

# 基于激光粉末床熔融成形的 Gyroid 结构参数化调整对其压缩力学行为的影响

金 珊<sup>1</sup>, 王智勇<sup>1, 2</sup>, 张毓昊<sup>1</sup>, 饶理想<sup>2</sup>, 张新春<sup>2</sup>, 王 瑞<sup>1</sup>, 司艳芳<sup>1</sup>, 赵俊皓<sup>1</sup>

(1. 新乡学院3D打印学院, 河南新乡 453000; 2. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 基于激光粉末床熔融 (LPBF) 技术, 系统探究了Gyroid三周期极小曲面 (TPMS) 结构的参数化调整对其压缩力学行为的影响。通过调控晶胞尺寸、壁厚及中性面偏置等关键参数, 结合试验与数值分析, 揭示了结构参数与力学性能的关联规律。研究表明, 壁厚每增加0.1 mm可使屈服强度提升25%~50%, 抗压强度增长显著; 减小晶胞尺寸可显著提高抗压强度 (145~600 MPa) 和屈服强度 (80~240 MPa); 中性面偏置值 $C = \pm 0.3$ 时致密度峰值达40.1%, 力学性能最优。研究发现壁厚与中性面偏置协同调控可平衡轻量化与承载需求, 为航空航天及汽车轻量化设计中TPMS结构的参数化优化提供了理论依据与试验支持。

**关键词:** 激光粉末床熔覆; TPMS结构; Gyroid结构; 结构参数; 压缩行为

近年来, 结构轻量化在多领域研究中进展显著, 对航空航天与汽车行业意义重大。航空航天领域, 飞机结构重量每降1%, 总重可降 3%~5%、油耗减少3%~4%, 每减重1 kg经济效益超450美元<sup>[1]</sup>; 汽车行业, 每减重100 kg可省10%燃料消耗, 汽车质量每减轻1 kg, 在汽车整个使用寿命期内可节油6.3 L<sup>[2]</sup>, 由此可以看出轻量化不仅是技术升级的必然方向, 更是现代工程和制造业的核心战略。

结构轻量化设计多采用各类晶格结构实现, 其中三周期极小曲面 (TPMS) 在三维空间呈周期性变化<sup>[3]</sup>, 兼具表面光滑、高度连通、数学可控、力学性能优异及设计灵活等优势应用广泛: 3D 打印 TPMS 支架可助于细胞增殖<sup>[4-5]</sup>; 其支撑性能佳且多孔结构生物相容性好, 常用于骨科假体植入, 能快速降低弹性模量至人体骨骼水平以改善应力遮挡问题<sup>[6]</sup>; 高连通性与灵活设计使其适用于散热零件, 相较传统零件散热面积更大、性能更优<sup>[7]</sup>。而TPMS结构中, 最具代表性的结构为Gyroid、Diamond及Schwarz P曲面结构, 分别以高比表面积与换热性能 (满足发动机换热减重需求)、宽频率吸声性能 (孔隙尺寸可调)、优异力学性能 (用于优化点阵结构承载刚度) 为核心特性。本团队前期研究通过TPMS结构力学压缩试验发现, 在相同结构参数下Gyroid结构刚性适中 (高于Schwarz结构以降低脆性风险, 低于Diamond结构以提升稳定性), 吸能缓冲能力优越; 而在相同致密度情况下, Gyroid曲面刚性与吸能性能最优。且Gyroid结构因双曲面支撑梁连续无断裂, 材料可形成更紧凑支撑网络, 孔隙率更低、致密度可控 (0.3~0.6 g/cm<sup>3</sup>), 较传统实心材料减重60%~70%, 更能抑制高刚性材料的脆性断裂风险。这种韧性优势使其在动态载荷或冲击环境中更具可靠性, 满足轻量化需求。

随着增材制造领域对晶格结构的要求趋于多元化, 对参数化建模时的力学性能影响参数需要更为系统的研究。目前, 对于TPMS结构参数优化大多采用调整壁厚、晶格结构和孔径尺寸等方法<sup>[8-10]</sup>。壁厚的增加会显著提高结构的承载能力和刚度, 但同时也会增加材料的用量和结构的重量; 单胞尺寸的增大通常会导致孔径尺寸变大, 从而使结构的整体刚度降低, 但在一定范围内可以提高结构的韧性和能量吸收能力<sup>[11]</sup>。如何通过结构参数的协同调整来有效调控晶格结构力学行为, 使其满足不

## 作者简介:

金 珊 (2005-), 女, 本科生, 主要研究方向为激光选区增材晶格结构的吸能/轻量化应用。E-mail: 2330994140@qq.com

## 通信作者:

赵俊皓, 男, 讲师。E-mail: Zhaojh\_Rico@126.com

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

12-1549-10

## 基金项目:

河南省自然科学基金青年基金 (252300421566)。

## 收稿日期:

2025-07-01 收到初稿,

2025-07-30 收到修订稿。

同载荷情况下的服役要求已成为轻量化应用中的共性关键问题。

因此,本试验聚焦TPMS中的Gyroid结构,通过对结构参数的系统性研究,围绕激光粉末床熔融(LPBF)成形Gyroid结构展开,归纳影响晶格致密度的主要参数、规律及权重,重点探究结构参数对压缩力学性能的影响机制。试验采用316L不锈钢粉末,通过优化LPBF工艺参数(激光功率220 W、扫描速度820 mm/s)制备高致密度试样;基于隐式方程建立Gyroid参数化模型,系统调整晶胞尺寸(3~6 mm)、壁厚(0.6~1.0 mm)及中性面偏置值(-0.5~0.5),以探究上述参数对压缩力学行为的影响规律,以期建立更为全面的结构-力学行为参数化调控方案。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

TPMS晶格结构试样制备所使用的粉末材料为中航迈特公司提供的316L不锈钢粉末,该粉末通过真空雾化法(VIGA)制备,其粉末形貌如图1所示。大多数粉末颗粒显示出了良好的球形度,但也包括少量

的不规则形状颗粒及卫星粉(指若干小颗粒粉体粘附在大颗粒粉体表面而形成的一种缺陷粉)。该粉末的粒径大小为15~53  $\mu\text{m}$  (D90),使用前将进行115  $^{\circ}\text{C}$ -4 h烘干处理以去除粉末中多余水分,保证成形质量。

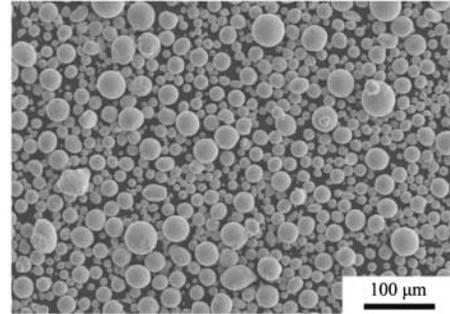


图1 扫描电子显微镜下(二次电子模式)的粉末颗粒形貌  
Fig. 1 SEM (secondary electron mode) morphology of powder particles

为验证成形前后材料成分一致性,分别对粉末原材料及成形后的块体试样成分进行检测,测试使用X射线荧光光谱仪(Foundry-Master X-pert,德国Uedem公司),其化学成分见表1。

表1 本试验所用的316L材料化学成分表  
Tab. 1 Chemical composition of 316L material used in this experiment

项目	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Fe
原始粉末	0.01	0.37	1.31	16.30	11.56	2.47	0.013	0.006	余量
成形后	0.02	0.39	1.79	17.46	12.28	2.53	0.014	0.001	余量

### 1.2 试样制备

激光粉末床熔融(LPBF)成形试验使用北京易加三维科技有限公司生产的EP-M250H设备进行,该设备配备IPG光纤高斯激光器,最大激光功率约为500 W,最大扫描速度5 000 mm/s,聚焦激光直径设定为100  $\mu\text{m}$ ,成形精度约为 $\pm 0.1$  mm,最大预热温度为200  $^{\circ}\text{C}$ ,成形时舱室充满氩气或氮气作为保护气氛,设备具体参数如表2所示。

加工过程中所采用的其他填充参数为:主体扫描间距为0.12 mm,层间旋转角设置为67 $^{\circ}$ ,轮廓扫描功率140 W,轮廓扫描速度350 mm/s,下表面填充功率140 W,下表面扫描速度2 400 mm/s,上表面填充功率150 W,上表面填充扫描速度600 mm/s,成形基板选用316不锈钢基板,成形时基板的预热温度为150  $^{\circ}\text{C}$ ,其他可能影响TPMS晶格结构的工艺参数详见表3。

表2 本试验所用LPBF成形设备具体参数表  
Tab. 2 Parameters of LPBF forming machine used in this experiment

设备电源/V	设备功率/kW	激光功率/W	设备尺寸/mm	成形区域尺寸/mm
380	8	500	3 500 × 1 300 × 2 200	262 × 262 × 370

表3 其他可能影响TPMS晶格结构成形质量的相关参数  
Tab. 3 Other relevant parameters that may affect the quality of TPMS lattice

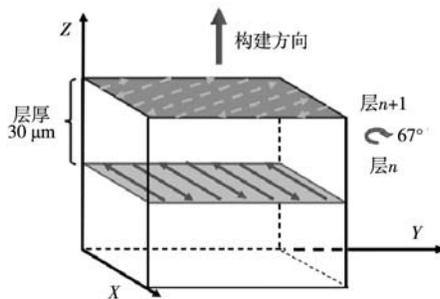
填充类型	X轴偏移	Y轴偏移	区域宽度/mm	条纹最小尺寸/mm	填充线间距/mm	填充线宽/mm
短直线	0	0	10	2	0.12	0.01

### 1.3 工艺参数优化及显微组织分析

用于进行相对致密度测量及工艺参数优化的块体试样，其尺寸确定为15 mm × 15 mm × 10 mm，在Magics 24.0软件中建模并进行预处理，将STL文件格式模型进行切片处理，切片层厚为0.03 mm，光斑补偿为-0.06 mm。块体试样成形示意图如图2(a)所示，LPBF成形后的立方块体试样如图2(b)所示。所有样品的层厚( $t$ )均为0.03 mm。根据以往的研究，将LPBF中316L不锈钢的体积能量密度设定在60~80 J/mm<sup>3</sup>

的范围内<sup>[1, 20]</sup>。优化过程经过几轮调整，根据预测和试验结果调整参数组合。

金相试样制备采用标准试样制备流程，使用200#~2 500#目金相砂纸从粗到细逐步磨削处理表面，去除切割过程中产生的损伤层和变形层，每次更换砂纸时都要彻底清洁样品，之后采用金刚石抛光膏进行试样抛光。采用王水腐蚀剂观测熔池及奥氏体形貌，具体配比为盐酸(HCl):硝酸(HNO<sub>3</sub>)=3:1，腐蚀时间10~30 s。



(a) 块体试样扫描策略示意图



(b) LPBF成形的块体试样

图2 块体试样制备

Fig. 2 Block specimen preparation

合金试样密度采用ImageJ软件测量。在金相显微图像中，材料基体与孔隙因光学反射率差异呈现不同的灰度值：基体区域通常较亮（高灰度值），孔隙因光散射或吸收而较暗（低灰度值）。软件通过设定灰度阈值，将图像二值化为黑白两色（基体为白色，孔隙为黑色），通过测定黑色区域占比得到相对致密度信息。

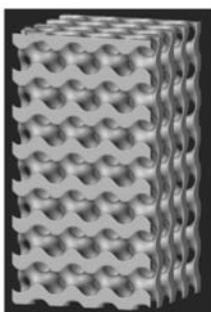
### 1.4 Gyroid 结构参数化建模及力学性能测试

为了便于观测压缩及晶格结构致密化过程，压缩试样尺寸采用12 mm × 12 mm × 22 mm的立方体晶格结构试样，如图3所示。利用隐式方程参数化构建Gyroid

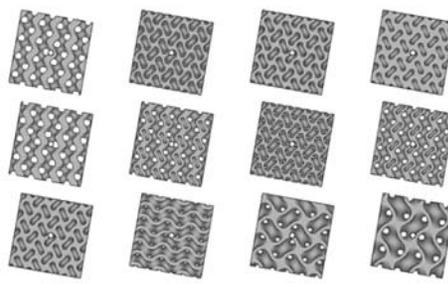
曲面模型，首先导入CAD模型将其转化为隐式体模型，确定TPMS晶格结构的边界大小，再利用Ntopology的晶格构建模块中的隐式曲面晶格命令构建Gyroid晶格结构，其中中性面 $C$ 值与隐式方程表达式如式(1)所示。其中 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 共同定义了三维空间中“某一点的位置”，方程通过判断该点坐标代入后是否满足等式，来确定该点“是否属于Gyroid结构的中性面”。

$$\sin(x)\cos(y) + \sin(y)\cos(z) + \sin(z)\cos(x) = C \quad (1)$$

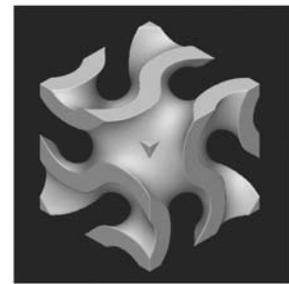
通过调整中性面偏置值 $\Delta C$ 、晶格壁厚 $t$ 及晶胞尺寸 $L$ 改变晶格的等效致密度，得到一系列具有不同结构参数的Gyroid晶格并应用布尔运算将其与CAD模型生成的隐式体结合。



(a) Gyroid结构压缩试样



(b) 结构参数化调整模型



(c) Gyroid结构单元三维图

图3 晶格参数化建模压缩试样与Gyroid结构单元三维图

Fig. 3 Compression specimens obtained by lattice parametric modeling

晶格结构相对致密度是指晶格结构的内部实体部分所占整体的空间百分比值,是衡量晶格结构力学性的一个重要的参数。相对致密度与许多设计参数有关,晶格结构的单元类型、支柱的直径与间距等都会影响孔隙率的大小。本试验中采用体积分法计算不同晶格结构的相对致密度,即通过nTopology软件直接测定实体体积占比。

室温压缩试验采用电子万能材料试验机实施,最大承载力为100 kN。由于激光选区熔化成形晶格结构为逐层铺粉制造,将试验机加载方向与成形方向保持一致,有利于消除增材制造工艺对晶格结构试样成形时所产生的力学性能的影响。晶格结构试样与实体试样均采用1 mm/min的恒定加载速率进行压缩,在电脑上获得相应的压缩力-位移曲线,并得出对应的屈服强度,抗压强度等力学性能参数。数据采集和分析,采集抗压强度,屈服强度。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 工艺优化与材料成形致密化

LPBF成形金属材料时,由于凝固过程复杂且冷却速度特别快,一般会导致凝固组织中存在难以完全消除的微小孔洞类缺陷,使得致密度只能尽可能接近100%,而很难达到完全致密。在成形实体构件时,当相对致密度达到99.8%以上时组织中只存在少许小尺寸孔洞,对于力学性能与塑性影响较小。而成形晶格结构时壁厚设置一般较小,使得整体力学行为对微小缺陷敏感性显著提高。因此采用针对实体构件的工艺窗口及工艺参数包可能造成后续研究中的较大误差。为了排除这种误差,本研究首先对316L材料的工艺参数进行更系统的优化以进一步提高材料致密度,以期排除微小冶金误差对于Gyroid结构力学行为的影响。

根据已有文献报道<sup>[12-13]</sup>,通常认为的316L材料具有高致密组织工艺窗口大致如下:激光功率 $P$ 范围为180~250 W,扫描速度区间为700~1 100 mm/s,体能量密度 $E_v$ 取值范围一般为65~80 J/mm<sup>3</sup>。处于以上工艺窗口内均有可能得到较高致密度的沉积组织(相对致密度>99.8%),因此本研究将以上范围确定为工艺优化区间,通过工艺优化确定本次试验条件下具有最高致密度的工艺参数组合,具体工艺参数设置如图4中黑色标记点所示。

图中已用不同色彩的虚线标识了不同水平的体能量密度 $E_v$ ,从图中可以看出,绝大多数工艺参数组的相对致密度高于98%,而致密度最高的结果出现在体能量密度70~80 J/mm<sup>3</sup>之间( $\geq 99.4\%$ ),且此时对应的最佳激光功率范围为210~230 W,最佳扫描速度区间为750~950 mm/s。需注意的是,以上得到的最优参数结

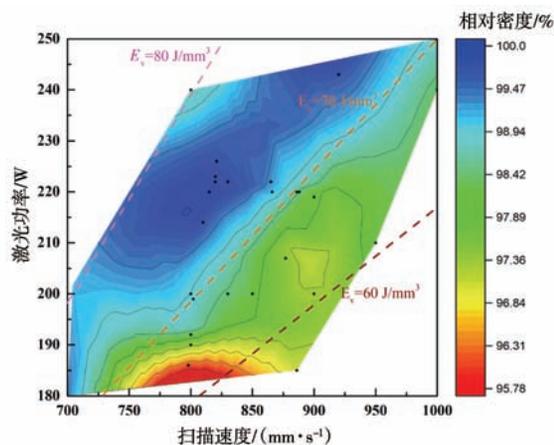


图4 成形工艺参数与致密度变化规律

Fig. 4 Change rules of relative densities versus the forming process parameters

果仅针对本次试验设备及铺粉层厚为0.03 mm,扫描间距为0.12 mm时的情况。其中当相对致密度高于99.4%时,对金相组织进行观察仍在凝固组织中发现了少量孔洞缺陷,如图5(a)所示。这可能是由于熔池凝固过程卷入保护气形成微小气泡,这些气泡随马兰戈尼流动未能及时接近熔池表面而逸出,留存在凝固组织中形成的<sup>[14]</sup>。

从金相结果分析,当激光功率处于220 W水平附近,扫描速度处于800~900 mm/s之间时能够得到最高的相对致密度。如图5(c)所示,当采用激光功率220 W,扫描速度820 mm/s的工艺参数组合时能够得到最高的相对致密度( $\approx 99.98\%$ )。因此选取该工艺参数组合作为后续成形Gyroid晶格结构的工艺参数,根据金相结果认为在此参数下成形晶格结构可最大限度排除冶金缺陷对力学行为的干扰。

### 2.2 Gyroid 结构参数对相对致密度的影响

在以往的试验中,研究者主要着重于相对致密度对力学行为的研究,包括Gyroid结构在准静态/动态载荷下的变形模式、平台应力和能量吸收效率等。然而对Gyroid结构来说,在进行参数化建模时中性面偏置与壁厚都会影响相对致密度结果。但两参数对结构调控方式不同,影响相对致密度的底层逻辑也存在差异,导致了某些情况下相对致密度一致,力学行为差异显著的现象。针对这一现象,本试验首先针对晶胞尺寸、壁厚及中性面偏置设置一系列梯度对照组,具体结构参数设置如表4所示。

激光粉床熔覆成形的试样如图6所示,经检查Gyroid晶格结构试样无明显的裂纹、孔隙、层纹和错位等影响后续力学性能研究的冶金缺陷。经过精确的尺寸测量,晶胞尺寸 $L$ 值、中性面偏置 $\Delta C$ 值和壁厚 $t$ 值

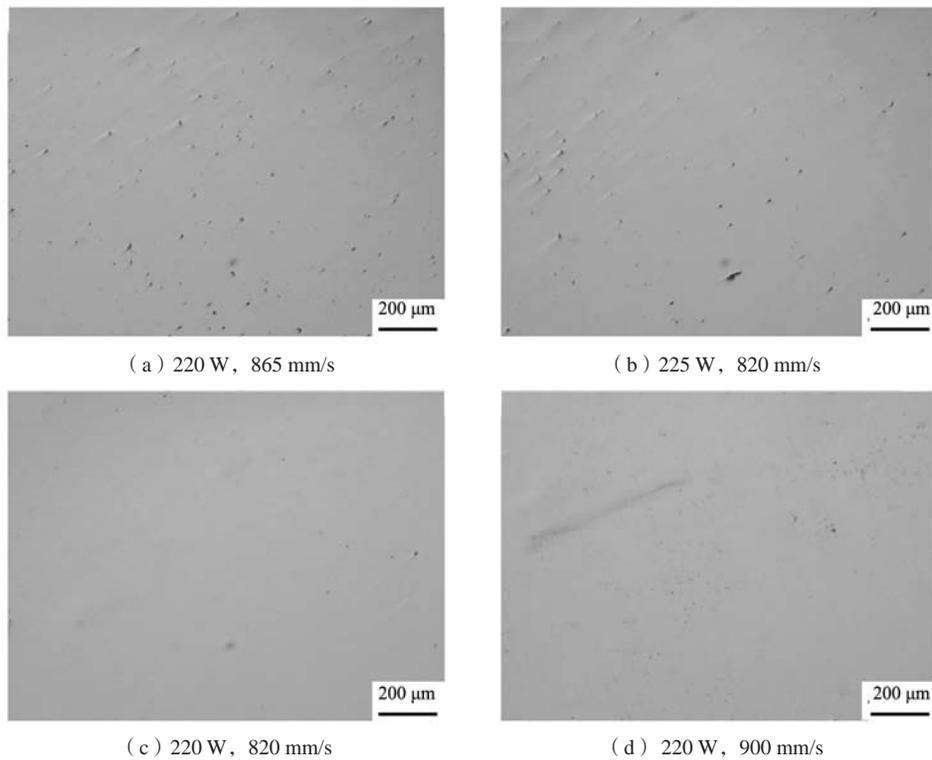


图5 不同工艺参数条件下试样的金相照片

Fig. 5 Metallographic photographs under the conditions of different process parameters

表4 Gyroid晶格结构试样参数设置  
Tab. 4 Parameter settings of Gyroid lattice structures

组别	晶胞尺寸/mm	晶格尺寸/mm	壁厚/mm	中性面偏置值	致密度	孔隙率
1	3×3×3	12×12×22	0.9	0	0.590 4	0.409 6
2	4×4×4	12×12×22	0.9	0	0.438 8	0.561 2
3	5×5×5	12×12×22	0.9	0	0.351 4	0.648 6
4	6×6×6	12×12×22	0.9	0	0.291 5	0.708 5
5	3×3×3	12×12×22	0.6	-0.5	0.370 9	0.629 1
6	3×3×3	12×12×22	0.6	-0.3	0.401 3	0.598 7
7	3×3×3	12×12×22	0.6	0	0.389	0.611
8	3×3×3	12×12×22	0.6	0.3	0.401 1	0.598 9
9	3×3×3	12×12×22	0.6	0.5	0.370 8	0.629 2
10	3×3×3	12×12×22	0.7	0	0.455 3	0.544 7
11	3×3×3	12×12×22	0.8	0	0.522 4	0.477 6
12	3×3×3	12×12×22	1	0	0.659 5	0.340 5

模型试样实际打印样件尺寸与CAD模型设计尺寸相比较,存在一定的尺寸误差,尺寸误差值均在0.1 mm以内,可以满足后续试验要求。

相对致密度随晶格结构参数的变化规律统计如图7所示。当总体晶格尺寸一定时,单位晶胞尺寸对相对致密度影响规律如图7(a)所示,即致密度随晶胞尺寸增大而减小,大致呈指数函数关系。通过数据拟合得到关系方程(2), $R^2=0.98$ 证明该拟合结果较好。壁

厚 $t$ 在以往研究中被证明是调整致密度最直接有效的参数,通常壁厚与相对密度之间呈非线性的关系,其关系式如式(3)所示。

$$\rho=0.48\exp\left(-\frac{L}{60.92}\right)+0.28 \quad (2)$$

$$\rho=2.3\times\left(\frac{t}{L}\right)^{0.11} \quad (3)$$

式中: $\rho$ 表示晶格结构的相对致密度, $t$ 表示晶格结构的壁厚, $L$ 表示单元晶胞尺寸。然而在本试验中,由于单

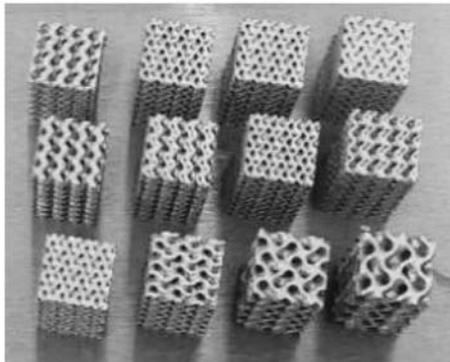
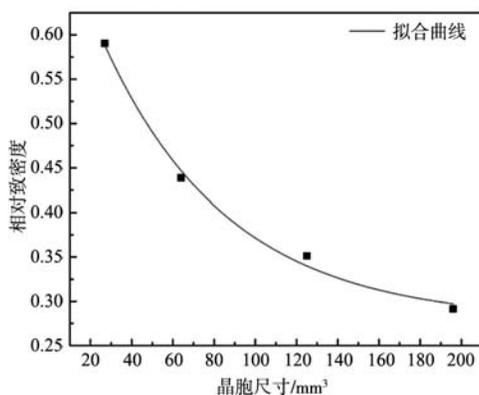
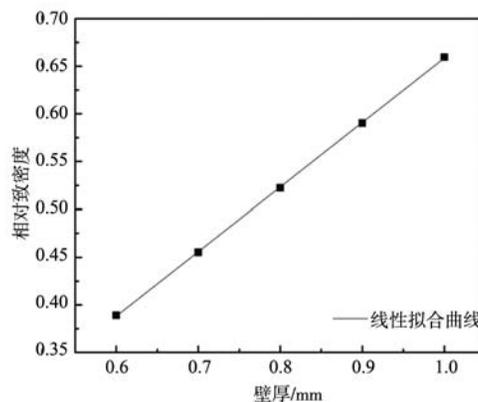


图6 具有不同结构参数的LPBF成形Gyroid结构试样  
Fig. 6 LPBF-formed Gyroid structure specimens with different structural parameters



(a) 晶胞尺寸 $L$ 对致密度的影响



(b) 壁厚 $t$ 对致密度的影响

图7 结构参数对致密度的影响

Fig. 7 Influences of structural parameters on the densities

于壁厚 $t$ 对于致密度的直接调整,通过中性面偏置 $C$ 调整致密度有利于保证Gyroid结构更好的曲率,但可能导致壁厚不均及由此导致的局部失效风险。此外由于 $C$ 值可能导致拓扑结构突变,其调整范围十分受限,导致仅改变 $C$ 值的这种单一途径很难显著改变晶格结构相对致密度。因此可通过协同调整结构参数 $t$ 与 $C$ 值,即先通过 $t$ 值在较大范围内调控晶格结构的致密度,再通过 $C$ 值调整进一步优化Gyroid晶格结构的力学行为得到最优化结构。

## 2.3 结构参数对 Gyroid 压缩力学行为影响

### 2.3.1 晶胞大小对强度的影响

Gyroid晶格结构的屈服强度与晶胞尺寸有着密切的关系。在晶格结构设计中,晶胞尺寸的缩小通过几何优化与材料分布调控对力学性能产生显著影响。如表5所示,当晶胞尺寸从 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 减小到 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 时,晶格致密度可从30%提升至60%。这种宏观结构的致密化使晶格结构的抗压强度与屈服强度同步增强,其核心机制在于:小型晶胞通

元晶胞尺寸较小( $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ ),数据呈现出了线性趋势。通过对式(3)进行泰勒展开并忽略高阶项,可使得幂律关系近似为线性关系,结合数据拟合得到关系式(4)如下所示。

$$\rho = 0.67t - 0.02 \quad (4)$$

该拟合结果的 $R^2 = 0.99$ ,证明在单元晶胞尺寸较小的情况下采用线性关系分析壁厚与相对致密度是可行的。

而对于中性面偏置来说,当偏置值一定时,在Gyroid这类高对称性晶格结构中,无论其偏置方向如何,对致密度的影响几乎一致。而随着偏置值的增加,晶格结构的致密度呈先增加后减小的趋势。相比

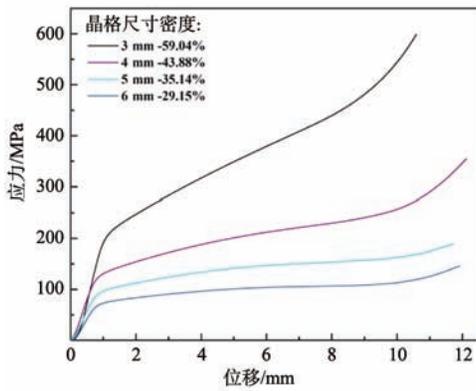
过更密集的支撑网络将外力分散至更多单元,有效抑制局部应力集中。晶胞尺寸减小使应力波传递路径缩短,载荷分布更均匀。

通常情况下随晶格结构致密化过程进行,抗压强度将逐步提高,试样变形量逐步降低。从吸能的角度来看,试样刚度的提升不利于能量吸收,试样致密化过程后期力学行为逐渐接近全致密构件,与本试验晶格结构力学行为研究目的不符。故本研究中所选取的抗压强度值均取自试样50%形变时的数据(即压缩行程在约11 mm时的强度值)。

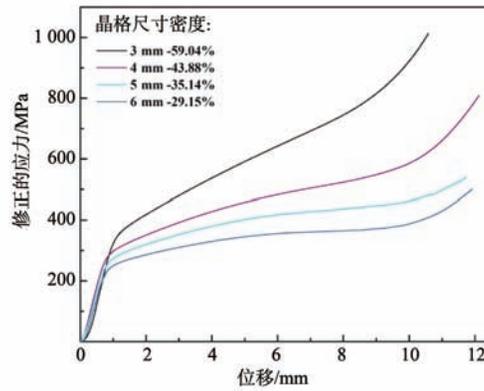
由表5可以看出,随着致密度降低,晶格结构的抗压强度与屈服强度显著降低。此外,小尺寸晶胞对打印缺陷(如球化、孔隙)的敏感度降低,如图8(a)中的试样试验结果显示,当晶胞越小时,试样中晶胞的数量越多,孔隙率减小,实体的占比增大,晶格的抗压强度增强,屈服强度也相应变强。但该数据采用了投影面积法计算受力截面积,未考虑致密度降低对受力截面的影响,可采用实体占比修正法对受力截面进行进一步修正。投影面积法中受力截面的计算可由

表5 不同晶胞尺寸对应的强度数据  
Tab. 5 Different structure cell sizes corresponding to compressive strengths and yield strengths

编号	晶胞尺寸/mm	抗压强度/MPa	屈服强度/MPa
1	3 × 3 × 3	600	240
2	4 × 4 × 4	355	145
3	5 × 5 × 5	190	170
4	6 × 6 × 6	145	80



(a) 投影面积法计算的应力-位移曲线



(b) 截面修正的应力-位移曲线

图8 不同晶胞尺寸的应力-位移曲线 (50%变形量)

Fig. 8 Stress-displacement curves for different structural cell sizes (50% deformation)

度的减小, 屈服强度显著降低, 呈现显著的非线性关系。尤其是当致密度从59.04%减少至43.88%时, 屈服强度降低约100 MPa。而随着致密度增加, 应力平台长度逐步减小即意味着更早地进入致密化阶段。

从致密度对受力截面进行修正得到的修正应力-位移曲线中发现, 屈服强度降低与致密度减少趋势更加一致。针对以上两种应力计算方式, 曲线变化趋势相

公式(5)表示。考虑晶格的致密度因素对受力截面积进行修正, 如公式(6)所示。对受力截面进行修正之后的工程应力-位移曲线如图8(b)所示。

$$A=L \times L \tag{5}$$

$$A_{\text{eff}}=\rho \cdot L^2 \tag{6}$$

式中:  $A$ 为受力截面 ( $\text{mm}^2$ ),  $L$ 为总体晶格结构的尺寸 ( $\text{mm}$ ),  $\rho$ 为相对致密度。从图中可以发现, 采用投影面积法计算的应力-位移曲线, 随着晶格结构致密

同, 但在计算比吸能时两种计算方式可能产生较大误差。从图8(a)来看, 随着致密度降低比吸能也在逐渐下降, 而图8(b)结果显示, 当致密度下降到一定值时, 比吸能可能也趋近于一个定值。通过曲线近似计算的总吸能及比吸能数据如表6所示。从表中可以推测, 随着致密度下降, 比吸能的主要影响因素可能由结构因素转变为了材料因素。

表6 不同晶胞尺寸试样压缩吸能  
Tab. 6 Compression energy absorption of specimens with different structural cell sizes

组号	屈服载荷/N	屈服位移值/mm	致密化载荷/N	致密化位移值/mm	总吸能/J	比吸能/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
1	29 089.88	1.1	67 970.11	8.80	373 680.96	632 928.46
2	18 808.58	1	34 643.83	9.00	213 809.64	487 259.89
3	13 769.41	0.98	22 843.07	9.40	154 138.54	438 641.26
4	10 319.21	0.95	15 865.68	9.50	111 940.40	384 015.11

### 2.3.2 中性面偏置与壁厚对力学行为的影响

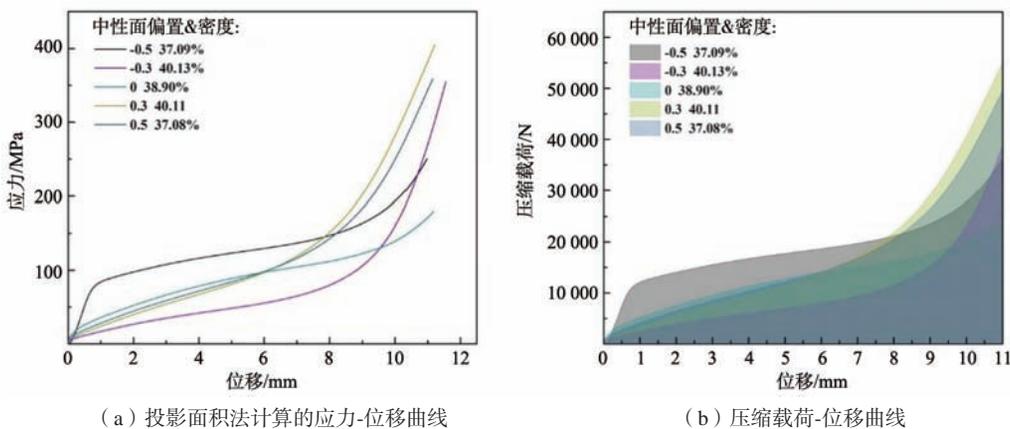
中性面偏置值增大会导致中性面一侧的壁厚增加, 另一侧变薄, 晶格结构的整体相对密度可能发生变化, 根据致密度变化结果发现正负偏置 (如  $|C|=\pm 0.5$ ) 的密度接近, 说明Gyroid结构优异的几何对称性。在Gyroid结构中, 如图9(a), 当Gyroid结构的中性面偏置值从-0.5逐渐调整为0时, 抗压强度和屈服

强度都有所下降, 并且在中性面偏置值为0时同时降至最低, 即抗拉强度降至180 MPa, 屈服强度降至85 MPa。

而当中性面偏置值从0调至0.5时, Gyroid结构的抗拉强度值表现为先上升后下降, 而屈服强度呈现上升趋势, 抗拉强度在0.3中性面偏置值时达到最大405 MPa, 屈服强度在-0.5中性面偏置值时达到最大210 MPa, 由该现象可知, 适当的中性面偏置可增加局部材料堆

积, 提高承载能力, 提高结构的抗压强度和屈服强度, 但是当过度偏置则会降低抗压和屈服强度。由图9 (b) 可看到, 当中性面偏置分别为-0.3与0.3时, 虽然两者致密度接近但力学行为存在明显差异, 主要表现在: (1) 塑性平台的载荷水平不同, 0.3偏置载荷

水平显著高于-0.3偏置的结构; (2) 致密化阶段开始时间不同, 在相同压缩速率下0.3偏置的结构致密化阶段开始较早。以上结果说明由中性面偏置带来的晶格结构改变对压缩行为影响显著, 仅以晶格相对致密度作为调控指标可能带来误差。



(a) 投影面积法计算的应力-位移曲线

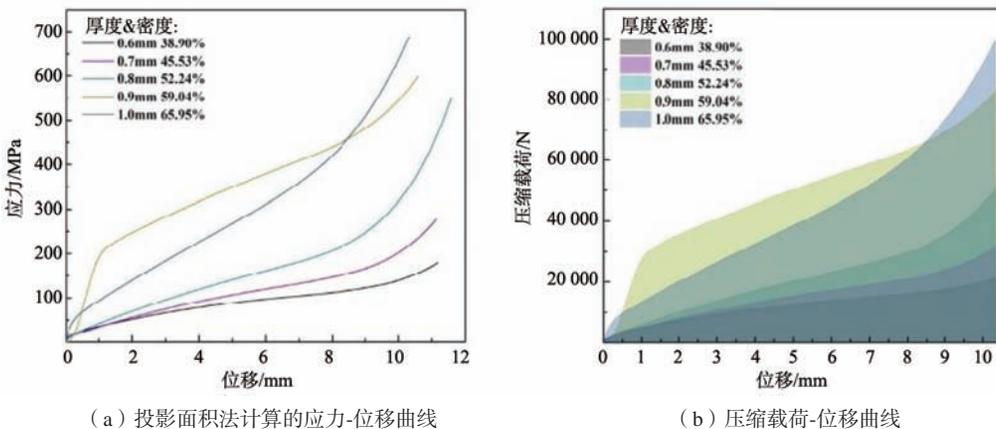
(b) 压缩载荷-位移曲线

图9 中性面偏置对力学行为及吸能影响

Fig. 9 Influences of neutral plane offsets on mechanical behaviors and energy absorption

由图10可知, 壁厚与晶格结构的抗压强度和屈服强度成正相关关系。壁厚增加通常会使得晶格结构的抗压和屈服强度显著提升。壁厚越大, 材料的有效承载面积增加, 从而提高了结构的抗压、抗弯和抗剪能力。随着壁厚每增加0.1 mm, 试样的屈服强度相应增长25%~50%。如图10 (a) 所示, 壁厚从0.6 mm增加至

1 mm时, 抗压强度从180 MPa增强至690 MPa, 同比增长383%; 同时, 屈服强度从原先的85 MPa涨至300 MPa, 同比增长388%。而对于吸能特性来说, 壁厚提高可以显著增加晶格结构刚度, 但可能带来初始弹性阶段增加, 塑性平台缩短的现象。



(a) 投影面积法计算的应力-位移曲线

(b) 压缩载荷-位移曲线

图10 壁厚对力学行为及吸能影响

Fig. 10 Influence of thickness on mechanical behavior and energy absorption

### 2.3.3 压缩应力分布及溃缩行为分析

采用有限元数值模拟软件Abaqus对壁厚为0.6 mm, 中性面偏置为0的晶格结构试样进行压缩载荷应力分析。应力分布云图如图11所示, 从应力分布云图可知Gyroid晶格结构的应力主要集中在晶胞的连接过渡区域, 当晶胞尺寸发生变化时, 晶胞连接处过渡区的形

成越长, 晶胞连接处的横截面积越大, 压缩应力能更加快速地传递到其他位置上。在压缩的初始弹性变形阶段, Gyroid结构表现出近似各向同性的线性响应。由于双螺旋曲面的高度连通性, 载荷通过连续的螺旋臂网络均匀传递, 此时结构整体发生可恢复的弹性变形, 应力-位移曲线呈线性上升, 无可见宏观破坏。该

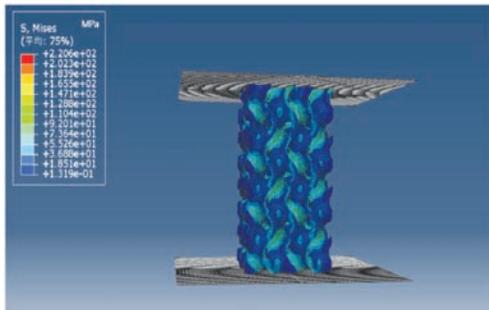


图11 线性弹性阶段Gyroid晶格结构应力云图分布

Fig. 11 Stress cloud distribution of Gyroid lattice structure in linear elastic phase

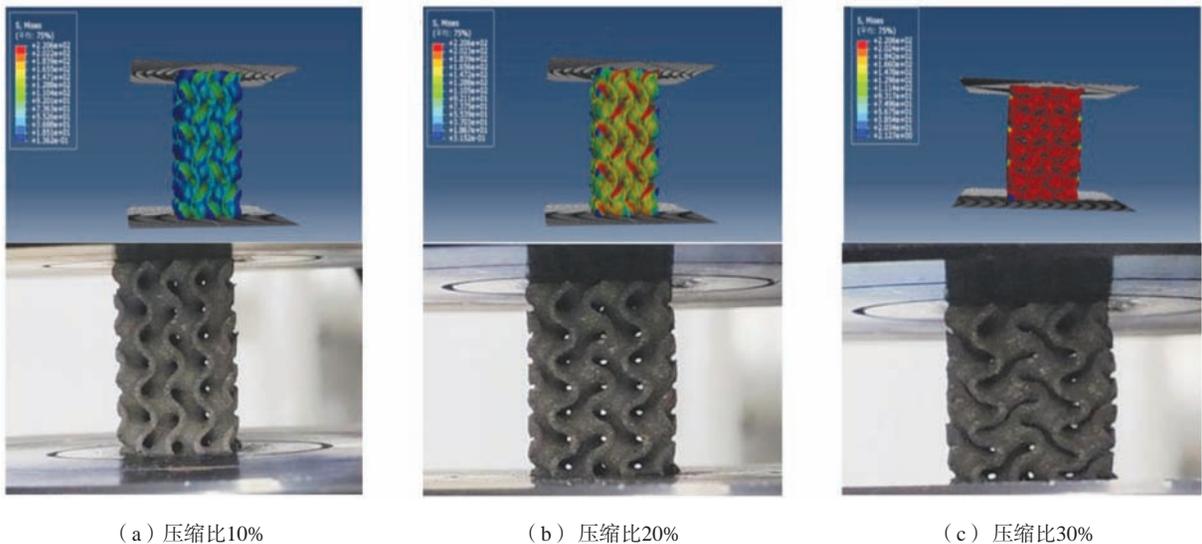
阶段的刚度与壁厚呈强正相关，薄壁结构（如壁厚0.6 mm）在此阶段更早达到屈服极限。

当压缩进入塑性平台阶段，渐进层状屈曲是Gyroid溃缩的核心过程。随着载荷增加，高曲率区域（如螺旋交汇处）率先发生局部屈曲，引发相邻晶胞的连锁坍塌。不同于杆状晶胞的脆性断裂，Gyroid的曲面拓扑促使变形以“层状折叠”方式传播。垂直于加载方向的晶胞层依次失稳，形成连续的塑性铰链，载荷在波动中维持相对稳定的平台应力。此阶段能量

吸收效率最高，平台应力水平受中性面偏置显著影响——当偏置值 $|C| = \pm 0.3$ ，优化的壁厚分布可提升平台应力约30%。

压缩比为10%、20%及30%对应的有限元数值模拟结果与试验结果对比如图12所示。从图中可以看到，Gyroid晶格结构在塑性塌缩变形阶段，晶胞的连接过渡区域发生了局部的坍塌，孔洞的形状也发生了改变，随着应变的增加不断趋向致密化，发生了相对均匀的塑性变形，没有极大的扭曲和局部的变形。图11中的数值模拟与试验压缩变形结果基本一致，符合图8，图9典型晶格结构的压缩曲线。

通常当压缩比大于50%时认为晶格结构开始进入致密化阶段。此时层状坍塌的晶胞被充分压实，实体材料相互接触形成刚性支撑，应力曲线陡升。此时结构失去多孔特性，力学行为趋近于实体材料，能量吸收能力急剧下降。致密化起始点与晶胞尺寸直接相关。小尺寸晶胞（如3 mm × 3 mm × 3 mm）因支撑网络密集，致密化应变阈值可延迟至60%以上，而大尺寸晶胞（6 mm × 6 mm × 6 mm）可能提前至40%，根据前文图8-10可以显著看到晶胞尺寸增加导致致密化阶段提前的现象。



(a) 压缩比10%

(b) 压缩比20%

(c) 压缩比30%

图12 试样压缩变形溃缩过程

Fig. 12 Specimen compression deformation collapse process

### 3 结论

基于激光粉末床熔融技术，采用优化工艺参数（激光功率220 W/扫描速度820 mm/s）制备高致密度316L不锈钢Gyroid结构，通过参数化模型调控晶胞尺寸、壁厚及中性面偏置值，系统揭示其压缩力学响应机制。发现减小晶胞尺寸显著增强承载能力；中性面偏置可优化致密度与力学性能，过度偏置则性能衰减。

(1) 通过对不同结构参数的TPMS结构进行力学压缩试验，找出了参数与吸能和刚性之间的联系，同一中性面偏置值下，壁厚主导强度提升，每增0.1 mm屈服强度提高25%~50%；随着壁厚的增加，致密度增大，模型的刚性增大，吸能效果提升显著。

(2) 晶胞尺寸对于Gyroid结构的力学性能呈现非线性的影响，但是在晶胞尺寸较小时可近似做线性化处理。减小晶胞尺寸大小可以相对提高抗压强度和

屈服强度，抗压强度为145~600 MPa，屈服强度为80~240 MPa，提高应力平台阶段的承载力。

(3) 壁厚与晶格结构的抗压强度和屈服强度成正相关关系，随着壁厚每增加0.1 mm，试样的屈服强度

相应增长25%~50%。同时影响晶格结构的能量吸收效率；综合三种参数的抗压和屈服强度影响区间，壁厚的影响最大。

#### 参考文献:

- [1] 徐仰立, 曹玄扬, 李婷婷, 等. 激光增材制造Ti6Al4V点阵结构的抗压吸能特性 [J]. 稀有金属材料与工程, 2022 (7): 2536-2544.
- [2] 曾寿金, 刘广, 李传生, 等. 基于SLM的股骨柄多孔结构设计与力学性能分析 [J]. 中国激光, 2022, 49 (2): 168-181.
- [3] 胡大勇, 李贤, 肖译林, 等. 一种泡沫填充三周期极小曲面多孔结构夹芯板及制备方法: CN110641083B [P]. 2020-01-03.
- [4] 都书, 阿依古丽·喀斯木, 张宇涛, 等. 选区激光熔化制备316L不锈钢点阵结构的力学性能研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59 (19): 255-263.
- [5] 聂伟, 刘奋成, 胡文伟, 等. 孔隙类型对激光选区熔化Inconel625合金高温塑性的影响 [J]. 中国激光, 2024, 51 (10): 314-324.
- [6] 施建平. 面向骨植入体3D打印的多孔结构构建研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [7] 张志强. 选区激光熔化制备AlSi10Mg晶格结构的力学及散热性能研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- [8] YANG L, MERTENS R, FERRUCCI M, et al. Continuous graded gyroid cellular structures fabricated by selective laser melting: design, manufacturing and mechanical properties [J]. Materials & Design, 2019, 162: 394-404.
- [9] 魏取龙, 姜丽红, 刘征, 等. 选区激光熔化制备TPMS晶格结构及力学性能 [J]. 航空学报, 2025, 46 (8): 430593.
- [10] 张明康. 隐式曲面梯度多孔结构优化设计及激光选区熔化成形力学性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [11] 王昕. 316L不锈钢TPMS多孔结构设计及其力学性能研究 [D]. 长沙: 湖南理工学院, 2024.
- [12] 李亚东. 设计参数对TPMS多孔结构SLM成形质量及力学性能影响 [D]. 太原: 中北大学, 2024.
- [13] MOWER T M, LONG M J. Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials [J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 651: 198-213.
- [14] ZHAO Y F, KOIZUMI Y, AOYAGI K, et al. Molten pool behavior and effect of fluid flow on solidification conditions in selective electron beam melting (sebm) of a biomedical Co-Cr-Mo alloy [J]. Additive Manufacturing, 2019, 26: 202-214.

## Effects of Parametric Modification of Gyroid Structures Fabricated via Laser Powder Bed Fusion on their Compressive Mechanical Behavior

JIN Shan<sup>1</sup>, WANG Zhi-yong<sup>1,2</sup>, ZHANG Yu-hao<sup>1</sup>, RAO Li-xiang<sup>2</sup>, ZHANG Xin-chun<sup>2</sup>, WANG Rui<sup>1</sup>, SI Yan-fang<sup>1</sup>, ZHAO Jun-hao<sup>1</sup>

(1. School of 3D Printing, Xinxiang University, Xinxiang 453000, Henan, China; 2. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

#### Abstract:

Based on the laser powder bed fusion (LPBF) technique, the effects of parametric tuning on the compressive mechanical behavior of Gyroid triple-periodic minimal surface (TPMS) structures has been systematically investigated, and the correlation laws between the structural parameters and the mechanical properties are revealed through tuning the key parameters such as structure cell size, wall thickness and neutral plane offset, and combining experimental and numerical analyses. The results show that each 0.1 mm increase in wall thickness can increase the yield strength by 25%-50%, and the compressive strength increases significantly; decreasing the cell size can significantly increase the compressive strength (145-600 MPa) and yield strength (80-240 MPa); and the peak densification value of the neutral plane offset value of  $C=\pm 0.3$  reaches 40.1%, which is optimal for the mechanical properties. It is found that the synergistic regulation of wall thickness and neutral plane offset can balance the lightweight and load-carrying requirements, providing theoretical basis and experimental support for the parametric optimization of TPMS structures in aerospace and automotive lightweight design.

#### Key words:

laser powder bed fusion (LPBF); triple-periodic minimal surface (TPMS) structure; gyroid structure; structural parameter; compression behavior