

# 激光选区熔化 TC4 钛合金点阵结构的压缩性能

卢毅晨<sup>1</sup>, 孙中刚<sup>1</sup>, 郭艳华<sup>1</sup>, 唱丽丽<sup>2</sup>, 申赛刚<sup>2</sup>, 邢飞<sup>2</sup>, 常辉<sup>1</sup>

(1. 南京工业大学, 江苏 南京 210009)

(2. 南京中科煜宸激光技术有限公司, 江苏 南京 210009)

**摘要:** 通过增材制造成型复杂晶格结构, 实现航空航天结构件的轻量化设计得到越来越多的应用, 然而点阵结构设计及其性能评价仍欠缺。本研究采用金刚石结构为基体, 以点阵密度、结构形式为目标, 设计不同几何参数试样, 并以 TC4 钛合金为对象进行激光选区熔化 (SLM) 成型。对成型试样进行压缩试验, 研究这种结构不同尺寸试样压缩性能的差异。结果表明: 金刚石点阵结构试样受到载荷后应力在连接节点位置集中, 产生断裂。提高晶胞密度可以缓解应力集中现象, 提高比强度。减小晶胞尺寸和添加外壳都可以使应力均匀化, 提高性能稳定性。小晶胞尺寸试样对球化现象、孔隙等冶金缺陷较为敏感, 造成强度的下降。

**关键词:** 点阵结构材料; 激光选区熔化; TC4 钛合金; 压缩性能

**中图分类号:** TG146.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2020)06-2067-09

随着航空航天技术飞速发展, 对飞行器及其零部件轻量化和性能的要求越来越高, 需要一种高强高韧, 轻质轻量的结构材料。为了满足轻量化要求, 一是选用具有较高比强度的材料, 其中钛合金就是较好的选择之一。另一种是对部分结构零件进行轻量化设计, 利用一些特殊结构来替代传统的实体结构, 满足轻量化要求。

金属三维点阵结构是近年来新兴的一种新型轻质多功能材料, 由于其比强度高、质轻和导热性低等特点在热交换和轻质承重结构等方面得到了广泛的应用。与实体材料相比, 大大减轻了零件的质量, 同时点阵中间联通的结构为零件多功能的集成提供了极大的空间, 很好地满足了对结构-功能一体化的需求<sup>[1-3]</sup>。金属点阵材料在其内部存在复杂的异性结构, 其传统制造方法有粉末冶金法、精密铸造法、熔体发泡法等, 但是这些方法制备试样的点阵尺寸都难以控制, 并且在材料内部也存在一些孔隙和缺陷, 性能不稳定<sup>[4,5]</sup>。

增材制造技术因其设计自由度高、成型精度高等特点为点阵材料的制备提供了良好的平台<sup>[6]</sup>。激光选区熔化 (SLM) 作为一种增材制造工艺, 通过在惰性气氛中使用高能量激光束扫描选择性地熔化金属粉末层来逐层实现实体部件的成型<sup>[7]</sup>。SLM 可以加工成型一系列金属合金, 如 Ti-6Al-4V (TC4), 一种高

比强度的轻质钛合金。SLM 工艺可以产生几何形状复杂的高均匀性周期性点阵结构, 相比之下, 传统的金属点阵结构制造工艺仅限于具有相对低均匀性的随机泡沫生产, 或具有高成本和相对较低的可制造几何复杂性的金属丝网结构<sup>[8,9]</sup>。

据报道, Mazur 等人<sup>[10]</sup>研究了不同晶胞拓扑结构、单元尺寸、边界条件对 SLM 成型 TC4 点阵结构件压缩载荷下的变形和失效行为的影响, 解决了 SLM 制造的 TC4 晶格结构相关的不确定性。研究表明, 在压缩下测试的晶格结构的失效模式为对角支柱和垂直支柱发生弯曲, 随后是支柱断裂和晶胞单元在对角剪切带上的塌陷。bcc 结构较 fcc 结构具有更低的弹性模量和比强度, 更适合柔性结构的设计。较大的晶胞单元尺寸和密度会降低比模量, 提升强度和刚度。Haydn 等<sup>[11]</sup>讨论了周期性多孔金属的制造方法, 如变形成形, 金属丝方法和熔模铸造。通过新颖的制造和拓扑设计, 发现具有周期性开孔芯的金属夹层板比随机泡沫具有更好的负载维持能力。Kusakabe 等<sup>[12]</sup>使用化学蚀刻制作用于骨骼长入表面的 3D 图案组装的 2D 钛网格层。通过加热至 900 °C, 将 10 层 100 μm 厚的钛 2D 网格粘合在一起。该结构的孔隙率为 80%, 具有良好的比强度和比模量。

虽然利用增材制造技术进行点阵化、轻量化设计

收稿日期: 2019-06-25

基金项目: 国家自然科学基金 (51875274)

作者简介: 卢毅晨, 男, 1993 年生, 硕士生, 南京工业大学先进金属材料研究院, 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210009, 电话: 025-58788296, E-mail: 403120730@qq.com

得到了大量的应用，但是实体结构点阵化后如何评价其力学性能是否满足强度设计需求，以及如何选择点阵结构的几何特征都存在困难，且没有系统的依据。基于此，本研究采用金刚石结构为基体，以 TC4 钛合金为对象，选用激光选区熔化 (SLM) 进行成型，分析不同晶胞几何参数对点阵结构试样性能的影响，探讨点阵结构设计的方法。

### 1 实验

本实验采用雾化制备的 TC4 钛合金粉末为原料，粉末的粒径范围为 15~53 μm，平均粒径 38.4 μm。图 1 为粉末的扫描电子显微镜 (SEM) 形貌和粉末的粒度分布。可以看到，绝大多数雾化制备的 TC4 钛合金粉末都呈规则的球形，只有少数小颗粒粉末呈不规则形，大部分粉末表面无杂质粘附，几乎不存在卫星粉和椭球粉，并且粒度分布符合正态分布，适合激光选区熔化打印，粉末的化学成分见表 1。

实验使用英国雷尼绍 SLM 铺粉打印设备(AM250)完成打印。选用 15 mm×15 mm×15 mm 的试验件进行正交实验，通过致密度变化，选取最优参数。使用

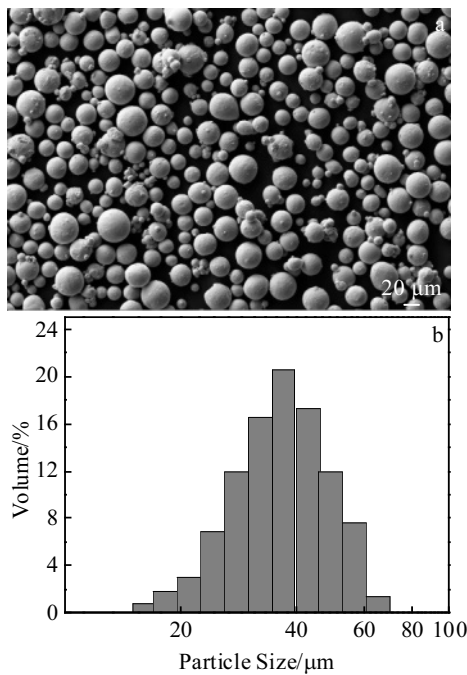


图 1 TC4 粉末形貌及其粒径分布直方图

Fig.1 TC4 powder morphology (a) and its particle size distribution histogram (b)

表 1 TC4 粉末化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 powder (ω/%)

Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
6.04	3.94	0.02	0.013	0.0045	0.0016	0.0856	Bal.

Kroll’s 腐蚀剂 (HF:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O =1:2:7) 进行金相腐蚀，在 AxioCam 105 color 光学显微镜 (OM) 下观察试样的光学显微照片，分析沉积态和退火态的组织。

采用金刚石晶胞为点阵结构试样的基体，设定尺寸为 15mm×15mm×15mm，选择不同的相对密度、晶胞尺寸、边界条件，通过 AM250 设备进行打印，分析几何参数对点阵结构试样性能的影响。金刚石结构的示意图如图 2 所示。

使用 MTS E45-205 万能拉伸试验机测试 TC4 合金点阵结构试样沿 Z 轴方向压缩性能，如图 3，每组点阵试样测试 3 次。采用 diondo d2 高分辨率全能型微焦点 CT 检测系统，对压缩试样进行缺陷检测。最后通过 JSM-6510 扫描电子显微镜 (SEM) 观察拉伸和压缩试样的断口形貌。

### 2 结果与分析

#### 2.1 不同参数对致密度的影响

在打印参数的选择上，用 30 μm 的层厚，110 μm 的扫描间距，55 μs 的恒定扫描点距，选择激光功率/

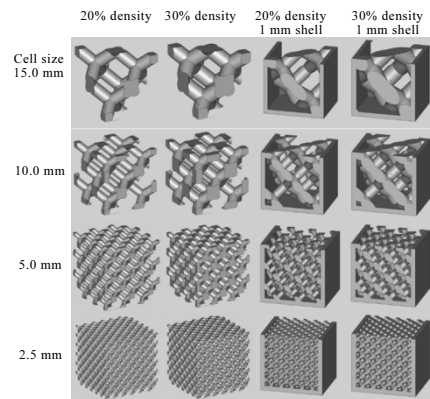


图 2 金刚石结构晶胞和试样模型图

Fig.2 Diamond structure unit cell and sample model

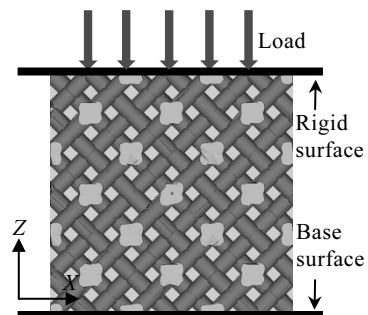


图 3 压缩试验示意图

Fig.3 Schematic diagram of compression test

曝光时间进行正交实验，激光功率选用 200~300 W，间隔 25 W，曝光时间选用 40~80 μs，间隔 10 μs。

将曝光时间和点距换算成扫描速度：

$$v = \frac{d}{t} \tag{1}$$

式中， $v$  是扫描速度 (mm/s)， $d$  是扫描点距， $t$  是曝光时间。对实验获得的样品，根据 GB 3850-83 ISO 3369-1975 (致密烧结金属材料与硬质合金密度测试方法)，采用排水法测密度：测样品质量  $m_1$ ，将试样悬浮放入水中，测量排水质量  $m_2$ 。水的密度记为  $\rho_w$ ，则试样的密度为  $\rho$ 。因为物体所受的浮力等于其排开水的重量，密度  $\rho$  计算公式为：

$$\rho = \frac{m_1}{V} = \frac{m_1}{\frac{m_2}{\rho_w}} = \frac{m_1 \rho_w}{m_2} \tag{2}$$

试样的致密度，即相对密度为：

$$\rho_{\text{relative}} = \frac{\rho}{\rho_{\text{TC4}}} \times 100\% \tag{3}$$

图 4a 为不同激光功率和扫描速度下试样的致密度变化趋势图。激光功率在 200 和 225 W 的时候，随着扫描速度的改变，致密度变化波动较大。当激光功率逐渐增大，大于 250 W 后，随着扫描速度的增加，致密度变化不明显。当扫描速度较快时，会出现大量未熔颗粒和孔洞，主要原因是与金属对激光的吸收特性有关，TC4 粉末在室温时对激光的吸收率很小，但是当粉末达到接近熔化的温度时，对激光的吸收率能达到 50%，并且吸收率随着温度的升高进一步提高。当扫描速度较低时，形成的熔池温度也很高，冷却时间较长，在打印过程中容易造成局部的热应力累积。当扫描速度加快后，熔池暂时还能保持均匀性和稳定性，获得试样的致密度较为稳定<sup>[13]</sup>。随着扫描速度的进一步增加，表面张力和熔体粘度随着温度的降低而增加，降低试样的成型质量。将参数代入能量密度公式：

$$E = \frac{Pt}{hd} \tag{4}$$

其中， $E$  是面能量密度 ( $\text{J}/\text{cm}^2$ )， $P$  是激光功率， $h$  是扫描间距，从图 4b 中可以看出，能量密度在  $250 \text{ J}/\text{cm}^2$  以上时，试样的致密度普遍较高，当能量密度较低时 (低于  $200 \text{ J}/\text{cm}^2$ )，单位面积上的能量输入密度减小，粉末材料吸收激光的能量只能引起小颗粒粉末熔化，一些大颗粒粉末未完全熔化或熔化后形成的熔池不均匀，没有与之前的打印层进行冶金结合，进而产生孔隙等缺陷，这些缺陷会随着打印层厚的累积逐渐扩大，影响打印质量和致密度<sup>[14,15]</sup>。最后选用工艺参数为激光功率 250 W，扫描速度 800 mm/s，扫描间距 110 μm，

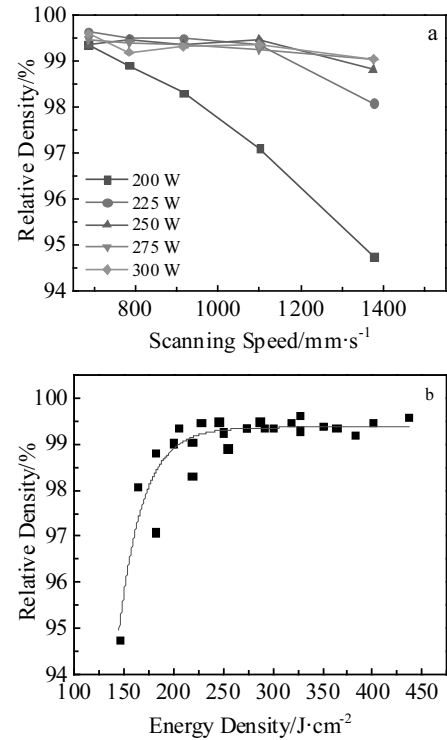


图 4 不同激光功率下致密度和扫描速度的关系及致密度与能量密度的关系

Fig.4 Relationship between relative density and scanning speed at different laser powers (a); relationship between relative density and energy density (b)

层厚 30 μm，进行后续试样打印。

## 2.2 TC4 钛合金沉积态与退火态显微组织

图 5a 为激光选区熔化 TC4 沉积态纵截面的显微组织。可以看到纵向剖面为相连的柱状晶，这些柱状晶是原生的  $\beta$  晶粒，沿着温度梯度方向，穿过多个沉积层扩展生长而成，长度可以达到几百微米。这是因为在激光选区熔化成形过程中，激光扫描某层粉末时，之前一层或者几层已成形的部分会受到激光能量的作用，产生重熔现象。金属粉末在加热过程中沿着铺层方向的微区熔池温度梯度可达到  $104\sim 105 \text{ K}/\text{cm}$ ，快速凝固后，进而形成柱状初生  $\beta$  晶粒。在柱状  $\beta$  晶粒内部不规则地密布着细小的针状组织。在激光选区熔化熔池微区烧结过程的冷却速度可以达到  $10^3\sim 10^5 \text{ K}/\text{s}$ ，远快于马氏体临界冷却转变温度  $410 \text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ ，极高的冷速导致原本的  $\alpha$  相转变成针状  $\alpha'$  马氏体，宽度为  $0.5\sim 1.0 \text{ }\mu\text{m}$ 。图 5b 显示其横截面的显微组织。主要为不规则的等轴状多边形  $\beta$  相晶粒，晶界不明显， $\alpha'$  马氏体交错分布在等轴  $\beta$  相晶粒内部<sup>[16,17]</sup>。

在  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  退火 2 h 空冷后，SLM 试样的微观结构如图 5c, 5d 所示。纵截面的  $\beta$  柱状晶仍然可见，组织

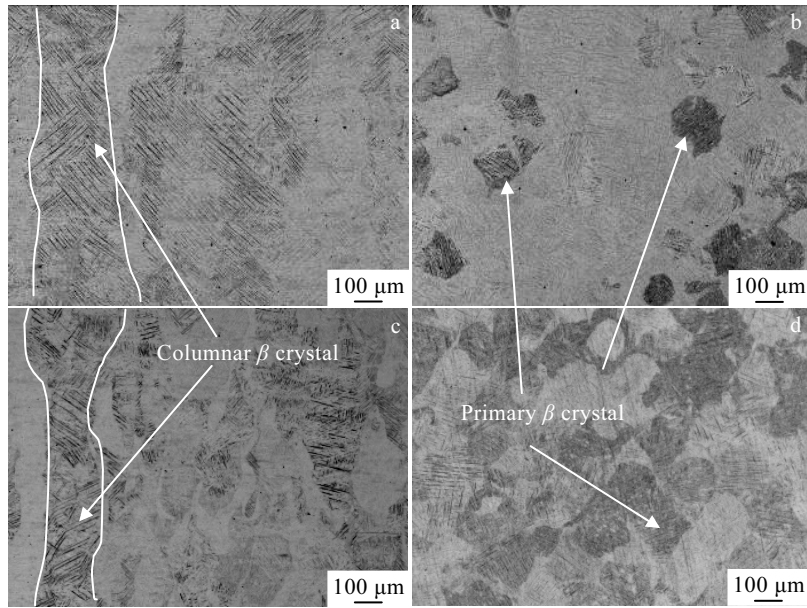


图 5 激光选区熔化 TC4 试样的显微组织

Fig.5 Sedimentary (a, b) and annealed (c, d) microstructures of longitudinal section (a, c) and cross-section (b, d) of SLMed TC4 samples

变化不大,细小的 $\alpha'$ 马氏体结构转变为 $\alpha$ 和 $\beta$ 的混合物,其中 $\alpha$ 相以细针状存在。横截面等轴 $\beta$ 相晶粒的晶界相比沉积态更为明显,宽度在 $40\sim 60\ \mu\text{m}$ 之间,针状 $\alpha'$ 相的体积略有粗化<sup>[18-20]</sup>。

### 2.3 点阵结构压缩性能

点阵结构的选择和设计直接影响了结构的力学性能。金刚石结构是点阵结构在增材制造中使用的相对较新的单元格之一,这是一种典型的 bcc 结构,每个节点都连接到最近的 4 个节点,封闭角均为  $109.5^\circ$ ,具有各向同性的力学性能。图 6 为点阵试样宏观形貌。

图 7a, 7b 为不同晶胞大小点阵试样分别在 20%和

30%晶胞密度下的压缩曲线。不同密度下 2.5 和 5.0 mm 晶胞试样的压缩曲线比较平稳。15 mm 晶胞试样的抗压和屈服强度都最高,这体现了大尺寸晶胞性能的优秀性。2.5 mm 晶胞大小的试样性能较差,5 和 10 mm 试样的性能相近。在弹性变形阶段,不同晶胞尺寸试样应力随应变变化的趋势基本相同。但是当达到抗压极限强度后,大晶胞试样产生失效破坏,曲线出现急剧的下降。小晶胞试样在非均匀塑性阶段的跨度也较长,其中 5 mm 晶胞的试样该阶段能从应变 5%持续到 15%,曲线也更为平滑。从图 7c, 7d 中看出,30%密度的试样相比 20%密度的试样,质量增加了 50%,强度提高了 120%,这种点阵结构打印在打印过程会因为温度梯度在局部造成应力的累积,进而产生裂纹,在压缩过程中容易在裂纹处产生断裂。增加了晶胞的密度,有利于形成更稳定的熔池,显示出了明显的性能优势<sup>[21-23]</sup>。

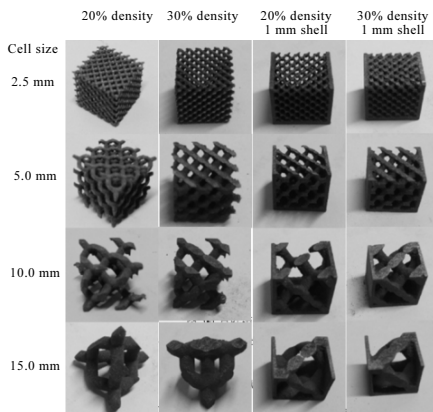


图 6 点阵结构试样宏观照片

Fig.6 Macro images of the lattice structure samples

图 8a, 8b 为点阵试样添加 1 mm 外壳后的压缩曲线。20%和 30%密度 15 mm 晶胞试样的性能都比较差,前者形成的曲线峰值明显小于同组其他试样,后者由于晶胞连接部分产生明显的脆断而终止。分析原因可能是除去外壳后,试样内的空间不足以支撑填充一个 15 mm 的晶胞单元,破坏了单个晶胞的完整性,影响了性能。图 8c, 8d 中其他晶胞尺寸试样的强度相近,在合适的晶胞尺寸下添加外壁可以提高点阵结构试样性能的稳定性的。

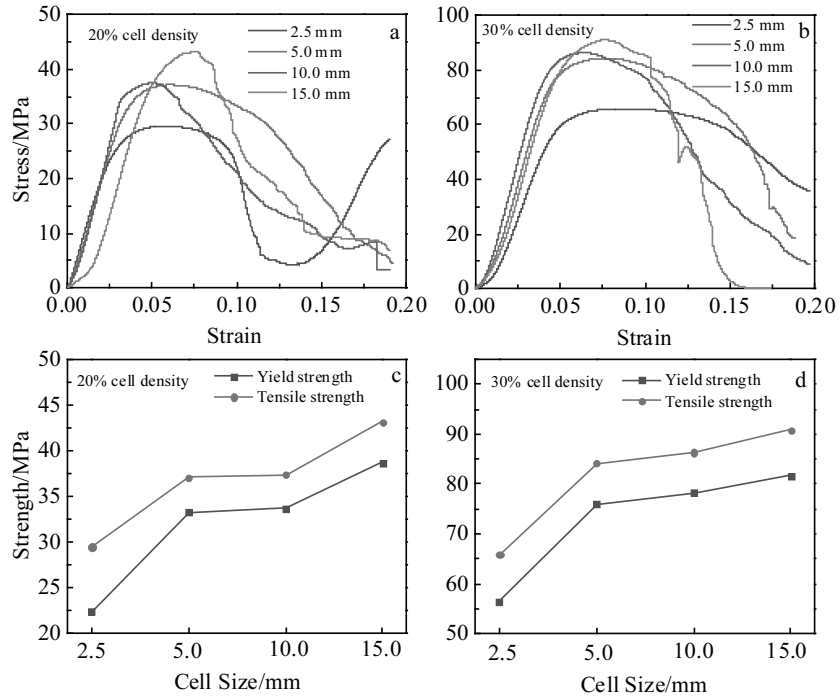


图 7 20%和 30%晶胞密度试样的压缩曲线及压缩性能

Fig.7 Compression curves (a, b) and compression properties (c, d) of 20% (a, c) and 30% (b, d) cell density sample

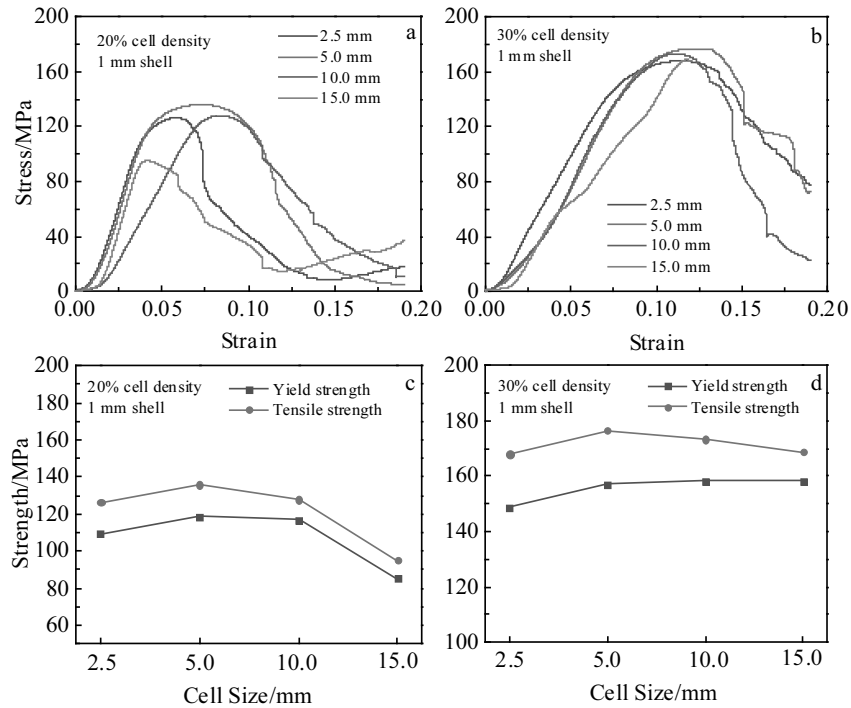


图 8 20%和 30%晶胞密度加 1 mm 外壳试样压缩曲线及压缩性能

Fig.8 Compression curves (a, b) and compression performances (c, d) of 20% (a, c) and 30% (b, d) cell density plus 1 mm shell samples

### 2.4 退火态点阵结构压缩性能

5 和 10 mm 晶胞大小的试样在几种不同结构和密度下都表现出稳定的性能，因此在中间添加一组 7.5

mm 晶胞大小的试样，试样如图 9 所示，进行退火后的压缩力学试验。退火温度为 600 °C，2 h 空冷。

图 10a, 10b 为退火态不同晶胞大小点阵试样分别

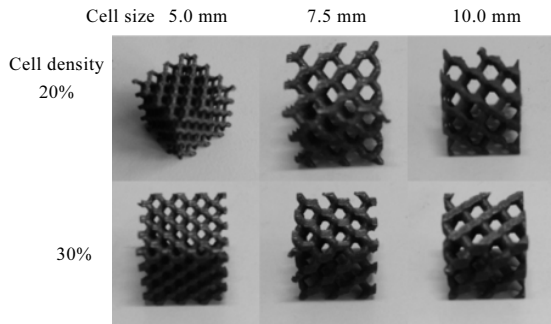


图 9 退火态点阵结构试样形貌

Fig.9 Morphologies of annealed lattice structure sample

在 20%和 30%晶胞密度下的压缩曲线。相比沉积态试样，2 种密度下退火后的试样应变失效阶段提前了，压缩曲线的峰变窄。从图 10c, 10d 中看出，试样的屈服强度和抗拉强度都有 10%~20%的明显提升，并且 3 种不同晶胞大小的试样力学性能差异很小，体现了在该晶胞大小区内性能的稳定性。

### 2.5 点阵结构缺陷及其断裂分析

从图 11 压缩断裂后的点阵试样可以看到，压缩过程中断裂位置普遍发生在晶格与晶格连结的节点部位。用 Abaqus 软件对单个晶胞结构试样进行静力学压缩模拟，如图 12 所示，晶胞连接杆的部分受到的应力

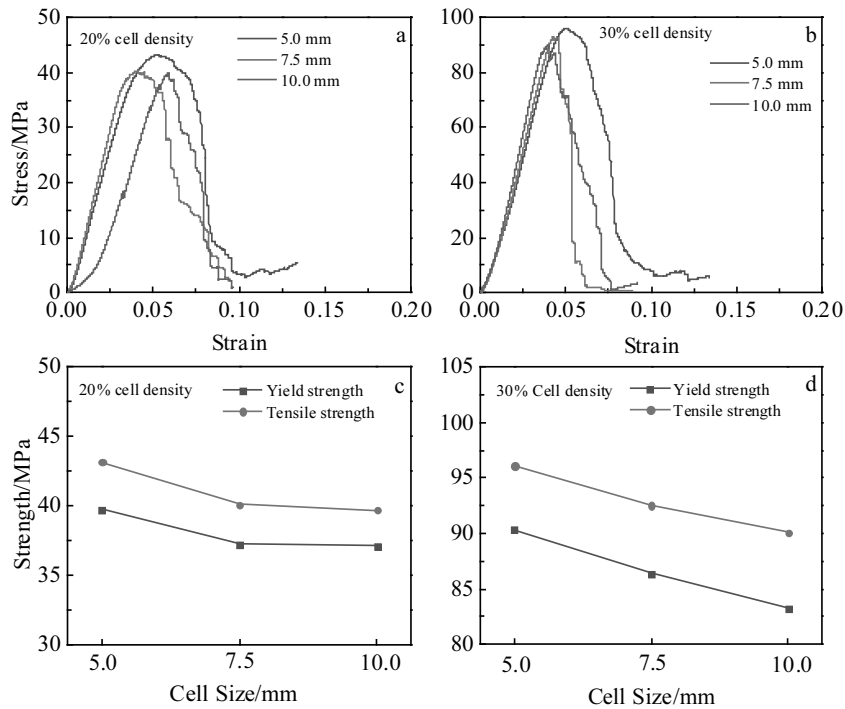


图 10 20%和 30%晶胞密度退火态试样的压缩曲线及压缩性能

Fig.10 Compression curves (a, b) and compression performance (c, d) of 20% (a, c) and 30% (b, d) cell density annealed samples

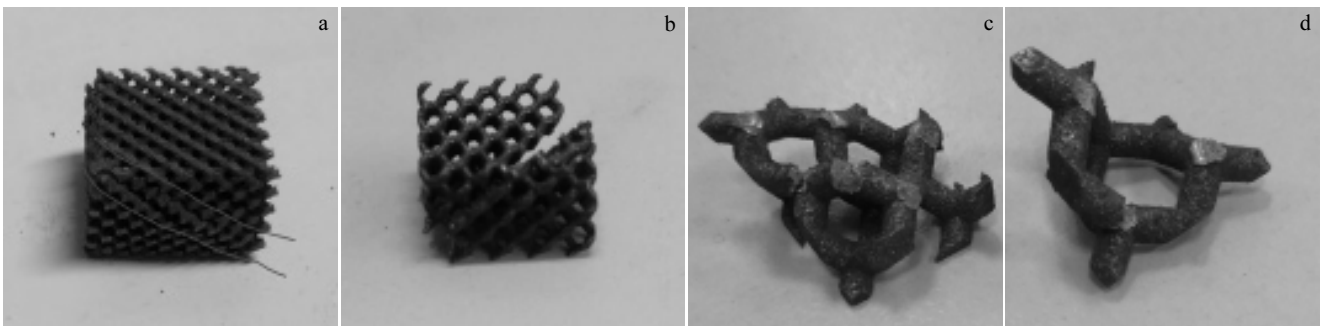


图 11 压缩断裂后的点阵试样

Fig.11 Lattice sample after compression fracture: (a) 20%-2.5 mm, (b) 20%-5 mm, (c) 20%-15 mm, and (d) 30%-15 mm

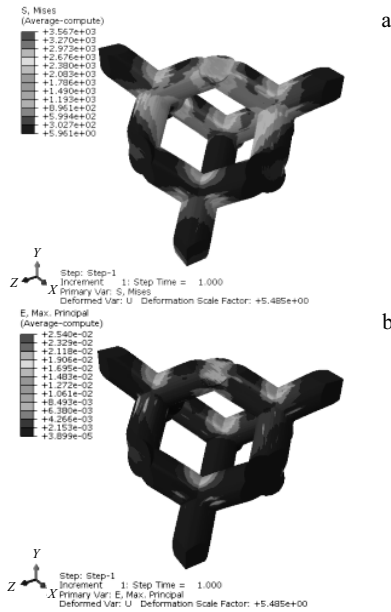


图 12 20%晶胞密度-15 mm 晶胞点阵试样的应力云图和应变云图

Fig.12 Stress cloud map (a) and strain cloud map (b) of 20% cell density-15 mm unit cell lattice sample

较小，在杆的连接节点部位出现了比较显著的应力集中效应。压缩过程中连接杆由节点向两端产生剪切力

并向两端弯曲，应变的最大位置集中在节点部位，靠近节点的部分也处于屈服的临界状态，载荷增加后晶胞容易从节点处断裂。

由于 2.5 mm 尺寸试样在压缩性能上较其他试样有明显的下降，因此选用 30%晶胞密度-2.5 mm 晶胞大小有/无外壳的 2 种试样进行了工业 CT 扫描检测(图 13 和图 14)：在图 13a 中发现，试样表面都由很多细小的粉末粘附，SLM 成形过程中由于激光束热量的扩散产生球化现象，降低表面粗糙度，影响性能稳定性。不同晶胞的相同位置的形貌有所差异，存在少量的孔隙。从图 13b 孔隙的 3D 显示图可以看出，孔隙最大的点都位于晶胞杆连接的节点位置，这在图 14b 截面的放大图上也可以看出，孔隙呈现不规则形状。压缩过程中，这些孔隙在压缩载荷作用下容易产生裂纹，并且主裂纹尖端通常通过最弱路径改变方向。随着应变量的增大裂纹会发生扩展，进而使材料失效断裂，从而降低了试样的强度。

图 15a, 15b, 15c 分别为 20%、30%密度-2.5 mm 晶胞和 30%密度-5.0 mm 晶胞试样断口的 SEM 照片。发现 20%-密度-2.5 mm 晶胞试样节点位置存在很明显的光滑的解理面，同时也存在少量韧性断裂产生的韧窝，主要还是以脆断为主。30%密度-2.5 mm 晶胞试样在节点位置的解理面面积少于 20%密度的试样，存在

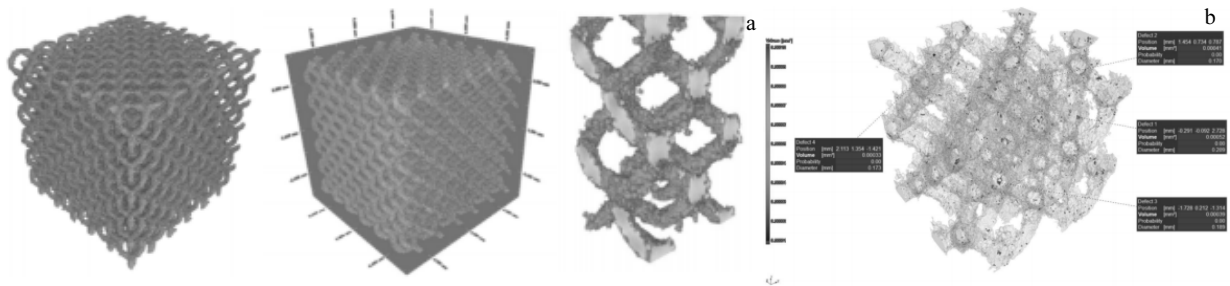


图 13 30%密度-2.5 mm 晶胞点阵试样的工业 CT 扫描

Fig.13 Industrial CT scanning of 30% density-2.5 mm unit cell lattice sample: (a) overall and local morphologies and (b) 3D display of pore

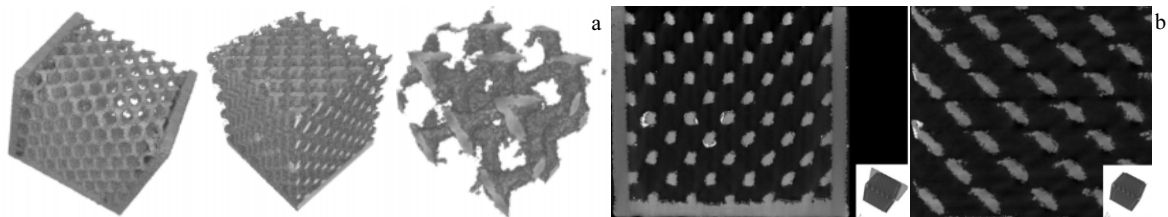


图 14 30%密度-2.5 mm 晶胞点阵加 1 mm 外壳试样的工业 CT 扫描

Fig.14 Industrial CT scanning of 30% density-2.5 mm unit cell lattice plus 1 mm shell sample: (a) overall and local morphologies and (b) partial surface enlarged display

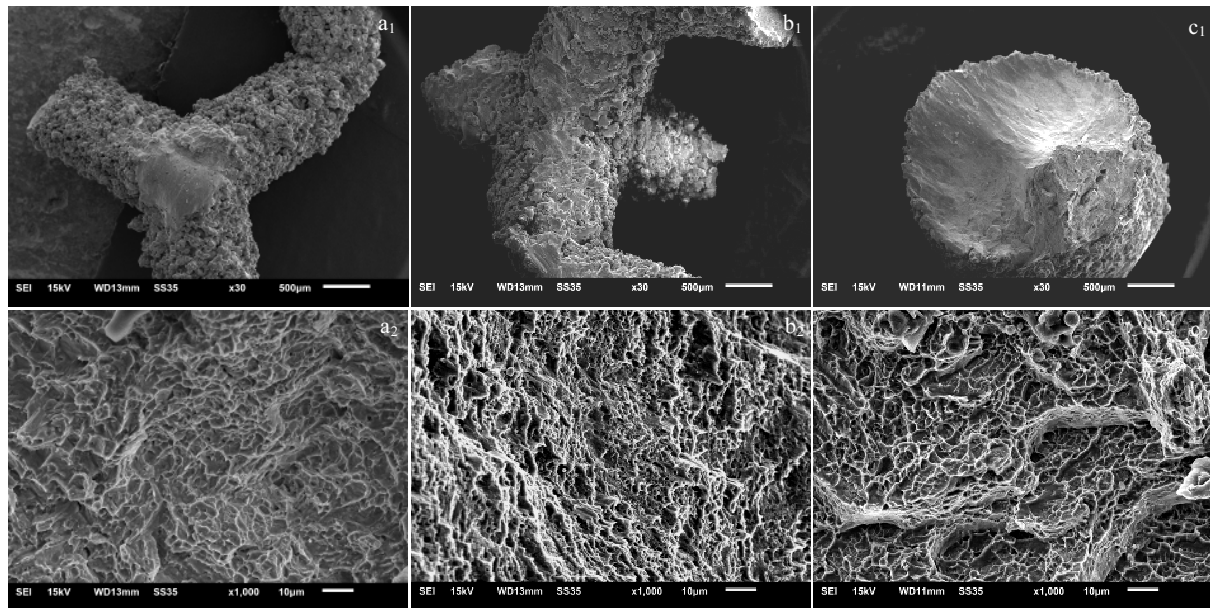


图 15 晶胞试样断口 SEM 形貌

Fig.15 SEM morphologies of the cell sample fracture: (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>) 20% density -2.5 mm unit cell; (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>) 30% density -2.5 mm unit cell; (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>) 30% density -5.0 mm unit cell

解理面和河流花样，其性能要明显好于前者。30%密度-5.0 mm 晶胞试样断口处有明显的解理台阶和和韧窝，该断裂机制是韧/脆混合型准解理断裂，因此无论是性能的稳定性和强度都高于 2.5 mm 晶胞试样<sup>[24]</sup>。

### 3 结 论

1) 激光功率、扫描速度等参数对试样的致密度有着显著的影响，选用 250 W 激光功率，800 mm/s 扫描速度，110 µm 扫描间距，30 µm 层厚参数，并使能量密度在 250 J/cm<sup>2</sup> 以上时，可以让致密度稳定在 99.0% 以上。

2) 激光选区熔化后形成的 TC4 沉积态试样纵截面组织为 β 柱状晶，横截面为片层的等轴 β 晶粒，内部均分布着针状 α' 马氏体。经过 600 °C 退火后，少量 α' 马氏体分解，晶粒尺寸略有变大。

3) 金刚石点阵结构试样受到载荷后在晶胞连接节点位置产生应力集中，进一步引发失效断裂。晶胞密度从 20% 提升到 30% 后，质量增加了 50%，强度提高了 120%。提高单位体积晶胞相对密度后，试样的变形抗力得到了提高，应力集中现象有所缓解。

4) 减小晶胞尺寸和添加外壳都可以使受力均匀化，提高点阵试样性能的稳定性和强度。但是小的晶胞尺寸对球化现象、孔隙等冶金缺陷较为敏感，降低试样的强度。

5) 600 °C 退火后点阵试样内部应力得到释放，强度有所提高，塑性下降。

### 参考文献 References

- [1] Lu Tianjian(卢天健), Liu Tao(刘涛), Deng Zichen(邓子辰) et al. *Mechanics in Engineering(力学与实践)*[J], 2008, 30(1): 1
- [2] Davis J, McGregor S T, William P King et al. *Additive Manufacturing* [J], 2019, 25: 10
- [3] Xiao L, Song W, Wang C et al. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2017, 100: 75
- [4] 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
- [5] Tang Huiping(汤慧萍), Zhang Zhengde(张正德). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 1997, 26(1): 1
- [6] Rombouts M, Kruth J P, Froyen L et al. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*[J], 2006, 55(1): 187
- [7] Yadroitsev I, Smurov I. *Physics Procedia*[J], 2011, 12: 264
- [8] Ochsner A, Altenbach H. *Cellular and Porous Materials in Structures and Processes*[M]. Vienna: Springer, 2010
- [9] Zhang X Z, Tang H P, Leary M et al. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*[J], 2018,70(9): 1870
- [10] Mazur M, Leary M, Sun S et al. *The International Journal of*



- Advanced Manufacturing Technology*[J], 2016, 84(5-8): 1391
- [11] Haydn N G, Wadly H N, Noman A E *et al. Composites Science and Technology*[J], 2003, 63(16): 2331
- [12] Kusakabe H, Sakamaki T, Nihei K *et al. Biomaterials*[J], 2004, 25(15): 2957
- [13] Hu Z, Zhu H, Zhang H *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2017, 87: 17
- [14] Liu Y, Yang Y, Wang D *et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2016, 87(1-4): 647
- [15] Kruth J P, Levy G, Klocke F *et al. CIRP Annals-Manufacturing Technology*[J], 2007, 56(2): 730
- [16] Shi X, Ma S, Liu C *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2016, 87(1-4): 647
- [17] Simonelli M, Tse Y Y, Tuck C *et al. Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2014, 45(6): 2863
- [18] Liang Xiaokang(梁晓康), Dong Peng(董鹏), Chen Jilun(陈济轮) *et al. Applied Laser(应用激光)*[J], 2014, 34(2): 101
- [19] Lu S L, Tang P H, Ning Y P *et al. Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2015, 46(9): 3824
- [20] Vrancken B, Thijs L, Kruth J P *et al. Journal of Alloys & Compounds*[J], 2012, 541: 177
- [21] Maskery L, Aremu A O, Simonelli M *et al. Experimental Mechanics*[J], 2015, 55(7): 1261
- [22] Cheng X Y, Li S J, Murr L E *et al. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*[J], 2012, 16: 153
- [23] Wang Qiangbing(汪强兵), Li Guangzhong(李广忠), Tang Huiping(汤慧萍) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2017, 46(9): 344
- [24] Edwards P, Ramulu M. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*[J], 2015, 38(10): 1228

## Compression Performance of TC4 Titanium Alloy Lattice Structures Manufactured by Selective Laser Melting

Lu Yichen<sup>1</sup>, Sun Zhonggang<sup>1</sup>, Guo Yanhua<sup>1</sup>, Chang Lili<sup>2</sup>, Shen Saigang<sup>2</sup>, Xing Fei<sup>2</sup>, Chang Hui<sup>1</sup>

(1. Nanjing Technology University, Nanjing 210009, China)

(2. Nanjing ZhongKe Raycham Laser Technology Co., Ltd, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** More and more applications have been made to realize lightweight design of aerospace parts by additive manufacturing to form complex lattice structures. However, the lattice structure design and its performance evaluation were still lacking. In this study, the diamond structure was used as the substrate, and the specimens with different geometric parameters were designed for forming TC4 titanium alloy, aiming at lattice density and structure form. Compression tests were carried out on the formed specimens to study the differences of compressive properties between specimens with different sizes. The results show that the stress of the diamond lattice structure specimens will concentrate at the joint position and cause fracture after being loaded. Increasing cell density can alleviate the phenomenon of stress concentration, and increase specific strength. Reducing cell size and adding shell can make the stress uniform and improve the stability. Small cell size specimens are more sensitive to metallurgical defects such as spheroidization and pore, resulting in a decrease in strength.

**Key words:** lattice structural materials; selective laser melting; TC4 titanium alloy; compression performance

---

Corresponding author: Sun Zhonggang, Ph. D., Associate Professor, Institute for Advanced Metallic Materials, Nanjing Technology University, Nanjing 210009, P. R. China, Tel: 0086-25-58788296, E-mail: sunzgg@njtech.edu.cn