

# 基于 SLM 成形的 TC4 钛合金点阵结构设计及压缩行为研究

吴佳豪<sup>1</sup>, 徐峰<sup>1</sup>, 王欢乐<sup>2</sup>, 景然<sup>1</sup>, 孟凡莹<sup>1</sup>

(1. 陕西理工大学 材料科学与工程学院, 陕西 汉中 723000)

(2. 西安重装蒲白煤矿机械有限公司, 陕西 渭南 715500)

**摘要:** 采用选区激光熔化 (SLM) 技术成形 TC4 钛合金均匀与梯度点阵结构, 研究了不同杆径 (0.8~1.2 mm)、单胞类型 (bcc、fcc、fbcc)、添加竖向支杆 (bccz、fccz、fbccz) 对均匀与梯度点阵结构压缩性能及能量吸收的影响规律。结果表明: 1.2 mm 杆径点阵结构性能最优; fccz 与 fbccz 点阵结构分别在同质量与同体积下具有最佳的性能; 竖向支杆的存在能够大幅地增强点阵结构在特定加载条件下的性能; 均匀点阵结构在失效前的压缩性能与能量吸收优于相同相对密度及应变的梯度点阵结构。由于梯度点阵结构逐层断裂的特性, 在 50% 及更大应变的状态下具有更优的性能, 更适于应用在吸能装置。

**关键词:** 选区激光熔化; 点阵结构; TC4 钛合金; 压缩性能; 吸能特性

**中图分类号:** TG146.23; TG115.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2024)07-1953-09

多孔结构广泛存在于自然界中, 如竹子、蜂窝、骨小梁、海胆等, 这些结构可分为开放多孔结构和封闭多孔结构, 其结构一般具有轻量化、高比强度、高承载力、吸能吸声的特性, 在航空航天、生物医疗等领域具有广阔的应用前景<sup>[1-4]</sup>。多孔结构主要可分为 2 类, 随机泡沫结构和点阵结构<sup>[5]</sup>。点阵结构为某类单胞按特定的组合形式周期性排列的集合, 单胞是影响点阵结构性能最主要的因素。点阵结构与泡沫结构的主要区别为单胞的拓扑、规模及性质<sup>[6]</sup>。由于点阵结构中的每个单胞, 甚至每个支柱都可以设置为设计变量, 通过精确控制成形过程和点阵设计可以实现独特的性能, 使得其性能相比泡沫结构更易控制且优异<sup>[7]</sup>。Clough 等<sup>[8]</sup>研究表明, 当设计某种结构来抑制屈曲时, 点阵结构具有更佳的抗压和抗剪切强度潜力。目前存在多种传统制备点阵结构的方法, 如熔模铸造法<sup>[9]</sup>、扩展金属板法<sup>[10]</sup>、卡扣法<sup>[11]</sup>等。但由于这些方法普遍存在不易成形复杂结构及准确控制尺寸、成本较高、成形性能不佳等问题, 因此制备的点阵结构部件难以获得预期效果。

近年来, 增材制造技术的发展使其成为成形点阵结构的新选择。选区激光熔化 (SLM) 作为增材制造技术的一种, 具有可设计自由度高、成形精度高、成

形性能良好的特点, 在成形点阵结构方面更具适应性<sup>[7]</sup>, 因此许多学者对此进行了相关研究。Yan 等<sup>[12]</sup>研究 SLM 成形 TC4 钛合金 2 种点阵结构在热等静压处理后的微观结构演化和对力学性能等的影响, 发现热等静压减少孔隙的能力有限, 不过能够消除微观结构各向异性, 显著提高吸能性能。Zhang 等<sup>[13]</sup>通过 SLM 技术制备 Ni-Ti Gyroid 点阵结构, 发现点阵结构的弹性模量、屈服强度和极限强度随着超弹性实验循环次数的增加而逐渐稳定。任会兰等<sup>[14]</sup>设计了 3 种空心点阵结构, 发现相比基本空心点阵结构, 支柱内部加强点阵结构性能有所提升, 而试样节点加强点阵结构性能却有小幅降低。Shi 等<sup>[15]</sup>探究了 4 种三周期极小曲面结构的压缩和吸能性能。结果表明, 在 Gyroid、Diamond 和 IW 结构中, 变形模式以弯曲-扭转耦合为主, IW 和 Gyroid 具有较高的压缩和吸能性能, Primitive 结构具有最佳的压缩性能和最低的吸能性能。综上, 在点阵结构性能方面, 许多学者研究主要集中在不同材料或类型制备的点阵结构性能, 关于点阵结构的相对密度与不同类型对压缩性能的影响还缺乏相关研究。

目前 SLM 技术可使用的成形粉末材料主要有铁基合金、铝合金、钛及钛合金、钴基合金等<sup>[16]</sup>, 本研

收稿日期: 2023-07-07

基金项目: 国家自然科学基金 (51701111)

作者简介: 吴佳豪, 男, 2000 年生, 硕士生, 陕西理工大学材料科学与工程学院, 陕西 汉中 723000, E-mail: wu222500@qq.com

究使用 TC4 钛合金材料成形点阵结构, 以更好地满足高比强度与轻量化方面的性能需求。结构方面选用 bcc、fcc 及两者组合叠加的 fbcc 作为单胞类型, 由于在压缩过程中主要受垂直方向的轴向力, 因此对每种单胞类型添加竖向支杆设计出 bccz、fccz、fbccz 3 类单胞, 利用不同类型点阵结构对比分析, 探究相对密度及梯度形式对点阵结构压缩性能的影响, 并研究添加竖杆后在特定加载方向上对压缩性能的影响, 在平衡轻量化与结构强度之间寻找最佳结构设计参数。

### 1 试样设计与制备

#### 1.1 点阵结构设计

利用 Creo 设计 bcc、bccz、fcc、fccz、fbcc、fbccz 6 种点阵结构单胞模型, 每种单胞设计直径为 0.8、1.0 和 1.2 mm 3 种杆径尺寸的均匀点阵结构, 再根据每种单胞设计梯度点阵结构, 杆径尺寸在 0.8~1.2 mm 连续变化, 所有点阵结构均为 4 层。图 1 为 1.0 mm 杆径点阵结构单胞模型, 单胞尺寸为 5 mm×5 mm×5 mm, 图 2 为 1.0 mm 杆径均匀点阵结构试样, 总体尺寸为 20 mm×20 mm×20 mm, 图 3 为 1.0 mm 杆径 bcc 均匀点阵与 bcc 梯度点阵结构正视图。每个点阵结构试样的相对密度根据 Creo 数据计算获得, 表 1 为点阵结构的相对密度。以点阵结构压缩应力 ( $\sigma$ ) 应变 ( $\varepsilon$ ) 曲线平台首段的峰值应力作为抗压强度, 应力应变计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{S}{L} \tag{1}$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{2}$$

式中,  $S$  为点阵结构压缩位移量;  $L$  为点阵结构初始高度;  $F$  为位移量为  $S$  时所施加的力;  $A$  为点阵结构底面面积, 以底面整体面积计算。

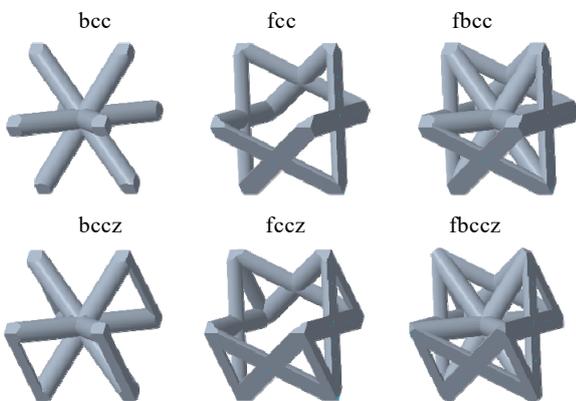


图 1 1.0 mm 杆径点阵结构的单胞模型

Fig.1 Unit cell models of lattice structures with 1.0 mm in rod diameter

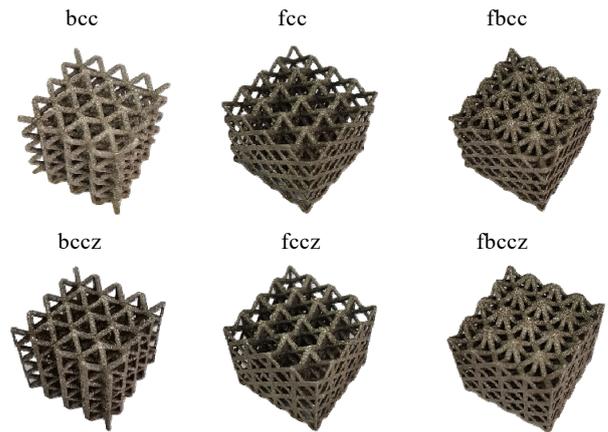


图 2 1.0 mm 杆径均匀点阵结构试样

Fig.2 Uniform lattice structure samples with 1.0 mm in rod diameter

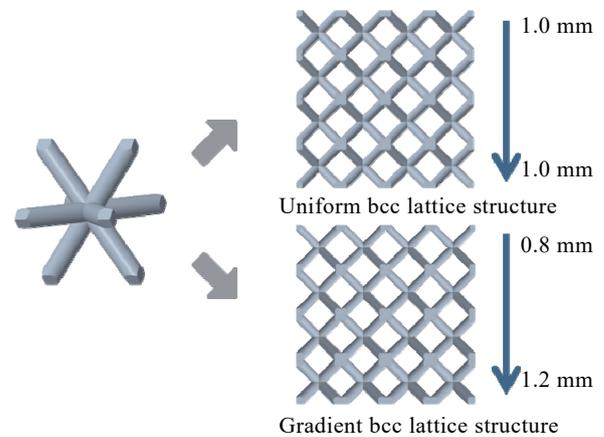


图 3 1.0 mm 杆径 bcc 均匀与梯度点阵结构的正视图

Fig.3 Front views of uniform and gradient bcc lattice structures with 1.0 mm in rod diameter

表 1 点阵结构相对密度

Table 1 Relative density of the lattice structures (%)						
Rod diameter/mm	bcc	bccz	fcc	fccz	fbcc	fbccz
0.8	11.92	13.42	9.77	11.16	20.07	21.46
1.0	17.85	19.99	14.64	16.56	29.92	31.24
1.2	24.60	27.37	20.19	22.60	39.28	41.68
Gradient	17.97	20.12	14.75	16.66	29.50	31.41

#### 1.2 试样制备

实验材料选用高纯氩气雾化工艺制备的 TC4 钛合金粉末, 图 4 为 TC4 钛合金粉末形貌图, 粉末颗粒形状规则且基本无卫星球, 粒度范围在 15~53  $\mu\text{m}$ , 平均粒度大小为 35  $\mu\text{m}$ , 表 2 为 TC4 钛合金化学成分。

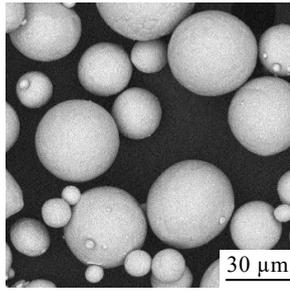


图 4 TC4 钛合金粉末形貌图

Fig.4 Scanning electron micrograph of TC4 titanium alloy powder

表 2 TC4 钛合金粉末的化学成分

Table 2 Chemical composition of TC4 titanium alloy spherical powder (ω/%)

Al	V	Fe	O	N	C	H	Ti
6.06	4.03	0.029	0.089	0.016	0.012	0.0006	Bal.

实验使用江苏永年 SLM 金属打印设备 (YLMs-300), 最小光斑尺寸为 70 μm。使用 SliceMaster 对点阵结构模型切片分层, 由于点阵结构杆径较小, 扫描策略采用无分区填充, 层间旋转 67°, 成形过程中持续通入纯度 99.99% 的氩气, 保持成形仓内氧含量低于 1000 μL/L。试样成形后进行超声清洗并烘干处理, 使用 Olympus SZX7 体视显微镜观察试样表面形貌。压缩测试标准参考 ISO 13314:2011, 压缩实验采用 CMT-5015 型微型控制电子万能试验机, 应变速率为 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>, 均匀点阵结构整体断裂时停止测试, 梯度点阵结构应变达到 50% 停止测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 宏观形貌

图 5 为 1.0 mm 杆径均匀点阵结构体视显微镜图, 可以看出, 试样成形效果较好, 结构无变形, 节点处无断裂, 支杆附着球形粉末较少, 这些附着粉末主要

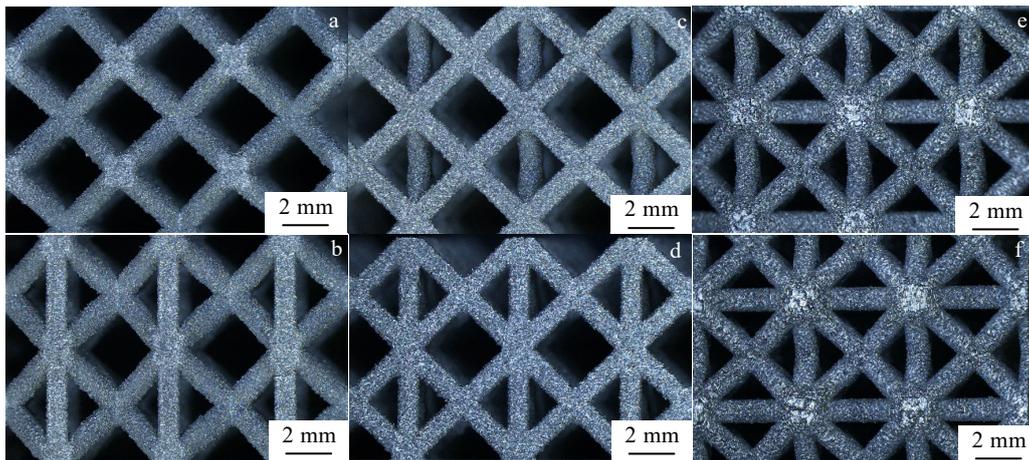


图 5 1.0 mm 杆径均匀点阵结构的体视显微镜图

Fig.5 Body-view microscope image of uniform lattice structures with 1.0 mm in rod diameter: (a) bcc, (b) bccz, (c) fcc, (d) fccz, (e) fbcc, and (f) fbccz

形成原因是 SLM 成形过程中具有高冷却速率的特性, 使成形支杆与金属粉末之间存在较大的温度梯度而发生热扩散, 导致金属粉末附着在支杆上。

### 2.2 压缩性能

点阵结构的抗压强度及弹性模量在很大程度上取决于结构类型、加载条件及相对密度, 尤其受到单胞类型属于是拉伸主导结构还是弯曲主导结构的加载响应方式影响, 而点阵结构的加载响应方式可通过 Maxwell 方程来判断<sup>[17-18]</sup>, 其三维桁架点阵结构的 Maxwell 公式为:

$$M = s - 3n + 6 \quad (3)$$

式中,  $s$  为支杆数;  $n$  为支杆连接的节点数。

根据公式计算 bcc、bccz、fcc、fccz、fbcc、fbccz 这 6 种点阵结构的 Maxwell 数分别为 -13、-9、-14、-10、-9、-5, 均小于 0, 加载响应方式以弯曲变形为主, 但由于 bccz、fccz、fbccz 3 种点阵结构在垂直方向存在竖杆, 因此在特定加载方向具有较高的强度。均匀点阵结构的压缩行为主要分为两种, 一种是当成形材料具有较高塑性时, 结构不发生断裂, 最终结构整体呈现出致密化; 另一种是当成形材料塑性较低时, 最大剪切力使试样沿 45° 对角线发生剪切断裂。图 6 为 1.0 mm 杆径均匀点阵结构 20% 压缩应变截面形貌, 可

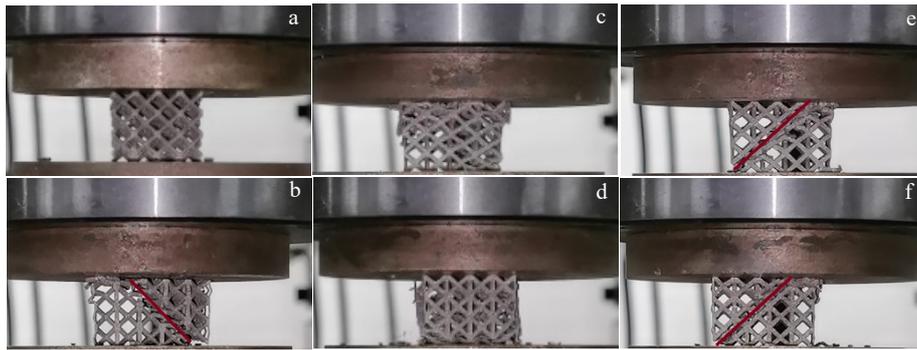


图 6 1.0 mm 杆径均匀点阵结构 20%压缩应变的截面形貌

Fig.6 Cross-sectional morphologies of uniform lattice structures with 1.0 mm in rod diameter at 20% compressed strain: (a) bcc, (b) bccz, (c) fcc, (d) fccz, (e) fbcc, and (f) fbccz

见 6 种均匀点阵结构均沿试样 45°对角线发生断裂，部分点阵结构的断裂发生在侧向，表明屈曲和断裂是变形过程的主要机制。图 7 为梯度点阵结构 20%压缩应变截面形貌，可见不同于均匀点阵结构，梯度点阵结构的压缩行为为逐层致密化，首层低相对密度的支杆率先无法承受载荷而发生断裂，断裂后载荷降低再逐步升高，达到下一层的承载临界值后此层断裂，循环该过程最终呈现致密化。

图 8 为 6 种均匀点阵结构试样压缩应力应变曲线。图中可见多数试样压缩应力应变曲线在加载到最大应力后存在波动的锯齿状线段，这是由于点阵结构的压缩特性及成形材料决定的。当试样在压缩应力加载到最大值后，某个支杆内部存在微小孔隙而承受不住此时的应力，造成局部节点失效发生断裂，断裂后应力下降，试样整体支杆继续承压，呈现出一段锯齿状曲线。此后支杆逐个断裂，表现出锯齿状线段区，当断裂支杆较多后，大部分支杆加载到最大剪切力，试样

最终沿 45°对角线断裂。同时观察发现 0.8 和 1.0 mm 杆径试样相对于 1.2 mm 杆径试样具有更宽的非均匀塑性变形阶段；bcc、fcc、fbcc 点阵结构相比于同类型增加竖杆的 bccz、fccz、fbccz 点阵结构断裂应变更大，0.8 和 1.0 mm 杆径的点阵结构更为明显，分析认为这是由于竖杆的存在使得点阵结构在特定加载方向下能够承载更大应力，当应力快速增加并超过最大承载力后，部分竖杆发生断裂使整体性降低，应力有所下降，但此时试样应力还远高于同阶段未加竖杆的同类型点阵结构，试样整体发生断裂，因此表现出较低的断裂应变。

图 9 为梯度点阵结构首层断裂及 50%应变压缩应力-应变曲线，应力应变曲线呈现点阵结构典型的弹性阶段、塑性变形及破坏阶段和致密化阶段。图 9b 中可见每条曲线存在多个波峰，每个大波峰代表低相对密度层发生断裂，同时观察到梯度点阵结构在首层断裂时的应力均低于同类型相似相对密度的 1.0 mm

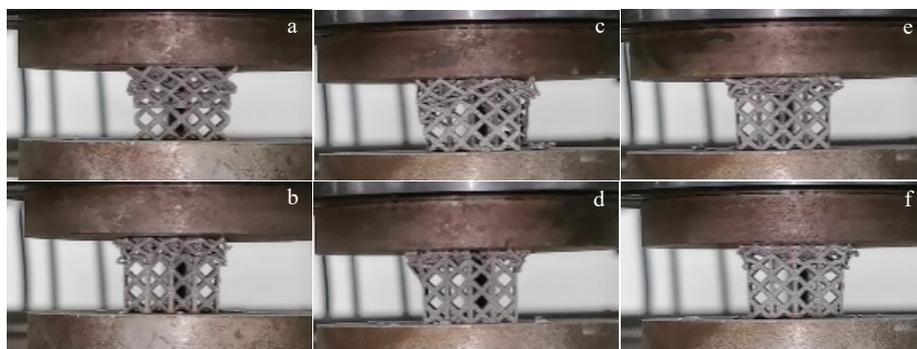


图 7 梯度点阵结构 20%压缩应变的截面形貌

Fig.7 Cross-sectional morphologies of gradient lattice structures at 20% compressive strain: (a) bcc, (b) bccz, (c) fcc, (d) fccz, (e) fbcc, and (f) fbccz

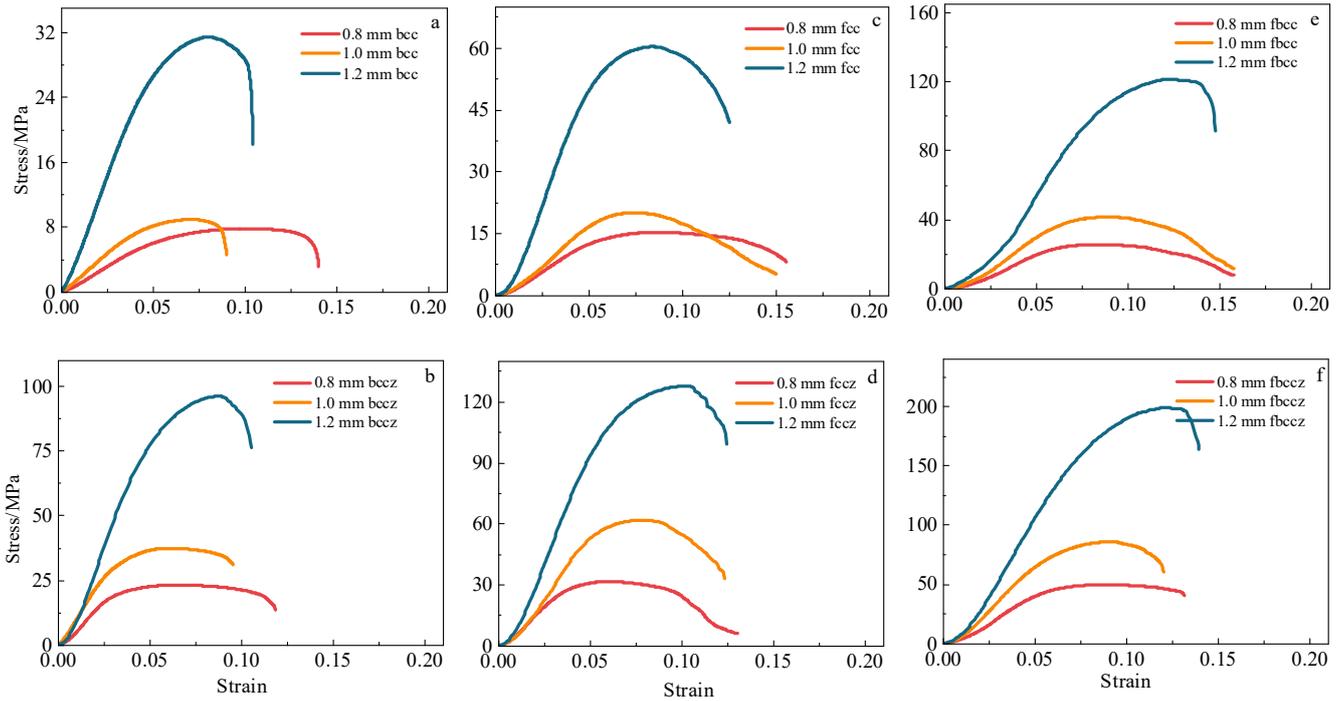


图 8 均匀点阵结构的压缩应力-应变曲线

Fig.8 Compression stress-strain curves of uniform lattice structures: (a) bcc, (b) bccz, (c) fcc, (d) fccz, (e) fbcc, and (f) fbccz

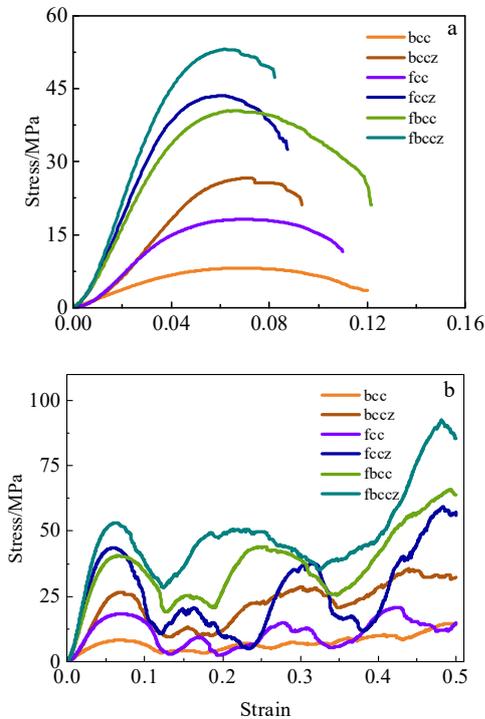


图 9 梯度点阵结构首层断裂及 50%应变的压缩应力-应变曲线

Fig.9 Compression stress-strain curves at the first-layer fracture (a) and at 50% strain (b) of gradient lattice structures

杆径均匀点阵结构，这是梯度点阵结构压缩特性所致。由于均匀点阵结构的各层相对密度一致，整体承受载荷作用；而梯度点阵结构的各层相对密度逐层变化，低相对密度层首先断裂，呈现出较低应力的状况，随着压缩的进行，最终应力将逐渐高于均匀点阵结构，由于当应变为 50%时便停止测试，部分类型的最终应力未超过均匀点阵结构。

图 10 和图 11 分别为 6 种均匀点阵结构的压缩性能。可以看出，不同杆径的点阵结构抗压强度与弹性模量变化趋势一致，随着杆径的增大，抗压强度与弹性模量也随之增加，但不同杆径的性能增幅差异较大。杆径从 0.8 mm 增至 1.0 mm，点阵结构抗压强度提升范围为 14%~95%，弹性模量提升范围为 18%~55%；而杆径从 1.0 mm 增至 1.2 mm，点阵结构抗压强度提升范围为 106%~252%，弹性模量提升范围为 71%~254%，其抗压强度与弹性模量增幅均高于前者。此外根据表 1 可知，0.8 mm 杆径 fbcc 点阵结构的相对密度为 20.07%，1.2 mm 杆径 fcc 点阵结构的相对密度为 20.19%，两者的相对密度差距不大，但性能差异较大，如图 10b 和 11b，后者的比强度与比弹性模量均是前者的 2.3 倍，可见点阵结构的类型及杆径对其性能具有较大影响。

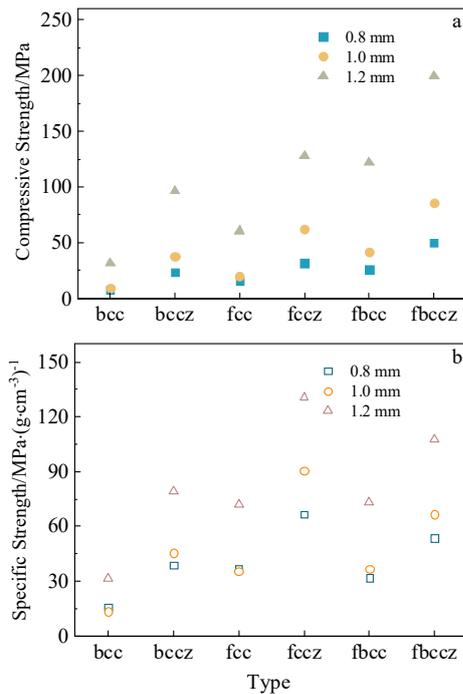


图 10 均匀点阵结构的抗压强度与比强度

Fig.10 Compressive strength (a) and specific strength (b) of uniform lattice structures

对于桁架式点阵结构，由于相同杆径不同类型的试样具有不同的相对密度，该杆径及类型下的试样抗压强度与弹性模量仅能反映当前相对密度的性能，此时需要以试样比强度与比弹性模量进行对比分析。图 10 和图 11 中可见，1.2 mm 杆径点阵结构的比强度与比弹性模量均大幅高于同类型 0.8 与 1.0 mm 杆径点阵结构，分析认为当这类桁架式点阵结构相对密度提高，同时杆径增加到一定程度后，能够抑制支杆的弯曲，降低屈曲程度与局部节点的失效，减缓试样的断裂，使试样由弯曲主导变形偏向于拉伸主导变形<sup>[19-20]</sup>。特别对于增加竖杆的点阵结构，由于增加的支杆与加载方向一致，比强度与比弹性模量得到有效的提升。各类型中 fbccz 的抗压强度与弹性模量值最高，但由于其性能依靠较高的相对密度支撑，其比强度与比弹性模量低于 fccz，其中 1.2 mm 杆径的 fccz 点阵结构具有最佳的比强度与比弹性模量。

图 12 为梯度点阵结构首层断裂时的压缩性能，其中 fbccz 梯度点阵结构的抗压强度和弹性模量值最高，fccz 梯度点阵结构的比强度与比弹性模量大幅高于其余类型。对比具有相似相对密度的 1.0 mm 杆径均匀点阵结构与梯度点阵结构压缩性能，发现对于同类型未加竖杆的梯度点阵结构弹性模量与比弹性模量均高于均匀点阵结构，抗压强度与比强度接近于均匀点阵结构，而增加竖杆后其性能普遍低于均匀点阵结构。分

析认为这与成形材料及结构相关，对于塑性较低的材料，由于竖杆的存在能够极大地增强点阵结构在特定加载方向下的抗变形能力，均匀点阵结构的支杆杆径一致，其稳定性较好，能够很好地阻碍其结构变形；梯度点阵结构则是连续变化的竖杆，当低杆径层的竖杆发生断裂，其整体性受到破坏，结构无法承受此时载荷，此层发生断裂，呈现出性能劣于均匀点阵结构。

### 2.3 吸能特性

由于具有高孔隙率的点阵结构在受到载荷作用后将发生较大形变，这些形变会吸收大量能量使结构保持稳定，因此点阵结构具有优良的吸能特性。目前评估点阵结构能量吸收能力的指标主要包括单位体积吸收能量  $W$  与比吸能 SEA，单位体积吸收能量可根据点阵结构压缩应力应变曲线与应变轴包围的面积得出，比吸能反映点阵结构单位质量下的吸收能量，分别表示为<sup>[21-22]</sup>：

$$W = \int_0^\epsilon \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (4)$$

$$SEA = \frac{\int_0^\epsilon \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\rho} \quad (5)$$

式中， $\epsilon$  为试样的压缩应变，以断裂或致密化阶段的应变为积分上限； $\sigma$  为试样的压缩应力； $\rho$  为试样的密度。

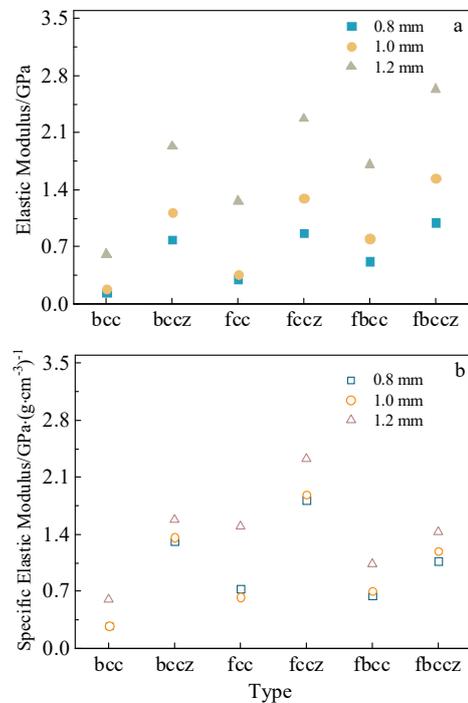


图 11 均匀点阵结构的弹性模量与比弹性模量

Fig.11 Elastic modulus (a) and specific elastic modulus (b) of uniform lattice structures

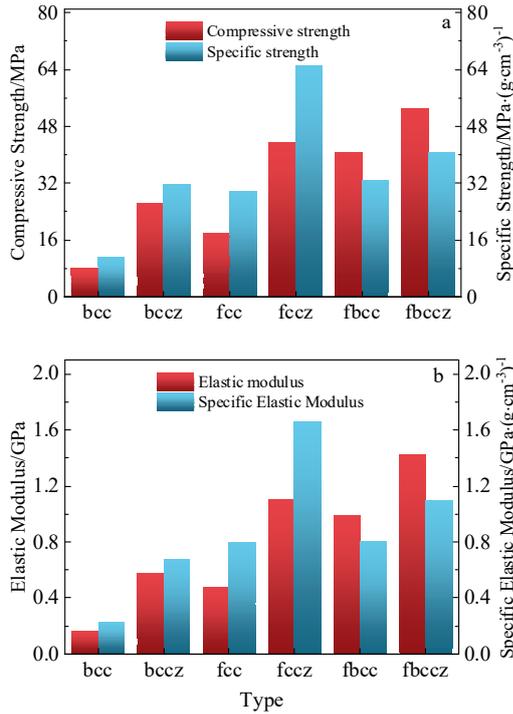


图 12 梯度点阵结构首层断裂时的抗压强度、比强度、弹性模量及比弹性模量

Fig.12 Compressive strength, specific strength (a), elastic modulus and specific elastic modulus (b) of gradient lattice structures at the first-layer fracture

图 13 为 6 种均匀点阵结构 20%应变时吸能特性。在支杆杆长一定时，杆径的增加能够提高点阵结构的力学性能，使其压缩应力同步提升，而吸能性能与应力应变有所关联，杆径的增加同时能够提升点阵结构的吸能性能，但两者并不是线性关系<sup>[19]</sup>。与压缩性能类似，1.2 mm 杆径均匀点阵结构的单位体积吸收能量与比吸能均最佳，且相比于杆径从 0.8 mm 增至 1.0 mm 最高 98% 的单位体积吸收能量及 37% 的比吸能提升，杆径从 1.0 mm 增至 1.2 mm 的单位体积吸收能量及比吸能的提升范围分别为 125%~329% 和 57%~182%，普遍高于前者。图中可见，fbccz 均匀点阵结构的单位体积吸收能量最高，而 fccz 均匀点阵结构的比吸能最佳，其中 1.2 mm 杆径的比吸能达到 14.51 J·g<sup>-1</sup>。

图 14 为梯度点阵结构 50%应变时吸能特性，可见其中 fbccz 梯度点阵结构具有最高的单位体积吸收能量，fccz 梯度点阵结构具有最高的比吸能。由于梯度点阵结构在压缩过程中逐层致密化的特性，在应变达到 50% 及更大时，其吸能特性优于相同相对密度的均匀点阵结构，更适于应用在吸能装置。通过与同类

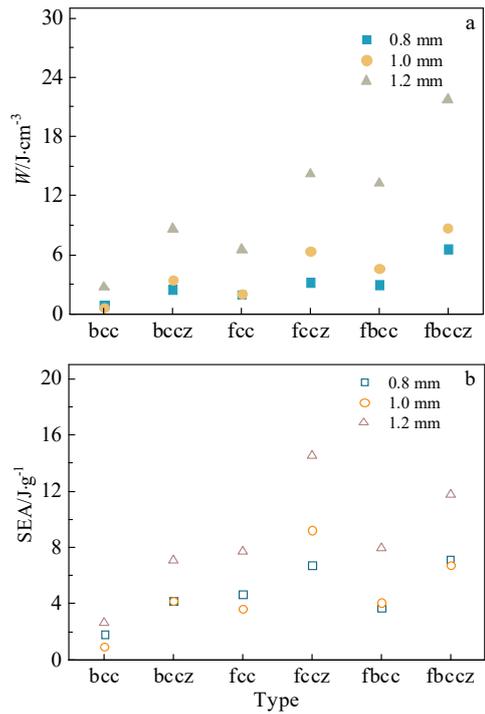


图 13 均匀点阵结构 20%应变单位体积吸收能量与比吸能  
Fig.13 Specific volume absorption energy (a) and specific energy absorption (b) of uniform lattice structures at 20% strain

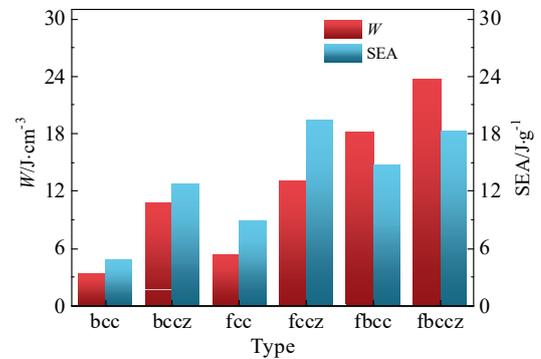


图 14 梯度点阵结构 50%应变单位体积吸收能量与比吸能  
Fig.14 Specific volume absorption energy and specific energy absorption of gradient lattice structures at 50% strain

型未加竖杆的点阵结构对比，其中 bccz 点阵结构相比于 bcc 点阵结构的性能增幅普遍高于其余 2 种类型，因此，在特定加载条件下，竖杆的存在使 bccz 点阵结构的性能得到大幅提升。

### 2.4 压缩断口

图 15 为 bcc 类点阵结构压缩断口扫描电镜形貌，6 种点阵结构的压缩断口形貌具有相似形态，断口形貌主要为韧窝与解理断裂形成的解理面，其断裂机理为韧

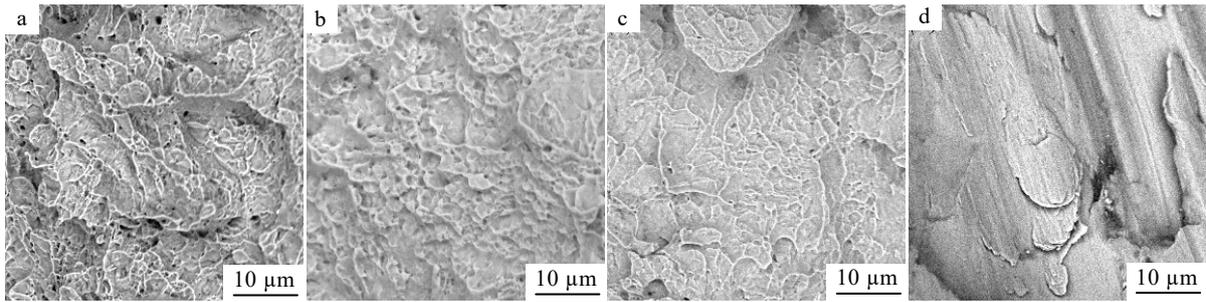


图 15 bcc 类点阵结构压缩断口扫描电镜形貌

Fig.15 SEM images of the compressed fracture surface of bcc lattice structure with different rod diameters: (a) 0.8 mm, (b, d) 1.0 mm, and (c) 1.2 mm

脆混合型准解理断裂。图 15a~15c 中较小杆径的支杆断口具有较多较深的韧窝，而较大杆径的支杆断口相对具有更多的解理面与一定的浅韧窝，这与前文提到的较小杆径的点阵结构具有更宽的非均匀塑性变形区一致。Choy 等<sup>[23]</sup>研究结果与此相似，并表示点阵结构支柱断裂形貌随着杆径的变化而变化。此外，可见点阵结构部分支杆在断裂时出现剥离，断口存在二次开裂现象，如图 15d 中 1.0 mm 杆径点阵结构所示，推断其主要形成原因为受应力集中影响，支杆在受压过程中有向外膨胀的倾向，其增加了对支杆薄弱区域断裂的风险<sup>[24-25]</sup>。

### 3 结 论

1) 采用 SLM 技术制备的 TC4 钛合金点阵结构成形效果良好，附着粉末较少，均匀点阵结构压缩过程中沿试样 45° 发生剪切断裂，梯度点阵结构逐层断裂，最终呈现致密化。

2) 压缩性能方面，6 种均匀与梯度点阵结构类型中，fbccz 点阵结构的抗压强度与弹性模量最高，fccz 点阵结构的比强度与比弹性模量最高。均匀点阵结构中，1.2 mm 杆径点阵结构的比强度与比弹性模量大幅高于同类型 0.8 与 1.0 mm 杆径点阵结构。

3) 吸能特性方面，6 种均匀点阵结构中 fbccz 点阵结构的单位体积吸收能量最高，fccz 点阵结构的比吸能最佳，梯度点阵结构吸能特性优于相同相对密度的均匀点阵结构，更适于应用在吸能装置。

4) 在特定加载条件下，增加竖杆能够大幅提升点阵结构的压缩与吸能性能。

#### 参考文献 References

[1] Siddique S H, Hazell P J, Wang H X *et al. Additive Manufacturing*[J], 2022, 58: 103051  
 [2] Kumar A, Collini L, Daurel A *et al. Additive Manufacturing*[J],

2020, 33: 101168

- [3] Wen Z, Li M. *Materials*[J], 2021, 14(16): 4410  
 [4] Shi Zhiliang(石志良), Huang Fuhong(黄富洪), Ruan Pengcheng(阮鹏成) *et al. Titanium Industry Progress(钛工业进展)*[J], 2023, 40(2): 1  
 [5] Du Plessis A, Broeckhoven C, Yadroitsava I *et al. Additive Manufacturing*[J], 2019, 27: 408  
 [6] Yan C Z, Hao L, Hussein A *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2014, 214(4): 856  
 [7] Du Plessis A, Razavi N, Benedetti M *et al. Progress in Materials Science*[J], 2022, 125: 100918  
 [8] Clough E C, Ensberg J, Eckel Z C *et al. International Journal of Solids and Structures*[J], 2016, 91: 115  
 [9] Kim T, Hodson H P, Lu T J. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2004, 47(6-7): 1129  
 [10] Kooistra G W, Wadley H N G. *Materials & Design*[J], 2007, 28(2): 507  
 [11] Dong L, Deshpande V, Wadley H. *International Journal of Solids and Structures*[J], 2015, 60: 107  
 [12] Yan X C, Yue S J, Ge J G *et al. Journal of Manufacturing Processes*[J], 2022, 77: 151  
 [13] Zhang C, Jin J L, He M *et al. Crystals*[J], 2022, 12(3): 408  
 [14] Ren Huilan(任会兰), Shen Haiting(申海艇), Li Jianqiao(栗建桥). *Scientia Sinica Technologica(中国科学:技术科学)*[J], 2021, 51(3): 293  
 [15] Shi X, Liao W H, Li P F *et al. Advanced Engineering Materials*[J], 2020, 22(11): 2000453  
 [16] Yang Yongqiang(杨永强), Chen Jie(陈杰), Song Changhui(宋长辉) *et al. Laser & Optoelectronics Progress(激光与光电子学进展)*[J], 2018, 55(1): 9  
 [17] Leary M, Mazur M, Elambasseril J *et al. Materials & Design*[J], 2016, 98: 344

- [18] Deshpande V S, Ashby M F, Fleck N A. *Acta Materialia*[J], 2001, 49(6): 1035
- [19] Xiang Zheng(向 政), Chen Jie(陈 捷), Yang Qin(杨 琴) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(11): 4279
- [20] Płatek P, Sienkiewicz J, Janiszewski J *et al. Materials*[J], 2020, 13(9): 2204
- [21] Bai L, Gong C, Chen X H *et al. International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2020, 182: 105735
- [22] Wang Zhaoyi(王兆毅), Lv Yunzhuo(吕云卓), Chen Bingzhi(陈秉智) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(6): 2302
- [23] Choy S Y, Sun C N, Leong K F *et al. Materials & Design*[J], 2017, 131: 112
- [24] Lin Y X, Shi W T, Li J *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2023, 872: 144986
- [25] Traxel K D, Groden C, Valladares J *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2021, 809: 140925

## Design of Lattice Structures Based on SLM for TC4 Titanium Alloy and Their Compression Behavior

Wu Jiahao<sup>1</sup>, Xu Feng<sup>1</sup>, Wang Huanle<sup>2</sup>, Jing Ran<sup>1</sup>, Meng Fanying<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

(2. Xi'an Heavy Pubai Coal Mine Machinery Co., Ltd, Weinan 715500, China)

**Abstract:** The uniform and gradient lattice structures of TC4 titanium alloy were fabricated using SLM technology. The effects of different rod diameters (ranging from 0.8 mm to 1.2 mm), cell types (bcc, fcc, fbcc), and adding vertical struts (bccz, fecz, fbccz) on the compressive properties and energy absorption of both uniform and gradient lattice structures were investigated. The results indicate that the lattice structure with 1.2 mm in rod diameter exhibits the best performance. The fccz and fbccz lattice structures exhibit the best performance in terms of both mass and volume efficiency, respectively. The presence of vertical struts significantly enhances the performance of lattice structures under specific loading conditions. Compression performance and energy absorption of uniform lattice structures before failure are better than those of gradient lattice structures with the same relative density and strain. Due to the layer-by-layer fracture characteristic of gradient lattice structures, they have better performance under 50% and larger strain conditions, and they are more suitable for application in energy absorption devices.

**Key words:** selective laser melting; lattice structure; TC4 titanium alloy; compressive properties; energy absorption characteristic

---

Corresponding author: Xu Feng, Master, Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, P. R. China, E-mail: xufeng@snut.edu.cn