智能设计Ti-6Al-4V多参数BCC点阵结构力学性能研究

张小帅[1,2,3] 罗梦杰[4] 牛 强[4] 张 严[1,2,3] 段 伟[1,2,3]

(1. 武汉科技大学机械工程学院,冶金装备及其控制教育部重点实验室,武汉 430081;2. 武汉科技大学机械传动与制造工程湖北重点实验室,武汉 430081;3. 武汉科技大学精密制造研究所,武汉 430081;4. 西安航天发动机有限公司,西安 710018)

摘 要 采用智能算法优化设计多参数体心立方(BCC)点阵结构,利用选区激光熔化(SLM)技术制备Ti-6Al-4V合金点阵结构,通过压缩试验研究多参数BCC点阵结构的力学性能,并与单参数BCC点阵结构进行对比分析。结果表明,多参数BCC点阵结构的屈服强度、抗压强度、弹性模量以及能量吸收能力显著优于单参数BCC点阵结构。同时,所建立的数值模拟模型能够预测压缩过程中点阵结构的断裂模式和载荷分布情况。

关键词 智能设计;多参数BCC点阵结构;压缩试验;力学性能;断裂模式

中图分类号 TG146.23;TP181 **文献标志码** A DOI:10.15980/j.tzzz.T20250406

Mechanical Properties of Multi-parameter BCC Lattice Structures of Intelligently Designed Ti-6Al-4V

ZHANG Xiaoshuai[1,2,3], LUO Mengjie[4], NIU Qiang[4], ZHANG Yan[1,2,3], DUAN Wei[1,2,3]

(1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2. Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 3. Precision Manufacturing Institute, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 4. Xi'an Space Engine Co., Ltd., Xi'an 710018)

Abstract: An intelligent algorithm was employed to optimize the design of a multi-parameter body-centered cubic (BCC) lattice structure. Ti-6Al-4V alloy lattice structure was fabricated using selective laser melting (SLM) technique. The mechanical properties of multi-parameter BCC lattice structures were investigated through compression experiments, and a comparative analysis was conducted with single-parameter BCC lattice structure. The results indicate that the yield strength, compressive strength, elastic modulus, and energy absorption capacity of multi-parameter BCC lattice structure are significantly superior to those of single-parameter BCC lattice structure. Meanwhile, the established numerical simulation model can effectively predict the fracture mode and load distribution characteristics of lattice structure during the compression process.

Key Words: **Intelligent Design, Multi-parameter BCC Lattice Structure, Compression Test, Mechanical Properties, Fracture Mode**

点阵结构是由晶胞在空间中按照一定规律周期性排列形成的多孔结构[1],因其优异的力学性能,如高比强度、高比刚度、减缓冲击、能量吸收能力以及吸声性能等[2-3],同时兼具轻量化,受到广泛关注。与实心材料相比,点阵结构具有更高的结构可设计性和更高的材料利用率等特点。SLM技术凭借其优异的几何成形高精度、复杂结构制造能力以及材料多样性等特点,可用于制造复杂形状的金属点阵结构。Ti-6Al-4V合金因其具有强度高、密度低、耐腐蚀性强以及良好的生物相容性等特点被广泛应用于航空航天、汽车、电子信息以

收稿日期:2025-11-05;**修订日期**:2026-01-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52175359);博士后科学基金资助项目(2023M743281)

第一作者:张小帅,男,2000年出生,硕士研究生,E-mail:2695275266@qq.com

通信作者:段伟,男,1983年出生,副教授,E-mail:duanwei@wust.edu.cn

张严,男,1988年出生,副教授,E-mail:yanzh@wust.edu.cn

引用格式:张小帅,罗梦杰,牛强,等. 智能设计Ti-6Al-4V多参数BCC点阵结构力学性能研究[J]. 特种铸造及有色合金,2026,46(11):1 633-1 639.

ZHANG X S, LUO M J, NIU Q, et al. Mechanical properties of multi-parameter BCC lattice structures of intelligently designed Ti-6Al-4V[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(11): 1 633-1 639.

及生物医学等领域[4-6]。

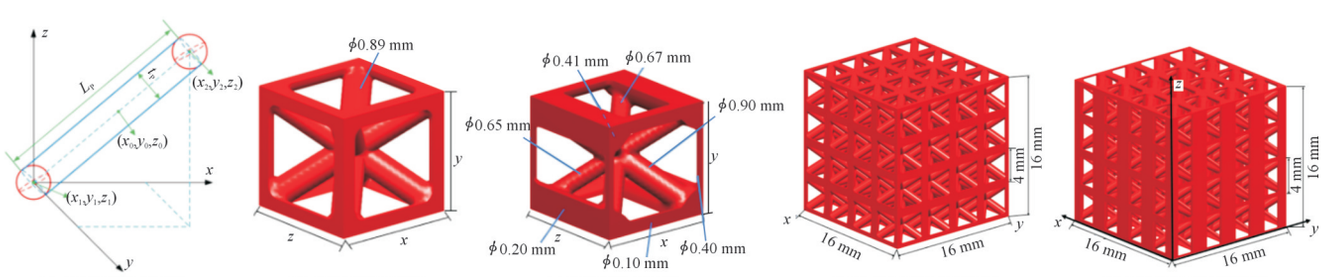
然而，传统改进的体心立方点阵结构在力学性能方面的表现难以满足人们对于高强度、高刚度结构的追求。传统点阵结构的优化设计大多依托单一参数变量展开，此设计模式在极大程度上限制了点阵单胞的优化设计空间，致使其材料利用率与承载潜能难以得到充分释放。相较于单一参数点阵结构，创新的优化设计赋予了多参数点阵结构更为广阔的设计自由度，使其呈现出优异的力学性能。因此，更多研究者开始关注优化设计 BCC 点阵结构，以提升材料力学性能。但是，点阵结构的优化设计受到诸多因素影响，如点阵单胞类型、支杆形状、支杆尺寸、孔隙率及孔隙分布等[7-9]。同时，设计变量与目标函数之间往往缺乏显式的函数关系，优化效率因此降低。在此背景下，点阵结构的优化设计对研究结构性能而言更具挑战性。近年来，许多高效的智能优化算法被提出，如遗传算法（GA）、粒子群优化算法（PSO）、蚁群算法（ACO）及差分进化算法（DE）等。其中，PSO 算法因具有参数少、操作简便、收敛性能优异等特点，被广泛应用于各类工程领域。为进一步提升智能优化算法求解高维度设计问题的效率与精度，采用代理模型辅助的粒子群优化算法（ESPSO），可合理平衡近似模型的预测能力与粒子群优化算法的全局搜索能力，从而使算法具备更高的优化效率与精度。LI H N 等[10]通过对 BCCZ 点阵结构分析，提出基于参数化建模的方法优化 BCCZ 点阵结构，通过压缩试验可知优化后的 BCCZ 点阵结构的抗压强度明显提高。LI B 等[11]提出了增强可变截面空心（RVCH）点阵结构，通过落锤测试系统对 RVCH 点阵结构进行轴向和斜向冲击试验，研究动态机械响应和能量吸收能力。同时建立了有限元模型，基于仿真方法对不同载荷角度的倾斜冲击条件进行讨论，研究了加强条和不同梯度构型对 RVCH 点阵结构变形机制和能量吸收能力的影响。以往研究多聚焦于单根杆件参数的变化对 BCC 点阵结构力学性能的影响，并没有考虑多根杆件参数变化对力学性能的影响。

为研究多根杆件参数变化对 Ti-6Al-4V 合金力学性能的影响，本研究基于智能设计方法进行不同杆件变直径参数以及具有 X、Y、Z 三轴支杆的 BCC 结构设计。通过 SLM 技术制备多参数 BCC 点阵结构，采用压缩试验研究多参数 BCC 点阵结构的弹性模量、屈服强度、抗压强度以及能量吸收能力。基于 Johnson-Cook 塑性模型[12]和损伤模型[13]建立的有限元模型进行压缩试验模拟，分析点阵结构的断裂模式和载荷分布情况，旨在为材料性能的提升提供参考。

1　建模及试验方法

1.1　单参数和多参数 BCC 点阵结构优化设计建模

采用智能设计方法优化多参数 BCC 点阵结构的杆件直径参数，通过不断迭代优化点阵结构杆件的直径参数，求解最优解，以满足设计要求，提高点阵结构的力学性能。图 1 为点阵结构模型。通过调控函数参数达到精确控制几何结构的目的。



(a) 点阵杆件几何参数　(b) 单参数晶胞结构　(c) 多参数晶胞结构　(d) 单参数BCC点阵结构　(e) 多参数BCC点阵结构

图 1　点阵结构模型

Fig.1　Lattice structure models

对于待优化的点阵结构，首先利用水平集函数法建立点阵结构的几何表达函数[14-15]，基于水平集的三维点阵杆件显式拓扑描述模型为：

$$\begin{cases}\phi_{\mathrm{p}}(x)>0, \text{if } x\in\Omega,\\ \phi_{\mathrm{p}}(x)=0, \text{if } x\in\delta\Omega,\\ \phi_{\mathrm{p}}(x)<0, \text{if } x\in D/\Omega\end{cases}\tag{1}$$

式中，$\phi_{\mathrm{p}}(x)$为基于水平集的三维点阵杆件显式拓扑描述；D 为点阵结构的整个设计域；Ω 为设计域中的实体材料区域；$\delta\Omega$ 为点阵结构的边界。

单根杆件均由一个变截面柱体和两个球体组成，其水平集函数分别为 $\phi_{\mathrm{p,c}}(x,y,z)$、$\phi_{\mathrm{p,s1}}(x,y,z)$、$\phi_{\mathrm{p,s2}}(x,y,z)$；杆件圆柱体的两端分别以 (x_1,y_1,z_1) 和 (x_2,y_2,z_2) 为中心，这两点也是两个球体的球心。相关参数函数表示为：

$$\phi_{\mathrm{p}}(x)=\max\left[\phi_{\mathrm{p,c}}(x,y,z),\phi_{\mathrm{p,s1}}(x,y,z),\phi_{\mathrm{p,s2}}(x,y,z)\right],$$

$$\phi_{\mathrm{p,c}}(x,y,z)=\min\left[\phi_{\mathrm{p,c1}}(x,y,z),\phi_{\mathrm{p,c2}}(x,y,z)\right]$$

$$\phi_{\mathrm{p,c1}}(x,y,z)=(L_{\mathrm{p}}/2)^2-(\cos\theta_{\mathrm{p}}\cdot L_{\mathrm{t}})^2$$

$$\begin{gathered}\phi_{\mathrm{p,c2}}(x,y,z)=(d_{\mathrm{p}}/2)^2-(\sin\theta_{\mathrm{p}}\cdot L_{\mathrm{t}})^2\\ \cos\theta_{\mathrm{p}}=\sqrt{\left(\frac{d_x d_{x_2}+d_y d_{y_2}+d_z d_{z_2}}{L_{\mathrm{d}}\sqrt{d_{x_2}^2+d_{y_2}^2+d_{z_2}^2}}\right)^2}\\ \sin\theta_{\mathrm{p}}=\sqrt{1-\cos^2\theta_{\mathrm{p}}}\,,L_{\mathrm{d}}=\sqrt{d_x^2+d_y^2+d_z^2}\\ d_{x_2}=x_2-x_0,d_{y_2}=y_2-y_0,d_{z_2}=z_2-z_0,\\ d_x=x-x_0,d_y=y-y_0,d_z=z-z_0\\ x_0=\frac{x_1+x_2}{2},y_0=\frac{y_1+y_2}{2},z_0=\frac{z_1+z_2}{2},\\ L_{\mathrm{p}}=\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2}\\ \phi_{\mathrm{p,s1}}(x,y,z)=(t_{\mathrm{p}}/2)^2-(x-x_1)^2+\\ (y-y_1)^2+(z-z_1)^2,\\ \phi_{\mathrm{p,s2}}(x,y,z)=(t_p/2)^2-(x-x_2)^2+\\ (y-y_2)^2+(z-z_2)^2\end{gathered}\tag{2}$$

式中，(x_0,y_0,z_0)为圆柱体中心点坐标值，t_{p}为杆直径；(x,y,z)和L_{p}分别为杆件的中心点坐标和杆件长度；θ_{p}为该杆件与水平面之间的夹角；L_{d}为构件上任一点到圆柱体中心点的距离；$\phi_{\mathrm{p,s1}}(x,y,z)$和$\phi_{\mathrm{p,s2}}(x,y,z)$为杆件两端球体的水平集拓扑描述函数。

对于多参数 BCC 点阵结构几何形状参数优化，以多参数 BCC 点阵结构的杆件直径为设计变量，结构体积为约束条件，柔度最小为目标函数，满足点阵结构刚度要求，建立点阵结构优化模型[16-17]：

$$\begin{cases}\text{Find: } q=(q_1,q_2,q_3,\cdots,q_N),N=1,2,\cdots,j\\ \text{Minimize: } \boldsymbol{C}(q)=\boldsymbol{F}^T\boldsymbol{U}=\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{U}=\\ \sum_{E=1}^{NE}(u_E^{MA})^{\mathrm{T}}k_E(q)u_E^{MA}\\ \text{Subject to: } \dfrac{V(q)}{V_0}=f,F=KU,\\ 0\leqslant q_{\min}\leqslant q_{\mathrm{N}}\leqslant q_{\max}\end{cases}\tag{3}$$

式中，q_N为设计变量；N为设计变量的个数；C为总柔度；F为总体载荷矩阵；U为加载过程中的总体位移矩阵；K为结构总刚度矩阵；u_E^{MA}和k_E分别为第E个宏观有限单元的位移矩阵和刚度矩阵。$V(q)$、V_0分别为点阵单胞的材料区域体积与设计域总体积；f为允许的材料体积分数；$q_{\min}$和$q_{\max}$分别为杆件直径的最小值与最大值，其中$q_{\min}=0.015$，可根据增材制造工艺的最小成形尺寸确定，$q_{\max}=\sqrt{3}/2$，此时点阵单胞为实体点阵。NE点阵结构被离散成有限单元的总数，且

$$k_E=\int_{\Omega_E}B^T\boldsymbol{E}^H(q)B\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{E}}\tag{4}$$

式中，B为应变-位移矩阵；$\boldsymbol{E}^H$为等效弹性张量矩阵；Ω_E为点阵单胞的设计域。

考虑到增材制造的实际精度限制，本研究规定点阵晶胞的体积率为 30%。在体积分数约定条件下，采用ESPSO算法进行优化设计，利用全局与局部近似模型信息更新粒子速度和位置，采用最优粒子计算点阵结构的整体柔度，使其满足设计要求，表达为：

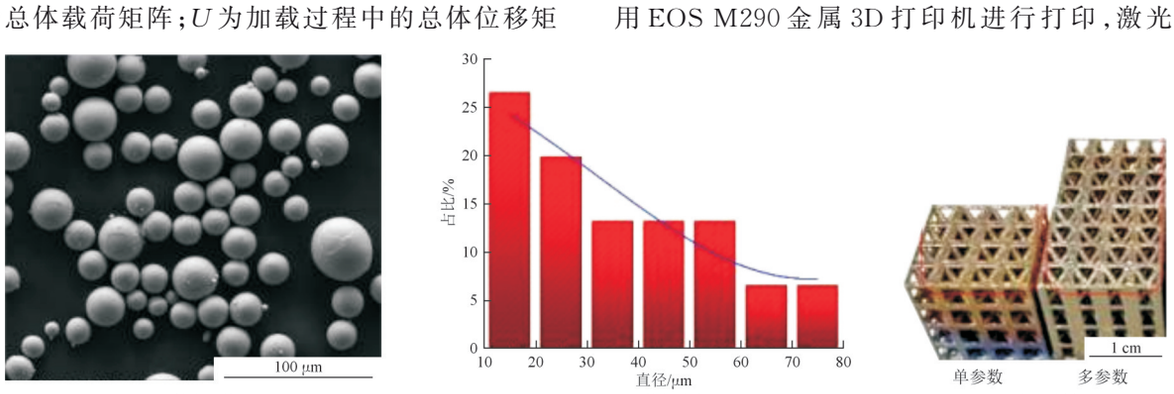
$$\begin{aligned}v_{id}(t+1)=x\{&v_i d(t)+c_1r_1[p_{\mathrm{Nid}}^*(t)-x_i(t)]+\\&c_2r_2(x^*(t)-x_i d(t)]\}\end{aligned}\tag{5}$$

式中，r_1和r_2为[0,1]之间的随机数；c_1和c_2为加速因子；$v_i d(t)$为粒子速度更新机制，其中$v_i(t)=[v_{i1}(t),v_{i2}(t),\cdots,v_{id}(t)]$，$x_i(t)=[x_{i1}(t),x_{i2}(t),\cdots,x_{id}(t)]$分别为第$t$次迭代的第$i$个粒子的速度和位置；$p_{\mathrm{Nid}}^*(t)$为局部最优位置；$x^*(t)$为全局最优位置。

基于成形精度与设备载荷适配性的双重考量，本研究选定单参数和多参数BCC点阵结构中每个晶胞尺寸为 4 mm×4 mm×4 mm，整个点阵结构是由晶胞分别沿坐标X、Y、Z方向阵列 4 个组成，总体尺寸为 16 mm×16 mm×16 mm，见图 1d 和图 1e。

1.2　点阵结构制备及试验方法

点阵结构材料选用 Ti-6Al-4V 合金粉末，其微观结构及粒径分布见图 2。可以看出，粉末呈规则的球形且表面光滑，平均粒径为 36.3 μm。设计的点阵结构采用 EOS M290 金属 3D 打印机进行打印，激光功率为



(a) 粉末形貌　(b) 粒径分布　(c) 成形试样

图 2　Ti-6Al-4V 粉末的形貌、粒径分布及成形试样

Fig.2　Morphology, particle distribution and formed specimens of Ti-6Al-4V powders

280 W、激光扫描速度为 1 250 mm/s、扫描间距为 0.1 mm。打印过程中粉末层厚度设为 0.06 mm。采用线切割方法将打印完成的试样从基板上取下，并使用超声波清洗去除表面粘附的粉末颗粒，成形试样见图 2c。使用 SHIMADZU 电子万能试验机对单参数和多参数点阵结构进行单轴压缩试验，位移加载速度为 1 mm/min，通过相机连续拍摄快照记录试样压缩变形的全过程以及压缩过程中的载荷与位移数据。

1.3　有限元模型的构建

为研究压缩试验中点阵结构的应力-应变曲线变化特征以及杆件失效机制，采用 Abaqus 有限元仿真软件进行数值模拟分析。通过 Ntopology 软件进行网格划分，采用四面体单元网格，网格类型为 C3D4，网格大小分别为 0.3、0.4 和 0.5 mm，考虑到计算精度与收敛周期问题，最终选择 0.4 mm 的网格尺寸。输出为 Abaqus 所适配的 inp 格式文件。压缩模拟过程中，模型的顶部和底部分别设置一个正方形离散刚板，并设置刚板的中心为参考点。数值模拟分析中材料属性按照 Ti-6Al-4V 材料参数设置，刚板与模型表面的接触方式设置为剪切摩擦，摩擦因数为 0.15，顶部刚板在参考点位置加载竖直向下的位移边界条件，底部刚板设置为固定约束，约束底部刚板的 6 个自由度。图 3 为模型网格划分及载荷约束条件，多参数 BCC 点阵结构模型的网格数量相比于单参数 BCC 点阵结构的网格数量较少，有利于减少计算时间和节约计算资源。数值求解过程中采用动态显式分析步，相比于静态隐式分析步可以有效避免计算难以收敛的问题。

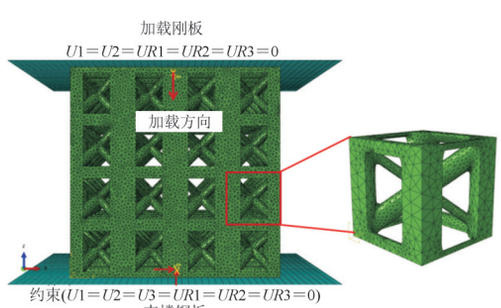


图 3　网格划分及约束条件

Fig.3　Grid division and constraint conditions

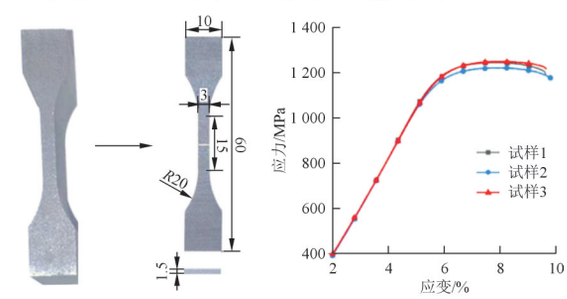
1.4　Ti-6Al-4V 材料的本构模型

在有限元分析中，采用 Johnson-Cook 模型研究材料的塑性行为和损伤模型评估点阵结构的断裂特性。压缩试验是在室温下以恒定的准静态应变率进行的，因此，简化的 Johnson-Cook 模型和损伤模型不考虑应变率和温度效应对材料动态力学响应的影响。可得材料的屈服应力 σ_s 和断裂应变 ε_f 的简化公式[18]：

$$\sigma_s = A + B\varepsilon_{pl}^{n} \tag{6}$$

$$\varepsilon_f = D_1 + D_2\exp(D_3\sigma^*) \tag{7}$$

式中，A、B 和 n 分别为屈服强度、硬化常数和硬化指数；ε_{pl} 为塑性应变；D_1、D_2 和 D_3 为损伤常数；σ^* 为应力三轴度。在模拟压缩试验时，n、D_2 和 D_3 保持不变，而 A、B 和 D_1 的变化表示材料的强度、脆性和延性的差异。采用 AM400 型 SLM 成形设备制备 Ti-6Al-4V 拉伸试样，成形工艺参数设定：激光光斑尺寸为 95 μm、扫描速度为 720 mm/s、激光功率为 120 W、扫描间距为 0.1 mm。通过单轴拉伸试验测定 3 根拉伸试样的应力-应变曲线，见图 4，并基于该曲线提取得到 Ti-6Al-4V 材料的关键力学性能参数，取其平均值，得到屈服强度为 900 MPa，抗拉强度为 1 222.53 MPa，伸长率为 4.46%，同时设定泊松比为 0.3。将力学性能参数导入 Johnson-Cook Constants Plug-in 插件，通过插件拟合获得 Ti-6Al-4V 材料的 Johnson-Cook 本构模型 A、B、n 参数。本构模型中的 D_1、D_2、D_3 参数采用 WANG Z Y 等[19]在单轴拉伸试验中拟合 Johnson-Cook 模型所得到的研究结果。以上本构参数的拟合方法与 JIN N 等[18]的材料参数结果相似，材料参数取值见表 1。



(a) 成形试样　(b) 拉伸试样　(c) 拉伸应力-应变曲线

图 4　拉伸试样及拉伸应力-应变曲线

Fig.4　Tensile specimens and stress-strain curves

表 1　Johnson-Cook 的强度和损伤模型的参数

Tab.1　Strength and damage model parameters of Johnson-Cook

A/MPa	B/MPa	n	D_1	D_2	D_3
1 200	500	0.378	0.005	0.43	−0.48

2　试验结果与讨论

2.1　压缩应力-应变曲线分析及试样塌陷演化过程

为研究单参数与多参数 BCC 点阵结构的压缩性能，在压缩试验中，通过分析点阵结构的应力-应变曲线特征以及变形塌陷演化过程来评估压缩响应。图 5 为压缩过程中的应力-应变曲线。可以看出，应力-应变曲线呈 3 个阶段：弹性变形阶段、平台阶段与致密化阶段。在弹性变形阶段，单参数和多参数 BCC 点阵结构的应力随应变的增加而增大，这是由于在弹性阶段竖

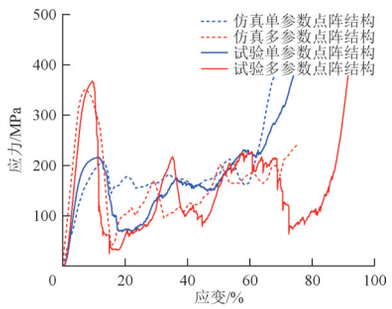


图 5　点阵结构压缩试验下的应力-应变曲线

Fig.5　Stress-strain curves of lattice structures under compression tests

直杆承受较大的应力，而在平台阶段应力随应变的增加迅速减小后呈波动稳定。这是模型竖直杆先承受较大的应力而发生 45°剪切断裂，随后发生逐层断裂直至达到致密化阶段所导致的。多参数 BCC 点阵结构在弹性阶段的应力-应变曲线高于单参数 BCC 点阵结构，而在平台阶段的应力-应变曲线则低于单参数 BCC 点阵结构。这是由于多参数 BCC 点阵结构优化后的竖直杆直径大于单参数 BCC 点阵结构，在弹性阶段能够承受较大的应力，随着平台阶段的竖直杆发生断裂，优化后的多参数 BCC 点阵结构斜杆和水平杆直径较小，承受应力的能力低于单参数 BCC 点阵结构。同时观察到，单参数和多参数点阵结构的试验与仿真应力-应变曲线在三个阶段的变化趋势总体一致。这表明基于 Johnson-Cook 塑性本构模型及损伤参数建立的有限元模型，可精确捕捉弹性阶段与平台阶段的应力峰值特征。图 6 为单参数和多参数 BCC 点阵结构的试验与数值模拟压缩变形塌陷过程。可以看出，单参数 BCC 点阵结构随应变增加在底层先发生断裂，随后其余层竖

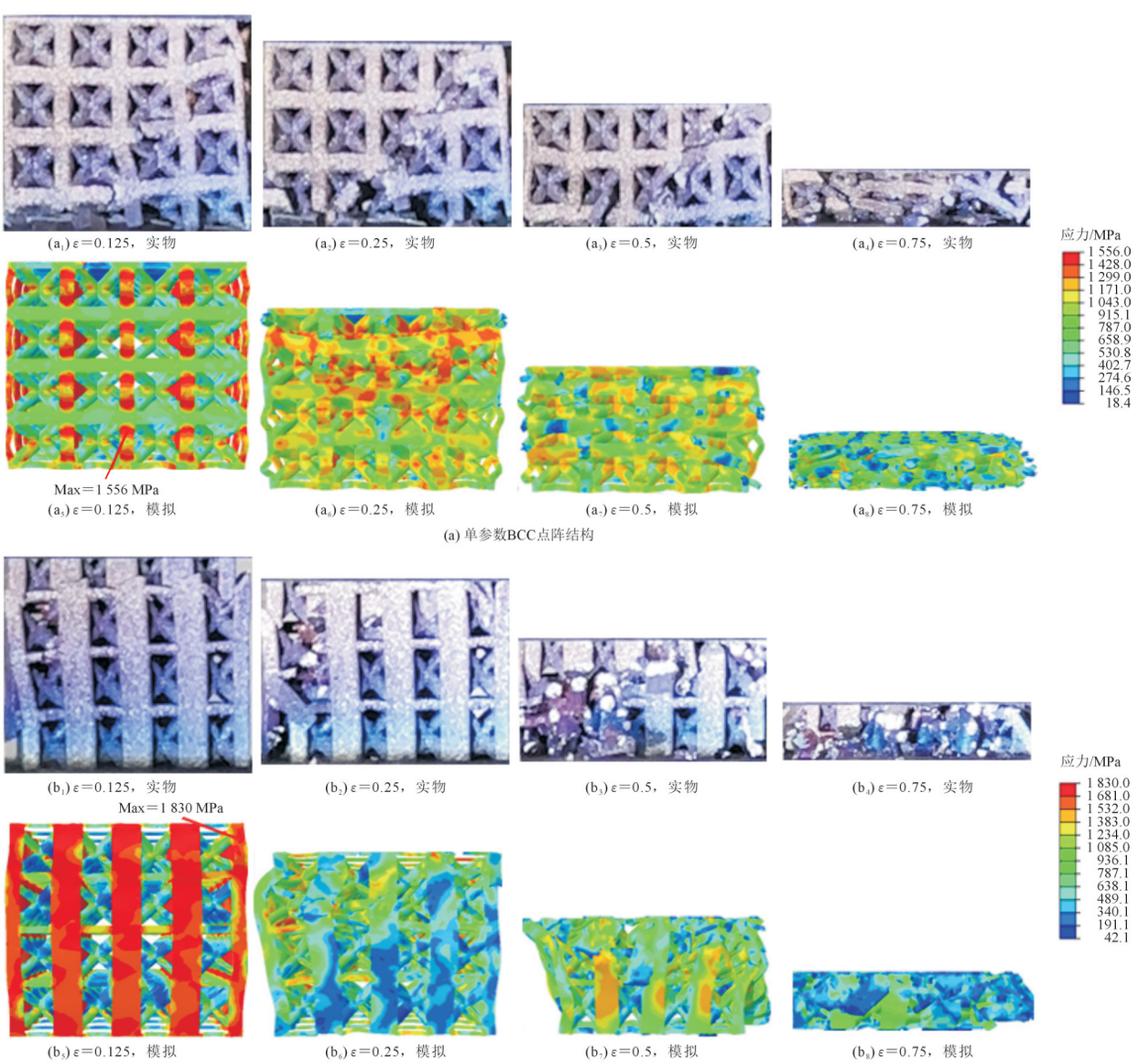


图 6　点阵结构压缩塌陷过程

Fig.6　Collapse process of lattice structures under compressive strain

直杆发生 45°剪切断裂，最后发生上下层均匀断裂。多参数 BCC 点阵结构随应变的增加，顶层竖直杆先发生断裂，随后发生自上而下逐层断裂。单参数和多参数 BCC 点阵结构的不同断裂方式是由结构差异导致的。通过应力-应变云图的观测结果可见，在外加载荷作用下，单参数与多参数点阵结构的竖直杆率先承受较大应力，当部分竖直杆发生断裂后，应力会逐步转移至水平杆、斜杆及剩余未断裂的竖直杆区域。多参数点阵结构竖直杆的最大承载应力高于单参数点阵结构，这是因为经优化设计的多参数点阵结构其竖直杆直径大于单参数点阵结构，进而赋予多参数点阵结构竖直杆更高的承载能力。

2.2　点阵结构的弹性模量、屈服强度以及抗压强度

通过对弹性模量、屈服强度以及抗压强度进行对比分析，定量评估了所设计点阵结构在弹性阶段的力学性能[20]。表 2 为计算求解点阵结构的屈服强度、抗压强度和弹性模量参数。可以发现，多参数 BCC 点阵结构的弹性模量、屈服强度以及抗压强度相较于单参数 BCC 点阵结构均得到显著提升，分别提高了 74.60%、77.94% 以及 70.17%。这主要是由于结构差异对点阵结构力学性能的影响，优化后的多参数 BCC 点阵结构竖直杆直径大于单参数 BCC 点阵结构，在弹性阶段能抵抗更大的载荷。

表 2　点阵结构的屈服强度、抗压强度和弹性模量值

Tab.2　Yield strength, compressive strength, and elastic modulus values of lattice structures

模型	屈服强度/MPa	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa
单参数 BCC 点阵结构	164.16	216.25	3 669.96
多参数 BCC 点阵结构	292.11	368.00	6 407.80
相对偏差/%	77.94	70.17	74.60

2.3　点阵结构的能量吸收能力

通过研究压缩试验中单参数和多参数 BCC 点阵结构在达到致密化阶段之前的能量吸收特性对比，可以有效反映优化后的结构在受到外力作用时的能量吸收能力。能量吸收能力即单位体积所吸收的能量值，可通过下式进行计算[21]：

$$W=\int_0^{\varepsilon_e}\sigma(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon \tag{8}$$

式中，$\sigma(\varepsilon)$为压缩应力-应变曲线上应变 ε 对应的应力值；ε_e 为点阵结构达到致密化时对应的应变值。

表 3 为不同点阵结构的能量吸收能力。可以看出，多参数 BCC 点阵结构相较于单参数 BCC 点阵结构的能量吸收能力提升了 17.00%。多参数 BCC 点阵结构能量吸收能力的提高主要是结构的不同，导致压缩过程中结构的变形行为不同。多参数 BCC 点阵结构优化后的竖直杆直径较大，在弹性变形阶段竖直杆能抵抗更高的强度，吸收较高的能量，随应变的增加部分竖直杆发生 45°剪切断裂，但是其余竖直杆和斜杆仍然能够起到支撑作用并继续吸收一部分能量。单参数 BCC 点阵结构的竖直杆直径较小，在弹性阶段竖直杆抵抗强度的能力较低，吸收的能量较少，即使在平台阶段吸收较多能量，但是随应变继续增加，结构较快发生破坏，从而减弱了能量吸收能力。

表 3　不同点阵结构的能量吸收能力　MJ·m^{-3}

Tab.3　Energy absorption capacity of different lattice structures

单参数 BCC 点阵结构	多参数 BCC 点阵结构	相对偏差/%
92.50	108.21	17.00

3　结　论

（1）多参数 BCC 点阵结构的弹性模量、屈服强度、抗压强度以及能量吸收能力相较于单参数 BCC 点阵结构均得到显著提升，分别提高了 74.60%、77.94%、70.17% 以及 17.00%。

（2）在压缩过程中，单参数 BCC 点阵结构竖直杆先发生 45°剪切断裂，之后水平杆和斜杆发生断裂，出现上下层均匀断裂；多参数 BCC 点阵结构先发生顶层竖直杆 45°剪切断裂，随后发生自上而下的逐层断裂。

（3）数值模拟压缩过程中，单参数与多参数点阵结构的竖直杆率先承受较大应力；当部分竖直杆发生断裂后，应力会逐步转移至水平杆、斜杆及剩余未断裂的竖直杆区域。

参　考　文　献

[1] YIN H F, ZHANG W Z, ZHU L C, et al. Review on lattice structures for energy absorption properties [J]. Composite Structures, 2023, 304: 116 397.

[2] 崔新建，刘玉德，石文天，等. 选区激光熔化成形 316L 不锈钢多孔结构及力学性能[J]. 特种铸造及有色合金，2020，40(1)：75-80.

[3] 朱陈成，陈鸿玲，傅高升，等. SLM 成形多孔结构 TC4 骨科植入物的仿真与力学试验[J]. 特种铸造及有色合金，2024，44(7)：975-981.

[4] DEHGHAN-MANSHADI A, VENEZUELA J, DEMIR A, et al. Additively manufactured Fe-35Mn-1Ag lattice structures for biomedical applications [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 80: 642-650.

[5] KHAN N, RICCIO A. A systematic review of design for additive manufacturing of aerospace lattice structures: Current trends and future directions [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2024, 149: 101 021.

[6] LI F Y, ANJARSARI Y, WANG J M, et al. Modulation of the lattice structure of 2D carbon-based materials for improving photo/electric properties [J]. Carbon Letters, 2023, 33(5): 1 321-1 331.

[7] WANG P, YANG F, LU G X, et al. Anisotropic compression behaviors of bio-inspired modified body-centered cubic lattices validated by additive manufacturing [J]. Composites, 2022, B234: 109 724.

[8] YAN X C, LI Q, YIN S, et al. Mechanical and in vitro study of an isotropic Ti-6Al-4V lattice structure fabricated using selective laser melting [J]. Journal of Alloys Compounds, 2019, 782: 209-223.

[9] ZHANG J F, SHEN Y F, SUN Y X, et al. Design and mechanical testing of porous lattice structure with independent adjustment of pore size and porosity for bone implant [J]. Journal of Materials Research Technology, 2022, 18: 3 240-3 255.

[10] LI H N, YANG W D, MA Q C, et al. Specific sensitivity analysis and imitative full stress method for optimal BCCZ lattice structure by additive manufacturing [J]. Crystals, 2022, 12(12): 1 844.

[11] LI B, LIU H, LIU X C, et al. Numerical and experimental investigation of a variable cross-section hollow BCC lattice subjected to axial and oblique impact loadings [J]. International Journal of Impact Engineering, 2025, 198: 105 223.

[12] KADIRGAMA K, HARUN W, TARLOCHAN F, et al. Statistical and optimize of lattice structures with selective laser melting (SLM) of Ti6Al4V material [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97: 495-510.

[13] SIRIGIRI V K R, GUDIGA V Y, GATTU U S, et al. A review on Johnson Cook material model [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62: 3 450-3 456.

[14] FADEEL A, ABDULHADI H, SRINIVASAN R, et al. A computational approach in understanding the low-velocity impact behavior and damage of 3D-printed polymer lattice structures [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(9): 6 511-6 521.

[15] ZHANG Y, ZHANG L, DING Z, et al. A multiscale topological design method of geometrically asymmetric porous sandwich structures for minimizing dynamic compliance [J]. Materials & Design, 2022, 214: 110 404.

[16] SHU Z T, GAO L, LI H. A multivariate level set method for concurrent optimization of graded lattice structures with multiple microstructure prototypes [J]. Computer Methods in Applied Mechanics Engineering, 2024, 425: 116 962.

[17] ZHANG Y, XIAO M, DING Z, et al. Dynamic response-oriented multiscale topology optimization for geometrically asymmetric sandwich structures with graded cellular cores [J]. Computer Methods in Applied Mechanics Engineering, 2023, 416: 116 367.

[18] JIN N, YAN Z Y, WANG Y W, et al. Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti-6Al-4V lattice materials [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 190: 106 042.

[19] WANG Z Y, LI P F. Characterisation and constitutive model of tensile properties of selective laser melted Ti-6Al-4V struts for microlattice structures [J]. Materials Science Engineering, 2018, A725: 350-358.

[20] YANG L, YAN C Z, CAO W C, et al. Compression - compression fatigue behaviour of gyroid-type triply periodic minimal surface porous structures fabricated by selective laser melting [J]. Acta Materialia, 2019, 181: 49-66.

[21] LI Y, WANG X Q, LI X, et al. Laser additive manufacturing of ODS CuCrZr TPMS lattice structures with enhanced mechanical-thermal performance [J]. Journal of Materials Research Technology, 2025, 37: 4 198-4 216.

（编辑：刘晨辉）

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊，是对国内外公开发行的中文核心期刊，中国科技论文统计与分析用刊，INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊，并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种（黑色和有色合金）特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验，并报道各相关学科和交叉学科，如挤压铸造（液态模锻）、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金（金属玻璃）、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告，业务范围：铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊，标准（大）16 开，邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元，全年 240 元。全国各地邮局均可订阅，也可直接向本刊编辑部邮购，本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社（武汉）有限公司

地址：武汉市江岸区建设大道融玺 1001 大厦 11 楼
邮编：430019
电话：027-85358206，85486024，
85358127
投稿网址：www.special-cast.com
邮箱：tzzz@special-cast.com