

3D 打印轻质高强钨材的力学性能研究

陈文练¹, 杨益航¹, 陈晓红², 郑俊杰¹, 古思勇¹, 张厚安¹

(1. 厦门理工学院 材料科学与工程学院, 福建 厦门 361024)

(2. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 采用选择性激光熔化 (SLM) 3D 打印方式成功设计和制造了具有点阵结构的钨材, 结合有限元分析、扫描电镜、准静态单轴压缩试验探究了不同点阵结构下钨材力学性能的变化规律, 分析了微观组织对力学性能的影响。结果表明圆弧型点阵结构可有效降低节点处的应力集中, 保持点阵结构轻质、低孔隙率特性同时还维持着钨材的高强度力学性能, 平均抗压强度达到 535 MPa, 平均质量仅为 1.25 g, 激光打印后圆弧点阵较立方点阵平均抗压强度提升 93%, 其中体心圆弧点阵 (BCA) 显示出更优抗压性能, 极限抗压强度达到 721 MPa, 结构致密度为理论值 12.8%; 力学性能指标接近于变形态。与立方点阵相比, 圆弧点阵具有良好的能量吸收特性, 后者相较前者总能量吸收值提升 223%, 圆弧点阵平均能量吸收达到 1664 J/mm³。此外, SEM 图像显示圆弧点阵因其弧形特性, 减少了打印中斜支柱的悬挂距离, 成型效果优于立方点阵。

关键词: 点阵结构; 3D 打印; 轻量化; 高强度; 钨材

中图分类号: TG146.4⁺11

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)11-3922-09

具有周期性几何排列的金属三维点阵结构与传统材料最大的区别在于其轻质、高强、高比表面积、抗冲击性及能量吸收^[1-6]。具有代表性的晶格结构如体心立方结构、面心立方结构、八重桁架结构、蜂窝结构^[7-9]。增材制造及现代技术的发展为点阵结构的制造提供了可行性^[10]。与传统方法相比, 增材制造技术可以制造出更为复杂的几何形状, 提供良好的控制性和预测性^[11-12]。轻量化是飞行结构设计的一个重要指标, 直接影响着飞行性能。近年来, 随着增材制造技术的发展, 点阵结构以其轻质、高强的特点, 逐渐被应用于航空航天领域, 提升了飞行器的综合性能, 通过优化结构设计, 可减少应力带来的影响, 从而延长试件的整体使用寿命, 欧洲航天局制备的一种耐高温钨合金零件^[13], 其内部结构为点阵结构, 美国波音公司于机身层芯材料中使用了周期点阵结构网架^[14], 有效地降低了机身的重量。因此, 研究点阵结构的力学特性, 探索在提高强度的同时减少材料的使用, 制备出轻质、高强结构使其运用于航空航天、汽车、医学等领域, 具有重要研究意义。钨是一种广泛使用的金属材料, 具有高熔点、高热导率、高强度等优点, 已广泛应用于航空航天、国防军工、医疗器械等尖端领域, 但较高的熔点和低温脆性导致钨传统加工和成

型难度较大, 同时, 钨高昂的成本也限制了其应用范围。因此, 从经济性入手, 采用增材制造技术制备纯钨点阵结构, 既满足了材料使用的性能要求, 同时降低了制造的成本和周期。

为提升 3D 打印制品的应用潜力, 主要有 3 种点阵结构优化方式: (1) 改变或组合不同结构; (2) 点阵节点优化; (3) 梯度结构设计。针对方式一, Chen^[15]等人设计了一种桁架点阵, 表现出了高能量吸收、减震的特性。Messner^[16]等人设计了一种以拉伸为主导的机械超材料, 具有在低相对密度下超高的能量吸收能力。Messner^[17]等人描述了一种优化晶格结构的方法, 可生产出最佳介观结构, 表现出出色的刚度和强度。针对方式二, Cao^[18]等人利用分离式霍普金森压杆研究了改进型菱形十二面体 (RD) 点阵结构的动态压缩性能。压缩模量和初始屈服强度分别增加了约 79% 和 55%。针对方式三, Yu^[19]等人设计了具有均匀和分级的密度结构, 结果表明梯度结构在压缩过程中吸收了更多的能量。I. Maskery^[20]等人测试了均匀和梯度结构在准静态载荷下的力学行为来建立晶格几何形状和性能之间的关系, 通过热处理改善了它们的行为和能量吸收能力。Al-Saedi^[21]等人通过 SLM 工艺制备了铝合金功能梯度结构及均匀点阵研究

收稿日期: 2023-03-20

基金项目: 福建省功能材料及应用重点实验室开放课题; 福建省增材制造创新中心开放基金 (ZCZZ202-16); 福建省自然科学基金 (2021J011213); 国家自然科学基金 (52173266)

作者简介: 陈文练, 男, 1999 年生, 硕士生, 厦门理工学院材料科学与工程学院, 福建 厦门 361024, E-mail: 1043984237@qq.com

晶格结构力学特性,结果表明功能梯度晶格的单位体积总累积能量吸收高于均匀晶格。

上述几种策略的研究中优化了点阵结构的力学性能,然而,仍然存在某些局限性,对于方式一形成的超材料需要精确的加工精度。对于方式二点阵节点的优化将导致节点权重的增加,影响设计及加工。对于方式三梯度结构层次之间的变形机制及相互作用效果难以控制且梯度结构伸长率较低。此外,上述方法并未显著提高机械性能,如弹性模量、应力集中等问题。为了保证点阵结构具有轻质特性的同时保持着高强度的性能,本研究针对应力集中问题,受圆角加工启发,设计了一类新结构,称为圆弧点阵。使用该结构中的圆角支柱代替立方点阵中的直支柱,由尖角过渡为圆角,从而减小点阵节点中的应力不均匀分布及应力集中,提高零件使用寿命,将在航空航天应用中展现优势。

1 实验

为了获得低密度、低质量、高强度的均匀点阵结构,选择纯钨材料进行样品的制造,激光打印原材料选用粒度 $\leq 44 \mu\text{m}$ 的近球形结晶钨粉,粉末形貌照片如图 1 所示。由原料品质报告见结晶钨粉的杂质含量如表 1 所示,钨粉氧含量达到 $300 \mu\text{g/g}$,纯度达 99.5% 以上。该结晶钨粉粒度分布均匀,颗粒结晶完整,没有明显团聚现象。使用粉末综合特性测试仪检测该结晶钨粉与普通钨粉的流动性指数如表 2 所示,结晶钨粉表现出更高的流动性。

为了比较立方点阵和圆弧点阵的压缩特性,选择了 8 种点阵结构模型:体心立方点阵、面心立方点阵、简单立方点阵、八重桁架点阵,还使用这 4 种点阵对应的圆弧点阵,分为 4 组,由 Unigraphics NX 设计。点阵胞元在 3 个方向上垂直排列由 $5 \times 5 \times 5$ 个构成,每个胞元大小 1.2 mm ,整体结构为 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 。所有点阵

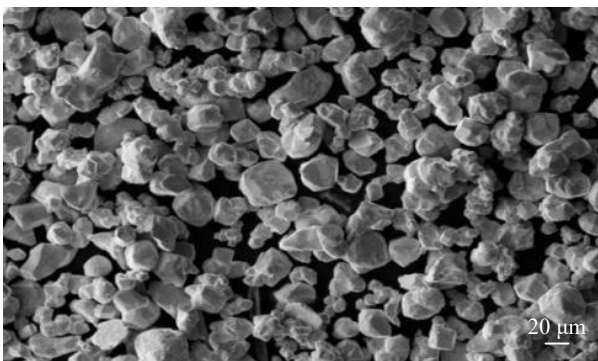


图 1 结晶钨粉 SEM 照片

Fig.1 SEM image of crystalline tungsten powder

表 1 结晶钨粉化学成分

Table 1 Chemical composition of crystalline tungsten powder ($\omega/\%$)

W	O	C	CO ₂	Fe
≥ 99.5	≤ 0.030	0.0008	0.0075	0.0075

表 2 粉末流动性指数

Table 2 Tungsten powder liquidity index

Index	Crystalline powder	Ordinary powder
Angle of repose/($^\circ$)	26.40	45.50
Angle of rupture/($^\circ$)	21.10	32.20
Differential angle/($^\circ$)	5.30	3.30
Flat angle/($^\circ$)	26.05	53.75
Bulk density/ g cm^{-3}	8.9	9.7
Degree of liquidity	Better	Ordinary

结构均由圆柱杆组成,考虑到设备最小加工尺寸及加工精度和经济效率,选择了 0.3 mm 的杆直径进行设计。

根据三维模型,纯钨点阵样品由 SLM 技术制造。样品制备所用的 3D 打印设备为 WXL-120T 智能金属 3D 成型设备。设备包含最大功率 500 W 、光斑尺寸为 $50 \mu\text{m}$ 的光纤激光器、高速扫描仪及气体保护系统。SLM 打印纯钨最适体积能量密度为 1000 J/mm^3 ^[22],体积能量密度可以表示为:

$$E = P/vhd \quad (1)$$

式中, E 为体积能量密度, P 为打印功率, v 为扫描速度, h 为扫描间距, d 为铺粉层厚。实际打印中功率设定为 350 W 、扫描速度 300 mm/s ,层厚及扫描间距分别设定 30 和 $40 \mu\text{m}$,经计算体积能量密度为 972 J/mm^3 ,为了减少残余应力,采用交替扫描策略,打印前基板预热至 $200 \text{ }^\circ\text{C}$,打印过程中受高纯氩气保护,含氧量保持在 $100 \mu\text{g/g}$ 以下。制造完成后,使用 SH400 线切割机将样品从基板上移除,图 2 展示了打印样品图。

将样品从基板上移除后,使用电子天平测量样品的质量。测量之前,将样品放入装有无水乙醇的烧杯中,使用超声波清洗器洗涤样品,以去除表面粉末及污染物。待样品干燥后,使用扫描电镜 (SEM, sigma 500) 观察样品微观形貌。为了评估圆弧点阵设计,有必要比较各组结构的机械响应。因此,采用泰思特万能试验机对样品进行准静态单轴压缩试验。根据 ISO 13314:2011 标准^[23],每个试样放置于两圆柱形硬化钢块之间,润滑接触面以减少摩擦力影响,在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 下,以 1 mm/min 的

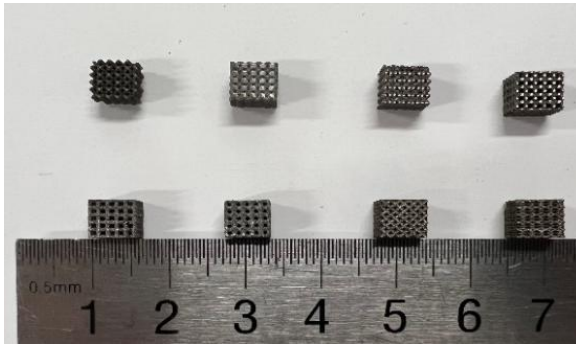


图 2 打印 8 种结构样品实物

Fig.2 Samples of eight kinds of structure

恒定加载速度在 z 方向上进行加载,当载荷急剧下降时,试验停止,每种结构测量 3 个样品以确保精确性。后续将试验力-位移曲线转换为应力-应变曲线,抗压强度为应力-应变曲线上的峰值应力。

2 结果与分析

2.1 钨材的轻量化

表 3 根据式 (2) 计算样品致密度。8 种结构致密度在理论值的 12.8%~30.2%之间,表现了点阵结构低度的特性。圆弧点阵致密度均小于立方点阵,表现了其低质量的优越性。

$$\rho = \frac{V_0}{V} \times 100\% \quad (2)$$

式中, ρ 为样品致密度; V_0 为样品理论体积; V 为边长 6 mm 正方体体积。表 3 列出了样品的实际质量和理论质量,圆弧结构平均质量仅为 1.25 g (保留一位小数), 8 种结构实际质量均大于理论质量,实际质量约为理论质量的 1.7 倍。这是由于 SLM 制造存在的固有特性,支柱表面易粘结粉末,导致样品实际质量大于理论质量。

2.2 SLM 工艺参数对纯钨试样致密度的影响

在 SLM 加工过程中,能量密度对致密化行为有重

表 3 点阵模型组成胞元及整体试样设计

Table 3 Lattice model composition cell and overall sample design

Lattice structure	Cell design	Overall structure	Volume/mm ³	Density/%	Theoretical mass/g	Actual mass/g	Rate of mass increase/%
Face centered cubic (FCC)			28.0803	13.0	0.5	1.1	105
Body centered cubic(BCC)			27.6805	12.8	0.5	0.8	51
Simple cubic (SC)			31.2498	14.5	0.6	1.4	138
Octuple truss (OT)			36.4282	16.9	0.5	0.9	81
Face centered arc (FCA)			27.5903	12.8	0.7	1.1	61
Body centered arc (BCA)			32.9142	15.2	0.6	0.9	45
Simple arc (SA)			65.3362	30.2	1.25	2.0	59
Octuple arc (OA)			58.1451	26.9	1.1	1.6	43

要影响。图 3 显示了使用不同激光能量密度的 SLM 加工纯 W 零件的密度, 各能量密度所对应的 SLM 工艺参数如表 4 所示。当能量密度低于 972 J/mm^3 时, 随着施加激光能量密度的增加, 密度和相对密度都会增加, 表明提高激光能量密度可以促进致密化过程并提高 SLM 加工 W 零件的密度。而当能量密度高于 972 J/mm^3 时, 密度和相对密度则会随激光能量密度的升高而降低, 表明存在激光能量密度最佳值 (1000 J/mm^3 附近)。使用最佳能量密度, 获得的相对密度为 18.57%。

2.3 具有点阵结构钨材的力学性能

2.3.1 压缩试验有限元分析

采用绘图软件 Unigraphics NX 建立点阵结构几何模型, 将建立的三维点阵模型作为实体导入 Workbench 进行有限元数值模拟。模拟钨材料密度设定 19.35 g/cm^3 , 弹性模量为 411 GPa, 泊松比设定 0.28, 屈服强度 2 GPa, 切线模量 161 GPa。有限元模型上下部分由 2 块刚性板组成实验边界条件, 厚度 0.1 mm, 长宽均为 6 mm, 下板块添加固定约束, 上板块施加单向载荷, 如图 4 所示。为了模拟刚性板和晶格之间的接触条件, 设置数值为 0.1 的切向摩擦系数。通过不同网格大小的设定, 发现使用 0.5 mm 网格大小进行计算时, 计算结果精确且减少时间。

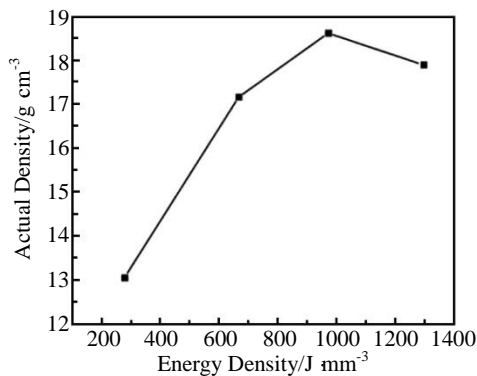


图 3 能量密度与样品密度关系曲线

Fig.3 Curve of energy density vs sample density

表 4 不同相对密度钨样品的制备参数

Table 4 Preparation parameters of tungsten samples with different relative density

Laser power/W	Laser speed/ mm s^{-1}	Layer thickness/ μm	Hatch space/ μm	Relative density/%	Energy density/ J mm^{-3}
250	1000	30	30	83.1	278
300	500	30	30	88.7	667
350	300	30	40	96.2	972
350	200	30	40	92.5	1458

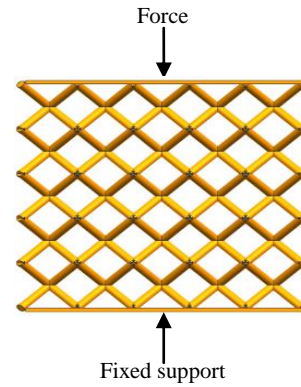


图 4 FEM 模拟分析模型

Fig.4 Analysis model of finite element modeling (FEM)

有限元模拟的应力结果通常与实际结果一致。然而, 收缩在 SLM 的液固相变中是无法避免的^[24], 这将导致由 SLM 制造的零件中会产生一定的应力和气孔、微裂纹及未熔颗粒等缺陷^[25-26], 因此, 实际压缩试验中样品施加 3000 N 单向压缩载荷的应力分布云图见图 5。在承受相同载荷条件下, 显著的应力集中和应力非连续分布现象出现在立方点阵中, 应力集中导致顶层支柱及节点位置断裂失效, 立方点阵在节点处显示出明显的应力集中, SC 结构中载荷主要分布在沿加载方向的垂直支柱上。圆弧点阵的晶胞节点处应力分布明显减小, 在节点附近区域, 应力分布更加均匀, 表明应力由节点分散到圆弧支柱上。图 5c 和 5d 展示了局部应力分布云图, 圆弧点阵提高了结构的光滑度和整体强度, 受载时可向四周分配应力, 扩大实际承载范围, 有利于载荷在支柱之间的均匀分布和扩散, 扩大了节点处的尖锐区域且不增加质量。考虑到样品尺寸较小, 选择不同尺寸的体心圆弧点阵进行有限元压缩模拟, 设置相同结构、截面、载荷但 Z 方向不同高度工件的应力分布情况, 结果如图 5e、5f、5g 所示。可见在单向 3000 N 的载荷作用下, 高度为 6 mm (图 5e)、12 mm (图 5f)、18 mm (图 5g) 的体心圆弧点阵所受应力值均在 4500 MPa 附近, 结构力学性能差异不大, 表明所受尺寸效应的影响较小^[27]。

2.3.2 单轴压缩试验

实际压缩试验与模拟压缩试验的应力-应变曲线和压结构变化如图 6 所示。其中显示了各类结构的代表性曲线, 试验结果与模拟结果一致, 圆弧结构极限抗压强度均高于立方结构, 表明圆弧结构的优异力学性能。在所有样品中, 观察到变形过程是相同的, 变形初始阶段表现为弹性变形; 随着载荷的增加, 结构开始产生塑性变形, 塑性变形主要发生在顶层支柱上, 通过节点与下一层支柱接触, 单元支柱被压碎, 结构应力达到峰值, 这与实际压缩试验中观察到的支柱断裂和块体飞溅类

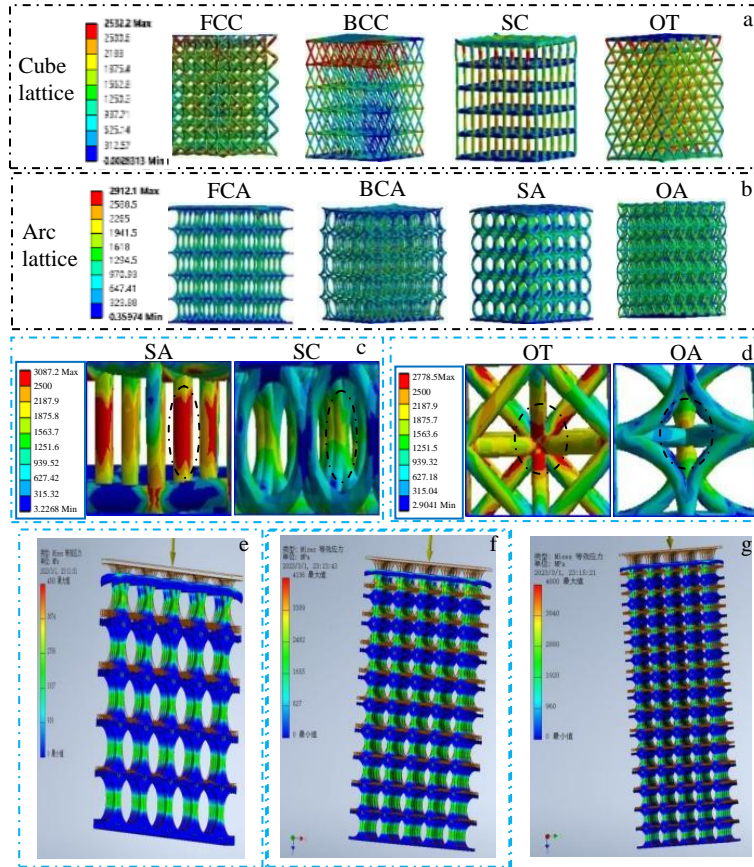


图 5 压缩试验有限元分析应力分布云图

Fig.5 Finite element analysis stress distribution plot of lattice structure: cube (a) and arc (b) lattice overall structural stress distribution; (c-d) local stress distribution; (e) 6 mm BCA, (f) 12 mm BCA, and (g) 18 mm BCA

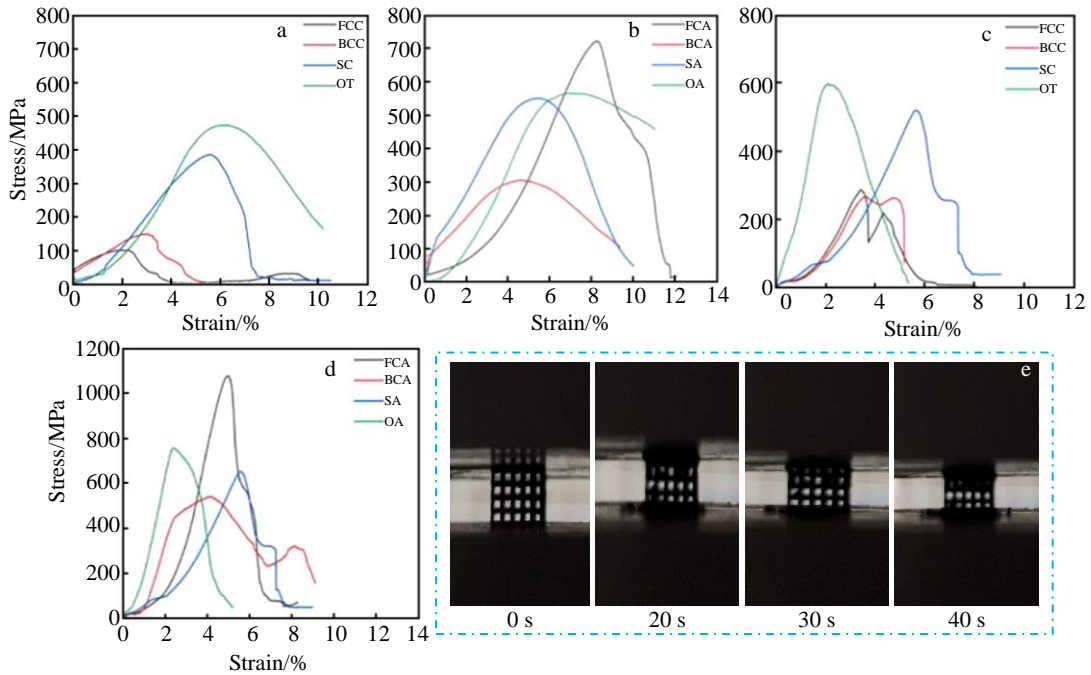


图 6 不同点阵结构样品实验应力-应变曲线和压结构变化

Fig.6 Experimental (a, b) and simulated (c, d) stress-strain curves of the samples with different lattice structures: (a, c) cube lattice and (b, d) arc lattice; (e) photographs during compression tests of lattice structure

似, 图 6e 展示了实际压缩试验中样品随时间变化的崩塌情况。BCA 结构显示出最高的抗压强度, 达到 721 MPa, 圆弧结构极限抗压强度均高于立方结构 (图 6a 和 6b), 平均极限抗压强度提升了 93%; 应力达极限值后, 各结构应力值迅速下降为零, 表明结构出现塌缩失效。圆弧结构的支柱可以分散更多的应力, 当应力集中在圆弧点阵的节点上时便迅速转移到下一层表现出点阵结构独特的逐层分布。模拟曲线 (图 6c 和 6d) 相对高于实验曲线, 这是由于 FCA 模型中所使用的材料为连续、均匀的理想几何形状, 而实际制造的样品内部存在不规则或缺陷区域 (气孔、裂纹、杂质等)。此外, 在压缩过程中存在的复杂物理变化导致样品物理性能改变如样品表面摩擦力等将更易产生应力集中。

2.3.3 样品的能量吸收

点阵结构可通过压缩变形吸收能量并应用于各类型保护装置中。金属晶格大部分能量在稳定阶段被吸收, 这取决于应力应变-曲线的平台长度, 由于实际压缩试验曲线中没有明确应力平台, 因此采用能量积分以供进一步研究。单位体积能量吸收定义为应力-应变曲线和应变轴围成的面积 (图 7a 和 7b 中阴影部分), 如式 (3):

$$W = \int_0^\epsilon \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (3)$$

式中, W (J/mm^3) 为单位体积能量吸收, ϵ 和 $\sigma(\epsilon)$ 分别为有效压缩应变和应力。所有结构在初始阶段均吸收了能量, 当结构开始塌缩失效时, 每单位体积能量吸收率逐渐减慢。使用极限应力对应的有效应变比较了各结构单位体积的能量吸收, 结果如图 7c 所示。圆弧点阵表现出非凡的能量吸收能力, 圆弧结构平均能量吸收达到 $1664 J/mm^3$, 总能量吸收值为立方结构的 223%。此外, 结果显示体心和面心两组点阵能量吸收效果提升显著, 分别达到 1326% 和 293%, 简单结构和八重结构之间的能量吸收能力差异不大。圆弧点阵的独特缓冲能力明显提高了能量吸收, 为晶格填充组件和保护结构提供

了可靠参考价值。

2.4 微观组织分析

2.4.1 表面形貌分析

使用 sigma 500 扫描电子显微镜观察均匀点阵结构样品表面, 如图 8 所示, 样品表面粘结较多粉末颗粒 (图 8a), 这是由于未熔粉末与熔化粉末之间存在显著温度差异, 材料之间发生热扩散, 导致粉末粘结在支柱表面及孔隙中^[28-29]。粉末粘结导致样品表面粗糙, 使表面形成更多气化核心, 还会导致点阵结构样品实际孔隙率小于理论孔隙率, 图 8a 中白色虚线部分, 表面粉末粘结导致空洞位置形成粉末堆积, 使结构孔隙率降低。通过 STL 切片软件将三维点阵模型分为许多多面体层, 多面体层结构导致阶梯效应, 使样品表面出现阶梯波纹, 图 8b, 阶梯效应导致样品实际尺寸与理论尺寸存在一定偏差, 可通过减少层厚及扫描速度来增加处理时间, 从而减少阶梯区域。Yang^[30]等人指出, 沿建筑方向的支柱可以提高制造保真度, 立方结构的斜支柱 (图 8c) 在加工过程中更易与相邻支柱烧结, 在结构底部观察到轻微下垂, 导致较长的悬挂距离和阶梯效应, 圆弧结构支柱 (图 8d) 倾向于平滑收敛, 减少斜撑的悬挂距离, 从而提高制造保真度, 垂直支柱直径明显大于斜支柱和水平支柱 (图 8c 中线段 1 长度小于图 8d 中线段 2 长度), 使得圆柱点阵力学性能优于立方点阵。此外, 制造粉末为非球形结晶钨粉, 激光辐照金属粉末形成熔滴, 熔滴在同种材料的基板上润湿铺展并凝固^[31-32], 当铺展过程快于凝固过程, 熔滴可实现较好的铺展和润湿, 若凝固过程优先于铺展过程, 凝固部分阻止了液体的铺展, 则未铺展而迅速凝固, 且由于热影响区的存在, 导致在图 8e 观察到不同尺寸大小的堆叠球体。尽管这些差异对结构有害, 但这些差异并未显著影响压缩性能^[33]。总体而言, 选取的 SLM 工艺提供的高成型功率, 使制备的钨材中未出现明显裂纹等缺陷。

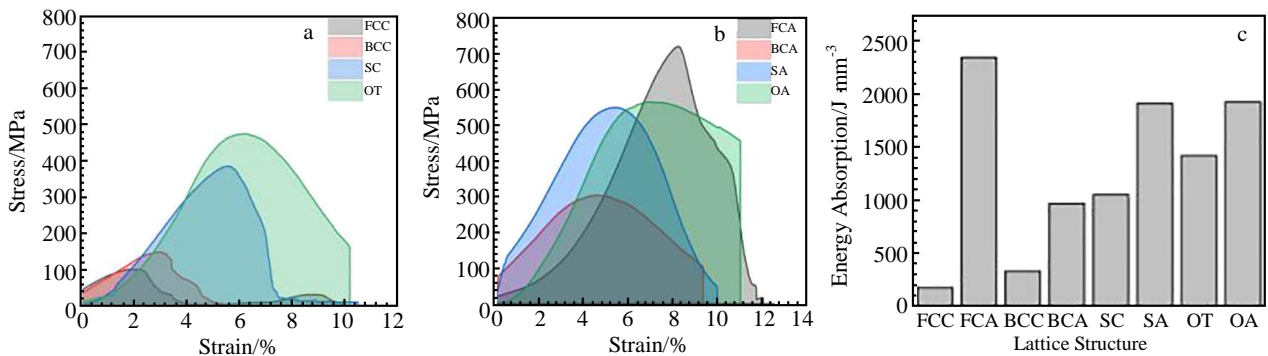


图 7 不同点阵结构样品的能量吸收

Fig.7 Energy absorption (the area enclosed by the stress-strain curves) of cube (a) and arc lattice (b), and energy absorption per unit volume (c)

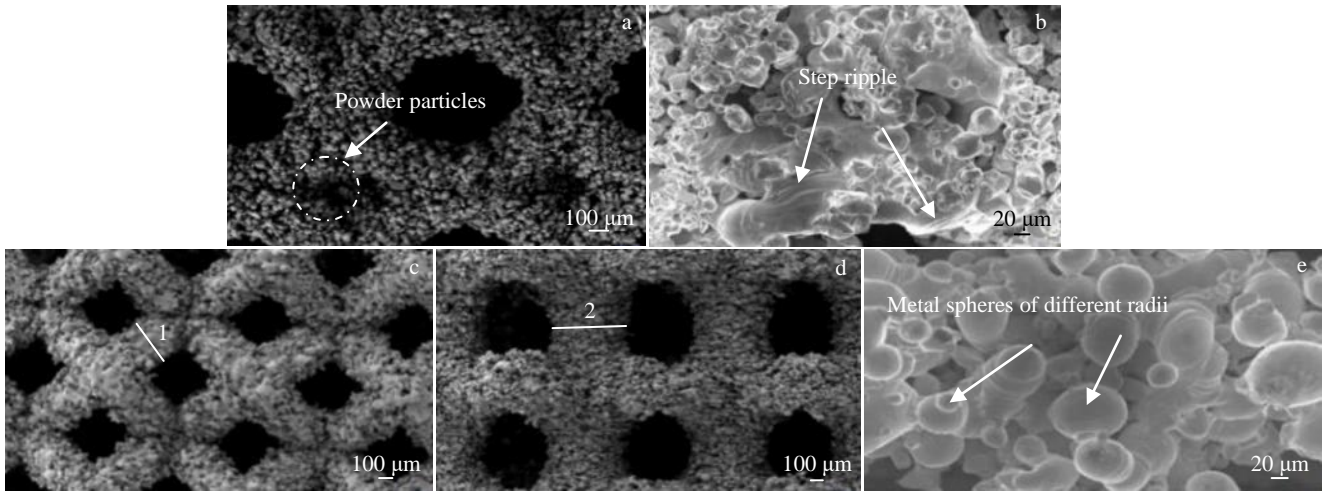


图 8 不同点阵结构样品表面 SEM 形貌

Fig.8 SEM morphologies of the sample surface of BCA (a), BCC (b), FCC (c), FCA (d), and SC (e)

2.4.2 断口形貌及晶粒尺寸分析

图 9 显示了压溃后纯钨零件的断口形貌。断裂呈现典型的脆性断裂特征，塑性变形较小。对断裂形态进行表征，可以清楚地看到样品内部存在许多空隙和未熔化的钨颗粒。层和颗粒之间的弱结合导致空隙和未熔化的颗粒是早期断裂的主要原因。在压缩过程中，颗粒相互

挤压，由于高韧脆转变温度导致晶界强度低，裂纹倾向于在晶界处萌生。随着晶界的不断滑移，这些初始裂纹沿着晶界扩展，样品沿晶界断裂。观察不同结构晶粒（图 10a 和 10b），晶粒总体尺寸差异不大，大晶粒尺寸在 60~80 μm 之间，其中包裹着一些细小晶粒，这也验证了内部存在未熔的钨颗粒。

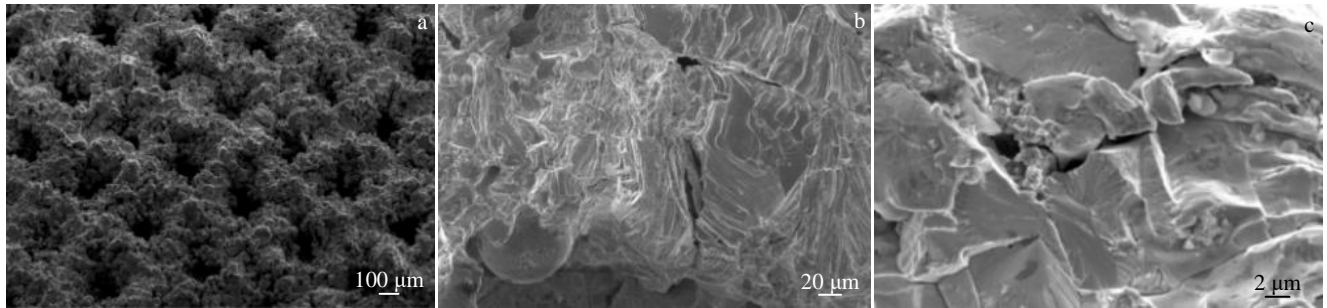


图 9 压溃不同点阵结构样品断口 SEM 形貌

Fig.9 Fracture morphologies of the sample of BCA (a), BCC (b), and FCC (c)

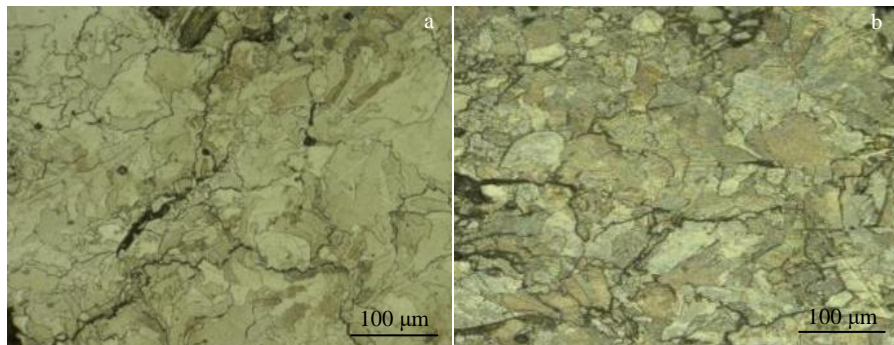


图 10 BCA 和 BCC 点阵结构样品晶粒形貌

Fig.10 Grain morphologies of the sample of BCA (a) and BCC (b)

3 结 论

1) 体积能量密度在 SLM 加工 W 零件的致密化中起着重要作用且存在最佳值 (1000 J/mm³ 附近)。使用最佳能量密度, 获得的样品相对密度为 18.57%。经 SLM 制造的样品致密度仅为理论值的 12.8%~30.2%, 圆弧点阵致密度均小于立方点阵。8 种结构平均质量仅为 1.25 g, 验证了点阵结构低密度的特性。

2) 有限元及抗压力学性能检测结果表明, 圆弧点阵在一定程度上降低了立方点阵中的应力集中现象。8 种点阵结构的抗压缩有限元分析和实验结果基本相同, 圆弧点阵应力从支点处分散到整体杆件中, 有效的缓解了节点处的应力集中, 体心圆弧点阵极限抗压强度最高, 达到 721 MPa, 实现了钨材的高强度制备。

3) 与立方点阵相比, 圆弧点阵平均极限抗压强度提升了 93%, 体现了圆弧点阵轻质、高强的优异力学性能和良好的能量吸收特性, 后者相较前者总能量吸收提升 223%, 立方点阵的节点应力集中阻碍了它们的能量吸收能力, 圆弧结构平均能量吸收达到 1664 J/mm³。

参考文献 References

- [1] Xu S, Shen J, Zhou Setal. *Materials & Design*[J], 2016, 93: 443
- [2] Bai L, Xu Y, Chen X H *et al. Materials & Design*[J], 2021, 211: 110 140
- [3] Mazur M, Leary M, Mcmillan M *et al. Laser Additive Manufacturing*[J], 2017(1): 119
- [4] Chen L Y, Liang S X, Liu Y *et al. Materials Science and Engineering R: Reports*[J], 2021, 146: 100 648
- [5] Emmelmann C, Herzog D, Kranz J. *Laser Additive Manufacturing*[M]. England: Woodhead Publishing, 2017
- [6] Uf A, Dk A, Lb A *et al. Manufacturing Letters*[J], 2020, 23: 85
- [7] Maskery I, Aboulkhair N T, Aremu A O *et al. Additive Manufacturing*[J], 2017, 2017: 259
- [8] Yavari S A, Ahmadi S M, Wauthle R *et al. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*[J], 2015, 43: 91
- [9] Yang Y, Shan M, Zhao L *et al. Materials & Design*[J], 2019, 181: 107 916
- [10] Nazir A, Abate K M, Kumar A *et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2019, 104: 9
- [11] Amir A, Zadpoor. *Acta Biomaterialia*[J], 2019, 85: 41
- [12] Habib F N, Iovenitti P, Masood S H *et al. Materials & Design*[J], 2018, 155(10): 86
- [13] Ji Fen(吉 芬), Liao Baohua(廖宝华), Bai Lin(柏 林) *et al. Aeronautical Science & Technology*(航空科学技术)[J], 2022, 33(9): 10
- [14] Zhong Jiehua(钟杰华), Zhao Wenli(赵文利), Cai Yu(蔡 昱). *Science and Technology Innovation Herald*(科技创新导报)[J], 2021, 18(9): 5
- [15] Chen L Y, Liang S X, Liu Y *et al. Materials Science and Engineering R: Reports*[J], 2021, 146: 100 648
- [16] Messner M C. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*[J], 2016, 96: 162
- [17] Messner Mark C. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*[J], 2016, 96: 162
- [18] Cao X, Xiao D, Li Y *et al. Thin-Walled Structures*[J], 2020, 148: 106 586
- [19] Yu S, Sun J, Bai J. *Materials & Design*[J], 2019, 182: 108 021
- [20] Maskery I, Aboulkhair N T, Aremu A O *et al. Materials Science and Engineering*[J], 2016, 670: 264
- [21] Al-Saedi D S J, Masood S H, Faizan-Ur-Rab M *et al. Materials & Design*[J], 2018, 144(4): 32
- [22] Guo M, Gu D, Xi L *et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2019, 84: 105 025
- [23] ISO 13314[S], 2011
- [24] Zhu H, Fuh J, Lu L. *ICMA 2004-Proceedings of the International Conference on Manufacturing Automation: Advanced Design and Manufacturing in Global Competition* [C]. Singapore: ICMA, 2004: 811
- [25] Hza B, Miao Z, Zma B *et al. International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2020, 175: 105 480
- [26] Li P Y, Ma Y E, Sun W B *et al. Engineering Fracture Mechanics*[J], 2021, 244: 107 537
- [27] Yang X, Gong Y, Zhao L *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2023, 22: 1800
- [28] Yan C, Liang H, Hussein A *et al. Materials & Design*[J], 2014, 55(5): 533
- [29] Yao Yansheng(姚燕生), Zhou Ruiqun(周瑞根), Zhang Chenglin(张成林) *et al. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*(航空学报)[J], 2022, 43(4): 525 202
- [30] Yang Lei Ferrucci, Massimiliano Mertens, Raya Dewulf *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2020, 275: 116 367
- [31] Zhou X, Li K, Zhang D *et al. Journal of Alloys & Compounds*[J], 2015, 631: 153
- [32] Saunders B, Milyavskaya M, Inzlicht M. *Nature Communications*[J], 2022, 13(1): 3201
- [33] Qiu C, Sheng Y, Adkins N *et al. Materials Science and Engineering*[J], 2015, 628: 188

Mechanical Properties of 3D Printing Lightweight and High-Strength Tungsten

Chen Wenlian¹, Yang Yihang¹, Chen Xiaohong², Zheng Junjie¹, Gu Siyong¹, Zhang Houan¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

(2. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The selective laser melting (SLM) 3D printing method was applied to design and to manufacture tungsten materials with lattice structures. The changes in the mechanical properties of tungsten materials with different lattice structures were investigated through finite element analysis, scanning electron microscopy, and quasi-static uniaxial compression tests. The influence of microstructure on mechanical properties was analyzed. The results indicate that the arc lattice structure can effectively reduce stress concentration at the nodes, while maintaining the lightweight and low porosity characteristics of the lattice structure, as well as the high-strength mechanical properties of tungsten materials. The average compressive strength reaches 535 MPa, while the average mass is only 1.25 g. After laser printing, the arc lattice has an average compressive strength increase of 93% compared to the cubic lattice, and the body-centered arc lattice (BCA) shows superior compressive performance, reaching a maximum compressive strength of 721 MPa, with a theoretical structural density of 12.8%. The mechanical performance of 3D printed W is close to that of plastic processed sample. Compared with the cubic lattice, the arc lattice has good ability absorption characteristics, and the total energy absorption value of the latter is increased by 223% compared with the former, and the average energy absorption of the arc lattice reaches 1664 J/mm³. In addition, the SEM image shows that the arc lattice reduces the hanging distance of the oblique pillar in the printing due to its arc characteristics, and the forming effect is better than that of the cubic lattice.

Key words: lattice structure; 3D printing; lightweight; high strength; tungsten

Corresponding author: Yang Yihang, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, P. R. China, E-mail: yihang@xmut.edu.cn