

多层尺寸梯度面心立方点阵结构力学性能研究

张武昆¹, 谭永华², 高玉闪¹, 王珺¹, 赵剑¹

(1. 西安航天动力研究所液体火箭发动机技术重点实验室, 710100, 西安;

2. 航天推进技术研究院, 710100, 西安)

摘要: 针对均匀点阵结构能量吸收性能低和截面梯度点阵结构刚度性能较差的问题, 设计了多层尺寸梯度面心立方点阵结构, 通过理论、仿真和试验方法研究了其力学性能。首先, 采用 SS316L 不锈钢材料和选择性激光熔融 (SLM) 技术, 制备了胞元尺寸梯度面心立方 (SG-FCC) 和均匀面心立方 (U-FCC) 两种点阵结构的试验件, 并进行了准静态压缩试验; 然后, 在试验和有限元分析的基础上, 获得了两种点阵结构在压缩过程的力学行为, 基于杆梁变形理论和多层梯度点阵结构刚度组集方法, 提出了两种点阵结构的等效弹性模量理论模型; 最后, 研究了不同梯度因子对 SG-FCC 点阵结构压缩性能的影响规律。试验结果表明: 相比于 U-FCC 点阵结构, SG-FCC 点阵结构的力学性能更加优异, 其刚度和比刚度分别增长了 17.8% 和 16.2%, 吸能量和比吸能量分别提高了 10.8% 和 10.36%。所提出的 SG-FCC 点阵结构弹性模量理论模型与试验和有限元分析结果相比吻合较好, 误差小于 10%, 可用于 SG-FCC 点阵结构的刚度预测; 当梯度因子为 1.5 时, SG-FCC 点阵结构的刚度性能较好; 当梯度因子为 3 时, SG-FCC 点阵结构的吸能性能较好。该研究可为集高刚度和大吸能性能的轻质化结构设计和工程应用提供参考。

关键词: 梯度面心立方点阵结构; 弹性模量; 压缩性能; 梯度因子; 有限元分析

中图分类号: V414.9 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202311003 **文章编号:** 0253-987X(2023)11-0021-10

Study on the Mechanical Behavior of Multilayer Size-Graded Face Center Cubic Lattice Structures

ZHANG Wukun¹, TAN Yonghua², GAO Yushan¹, WANG Jun¹, ZHAO Jian¹

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Liquid Rocket Engines, Xi'an Aerospace Propulsion Institute,

Xi'an 710100, China; 2. Academy of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: This paper aims to address the low energy absorption performance of uniform lattice structures and the poor stiffness performance of cross-section gradient lattice structures. To this end, a multilayer size gradient FCC lattice structure was designed and its mechanical properties were investigated through theoretical, numerical, and experimental methods. Firstly, size-graded face center cubic (SG-FCC) and uniform face center cubic (U-FCC) lattice structures were fabricated using the SS316L stainless steel and selective laser melting (SLM) technology. The quasi-static compression tests were also carried out. Then the mechanical properties of the two lattice

收稿日期: 2022-12-07。 作者简介: 张武昆(1995—), 男, 博士生; 高玉闪(通信作者), 男, 研究员, 博士生导师。 基金项目: 航天先进制造技术研究联合基金资助项目 (U1737205); 液体火箭发动机重点实验室开放基金资助项目 (6142704210403, 6142704220403)。

网络出版时间: 2023-04-17

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20230414.1556.005.html>

structures during compression were obtained from the tests and finite element analysis results. In addition, the equivalent elastic modulus analytical models were proposed for both lattice structures based on the deformation theory of beams and the stiffness set method of gradient lattice structures. Finally, the study explored the influence of different gradient factors on the compressive performance of the SG-FCC lattice structures. The results showed that the mechanical properties of the SG-FCC lattice were superior to those of the U-FCC lattice. Specifically, the stiffness and specific stiffness of the SG-FCC lattice increased by 17.8% and 16.2% respectively, and the absorption energy and specific absorption energy increased by 10.8% and 10.36% respectively. Furthermore, the theoretical elastic modulus model of SG-FCC lattices was in good agreement with the experimental and finite element results. The prediction error was less than 10%, which could be used to predict the stiffness of the SG-FCC lattice structure. When the gradient factor was 1.5, the stiffness properties of the SG-FCC lattice structure were better than those of other gradient factors. When the gradient factor was 3, the energy absorption properties of the SG-FCC lattice structure were better than those of other gradient factors. The research findings offer guidance for the design and engineering application of lightweight structures with high stiffness and high energy absorption performance.

Keywords: graded face centre cubic lattice structure; elastic modulus; compressive performance; gradient factors; finite element analysis

点阵结构具有高比刚度和高比强度等诸多优异的力学性能^[1-2],同时内部巨大的开放式空隙也使其具有良好的抗冲击吸能和对流换热等多功能性能^[3-4],目前已经应用于航空航天^[5-7]、车辆、医学等诸多领域。近年来,在均匀点阵结构的基础上,通过改变相对密度或拓扑结构等方式而形成的梯度点阵结构^[2],这种结构具有更优异的力学性能和更高的结构效率。另外,通过材料梯度分步的设计也能够使其更贴近工程实际应用需求和仿生结构形式,因此梯度点阵结构引起了国内外诸多学者的广泛关注。

当前,由于增材制造技术的不断发展^[8-9],梯度点阵结构的制备更加方便快捷^[10]。梯度点阵结构的形式主要有4种:材料梯度、截面梯度、胞元尺寸梯度和胞元拓扑梯度。其中,关于截面梯度的研究很多。朱凌雪等基于梯度化因子,采用数值方法研究了面板和芯层梯度因子对金字塔点阵结构在平压和爆炸载荷下吸能性能的影响,认为梯度点阵结构的吸能值相比非梯度结构大大增强^[11-12]。乔及森等研究了相同质量下梯度率对铝蜂窝夹芯板结构能量吸收的影响^[13]。Niknam等研究了多种梯度组成形式的点阵结构的压缩承载能力和能量吸收性能,结果表明,相对密度垂直于外部压缩力方向变化的梯度组成形式最优^[14]。Choy等研究了梯度蜂窝结

构的性能,认为梯度结构的吸能量和应变呈指数增加关系,而均匀结构则表现出近似的线性关系^[15]。

虽然截面梯度点阵结构易于设计且性能相比均匀结构有所增强,但是截面梯度点阵的小截面很容易在承受振动或冲击等载荷下成为薄弱环节,进而造成整体刚度下降、局部疲劳断裂或冲击损伤破坏等失效行为。同时,小截面对制造和工艺的要求更高。胞元尺寸梯度结构不改变截面大小,仅通过改变胞元的边界尺寸来改变相对密度,因此设计更加灵活。Bai等研究了尼龙(PA2000)制备的尺寸梯度体心立方点阵(SG-BCC)的压缩行为和能量吸收性能,认为SG-BCC相比截面梯度体心立方点阵(RG-BCC)具有更好的承载和能量吸收性能^[17]。此外,Bai等还通过Ti-6Al-4V制备并比较了均匀体心立方(BCC)、垂向尺寸梯度BCC和横向尺寸梯度BCC点阵结构的力学性能,结果表明:横向尺寸梯度BCC点阵结构的压缩变形模式与均匀结构相似,而垂向尺寸梯度BCC点阵结构的弹性模量和能量吸收分别提高了17.53%和59.43%^[17]。然而,上述研究中针对梯度点阵结构等效弹性模量的计算,一种是通过仿真或试验得到单层性能后组集得到,另一种是基于统计的Gibson-Ashby模型预测整体的等效模量,并没有从理论直接给出预测结果,且没有研究不同梯度因子对结构性能的影响规律。

相比于 BCC 点阵结构,面心立方(FCC)点阵有着更优异的力学性能^[18-20]。然而,针对尺寸梯度面心立方点阵结构(SG-FCC)的研究目前还未见公开发表的文献。本文设计并选用 316L 材料制备了两种 FCC 点阵结构,通过试验、理论和有限元方法研究了尺寸梯度面心立方点阵结构的力学性能。

1 设计与制备

图 1 为 FCC 点阵结构的胞元结构形式,6 个节点位于六面体胞元的不同面心。六面体结构的底面为正方形,边长为 L ,高为 RL ,其中 R 为高度系数,表示胞元高度与底面长度的比。点阵结构由 8 根相同的杆件构成,杆件长度以 OC 杆为例,为 $L/2 \sqrt{1+R^2}$ 。

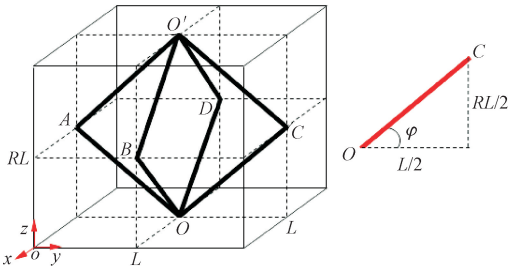


图 1 FCC 点阵结构构型

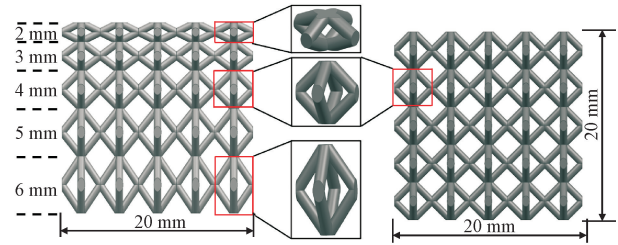
Fig. 1 FCC lattice structure configuration

考虑增材制造的工艺约束^[21](特征尺寸大于 0.2 mm、成形质量和力学性能随悬空角的减少而降低、加载方向与打印方向平行时力学性能更强等),保持胞元杆直径不变,设计并制备了均匀 FCC(U-FCC)、尺寸梯度 FCC(SG-FCC)两种类型的点阵结构,梯度方向为垂直方向,如图 2 所示。两种点阵结构均为 $5 \times 5 \times 5$ 胞元,包络尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。U-FCC 的单胞尺寸为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$,而 SG-FCC 点阵结构的每层高度比上层少 1 mm,胞元杆直径为 0.9 mm。点阵结构的相对密度计算式如下

$$\rho^* = \frac{V_l}{V_e} \tag{1}$$

式中: V_l 为点阵结构的实际体积; V_e 为点阵结构的等效体积。通过计算机几何模型计算得出,SG-FCC 点阵结构每层的相对密度从上到下分别为 0.259 1、0.206 7、0.180 4、0.165 7、0.156 8,U-FCC 点阵结构相对密度为 0.180 4。假设梯度正方向为相对密度从小到大的方向。

采用 BLT S310 机器打印点阵结构,基材料为不锈钢 SS316L,制备技术为选择性激光熔融(SLM)。激光功率为 200 W,扫描速度 2 m/s,分层厚度 50 μm 。打印产品如图 3 所示。



SG-FCC 点阵结构 U-FCC 点阵结构
图 2 FCC 点阵结构设计

Fig. 2 FCC lattice structure design

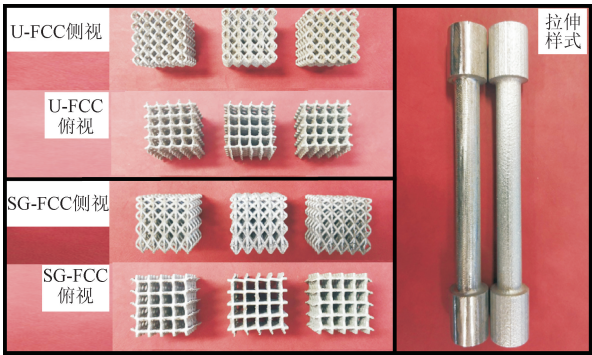


图 3 增材制造的试样

Fig. 3 Samples made by additive manufacturing

2 试验和仿真

2.1 试验

采用美特斯 700 kN 微机控制电子万能试验机(美特斯工业系统(中国)有限公司)对试验件进行室温环境下的准静态加载实验。为了获得材料性能,采用相同的技术,制备标准哑铃型拉伸试样,试样尺寸根据 ASTM E8/E8M-21 标准^[22],中心考核段长为 50 mm,直径为 12.5 mm,拉伸速度为 0.5 mm/min。材料名义应力、应变曲线如图 4 所示。材料拉伸弹性模量为 205 GPa,屈服强度为 571 MPa,拉伸强度为 685 MPa,材料密度为 7 971 kg/m³,试验结果与 Casati 等采用 SLM 技术制备的 316L 不锈钢材料的测试结果比较接近^[23-24]。根据 ISO 13314: 2011 标准进行压缩试验,设定加载速率为 1 mm/min,加载方向为梯度正方向。在对点阵结构进行压缩实验时,采用数码相机记录点阵结构压缩过程中的变形。

打印点阵试件的质量比较如表 1 所示,实测结果与理论结果误差较小,说明打印精度较高。为方便性能比较,设计的两种点阵结构的质量总体相差不大。

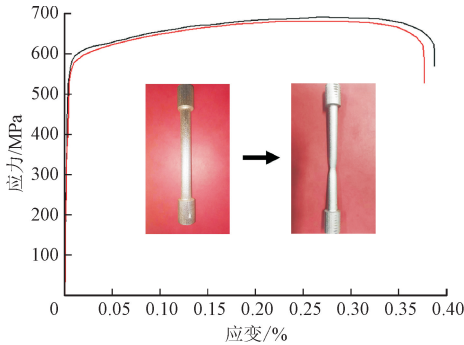


图 4 SS316L 材料拉伸应力应变曲线

Fig. 4 Tensile stress-strain curve of SS316L material

表 1 点阵试件打印质量

Table 1 Qualities of manufactured lattice specimens

点阵结构	理论质量/g	实际质量/g	相对误差/%
U-FCC1	11.50	11.60	0.86
U-FCC2	11.50	11.62	1.03
U-FCC3	11.50	11.56	0.52
SG-FCC1	11.57	11.68	0.94
SG-FCC2	11.57	11.64	0.6
SG-FCC3	11.57	11.71	1.21

2.2 有限元模型

采用 ABAQUS 6.14 的 EXPLICIT 模块建立点阵结构有限元模型,并进行准静态压缩仿真研究^[25]。根据下式计算真实应力和应变数据

$$\begin{cases} \sigma_{\text{true}} = \sigma_{\text{nominal}} (1 + \epsilon_{\text{nominal}}) \\ \epsilon_{\text{true}} = \ln(1 + \epsilon_{\text{nominal}}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_{true} 和 ϵ_{true} 分别为真实应力和应变; σ_{nominal} 和 $\epsilon_{\text{nominal}}$ 分别为名义应力和应变。

采用 Li 等关于 BCC(体心立方)点阵结构准静态压缩的仿真分析方法^[27],用两块刚性平板模拟试验机的两个压头。为了模拟平板与点阵结构之间的接触情况,在切向设置摩擦因数为 0.1 的摩擦接触,在法向设置硬接触。整体模型采用通用自接触。为保证实验准静态分析的要求和计算精度,减少计算时间,采用质量缩放方法,且保证分析中系统的动能占总能量的比值小于 5%。在网格划分方面,采用 2 节点 3D 梁单元(B31)。通过网格收敛性分析,设置网格尺寸为 0.3 mm。有限元模型如图 5 所示。其中, U_x 、 U_y 、 U_z 分别为 x 、 y 、 z 3 个方向的位移, R_x 、 R_y 、 R_z 分别是这 3 个方向的转角, V_z 为 z 方向的速

度,方向向下。

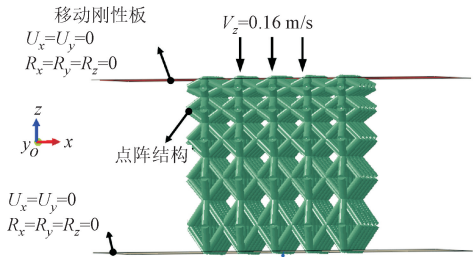


图 5 SG-FCC 点阵结构有限元模型

Fig. 5 Finite element model of SG-FCC lattice structures

3 分析与讨论

3.1 压缩过程分析

图 6 为 U-FCC 和 SG-FCC 点阵结构在压缩过程的应力、应变曲线。由图 6 可以看出,同种结构形式下两个试件的应力、应变曲线基本重合。其变形过程大致分为 3 个阶段,即线弹性阶段($0 < \epsilon < 0.02$)、塑性平台阶段($0.02 < \epsilon < 0.55$)和致密化阶段($\epsilon > 0.55$)。不同的应变值下, U-FCC 结构和 SG-FCC 的应力、应变曲线有一定差异。在线弹性阶段基本相似,而塑性平台阶段差异明显,具体表现为 SG-FCC 点阵结构应力先上升,应力水平明显高于 U-FCC 点阵结构;然后下降,应力水平略微低于 U-FCC 点阵结构;然后再上升,应力水平高于 U-FCC 点阵结构。而 U-FCC 结构则一直上升,但是不同的应变阶段下应力增长速率不同。在点阵结构压缩后期,两种结构呈现致密化,各层均被压实,压应力迅速增大。此时,力学性能取决于基体材料,故点阵结构的压缩过程仅分析致密化阶段开始前的阶段,即 $\epsilon < 0.55$ 。点阵结构的等效力学性能对比

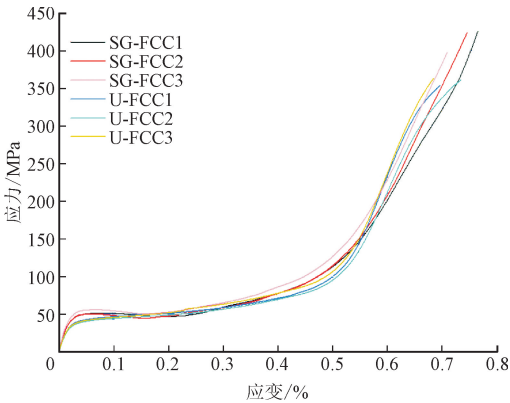


图 6 SG-FCC 和 U-FCC 点阵结构压缩应力、应变曲线

Fig. 6 The compression stress strain curves of SG-FCC and U-FCC lattice structures

如表 2 所示。由表 2 可知,相比 U-FCC 点阵结构,SG-FCC 点阵结构的刚度和比刚度分别增长了 6%和 4.3%,两者的强度和比强度相差不明显,该结论与 Bai 等关于尺寸梯度 BCC 点阵结构强度的研究类似^[17-18]。但是,相比 U-FCC 点阵结构,SG-FCC 点阵结构的刚度和比刚度更高,分别增加了 17.8%和 16.2%。根据 Choy 等和 AL-SAEDI 等的研究成果^[15, 27],相比于均匀点阵结构,截面梯度形式的点阵会造成刚度和比刚度的大幅减小,这也显示出尺寸梯度相比截面梯度点阵结构在刚度方面的增强优势。

表 2 点阵试件结构等效力学性能

Table 2 Equivalent mechanical properties of lattice structure

点阵结构	刚度/ GPa	强度/ MPa	比刚度/ (GPa·cm ³ ·g ⁻¹)	比强度/ (MPa·cm ³ ·g ⁻¹)
U-FCC1	2.780	50.87	1.92	35.08
U-FCC2	2.416	49.02	1.66	33.75
U-FCC3	2.526	48.50	1.75	33.56
平均 U-FCC	2.574	49.46	1.79	34.41
SG-FCC1	2.854	51.98	1.95	35.60
SG-FCC2	2.988	50.65	2.05	34.81
SG-FCC3	3.254	54.60	2.22	37.30
平均 SG-FCC	3.032	52.41	2.08	35.90

数值分析和试验得到的两种点阵结构压缩应力、应变曲线对比如图 7 所示。结果表明,实验得到的压缩响应曲线与有限元分析得到的曲线在线弹性段和塑性平台段吻合较好,验证了有限元模型的准确性。在致密化阶段,由于杆梁模型难以准确模拟由点阵杆件在大变形压缩后的挤压接触力学行为,因此偏差较大,需要采用实体有限元模型。因致密化阶段并不作为文章的研究重点,本文综合考虑计算效率,可以采用杆梁有限元模型进行分析。

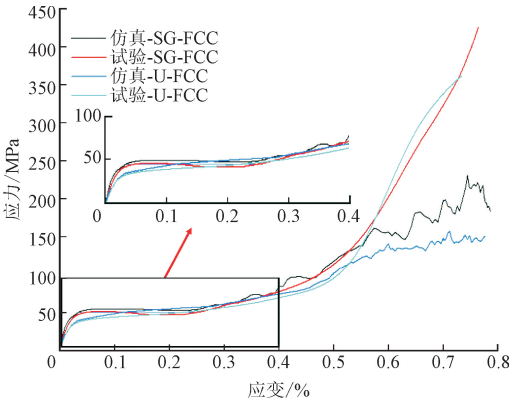


图 7 点阵结构试验与有限元模型应力应变曲线对比
Fig. 7 Comparison of lattice structure stress-strain curves between test and finite element model

图 8 为 SG-FCC 和 U-FCC 点阵结构压缩过程中不同应变水平的变形模式。在压缩起始段,SG-FCC 点阵结构相对密度较小的层先产生变形,而相对密度较大的层则变形不明显;相对密度较小的层更高,左右相邻杆件角度更小,相比 U-FCC 点阵结构在梯度方向的传力效率更好,因此在初期刚度性能好。随着压缩位移的增大,相对密度较小的层相邻杆件角度增大,承载性能下降,这是造成其在塑性平台阶段初期应力水平下降的主要原因。由于相对密度较小的层杆件较长,压缩后致密化结构体积更大,因此结构整体表现为“梯形”现象。最后,各层均逐渐压缩至相互接触,应力水平也逐渐上升,直到结构整体进入致密化,应力急剧增加。U-FCC 点阵结构在压缩中表现为上下层先发生大变形,中间层之后发生变形,压缩过程中结构总体表现为两端细中间粗的“椭圆形”现象。Huang 等通过对不同杆件角度下金字塔点阵结构的压缩行为研究^[29],也得出类似的结论:当点阵结构的杆件角度大于 45°时,随着角度的增加,其力学性能会逐渐增强。另外,根据有限元计算的应力云图,SG-FCC 相比 U-FCC 点阵结构的低应力区面积更少,应力梯度更小,也显示出 SG-FCC 相比 U-FCC 点阵结构在承载能力和结构效率方面的优势。

相比实体结构,点阵结构具有更优异的能量吸收性能。衡量指标有能量吸收性能 W_{ϵ} (压缩应变为 ϵ 时的吸能量)、比能量吸收性能 W_{∞} (单位质量点阵结构在压缩应变为 ϵ 时的吸能量),如下所示

$$W_{\epsilon} = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \tag{3}$$

$$W_{\infty} = (\int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon) / \rho_e \tag{4}$$

式中: ρ_e 为点阵结构的等效密度; σ 为结构的压缩应力。

两种点阵结构在实验过程中的吸能量和比吸能量对比如图 9 所示。可以看出,当 $\epsilon < 0.55$ 时,两种结构的吸能量和比吸能量随应变的变化类似,均呈近似线性增长,但梯度点阵结构的吸性能优于均匀点阵结构。当 ϵ 为 0.55 时,SG-FCC 点阵结构的吸能量为 36.83 J/cm³,比吸能量为 25.27 J/g。U-FCC 点阵结构的吸能量为 33.23 J/cm³,比吸能量为 22.9 J/g。相比于均匀点阵结构,梯度点阵结构的吸能量提高了 10.8%,比吸能量提高了 10.36%。U-FCC 结构和 SG-FCC 结构的吸能量试验值和仿真值曲线比较接近(应变小于 0.6 时),也验证了仿真模型的准确性。

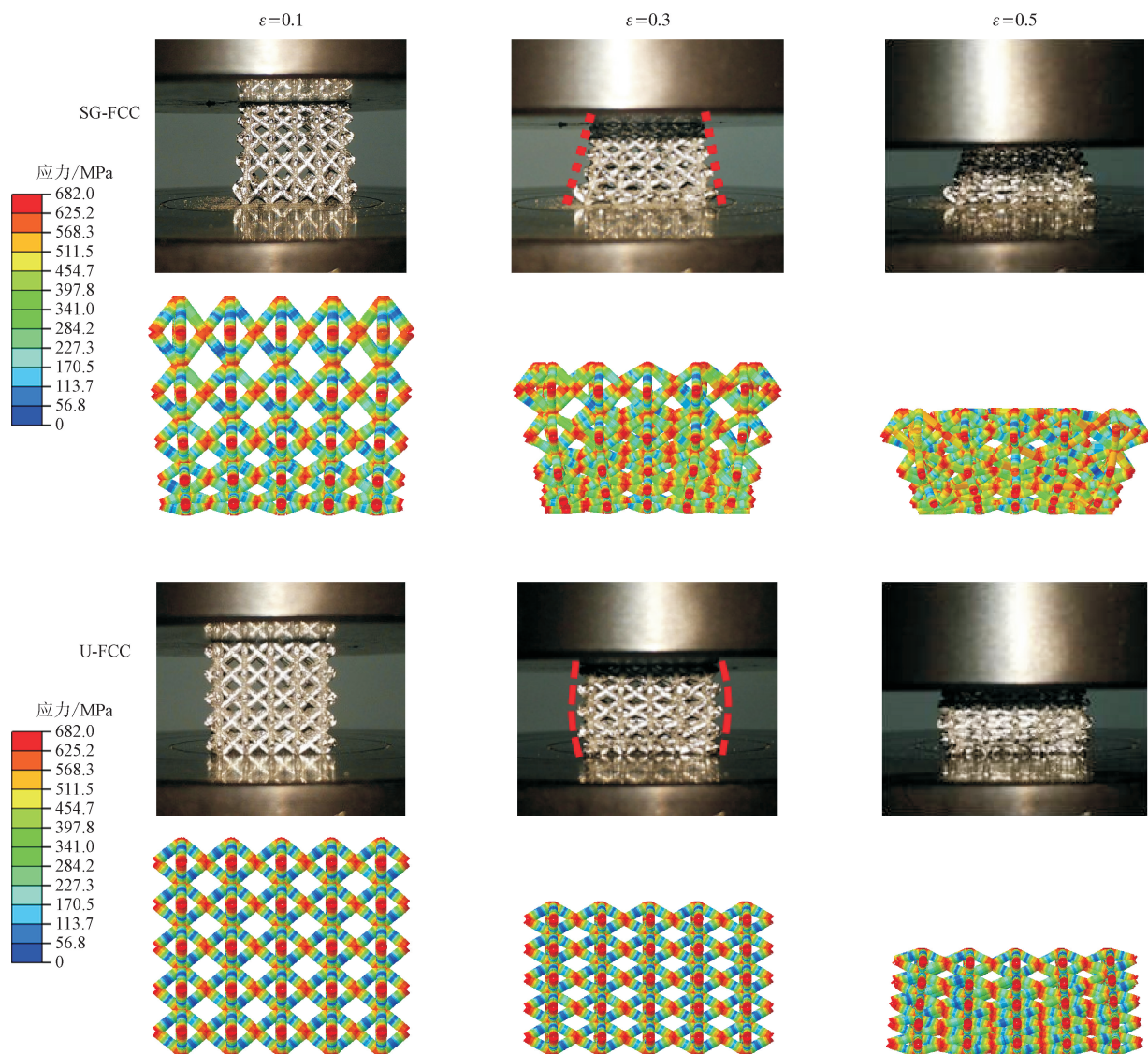


图 8 SG-FCC 和 U-FCC 点阵结构变形模式分析

Fig. 8 The deformation behaviors of SG-FCC, U-FCC lattice structures

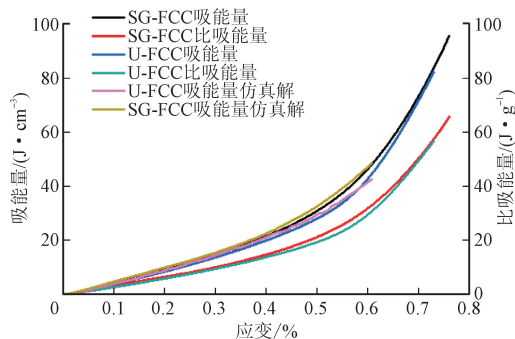


图 9 不同点阵结构能量吸收曲线对比

Fig. 9 Comparison of energy absorption performance curve between different lattice structures

3.2 等效弹性模量模型

由上节可知,试验计算的 SG-FCC 点阵结构的

等效弹性模量为 3.032 GPa, U-FCC 点阵结构的等效弹性模量为 2.574 GPa。梯度点阵结构的等效弹性模量多采用 Gibson-Ashby 模型预测,本节采用一种基于杆梁变形理论和梯度结构刚度组集方法计算两种点阵结构的等效弹性模量。

由图 1 中的 FCC 点阵结构构型可知,可以根据对称性,可以采用图 1 中的 OC 杆为例分析受力,如图 10 所示。将原坐标系 xyz 旋转得到新坐标系 $x'y'z'$, x' 轴沿杆件方向, y' 轴沿同平面垂直于杆件方向。根据式(5)中的等效弹性模量方法计算。

$$E_z = \frac{\sigma_z}{\epsilon_z}; \sigma_z = \frac{4F_z}{L^2}; \epsilon_z = \frac{2\delta_z}{RL} \quad (5)$$

式中: E_z 为等效弹性模量; σ_z 和 ϵ_z 分别为等效应力和应变; F_z 为 z 向加载力; δ_z 为 z 向对应变形。根

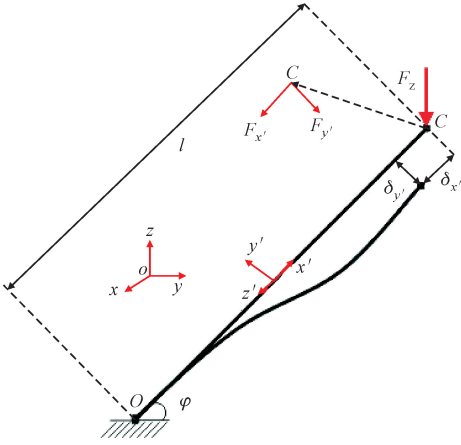


图 10 FCC 点阵代表性杆件变形模式及受力分析
Fig. 10 Deformation mode and force analysis of FCC lattice representative rod

据矢量运算规则,将 F_z 和 δ_z 分解到 x' 轴和 y' 轴,并根据力与位移的关系^[30],可得

$$\begin{cases} \delta_z = \delta_{x'} \sin\varphi + \delta_{y'} \cos\varphi \\ F_{x'} = F_z \sin\varphi \\ F_{y'} = F_z \cos\varphi \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \delta_{x'} = \frac{F_{x'} l}{AE_s} \\ \delta_{y'} = \frac{F_{y'} l^3}{12E_s I} + \frac{F_{y'} l}{kAG_s} \end{cases} \quad (7)$$

式中: k 为铁木新科梁剪切变形相关系数, $k = \frac{6(1+v_s)}{7+6v_s}$, v_s 为材料泊松比; E_s 为基材弹性模量; G_s 为基材剪切模量, $G_s = \frac{E_s}{2(1+v_s)}$; A 为杆件截面积, $A = \pi r^2$; l 为杆件长度, $l = \frac{L}{2} \sqrt{1+R^2}$; I 为杆件截面的二次惯性矩, $I = \frac{\pi r^4}{4}$; 根据几何关系, $R = \tan\varphi$ 。

联立式(5)~式(7),可计算出均匀 FCC 点阵结构的等效弹性模量为

$$E_{z1} = \frac{3Rk(1+R^2)^{3/2}\pi}{3R^2k(l/r)^2 + k(l/r)^4 + 6(1+v_s)(l/r)^2} E_s \quad (8)$$

式(8)为均匀 FCC 点阵结构的等效弹性模量,当 $R \leq 1$ 时,等效弹性模量均可以由此计算。当 $R > 1$ 时,胞元高度增大,杆件的剪切变形作用减弱,在承载后主要呈现弯曲变形特征,因此采用欧拉-伯努利梁理论,将式(7)改为

$$\delta_{x'} = \frac{F_{x'} l}{AE_s}; \delta_{y'} = \frac{F_{y'} l^3}{12E_s I} \quad (9)$$

联立式(5)、(6)和(9),可计算出等效弹性模量为

$$E_{z2} = \frac{3R(1+R^2)^{3/2}\pi}{3R^2(l/r)^2 + (l/r)^4} E_s \quad (10)$$

通过调节 R ,可以获得不同梯度下 FCC 点阵结构的等效弹性模量。进而梯度 FCC 结构整体的弹性模量由不同层的弹性模量叠加计算得到

$$\delta_i = \frac{FL_i}{E_i A_0}; \delta = \sum_{i=1}^n \delta_i; \delta = \frac{FL}{E_{\text{glatt}} A_0} \quad (11)$$

式中: δ_i 为第 i 层的变形; L_i 为第 i 层的高度; L 为总高度, $L = \sum_{i=1}^n L_i$; A_0 为等效底面积; F 为加载力; E_i 为第 i 个单层的等效弹性模量; δ 为结构总变形; E_{glatt} 为整个梯度点阵结构的等效弹性模量。可得尺寸梯度点阵结构的等效弹性模量为

$$\frac{1}{E_{\text{glatt}}} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{LE_i} \quad (12)$$

然而,采用式(12)进行运算时会出现数值误差,不适合进行实际工程计算,可将其改写为

$$E_{\text{glatt}} = \frac{\prod_{i=1}^n E_i}{\sum_{k=1}^n f_k \prod_{i=1, i \neq k}^n E_i} \quad (13)$$

式中: $f_k = L_k/L$, 即单层结构占整体结构的等效体积分数。尺寸梯度点阵结构的相对密度如下

$$\rho = \sum_{k=1}^n f_k \rho_k \quad (14)$$

式中: ρ_k 为第 k 个单层点阵结构的相对密度。将理论、试验和仿真计算获得的等效弹性模量对比如表 3 所示。由表 3 可知,针对 U-FCC 和 SG-FCC 点阵结构,理论、试验和仿真计算结果比较接近,验证了提出的梯度点阵结构弹性模量理论模型的准确性。同时也说明了当 $R > 1$ 时, FCC 点阵结构杆件的弹性变形更接近欧拉-伯努利梁的弯曲变形模式;当 $R \leq 1$ 时,杆件的弹性变形更接近铁木辛柯梁的剪切变形模式。

表 3 两种点阵结构弹性模量比较

Table 3 Elastic modulus comparison between two lattice structures

参数	U-FCC	SG-FCC
理论计算等效模量/GPa	2.696	2.812
试验得到等效模量/GPa	2.574	3.032
仿真计算等效模量/GPa	2.734	3.073
误差(理论与试验)/%	4.74	7.26
误差(理论与仿真)/%	1.39	8.49

3.3 梯度因子影响

为研究不同梯度因子下 SG-FCC 点阵结构的力学性能,设计了不同的梯度因子方案,如表 4 所示。

表 4 中梯度因子的定义及约束条件如下

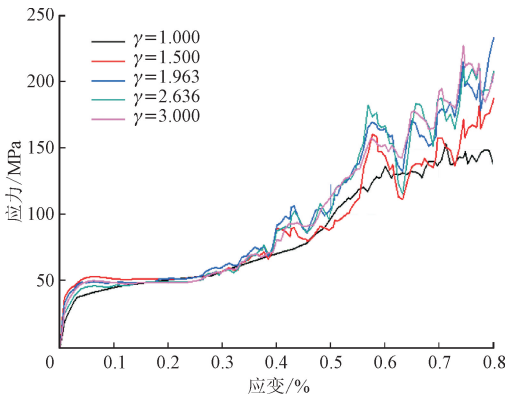
$$\gamma^i = \frac{H_5^i}{H_1^i} \tag{15}$$

$$\begin{cases} H_5^i - H_4^i = c^i \\ H_4^i - H_3^i = c^i \\ H_3^i - H_2^i = c^i \\ H_2^i - H_1^i = c^i \\ H_3 = 4 \text{ mm} \end{cases} \tag{16}$$

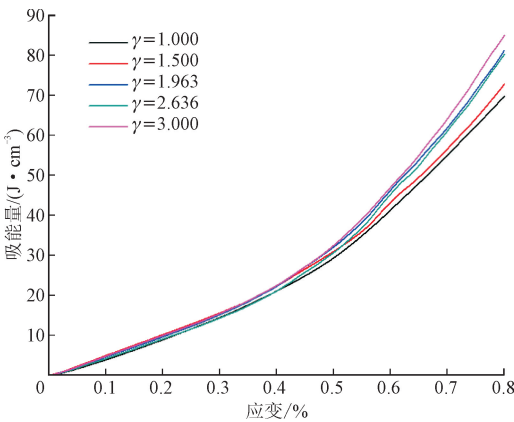
式中： γ^i 为编号 i 对应的梯度因子值； H_5^i 和 H_1^i 分别为第 5 层和第 1 层的高度； H_2^i 、 H_3^i 、 H_4^i 分别为 2~4 层中各层的高度。

通过设定 γ^i ，便可计算出各层的设计高度。采用理论和数值分析方法获得不同梯度因子的点阵结构的力学性能。表 5 为不同梯度因子点阵结构力学性能对比，图 11 为不同梯度因子下的 FCC 点阵结构压缩应力-应变与能量吸收对比。可以看出：对于尺寸梯度 FCC 点阵结构，不同梯度因子对压缩曲线的变化形状影响不大，与杨等关于不同梯度因子极小曲面点阵结构的压缩研究结论类似^[31]。结合上文的压缩过程变形分析，当压缩应变大于 0.35 时，由于部分杆件提前进入致密段，会造成应力曲线陡增的现象，这是梯度点阵吸能性能得到增强的主要原因。采用梯度化设计后，压缩刚度和能量吸收性能均得到提高。对于刚度性能，当梯度因子为 1.5 时的等效刚度和比刚度较高，梯度因子为 1.963 次之，梯度因子为 3 和 2.636 的刚度性能比较接近。对于吸能性能(应变 0.55)，当梯度因子为 3 时的吸能量和比吸能量较高，梯度因子为 1.963 和 2.636 的吸能性能比

较接近，且均大于梯度因子为 1.5 时的性能。当梯度因子为 1 时的吸能性能和刚度性能均较差。



(a) 应力-应变曲线



(b) 单位体积能量吸收曲线

图 11 不同梯度因子 FCC 点阵结构压缩吸能性能
Fig. 11 Compression energy absorption performance of FCC lattice structures with different gradient factors

表 4 梯度化因子研究方案

Table 4 Research scheme of gradient factors

编号 i	γ	H_1/mm	H_2/mm	H_3/mm	H_4/mm	H_5/mm	相对密度 ρ^*
1	1.000	4.0	4.00	4	4.00	4.0	0.180 4
2	1.500	3.2	3.60	4	4.40	4.8	0.180 6
3	1.963	2.7	3.35	4	4.65	5.3	0.180 9
4	2.636	2.2	3.10	4	4.90	5.8	0.181 0
5	3.000	2.0	3.00	4	5.00	6.0	0.181 4

表 5 不同梯度因子点阵结构力学性能对比

Table 5 Comparison of mechanical properties for lattice structures with different gradient factor

编号 i	等效刚度/GPa		比刚度理论解 /(GPa·cm ³ ·g ⁻¹)	结构质量/g	单位体积		单位质量
	仿真解	理论解			吸能量/(J·cm ⁻³)	吸能量/(J·g ⁻¹)	
1	2.73	2.70	1.88	11.50	35.22	24.50	
2	3.23	2.87	1.99	11.52	36.17	25.12	
3	3.16	2.85	1.98	11.53	38.45	26.68	
4	3.06	2.82	1.96	11.54	36.30	25.16	
5	3.07	2.81	1.94	11.57	39.35	27.21	

4 结 论

本文通过理论、试验和数值仿真方法,研究了多层均匀面心立方(U-FCC)和尺寸梯度面心立方(SG-FCC)两种点阵结构在准静态压缩载荷下的力学性能,结论如下。

(1)相比于 U-FCC 点阵结构,SG-FCC 点阵结构的力学性能更加优异,其刚度和比刚度分别增长了 17.8%和 16.2%,吸能量和比吸能量分别提高了 10.8%和 10.36%。

(2)基于杆梁变形理论和梯度结构刚度组集方法,针对 SG-FCC 和 U-FCC 两种点阵结构,提出了等效弹性模量理论模型计算方法,有限元和试验验证了等效弹性模量理论模型的准确性。

(3)不同的梯度因子下,梯度 FCC 点阵结构的等效刚度、比刚度、吸能量和比吸能量均不同。当梯度因子为 1.5 时,等效刚度和比刚度性能较好,当梯度因子为 3 时,吸能量和比吸能量较好。

参考文献:

- [1] OBADIMU S O, KOUROUSIS K I. Compressive behaviour of additively manufactured lattice structures: a review [J]. *Aerospace*, 2021, 8(8): 207.
- [2] RIVA L, GINESTRA P S, CERETTI E. Mechanical characterization and properties of laser-based powder bed-fused lattice structures: a review [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 113(3): 649-671.
- [3] 徐亮, 湛清云, 席雷, 等. 微类桁架点阵结构填充内冷通道的多目标优化设计 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(3): 1-11.
XU Liang, CHEN Qingyun, XI Lei, et al. Multi-objective optimization design of micro-class truss lattice structure for filling internal cooling channel [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(3): 1-11.
- [4] TARLOCHAN F. Sandwich structures for energy absorption applications: a review [J]. *Materials*, 2021, 14(16): 4731.
- [5] 熊健, 杜昀桐, 杨雯, 等. 轻质复合材料夹芯结构设计及力学性能最新进展 [J]. *宇航学报*, 2020, 41(6): 749-760.
XIONG Jian, DU Yuntong, YANG Wen, et al. Research progress on design and mechanical properties of lightweight composite sandwich structures [J]. *Journal of Astronautics*, 2020, 41(6): 749-760.
- [6] 左蔚, 赵剑, 白静, 等. 激光选区熔化菱形正十二面

体点阵材料的承载与失效特性 [J]. *火箭推进*, 2020, 46(5): 87-93.

ZUO Wei, ZHAO Jian, BAI Jing, et al. Research on bearing and disable properties of laser selective melting rhombohedral dodecahedral lattice materials [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2020, 46(5): 87-93.

- [7] 左蔚, 宋梦华, 杨欢庆, 等. 增材制造技术在液体火箭发动机应用述评 [J]. *火箭推进*, 2018, 44(2): 55-65.

ZUO Wei, SONG Menghua, YANG Huanqing, et al. Application of additive manufacturing technology in liquid rocket engine [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2018, 44(2): 55-65.

- [8] 王雷, 闫素娜, 赵强强, 等. 基于单元过滤的自支撑结构拓扑优化方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(5): 45-55.

WANG Lei, YAN Suna, ZHAO Qiangqiang, et al. A topology optimization method for self-supporting structures based on element filtering [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(5): 45-55.

- [9] BLAKEY-MILNER B, GRADL P, SNEDDEN G, et al. Metal additive manufacturing in aerospace: a review [J]. *Materials & Design*, 2021, 209: 110008.

- [10] REICHARDT A, SHAPIRO A A, OTIS R, et al. Advances in additive manufacturing of metal-based functionally graded materials [J]. *International Materials Reviews*, 2021, 66(1): 1-29.

- [11] 朱凌霄, 王同银, 朱晓磊. 基于梯度化因子功能梯度点阵夹层结构优化设计 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(23): 98-103.

ZHU Lingxue, WANG Tongyin, ZHU Xiaolei. Optimization design of a functionally graded lattice sandwich structure based on gradient factor [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(23): 98-103.

- [12] 朱凌霄, 朱晓磊. 芯体截面梯度变化的点阵夹层结构吸能特性研究 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(14): 115-121.

ZHU Lingxue, ZHU Xiaolei. Energy absorption characteristics of lattice truss structures with graded cross-section core member [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(14): 115-121.

- [13] 乔及森, 孔海勇, 苗红丽, 等. 梯度铝蜂窝夹芯板的力学行为 [J]. *材料工程*, 2021, 49(3): 167-174.

QIAO Jisen, KONG Haiyong, MIAO Hongli, et al. Mechanical behavior of gradient aluminum honeycomb sandwich panels [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2021, 49(3): 167-174.

- [14] NIKNAM H, AKBARZADEH A H. Graded lattice

- structures; simultaneous enhancement in stiffness and energy absorption [J]. *Materials & Design*, 2020, 196: 109129.
- [15] CHOY S Y, SUN Chennan, LEONG K F, et al. Compressive properties of functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting [J]. *Materials & Design*, 2017, 131: 112-120.
- [16] BAI Long, GONG Cheng, CHEN Xiaohong, et al. Mechanical properties and energy absorption capabilities of functionally graded lattice structures; experiments and simulations [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 182: 105735.
- [17] BAI Long, GONG Cheng, CHEN Xiaohong, et al. Quasi-Static compressive responses and fatigue behaviour of Ti-6Al-4V graded lattice structures fabricated by laser powder bed fusion [J]. *Materials & Design*, 2021, 210: 110110.
- [18] WANG Peng, BIAN Yijie, YANG Fan, et al. Mechanical properties and energy absorption of FCC lattice structures with different orientation angles [J]. *Acta Mechanica*, 2020, 231(8): 3129-3144.
- [19] JIN Nan, WANG Fuchi, WANG Yangwei, et al. Failure and energy absorption characteristics of four lattice structures under dynamic loading [J]. *Materials & Design*, 2019, 169: 107655.
- [20] LEARY M, MAZUR M, WILLIAMS H, et al. Inconel 625 lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM); mechanical properties, deformation and failure modes [J]. *Materials & Design*, 2018, 157: 179-199.
- [21] ZHU Jihong, ZHOU Han, WANG Chuang, et al. A review of topology optimization for additive manufacturing; status and challenges [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(1): 91-110.
- [22] ASTM International. Standard test methods for tension testing of metallic materials: ASTM E8/E8M-21 [S]. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2021.
- [23] CASATI R, LEMKE J, VEDANI M. Microstructure and fracture behavior of 316L austenitic stainless steel produced by selective laser melting [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2016, 32(8): 738-744.
- [24] ROSA F, MANZONI S, CASATI R. Damping behavior of 316L lattice structures produced by selective laser melting [J]. *Materials & Design*, 2018, 160: 1010-1018.
- [25] JIANG Huan, COOMES A, ZHANG Zhennan, et al. Tailoring 3D printed graded architected polymer foams for enhanced energy absorption [J]. *Composites; Part B Engineering*, 2021, 224: 109183.
- [26] LI Puhao, YANG Fan, BIAN Yijie, et al. Deformation pattern classification and energy absorption optimization of the eccentric body centered cubic lattice structures [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 212: 106813.
- [27] AL-SAEDI D S J, MASOOD S H, FAIZAN-UR-RAB M, et al. Mechanical properties and energy absorption capability of functionally graded F2BCC lattice fabricated by SLM [J]. *Materials & Design*, 2018, 144: 32-44.
- [28] HUANG Yingjie, XUE Yingying, WANG Xinfu, et al. Mechanical behavior of three-dimensional pyramidal aluminum lattice materials [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 696: 520-528.
- [29] ALAÑA M, LOPEZ-ARANCIBIA A, PRADERA-MALLABIABARRENA A, et al. Analytical model of the elastic behavior of a modified face-centered cubic lattice structure [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2019, 98: 357-368.
- [30] 杨磊, 郑浩, 张聪, 等. 梯度极小曲面点阵结构力学特性研究 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(12): 64-69.
- YANG Lei, ZHENG Hao, ZHANG Cong, et al. Influence of gradient design on mechanical properties of Gyroid lattice structures [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2022, 50(12): 64-69.

(编辑 杜秀杰 武红江)