

## 激光选区熔化成形多层级Gyroid点阵结构的力学性能研究

王鹏欢, 汤名锴, 王森林

### MECHANICAL PROPERTIES OF MULTI-LEVEL GYROID LATTICE STRUCTURES FABRICATED BY SELECTIVE LASER MELTING

Wang Penghuan, Tang Mingkai, and Wang Senlin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/0459-1879-24-283>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于增材制造的三周期极小曲面结构关键力学性能研究进展

RECENT PROGRESS ON SOME FUNDAMENTAL MECHANICAL PROPERTIES OF TPMS STRUCTURES BASED ON ADDITIVE MANUFACTURING

力学学报. 2024, 56(11): 3099-3115

#### 激光选区熔化铺粉过程的数值模拟及粉层表征

NUMERICAL SIMULATIONS OF POWDER SPREADING PROCESS IN SELECTIVE LASER MELTING AND POWDER LAYER CHARACTERIZATION

力学学报. 2023, 55(9): 1921-1938

#### 功能梯度三周期极小曲面静动态力学特性

QUASI-STATIC AND DYNAMIC MECHANICAL PROPERTIES OF FUNCTIONALLY GRADED TRIPLY PERIODIC MINIMAL SURFACE STRUCTURES

力学学报. 2024, 56(9): 2646-2658

#### 激光选区熔化增材制造中的粉体热动力学行为

DYNAMIC BEHAVIOURS OF POWDER PARTICLES IN SELECTIVE LASER MELTING ADDITIVE MANUFACTURING

力学学报. 2021, 53(12): 3206-3216

#### 选区激光熔化成形区粗糙表面对铺粉质量的影响:离散元模拟

INFLUENCE OF ROUGH SURFACE OF DEPOSITED AREA ON QUALITY OF POWDER SPREADING DURING SELECTIVE LASER MELTING: DISCRETE ELEMENT SIMULATIONS

力学学报. 2021, 53(12): 3217-3227

#### 金属增材制造中的缺陷、组织形貌和成形材料力学性能

DEFECTS, MICROSTRUCTURES AND MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS FABRICATED BY METAL ADDITIVE MANUFACTURING

力学学报. 2021, 53(12): 3190-3205



关注微信公众号，获得更多资讯信息

# 激光选区熔化成形多层级 Gyroid 点阵结构的力学性能研究<sup>1)</sup>

王鹏欢\* 汤名锴<sup>\*,2)</sup> 王森林<sup>†</sup>

\* (武汉科技大学机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 武汉 430081)

† (华中科技大学材料科学与工程学院, 武汉 430074)

**摘要** 三周期极小曲面 (TPMS) 结构因其优异的力学性能, 在航空航天领域关键零件轻量化方面展现出广阔的应用前景. 为有效增强 TPMS 结构力学性能及其轻量化程度, 提出一种基于应力场引导的多层级 TPMS 点阵结构设计优化方法, 设计出多层级 Gyroid 点阵结构, 采用激光选区熔化技术制备了相应的点阵结构, 并与体积分数相同的初级 Ti6Al4V Gyroid 点阵结构进行了对比研究. 在此基础上, 通过有限元模拟和压缩试验, 系统研究了多层级 Gyroid 点阵结构的压缩性能、变形行为和能量吸收性能. 结果显示, 与相同体积分数的初级 Gyroid 点阵结构相比, 多层级 Gyroid 点阵结构压缩性能显著提升, 其弹性模量、屈服强度和极限强度分别提高了约 36.52%, 58.55% 和 57.62%, 能量吸收能力提升了约 42.85%. 此外, 与初级 Gyroid 点阵结构在斜压杆中心区域的 45° 剪切断裂模式不同, 多层级 Gyroid 点阵结构初期在填充区域发生层状断裂, 随后在未填充区域的斜压杆中心区域发生 45° 剪切断裂. 基于 Johnson-Cook 塑性模型和损伤模型所建立的有限元模型能够准确预测多层级 Gyroid 点阵结构的变形行为和力学性能, 其预测误差在 20% 以内. 文章所设计的多层级 Gyroid 点阵结构具有优异的力学性能和能量吸收能力, 为航空航天领域高性能轻量化零件优化设计与制造提供了新的思路与技术支持.

**关键词** 激光选区熔化, 三周期极小曲面, 多层级结构, 有限元分析, 力学性能

中图分类号: O342, TB31

文献标识码: A

DOI: 10.6052/0459-1879-24-283

CSTR: 32045.14.0459-1879-24-283

## MECHANICAL PROPERTIES OF MULTI-LEVEL GYROID LATTICE STRUCTURES FABRICATED BY SELECTIVE LASER MELTING<sup>1)</sup>

Wang Penghuan\* Tang Mingkai<sup>\*,2)</sup> Wang Senlin<sup>†</sup>

\* (Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering of Hubei Province, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

† (School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract** Triply periodic minimal surface (TPMS) structures, owing to their outstanding mechanical properties, have shown significant potential in lightweight design for critical aerospace components. To effectively enhance the mechanical performance and lightweight characteristics of TPMS structures, this study proposes an optimization method

2024-06-13 收稿, 2024-12-05 录用, 2024-12-06 网络版发表.

1) 湖北省自然科学基金(2023AFB030)和国家自然科学基金(52305413)资助项目.

2) 通讯作者: 汤名锴, 讲师, 主要研究方向为增材制造和功能梯度点阵结构. E-mail: mingkaitang@wust.edu.cn

引用格式: 王鹏欢, 汤名锴, 王森林. 激光选区熔化成形多层级 Gyroid 点阵结构的力学性能研究. 力学学报, 2025, 57(1): 148-161

Wang Penghuan, Tang Mingkai, Wang Senlin. Mechanical properties of multi-level Gyroid lattice structures fabricated by selective laser melting. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2025, 57(1): 148-161

for multi-level TPMS lattice structures based on stress field guidance. Specifically, a multi-level Gyroid lattice structure is designed and fabricated using selective laser melting (SLM) technology. The performance of the multi-level Gyroid lattice is then compared with that of a primary Ti6Al4V Gyroid lattice structure with the same volume fraction. Through finite element simulations and compression tests, the compression behavior, deformation mechanisms, and energy absorption capabilities of the multi-level Gyroid lattice structure are systematically studied. The results indicate that, compared to the primary Gyroid lattice with the same volume fraction, the multi-level Gyroid structure exhibits significant improvements in compression performance. Specifically, its elastic modulus, yield strength, and ultimate strength are enhanced by approximately 36.52%, 58.55%, and 57.62%, respectively. Moreover, its energy absorption capacity is increased by approximately 42.85%. In terms of failure modes, unlike the primary Gyroid lattice structure, which experiences 45° shear fracture at the center of the inclined compression struts, the multi-level Gyroid lattice initially undergoes layered fracture in the filled regions. Subsequently, a 45° shear fracture occurs in the center of the inclined compression struts in the unfilled regions. The finite element model, based on the Johnson-Cook plasticity and damage models, accurately predicts the deformation behavior and mechanical performance of the multi-level Gyroid lattice structure, with a prediction error within 20%. The multi-level Gyroid lattice structure designed in this study demonstrates superior mechanical properties and energy absorption capabilities, offering new insights and technical support for the design and manufacturing of high-performance lightweight components in aerospace applications. This work presents a novel approach to lattice structure optimization, contributing to the advancement of additive manufacturing techniques and their application in the aerospace industry.

**Key words** selective laser melting, triply periodic minimal surface, multi-level architectures, finite element analysis, mechanical properties

## 引言

三周期极小曲面 (triply periodic minimal surface, TPMS) 是一种具有周期性、零曲率和复杂几何形状的曲面, 通常由隐式函数来定义<sup>[1]</sup>. 与传统的点阵结构 (例如体心立方结构) 相比, 三周期极小曲面点阵结构不仅具有高比强度和优异的力学性能<sup>[2]</sup>, 还展现出优异的振动阻尼、流体控制、散热、生物相容性和吸声等性能<sup>[3-5]</sup>. 三周期极小曲面点阵结构在航空航天<sup>[6]</sup> 和医学器材设计<sup>[7]</sup> 等轻量化设计领域<sup>[8]</sup> 展现出广阔的应用前景.

近年来, 增材制造技术<sup>[9]</sup> 的快速发展为点阵结构的设计和成形提供了极大的便利, 特别是激光选区熔化 (selective laser melting, SLM) 技术已经相当成熟. SLM 技术能够实现随机、梯度和均匀的晶格结构, 并可用于加工 316L 不锈钢及钛合金等多种金属材料<sup>[10]</sup>. SLM 技术能够精确地打印出复杂的 TPMS 结构, 例如 Zhang 等<sup>[11]</sup> 利用 SLM 制备了具有均匀和渐变片厚的 Gyroid 点阵结构, CT 检测结果显示其缺陷率低, 制造精度高. 与传统的点阵结构相比, 桁架或支柱结构的连接部位容易产生应力集中和缺陷, 这可能会对结构的力学性能造成不利的影

响<sup>[12-13]</sup>. Yang 等<sup>[14]</sup> 利用 SLM 制备了不同孔隙率下的均匀 Ti6Al4V Gyroid 点阵结构, 通过压缩实验发现 Gyroid 点阵结构的断裂行为为 45° 剪切断裂. Zhao 等<sup>[15]</sup> 则采用 SLM 制备了功能梯度 Gyroid 晶格结构, 研究结果显示, 相对于均匀 Gyroid 结构, FGS 结构具有更好的几何连续性和连通性, 稳定的强度变化, 以及出色的能量吸收性能. Chen 等<sup>[16]</sup> 研究了采用激光选区熔化技术制备的 Ti6Al4V 和 Al-Si10Mg Gyroid 点阵结构在单轴压缩条件下的力学性能, 并通过 Gibson-Ashby 模型对实验结果进行了拟合, 为生物应用和种植体匹配提供了理论指导.

然而, 对 SLM 所成形点阵结构力学性能的研究主要依赖于实验工作. 由于机器、金属粉末、加工、操作人员以及后处理的高昂成本, 进行大量实验测试既耗时又浪费材料<sup>[15]</sup>. 因此, 通过有限元方法对其结构进行仿真成为研究热点. 有限元分析可以提供详细的应力-应变分布, 这在实验中难以测量, 这些信息有助于优化点阵结构的设计<sup>[17-19]</sup>. 例如, Smith 等<sup>[20]</sup> 利用有限元模型分析了体心立方单元格在压缩过程中的应力-应变分布, 发现支撑中的塑性变形位于节点区域附近, 这是由于应力集中导致的. 基于这一结论, 他们优化了模型, 以提高压缩条件下

的刚度和屈服应力. Cho 等<sup>[21]</sup>采用有限元方法模拟了多孔钛合金点阵结构在单轴压缩下的变形行为, 结果与压缩试验的观测结果高度吻合. 由此可见, 采用有限元分析的方法对点阵结构的力学性能和变形行为进行预测和机理分析是一个极佳的方法.

对于先前 TPMS 点阵结构设计的研究往往基于梯度和两种 TPMS 点阵结构的过渡设计等<sup>[22]</sup>, 很少有根据点阵结构的仿真结果进行优化设计. 虽然 Ding 等<sup>[23]</sup>提出了一种利用 STL-free 工作流程, 无缝整合了隐式固体建模和直接切片制造, 避免了 STL 网格的中间步骤, 设计并制造了多层次点阵结构, 实现了轻量化设计. 然而, 目前很少人对多层次点阵结构的力学性能进行深入研究. Wang 等<sup>[24]</sup>在相关研究中提出了一种基于场驱动的处理方法, 通过将网格、函数和点云图等数据转换为统一的控制场表示, 并建立合理的控制-属性映射规则, 实现了所需模型的构建. 例如, Wang 等<sup>[25]</sup>在后续研究中选取 I-WP 和钻石单元分别作为初级和填充单元. 根据功能需求驱动, 通过所提框架指导的模拟应力场分布完成了梯度分布设计. 结果表明, 在相近体积分数下, 多层次 I-WP 点阵结构的压缩强度比初级点阵提高了约 100%. 结合初级点阵结构的应力场, 对初级点阵结构进行轻量化设计, 进一步与相同体积分数的初级点阵结构相比, 其力学性能得到提升.

鉴于这种设计方法的灵活性, 本文针对航空航天应用中点阵结构对高轻量化和优异抗压性能的同步需求, 提出一种基于应力场引导的多层级 TPMS 点阵结构设计优化方法. 首先, 选取了非应力集中的区域作为填充区域, 设计了 3 种填充模式: 均匀填充、线性填充和非线性填充. 其次, 基于该方法设计模型, 进而采用激光选区熔化技术制备出 Ti6Al4V 多层次 Gyroid 点阵结构样品, 通过压缩实验测试了不同填充模式下, 与相同体积分数的初级 Gyroid 点阵结构在压缩性能和能量吸收方面的差异. 最后, 基于 Johnson-Cook 塑性模型和损伤模型所建立的有限元分析模型, 对多层次 Gyroid 点阵结构的变形机理和压缩性能进行解释分析.

## 1 材料与方 法

### 1.1 多层次 Gyroid 点阵结构设计

与其他曲面相比, Gyroid 曲面在中心区域表现

出明显的应力集中现象. 在其他部位, 应力水平相对较低. 因此, 这一特性为后续填充晶格结构的选择提供了指导. 鉴于 Gyroid 曲面独特的应力分布, 使其成为初级点阵结构和填充点阵结构的理想选择, 三周期极小曲面通常由隐函数形式提取广义方程的零等值面, Gyroid 曲面的隐函数如下

$$f_G = \sin X \cos Y + \sin Y \cos Z + \sin Z \cos X = t \quad (1)$$

式中,  $X = \frac{2\pi}{L}x$ ,  $Y = \frac{2\pi}{L}y$ ,  $Z = \frac{2\pi}{L}z$ ;  $X$ ,  $Y$  和  $Z$  表示三周期极小曲面的 3 个不同方向, 并且  $L$  表示单胞的尺寸,  $t$  控制着结构的体积分数.

本文主要探讨了填充方式对多层次 Gyroid 点阵结构的影响. 为此, 本文将初级 Gyroid 点阵结构与填充 Gyroid 点阵结构的体积分数统一设定为 50%. 初级 Gyroid 点阵结构尺寸为  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ , 单胞尺寸为  $5 \text{ mm}$ , 如图 1(a) 所示. 该结构模型被导入商业有限元仿真软件 COMSOL 中, 进行静力学仿真. 仿真条件为顶部施加恒定载荷, 底部固定; 材料属性采用 Johnson-Cook 本构模型, 具体参数见表 1. 图 1(b) 显示了初始结构的 von Mises 应力云图. 从仿真结果可得, 在 Gyroid 点阵结构中, 斜压杆的中心区域承受着最高的应力. 现有文献表明, Gyroid 点阵结构的斜压杆的中心区域的受力情况展现出一种弯曲与拉伸相结合的复合变形模式<sup>[14]</sup>. 根据静力学仿真结果, 本文首先对初始结构的高应力区域的应力值进行剔除, 其次对非应力集中区域进行了统计分析. 为了在轻量化与力学性能之间取得平衡, 将填充范围设定为  $0 \sim 24.69 \text{ MPa}$  (占比为 60%), 如图 1(d) 所示. 为了讨论不同填充方式对多层次 Gyroid 点阵结构的力学性能影响, 本文设置了 3 种填充方式: 均匀填充、线性填充和非线性填充. 在初级 Gyroid 结构的  $Z$  轴方向上, 均匀填充主要以  $2 \text{ mm}$  的 Gyroid 晶胞进行填充; 线性填充以一次函数控制填充晶胞的大小; 非线性填充以二次函数控制填充晶胞的大小, 如图 1(e) 所示. 将仿真结果转换为点云图后, 导入先前开发的 4D print 软件中. 通过使用 Materialise Magics 软件, 计算出多层次 Gyroid 点阵结构模型的理论体积分数为 33%.

为了进行对比, 本文还设计了一个与多层次 Gyroid 点阵结构具有相同体积分数的初级 Gyroid 点阵结构. 本文设计的 Gyroid 点阵结构模型如图 2



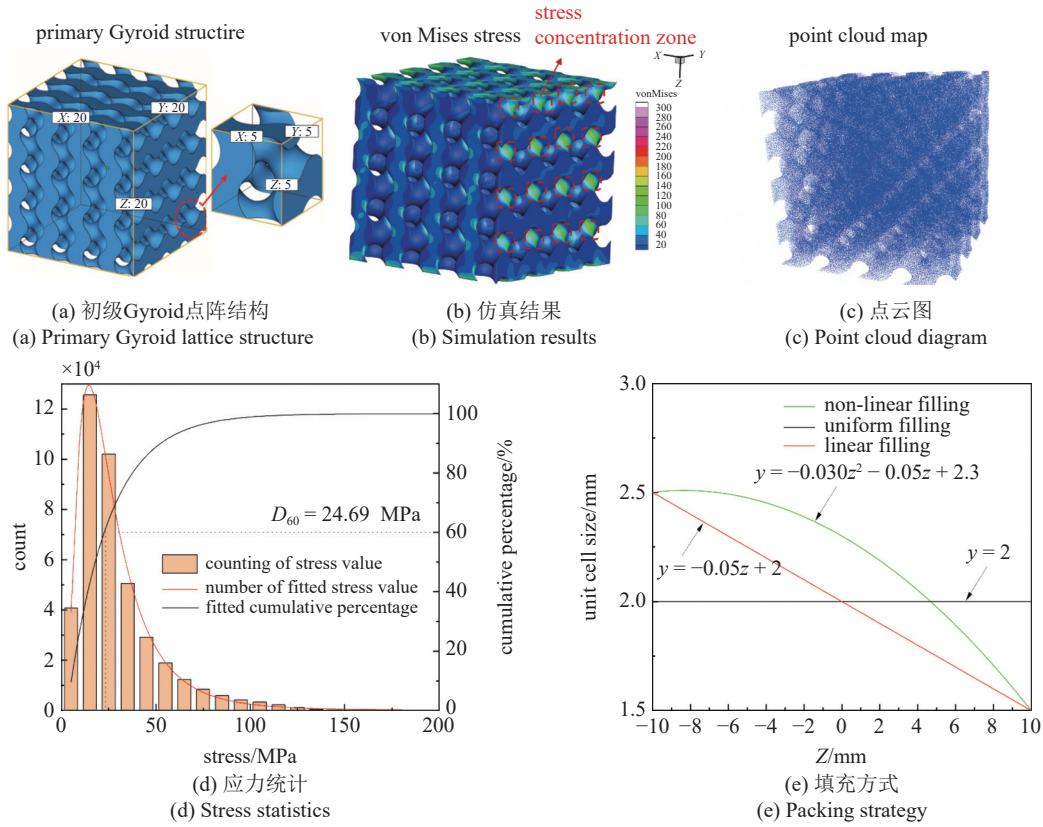


图 1 仿真结果数据分析及晶格填充方式

Fig. 1 Analysis of simulation results and lattice packing strategy

表 1 Johnson-Cook 的强度和损伤模型的参数

Table 1 Parameters for the Johnson-Cook strength and damage model

A/MPa	B/MPa	n	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>
1567	952	0.4	-0.09	0.25	-0.5

### 1.2 材料与研究方法

#### 1.2.1 材料

在本研究中, 采用了雾化球形 Ti6Al4V 粉末 (纯度为 99.9%). 该粉末球形度较好, 表面光滑, 且流动性较好, 其微观形貌如图 3 所示.

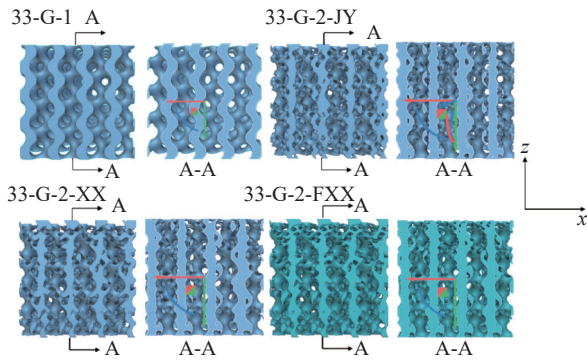


图 2 初级 Gyroid 与多层次 Gyroid 点阵结构

Fig. 2 Primary Gyroid lattice structures versus multilevel Gyroid lattice structures

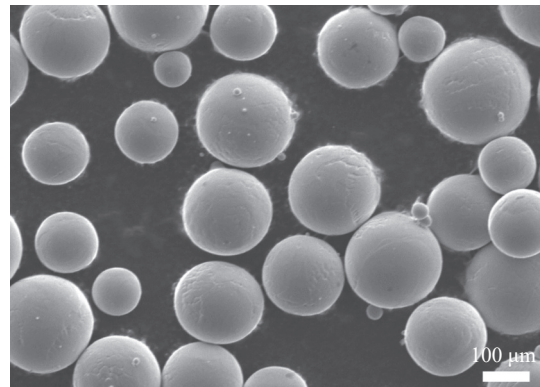


图 3 Ti6Al4V 粉末的扫描电子显微镜 (SEM) 图像

Fig. 3 SEM image of Ti6Al4V powder

所示. 为了便于后续讨论, 本文将设计结构按照以下规则命名: “体积分数-TPMS 类型-晶格结构层级-填充方式”, 其中填充方式采用中文缩写.

#### 1.2.2 SLM 工艺参数

本研究中设计的 Gyroid 点阵结构模型均采用德国 EOS 公司生产的 M290 SLM 设备进行制造. 在

加工过程中,为防止氧化反应,需在氩气保护气氛中进行.经过多次实验,并参考已有研究<sup>[25]</sup>,本文确定了 Ti6Al4V Gyroid 点阵结构的 SLM 工艺参数,如表 2 所示.在样品制备开始之前,我们在每个模型的底部添加了一层厚度为 0.5 mm 的薄板,以有效保护模型样品材料,避免在通过电火花加工去除材料时造成损坏.本文中制造的所有样品展示于图 4.此外,采用这些工艺参数制备的 Ti6Al4V 块体,通过阿基米德法测其密度为 4.50 g/cm<sup>3</sup>.

表 2 Ti6Al4V 的主要 SLM 工艺参数

Table 2 Primary SLM process parameters for Ti6Al4V

Process parameters	Value
laser power/W	250
scanning speed/(mm·s <sup>-1</sup> )	1200
spacing layer/mm	0.14
thickness/mm	0.03
preheating temperature/°C	150

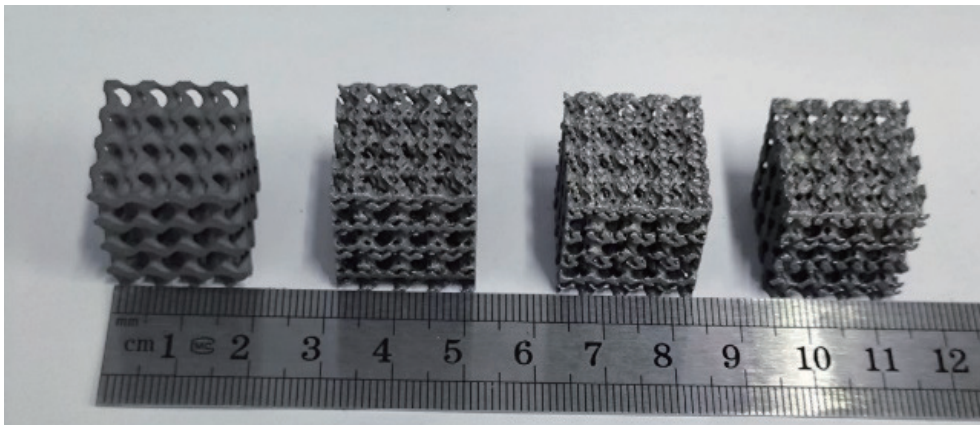


图 4 SLM 制造的 Gyroid 点阵样品

Fig. 4 SLM-fabricated gyroid lattice specimens

### 1.3 样品表征与准静态压缩实验

在本研究中,利用最小刻度为 0.01 mm 的游标卡尺测量打印样品的尺寸,同时使用最小刻度为 0.0001 g 的电子秤测定其重量.随后,制备样品的相应实际体积分数计算如下

$$\text{Actual volume fraction} = \frac{\text{Actual weight}}{\rho_s \cdot V_s} \quad (2)$$

式中, $\rho_s$  代表 Ti6Al4V 块体的密度, $V_s$  则表示三周期极小曲面正方体边界框架的体积.

本文中, Ti6Al4V 粉末形貌是通过英国马尔文帕纳科有限公司生产的 Master Sizer 3000 激光衍射仪进行表征的.为了观察打印样品形貌,采用了德国卡尔蔡司公司出品的 Stemi 508 体视显微镜.此外,点阵结构的表面形貌表征则是通过日本电子公司制造的 JSM-7600F 场发射 SEM 完成的.采用日本岛津公司生产的 300 kN 电子万能试验机进行压缩试验.室温下,按照 ISO13314:2011 标准<sup>[26]</sup>,沿 Z 轴方向(成型方向或者晶胞填充方向,即 Z 轴的负方向)以恒定速率施加载荷,加载速度为 2 mm/min.实验时

配备工业相机,记录样品变形过程.为了确保数据准确性<sup>[27]</sup>,每个点阵结构设计重复测试 3 次,取其平均值和标准误差作为其最终分析结果.并且提取对应应变的视频帧数,展示多层次 Gyroid 点阵结构断裂过程.

### 1.4 有限元方法

#### 1.4.1 有限元模型的构建

利用有限元分析,通过 Abaqus 2021 的动态显式分析进一步研究了压缩试验中的变形机理.首先,通过 4D print 软件生成点阵结构的 CAD 模型.由于模型表面网格较为杂乱,需对其进行优化.考虑到多层次 Gyroid 点阵结构的几何结构复杂性,本研究采用 Ntopology 软件对多层次 Gyroid 点阵结构进行了网格划分.已有研究指出,过于粗糙的单元可能导致计算精度降低,而过于细致的网格则可能显著增加计算时间<sup>[28]</sup>.因此,本研究选取了 0.2 mm 作为网格的最佳尺寸.网格划分过程首先进行二维网格划分,随后进行三维网格划分,并将网格文件保存为 Abaqus 2021 软件识别的格式(inp),具体如图 5(a)所示.在

建立的有限元模型中, 多层级 Gyroid 点阵结构被置于两块平行刚性板之间. 其中, 下方刚性板固定, 而上方刚性板沿 Z 轴方向向下移动 10 mm, 具体如

图 5(b) 所示. 为了模拟实际接触情况, 设置钢板与结构间摩擦系数为 0.2. 利用上平板的中心点得到压缩过程中的位移和力, 以便后面获得应力应变曲线.

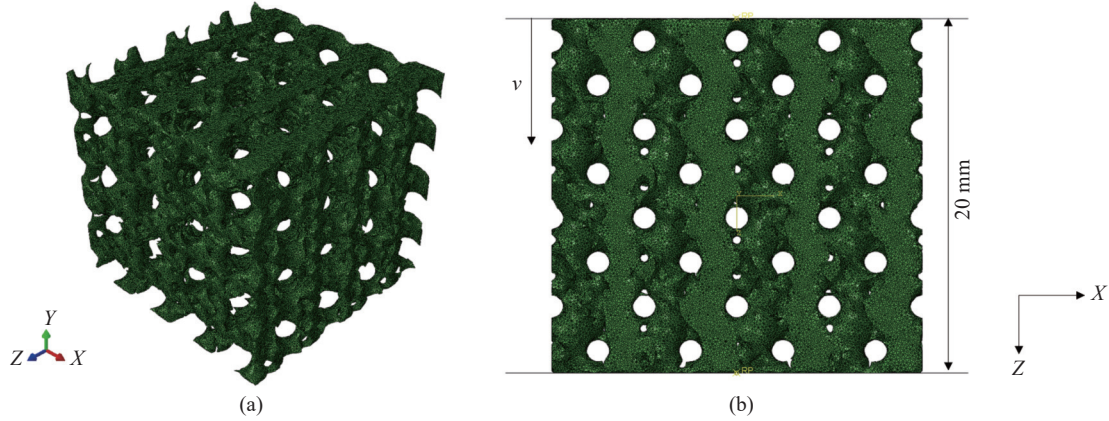


图 5 四面体网格的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of tetrahedral mesh

1.4.2 Ti6Al4V 的材料本构模型

在弹性阶段, Ti6Al4V 块体的弹性模量为 107 GPa, 泊松比为 0.3. 在有限元分析中, 所研究材料的塑性行为采用 Johnson-Cook 模型进行描述. 该模型综合考虑了应变硬化、应变率效应和温度软化对材料动态力学响应的影响. 因此, Johnson-Cook 模型广泛应用于静态加载条件下的模拟<sup>[29-30]</sup>. 根据 Johnson-Cook 模型, 材料的屈服应力为

$$\sigma_S = (A + B\varepsilon_e^n) \left(1 + C \ln \varepsilon^p / \varepsilon^\theta\right) (1 - T^{*m}) \quad (3)$$

式中,  $A$  和  $B$  分别代表屈服强度和硬化常数,  $\varepsilon_e$  为等效塑性应变,  $n$  为硬化指数,  $C$  为应变速率常数,  $\varepsilon^p$  为等效塑性应变速率,  $\varepsilon^\theta$  为参考等效塑性应变速率,  $T^*$  为融化温度,  $m$  为软化指数.

为了准确评估点阵结构的断裂特性, 本研究采用了 Johnson-Cook 损伤模型<sup>[31]</sup>

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}) \cdot (1 + D_4 \ln \varepsilon^p / \varepsilon^\theta) \cdot (1 + D_5 T^{*m}) \quad (4)$$

式中,  $\varepsilon_f$  代表断裂应变;  $D_1, D_2$  和  $D_3$  为损伤常数, 它

们决定了失效应变率与温度之间的关系;  $D_4$  和  $D_5$  则是分别由应变率和温度决定的常数. 此外,  $\sigma^*$  表示应力三轴度, 定义为静水应力与等效应力的比值.

鉴于实验在室温条件下以恒定加载速度进行, 故在本研究中忽略了 Johnson-Cook 模型中的  $C, m, D_4$  和  $D_5$  参数. 这些参数的选择依据了先前文献<sup>[25]</sup>, 如表 1 所示.

2 结果与分析

2.1 样品制造准确性分析

图 4 展示了本研究中采用 SLM 制造的 Gyroid 点阵结构样品. 表 3 详细列出了样品的理论体积分数与实际体积分数, 以及二者之间的误差值. 研究发现, 点阵结构的实际体积分数普遍高于理论体积分数, 这一偏差主要归因于点阵表面部分熔融粉末, 如图 6 所示的高倍 SEM 图像清晰可见. 此外, 从高倍 SEM 图像中还可以观察到样品中存在一定数量的空洞, 以及在中心区域处出现了悬挂, 因此, 实际体

表 3 样品的理论体积分数、实际体积分数及相对误差

Table 3 Theoretical, actual volume fractions, and relative error of the samples

Sample	Theoretical volume fraction/%	Actual volume fraction/%	Relative error/%
33-1	32.61	33.47	2.64
33-2-JY	32.65	33.05	1.23
33-2-XX	33.12	34.02	2.72
33-2-FXX	33.45	34.53	3.23



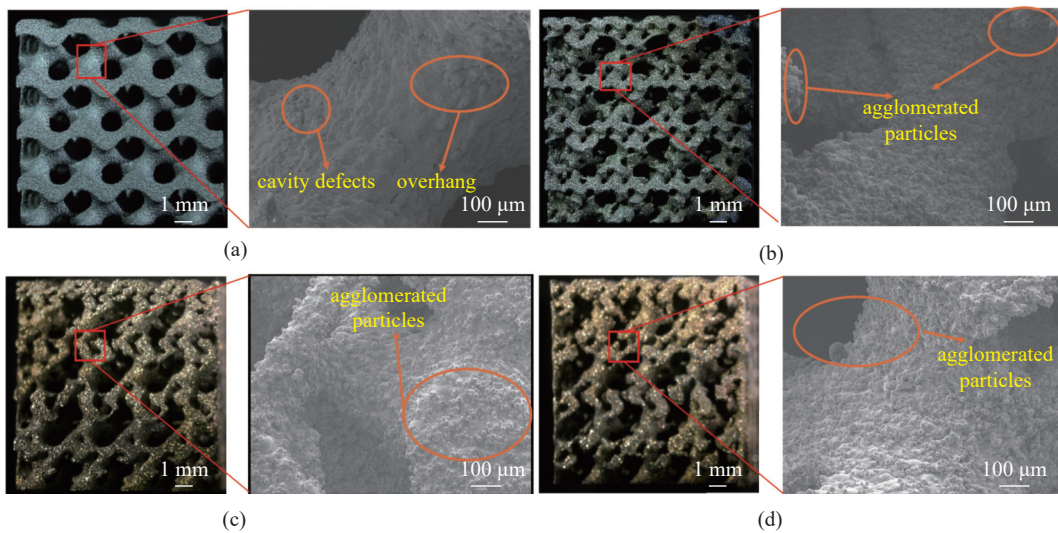


图 6 SLM 制备样品的光镜与 SEM 电镜观察

Fig. 6 Optical microscopy and SEM images of SLM-fabricated specimens

积分数与设计体积分数之间的差异也受到这些因素的影响。

## 2.2 应力应变曲线分析及压缩变形机制

为直观、定量地探讨 Gyroid 点阵结构的压缩性能,开展了一系列压缩试验.本节着重关注 Gyroid 点阵结构在压缩时的应力应变曲线及变形行为,深入研究其压缩性能.图 7 展示了初级与多层级 Gyroid 点阵结构在实验下的应力-应变曲线.研究结果表明,这些点阵结构在加载时呈现出典型的弹性、塑性和致密化阶段.然而,4 种 Gyroid 点阵结构的压缩实验均起始自非线性区域,这一现象主要归因于表面粗糙度导致的非线性曲线.此外,实验装置的接触间隙也会影响应力应变曲线的初始阶段<sup>[32]</sup>.在室温条件下,采用 SLM 制造的 Ti6Al4V 合金点阵结构,其主要的失效模式为脆性断裂<sup>[15]</sup>.因此,其应

力随应变增加呈现出先上升后迅速下降,然后在上升直至到达点阵结构压缩至致密化的趋势.对于 Gyroid 点阵结构应力幅度骤然下降,这归因于斜压杆中心区域发生 45°剪切断裂.如图 8 所示,在应变为 0.1 和 0.25 时,两个相邻部分发生滑动,导致承载能力下降,发生断裂.在应变为 0.5 时, Gyroid 点阵结构发生压溃,达到致密化状态.从图 8(a)中可以观察到,对于 33-G-1 结构,断裂形式大多为在斜压杆中心区域处 45°剪切断裂.从图 7(a)中可以观察到在应变为 0.073 时, 33-G-1 的应力达到峰值.在随后的应力波动阶段,应力峰值在较大范围内发生剧烈波动,并且其应力波动较大;这归因于材料分布是影响点阵结构力学性能的重要因素<sup>[33]</sup>.

然而,对于多层级 Gyroid 点阵结构,其变形行为与初级 Gyroid 点阵结构不同.从图 8(b)~图 8(d)

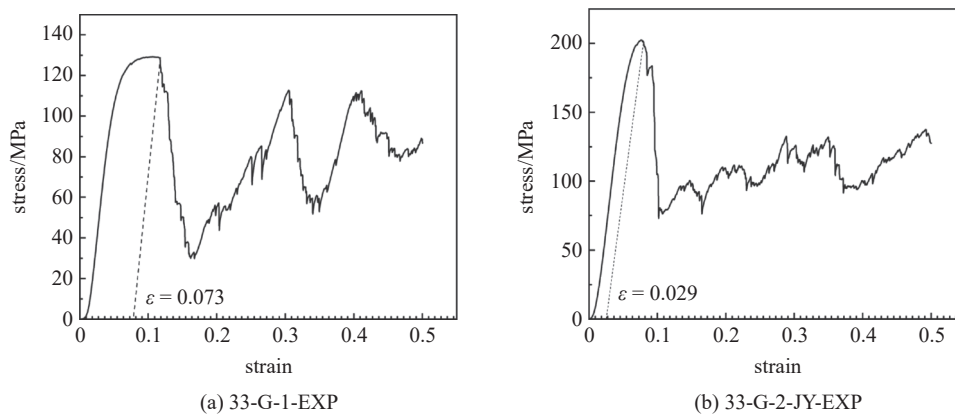


图 7 4 种 Gyroid 点阵结构的实验应力-应变曲线图

Fig. 7 Experimental stress-strain curves of the four Gyroid lattice structures

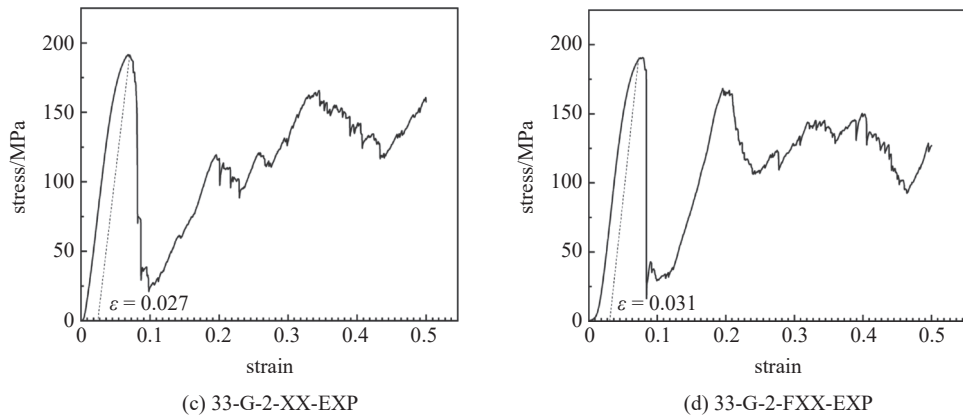


图 7 4 种 Gyroid 点阵结构的实验应力应变曲线图 (续)

Fig. 7 Experimental stress-strain curves of the four Gyroid lattice structures (continued)

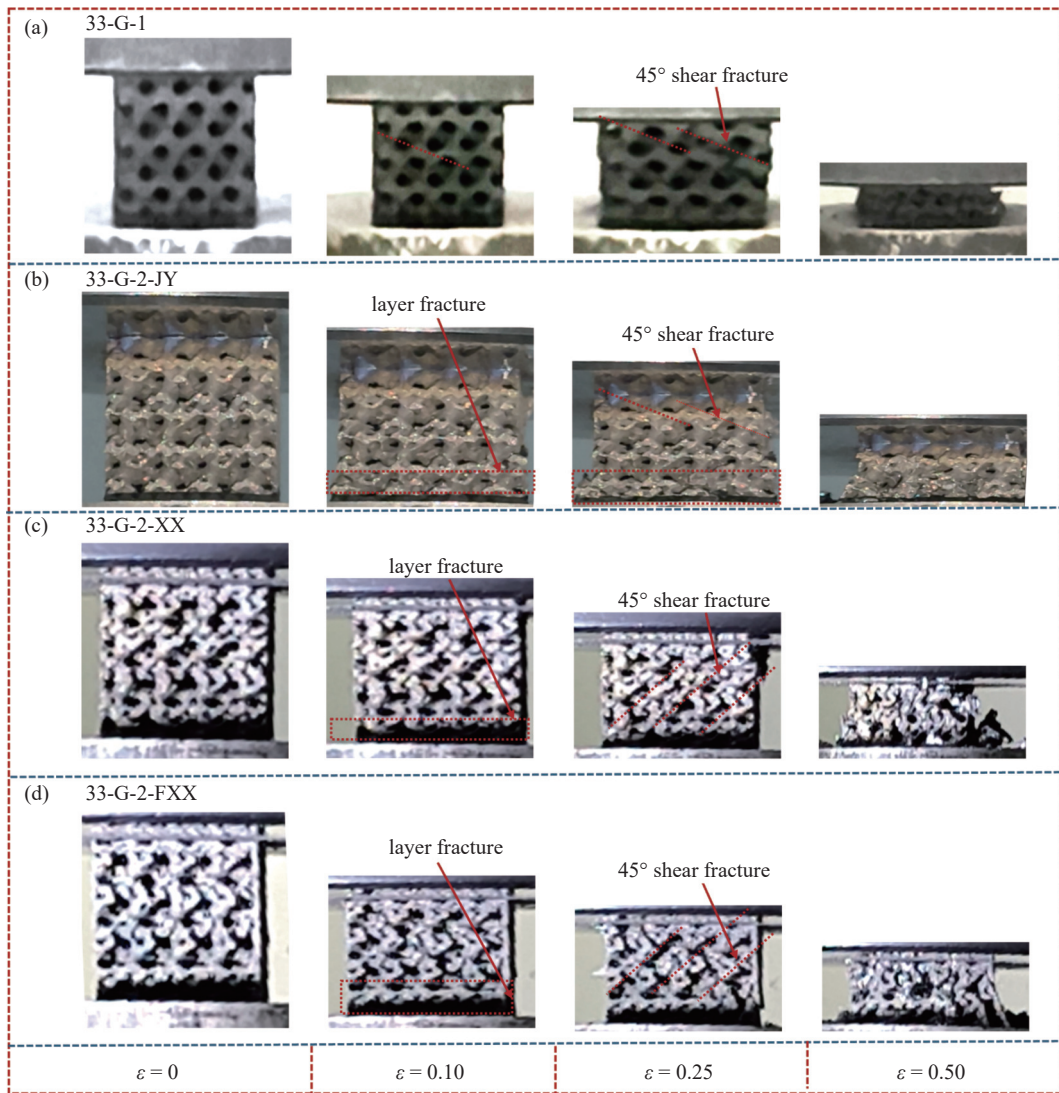


图 8 4 种 Gyroid 点阵结构压缩实验变形图

Fig. 8 Compression test deformation images of the four Gyroid lattice structures

可发现, 断裂首先出现在结构的底部, 表现为填充区域的层层断裂. 随着压缩过程中, 在未填充区的斜压

杆中心区域呈现出 45° 方向的剪切断裂. 此类断裂行为为在之前研究中已有观察<sup>[25]</sup>. 这种断裂行为的产生,

可归因于设计模型时, 填充区域的晶格填充方式. 在此填充区域, 出现了较小的斜压杆, 这可以从图 6 的 SEM 图像中明显观察到. 因此, 相较于初级 Gyroid 点阵结构, 应力集中区域转移至填充区域. 在之前的研究中<sup>[34]</sup>, 线性梯度、非线性梯度和渐变梯度点阵结构, 其断裂模式通常表现为从底部开始, 逐层破坏, 呈现层状破坏趋势. 此外, 通过图 7 的观察分析, 可以发现相较于相同体积分数的初级 Gyroid 点阵结构, 多层次结构发生断裂的应变值较小. 例如, 33-G-2-JY 在应变为 0.029 时, 发生断裂, 应力达到峰值, 其余两种结构到达应力峰值的应变值分别为 0.027 和 0.031. 并且多层次结构在初次断裂之后, 其承载恢复能力强于相同体积分数的初级 Gyroid 点阵结构. 在应力波动区间, 应力峰值波动较为稳定. 表 4 展示了 4 种结构的极限强度. 多层次 Gyroid 点阵结构的极限强度普遍高于相同体积分数的初级 Gyroid 点阵结构. 例如, 33-G-1 的极限强度为 128.61 MPa. 优化后的多层次点阵结构 33-G-2-JY 结构极限强度提升了 57.62%, 效果最为显著. 33-G-2-XX 和 33-G-2-FXX 结构的极限强度也提升了约 48%. 这表明这些结构在小变形条件下具有更高的承载能力和更有效的保护作用. 33-G-2-JY 在应力波动区间, 波动较为稳定, 并且其极限强度也强于其余两种, 这是由于填充区域 Gyroid 晶胞尺寸为 2 mm, 从而在断裂区间内避免了应力显著波动. 33-G-2-FXX 和 33-G-2-XX 这两种结构在断裂之后, 其承载恢复能力也强于 33-G-2-JY. 由于底层单胞尺寸较小, 斜压杆直径和横截面面积也会减小. 这会导致应力集中区域更加明显, 从而更容易在该区域发生断裂, 如图 8(c) 和图 8(d) 所示. 断裂后, 底层形成致密的区域, 起到支撑作用, 有效地将压缩载荷传递到上层结构, 并阻止结构整体过早断裂, 因此在第一次下降后仍能再次上升达到较高的应力水平.

表 5 4 种 Gyroid 点阵结构的弹性模量和屈服强度值

Table 5 Elastic modulus and yield strength values of the four Gyroid lattice structures

Sample	Elastic modulus/MPa	Improvement rate/%	Yield strength/MPa	Improvement rate/%
33-G-1	3122.49 ± 156.12	—	107.98 ± 5.35	—
33-G-2-JY	4218.92 ± 210.95	35.11	171.2 ± 8.56	58.55
33-G-2-XX	4228.53 ± 214.43	35.42	156.23 ± 7.81	44.68
33-G-2-FXX	4262.90 ± 213.15	36.52	155.58 ± 7.78	44.08

表 4 4 种 Gyroid 点阵结构的极限强度值

Table 4 Ultimate strength values of the four Gyroid lattice structures

Sample	Ultimate strength/MPa	Improvement rate/%
33-G-1	128.61 ± 6.43	—
33-G-2-JY	202.72 ± 10.14	57.62
33-G-2-XX	191.54 ± 9.58	48.93
33-G-2-FXX	190.70 ± 9.54	48.28

### 2.3 弹性模量及屈服强度

弹性模量和屈服强度是评价结构力学性能的参考值<sup>[35]</sup>. 为了对所设计结构的力学性能进行定量评估, 本节对弹性模量和屈服强度进行了分析与对比. 压缩实验所得的应力应变曲线被用于计算 Gyroid 点阵结构的弹性模量和屈服强度. 弹性模量的确定基于应力应变曲线线性区间的斜率, 而屈服强度是在线弹性曲线基础上, 应变偏移 0.2% 处的应力值. 表 5 对比了多层次结构与体积分数相同的初级 Gyroid 点阵结构弹性模量和屈服强度. 从表 5 可知, 多层次 Gyroid 点阵结构在弹性模量和屈服强度方面的显著提升, 这一现象是可解释的. 在多层次结构中, 保留了体积分数为 50% 的初级 Gyroid 点阵结构的直径较大的斜压杆部分. 此外, 观察多层次 Gyroid 点阵结构的变形行为, 可以看到底部填充区域首先发生断裂, 起到支撑作用. 与体积分数为 33% 的初级 Gyroid 点阵结构相比, 其承载能力有所提高. 对于不同填充方式的多层次结构, 33-G-2-JY 的屈服强度提升幅度高于其余两种结构. 33-G-2-JY 的填充晶胞尺寸均为 2 mm, 而其他两种结构采用线性或非线性梯度填充. 因为 33-G-2-FXX 和 33-G-2-XX 最初断裂的部位填充晶胞的尺寸低于 33-G-2-JY, 所以 33-G-2-FXX 和 33-G-2-XX 的屈服强度低于 33-G-2-JY.



### 2.4 能量吸收

点阵结构因其高孔隙率而具备轻质和优良的能量吸收特性. 因此, 点阵结构在能量吸收应用中, 如航空航天设备的包装和保护装置, 有着重要的应用价值. 点阵结构在封装和保护器件中的应用, 关键因素是其单位体积的能量吸收值, 即能量吸收性能. 根据 ISO 13314:2011 标准<sup>[26]</sup>, 本研究对这些点阵结构的能量吸收性能进行了评估, 能量吸收的计算公式为

$$W = \int_0^{\varepsilon_e} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (5)$$

式中,  $\sigma(\varepsilon)$  表示压缩实验中应力-应变曲线上的应力值, 该值对应于应变  $\varepsilon$ , 而  $\varepsilon_e$  代表 Gyroid 点阵结构在达到致密点之前的应变水平.

从图 9 可以看出多层级 Gyroid 点阵结构在能量吸收方面相较于体积分数相同的初级 Gyroid 点阵结构有显著的提升, 增强幅度达到约 42.85%. 多层级 Gyroid 点阵结构之所以展现出卓越的能量吸收性能, 主要归功于其在压缩测试中独特的变形行为. 在压缩过程中, 多层级 Gyroid 点阵结构首先表现为层层断裂的形式, 随着压缩的进行, 结构底部起到了有效的支撑作用, 避免了高强度区域的破坏. 而初级 Gyroid 点阵结构的孔隙率在垂直方向上均匀分布, 当应力达到最大值时, 容易发生 45° 剪切断裂, 导致应力迅速降低, 从而减弱了其能量吸收能力.

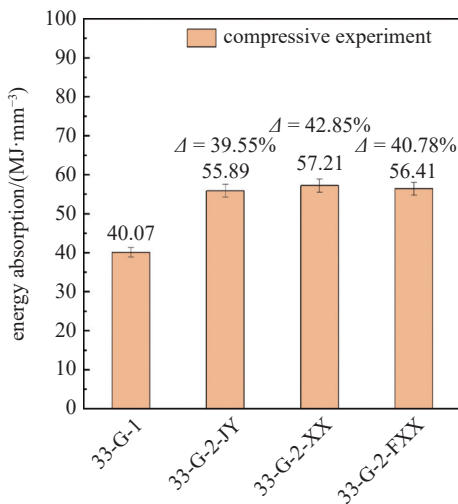


图 9 4 种 Gyroid 点阵结构的能量吸收值

Fig. 9 Energy absorption values for four types of Gyroid lattice structures

为了进一步探讨多层级 Gyroid 点阵结构的能量吸收特性<sup>[36]</sup>, 本研究重点考察了压缩实验中 Gyroid 点阵结构单位体积能量吸收 ( $W$ ) 与应变之间的关系, 并利用幂函数公式对其进行了拟合, 如图 10 所示. 拟合得到的指数值揭示了点阵结构在压缩过程中能量吸收能力的增长速率. 从图 10 中可以明显看出, 初级 Gyroid 点阵结构样品的指数值接近于 1. 与初级 Gyroid 点阵结构相比, 采用梯度填充的多层级 Gyroid 点阵结构的指数值有所提高. 均匀填充的多层级 Gyroid 点阵结构的指数与初级结构相似, 但从拟合公式来看, 多层级 Gyroid 点阵结构的常数项大于初级 Gyroid 点阵结构, 表明多层级 Gyroid 点阵结构在整个压缩过程中其能量吸收能力逐渐增强. 现有文献也指出梯度点阵结构的能量吸收能力随着压缩过程的进行而逐渐提升<sup>[37]</sup>, 这主要归因于功能梯度点阵结构在压缩过程中体积分数的持续增加. 因此在本研究中, 由于填充方式的不同, 能量吸收能力的增长速率也有差异. 例如 33-G-2-JY 的指数为 1.01, 与 33-G-1 的 1.02 非常接近, 说明随着压缩实验的进行, 两者的能量吸收能力趋于一致. 然而, 33-G-2-JY 的能量吸收能力高于 33-G-1, 这可能是由于 33-G-2-JY 独特的断裂模式所致. 从图 10 中还可以观察到, 当  $\varepsilon < 0.137$  时, 4 种 Gyroid 点阵结构中 33-G-2-JY 的能量吸收能力显著优于其他 3 种结构. 当  $\varepsilon > 0.137$  时, 33-G-2-XX 和 33-G-2-FXX 的指数值分别为 1.23 和 1.25, 其能量吸收速率较大, 在点阵结构致密化之前, 能量吸收能力较强.

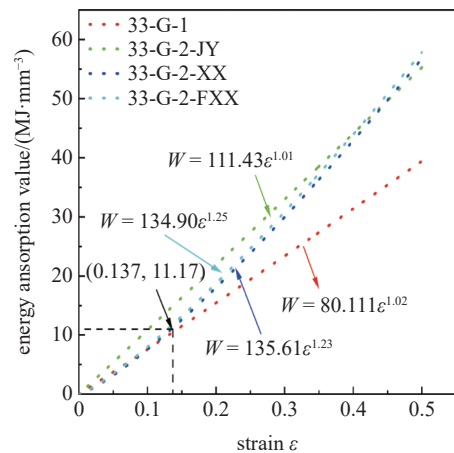


图 10 4 种 Gyroid 点阵结构的能量吸收曲线

Fig. 10 Energy absorption curves for four TPMS lattice structures



## 2.5 多层次 Gyroid 点阵结构的压缩有限元分析

图 11 比较了仿真和实验的应力-应变曲线图,仿真的应力-应变曲线变化趋势与压缩实验的应力-应变趋势吻合较好.但是应力-应变曲线后期阶段表明实验和仿真之间的误差越来越大,这一结果与压缩实验和仿真分析过程中断裂脱落的支柱数量有一定的关系,这会导致残余结构体积分数不同而引起的应力变化差异,两者之间的误差越来越大.多层次 Gyroid 点阵结构压缩仿真期间在不同应变下的 von Mises 应力分布如图 12(b)~图 12(d)所示,应力集中的部位主要分布在填充区域较小的斜压杆中心区域,并且底部存在一些薄弱的区域,这是结构早期在底部填充区域发生层层断裂的主要原因.随着压缩过程的进行,发生脆性断裂的应力集中区域从填充区域转移到未填充区域,故这种现象可以解释多层次 Gyroid 点阵结构先发生填充区域的层层断裂及随后在未填充区域的斜压杆中心区域 45°剪切断裂

的变形机理.体积分数相近的初级 Gyroid 点阵结构的 von Mises 应力分布如图 12(a)所示,应力集中的部位都在斜压杆的中心区域,随着应变的增加,该部位发生 45°剪切断裂.

图 13 展示了 4 种 Gyroid 点阵结构在有限元仿真与实验研究中得出的弹性模量和屈服强度的相对误差.分析结果表明,在线弹性阶段,有限元仿真得到的屈服强度和弹性模量与实验数据呈现出良好的一致性,两者之间的相对误差控制在 20% 以内.表 6 综合比较了 4 种 Gyroid 点阵结构在有限元仿真与实验测量中的能量吸收误差.基于 Johnson-Cook 塑性模型和损伤模型所建立的有限元分析模型,能够精确捕捉到应力-应变曲线在弹性区和波动区域的每一个峰值,从而使得模拟得到的能量吸收值与实验结果之间的相对误差保持在较低水平,基本介于 1.32%~13.98%.尽管有限元仿真结果与实验数据存在一定的偏差,这归因于有限元模型的网格划分方

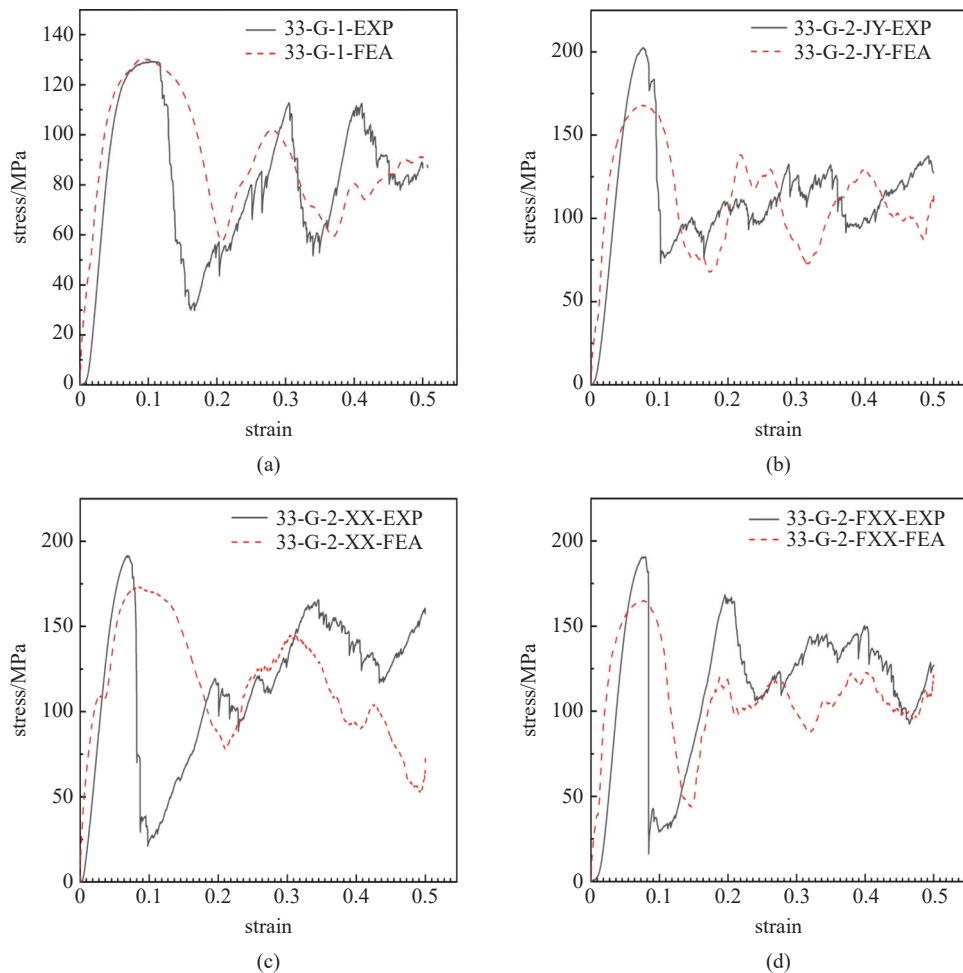


图 11 4 种 Gyroid 点阵结构的实验和仿真的应力应变曲线对比图

Fig. 11 Comparison of experimental and simulated stress-strain curves for four Gyroid lattice structures

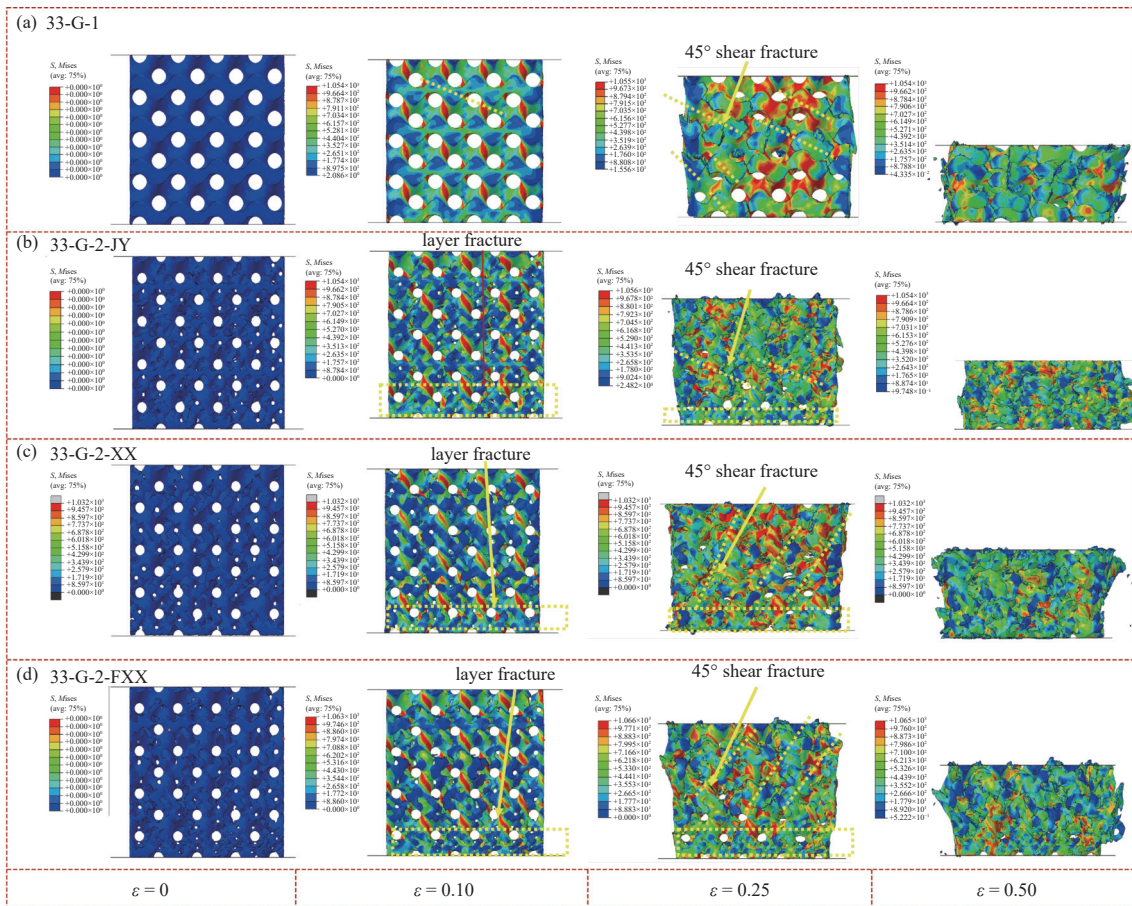


图 12 4 种 Gyroid 点阵结构仿真压缩变形图

Fig. 12 Simulated compression deformation images of four Gyroid lattice structures

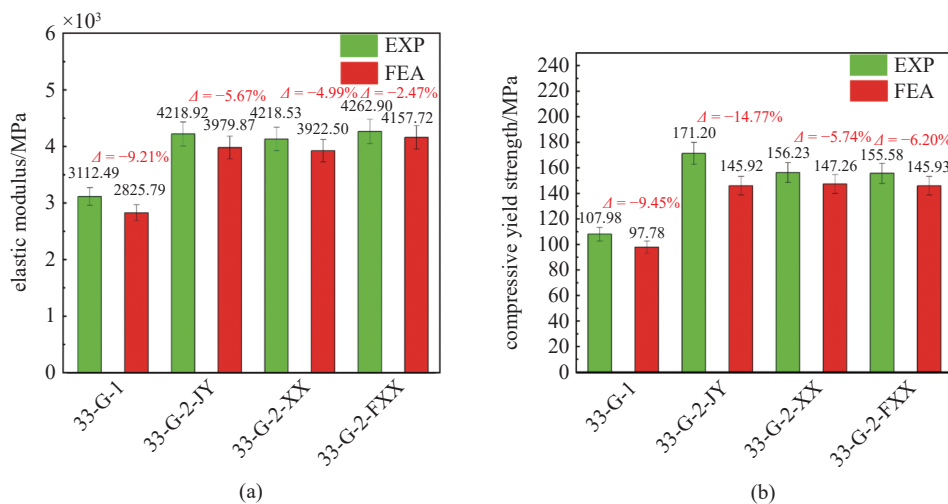


图 13 实验与仿真的弹性模量和屈服强度对比图

Fig. 13 Comparison of elastic modulus and yield strength between experiments and simulations

式和材料模型的选取. 此外, 有限元模型未计入点阵结构样品中可能存在的空洞缺陷以及从基板上切割时产生的微小变形. 同时, SLM 制备的 Gyroid 点阵

结构的几何特征容易引起粉末黏附和较大的熔池形成, 这些因素会导致样品重量、体积分数和支柱尺寸的增加, 从而影响仿真结果与实验结果之间的误差.

表 6 实验与仿真的能量吸收对比

Table 6 Comparison of energy absorption between experiments and simulations

Sample	Experiment/ (MJ·mm <sup>-3</sup> )	Simulation/ (MJ·mm <sup>-3</sup> )	Error/%
33-G-1	40.07 ± 2.01	45.67	13.98
33-G-2-JY	55.89 ± 2.79	55.15	1.32
33-G-2-XX	57.21 ± 2.86	58.25	1.82
33-G-2-FXX	56.41 ± 2.82	53.98	4.51

### 3 结论

本研究基于一种以应力场为导向的多层级 Gyroid 点阵结构轻量化设计方法. 采用激光选区熔化技术, 以 Ti6Al4V 粉末为材料制备了多层级 Gyroid 点阵结构样品. 对样品进行压缩实验, 验证多层级 Gyroid 点阵结构的变形行为和力学性能, 并通过有限元仿真解释了多层级 Gyroid 结构的变形行为机理和压缩性能. 通过与体积分数相同的初级 Gyroid 点阵结构进行比较, 得出以下结论.

(1) 与相同体积分数的初级 Gyroid 点阵结构相比, 多层级 Gyroid 点阵结构展现出优异的力学性能和更强的能量吸收能力. 例如, 33-G-2-FXX 的弹性模量比 33-G-1 提升 36.52%, 33-G-2-JY 的屈服强度比 33-G-1 提升 58.55%. 在能量吸收方面, 33-G-1 和 33-G-2-JY 的单位体积能量吸收随应变的幂函数线性增长, 而其他两种结构表现出非线性增长趋势. 与相同体积分数的初级 Gyroid 点阵结构相比, 多层级结构的能量吸收能力提升约 43%.

(2) 在变形方面, 33-G-1 结构表现出沿 45° 方向的剪切断裂. 而多层级 Gyroid 结构则首先呈现层状断裂, 即填充区域内出现多组沿 45° 方向的剪切断裂. 最终, 多层级 Gyroid 结构的未填充区域内斜压杆中心发生沿 45° 方向的剪切断裂.

(3) 基于 Johnson-Cook 塑性模型和损伤模型建立的有限元分析模型能够准确预测多层级 Gyroid 点阵结构的压缩变形行为. 此外, 仿真结果准确反映了多层级 Gyroid 点阵结构的压缩性能和能量吸收能力, 相对误差控制在 20% 以内.

(4) 基于初级 TPMS 结构的应力场, 可以通过调整填充单元的结构参数和填充方式, 便捷地实现满足特定需求的多层级 TPMS 点阵结构设计. 这种结构凭借其独特的变形行为和力学性能, 在航空航天

防护领域展现出巨大的应用潜力, 同时还具有优异的能量吸收能力. 在未来设计中, 可根据不同应用场景进行定制化设计, 以满足特定需求.

### 参 考 文 献

- Zhang L, Feih S, Daynes S, et al. Energy absorption characteristics of metallic triply periodic minimal surface sheet structures under compressive loading. *Additive Manufacturing*, 2018, 23: 505-515
- Sokollu B, Gulcan O, Konukseven EI. Mechanical properties comparison of strut-based and triply periodic minimal surface lattice structures produced by electron beam melting. *Additive Manufacturing*, 2022, 60: 103199
- Al-Ketan O, Abu Al-Rub RK. Multifunctional mechanical metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices. *Advanced Engineering Materials*, 2019, 21(10): 1900524
- Chang L, Jiang A, Rao M, et al. Progress of low-frequency sound absorption research utilizing intelligent materials and acoustic metamaterials. *RSC Advances*, 2021, 11(60): 37784-377800
- Gao T, Liu K, Wang X, et al. Elastic wave manipulation via functional incorporation of air-solid phases in hybrid TPMS. *Composites Communications*, 2023, 44: 101745
- 王博, 郝鹏, 田阔等. 航空航天结构轻量化设计与实验方法研究进展. *宇航学报*, 2023, 44(4): 596-606 (Wang Bo, Hao Peng, Tian Kuo, et al. Research progress in lightweight design and experimental methods for aerospace structures. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(4): 596-606 (in Chinese))
- 林昕, 杨博, 朱鲲鹏等. 基于 Gyroid 三周期极小曲面的多孔骨支架梯度结构设计及力学性能分析. *武汉科技大学学报*, 2023, 46(2): 109-117 (Lin Xin, Yang Bo, Zhu Kunpeng, et al. Design and mechanical property analysis of gradient structures for porous bone scaffolds based on gyroid triply periodic minimal surfaces. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2023, 46(2): 109-117 (in Chinese))
- 刘飞, 唐艺川, 谢海琼等. 选区激光熔化成形极小曲面点阵的结构和性能优化. *中国激光*, 2023, 50(12): 214-227 (Liu Fei, Tang Yichuan, Xie Haiqiong, et al. Optimization of structure and performance of minimal surface lattice formed by selective laser melting. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(12): 214-227 (in Chinese))
- 胡雅楠, 余欢, 吴圣川等. 基于机器学习的增材制造金属力学性能预测研究进展与挑战. *力学学报*, 2024, 56(6): 1892-1915 (Hu Yanan, Yu Huan, Wu Shengchuan, et al. Machine learned mechanical properties prediction of additively manufactured metallic alloys: progress and challenges. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2024, 56(6): 1892-1915 (in Chinese))
- Alomar Z, Concli F. A review of the selective laser melting lattice structures and their numerical models. *Advanced Engineering Materials*, 2020, 22(12): 2000611
- Zhang XY, Fang G, Zhou J. Additively manufactured scaffolds for bone tissue engineering and the prediction of their mechanical behavior: A review. *Materials*, 2017, 10(1): 50
- Korkmaz ME, Gupta MK, Robak G, et al. Development of lattice structure with selective laser melting process: A state of the art on properties, future trends and challenges. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 81: 1040-1063
- 陈泽坤, 蒋佳希, 王宇嘉等. 金属增材制造中的缺陷、组织形貌和成形材料力学性能. *力学学报*, 2021, 53(12): 3190-3205 (Chen Zekun, Jiang Jiayi, Wang Yujia, et al. Defects, microstructures and



- mechanical properties of materials fabricated by metal additive manufacturing. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(12): 3190-3205 (in Chinese))
- 14 Yang L, Yan C, Han C, et al. Mechanical response of a triply periodic minimal surface cellular structures manufactured by selective laser melting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 148: 149-157
- 15 Zhao M, Zhang DZ, Liu F, et al. Mechanical and energy absorption characteristics of additively manufactured functionally graded sheet lattice structures with minimal surfaces. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 167: 105262
- 16 Chen C, Ma J, Liu Y, et al. Compressive behavior and property prediction of gradient cellular structures fabricated by selective laser melting. *Materials Today Communications*, 2023, 35: 105853
- 17 Al-Ketan O, Rowshan R, Abu Al-Rub RK. Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials. *Additive Manufacturing*, 2018, 19: 167-183
- 18 Maskery I, Aboulkhair NT, Aremu AO, et al. Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices. *Additive Manufacturing*, 2017, 16: 24-29
- 19 Maskery I, Aremu AO, Parry L, et al. Effective design and simulation of surface-based lattice structures featuring volume fraction and cell type grading. *Materials & Design*, 2018, 155: 220-232
- 20 Smith M, Guan Z, Cantwell WJ. Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, 67: 28-41
- 21 Cho HH, Cho Y, Han HN. Finite element analysis for mechanical response of Ti foams with regular structure obtained by selective laser melting. *Acta Materialia*, 2015, 97: 199-206
- 22 曾元辉, 赵淼, 张正文等. TPMS 点阵结构的密度梯度杂交优化设计. 重庆大学学报, 2022, 47(5): 76-86 (Zeng Yuanhui, Zhao Miao, Zhang Zhengwen, et al. Hybrid optimization design of density gradient for TPMS lattice structures. *Journal of Chongqing University*, 2022, 47(5): 76-86 (in Chinese))
- 23 Ding J, Zou Q, Qu S, et al. STL-free design and manufacturing paradigm for high-precision powder bed fusion. *CIRP Annals*, 2021, 70(1): 167-170
- 24 Wang S, Zhang L, Cai C, et al. Field-driven data processing paradigm for multi-information additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 2023, 61: 103352
- 25 Wang S, Zhang L, Tang M, et al. Field-driven design and performance evaluation of dual functionally graded triply periodic minimal surface structures for additive manufacturing. *Materials & Design*, 2023, 233: 11257
- 26 Raghavendra S, Molinari A, Fontanari V, et al. Tensile and compression properties of variously arranged porous Ti-6Al-4V additively manufactured structures via SLM. *Procedia Structural Integrity*, 2018, 13: 149-154
- 27 李一磊, 姚迪, 乔红威等. 金属材料中低加载速率下的动态韧脆转变及断裂韧性测量. 力学学报, 2021, 53(2): 424-436 (Li Yilei, Yao Di, Qiao Hongwei, et al. Dynamic ductile-brittle transition and fracture toughness measurement of metal under intermediate-low loading velocities. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(2): 424-436 (in Chinese))
- 28 蒋创宇, 张保强, 陈云等. Gyroid 结构力学性能及数值收敛性研究. 中国机械工程, 2022, 33(23): 2790-2800 (Jiang Chuangyu, Zhang Baoqiang, Chen Yun, et al. Study on the mechanical properties and numerical convergence of gyroid structures. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(23): 2790-2800 (in Chinese))
- 29 西禹, 张强, 张欣钥等. 增材制造 TC4 钛合金的动态力学行为研究. 力学学报, 2022, 54(2): 425-444 (Xi Yu, Zhang Qiang, Zhang Xinyue, et al. Dynamic mechanical behavior of additive manufacturing TC4 alloy. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(2): 425-444 (in Chinese))
- 30 Sobolev AV, Radchenko MV. Use of Johnson-Cook plasticity model for numerical simulations of the SNF shipping cask drop tests. *Nuclear Energy and Technology*, 2016, 2(4): 272-276
- 31 Banerjee A, Dhar S, Acharyya S, et al. Determination of Johnson cook material and failure model constants and numerical modelling of Charpy impact test of armour steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 640: 200-209
- 32 Yan C, Hao L, Hussein A, et al. Microstructural and surface modifications and hydroxyapatite coating of Ti-6Al-4V triply periodic minimal surface lattices fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: C*, 2017, 75: 1515-1524
- 33 Maconachie T, Leary M, Lozanovski B, et al. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials & Design*, 2019, 183: 108137
- 34 Sun Q, Sun J, Guo K, et al. Compressive mechanical properties and energy absorption characteristics of SLM fabricated Ti6Al4V triply periodic minimal surface cellular structures. *Mechanics of Materials*, 2022, 166: 104241
- 35 夏元明, 张威, 崔天宁等. 金属多级类蜂窝的压溃行为研究. 力学学报, 2019, 51(3): 873-883 (Xia Yuanming, Zhang Wei, Cui Tianning, et al. Investigation on crushing behavior of metal honeycomb-like hierarchical structures. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(3): 873-883 (in Chinese))
- 36 程乾, 尹剑飞, 温激鸿等. 功能梯度三周期极小曲面静动态力学特性. 力学学报, 2024, 56(9): 2646-2658 (Cheng Qian, Yin Jianfei, Wen Jihong, et al. Quasi-static and dynamic mechanical properties of functionally graded triply periodic minimal surface structures. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2024, 56(9): 2646-2658 (in Chinese))
- 37 Zhou H, Zhao M, Ma Z, et al. Sheet and network based functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting: Design, mechanical properties, and simulation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 175: 105480