

激光增材制造 Ti6Al4V 点阵结构的抗压吸能特性

徐仰立¹, 曹玄扬², 李婷婷³, 谭援强¹, 黄国钦¹

(1. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021)

(2. 长沙新材料产业研究院有限公司, 湖南 长沙 410083)

(3. 厦门软件职业技术学院, 福建 厦门 361024)

摘要: 人体骨骼受到碰撞后的断裂过程伴随着能量吸收, 多孔骨植入体的设计需考虑结构的抗压吸能特性。在空间尺寸(20 mm×20 mm×30 mm)内, 通过拓扑优化设计和激光增材制造技术制备不同胞元尺寸和相对密度的 Ti6Al4V 点阵结构, 采用熔池监控、单向压缩实验和有限元仿真方法, 探究了点阵结构的表面质量、断裂形变规律和吸能特性。结果表明, 点阵结构的结构参数受熔池温度场和粉末支持力的影响; 点阵结构的抗压行为遵循弹脆性变化规律, 断裂带与制造方向呈 45°; 点阵结构的断裂机制为韧性断裂, 裂纹沿内部微孔洞分布方向扩展; 能量吸收能力随着相对密度增大呈递增趋势, 随着胞元尺寸增大呈递减趋势; 能量吸收效率随着相对密度增大呈递减趋势, 随着胞元尺寸增大呈递增趋势。

关键词: Ti6Al4V; 点阵结构; 熔池监控; 抗压行为; 能量吸收

中图分类号: TN249; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)07-2536-09

Ti6Al4V 合金具有高比强度、生物相容性好、抗腐蚀等优化性能, 是制备骨科植入体的理想材料^[1]。但是由于 Ti6Al4V 合金弹性模量和人体骨组织不匹配, 容易产生应力屏蔽现象, 导致植入失败^[2-4]。通过对骨植入物内填充多孔点阵结构, 可降低植入体的弹性模量, 提高植入成功率。增材制造技术由于成形自由度高、材料利用率高、工序少等优点, 目前已成为制备生物点阵结构的重要技术手段^[5]。

近年来, 关于增材制造 Ti6Al4V 点阵结构的力学性能研究层出不穷。Xu 等^[6]采用激光选区熔化制备拓扑优化的点阵结构, 研究了结构参数对其力学性能的影响; Wang 等^[7]比较了不同几何形状的点阵结构的力学性能, 发现它们遵循着相同的应力-应变曲线的变化规律; Mazur^[8]、Maskery^[9]等研究了胞元数量对点阵结构力学性能的影响, 发现胞元数量越多, 力学性能越强; Choy 等^[10]研究了梯度分布的点阵结构的力学性能, 探索了杆壁尺寸对力学性能的影响机制。目前, 对 Ti6Al4V 点阵结构的研究关注点集中于结构破坏机制和力学性能可控性上, 而对点阵结构能量吸收特性的研究相对较少。

骨植入体在使用过程中, 会承受来自多个方向的应

力, 针对多孔植入体吸能特性的研究对结构的设计优化具有指导意义^[11]。Yang 等^[12]研究了不同退火温度对 Ti6Al4V 点阵结构吸能特性的影响, 研究表明当退火温度为 800 °C 时, 点阵结构具有最佳的吸能能力。Bai 等^[13]报道了相对密度对点阵结构吸能效率的影响, 研究表明当相对密度降低时, 能量吸收效率提高。Zhang^[14]对比不同设计方法制备的点阵结构的吸能能力, 表明拓扑优化的点阵结构具有最佳的吸能能力。李心远等^[15]通过仿真的方法研究了不同压缩速率和体积分数对点阵结构吸能效率的影响, 体积和冲击速率的提升有助于提高结构的能量吸收能力。以上研究表明, 点阵结构的吸能性能受热处理温度和相对密度等因素的影响, 但是结构参数对 Ti6Al4V 点阵结构吸能特性的影响未进行系统性研究。

本研究结合拓扑优化方法和激光增材制造技术, 制备了不同结构参数(胞元尺寸、相对密度)的多孔点阵结构, 采用熔池监控系统揭示点阵结构表面形貌及结构参数差异性的成因; 通过压缩实验和有限元仿真结果, 研究了点阵结果在压缩过程中的断裂形变规律; 探索了不同胞元尺寸和相对密度对点阵结构能量吸收特性的影响机制。

收稿日期: 2021-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(11772135, 51975221); 福建省自然科学基金面上项目(2020J01088); 福建省增材制造创新中心开放基金(ZCZZ202-27)

作者简介: 徐仰立, 男, 1991 年生, 博士, 讲师, 华侨大学制造工程研究院, 福建 厦门 361021, 电话: 0592-6162613, E-mail: ylXu@hqu.edu.cn

1 实验

1.1 点阵结构设计方法

本实验采用拓扑优化的方法来设计点阵胞元结构, 基于 ABAQUS 结构设计软件, 以正方体作为结构优化模型, 材料属性设置为: Ti6Al4V, 弹性模量 110 GPa, 泊松比 0.33; 优化模型的受力和边界条件为: 在正方体的其中一个顶点位置上施加一个沿负 Z 轴的 2317 N 的负载 (人体骨骼受力条件)^[16], 同时限定其对角线顶点的位置的所有自由度; 为了提高结构的精度, 优化模型采用正四面体 (C3D10) 网格进行划分, 网格的个数为 18 574 个; 优化目标为整体结构的最大刚度, 约束条件为优化结构的相对密度 ρ , 相关定义将在 1.3 阐明。本实验设定的密度约束条件分别为 0.4、0.3 和 0.2 (拓扑优化得到完整胞元结构的限定条件为密度约束需>0.2), 图 1 为相对密度为 0.4 的胞元结构的拓扑优化过程。优化后的结构经过平滑处理后, 输出胞元结构的 STL 格式模型。

本实验在指定空间内填充不同密度和尺寸的胞元结构, 胞元填充的空间尺寸为 20 mm×20 mm×30 mm, 点

阵结构的上下各有一块 2 mm 厚度的平板。通过观察, 优化后的胞元结构不是各向同性的对称结构, 为了获得最佳的承力结构, 本实验采用镜面堆叠的方式进行点阵结构的设计, 设计后的点阵结构如图 1 所示。通过布尔操作, 得到不同相对密度 (0.2~0.4) 和胞元尺寸 (2~6 mm) 的点阵结构模型。

1.2 点阵结构制备方法

本实验的原材料为国产的气雾化 Ti6Al4V 粉末, 平均粒径为 40 μm , 主要成分 (质量分数) 包括: Ti 85.7%, Al 4.66%, V 3.30%, Fe 0.198%。采用的增材制造设备为德国 SOLUTION 公司的 Solution 125^{HL}, 设备搭载熔池监控系统, 制造参数如表 1 所示。每一组参数的点阵结构均制备 3 个。点阵结构制备后, 先进行去应力退火处理 (真空 800 $^{\circ}\text{C}$ /4 h), 再进行喷砂和超声清洗处理。

1.3 点阵结构性能表征

点阵结构的相对密度 ρ 在数值等于点阵结构的质量 M 与点阵结构所占空间体积 V (这里为 20 mm×20 mm×30 mm) 的比值^[10]。点阵结构的质量通过排水法获取: 将试样悬挂放入水中, 测得浮力 F 与排水质量 M_w 。依据如下公式:

$$F = M_w g = \rho_w g V_D \tag{1}$$

式中, 浮力 F 等于排水的重量, ρ_w 为水的密度。

计算得到点阵结构的排水体积为 V_D , 扣除点阵结构上下两板的体积 (20 mm×20 mm×2 mm), 得到点阵结构的实际体积 V_L 。因此, 相对密度 ρ 可由以下公式计算:

$$\rho = \frac{M_L}{V} = \frac{\rho_0 \cdot V_L}{V} = 1 - P \tag{2}$$

式中, M_L 为点阵质量, ρ_0 为 Ti6Al4V 材料的密度, 取值 4.43 g/cm³, 相对密度在数值上等于 (1-P), P 为点阵结构的孔隙率。

压缩实验采用德国 zwick/roell 公司的万能材料试验机, 型号为 (ZWICK/ROELL Z050)。点阵结构的压缩实验按照 ISO 13314: 2011 标准进行, 压缩位移速率为 1 mm/min, 实验在室温下进行。微观组织和断口形貌的观测采用荷兰 FEI 公司的 FEI Quanta 200 (scanning electron microscopy, SEM) 设备。微观组织的定量分析采用德国

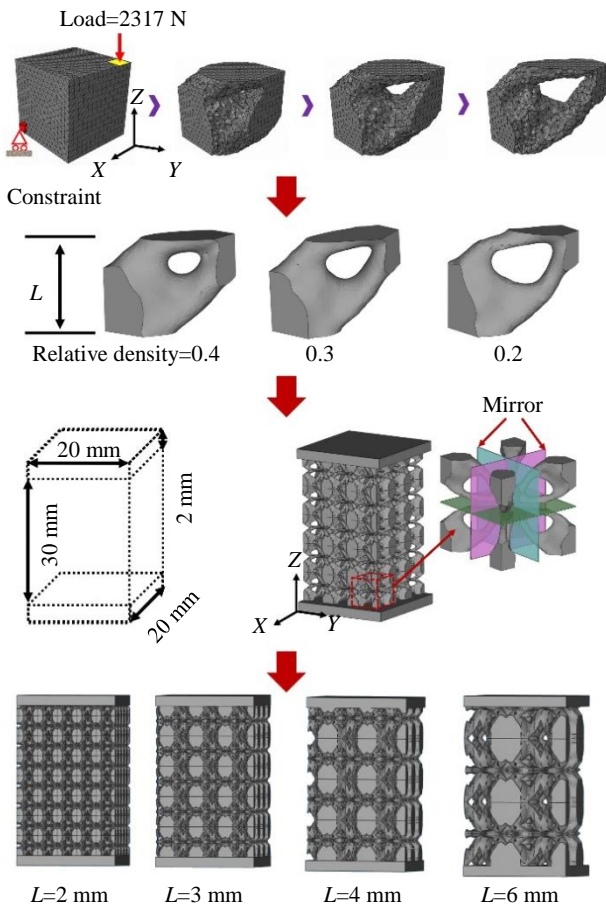


图 1 点阵结构的优化设计过程

Fig.1 Optimization processing of lattice structures

表 1 点阵结构的制造参数

Table 1 Fabricating parameters of lattice structures

Fabricating parameter	Value
Laser power/W	170
Scanning velocity/mm s ⁻¹	1250
Hatch spacing/mm	0.10
Layer thickness/ μm	30

BRUKER 公司的 D8 ADVANCE (X ray diffraction)设备。

1.4 胞元结构的应力应变仿真

仿真实验选取不同相对密度(0.2~0.4)、尺寸为 2 mm 的胞元结构,在单向压缩条件下,进行结构的应力仿真分析。Ti6Al4V 材料属性设置为:弹性模量 110 GPa,泊松比 0.33;边界条件设置为:仅下表面(X-Y 面)受到全自由度的约束,上表面沿 Z 轴方向做单向压缩位移;采用正四面体(C3D10)单元进行划分网格划分。由于本实验只获取胞元结构的压缩应力分布,故位移量设置为 0.2 mm。

2 点阵结构的相对密度

图 2 对比了不同结构参数下,点阵结构的实测相对密度和理论相对密度的差异性。实测的相对密度总体上都比理论相对密度略大,这说明增材制造后的点阵结构表面轮廓与设计模型相比发生了变化。

图 3 为相对密度 0.4、胞元尺寸 3 mm 的点阵结构的表面形貌 SEM 像,同时还给出点阵结构在成形过程中不同位置的熔池监控温度分布图。从 SEM 像中可以看出,结构的实体支撑面相对较为平滑,呈现增材制造典型的台阶状形貌;而结构的粉末支撑面(悬垂面)却存在大量的挂渣,这些挂渣大多呈半熔化的球形粉末,是导致点阵结构相对密度变化的一个重要原因。另外,从熔池监控的结果看,结构实体支撑面比粉末支撑面的温度强度相比较低,温度分布较均匀;在粉末支撑面与粉末直接接触的区域,温度强度呈高强度红色分布,说明

粉末支撑面的热累积程度高。

图 4 解释了点阵结构出现悬垂面产生挂渣的原因:

(1) 热量累积效应。在激光增材制造过程中,熔池的热量是向下传递的,热量传递的速度取决于熔池底部接触的物质形态。对于实体支撑面,熔池底部接触的是固化的金属层,此时热量传递速率较快;而对于粉末支撑面来说,熔池底部是粉末层,热量传递的速率相对较慢。熔池监控结果佐证了这一观点,实体支撑面比粉末支撑面的热累积程度低。热累积使粉末支撑面熔池的热影响区扩大,因此会熔化更多粉末,形成挂渣;(2) 熔池受力失衡。对于粉末支撑面的熔池,粉末层的支持力无法支持熔池的重力和表面张力的合力,因此熔池会穿透到粉

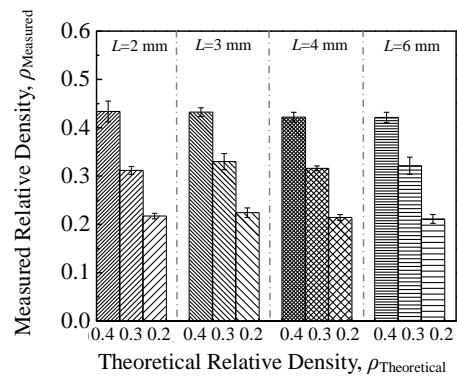


图 2 点阵结构的理论相对密度和实测相对密度

Fig.2 Theoretical and measured relative densities of lattice structures

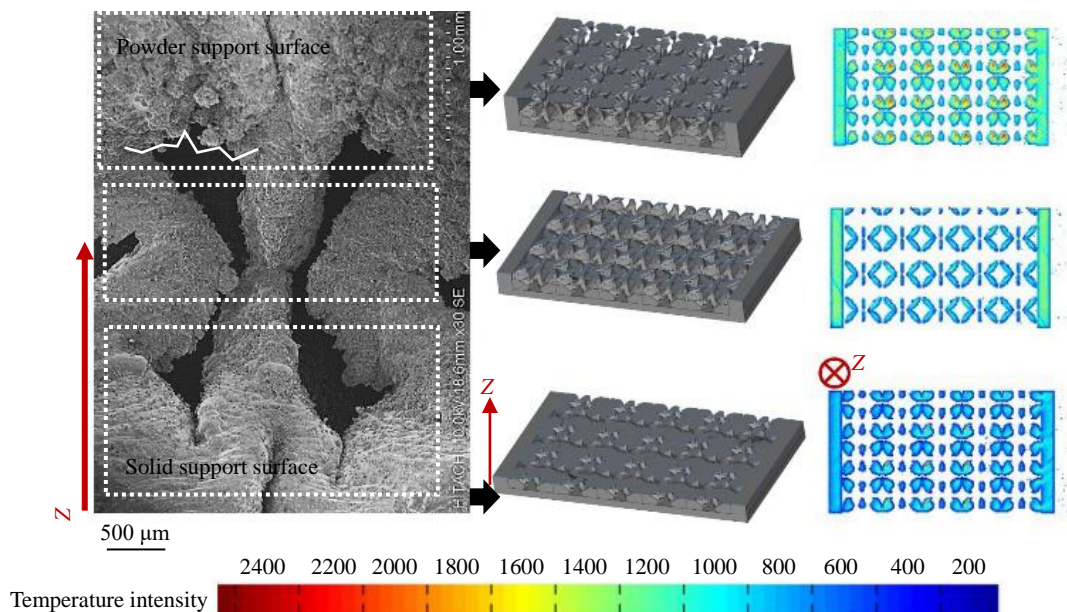


图 3 典型结构的 SEM 像及熔池温度分布

Fig.3 SEM image and temperature distribution of molten pool of typical microstructure

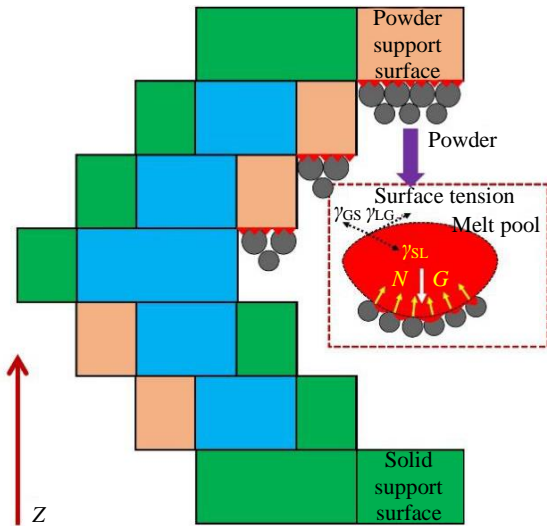


图 4 点阵结构下表面挂渣成因示意图

Fig.4 Diagram of the formation reason of slag hanging on the surface of lattice structure

末层熔化更深处粉末，大量半熔化状态的粉末吸附在熔池底部，呈现锯齿状分布，因为它们无法在后期的喷砂和超声清洗过程中去除，因此形成挂渣。

3 点阵结构的抗压行为

3.1 点阵结构的应力-应变曲线

图 5 是不同结构参数下点阵结构的应力-应变曲线，相同结构参数的点阵结构只选取一条典型的曲线绘制。点阵结构的压缩过程中伴随着大量的杆壁弹性屈曲和断裂的过程，是结构能量吸收的主要方式。由于点阵结构的基材是 Ti6Al4V，因此应力-应变曲线呈现弹脆性材料的变化轨迹^[17,18]。根据轨迹特征，应力-应变曲线可大致分为 3 个区域：（1）区域 I—线弹性区域，这是点阵结构从受力开始到发生屈服前的线性阶段，其斜率为定义的弹性模量 E ，从图中可以看出，所有点阵结构的线弹性阶段都出现在应变 2% 以下；（2）区域 II—屈服平台，这是从屈服发生开始到开始失效前的波动平台阶段，屈服点为定义的屈服应力 σ_y ，点阵结构的屈服平台长度没有规律，在压缩过程中，随时都会发生断裂失效；（3）区域 III—破坏失效，点阵结构开始完全破坏直至压缩试验机停止的阶段，几乎所有的点阵结构都发生了断裂失效，在剪切力的作用下呈现 45° 的断裂带（如图 6）。

3.2 点阵结构的力学性能

图 7 为从应力-应变曲线得到的不同结构参数点阵结构的弹性模量。所有的弹性模量数值均满足骨骼的力学性能要求^[5]。点阵结构的弹性模量与胞元尺寸和相对密度具有相关性：对于相同胞元尺寸，弹性模量随着相对密度增加呈递增趋势；而对于同一相对密度，弹性模量随着胞元尺寸增加呈递减趋势。

图 8 是不同结构参数点阵结构的屈服强度。点阵结

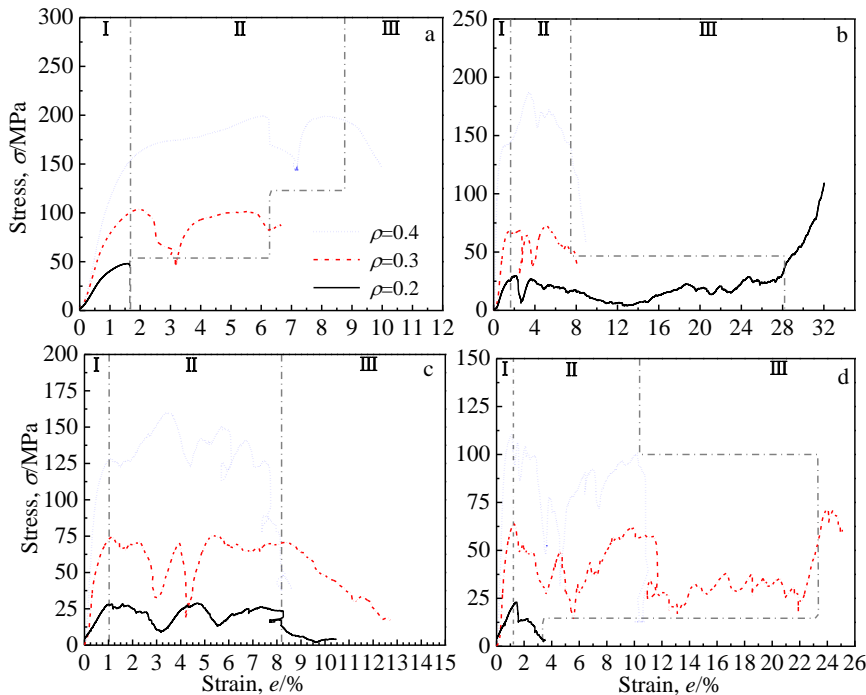


图 5 不同结构参数点阵结构的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of lattice structures with different structural parameters: (a) $L=2$ mm, (b) $L=3$ mm, (c) $L=4$ mm, and (d) $L=6$ mm

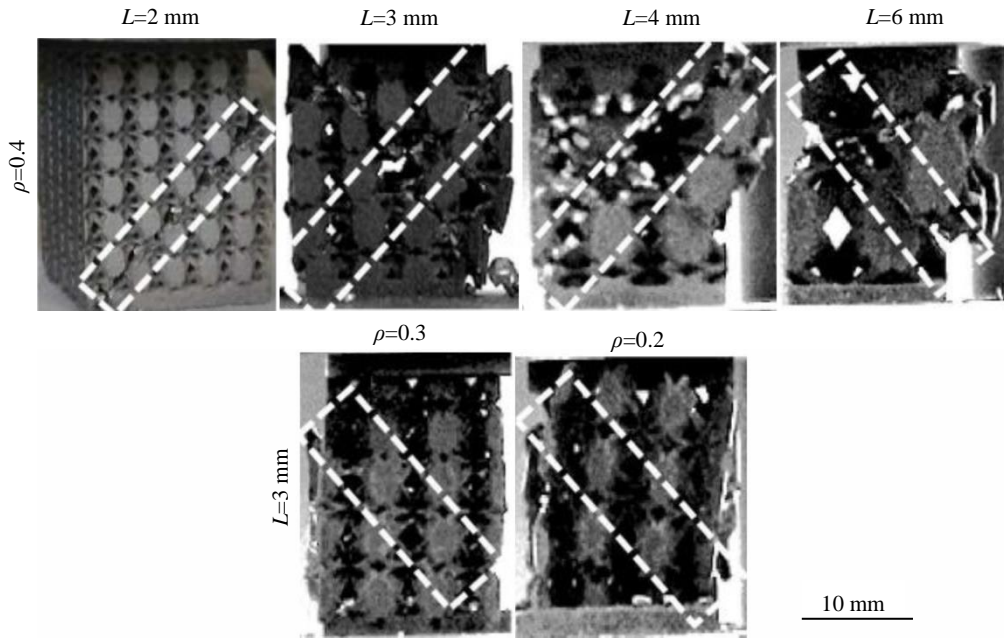


图 6 压缩失效后的点阵结构

Fig.6 Lattice structures after compression test

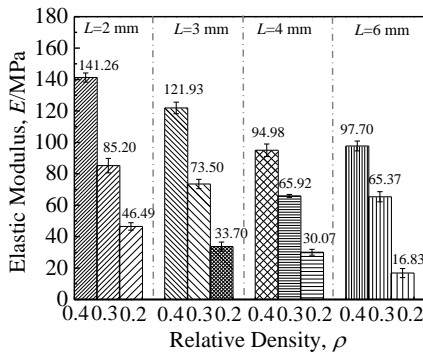


图 7 不同结构参数点阵结构的弹性模量

Fig.7 Elastic modulus of lattice structures with different structural parameters

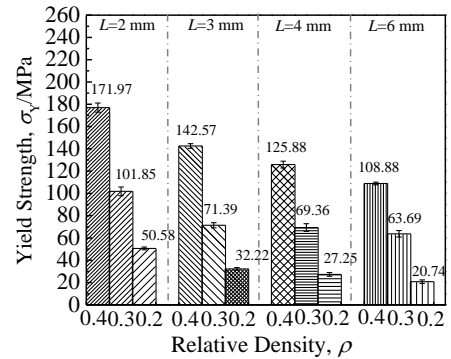


图 8 不同结构参数点阵结构的屈服强度

Fig.8 Yield strength of lattice structures with different structural parameters

构的屈服强度主要受胞元尺寸和相对密度的影响。随着胞元尺寸增加，结构的屈服强度逐渐减小；随着相对密度的增加，结构的屈服强度呈增大趋势。

结构参数对力学性能的影响机制具有差异性。胞元尺寸的影响机制主要受胞元数量的影响，对于同一空间填充的点阵结构，胞元尺寸越大的，填充的胞元数量较少，因此力学性能较差；而对于相对密度影响机制来说，胞元的壁厚是力学性能变化的主要影响因素，壁厚较大的力学性能较好。这也是结构能量吸收能力的主要影响因素，将在后文具体阐述。

3.3 点阵结构的断裂特征

图 9 为不同相对密度胞元结构在单向压缩过程中的应力分布的仿真结果。结合图 6 中压缩过程的结构变化图可以看出，对于不同的相对密度，胞元结构在压缩过程中最大应力区域均分布在杆壁厚度较小的区域，说明这些区域是最容易发生断裂的位置；对于杆壁厚度较大的区域应力较小，因而在压缩过程中，这些位置发生断裂的机率较小。需要指出的是，图 9 中仿真模型对边界条件限定条件有限（只约束下表面 X-Y 面区域），并且仅对结构的弹性变形阶段进行仿真，因此该结果对应力分布的预测并不完全准确。

图 10 为相对密度为 0.2、胞元尺寸为 3 mm 的点阵

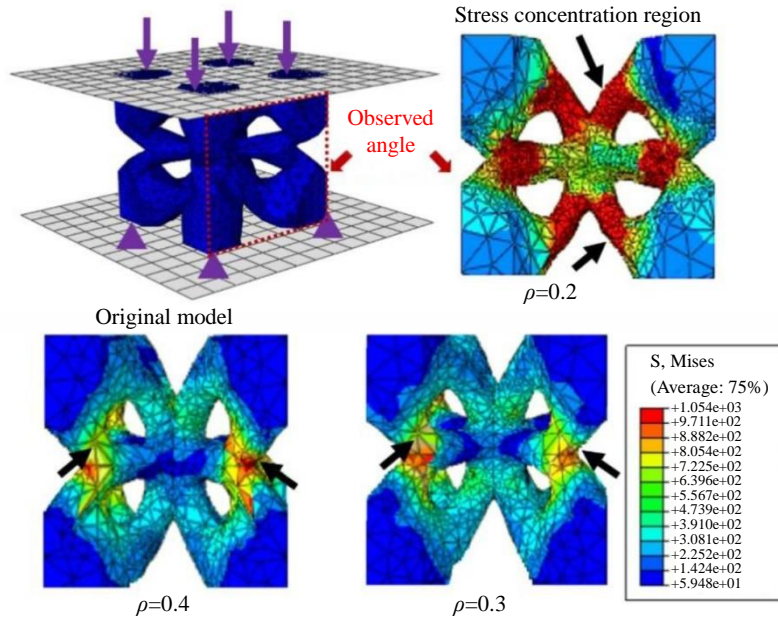


图 9 不同相对密度 ($\rho=0.2\sim 0.4$)、 $L=2\text{ mm}$ 的胞元结构的应力分布
 Fig.9 Stress distribution of unit cell structure with $\rho=0.2\sim 0.4$ and $L=2\text{ mm}$

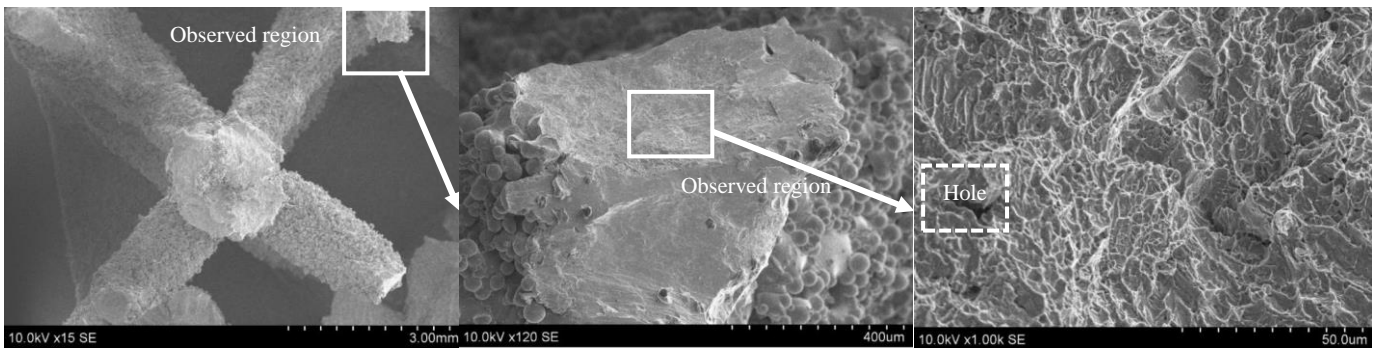


图 10 $\rho=0.2$ 、 $L=3\text{ mm}$ 的点阵结构的断口形貌
 Fig.10 Fracture morphologies of lattice structures with $\rho=0.2$ and $L=3\text{ mm}$

结构的断口形貌图。从图中可以看出，点阵结构的断口位置与仿真结果预测的位置相一致，在杆壁厚度较小的区域均有不同程度的断裂。通过对断口位置的进一步放大，可以观察到断口形貌具有典型的韧窝（尺寸在 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ ），说明点阵结构断裂机制为韧性断裂。另外，图 10 还观察到明显的孔洞，它是杆壁断裂发生的起源点。

图 11 为相对密度为 0.2、胞元尺寸为 3 mm 的点阵结构杆壁微观组织和裂纹的 SEM 像。通过对断裂杆壁进行金相试样制备，可以明显看到试样的微观组织为典型的 $(\alpha+\beta)$ 型组织，这说明退火后的试样产生了有利于提高 Ti6Al4V 韧性的微观组织成分。另外，通过对杆壁的断裂区域进行观察，发现断裂带的走向是由多条微裂纹共同作用形成的。内部孔洞是微裂纹的发生点，多

个孔洞在断裂过程中互相延伸，进而形成扁平状的大孔洞。随着压缩过程的进行，大孔洞之间相互贯通，形成锯齿状的微裂纹。这些孔洞大多在 $1\ \mu\text{m}$ 以下，是因为在增材制造过程中 Ti6Al4V 金属粉末颗粒之间存在着大量的孔隙，激光作用粉末后，熔池内部由于马兰戈尼效应出现气体无法及时逸出而形成^[19]。

4 点阵结构的能量吸收性能

单位体积能量吸收能力和能量吸收效率是评价点阵结构的能量吸收性能的主要指标。当点阵结构受到压缩载荷作用时，应力做功。点阵结构的能量吸收能力，可以用其在压缩变形过程中应力吸收变形功 w 表示，即：当点阵结构的应变为 e 时，单位体积吸收能量通过计算

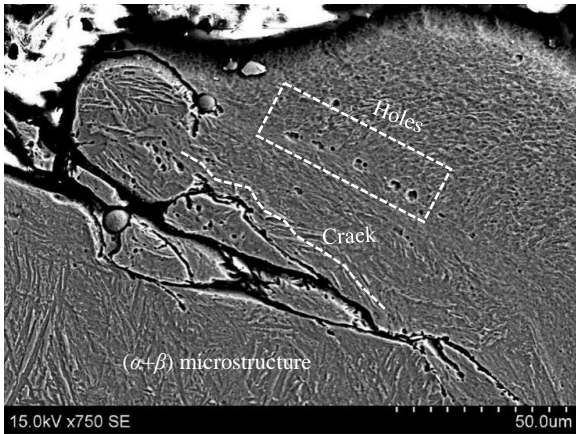


图 11 $\rho=0.2$ 、 $L=3$ mm 的点阵结构杆壁的微观组织和裂纹

Fig.11 Microstructure and crack of thin wall of lattice structure with $\rho=0.2$ and $L=3$ mm

应力-应变曲线的积分面积表示，表达式为：

$$w = 1/100 \int_0^e \sigma de \quad (3)$$

式中， σ 为应力值， e 为应变值。

能量吸收效率 (w_e) 指点阵结构在压缩过程中任意应变下吸收能量与理想吸能材料在相同应变下吸收能量的比值，表达式为：

$$w_e = w / (\sigma_Y e) \times 10^4 \quad (4)$$

式中， σ_Y 为点阵结构的屈服应力值。

4.1 能量吸收能力

图 12 为不同结构参数的点阵结构的 w - e 曲线。由图可知，尽管胞元尺寸和相对密度不同，点阵结构的 w - e 曲线高低有所不同，但总体呈单调递增趋势，根据 w 增速的快慢，可分为 3 个阶段：（1）具有较小 w 值的初始阶段。这个阶段 w 值增速缓慢，与应力-应变曲线的线弹性阶段相对应，因为这个阶段的应力相对较低，且应变较小，所以构成的积分曲线面积较小，导致该阶段的 w 值较小；（2） w 值快速增加阶段。这个阶段处于屈服平台时期，应力随应变发生上下波动变化，积分曲线的面积增加较明显，所以 w 值增速较快，但是该阶段并非完全线性增加，而是略有起伏；（3） w 值恢复缓慢增加阶段。这个阶段点阵结构倾向完全破坏失效，应力随应变急剧下降，此时积分曲线的面积增加变得缓慢，在 w - e 曲线出现一个拐角， w 值增加缓慢，直到点阵结构完全破坏。

点阵结构的 w 值受结构参数影响明显。总体规律是，在相同应变下，对于同一胞元尺寸，相对密度大的点阵结构 w 值越大；对于同一相对密度，胞元尺寸大的点阵结构 w 值越小。例如，在应变为 6% 时，对于相对密度为 0.4，胞元尺寸为 2、3、4 和 6 mm 的点阵结构，其 w 值分别为 8.81、8.09、7.23、4.87 MJ m⁻³。

4.2 能量吸收效率

图 13 为不同结构参数的点阵结构的 w_e - e 曲线。由图可知，点阵结构的 w_e - e 曲线可大致分为 3 个阶段：（1）

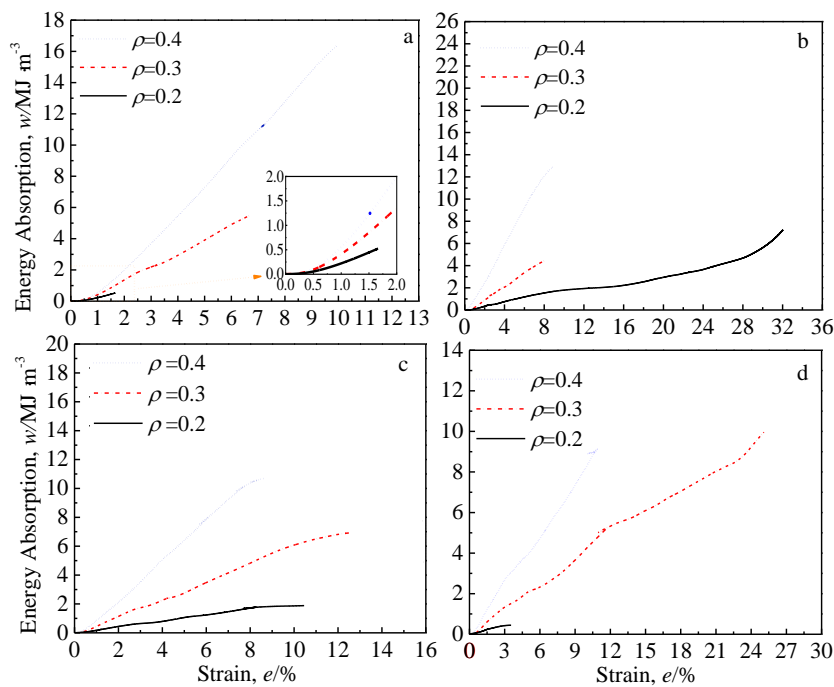
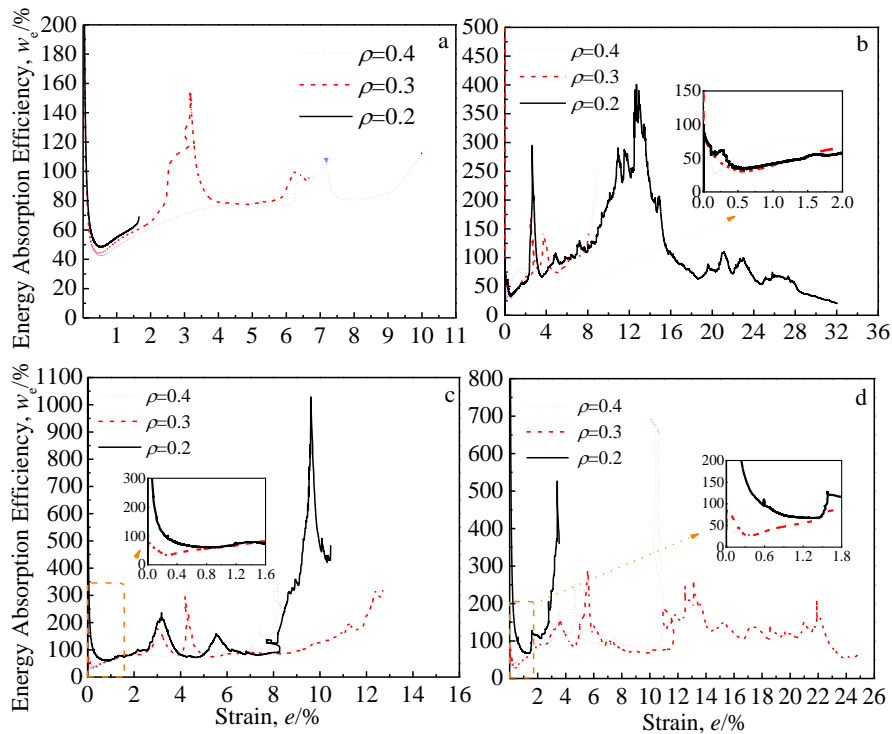


图 12 不同结构参数点阵结构的 w - e 曲线

Fig.12 w - e curves of lattice structures with different structural parameters: (a) $L=2$ mm, (b) $L=3$ mm, (c) $L=4$ mm, and (d) $L=6$ mm

图 13 不同结构参数点阵结构的 w_e - e 曲线Fig.13 w_e - e curves of lattice structures with different structural parameters: (a) $L=2$ mm, (b) $L=3$ mm, (c) $L=4$ mm, and (d) $L=6$ mm

w_e 值快速下降阶段。在弹性阶段开始, 由于承受压缩应力的能量几乎被完全吸收, 所以 w_e 值较高, 之后由于点阵结构的杆壁只是发生弹性屈曲, 能量吸收效率开始急剧下降; (2) w_e 值波动变化阶段。此时杆壁发生不断地断裂、转动和弯折, 以这种方式吸收能量的效率比弹性屈曲的方式效率高, 因此 w_e 值先上升, 随后杆壁断裂后发生不断屈曲和断裂过程, 使曲线呈现波动变化; (3) w_e 值缓慢下降。点阵结构内的杆壁几乎完全被破坏只能发生塑性变形, 导致 w_e 值逐渐下降。

w_e 值随结构参数的变化规律与 w 值不同。相对密度较小的点阵结构具有更高的能量吸收效率, 但是通过观察弹性阶段的 w_e 值, 相对密度较小的点阵结构, 其极小值出现得越早 (如图 13a)。另外, 胞元尺寸较大的点阵结构, w_e 值也较大 (对比图 13a 和图 13d)。从中可以看出, 能量吸收能力强的点阵结构, 其能量吸收效率不一定高。

4.3 结构参数对能量吸收能力的影响机制

不同结构参数下的点阵结构的能量吸收能力, 受到不同主导因素影响。对于相对密度变化的点阵结构, 杆壁的厚度大小是影响其能量吸收能力的主导因素。杆壁厚度增大, 将大大增加整体结构抵御形变的能力, 从而提高能量吸收能力。而对于胞元尺寸变化的点阵结构, 虽然杆壁也同样发生变化, 但是胞元结构的数量是影响能量吸收能力的最主要因素。胞元结构的数量越多, 整体

结构越不容易被破坏, 所以能量吸收能力也较强。能量吸收能力和能量吸收效率共同为吸能结构的设计和选材提供重要参考。

5 结论

1) 表面过熔金属粉末是影响相对密度变化的主要原因, 其中下表面较上表面存在较多挂渣, 由熔池热累积和粉末支持力失衡导致。

2) 点阵结构的应力-应变曲线可分为线弹性、波动屈服平台和断裂失效 3 个阶段, 通过数值模拟表明, 断裂首先在杆壁较薄处发生, 断口形貌由韧窝组成, 裂纹发生点为材料内部孔洞。点阵结构的弹性模量和屈服强度随着相对密度增大呈现递增趋势, 随着胞元尺寸的增大呈现递减趋势。

3) 点阵结构的能量吸收能力曲线总体呈单调递增趋势, 可分为 3 个阶段: 具有较小 w 值的初始阶段、快速增加、平缓增加。 w 值受结构参数影响明显, 在相同应变下, 对于同一胞元尺寸, 相对密度大的点阵结构 w 值越大; 对于同一相对密度, 胞元尺寸大的点阵结构 w 值越小。

4) 点阵结构的能量吸收效率曲线分为 w_e 值快速下降、波动变化和缓慢下降 3 个阶段。相对密度较小的点阵结构具有更高的能量吸收效率, 同时相对密度较小的点阵结构, 其极小值出现得越早。同时, 胞元尺寸较大的点阵结构, w_e 值也较大。

参考文献 References

- [1] Lu Bingheng(卢秉恒). *China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2020, 31(1): 19
- [2] Krishna B V, Bose S, Bandyopadhyay A. *Acta Biomaterialia*[J], 2007, 3(6): 997
- [3] Long M, Rack H J. *Biomaterials*[J], 1998, 19(18): 1621
- [4] Li J P, Wijn J R, Blitterswijk C A *et al.* *J Biomed Mater Res A*[J], 2010, 92(1): 33
- [5] Zhang L, Song B, Yang L *et al.* *Acta Biomaterialia*[J], 2020, 112: 298
- [6] Xu Y L, Zhang D Y, Hu S T *et al.* *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*[J], 2019, 99: 225
- [7] Wang L, Kang J F, Sun C N *et al.* *Materials & Design*[J], 2017, 133: 62
- [8] Mazur M, Leary M, Sun S J *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2016, 84(5-8): 1391
- [9] Maskery I, Aremu A O, Simonelli M *et al.* *Experimental Mechanics*[J], 2015, 55(7): 1261
- [10] Choy S Y, Sun C N, Leong K F *et al.* *Materials & Design*[J], 2017, 131: 112
- [11] Li Yunhe(李云鹤), Zhang Chunqiu(张春秋), Liu Jingna(刘静娜) *et al.* *Journal of Tianjin University of Technology*(天津理工大学学报)[J], 2020, 36(1): 60
- [12] Zhang M K, Yang Y Q, Wang D *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2018, 736: 288
- [13] Bai L, Zhang J F, Xiong Y *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2020, 34: 101 222
- [14] Zhang L, Song B, Fu J J *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2020, 56: 1166
- [15] Li Xinyuan(李心远), Song Weidong(宋卫东), Chen Jian(陈 键). *Journal of Taiyuan University of Technology*(太原理工大学学报)[J], 2019, 50(3): 386
- [16] Caouette C, Bureau M N, Vendittoli P A *et al.* *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*[J], 2015, 45: 90
- [17] 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
- [18] Gibson L J, Ashby M F. *Cellular Solids: Structure and Properties*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 183
- [19] Khairallah S A, Anderson A T, Rubenchik A *et al.* *Acta Materialia*[J], 2016, 108: 36

Compressive Behavior and Energy Absorption of Ti6Al4V Lattice Structure Fabricated by Laser Additive Manufacturing

Xu Yangli¹, Cao Xuanyang², Li Tingting³, Tan Yuanqiang¹, Huang Guoqin¹

(1. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

(2. Changsha Advanced Materials Industrial Research Institute, Changsha 410083, China)

(3. Xiamen Institute of Software Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: The fracture process of human bone under impacting is accompanied by the absorption of energy. The design of porous implant should consider compressive behavior and energy absorption characteristics of the whole structure. Within the space size (20 mm×20 mm×30 mm), a series of Ti6Al4V lattice structures with different unit cell sizes and relative densities were established by topology optimization designing and laser additive manufacturing technology. And the surface quality, fracture and deformation regularities and energy absorption performance of lattice structure were investigated by melt pool monitoring, unidirectional compression test and finite element simulation. The results show that the structural parameters of lattice structure are affected by the temperature field of molten pool and the supporting force of powder layer. The compressive behavior of lattice structures follows the law of elasticity and brittleness, and the crush band forms at an angle of 45° with the fabricating direction. The fracture mechanism of lattice structure is ductile fracture, and the crack propagation direction is distributed along the internal micro-pores. The energy absorption capacity increases with the increase of relative density and decreases with the increase of unit cell size. The energy absorption efficiency decreases with the increase of relative density and increases with the increase of unit cell size.

Key words: Ti6Al4V; lattice structure; melt pool monitoring; compressive behavior; energy absorption