

单胞构型和结构参数对 SLM 成形梯度点阵结构压缩性能的影响

张 博^{1,2}, 王国伟¹, 孙明艳¹, 秦 煄¹, 沈显峰¹, 王 超¹, 黄姝珂¹, 方 辉²

(1. 中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900)

(2. 四川大学 机械工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 梯度点阵结构由于压缩时具有优秀的吸能能力, 目前常作为吸能组件被应用于航天、国防和医疗等领域。但随着现代工业的发展, 工程领域对其压缩性能提出了更高的要求, 为使其进一步优化, 有必要探讨单胞构型、结构参数和压缩性能之间的关系。因此本研究通过选区激光熔化 (selective laser melting, SLM) 成形了 2 种梯度差的 AlSi10Mg 变杆径梯度体心立方 (body-centered cubic, bcc) 和金刚石 (diamond, Diam) 结构, 结合有限元分析 (finite element analysis, FEA) 研究梯度差对压缩性能的影响, 并对 2 种单胞构型进行对比。准静态单轴压缩实验的结果表明, 在同相对密度下, 当单胞构型相同时, 随着梯度差的增加单位体积吸能量明显增加, 而梯度差相同时, Diam 梯度点阵结构的压缩模量、屈服强度、抗压强度和最大峰值应力均高于 bcc, 同时其单位体积吸能量和吸能效率也高于 bcc。

关键词: 选区激光熔化; 梯度点阵结构; 压缩性能; 有限元分析

中图法分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2024)04-1021-11

随着现代工业的发展, 航空航天、国防等领域对材料轻量化的需求越来越强烈^[1], 并且期望材料轻量化后具有优良的力学和吸能性能, 因此轻质高性能材料的研究在近年来颇受关注。其中金属点阵结构是一种备受关注的新兴轻质材料, 为满足工业应用越来越高的要求, 近年来又衍生出梯度点阵结构, 相关研究已经表明其相对传统的均匀结构具有更好的吸能特性^[2-3], 同时梯度结构具有独特的功能优势, 比如作为骨植入体时更利于成骨细胞功能的施展^[4], 作为散热结构时性能也可以优于传统结构^[5]。金属点阵结构的传统生产路线包括: 切割出周期性的板条后, 通过扣合^[6]等方式组合、金属丝绕织制造^[7]、裁减-折叠制造法^[8]等。但传统生产路线通常伴随严重的材料浪费和低下的效率并且难以制造复杂的点阵结构。

而增材制造技术为点阵结构的制造开辟了一条高效的新途径。增材制造尤其适用于成形复杂点阵结构, 比如弯曲支杆结构^[9], 三维新型混合点阵结构^[10]等。而选区激光熔化是一种具有代表性的金属增材制造工艺, 适用于以铝合金^[11]、钛合金^[12-13]

和 316L^[14]为基础材料来成形工件。结合 SLM, 金属梯度点阵结构设计的自由性被释放, 其也迎来了高速发展。据报道, Zhao 等^[15]用 SLM 成形了 Ti-6Al-4V 的原始和螺旋三周期极小曲面的均匀和梯度结构, 发现压缩时梯度结构的单位体积吸能量高于均匀结构。Al-Saedi 等^[16]通过 SLM 成形了 Al-12Si 的 F2bcc 均匀和梯度结构并对其进行压缩实验, 结果也显示梯度结构具有更高的单位体积吸能量。但梯度结构吸能能力的优势并不是绝对的, Choy 等^[17]通过 SLM 成形了 4 种单胞构型的梯度结构和均匀结构, 尽管其中 3 种梯度结构的比吸能量都超过了对应的均匀结构, 但其中 1 种立方体结构 (C1) 结果相反。即使失去吸能量方面的优势, 梯度结构在能量吸收应用上也更具吸引力, 比如 Maskery 等^[18]认为, 尽管他们研究的 AlSi10Mg 的 bcc 均匀和梯度结构的吸能量几乎相同, 但梯度结构的变形模式和吸能能力更好预测。近年来, 梯度结构的优化也在进一步发展, Bai 等^[19]设计的尺寸梯度结构相对于均匀结构, 在小应变时具有更优的支撑性能, 大应变时具有更好的吸能能力。Yang 等^[20]

收稿日期: 2023-04-03

基金项目: 中国工程物理研究院创新发展基金 (CX20210005); 国家自然科学基金 (52101057)

作者简介: 张 博, 男, 1997 年生, 硕士, 中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900, E-mail: 19980536921@163.com

研究了周期压缩载荷下螺旋三周期极小曲面的梯度结构,发现其疲劳寿命为均匀结构的 1.21~1.67 倍。也有针对其他性能的新型设计,比如 Zhang 等^[21]通过改变形状参数来设计和研究不同的螺旋三周期极小曲面梯度结构,发现通过调整部分梯度结构可以更灵活地控制结构的生物特性,同时不显著影响其力学性能。

不难看出,目前对于梯度点阵结构的研究才刚起步,研究重点关注其压缩性能与均匀点阵结构的比较,而缺乏关于单胞构型间的比较以及梯度差对压缩性能影响的系统研究。基于此,本研究选取 bcc 和 Diam 点阵,通过控制底端和顶端直径设计出 2 种梯度差的 bcc 和 Diam 变杆径梯度点阵结构,采用 SLM 技术以 AlSi10Mg 为基础材料成形样品,并通过实验、有限元分析等方法研究了梯度差对力学性能的影响,同时比较了同梯度差的 bcc 和 Diam 点阵结构的压缩性能,为梯度点阵结构在缓冲和吸能方面的优化提供了参考,用于描述性能的符号如表 1 所示。

1 实验

1.1 梯度点阵结构设计

采用 SolidWorks 对点阵结构进行建模, Magics 进行处理。bcc 单胞尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm, 其点阵结构由 4×4×4 个单胞分别在 xyz 方向排列组合而成, 表观尺寸为 40 mm×40 mm×40 mm。考虑

表 1 用于描述性能的符号

Table 1 Symbolization used to describe properties

Symbolization	Characteristics
E_{latt}	Compressive modulus of the lattice structures
$\sigma_{y, \text{latt}}$	Yield strength of the lattice structures
σ_m	Stress of the basis material
ε_m	Strain of the basis material
σ_c	Compressive strength of the lattice structures
σ_p	Peak stress of the lattice structures
ρ^*	Relative density of the lattice structures
ρ_{latt}	Effective density of the lattice structures
σ_{pl}	Plateau stress of the lattice structures
ε_D	Densification strain of the lattice structures
W_v	Absorbed energy per unit volume
σ	Stress of the lattice structures
ε	Strain of the lattice structures
E	Energy absorption efficiency

到增强 Diam 点阵结构的可成形性及其支杆间的连接性,其单胞排列方式如图 1 所示,结构由 5×5×4 个尺寸为 7.07 mm×7.07 mm×10 mm 单胞分别在 xyz 方向上排列组合而成,边长为 35.36 mm×35.36 mm×40 mm。同时,2 种点阵结构都通过圆柱形支杆的直径在压缩方向上线性连续地变化(这在以往的研究中被称为变杆径梯度点阵结构^[19])来改变各层的相对密度(以下简称层相对密度)以避免突然的几何变化,这对梯度结构的设计非常重要^[22]。

定义应力为压缩载荷 P 除以垂直于载荷方向的样品表观截面积,应变为位移 ΔL 除以样品沿载荷方向的初始高度 H ^[23],公式为:

$$\sigma = \frac{P}{W_1 W_2} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{H} \quad (2)$$

点阵结构有效密度 ρ_{latt} 和相对密度 ρ^* ^[24]计算公式如下所示:

$$\rho_{\text{latt}} = \frac{m}{V_a} \quad (3)$$

$$\rho^* = \frac{\rho_{\text{latt}}}{\rho_m} \quad (4)$$

其中, ρ_m 代表基础材料密度, V_a 为点阵结构表观体积, m 为样品质量。

图 1 展示了 4 种梯度点阵结构的计算机辅助设计(computer aided design, CAD)模型,本研究设计了 2 种梯度差,从顶端到底端支杆直径的变化分别为从 1 mm 到 3 mm 和从 1.5 mm 到 2.5 mm(分别用后缀 1-3 和 1.5-2.5 表示),即梯度差分别为 2 和 1 mm。但需强调,本研究确定梯度差时均以最大杆径和最小杆径的中间值固定为 2 mm 为前提条件,这使得相同梯度差的 bcc 和 Diam 点阵结构对应的层相对密度几乎相同。同时本研究样品相对密度基本一致,分析时将其视作同相对密度。

1.2 样品制备和测试

采用 AlSi10Mg 合金粉末通过 SLM 成形样品,其化学成分见表 2。激光干涉仪测得粉末粒径分布在 15~50 μm ,平均粒径为 30 μm 。合金粉末在成形前先经过真空干燥箱的烘干处理以提高铺粉质量,设置烘干温度 120 $^{\circ}\text{C}$,烘干时间为 2 h。

使用德国 EOS M290 3D 打印机进行 SLM 成形。在成形过程中,通过不断往成形腔里输送氩气使得氧气含量始终低于 0.1%。成形样品的工艺参数为:激光功率 370 W,扫描速度 1300 mm/s,扫描间距 0.19 mm,层厚 30 μm ,激光光斑直径 100 μm 。成形

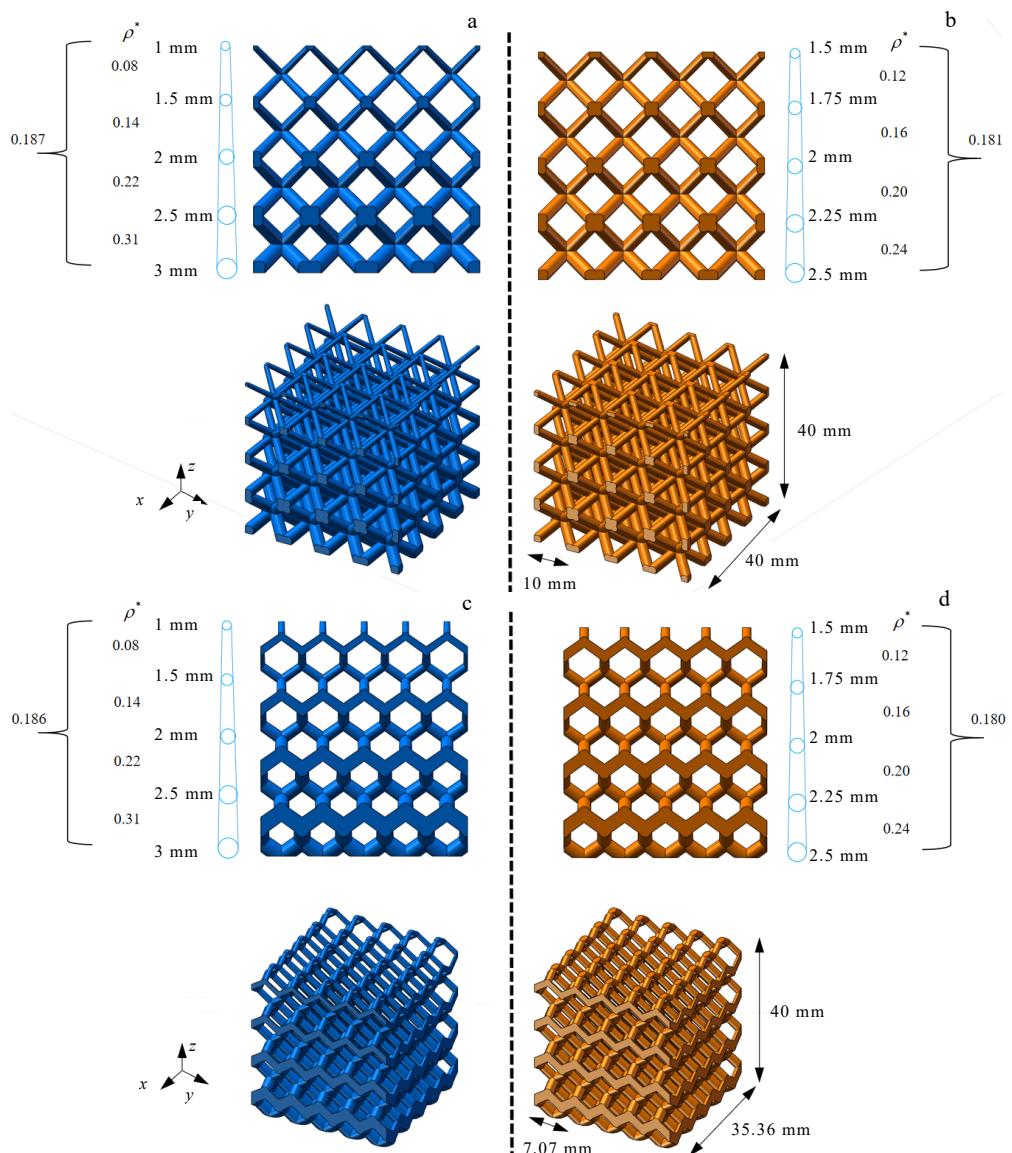


图 1 bcc1-3, bcc1.5-2.5, Diam1-3 和 Diam1.5-2.5 的 CAD 模型

Fig.1 CAD models of bcc1-3 (a), bcc1.5-2.5 (b), Diam1-3 (c), and Diam1.5-2.5 (d)

表 2 合金粉末的化学成分

Table 2 Chemical composition of alloy powder (ω/%)

Si	Fe	Mn	Mg	Ti	Ni	Zn	O	Al
10.11	0.085	0.20	0.35	0.013	0.0046	0.043	0.04	Bal.

后用电火花线切割使样品和基板分离。再使用超声清洗以去除样品表面粘附粉末。之后采用箱式电阻炉对样品进行热处理: 样品以 15 °C/min 的速度随炉升温至 300 °C, 冷却前保持此温度 2 h, 然后随炉冷却至室温。为避免成形方向效应的影响, 成形方向与压缩方向 (z 向) 一致^[25]。

样品成形后对样品表观尺寸、质量和相对密度进行表征。为探究梯度点阵结构的准静态压缩性能,

对 4 种梯度点阵结构的 2 组平行样品进行了准静态压缩测试, 采用 MTS-810 万能材料试验机在室温下进行。将梯度点阵样品放置在较低的固定平台上, 杆径大的一端朝下, 压头以 4 mm/min 的压缩速率向下移动, 期间计算机会自动记录压头下降位移和受到的载荷, 当压头位移到达一定数值时 (根据以往实验经验, 对 bcc 压缩位移设定为 24 mm, 即应变为 0.6, 对于 Diam 设定为 35 mm, 即应变为 0.875), 压头会进行短暂停顿, 然后以 8 mm/min 的速度卸载直至归位。同时高清摄像机会记录下样品的压缩变形过程。记录的载荷-位移曲线通过式 (1) 和式 (2) 转化为应力-应变曲线, 并用扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 对断口进行分析。

1.3 有限元分析

成形样品的同时成形了 2 组标准拉伸样品, 经过相同后处理后进行拉伸实验, 以确定基础材料的材料属性。拉伸应力-应变曲线如图 2 所示, 具体力学性能参数列于表 3。

采用有限元分析软件 ANSYS 对单层进行仿真分析。仿真单元为 8 节点三维实体单元 SOLID185, 网格大小在 0.2~0.4 mm 之间。如图 3 所示设置边界条件时重点考虑弱边界影响, 顶端面只设置向-z 方向移动, 不限制向其余方向移动, 底端面只有中心处局部平面完全固定, 其余平面只限制 z 向位移。

2 结果和讨论

2.1 样品表征

成形样品如图 4 所示, 测量出样品表观尺寸和质量, 同时用阿基米德排水法测量出体积并得到相对密度, 上述数据列于表 4。数据表明, 样品的成形效果良好。

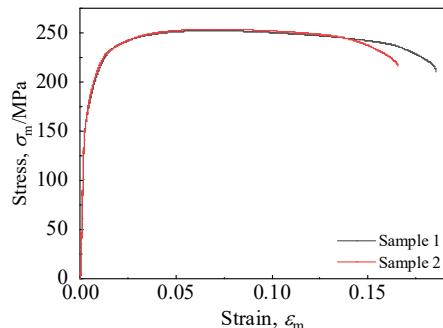


图 2 拉伸样品的应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of stretching samples

表 3 基础材料拉伸力学性能

Table 3 Tensile mechanical properties of basis material

Sample	Poisson's ratio	Elastic modulus/GPa	Yield strength/MPa	Ultimate strength/MPa
1	0.33	72	177.05	252.50
2	0.33	72	179.26	253.91
Average	0.33	72	178.16	253.21

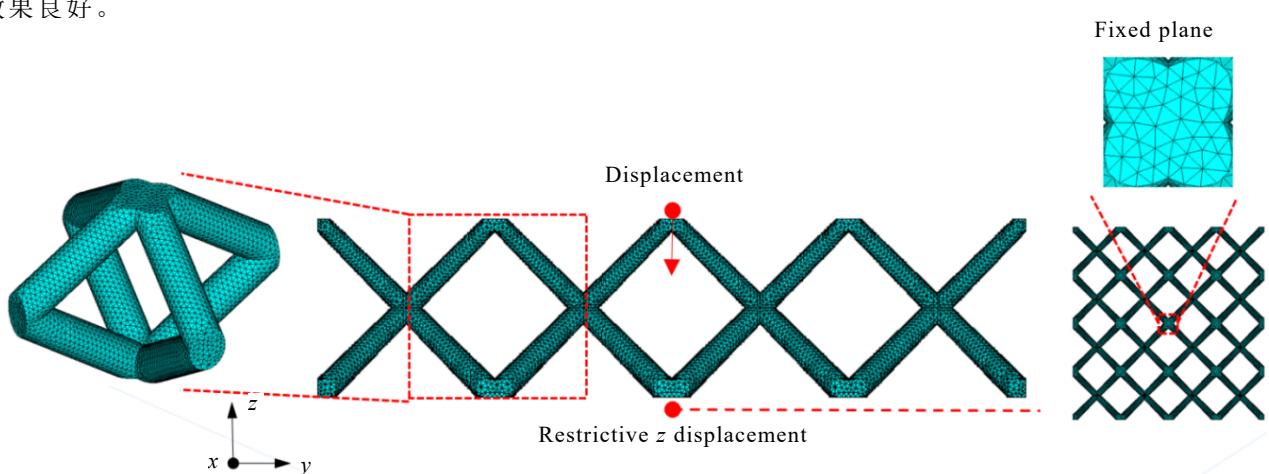


图 3 FEA 网格划分和边界条件

Fig.3 FEA mesh and boundary condition

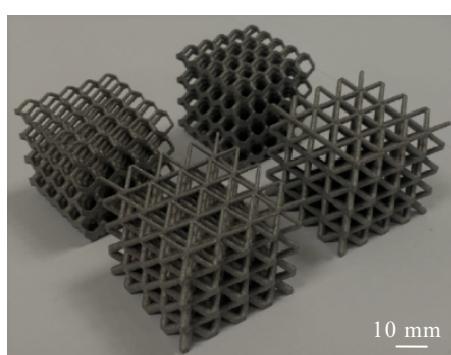


图 4 样品的等轴视图

Fig.4 Isometric view of samples

2.2 变形和应力-应变曲线

4 种梯度点阵结构的压缩应力-应变曲线如图 5a 所示。由于 2 个平行样品所得实验数据相似, 为使曲线图明晰, 每种只展示 1 条曲线。本研究将曲线分为线弹性阶段、平台阶段和致密化阶段, 定义屈服应变 ϵ_y 为平台阶段的起始应变, 最高吸能效率的应变为标志平台阶段结束的致密化应变 ϵ_D , 如图 5b 所示。梯度点阵结构的变形模式如图 6 所示, 结构按照层相对密度由小到大顺序逐层压溃, 即大变形逐层传递。由于大变形层的层相对密度逐渐增大, 其力学性能也逐渐增强, 对应了平台阶段应力的阶梯状上升趋势。同时, 支杆在节点处发生断裂, 结构发生较大幅的强度损失, 平台阶段因此出现相对

表 4 CAD 模型和样品之间尺寸、质量和相对密度的比较

Table 4 Comparison of the dimension, mass and relative density between the CAD models and samples

Type	Dimension, $W_1 \times W_2 \times H/\text{mm}$		Mass/g		Relative density/%	
	Measured	CAD	Measured	CAD	Measured	CAD
bcc1-3	40.19 \times 40.12 \times 40.32	40 \times 40 \times 40	31.78	31.06	18.43	18.67
	40.21 \times 40.07 \times 40.30		31.71		18.40	
bcc1.5-2.5	40.16 \times 40.11 \times 40.30	40 \times 40 \times 40	30.55	30.04	17.74	18.05
	40.14 \times 40.10 \times 40.31		30.59		17.77	
Diam1-3	35.51 \times 35.52 \times 40.38	35.36 \times 35.36 \times 40	24.61	24.20	18.21	18.61
	35.62 \times 35.57 \times 40.42		24.60		18.10	
Diam1.5-2.5	35.53 \times 35.51 \times 40.41	35.36 \times 35.36 \times 40	23.72	23.41	17.55	18.00
	35.56 \times 35.55 \times 40.44		23.86		17.63	

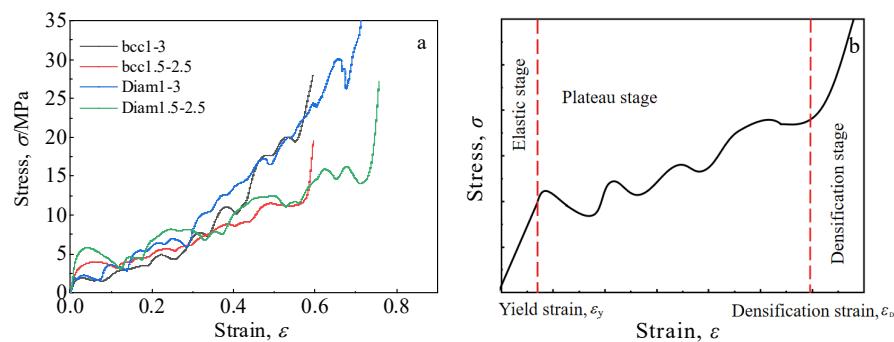


图 5 4 种梯度点阵结构的压缩应力-应变曲线和压缩应力-应变曲线阶段示意图

Fig.5 Compressive stress-strain curves of the four gradient lattice structures (a); schematic diagram of compressive stress-strain curve stages (b)

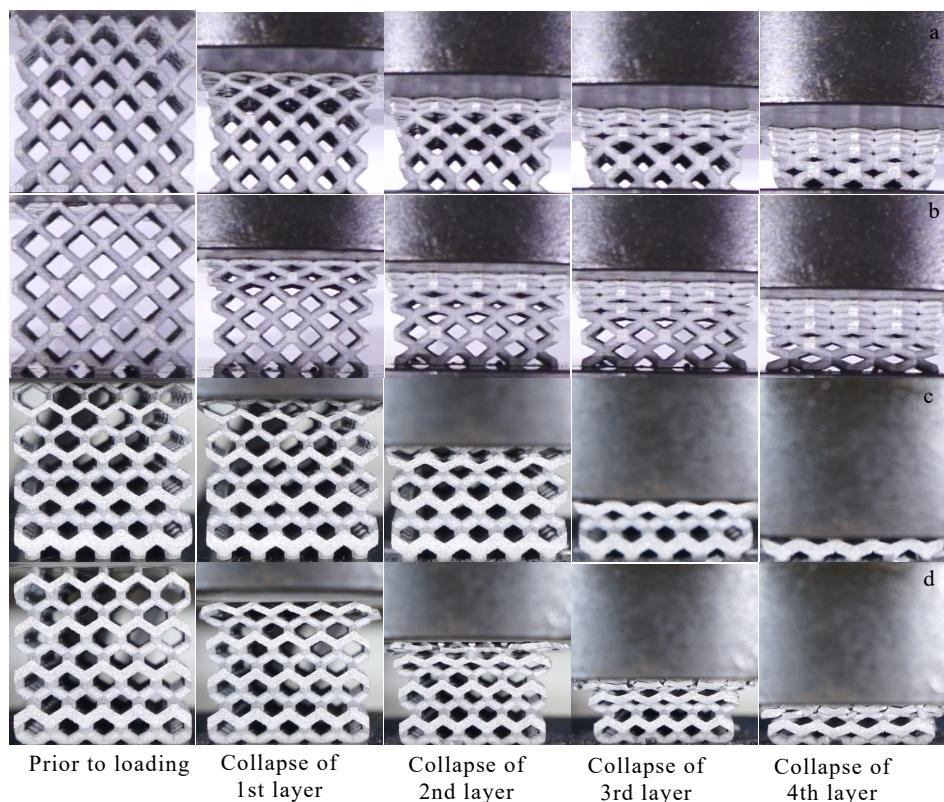


图 6 样品压缩变形情况

Fig.6 Compression deformation of samples: (a) bcc1-3; (b) bcc1.5-2.5; (c) Diam1-3; (d) Diam1.5-2.5

剧烈的波动。相较于均匀结构快速而随机的剪切变形，这种变形因为可预测而被认为是有利的^[17]。同时，结构致密化后的压缩性能接近基础材料的实心结构^[19]，因此应力骤增。

值得注意的是，应力峰值数量与层数并不一致（图 5a）。根据有限元模拟结果（图 7）推断，由于结构各层在压缩方向上同样存在相对密度差异，因此可以根据节点将层再细分为子层，实际压缩变形模式是逐子层压溃，峰值数量对应的实际是子层数（bcc 子层数量为 8，Diam 为 16）。对于 bcc1-3、bcc1.5-2.5 和 Diam1-3，峰值数量与子层数量基本相同，但 Diam1.5-2.5 的峰值数量明显较少。从图 7 不难看出，应变相同时，Diam1-3 顶层的顶层子层发生大变形，其余子层保持稳定，而 Diam1.5-2.5 顶层的所有子层都发生了明显变

形，说明梯度差较大时 Diam 各层变形趋向逐子层压溃，梯度差较小时则更趋向整层整体压溃。分析原因为，梯度差大意味着上下子层承载能力差距大，上子层变形时的载荷只能引发下子层较小的变形，但小梯度差结构上下子层承载能力相似，因此同时变形。这就解释了 Diam1.5-2.5 的峰值数量较少的原因，曲线上明显的起伏数量与层数一致也为该结论提供了佐证。

从图 8 可以看出，断裂主要发生在边缘处的节点上，而内部支杆完整性较好。节点的断裂与节点处的 Von Mises 应力集中有关，并且边缘单胞部分节点无约束^[11]，在压缩时变形较大所以更容易发生断裂。而致密化后，bcc 梯度结构依然比较完整，Diam 梯度结构则较为碎散，大量支杆从结构上脱离，表明其节点断裂更为彻底。

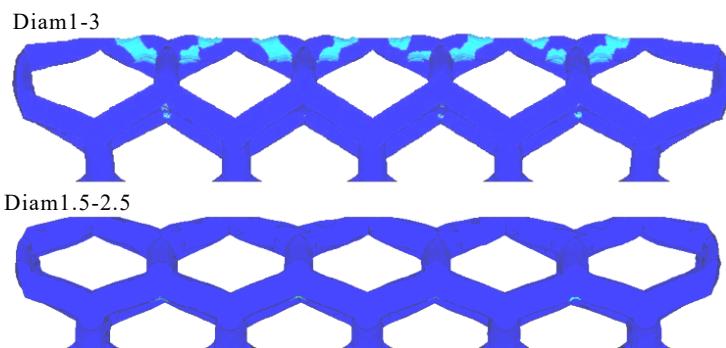


图 7 应变为 0.07 时 Diam1-3 和 Diam1.5-2.5 顶层 FEA 变形图

Fig.7 FEA deformation diagrams of the top layer of Diam1-3 and Diam1.5-2.5 at strain of 0.07

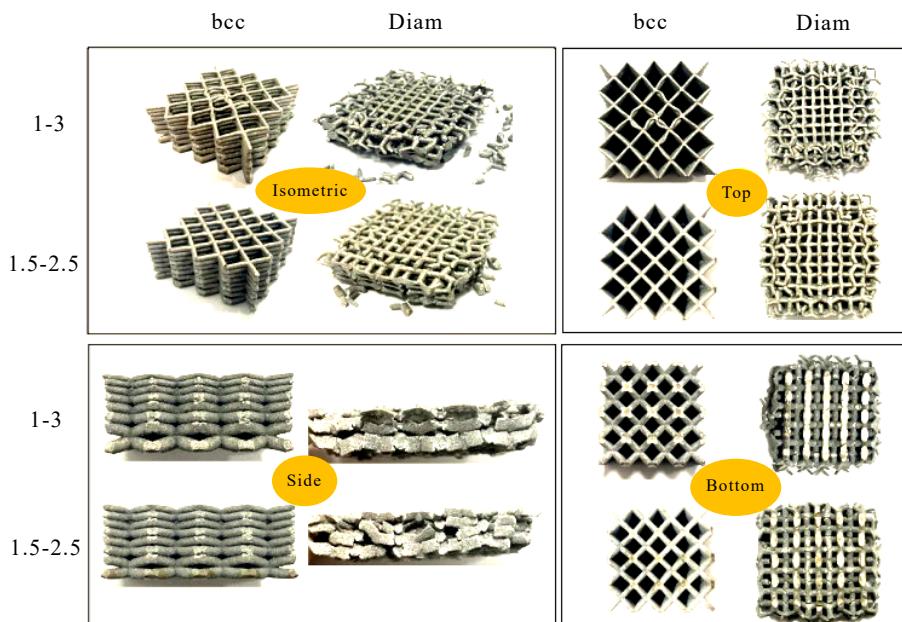


图 8 梯度点阵结构样品压缩到致密化后的照片

Fig.8 Photographs of gradient lattice structure samples after the densification

如图 9 所示, bcc 梯度结构平台阶段的曲线都较为稳定, 而 Diam1.5-2.5 曲线平台阶段则存在大幅度起伏。由于 Diam 节点断裂得更加彻底, 这削弱了断裂后节点对结构的约束, 导致压溃结构剩余强度大幅下降, 曲线因此产生较剧烈的波动, 这不利于结构的吸能能力。需注意, Diam1-3 的平台阶段稳定性与 bcc1-3 相近, 这是因为 Diam1-3 的子层数量 2 倍于 bcc1-3, 而 Diam1-3 实际发生逐子层压溃, 当子层压溃后下面的稳定子层能迅速地继续支撑^[15], 结构得到快速而稳定的强度回复, 抵消了节点彻底断裂对曲线稳定性的负面影响。这可以为设计者提供一些理论参考: 通过提高梯度差强化逐子层压溃现象, 一方面可以更精确地控制梯度点阵结构的变形行为, 另一方面可以削弱应力因结构压溃而下降对结构吸能能力的不利影响。

2.3 力学性能分析

梯度点阵结构的压缩模量 E_{latt} 由应力-应变曲线的初始线性段斜率确定, 且以产生 0.2% 残余变形的应力值作为屈服强度 $\sigma_{y,\text{latt}}$, 首个峰值应力作为抗压强度 σ_c ^[15], 致密化应变前的最大的峰值应力作为最大峰值应力 σ_p , 结果见表 5。可以看出, 应变较小时小梯度差结构的力学性能参数(包括: 压缩模量、屈服强度、抗压强度) 高于大梯度差结构, 而应变较大时(最大峰值应力) 则相反, 这是因为小梯度差结构顶层的层相对密度高于大梯度差结构, 底层的层相对密度则相反(图 1)。而当梯度差相同时, Diam 的应力整体高于 bcc(图 9), 显然其力学性能优于 bcc, 考虑到本研究已经排除相对密度、加载条件和边界条件的影响^[26], 可以认为 Diam 和 bcc 单胞构型不同是产生差异的主要原因。

如图 10 所示, 对比单胞构型相同而梯度差不同结构的应力-应变曲线, 发现它们都存在交点, 交点前 1.5-2.5 应力整体高于 1-3, 之后则相反。如图 10a 所

示, bcc 的交点(应变 0.29, 应力 6.04 MPa) 位于第 4 子层峰值和第 5 子层峰值之间。这是因为, 沿着压缩方向, bcc1-3 杆径在这 2 个子层间超过 bcc1.5-2.5, 其子层的承载能力随之超过 bcc1.5-2.5。如图 10b 所示, Diam 的交点(应变 0.3, 应力 7.98 MPa) 明显前移, 即发生于 Diam1-3 的第 5 子层和第 6 子层峰值之间以及 Diam1.5-2.5 第 2 层压溃期间, 此时 Diam1-3 承载子层的杆径仍小于 Diam1.5-2.5。主要原因为: Diam1-3 发生逐子层压溃而获得稳定的强度回复, 而 Diam1.5-2.5 发生整层整体压溃时应力下降幅度较大。同时不难看出, 交点应变前, 1.5-2.5 的应力仅略大于 1-3, 而交点应变后 1-3 的应力超过 1.5-2.5 并且差距迅速增大。分析原因为, bcc 和 Diam 变杆径梯度点阵结构的压缩强度与杆径的关系呈指数大于 1 幂函数的特点: 杆径较小时, 随着杆径的增加结构强度只略微提高, 杆径较大时则会大幅提高。

2.4 吸能特性分析

梯度结构常作为一种吸能材料被用于防护装置中, 所以有必要对几种吸能特性参数进行讨论。其中平台应力 σ_{pl} 的公式如下^[27]:

$$\sigma_{\text{pl}} = \frac{\int_0^{\varepsilon_D} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\varepsilon_D} \quad (5)$$

计算得出平台应力列于表 6, 从图 11a 中可看出 Diam 梯度结构的平台应力大于同梯度差的 bcc 梯度点阵结构, 因为 Diam 的应力整体高于 bcc(图 9)。同时从表 6 可知 Diam 的致密化应变也大于 bcc, 分析原因来自两方面:

(1) 结构特点。压缩方向上(z 向), Diam 单胞各个子层的支杆之间都不共面, 使得压溃时单层的支杆间不易相互挤压, 因此致密化结构高度较低, 致密化应变较高。而如果将 bcc 单胞投影到 xy 平面, 则重合的支杆在压缩方向上都共面, 在压溃时一般会相互挤压。

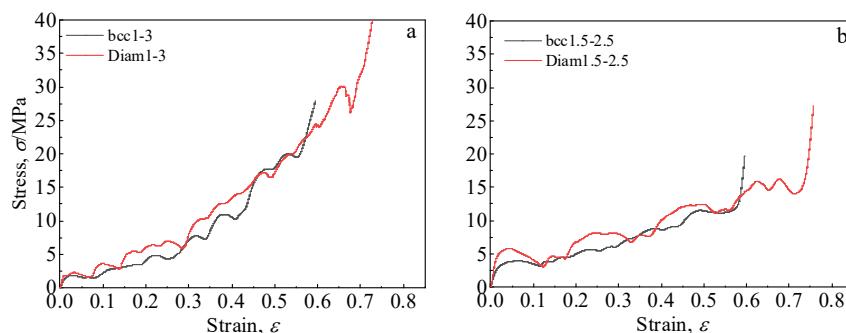


图 9 梯度差为 2 和 1 mm 的梯度点阵结构应力-应变曲线比较

Fig.9 Comparison of stress-strain curves of gradient lattice structure with gradient gaps of 2 mm (a) and 1 mm (b)

表 5 梯度点阵结构力学性能

Table 5 Mechanical properties of gradient lattice structures

Parameter	bcc1-3	bcc1.5-2.5	Diam1-3	Diam1.5-2.5
Compressive modulus, E_{latt} /MPa	146.93±1.18	224.268±6.027	279.995±3.925	390.04±16.73
Yield strength, σ_y , latt./MPa	1.49±0.03	2.52±0.16	1.678±0.142	4.065±0.035
Compressive strength, σ_c /MPa	1.885±0.015	3.89±0.04	2.175±0.075	5.585±0.205
Peak stress, σ_p /MPa	19.86±0.12	11.45±0.07	27.2±2.87	15.315±0.875

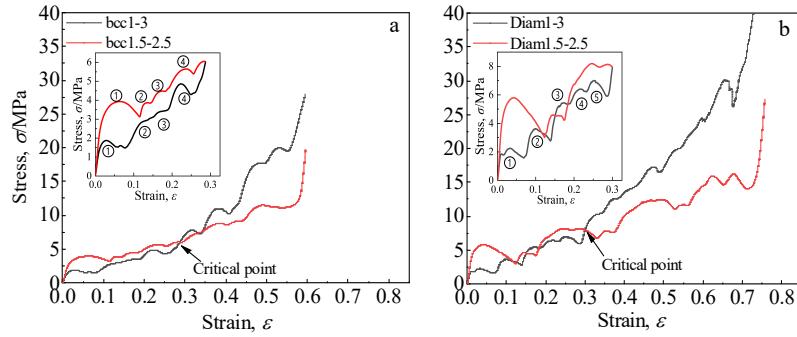


图 10 bcc 和 Diam 梯度点阵结构应力-应变曲线的比较

Fig.10 Comparison of stress-strain curves of bcc (a) and Diam (b) gradient lattice structures

表 6 梯度点阵结构的吸能特性参数

Table 6 Energy absorption characteristic properties of gradient lattice structures

Parameter	bcc1-3	bcc1.5-2.5	Diam1-3	Diam1.5-2.5
Plateau stress, σ_{pl} /MPa	7.98±0.02	6.74±0.04	11.315±1.095	9.08±0.36
Densification strain, ε_D /%	55.96±0.03	57.04±0.34	68.005±1.085	71.48±2.2
Absorbed energy per unit volume, W_v /MJ·m ⁻³	4.465±0.005	3.85±0	7.705±0.865	6.5±0.46
Energy absorption efficiency, E /%	22.485±0.095	33.58±0.2	29.24±0.73	42.39±0.56

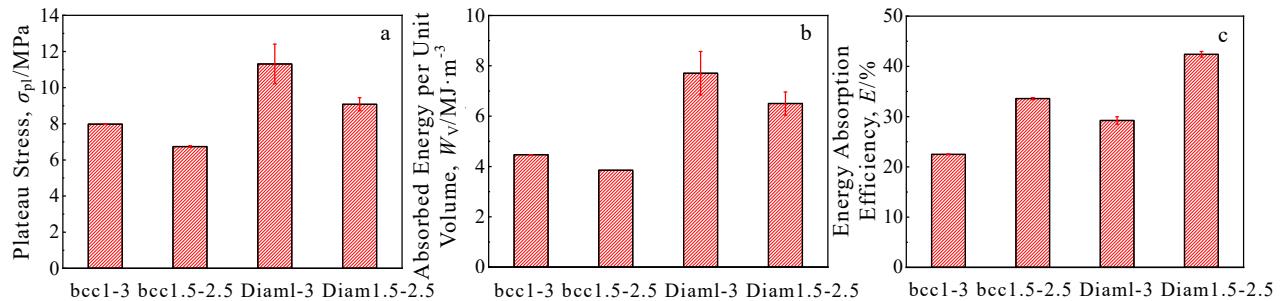


图 11 平台应力, 单位体积吸能量和吸能效率对比

Fig.11 Comparison of plateau stress (a), absorbed energy per unit volume (b) and energy absorption efficiency (c)

(2) 彻底的节点断裂。Diam 边缘处节点完全断裂, 部分支杆从结构上脱离, 已压溃结构因为缺乏节点约束, 导致弱边界的影响增强, 体积更多地向边缘扩展(图 8 中可以明显观察到), 使得致密化结构的高度降低, 因此致密化应变更高。

值得注意的是, 在同相对密度下, bcc 和 Diam 的平台应力均随着梯度差的增大而增大。结合节 2.3 交点及其前后应力差距分析原因为: 对于不同梯度差的结构, 压缩方向上杆径相同时的高度都为结构高度

H 的一半, 因此在不考虑交点前移的情况下, 交点应变固定为致密化应变的 1/2 左右, 而交点前应力差距很小, 因此平台应力的高低主要取决于交点后应力高低。考虑 Diam 结构交点前移的特殊情况, 不难看出该现象只会增加上述分析中平台应力高低的差距, 另一方面, Diam1.5-2.5 各层压溃时较大的应力下降也扩大了这种差距。同时, 如表 6 所示, 单胞构型相同而梯度差不同的结构致密化应变几乎相同, 这表明相对密度相同时, 致密化应变不受梯度差的影响。

通过对压缩应力-应变曲线积分来计算单位体积吸能量^[27], 如式 6 所示, 即应力-应变曲线下的面积(图 12)。

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

梯度点阵结构的单位体积吸能量等于致密化应变 ε_D 前的单位体积吸能量总和, 不难看出其大小取决于平台应力和致密化应变。从图 11b 可以看出, 同梯度差时 Diam 梯度结构的单位体积吸能量高于 bcc 结构, 其中 Diam1-3 单位体积吸能量和 bcc1-3 差距最大, 高出大约 73%。而 Diam1.5-2.5 高出 bcc1.5-2.5 约 69%, 这主要是因为同梯度差时 Diam 具有更高的平台应力和致密化应变。bcc 和 Diam 梯度结构的致密化应变几乎不受梯度差影响, 但平台应力会随着梯度差增大而增大, 因此单位体积吸能量会随着梯度差的增大而增大, 其中 Diam1-3 梯度点阵结构吸能量和 Diam1.5-2.5 差距最大, 高出大约 19%, 而 bcc1-3 高出 bcc1.5-2.5 大约 16%。

综合以上结果发现, 梯度差和单胞构型都会对梯度点阵结构的单位体积吸能量造成巨大影响, 本研究中吸能量最大的梯度结构(Diam1-3)的单位体积吸能量是最小结构(bcc1.5-2.5)的 2 倍。

定义结构实际和理想吸能器单位体积吸能量的比值为吸能效率^[28], 公式如下:

$$E = \frac{\int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma_{\max} \times 100\%} \quad (7)$$

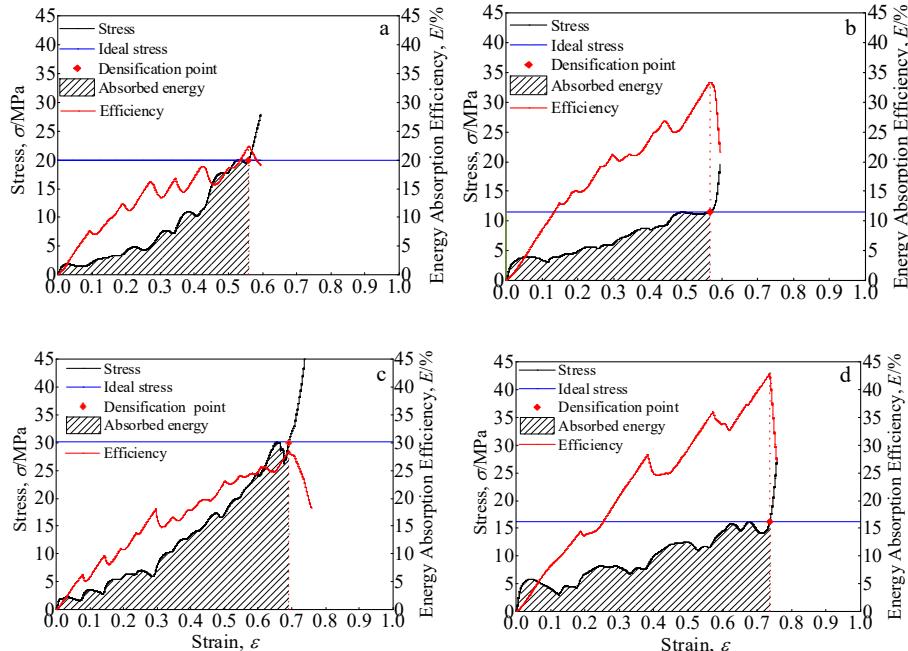


图 12 bcc1-3, bcc1.5-2.5, Diam1-3 和 Diam1.5-2.5 的应力和吸能效率与应变的关系

Fig.12 Stress and energy absorption efficiency versus strain for bcc1-3 (a), bcc1.5-2.5 (b), Diam1-3 (c) and Diam1.5-2.5 (d)

其中, σ_{\max} 是应变 ε 前曲线的最大应力值。非理想的结构致密化时的吸能效率最高, 因为致密化后点阵结构由多孔特性转变为材料实体的压缩特性, 相对不易压缩变形, 致使吸能效率大幅度下降。本研究据此定义吸能效率最高点的应变为致密化应变。

如图 12 所示, 梯度点阵结构的吸能效率等于致密化应变前应力-应变曲线下的面积除以蓝色横线下的面积, 结果列于表 6。如图 11c 所示, 同梯度差时 Diam 的吸能效率高于 bcc, 发现梯度差为 2 mm 时, Diam 的吸能效率高出 bcc 约 30%, 梯度差为 1 mm 时, Diam 的吸能效率高出 bcc 约 26%。但单胞构型相同的情况下, 吸能效率会随着梯度差的增大而降低。

2.5 断口 SEM 分析

通过 SEM 观察支杆变形后的断口表面。如图 13, bcc 支杆节点断面上观察到开孔(opened-up pore)和韧窝, 这说明其发生韧性断裂, 以往研究表明断裂可能从这些开孔的位置发生, 而后继续向外蔓延^[29], 最终导致节点断裂。应强调, 韧窝大多呈等轴状, 根据 González-Velázquez 的研究, 这种韧窝与均匀拉伸应力有关^[30]。Diam 支杆同样发生韧性断裂, 断裂表面为粗糙区域和光滑区域的组合, 二者面积大致相同且有清晰的分界线。其中粗糙区域与 bcc 断口类似, 也由开孔和韧窝组成, 而

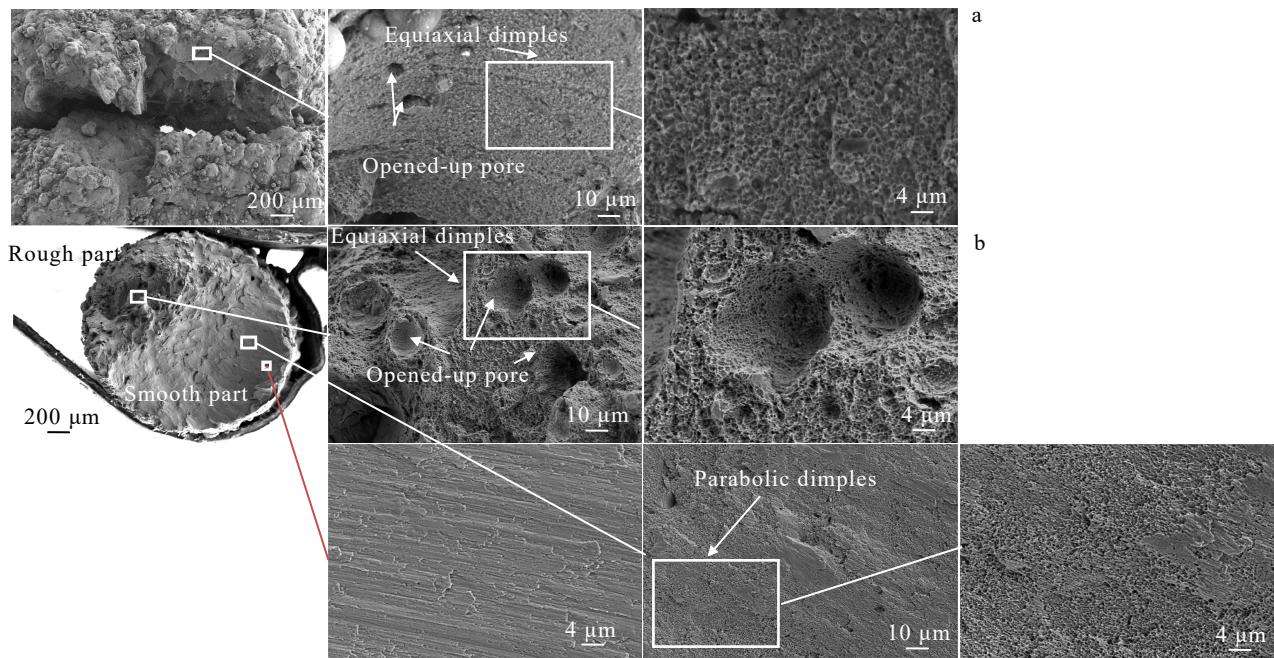


图 13 支杆节点断口表面的 SEM 照片

Fig.13 SEM micrographs of a strut fracture surface from nodes: (a) bcc and (b) Diam

光滑区域则显示出明显的剪切断裂特征^[23]，同时光滑区域的韧窝呈抛物线状，González-Velázquez 认为这种韧窝可能与剪切应力有关^[30]，这说明导致 Diam 节点断裂的原因是拉伸和剪切应力的耦合。分析断裂过程为，支杆在拉伸载荷的作用下首先在内部孔区域发生拉伸断裂，形成裂纹，此时较大的局部剪切应力集中在裂纹处，使其迅速扩大，最终导致节点彻底断裂。本研究认为这是导致 Diam 节点断裂比 bcc 更彻底的主要原因。

3 结 论

1) Diam 梯度点阵结构压缩时的强度和刚度优于同梯度差和相对密度的 bcc 梯度点阵结构。Diam 结构的压缩模量、屈服强度、抗压强度和最大峰值应力均高于 bcc 结构。

2) Diam 梯度点阵结构压缩时的吸能特性优于同梯度差和相对密度的 bcc 梯度点阵结构。Diam 的平台应力和致密化应变均高于 bcc，因此其单位体积吸能量超过 bcc，同时具有更高的吸能效率。

3) 提高梯度差能有效提升梯度点阵结构的吸能能力。平台应力随着梯度差增加而增加，但致密化应变不受其影响，因此单位体积吸能量得到提高，Diam1-3 相较 Diam1.5-2.5 提高 19%，bcc1-3 相较 bcc1.5-2.5 提高 16%。

参考文献 References

- [1] Smith M, Guan Z, Cantwell W J. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2013, 67: 28
- [2] Li Shuang, Yang Jinshui, Schmidt Rüdiger et al. *Marine Structures*[J], 2021, 75: 102845
- [3] Zhang Siyuan, Yang Fan, Li Puahao et al. *Engineering Structures*[J], 2022, 263: 114384
- [4] Nune K C, Kumar A, Misra R D K et al. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*[J], 2017, 150: 78
- [5] Zheng Zihao, Yi Yuan, Bai Xiaohui et al. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2021, 173: 121254
- [6] Li Xiaodong, Wu Linzhi, Ma Li. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*[J], 2016, 35(16): 1260
- [7] Sypeck D J, Wadley H N G. *Journal of Materials Research*[J], 2001, 16: 890
- [8] Wei Xingyu, Li Dafu, Xiong Jian. *Composites Science and Technology*[J], 2019, 184: 107878
- [9] Bai Long, Xu Yue, Chen Xiaohong et al. *Materials & Design*[J], 2021, 211: 110140
- [10] Zhang Peng, Bilitetu, Qi Dexing et al. *Science China Technological Sciences*[J], 2021, 64(10): 2220
- [11] Li Chuanlei, Lei Hongshuai, Liu Yabo et al. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2018, 45: 389
- [12] Xiong Yinze, Gao Ruining, Zhang Hang et al. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*[J],

- 2020, 104: 103673
- [13] Fan Shijing(樊世婧), Liu Meishuai(刘梅帅), He Bo(何博). *Materials China*(中国材料进展)[J], 2023, 42(11): 865
- [14] Santorinaios M, Brooks W, Sutcliffe C J et al. *High Performance Structures and Materials III*[C]. Southampton: WIT Press, 2006: 481
- [15] Zhao Miao, Zhang David Z, Liu Fei et al. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2020, 167: 105262
- [16] Al-Saedi D S J, Masood S H, Faizan-Ur-Rab M et al. *Materials & Design*[J], 2018, 144: 32
- [17] Choy S Y, Sun C N, Leong K F et al. *Materials & Design*[J], 2017, 131: 112
- [18] Maskery I, Aboulkhair N T, Aremu A O et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2016, 670: 264
- [19] Bai Long, Gong Cheng, Chen Xiaohong et al. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2020, 182: 105735
- [20] Yang Lei, Wu Siqi, Yan Chunze et al. *Additive Manufacturing*[J], 2021, 46: 102214
- [21] Zhang Xiangyu, Yan Xingchen, Fang Gang et al. *Additive Manufacturing*[J], 2020, 32: 101015
- [22] Zadpoor A A. *Acta Biomaterialia*[J], 2019, 85: 41
- [23] Liu Fei, Zhang David Z, Zhang Peng et al. *Materials*[J], 2018, 11(3): 374
- [24] Wang Peng, Yang Fan, Ru Dongheng et al. *Materials & Design*[J], 2021, 210: 110116
- [25] Zhong Tianlin, He Ketai, Li Huaxue et al. *Materials & Design*[J], 2019, 181: 108076
- [26] Gibson L J, Ashby M F. *Cellular Solids: Structure and Properties*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997
- [27] Lei Hongshuai, Li Chuanlei, Meng Jinxin et al. *Materials & Design*[J], 2019, 169: 107685
- [28] Miltz Joseph, Ramon Ori. *Polymer Engineering & Science*[J], 1990, 30(2): 129
- [29] Qiu Chunlei, Sheng Yue, Adkins Nicholas J E et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2015, 628: 188
- [30] González-Velázquez Jorge Luis. *Fractography and Failure Analysis*[M]. Cham: Springer-Verlag Press, 2018: 65

Effect of Cell and Structural Parameter on Compression Properties of SLMed Gradient Lattice Structures

Zhang Bo^{1,2}, Wang Guowei¹, Sun Mingyan¹, Qin Yu¹, Shen Xianfeng¹, Wang Chao¹, Huang Shuke¹, Fang Hui²

(1. Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(2. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Gradient lattice structure is commonly used as energy-absorbing components in aerospace, national defense and medical fields due to its excellent energy absorption ability when compressed. However, with the development of modern industry, the engineering field has put forward higher requirements for its compression properties. To achieve further optimization, it is necessary to study the relationship between compression properties and cell, structural parameters. Two AlSi10Mg rod-diameter-change gradient body-centered cubic (bcc) and diamond (Diam) structures with different gradient gaps were formed by selective laser melting (SLM) to investigate the effect of gradient gap on the compression properties combined with finite element analysis (FEA), and the two cells were compared. The results of quasi-static uniaxial compression experiments show that the absorbed energy per unit volume increases significantly with the increase in gradient gap at the same relative density with the same cell. The compressive modulus, yield strength, compressive strength and peak stress of Diam gradient lattice structure are higher than those of bcc structure when the gradient gap and relative density are the same, and its absorbed energy per unit volume and energy absorption efficiency are also higher than those of bcc structure.

Key words: selective laser melting; gradient lattice structure; compression property; finite element analysis

Corresponding author: Wang Guowei, Ph. D., Senior Engineer, Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, P. R. China, E-mail: gwwang13s@alum.imr.ac.cn