

引文格式: 刘晓彤, 王丙阳, 戴宁, 等. 激光选区熔化制备钛合金点阵材料无损表征[J]. 航空制造技术, 2021, 64(5): 24-29.

LIU Xiaotong, WANG Bingyang, DAI Ning, et al. Nondestructive characterization of titanium alloy lattice materials prepared by laser selective melting [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(5): 24-29.

# 激光选区熔化制备钛合金点阵材料无损表征

刘晓彤<sup>1</sup>, 王丙阳<sup>1</sup>, 戴宁<sup>2</sup>, 武立铭<sup>2</sup>, 王敬钊<sup>1</sup>, 胡全栋<sup>1</sup>, 李怀学<sup>1</sup>

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;

2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 通过激光选区熔化制备 BCC 和 DOD 结构的钛合金金属点阵, 使用 Micro-CT 对两种结构的钛合金点阵材料进行扫描和三维重建。Micro-CT 图像清晰地显示金属点阵内部结构, BCC 和 DOD 单胞整齐地以周期性进行排列, 且内部存在少量圆形、椭圆形缺陷。通过将实际样品三维数据与 CATIA 数模进行比对, 发现钛合金点阵在制备过程中出现一定程度翘曲。此外使用共聚焦显微镜并基于 Micro-CT 图像对 BCC 和 DOD 两种金属点阵进行表面粗糙度测定。结果表明, Micro-CT 在钛合金点阵材料内部结构、缺陷、制备误差、粗糙度测试等表征方面具有显著的应用价值。

关键词: 激光选区熔化; 点阵结构; 表面粗糙度; Micro-CT; 无损表征

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.05.024



刘晓彤

助理工程师、硕士, 研究方向为工业 CT 检测技术。

随着增材制造技术的进步, 近年来晶格结构和功能梯度材料的制备和功能研究得到了长足发展, 并在航

空航天、生物医疗以及工业制造等领域有极大的潜力<sup>[1]</sup>。三维点阵结构亦被称为“类桁架结构”<sup>[2]</sup>, 它是三维有序多孔结构的一种, 由周期性的点阵桁架组成, 可以通过对桁架单胞的构型和几何尺寸设计实现对功能性的调控<sup>[3]</sup>。这类结构具有质量轻、密度小、比刚度和比强度高特点, 在受外力作用后, 变形空间较大, 在抵抗冲击, 抵御爆炸方面拥有良好的力学性能<sup>[4]</sup>, 此外金属点阵结构还兼具隔热、吸能、消音降噪等物理特性, 因此被认为是最有前景的新一代先进轻质超强韧材料<sup>[5-6]</sup>。传统金属点阵结构的制备工艺包括: 冲压成形法、挤压线切割法、拉伸网折叠法、搭接拼装法、铸造法等<sup>[7]</sup>。而近年来 3D 打印技术在航空航天等领域的优势日益凸显, 使用增材制造技术制备的金属点阵结构在结构功能一体化技

术应用中表现出巨大潜力<sup>[8]</sup>。

针对激光选区熔化钛合金金属点阵结构材料无损表征鲜有文献发表。本文使用激光选区熔化制造 BCC (Body-centered cells)、DOD (Dodecahedron) 钛合金金属点阵, 进行无损检测和表征。

## 试验设计

### 1 金属点阵结构设计

试验设计了两种金属点阵结构样件, 其中 BCC 结构单胞为  $7\text{mm} \times 7\text{mm} \times 7\text{mm}$ , 结构杆半径为  $0.7\text{mm}$ ; DOD 结构单胞为  $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 10\text{mm}$ , 结构杆半径为  $0.75\text{mm}$ 。单胞结构如表 1 所示, 其中  $a_1$  表示 BCC 结构单胞边长,  $r_1$  表示 BCC 结构杆半径,  $a_2$  为 DOD 单胞边长,  $r_2$  为 DOD 结构杆半径。

使用 TLS Technik Spezialpulver

生产 TC4 粉末,粉末粒径 15~53 $\mu\text{m}$  为原材料。M810 大型激光选区熔化精密快速成形设备,层厚 40 $\mu\text{m}$ ,激光功率 330W,扫描速度 1250mm/s;扫描间距 0.13mm,轮廓扫描功率 250W,轮廓扫描速度 1250mm/s,进行金属点阵结构激光选区熔化成形。

打印结束后经线切割得到 BCC 和 DOD 结构金属点阵结构样件,其中 BCC 结构样件为 3 $\times$ 3 $\times$ 5 周期,共 45 个单胞,样件总尺寸为 21mm $\times$ 21mm $\times$ 35mm;DOD 结构样件为 3 $\times$ 3 $\times$ 4 周期,共 36 个单胞,总尺寸为 30mm $\times$ 30mm $\times$ 40mm,如图 1 所示。

在增材制造过程中,由于点阵结构底部有支撑以及未熔融粉末,会导致底部出现高粗糙度和明显的表面波纹<sup>[9]</sup>。由图 1 (a)可以看出钛合金粉末激光选区熔化制备的点阵材

料表面粘附少量合金粉末引起的表面粗糙度增加。

## 2 试验方法

金属点阵结构材料使用北京固鸿科技有限公司 IPT04203C 型工业 CT 系统进行扫描,如图 2 所示,扫描参数为电压 150kV、电流 350 $\mu\text{A}$ 、积分时间 1200ms、投影次数 720、增益 0.5、放大比 6.11;重建参数为图像尺寸 2048mm $\times$ 2048mm、层间隔 0.05mm。

## 试验结果与讨论

### 1 工业 CT 三维重建和内部缺陷

使用 Micro-CT 对金属点阵结构样品进行扫描和重建,切层厚度为 0.05mm,重建后切层图如图 3 所示。

金属点阵内部虽然以周期进行排列,但内部曲面复杂,由于康普顿散射和瑞利散射的存在,探测器接收的光子还包括了散射光子,散射光子

使得探测器信号偏离 X 射线真实的信号强度,因此导致图像对比度和信噪比下降,并在重建图像中呈现阴影和条纹状散射伪影<sup>[10-11]</sup>。CT 系统中的散射信号主要来源于工件、环境和探测器<sup>[12]</sup>,同时选择性激光熔化工艺容易存在未熔融粉末颗粒,并导致灰度图像上出现大量噪声,从而影响测量结果。从图 3 (a)可看出,经 Micro-CT 扫描重建后,图像存在严重伪影,因此需进行伪影校正。

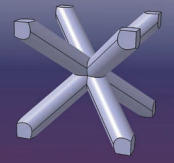
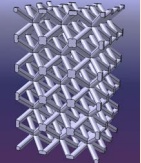

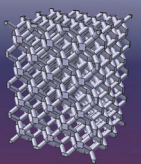
首先对探测器像元通道响应不一致性进行校正,包括无响应像素点、热点像素点和明暗场响应不一致性的校正。这些坏点通常数量巨大,有时集中又无法通过设备自动校正剔除,且对伪影的形成影响显著<sup>[13]</sup>。其次,通过在射线源与钛合金点阵材料之间放置滤波板来提高射束的平均能量,使射线穿透工件时的散射几率降低<sup>[14-15]</sup>。在扫描和重建参数不变的条件下,调节扫描工艺得到钛合金点阵切层图见图 3 (b)。对比图 3 (a)和(b)可以看出,点阵杆件轮廓更加清晰,影响图像质量的伪影降低,图像质量显著提高。同时可以得到 BCC 和 DOD 结构三维重建图像分别见图 4 (a)和(b)。

通过图 4 样品三维重建图可清晰地看到金属点阵结构杆件分布及整体/内部结构。从图中可以看出,BCC 和 DOD 单胞整齐地以周期性进行排列,并完整地反映出钛合金点阵的形貌。

图 5 所示为激光选区熔化钛合金点阵材料内部缺陷,其中图 5 (a)为 BCC 结构,图 5 (b)为 DOD 结构。可以看出,边缘椭圆形轮廓清晰可见,图 5 (a)中缺陷为圆形缺陷,其中缺陷 1 直径为 0.083mm,缺陷 2 直径为 0.148mm;图 5 (b)中缺陷为椭圆缺陷,缺陷大小为 0.285mm。图 5 (b)中红色箭头所指为成形过程中由于激光束功率偏高、成形速率过快,或成形使用合金粉末颗粒

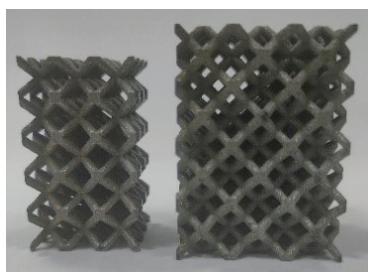
表 1 金属点阵结构设计

Table 1 Metal lattice structure design

金属点阵类型	单胞结构	单胞尺寸和杆半径/mm	点阵结构
BCC		$a_1=7$ $r_1=0.7$	
DOD		$a_2=10$ $r_2=0.75$	



(a) 点阵局部放大图像



(b) 钛合金点阵

图 1 BCC 和 DOD 钛合金点阵

Fig.1 BCC and DOD type metal lattice of titanium alloy

度较细导致局部过热引起的粘粉或未熔融颗粒,这与实际工程应用需较快成形的需求相符合。这表明经伪影校正的 Micro-CT 图像可以反映样品的形貌和内部结构,在激光选区熔化金属点阵的无损检测过程中有一定的实际应用价值。

## 2 实物/模型比对

由于激光选区熔化增材制造过程中,易出现熔池不稳定的现象,在熔池凝固过程中导致收缩产生残余应力,并在铺粉打印过程中逐步累积,最终使得工件翘曲变形,影响工件尺寸精度和力学性能<sup>[16-17]</sup>。为了研究在激光选区熔化钛合金点阵制备过程中的变形,需对金属点阵进行模型比对。

首先对体积重建模型进行表面测定,并对三维体积进行预处理,可以将实际样品三维模型与 CATIA 数模进行比对,判断实际 3D 打印与设计数模之间的误差。图 6 为 TC4 合金实际样品与 CATIA 数模比对偏差图。其中图 6(c)和(d)横坐标为

-0.4~0.4mm,纵坐标为 0~30。可以看出,使用激光选区熔化制备的金属点阵材料,表面偏差分布较为均匀,峰值集中在 0.10mm 附近,峰值在 0mm 右侧。这是由于在激光选区熔化成型过程中,金属点阵材料表面粘有部分未熔化的合金粉末,使实际样品表面较 CATIA 数模更大。

此外,图 6(a)和(b)水平向下方向为实际打印的基板方向,可以看出,在靠近基板位置,样品和数模有正偏差。在激光选区熔化成型时,基板作为约束限制了样品的翘曲,当通过线切割取下样品时,基板的约束撤去,金属点阵内部应力使四周边缘向反方向翘起从而与设计模型存在正偏差。

## 3 表面粗糙度分析

由于点阵材料存在一定的功能性应用潜力,因此有必要测定制件的表面粗糙度。

目前传统表面粗糙度测量方法主要分为接触式与非接触式两类。其中,接触式表面粗糙度测量以触针式为常用方法,测量时使用细小

的金刚石触针沿着一定长度的工件表面缓慢滑行,并将触针的上下位移通过传感器转换为电信号,经过放大、滤波和计算后即可显示表面粗糙度轮廓的图形,并计算出样件表面粗糙度。非接触式表面粗糙度测量,以光学测量为主,包括光学干涉法、散射法、共聚焦显微法以及白光干涉测量等<sup>[18-22]</sup>方法。

由于接触法对触针滑行距离有一定要求,而点阵结构单胞尺寸远小于该要求,因此试验使用共聚焦显微镜对 BCC 和 DOD 两种金属点阵进行表面粗糙度测定,结果如图 7 所示。

金属点阵或者内部拓扑结构由于其结构特殊性,传统接触或非接触测试无法对内部进行表面粗糙度测定,且破坏测量也不适于实际生产需要。基于 Micro-CT 图像进行的粗糙度检测技术,可以对工件内外表面粗糙度的状况进行无损评估,并通过切层数据对点阵结构的表面粗糙度进行定量分析。

根据国际标准 ISO 4287—1997

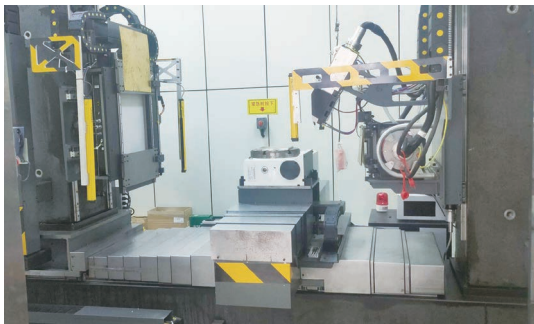


图 2 IPT04203C 型工业 CT 系统  
Fig.2 IPT04203C-type industrial CT system

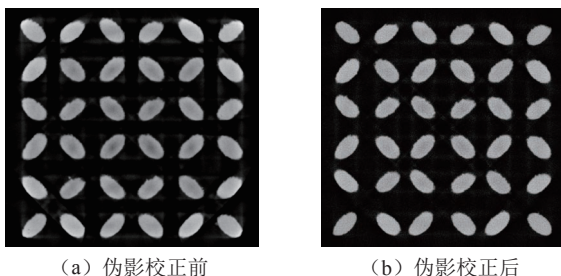


图 3 Micro-CT 重建切层图  
Fig.3 Micro-CT reconstruction slice

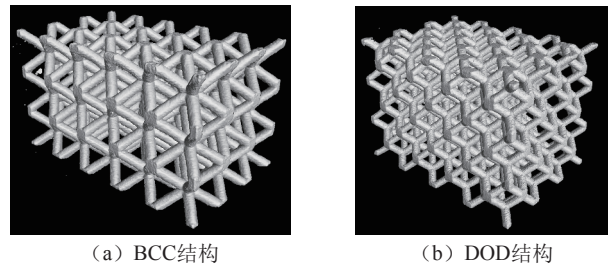


图 4 钛合金金属点阵三维重建图  
Fig.4 3D reconstruction of titanium alloy metal lattice

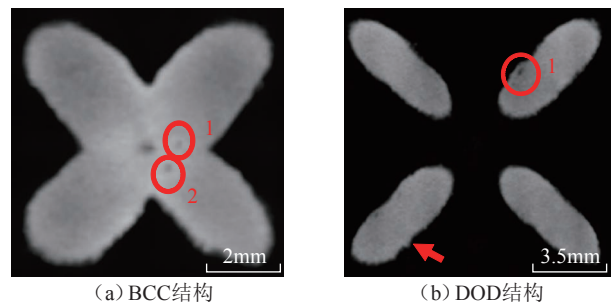


图 5 激光选区熔化钛合金点阵材料内部缺陷  
Fig.5 Internal defects of titanium alloy lattice prepared by laser selective melting

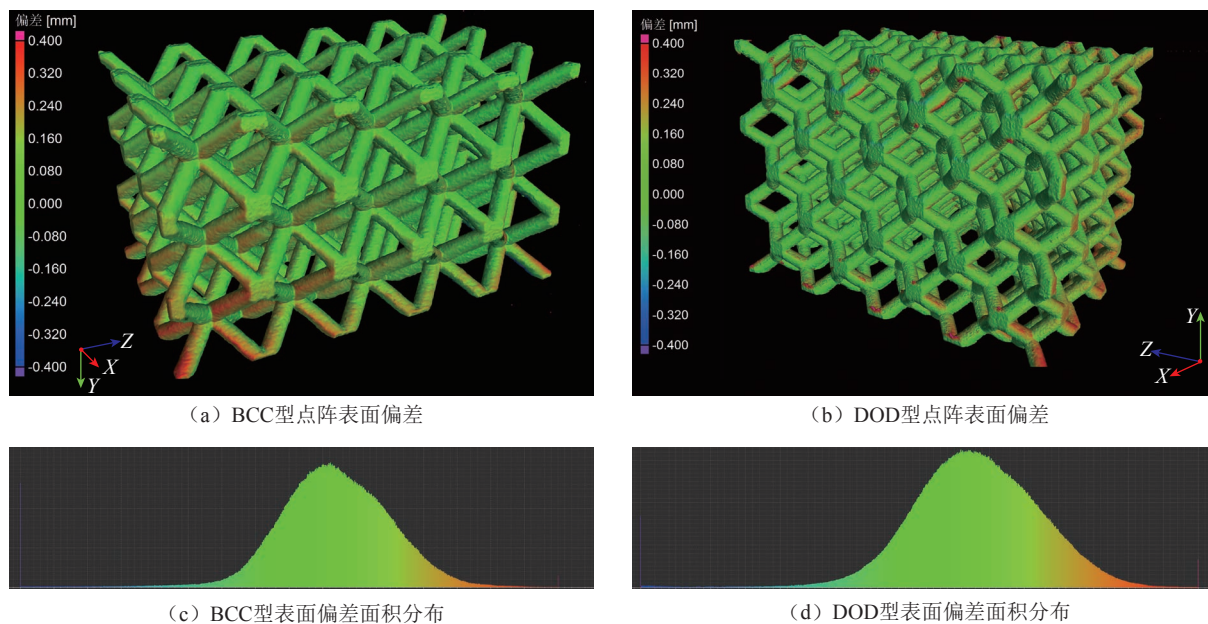


图6 样品三维重建与 CATIA 数模比对偏差  
Fig.6 Deviation comparison of 3D reconstruction with CATIA model

对于粗糙度的相关定义,点阵结构杆件单层轮廓的粗糙度值  $R_{a,i}$  值可以定义为:

$$R_{a,i} = \frac{1}{L} \int_0^L f(x) dx \quad (1)$$

式(1)中,  $L$  为基于最小二乘法拟合的椭圆周长:

$$L = 2\pi b + 4(a-b) \quad (2)$$

式(2)中,  $a$  为拟合椭圆的长半轴,  $b$  为拟合椭圆的短半轴。则单根杆的表面粗糙度  $R_a$  可以表示为:

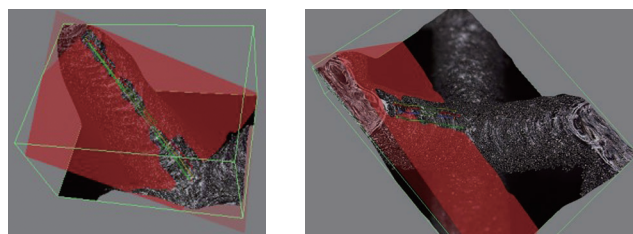
$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n R_{a,i} \quad (3)$$

式(3)中,  $n$  为杆件间互不相接触的区间内分层的数量,单根杆的均方根偏差  $R_q$  为:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n R_{a,i}^2} \quad (4)$$

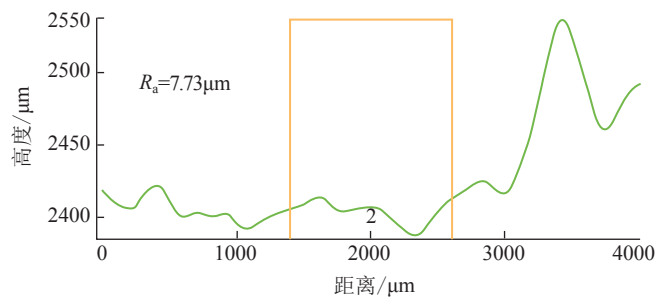
但在实际过程中,当杆件尺寸变大,其上下表面的粗糙度值也会有较大差别,必须将轮廓进行分开,单独计算(图8)。如图8(a)中A部分为上表面轮廓,其粗糙度值小;B部分为下表面轮廓,其粗糙度值较大。

晶格杆件单层上表面轮廓的粗糙度值  $R_{a,i,up}$  可以定义为:

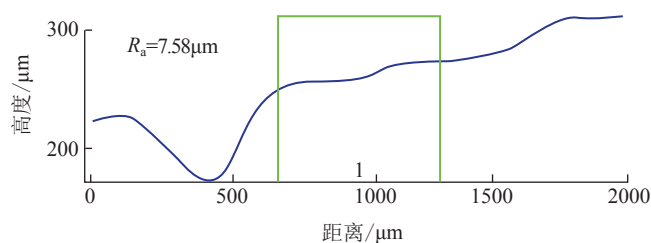


(a) BCC点阵测量区域

(b) DOD点阵测量区域



(c) BCC点阵表面粗糙度



(d) DOD点阵表面粗糙度

图7 共聚焦显微镜测量表面粗糙度

Fig.7 Confocal microscope measurement of surface roughness

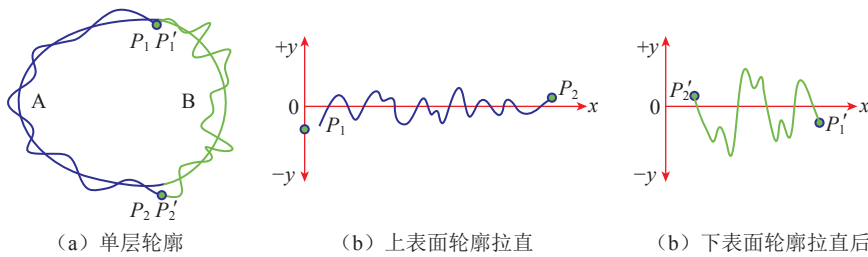


图8 真实晶格点阵结构上下表面粗糙度计算模型

Fig.8 Calculation model of upper and lower surface roughness of real lattice structure

$$R_{a,i,up} = \frac{1}{P_1P_2} \int_0^{L_{up}} f(x) dx \quad (5)$$

式(5)中,  $P_1P_2$  为轮廓拉直后拟合椭圆的水平长度:

$$P_1P_2 = \frac{L_{up}}{2} + 2 \times L_{MN} \quad (6)$$

式(6)中, 点  $M$  是短轴与椭圆的交点, 点  $N$  是椭圆中心点与上表面轮廓端点连线和椭圆的交点,  $L_{MN}$  为点  $M$  和点  $N$  的距离,  $L_{up}$  为基于最小二乘法拟合椭圆的周长:

$$L_{up} = 2\pi b_{up} + 4(a_{up} - b_{up}) \quad (7)$$

式(7)中,  $a_{up}$  和  $b_{up}$  分别为上表面轮廓拟合椭圆的长短半轴长, 则单根杆的上表面粗糙度  $R_{a,up}$  可以表示为:

$$R_{a,up} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n R_{a,i,up} \quad (8)$$

类似地, 下表面轮廓的粗糙度值  $R_{a,i,down}$  以及单根杆下表面的粗糙度  $R_{a,down}$  分别为:

$$R_{a,i,down} = \frac{1}{P_1'P_2'} \int_0^{L_{down}} f(x) dx$$

$$R_{a,down} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n R_{a,i,down} \quad (9)$$

晶格点阵结构单根杆整体的表面粗糙度值为:

$$R_a = \frac{R_{a,i,up} + R_{a,i,down}}{P_1P_2 + P_1'P_2'} \quad (10)$$

基于 Micro-CT 的尺寸特征边缘检测由此可通过钛合金点阵 Micro-CT 切层图对点阵芯部表面粗糙度进行计算, BCC 型晶格杆件表面粗糙度为  $6.1688\mu\text{m}$ ,  $6.2414\mu\text{m}$ ,  $5.4782\mu\text{m}$ ,  $5.1198\mu\text{m}$ ,  $7.0111\mu\text{m}$ ,  $5.0497\mu\text{m}$ ,  $5.5807\mu\text{m}$ ,  $6.4905\mu\text{m}$ , 均

值为  $5.8925\mu\text{m}$ ; DOD 型晶格杆件表面粗糙度为  $5.0279\mu\text{m}$ ,  $6.6061\mu\text{m}$ ,  $5.7348\mu\text{m}$ ,  $5.6915\mu\text{m}$ ,  $5.4809\mu\text{m}$ ,  $7.6685\mu\text{m}$ ,  $5.0684\mu\text{m}$ ,  $5.5761\mu\text{m}$ ,  $5.6511\mu\text{m}$ ,  $6.2754\mu\text{m}$ ,  $6.0589\mu\text{m}$ ,  $6.1674\mu\text{m}$ ,  $5.8245\mu\text{m}$ ,  $6.0635\mu\text{m}$ ,  $4.8429\mu\text{m}$ ,  $6.0431\mu\text{m}$ ,  $6.5423\mu\text{m}$ ,  $7.3734\mu\text{m}$ ,  $5.6084\mu\text{m}$ ,  $5.9169\mu\text{m}$ ,  $4.6473\mu\text{m}$ ,  $5.8719\mu\text{m}$ ,  $5.8994\mu\text{m}$ ,  $5.5153\mu\text{m}$ ,  $5.3085\mu\text{m}$ ,  $4.9681\mu\text{m}$ ,  $5.0132\mu\text{m}$ ,  $6.1916\mu\text{m}$ ,  $5.0706\mu\text{m}$ ,  $6.1389\mu\text{m}$ ,  $5.4228\mu\text{m}$ ,  $5.3757\mu\text{m}$ , 均值为  $5.7701\mu\text{m}$ 。

对比使用共聚焦显微镜测量表面粗糙度数值与基于 Micro-CT 图像进行的粗糙度检测数值, 发现后者粗糙度略小于前者。基于激光束选区熔化的金属增材制件, 由于粘粉和激光逐层扫描引起“阶梯效应”现象, 导致增材制件表面较为粗糙<sup>[23]</sup>。使用共聚焦显微镜测量将“阶梯”引起的表面粗糙度也计入在内, 故数值偏高。

## 结论

(1) 使用 Micro-CT 对金属点阵结构样品进行扫描和重建, 可以清晰地看到金属点阵内部结构, BCC 和 DOD 单胞整齐地以周期性进行排列, 钛合金点阵内部存在少量圆形、椭圆形缺陷。

(2) 通过将实际样品三维数据与 CATIA 数模进行比对, 发现钛合金点阵在制备过程中出现一定程度翘曲。

(3) 共聚焦显微镜对 BCC 和 DOD 金属点阵进行表面粗糙度

测定, 其中  $R_{a,BCC} = 7.73\mu\text{m}$ ,  $R_{a,DOD} = 7.58\mu\text{m}$ ; 基于 Micro-CT 图像进行的粗糙度测量,  $R_{a,BCC} = 5.89\mu\text{m}$ ,  $R_{a,DOD} = 5.77\mu\text{m}$ 。

## 参考文献

- [1] DALIA M, MOHAMED E. Lattice structures and functionally graded materials applications in additive manufacturing of orthopedic implants: A review[J]. Journal of Manufacturing & Materials Processing, 2017, 1(2):13-32.
- [2] WICKS N, HUTCHINSON J W. Optimal Truss Plates[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(30-31): 5165-5183.
- [3] 张奎晓, 贾芸, 储逸然. 基于增材制造的点阵结构特性及建模方法[J]. 机械工程与自动化, 2019(5): 221-222,226. ZHANG Kuixiao, JIA Yun, CHU Yiran. Characteristic and modeling method of lattice structure based on additive manufacturing[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019(5): 221-222,226.
- [4] 郭怡东, 马玉娥, 李佩瑶. 增材制造钛合金微桁架夹芯板低速冲击响应研究[J]. 航空学报, 2020. GUO Yidong, MA Yue, LI Peiyao. Low velocity impact response of additively manufactured titanium alloy micro-truss sandwich panels[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020.
- [5] 杜义贤, 李涵钊, 田启华, 等. 基于能量均匀化的高剪切强度周期性点阵结构拓扑优化[J]. 机械工程学报, 2017, 53(18): 152-160. DU Yixian, LI Hanzhao, TIAN Qihua, et al. Topology optimization of periodic lattice structure with high shear strength using energy-based homogenization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(18): 152-160.
- [6] 赵冰, 李志强, 侯红亮, 等. 金属三维点阵结构制备技术研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(8): 2189-2200. ZHAO Bing, LI Zhiqiang, HOU Hongliang, et al. Research progress on fabrication methods of metal three dimensional lattice structure[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(8): 2189-2200.
- [7] 黄英杰. 三维 Al 基点阵材料设计、制备及力学性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017. HUANG Yingjie. 3D Al basis matrix material design, preparation and mechanical properties research[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [8] 王向明, 苏亚东, 吴斌, 等. 微桁架点阵结构在飞机结构/功能一体化中的应用[J]. 航空制造技术, 2018, 61(10): 16-25.

WANG Xiangming, SU Yadong, WU Bin, et al. Application for additive manufacturing of lattice materials on integrated aircraft structures and functions[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(10): 16–25.

[9] 喻长江. 面向增材制造的仿生微结构建模及质量检测技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.

YU Changjiang. Add material manufacturing oriented modeling bionic microstructure and quality detection technology research[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

[10] RONG J Y, LIU W L, GAO P, et al. The review of scatter suppression methods in cone beam CT[J]. *Computerized Tomography Theory and Applications*, 2016, 25(2):235–250.

[11] LIU J B, XI X Q, HAN Y, et al. A new scattering artifact correction method based on K–N formula for cone-beam computed Tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1134001.

[12] 唐天旭, 段晓礁, 周志政, 等. 基于散射校正板的锥束微纳 CT 系统的散射校正[J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0834001.

TANG Tianxu, DUAN Xiaojiao, ZHOU Zhizheng, et al. Scatter correction based on beam stop array for cone-beam micro-computed tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0834001.

[13] 李俊江, 胡少兴, 李保磊, 等. CT 图像环状伪影校正方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2007, 33(11): 1378–1382.

LI Junjiang, HU Shaoxing, LI Baolei, et al.

Ring artifact correction for industrial CT images[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007, 33(11): 1378–1382.

[14] 李保磊, 封亚, 李俊江. CT 成像射束硬化校正方法研究[J]. *生命科学仪器*, 2007, 5(9): 34–38.

LI Baolei, FENG Ya, LI Junjiang. Research on beam hardening correction method for computed tomography imaging[J]. *Life Science Instruments*, 2007, 5(9): 34–38.

[15] MAIL N, MOSELEY D J, SIEWER-DSEN J H, et al. The influence of bowtie filtration on cone-beam CT image quality[J]. *Medical Physics*, 2009, 36(1): 22–32.

[16] VRANCKEN B, CAIN V, KNUITSEN R, et al. Residual stress via the contour method in compact tension specimens produced via selective laser melting[J]. *Scripta Materialia*, 2014, 87: 29–32.

[17] 张凯, 刘婷婷, 张长东, 等. 基于熔池数据分析的激光选区熔化成形件翘曲变形行为研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0903007.

ZHANG Kai, LIU Tingting, ZHANG Changdong, et al. Study on deformation behavior in selective laser melting based on the analysis of the melt pool data[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0903007.

[18] AKHSAKHALYAN A A, AKHSAKHALYAN A D, ZORINA M V, et al. A method for measuring the shape of a surface of an ellipsoid of rotation on a Talysurf CCI 2000 interference microscope[J]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences Physics*, 2011, 75(1): 97–99.

[19] KAWASAKI T, TAYA M, TAKAI Y. Practical method to determine the filter shape function used in the three-dimensional Fourier filtering method[J]. *Journal of Electron Microscopy*, 2004, 53(3): 271–275.

[20] 常素萍. 基于白光干涉轮廓尺寸与形貌非接触测量方法和系统[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.

CHANG Suping. Based on white light interference profile non-contact measuring method of size and shape and system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.

[21] 胡春光. 利用相移显微干涉术和频闪成像技术研究 MEMS 离面运动[D]. 天津: 天津大学, 2004.

HU Chunguang. Using the phase shift microscopic interferometry and stroboscopic imaging technology research MEMS surface movement[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.

[22] BARARI A, KISHAWY H A, KAJI F, et al. On the surface quality of additive manufactured parts[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89(5–8): 1969–1974.

[23] 苏仕祥, 戴宁, 程筱胜, 等. 基于轮廓特征的点阵尺寸可溯源测量[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1212006.

SU Shixiang, DAI Ning, CHENG Xiaosheng, et al. Traceable dimensional measurement for lattices based on contour features[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1212006.

通讯作者: 刘晓彤, E-mail: liuxt\_sheldon@126.com。

## Nondestructive Characterization of Titanium Alloy Lattice Materials Prepared by Laser Selective Melting

LIU Xiaotong<sup>1</sup>, WANG Bingyang<sup>1</sup>, DAI Ning<sup>2</sup>, WU Liming<sup>2</sup>, WANG Jingzhao<sup>1</sup>, HU Quandong<sup>1</sup>, LI Huaixue<sup>1</sup>

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**[ABSTRACT]** The titanium alloy lattice with BCC and DOD structure is prepared by laser selective melting. Micro-CT is used to scan and 3D reconstruct the titanium alloy lattice materials with these two kinds of structures. Clear internal structure can be seen in these lattices and a few round and oval defects can be found. BCC and DOD cells are arranged neatly and periodically with no slag, collapse or rod bending. Through comparison of CATIA model and 3D reconstruction data of lattice structures, it is found that the alloy lattice is bended. In addition, the surface roughness of BCC and DOD metal lattices is measured and calculated using confocal microscope based on Micro-CT image. The results show that Micro-CT has significant application value in the characterization of the internal structure, defects, preparation errors and roughness testing of titanium alloy lattice materials.

**Keywords:** Laser selective melting; Lattice structure; Surface roughness; Micro-CT; Nondestructive characterization

(责编 大漠)