

引用格式: 余金桂, 朱瑶, 章桥新. 激光熔融八边形双棱锥与 Kelvin 混合点阵结构的力学性能及变形机理[J]. 航空材料学报, 2026, 46(4): 73-83.

YU Jingui, ZHU Yao, ZHANG Qiaoxin. Mechanical properties and deformation mechanism of laser melting octagonal double pyramid and Kelvin hybrid lattice structure[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(4): 73-83.

激光熔融八边形双棱锥与 Kelvin 混合点阵结构的力学性能及变形机理

余金桂*, 朱瑶, 章桥新

(武汉理工大学 机电工程学院, 武汉 430070)

摘要: 点阵结构因其优异的力学性能, 在航天器轻量化结构和缓冲吸能装置上展现出广阔的应用前景。本工作提出基于八边形双棱锥结构和 Kelvin 结构的混合结构 1, 并通过拉伸处理得到长宽高比为 2:2:3 的混合结构 2, 采用选区激光熔融制备对应的点阵结构。通过实验和仿真系统地研究混合结构的力学性能、吸能特性及变形机理。结果表明: 混合结构的力学性能和吸能性能均得到显著增强; 当相对密度相同时, 混合结构 1 的吸能效率提升 15.7%, 混合结构 2 的比强度和比吸能分别提升 93% 和 92%。在变形机制方面, 混合结构 1 均匀坍塌, 呈现出以弯曲为主导的变形机制; 混合结构 2 则是全程自下而上逐层坍塌。为了进一步改善混合结构变形机制和提高力学性能, 对混合结构的几何参数进行优化, 发现改变内外杆件直径比例 λ 可以实现对混合结构的调整优化。 $\lambda=0.75$ 时, 混合结构 1 的综合性能最优, 其比强度和比吸能分别提高 21% 和 10%。

关键词: 选区激光熔融; 混合点阵; 力学性能; 能量吸收; 几何参数优化

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2024.000187

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2024.000187

中图分类号: V252

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2026)04-0073-11

Mechanical properties and deformation mechanism of laser melting octagonal double pyramid and Kelvin hybrid lattice structure

YU Jingui*, ZHU Yao, ZHANG Qiaoxin

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Due to their excellent mechanical properties, dot matrix structures show a broad application prospect for spacecraft lightweight structures and cushioning energy absorbing devices. In this paper, two hybrid structures based on octagonal bipyramidal structure and Kelvin structure are proposed, and the corresponding dot matrix structures are prepared by selected laser melting. The mechanical properties, energy-absorption characteristics and deformation mechanisms of the hybrid structures are systematically investigated through experiments and simulation. It shows that the mechanical and energy-absorbing properties of the hybrid structures are significantly enhanced; when the relative density is the same, the energy-absorbing efficiency of the hybrid structure 1 is increased by 15.7%, and the specific strength and specific energy-absorption of the hybrid structure 2 are increased by 93% and 92%, respectively. In terms of the deformation mechanism, the hybrid structure 1 uniformly collapses, which shows a bending-dominant deformation mechanism; while the hybrid structure 2 collapses layer by layer throughout the whole process from bottom to top. In order to further improve the deformation mechanism and enhance the mechanical properties of the hybrid structure, the geometric parameters of the hybrid structures are investigated. It is found that adjusting the ratio of inner and outer rod diameters can realize optimization of the hybrid structure. When $\lambda = 0.75$, comprehensive performance of hybrid structure 1 is best, with its specific strength and specific energy absorption increasing by 21% and 10% respectively.

Key words: selected laser melting; hybrid lattice; mechanical property; energy absorption; geometric parameter optimization

点阵结构具有相对密度低、比刚度和比强度高的特点,广泛用于航空航天、交通运输和生物医学等领域^[1-3]。选区激光熔融(selected laser melting, SLM)^[4]由于能制备随机、复杂和均匀的点阵结构,被广泛用于制备 316L 不锈钢、AlSi10Mg 等材料的点阵结构。Qiu 等^[5]研究 SLM 激光功率和扫描速度对 AlSi10Mg 点阵结构支柱尺寸和孔隙率的影响,通过优化 SLM 工艺参数可以制备出高精度和高致密度的点阵结构。Zhang 等^[6]利用 SLM 制备具有均匀和渐变片厚的 Gyroid 点阵结构,CT 检测发现其缺陷率低,制造精度高。

现有的点阵结构在压缩作用下存在高比强度与应力稳定性之间的矛盾^[7]。为了获得具有高比强度和稳定平台应力的点阵结构,Osman 等^[8]将八元桁架结构(OTL)进行拉伸,得到一种单元格尺寸为 1:1:2 的拉伸单元点阵(SCL)。SCL 在准静态压缩实验下具有不稳定的扭转变形模式,其屈服强度提高约 80%,比吸能提高 26%。Zhao 等^[9]使用极小曲面公式生成 TPMS-BCC 结构,其弹性模量、屈服强度和抗压强度的提高范围分别在 18.9%~42.2%、19.2%~29.5% 和 2%~36.6%。除了结构改良外,优化几何结构参数也可提高点阵结构的力学强度和吸能性能^[10]。Tancogne-dejean^[11]采用锥形梁代替均匀圆形截面的标准梁,降低 BCC 杆的弹性各向异性;梁截面的逐渐变细带来更高的力学性能,弹性模量提升了 70%,比吸能提升了 45%。Liu 等^[12]研究 BCC 的直径大小对弹性响应和比能吸收的影响,探讨剪切带的形成机制。压缩实验发现加粗杆件中心和修剪节点附近部位可以缓解杆件内拉应力,抑制剪切带的形成。Bai 等^[13]设计 SG 功能梯度点阵结构,发现 SG 结构连接稳定,比强度和比刚度均优于均匀点阵结构,比吸能提升了 36%。

组合设计策略为点阵结构设计引入了新的思路^[14],通过将不同结构进行组合来优化力学性能。Sun 等^[14]对八元桁架结构进行组合设计,混合结构在刚度和强度与原结构相当的情况下,具有更加稳定的平台应力。Wang 等^[15]在 FCC 点阵中心加入十字杆,得到 MFCC 结构,准静态压缩实验结果表明,相比于 FCC, MFCC 具有更大的平台应力和更好的吸能性能,且有效地避免了屈曲变形模式。Andrew 等^[16]测试基本(SC、BCC 和 FCC)和混合

(SC-BCC、SC-FCC 和 SC-BCC-FCC)构型的三维板点阵的低速冲击响应特性。混合点阵由于存在大量的开、闭子室,能够衰减传递到结构上的峰值冲击应力,延长载荷脉冲的持续时间。SC-BCC-FCC 混合板点阵的韧性提高了 70%,其比吸能高于常规铝点阵和其他超材料。然而混合结构在压缩过程中能量吸收机理和变形机制转换机理尚不明确,深入探讨变形机制转换机理,有助于分析基本结构对混合结构的影响,为优化混合结构的几何参数和提升力学性能提供指导。

本工作提出两种基于八边形双棱锥结构和 Kelvin 结构^[17]的混合结构,开展正交实验确定 SLM 成形 316L 不锈钢的最优参数,并制备点阵结构,研究准静态压缩实验下点阵结构的力学性能及吸能特性,揭示其微观变形机理。通过有限元软件模拟准静态压缩过程,对比点阵结构压缩过程的变形特点,揭示内外部杆件协同作用实现高强度和稳定平台应力的机理。进一步通过调控拉伸主导结构杆件和弯曲主导结构杆件的杆径比例,实现最优力学性能,并通过压缩实验进行验证分析。

1 实验材料与方法

1.1 八边形双棱锥与 Kelvin 混合点阵结构设计

八边形双棱锥(octagonal bipyramid, OB)结构是一种横向各向同性结构(图 1(a)),其力学性能在 x 和 y 方向上相似,而在 z 方向上不同,每个单元格有 16 个等腰三角形面,10 个顶点和 24 个支柱。在正多边形双棱锥点阵结构中,其力学性能最优^[18]。该结构的杆件主要受轴向的拉伸和压缩作用,具有优越的比刚度和比强度,但屈服后会产生明显的应力波动^[19]。Kelvin 结构的杆件以弯曲为主,具有稳定且持久的屈服后平台应力,但其比强度较低。为了获得具有高比强度和稳定平台应力的点阵结构,本工作将 OB 结构和 Kelvin 结构组合,得到一种新的混合结构,称为混合结构 1(hybrid structure 1, HS1),如图 1(b)所示。在该结构中,八边形双棱锥结构被 Kelvin 结构包裹,中心面的八个顶点依次重合。八边形的外切圆直径为 4 mm,单胞高度为 4 mm。增加的杆件使 HS1 比 OB 结构更加复杂,相对密度更高。为了降低相对密度,对 HS1 沿 Z 轴方向进行拉伸处理,得到长宽

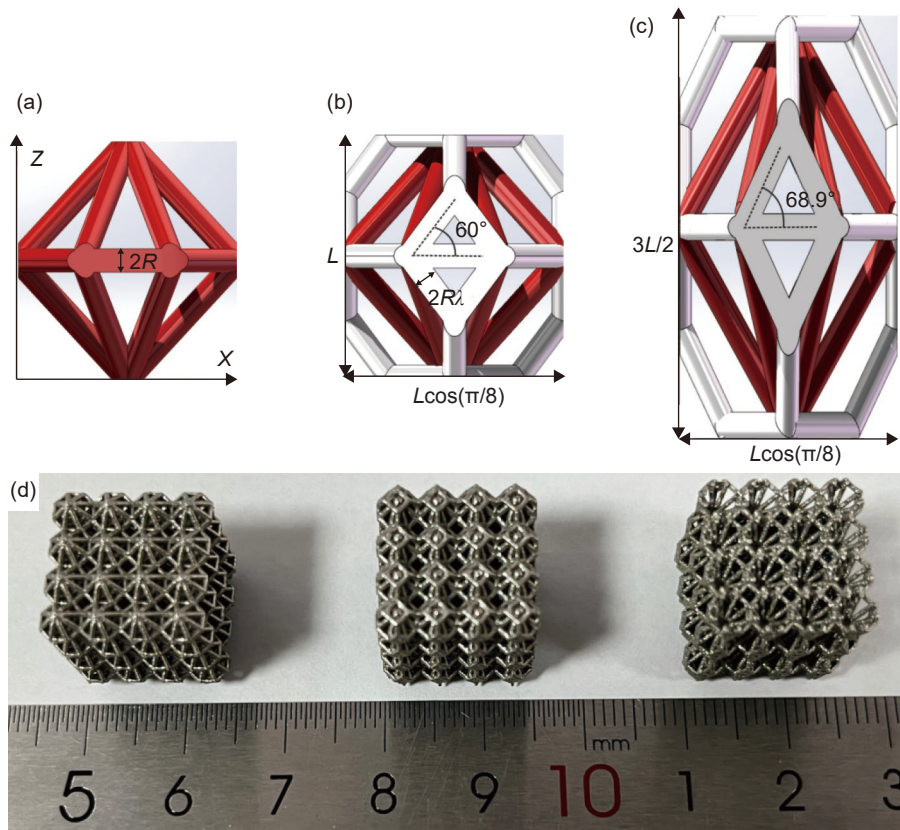


图1 样品结构示意图与实物 (a)OB; (b)HS1; (c)HS2; (d)SLM 制备的点阵结构样品
Fig. 1 Schematic diagram and physical object of sample structure (a) OB; (b) HS1; (c) HS2;
(d) lattice structure samples fabricated by SLM

高比例为 2:2:3 的新单胞, 称为混合结构 2 (hybrid structure 2, HS2), 结构如图 1(c) 所示, 单胞的尺寸为 4 mm×4 mm×6 mm。三种点阵结构实物见图 1(d)。

为了提高制造的精确性, 通过理论计算分析得出杆件半径与相对密度之间的关系(式(1))。单胞的相对密度 $\bar{\rho}$ 是单胞的宏观密度 ρ_l 与基体材料密度 ρ_s 之比, 与单胞的体积与单元格体积之比等效^[20]。

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_l}{\rho_s} \quad (1)$$

利用近似解析关系, 杆件半径为 R , 单元格长度为 L 的 OB 的相对密度为:

$$\bar{\rho}_{OB} = \left[6 \sin\left(\frac{\pi}{8}\right) + 8\sqrt{2} \right] \pi \left(\frac{R}{L}\right)^2 \quad (2)$$

HS1 中除去 OB 后剩余的外部杆件的相对密度为:

$$\bar{\rho}_{other} = 4 \sqrt{1 + 4 \sin^2\left(\frac{\pi}{8}\right)} \pi \left(\frac{R}{L}\right)^2 \quad (3)$$

则 HS1 的相对密度为:

$$\bar{\rho}_{HS1} = \bar{\rho}_{OB} + \bar{\rho}_{other} \quad (4)$$

由于重复计算了节点的体积而高估了相对密度, 因此相对密度的高度近似为:

$$\bar{\rho}_{HS1} = \left[6 \sin\left(\frac{\pi}{8}\right) + 8\sqrt{2} \right] \pi \left(\frac{R}{L}\right)^2 + \left(4 \sqrt{1 + 4 \sin^2\left(\frac{\pi}{8}\right)} + 4 \sin\left(\frac{\pi}{8}\right) \right) \pi \left(\frac{R}{L}\right)^2 - C \left(\frac{R}{L}\right)^3 \quad (5)$$

若外部的杆件与内部十六面的杆件的直径比不同, 比例为 λ 时, 相对密度的表达式为:

$$\bar{\rho}_{HS1} = \left[6 \sin\left(\frac{\pi}{8}\right) + 8\sqrt{2} \right] \pi \left(\frac{R}{L}\right)^2 + \left(4 \sqrt{1 + 4 \sin^2\left(\frac{\pi}{8}\right)} + 4 \sin\left(\frac{\pi}{8}\right) \right) \pi \left(\frac{R}{L}\right)^2 \lambda^2 - C \left(\frac{R}{L}\right)^3 \quad (6)$$

拟合相对密度发现, 当内外杆件直径相差较小时, 系数 C 的值与直径比 λ 成线性关系:

$$C = 240\lambda \quad (7)$$

同理, 内外结构直径相等的 HS2 的相对密度为:

$$\bar{\rho}_{HS2} = \left[4 \sin\left(\frac{\pi}{8}\right) + \frac{8}{3} \sqrt{13} \right] \pi \left(\frac{R}{L}\right)^2 + \left[\frac{4}{3} \sqrt{9 + 16 \sin^2\left(\frac{\pi}{8}\right)} + \frac{8}{3} \sin\left(\frac{\pi}{8}\right) \right] \pi \left(\frac{R}{L}\right)^2 - C \left(\frac{R}{L}\right)^3 \quad (8)$$

经理论分析与建模软件处理, 得到系数 C 为 176。

1.2 成形工艺与实验方法

SLM 采用 3D 打印设备 (型号为 HBD-80), 选

用 316L 不锈钢粉末制备点阵结构。由于单胞尺寸较小, SLM 制备的试样存在粉末黏附与无法成形等情况。为提高成形质量, 以激光功率 P 、扫描速度 v 、扫描间距 s 作为变量, 设计三因素三水平正交实验, 实验方案如表 1 所示, 分别打印尺寸为 $14.78\text{ mm} \times 14.78\text{ mm} \times 16\text{ mm}$ 的点阵结构。

表 1 SLM 制备点阵结构的工艺参数正交实验方案
Table 1 Orthogonal experiments schemes on process parameters for SLM preparation of dot matrix structures

Sample	P/W	$v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	s/mm	Energy density/ ($\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}$)
1 [#]	140	800	0.06	48.1
2 [#]	140	900	0.08	72.9
3 [#]	140	1000	0.10	46.6
4 [#]	160	800	0.08	83.3
5 [#]	160	900	0.10	59.3
6 [#]	160	1000	0.06	88.9
7 [#]	180	800	0.10	75.2
8 [#]	180	900	0.06	90.9
9 [#]	180	1000	0.08	75.2

点阵结构的准静态压缩实验采用 DNS100 型电子万能试验机。采用位移控制载荷的方式对试样进行压缩, 加载速率恒定为 2 mm/min , 压缩位移为样件高度的 80%。测试过程中, 所有试样都位于固定底板的中心, 底板上涂满油, 以减少表面之间摩擦。

为研究点阵结构在压缩载荷下的变形机制, 通过有限元软件进行仿真研究。材料损伤模型采用 Johnson-Cook 模型和基于能量的损伤演化准则, 以 2 mm/min 的速度沿轴向移动。板与点阵结构之间剪切摩擦系数为 0.2, 在法向设置硬接触, 其他部位设置通用自接触。

2 结果与分析

2.1 SLM 成形工艺及其质量分析

图 2(a) 为采用不同工艺参数制备的点阵结构。在参数组合 1、3、4、5、9 条件下, 点阵结构存在大量结构缺失; 组合 2 和组合 7 的点阵结构存在杆径过小的问题。这是因为以上几组参数的能量密度^[21] 较低, 成形过程中粉末层下端未能完全熔化, 层间黏接不紧密, 导致结构缺失和杆径过小的情况。组合 6 和组合 8 的能量密度较高, 制备的点

阵结构较完整。由此说明, 能量密度越高, 成形质量越好。因此, 选择第 6 组工艺参数制备 OB、HS1 和 HS2 三种点阵结构, 制备的点阵结构样品如图 1(d) 所示。SLM 制备的点阵试样的形态和设计模型一致性较好, 单胞形状清晰, 宏观成形质量较好。图 3 展示了第 6 组工艺参数的侧面显微形貌图。水平杆的成形质量较差, 这是因为打印水平杆底部没有支撑。松散粉末对熔池的约束力很小^[22], 熔池凝固会倾向于收卷成球, 杆件底部产生球化和塌陷现象。斜杆底部有支撑作用, 成形质量较好。这表明支杆倾斜角度越大, 制造精度越高。表 2 为点阵结构杆件的平均尺寸, OB、HS1、HS2 三种试样斜杆的倾斜角度分别为 45° 、 60° 和 68.9° 。对比三种试样的尺寸发现, 随着斜杆倾斜角度的增加, 其尺寸误差呈现逐渐减小的趋势, 均控制在 8% 以内。图 4 为 316L 不锈钢的 XRD 衍射图, 其主要内部组织为 $\gamma\text{-Fe}$ 奥氏体, 这使得材料具有良好的韧性, 结构杆件在拉伸过程中能够承受较大的塑性变形。

2.2 激光熔覆八边形双棱锥与 Kelvin 混合结构的准静态压缩性能与吸能机理

2.2.1 混合点阵结构的准静态压缩力学性能

图 5 是三种结构的应力-应变曲线图。点阵结构在加载时呈现典型的弹性、吸能和致密化阶段。在吸能阶段, 三种结构的应力都出现一定幅度的波动。当杆径相同时, 在初始屈服阶段, OB 结构的应力下降到屈服强度的 50%, 而 HS1 仅下降 22%。这是因为 OB 中的杆件以拉伸变形为主, 在达到屈服强度后发生屈曲, 承载能力下降; 而 HS1 外部的杆件在压缩过程中发生弯曲变形, 避免了结构出现灾难性的坍塌。相比于 HS1, 经过拉伸处理的 HS2 的径长比减小, 临界屈曲应力减小, 外部杆件更容易发生屈曲。因此, HS2 的应力-应变曲线呈驼峰状变化, 初始应力下降幅度达到了 38%。另外, HS2 的斜杆的倾斜角度增大, 杆件受到沿轴向的分力增加, 结构的承载能力更强。在致密化应变方面, 两种混合结构拥有更复杂的结构和更高的相对密度, 比 OB 结构更早地致密化。图 5(b) 为不同杆径的应力-应变曲线图。控制三种结构的相对密度为 13%, OB、HS1 和 HS2 的杆径分别为 0.495 mm 、 0.4 mm 和 0.445 mm 。由于杆径的增大, OB 结构的径长比减小, 临界屈服应力增大, 承载能力上升; 因此其比刚度和比强度都要优于 HS1。然而, OB 结构屈服后应力急剧下降和剧烈波动的现象依旧存在。相比之下, 混合结构表现出了相对稳定的应力

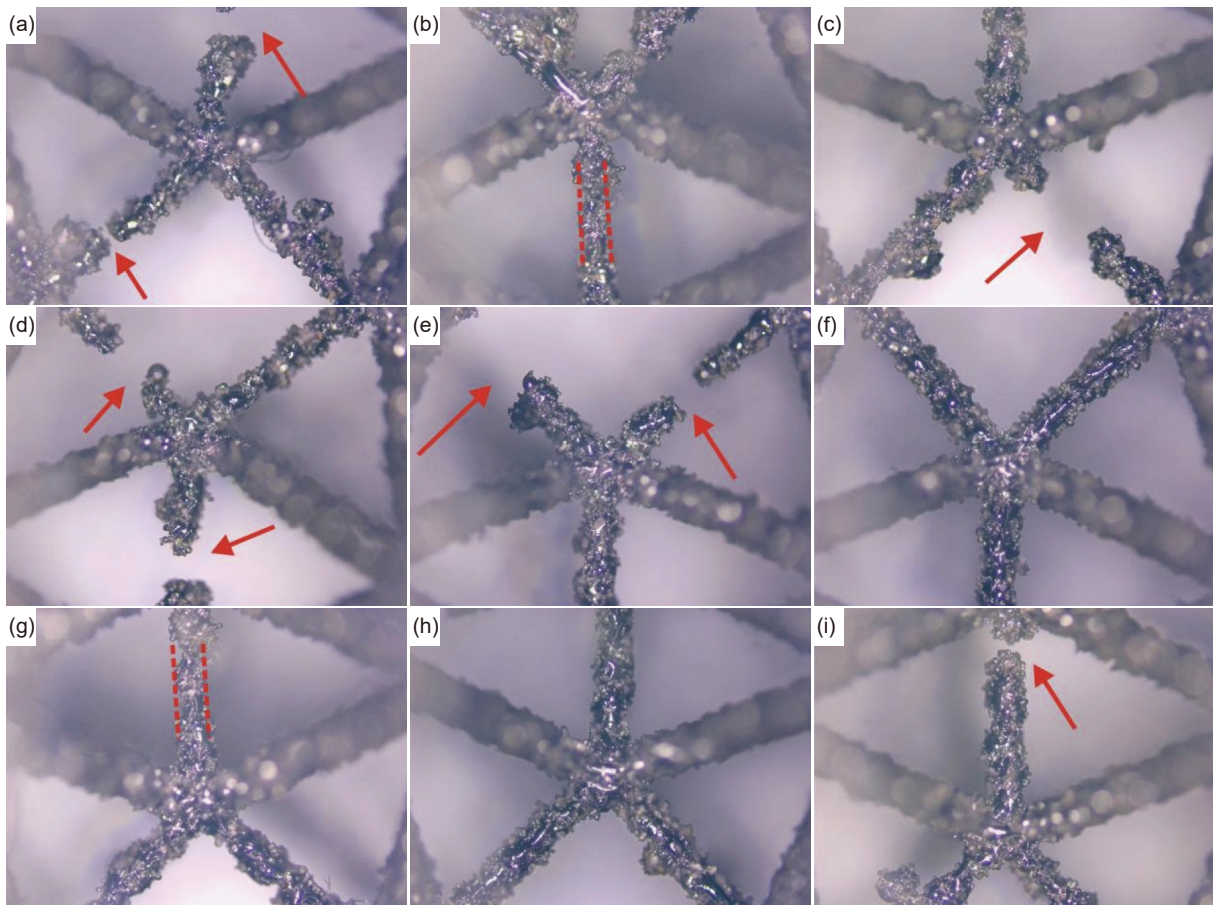


图2 SLM 制备的点阵结构显微形貌图 (a)1[#]; (b)2[#]; (c)3[#]; (d)4[#]; (e)5[#]; (f)6[#]; (g)7[#]; (h)8[#]; (i)9[#]

Fig. 2 Microscope images of lattice specimens fabricated by SLM (a)1[#]; (b)2[#]; (c)3[#]; (d)4[#]; (e)5[#]; (f)6[#]; (g)7[#]; (h)8[#]; (i)9[#]

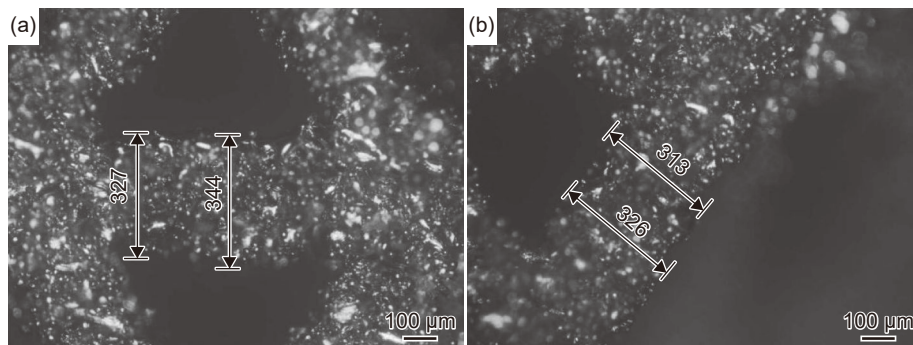


图3 HS1 点阵结构侧面显微形貌图 (a)水平杆; (b)斜杆

Fig. 3 Side-view microstructure image of HS1 lattice structure (a) horizontal strut; (b) inclined strut

表2 点阵结构的平均杆径

Table 2 Average rod diameters of lattice structures

Structure	Horizontal strut/ μm	Inclined strut/ μm	Intended target value/ μm
OB	335	324	300
HS1	333	319	300
HS2	335	316	300

波动。随着杆径的增加, HS2 的初始应力下降幅度有所减小, 比刚度和比强度分别提高了 372% 和 54%。

2.2.2 混合点阵结构的吸能性能

本工作采用比吸能评价点阵结构吸能特性, 计算如式(9)所示:

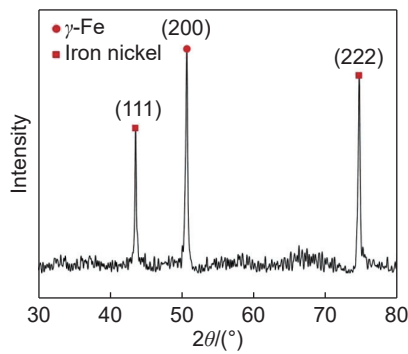


图4 316L不锈钢的XRD衍射图

Fig. 4 XRD pattern of 316L stainless steel

$$SEA = \frac{\int_0^{\varepsilon_A} \sigma d\varepsilon}{\bar{\rho}} \quad (9)$$

式中： σ 为压缩应力； ε_A 为压缩应变；SEA为结构在压缩到应变为 ε_A 时吸收的能量与相对密度之比^[23]，常用来比较相对密度不同时结构的吸能特性。图6(a)是相同杆径结构的比吸能随应变变化的情况。在小变形阶段，HS1与OB结构的曲线重合。随着应变增加，HS1逐渐展现出更好的吸能性能；变形越大，差异越明显，这是因为HS1应力响应更稳定。HS2拥有更高的比强度、比刚度和平台应力，因此其吸能性能在各个阶段都要优于另外两种结构。当应变为58%时，HS2的比吸能比HS1高24%，比OB结构高88%。图6(b)是不同杆径结构的比吸能随应变变化的情况。OB和HS1的能量吸收曲线的顺序发生互换，这是因为OB结构的杆径更大，应力响应更高。

基于上述研究的混合结构的吸能性能差异，进一步研究吸能的稳定性。采用能量吸收效率方法进行评价，表示为式(10)：

$$\eta(\varepsilon_A) = \frac{\int_0^{\varepsilon_A} \sigma d\varepsilon}{\sigma_p(\varepsilon_A) \times 1} \quad (10)$$

式中： $\sigma_p(\varepsilon_A)$ 为结构在应变为 $[0, \varepsilon_A]$ 区间内经历

的最高的应力； $\eta(\varepsilon_A)$ 为能量吸收效率，是结构在压缩到应变 ε_A 时吸收的能量与在恒定抗压强度 $\sigma_p(\varepsilon_A)$ 下应变从0到100%所获得的最大可能吸收能量之比^[24]，这个参数可以用来量化结构在屈服后相应的稳定性，效率越高，稳定性越好。

经计算分析，绘制相同相对密度点阵结构的能量吸收效率-应变如图6(c)所示。在小变形阶段，结构之间的吸能效率区别很小。随着应变的增加，吸能效率的差异开始变得明显。HS2和OB两种结构的吸能效率在 $\varepsilon=0.5$ 时出现互换，这归因于OB结构在该应变下发生应力骤降。当 $\varepsilon=0.58$ 时，OB结构首先迎来能量吸收效率峰值；HS1的屈服后应力响应更加稳定，其吸能效率比HS2高5%，比OB高15.7%。这说明添加外部支撑可以帮助抵抗内部杆件屈曲带来的应力波动。

点阵结构致密化应变的取值通常具有随机性。为了提高计算分析的准确性，将致密化应变定义为最大能量吸收效率所对应的应变，以杆径0.4 mm的HS1为例，如图6(d)所示。点阵结构致密化应变和最大比吸能如图7(a)所示，其中括号内百分数为结构的相对密度。在杆件直径相同的情况下，OB的结构更加简单和开放，其致密化应变明显大于混合结构。HS2的致密化应变比HS1小3%，最大比吸能高了88%。致密化应变的差异归因于杆件的屈服。在相对密度相同的情况下，OB的直径远大于混合结构的直径，杆件在压缩过程中更容易接触，发生致密化，其致密化应变比HS1和HS2分别小11%和7%，最大比吸能比HS1略低，比HS2少小92%。三种杆件的比刚度和比强度对比见图7(b)。

2.2.3 混合点阵结构的变形机制和失效模式分析

图8和图9是杆径相同情况下，三种点阵结构准静态压缩过程的实验和仿真示意图。从仿真变

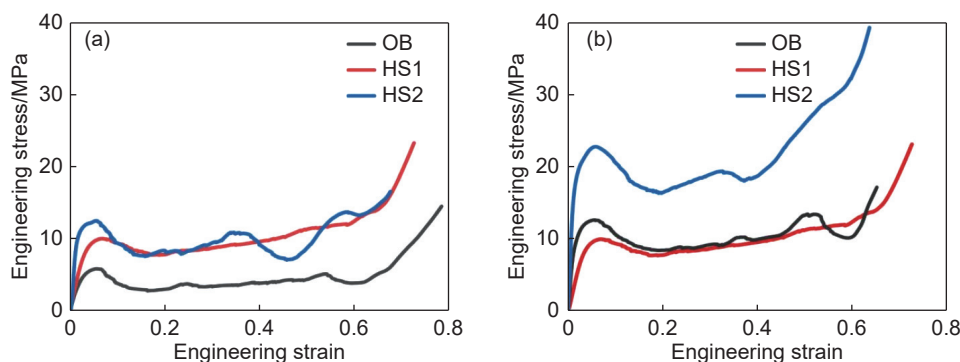


图5 三种点阵结构的准静态压缩实验应力-应变曲线图 (a)相同杆径；(b)不同杆径

Fig. 5 Quasi-static compressive stress-strain curves of three lattice structures (a) same strut diameter; (b) different strut diameter

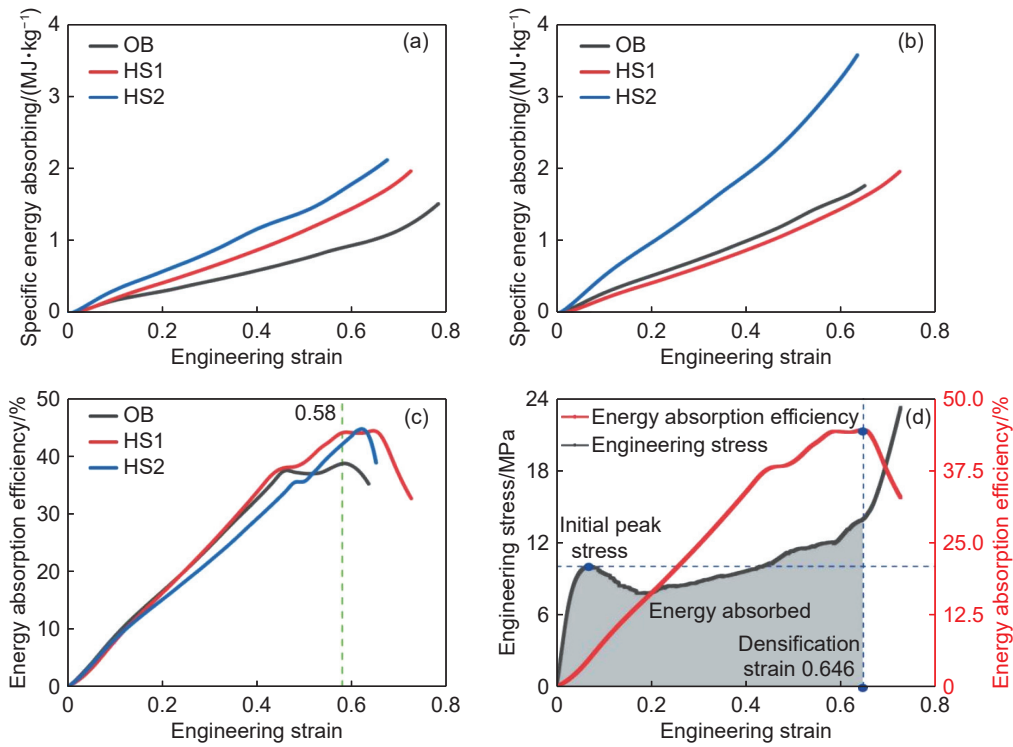


图 6 点阵结构的吸能性能 (a)相同杆径结构的比吸能;(b)不同杆径结构的比吸能;(c)相同密度的三种点阵结构的能量吸收效率;(d)杆径为 0.4 mm 的 HS1 的应力-应变曲线(阴影区域表示吸收的能量;红色实线表示能量吸收效率随应变的变化;水平和垂直蓝色虚线分别为屈服强度和根据式(10)计算的致密化应变)

Fig. 6 Energy absorption performance of the lattice structure (a) specific energy absorption of the same strut diameter structure; (b) specific energy absorption of different strut diameter structures; (c) capacity absorption efficiency of three lattice structures of the same density; (d) stress-strain curves of HS1 with a rod diameter of 0.4 mm (The shaded area represents the absorbed energy; the solid red line shows the change in energy absorption efficiency with strain; the horizontal and vertical blue dashed lines are the yield strength and the densification strain calculated according to equation (10))

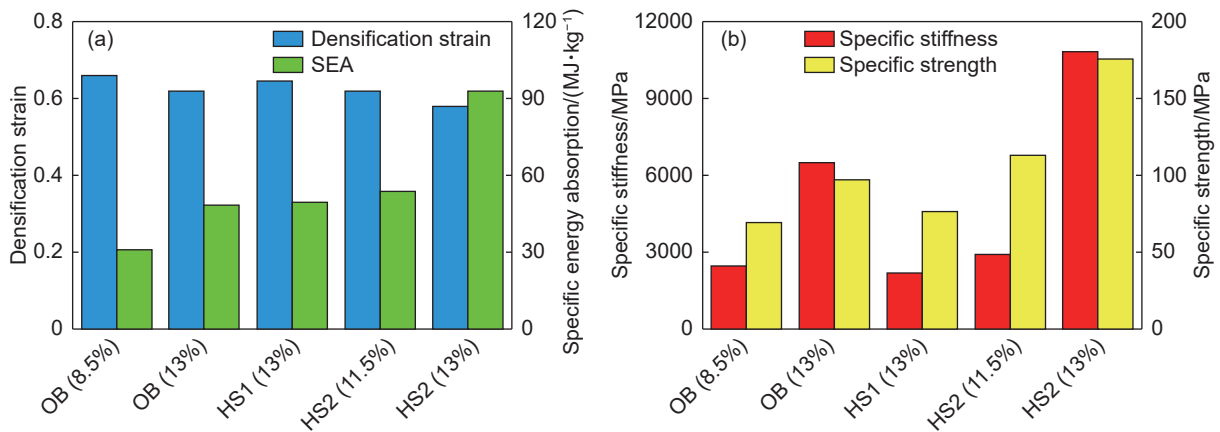


图 7 点阵结构力学性能对比 (a)致密化应变和比吸能;(b)比刚度和比强度

Fig. 7 Comparison of mechanical properties of lattice structures (a) densification strain and specific energy absorption; (b) specific stiffness and specific strength

形图可以观察到,OB 的应力集中部位主要沿对角线分布。对角线上的单胞受力较大,杆件达到临界屈服强度后,首先发生屈曲变形。因此,OB 的变形模式为 X 形剪切带变形。在实验中,由于存在制造缺陷,OB 出现了变形局部化。压缩刚开始时,OB 仅出现一个 45°剪切带,结构沿剪切带发生滑

动,杆件出现断裂,应力骤降。随着压缩的进行,剪切带上的杆件提前接触,发生局部致密化,应力开始上升。在 $\epsilon=0.5$ 时,OB 出现第二个 45°剪切带,形成 X 型变形带,应力再次骤降。对于 HS1,其压缩过程可分为两个阶段。首先是小变形阶段,其变形机制与 OB 相似,出现了 45°剪切带。HS1 沿剪

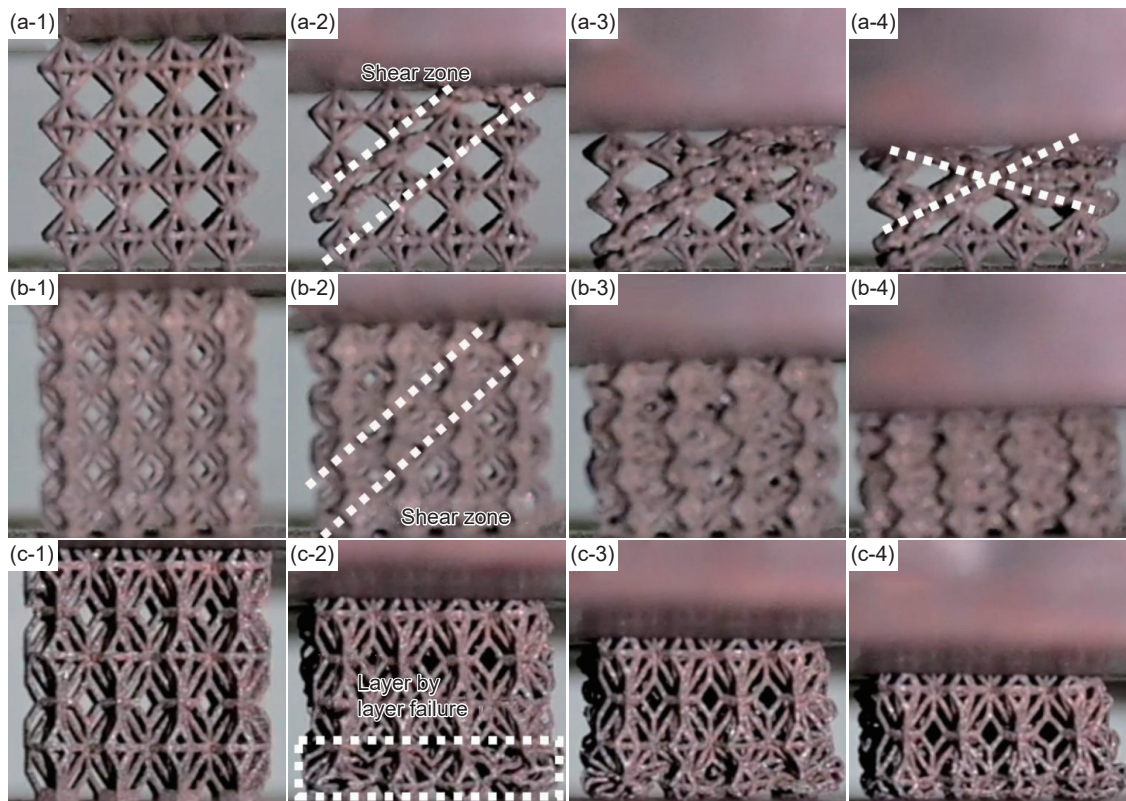


图 8 点阵结构的实验压缩变形 (a)OB; (b)HS1; (c)HS2; (1) $\varepsilon=0$; (2) $\varepsilon=0.2$; (3) $\varepsilon=0.4$; (4) $\varepsilon=0.5$
 Fig. 8 Experimental compression deformation of lattice structures (a) OB; (b) HS1; (c) HS2; (1) $\varepsilon=0$;
 (2) $\varepsilon=0.2$; (3) $\varepsilon=0.4$; (4) $\varepsilon=0.5$

切带发生滑移, 导致应力出现了微小的波动。第二阶段是均匀变形阶段。在这一阶段, HS1 的外部杆件发生弯曲变形, 整体结构逐渐呈现出均匀坍塌的变形机制, 其应力随应变的增加稳步上升。上述现象表明: 在小变形阶段, HS1 的内部杆件承受压缩变形, 起着关键的支撑作用; 另外, 外部杆件通过弯曲变形可以有效抵抗 OB 杆件的屈曲, 减小应力波动。然而, 拥有类似结构的 HS2 的变形机制却截然不同, 展现出层级坍塌的变形机制。HS2 的坍塌首先发生在底层, 其斜杆发生屈曲变形; 中心面上的节点产生了较大的横向位移, 水平杆受拉伸断裂, 应力发生骤降。随着压缩的进行, 不同层的结构由下向上依次被压实。每一层发生屈曲变形的应变分别为应力峰值的应变。两种混合结构拥有不同的变形机制可以归因于塑性铰的分布。从仿真图像中可以观察到, HS2 除了在内部杆件上出现塑性铰外, 外部的杆件中心附近也形成了塑性铰, 在压缩时发生了屈曲变形, 所以 HS2 的应力-应变曲线在吸能阶段会产生不稳定的应力波动。而 HS1 的外部杆件上没有出现塑性铰, 更倾向于发生弯曲变形, 整体结构均匀变形。对比三种不同的变形机制发现: OB 结构的剪切带变形机制和 HS2 的逐层坍塌

塌变形机制均引起较大的应力波动, 导致能量吸收效率降低; 而 HS1 的均匀变形模式避免了应力骤降, 有利于能量的吸收。

为进一步研究结构杆件的失效机制, 对断口表面进行了显微形貌分析, 如图 10 所示。断裂位置主要集中在水平杆上, 这与仿真结果中应力集中的位置相吻合。所有试样的断口表面都堆积了大量的韧窝, 表现出典型的韧性断裂特征。与 OB 结构相比, 混合结构的韧窝较深且分布更加密集, 表明其在断裂前发生了更显著的塑性变形, 具有更优异的吸能性能。

2.3 混合点阵结构几何参数研究

为了进一步探讨混合结构中各杆件对力学性能的影响, 对 HS1 进行几何参数优化。引入参数 λ (Kelvin 与 OB 杆件直径之比), λ 取 0.75、0.875、1、1.125 和 1.25。图 11(a) 是相对密度为 13% 时, 不同 λ 的 HS1 的应力-应变曲线。从图中可以观察到, HS1 的屈服强度随着 λ 的增加而减小。在小变形阶段, 内部杆件是主要的承力杆件, 增加其直径可以提高其临界屈曲应力, 进而提高屈服强度。随着 λ 的增加, 外部杆件直径增加, 相邻杆件更早地发生接触, 屈服后的应力增加更明显; 应力-应变曲线逐渐从驼峰状变为稳步上升。在吸能性能方面,

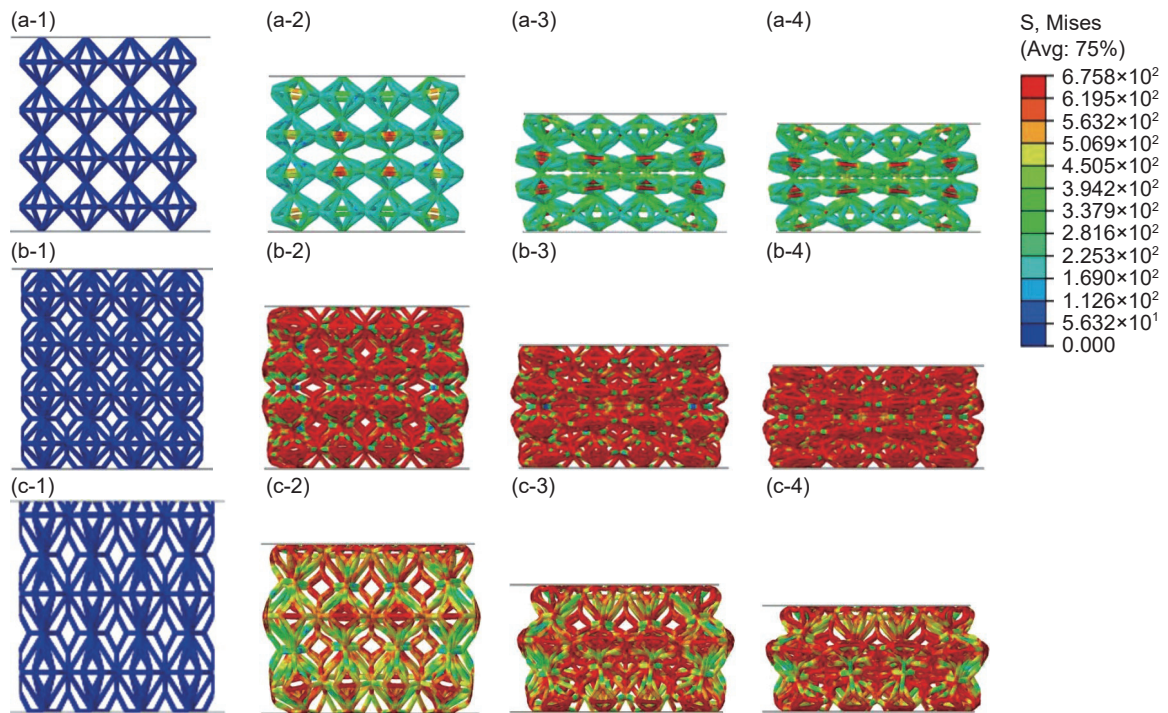


图 9 点阵结构的仿真压缩变形 (a)OB; (b)HS1; (c)HS2; (1) $\epsilon=0$; (2) $\epsilon=0.2$; (3) $\epsilon=0.4$; (4) $\epsilon=0.5$;

Fig. 9 Simulated compression deformation of lattice structures (a) OB; (b) HS1; (c) HS2; (1) $\epsilon=0$; (2) $\epsilon=0.2$; (3) $\epsilon=0.4$; (4) $\epsilon=0.5$;

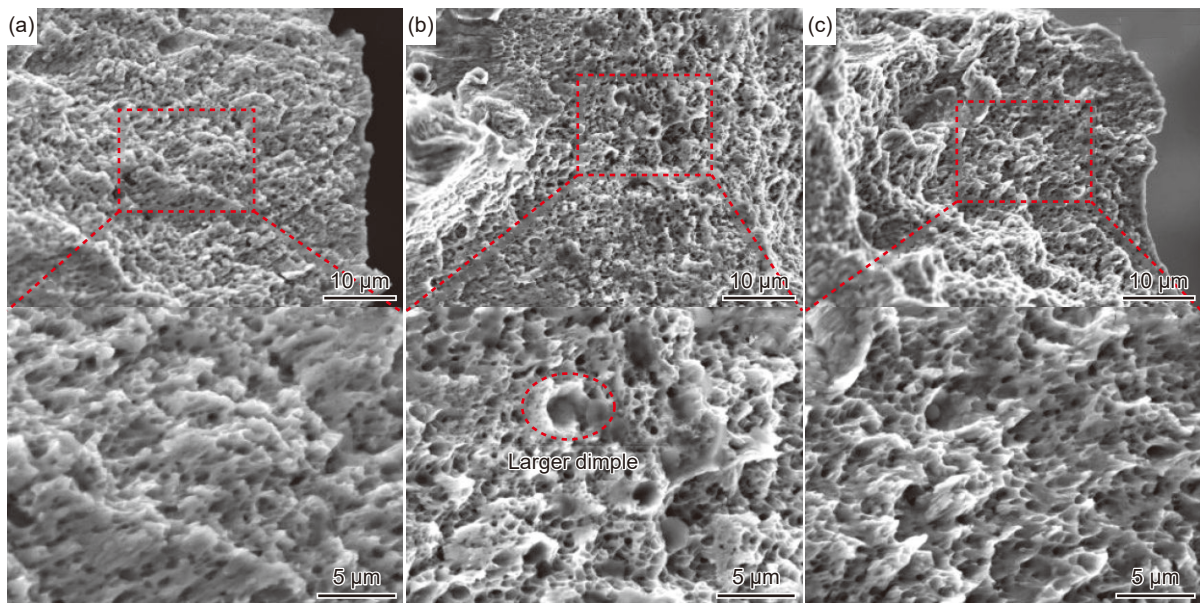


图 10 断口形貌 (a)OB; (b)HS1; (c)HS2

Fig. 10 Fracture morphologies (a) OB; (b) HS1; (c) HS

λ_4 和 λ_5 都要优于 λ_3 , 其中 λ_5 的比吸能比均质结构提升了 17%。由图 11(c)、(d)可知, 当 $\lambda < 1$ 时, HS1 到达屈服强度后, 45°对角线上出现明显的剪切带, 随后沿剪切带滑动, 直至压溃; 当 $\lambda \geq 1$ 时, HS1 呈现以弯曲为主导的均匀变形模式。以上现象说明, 通过改变 λ 对结构的力学性能进行调控是可行的。其中, $\lambda=0.75$ 结构的综合性能最优, 相较于均质结

构, 其比强度和比吸能分别提高了 21% 和 10%。

3 结论

(1) 将八边形双棱锥点阵(OB)和 Kelvin 结构组合, 设计了 OB 结构被 Kelvin 结构包裹, 且中心面的八个顶点依次重合的 HS1, 解决了 OB 结构在

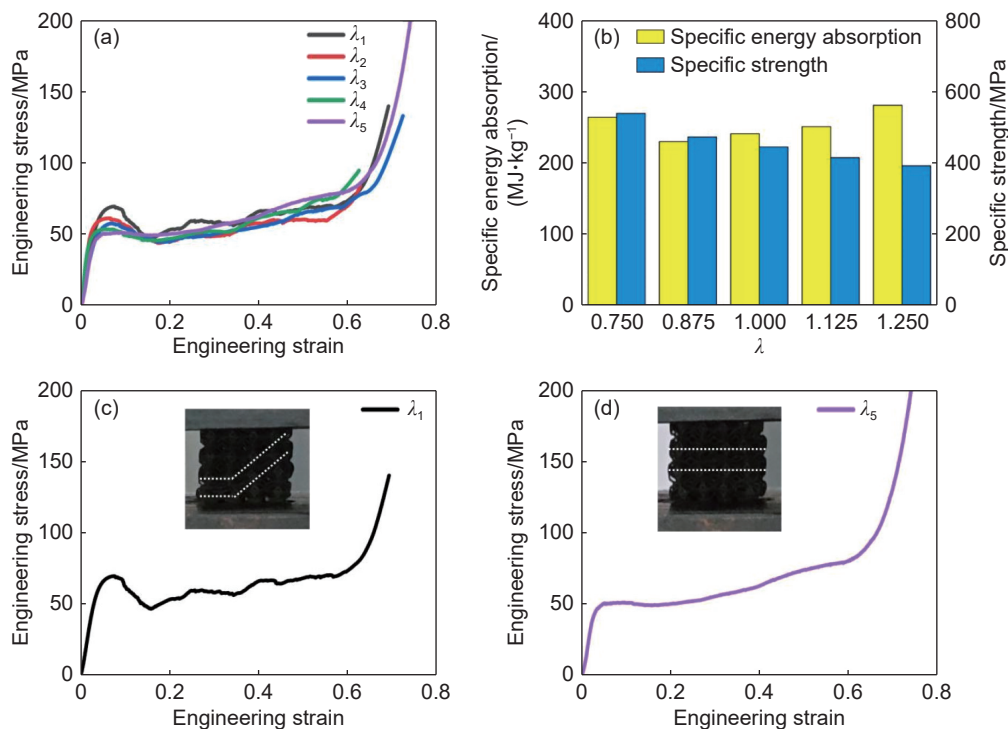


图 11 相对密度为 13% 且不同 λ 点阵结构的力学性能 (a) 应力-应变曲线; (b) 力学性能数据对比; (c) $\lambda < 1$ 时出现剪切带; (d) $\lambda > 1$ 时呈现均匀变形

Fig. 11 Mechanical properties of different λ during relative density is 13% (a) stress-strain curves; (b) comparison of mechanical property data; (c) shear bands appear at $\lambda < 1$; (d) uniform deformation occurs at $\lambda > 1$

屈服后会出现不稳定平台应力的问题,同时具有高比强度和比刚度,其吸能效率提升 15.7%。对 HS1 进行拉伸处理,得到长宽高比例为 2:2:3 的 HS2。当相对密度相同时,HS2 的比强度和比吸能进一步提升,相比于 OB 分别提升了 93% 和 92%。

(2) 在变形机制方面,OB 结构表现出沿 45° 方向的剪切断裂,并沿剪切带滑动。HS1 首先沿 45° 方向的剪切断裂,随后开始均匀变形,呈现以弯曲为主导结构的变形机制,HS2 则是全程自下而上逐层坍塌。

(3) HS1 的力学性能可通过调控参数 λ (Kelvin 与 OB 杆件直径之比) 优化。当相对密度相同时,减小 λ 可以提高屈服强度;增加 λ 可以提高吸能稳定性,提升比吸能。

(4) SLM 制备的点阵结构的成形质量与激光能量密度和结构的制造方向有关:能量密度越高,成形质量越好;支杆倾斜角度越大,制造精度越高。

参考文献:

- [1] LI L, YANG F, WANG P, et al. A new hybrid lattice structure with improved modulus, strength and energy absorption properties[J]. *Science China Technological Sciences*, 2023, 66(7): 2119-2133.
- [2] 郑权, 冀宾, 李昊, 等. 基于增材制造的多层金字塔点阵夹芯板抗压性能[J]. *航空材料学报*, 2018, 38(3): 77-82. ZHENG Q, JI B, LI H, et al. Compressive behavior of sandwich panels with multilayer pyramidal truss cores by additive manufacturing[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2018, 38(3): 77-82.
- [3] IIO S, HASEGAWA K, FUSHIMI S, et al. On compressive deformation behavior of hollow-strut cellular materials[J]. *Materials & Design*, 2016, 105: 1-8.
- [4] 胡雅楠, 余欢, 吴圣川, 等. 基于机器学习的增材制造合金材料力学性能预测研究进展与挑战[J]. *力学学报*, 2024, 56(7): 1892-1915. HU Y N, YU H, WU S C, et al. Machine learned mechanical properties prediction of additively manufactured metallic alloys: progress and challenges[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2024, 56(7): 1892-1915.
- [5] QIU C L, YUE S, ADKINS N J E, et al. Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 628: 188-197.
- [6] ZHANG X Y, FANG G, ZHOU J. Additively manufactured scaffolds for bone tissue engineering and the prediction of their mechanical behavior: a review[J]. *Materials*, 2017, 10(1): 50.

- [7] PARISIEN A, ELSAYED M S A, FREI H. Mechanoregulation modelling of stretching *versus* bending dominated periodic cellular solids[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 33: 104315.
- [8] OSMAN M M, SHAZLY M, EL-DANAF E A, et al. Compressive behavior of stretched and composite micro-lattice metamaterial for energy absorption applications [J]. *Composites Part B*, 2020, 184: 107715.
- [9] ZHAO M, LIU F, FU G, et al. Improved mechanical properties and energy absorption of BCC lattice structures with triply periodic minimal surfaces fabricated by SLM[J]. *Materials*, 2018, 11(12): 2411.
- [10] CAO X F, DUAN S Y, 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.
- [11] TANCOGNE-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.
- [12] LIU X Y, WADA T, SUZUKI A, et al. Understanding and suppressing shear band formation in strut-based lattice structures manufactured by laser powder bed fusion[J]. *Materials & Design*, 2021, 199: 109416.
- [13] BAI L, GONG C, CHEN X H, 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.
- [14] SUN Z P, GUO Y B, SHIM V P W. Characterisation and modeling of additively-manufactured polymeric hybrid lattice structures for energy absorption[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 191: 106101.
- [15] WANG P, YANG F, LI P H, et al. Design and additive manufacturing of a modified face-centered cubic lattice with enhanced energy absorption capability[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2021, 47: 101358.
- [16] ANDREW J J, SCHNEIDER J, UBAID J, et al. Energy absorption characteristics of additively manufactured plate-lattices under low-velocity impact loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 149: 103768.
- [17] QI D X, YU H B, LIU M, et al. Mechanical behaviors of SLM additive manufactured octet-truss and truncated-octahedron lattice structures with uniform and taper beams[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 163: 105091.
- [18] GHAREHBAGHI H, SADEGHZADE M, FARROKHABADI A. Introducing the new lattice structure based on the representative element double octagonal bipyramid[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 121: 107383.
- [19] SADEGHZADE M, GHAREHBAGHI H, FARROKHABADI A. Experimental and analytical studies of mechanical properties of additively manufactured lattice structure based on octagonal bipyramid cubic unit cell[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 48: 102403.
- [20] TANCOGNE-DEJEAN T, SPIERINGS A B, MOHR D. Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading[J]. *Acta Materialia*, 2016, 116: 14-28.
- [21] 傅少军, 章桥新, 余金桂. 三种骨支架单胞结构构造及 SLM 打印成形[J]. *应用激光*, 2024, 44(7): 19-26.
- FU S J, ZHANG Q X, YU J G. Monocell structure and SLM printing of three bone scaffolds[J]. *Applied Laser*, 2024, 44(7): 19-26.
- [22] 张晓博, 党新安, 杨立军. 选择性激光熔化成形过程的球化反应研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(6): 127-132.
- ZHANG X B, DANG X A, YANG L J. Study on balling phenomena in selective laser melting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(6): 127-132.
- [23] 牟浩蕾, 刘兴炎, 刘冰, 等. 不同缘条宽度复合材料 C 型柱轴向压缩吸能特性[J]. *航空材料学报*, 2023, 43(6): 107-116.
- MOU H L, LIU X Y, LIU B, et al. Energy-absorption characteristics of composite C-channels with different flange widths under axial compression[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2023, 43(6): 107-116.
- [24] SADEGHZADE M, GHAREHBAGHI H, TOOZANDEHJANI H, et al. Experimental study of energy absorption capability in the lattice structures based on the octagonal bipyramid unit cell[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2023, 45(9): 460.

收稿日期: 2024-12-06; 录用日期: 2025-01-08

基金项目: 机械传动与制造工程湖北省重点实验室开放基金项目(MTMEOF2021B05)

通讯作者: 余金桂(1984—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为金属及复合材料零部件结构设计优化、力-热-耐腐蚀等多尺度模拟及实验研究和面向材料&结构一体化复杂零部件的3D打印工艺及工程应用研究, 联系地址: 湖北省武汉市珞珈路122号(430070), E-mail: yujingui@whut.edu.cn

(本文责编: 张琴)