

# 选区激光熔化成形点阵结构的各向异性对力学性能的影响

吴鸿飞<sup>1</sup>, 王维荣<sup>2</sup>, 王国伟<sup>1</sup>, 孙朝明<sup>1</sup>, 张文康<sup>1</sup>, 沈显峰<sup>1</sup>, 陈金明<sup>1</sup>

(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. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 选区激光熔化技术 (selective laser melting, SLM) 成形的金属点阵结构由于具有结构设计自由度大、轻量化、缓冲吸能等优势, 在航空航天等领域具有广泛的工程应用前景, 然而对其力学性能的研究不够充分。本研究设计了不同方向的体心立方 (body-centered cubic, bcc) 和金刚石 (Dia) 2 种晶胞点阵结构, 基于 SLM 技术成形了 AlSi10Mg 点阵结构, 并对成形试样进行了压缩试验, 结合有限元分析 (finite element analysis, FEA) 研究了点阵结构的各向异性对其压缩响应和吸能特性的影响。结果表明, 2 种点阵结构均存在明显的各向异性。在相对密度基本一致的情况下, 点阵结构方向从 0° 到 45°, 随着角度的增大, 屈服强度明显增大, bcc 点阵结构的各向异性对其压缩屈服强度的影响更加明显, Dia 点阵结构的屈服强度明显高于 bcc 点阵结构。不同方向点阵结构的比吸能 (specific energy absorption, SEA) 存在明显差异, 点阵结构方向从 0° 到 45°, 随着角度的增大, SEA 明显增大, Dia 点阵结构的 SEA 明显高于 bcc 点阵结构。不同方向点阵结构的碰撞载荷效率 (crash load efficiency, CLE) 存在明显差异, bcc 点阵结构在 0° 方向取得最大值 1.07, 并随着点阵结构角度的增大逐渐减小, Dia 点阵结构 CLE 随着点阵结构角度的增大而增大, 并在 45° 方向上取得最大值 1.01。

**关键词:** 选区激光熔化; 点阵结构; 压缩性能; 吸能特性

中图分类号: TN249; TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)04-1397-09

随着航空航天、国防军工等领域的快速发展, 对轻量化的吸能支承结构的性能要求越来越高, 不仅需要轻量化, 同时对其强度和吸能等力学性能提出了更高要求。

金属点阵结构是近年来新兴的一种轻质多功能材料, 具有结构设计自由度大、成形零件具有轻量化、缓冲吸能减振等优势, 在航空航天等领域具有广泛的工程应用前景。与实体材料相比不仅减轻了构件的质量, 同时具有更好的减震吸能性能, 实现了结构-功能一体化<sup>[1-5]</sup>。其传统制造方法有熔模铸造、冲压、拉伸网折叠、挤压线切割和搭装拼接等。传统制造方法存在的主要问题是制造成本高, 周期长且难以成形复杂精密的点阵结构, 使得点阵结构的结构设计自由度严重受到成形工艺的限制, 极大地影响了点阵结构的工程应用<sup>[6,7]</sup>。

增材制造 (additive manufacturing, AM) 技术是基于离散堆积原理, 根据零件三维数据可直接将原材料快速精确成形为实体零件的先进制造技术, 具有数字化成形、成形精度高、材料利用率高、研发周期短等特点, 与传统的减材制造相比, 具有缩短了制造周期、

成形的复杂度不受限制和能够释放设计师设计的自由度等优势<sup>[8,9]</sup>。选区激光熔化作为增材制造技术的典型工艺, 其工作原理是利用高能束激光热源, 将粉末逐层熔化后凝固成形, 可直接成形设计的三维模型, 制造出复杂精密的金属零件, 因此适用于复杂精密点阵结构的成形<sup>[10-12]</sup>。

据报道, Crupi 等人<sup>[13]</sup>研究了 bcc 点阵结构的压缩性能与吸能特性, 发现 bcc 点阵结构具有较高的吸能能力和承载能力, 随着杆径、杆长比和相对密度的增加, 点阵结构的力学性能有所提高, 晶胞尺寸的增加会降低点阵结构的力学性能, 理论分析与压缩试验结果非常吻合, 可通过理论计算有效地预测这种点阵结构的力学性能。Smith 等人<sup>[14]</sup>通过有限元仿真方法对 bcc 和 bcc-z 点阵结构的压缩响应进行了预测, 研究表明, 基于 bcc 和 bcc-z 单元的点阵结构的准静态响应可以用三维连续单元和梁单元 2 种类型的有限元模型精确地描述。对初始刚度、屈服强度、平台应力、能量吸收和致密应变进行了预测, 并表明在一系列单元格

收稿日期: 2021-04-06

基金项目: NSAF 联合基金 (U1930207); 中国工程物理研究院创新发展基金 (CX20210005)

作者简介: 吴鸿飞, 男, 1996 年生, 硕士生, 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: hfwu96@126.com

尺寸和几何形状上与实验结果相似。Al-Saedi 等人<sup>[15]</sup>对 F2 bcc 功能梯度点阵结构和均匀点阵结构的力学性能和能量吸收能力进行了研究和对比,发现功能梯度点阵结构具有更高的能量吸收,并建立了公式用来预测 F2 bcc 点阵结构的力学性能。Lei 等人<sup>[16]</sup>利用 SLM 技术成形了 bcc 和 bcc-z 2 种点阵夹芯板结构,通过 X 射线微型电子计算机断层扫描 (X-ray micro-computed tomography,  $\mu$ -CT) 技术获得了成形试件的真实几何信息,建立了考虑了几何缺陷的有限元模型,并研究了缺陷和层数对结构力学性能和吸能特性的影响,研究表明随着层数的增加,致密应变和碰撞载荷效率增大,比吸能由于边界条件和破坏模式的影响而逐渐降低。Li 等人<sup>[17]</sup>研究了层数和单元数对点阵夹芯板准静态压缩响应的影响,并提出了一种预测 bcc-z 多层点阵夹芯板压缩模量和初始破坏强度的理论模型,发现模量和强度随层数的增加而显著降低,层间渐进破坏是主要破坏模式。

目前增材制造技术成形的点阵结构已经得到了广泛的应用,但是如何针对不同的应用场景和设计需求选择合适的点阵结构方向等几何特征,以及如何评价点阵结构力学性能是否满足设计要求,缺乏系统的研究和依据。基于此,本工作以 bcc 和 Dia 2 种典型晶胞点阵结构为研究对象,基于选区激光熔化技术成形了 AlSi10Mg 点阵结构,研究了点阵结构的各向异性对其力学性能的影响,为点阵结构在轻量化结构和缓冲吸能结构等应用的优化设计提供参考。

## 1 实验

### 1.1 单元几何模型

本实验所用的 2 种单元为 bcc 和 Dia 晶胞单元,2 种单元几何参数如图 1 所示,其中图 1a 为 bcc 晶胞单元,图 1b 为 Dia 晶胞单元。其中 2 种晶胞的尺寸  $L=10.0$  mm,支杆截面直径  $r=2.0$  mm。

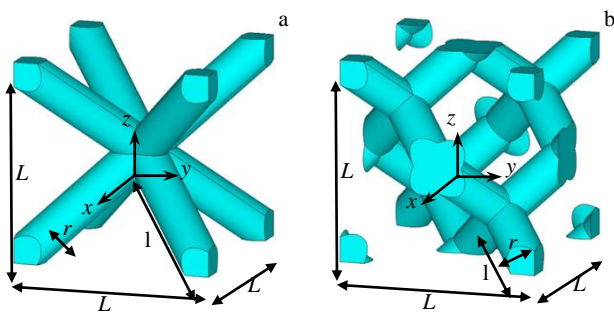


图 1 bcc 和 Dia 单元几何参数

Fig.1 Geometrical parameters of bcc (a) and Dia (b) unit cells

相对密度  $\bar{\rho}$  定义为晶胞单元宏观密度与基体材料密度的比值<sup>[18]</sup>:

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

以平台段起始应力或初始峰值应力作为压缩屈服强度<sup>[19,20]</sup>。应力、应变的计算方法分别为<sup>[21]</sup>:

$$\varepsilon = \Delta L / H \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{w_1 w_2} \quad (3)$$

式中,  $\Delta L$  为压缩位移量,  $H$  为试样压缩方向高度,  $F$  为压缩位移为  $\Delta L$  时对应的反力,  $S$  为试样压缩底面面积,  $w_1$  和  $w_2$  为试样压缩底面边长。

### 1.2 样品制备与测试

本次实验设计的不同方向点阵结构的模型如图 2 所示。将图 1 所示 2 种晶胞单元在三维方向阵列,2 种点阵结构的单元尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ,杆径为  $2.0 \text{ mm}$ ,壳厚度为  $0.75 \text{ mm}$ 。2 种点阵结构的 4 个样品均为在第一个点阵结构的基础上旋转了  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ 。bcc 点阵结构的尺寸为  $40 \text{ mm} \times 41.5 \text{ mm} \times 41.5 \text{ mm}$ , Dia 点阵结构的尺寸为  $40 \text{ mm} \times 36.86 \text{ mm} \times 36.86 \text{ mm}$ 。

本次实验成形试样采用雾化 AlSi10Mg 合金粉末材料,粉末粒径分布在  $15 \sim 50 \mu\text{m}$ ,平均粒径为  $30 \mu\text{m}$ ,图 3 为粉末的扫描电子显微镜 (SEM) 形貌。可以看出,AlSi10Mg 粉末基本上呈规则的球形,粉末表面较为粗糙,部分粉末表面粘附卫星粉,粉末的化学成分见表 1。

实验所用成形设备为 EOS M290 (德国 EOS 股份有限公司)。成形工艺参数为:激光功率  $370 \text{ W}$ ,扫描速度  $1300 \text{ mm/s}$ ,扫描间距  $0.19 \text{ mm}$ ,层厚  $30 \mu\text{m}$ 。在成形过程中,通过循环氩气使成形腔内的氧含量低于  $0.1\%$ 。成形的试样固结于铝基板上面,打印完成后,通过电火花线切割技术将试样从基板上去除,然后用压缩空气和超声去除样品表面附着粉末。

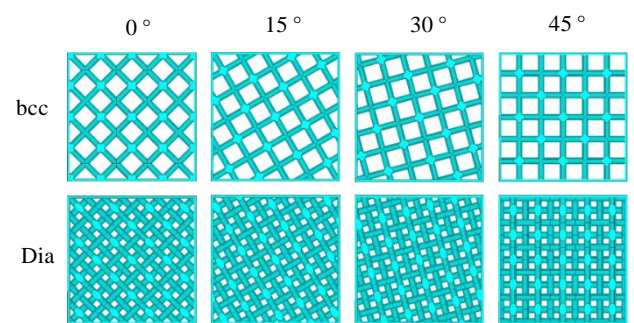


图 2 点阵结构试样模型图

Fig.2 Diagram of lattice structure samples model

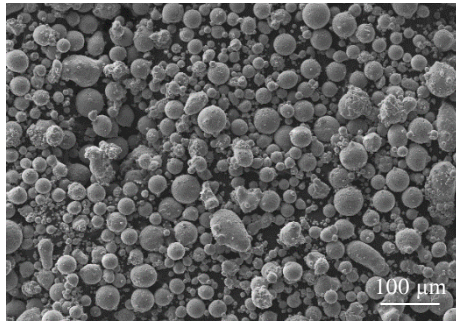


图 3 AlSi10Mg 粉末形貌

Fig.3 Morphology of AlSi10Mg powder

表 1 AlSi10Mg 粉末化学成分

Table 1 Chemical composition of AlSi10Mg 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.

试样成形后进行热处理，热处理方法为随炉升温至 300 °C 并保温 2 h，然后炉冷至室温。对样品进行了尺寸、体积、质量和密度的测试，最后进行了压缩实验。使用 MTS-810 万能材料试验机对点阵结构的准静态压缩力学性能进行了测试。试验机压头进给速度为 4 mm/min，卸载速度为 8 mm/min，采样频率为 50 Hz，每种点阵结构分别测试 2 个样品。

### 1.3 有限元仿真分析

本研究用 ANSYS 软件对点阵结构进行了准静态压缩仿真模拟。仿真模型与图 2 所示试样成形模型一致，材料模型为各向同性塑性硬化模型。在相同成形工艺下成形标准 AlSi10Mg 材料的拉伸试件，得到该材料在该成形工艺下的工程应力-工程应变曲线，然后换算得到真应力-真应变曲线，其中应力-应变曲线如图 4 所示。根据该真应力-真应变曲线设置材料属性，其中弹性模量设为  $E=70\text{ GPa}$ ，泊松比为 0.33。利用四面体单元 (SOLID185) 对点阵结构模型进行了网格划分，网格划分情况如图 5 所示。施加载荷为位移载荷，位移加载量为点阵结构模型在压缩方向高度的 50%。

## 2 结果与讨论

### 2.1 成形试样

图 6 所示为成形的不同方向点阵结构试样，试样的结构参数见表 2。可以看出，点阵结构具有较好的成形效果，支杆及连接节点处均没有明显缺陷。

通过阿基米德排水法<sup>[22]</sup>，测试了成形的不同方向点阵结构的体积和密度。其中在相同工艺参数下成形的实心试样的密度为  $2.65\text{ g/cm}^3$ ，作为基体材料密度。

### 2.2 点阵结构力学性能分析

通过压缩实验得到了点阵结构的力-位移曲线，并换算得到其应力-应变曲线，从试样的应力-应变图中可得不同方向点阵结构的屈服强度。

本次实验每个方向的点阵结构均有 2 个平行样品，2 个样品分别压缩到应变为 0.5 和完全致密，图 7 所示为 2 种不同方向点阵结构压缩曲线对比，为对比不同方向点阵结构之间的压缩性能差异，每个样品选用压缩到致密的曲线进行对比。图 8 所示为仿真和实验屈服强度对比。图 9 所示为不同方向 bcc 点阵结构的 2 次压缩曲线对比，图 10 所示为不同方向 Dia 点阵结构的 2 次压缩曲线对比。

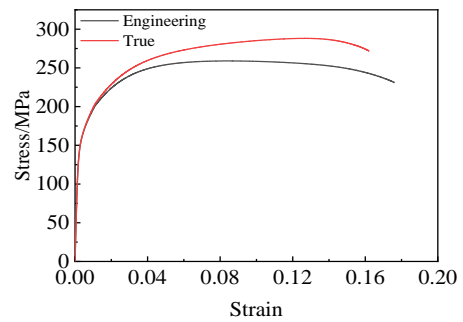


图 4 单轴拉伸试样的应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves for uniaxial tensile sample

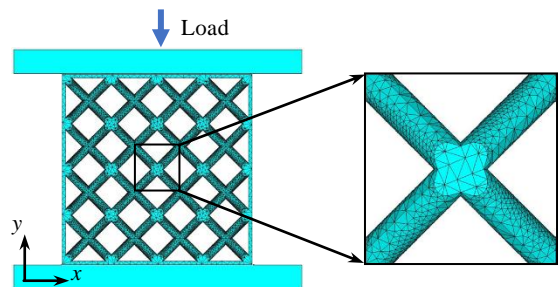


图 5 点阵结构仿真模型

Fig.5 Simulation model of lattice structure

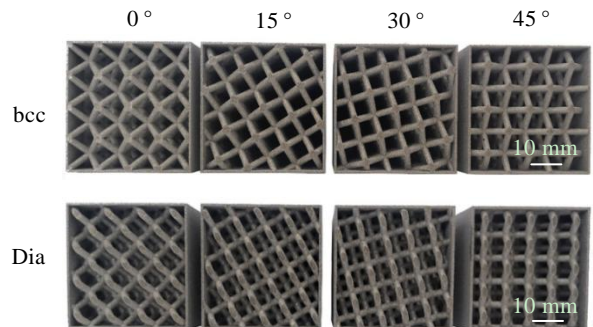


图 6 点阵结构试样宏观照片

Fig.6 Macro images of lattice structure samples

表 2 点阵结构样品实测尺寸、质量和密度

Table 2 Measured dimensions, mass and density of the lattice structure samples

Type	Angle	Build direction/mm	x-direction/mm	y-direction/mm	Mass/g	Density/g cm <sup>-3</sup>	Relative density
bcc	0°	40.35	41.72	41.71	43.15	0.61	0.23
	15°	40.35	41.72	41.70	43.12	0.61	0.23
	30°	40.35	41.72	41.72	43.69	0.62	0.23
	45°	40.33	41.70	41.72	40.10	0.57	0.22
Dia	0°	40.40	37.03	37.04	34.81	0.63	0.24
	15°	40.34	37.05	37.05	34.75	0.63	0.24
	30°	40.34	37.04	37.06	34.87	0.63	0.24
	45°	40.33	37.04	37.08	34.82	0.63	0.24

可以看出，2 个平行样品的压缩曲线基本一致，说明设计的点阵结构具有较好的可重复性，力学性能稳定。点阵结构试样的压缩曲线，可分为线弹性阶段、弹塑性阶段、塑性变形与破坏阶段以及致密阶段 4 个阶段。从图 7 可以看出，对于 2 种点阵结构，点阵结构方向从 0°到 45°，随着角度的增大，点阵结构的强度有逐渐增大的趋势，特别是在线弹性阶段，随着角度的增大，点阵结构的屈服强度明显增大。在塑性变形和破坏阶段，考虑由于包壳的破坏具有一定的随机性，使得点阵结构的压缩曲线出现没有明显规律的波动。总的来说，对于 2 种点阵结构，点阵结构方向从 0°到 45°，随着角度的增大，点阵结构的压缩性能逐渐

提高。将实验结果与仿真结果进行了对比，不同方向点阵结构的仿真和实验屈服强度见表 3。从图 8 中 2 种点阵结构的仿真和实验屈服强度对比可以看出，点阵结构的方向从 0°到 45°，随着角度的增大，2 种点阵结构的屈服强度有明显的提高。从实验结果可以看出，对于 bcc 点阵结构，0°方向点阵结构的屈服强度为 10.44 MPa，45°方向点阵结构的屈服强度为 17.04 MPa，屈服强度提高了约 63%。对于 Dia 点阵结构，0°方向点阵结构的屈服强度为 17.50 MPa，45°方向点阵结构的屈服强度为 20.59 MPa，屈服强度提高了约 18%。可以看出点阵结构方向相同时 Dia 点阵结构的屈服强度要明显高于 bcc 点阵结构，但随着方向的变化，bcc

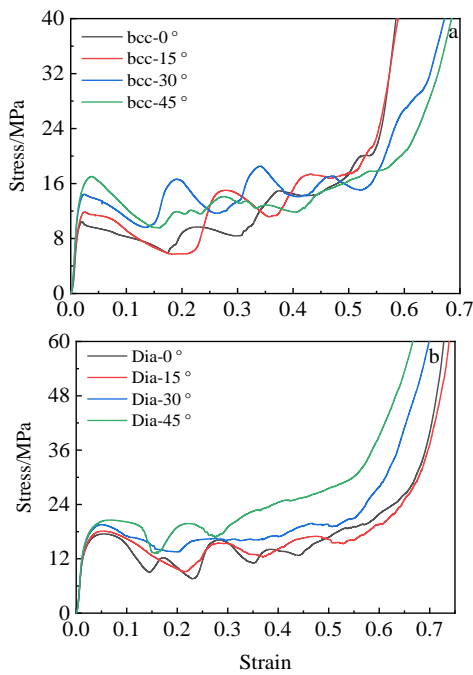


图 7 不同方向点阵结构的压缩曲线

Fig.7 Compressive curves of bcc (a) and Dia (b) lattice structures in different directions

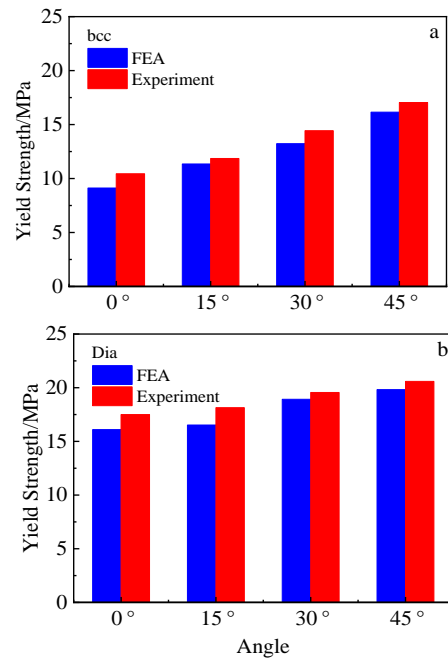


图 8 不同方向点阵结构的仿真与实验屈服强度对比

Fig.8 Comparison of yield strength between simulation and experiment of bcc (a) and Dia (b) lattice structures in different directions



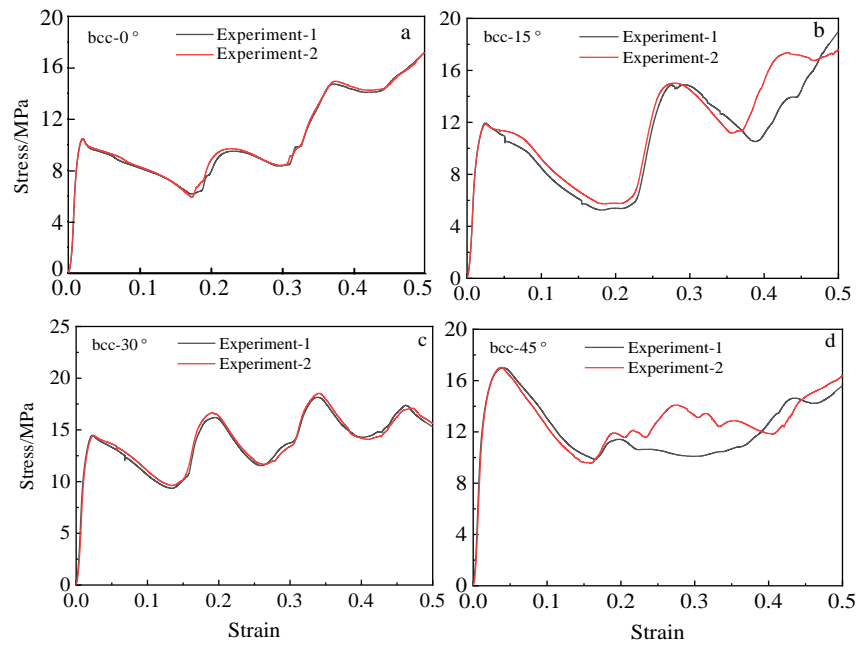


图 9 不同方向 bcc 点阵结构的压缩曲线

Fig.9 Compression curves of bcc lattice structures in different directions: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, and (d) 45°

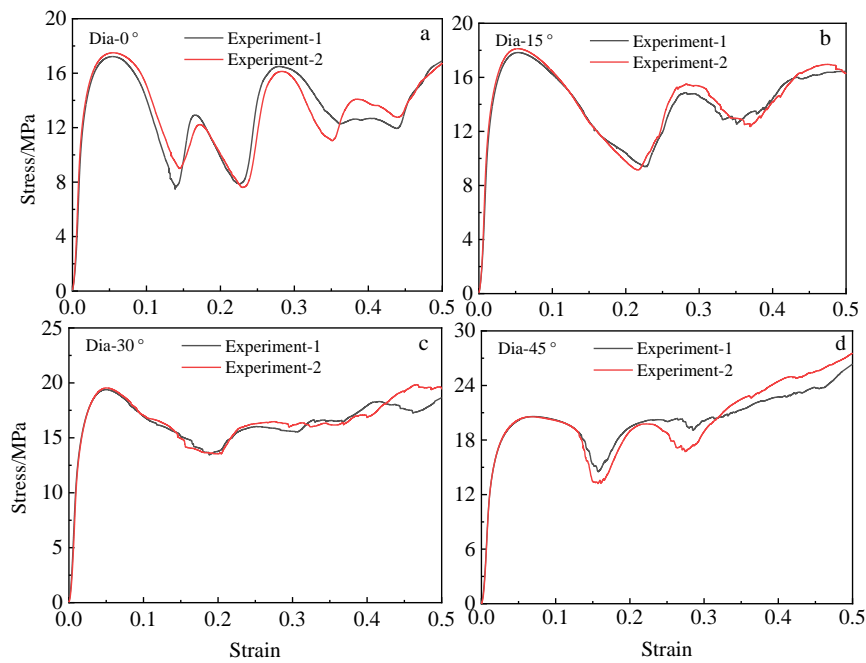


图 10 不同方向 Dia 点阵结构的压缩曲线

Fig.10 Compression curves of Dia lattice structures in different directions: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, and (d) 45°

表 3 不同方向点阵结构的仿真和实验屈服强度

Table 3 Simulation and experimental yield strength of lattice structures in different directions

Type	0°		15°		30°		45°	
	bcc	Dia	bcc	Dia	bcc	Dia	bcc	Dia
Experimental yield strength/MPa	10.44	17.50	11.86	18.14	14.43	19.56	17.04	20.59
Simulation yield strength/MPa	9.12	16.10	11.35	16.53	13.23	18.92	16.15	19.82

点阵结构的屈服强度的增幅较大, 说明通过改变点阵结构方向的方法可以有效提高 2 种点阵结构的屈服强度, 并对 bcc 点阵结构的提高更加显著。

对比仿真与实验结果可以看出, 仿真结果与实验结果相比误差在 20% 以内, 仿真结果与实验的吻合度较高, 可通过有限元仿真模拟预测点阵结构的压缩性能, 并分析不同方向点阵结构的力学性能差异。

图 11 所示为 2 种点阵结构仿真和实验变形结果对比。可以看出, 对于 bcc 点阵结构, 0° 方向点阵结构层间变形较为均匀, 上下底面支杆受到外壳影响变形较小, 随着角度的增大由于在压缩方向上点阵结构的一致性逐渐变差, 可以看出点阵结构变形的均匀性变差, 同时支杆的变形和破坏具有一定的随机性。对于 Dia 点阵结构, 可以看出随着角度的增大, 点阵结构变形的均匀性逐渐变好。同时可以看出, 外壳的变形与破坏具有一定的随机性。仿真和实验结果基本吻合, 通过有限元仿真方法可以对点阵结构的压缩变形模式进行预测。

### 2.3 吸能特性分析

bcc 和 Dia 点阵结构作为典型的点阵结构, 不仅在比刚度和比强度等方面表现出优异的力学性能, 同时也具有优良的吸能特性<sup>[13]</sup>。对于点阵结构的吸能特性的评估指标较多, 一个高质量的吸能零件应该平衡多个指标参数。其中, 单位体积吸收的能量可以通过计算应力-应变曲线下的面积得到<sup>[16]</sup>:

$$U_v = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon \quad (4)$$

比吸能定义为点阵结构在压缩应变为致密应变  $\varepsilon_{cd}$  时单位质量吸收的能量( $U_M$ )<sup>[18]</sup>, 可表示为:

$$U_M = \frac{\int_0^{\varepsilon_{cd}} \sigma d\varepsilon}{\rho} \quad (5)$$

吸能效率为材料或结构吸收的能量与理想吸收的能量之比。在某一应变下的效率参数  $\eta$  可以表示为<sup>[16]</sup>:

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

其中,  $\sigma_{ps}$  为给定应变下的峰值应力, 致密应变  $\varepsilon_{cd}$  定义为吸能效率达到最大时的应变。

点阵结构在线弹性阶段吸能较少, 主要在平台段吸收能量, 因此多孔材料的能量吸收能力和特性主要取决于平台应力的大小和长度, 平台应力  $\sigma_{pl}$  定义为<sup>[16]</sup>:

$$\sigma_{pl} = \frac{\int_0^{\varepsilon_{cd}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\varepsilon_{cd}} \quad (7)$$

碰撞载荷效率(CLE)表示为平台应力与初始峰值应力之比, 反应了载荷-位移曲线的均匀性, CLE 可表示为<sup>[16]</sup>:

$$CLE = \frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{pk}} \quad (8)$$

其中,  $\sigma_{pk}$  为初始峰值应力。

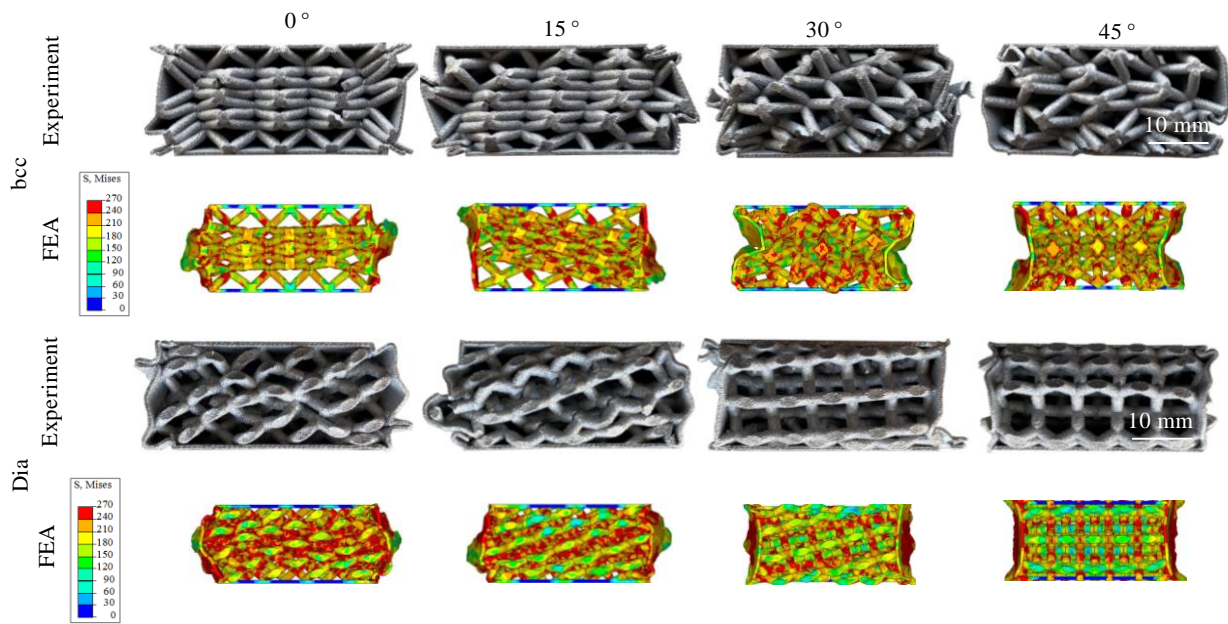


图 11 不同方向点阵结构的实验与仿真变形对比

Fig.11 Deformation comparison between experimental and simulation results of lattice structures in different directions

根据图 7 所示的压缩曲线，可计算得到点阵结构的吸能曲线和吸能效率曲线，图 12 所示为点阵结构的应力-应变，吸能-应变和吸能效率-应变曲线。图 13 所示为 2 种点阵结构的吸能特性对比，具体的参数值见表 4。

通过对比发现，在相对密度基本一致的情况下，点阵结构方向从 0° 到 45°，随着角度的增大，2 种点阵结构的比吸能(SEA)明显增大。其中 bcc 点阵在 0° 方向时的 SEA 为 9.66 J/g，在 45° 方向时的 SEA 为 13.04 J/g，SEA 提高了约 35%，Dia 点阵结构在 0° 方向时的

SEA 为 12.44 J/g，在 45° 方向时的 SEA 为 17.66 J/g，SEA 提高了约 42%，说明随着点阵结构角度的增大，其吸能能力逐渐增大。点阵结构方向相同，Dia 点阵结构的 SEA 明显高于 bcc 点阵结构。bcc 点阵结构在 0° 方向上的 CLE 取得最大值 1.07，随着点阵结构角度的增大其 CLE 逐渐减小。Dia 点阵结构的 CLE 随着点阵结构角度的增大而增大，在 45° 方向上其 CLE 取得最大值 1.01，Dia 点阵结构在 45° 方向时吸能特性最为稳定。2 种不同方向点阵结构的致密应变基本保持在 0.55 左右。

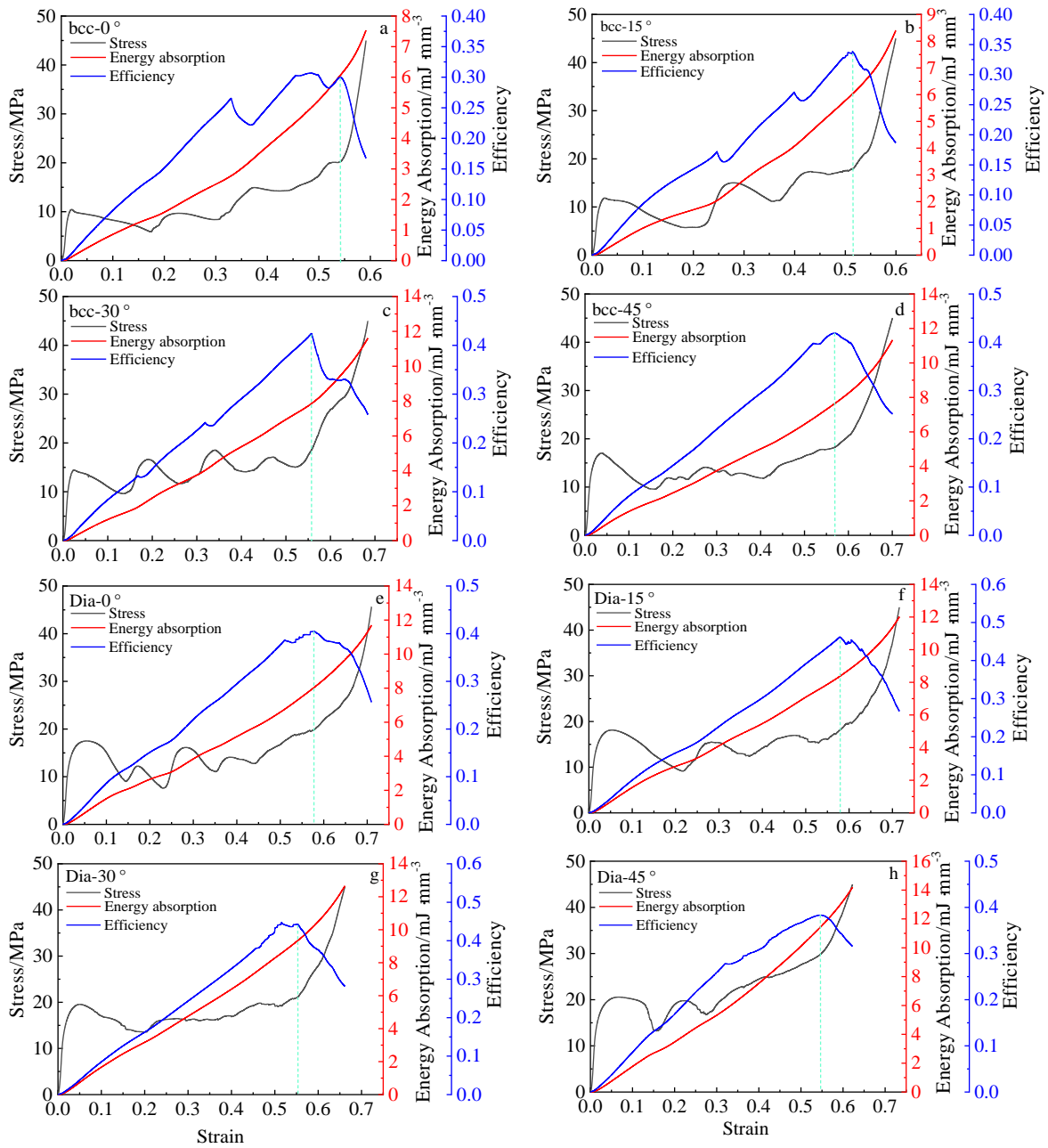


图 12 不同方向点阵结构的应力-应变，吸能-应变和吸能效率-应变曲线

Fig.12 Stress-strain, energy absorption-strain and energy absorption efficiency-strain curves of bcc (a~d) and Dia (e~h) lattice structures in different directions: (a, e) 0°, (b, f) 15°, (c, g) 30°, and (d, h) 45°

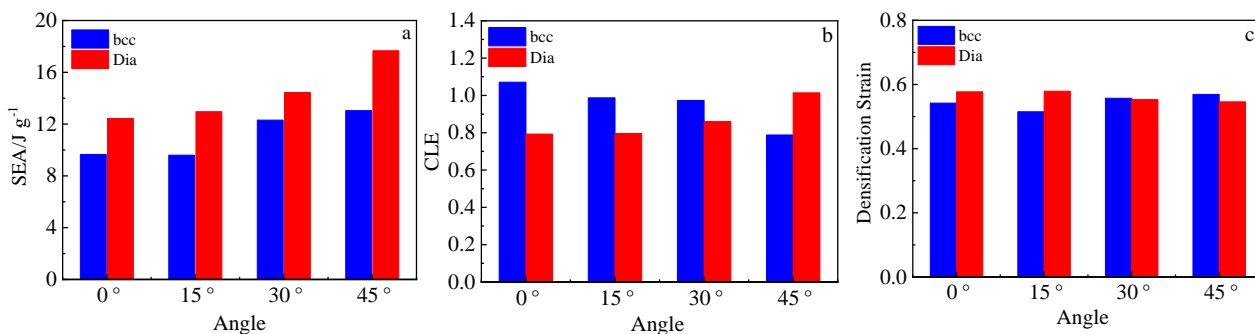


图 13 bcc 和 Dia 点阵结构吸能特性

Fig.13 Energy absorption properties of bcc and Dia lattice structures: (a) SEA, (b) CLE, and (c) densification strain

表 4 bcc 和 Dia 点阵结构吸能特性参数

Table 4 Energy absorption properties parameters of bcc and Dia lattice structures

Type	0°		15°		30°		45°	
	bcc	Dia	bcc	Dia	bcc	Dia	bcc	Dia
SEA/J g <sup>-1</sup>	9.66	12.44	9.60	12.96	12.31	14.44	13.04	17.66
CLE	1.07	0.79	0.99	0.80	0.97	0.86	0.79	1.01
Densification strain	0.54	0.58	0.52	0.58	0.56	0.55	0.57	0.55

### 3 结 论

1) bcc 和 Dia 点阵结构存在明显的各向异性。在相对密度基本一致的情况下，点阵结构方向从 0°到 45°，随着角度的增大，屈服强度明显增大。bcc 点阵结构的各向异性对其压缩屈服强度的影响更加显著。Dia 点阵结构的屈服强度明显高于 bcc 点阵结构。

2) 不同方向点阵结构的比吸能存在明显差异。在相对密度基本一致的情况下，点阵结构方向从 0°到 45°，随着角度的增大，2 种点阵结构的比吸能明显增大。点阵结构方向相同时，Dia 点阵结构的比吸能明显高于 bcc 点阵结构。

3) 不同方向点阵结构的碰撞载荷效率存在明显差异。bcc 点阵结构在 0°方向上 CLE 的值最大为 1.07，随着点阵结构角度的增大其 CLE 逐渐减小。Dia 点阵结构的 CLE 随着点阵结构角度的增大而增大，在 45°方向上取得最大值为 1.01。

#### 参考文献 References

[1] McGregor Davis J, Tawfick S, King William P. *Additive Manufacturing*[J], 2019, 25: 10  
 [2] Wadly Haydn N G, Fleck Noman A, Evans Anthony G. *Composites Science and Technology*[J], 2003, 63(16): 2331  
 [3] Zeng Song(曾嵩), Zhu Rong(朱荣), Jiang Wei(姜炜) et al. *Materials Reports(材料导报)*[J], 2012, 26(5): 18  
 [4] Cao Xiaofei, Duan Shengyu, Liang Jun et al. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2018, 145: 53

[5] Xiao Lijun, Song Weidong. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2018, 111: 255  
 [6] Liu Peisheng(刘培生). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2007, 36(S3): 535  
 [7] Zhao Bing(赵冰), Li Zhiqiang(李志强), Hou Hongliang(侯红亮) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2016, 45(8): 2189  
 [8] Yin Shuo, Yan Xingchen, Chen Chaoyue et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2018, 255: 650  
 [9] Zhang Chen, Gao Ming, Zeng Xiaoyan. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2019, 271: 85  
 [10] Herzog D, Seyda V, Wycisk E et al. *Acta Materialia*[J], 2016, 117: 371  
 [11] Xu Yangli, Li Tingting, Cao Xuanyang et al. *Advanced Engineering Materials*[J], 2020, 23(3): 2 000 957  
 [12] Ge Jinguo, Huang Jian, Lei Yongping et al. *Surface and Coatings Technology*[J], 2020, 403: 126 419  
 [13] Crupi V, Kara E, Epasto G et al. *Materials & Design*[J], 2017, 135: 246  
 [14] Smith M, Guan Z, Cantwell W J. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2013, 67: 28  
 [15] Al-Saedi D S J, Masood S H, Faizan-Ur-Rab M et al. *Materials & Design*[J], 2018, 144: 32  
 [16] Lei Hongshuai, Li Chuanlei, Meng Jinxin et al. *Materials & Design*[J], 2019, 169: 107 685  
 [17] Li Chuanlei, Lei Hongshuai, Liu Yabo et al. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2018, 145: 389



- [18] Tancogne-Dejean T, Spierings A B, Mohr D. *Acta Materialia* [J], 2016, 116: 14
- [19] Gümrük R, Mines R A W, Karadeniz S. *Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 586: 392
- [20] Cui Xinjian(崔新建), Liu Yude(刘玉德), Shi Wentian(石文天) *et al. Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2020, 40(1): 75
- [21] Gao Ruining(高芮宁), Xong Yinze(熊胤泽), Zhang Hang(张航) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(1): 249
- [22] Lu Yichen(卢毅晨), Sun Zhonggang(孙中刚), Guo Yanhua(郭艳华) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(6): 2067

## Effect of Anisotropy on Mechanical Properties of Lattices Structures Manufactured by Selective Laser Melting

Wu Hongfei<sup>1</sup>, Wang Weirong<sup>2</sup>, Wang Guowei<sup>1</sup>, Sun Chaoming<sup>1</sup>, Zhang Wenkang<sup>1</sup>, Shen Xianfeng<sup>1</sup>, Chen Jinming<sup>1</sup>

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

(2. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The metal lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM) has a wide range of engineering applications in aerospace and other fields due to its advantages such as large freedom of structural design, light weight, shock absorption and so on. However, the research on its mechanical properties is still insufficient. In this study, body-centered cubic (bcc) and Diamond (Dia) lattice structures with different directions were designed, and AlSi10Mg lattice structures were manufactured by SLM. Compressing tests were carried out on the formed samples. Combined with finite element analysis (FEA), the anisotropy effects of lattice structures on the compression and energy absorption properties were studied. The results show that bcc and Dia lattice structures have obvious anisotropy. In the case of roughly the same relative density, from 0° to 45°, the yield strength increases obviously with the increase of the angle. The anisotropy of the bcc lattice structure has a more obvious effect on the compressive yield strength, and the yield strength of the Dia lattice structure is significantly higher than that of the bcc lattice structure. The specific energy absorption (SEA) of the lattice structure in different directions is obviously different. From 0° to 45°, as the angle increases, the specific energy absorption increases significantly. The specific energy absorption of the Dia lattice structure is significantly higher than that of the bcc lattice structure. The crash load efficiency (CLE) of the lattice structure in different directions is obviously different. The CLE of bcc lattice structure reaches a maximum of 1.07 in the 0° direction and gradually decreases with the increase of lattice structure angle. The CLE of the Dia lattice structure increases with the increase of lattice structure angle and reaches the maximum of 1.01 in the 45° direction.

**Key words:** selective laser melting; lattice structures; compression performance; energy absorption properties

---

Corresponding author: Wang Guowei, Ph. D., Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, P. R. China, Tel: 0086-816-2484292, E-mail: gwwang13s@alum.imr.ac.cn