

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2025.20230274

三角函数密度梯度蒙皮点阵结构设计及力学性能

郝博^{1,2}, 赵玉欣², 徐新岩²

(1. 东北大学航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

2. 东北大学秦皇岛分校控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 基于螺旋(gyroid)型的3周期最小曲面(TPMS), 针对目前研究中梯度点阵结构梯度变化规律较为单一的问题, 提出了正弦函数平方和余弦函数平方密度梯度蒙皮点阵结构, 并采用选择性激光熔化(SLM)技术制备了钛合金(Ti-6Al-4V)样件. 为研究其力学性能对样件进行了有限元分析和压缩实验, 二者结果误差小于6.3%. 以传统线性密度梯度蒙皮点阵结构为对照, 将3种结构的力学性能、变形行为及能量吸收特性进行了对比分析. 结果发现, 3种结构中, 余弦函数平方蒙皮点阵结构承载性能最好, 正弦函数平方蒙皮点阵结构能量吸收能力最强. 通过优化蒙皮点阵结构内部相对密度分布, 可以提高其力学性能和能量吸收能力.

关键词: 螺旋型; 3周期最小曲面; 密度梯度; 蒙皮点阵结构; 压缩实验

中图分类号: TH164 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)03-0069-11

Design and Mechanical Performance of Triangular Function Density Gradient Skin Lattice Structures

HAO Bo^{1,2}, ZHAO Yu-xin², XU Xin-yan²

(1. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion System, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China. Corresponding author: ZHAO Yu-xin, E-mail: 418715530@qq.com)

Abstract: Based on the gyroid three period minimum surface (TPMS), a sine function square and cosine function square density gradient skin lattice structure was proposed to address the problem of a relatively single gradient variation law in gradient lattice structures in current research. Titanium alloy (Ti-6Al-4V) sample was prepared using selective laser melting (SLM) technology. Finite element analysis and compression experiments were conducted on the sample to study its mechanical properties, and the error between the two results was less than 6.3%. Compared with the traditional linear density gradient skin lattice structures, the mechanical properties, deformation behavior, and energy absorption characteristics of the three structures were compared and analyzed. It was found that among the three structures, the cosine function square skin lattice structure had the best load-bearing performance, while the sine function square skin lattice structure had the strongest energy absorption capacity. By optimizing the internal relative density of the skin lattice structure, its mechanical properties and energy absorption capacity can be improved.

Key words: gyroid; three period minimum surface; density gradient; skin lattice structure; compression experiment

随着增材制造(AM)技术的出现和发展,不同的蒙皮点阵结构可以通过控制点阵结构来制造,以满足更先进的要求和应用^[1-2]. 选择性激光熔化(SLM)^[3]作为AM技术的典型代表由于其逐

层加工原理而具有的控制点阵结构的能力^[4],使其成为用于制造蒙皮点阵结构的理想工艺. Gibson等^[5]研究表明,晶格结构的力学性能与其相对密度密切相关. 因此,具有相对密度梯度变化

收稿日期: 2023-09-25

基金项目: 装备预研领域基金快速扶持项目(80923020104).

作者简介: 郝博(1963—),男,辽宁沈阳人,东北大学教授,博士生导师.

的晶格结构,即功能梯度(FG)晶格结构受到了人们的关注.

Maskery 等^[6]利用 SLM 技术使用 Al-Si-10Mg 材料制造了梯度体心立方(BCC)晶格结构,通过对样品压缩,发现 FG 晶格结构比均匀晶格结构能够吸收更多的能量.Choy 等^[7]研究了支柱直径沿载荷方向连续变化的 FG 立方和蜂窝晶格结构,压缩试验表明,由于独特的逐层变形,分级结构的能量吸收行为得到了改善.杨磊等^[8]通过数学建模的方法设计了 2 种周期线性渐变和 2 种双向(矩形)线性渐变的梯度结构,并分析了梯度设计对极小曲面点阵结构力学特性的影响,结果表明,与均匀结构对比,梯度结构的弹性模量提高了 10%.Tan 等^[9]设计并加工了模仿人体天然骨骼结构的径向梯度晶格结构(RGLS),该结构在 x 和 y 方向上,由中心到四周设置了 80%~40% 的线性梯度,对 RGLS 样品的形貌、力学性能、变形行为和生物相容性进行了表征,并与均匀晶格结构中的 RGLS 样品进行了比较,结果表明 RGLS 的抗压屈服强度为 71.5 MPa,远高于均匀样品的抗压屈服强度(46.5 MPa).Nian 等^[10]提出了一种新颖的基于自然启发的功能梯度结构填充防护结构(FGLPS),结构分为 2 种不同的梯度模式(即增加梯度模式和分区设计的递减梯度模式),该种设计方法具有降低冲击载荷、延长冲击时间的作用,特别是通过分区梯度设计,可使船舶撞击桥墩时产生的峰值冲击力降低 60.01%.

目前,关于梯度点阵结构的研究较多,但在密度梯度蒙皮点阵结构的设计中,密度梯度的变化规律较为单一,主要为周期函数规律、一次函数规律或两者的组合,以高次周期函数为梯度规律的密度梯度蒙皮点阵结构的研究较少.因此,本文以线性密度梯度蒙皮点阵结构和三角函数平方密度梯度蒙皮点阵结构为主要研究对象,研究不同梯度规律下蒙皮点阵结构的力学性能.

1 点阵结构的设计与建模

1.1 Gyroid 型晶胞设计方法

Gyroid 是 3 周期最小曲面(TPMS)中的一个成员,具有优异的自支撑和几何各向同性的特征^[11-12].本文所述的 gyroid 晶胞结构由 TPMS 等式获得.在 Melchels 等^[13]的研究基础上,考虑到单胞的形态,本文通过调节参数来修改孔的形状和大小.以 gyroid 型晶胞为例,具有可调参数的

gyroid 型 TPMS 表达式为

$$\begin{aligned} \varphi_G(x, y, z) = & \cos(\alpha x) \sin(\beta y) + \\ & \cos(\beta y) \sin(\gamma z) + \cos(\gamma z) \sin(\alpha x) + \\ & 0.08 [\cos(2\alpha x) \cos(2\beta y) + \\ & \cos(2\beta y) \cos(2\gamma z) + \\ & \cos(2\gamma z) \cos(2\alpha x)] + R_G = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

式中:参数 α, β, γ 与 x, y, z 方向上的单元尺寸相关,较大的参数导致较小的单元尺寸,因此选用不同的 α, β 和 γ 可以获得不同的晶胞尺寸;参数 R_G 用于调整 TPMS 晶胞结构的相对密度.表 1 为本文的设计参数及物理意义.

表 1 设计参数及物理意义

Table 1 Design parameters and physical significance

设计参数	物理意义
α, β, γ	控制晶胞大小的参数
R_G	相对密度参数,下标表示 gyroid

1.2 相对密度

一般情况下,基于 TPMS 等式生成的晶胞结构只是光滑的表面,没有体积.因此使用相对密度函数实现 TPMS 晶胞结构的实体化.相对密度 ρ^* 可采用三重积分法^[14]计算.

$$\begin{aligned} \rho^* = & \frac{\iiint_{\Omega} dv}{(x_{\max} - x_{\min})(y_{\max} - y_{\min})(z_{\max} - z_{\min})}, \quad (2) \\ \Omega = & \{(x, y, z) | \varphi_G(x, y, z) \leq 0, x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, \\ & y_{\min} \leq y \leq y_{\max}, z_{\min} \leq z \leq z_{\max}\}. \end{aligned} \quad (3)$$

当 $\varphi_G(x, y, z) \leq 0$ 时,TPMS 晶胞的相对密度为 0~50%;当 $\varphi_G(x, y, z) \geq 0$ 时,TPMS 晶胞的相对密度为 50%~100%.max 和 min 分别表示结构的最大和最小空间区域.对于均匀点阵结构,在一个周期单位中, x, y, z 的最大值和最小值的差等于 2π ,且在均匀点阵结构中 R_G 为常数.对于密度梯度点阵结构,相对密度 ρ^* 是 R_G 的线性函数,相对密度 ρ^* 可用不同的 R_G 值计算.两者之间的计算关系可由式(4)确定.

$$\rho^* = -31.93R_G + 49.19. \quad (4)$$

对于 gyroid 型晶胞, ρ^* 与 R_G 之间存在线性关系,如图 1 所示.将 R_G 定义为位置向量的函数,不仅可以得到均匀的点阵结构,还可以生成梯度点阵结构.

通过控制式(1)中的参数 α, β, γ 和 R_G 可以建立不同晶胞大小及相对密度的蒙皮点阵结构.同时,不同的 R_G 表达式可以获得不同相对密度梯度的点阵结构.线性密度梯度点阵结构为

$$R_G = kz + R_0. \quad (5)$$

式中: k 是控制晶胞密度梯度变化速率的参数, k 越大,晶胞密度梯度变化越快; R_0 是控制晶胞密度大小的常数,与 R_G 成正比,与晶胞密度大小有关,调整 R_0 的大小即可得到不同密度的晶胞结构.此外,本文提出了一种正弦函数平方密度梯度点阵结构,其表达式如式(6)所示:

$$R_G = k \sin^2(\delta z) + R_0. \quad (6)$$

式中, δ 是控制晶胞密度梯度变化周期的参数, δ 越小,晶胞密度梯度变化周期越长.

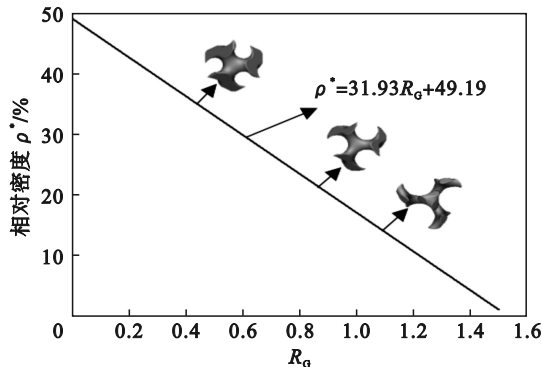


图1 参数 R_G 与相对密度 ρ^* 的线性关系

Fig. 1 Linear relationship between parameter R_G and relative density ρ^*

式(6)将 R_G 定义为位置 z 的函数,通过控制晶胞密度梯度变化速率和周期,可以在 z 方向上建

立按正弦平方函数规律进行密度梯度变化的点阵结构.以式(6)为基础,可以建立起 x, y, z 方向上按正弦函数规律进行密度梯度变化的点阵结构.用余弦函数平方替代正弦函数平方,则可以在 x, y, z 方向上按余弦函数规律建立密度梯度变化的点阵结构,如式(7)所示:

$$R_G = k \cos^2(\delta z) + R_0. \quad (7)$$

式(5)~式(7)所用参数如表2所示.

表2 3种梯度点阵结构表达式所用参数
Table 2 Parameters of three gradient lattice structure expressions

设计参数	线性点阵结构	正弦函数平方点阵结构	余弦函数平方点阵结构
k	2	-0.3	-0.3
δ	—	0.11	0.12
R_0	-0.82	-0.72	-0.74

1.3 建立点阵结构模型

根据上述正弦函数平方和余弦函数平方密度梯度点阵结构极小曲面隐函数表达式,使用MATLAB R2019b生成2种三角函数密度梯度点阵结构模型.为了进一步分析三角函数密度梯度点阵结构的力学性能,同时建立了线性梯度点阵结构进行对比分析.3种点阵结构模型如图2所示.

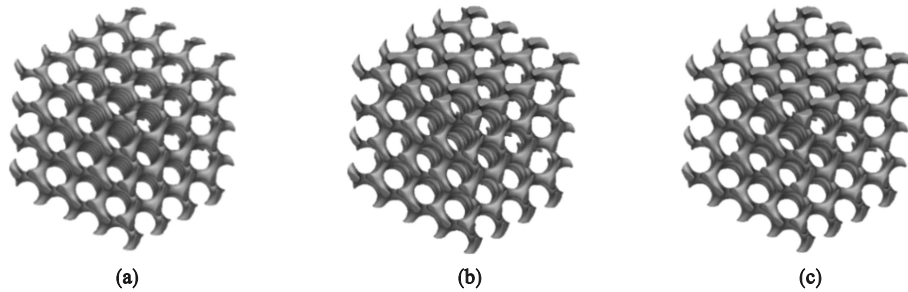


图2 Gyroid点阵结构模型

Fig. 2 Gyroid lattice structure models

(a)一线性密度梯度; (b)一正弦函数平方密度梯度; (c)一余弦函数平方密度梯度.

图2a~图2c分别为线性、正弦函数平方和余弦函数平方密度梯度的点阵结构模型.模型对应的相对密度均为0.15.单胞最小外接立方体尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$.阵列之后点阵结构最小外接立方体尺寸为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$, x, y 和 z 方向均排列4个单胞,点阵共有64个单胞,如图2所示.点阵模型建立后,使用Hypermesh软件对STL格式的点阵模型进行前处理和网格划分,为进行下一步有限元分析作准备.

2 有限元分析与实验

2.1 材料

钛合金因具有强度高、重量轻、耐腐蚀性高、导热系数低、生物相容性好等特点,已被广泛应用于军事、航空、汽车、医疗等领域.然而,由于钛合金切削性能差,与氧的化学亲和力高,采用传统加工模式时,存在材料利用率低、交货周期长、

生产成本高等问题.目前,基于材料逐层堆叠的增材制造技术可以实现复杂结构件的快速成型制作,可生产复杂几何形状的零件具有近净成型和低成本、高效率的特点,从而可以很好地解决上述问题.因此,钛合金的增材制造技术发展迅速.本文选用Ti-6Al-4V钛合金作为制作蒙皮和点阵结构的材料.Ti-6Al-4V的机械性能如表3所示.

表3 Ti-6Al-4V的机械性能
Table 3 Mechanical properties of Ti-6Al-4V

结构	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	杨氏模量/GPa	泊松比
蒙皮点阵	4 430	0. 118	0. 3

2.2 网格划分方法

在网格设置中,使用非结构化网格进行网格构建.为了提高计算精度,在点阵结构部分生成较细的网格.对于模型上下部分蒙皮区域,生成相对较粗的网格以节省计算时间和成本,gyroid结构网格细节如图3所示.平均正交质量为0.739,最大偏斜度为0.73,平均偏斜度为0.216 4,长宽比为2.690 3,平均扭曲因子为0.018 016.独

立网格验证中,选择线性密度梯度的gyroid点阵结构模型,比较网格数为 0.77×10^6 , 1.07×10^6 , 1.91×10^6 , 2.53×10^6 时的初次破坏载荷,结果如表4所示.对比结果表明,网格数为 1.91×10^6 和 2.53×10^6 时的初次破坏载荷及初次破坏位移的相邻数据误差小于1%.为保证计算结果的准确性并节省计算资源,在后续计算中,其他模型网格尺寸和设置均与线性密度梯度的gyroid点阵结构模型网格数相同,为 1.91×10^6 .

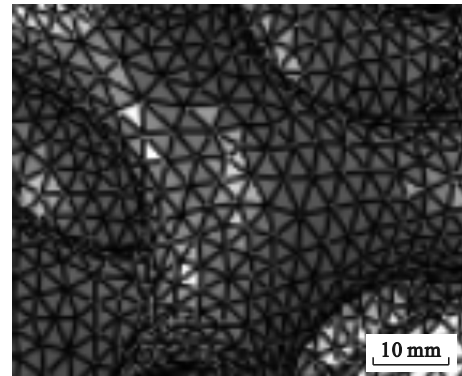


图3 网格细节

Fig. 3 Grid detail

表4 网格独立性验证
Table 4 Grid independence verification

网格数	初次破坏载荷/kN	相邻数据误差/%	初次破坏位移/mm	相邻数据误差/%
769 962	11. 756	—	0. 883	—
1 072 809	11. 985	1. 95	0. 901	2. 04
1 912 849	12. 114	1. 08	0. 912	1. 22
2 530 455	12. 02	0. 84	0. 919	0. 77

2.3 有限元分析模型

将划分网格后的点阵模型导入Materialise Magics软件中创建厚度为1 mm的蒙皮,并将蒙皮与点阵结构进行布尔运算,生成蒙皮点阵结构,进行有限元分析^[15],根据不同TPMS结构及不同相对密度,可获得不同壁厚的蒙皮点阵模型及其质量,其尺寸参数如表5所示.图4为相对密度为0.15的gyroid蒙皮点阵夹层结构模型和相同相对密度的gyroid蒙皮点阵结构有限元分析模型.图4a~图4c分别为线性、正弦函数平方和余弦函数平方密度梯度的gyroid蒙皮点阵结构模型,图4d~图4f分别为线性、正弦函数平方和余弦函数平方密度梯度的gyroid蒙皮点阵结构有限元分析模型.

为探究蒙皮点阵结构的力学性能,需要对如图4所示的几何模型进行压缩过程的有限元分析及实验验证.蒙皮点阵结构采用Ti-6Al-4V材

质,杨氏模量为118 GPa,泊松比为0.3.在上蒙皮的上表面和下蒙皮的下表面设置尺寸为 $15\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 的离散刚体平面,且上、下两离散刚体平面几何中心设置为参考点,以输出对应位置的数据结果.对上蒙皮施加均布载荷,采用显式动力学类型,分析步时间长度设置为0.000 24 s,设置历程输出位移和作用力.上、下两离散刚体平面对应蒙皮表面的接触设置为通用接触,接触面的切向摩擦系数设置为0.03,法向行为采用硬接触.将下离散刚体平面设置为完全固定,在上离散刚体平面上施加位移载荷,边界条件设置载荷位移为11 mm.所有模拟都在具有10核的Intel Core i7-8750H CPU,16 GB RAM上进行,求解每个有限元模型所花费的计算时间约为15 h.在有限元分析结果中,输出位移-载荷曲线,由位移-载荷曲线可获得2种蒙皮点阵结构发生破坏时的最大允许载荷.

表 5 蒙皮点阵结构尺寸参数
Table 5 Size parameters of the skin lattice structure

	mm
蒙皮点阵结构尺寸定义	数值
点阵结构的宽度	20
点阵结构的厚度	20
上、下面板质心间的距离	21
蒙皮点阵结构的长度	20
蒙皮厚度	1

有限元仿真分析中使用材料的塑性变形由 Johnson-Cook 塑性模型^[16]描述,该模型考虑了应变硬化、应变率和热软化,并且通常用于动态响应分析.根据该模型,屈服应力 σ_s 可以由式(8)表示.

$$\sigma_s = \left[A + B(\epsilon_c)^N \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_m - T_{room}} \right)^M \right] \quad (8)$$

式中: A, B, N, C 和 M 为常量,是从力学试验中获得的流变应力数据的相关参数; ϵ_c 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}_p$ 为等效塑性应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考等效塑性应变率; T 为样件温度, T_{room} 为室温; T_m 为熔化温度.

为了评估晶格结构的断裂行为,使用 Johnson-Cook 损伤模型.一旦失效单元超过极限值,则将其移除.断裂应变 ϵ_f 可由式(9)表示.

$$\epsilon_f = \left[D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma} \right] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \times \left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_{room}}{T_m - T_{room}} \right) \right] \quad (9)$$

式中: D_1, D_2 和 D_3 为与破坏应变和应力 3 轴度之间关系有关的损伤参数; D_4 和 D_5 分别为取决于应变率和温度的常数; σ^* 为应力 3 轴度,其定义是静应力与等效应力之比.

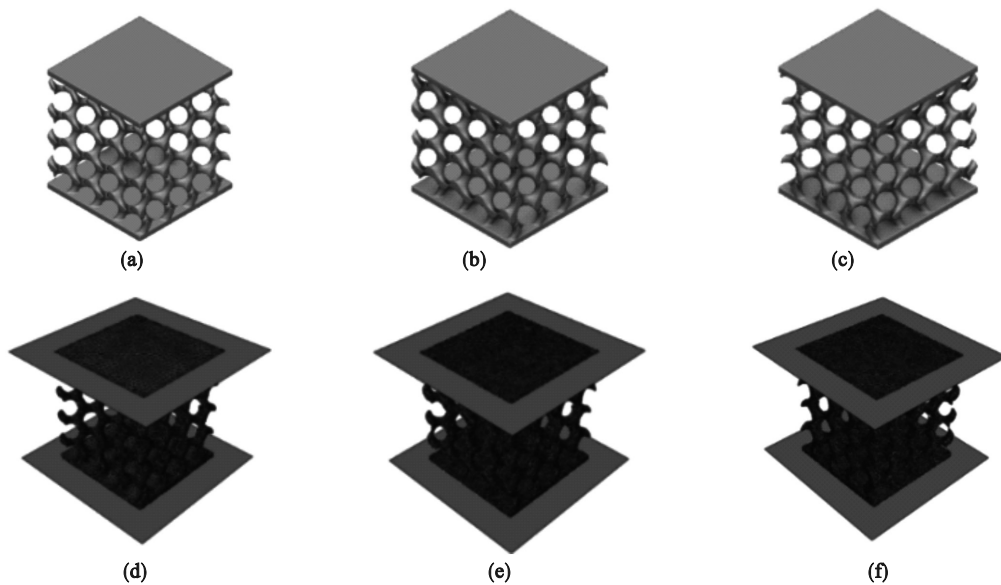


图 4 Gyroid 蒙皮点阵结构及有限元分析模型

Fig. 4 Gyroid skin lattice structures and finite element analysis models

(a) — 线性密度梯度; (b) — 正弦函数平方密度梯度; (c) — 余弦函数平方密度梯度; (d) — 线性密度梯度有限元分析模型; (e) — 正弦函数平方密度梯度有限元分析模型; (f) — 余弦函数平方密度梯度有限元分析模型.

本文所有压缩试验均在恒定应变速率和室温条件下进行,因此, C, M, D_4 和 D_5 被忽略.基于文献[17],本文使用 Ti-6Al-4V 的 Johnson-Cook 模型的输入常数,如表 6 所示.

表 6 Johnson-Cook 塑性本构参数
Table 6 Johnson-Cook plastic constitutive parameters

A/MPa	B/MPa	N	D_1	D_2	D_3
1 567	952	0.4	0.005	0.43	-0.48

本文主要针对均匀、正弦函数平方和余弦函数平方密度梯度的 gyroid 点阵结构在均匀载荷下的变形情况,并根据晶胞结构的不同,分析了 3 种结构的差异对蒙皮点阵结构承载能力的影响.

2.4 蒙皮点阵结构压缩实验

由于蒙皮点阵结构较为复杂,对加工工艺的要求很高,因此,制备技术成为点阵结构应用的关键.目前针对杆件类点阵结构可使用传统的冲孔网冲压法、熔模铸造法、拉伸网折叠法等,

而对于构型复杂的极小曲面结构几乎只能采用增材制造进行制备. 首先, 使用 MATLAB R2019b 软件生成 2 种蒙皮点阵结构的 stl 文件, 再使用 Materialise Magics 软件对 stl 文件进行模型缺陷检查和修复等预处理, 样件的整体尺寸为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 22\text{ mm}$. 制备样件所用材料为 Ti-6Al-4V 粉末, 化学组分如表 7 所示. 实验样品使用德国 Concept Laser M2 金属熔铸设备加工. 采用 SLM 技术完成, 制造完成后, 将样件进行热处理, 消除内应力, 并去除残留的松散粉末. 图 5 为 gyroid 蒙皮点阵结构样件, 样件的相对密度均为 0.15.

压缩试验中, 使用万能试验机 WDW-100 进行试验, 该机器最大实验载荷为 100 kN 的. 在压缩试验中控制中心压头的位移, 以 1 mm/min 的

速度进行加载, 当样件压缩高度为 11 mm 时停止实验. 通过摄像机对整个实验过程进行记录, 以便观察样件在实验中的变形行为. 如图 6a~图 6c 分别为线性、正弦函数平方和余弦函数平方密度梯度 gyroid 蒙皮点阵结构预压紧时的样件, 图 6d~图 6f 分别为线性、正弦函数平方和余弦函数平方密度梯度 gyroid 蒙皮点阵结构在应变为 0.5 时的样件. 由传感器及计算机自动记录压缩实验过程中的载荷及位移变化数据, 绘制载荷-位移变化曲线.

表 7 钛合金粉末化学组分(质量分数)
Table 7 Chemical composition of titanium alloy powder(mass fraction) %

元素	Al	Fe	V	Si	C	H	Ti
实测值	6.00	0.058	3.97	<0.01	0.013	0.0018	余量

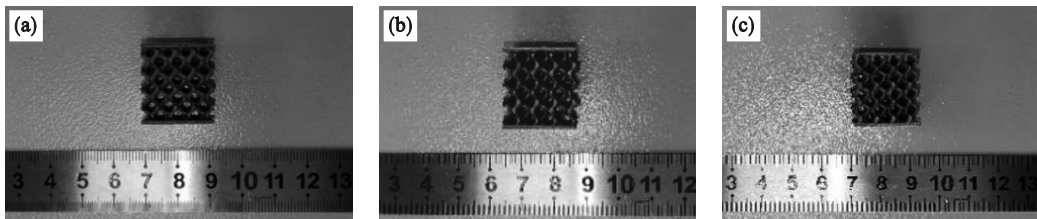


图 5 蒙皮点阵结构的钛合金样件

Fig. 5 Titanium alloy samples with the skin lattice structure

(a)—线性密度梯度; (b)—正弦函数平方密度梯度; (c)—余弦函数平方密度梯度.

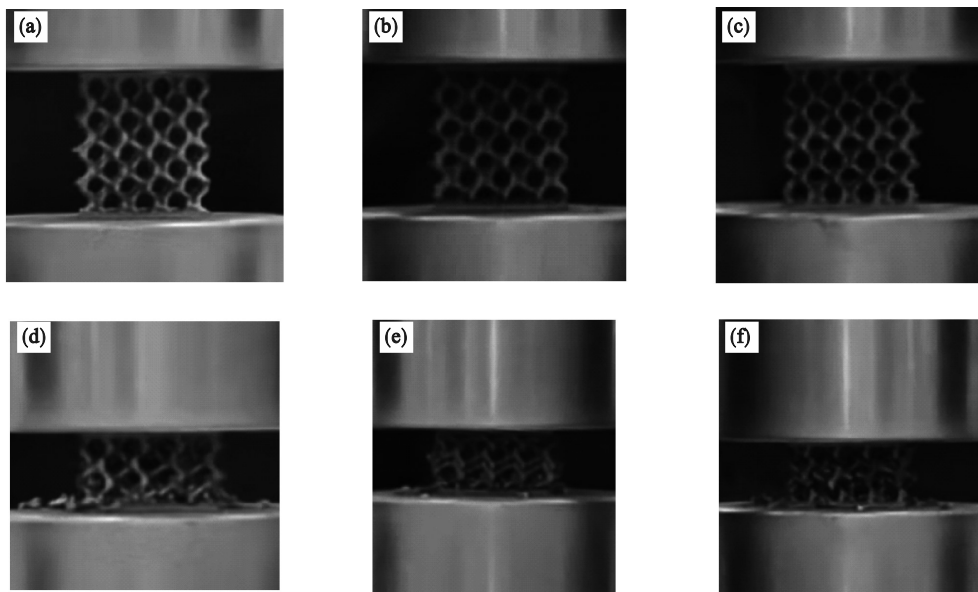


图 6 样件压缩实验

Fig. 6 Samples compression experiment

(a)—预压紧时的线性密度梯度样件; (b)—预压紧时的正弦函数平方密度梯度样件;
(c)—预压紧时的余弦函数平方密度梯度样件; (d)—应变为 0.5 时的线性密度梯度样件;
(e)—应变为 0.5 时的正弦函数平方密度梯度样件; (f)—应变为 0.5 时的余弦函数平方密度梯度样件.

3 结果和讨论

3.1 力学性能和变形行为

从压缩试验中获得3种样件的载荷-位移曲线如图7所示.蒙皮点阵结构的压缩过程存在3个不同的阶段:弹塑性阶段、波动阶段和致密化阶段.在图7中,对于3种梯度密度蒙皮点阵结构,在初始载荷峰值之后,观察到载荷值显著下降.这种趋势是由于点阵结构的突然破坏所致,即对于线性点阵结构,在载荷位移约0.8 mm时发生点阵结构的首次破坏;对于正弦函数平方点阵结构,在载荷位移约0.7 mm时发生点阵结构的首次破坏;对于余弦函数平方密度梯度的 gyroid 点阵结构,在载荷位移约1 mm时发生点阵结构的首次破坏.

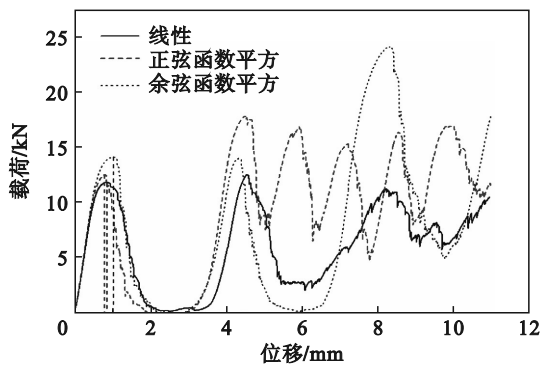


图7 3种蒙皮点阵结构的载荷-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of three types of skin lattice structures

在波动阶段,由图7可见,3种蒙皮点阵结构的载荷在一定的位移区间内上下波动.3种蒙皮点阵结构的载荷-位移曲线规律不同,这是由于3种蒙皮点阵结构内部材料分布不同,从而影响了蒙皮点阵结构晶格的机械特性.

对于线性蒙皮点阵结构,在压缩过程中,相对密度最小的单层晶胞结构最先被破坏,再逐层破坏相对密度稍大的单层晶胞结构,结构密度的变化较为均匀,因此线性蒙皮点阵结构载荷波动峰值较小.

正弦函数平方蒙皮点阵结构的中间层相对密度最小,因此中间层晶胞结构最先被破坏.晶胞结构被破坏之后,中间层的上、下两层由于相对密度相同,因此同时被破坏,导致载荷变化较为频繁,使载荷-位移曲线出现较多次的波动.正弦函数平方蒙皮点阵结构相对密度小的单层晶

胞结构层数较少,所以载荷峰值较大.

余弦函数平方蒙皮点阵结构有两层相对密度较小的单层晶胞结构,且在弹塑性阶段就被破坏.进入波动阶段后,余弦函数平方蒙皮点阵结构中两层相对密度较大的单层晶胞结构开始同时被破坏,很快到达致密阶段,因此余弦函数平方蒙皮点阵结构在波动阶段的载荷波峰较少且峰值较大.

如图8所示,线性蒙皮点阵结构从具有最低相对密度的顶层开始断裂,晶格样品以可预测的逐层方式依次塌陷.正弦函数平方蒙皮点阵结构中中间层最先被破坏,随后上、下两层.余弦函数平方蒙皮点阵结构最先破坏上部和下部两层相对密度较小的单层晶胞结构,再破坏中间层.所有蒙皮点阵结构样品的载荷-位移曲线中初始峰值较小,随后峰值越来越高.3种蒙皮点阵结构中,余弦函数平方蒙皮点阵结构的初始峰值最大.线性蒙皮点阵结构的最大峰值比初始峰值高约14%,正弦函数平方蒙皮点阵结构的最大峰值比初始峰值高约50%,余弦函数平方蒙皮点阵结构的最大峰值比初始峰值高约71%.这表明它们的承载能力有所增强,可以抵抗进一步的损伤.

3种点阵结构的机械性质列于表8中.其中,余弦函数平方蒙皮点阵结构能承受的载荷最大,为14.224 kN.同时,初次破坏位移最大,为1.024 mm.这是由于余弦函数平方蒙皮点阵结构在压缩起始时有两层相对密度较小的结构同时受力,结构被破坏前的弹性变形较大.线性蒙皮点阵结构初次破坏载荷最小,这是由于在3种结构中,线性蒙皮点阵结构最小相对密度层的点阵结构内部尺寸是最小的.同时,正弦函数平方蒙皮点阵结构初次破坏位移为0.802 mm,是3种结构中初次破坏位移最小的,这是由于压缩初期,相对密度较低的单层晶胞结构易受力变形,因此破坏位移最小.

3.2 仿真分析

3种密度的梯度蒙皮点阵结构在压缩载荷下的塑性变形仿真分析如图8所示,其中 ε 为应变.仿真分析结果显示,在加载方向上,3种密度梯度蒙皮点阵结构均从相对密度最低的单层开始坍塌,然后随相对密度由小到大而发生层层破碎,这与3种密度梯度蒙皮点阵结构样件的实验变形行为一致.

为了进一步揭示3种密度梯度蒙皮点阵结构的变形行为,本文对单层晶胞结构的破坏变形进

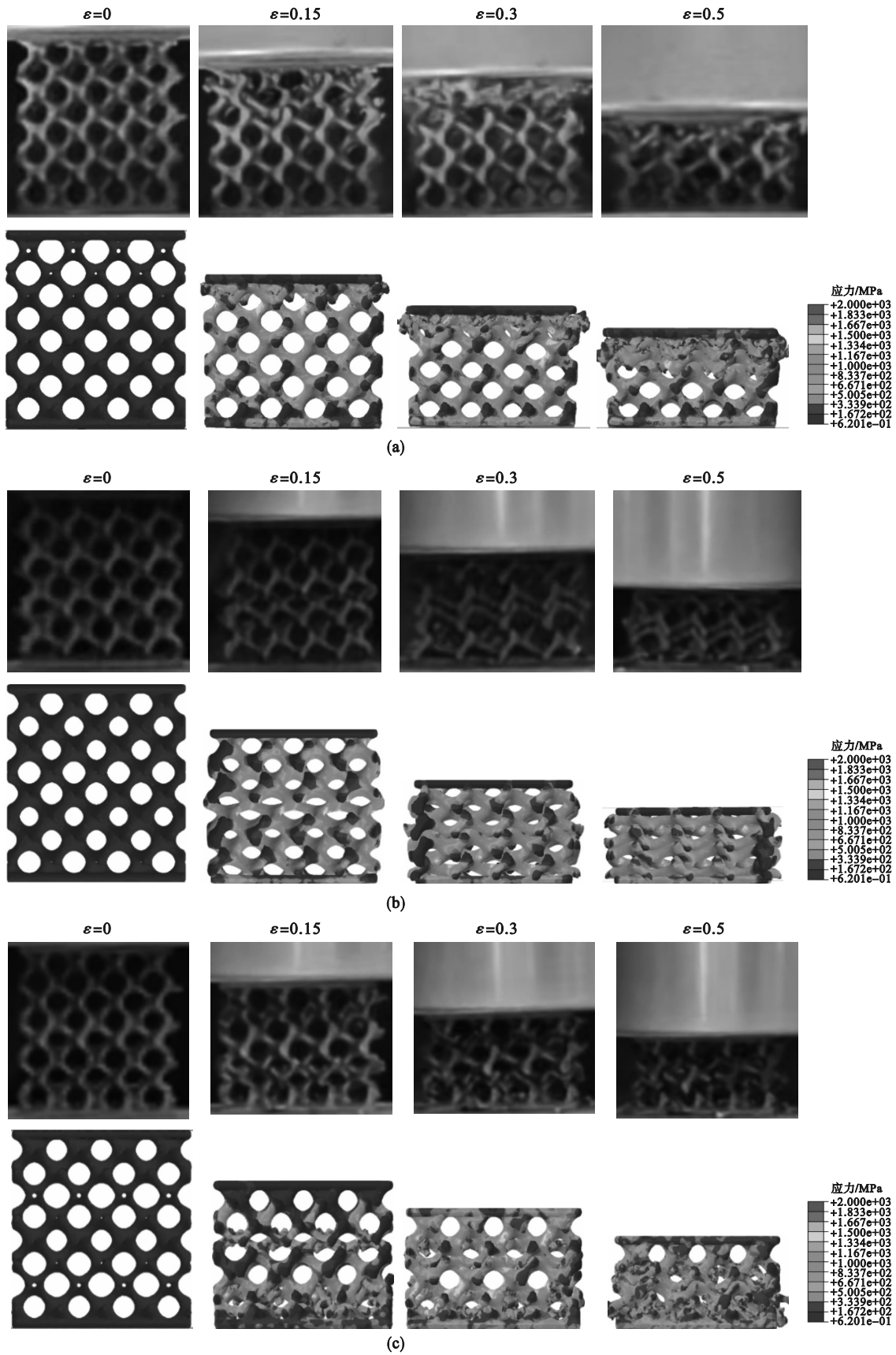


图8 实验与有限元分析应力云图

Fig.8 Experiments and finite element analysis stress cloud maps
 (a)—线性密度梯度蒙皮点阵结构; (b)—一正弦函数平方密度梯度点阵结构;
 (c)—一余弦函数平方密度梯度点阵结构.

行了研究.图9为在初始破坏载荷下单层晶胞结构的塑性变形,塑性变形主要分布在单层晶胞的顶部区域,由于周期性的内部材料分布,晶格单元可以沿着载荷方向进一步细分为若干子层.单层晶胞结构的破坏包括这些子层的崩溃.因此,对于具有连续相对密度变化的密度梯度蒙皮点阵结构样品,随着子层相对密度的逐渐变化,失效从具有最低相对密度的上部子层开始,并延续到具有较高相对密度的子层.

表 8 样品的机械性质
Table 8 Mechanical properties of the samples

点阵结构	初次破坏 载荷/kN	初次破坏 位移/mm
线性密度梯度	11.921	0.884
正弦函数平方密度梯度	12.623	0.802
余弦函数平方密度梯度	14.224	1.024



图 9 单层晶胞变形仿真图

Fig. 9 Simulation image of single layer cell deformation

对于线性蒙皮点阵结构,每层单胞的相对密度随层由上而下递增,因此在相对密度较小的单胞层发生完全破坏,最终导致坍塌层数和位移-载荷曲线上的载荷峰个数相同.

对于正弦函数平方蒙皮点阵结构,由于其相对密度较小的中间单胞层首先被破坏,随后两个相对密度稍大的最上层和最下层被破坏,由于最

上层和最下层不是完整单胞层,所以在破坏过程中压缩位移较小,之后再破坏相对密度更大的单胞层,其坍塌层数比线性蒙皮点阵结构多,其位移-载荷曲线上的载荷峰个数更多.

对于余弦函数平方蒙皮点阵结构,在初始破坏发生时,中上和 中下两个相对密度较小的单胞层被同时破坏,由于初始破坏的两单胞层为完整单胞层,同时破坏引起相邻单胞层变形,所以其变形位移较大,导致整体结构坍塌次数较少且快速形成致密层,其位移-载荷曲线上的载荷峰个数较少且在波动阶段后期载荷峰值较大.

综上所述,对于蒙皮点阵结构,通过优化内部相对密度分布,可以更精确地控制密度梯度点阵结构的变形行为.

为了验证有限元分析预测密度梯度蒙皮点阵结构的机械性能的可靠性,图 10 给出了有限元分析和实验的载荷-位移曲线.选取 3 种密度梯度点阵结构从开始受力到初次破坏阶段将 3 种密度梯度点阵结构机械性能的有限元分析结果和实验结果的相对误差总结在表 9 中.总体而言,通过对比实验数据和有限元分析结果可以看出,有限元模型可以正确地预测密度梯度蒙皮点阵结构的载荷-位移曲线的趋势,有限元仿真与实验数据吻合良好,误差小于 6.3%.图 10 中有限元模型的初次破坏最大载荷和初次破坏时的位移均高于实验结果,这是因为样品在增材制造过程中存在一定内部缺陷且存在应力集中,同时喷砂等处理会影响样件表面形态^[18],也会导致有限元模型的初次破坏最大载荷和初次破坏时的位移均高于实验结果.

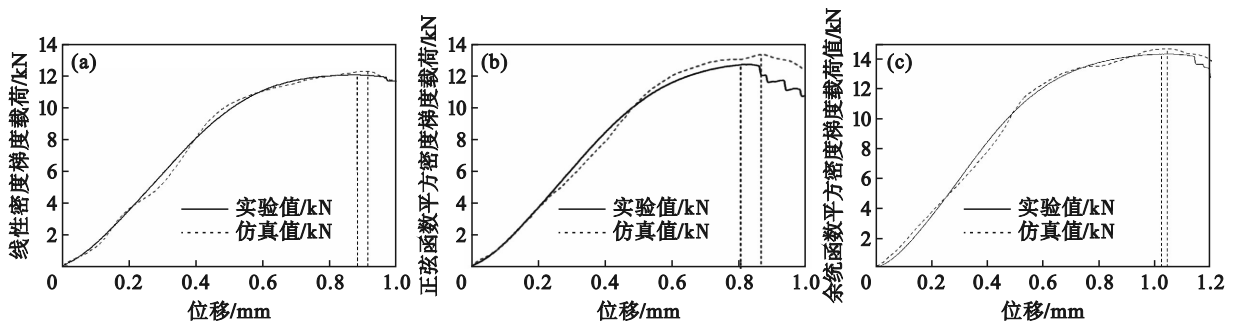


图 10 有限元分析和实验结果的载荷-位移曲线对比

Fig. 10 Comparison of load-displacement curves between finite element analysis and experimental results

(a)—线性密度梯度 gyroid 蒙皮点阵结构; (b)—正弦函数平方密度梯度 gyroid 蒙皮点阵结构;

(c)—余弦函数平方密度梯度 gyroid 蒙皮点阵结构.

3.3 能量吸收

晶格结构的能量吸收性能决定了其在能量

吸收和封装保护方面的潜在应用.图 11 为压缩变形下 3 种结构单位体积能量吸收曲线.可以看出,

通过蒙皮点阵结构的梯度设计,可以改善晶格样品的能量吸收性能.能量吸收性能的提高是由于相邻层之间平均相对密度存在差异,从而导致平行于加载方向的力学性能在压缩过程中发生变化.因此,力学性能逐渐增强的逐层变形行为使晶格样品吸收更多的能量.3种结构在压缩应变

为0.5时,单位体积样品吸收的能量累积量 W_v 如表10所示.在3种蒙皮点阵结构中,正弦函数平方梯度蒙皮点阵结构的 W_v 最高,为5.79 MJ/m³,比线性蒙皮点阵结构高8.2%.余弦函数平方梯度蒙皮点阵结构的 W_v 最低,为4.48 MJ/m³,比线性梯度蒙皮点阵结构的 W_v 低16.26%.

表9 蒙皮点阵结构有限元分析结果和实验结果的相对误差

Table 9 Relative errors between finite element analysis results and experimental results

类型	初次破坏位移			初次破坏载荷		
	实验值	仿真值	误差/%	实验值	仿真值	误差/%
线性密度梯度	0.884	0.912	3.4	11.923	12.114	1.6
正弦函数平方密度梯度	0.802	0.853	6.3	12.622	13.231	4.8
余弦函数平方密度梯度	1.024	1.041	1.2	14.224	14.583	2.5

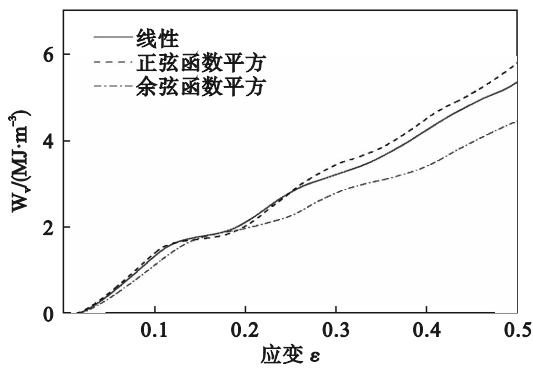


图11 3种蒙皮点阵结构单位体积能量吸收曲线

Fig. 11 Energy absorption curves per unit volume of three types of skin lattice structures

表10 当 $\varepsilon=0.5$ 时,单位体积样品吸收的能量累积量

Table 10 Accumulated energy absorbed per unit volume of the samples at $\varepsilon=0.5$

样品	线性蒙皮点阵结构	正弦函数平方蒙皮点阵结构	余弦函数平方蒙皮点阵结构
$W_v/(MJ \cdot m^{-3})$	5.35	5.79	4.48

3.4 应用分析

汽车转型升级带来新的机遇和挑战,正在催生先进的结构设计技术,不论是传统汽车还是纯电动汽车,在技术革新和创新设计过程中都会在降低油耗、节约能源或增加续航里程、安全防护等方面付出巨大努力,而新结构的研制与应用是有效途径之一,必将在汽车发展进程中担当重要角色,成为推动汽车快速发展的重要利器之一.结合蒙皮点阵材料特性,将其应用在汽车防撞梁吸能盒上^[19],如图12所示,可以将三角函数密度梯度蒙皮点阵结构在汽车上的应用作为一个研究方向.

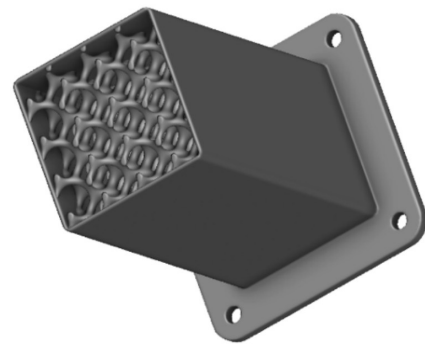


图12 正弦函数平方蒙皮点阵结构应用于汽车吸能盒

Fig. 12 Application of the sine function square skin lattice structure in automotive energy absorbing boxes

4 结 论

1) 对于线性蒙皮点阵结构,在压缩过程中被破坏结构的相对体积由上而下逐步增大,因此其载荷-位移实验曲线波动峰值较小.其最小相对密度层的点阵结构内部尺寸最小,因此在本文的3种结构中其初次破坏载荷最小.

2) 对于正弦函数平方蒙皮点阵结构,在压缩过程中其载荷变化较为频繁,其载荷-位移实验曲线出现较多次的波动.其相对密度小的单层晶胞结构层数较少,所以载荷峰值较大.在压缩初期,其相对密度较低的单层晶胞结构易受力变形,因此其初次破坏位移最小.

3) 与前2种结构相比,余弦函数平方蒙皮点阵结构的初次破坏载荷最大,其承载能力在3种结构中最好.波动阶段其载荷-位移实验曲线波动阶段峰值较大,表明其变形后的承载能力有所增强,可抵抗进一步的损伤.在压缩初期,有两层

相对密度较小的结构同时受力,结构被破坏前的弹性变形较大,因此其初次破坏位移最大。

4) 与线性蒙皮点阵结构相比,正弦函数平方蒙皮点阵结构吸能效果提高8.2%。余弦函数平方蒙皮点阵结构比线性蒙皮点阵结构的 W_v 低16.26%。三角函数密度梯度蒙皮点阵结构在汽车吸能盒上的应用有很大发展潜力。

参考文献:

- [1] Al-Ketan O, Rowshan R, Abu Al-Rub R K. Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 19: 167-183.
- [2] 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.
- [3] Thijs L, Verhaeghe F, Craeghs T, et al. A study of the micro structural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V [J]. *Acta Mater*, 2010, 58(9): 3303 - 3312.
- [4] Maskery I, Aboulkhair N T, Aremu A O, et al. Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices [J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 16: 24-29.
- [5] Gibson J L, Ashby F M. Cellular solids [M/OL]. Cambridge University Press: 1997-06-15. DOI: 10.1017/CBO9781139878326.
- [6] Maskery I, Aboulkhair N T, Aremu A O, et al. A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2016, 670: 264-274.
- [7] Choy S Y, Sun C, Leong K F, et al. Compressive properties of functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting [J]. *Materials & Design*, 2017, 131: 112-120.
- [8] 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.)
- [9] Tan C L, Deng C, Li S, et al. Mechanical property and biological behaviour of additive manufactured TiNi functionally graded lattice structure [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2022, 4(4): 206-213.
- [10] Nian Y Z, Wan S, Wang X, et al. Study on crashworthiness of nature-inspired functionally graded lattice metamaterials for bridge pier protection against ship collision [J]. *Engineering Structures*, 2023, 277: 115404.
- [11] 杨泽凌, 徐仰立. 激光选区熔化成形拓扑优化梯度点阵结构的抗压性能研究 [J]. 应用激光, 2023, 43(5): 1-10.
(Yang Ze-ling, Xu Yang-li. Compressive properties of functionally grade lattice structures fabricated by selective laser melting [J]. *Applied Laser*, 2023, 43(5): 1-10.)
- [12] Ahmadi S M, Campoli G, Amin Yavari S, et al. Mechanical behavior of regular open-cell porous biomaterials made of diamond lattice unit cells [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2014, 34: 106-115.
- [13] 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.
- [14] Yang S D, Lee H G, Kim J. A phase-field approach for minimizing the area of triply periodic surfaces with volume constraint [J]. *Computer Physics Communications*, 2010, 181(6): 1037-1046.
- [15] 张坤伦, 潘锋, 韩勇, 等. 短纤维增强复合材料的力学性能仿真研究 [J]. 机械设计与制造, 2020, 358(12): 212-215, 220.
(Zhang Kun-lun, Pan Feng, Han Yong, et al. Simulation study on mechanical properties of short fiber reinforced composites [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020(12): 212-215, 220.)
- [16] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1983, 21: 541-548.
- [17] 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.
- [18] Ravari K M, Kadkhodaei M, Badrossamay M, et al. Numerical investigation on mechanical properties of cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014, 88: 154-161.
- [19] 熊凯旋. 汽车吸能盒正面碰撞的有限元分析及优化 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2018.
(Xiong Kai-xuan. Finite element analysis and optimization of front impact of automobile crash box [D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2018.)