

## 选区激光熔化成形极小曲面点阵的结构和性能优化

刘飞<sup>1,2</sup>, 唐艺川<sup>1</sup>, 谢海琼<sup>1,2\*</sup>, 张臣科<sup>2</sup>, 陈俊杰<sup>1</sup><sup>1</sup>重庆邮电大学先进制造工程学院, 重庆 400065;<sup>2</sup>陆军军医大学第一附属医院运动医学中心, 重庆 400037

**摘要** 随着激光增材制造技术的快速发展,具有轻质高强和性能可控的点阵结构成为航空航天、骨科医疗等领域的研究热点。三周期极小曲面(TPMS)点阵结构的平均曲率为零,具有消除应力集中和提高结构强度的优点,是轻量化多功能结构材料的理想候选者。本团队采用一种新的曲面偏移方法设计了金刚石(Diamond)、初始晶格(Primitive)、螺旋二十四面体(Gyroid)和体心立方(I-WP)4种 TPMS 点阵结构,并采用选区激光熔化(SLM)完成了 Ti-6Al-4V 样件的制备,同时建立了基于 Johnson-Cook 的有限元仿真模型。点阵结构的仿真结果在受载进程的线性增长、应力降、应力平台各阶段均还原了实验过程,证明了有限元仿真模型的良好预测性,揭示了优化点阵结构在压缩过程中表现出的逐层坍塌的变形行为和连续塑性断裂模式。得益于曲面偏移设计产生的截面系数增加,4种 TPMS 点阵结构的压缩性能和能量吸收都获得了较大提升,其中 I-WP 点阵结构的强度提升了 244.9%,能量吸收提升了 312.7%。

**关键词** 激光技术; 点阵结构; 选区激光熔化; 三周期极小曲面; 有限元仿真; 变形行为

**中图分类号** TG146; TG404

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL221026

## 1 引言

点阵结构由周期性排列的晶格单元组成,是一种实现轻量化设计的多功能结构,具有高比强度、高比刚度和高能量吸收率<sup>[1-2]</sup>。该结构以其集结构、功能于一体的优良综合性能在热交换器、医疗、轻型结构、航空航天<sup>[3-6]</sup>等领域得到了广泛研究和运用。

增材制造(AM)技术<sup>[7]</sup>是一种层层累加的制造工艺,为点阵结构的制造提供了可行性。其中,选区激光熔化(SLM)技术展现出了对金属结构的强大制造能力,该技术能高效准确地还原设计模型的几何特征,并保持其优良的力学性能。AM 技术极大地促进了点阵结构的发展,许多研究通过寻找合适的基本单元或采用结构拓扑优化来提升结构的力学性能。三周期极小曲面(TPMS)<sup>[8-9]</sup>点阵结构以连续的拓扑构型和平均曲率为零<sup>[10]</sup>的光滑曲面为特征,能有效降低承载时的应力集中,提高结构的力学性能和疲劳寿命,已被广泛应用于结构的优化设计。此外,TPMS 还具有简洁的函数表达,其结构特征易于控制<sup>[11]</sup>,能够实现梯度多孔结构的性能定制<sup>[12-14]</sup>和多功能耦合<sup>[15-16]</sup>。Yang 等<sup>[17]</sup>对均匀和梯度 TPMS-Gyroid 结构进行了对比研究,结果发现二者都展现出了高制造保真度、可重复性和可预

测性。该研究证明了 TPMS 是可控性能梯度设计的有效方式。Liu 等<sup>[18]</sup>提出了基于 TPMS 支架的拓扑结构控制策略,采用该策略成形的 TPMS-Diamond 结构具有优良的综合性能,能有效解决传统多孔结构力学性能和高渗透性之间的矛盾。Nguyen-van 等<sup>[19]</sup>将 TPMS-Primitive 的面片状结构作为复合材料的增强相来加固钢筋混凝土,结果发现加固钢筋混凝土的强度比单层钢筋混凝土提高了 35%。

目前,研究人员采用 SLM 制造技术已经开发出支杆状和面片状两种类型的 TPMS 点阵结构,这两种结构都有独特优势:前者具有更优良的孔隙连通性和渗透性<sup>[20]</sup>,是良好的骨缺损替代材料;后者通常具有更高的强度和能量吸收能力,在吸能缓冲装置、航空航天轻量化结构上具有广阔的应用前景<sup>[4,6]</sup>。但并非所有面片状 TPMS 点阵结构都具有良好的力学性能,人们对面片状点阵结构性能提升的机理还不清楚,而且尚缺乏有效的性能预测模型,难以获得与目标性能相匹配的优化设计。此外,轻量化结构力学性能和结构效率的提升推动着 TPMS 点阵优化设计的快速发展,亟须建立高效可靠的分析方法,以揭示点阵结构在承载过程中的变形和失效机制,探寻点阵结构性能优化的规律。

收稿日期: 2022-07-05; 修回日期: 2022-08-23; 录用日期: 2022-09-08; 网络首发日期: 2022-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(52205250)、重庆市教委科学技术研究计划(KJQN202100650)、重庆市自然科学基金博士后科学基金(cstc2021jcyj-bshX0037)、重庆市博士后科研项目特别资助(2011010006524418)

通信作者: \*xiehq@cqupt.edu.cn

本文提出了一种新的曲面偏移设计方法,旨在提高 TPMS 点阵结构的强度和能量吸收性能。本团队采用该方法设计了金刚石(Diamond)、初始晶格(Primitive)、螺旋二十四面体(Gyroid)和体心立方(I-WP) 4 种典型的 TPMS 点阵结构,建立了基于 Johnson-Cook 的仿真分析模型,以确定各点阵结构的力学行为。同时,通过实验和仿真方法研究了 TPMS 点阵结构的准静态力学响应及其能量吸收能力,探究

了曲面偏移设计对不同结构力学性能的影响规律,以期为点阵结构的优化策略和分析方法提供参考。

## 2 材料与方法

### 2.1 点阵结构的设计方法

Diamond、Primitive、Gyroid 和 I-WP 单元是典型的点阵结构,具有良好的综合力学性能。设计这 4 种结构的函数公式<sup>[12,21]</sup>分别为

$$\varphi_D(x, y, z) = \sin(x) \cdot \sin(y) \cdot \sin(z) + \sin(x) \cdot \cos(y) \cdot \cos(z) + \cos(x) \cdot \sin(y) \cdot \cos(z) + \cos(x) \cdot \cos(y) \cdot \sin(z) - 0.07 [\cos(4x) + \cos(4y) + \cos(4z)] + t, \quad (1)$$

$$\varphi_P(x, y, z) = \cos(x) + \cos(y) + \cos(z) + 0.51 [\cos(x) \cdot \cos(y) + \cos(y) \cdot \cos(z) + \cos(z) \cdot \cos(x)] + t, \quad (2)$$

$$\varphi_G(x, y, z) = \cos(x) \cdot \sin(y) + \cos(y) \cdot \sin(z) + \cos(z) \cdot \sin(x) + 0.08 [\cos(2x) \cdot \cos(2y) + \cos(2y) \cdot \cos(2z) + \cos(2z) \cdot \cos(2x)] + t, \quad (3)$$

$$\varphi_W(x, y, z) = \cos(2x) + \cos(2y) + \cos(2z) - 1.95 [\cos(x) \cdot \cos(y) + \cos(y) \cdot \cos(z) + \cos(z) \cdot \cos(x)] + t, \quad (4)$$

式中: $\varphi_D(x, y, z)$ 、 $\varphi_P(x, y, z)$ 、 $\varphi_G(x, y, z)$ 、 $\varphi_W(x, y, z)$  分别代表 Diamond、Primitive、Gyroid 和 I-WP 结构在坐标轴中的函数; $t$  为常数,是控制各点阵结构相对密度( $\rho^*$ )的参数。参数  $t$  不同的赋值可以生成不同尺寸的实体区域,得到不同相对密度的多孔结构,如图 1(a) 所示。通过多项式拟合得到了参数  $t$  与相对密度  $\rho^*$  之间的关

系,如图 1(b) 所示。Diamond、Primitive、Gyroid 和 I-WP 这 4 种点阵结构的相对密度与参数  $t$  之间的关系分别为

$$\rho_D^* = -6.1t^3 + 8t^2 - 40.42t + 48.69, \quad (5)$$

$$\rho_P^* = -12.29t^3 + 19.72t^2 - 41.94t + 61.89, \quad (6)$$

$$\rho_G^* = -1.82t^3 + 2.75t^2 - 32.45t + 49.06, \quad (7)$$

$$\rho_W^* = -0.95t^3 + 2.22t^2 - 16.02t + 53.95. \quad (8)$$

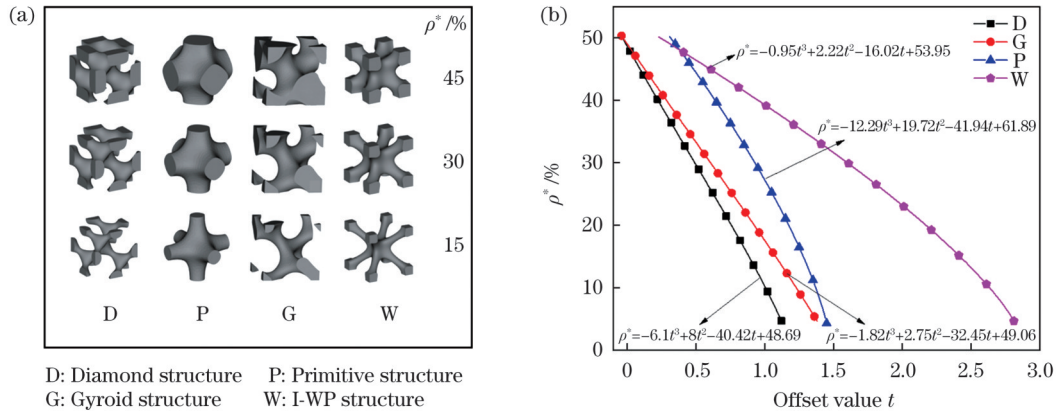


图 1 4 种点阵结构设计。(a) 不同相对密度的单元;(b) 参数  $t$  与相对密度  $\rho^*$  之间的关系

Fig. 1 Four kinds of lattice structure designs. (a) Unit cells with different relative densities; (b) relationship between parameter  $t$  and relative density  $\rho^*$

在 SLM 制造中,较低相对密度的点阵结构具有更轻质的特点,但不利于成形质量。根据前期研究<sup>[21]</sup>,本文折中选择 15% 的固定相对密度。通过布尔运算实现曲面点阵结构的设计,如图 2 所示,以一个相对密度为 30% 的 I-WP 支杆状结构单元(rod 30)减去一个相对密度为 15% 的支杆状结构单元(rod 15),可以得到曲面偏移的面片状点阵结构(sheet 30-15)。同理也可以获得其他面片状点阵结构,如 sheet 45-30。

### 2.2 点阵结构的制造

为了探寻曲面偏移对 TPMS 点阵结构性能优化的规律,采用相同的方法分别设计了 Diamond、

Gyroid、Primitive 和 I-WP 类型的支杆状结构(rod 15)和面片状结构(sheet 30-15、sheet 45-30)。这些点阵结构都是基于式(1)~(8),使用 MATLAB R2017 b 软件生成的具有三周期极小曲面结构的 stl 文件。然后利用 Magics 软件对生成的文件进行缩放和优化,并完成布尔操作,使  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向都有 4 个单元,整体尺寸为  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。图 3 展示了所设计的模型和采用 SLM 制造的样品。

上述点阵结构(材料为 Ti-6Al-4V)采用 EOSINT-M280 型增材制造设备制备得到。4 种点阵结构采用相同的工艺参数:激光功率为 175 W,光束直径

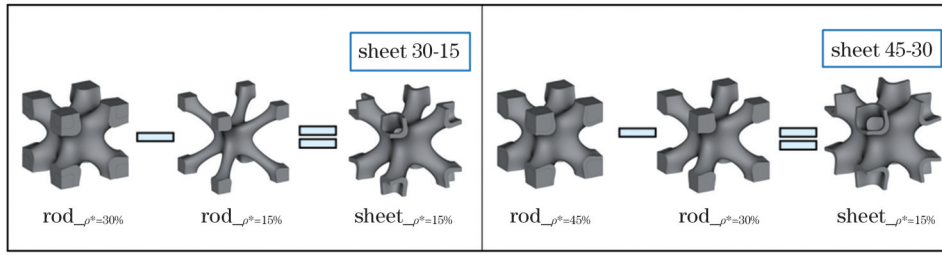


图 2 基于布尔运算实现 I-WP 点阵结构的曲面偏移的设计方法  
Fig. 2 Design method of surface offset for I-WP lattice structure by Boolean operation

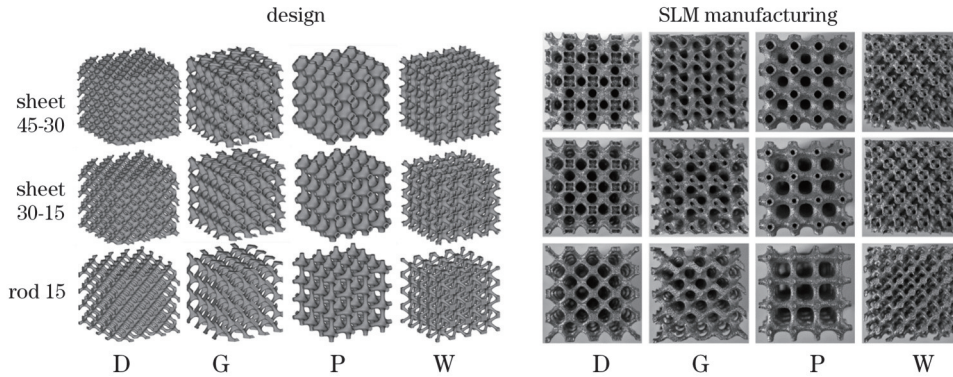


图 3 Diamond, Gyroid, Primitive, I-WP 设计以及制造的支杆状结构 (rod 15) 和面片状结构 (sheet 30-15, sheet 45-30)  
Fig. 3 Diamond, Gyroid, Primitive and I-WP design and manufactured rod structure (rod 15) and sheet structures (sheet 30-15 and sheet 45-30)

为 0.1 mm, 激光扫描线长为 5 mm, 扫描线间距为 75  $\mu\text{m}$ , 扫描速度为 1250 mm/s, 光束轮廓偏移为 15  $\mu\text{m}$ , 铺粉层厚为 30  $\mu\text{m}$ , 采用各层间夹角为 67° 的交替填充。在 SLM 成形过程中, 金属粉末的化学成分、形貌、流动性和粒度等材料特性会对成形件的性能有很大影响。本次实验使用的 Ti-6Al-4V 粉末的化学成分如表 1 所示, 材料中的氧、氢、氮等杂质含量较低, 符合 GB/T 3620.1—2007《钛及钛合金牌号和化

学成分》的规定; Ti-6Al-4V 合金中铝元素的质量分数为 5.5%~6.75%, 钒元素的质量分数为 3.5%~4.5%, 钛元素的质量分数在 90% 左右。由图 4(a) 所示的 Ti-6Al-4V 粉末的扫描电镜 (SEM) 图可以看出粉末颗粒表面光滑且接近球形, 这有利于提高粉末的流动性和铺展平整度。由图 4(b) 可以看出 Ti-6Al-4V 粉末粒度主要集中在 30  $\mu\text{m}$  左右, 保证了微细多孔结构的 SLM 成形。

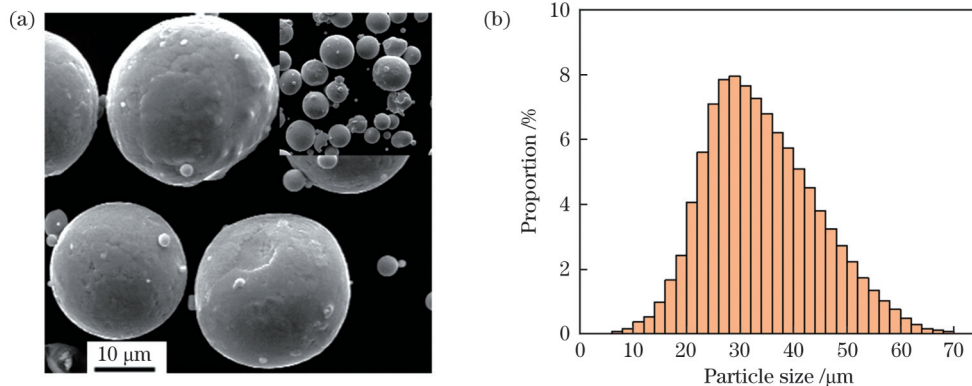


图 4 实验使用的 Ti-6Al-4V 粉末的微观形貌和粒度分布。(a) Ti-6Al-4V 粉末的 SEM 形貌; (b) 粒度分布  
Fig. 4 Morphology and particle size distribution of Ti-6Al-4V powder used in experiment. (a) SEM image of Ti-6Al-4V powder; (b) particle size distribution

制造完成后, 将晶格样品在 650  $^{\circ}\text{C}$  下进行 2 h 的热处理 (热处理在氩气保护下进行, 防止样品被氧化),

以消除样品中的热应力, 并在软化水浴中超声清洗 20 min, 去除残留的松散粉末。



表1 Ti-6Al-4V 合金粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ti-6Al-4V alloy powder

Element	Mass fraction / %
Ti	Balance
Al	5.5-6.75
V	3.5-4.5
O	<0.2
N	<0.05
C	<0.08
H	<0.015
Fe	<3

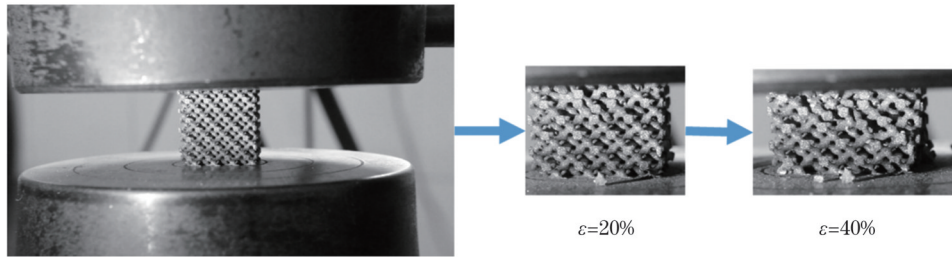


图5 压缩过程中点阵结构的变形行为

Fig. 5 Deformation behaviors of lattices structure during experimental compression

表2 TPMS点阵结构的力学性能及相应说明

Table 2 Mechanical properties of TPMS lattice structures and corresponding descriptions

Nomenclature	Description
$\rho^* / \%$	Relative density of the lattice structures
$\sigma / \text{MPa}$	Stress, calculated by dividing the load by the apparent cross-sectional area
$\epsilon / \%$	Stain, calculated by dividing the displacement by sample's height
$E / \text{GPa}$	Young's modulus of the lattice structure, which is the slope of linear phase of stress-strain curve
$\sigma_s / \text{MPa}$	Yield strength of the lattice structure, identified with the compressive 0.2% offset stress
$\epsilon_s / \%$	Yield strain, the strain produced when yield strength is reached
$\sigma_b / \text{MPa}$	Ultimate strength of the lattice structure, measured as the first peak on the stress-strain curve
$\epsilon_b / \%$	Ultimate strain, the strain produced when the ultimate strength is reached
$\sigma_{pl} / \text{MPa}$	Plateau stress, average stress from $\epsilon=20\%$ to $\epsilon=40\%$
$W_V / (\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3})$	Cumulative energy absorption per unit volume up to $\epsilon=50\%$

### 2.3.2 有限元建模

为了准确描述 TPMS 点阵结构在压缩过程中的力学性能和变形行为,利用 ABAQUS/Standard 2019 软件对其进行有限元仿真分析。首先,在 Hypermesh 软件中将点阵结构划分为四面体(C3D10M)网格模型,并对网格进行收敛性分析,最终确定平均网格单元尺寸为 0.1 mm,如图 6 所示。然后,在模拟压缩过程中将底板固定,顶板施加与实验相同的载荷,并在刚性板和点阵结构之间设置 0.1 的摩擦因数。根据拉伸样件的实验结果,设置 Ti-6Al-4V 的弹性模量为 107 GPa,泊松比为 0.3。

利用 Johnson-Cook 塑性和损伤模型描述点阵结构的塑性变形和失效形式,点阵结构的等效应力

## 2.3 测试

### 2.3.1 静态力学测试

根据多孔金属压缩测试标准(ISO 13314—2011),使用 CMT 5101 型万能试验机对各点阵结构的压缩性能进行测试,如图 5 所示。CMT 5101 型万能试验机具有 100 kN 的最大实验载荷。在压缩测试过程中控制点阵结构的变形率,以 1.5 mm/min 的速度进行加载,达到 50% 应变( $\epsilon$ )时停止测试,每个样品重复测试三次。采用摄像机对整个实验过程进行记录,以便观察样件在压缩过程中的变形行为。测试样件的性能参数及相应描述总结在表 2 中。

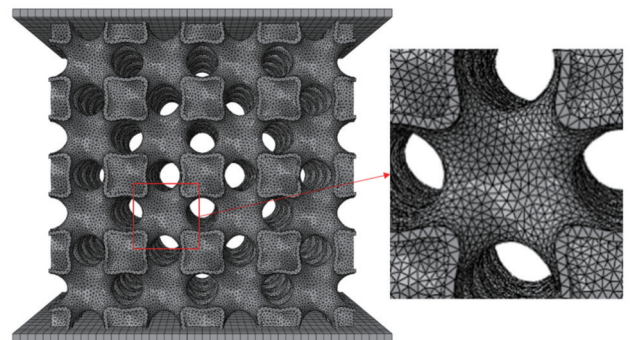


图6 有限元中I-WP sheet 45-30点阵结构的C3D10M网格划分

Fig. 6 Division of tetrahedral mesh C3D10M of I-WP sheet 45-30 lattice structure in FEM (the right image is partially enlarged morphology of left image)



$(\sigma_{eq})^{[22-23]}$  可以表示为

$$\sigma_{eq} = \left[ A + B(\epsilon_{eq})^n \right] \cdot \left[ 1 + C \cdot \ln(\dot{\epsilon}_{eq}^*) \right] \cdot \left[ 1 - (T^*)^m \right], \quad (9)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $m$ 、 $n$  为材料常数;  $\epsilon_{eq}$  为等效应变;  $\dot{\epsilon}_{eq}^*$  为无量纲的等效塑性应变率;  $T^*$  为无量纲温度。断裂应变( $\epsilon_f$ )的表达式为

$$\epsilon_f = \left[ D_1 + D_2 \cdot \exp(D_3 \sigma^*) \right] \cdot \left[ 1 + D_4 \ln(\dot{\epsilon}_{eq}^*) \right] \cdot \left[ 1 - D_5 T^* \right], \quad (10)$$

式中:  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$  和  $D_5$  是材料损伤常数;  $\sigma^*$  是应力的三轴度。Johnson-Cook 模型的输入参数采用之前研究<sup>[23-24]</sup>中的参数, 如表 3 所示。

### 3 结果和讨论

首先对 SLM 成形的点阵结构进行准静态压缩测试, 得到各点阵结构相应的力学性能, 并利用摄像机同步记录实验过程, 以观察样件的形态变化和断裂行为; 然后采用有限元方法对建立的模型进行仿真, 并将仿真结果与实验结果进行比较, 验证仿真模型的可靠性; 最后探究曲面偏移设计方法对 Diamond、Primitive、

表 3 SLM 成形 Ti-6Al-4V 的 Johnson-Cook 模型中设置的性能参数

Table 3 Performance parameters set in Johnson-Cook model of SLM manufacturing Ti-6Al-4V

Parameter	Value
$A$ / Pa	997
$B$ / MPa	746
$N$	0.325
$D_1$	0.005
$D_2$	0.43
$D_3$	-0.48

Gyroid、I-WP 点阵结构力学性能和吸能性的影响规律。

#### 3.1 压缩测试

压缩测试结果表明, SLM 样件的成形性良好并表现出一致的力学性能。选取其中一组压缩应力-应变曲线进行分析, 可以发现, 相较于支杆状点阵结构, 通过曲面偏移设计得到的 TPMS 点阵结构的力学性能得到了显著提升, 如图 7 所示。值得说明的是, 本文中的所有点阵结构均具有相同的相对密度。

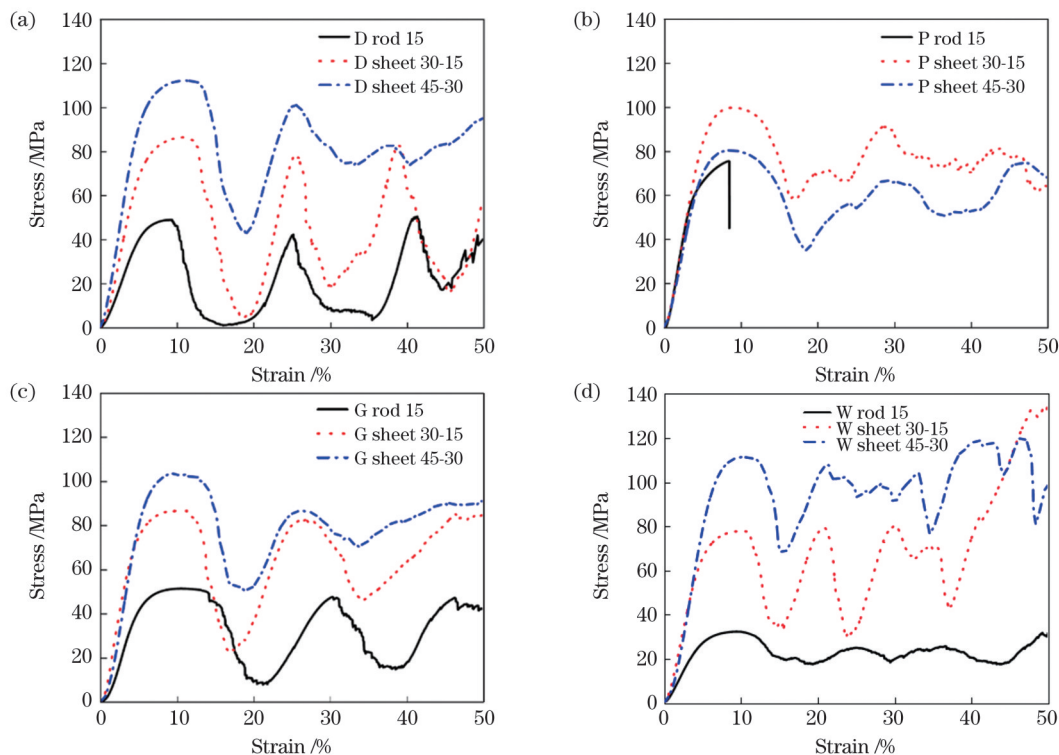


图 7 Diamond、Primitive、Gyroid 和 I-WP 点阵结构的压缩应力-应变曲线。(a)Diamond 点阵结构; (b)Primitive 点阵结构; (c)Gyroid 点阵结构; (d)I-WP 点阵结构

Fig. 7 Compressive stress-strain curves of Diamond, Primitive, Gyroid and I-WP lattice structures. (a) Diamond lattice structure; (b) Primitive lattice structure; (c) Gyroid structure; (d) I-WP lattice structure

具体来看, 在 Primitive 点阵结构中, 当偏移距离较小时, 曲面偏移后的面片状点阵结构的力学性能有较大幅度提升, sheet 30-15 的强度较偏移前提升了 47.1%; 但随着偏移距离继续增大, 压缩性能有所降

低, sheet 45-30 的强度相较于 sheet 30-15 下降了 19.5%。其他 3 种点阵结构 (Diamond、Gyroid 和 I-WP) 中的 sheet 30-15 和 sheet 45-30 的强度则随着偏移距离增大而逐步提升, 尤其是 I-WP 点阵结构的强度

提升得最为明显, sheet 30-15 和 sheet 45-30 的强度分别提升了 140.7% 和 244.9%。在这几种结构中, 虽然曲面偏移对压缩性能的影响规律有所不同, 但整体都

表现出了明显的提升效果, 从而验证了通过曲面偏移设计提升点阵结构压缩性能的有效性。各点阵结构的压缩性能如表 4 所示。

表 4 各点阵结构的压缩性能  
Table 4 Compressive properties of each lattice structure

Structure	$\sigma_s$ /MPa	$\epsilon_s$ /%	$\sigma_b$ /MPa	$\epsilon_b$ /%	$E$ /MPa
D rod 15	39.34±1.23	4.94	48.84±0.21	9.35	982.500±14.654
D sheet 30-15	70.67±1.11	5.21	86.68±0.12	11.13	1755.196±21.988
D sheet 45-30	91.27±0.77	5.14	112.51±0.09	11.13	2219.714±22.124
P rod 15	52.96±2.11	3.89	67.86±0.26	8.87	1932.197±33.484
P sheet 30-15	84.50±1.03	5.15	99.79±0.14	8.74	2054.919±3.398
P sheet 45-30	67.43±1.31	4.78	80.34±0.13	8.24	1715.439±19.954
G rod 15	38.12±1.19	4.52	51.40±0.14	9.08	1137.651±45.607
G sheet 30-15	66.02±3.00	4.15	86.72±0.03	9.36	1996.746±63.557
G sheet 45-30	80.24±0.70	5.03	103.59±0.25	9.25	2121.357±15.393
W rod 15	24.96±0.87	4.26	32.37±0.22	8.99	681.473±1.303
W sheet 30-15	62.15±1.21	4.58	77.92±0.15	10.44	1677.287±2.883
W sheet 45-30	93.89±0.96	6.16	111.64±0.24	10.12	2181.133±158.558

图 8 展示了 12 种结构在实验过程中的初始形态以及形变过程中和 50% 最终变形后的形态。其中

Primitive 的 rod 15 结构较为特殊, 由上层竖直杆失稳造成层间崩裂, 未能压缩到 50% 的最终形变。

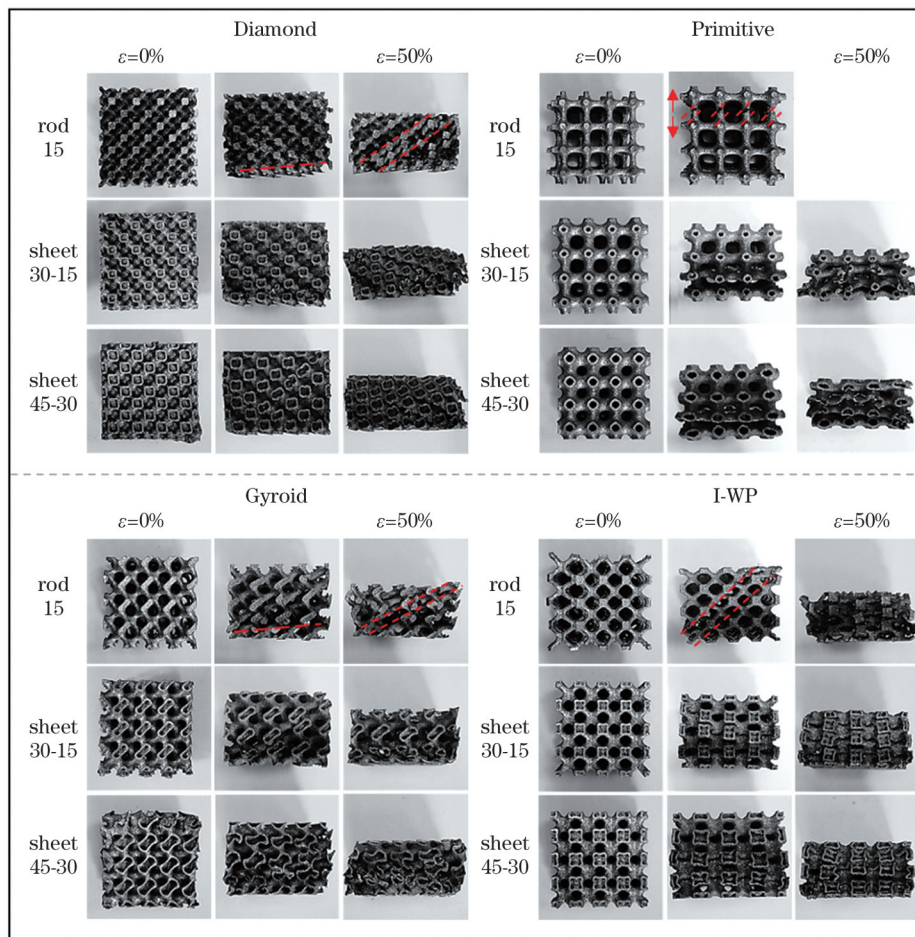


图 8 Diamond、Primitive、Gyroid 和 I-WP 中的 rod 15、sheet 30-15 和 sheet 45-30 点阵结构在压缩测试中的形变  
Fig. 8 Deformation of Diamond, Primitive, Gyroid and I-WP lattice structures with rod 15, sheet 30-15 and sheet 45-30 types in compression test

研究发现,压缩时的塑性坍塌和失效形式取决于结构单元的几何形状和曲面偏移位置。在 Primitive 点阵结构中,rod 15 结构在产生 8% 形变时因竖直杆失稳出现层间崩裂,应力跌落至 0,无法正常继续之后的实验。曲面偏移设计优化了 Primitive 点阵结构,使其最终能够达到 50% 的压缩应变状态,从而提升了 Primitive 点阵结构的能量吸收性能。在 Diamond、Gyroid 和 I-WP 三种结构中,曲面偏移使模型的变形形式发生了显著变化:由 45° 剪切破坏逐渐转变为层层坍塌,而层层坍塌的失效形式有助于平抑点阵结构的应力跌落和提高点阵结构的能量吸收。

### 3.2 有限元仿真实验

在压缩测试中可以观察到点阵结构整体的形态变化,并记录各个时间点对结构压缩的作用力,但难以对

结构内部的塑性变形和应力大小进行准确描述和测量。有限元模拟仿真可以很好地解决这一问题,因此,接下来将有限元仿真与压缩测试进行对照分析,以验证模拟仿真的正确性和可靠性。然后,分析曲面偏移设计对点阵结构变形行为和压缩性能的影响规律。

图 9 展示了物理压缩测试和有限元仿真获得的各点阵结构的应力-应变曲线。它们呈现出相似的线性增长、应力降落和应力平台阶段,说明了模拟仿真中 Johnson-Cook 模型参数设置合理,也证明了采用有限元方法对点阵结构压缩性能进行预测的可行性。另由图 9 可以看出,各结构的两条曲线(物理压缩测试和有限元仿真获得的曲线)之间存在一定偏移<sup>[25]</sup>,该现象的主要原因是实验样件的平行度误差导致应力-应变曲线在初始阶段出现了一个非线性的、向上凹的区域。

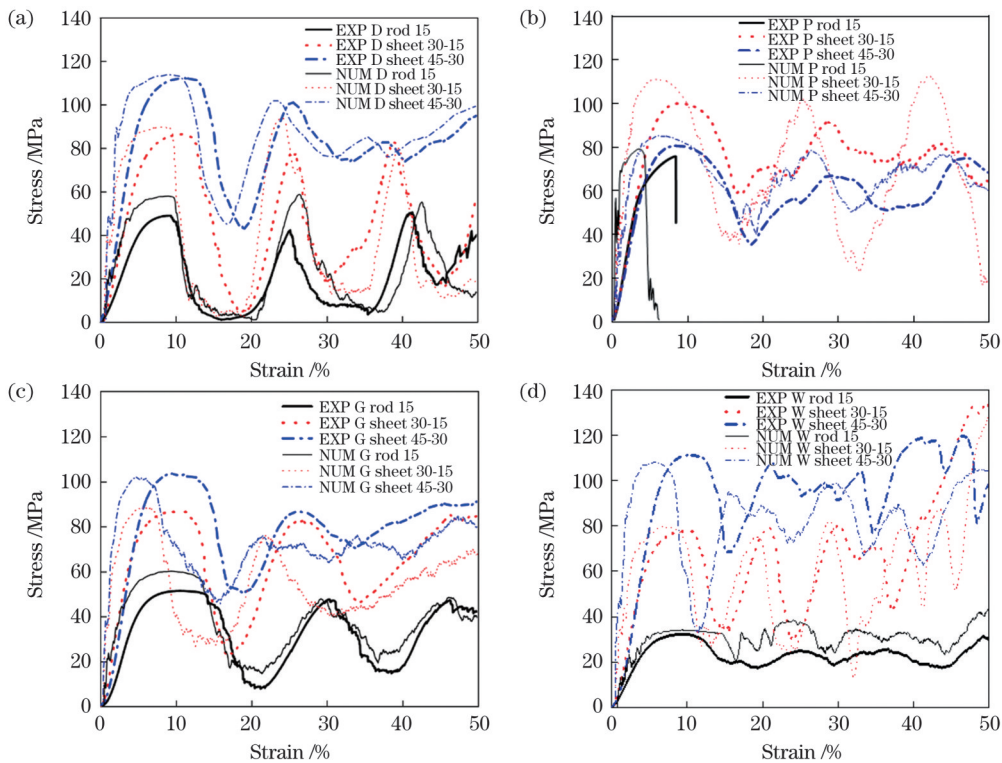


图 9 物理压缩测试和有限元仿真得到的应力-应变曲线的比较。(a)Diamond 点阵结构;(b)Primitive 点阵结构;(c)Gyroid 点阵结构;(d)I-WP 点阵结构

Fig. 9 Comparison of stress-strain curves obtained by physical compression test and finite element simulation. (a) Diamond lattice structures; (b) Primitive lattice structures; (c) Gyroid structures; (d) I-WP lattice structures

在点阵结构的力学性能仿真分析中常采用极限强度作为模拟精度的判据。为评价仿真模型的可靠性,本文对仿真和压缩测试得到的极限强度进行了对比分析,分析如图 10 所示。分析实验结果可以得到: Diamond、Gyroid 和 I-WP 结构中的极限强度随偏移距离增大而逐步提升,其中 sheet 45-30 结构相较于 rod 15 结构的极限强度提升了 101.5%~244.9%;但在 Primitive 结构中,由于偏移过程产生了塑性铰, sheet 30-15 的压缩性能的提升效果最佳,该结构的极限强度相较于 rod 15 提升了 47.1%。分析模拟仿真结果可以

得到: rod 15 点阵结构的极限强度通常大于物理压缩测试值,平均偏差值为 7.61 MPa,而 sheet 30-15 和 sheet 45-30 点阵结构的数值模拟预测值与物理压缩测试值更加接近,平均偏差值为 3.65 MPa。总体而言,通过数值模拟仿真预测得到的支杆状结构的极限强度与物理压缩测试结果能较好地吻合,面片状点阵结构极限强度的物理测试值与仿真预测值吻合得更好,验证了数值模拟仿真的准确性和可靠性。

图 11~14 分别展示了 4 种单元结构在模拟仿真过程中的变形行为。由模拟仿真云图可以得到点阵结构



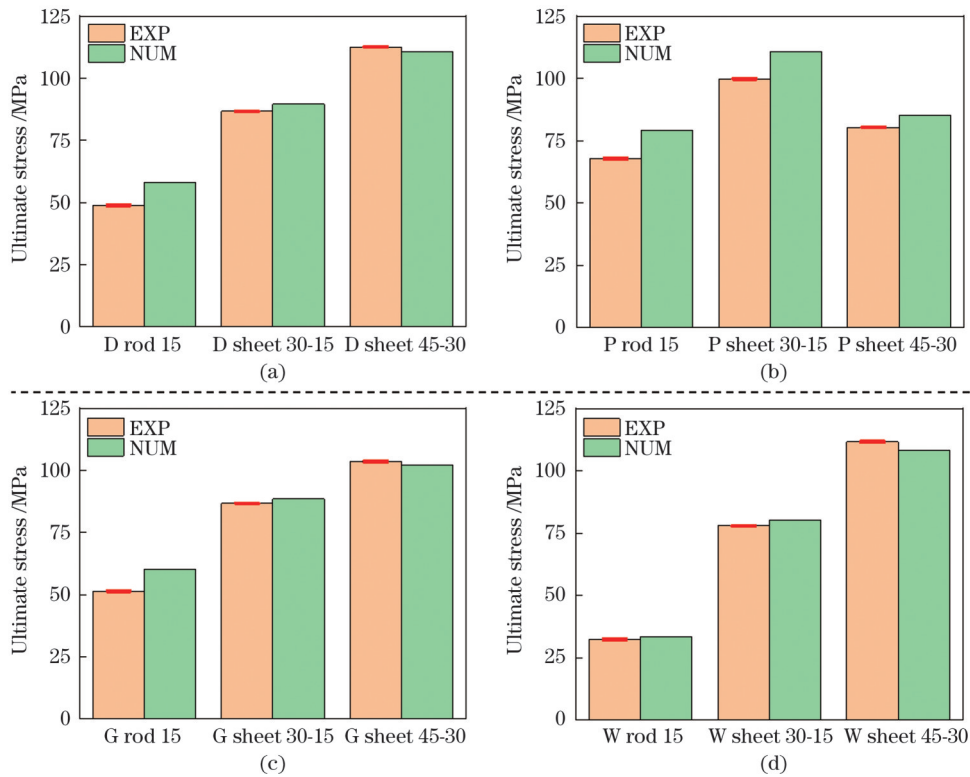


图 10 数值模拟和压缩测试得到的极限强度的对比。(a)Diamond点阵结构;(b)Primitive点阵结构;(c)Gyroid点阵结构;(d)I-WP点阵结构

Fig. 10 Comparison of ultimate strength obtained by numerical simulation and compression test. (a) Diamond lattice structures; (b) Primitive lattice structures; (c) Gyroid structures; (d) I-WP lattice structures

在准静态压缩作用下的塑性应变分布特征,这对于理解曲面偏移设计对 TPMS 点阵结构力学性能的影响具有重要的指导意义。

如图 11 所示,在 Diamond 点阵结构受压过程中,随着应变增加,rod 15 结构的支杆首先出现塑性变形,然后在 45° 对角支柱上出现断裂现象(该情况下易发生斜向剪切破坏);之后随着应变继续增大,中间层结构

紧紧堆叠,最终呈现压实状态。应变较小时,曲面偏移较小的 sheet 30-15 点阵结构中的初始塑性变形位置同样发生在支杆上;随着变形量增大,支柱呈现不规则断裂,45° 剪切破坏现象得到一定抑制。在 sheet 45-30 点阵结构中,顶部首先出现塑性变形,随着应变增大,塑性变形区域集中在结构的顶部并在该处出现断裂破坏,顶部单元层出现明显的横向变形,模型上部结构被

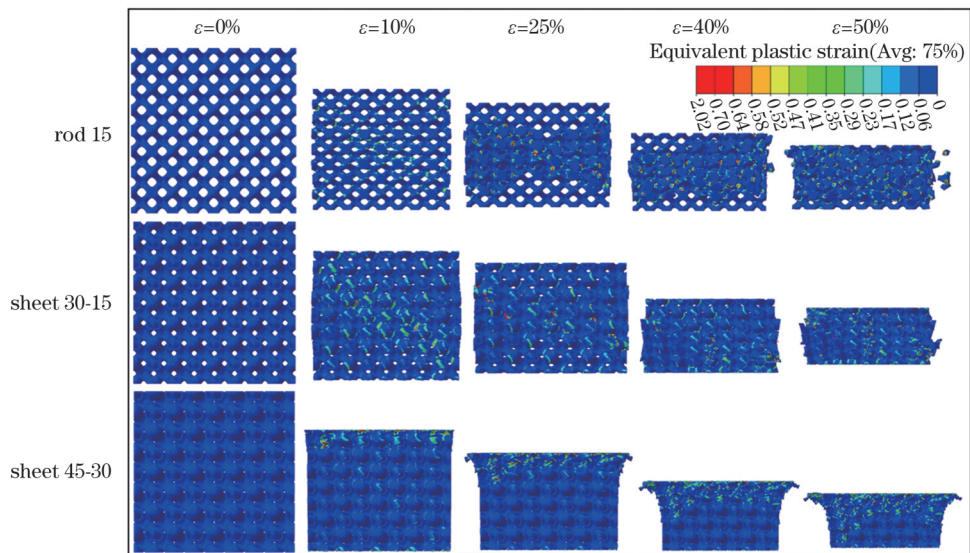


图 11 Diamond 点阵结构在受压过程中产生的塑性变形的仿真结果

Fig. 11 Simulated plastic deformation of Diamond lattice structures in compression process

完全压实并逐渐下移,下部结构因受到的影响较小而基本保持完整。

在 Primitive 点阵结构中, rod 15 结构的支杆在较小的应变下就出现了明显的塑性变形,当应变达到 8% 左右时发生了垂直杆失稳断裂现象,与物理压缩测试结果相同,上层结构发生了整体断裂。对于曲面偏移后的 sheet 30-15 点阵结构来说,由于其结构拓扑优化为面片状,原本集中在支杆上的塑性

变形转移到结构曲面连接处,压杆失稳情况得到有效抑制,出现断裂的位置也从支杆转移至连接处,改善了支杆状结构的失效形式并增强了结构的力学性能。sheet 45-30 点阵结构中发生了与 sheet 30-15 相同的塑性变形,但由于产生了塑性铰,加剧了曲面连接处的塑性变形,削弱了节点抵抗塑性变形的能力,使得结构的连接处提前断裂,降低了结构的力学性能。

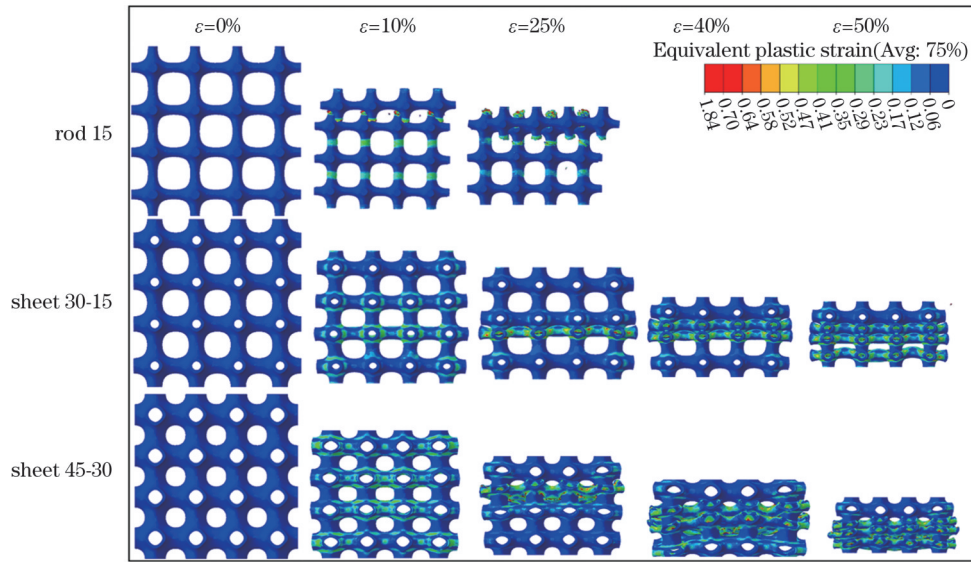


图 12 Primitive 点阵结构在受压过程中产生的塑性变形的仿真结果

Fig. 12 Simulated plastic deformation of Primitive lattice structures in compression process

在 Gyroid 点阵结构中, rod 15 结构中最初产生的塑性变形均匀地出现在各支杆上;当应变逐渐增大到 25% 时,形成了斜向断裂带而且断裂带继续拓展,结构呈现出明显的 45° 剪切破坏特征;当应变达到 50% 时,整个结构被紧紧压实,两侧有断裂的碎片出现。sheet 30-15 结构在压缩过程中仍存在 45° 剪切破坏现

象,而且在形变过程中上层单元也出现了较为明显的塑性变形区域,其变形和失效方式逐渐向逐层坍塌过渡。sheet 45-30 点阵结构的斜向剪切破坏现象得到改善,当应变较大时,坍塌位置出现在点阵结构的底层,模型底部结构被完全压实,上部结构只受到较小影响并基本保持着结构完整。

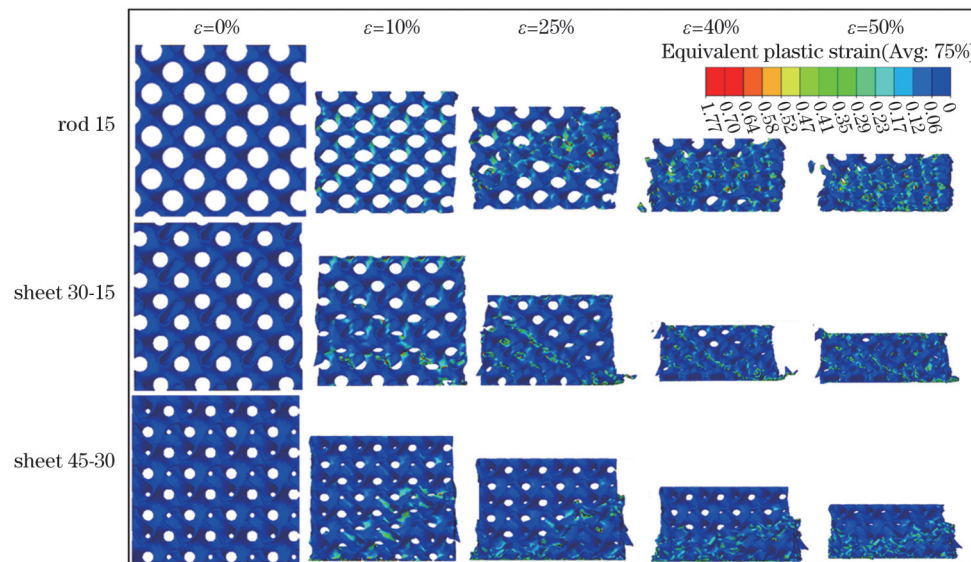


图 13 Gyroid 点阵结构在受压过程中产生的塑性变形的仿真结果

Fig. 13 Simulated plastic deformation of Gyroid lattice structure in compression process



在 I-WP 点阵结构中, rod 15 结构开始发生塑性变形的位在上下两端的支杆上。当应变为 25% 时, 塑性变形较大的区域分布在上下两部分且呈现为三角形形状, 上下两部分承担了大部分变形; 当应变达到 50% 时, 整个结构被全部压实。在 sheet 30-15 点阵结构中, 塑性变形在应变达到 25% 之前于各支杆连接处均匀分布, 应变达到 25% 之后集中分布在中层的支杆

连接处; 继续增大应变, 整个结构呈压实状态。在 sheet 45-30 点阵结构中, 当应变为 10% 时, 发生的较大塑性变形集中分布在结构的中部, 其余支杆连接处只发生了较小的塑性变形; 随着应变增大, 这一现象更加明显, 中间层单元被逐渐压实, 上下部分还保持着较为完整的结构; 当应变达到 50% 时, 中层结构被紧紧压实, 上下两部分仍维持着较好的状态。

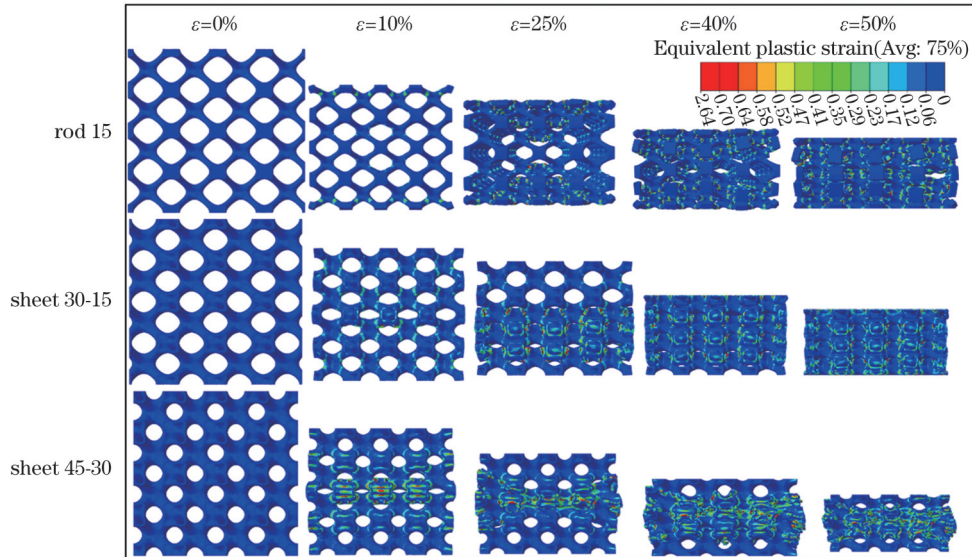


图 14 I-WP 点阵结构在受压过程中产生的塑性变形的仿真结果

Fig. 14 Simulated plastic deformation of I-WP lattice structures in compression process

在物理压缩测试和有限元模拟仿真中均对点阵结构进行了曲面偏移设计, 随着支杆状结构偏移距离逐渐增大, 点阵结构变为空间连续曲面, 节点与杆之间不再具有连接点特征, 点阵结构的截面模量增大, 避免了局部应力集中, 因此应力分布得更加均匀。同时, 曲面偏移设计稳定了结构的破坏过程, 使得逐层坍塌成为结构的主要破坏模式, 结构的强度更高, 应力-应变曲线更平滑且应力的下降趋势得到缓解<sup>[13, 26]</sup>。但在实验中, 曲面偏移设计对各结构变形行为和压缩性能的影响并不完全相同, 其原因在于受压时不同结构内部受到的应力及其失效形式有所不同。以 Diamond、Gyroid 和 I-WP 为代表的点阵结构失效破坏的主要原因是结构中存在弯曲和扭转载荷。在材料力学中, 计算抗扭截面系数的一个重要物理量是惯性矩, 惯性矩通常被用来描述截面抵抗弯曲的能力。与实心的支杆状点阵结构相比, 空心的面片状结构在扭转和弯曲方面具有更高的截面惯性矩<sup>[21]</sup>, 在同等的相对密度下具有更大的抵抗变形的能力。对这几种结构持续进行曲面偏移时, 截面惯性矩得到了有效提升, 大大增强了结构抵抗扭转和弯曲变形的能力, 结构的压缩性能能够随着曲面的持续偏移而不断增加。然而, 在以 Primitive 为代表的点阵结构中, 支杆失效破坏的主要形式是压

杆失稳。曲面偏移提高了其截面惯性矩, 但也在连接点截面上产生了塑性铰。塑性铰的产生会削弱节点抵抗塑性变形的能力, 使结构单元连接处的曲面提前断裂。

综上所述可以得出: 曲面偏移是提高 TPMS 点阵结构压缩性能的有效策略, 但该方法并不适用于所有的单元类型。对 Primitive 点阵结构进行设计时, 需要对曲面偏移带来的截面惯性矩的强化作用与塑性铰的弱化效果进行平衡, 避免过量的曲面偏移。

### 3.3 能量吸收

点阵结构在压缩进程中的累积吸收能量可以通过对应力-应变曲线进行积分求得, 积分公式<sup>[21]</sup>为

$$W_v = \int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (11)$$

为了进一步阐述结构的能量吸收性能, 采用式(12)所示的拟合函数<sup>[27]</sup>对能量吸收累积曲线进行分析。

$$W_v' = a\varepsilon^b, \quad (12)$$

式中: 系数  $a$  代表点阵结构的初始能量吸收能力, 与材料的弹性模量密切相关; 系数  $b$  描述了点阵结构在压缩载荷作用下的累积能量吸收增长率, 代表点阵结构持续吸收能量的能力, 与应力回跌下降现象有关;  $W_v'$  为累积能量吸收。



图 15 展示了压缩测试和有限元模拟仿真得到的各结构的累积能量吸收与应变的关系。经过曲面偏移设计,各点阵结构的能量吸收曲线均在支杆状点阵结构曲线的上方,这说明曲面偏移设计有效提升了结构的能量吸收能力。由式(11)可知,累积

能量吸收可由应力-应变曲线进行积分得到,结合应力降与结构破坏的关系可以发现能量吸收曲线的波动与结构沿 45° 对角线方向的剪切破坏模式有关,能量吸收曲线斜率的平缓处对应着应力急剧下降区域。

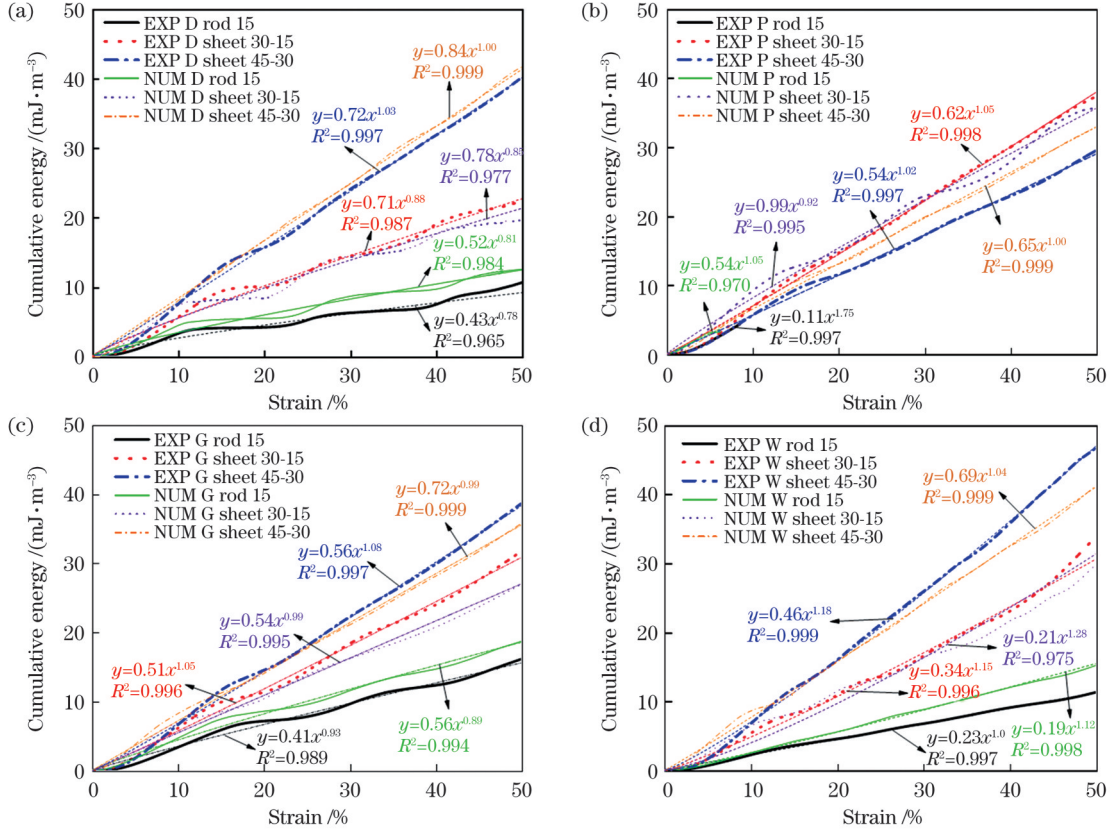


图 15 各点阵结构的累积能量吸收曲线和拟合曲线。(a)Diamond 点阵结构;(b)Primitive 点阵结构;(c)Gyroid 点阵结构;(d)I-WP 点阵结构

Fig. 15 Cumulative energy absorption and fitting curves of each lattice structures. (a) Diamond lattice structures; (b) Primitive lattice structures; (c) Gyroid structures; (d) I-WP lattice structures

分析图 15 可以发现,与支杆状结构相比,面片状点阵结构的系数  $a$  和系数  $b$  更大。这说明面片状点阵结构相比支杆状结构在初始能量吸收能力和累积能量吸收增长率方面均有提升。点阵结构的综合力学测试表明,通过曲面偏移设计,点阵结构的惯性矩得到了显著改善,结构中会同时发生剪切和扭转变形,导致更加复杂和随机的断裂行为,从而避免了大规模集体坍塌,使弯曲变形和滑动变形(而非支杆状结构的坍塌变形)成为主导,因此吸能性较支杆状结构更好。此外,面片状将结构中的孔隙分成两部分,减小了坍塌应变的空间,从而为得到稳定、光滑的应力-应变曲线提供了条件。

在压缩测试过程中,点阵结构在应力达到极限时发生破坏,结构暂时失去承载能力,导致应力急剧下降;而应变还在继续增大,直到破坏层单元与下一层相接触。在应力-应变曲线中可以观察到该过程对应

的应力值很低,能量吸收较少,结构表现为较低的连续能量吸收能力。其中,平台应力( $\sigma_{pl}$ )是计算累积能量吸收的关键参数,该参数反映了点阵结构在坍塌阶段的承载能力和应力波动情况,并且受材料延展性和点阵结构单元类型的影响。在结构中,高而平稳的应力能得到更高的平台应力值,有利于能量的吸收。根据 ISO 13314—2011,平台应力可以通过式(13)计算得到。

$$\sigma_{pl} = \frac{1}{\epsilon_{40} - \epsilon_{20}} \int_{\epsilon_{20}}^{\epsilon_{40}} \sigma(\epsilon) d\epsilon, \quad (13)$$

式中: $\epsilon_{20}$ 和 $\epsilon_{40}$ 分别表示 20% 应变和 40% 应变。。

如图 16 所示,各结构的平台应力和累积能量吸收呈现相同的变化趋势:曲面偏移设计后,各结构的平台应力和能量吸收都增加,尤其是 I-WP 结构,其平台应力提升了 335.7%,能量吸收提升了 312.7%。

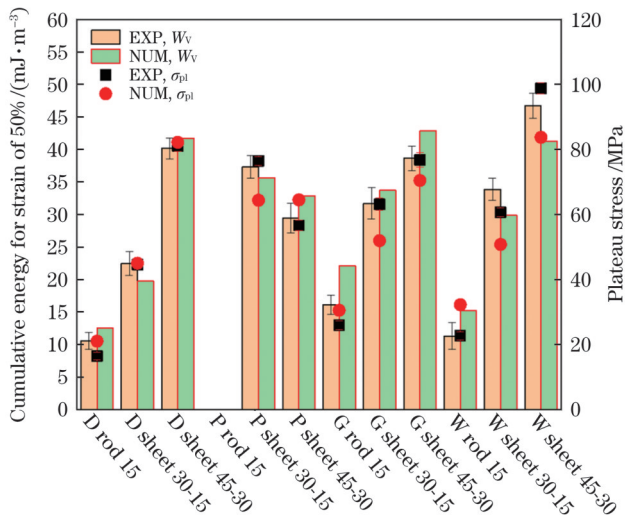


图 16 应变为 50% 时各结构的累积能量吸收和平台应力  
Fig. 16 Cumulative energy absorption and plateau stress of each structure for strain of 50%

## 4 结 论

对 4 种典型的 TPMS 结构进行曲面偏移设计,并将曲面偏移设计结构与支杆状结构的压缩性能进行了对比,同时建立了有限元仿真模型,利用 Johnson-Cook 力学模型揭示了点阵结构的断裂形式和变形行为,得出以下结论:

1) 在压缩过程中,支杆状点阵结构易出现 45° 剪切断裂现象;通过持续的曲面偏移能有效改善突变坍塌的变形行为,提升结构的强度和平台应力,进而获得更高的能量吸收性能。

2) 利用 Johnson-Cook 塑性和损伤模型建立的仿真分析方法能准确预测 TPMS 点阵结构的强度和能量吸收性能,较好地揭示结构的失效过程和断裂行为,从而为结构优化和性能提升提供重要指导。

3) 在几种点阵结构中,I-WP 通过曲面偏移获得的性能改善最为显著:相较于支杆点阵,面片点阵的力学强度提升了 244.9%,平台应力提升了 335.7%,能量吸收提升了 312.7%。这主要得益于面片偏移产生的变形模式的转变,避免了 45° 剪切断裂行为,最终通过层层坍塌的变形模式提升点阵结构的力学稳定性和平台应力。

4) 持续的曲面偏移对结构的性能提升在不同结构中得到了不同的结果: Diamond、Gyroid 和 I-WP 结构的压缩性能随着曲面偏移距离的增大而持续提升;在 Primitive 结构中,曲面偏移距离较小时性能明显提升,但持续的偏移会加剧塑性铰,使结构快速失效,降低了大偏移面片状结构的承载能力。

综上,本文所提曲面偏移设计和 Johnson-Cook 仿真模型为点阵结构的优化策略和分析方法提供了参考。今后将进一步开展 TPMS 点阵结构疲劳性能等方面的研究,以推动激光增材制造新型轻量化结构的发展。

## 参 考 文 献

- [1] Evans A G, Hutchinson J W, Fleck N A, et al. The topological design of multifunctional cellular metals[J]. *Progress in Materials Science*, 2001, 46(3/4): 309-327.
- [2] 范华林, 杨卫. 轻质高观点阵材料及其力学性能研究进展[J]. *力学进展*, 2007, 37(1): 99-112.  
Fan H L, Yang W. Development of lattice materials with high specific stiffness and strength[J]. *Advances in Mechanics*, 2007, 37(1): 99-112.
- [3] Kaur I, Singh P. State-of-the-art in heat exchanger additive manufacturing[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 178: 121600.
- [4] 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): 0202016.  
Zeng S J, Liu G, Li C S, et al. Porous structure design and mechanical properties analysis of femoral stem based on selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(2): 0202016.
- [5] 钦兰云, 金子心, 赵朔, 等.  $\alpha$  相织构对激光沉积制造 TC4 合金力学行为影响研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0102007.  
Qin L Y, Jin Z X, Zhao S, et al. Effect of  $\alpha$  texture on mechanical behavior of TC4 alloy fabricated by laser deposition manufacturing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0102007.
- [6] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500002.  
Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500002.
- [7] 刘伟, 李能, 周标, 等. 复杂结构与高性能材料增材制造技术发展[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(20): 128-151, 159.  
Liu W, Li N, Zhou B, et al. Progress in additive manufacturing on complex structures and high-performance materials[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(20): 128-151, 159.
- [8] Kapfer S C, Hyde S T, Mecke K, et al. Minimal surface scaffold designs for tissue engineering[J]. *Biomaterials*, 2011, 32(29): 6875-6882.
- [9] Melchels F P W, Bertoldi K, Gabbriellini R, et al. Mathematically defined tissue engineering scaffold architectures prepared by stereolithography[J]. *Biomaterials*, 2010, 31(27): 6909-6916.
- [10] Giannitelli S M, Accoto D, Trombetta M, et al. Current trends in the design of scaffolds for computer-aided tissue engineering[J]. *Acta Biomaterialia*, 2014, 10(2): 580-594.
- [11] Garner E, Kolken H M A, Wang C C L, et al. Compatibility in microstructural optimization for additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 26: 65-75.
- [12] Liu F, Mao Z F, Zhang P, et al. Functionally graded porous scaffolds in multiple patterns: new design method, physical and mechanical properties[J]. *Materials & Design*, 2018, 160: 849-860.
- [13] Maskery I, Aremu A O, Parry L, et al. Effective design and simulation of surface-based lattice structures featuring volume fraction and cell type grading[J]. *Materials & Design*, 2018, 155: 220-232.
- [14] Afshar M, Anaraki A P, Montazerian H, et al. Additive manufacturing and mechanical characterization of graded porosity scaffolds designed based on triply periodic minimal surface architectures[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2016, 62: 481-494.
- [15] Han C J, Li Y, Wang Q, et al. Continuous functionally graded porous titanium scaffolds manufactured by selective laser melting for bone implants[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2018, 80: 119-127.
- [16] Montazerian H, Davoodi E, Asadi-Eyvand M, et al. Porous scaffold internal architecture design based on minimal surfaces: a compromise between permeability and elastic properties[J]. *Materials & Design*, 2017, 126: 98-114.
- [17] Yang L, Li Y, Wu S Q, et al. Tailorable and predictable mechanical responses of additive manufactured TPMS lattices with graded structures[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022,

- 843: 143109.
- [18] Liu Z Q, Gong H, Gao J Z, et al. Topological design, mechanical responses and mass transport characteristics of high strength-high permeability TPMS-based scaffolds[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 217: 107023.
- [19] Nguyen-van V, Choudhry N K, Panda B, et al. Performance of concrete beam reinforced with 3D printed bioinspired primitive scaffold subjected to three-point bending[J]. *Automation in Construction*, 2022, 134: 104060.
- [20] Zhang Z, Jones D, Yue S, et al. Hierarchical tailoring of strut architecture to control permeability of additive manufactured titanium implants[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2013, 33(7): 4055-4062.
- [21] Liu F, Zhou T Y, Zhang T, et al. Shell offset enhances mechanical and energy absorption properties of SLM-made lattices with controllable separated voids[J]. *Materials & Design*, 2022, 217: 110630.
- [22] Johnson G R, Cook W. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C]// *The 7th International Symposium on Ballistics*. [S.l.:s.n.], 1983: 541-547.
- [23] 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 and Engineering: A*, 2018, 725: 350-358.
- [24] Zhao M, Zhang D Z, Liu F, et al. Mechanical and energy absorption characteristics of additively manufactured functionally graded sheet lattice structures with minimal surfaces[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 167: 105262.
- [25] Yan C Z, Hao L, Hussein A, et al. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 62: 32-38.
- [26] Kelly C N, Francovich J, Julmi S, et al. Fatigue behavior of As-built selective laser melted titanium scaffolds with sheet-based gyroid microarchitecture for bone tissue engineering[J]. *Acta Biomaterialia*, 2019, 94: 610-626.
- [27] 张馨月. 基于三周期极小曲面的 SLM 成形夹芯结构研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- Zhang X Y. Design method and performance study of SLM formed sandwich structures based on triply periodic minimal surfaces[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.

## Optimization of Structure and Performance of Minimal Surface Lattice Formed by Selective Laser Melting

Liu Fei<sup>1,2</sup>, Tang Yichuan<sup>1</sup>, Xie Haiqiong<sup>1,2\*</sup>, Zhang Chenke<sup>2</sup>, Chen Junjie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*School of Advanced Manufacturing Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;*

<sup>2</sup>*Sports Medicine Center, First Affiliated Hospital of the Army Medical University, Chongqing 400037, China*

### Abstract

**Objective** Because of their excellent performance with lightweight and multifunctional integration, lattice structures have been widely used in aerospace, heat exchangers, and bone tissue engineering. Triply periodic minimal surface (TPMS) lattice structures with smooth surface morphology reduce the stress concentration under load, exhibiting higher specific strength, specific stiffness, and energy absorption capacity. Therefore, TPMS has potential applications in lightweight and energy-absorbing buffer devices in the aerospace industry. Sheet and network lattices have been proposed to utilize their advantages, which require further performance improvements with an optimal design. Thus, there is an urgent need to develop a reliable simulation analysis method to reveal the mechanism of structural strengthening and determine optimization direction.

**Methods** In this study, a new surface offset method was developed to design a TPMS lattice structure (Fig. 2) to improve mechanical properties and energy absorption. Diamond, Primitive, Gyroid, and I-WP TPMS lattice structures (Fig. 3) were optimized using this method and fabricated via selective laser melting (SLM). The compression tests of the lattice structures were repeated three times to reveal the mechanical properties. In comparison, finite element models with the Johnson-Cook model were established to reflect the deformation behaviors of the lattices and predict their mechanical strength, as confirmed by the experimental results. In this study, the influence of surface offset design on the mechanical properties and energy absorption capacity under quasistatic compression was investigated, which provided insight into the optimization strategies and analysis methods of lattice structures.

**Results and Discussions** The experimental and simulated compression stress-strain curves show that the finite element analysis method based on the Johnson-Cook model can precisely replicate the experimental results, including similar linear growth, stress drop, and stress plateau stages. The deviations in the mechanical strength of the lattice structures obtained via the experiment and simulation are all less than 14%, particularly for sheet structures, whose ultimate strength error is within 2%. This indicates that the finite element method can accurately predict the mechanical properties and deformation behavior of lattice structures.

The mechanical properties of the four lattice types were improved significantly using the proposed design method, as can be seen from Table 4 showing the critical mechanical properties of all the samples. With the continuous increase in the surface offset, the mechanical strength of Diamond, Gyroid and I-WP lattices increase by 101.5%–244.9% owing to the increase in the second moment of area. Among them, the I-WP sheet 45-30 exhibits the most outstanding performance, demonstrating an increased mechanical strength (111.64 MPa) compared with that of the rod lattice (32.37 MPa). However, Primitive lattices significantly differ from the



other three types. The surface offset helps to improve the stability of the Primitive lattices, avoiding the sudden collapse of the entire structure. The mechanical strength was increased by 47.1%, but continuous growth of the shell offset reduced the mechanical properties owing to the weakening effect of the plastic hinges.

The cumulative energy absorption (Figs. 15 and 16) reveals that the surface offset design effectively improves the energy absorption capacity of the lattice structure. Specifically, Diamond, Gyroid, and I-WP continuously improve the cumulative energy absorption by 139.8%, 279.2%, and 312.9%, respectively, compared with the corresponding rod-type lattices. Similar to strength, the most outstanding performances are contributed by the I-WP sheet 45-30, whose cumulative energy absorption increases from 11.32 to 46.72 MJ/m<sup>3</sup>, and the plateau stress ( $\sigma_{pl}$ ) increases from 22.68 to 98.81 MPa.

These results highlight the optimization effect of the surface offset on the energy absorption capacity. The shear failure mode of rod-shaped lattice structure changes into the deformation behavior of layer-by-layer collapse using this method. The large-scale collective collapse of lattice structures can be prevented to obtain a smooth, continuous stress-strain curve, which increases the plateau stress of the sheet lattices.

**Conclusions** 1. In compression experiments, the rod lattice structure is prone to a 45° shear fracture. A continuous surface offset can effectively improve the deformation behavior of an abrupt collapse, enhance the mechanical strength and plateau stress, and increase the energy absorption capacity.

2. The simulation analysis method based on the Johnson-Cook plasticity and damage model can accurately predict the mechanical strength and energy absorption performance of the TPMS lattice structure, revealing the failure process and fracture behavior of the lattices. This provides essential guidance for structural optimization and performance improvement.

3. The I-WP sheet exhibits the best performance among the four typical TPMS lattice structures through surface offset. Compared with rod-shaped lattices, the mechanical strength, plateau stress, and energy absorption of sheet-shaped lattices increased by 244.9%, 335.7%, and 312.7%, respectively. This is mainly attributed to the transformation of the deformation mode contributed by the surface offset, which minimizes the 45° shear fracture behavior and improves the plateau stress of the lattice structure, accompanied by a layer-by-layer collapse for deformation optimization.

In summary, the surface offset design and Johnson-Cook simulation model were adopted for TPMS lattices in this study, which provides a reference for optimization strategies of lattice structures. Further studies on the fatigue performance of TPMS lattice structures should be conducted to facilitate the development of new lightweight structures in laser additive manufacturing.

**Key words** laser technique; lattice structure; selective laser melting; triply periodic minimal surface; finite element simulation; deformation behaviors