



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

孔祥清 常雅慧 张宁 张明亮 张瑞祥 丁小轩

Numerical investigation on dynamic response of bio-inspired bi-directional corrugated lattice structure under impact loading

KONG Xiangqing, CHANG Yahui, ZHANG Ning, ZHANG Mingliang, ZHANG Ruixiang, DING Xiaoxuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240623.005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

铝蜂窝夹芯板面外剪切性能试验研究与数值模拟

Experiment and numerical simulation of out-plane shear performance of aluminum honeycomb sandwich panel

复合材料学报. 2022, 39(12): 6119–6129 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211125.002>

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>

CFRP面板-功能梯度蜂窝夹层板的抗低速冲击性能

Low-velocity impact of functional gradient honeycomb sandwich plate with CFRP face sheets

复合材料学报. 2023, 40(7): 4226–4236 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221014.007>

仿鱼鳞片结构的防护装具抗穿甲燃烧弹性能

Performance of the protective gear inspired by fish scale structure against armor-piercing incendiary bullets

复合材料学报. 2022, 39(12): 5958–5965 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220105.004>

新型并联梯度蜂窝结构的面内力学性能

In-plane crushing behaviors of honeycombs with a novel parallel graded design

复合材料学报. 2020, 37(1): 155–163 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190417.003>

PASGT防弹头盔在手枪弹冲击下的防护性能

Protective performance of PASGT combat helmet under pistol bullet impact

复合材料学报. 2022, 39(7): 3629–3640 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210823.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20240623.005

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



分享本文

孔祥清^{*1,2}, 常雅慧¹, 张宁¹, 张明亮¹, 张瑞祥³, 丁小轩²(1. 辽宁工业大学 土木建筑工程学院, 锦州 121001; 2. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 青岛 266580;
3. 松山湖材料实验室, 东莞 523830)

摘要: 为了探究仿生双正弦波纹点阵结构 (Bio-inspired bi-directional corrugated lattice structure, BBCLS) 的抗冲击性能, 采用 ANSYS/LSDYNA 有限元分析软件建立了其在冲击荷载作用下的有限元数值模型, 并基于已有的试验结果与数值模拟结果进行了对比, 验证了该模型的有效性。在此基础上, 研究了不同冲击速度对 BBCLS 的应力分布、变形模式、承载能力以及能量吸收特性的影响, 并与传统体心立方点阵结构 (BCC) 进行了对比。同时利用该数值模型进一步分析了振幅、波纹数和胞壁厚度等微结构几何参数对 BBCLS 抗冲击性能的影响。研究结果表明: BBCLS 在冲击荷载作用下的承载能力、吸能总量及比吸能均明显优于传统的 BCC 点阵结构。BBCLS 的冲击动力学响应主要与冲击速度和微结构几何参数有关。在低速冲击时, BBCLS 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。随着冲击速度的提高, 增大振幅、波纹数、胞壁厚度均使结构在受到冲击载荷时应力分布均匀, 有效增加了冲击端的平台应力。此外, 微结构几何参数的改变对结构比吸能以及综合比吸能有显著影响。由于波纹数的增大, BBCLS 的承载能力、刚度和吸能性均大幅度提高, 当波纹数为 8, 冲击速度达到 100 m/s, 相比于波纹数为 5, 冲击速度为 10 m/s 比吸能提高 201.36%。研究结果为研究仿生点阵结构的冲击变形失效和吸能效果提供了力学依据。

关键词: 仿生点阵结构; 有限元模型; 动态冲击; 微结构几何参数; 能量吸收

中图分类号: TU398.9; TB330.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2025)04-2282-20

Numerical investigation on dynamic response of bio-inspired bi-directional corrugated lattice structure under impact loading

KONG Xiangqing^{*1,2}, CHANG Yahui¹, ZHANG Ning¹, ZHANG Mingliang¹,
ZHANG Ruixiang³, DING Xiaoxuan²

(1. School of Civil Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China; 2. School of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 3. Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523830, China)

Abstract: In order to explore the impact resistance of bio-inspired bi-directional corrugated lattice structure (BBCLS), ANSYS/LSDYNA finite element analysis software was used to establish the finite element numerical model under the impact load, and the existing test results were compared with the numerical simulation results to verify the effectiveness of the model. On this basis, the effects of different impact velocities on the stress distribution, deformation mode, bearing capacity and energy absorption characteristics of BBCLS were studied, and compared with the traditional body-centered cubic lattice structure (BCC). The effects of the geometric parameters such

收稿日期: 2024-04-26; 修回日期: 2024-06-04; 录用日期: 2024-06-15; 网络首发时间: 2024-06-24 11:39:29

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240623.005>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFA1403504); 广东省基础与应用基础研究基金区域联合基金项目(2022A1515140003)

National Key Research and Development Project (2022YFA1403504); Regional Joint Fund Project of Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province (2022A1515140003)

通信作者: 孔祥清, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为仿生力学、复合结构力学性能及仿真 E-mail: xqkong@upc.edu.cn

引用格式: 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).

as amplitude, ripple number and cell wall thickness on the impact resistance of BBCLS were further analyzed using the numerical model. The results show that the carrying capacity, total energy absorption and specific energy of BBCLS under impact load are obviously superior to the traditional BCC lattice structure. The impact dynamic response of BBCLS is mainly related to impact velocity and microstructure geometry parameters. At low speed impact, BBCLS presents an overall deformation pattern. The structure changes to the local deformation mode during the impact of medium and high speed. With the increase of impact velocity, the increase of amplitude, ripple number and cell wall thickness can make the stress distribution of the structure under impact load uniform, and effectively increase the platform stress at the impact end. In addition, the change of microstructure geometric parameters has a significant effect on the specific absorption energy of the structure and the overall specific absorption energy. As the number of ripples increases, the bearing capacity, stiffness and energy absorption of BBCLS are greatly improved. When the number of ripples is 8, the impact velocity reaches 100 m/s. Compared with the number of ripples, the impact velocity is 10 m/s, which is 201.36% higher than the energy absorption. The results provide a mechanical basis for the study of impact deformation failure and energy absorption effects of bionic lattice structures.

Keywords: bio-inspired lattice structure; finite element model; dynamic impact; microstructure parameter; energy absorption

在实际生活生产以及工程应用当中，由于冲击损伤而引起的材料破坏失效，给国家经济建设、人民生命财产安全带来了巨大的损失^[1-3]。研发轻质高强的抗冲击结构已成为重要的研究课题。点阵结构作为一种新型轻质结构，由多孔晶胞规则排列组成，其内部开放、贯通的空间易于实现集承载、储能、阻尼、热控于一体的多功能特性，同时具有能量吸收能力好、比强度和比刚度高、比表面积大、质量轻、减振降噪等诸多优异的性能，是结构和功能一体化的优良载体^[4-5]。作为一种轻质多功能结构，常被用于保护人员或结构免受冲击载荷的影响，在轨道交通、航空航天、土木工程等一系列工程领域的结构轻量化设计方面具有广泛的应用前景^[6-7]。尽管目前有关点阵结构的制备^[8-10]、设计^[11-13]和力学性能^[14-16]等方面取得了一定的研究进展，但是研究人员仍在不断探索结构更加复杂、抗冲击性能更加优越的点阵结构。

庞大的自然界生物经过亿万年的演化过程后，形成了适应复杂环境的结构，并表现出优异的力学性能^[17]。受此启发，国内外研究人员通过对自然界中承受冲击载荷的生物结构进行研究，设计了具有生物特征的仿生点阵结构，并对其准静态和动态荷载下的力学行为方面展开了大量研究^[18-20]。Zhang 等^[21]从柚子成熟落地受到冲击载荷时柚子皮保护种子的现象中获得灵感，提出了一种新型的仿生柚子皮状蜂窝点阵结构，并研究了其在面内和面外静/动态压缩荷载作用下的变形模式及能量吸收特性。研究表明仿生柚子皮状蜂窝点阵结构的比吸能和等效应力为传统蜂窝结构的 1.5 倍

和 2.5 倍。冀旭晖^[22]从蜘蛛网拦截飞虫并能吸收冲击能量的现象中得到启发，设计了仿生蜘蛛网点阵结构，对其在准静态压缩和低速冲击载荷下的吸能效果进行了研究。Meng 等^[23]提出一种基于甲虫翅膀的仿生双曲面点阵结构，研究了其在冲击载荷下的力学性能，结果表明仿生双曲面点阵结构承载性能较传统点阵结构大幅提升。

雀尾螳螂虾螯是被仿生学者成功应用的又一抗冲击生物结构。研究发现，虾螯能承受超过 10^5 m/s^2 的加速度和 1500 N 的瞬时冲击力^[24-25]，这主要得益于其在宏观上的多区域结构以及在微观上独特的纤维排列结构，能够有效地吸收来自各方向的冲击动能^[26]。Yaraghi 等^[27]对雀尾螳螂虾螯表面微观结构进行研究，发现其抗冲击区域内部存在近似周期性的波纹状人字形结构，冲击表面的纵向纤维可以将应力分散到更大的面积上，有助于缓解应力集中；人字形结构中的正弦界面有效延长了裂纹扩展的路径长度，从而显著地提高了能量吸收能力。Yang 等^[28]基于虾螯微观结构仿生原理，提出了一种仿生双正弦波纹夹层结构，该结构中间夹芯部分由单层的双正弦波纹组成，并研究了其在准静态压缩及面外动态压缩荷载下的力学特性。研究表明与传统三角形夹层结构相比，该结构的比吸能提升了 58.6%。Han 等^[29]将螳螂虾螯微观结构中的冲击区与周期区耦合，提出一种仿生单层螺旋纤维正弦结构，发现与非螺旋纤维正弦结构相比，单层螺旋纤维正弦结构的抗冲击性能最优。Huang 等^[30]基于虾螯微观结构特征，设计了两种不同夹芯形式的单层仿生夹层结构，研究

了其在冲击载荷作用下的动态性能。但值得注意的是,以上关于螳螂虾仿生波纹结构的研究主要集中在单层结构。相较于单层仿生结构,仿生点阵结构可以显著增加结构稳定性,提高能量吸收特性^[31]。近年来,Li等^[32]基于雀尾螳螂虾螯抗冲击区域微观结构特点,在单层仿生波纹结构基础上,提出了一种新型仿生双正弦波纹点阵结构(Bio-inspired bi-directional corrugated lattice structure,BBCLS),并利用实验与模拟相结合的方法研究了其在典型压缩载荷下的失效行为与变形失效过程,结果表明该结构具有良好的稳定性,在压缩性能和吸能方面具有独特的优势。但是,他们未考虑该仿生点阵结构在冲击荷载作用下的动态响应。与准静态荷载下的失效模式不同,在冲击荷载作用下,点阵结构一般会发生动态失稳,结构内部发生大的塑性/弹性变形^[33]。此外,点阵结构在空间上有材料与结构双重多尺度特征,冲击载荷作用又增加了时间多尺度特征^[34]。目前,对于这种BBCLS冲击载荷下的变形失效机制尚不清楚。

本文中,以受螳螂虾启发的BBCLS为研究对象,基于数值模拟分析,研究其在冲击荷载作用下的力学性能和吸能特性。首先通过将数值模拟结果与文献^[32]中的试验结果对比,验证模型的准确性。在此基础上,研究冲击荷载作用下BBCLS的动态响应,重点分析其冲击性能、变形失效模式以及能量吸收特性,并与传统体心立方

点阵结构(BCC)进行了对比。此外,系统探究了冲击速度及振幅、波纹数、胞壁厚度等因素对BBCLS抗冲击特性的影响规律。本研究旨在揭示仿生点阵结构在冲击荷载下的变形失效机制以及能量吸收特性,在满足轻量化要求的前提下为新型仿生点阵结构的工程应用提供设计参考。

1 模型验证

1.1 BBCLS 有限元模型建立

图1(e)为BBCLS结构示意图^[32],该结构从雀尾螳螂虾(图1(a))虾螯抗冲击区域微观结构中得到启发,雀尾螳螂虾螯前端趾(图1(b))具有抗冲击区域(图1(c))^[25-27,35]。雀尾螳螂虾螯抗冲击区域微观结构(图1(d)),沿冲击荷载方向存在近似周期性的人字形单元^[36]。该结构数学表达式为^[32]

$$Z(x,y) = \frac{A}{2} \left[\cos\left(\frac{2\pi N}{L}x\right) - \cos(\pi N) \right] \cos\left(\frac{2\pi N}{L}y\right) \quad (1)$$

式中: x 、 y 、 z 为空间坐标系;参数 N 为沿宽度方向的波纹数;参数 L 为距离原点的长度;参数 A 为振幅。

利用三维软件SolidWorks,基于文献^[32]中的试验数据建立了准静态压缩荷载下BBCLS的三维有限元模型,如图2所示。结构整体尺寸为48 mm×48 mm×44 mm,在BBCLS的两端设置尺寸为80 mm×80 mm,厚度为6 mm的钢板。图2(c)为BBCLS胞元示意图,其中波纹数为参数 N ,振

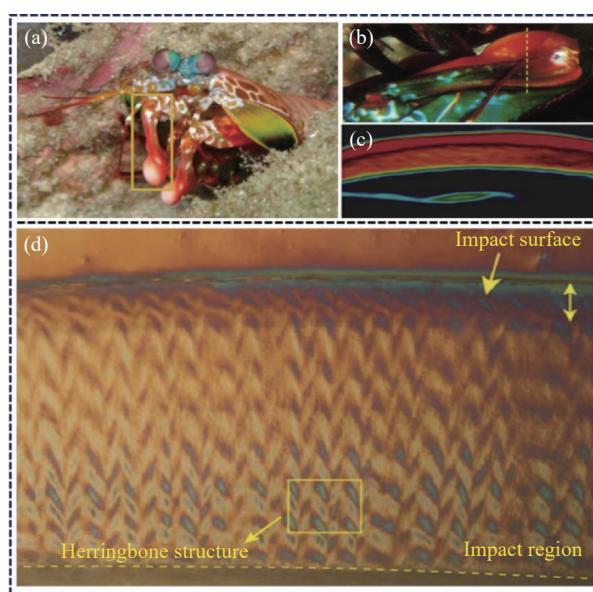


图1 仿生双正弦波纹点阵结构(BBCLS)示意图:(a)雀尾螳螂虾^[25];(b)虾螯^[27];(c)抗冲击区域^[27];(d)虾螯抗冲击区域微观结构^[27];(e)BBCLS^[32]

Fig. 1 Schematic diagram of bio-inspired bi-directional corrugated lattice structure (BBCLS): (a) *Odontodactylus scyllarus*^[25]; (b) Shrimp chela^[27]; (c) Impact zone^[27]; (d) Macro-microstructure of shrimp chela^[27]; (e) BBCLS^[32]

幅为参数 A ，胞壁厚度为参数 t 。为了合理控制计算时间，BBCLS 采用 Belytschko-Tsay 壳单元建模，在沿单元厚度方向上定义 5 个积分点。钢板采用 8 节点实体单元 (SOLID164) 进行建模。将模型导入到 Hypermesh 中，利用其 2D 面板下 Shrink Wrap 功能，对导入的 BBCLS 进行网格划分。对有限元模型网格开展收敛性分析，确定数值模型的网格尺寸。BBCLS 网格尺寸为 0.3 mm，上、下钢板网格尺寸为 2 mm。

采用与文献 [32] 一致的边界条件和接触设置，即上钢板在 Y 方向以 3 mm/min 的恒定速度向下移动压缩位移，而下钢板完全固定。为了避免穿

透或相交，采用面面自动接触算法来模拟 BBCLS 与钢板之间的接触，静摩擦系数和动摩擦系数分别设定为 0.3 和 0.2。BBCLS 内部各胞元间设置单面自动接触算法。根据文献 [32]，BBCLS 点阵结构材料为尼龙 PA2200，有限元模型中采用*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 分段弹塑性模型。尼龙 PA2200 的材料参数均来源于文献 [32] 中单轴拉伸试验，以试验测得的应力-应变曲线做为计算时的材料性能输入，其密度为 1 140 kg/m³，杨氏模量为 1.8 GPa，泊松比为 0.4。上下钢板材料参数为：密度为 7 800 kg/m³，杨氏模量为 210 GPa，泊松比为 0.3^[37]。

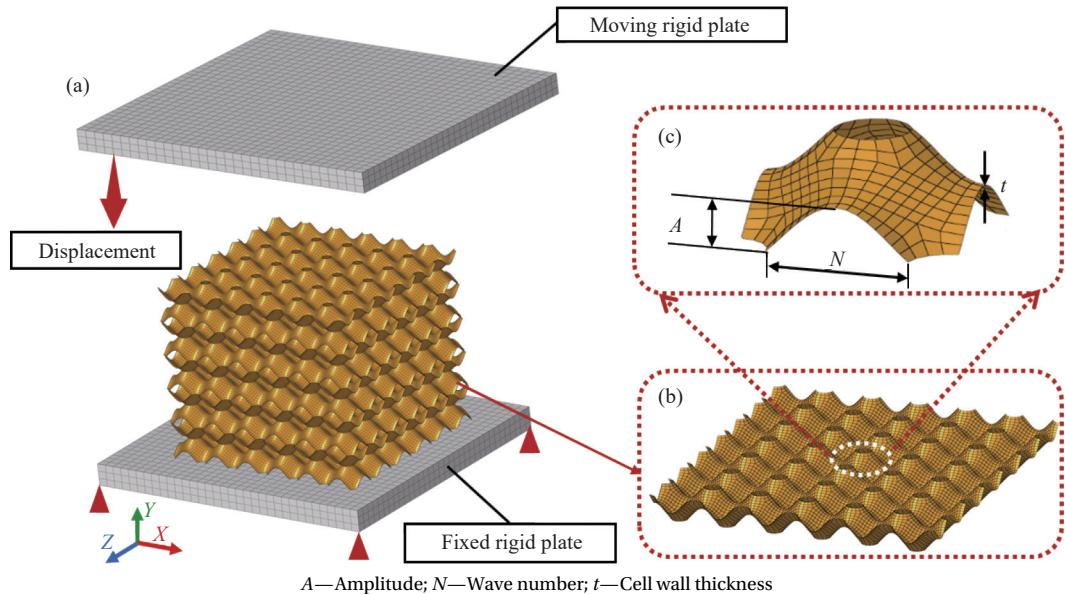


图 2 BBCLS 有限元模型：(a) 准静态压缩荷载下 BBCLS 计算模型；(b) BBCLS 单层模型；(c) BBCLS 胞元模型

Fig. 2 BBCLS finite element model: (a) Computational model of BBCLS under quasi-static compression loading; (b) BBCLS single-layer model; (c) BBCLS single-cell model

对于多胞结构，其能量吸收特性及变形模式均与多胞结构的相对密度有关。根据多孔材料理论及对相对密度的定义，BBCLS 的相对密度可表示为^[38]

$$\Delta\rho = \frac{\rho_b}{\rho_s} = \frac{M/V_b}{M/V_s} = \frac{V_s}{V_b} \quad (2)$$

式中： ρ_b 为整体密度； ρ_s 为基体材料密度； M 为结构的质量； V_b 为结构所围区域的体积； V_s 为结构的实体体积。

根据式 (2) 及刘伟洛^[39]提出的点阵结构相对密度计算方法，分别求得 BBCLS 不同微结构几何参数的相对密度如表 1 所示。

1.2 模型验证

将数值模拟得到的压缩荷载作用下 BBCLS 破坏形态与试验结果^[32]进行了对比分析，结果如图 3 所示。压缩初始时，BBCLS 试样所受的压缩应力较小，结构只发生弹性变形并未出现失效如图 3 中位置 E2 和 S2 所示。随着压缩位移的增大，沿加载方向的胞元在达到临界应力时，开始发生塑性变形，其中位于最上层的胞元塑性变形程度最大 (如图 3 中位置 E3 和 S3 所示)。随后试样各层胞元逐层压缩堆叠变形 (如图 3 中位置 E4、E5 及 S4、S5 所示)。随着压缩位移的进一步增加，BBCLS 进入密实阶段，BBCLS 变形带逐渐向下端

表 1 BBCLS 初始峰值力仿真与试验误差对比

Table 1 Comparison between simulation and test error of BBCLS contact force peak value

Sample name	Wave number	Relative density	Test value ^[32] /kN	Simulated value/kN	Absolute error/kN	Relative error/%
1	5	0.13303	2.97	2.84	0.13	4.38
2	6	0.14662	4.25	4.17	0.08	1.88
3	7	0.16201	5.65	5.46	0.19	3.36

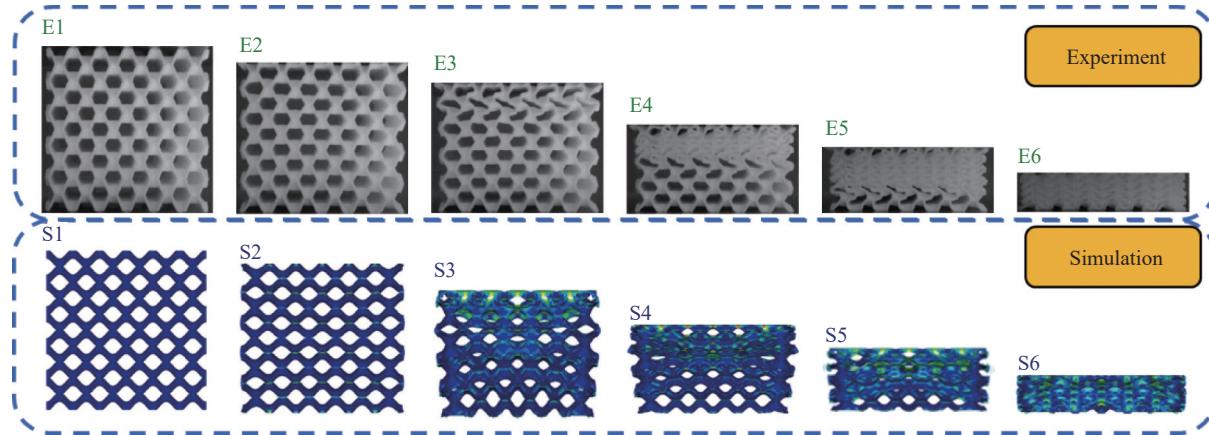


图 3 BBCLS 试验与模拟破坏形态对比图

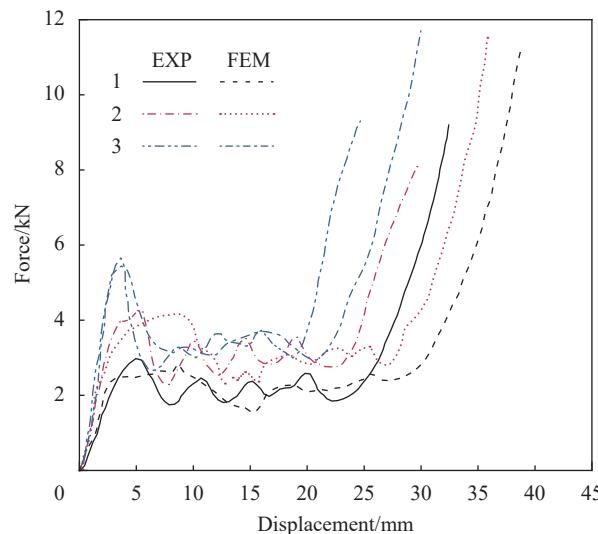
Fig. 3 Comparison between experimental and simulated failure state of BBCLS

移动,当变形量积累到一定程度,整个结构被完全压实。整个压缩过程为塑性变形失效,试件并未发生断裂。这也与徐向聪等^[40]和 Maskery 等^[41]的研究结果相似。

经过对比分析可以看出,数值模拟得到的压缩荷载作用下 BBCLS 整体变形模式与试验结果基本一致,但局部压缩堆叠变形略有不同,这可能是由于制造工艺引起的试样缺陷中的应力集中造成的。但整体上两者的变形过程、变形演进形状均相同。

图 4 和表 1 为不同波纹数 N (5、6、7) 的 BBCLS 力-位移曲线的试验和模拟对比结果。可以看出,数值模拟结果变化趋势与试验基本一致。准静态压缩荷载作用下 BBCLS 的变形经历了 3 个典型阶段:初始阶段是线弹性阶段,BBCLS 在压缩荷载作用下发生初始弹性变形,在达到初始峰值力后压溃力迅速下降;随后进入相对稳定的平台阶段,胞元发生渐进塑性屈服;最后进入密实化阶段,大量胞元屈服导致曲线呈持续上升趋势。平台阶段力-位移曲线的数值模拟结果与试验结果吻合较好,而数值模拟结果中密实化阶段力-位移曲线上升趋势较试验中稍滞后,这可能是由于试验试件加工制备过程中存在初始缺陷导致。由表 1 可以看出,有限元模型的初始峰值力与试验结果误差较小,为 1.88%~4.38%,这也验证了数值模拟的可

靠性。因此,本文建立的数值模型能够有效地预测 BBCLS 在准静态压缩荷载下的力学响应。



FEM—Finite element model; EXP—Experiment

图 4 BBCLS 的力-位移曲线试验与模拟结果对比

Fig. 4 Comparison of experimental and simulated force-displacement curves of BBCLS

2 冲击荷载作用下 BBCLS 的动态响应分析

2.1 冲击荷载作用下有限元模型建立

基于上述验证的数值模型,分析冲击荷载作用下 BBCLS 的动态响应。为研究不同冲击速度对结构承载及吸能性能的影响,上钢板以加载速度

为 10 m/s、30 m/s、50 m/s、70 m/s、100 m/s 和 200 m/s 沿 Y 方向向下运动，下钢板完全固定。上下钢板材料参数同准静态压缩荷载下保持一致。对于在冲击载荷下的 BBCLS，选用在抗冲击结构中常用的 AlSi10Mg 铝合金，这是由于 AlSi10Mg 铝合金作为点阵结构的基体材料能够更大程度地提升结构在冲击载荷下的能量吸收和承载能力^[42]。AlSi10Mg 铝合金采用*MAT_PLASTIC_KINEMATIC 理想弹塑性模型，材料密度为 2.68 g/cm³，弹性模量为 80 GPa，泊松比为 0.30，屈服强度为 276 MPa^[43]。由于铝合金对材料的应变率不敏感^[44]，因此模拟时忽略应变率效应。BBCLS 及钢板的单元类型、单元尺寸、接触算法均与准静态压缩荷载下保持一致。

2.2 变形模式

为了深入探究 BBCLS 准静态压缩和动态冲击时不同的变形吸能特性，参考文献^[43]的临界冲击速度设计了低速（10 m/s 和 30 m/s）、中速（50 m/s 和 70 m/s）、高速（100 m/s 和 200 m/s）对 BBCLS 整体变形模式进行了分析，以建立力学响应与变形之间的关系。图 5 给出了不同冲击速度下，BBCLS 在塑性变形阶段（应变为 $\varepsilon=0$ 、0.25、0.50、0.75）的冲击变形模式。

BBCLS 在准静态压缩载荷作用下发生了明显的纵向颈缩现象，局部变形带率先在压缩端出现，应力相对集中（图 3）。相对于准静态压缩荷载，BBCLS 在动态条件下的变形模式发生了较大变化，如图 5 所示。可以看出：(1) 在低速冲击载荷下 BBCLS 呈现出一种整体均匀变形的模式。处于中应变水平 ($\varepsilon=0.50$) 时，BBCLS 的中部出现了明显的塑性变形，塑性塌陷主要集中在模型中部区域；(2) 随着冲击速度的增加，惯性效应逐渐显现，结构对角线上胞元首先发生塌陷，随着剪切带逐渐向中部偏移，使结构整体出现横向“X”型的变形模式。当冲击速度达到 70 m/s 时，靠近冲击端位置处出现了严重的局部变形，并形成了局部的密实化区域；(3) 在高速冲击荷载作用下，应力波在结构的动态响应中起主导作用，结构的变形模式会发生明显变化，呈现动态变形模式^[45]。BBCLS 的冲击端首先出现压缩变形带，固定端由于惯性作用保持原来静止状态。随着压缩应变的进一步增加，结构的冲击端首先被完全压实，随后变形带逐渐向固定端移动，直到整个结构被完全压实。

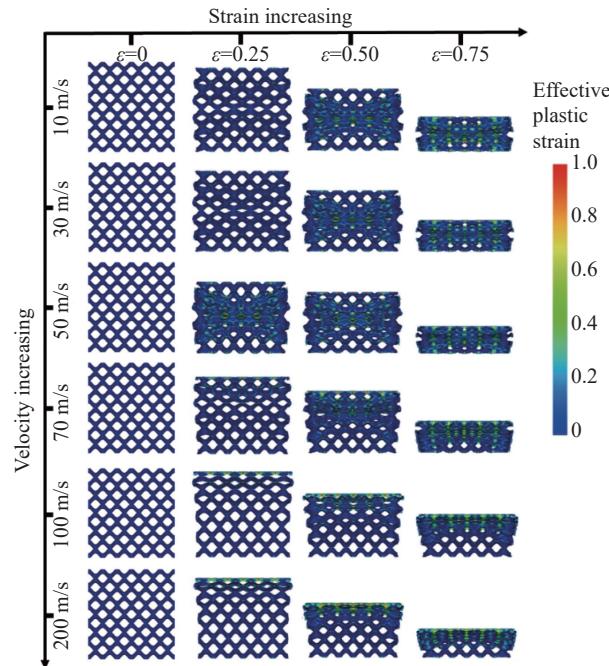


图 5 不同冲击速度下的 BBCLS 在典型应变水平下的变形图

Fig. 5 Deformation diagram of BBCLS under typical strain levels at different impact velocities

研究发现，BBCLS 的动态吸能性能要优于其准静态压缩。这主要由于 BBCLS 的变形模式与冲击速度密切相关，随着冲击速度增加，惯性效应逐渐增强，更多胞元均匀协调地参与变形，使 BBCLS 抗压溃能力更强，同时更早到达密实阶段^[46]。

2.3 应力-应变曲线

名义应力与名义应变这两种参数常被用来研究点阵结构应力-应变曲线，计算公式为^[43]

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{u}{L} \quad (4)$$

式中： F 为接触反力； S 是上下钢板与试样的初始接触面积； u 是上钢板的移动距离； L 是试样的长度。

图 6 为 BBCLS 在不同冲击速度下冲击端及固定端名义应力-应变曲线的计算结果。由图 6(a) 可知，结构在冲击端应力水平随着冲击速度的提高而不断增大。主要受以下两种因素影响^[43]：(1) 由于冲击速度的不断提高导致结构发生塑性变形堆叠的区域集中在冲击端，而堆叠的结构通过不断强化冲击端附近的结构，使得冲击端附近的结构强度有着大幅度的提升；(2) 由于冲击速度的不断提高，使得结构的惯性阻碍效应更加明显。此外

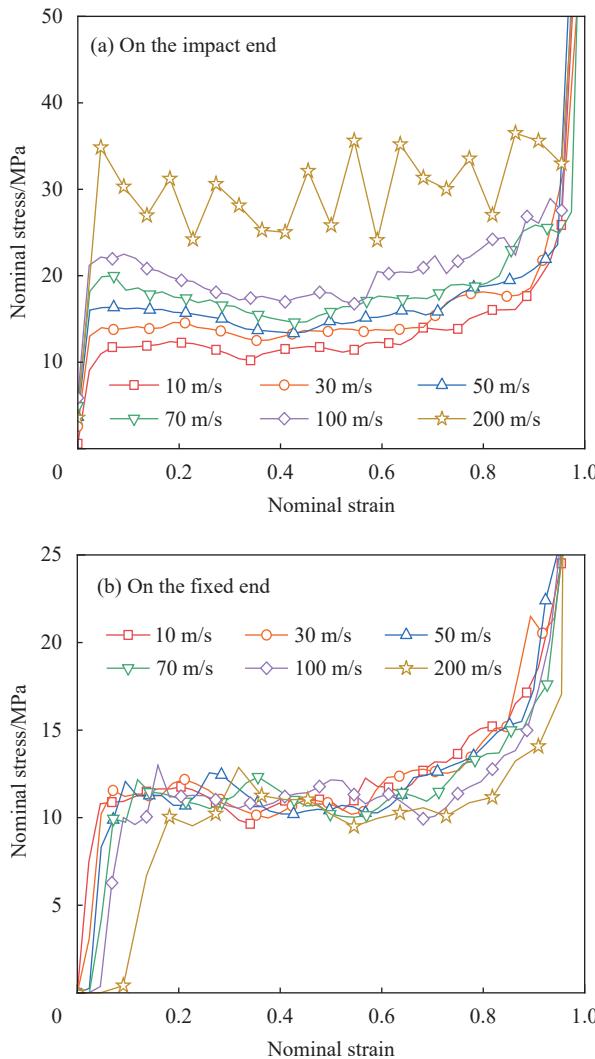


图 6 不同冲击速度下的 BBCLS 在冲击端和固定端的名义应力-应变曲线

Fig. 6 Nominal stress-strain curves on impact end and fixed end of BBCLS under different impact velocities

由图 6(a) 还可以看出, 结构在逐层堆叠失效的变形模式与应力波的复杂作用机制下, 随着冲击速度不断提高, 冲击端的应力-应变曲线出现较为剧烈的震荡现象。当结构某一层被压溃时, 应力呈现波动现象, 当应变达到 0.9 左右, 此时结构进入密实化阶段, 随后结构在冲击端的应力水平迅速上升。而结构在固定端的应力-应变曲线变化规律与冲击端存在较大区别。由图 6(b) 可知, 结构在固定端应力水平随着冲击速度的提高并无明显变化, 而且固定端应力水平低于冲击端。这表明与冲击端不同, 固定端的应力水平受冲击速度提高而导致的结构堆叠以及对惯性阻碍效应的影响并不显著, 这是由于应力水平主要与固定端的结构强度有关, 受冲击速度的影响很小。通过对

BBCLS 在不同冲击速度下冲击端及固定端名义应力-应变曲线的分析可知, BBCLS 可以降低传递到被保护件的应力值, 从而有效地保护结构不被破坏。这表明, BBCLS 适合作为一种抗冲击材料, 将其应用在结构抗冲击方面, 可以有效保护下部结构免受冲击荷载的影响。

2.4 平台应力

平台应力 (σ_p) 是评价点阵结构冲击响应特性的一个重要指标, 如下式所示^[47]:

$$\sigma_p = \frac{1}{\varepsilon_d - \varepsilon_{cr}} \int_{\varepsilon_{cr}}^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (5)$$

式中: $\sigma(\varepsilon)$ 为名义应力; ε_{cr} 为屈服应变, 即初始应力峰值所对应的名义应变; ε_d 为密实应变, 即结构被压缩密实前的最大应变值。密实应变 ε_d 由能量吸收效率方法来确定^[48]。能量吸收效率 η 定义如下^[48]:

$$\eta = \frac{\int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma(\varepsilon)} \quad (6)$$

基于式(6), 图 7 给出了不同冲击速度下 BBCLS 在冲击端的能量吸收效率。取能量吸收效率曲线中最后一个极大值点所对应的名义应变定为结构的密实应变点, 即可得到结构在不同冲击速度下冲击端的密实应变 ε_d , 结合式(5)可得到平台应力 σ_p , 计算结果如图 8 所示。可以看出, 随着冲击速度的不断增加, 冲击端的平台应力明显增大, 且冲击速度越大, 增幅越明显。这是由于高速冲击时的应力水平高于低速冲击时的应力水平, 且在高速时 BBCLS 的各行胞元层被快速压溃并逐层坍塌, 高速冲击带来的应力波在坍塌方向上快速传播, 从而提高了 BBCLS 的冲击承载能力。这也印证了 2.2 节所述的变形模式。说明冲击速度对于 BBCLS 平台应力有显著影响, 冲击速度越大, 冲击端平台应力越大, BBCLS 受到冲击时吸能效果更好。与平台应力的变化相同, 密实化应变与冲击速度的变化呈线性增大关系。然而, 不同冲击速度下 BBCLS 的密实化应变相差不大 (10 m/s 与 200 m/s 冲击时仅差 0.068)。这表明冲击速度对于 BBCLS 密实应变没有影响, 而密实应变主要受结构内部胞元的影响。

2.5 能量吸收特性

在动态冲击中, 通常采用比吸能 (Specific energy absorption, E_{SEA}) 来评估结构的吸能特性, 比吸能既是决定结构吸能特性的重要参数, 同时也是

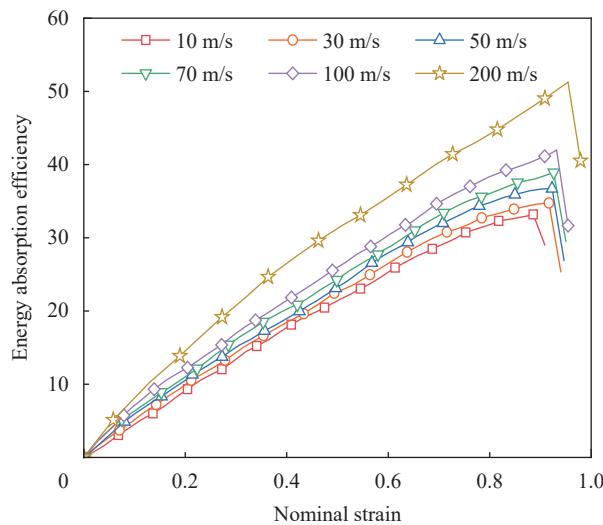


图 7 不同冲击速度下的 BBCLS 能量吸收效率

Fig. 7 Energy absorption efficiency of BBCLS at different impact velocities

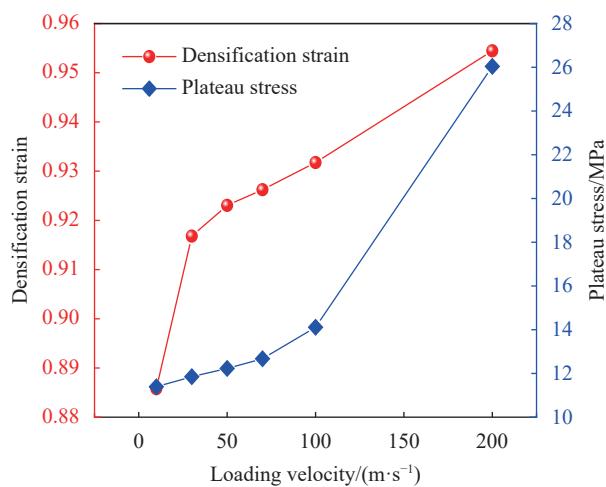


图 8 不同冲击速度下的 BBCLS 平台应力及密实化应变

Fig. 8 Plateau stress and densification strain curves of BBCLS at different impact velocities

判断能否作为防护结构的重要指标，其表达式为^[46]

$$E_{SEA} = \frac{E_A}{m} \quad (7)$$

式中： E_A 为总吸能； m 为总质量。

总吸能指结构在压缩过程中吸收的总能量，其表达式为^[48]

$$E_A = \int_0^s F(x) dx \quad (8)$$

式中： s 为压缩变形的位移； $F(x)$ 为当前位移的载荷。

图 9 展示了不同冲击速度下的 BBCLS 的比吸能特性。可知，BBCLS 的应变与比吸能之间呈现出明显的线性关系。随着冲击速度的提高，曲线的斜率显著提高且呈持续上升趋势。这说明

BBCLS 的能量吸收能力随着冲击速度的提高不断增强。为了进一步探究 BBCLS 的能量吸收分布情况，选取结构在动态载荷下应变达到 0.6 时的 E_{SEA} 与准静态载荷下进行对比，结果如图 10 所示。当冲击速度达到 200 m/s 时，BBCLS 的比吸能比冲击速度为 10 m/s 增加 72.11%，比准静态加载条件下提高 239.76%。这是由于冲击速度的提高，导致 BBCLS 惯性效应增强，由冲击速度带来的额外能量增量一部分转化为动能，而另一部分在胞壁间接触中吸收，动能在能量吸收中所占比例显著增大。使得 BBCLS 在变形过程中，其胞元折叠变形更完全，折叠次数更多，从而增加了 BBCLS 的能量吸收能力。不同冲击载荷下 BBCLS 均呈现出比准静态载荷下更优异的能量吸收能力，说明 BBCLS 更加适用于冲击载荷下的能量吸收。

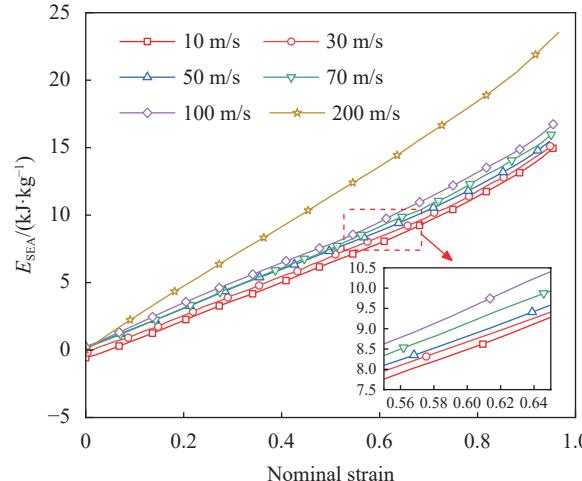
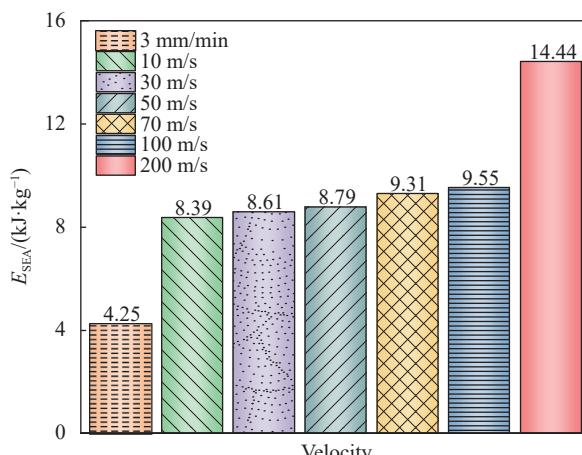
图 9 不同冲击速度下 BBCLS 的比吸能 E_{SEA} 对比Fig. 9 Comparison of specific energy absorption E_{SEA} of BBCLS at different impact velocities

图 10 静态荷载与冲击荷载下 BBCLS 比吸能对比

Fig. 10 Comparison of BBCLS E_{SEA} under static load and dynamic load

2.6 与传统的体心立方点阵结构抗冲击性能比较

将新型 BBCLS 的抗冲击性能与传统 BCC 进行了对比。保证两种点阵结构的相对密度相同。BCC 的相对密度可表示为^[49]

$$\Delta\rho = \frac{\sqrt{3}\pi d^2}{l^2} \quad (9)$$

式中: l 为单胞杆长; d 为支柱截面直径。

尽量保持 BBCLS 和 BCC 两种结构的质量和整体尺寸一致。同时, 根据式(9), 通过调整 BCC 每个支撑杆圆形截面的直径, 使两种结构具有相

同的相对密度(0.14662)。因此, 选定 BCC 单胞的设计参数为: $l=w=h=8 \text{ mm}$ (其中: l 表示长度; w 表示宽度; h 表示高度); $d=1.31 \text{ mm}$, BCC 整体尺寸为 $48 \text{ mm} \times 48 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。基于上述 BBCLS 的数值模型, 建立冲击荷载作用下 BCC 的有限元模型, 如图 11(a) 所示。图 11(b) 为 BCC 三维模型, 图 11(c) 为 BCC 胞元示意图。BCC 及钢板的单元类型、单元尺寸、接触算法以及材料参数均与 BBCLS 在冲击荷载下保持一致, 上钢板加载速度为 10 m/s 。

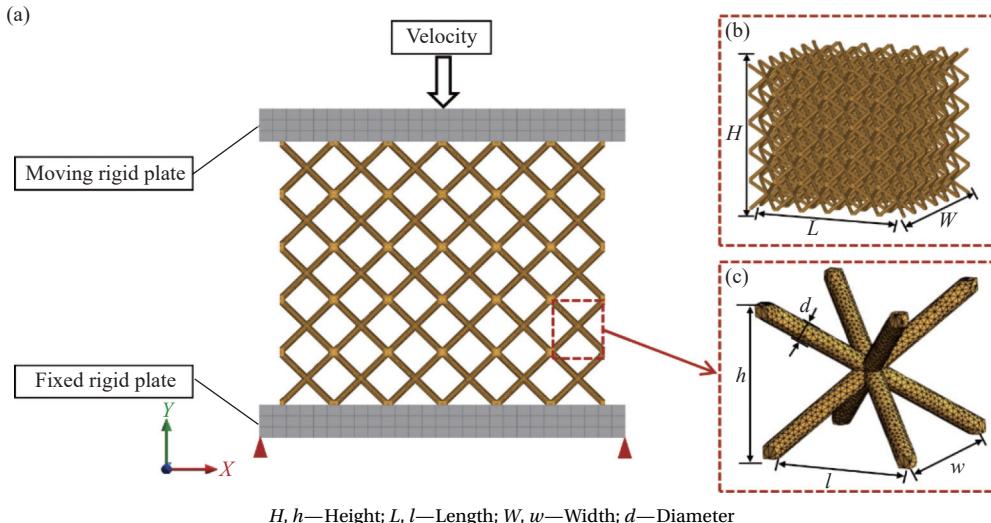


图 11 体心立方点阵结构(BCC)有限元模型: (a) 冲击荷载作用下 BCC 计算模型; (b) BCC 三维模型; (c) BCC 胞元模型

Fig. 11 Body-centered cubic lattice structure (BCC) finite element model: (a) Computational model of BCC under impact load; (b) BCC three-dimensional model; (c) BCC single cell model

上述两种点阵结构在冲击荷载作用下的变形过程、力-位移曲线分别如图 12、图 13 所示。在冲击荷载作用下, 两种点阵结构展现出了截然不同的变形模式与承载能力。两种点阵结构的冲击变形过程均可分为 3 个阶段: 弹性阶段、塑性平台阶段与密实化阶段。在冲击初始时刻, 两种点阵结构受到初始冲击荷载作用发生弹性变形, 荷载随着位移近似线性增大直至出现较大的峰值, 点阵结构在该阶段产生弹性变形如图 12 中位置(A)所示。随着冲击的进行 BCC 与 BBCLS 呈现出两种不同的变形模式。BCC 产生了明显的塑性变形, 塑性塌陷主要集中在模型中部区域, 形成了一对“X”型剪切带, 如图 12 中 BCC 的位置(B)所示。随着冲击钢板的下移, 由于节点处受到较高的应力, 使得发生严重的局部变形, 并形成了局部的密实化区域, 如图 12 中 BCC 的位置(C)所

示。在平台阶段, 力-位移曲线呈现出相对稳定的趋势。最后结构进入密实化阶段, 力-位移曲线(图 13)出现明显快速上升的趋势, BCC 各层胞元被快速压溃并逐层坍塌, 导致整体密实化失去了吸收能量的能力。对于 BBCLS, 当冲击过程进入塑性平台阶段时, 由于 BBCLS 独特的曲面型结构, 使其呈现出整体均匀的塑性变形模式。其中位于中部区域的单胞塑性变形最大, 形成了局部致密化, 如图 12 中 BBCLS 的位置(B)所示。在塑性平台阶段, BBCLS 力-位移曲线(图 13)呈现出稳定的上升趋势。随着冲击过程进入密实阶段, BBCLS 变形带逐渐向固定端移动, 直到整个结构被完全压实。此外, 通过进一步对比两种点阵结构在冲击荷载作用下的力-位移曲线可知, BBCLS 的荷载大小在整个冲击过程中均明显高于传统 BCC, 展现出更高的承载能力。通过对比二者的

能量吸收指标(图14)可知, BBCLS表现出了优越的吸收能量特性,BBCLS的能量吸收总量与比吸能均为BCC型的5倍左右,显著优于BCC。同时对比分析了BBCLS与BCC在冲击过程中其节点处在 $\varepsilon=0.10$ 下的应力大小,如图15所示。可以看出,BCC此时节点处的应力值为120.51 MPa,而BBCLS的应力值为52.03 MPa,BBCLS明显改善了BCC节点处应力集中的问题。

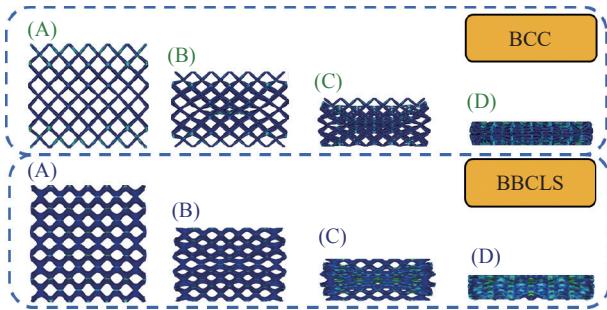


图 12 两种点阵结构冲击过程

Fig. 12 Impact process for two types of lattice structure

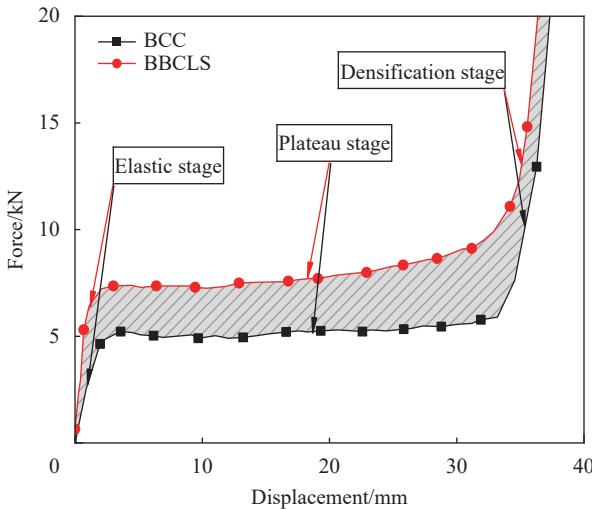


图 13 两种点阵结构在冲击荷载下的力-位移曲线

Fig. 13 Force-displacement curves of two lattice structure under impact loading

通过与冲击荷载作用下传统的BCC对比发现,BBCLS能够更好地分散压力,应力分布也较为均匀,有效减少应力集中。这是由于BBCLS为曲面型结构,胞元之间由连续且光滑的表面过渡和连接,有效增加了结构实体部分应力分布的面积,使得应力可以迅速均匀地分布到结构内部。而BCC为支撑型点阵结构,边缘棱角的存在会导致应力集中现象的产生,容易在局部发生大变形以致结构过早失效。并且由于BBCLS内部存在孔隙,

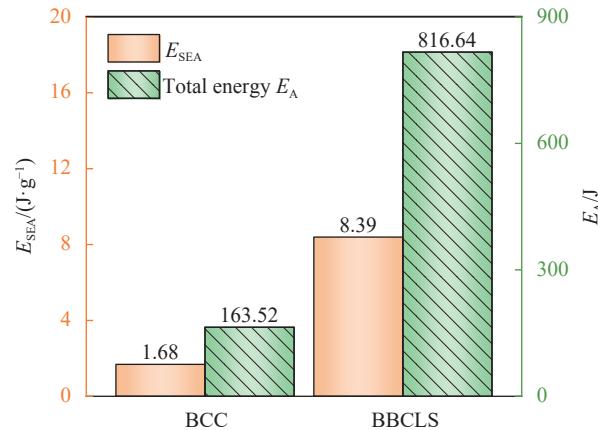


图 14 两种点阵结构在冲击荷载下的能量吸收指标

Fig. 14 Energy absorption indicators of two lattice structure under impact loading

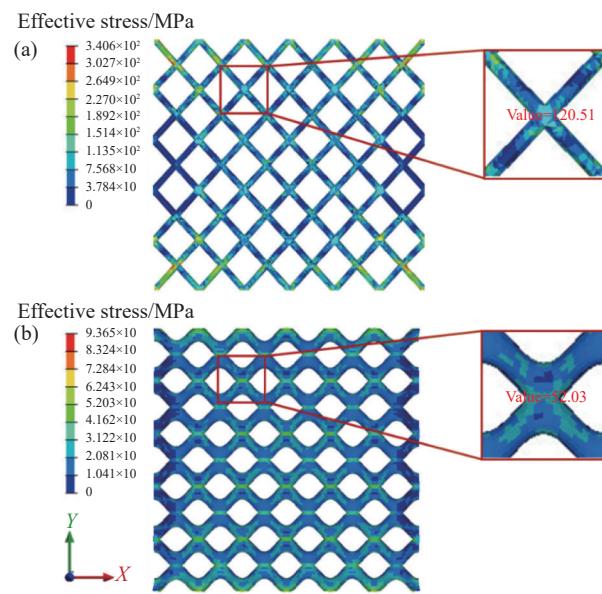


图 15 两种点阵结构的应力云图: (a) BCC; (b) BBCLS

Fig. 15 Stress cloud of two lattice structures: (a) BCC; (b) BBCLS

使得结构充分发挥出减震抗冲击性能^[50-51]。由此可见,BBCLS改善了传统BCC在节点处应力集中的问题,且在承载能力与能量吸收性能方面表现出明显的优势。

3 BBCLS 抗冲击性能参数研究

3.1 振幅对结构抗冲击性能的影响

通过改变BBCLS单胞的振幅(A)会使单胞的高度发生变化,进而导致结构相对密度与整个点阵结构在高度方向上的尺寸变化。为了研究振幅大小对BBCLS抗冲击性能的影响,选取5种不同的单胞振幅(2.0 mm、2.5 mm、3.0 mm、3.5 mm、4.0 mm),建立截面尺寸、波纹数与胞壁厚度相同

的BBCLS有限元模型，其中5种不同振幅的BBCLS相对密度分别为(0.12196、0.12681、0.14662、0.15938、0.16852)。选取3种冲击载荷：低速冲击载荷(10 m/s)、中速冲击载荷(50 m/s)、高速冲击载荷(100 m/s)下结构的冲击响应情况进行比较。具有不同振幅的BBCLS的力学响应与吸能特性对比分别如图16~图19所示。

由图16和图17冲击端与固定端的名义应力-应变曲线。可以看出，当冲击速度一致时，振幅越大，冲击端平台应力越大，而固定端的应力水平相比冲击端偏低，但与冲击端类似。随着冲击速度的增加，相同振幅的BBCLS冲击端平台应力会随着冲击速度提升而增大，且速度越高增幅越明显，而固定端应力水平却无明显提高。这是由于结构低速冲击时，平台阶段发展较为平缓，塑性波要快于冲击速度由冲击端传递至固定端所致的，而高速冲击时结构表现为逐层压溃变形，惯性效应随着冲击速度增大而增强，结构只在冲击端发生局部变形，而固定端变形较小。图18给出了不同振幅的BBCLS在不同冲击速度下的比吸能情况。随着冲击速度的增大，不同振幅的BBCLS的比吸能均有所增加。图19给出了不同振幅的BBCLS在应变达到0.6的比吸能值，在一定冲击速度下，振幅较大的结构在冲击过程中其单位质量能量吸收能力较好。当冲击速度为100 m/s时，振幅为4.0 mm的BBCLS比振幅为2.0 mm比吸能增大了30.95%。这是由于随着单胞振幅的增大，BBCLS密实化阶段被推迟，导致吸能总量与比吸能随着单胞振幅的增大而大幅提高。但是需要注意的是，随着振幅的增大，综合比吸能增加变得平缓，也就意味着超过一定值之后，增大振幅虽然可以增加结构抗冲击能力，但是效果较小，不利于轻量化的目标。故应综合考虑材料成本与承载要求需要，合理设计振幅大小，实现BBCLS平台应力与承载可延续性的平衡^[52]。

3.2 波纹数对结构抗冲击性能的影响

保证结构整体尺寸不变，改变BBCLS波纹数(N)导致单胞数量以及胞元几何参数发生变化，这会直接影响BBCLS的相对密度，进而对点阵结构的吸能特性与应力水平产生影响。为了研究波纹数对BBCLS抗冲击性能的影响，选取4种不同的波纹数(5、6、7、8)，建立截面尺寸、单胞振幅与胞壁厚度相同的BBCLS有限元模型，其中4

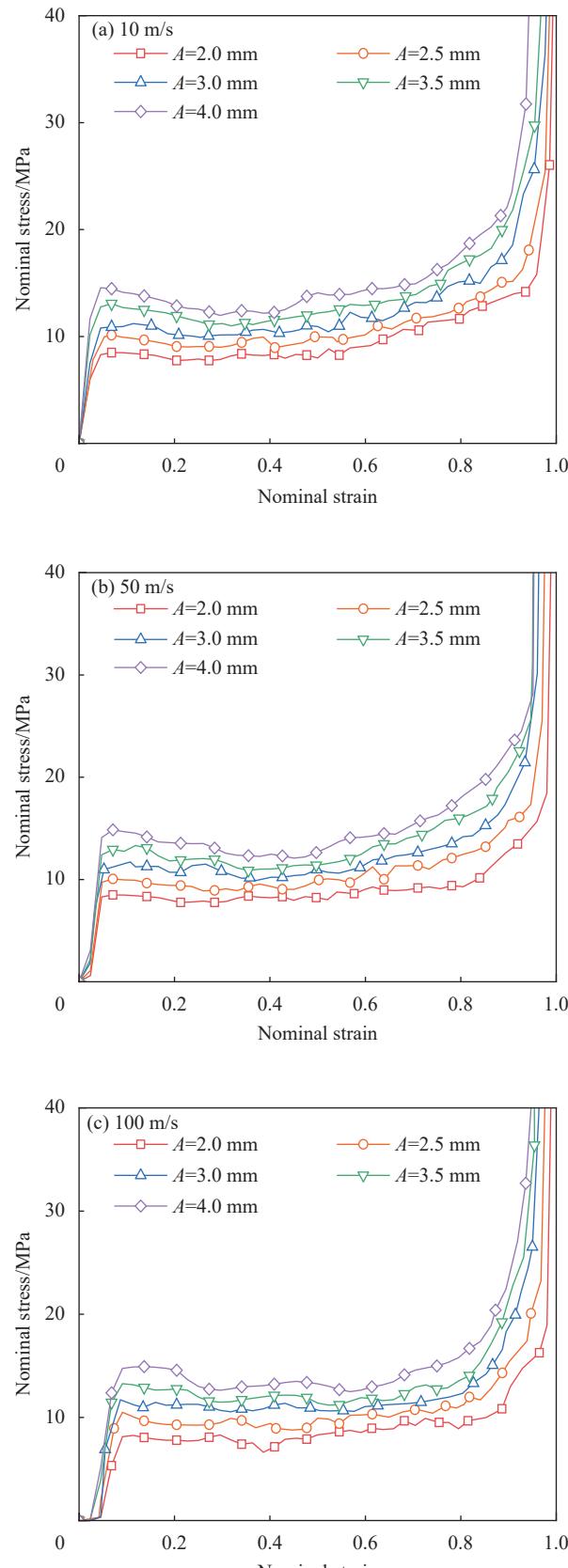


图16 不同振幅 A 下 BBCLS 固定端的名义应力-应变曲线

Fig. 16 Nominal stress-strain curves on fixed end of BBCLS under different amplitudes A

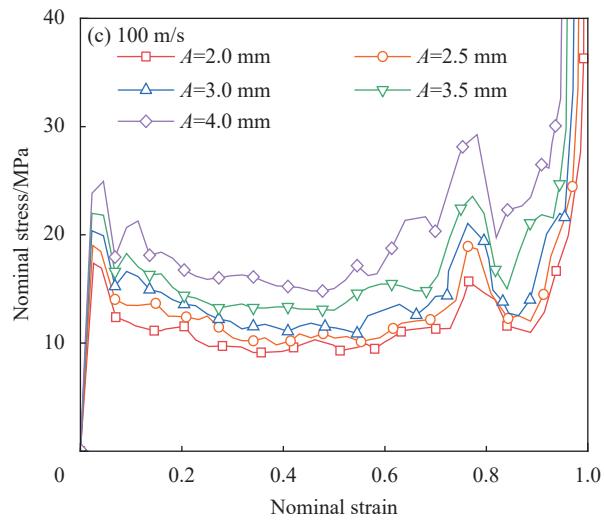
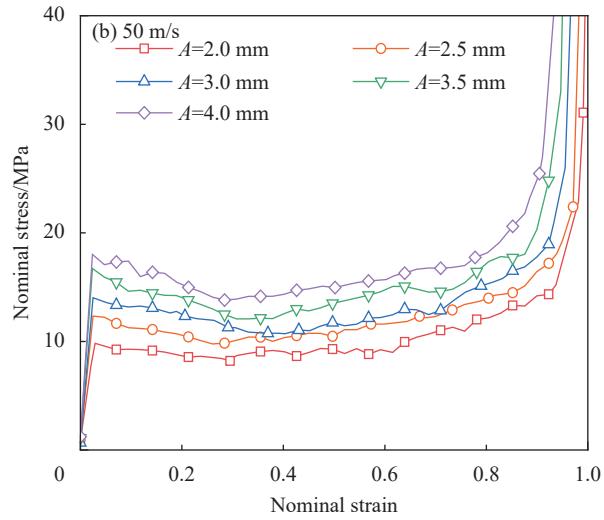
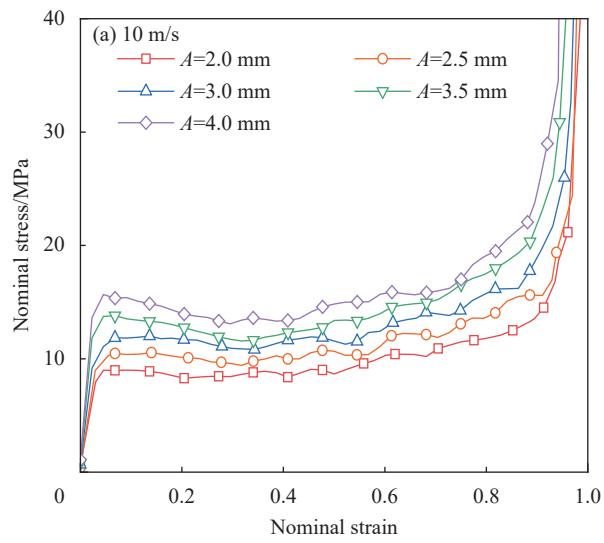


图 17 不同振幅下 BBCLS 冲击端的名义应力-应变曲线

Fig. 17 Nominal stress-strain curves on impact end of BBCLS under different amplitudes

种不同波纹数的 BBCLS 相对密度分别为 (0.13303、0.14662、0.16201、0.17270)。选取 3 种冲击载荷：

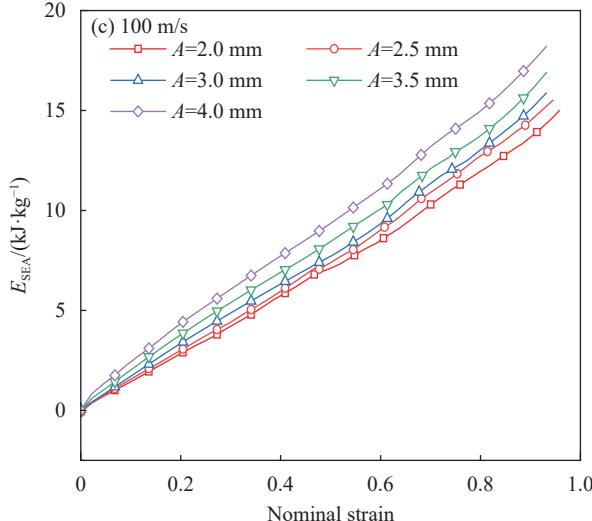
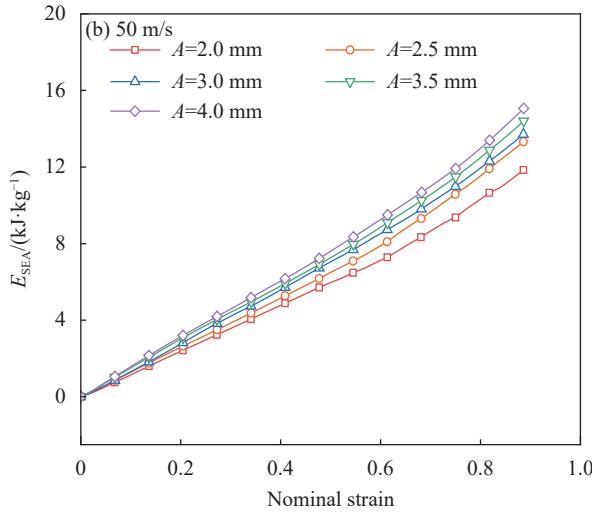
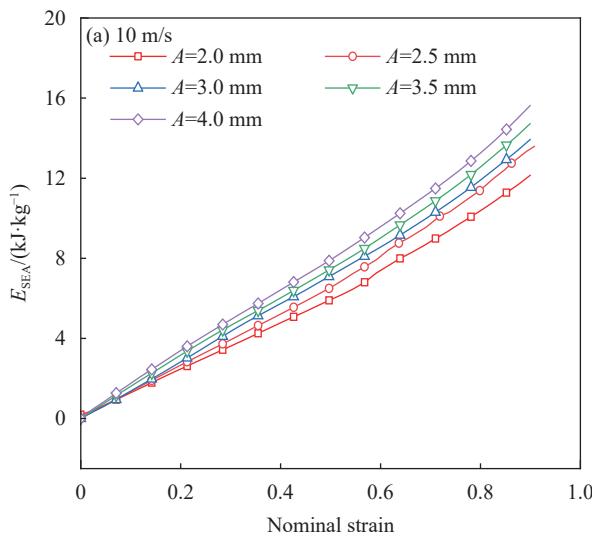


图 18 不同振幅的 BBCLS 比吸能对比

Fig. 18 Comparison of E_{SEA} of BBCLS under different amplitudes

低速冲击载荷 (10 m/s)、中速冲击载荷 (50 m/s)、高速冲击载荷 (100 m/s) 下结构的冲击响应情况进

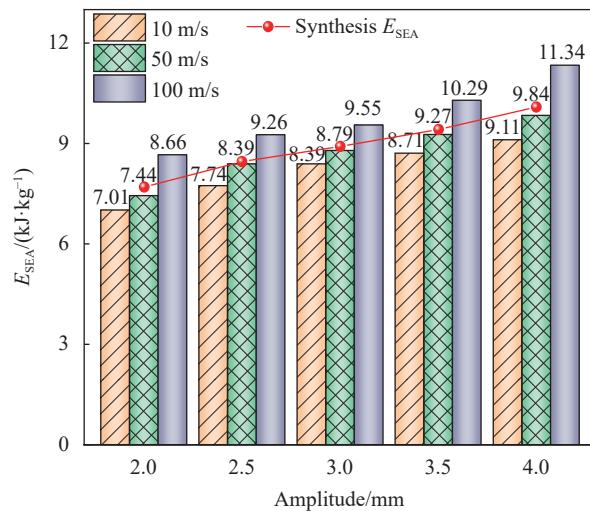


图 19 不同振幅的 BBCLS 在 0.6 应变下的比吸能

Fig. 19 E_{SEA} at 0.6 strain of BBCLS under different amplitudes

行比较。具有不同波纹数的 BBCLS 的力学响应与吸能特性对比分别如图 20~图 23 所示。

基于图 20、图 21 给出了不同波纹数的 BBCLS 在 3 种冲击速度下，冲击端及固定端名义应力-应变曲线。随着波纹数逐渐增多，BBCLS 在相同冲击速度下的平台应力逐渐升高。随着冲击速度的增加，不同波纹数的 BBCLS 冲击端的平台应力均明显增大，其中冲击速度越大，平台应力增幅越明显，而固定端的平台应力基本保持不变且相对较小。图 22 展示了不同波纹数的 BBCLS 在不同冲击速度下的比吸能变化曲线。在一定冲击速度下，随着波纹数增加，BBCLS 的比吸能逐渐增加；在波纹数一定的情况下，随着冲击速度的增加，BBCLS 的比吸能随应变的增加大幅提高。图 23 进一步给出了不同波纹数的 BBCLS 在应变达到 0.6 的比吸能值。可以看出，随着波纹数和冲击速度的增大，BBCLS 的比吸能明显增强，当波纹数为 8、冲击速度达到 100 m/s，相比于波纹数为 5、冲击速度为 10 m/s 时，结构在应变达到 0.6 的 E_{SEA} 提高 201.36%。随着波纹数的增大 BBCLS 的综合比吸能呈上升趋势。这主要是由于波纹数增大导致结构整体承受的形变和应力较大，而其单胞的形变较小，进而使点阵结构面外方向承载能力大幅提高。可见，通过改变波纹数和增加冲击速度可以提升 BBCLS 的承载能力与能量吸收能力。但是需要说明的是，虽然随着波纹数增加，结构相对密度增大，承载能力增强，但其轻量化设计的程度会降低，因此需要合理设计波纹数使结构

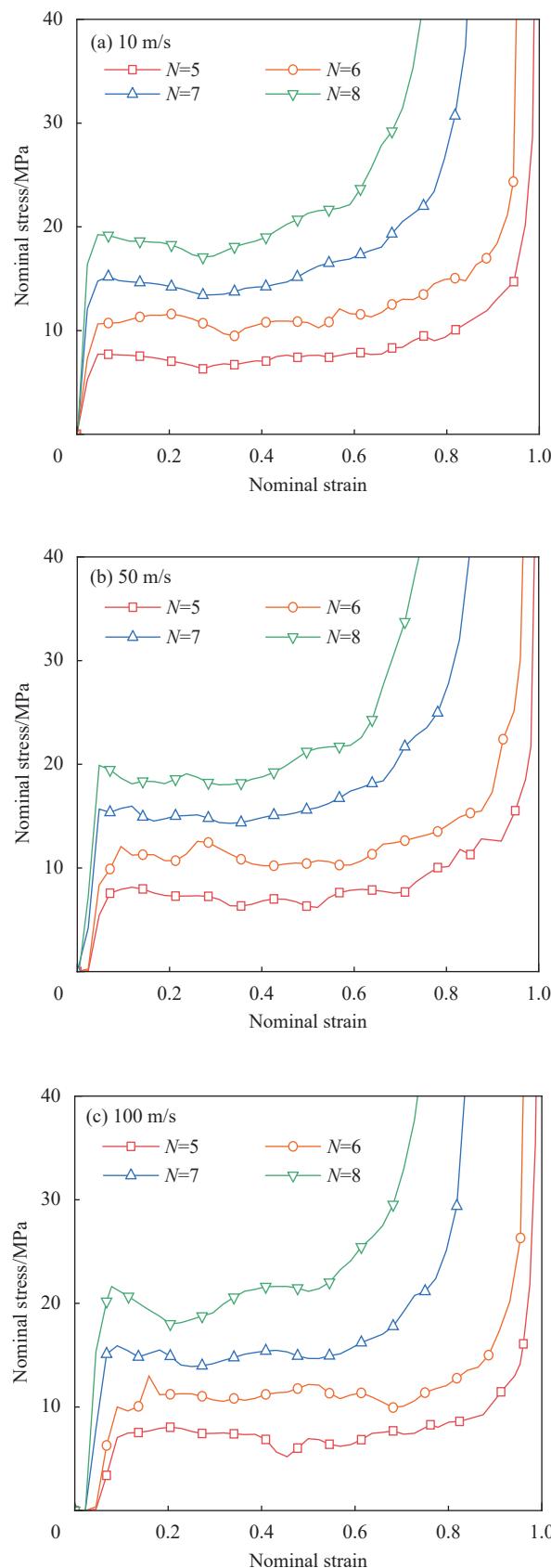


图 20 不同波纹数 N 下 BBCLS 在固定端的名义应力-应变曲线

Fig. 20 Nominal stress-strain curves on fixed end of BBCLS under different wave number N

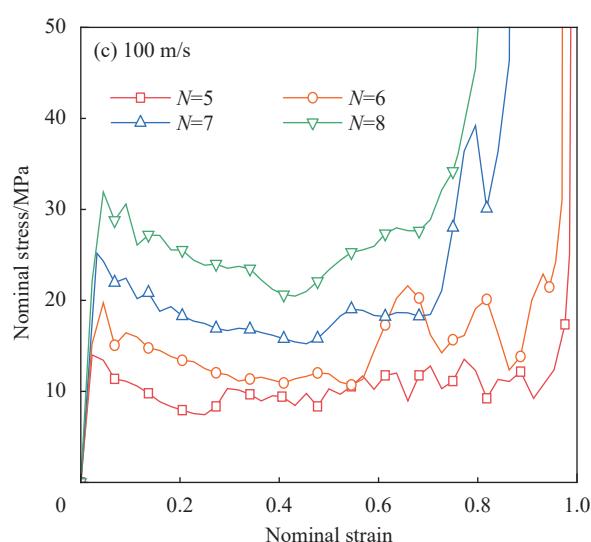
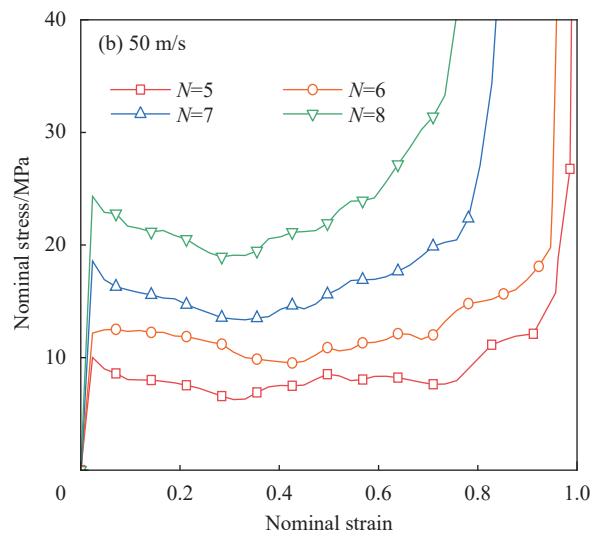
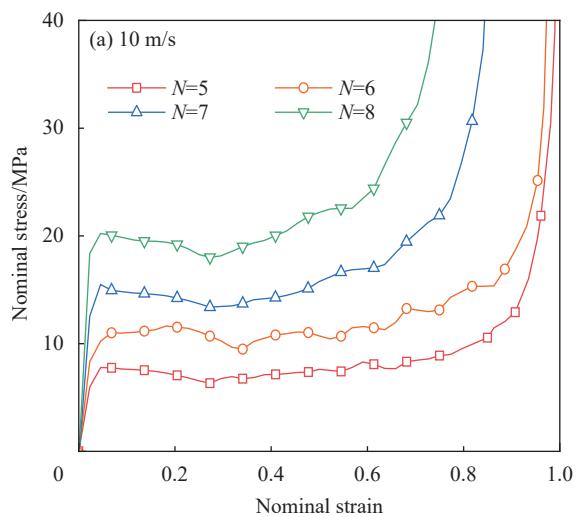


图 21 不同波纹数下 BBCLS 在冲击端的名义应力-应变曲线

Fig. 21 Nominal stress-strain curves on impact end of BBCLS under different wave number

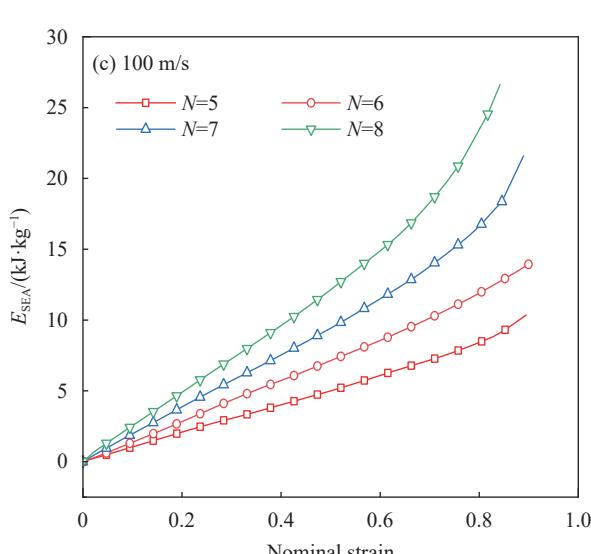
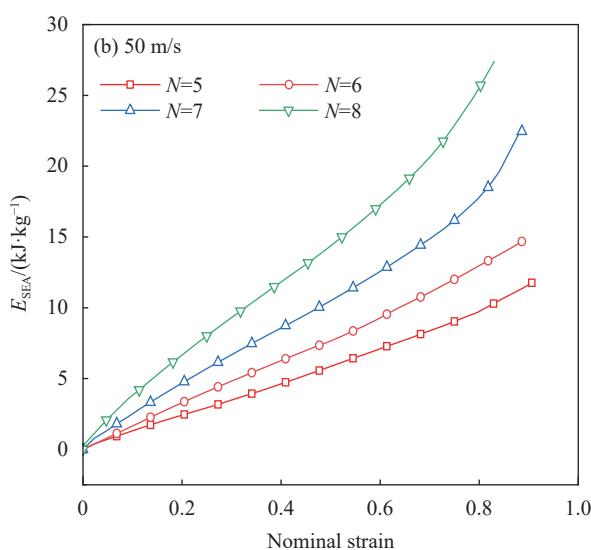
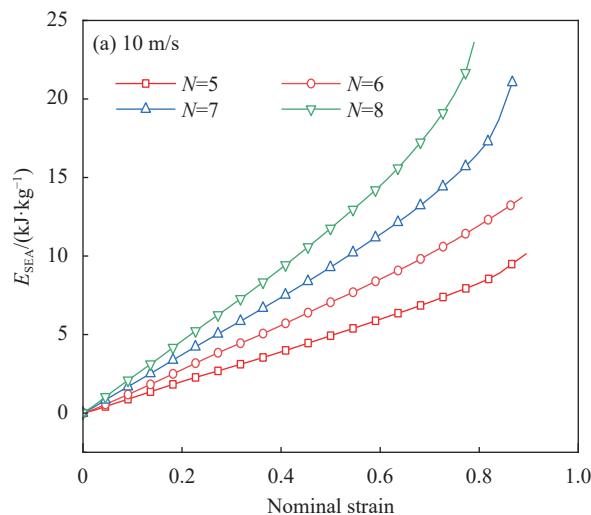


图 22 不同波纹数的 BBCLS 比吸能对比

Fig. 22 Comparison of E_{SEA} of BBCLS under different wave number

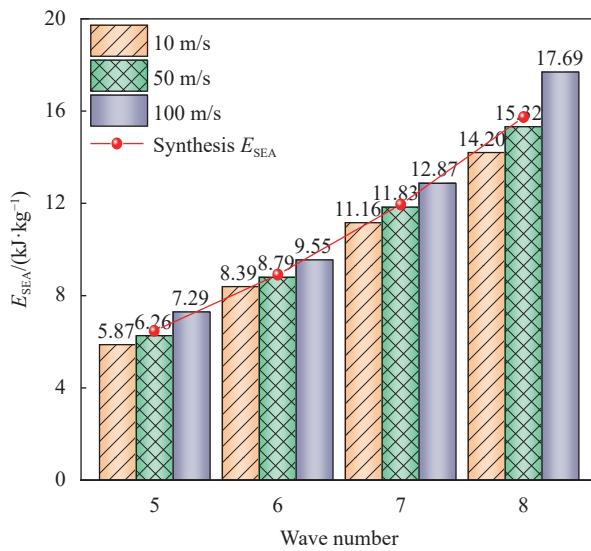


图 23 不同波纹数的 BBCLS 在 0.6 应变下的比吸能

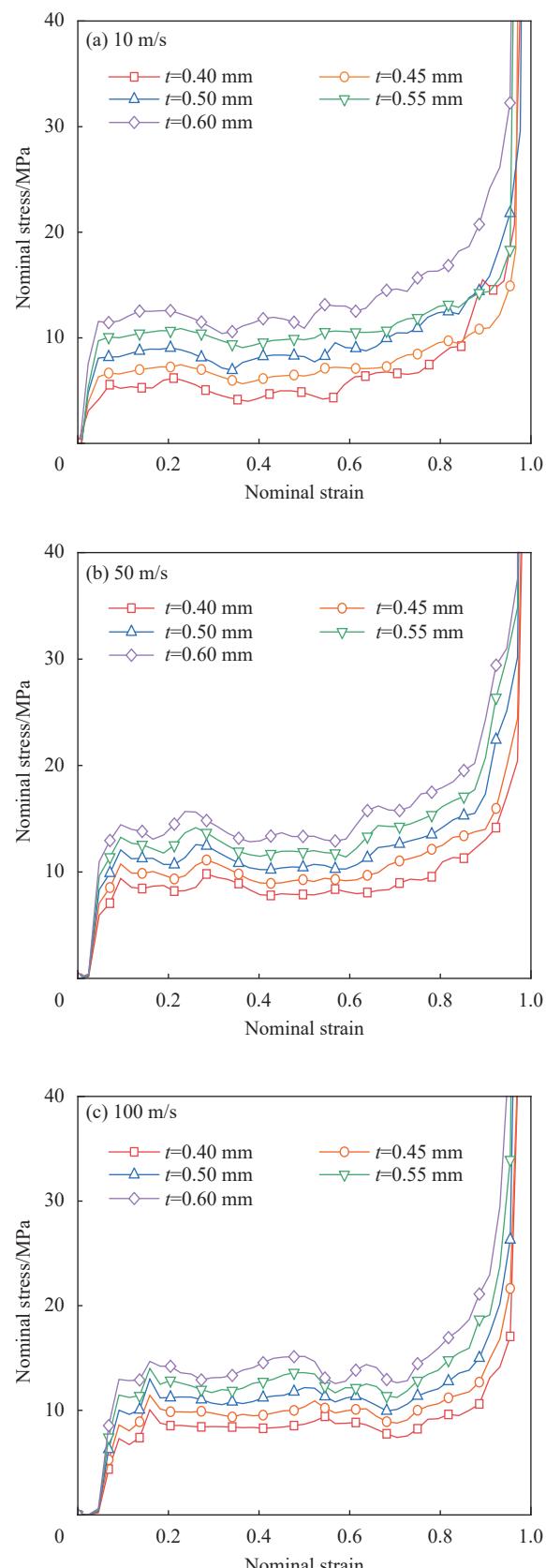
Fig. 23 E_{SEA} at 0.6 strain of BBCLS under different wave number

具有更好冲击承载能力。

3.3 胞壁厚度对结构抗冲击性能的影响

在轴向荷载作用下，增加胞壁厚度(t)通常在一定范围内能够提高结构的抗冲击性能^[53]。由于BBCLS在准静态压缩荷载下，胞壁厚度 t 在0.40~0.60 mm范围内时的轴向荷载-位移曲线较为稳定^[32]。因此选取5种不同的胞壁厚度(0.40 mm、0.45 mm、0.50 mm、0.55 mm、0.60 mm)，建立截面尺寸、波纹数与单胞振幅相同的BBCLS有限元模型，其中5种不同胞壁厚度的BBCLS相对密度分别为(0.11729、0.13195、0.14662、0.16128、0.17594)。选取3种冲击载荷：低速冲击载荷(10 m/s)、中速冲击载荷(50 m/s)、高速冲击载荷(100 m/s)下结构的冲击响应情况进行比较。具有不同胞壁厚度的BBCLS的力学响应与吸能特性对比分别如图24~图27所示。

由图24和图25冲击端与固定端的名义应力-应变曲线可以看出，对于相同的胞壁厚度，固定端的初始峰值力与平台段的应力波动幅度随着冲击速度的不断增大有小幅提高。与固定端相比，冲击速度对冲击端的应力波动影响更为明显，且其增长净值相对较大。在中低速载荷冲击作用下，冲击端名义应力-应变曲线与固定端基本相似，但随着冲击速度的增加，BBCLS冲击端的动态平台应力与初始应力峰值有了大幅的提高。不同胞壁厚度的BBCLS的比吸能对比如图26所示。可以看出：随着胞壁厚度和冲击速度的增大，BBCLS的比吸能明显增大。其中，胞壁厚度对BBCLS比

图 24 不同厚度 t 下 BBCLS 在固定端的名义应力-应变曲线Fig. 24 Nominal stress-strain curves on fixed end of BBCLS under different thicknesses t

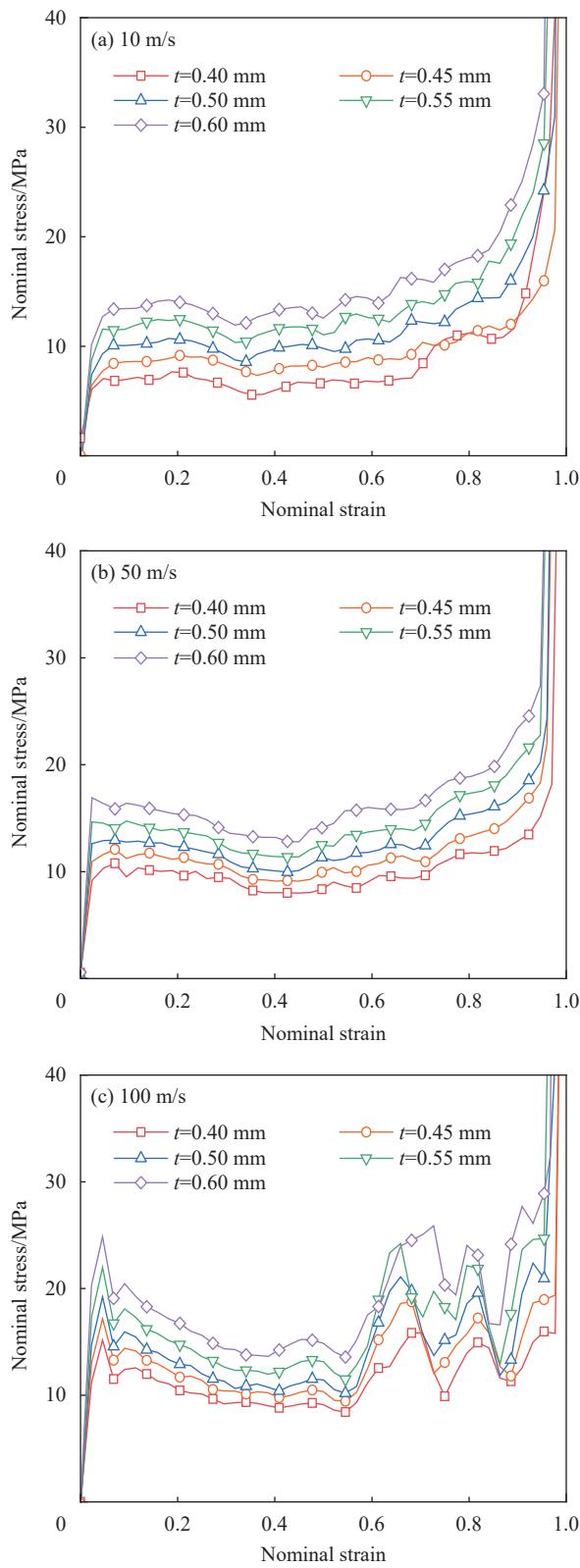


图 25 不同厚度下 BBCLS 在冲击端的名义应力-应变曲线

Fig. 25 Nominal stress-strain curves on impact end of BBCLS under different thicknesses

吸能的增大作用更为显著。由图 27 可知，当冲击速度为 10 m/s 时，随着胞壁厚度的增大结构比吸

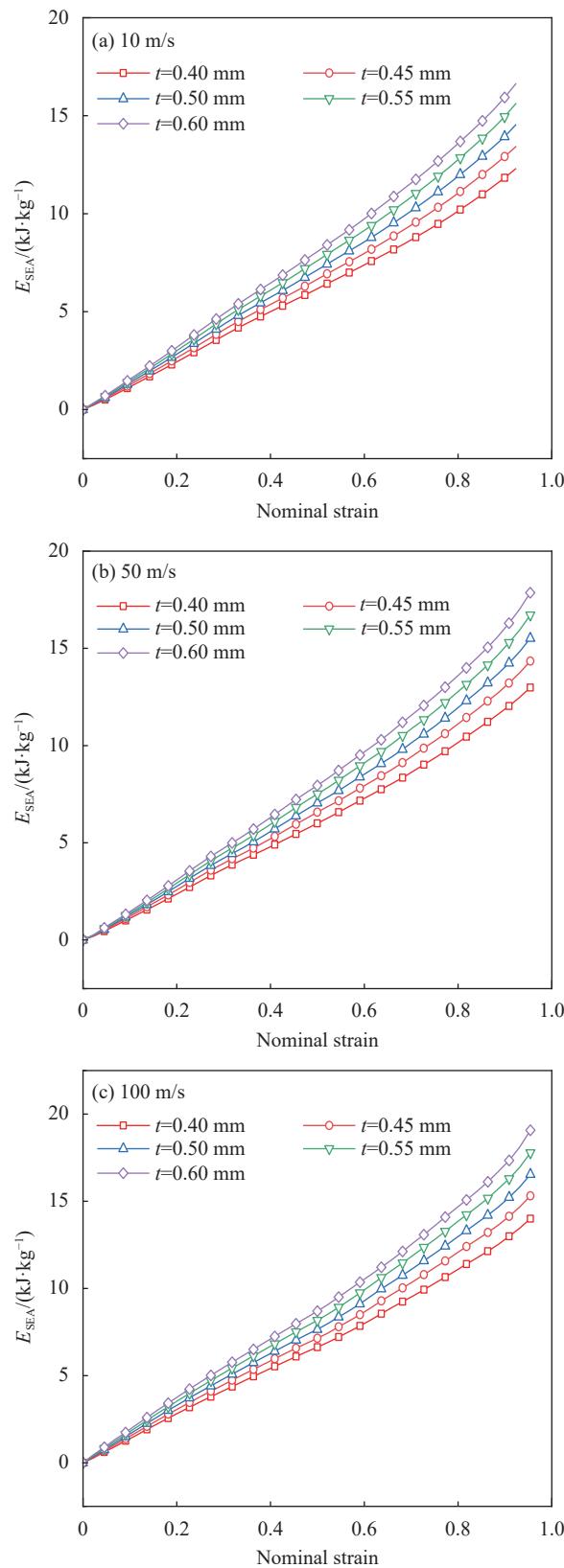


图 26 不同厚度的 BBCLS 比吸能对比

Fig. 26 Comparison of E_{SEA} of BBCLS under different thicknesses

能分别提升 8.93%、21.76%、30.13%、38.08%。这主要是由于胞壁厚度增大导致单胞相对密度升高，

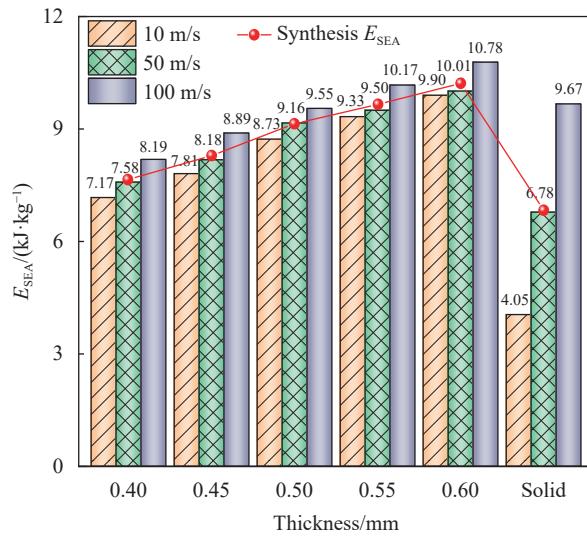


图 27 不同厚度的 BBCLS 在 0.6 应变下的比吸能

Fig. 27 E_{SEA} at 0.6 strain of BBCLS under different thicknesses

从而提高了结构的抗冲击刚度和阻力，使结构具有更好的冲击承载能力。此外，由图 27 还可以看出，与振幅和波纹数的影响规律类似，随着胞壁厚度的继续增大综合比吸能变化将变得平缓，提升效果将变得不明显。当相对密度趋近于 1 时(实心结构)，BBCLS 的比吸能呈下降趋势，与胞壁厚度为 0.6 mm 相比，实心结构综合比吸能下降了 49.63%。这说明增加胞壁厚度对于提升 BBCLS 结构的能量吸收效率效果有限。因此在实际应用中，需要综合考虑结构轻量化设计，不可盲目增大相对密度以达到更强的承载效果。

4 结论

为了探究仿生双正弦波纹点阵结构(BBCLS)的抗冲击性能，建立了其在冲击荷载作用下的三维有限元数值模型，重点研究了不同冲击载荷作用下对 BBCLS 的变形模式、动态响应以及能量吸收的影响，并与相同相对密度的传统 BCC 进行了对比。在此基础上，利用该模型进一步探究了冲击速度及振幅、波纹数、胞壁厚度等因素对 BBCLS 动态响应及吸能特性的影响规律进行了分析和研究，分析得到以下结论：

(1) 与准静态压缩荷载变形模式不同，BBCLS 在冲击载荷作用下的冲击过程可分为 3 种模式：低速冲击荷载下的均匀变形模式；中速冲击荷载下的过渡变形模式；高速冲击荷载下的动态变形模式。随着冲击速度的增大，BBCLS 的初始应力峰值、平台应力和密实应变越大，能量吸收能力

越强；

(2) BBCLS 在冲击荷载作用下的承载能力、吸能总量及比吸能均明显优于传统的体心立方点阵结构(BCC)，BBCLS 不仅改善了传统 BCC 点阵结构在节点处应力集中的问题，且在承载能力与能量吸收性能方面表现出明显的优势；

(3) 随着冲击速度的增大，相同振幅的 BBCLS 冲击端平台应力会随着冲击速度提升而增大，且速度越高增幅越明显。但是需要注意的是，随着振幅的增大，综合比吸能增加变得平缓，也就意味着超过一定值之后，增大振幅虽然可以增加结构抗冲击能力，但是效果较小，不利于轻量化的目标。故应综合考虑材料成本与承载要求需要，合理设计振幅大小，实现 BBCLS 平台应力与承载可延续性的平衡；

(4) 由于波纹数的增大，BBCLS 的承载能力、刚度和吸能性均大幅度提高，BBCLS 在相同冲击速度下的平台应力逐渐升高，波纹数为 8 时结构的平台应力最大。当波纹数为 8 时，冲击速度达到 100 m/s，相比于波纹数为 5，冲击速度为 10 m/s 结构在应变达到 0.6 的比吸能(E_{SEA})提高 201.36%；

(5) 随着胞壁厚度和冲击速度的增大，BBCLS 的比吸能明显增大。其中胞壁厚度对 BBCLS 吸能的增大作用更为显著。在一定程度上增大胞壁厚度可使结构冲击变形更加均匀，能够有效地提高 BBCLS 在不同冲击载荷作用下的吸能能力。在实际应用中，需要综合考虑结构轻量化设计不可盲目增大相对密度以达到更强的承载效果。

参考文献：

- [1] BAROUTAJI A, SAJJIA M, OLABI A G. On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 118: 137-163.
- [2] QIU X M, YU T X. Some topics in recent advances and applications of structural impact dynamics[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2011, 64(3): 1-12.
- [3] 余同希, 朱凌, 许骏. 结构冲击动力学进展(2010-2020)[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(12): 4-64.
YU Tongxi, ZHU Ling, XU Jun. Progress of structural impact dynamics (2010—2020)[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(12): 4-64(in Chinese).
- [4] YANG J, CHEN X, SUN Y, et al. Compressive properties of bidirectionally graded lattice structures[J]. *Materials & Design*, 2022, 218: 110683.

- [5] YE J, SUN Z, DING Y, et al. The deformation mechanism, energy absorption behavior and optimal design of vertical-reinforced lattices[J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 190: 110988.
- [6] 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.
ZHANG Wukun, TAN Yonghua, GAO Yushan, et al. Research progress on energy absorption and vibration of periodic lightweight porous structures[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(8): 1-19(in Chinese).
- [7] XU P, GUO W, YANG L, et al. Crashworthiness analysis of the biomimetic lotus root lattice structure[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 263: 108774.
- [8] 韩剑, 孙士勇, 牛斌, 等. 树脂基复合材料点阵结构的制造技术研究进展 [J]. 航空学报, 2023, 44(9): 47-67.
HAN Jian, SUN Shiyong, NIU Bin, et al. Research progress in manufacturing technology of resin matrix composites with lattice structure[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(9): 47-67(in Chinese).
- [9] XU Z, RAZAVI S M J, AYATOLLAHI M R. Functionally graded lattice structures: Fabrication methods, mechanical properties, failure mechanisms and applications[M]. Amsterdam: Comprehensive Structural Integrity, 2022: 433-466.
- [10] DONG G, WIJAYA G, TANG Y, et al. Optimizing process parameters of fused deposition modeling by Taguchi method for the fabrication of lattice structures[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 19: 62-72.
- [11] 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*, 2023, 194(10): 111349.
- [12] YANG J, CHEN X, SUN Y, et al. Rational design and additive manufacturing of grain boundary-inspired, multi-architecture lattice structures[J]. *Materials & Design*, 2023, 235: 112448.
- [13] 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.
- [14] MA X, ZHANG N, CHANG Y, et al. Analytical model of mechanical properties for a hierarchical lattice structure based on hierarchical body-centered cubic unit cell[J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 193: 111217.
- [15] LEE J J, MOHAMMED A A, PULLEN A, et al. Mechanical characterisation of 3D printed lightweight lattice structures with varying internal design alterations[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 36: 106456.
- [16] XIAO L, SONG W. Additively-manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: Experiments[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 111: 255-272.
- [17] HA N 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.
- [18] PLESSIS A, BROECKHOVEN C, YADROITSAVA I, et al. Beautiful and functional: A review of biomimetic design in additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 27: 408-427.
- [19] AHAMED M K, WANG H, HAZELL P J. From biology to biomimicry: Using nature to build better structures—A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 320: 126195.
- [20] 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.
- [21] ZHANG W, YIN S, YU T X, et al. Crushing resistance and energy absorption of pomelo peel inspired hierarchical honeycomb[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 125: 163-172.
- [22] 冀旭晖. 仿生蜘蛛网点阵结构设计及其吸能效果研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022.
- [23] JI Xuhui. Study on bionic spider web lattice structure design and energy absorption effect[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2022(in Chinese).
- [24] MENG L, SHI J, YANG C, et al. An emerging class of hyperbolic lattice exhibiting tunable elastic properties and impact absorption through chiral twisting[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2020, 40: 100869.
- [25] PATEK S N, KORFF W L, CALDWELL R L. Deadly strike mechanism of a mantis shrimp[J]. *Nature*, 2004, 428(6985): 819-820.
- [26] WEAVER J C M G W, MISEREZ A, EVANS-LUTTERODT K, et al. The stomatopod dactyl club: A formidable damage-tolerant biological hammer[J]. *Science*, 2012, 336(6086): 1275-1280.
- [27] PATEK S N, CALDWELL R L. Extreme impact and cavitation forces of a biological hammer: Strike forces of the peacock mantis shrimp *Odontodactylus scyllarus*[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2005, 208(19): 3655-3664.
- [28] YARAGHI N A, GUARÍN-ZAPATA N, GRUNENFELDER L K, et al. A sinusoidally architected helicoidal biocomposite[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(32): 6835-6844.
- [29] YANG X, MA J, SHI Y, et al. Crashworthiness investigation of the bio-inspired bi-directionally corrugated core sandwich panel under quasi-static crushing load[J].

- Materials & Design, 2017, 135: 275-290.
- [29] HAN Q, SHI S, LIU Z, et al. Study on impact resistance behaviors of a novel composite laminate with basalt fiber for helical-sinusoidal bionic structure of dactyl club of mantis shrimp[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 191: 107976.
- [30] HUANG H, YANG X, YAN Q, et al. Crashworthiness analysis and multiobjective optimization of bio-inspired sandwich structure under impact load[J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 172(3): 108840.
- [31] CUI C Y, CHEN L, FENG S, et al. Novel cuttlebone-inspired hierarchical bionic structure enabled high energy absorption[J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 186: 110693.
- [32] LI B, LIU H, ZHANG Q, et al. Crushing behavior and energy absorption of a bio-inspired bi-directional corrugated lattice under quasi-static compression load[J]. *Composite Structures*, 2022, 286: 115315.
- [33] HUNT C J, MORABITO F, GRACE C, et al. A review of composite lattice structures[J]. *Composite Structures*, 2022, 284: 115120.
- [34] ZHU J, ZHOU H, WANG C, et al. A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(1): 91-110.
- [35] CLAVERIE T, CHAN E, PATEK S N. Modularity and scaling in fast movements: Power amplification in mantis shrimp[J]. *Evolution*, 2011, 65(2): 443-461.
- [36] 黄晗, 许述财, 陈姮. 仿生波纹夹层结构耐撞性分析及优化 [J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(8): 36-46.
- HUANG Han, XU Shucai, CHEN Heng. Impact resistance analysis and optimization of biomimetic corrugated sandwich structures[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(8): 36-46(in Chinese).
- [37] 魏路路, 余强, 赵轩, 等. 内凹-反手性蜂窝结构的面内动态压溃性能研究 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(4): 261-269.
- WEI Lulu, YU Qiang, ZHAO Xuan, et al. Research on in-plane dynamic crushing behavior of concave and back-handed honeycomb structures[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(4): 261-269(in Chinese).
- [38] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 2-12.
- [39] 刘伟洛. 增材制造三周期极小曲面结构的力学性能研究 [D]. 广州: 广州大学, 2021.
- LIU Weiluo. Research on mechanical properties of additive manufacturing three-period minimal curved surface structures[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2021(in Chinese).
- [40] 徐向聪, 高佳丽, 郝云波. 304 不锈钢多层梯度点阵结构压缩性能及梯度率影响研究 [J]. 机械强度, 2023, 45(6): 1318-1325.
- XU Xiangcong, GAO Jiali, HAO Yunbo. Research on compression properties and influence of gradient rate of 304 stainless steel multilayer gradient lattice structure[J]. *Mechanical Strength*, 2023, 45(6): 1318-1325(in Chinese).
- [41] MASKERY I, ABOULKHAIR N T, AREMU A O, et al. A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 670: 264-274.
- [42] 李晓丹, 朱庆丰, 孔淑萍, 等. 3D 打印 AlSi10Mg 合金组织性能研究 [J]. *材料科学与工艺*, 2019, 27(2): 16-21.
- LI Xiaodan, ZHU Qingfeng, KONG Shuping, et al. Study on microstructure and properties of 3D printed AlSi10Mg alloy[J]. *Materials Science and Technology*, 2019, 27(2): 16-21(in Chinese).
- [43] 陈剑勇. 静动态载荷下三周期极小曲面多孔结构响应特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- CHEN Jianyong. Study on response characteristics of three-period minimal curved porous structures under static and dynamic loads[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023(in Chinese).
- [44] MACONACHIE T, LEARY M, TRAN P, et al. The effect of topology on the quasi-static and dynamic behaviour of SLM AlSi10Mg lattice structures[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 118(11-12): 4085-4104.
- [45] 厉雪, 肖李军, 宋卫东. 3D 打印梯度 Gyroid 结构的动态冲击响应 [J]. *高压物理学报*, 2021, 35(3): 90-99.
- LI Xue, XIAO Lijun, SONG Weidong. Dynamic impact response of 3D printed gradient gyroid structure[J]. *Journal of High Pressure Physics*, 2021, 35(3): 90-99(in Chinese).
- [46] 卢子兴, 王欢, 杨振宇, 等. 星型-箭头蜂窝结构的面内动态压溃行为 [J]. 复合材料学报, 2019, 36(8): 1893-1900.
- LU Zixing, WANG Huan, YANG Zhenyu, et al. In-plane dynamic crushing behavior of star-arrow honeycomb structures[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(8): 1893-1900(in Chinese).
- [47] 张晓楠, 晏石林, 欧元勋, 等. 负泊松比内凹蜂窝结构梯度设计与动态冲击响应 [J]. 振动与冲击, 2023, 42(3): 193-198.
- ZHANG Xiaonan, YAN Shilin, OU Yuanxun, et al. Gradient design and dynamic shock response of concave honeycomb structures with negative Poisson's ratio[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(3): 193-198(in Chinese).
- [48] 李成兵, 李锐, 张吉涛, 等. 多阶式层级梯度蜂窝结构的共面冲撞性能研究 [J]. 高压物理学报, 2023, 37(3): 121-132.
- LI Chengbing, LI Rui, ZHANG Jitao, et al. Coplanar shock response of multistage hierarchical gradient honeycomb structures[J]. *Journal of High Pressure Physics*, 2023, 37(3): 121-132(in Chinese).

- [49] 纪小刚, 张建安, 梁宇豪, 等. 仿皮肤三维多孔点阵结构压缩吸能性能研究 [J]. *机械工程学报*, 2021, 57(15): 222-230.
JI Xiaogang, ZHANG Jian'an, LUAN Yuhao, et al. Study on compressive energy absorption performance of three-dimensional porous lattice structure modeled on skin [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(15): 222-230(in Chinese).
- [50] 李心远, 宋卫东, 陈键. 3D 打印 TPMS 多孔材料力学性能数值仿真 [J]. 太原理工大学学报, 2019, 50(3): 386-393.
LI Xinyuan, SONG Weidong, CHEN Jian. Numerical simulation of mechanical properties of 3D printed TPMS porous materials [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2019, 50(3): 386-393(in Chinese).
- [51] 肖江海, 侯俊玲, 李群. 基于 MJF 的极小曲面结构力学行为及吸能特性研究 [J]. 固体力学学报, 2024, 45(2): 201-212.
XIAO Jianghai, HOU Junling, LI Qun. Study on mechanical behavior and energy absorption characteristics of minimal surface structures based on MJF [J]. *Journal of Solid Mechanics*, 2024, 45(2): 201-212(in Chinese).
- [52] 赵众豪, 池瑜莉, 冯峻良, 等. 新型 CFCB 点阵夹芯结构面外压缩载荷下能量吸收特性研究 [J]. 振动与冲击, 2023, 42(17): 166-174.
ZHAO Zhonghao, CHI Yuli, FENG Junliang, et al. Study on energy absorption characteristics of novel CFCB lattice sandwich structures under out-of-plane compression loads [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(17): 166-174(in Chinese).
- [53] 虞科炯, 徐峰祥, 华林. 正弦曲边负泊松比蜂窝结构面内冲击性能研究 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(13): 51-59.
YU Kejiong, XU Fengxiang, HUA Lin. Research on in-plane impact performance of sinusoidal curved negative Poisson's ratio honeycomb [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(13): 51-59(in Chinese).