



# 混合结构配置点阵结构压缩行为和吸能特性实验研究

徐慧宁<sup>1</sup>, 江卫锋<sup>2</sup>, 刘德航<sup>1</sup>, 殷鸣<sup>3</sup>

(1. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065; 2. 西华大学 机械工程学院, 成都 610039; 3. 四川大学 机械工程学院, 成都 610065)

**摘要:** 节点和支柱相互连接后有序排列形成的点阵结构具有轻量化、可承载、缓冲吸能等特点, 在工程实际中被广泛应用。然而, 仅单一形式单元结构经周期排列组成的点阵结构, 可能难以平衡多性能维度下的综合表现。本文组合不同结构配置的单元结构来构造混合点阵结构, 探究混合配置下点阵结构的压缩行为和吸能特性。通过单轴压缩实验研究结构的力学响应, 比较单一配置结构与混合配置结构的力学性能和变形模式, 基于复杂比例评价方法对结构的吸能性能进行定量综合评估。结果表明, 相较于单一结构配置, 合理的结构配置组合能够融合各组成配置的功能特点, 使得混合配置结构的压缩性能实现提升, 并获得更为稳定和均衡的能量吸收性能。所提出的混合结构配置设计策略可为基于点阵结构的新型吸能结构开发提供理论指导和设计依据。

**关键词:** 点阵结构; 吸能特性; 混合结构配置; 压缩行为; 复杂比例评价方法

**中图分类号:** 文献标志码: A DOI: 10.12179/1672-4550.20240672

## An Experimental Study on Compression Behavior and Energy Absorption Properties of Lattice Structures with Hybrid Configurations

XU Huining<sup>1</sup>, JIANG Weifeng<sup>2</sup>, LIU Dehang<sup>1</sup>, YIN Ming<sup>3</sup>

(1. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. School of Mechanical Engineering, Xihua University Chengdu 610039, China; 3. School of Mechanical Engineering, Sichuan University Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The lattice structure formed by the orderly arrangement of interconnected nodes and struts possesses the features of light weight, load-bearing and energy absorption, and is widely used in engineering practice. By combining unit cells with different structural configurations to construct the lattice structure, the compression behavior and energy absorption properties of the lattice structure in hybrid configurations are explored. The mechanical response of the structure under uniaxial compressive loading is investigated, and the mechanical properties and deformation modes of the single-configuration structure are compared with those in the hybrid configuration. A quantitative and comprehensive assessment of the energy absorption performance of the lattice structure is performed based on the complex proportional assessment method. The results show that, compared with a single configuration, a rational combination of structural configurations can integrate the functional characteristics of each component configuration, resulting in improved compression performance and more stable and balanced energy absorption performance of the lattice structure in hybrid configuration. The proposed design strategy for constructing hybrid configuration structures can provide theoretical guidance and design basis for the development of novel energy-absorbing structures based on lattice structures.

**Key words:** lattice structures; energy absorption; hybrid configurations; compression behavior; complex proportional assessment

冲击碰撞在土木建筑、动力机械、交通运输、航空航天等工程领域中几乎难以避免, 而剧烈的冲击严重影响装备或器件的性能、精度、寿命, 严重时甚至会造成事故威胁到人身安全。因此, 提高结构的耐撞性能具有极其重要的工程意

义, 迫切需要发展具有优良吸能特性的工程结构。在此背景下, 新结构技术被寄予厚望, 研究人员期望能根据客观需求进行结构的人工设计, 来获取性能优于传统方案的新型工程结构。其中, 点阵结构无疑是颇具研究价值和前景的

收稿日期: 2024-12-19

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51705347); 四川省科技计划项目(2018GZ0121)。

作者简介: 徐慧宁, 博士, 讲师, 主要从事实验力学方面的研究。E-mail: [huiningxu@foxmail.com](mailto:huiningxu@foxmail.com)

选择之一。点阵结构由节点和支柱相互连接后有序排列形成, 可通过结构的塑性变形、屈曲变形等方式将输入的动能吸收或耗散, 从而达到缓和冲击的作用<sup>[1]</sup>。在通过物理结构设计实现特定功能需求的设计理念指引下, 人工构筑的点阵结构显示出设计高度自由、性能人为可控等特点, 辅以先进制造技术的制备, 有望作为一种特殊功能结构在吸能防撞应用场景中发挥重要作用<sup>[2-4]</sup>。

点阵结构的力学性能很大程度上由其拓扑结构决定, 大量的研究通过经验设计<sup>[5-7]</sup>、优化设计<sup>[8-9]</sup>、仿生设计<sup>[10-12]</sup>等方法来构造或调整单元结构的拓扑构型, 进而使其性能得以满足不同应用场景下的功能需求。例如, HABIB 等人<sup>[13]</sup> 评估比较了六种不同类型点阵结构的能量吸收特性, 结果表明结构的变形模式显著影响结构的吸能性能。BAI 等人<sup>[14]</sup> 提出一种使用圆弧支柱来构造弯曲点阵结构的设计策略, 实验和仿真结果表明弯曲支柱点阵结构能有效缓解节点处的应力集中, 改善结构力学性能, 使得结构的能量吸收能力提升。XIAO 等人<sup>[15]</sup> 针对不同的工况, 采用将增材制造与拓扑优化相结合的方法, 设计并制备了多种具有优良机械性能的轻质点阵结构。FERNANDES 等人<sup>[16]</sup> 从一类深海六放海绵的骨架系统中得到启发, 设计并制备出一种正方点阵结构, 其优异的机械稳固性使得结构应对外部负载时可以避免发生全局屈曲。然而, 为了减少结构设计的复杂性, 大量研究工作中的点阵结构一般仅由单一形式的单元结构周期排列组成, 这种单一结构配置的结构在一定特性方面可以呈现出较为突出的性能, 但可能难以平衡多性能维度下的综合表现。ZHANG<sup>[17]</sup> 等人提出通过变密度和多种结构混合来构造复合点阵结构, 结果表明该方式有助于提高结构的承载和抗冲击性能。ALBERDI<sup>[18]</sup> 等人的研究表明多种单元结构混合组成的点阵结构有望获得比均匀结构更好的吸能效果。

因此, 本文将组合不同结构配置的单元结构来构造点阵结构, 比较单一配置结构与混合配置结构的压缩力学性能和变形模式, 探究混合结构配置下点阵结构的压缩行为和吸能特性。同时, 考虑结构在屈服强度、软化行为、耐损伤性、吸能性能等方面存有潜在冲突的情况下, 基于复杂比例评价方法对所有结构的吸能性能进行定量综合评估, 以期利用不同结构配置的功能优势来实

现更为优良均衡的综合性能。

## 1 结构配置设计及实验方法

### 1.1 混合结构配置设计

作为研究示例, 本文以二维正方点阵为基础来构造点阵结构。在简单正方格子中通过引入斜向支撑, 可使结构保持轻量化特征的同时能提高承载和吸能性能。作为示例, 以工程实际中一种常见具有对角支柱的结构作为基础结构配置 1, 如图 1 所示, 它由在单元尺寸为  $L$  且支柱宽度为  $t_s$  的正方格子中沿对角线方向引入宽度为  $t_i$  的斜向支柱构成。

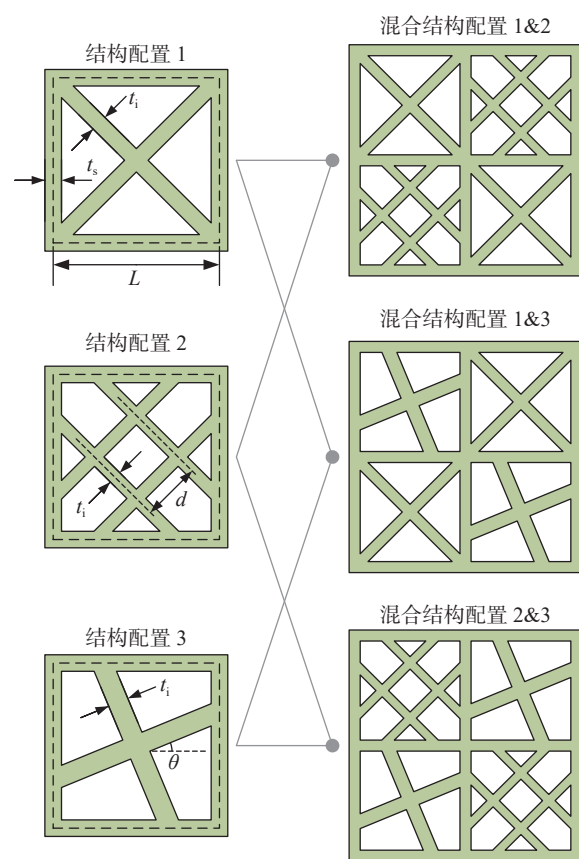


图 1 各结构配置的截面示意图

以此为基础, 可构造衍生结构并将其交替来构筑混合结构配置。考虑到在基础单元结构中引入复杂几何变化后, 不利于分析混合结构配置设计所带来的结构变化对结构性能的影响, 因此本文通过改变内部斜向支柱的数量、倾角和排布方式来构造不同配置的点阵结构, 衍生出如图 1 所示的结构配置 2 和结构配置 3。结构配置 2 中两平行斜向支柱之间的距离为  $d$ , 结构配置 3 中斜向支柱的倾斜角为  $\theta$ 。进一步, 将以上 3 种基础结构配

置两两组合并交替排列, 可分别得到混合结构配置 1&2、2&3、1&3。本文将通过以上 6 种结构作为示例, 详细探讨混合结构配置形式对点阵结构力学性能和吸能特性的影响。

点阵结构的相对密度是一项重要特征参数, 它是结构名义密度和组成材料密度的比值, 上述各结构配置的相对密度可分别通过式(1)~(6)进行计算。作为研究示例, 令各配置结构的相对密度都

保持在约 44%, 具体的几何参数如表 1 所示, 其中  $H$  为结构在面外方向的厚度。采用数字光处理(Digital Light Processing, DLP)增材制造工艺(Shape 1+HD, Rayshape)来制备点阵结构样件, 所选材料为成形后具有优良韧性的光敏树脂(Tough 20, Rayshape), 打印层厚为 0.05 mm, 打印完成的样件经工业酒精清洗后再通过紫外光固化机进行固化干燥, 最终制备得到的点阵结构样件如图 2 所示。

表 1 几何参数表

结构配置	$L$ (mm)	$H$ (mm)	$t_s$ (mm)	$t_i$ (mm)	$d$ (mm)	$\theta$ (°)
配置1	15	20	1.5	1.5		
配置2	15	20	1.5	1.03	5.3	
配置3	15	20	1.5	1.93		22.5
配置1&2	15	20	1.5	1.5/1.03	5.3	
配置1&3	15	20	1.5	1.5/1.93		22.5
配置2&3	15	20	1.5	1.03/1.93	5.3	22.5

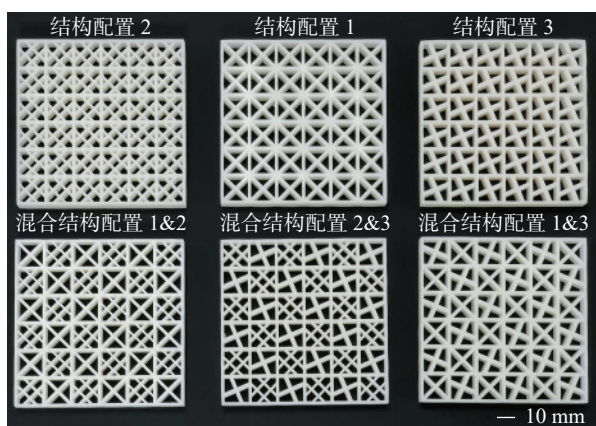


图 2 制备的点阵结构样件

$$\rho_{r1} = \frac{L^2 - (L - t_s - \sqrt{2}t_i)^2}{L^2} \quad (1)$$

$$\rho_{r2} = \frac{L^2 - (L - t_s)^2 + 2\sqrt{2}t_i(2L - \sqrt{2}d - 2t_s) - 4t_i^2}{L^2} \quad (2)$$

$$\rho_{r3} = \frac{L^2 - (L - t_s)^2 + 2t_i \cos^{-1}\theta(L - t_s) - t_i^2}{L^2} \quad (3)$$

$$\rho_{r1\&2} = \frac{\rho_{r1} + \rho_{r2}}{2} \quad (4)$$

$$\rho_{r1\&3} = \frac{\rho_{r1} + \rho_{r3}}{2} \quad (5)$$

$$\rho_{r2\&3} = \frac{\rho_{r2} + \rho_{r3}}{2} \quad (6)$$

## 1.2 准静态压缩实验

点阵结构的压缩行为和吸能特性通过利用

Instron 5967(最大载荷 30 kN, 测量精度高、采样率高)电子万能试验机进行准静态压缩实验来评估。实验前, 分别多次测量样件的长、宽、高尺寸并取平均值, 用于计算名义应力和名义应变。实验中, 如图 3 所示, 样件置于固定的压盘上, 横梁以 5 mm/min 的速度(应变率为  $9 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , 准静态)向下匀速压缩结构样件, 压缩位移为 60 mm(对应 65.57% 的压缩应变)。压缩过程中的力-位移曲线由系统软件自动记录, 并可转化为应力-应变曲线。此外, 为观察压缩过程中结构的变形模式和失效形式, 利用数码相机每隔 2 s 间隔拍摄记录整个压缩过程。

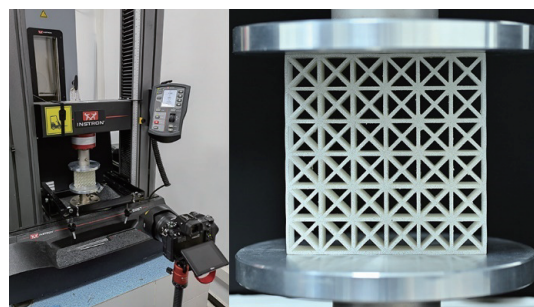


图 3 准静态压缩实验

## 2 结果与讨论

### 2.1 压缩力学响应

准静态压缩过程中的应力-应变曲线如图 4 所示。可以看到, 所有结构都呈现出非线性的载荷

一位移关系，表现在应力-应变曲线主要呈现出三个典型阶段：弹性段、平台段以及密实段。

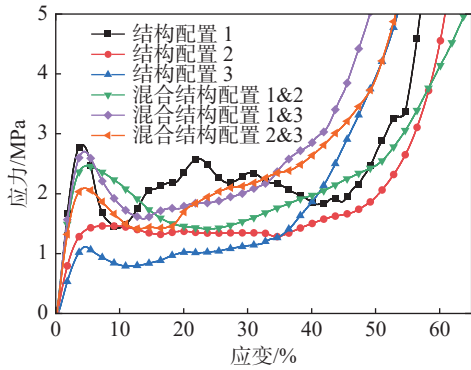


图4 应力应变曲线

在弹性段，结构发生弹性变形，应力随压缩应变增大而近似线性增大，直至结构中的薄壁支柱发生屈服。图5给出了该阶段下测得各结构的屈服强度(0.2%残余应变时的应力值)和刚度(应力-应变曲线弹性段线性拟合的斜率)，考虑到制备样件的实际相对密度略微存在偏差，此处屈服强度和刚度为除以实际相对密度后的比屈服强度 $\sigma_y^*$ 和比刚度 $E^*$ 。可以看到，结构配置1显示出最大的压缩刚度和屈服强度，远大于结构配置2和结构配置3；三种混合结构配置之间的刚度和屈服强度差距则并不大，稍小于结构配置1，但相较于结构配置2和结构配置3，混合结构配置的屈服强度和刚度明显提升。以混合结构配置2&3为例，其屈服强度和刚度分别为4.75 MPa和138.77 MPa，相比于单一的结构配置2( $\sigma_y^* = 3.06$  MPa,  $E^* = 87.31$  MPa)和结构配置3( $\sigma_y^* = 2.08$  MPa,  $E^* = 70.67$  MPa)，屈服强度分别提升55.23%和128.37%，刚度分别提升58.94%和96.36%。随后进入平台段，结构中的支柱逐渐屈曲崩塌，应力在一段较长的压缩行程中维持在一定范围内，因此是结构吸收能量的主要阶段。该阶段，结构配置1呈现出最大的平台应力，结构配置3的平台应力最小。最后进入密实段，由于材料被逐渐压实，应力快速上升。从开始压缩到密实段开始所吸收的冲击能量之和，就为结构在被压缩过程中所吸收的总能量。

在应力-应变曲线中还可观察到的一个重要现象是，除结构配置2外的其余结构在屈服点之后5%~10%的应变范围内都明显软化，应力不同程度地下降。应力的变化幅度可进一步通过计算得

到如图6所示的硬化率曲线来定量评估，硬化率为一定应变范围内应力的变化率，正值表示硬化而负值则意味着软化<sup>[19]</sup>。在屈服点后，结构配置1的软化率绝对值最高为54.53 MPa，相较之下结构配置3为8.07 MPa，而结构配置2仅为4.39 MPa。然而可以注意到，结构配置1在同结构配置2或结构配置3组成混合配置结构后，软化现象得到明显改善，混合结构配置1&2和混合结构配置1&3的软化率分别为10.04 MPa和21.68 MPa，相对于结构配置1分别下降81.59%和60.24%。而另一方面，混合结构配置1&2、1&3的屈服强度和刚度相对于结构配置2和结构配置3得到显著提升，平台应力也得以提高，这意味着更多的能量在平台段被吸收。此外，还可看到结构配置1和结构配置2或结构配置3形成混合配置结构后，硬化率曲线的波动幅度明显减小，表明结构在压缩过程中的载荷变化更为平稳。

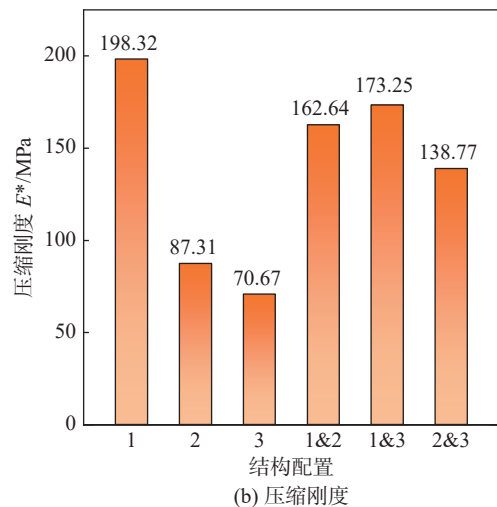
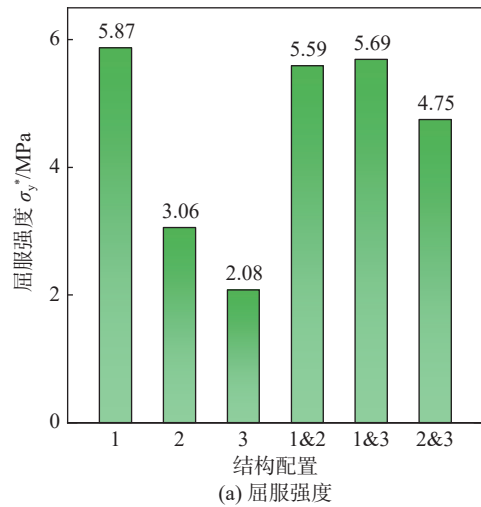
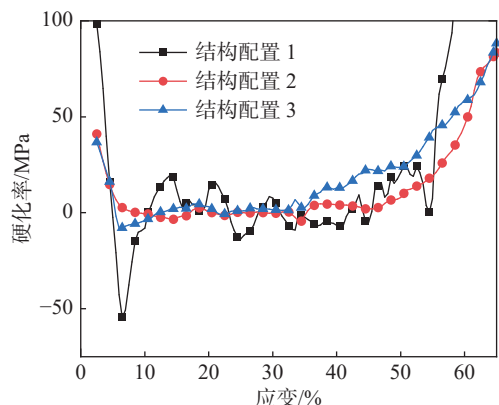
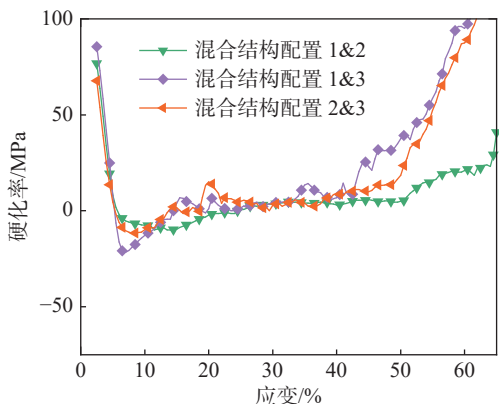


图5 压缩性能



(a) 单一结构配置



(b) 混合结构配置

图6 硬化率曲线

## 2.2 结构变形模式

进一步, 通过结构的变形机制和失效模式来探究不同结构配置下点阵结构的压缩行为。图7展示了不同压缩应变下结构的变形模式。可以看到, 结构配置1的变形从与下压盘接触的最下层开始, 然后往上逐层崩塌, 在约45%的压缩应变时出现“X”形剪切变形带, 随后逐渐被压实。尤其值得注意的是, 在竖直支柱的中点以及竖直支柱和斜向支柱的连接节点处, 可以观察到由于严重弯曲变形导致的局部断裂, 这些断裂失效尤其是加载方向上竖直支柱的断裂使得结构配置1在后屈服点的强度快速下降且平台段的应力波动幅度较大。结构配置2则是从最上层往下逐层崩塌, 约35%的压缩应变时在最下两层出现倒“V”形的剪切变形带, 随后结构从两端向中间逐渐被完全压实。压缩过程中仍可观察到断裂发生, 但断裂主要发生在部分薄壁斜向支柱和竖直支柱的连接节点处, 而主要承受轴向载荷的竖直支柱自身没有断裂, 结构变形较为均匀, 因此在应力-应变曲线中平台段的应力几乎保持恒定。与

结构配置1、2相比, 结构配置3受压时, 在弯矩作用下水平和竖直支柱向内弯曲, 而交叉的斜向支柱发生旋转, 使得结构整体向内收缩而不是向外膨胀, 结构中的孔隙很快被弯曲变形的支柱填充, 因此它相比于其他配置的结构更快进入压实阶段。

混合结构配置1&2在约15%的压缩应变时可观察到与加载方向呈40°的剪切变形带, 随后从顶层和底层两端开始逐层崩塌, 在约25%的压缩应变后出现一定程度地面外屈曲, 随后逐渐被压实。而在混合结构配置1&2中, 其断裂失效情况与结构配置2类似, 主要为局部位置配置2对应的薄壁斜向支柱从节点上断裂, 而轴向承载的支柱没有发生断裂。因此, 相较于结构配置1, 混合结构配置1&2的应力应变行为中软化现象得到改善。混合结构配置1&3中局部位置的竖直支柱由于剧烈的弯曲变形在中点处断裂。但是与结构配置1对比可以看到, 在部分相同的结构位置, 结构配置1在15%压缩应变时就已发生断裂, 而混合结构配置1&3在约45%压缩应变时才完全断裂。混合结构配置2&3变形模式的最主要特征在于出现多条与加载方向呈约37°的剪切变形带, 集中分布在其组成结构配置2中。

## 2.3 结构吸能性能比较

最大压溃力(Global Peak Crushing Force, GPCF)、平均压溃力(Mean Crushing Force, MCF)、压溃力效率(Crushing Force Efficiency, CFE)、总吸能(Energy Absorption, EA)、比吸能(Specific Energy Absorption, SEA)、能量吸收效率 $\eta$ (Energy Absorption Efficiency)等参数是用于综合评估结构吸能性能的重要指标。总吸能是结构被压缩至致密化阶段开始时<sup>[20]</sup>(最大吸能效率对应的位移)所吸收的冲击能量之和, 可以通过计算压缩力-位移曲线下的面积得到:

$$EA = \int_0^{d_{\max}} F(\delta) d\delta \quad (7)$$

式中 $F(\delta)$ 表示轴向压缩力,  $\delta$ 是轴向压缩位移, 而 $d_{\max}$ 是有效压缩行程, 即能量吸收效率达到最大时的压缩位移。比吸能是直接反映结构吸能性能的重要指标, 它指单位质量结构所吸收的能量, 表示为

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad (8)$$

其中  $m$  为结构的总质量。能量吸收效率被定义为在某一确定压缩应变下，结构吸收的能量同个理想能量吸收器所吸收的能量之比，其计算公式如下：

$$\eta(\varepsilon) = \frac{\int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma_{\max} \times 1} \quad (9)$$

其中  $\sigma_{\max}$  是压缩至应变  $\varepsilon$  过程中出现的最大应力。最大压溃力是整个压缩过程中出现的最大峰值载荷，平均压溃力则是结构在整个压缩过程中

所承受载荷的平均值，其计算表达式为：

$$MCF = \frac{EA}{d_{\max}} \quad (10)$$

压溃力效率由平均压溃力与最大压溃力的比值给出：

$$CFE = \frac{MCF}{GPCF} \quad (11)$$

它能够反映结构所承受载荷的稳定性和一致性。

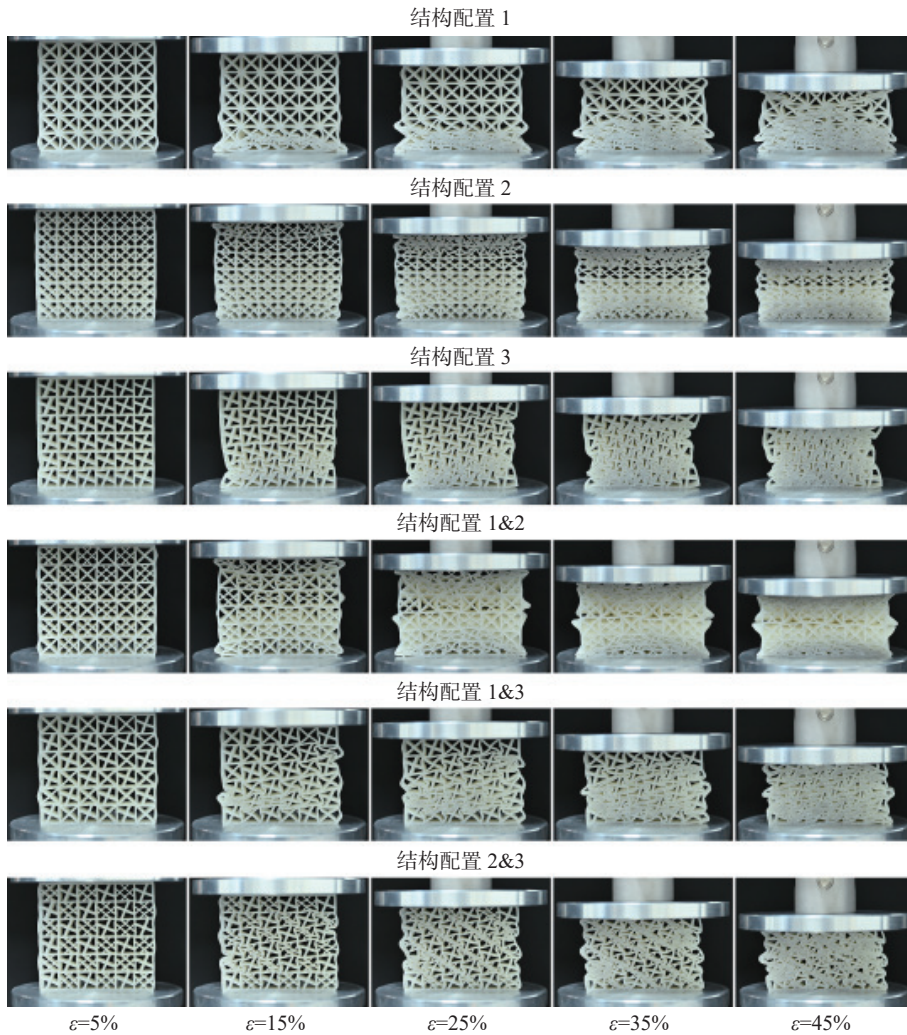


图 7 结构的变形模式

利用准静态压缩测试得到的力-位移(应力-应变)数据，计算得到总吸能、比吸能、能量吸收效率、压溃力效率、最大压溃力等能量吸收性能评估指标的具体数值，图 8(a)~(d)中给出了各项吸能指标的统计情况。可以看到各结构在比吸能和峰值力指标上差异十分明显。其中，比吸能是衡

量结构吸能特性最重要的一项指标，混合结构配置 1&2、1&3、2&3 的比吸能相较于结构配置 1 分别下降 7.30%、18.26%、24.49%，然而相较于结构配置 2 分别提升 45.56%、28.34%、18.56%，相较于结构配置 3 分别提升 191.97%、157.44%、137.82%，而混合配置结构的最大压溃力也要显著

高于结构配置 2 和结构配置 3。对于压溃力效率, 混合排布结构配置和单一排布结构配置之间的差别不大, 但从实际的应力-应变曲线中可以看到各结构配置的载荷波动情况不尽相同。因此从评估

结构所承受载荷的稳定性来看, 硬化率指标更能反映出各结构之间的差异。在吸能效率方面, 混合结构配置 1&2 与结构配置 1、结构配置 2 几乎相同, 要优于混合结构配置 1&3、2&3。

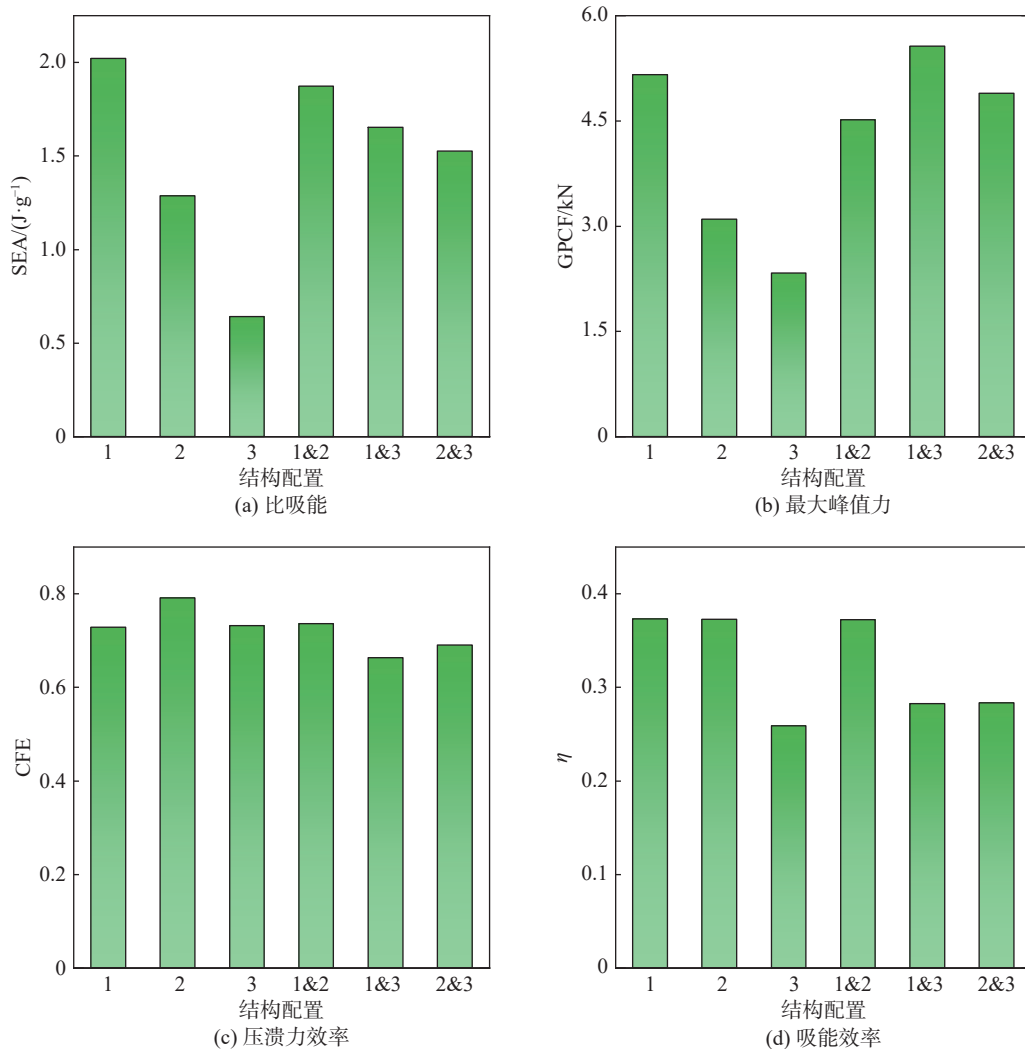


图 8 吸能性能

### 2.4 基于复杂比例评价方法的吸能特性综合评估

由于各个指标的重要程度不尽相同且部分性能指标存在冲突, 难以直接比较结构配置 1、结构配置 2 和混合结构配置 1&2 这三种结构的综合性能。因此, 进一步采用复杂比例评价 (Complex Proportional Assessment, COPRAS) 方法<sup>[21]</sup>来定量评估各结构配置包含压缩行为和吸能特性在内的综合性能。该方法是一种多属性的决策方法, 可以解决评价标准之间的冲突并考虑相应的标准权重, 其具体实现步骤如下:

步骤 1: 构建初始决策矩阵  $X$ ,

$$X = [x_{ij}]_{mn} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中  $x_{ij}$  表示在第  $i$  种结构设计下的第  $j$  项性能指标,  $m$  为设计方案的总数,  $n$  为性能指标的数目。

步骤 2: 归一化初始决策矩阵, 得到无量纲矩阵  $R$ ,

$$R = [r_{ij}]_{mn} = \left[ \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \right]_{mn} \quad (13)$$

其中  $r_{ij}$  表示第  $i$  种设计下第  $j$  项性能指标的归一

化值。

步骤 3: 确定性能指标的权重系数。将所有的性能指标两两比较, 其中更重要的指标给 3 分, 较次要的指标给 1 分, 若重要程度相同则都给 2 分。由此, 第  $j$  项性能指标的权重系数定义为该指标总得分与所有指标总得分的比值, 具体计算公式如下:

$$w_j = \frac{\sum_{i=1}^m N_{ij}}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m N_{ij}} \quad (14)$$

式中  $N_{ij}$  表示第  $i$  种设计下第  $j$  项性能指标的得分。

步骤 4: 计算加权后的归一化矩阵  $D$ ,

$$D = [y_{ij}]_{mn} = [r_{ij}]_{mn} \times w_j \quad (15)$$

其中,  $w_j$  为第  $j$  项性能指标的权重系数。

步骤 5: 分别对有利性能指标和不利性能指标的加权后归一化值求和:

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^n y_{+ij} \quad (16)$$

$$S_{-i} = \sum_{j=1}^n y_{-ij} \quad (17)$$

式中  $y_{+ij}$  和  $y_{-ij}$  分别为有利指标和不利指标的加权后归一化值。 $S_{+i}$  的值越大而  $S_{-i}$  的值越小则表明其对应的结构设计方案越好。

步骤 6: 确定各设计方案的相对重要性或优先级, 计算其综合评分  $Q_i$ :

$$Q_i = S_{+i} + \frac{S_{-\min} \sum_{i=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{i=1}^m (S_{-\min}/S_{-i})} \quad (18)$$

其中,  $S_{-\min}$  为  $S_{-i}$  的最小值,  $Q_i$  值越大表明综合性能越好, 其最大值  $Q_{\max}$  对应着最优的设计方案。将各结构设计方案的  $Q_i$  值与  $Q_{\max}$  相比, 可得到相对分值:

$$U_i = \frac{Q_i}{Q_{\max}} \times 100\% \quad (19)$$

在比吸能  $SEA$ 、能量吸收效率  $\eta$ 、压溃力效率  $CFE$  以及最大压溃力  $GPCF$  这四项吸能性能评估指标中, 压溃力效率一般用来评估结构所承受载荷的稳定性和一致性。然而, 从图 8 (c) 的结果中可以看到, 所有结构配置之间的压溃力效率差异并不大, 尤其未能反映出各结构在屈服后的软化行为, 故此处采用软化率来替代压溃力效率参与综合性能评估。此外, 考虑结构的压缩力学性能, 将屈服强度  $\sigma_y$  也纳入评估。各项指标中, 比吸能直接反映结构的能量吸收能力, 是衡量结构吸能特性最重要的一项指标; 最大压溃力是安全性评估的限定指标, 吸能结构需在吸收能量的同时使得峰值力在容许范围内, 因此最大压溃力也是一项重要指标。此外, 屈服强度是反映结构压缩性能的一项重要指标。因此, 得到  $SEA > GPCF = \sigma_y > HR = \eta$  的性能指标重要性排序, 由此可根据式 (14) 计算得到各性能指标的权重系数, 如表 2 所示。

表 2 性能指标的权重系数

性能指标	性能比较组合										总分	权重系数
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
$SEA$	3	3	3	3							12	0.3
$GPCF$	1				2	3	3				9	0.225
$\sigma_y$		1			2			3	3		9	0.225
$HR$			1			1		1		2	5	0.125
$\eta$				1			1		1	2	5	0.125

最终计算得到各结构配置的各项性能指标加权归一化值、 $Q_i$  值、 $U_i$  值, 如表 3 所示。定量计算结果表明, 混合结构配置 1&2 得分最高, 即具有最佳的综合性能, 其组成结构配置 1 和结构配置 2 分列第二和第三。结构配置 3 排名最低, 因其受压时支柱向内弯曲收缩而很快被压实, 所以吸能较少, 然而比吸能却是权重系数最高的一项指标。混合结构配置 1&3 和混合结构配置 2&3 的

综合性能相较于结构配置 3 提升明显, 但是受到结构配置 3 变形模式的影响, 它们的综合性能表现并未能超过结构配置 1 和结构配置 2。

综合以上结果, 可以发现混合结构配置在调控结构的压缩行为和吸能性能主要显示出两方面的优势。一方面是混合结构配置有潜力克服其原组成结构配置的局限, 在某些性能方面实现显著提升。例如, 混合结构配置 2&3 的屈服强度和刚



度远高于结构配置 2 和结构配置 3。另一方面, 相较于单一的结构配置, 合理的混合结构配置能够融合各组成配置的特点, 平衡有利和不利的性能指标, 从而实现更为均衡的综合性能。以混合结构配置 1&2 为例, 其中结构配置 1 呈现出最高的屈服强度、刚度和比吸能, 然而它在屈服点后的软化现象最为严重, 平台段的载荷波动幅度也最大; 结构配置 2 则恰恰相反, 其没有出现明显的软化现象, 平台段的应力几乎保持恒定, 呈现出理想的吸能曲线, 然而较低的平台应力使其最终的比吸能并不高。在这种情况下, 混合结构配置 1&2 在保持较高比吸能和能量吸收效率的同时, 后致软化现象得到明显改善, 平台段的峰值应力下降且载荷变化也更为平稳, 呈现出更加稳定和均衡的能量吸收性能。混合结构配置 1&2 均衡的表现也在基于复杂比例评价方法的定量评估中得到印证, 其得分最高, 即综合性能最好。

可见, 同时将有利的和不利性能指标纳入考察, 定量综合评估结果表明合理的混合结构配置组合可使得结构最终在力学性能、耐损伤性与吸能性能上得到综合改善, 实现更加稳定和均衡的能量吸收性能。融合不同构型功能优势的混合结构配置可增强结构在应对外部负载时的多维度综合性能表现, 从而满足高端装备结构的防撞抗冲击性能需求。通过构筑点阵单元结构, 并以混合配置排布的方式将其作为芯体或支架结构嵌入到典型功能结构部件的设计中, 具有广阔的实际工程应用前景。例如, 在航空航天领域, 可应用于蒙皮、舱板等结构, 以减轻工作过程中的振动和冲击载荷; 在交通运输领域, 可用于轨道基座、车体壁板、车身前纵梁等结构的防撞吸能, 以减轻意外冲击对主体结构的破坏; 在国防军工领域, 可应用于开发防爆装甲等装备, 阻隔爆炸冲击波, 吸收瞬时冲击能量。

表 3 综合性能评估结果

结构配置	$SEA$	$\eta$	$\sigma_y$	$GPCF$	$HR$	$Q_i$	$U_i$	排名
1	0.0674	0.024	0.0502	0.0454	0.0324	0.1819	98.26	2
2	0.0429	0.024	0.0246	0.0273	0.012	0.1715	92.6	3
3	0.0214	0.0167	0.0176	0.0205	0.0169	0.1394	75.27	6
1&2	0.0624	0.024	0.0451	0.0397	0.0187	0.1852	100	1
1&3	0.0551	0.0182	0.0487	0.049	0.025	0.1644	88.77	4
2&3	0.0509	0.0182	0.0388	0.043	0.0199	0.1577	85.17	5

### 3 结束语

本文将不同构型的单元结构组合来构造混合结构配置的点阵结构, 通过准静态压缩实验, 研究了混合结构配置下点阵结构的压缩行为、吸能性能, 定量综合评估了结构的力学性能和吸能性能, 得到的主要结论如下:

(1) 混合结构配置点阵结构有潜力克服其原组成结构配置的局限, 合理的配置组合可使得混合配置结构在诸如压缩刚度、屈服强度、硬化率、总吸能等性能上实现显著提升。

(2) 相较于单一的结构配置, 合理的混合结构配置能够融合各组成配置的特点, 平衡有利和不利的性能指标, 从而实现更为均衡的综合性能。

(3) 混合排布不同结构配置功能基元的结构设计策略能够一定程度上改善结构的耐损伤性。结构在屈服后的变形更为稳定, 后致软化现象得到明显改善, 平台段的应力变化也更为平稳, 呈现

出更加稳定的能量吸收特性。

### 参考文献

- [1] LU G X, YU T X. Energy Absorption of Structures and Materials[M]. Amsterdam: Elsevier, 2003
- [2] YIN H F, ZHANG W Z, ZHU L C, et al. Review on lattice structures for energy absorption properties[J]. *Composite Structures*, 2023, 304: 116397.
- [3] 张志, 宋波, 王晓波, 等. 吸能的力学超材料设计与增材制造研究现状及趋势[J]. *中国激光*, 2022, 49(14): 1402301.
- [4] 王兆毅, 吕云卓, 陈秉智, 等. 增材制造吸能结构研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2022, 51(6): 2302-2315.
- [5] ZHANG L, FEIH S, DAYNES S, et al. Energy absorption characteristics of metallic triply periodic minimal surface sheet structures under compressive loading[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 23: 505-515.
- [6] ALOMARAH A, MASOOD S H, SBARSKI I, et al. Compressive properties of 3D printed auxetic structures:

- experimental and numerical studies[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2020, 15(1): 1–21.
- [7] OSMAN M M, SHAZLY M, EL-DANAF E A, et al. Compressive behavior of stretched and composite microlattice metamaterial for energy absorption applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 184: 107715.
- [8] YANG C X, LI Q M. Advanced lattice material with high energy absorption based on topology optimisation[J]. *Mechanics of Materials*, 2020, 148: 103536.
- [9] LI D M, QIN R X, XU J X, et al. Topology optimization of thin-walled tubes filled with lattice structures[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 227: 107457.
- [10] HA N S, LU G X. A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 181: 107496.
- [11] SHARMA D, HIREMATH S S. Bio-inspired repeatable lattice structures for energy absorption: Experimental and finite element study[J]. *Composite Structures*, 2022, 283: 115102.
- [12] 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.
- [13] HABIB F N, IOVENITTI P, MASOOD S H, et al. Fabrication of polymeric lattice structures for optimum energy absorption using Multi Jet Fusion technology[J]. *Materials & Design*, 2018, 155: 86–98.
- [14] BAI L, XU Y, CHEN X H, et al. Improved mechanical properties and energy absorption of Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V laser powder bed fusion lattice structures using curving lattice struts[J]. *Materials & Design*, 2021, 211: 110140.
- [15] XIAO Z F, YANG Y Q, XIAO R, et al. Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting[J]. *Materials & Design*, 2018, 143: 27–37.
- [16] 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.
- [17] ZHANG M, ZHAO C, LI G X, et al. Mechanical properties of the composite lattice structure with variable density and multi-configuration[J]. *Composite Structures*, 2023, 304: 116405.
- [18] ALBERDI R, DINGREVILLE R, ROBBINS J, et al. Multi-morphology lattices lead to improved plastic energy absorption[J]. *Materials & Design*, 2020, 194: 108883.
- [19] LIU C, LERTTHANASARN J, PHAM M S. The origin of the boundary strengthening in polycrystal-inspired architected materials[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 4600.
- [20] LI Q M, MAGKIRIADIS I, HARRIGAN J J. Compressive strain at the onset of densification of cellular solids[J]. *Journal of Cellular Plastics*, 2006, 42(5): 371–392.
- [21] CHATTERJEE P, ATHAWALE V M, CHAKRABORTY S. Materials selection using complex proportional assessment and evaluation of mixed data methods[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(2): 851–860.

编辑 葛晋