*, 2020, 186: 108344.
- [6] CHEN X, JI Q, WEI J, et al. Light-weight shell-lattice metamaterials for mechanical shock absorption[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 169: 105288.
- [7] 熊健, 李志彬, 刘惠彬, 等. 航空航天轻质复合材料壳体结构研究进展 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(6): 1629-1650.  
XIONG Jian, LI Zhibin, LIU Huibin, et al. Advances in aerospace lightweight composite shell structure[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(6): 1629-1650(in Chinese).
- [8] BAISHYA M J, MUTHU N, KHANIKAR P. In pursuit of a high-performance mechanical metamaterial: Simple-cubic-octahedral plate lattice[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 272: 109189.
- [9] GUO Z, YANG F, LI P. A partially hollow BCC lattice structure with capsule-shaped cavities for enhancing load-bearing and energy absorption properties[J]. *Engineering Structures*, 2024, 305: 117777.
- [10] YUAN Y, LIU X, ZHANG Y, et al. Modified face-centred cubic lattice with enhanced mechanical properties[J]. *Engineering Structures*, 2024, 315: 118440.
- [11] CAO X, DUAN S, LIANG J, et al. Mechanical properties of an improved 3D-printed rhombic dodecahedron stainless steel lattice structure of variable cross section[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 145: 53-63.
- [12] WANG P, YANG F, ZHENG B, et al. Breaking the tradeoffs between different mechanical properties in bioinspired hierarchical lattice metamaterials[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(45): 2305978.
- [13] NORONHA J, ROGERS J, LEARY M, et al. Ti-6Al-4V hollow-strut lattice materials by laser powder bed fusion[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 72: 103637.
- [14] WANG Z, LI P. Characterisation and constitutive model of tensile properties of selective laser melted Ti-6Al-4V struts for microlattice structures[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 725: 350-358.
- [15] ZHONG K, WANG Z, CUI J, et al. Mechanical properties and failure behavior of additively manufactured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> lattice structures infiltrated with phenol-formaldehyde resin[J]. *Ceramics International*, 2024, 50(19): 36521-36536.
- [16] 孙非凡. 节点增强型晶格结构力学性能研究及预测 [D]. 南京: 南京林业大学, 2024.  
SUN Feifan. Research and prediction of mechanical properties of node-enhanced lattice structures[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2024(in Chinese).
- [17] 吕若萱, 任浩乾, 梅轩, 等. 新型余弦函数基点阵材料变形吸能特性及结构梯度化设计 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(11): 6215-6231.  
LYU Ruoxuan, REN Haoqian, MEI Xuan, et al. Deformation energy absorption characteristics and structure gradient design of novel cosine function-based lattice materials [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(11): 6215-6231(in Chinese).
- [18] ZHAO M, LI X, ZHANG D Z, et al. Design, mechanical properties and optimization of lattice structures with hollow prismatic struts[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 238: 107842.
- [19] XIAO L, FENG G, LI S, et al. Mechanical characterization of additively-manufactured metallic lattice structures with hollow struts under static and dynamic loadings[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 169: 104333.
- [20] DISAYANAN D, BUNTORNORAPAN P, SUKPRASERT-CHAI T, et al. Improving energy absorption and failure characteristic of additively manufactured lattice structures using hollow and curving techniques[J]. *Composite Structures*, 2024, 337: 118067.
- [21] HAN C, LI Y, WANG Q, et al. Continuous functionally graded porous titanium scaffolds manufactured by selective laser melting for bone implants[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2018, 80:

119-127.

[22] ZHANG Z, ZHANG L, SONG B, et al. Bamboo-inspired, simulation-guided design and 3D printing of light-weight and high-strength mechanical metamaterials[J]. *Applied Materials Today*, 2022, 26: 101268.

[23] FERNANDES M C, AIZENBERG J, WEAVER J C, et al. Mechanically robust lattices inspired by deep-sea glass sponges[J]. *Nature Materials*, 2020, 20(2): 237-241.

[24] ZHANG Z, SONG B, FAN J, et al. Design and 3D printing of graded bionic metamaterial inspired by pomelo peel for high energy absorption[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 2023, 1: 47-54.

[25] SIDDIQUE S H, HAZELL P J, WANG H, et al. Lessons from nature: 3D printed bio-inspired porous structures for impact energy absorption—A review[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 58: 103051.

[26] WANG Y, CHEN X, SUN Y, et al. Full-band vibration isolation and energy absorption via cuttlebone-inspired lattice structures[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 274: 109283.

[27] MA X, ZHANG N, ZHANG C, et al. Mechanical behavior of a novel lattice structure with two-step deformation[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 197: 111580.

[28] WANG P, YANG F, LU G, et al. Anisotropic compression behaviors of bio-inspired modified body-centered cubic lattices validated by additive manufacturing[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 234: 109724.

[29] 孔祥清, 常雅慧, 张宁, 等. 冲击荷载作用下仿生双正弦波纹点阵结构动态响应数值模拟 [J]. *复合材料学报*, 2025, 42(4): 2282-2301.

KONG Xiangqing, CHANG Yahui, ZHANG Ning, et al. Numerical investigation on dynamic response of bio-inspired bi-directional corrugated lattice structure under impact loading[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(4): 2282-2301(in Chinese).

[30] WEI Y L, YANG Q S, LIU X, et al. Multi-bionic mechanical metamaterials: A composite of FCC lattice and bone structures[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 213: 106857.

[31] 周剑飞, 郭子琦, 许述财, 等. 生物轻质高强结构及其在吸能结构中的仿生应用 [J]. *机械工程学报*, 2023, 59(4): 80-95.

ZHOU Jianfei, GUO Ziqi, XU Shucai, et al. Biological light-weight and high-strength structure and its bionic application in energy-absorbing structure[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(4): 80-95(in Chinese).

[32] STAGNI A, TREVISAN G, VERGANI L, et al. Bone osteon-like structures: A biomimetic approach towards multiscale fiber-reinforced composite structures[J]. *Composites Science and Technology*, 2024, 254: 110669.

[33] ZHANG H, HU D, PENG H, et al. In-plane crushing behavior and energy absorption of sponge-inspired lattice structures[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 274: 109328.

[34] 中国国家标准化管理委员会. 塑料拉伸性能的测定: GB/T 1040.1—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of tensile properties of plastics: GB/T 1040.1—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018(in Chinese).

[35] GÜMRÜK R, MINES R A W. Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, 68: 125-139.

[36] BAI L, GONG C, CHEN X, et al. Mechanical properties and energy absorption capabilities of functionally graded lattice structures: Experiments and simulations[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 182: 105735.

[37] SHI L, TU F, YANG J. Mechanical behaviors of porous bionic structure of lotus stem[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2024, 290: 112665.

[38] LIANG R, LIU X, HU Y, et al. A methodology to investigate and optimise the crashworthiness response of foam-filled twelve right angles thin-walled structures under axial impact[J]. *Composite Structures*, 2023, 310: 116736.

[39] WANG M, ZHANG J, WANG W, et al. Compression behaviors of the bio-inspired hierarchical lattice structure with improved mechanical properties and energy absorption capacity[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 17: 2755-2771.

[40] CUI Z, ZHAO J, XU R, et al. Mechanical design and energy absorption performances of novel plate-rod hybrid lattice structures[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 194: 111349.

[41] ALI M, SARI R K, SAJJAD U, et al. Effect of annealing on microstructures and mechanical properties of PA-12 lattice structures proceeded by multi jet fusion technology[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 47: 102285.

[42] BHAT C, KUMAR A, JENG J Y. Effect of atomic tessellations on structural and functional properties of additive manufactured lattice structures[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 47: 102326.