

自锁式内凹负泊松比结构设计及吸能特性研究

李永祥¹, 孙东洋¹, 吴志兵¹, 安瑛莹¹, 郝清玄², 徐尧尧², 刘旭畅^{2,3}, 杨金水^{2,3}

(1. 广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院, 511434, 广州; 2. 哈尔滨工程大学青岛创新发展基地, 266000, 山东青岛; 3. 哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院, 150001, 哈尔滨)

摘要: 为解决传统负泊松比结构一体化成型导致损坏后需整体替换的问题, 采用离散化思想, 提出了一种新型自锁式负泊松比结构, 通过在内凹六边形两侧以及中间腹部区域设计椭圆形嵌锁区域, 充分保证了结构在压缩过程中能有效互锁。采用 3D 打印工艺制备试样, 通过准静态压缩试验获得单胞和装配试样的力学响应。此外, 通过有限元法进一步分析腹板倾斜角度、壁厚等关键参数对结构力学性能和能量吸收特性的影响规律。研究发现, 相较于单胞样件, 整体装配结构的比吸能提高了 31.5%, 平均压溃力提高了 577.7%。新型自锁式负泊松比结构具有优异的力学性能和能量吸收特性, 增加腹板倾角和壁厚可有效提升结构的比吸能、平均压溃力和负泊松比效应, 但会一定程度降低结构的稳定性。研究成果可为模块化、低成本、高吸能新型结构技术提供理论指导。

关键词: 负泊松比结构; 自锁; 力学性能; 能量吸收

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202603015 **文章编号:** 0253-987X(2026)03-0155-11

Design and Energy Absorption Characteristics of Self-Locking Concave Negative Poisson's Ratio Structure

LI Yongxiang¹, SUN Dongyang¹, WU Zhibing¹, AN Yingying¹, HAO Qingxuan²,
XU Yaoyao², LIU Xuchang^{2,3}, YANG Jinshui^{2,3}

(1. Automotive Engineering Research Institute, Guangzhou Automobile Group Corporation, Guangzhou 511434, China;
2. Qingdao Innovation Development Base, Harbin Engineering University, Qingdao, Shandong 266000, China;
3. College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To address the issue of complete replacement required for conventional negative Poisson's ratio structures damaged due to monolithic fabrication, this study proposes a novel self-locking negative Poisson's ratio structure based on a discrete design approach. Elliptical interlocking regions are designed on both sides and the central web area of the re-entrant hexagon to ensure effective mutual locking during compression. Specimens are fabricated via 3D printing, and the mechanical responses of both unit-cell and assembled specimens are obtained through quasi-static compression tests. Furthermore, the influence of key parameters, such as the inclination angle of the web plates and the wall thickness, on the mechanical performance and energy absorption characteristics of the structure is analyzed numerically using the finite element method. The

results demonstrate that compared to the unit-cell specimen, the assembled structure exhibits a 31.5% improvement in specific energy absorption and a 577.7% increase in average crushing force. The self-locking negative Poisson's ratio structure shows superior mechanical performance and energy absorption capabilities. Increasing the web inclination angle and wall thickness enhances specific energy absorption, average crushing force, and the negative Poisson's ratio effect, but slightly reduces structural stability. The findings of this study provide theoretical guidance for developing modular, low-cost, high-energy-absorption structural technologies.

Keywords: negative Poisson's ratio structure; self-locking; mechanical properties; energy absorption

负泊松比(NPR)结构是一类具有独特机械性能的材料结构,其在拉伸或压缩时,材料的横向变形与纵向变形呈现出膨胀或收缩^[1]。这种结构特殊的几何形态使其具有质量较轻^[2-3]、抗冲击性能强^[4-5]、力学性能稳定^[6-8]等优点,在航空航天、汽车交通、海洋船舶等领域有着非常广泛的应用^[9-11]。近年来开发出了许多新型拉胀蜂窝单元,例如内凹结构^[3,12]、手性结构^[13]、双箭头结构^[14-15]等。在仿生学方面,Alomarah^[16]受蝴蝶几何结构启发,构建了一种新型蝴蝶形负泊松比蜂窝结构模型,计算其在两个坐标轴方向拉伸作用下的等效弹性性能。万武举等^[17]提出了内凹双材料胞元的梯度负泊松比蜂窝结构,研究了各梯度结构的面内斜向冲击载荷作用时的动力学性能。沈佳兴等^[18]设计了一种点阵负泊松比材料的吸能结构,提高了吸能液压支架的吸能特性和支撑特性。

传统 NPR 结构通常采用 3D 打印的方式一体成型,对于使用环境较为复杂的防护结构,其加工制备受限。由此,研究人员提出了一种自锁结构,基于离散的思想,整体结构由单一胞元组装形成,具备优异的快速组装性能、适用性能优良等工程实用价值。Chen 等^[19]首次提出了自锁系统的概念,薄壁金属结构具有哑铃形横截面,这种设计使系统能够通过圆管之间的相互作用实现自锁,表现出卓越的能量吸收能力。在此基础之上,研究人员还在理论^[20]、材料^[21]和形状^[22-24]等方面开展研究,以进一步提高哑铃形管系统的性能。Chen 等^[25]开发了一种波纹管型自锁系统,提高了材料利用率和负载稳定性。Liu 等^[26]提出了管状自锁系统的新型设计策略,并由此开发出了多种配置。赵洋^[27]受折纸折痕的启发,设计了一种双向自锁系统,在传统自锁结构基础之上显著提高了系统的抗斜冲击能力。Zhu 等^[28]受中国古代榫卯技术的启发,设计了一种自锁系统,该系统显示出负泊松比效应,将自锁机制的优势与此类材料的特殊机械性能结合在一起。马芳武

等^[29]基于仿生原理,提出了混合梯度负泊松比结构,通过对具有不同排布方式的混合梯度结构的变形模式进行对比发现,混合梯度结构由于合理的材料分布,兼顾了综合吸能性和吸能稳定性。

目前,现有的自锁吸能结构多由薄壁管单元的几何互锁实现,其突出优势是无外部紧固件的装配与抑制“侧向飞溅”,但并不具备本征的负泊松比协同变形机制。另一方面,出现了将装配思想引入 NPR 蜂窝的尝试。例如,基于榫卯结构的装配式 NPR 蜂窝,虽然实现了模块化组装和拉胀变形的结合,但互锁多发生在胞元边界/节点而非胞元内部,对承载路径重构与逐层致密化调控的能力有限。

本文提出的自锁式内凹负泊松比结构的关键优势在于,通过在内凹单元内部引入椭圆形互锁域(包含腹板中心与上、下板两侧嵌锁区域),互锁行为与负泊松比拉胀协同发生,与传统自锁系统的“非 NPR+外互锁”模式以及榫卯 NPR 蜂窝的“边界互锁”模式有所不同。此外,内嵌互锁在装配后于结构中形成双厚度承载,在提高承载能力的同时还可依靠腹板倾角与壁厚在不改变单元拓扑的前提下实现连续调节平台应力、致密化应变和 NPR 强度。在工程上,单元离散装配且自锁无紧固件,兼具可替换与低成本制造,在保持 NPR 协同变形的同时具有装配优势。

1 实验材料及方法

从传统内凹负泊松比结构出发,本文提出了一种内凹 6 边形自锁式负泊松比结构,该结构兼具自锁结构的离散特性,也具备负泊松比结构的泊松比特性。结构由内凹 6 边形负泊松比结构演化而来,在水平板两侧用椭圆实体变形,在腹板中心交接处按椭圆实体形状变形形成中空区域,两个位置的形状保持一致,如图 1 所示。这一设计能使得当两个单胞在第 3 个胞元的腹板中心椭圆处嵌锁时,两个

胞元的椭圆实体能刚好填满结构中空区域,确保多个胞元嵌锁时各零部件能充分互锁。结构的尺寸示意标注如图 2(a)所示,其中 $\alpha = 60^\circ$ 、 $t = 1.2$ mm、 $a = 2.5$ mm、 $b = 1.2$ mm、 $H = 20.78$ mm、 $L = 50$ mm、 $D = 29$ mm。

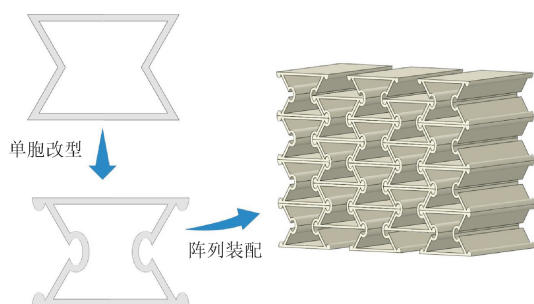


图1 自锁负泊松比结构演化及装配示意

Fig.1 Schematic of self-locking negative Poisson's ratio structure evolution and assembly

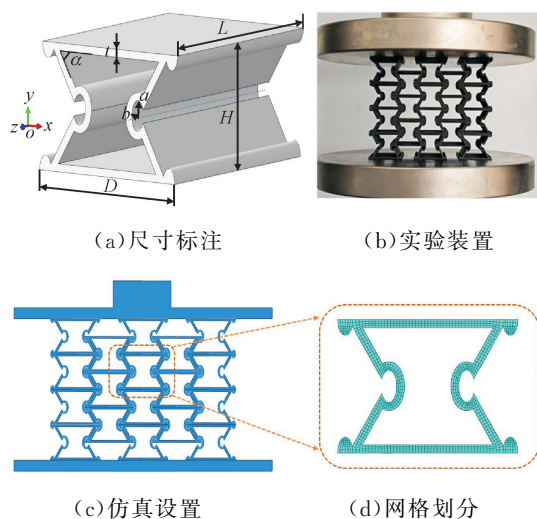


图2 自锁式内凹负泊松比结构设计、实验及仿真装置

Fig.2 Self-locking concave negative Poisson's ratio structure design, experiment and simulation

在研究中,整体结构采用 3×4 单胞阵列装配(3列 $\times$ 4行,共12个基本胞元),并在相邻行与列的交接处增设6个连接胞元以实现自锁;连接胞元数量按 $(n-1) \times (m-1)$ 计算(本文 $n=3$ 、 $m=4$),因此总胞元数为 $12+6=18$ 。

试样采用熔融沉积成型工艺3D打印制备,材料选择惠普PA12,挤出头温度为 $240 \sim 260^\circ\text{C}$,热床温度为 $70 \sim 80^\circ\text{C}$,打印速度为 30 mm/s,打印方向为结构拉伸方向,即图 2(a)中的 z 方向。材料参数为:密度 $\rho = 1.08$ g/cm³,弹性模量 $E_0 = 1\,210$ MPa,

屈服强度 $\sigma_0 = 38.1$ MPa、泊松比 $\nu = 0.3$,断裂能 0.88 mJ/mm³。

为系统表征自锁结构的准静态力学响应,使用万能实验系统(FL5105GD,馥勒仪器科技有限公司(FULETEST))开展实验。通过上下刚性压板进行非约束式夹持,加载方向与结构表面垂直。实验采用位移控制模式,以 2 mm/min 的恒定速率施加轴向压缩载荷,载荷-位移曲线由试验机内置的载荷传感器及位移传感器实时记录,并使用相机记录结构的变形过程,实验装置如图 2(b)所示。

采用 ABAQUS/Explicit 软件进行有限元仿真。将试样放置在两块刚性板之间,如图 2(c)所示,下面的刚性板在各个方向认为是被完全约束的,上面的刚性板只向下移动,其余方向被约束。内锁接触对、试样与压头/压板接触对统一采用面-面接触和有限滑移接触,法向为硬接触(罚函数约束),切向为库仑摩擦接触。Abaqus/Explicit 的广义接触以罚函数约束实施法向约束与硬接触,摩擦系数为 0.3 。试样和刚性板均使用 6 面体单元(C3D8R)进行网格划分,且由于 6 面体单元在厚度方向需要足够的积分点以准确计算应力分量。为提供更合理的积分点分布,试样在厚度方向上至少布置了 3 层网格,如图 2(d)所示。此外,进一步考虑材料的损伤,在模型中定义了韧性损伤,惠普 PA12 的损伤参数参考 Yousefi 等^[30]的研究。

为评估离散误差,比较了 7 种不同网格尺寸 h 下的载荷-位移曲线,结果如图 3 所示。当网格尺寸细化至 $h \leq 1.6$ mm 时,曲线与 $h = 1.0 \sim 1.2$ mm 的结果在 $0 \sim 4$ mm 位移范围内几乎重合,仅最粗网格($h \geq 2.5$ mm)在大位移端出现轻微“偏硬”。据此认为计算解已进入网格渐近收敛区、对网格尺寸不敏

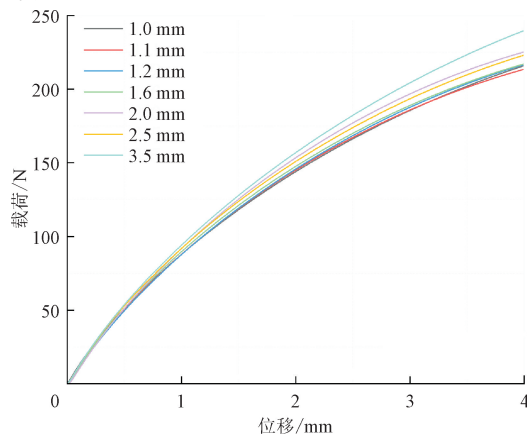


图3 不同网格尺寸下的载荷-位移曲线

Fig.3 Load-displacement curves at different mesh sizes

感(与网格收敛的一般判据一致)。为平衡精度与计算成本,后续计算采用 $h=1.2\text{ mm}$ 作为基准网格。

为了定量分析结构的力学性能和能量吸收能力,采用几个关键指标进行评估,包括总吸收能量(W)、比吸能(E)、平均压溃力(F_m)和能量吸收效率(E_f)。此外,结构的名义应力(σ)和名义应变(ϵ)采用 $\sigma = f(u)/(LD)$ 和 $\epsilon = u/H$ 计算,其中 $f(u)$ 为压缩过程中的结构所载荷, u 为压缩时的位移。

致密化应变(ϵ_d)即为 ϵ_d - E_f 曲线上最后一个峰值所对应的应变。 E_f 和 ϵ_d 由以下公式定义

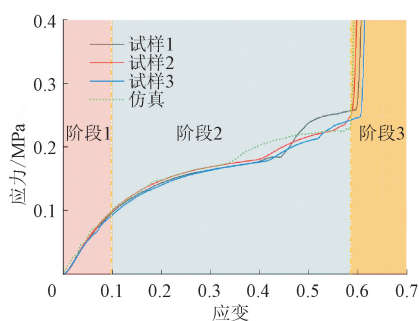
$$E_f = \frac{\int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\sigma(\epsilon)} \quad (1)$$

$$\left. \frac{dE_f}{d\epsilon} \right|_{\epsilon=\epsilon_d} = 0 \quad (2)$$

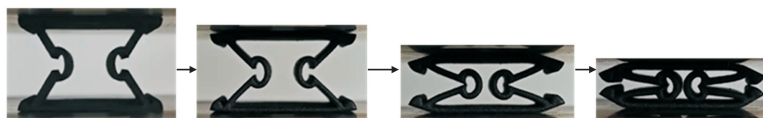
结构的总吸收能量为

$$W = \int_0^{u_d} f(u) du \quad (3)$$

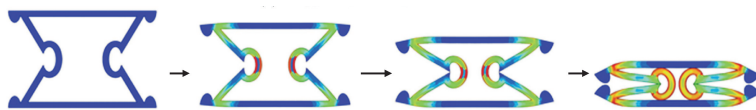
式中: u_d 为结构致密化时产生的位移, $u_d = H\epsilon_d$ 。



(a) 应力-应变曲线



(b) 压缩实验变形过程



(c) 压缩仿真变形过程

图 4 单胞应力应变曲线及压缩变形过程

Fig. 4 Stress-strain curve and compression deformation process of single cell

根据应力-应变曲线,结构的变形可以分为以下 3 个阶段。

阶段 1:弹性阶段。在该阶段,结构主要依赖中部椭圆形腹板的弹性弯曲变形来承载载荷,整体仍处于线性弹性响应范围内。

阶段 2:平台阶段。该阶段由中部椭圆形腹板的屈服主导,并在两侧腹板引导下,结构逐步发生屈服并向内凹陷,表现出明显的负泊松比效应。此外,平板与腹板的交界区域形成塑性铰,使结构的能量吸收能力进一步增强。从应力-应变曲线可见,在应变达到 0.45 时,结构的应力出现显著提升,这归因于椭圆形自锁缺口区域的两个尖点相互接触,导致局部应力集中。

为了避免质量对结构能量吸收的影响,采用比吸能进行评估。该指标为每个试样吸收的总能量除以其质量,得出单位质量吸收的能量,表达式如下

$$E = \frac{W}{M} \quad (4)$$

式中: M 为试样质量。平均压溃力表示为

$$F_m = \frac{W}{u_d} \quad (5)$$

2 结果与讨论

2.1 实验结果

2.1.1 单胞实验结果

首先,开展单胞准静态压缩实验和仿真,实验和仿真得到的变形过程和应力-应变曲线如图 4 所示。从图中可以看出,实验与仿真应力和变形保持良好的一致性,两者可相互验证可靠,仿真的密实位移(图 4 中阶段 3)相较于实验提前。这是由于,实验制备的试样存在一定缺陷,结构在压缩过程中会发生偏转,而仿真模型是一种理想工况。

阶段 3:密实阶段。胞元中心的椭圆形自锁区域与面板接触,载荷迅速增加,结构趋于密实并失去吸能能力。

2.1.2 整体实验结果

通过实验与仿真相结合的方法,本研究获得了整体结构的变形过程及其应力-应变曲线,如图 5 所示。实验数据与仿真结果在应力和变形特征方面均呈现出良好的一致性。通过分析应力-位移曲线,同样可将整体结构的压缩变形过程划分以下 3 个典型阶段。

阶段 1:弹性阶段。在此阶段,结构主要表现为线性弹性变形特征,应力与应变呈近似线性关系,结构未发生明显塑性变形。

阶段2:波动变形阶段。从应力-应变曲线可以观察到,实验和仿真结果均出现显著的应力波动现象。这一现象的产生机制可归因于结构的不均匀变形特征,在整体结构的相互嵌锁区域,结构壁厚可等效为两倍单胞壁厚,而边界区域则保持单倍壁厚。在压缩载荷作用下,与压缩夹具直接接触的上、下表面胞元由于壁厚较薄、承载能力较弱,率先发生屈服(如图5红色区域所示)。随着压缩位移的持续增

加,中心区域两侧的单倍壁厚结构依次进入屈服状态(如图5橙色区域所示)。该阶段的应力峰值呈现递增趋势,也体现出结构具有逐层渐进变形的特征。此外,在受压过程中,结构出现了局部的损伤,也导致应力曲线出现波动。

阶段3:密实阶段。该阶段结构达到完全密实状态,内部孔隙被完全压缩,结构失去继续吸收能量的能力。

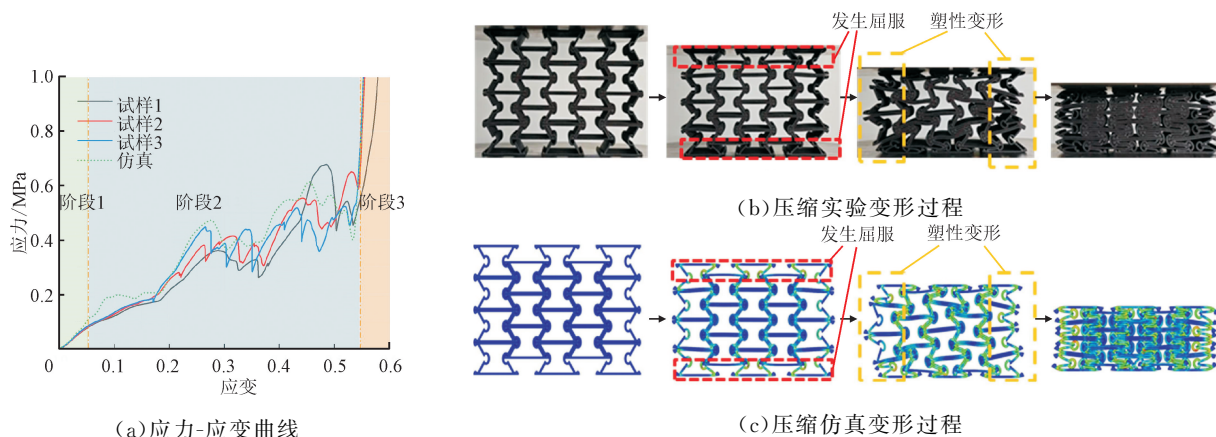


图5 整体应力应变曲线及压缩变形过程

Fig. 5 Stress-strain curve and compression deformation process of whole entity

2.1.3 单胞及整体实验结果对比

图6和表1分别展示了单胞结构和整体结构的比吸能曲线及关键力学性能指标,其中 $\bar{E}$ 为比吸能均值, $\bar{F}_m$ 为平均压溃力均值。通过对比分析可以发现,整体结构在比吸能 E 和平均压溃力 F_m 两个关键指标上均显著优于单胞结构。这种性能提升主要源于以下机制:在整体结构压缩过程中,胞元间的相互嵌锁作用形成了有效的支撑体系,使结构

能够更均匀地分布载荷。同时,这种相互作用促进了更多区域参与塑性变形,从而提高了能量吸收效率。根据表1可以看出,整体装配结构相对单胞结构的比吸能 E 提升了31.5%,平均压溃力 F_m 提升了577.7%。此外,从图5的变形过程可以观察到,整体结构在整个压缩过程中保持了良好的结构完整性,未出现胞元脱落现象,这充分证明了结构自锁效应的有效性。

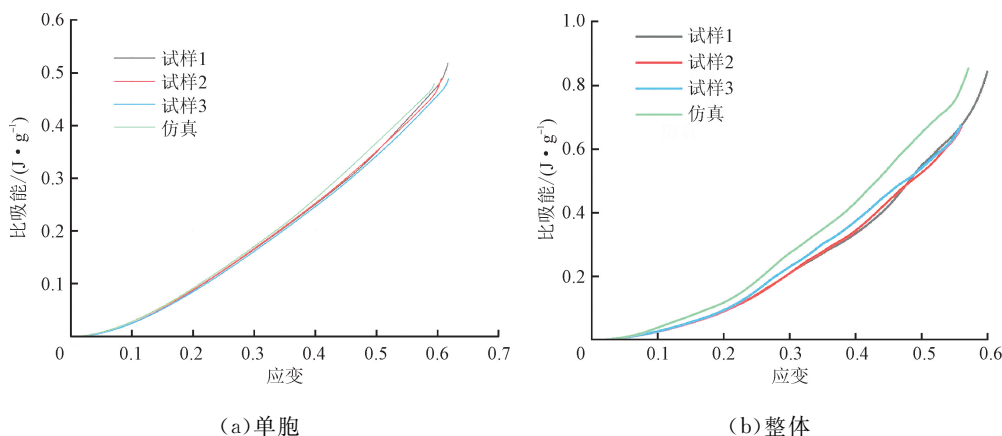


图6 单胞及整体负泊松比自锁结构比吸能曲线

Fig. 6 SEA curves for single-cell and whole entity self-locking concave negative Poisson's ratio structure

表 1 单胞及整体负泊松比自锁结构关键指标统计

Table 1 Key statistics of single-cell and whole entity self-locking concave negative Poisson's ratio structure

试样	M/g	ε_d	$E/(J \cdot g^{-1})$	$\bar{E}/(J \cdot g^{-1})$	F_m/kN	$\bar{F}_m/kN$
单胞 1	5.78	0.595	0.468	0.463	0.229	0.229
单胞 2	5.87	0.603	0.477	0.463	0.234	0.229
单胞 3	5.91	0.587	0.443	0.463	0.225	0.229
单胞 FE	5.82	0.582	0.456	0.456	0.230	0.230
整体 1	108.52	0.535	0.618	0.609	1.580	1.552
整体 2	109.08	0.543	0.616	0.609	1.559	1.552
整体 3	107.07	0.528	0.594	0.609	1.518	1.552
整体 FE	108.05	0.534	0.705	0.705	1.798	1.789

2.2 参数化分析

2.2.1 腹板倾角的影响

为了研究腹板倾角对变形模式、吸能性和泊松比的影响,分别设置倾角 α 为 55° 、 60° 、 65° ,其余参数及仿真设置与前文保持一致。

3 种工况的单胞变形云图以及应力-应变曲线如图 7 和图 8(a)所示。从图 8(a)可见,腹板倾角对结构初始的弹性段影响较小,3 种倾角工况的弹性阶段模量一致。在进入平台段后,倾角越小,结构的承载能力越好,虽然 3 种工况中心椭圆腹板形状一致,但是倾角的不同、斜腹板与平板的夹角不同导致塑性铰的形成有差异,进而影响结构力学性能。倾角为 65° 的工况下,在应变为 0.4 时,载荷迅速降低,这是由于倾角过大,在压缩过程中两侧的椭圆形腹板向内收缩时相互接触导致其断裂。由于材料的损伤演化,在 0.43~0.63 应变区间,曲线数值出现剧烈的波动。此外,从图 8(b)可以观察到, 65° 倾角整体结构在应变为 0.14 前的应力接近 0。这是因为,腹板倾角增大,倾斜腹板的横向刚度降低,在初始压缩时轴向承载能力减弱,薄壁区域(尤其是边界单胞)因承载能力弱,提前发生弹性屈曲而非渐进屈

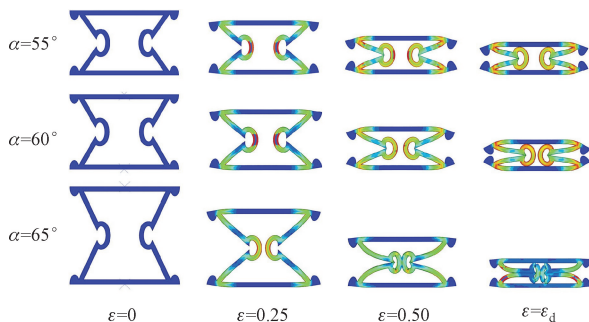


图 7 倾角对单胞变形的影响

Fig. 7 Effect of inclination angles on the deformation of single cells

服,结构瞬间失去轴向承载能力,表现为载荷骤降。此外,当倾角增加至 65° 时,整体结构的变形模式更加复杂,局部接触面发生不均匀接触,造成了接触不稳定与微小滑移,从而在应力-应变曲线中表现出较大波动。

3 种工况的整体的应力-应变曲线如图 8(b)所示。当倾角为 65° 时,整体结构的波动较单胞结构要明显的多。这是由于,整体结构在压缩时,受边界条件的影响更大,部分胞元提前破坏,且结构在 $\varepsilon = 0.42$ 时,较多的胞元壁面出现断裂,结构承载能力快速降低,以致失去承载能力。

随腹板倾角增大及自锁接触的早期介入,整体结构在平台段出现更强的载荷起伏并伴随致密化应变略有提前。其根本原因在于:在变形模式方面,内凹蜂窝的拉胀主要由胞壁弯曲-旋转主导,倾角增大使旋转自由度增强、等效弯曲刚度降低,因而更易触发几何非线性并将变形导向非均匀模式。在屈曲特征方面,引入自锁的局部接触约束使压缩过程中在对角方向形成并发展成压溃带/屈曲带,蜂窝在面内受压时常见的带状局部化与锯齿平台正源于此,一旦带前沿跨越相邻胞元,整体刚度出现阶段性软化并体现为曲线波动与稳定性下降。

如图 8(c)、8(d)所示,从吸能效果来看,倾角增加会使得单胞结构和整体结构的比吸能增大,这是由于倾角增大后,结构的有效变形行程增大,做功距离增加。但是,倾角增大后,结构的质量也会随之增大,在有效行程内的结构平均压溃力反而更低。倾角增大同时增加了结构屈曲失效的风险,在数值上的表现为结构的应力曲线波动更为剧烈,在工程实际应用上可能会给结构带来二次损伤,因此需充分考虑比吸能和平均压溃力的优先级。

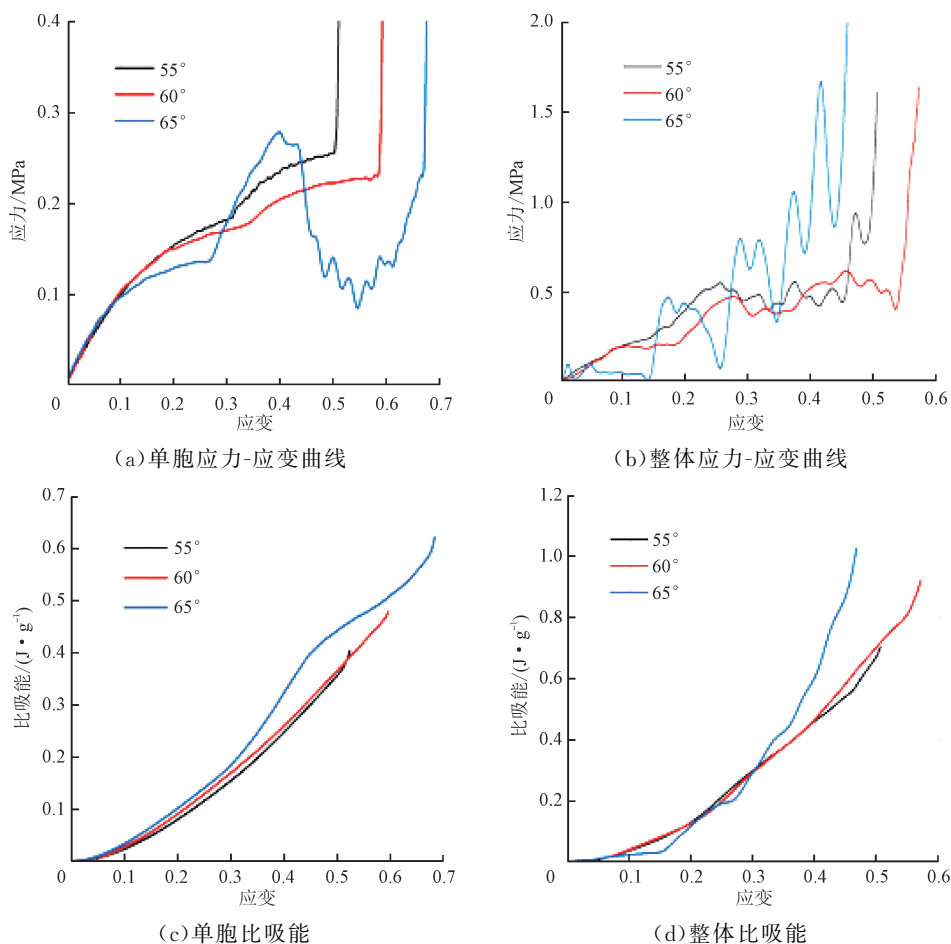


图8 不同倾角下的结构应力-应变及比吸能曲线

Fig. 8 Stress-strain and SEA curves of single cell and assembled structure at different inclination angles

由于本研究的对象为自锁负泊松比结构,因此研究结构在变形过程中的泊松比变化是十分有必要的。通过提取参考点的横向以及纵向的位移变化量,根据应变的关系即可获得结构的泊松比 ν ,单胞结构和整体结构的参考点1、2、3、4位置如图9所示。以单胞结构为例,其泊松比计算公式为

$$\nu = \frac{0.5((\epsilon_{1x} - \epsilon_{3x}) + (\epsilon_{2x} - \epsilon_{4x}))}{0.5((\epsilon_{1y} - \epsilon_{2y}) + (\epsilon_{3y} - \epsilon_{4y}))} \quad (6)$$

式中: ϵ 为应变,下标1、2、3、4为参考点,下标 x 、 y 为应变方向。

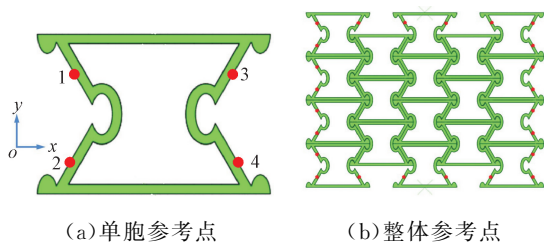
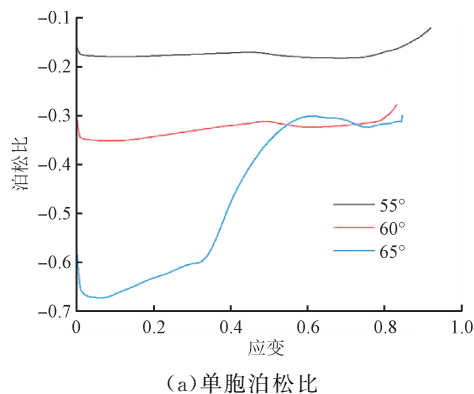


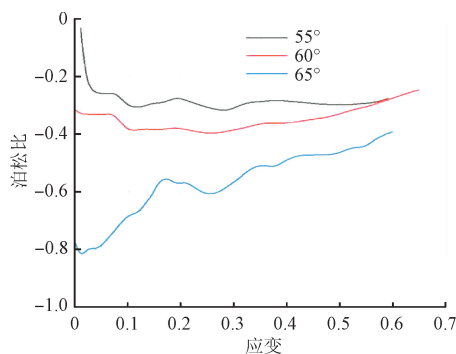
图9 提取位移变化量参考点位置分布

Fig. 9 Distribution of the position of the reference point for extracting the amount of displacement change

通过计算,得到单胞和整体装配结构负泊松比曲线如图10所示。当单元角由60°增加至65°,单胞的最小泊松比 $|\nu_{\min}|$ 与应变在 $[0.05, 0.20]$ 区间的平均泊松比 $|\bar{\nu}_{[0.05, 0.20]}|$ 分别提升91.15%与88.03%;整体装配结构 $|\nu_{\min}|$ 与 $|\bar{\nu}_{[0.05, 0.20]}|$ 的提升为104.82%与77.92%。与之相对,单元角减小到55°时,单胞的两项指标分别下降47.98%、48.62%,整体装配结构分别下降19.95%、22.69%。这说明,单元角增大(更内凹)可以显著增强负泊松比特性,从而增加结构的吸能效果。



(a) 单胞泊松比



(b) 整体泊松比

图 10 不同倾角下的结构泊松比

Fig. 10 Poisson's ratio for structures with different inclination angles

2.2.2 壁厚的影响

为了研究壁厚 t 对结构变形模式、吸能特性以及泊松比的影响机制及规律,本文设置了 1.1、1.2 和 1.3 mm 3 种壁厚进行对比分析,其余几何参数和仿真设置均与前文保持一致。

图 11 和图 12(a)展示了 3 种壁厚下单胞结构的变形过程及对应的应力-应变曲线。从图 12(a)可以发现,壁厚对单胞结构的力学性能具有显著影响。随着壁厚从 1.1 mm 增加至 1.3 mm,单胞结构的承载能力呈现明显的提升趋势,但与此同时,其密实应变却有所降低。值得注意的是,所有壁厚工况下的变形过程均呈现出典型的 3 个阶段特征:弹性阶段、平台阶段和密实阶段。其中,平台阶段出现的应力波动主要源于上下椭圆形腹板尖点接触所导致的局部应力集中效应。此外,图 12(b)中整体结构的应力-应变曲线波动较大,不同壁厚改变胞壁弯曲刚度,使临界屈曲发生变化,产生阶段性“软化-再承载”,从而在平台阶段形成明显波动。临近致密化时,有效接触面积迅速增加,叠加制造缺陷在节点和转角处诱发的微裂纹与损伤累积,进一步放大应力起伏。

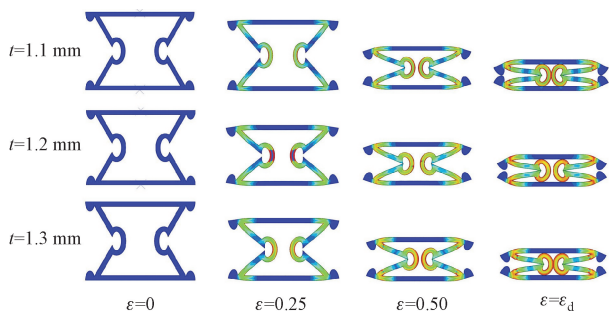
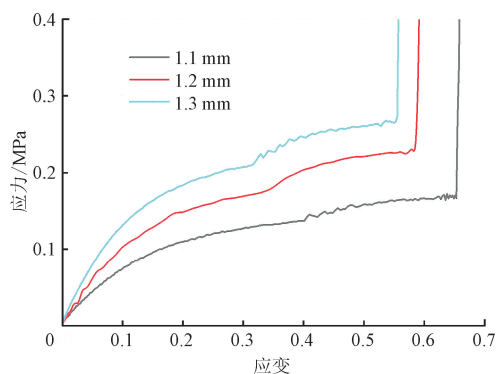
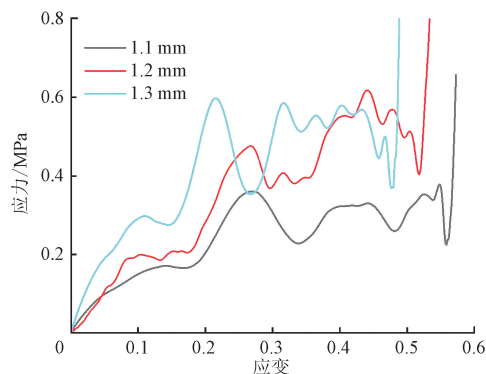


图 11 壁厚对单胞变形的影响

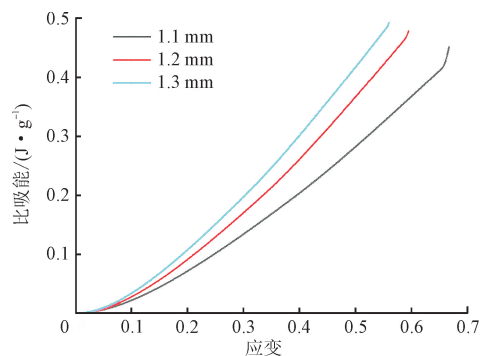
Fig. 11 Effect of wall thickness on deformation of single cells



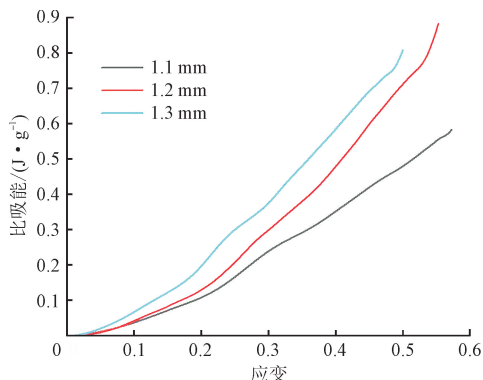
(a) 单胞应力-应变曲线



(b) 整体应力-应变曲线



(c) 单胞比吸能



(d) 整体比吸能

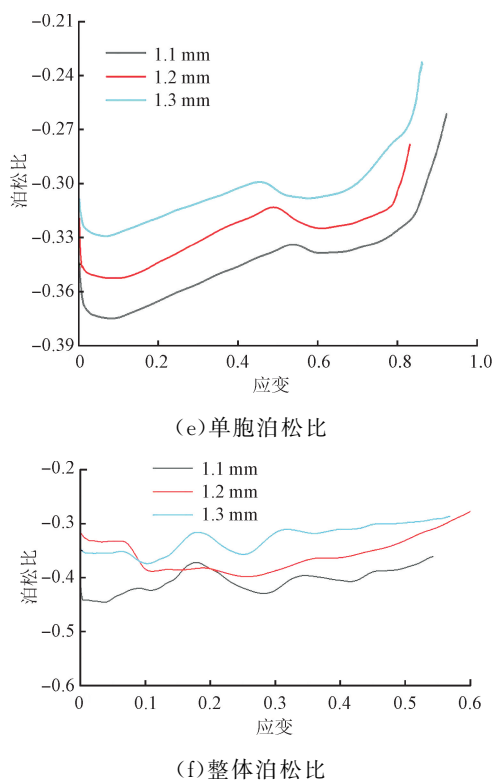


图 12 不同壁厚结构的应力-应变、比吸能、负泊松比曲线
Fig. 12 Stress-strain, specific energy absorption, and negative Poisson's ratio curves for different wall thickness structures

图 12(b)展示了 3 种壁厚下整体结构的应力-应变曲线。与单胞结构类似,整体结构的应力水平也随壁厚增加而显著提高,而密实应变则呈现下降趋势。特别地,在 1.3 mm 壁厚工况下,应力曲线表现出较为剧烈的波动特征,这主要是由于壁厚增加导致壁面更容易发生断裂破坏,此外壁厚也影响了结构的可变形空间。同样地,从图 12(c)~12(f)也可以看出,壁厚的增加,单胞结构和整体结构的比吸能均呈现显著提升趋势,但负泊松比特性减弱。

通过计算,根据图 12(a)与图 12(b),以 $t=1.2$ mm 为基准,当壁厚减薄至 1.1 mm 时,单胞的 $|\nu_{\min}|$ 与 $|\bar{\nu}_{[0.05,0.20]}|$ 分别提升 6.32%、6.12%;在整体装配结构中,两项指标的提升分别为 11.90%与 10.45%。相反,当壁厚增加至 1.3 mm 时候,单胞的 $|\nu_{\min}|$ 与 $|\bar{\nu}_{[0.05,0.20]}|$ 分别下降 6.67%、7.18%;整体装配结构的两项指标分别下降 6.10%、5.27%。这表明,减薄壁厚使腹板弯曲刚度降低,发生变形时转动更充分,负泊松比效应增强。

3 结 论

本文设计并制备出了一种新型自锁式内凹负泊

松比结构,通过实验结合数值分析的方法,研究了结构的准静态压缩力学响应和吸能特性,开展了腹板倾角、壁厚等关键参数优化分析,得到结论如下。

(1)整体结构在装配完成后,由于胞元之间的相互作用增强,结构的变形更加充分,使得整体装配结构相对单胞结构的比吸能 E 提升 31.5%,平均压溃力 F_m 提升 577.7%。

(2)整体结构的应力曲线存在波动段,呈现出逐层变形的特点。这是由于受边界条件影响,四周未与连接其他胞元的壁面壁厚为单一胞元壁厚,而内部区域壁厚为双倍胞元壁厚,内部区域承载能力较强,外部承载能力较差。因此,在压缩加载过程中,与刚性板接触的胞元率先屈服,随着位移增加,两侧胞元屈服。

(3)增加腹板倾角会增大结构的比吸能和负泊松比特性。这是由于,结构变形的有效行程增加,但增大倾角会降低结构的承载能力,且在变形时椭圆形互锁区域会相互接触产生破坏,导致应变曲线剧烈波动;增加壁厚会提高结构的比吸能和承载能力,但负泊松比特性和密实应变会有所降低。

本研究提出的内凹 6 边形自锁负泊松比结构同时兼具负泊松比结构的变形和自锁结构的离散性能,具备良好的吸能效果和装配性能。在工程应用中可实现对被防护物的全方位防护和损伤后替换的效果,具备广泛的应用前景和较高的应用价值。

此外,后续工作将考虑基于单胞力学表征(如力-位移关系、能量-应变关系以及局部屈曲/接触阈值),建立从单胞到整体的预测模型,明确腹板倾角、壁厚等参数与结构级比吸能、平均压溃力、致密化应变的定量关系,并给出用于快速设计优化和尺寸外推的简化公式或代理模型。该模型将通过有限元与实验联合验证,力求将关键指标的预测误差控制在工程可接受范围内。

参考文献:

- [1] CUI Jipeng, ZHANG Liangchi, GAIN A K. A novel auxetic unit cell for 3D metamaterials of designated negative Poisson's ratio [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 260: 108614.
- [2] TABACU S, NEGREA R F, NEGREA D. Experimental, numerical and analytical investigation of 2D tetra-anti-chiral structure under compressive loads [J]. Thin-Walled Structures, 2020, 155: 106929.
- [3] HE Pan, WANG Siwen, ZHANG Miaomiao, et al. Compression performance of 3D-printed thermoplastic

- auxetic structures [J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 197: 111558.
- [4] GÄRTNER T, VAN DEN BOOM S J, WEERHEIJM J, et al. Geometric effects on impact mitigation in architected auxetic metamaterials [J]. *Mechanics of Materials*, 2024, 191: 104952.
- [5] 陶晓晓, 孙晓旺, 石文, 等. 设计参数对负泊松比结构抗爆性能的影响研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(4): 74-79.
- TAO Xiaoxiao, SUN Xiaowang, SHI Wen, et al. Influence of design parameters on anti-explosion performance of honeycomb sandwich structure with negative Poisson's ratio [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(4): 74-79.
- [6] WANG Tao, AN Junhan, HE Huan, et al. A novel 3D impact energy absorption structure with negative Poisson's ratio and its application in aircraft crashworthiness [J]. *Composite Structures*, 2021, 262: 113663.
- [7] ZOU Zhen, XU Fengxiang, NIU Xiaoqiang, et al. In-plane crashing behavior and energy absorption of re-entrant honeycomb reinforced by arched ribs [J]. *Composite Structures*, 2023, 325: 117615.
- [8] 尤泽华, 肖俊华, 王美芬. 弧边内凹蜂窝负泊松比结构的力学性能 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39(7): 3570-3580.
- YOU Zehua, XIAO Junhua, WANG Meifen. Mechanical properties of arc concave honeycomb structure with negative Poisson's ratio [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(7): 3570-3580.
- [9] 庄晟逸, 李成伟, 向文超, 等. 负泊松比结构的改进设计及其在航空航天中的应用 [J]. *化工学报*, 2024, 75(11): 3951-3972.
- ZHUANG Shengyi, LI Chengwei, XIANG Wenchao, et al. Improved designs of negative Poisson's ratio structure and their applications in aerospace engineering [J]. *CIESC Journal*, 2024, 75(11): 3951-3972.
- [10] 高元明, 胡超佚, 王趁心, 等. 负泊松比镁合金气管支架的生物力学研究 [J]. *医用生物力学*, 2021, 36(S1): 104.
- GAO Yuanming, HU Chaoyi, WANG Chenxin, et al. Biomechanical study of negative Poisson's ratio magnesium alloy tracheal stent [J]. *Journal of Medical Biomechanics*, 2021, 36(S1): 104.
- [11] PAN Yi, ZHOU Yang, GAO Qiang, et al. A novel 3D polygonal double-negative mechanical metamaterial with negative stiffness and negative Poisson's ratio [J]. *Composite Structures*, 2024, 331: 117878.
- [12] 陆欢, 王小鹏, 陈天宁. 具有3D负泊松比结构填充的新型吸能盒设计与耐撞性研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2024, 58(10): 188-198.
- LU Huan, WANG Xiaopeng, CHEN Tianning. Design and crashworthiness of novel energy-absorbing box filled with the 3D negative Poisson's ratio structure [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(10): 188-198.
- [13] 石南南, 张伟晨, 李振宝, 等. 泡沫填充四韧带反手性结构和内凹结构的面内压缩性能 [J]. *复合材料学报*, 2024, 41(6): 2935-2946.
- SHI Nannan, ZHANG Weichen, LI Zhenbao, et al. In-plane compression properties of foam-filled anti-tetrachiral structure and re-entrant structure [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(6): 2935-2946.
- [14] LI Mingxuan, LU Xiaofeng, ZHU Xiaolei, et al. Research on in-plane quasi-static mechanical properties of gradient tetra-chiral hyper-structures [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2019, 21(3): 1801038.
- [15] YIN Liang, ZHANG Mengchen, ZHU Yazhi, et al. Quasi-static cyclic tension-compression behavior of circular anti-chiral auxetic metamaterials [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 450: 138519.
- [16] ALOMARAH A, YUAN Ye, RUAN Dong. A bio-inspired auxetic metamaterial with two plateau regimes: compressive properties and energy absorption [J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 192: 111175.
- [17] 万武举, 肖俊华, 郭之熙. 梯度双材料负泊松比蜂窝结构的面内倾斜冲击失效与吸能研究 [J]. *固体力学学报*, 2025, 46(1): 93-104.
- WAN Wuju, XIAO Junhua, GUO Zhixi. In-Plane oblique loading impact failure and energy absorption of gradient bimaterial honeycomb structures with negative Poisson's ratios [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2025, 46(1): 93-104.
- [18] 沈佳兴, 董建秀, 范中海, 等. 防冲吸能液压支架点阵负泊松比吸能结构设计及优化 [J]. *中国机械工程*, 2025, 36(3): 515-524.
- SHEN Jiaxing, DONG Jianxiu, FAN Zhonghai, et al. Design and optimization of negative Poisson's ratio energy absorption structures for anti-shock and absorption hydraulic support lattices [J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(3): 515-524.
- [19] CHEN Yuli, QIAO Chuan, QIU Xinming, et al. A novel self-locked energy absorbing system [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2016, 87: 130-149.
- [20] QIAO Chuan, CHEN Yuli, WANG Shengtao, et al. Theoretical analysis on the collapse of dumbbell-shaped tubes [J]. *International Journal of Mechanical Sci-*

- ences, 2017, 123: 20-33.
- [21] YANG Kuijian, CHEN Yuli, LIU Shoubin, et al. Internally nested self-locked tube system for energy absorption [J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 119: 371-384.
- [22] YANG Kuijian, CHEN Yuli, ZHANG Lei, et al. Shape and geometry design for self-locked energy absorption systems [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 156: 312-328.
- [23] PAN Jinxin, ZHU Weiyu, YANG Kuijian, et al. Energy absorption of discretely assembled composite self-locked systems [J]. *Composite Structures*, 2022, 292: 115686.
- [24] ZHANG Hui, ZHANG Xiong. Axial crushing of self-lock multi-cell tubes with foam filler and tube envelope [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 155: 106847.
- [25] CHEN Zongbing, WU Qianqian, YANG Haotian, et al. A periodic dissipative system with self-locking capacity [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 166: 104233.
- [26] LIU Yizhe, XIONG Feng, YANG Kuijian, et al. A novel omnidirectional self-locked energy absorption system inspired by windmill [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2020, 87(8): 085001.
- [27] 赵洋. 双向自锁薄壁管状结构和系统静态力学性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [28] ZHU Yilin, GAO Defeng, SHAO Yongbo, et al. A novel prefabricated auxetic honeycomb meta-structure based on mortise and tenon principle [J]. *Composite Structures*, 2024, 329: 117782.
- [29] 马芳武, 王强, 马文婷, 等. 混合梯度负泊松比结构多工况耐撞性研究 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(7): 85-97.
- MA Fangwu, WANG Qiang, MA Wenting, et al. Study on crashworthiness of hybrid gradient negative Poisson's ratio structure under multi-conditions [J]. *Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2022, 50(7): 85-97.
- [30] YOUSEFI A, JOLAIY S, LALEGANI DEZAKI M, et al. 3D-printed soft and hard meta-structures with supreme energy absorption and dissipation capacities in cyclic loading conditions [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2023, 25(4): 2201189.
- (编辑 杜秀杰)