

密度梯度的IWP点阵结构力-能协同响应

王广阳¹ 纪小刚^{1,2*} 牛国法¹ 梅剑驰¹

1. 江南大学机械工程学院, 无锡, 214122

2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡, 214122

摘要:三周期极小曲面点阵结构是一种基于数学曲面的轻量化结构,广泛应用于增材制造领域,其中IWP(I-wrapped package)因轻质高强度适用于航天轻量化设计,且因力学性能可调控具有医用潜力。设计了一系列相对密度相同的IWP点阵结构,其中密度梯度包含线性、正弦函数和余弦函数梯度。为揭示梯度设计的优化潜力,对均匀点阵结构和梯度结构进行对比分析,利用数字光处理技术制备点阵结构,通过压缩试验对各结构的力学响应、吸能响应以及应力分布展开研究,优选出最佳的力-能协同响应结构,并通过有限元仿真验证压缩试验的可靠性。结果表明,对于各梯度结构的投影关系曲线,其峰值变化规律与构造的梯度函数的单调性高度一致;正弦点阵(SIN)结构具有优异的力-能协同响应特性,承载高应力的同时可协同进行稳定吸能,当达到致密化应变时,SIN结构每单位体积吸收的能量相较于均匀结构提高了17.65%。

关键词:三周期极小曲面;密度梯度;点阵结构;力-能协同响应;数字光处理技术

中图分类号: TB34; TP391.73

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.01.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Density Gradient IWP Lattice Structural Force-energy Synergistic Response

WANG Guangyang¹ JI Xiaogang^{1,2*} NIU Guofa¹ MEI Jianchi¹

1.School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu, 214122

2.Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment Technology, Wuxi, Jiangsu, 214122

Abstract: TPMS lattice structures were a type of lightweight structure based on mathematical surfaces, which widely used in additive manufacturing. Among them, the I-wrapped package(IWP) demonstrated suitability for aerospace lightweighting due to the combination of low mass and high strength, while the tunable mechanics properties conferred potential for medical applications. Therefore, a series of IWP lattice structures were designed with the same relative density, where the density gradients included linear, sine, and cosine function gradients. To reveal the optimization potential of gradient design, comparative analyses were conducted between uniform lattice structures and gradient structures. DLP technology was employed to produce lattice structures, and compression tests were performed to study mechanics response, energy absorption response, and stress distribution of each structure, ultimately selecting the best force-energy synergistic response structure and validating the reliability of the compression tests through finite element simulation. The results indicate that for the projection relationship curves of each gradient structure, the peak variation patterns are highly consistent with the monotonicity of the constructed gradient functions. The sine lattice(SIN) structure demonstrates excellent force-energy synergistic response, bearing high stress while stable energy absorption, with the energy absorbed per unit volume of the SIN structure increasing by 17.65% compared to uniform structures when reaching densification strain.

Key words: triply periodic minimal surface(TPMS); density gradient; lattice structure; force-energy synergistic response; digital light processing(DLP) technology

0 引言

近年来增材制造技术在高度复杂结构上的应

用发展迅速^[1-2],其中点阵结构在轻量化设计中凭借其独特的几何构型展现出卓越的力学性能与材料利用效率。这种结构通过精确的空间拓扑优化,可实现高比强度与高比刚度的完美结合,在确保结构承载能力的同时显著减小材料使用量^[3-4]。根据结构拓扑模型,可将拓扑优化方法分为基于

收稿日期:2025-04-01

基金项目:国家自然科学基金(52175234, 51105175);江苏省“六大人才高峰”项目(JXQC-006)

密度或单元描述的拓扑优化和基于边界演化的拓扑优化^[5-8]。相较于均匀点阵结构,基于密度的拓扑优化更能发挥出结构和材料的潜能^[9]。

三周期极小曲面(triply periodic minimal surface, TPMS)结构具有零平均曲率、均匀的应力分布等特性,是结构吸能设计的理想多孔结构。曾元辉等^[10]发现密度梯度W和P点阵结构的刚度与对应的均匀点阵结构相比均明显提高,由W和P两种点阵单元组成的密度梯度杂交点阵结构的刚度最大,比密度梯度W和P点阵结构分别提高了4.63%和33.63%。张明康^[11]对Primitive结构和IWP(I-wrapped package)结构进行线性梯度设计,发现ZL-Primitive比ZL-IWP具有更好的能量吸收能力。LIN等^[12]对密度梯度BCC点阵结构的力学性能和能量吸收特性进行探讨,发现INDEX结构和LINEAR结构的能量吸收率分别比均匀结构提高了38.38%和48.29%。HAO等^[13]设计了均匀、线性梯度、平方正弦函数梯度和平方余弦函数梯度4种Gyroid点阵结构,发现采用线性梯度或正弦平方函数密度梯度设计可以增强均匀点阵结构的承载能力。WALLAT等^[14]引入了一种算法,允许通过可定义的函数来调整孔隙率,设计均匀、线性梯度和二次线性梯度的Gyroid点阵结构,发现具有梯度的Gyroid结构通常具有较高的应力峰值,但平均归一化应力较低。PLOCHER等^[15]设计了BCC、Schwarz-P和Gyroid点阵结构,发现与等密度的均匀点阵相比,适量的密度梯度对Schwarz-P和BCC点阵结构的抗压刚度分别有正影响和无影响,较大的密度梯度会逐渐降低总刚度,但尺寸梯度对刚度没有显著影响。ZHONG等^[16]发现均匀的Primitive点阵结构呈现单水平应力平台,梯度Primitive点阵结构呈现明显的双应力平台,梯度TPMS结构的总能量吸收也略高于均匀TPMS结构。

上述国内外研究现状表明,密度梯度的结构设计在承载能力、吸能等方面具有显著优势,其中IWP结构继承了TPMS结构的高强度和可调控的特性。本文在均匀IWP点阵结构的基础上设计线性梯度变化的IWP结构,并引入独特的正弦和余弦梯度变化的IWP结构,研究不同密度梯度的IWP点阵结构力-能协同响应。

1 点阵结构的设计制备及指标体系构建

1.1 点阵结构的参数设计

TPMS点阵结构具有严格的空间周期性、高

度对称性和复杂的几何拓扑形态,其中TPMS的“极小曲面”是指该结构的表面具有零曲率,在众多TPMS结构中,IWP是一种较为常见且研究广泛的典型结构,其几何形态呈现出相互交织的周期性极小曲面特征,这种特殊的拓扑构型使其在轻量化设计、能量吸收和生物仿生等领域展现出巨大潜力。本文描述的IWP单元结构根据隐函数表达式获得,其表达式为

$$f_i(x, y, z) = 2 \left[\cos\left(2\pi \frac{nx}{L}\right) \cos\left(2\pi \frac{ny}{L}\right) + \cos\left(2\pi \frac{ny}{L}\right) \cos\left(2\pi \frac{nz}{L}\right) + \cos\left(2\pi \frac{nz}{L}\right) \cos\left(2\pi \frac{nx}{L}\right) \right] - [\cos\left(4\pi \frac{nx}{L}\right) + \cos\left(4\pi \frac{ny}{L}\right) + \cos\left(4\pi \frac{nz}{L}\right)] - t \quad (1)$$

式中: $f_i(x, y, z)$ 为IWP结构在坐标轴中的函数; t 用于控制相对密度 ρ ,改变 t 可得到不同相对密度的多孔结构; n 为X、Y和Z方向上单元的数量; L 为绝对尺寸。

对于IWP结构,参数 t 和相对密度 ρ 之间存在的非线性关系如图1所示。

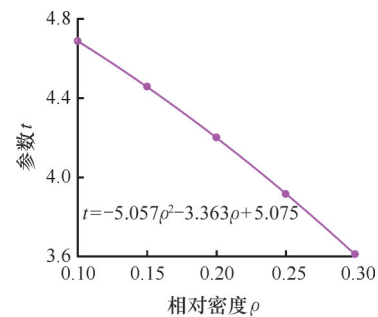


图1 参数 t 与相对密度 ρ 的关系

Fig.1 The relationship between parameter t and relative density ρ

以下针对密度梯度的函数设计均是根据图1中 t 值与相对密度 ρ 的关系,在Z方向上设计密度梯度的IWP结构,控制结构的最大密度为30%,最小密度为15%,同时使得每种密度梯度结构的相对密度 ρ 为22.5%

针对具有线性梯度特征的IWP结构,可采用线性连续函数进行数学表征:

$$t = t_0 + kz \quad (2)$$

其中, k 和 t_0 为待求解的未知数。将图1中 t 值与相对密度 ρ 的关系式与式(2)联立求解 k 和 t_0 。

对于三角函数梯度变化的IWP结构,可构造三角函数进行数学表征,余弦和正弦三角函数构造点阵结构的控制方程分别为

$$t = t_0 + k \cos(\alpha z) \quad (3)$$

$$t = t_0 + k \sin(\alpha z) \quad (4)$$

其中, k 、 t_0 和 α 为待求解的未知数, α 用来控制密度梯度的周期性,通过图1中的关系式与式(3)、式(4)联立求解。

为深入探究梯度结构设计在性能优化方面的潜在优势,同时设计具有均匀密度的IWP结构以便进行对比研究。具体参数设置如表1所示。

表1 参数设置

Tab.1 Parameter settings

梯度类型	k	α	t_0	t
线性点阵 (LINEAR)	0.24		-4	$0.24z-4$
余弦点阵 (COSINE)	-0.64	1.1	-4.023	$-0.64\cos(1.1z)-4.023$
正弦点阵 (SIN)	-0.44	1.1	-4.008	$-0.44\sin(1.1z)-4.008$

本文所设计的点阵为 $5 \times 5 \times 5$ 阵列结构,总尺寸为 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,即 $L=15 \text{ mm}$, $n=5$ 。该点阵结构的建模过程主要依托MATLAB软件完成,在软件中输入各结构隐函数表达式,生成3种密度梯度变化和1种均匀密度的IWP结构,保存为STL文件。将生成的STL文件导入Materialise Magics软件进行后续工艺适配性优化。为满足实际承载需求并便于后续力学测试,在点阵结构的顶部和底部分别增设了厚度为1 mm的面板,并使其略大于点阵结构本体以提供稳定的夹持界面。最终面板尺寸为 $16 \text{ mm} \times 16 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。通过布尔运算将上下面板与点阵结构无缝融合,确保结构整体性和连接强度。设计效果如图2左列所示。

1.2 点阵结构的制备

使用Photon Ultra设备对上述三维模型采用数字光处理(digital light process, DLP)技术打印成形,所使用的材料为超弹性的生物基光敏树脂,由7162弹性单官聚氨酯丙烯酸树脂、3906弹性双官聚氨酯丙烯酸树脂、丙烯酸吗啉(ACMO)和丙烯酸异冰片酯(IBOA)4种组分按照一定比例混合配制而成。根据软件最终成形的各结构图,打印整体尺寸为 $16 \text{ mm} \times 16 \text{ mm} \times 17 \text{ mm}$ 。成形后从上板取出,放入95%工业酒精中,将黏附在表面的多余树脂清洗干净,再放入UV箱中进行二次固化15 min,然后置于室温下24 h。最终点阵结构的制备效果如图2右列所示。

各点阵结构的成形效果良好,观察图2右列每一层单胞节点在密度梯度方向存在差别:均匀点阵(UNIFORM)结构各单胞支柱尺寸一致,相对密度恒定保持为22.5%;LINEAR结构从上到下单胞密度从30%逐渐减小至15%,支柱宽度逐渐减小;COSINE结构单胞密度符合余弦函数变化,中间部分单胞密度最小为15%,支柱宽度最小,上下两边单胞密度最大为30%,支柱最宽;

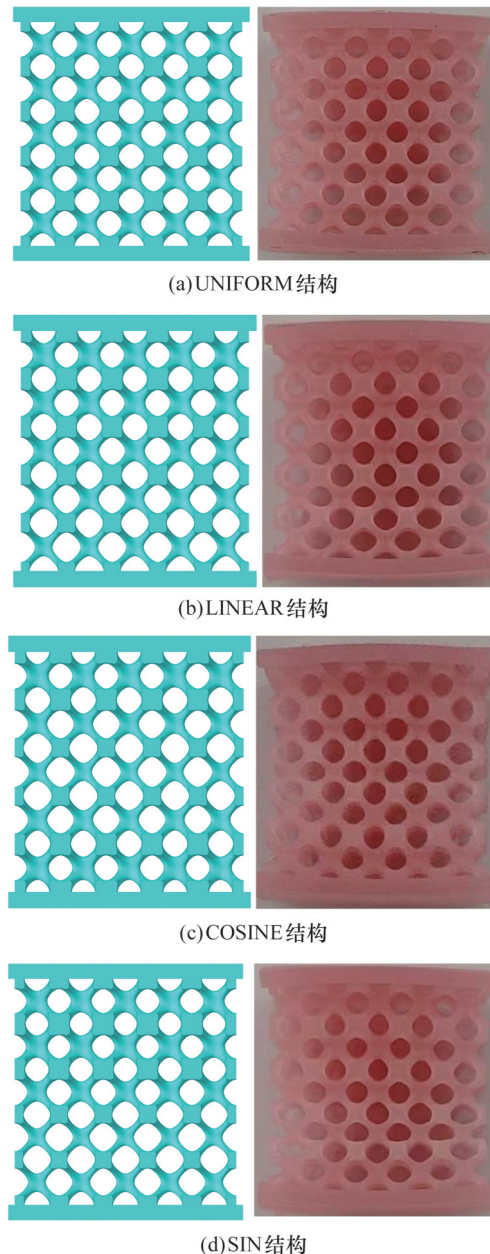


图2 点阵结构设计图及成形效果

Fig.2 Lattice structure design drawings and forming effects

SIN结构单胞密度符合正弦函数变化,在结构上端1/4高度处密度最大,而在下端至3/4高度处密度最小。

1.3 力-能协同响应的评估指标体系构建

为系统解析密度梯度IWP点阵结构的力-能协同响应,本文不再使用传统单一指标评价,而是提出一套多维度、可量化的综合评估指标体系,用来评价各类点阵结构的力学响应和吸能响应,也可为优异能量吸收的点阵结构设计提供参考。

压缩力学响应的指标如下。

1)弹性模量 E 定义为线弹性阶段应力-应变曲线的斜率。

2)平台应力 σ_{pl} 即压缩过程中从屈服到致密

化的平均应力,其表达式为

$$\sigma_{pl} = \frac{1}{\epsilon_D - \epsilon_y} \int_{\epsilon_y}^{\epsilon_D} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (5)$$

式中: ϵ_y 为屈服应变; ϵ_D 为致密化应变。

3) 平均应力 σ_{avg} 即从开始压缩到致密化过程的平均应力,其表达式为

$$\sigma_{avg} = \frac{1}{\epsilon_D} \int_0^{\epsilon_D} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (6)$$

4) 载荷波动度(ULC)即压缩过程中力的相对波动,其数值越小说明平台载荷越平稳。表达式为

$$C_{ULC} = \frac{\int_0^{\epsilon_D} |\sigma(\epsilon) - \sigma_{avg}| d\epsilon}{\int_0^{\epsilon_D} \sigma(\epsilon) d\epsilon} \quad (7)$$

压缩吸能响应的指标如下。

1) 总能量吸收 W , 可以从点阵结构在平压测试下载荷-位移曲线下的面积获得, 即

$$W = \int_0^s F(s) ds \quad (8)$$

2) 每单位体积的变形能(EPV)定义为点阵结构的能量吸收与体积的比率。EPV 的值可以通过点阵结构的压缩应力-应变线下的面积获得, 即

$$E_{EPV} = \int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (9)$$

3) 能量吸收效率 η 表示一定应变下每单位体积的能量吸收与该应变下应力的比值, 即

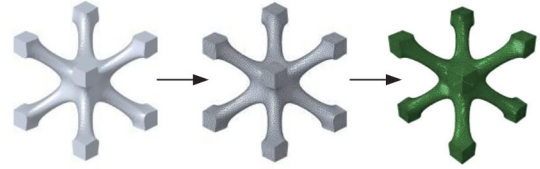
$$\eta = \frac{1}{\sigma(\epsilon)} \int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (10)$$

2 IWP点阵结构压缩数值模拟

2.1 IWP点阵结构有限元模型建立

为阐述梯度点阵结构在压缩下的力-能协同响应和变形行为, 使用 ABAQUS/Standard 进行显式动力学仿真分析, 建模过程如图 3 所示。首先在 TPMS 生成器中生成点阵结构模型, 保存为 STL 文件; 随后将该文件导入 Hypermesh 前处理软件进行精细化网格划分, 二维网格划分结束后进行三维网格划分; 将 Tetra 实体单元 0.2 mm 的单元尺寸应用于模型网格, 划分单元类型为 C3D4 的四面体网格; UNIFORM、LINEAR、COSINE、SIN 各结构网格数分别为: 1 915 356、2 123 734、2 613 268、2 057 518。赋予特征和材料属性后, 将处理完成的模型以 INP 文件格式导出, 材料属性^[17]如表 2 所示。最后导入 ABAQUS 软件, 其中最小时间增量大小设置为 1×10^{-5} s; 考虑实际压缩工况中的接触条件, 设置摩擦因数为 0.2 以更真实地模拟界面相互作用; 在边界条件设

置方面, 将梯度点阵结构试样置于两个平行刚性压板之间, 完全约束底部压板的所有自由度; 在顶部压板上施加 9 mm 的轴向位移载荷, 该位移量对应于结构初始高度的 60% 压缩应变, 从而实现梯度点阵结构大变形压缩行为的数值模拟。



(a)TPMS生成器 (b)Hypermesh软件 (c)ABAQUS软件

图 3 模型建立过程

Fig.3 Modeling process

表 2 材料参数

Tab.2 Material parameters

密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	拉伸强度/ MPa
1.13	1.01	0.45	1.79

2.2 等应变下各结构应力分析

对 4 种结构进行有限元仿真, 各结构的 Mises 应力云图见图 4, 沿各结构的对角线方向做出一条路径线, 沿该路径线进行投影, 作出 Mises 应力沿路径线位置的曲线关系。

由应力云图可看出, 各点阵结构的应力分布有明显差异, 其中高应力主要分布在节点及附近支柱上。UNIFORM 结构在压缩方向上无密度梯度变化, 局部应力集中出现在节点及附近支柱上, 其投影关系曲线显示: 峰值应力接近, 最大峰值应力为 0.393 MPa。LINEAR 结构的密度从 30% 线性减小到 15%, 这种梯度变化导致应力沿密度递减方向逐渐减小, 高密度区域有较高的应力集中, 低密度区域应力较小, 在投影关系曲线中, 这种梯度特征表现为峰值应力依次递减的规律, 其中高密度区域的最大峰值应力达到 0.484 MPa, 显著高于均匀结构。

COSINE 结构高应力集中在余弦波峰区域, 分布于结构两端, 中心区域即波谷阶段应力最低, COSINE 结构由于其余弦函数的特性, 其密度沿加载方向先减小再增大, 故在投影关系曲线中, 应力也呈现先减小再增大的趋势。SIN 结构其高应力集中在正弦波峰区域, 但由于正弦函数存在多个波峰波谷, 在投影关系曲线中, 应力曲线呈现较大波动, 但总体呈现先升高, 后降低, 再升高再降低的趋势。

通过上述对比可以发现, 投影关系曲线的峰值变化规律与结构在 Z 向构造的梯度函数的单调性

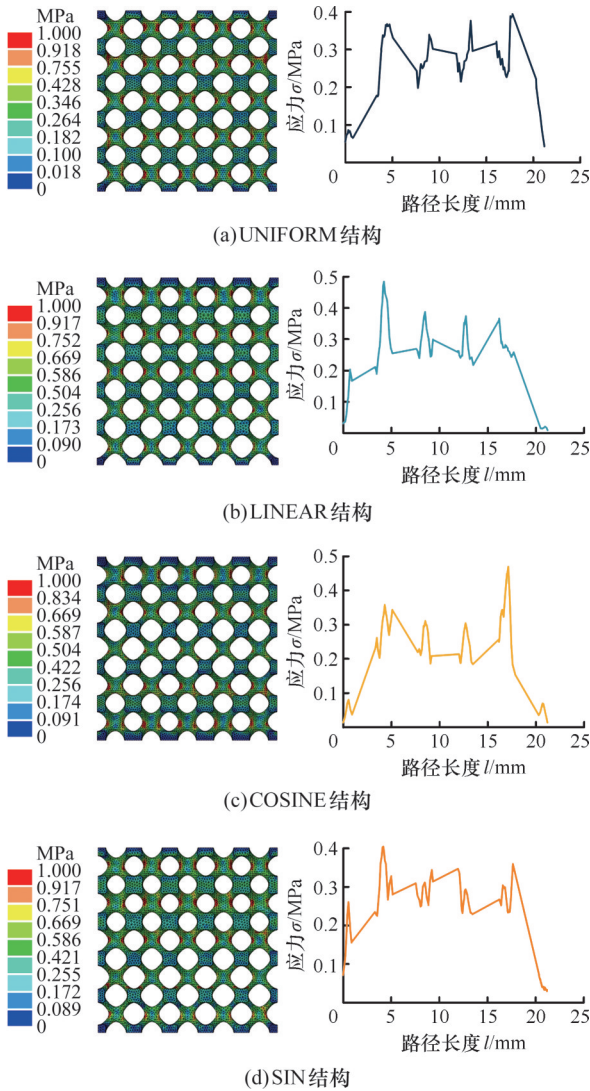


图4 点阵结构应力云图及应力值与投影位置关系曲线

Fig.4 The stress contour of lattice structure and the relationship curve of stress value and projection position

高度一致。具体而言,当梯度函数在某一区间内呈现单调递增或递减趋势时,投影关系曲线中的应力峰值也会相应地表现出类似的单调变化特征。

3 IWP点阵结构力-能协同响应分析

3.1 IWP密度梯度结构压缩试验方法

采用CTM2500万能试验机对试样进行压缩试验,如图5所示。将点阵结构样品放置于试验机夹具中,确保样品顶部和底部完全接触加载夹具。每种结构进行3次重复实验,采集数据后,将3组数据在同一坐标系下进行数据处理,计算平均值曲线,即为应力应变曲线;同时计算各结构的力学响应值,取其均值。所有试验均在室温环境下进行。由于该模型是一种微型且较软的结构,故压缩速率设置为1 mm/min,保证压缩速率不过快。

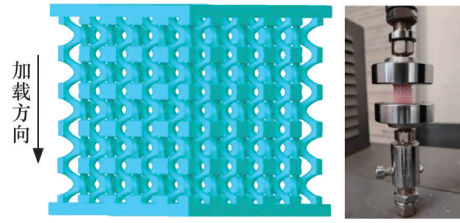


图5 点阵结构压缩试验方法

Fig.5 Compression test method for lattice structure

3.2 IWP密度梯度结构压缩力学响应

DLP制备不同密度梯度的点阵结构,沿Z方向经过单轴平压试验后得到的应力-应变曲线如图6所示,根据应力-应变曲线得出的力学响应分析如表3所示。由图6可以看出,由超弹性材料制成的点阵结构应力应变曲线的线弹性阶段并不明显。故在起始部分,仍尝试选取一段相对较接近线性变化的小区域,利用线性拟合手段得到一条拟合直线,将该直线的斜率近似作为弹性模量。这是因为即使线弹性阶段整体不清晰,但起始局部区域仍遵循近似线性的胡克定律。采用0.2%偏移法,在线弹性基础上,将沿应变轴偏移0.2%的应变值作为屈服应变。

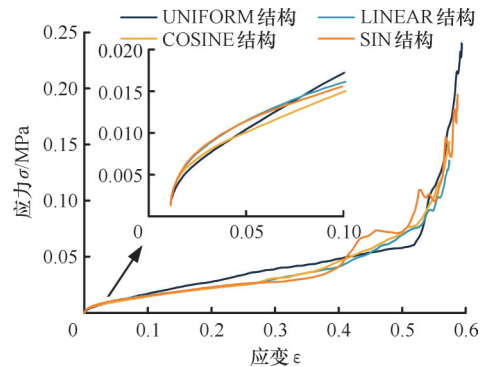


图6 不同点阵结构的试验应力-应变曲线

Fig.6 Experimental stress-strain curves of different lattice structures

表3 各结构力学响应值

Ta.3 Mechanics response value of each structure

力学响应	UNIFORM	LINEAR	COSINE	SIN
弹性模量 E/MPa	0.222	0.239	0.245	0.259
致密化应变 ϵ_D	0.519	0.525	0.523	0.550
平台应力 σ_{pl}/MPa	0.036	0.033	0.034	0.039
平均应力 σ_{avg}/MPa	0.034	0.031	0.032	0.036
ULC值 C_{ULC}	0.408	0.469	0.505	0.559

通过计算,UNIFORM、LINEAR、COSINE和SIN结构的初始屈服应变分别发生在0.044、0.045、0.034和0.038。随后进入平台阶段,应变增大,而应力稳定在一定范围内,进入致密化状态后,应力快速上升。致密化应变是结构从逐层塌陷转变为整体压实的关键点,而密度梯度结构在

压缩过程中不同密度的层依次被压实,因此每个峰值对应不同层的压实,最后一个峰值便代表整个结构达到完全致密化,各结构致密化应变 ϵ_0 分别为0.519、0.525、0.523和0.550。相比之下,SIN结构进入致密化阶段的时间较晚,可以解释为逐层坍塌使得整体压缩更困难,需要更大的应变启动致密化。

由表3可知,SIN点阵结构比其他结构具有更高的弹性模量、平台应力和平均应力,说明SIN结构的承载性能最好,且SIN结构具有更高的致密化应变,这将更有利于缓冲吸能。

UNIFORM的弹性模量最小,可解释为在密度梯度设计中,高密度区域显著提高了局部刚度,这些区域在压缩早期承担更多载荷,从而整体弹性模量更高。

对比发现,SIN结构的ULC值最大,说明其平台载荷不平稳,意味着沿加载方向设置正弦函数梯度变化,高密度区与低密度区之间的过渡频繁且不规则;密度高的区域相互作用更强,在压缩时能承受更大的力;密度低的区域则相对较弱。这样在整个结构压缩过程中,力的传递和分布就会不均匀,从而表现为ULC值的较大波动。

由于余弦函数与正弦函数的相位差异,COSINE结构在压缩过程中应力集中和分散的时刻与正弦结构有所不同,使得整体力的波动程度小于正弦结构,但仍大于LINEAR和UNIFORM结构。

LINEAR结构中密度随位置呈线性改变。应力集中位置相对固定且变化规律简单,在压缩过程中,应力分布相对稳定,力的变化较为平稳,从高密度端到低密度端,应力逐渐减小,材料各部分的受力变化有一定规律,不会出现应力集中点的频繁突变,因此ULC值波动较小。UNIFORM的变形相对均匀,应力传递和分布也更为规则,不会出现因密度差异导致的局部应力集中或分散的剧烈变化,所以力的相对波动最小,ULC波动在4种结构中也最小。

对于密度梯度的点阵结构,用Gibson-Ashby模型来描述弹性模量、致密化应变和相对密度之间的关系:

$$\frac{E_L}{E_S} = C_1(\rho)^m \quad (11)$$

$$\epsilon_0 = 1 - \alpha\rho \quad (12)$$

式中: E_L 为点阵结构的弹性模量; E_S 为固体材料的弹性模量,其值为1.01 MPa。

根据压缩试验结果可计算出 C_1 和 α 的值,这里将

m 设置为 $2^{[17]}$, $\rho=22.5\%$,计算系数 C_1 和 α ,结果见表4。

表4 各结构Gibson-Ashby系数

Ta.4 Gibson-Ashby coefficients for each structure

梯度类型	$C_1(0.1\sim 4.0)$	$\alpha(1.4\sim 2.0)$
UNIFORM	4.341	2.137
LINEAR	4.674	2.111
COSINE	4.792	2.120
SIN	5.065	2.000

4种点阵结构的 C_1 值并未落在0.1~4.0的指定范围内,这意味着弹性模量高于Gibson-Ashby模型的可预测强度。对于LINEAR、COSINE、SIN结构,密度的空间变化使得材料内部的应力分布和传递力的路径更为复杂。这种复杂的应力分布难以用简单的Gibson-Ashby模型准确描述,使得 C_1 值偏离通常范围。参数 α 的值均略高于模型给出的1.4~2.0范围,这表明致密化应变出现在比Gibson-Ashby模型预测值更短的时间,即实际致密化应变小于预测应变。这可以解释为本文中的点阵模型体积分数较小,导致计算出的 α 值较大,同时也要考虑本文研究结构与其他研究结构之间的差异以及所使用的材料类型。

通过对各结构力学响应的研究以及Gibson-Ashby模型系数的探讨可以得出:SIN结构由于其独特的密度梯度,逐层塌缩更为困难,导致其致密化时间延长;SIN结构在力学响应方面更具优势,更高的弹性模量使其承载能力更强,压缩过程力的波动较大,即ULC值较大。密度梯度的不同函数设计是造成各结构力学响应显著区别的原因,三角函数的密度梯度变化将会导致应力分布以及力的传递路径更为复杂。在IWP点阵结构力学响应的研究中,压缩方向设计正弦函数的密度变化可获得优异的力学性能。

3.3 IWP密度梯度结构压缩吸能响应

各点阵结构能量吸收曲线根据式(8)计算,结果如图7所示。使用幂指数函数对数据进行拟合,通过拟合结果可以看出,在应变较小的阶段,4条曲线的总能量吸收值差距相对较小,但随着应变的增大,差距逐渐拉开。由于SIN结构的总吸能函数的指数最大,LINEAR结构的指数最小,故SIN曲线增长速度相对较快,在应变较大时优势更为明显;相反LINEAR曲线增长最为平稳。

UNIFORM、LINEAR、COSINE和SIN结构在达到致密化应变时所吸收的能量分别为0.059 J、0.055 J、0.056 J和0.067 J,对比每单位体积的变形能,分别为0.017 MJ/m³、0.016 MJ/m³、0.017

MJ/m^3 和 $0.020 \text{ MJ}/\text{m}^3$,其中SIN结构在致密化前吸收的能量更多,说明其吸能效果更强,更适用于高吸能的应用场景。

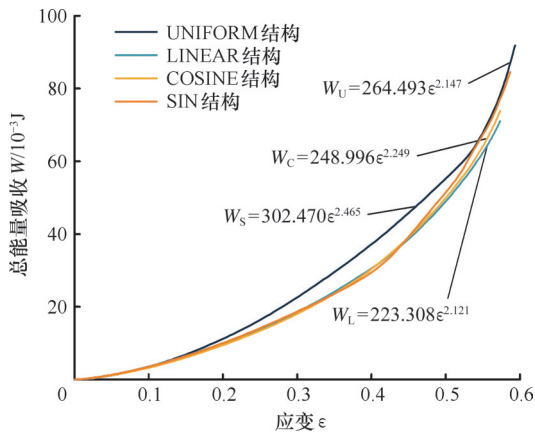


图7 压缩过程能量吸收曲线

Fig.7 Energy absorption curve during compression

点阵结构能量吸收效率曲线根据式(10)计算,结果如图8所示。在应变范围为 $0\sim 0.25$ 阶段,能量吸收效率曲线接近线性,表明结构在此阶段以稳定的模式吸收能量。当应变超过 0.25 后,3种不同密度梯度结构的效率曲线均表现出明显的波动锯齿状特征,这种波动现象源于梯度结构在压缩过程中不同密度层依次被压实,其中每个效率峰值对应着某一特定密度层的完全压实,而最后一个峰值则标志着整个结构进入完全致密化状态。从效率曲线的变化趋势可以看出,达到致密化应变时,UNIFORM结构的吸能效率最高,为 28.83% 。

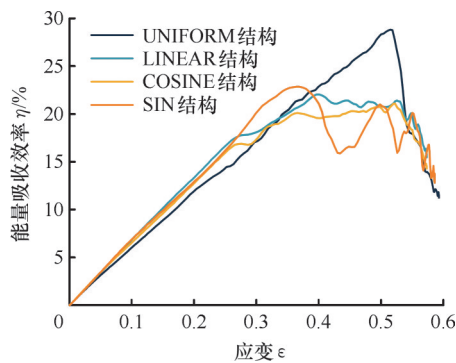


图8 能量吸收效率曲线

Fig.8 Energy absorption efficiency curve

超过致密化应变后,尽管效率有所下降,但仍可观察到效率曲线局部回升趋势。这一现象可归因于结构在完全致密化后,其内部支撑杆件在持续压缩载荷作用下进一步挤压并继续吸收少量能量。这一行为表明,即使在结构整体压实后,残余的杆件相互作用仍可能对能量吸收产生一定贡献。

利用式(9)可计算出每种结构单位体积的形

变能,为筛选出力-能协同响应优异的结构,通过EPV值与应力之间的关系绘制曲线,并选择固体材料的弹性模量 E_s 进行双标准化处理,该量纲一分析方法可有效解决不同材料体系间的性能对比问题。结果如图9所示,横坐标为点阵结构的应力与固体材料的弹性模量的比值,纵坐标为点阵结构EPV值 V_{EPV} 与固体材料的弹性模量的比值。

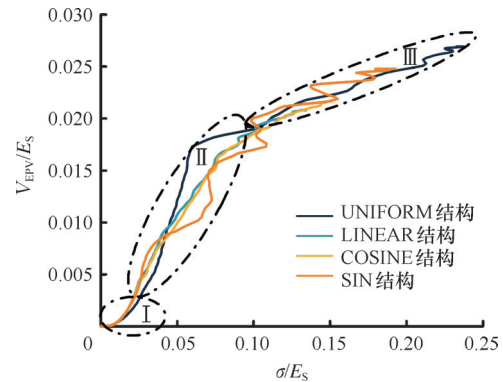


图9 点阵结构归一化能量吸收

Fig.9 Normalized energy absorption of lattice structures

由曲线变化趋势可以清晰地观察到3个典型的变形阶段特征:在I阶段,随着应力的增大,吸收的能量不断增大;进入II阶段后,在应力缓慢增大的情况下,能量吸收速率变大,各结构快速吸能,此阶段为主要吸能阶段;III阶段对应致密化阶段,应力快速升高,但能量吸收却很缓慢,此时结构能量吸收速率大幅降低。相比之下,UNIFORM结构在III阶段进入致密化状态,曲线出现明显的拐点,而密度梯度的3种IWP结构是逐渐进入致密化状态的,具有更稳定、更渐进的能量吸收过程,其中SIN结构更为突出,在较高应力加载下依旧协同进行能量吸收,更加说明SIN结构具有优异的力-能协同响应,适用于高能量吸收的场所。

4 IWP密度梯度仿真验证与结构优选

4.1 IWP结构仿真验证

不同点阵结构的仿真和试验应力应变如图10所示,所有仿真曲线与试验数据在线弹性阶段、平台阶段及致密化阶段相吻合,各密度梯度结构的波动应力被模型成功捕捉,表明所建立的有限元模型能准确反映梯度变化对结构压缩力学行为的影响。

压缩试验与仿真的弹性模量对比如图11所示。结果显示,有限元仿真结果普遍高于压缩试验测试值,偏差幅度在 $5.91\%\sim 14.24\%$ 之间,最大偏差出现在正弦梯度结构,最小偏差为均匀结

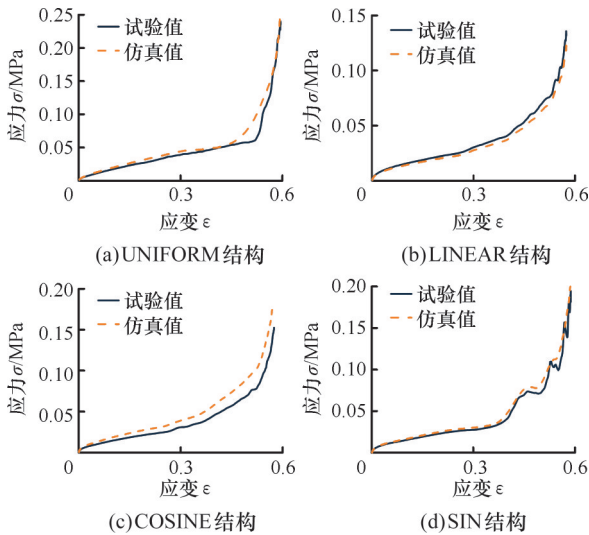


图 10 4种点阵结构的试验与仿真应力应变曲线

Fig.10 Stress-strain curves from experiments and simulations of 4 types of lattice structures

构。这可以解释为网格划分采用四面体主导策略,未能完全再现打印件的表面粗糙度,以及打印件从机器上板脱模时产生的微小变形。但整体而言,有限元仿真预测的各密度梯度下点阵结构弹性模量的变化趋势与压缩试验值吻合,因此,在未来的点阵结构设计中可以采用有限元仿真进行初步预测。

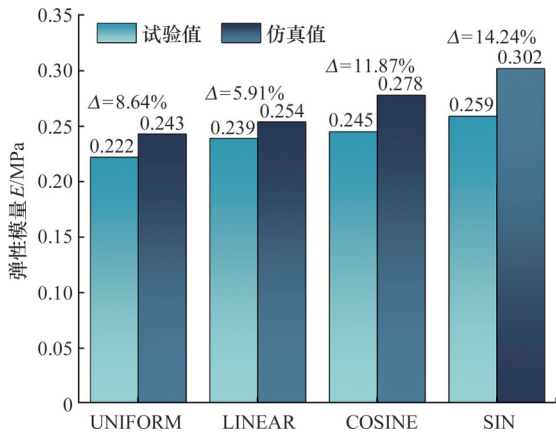


图 11 仿真与试验的弹性模量对比

Fig.11 Comparison of elastic modulus of simulations and experiments

4.2 IWP密度梯度结构优选

通过对各点阵结构压缩力学响应和吸能响应分析可知,UNIFORM、LINEAR、COSINE结构的弹性模量、平台应力、平均应力较低,而SIN结构的各项力学性能均有明显优势。相较于UNIFORM结构,SIN结构的弹性模量显著提高16.67%,说明SIN结构承载性能与其他结构相比更为理想;但SIN结构的ULC值最大,说明正弦函数的梯度设计致使结构在压缩过程中载荷波动

较大,这与正弦函数中多个波峰波谷有较大关系,力的传递与其他结构相比更不均匀。在能量吸收方面,SIN结构的总吸能和EPV优势显著。相较于均匀结构,SIN结构的EPV值提高了17.65%,且SIN结构在较高应力条件下依旧保持稳定吸能。这表明SIN点阵结构在保持高承载能力的基础上,对能量吸收场景的适配性更强。

综合上述对力和能的分析可知,SIN结构一方面要承受压缩带来的力,另一方面又要吸收压缩过程产生的能,这种力的承受和能量的吸收是协同进行的,而在高应力下SIN结构依旧保持稳定吸能,说明它具有最优的力-能协同响应。

5 结论

1)各结构在节点及附近支柱上出现应力集中,对于梯度点阵结构,高密度区域为主要承载部分,投影关系曲线的峰值变化规律与结构在Z向构造的梯度函数的单调性具有高度一致性。

2)4种点阵结构中,SIN结构的弹性模量、平台应力和平均应力均最高,其承载能力最好;UNIFORM结构承载性能最差。

3)SIN结构的平台载荷不平稳,由于其正弦函数存在多个波峰波谷,其高密度区与低密度区之间频繁过渡且不规则,致使力的传递和分布不均匀;UNIFORM结构力的相对波动最小。

4)SIN结构在达到致密化前吸收的能量最多、吸能效果最强,在高应力环境下协同进行稳定吸能,力-能协同响应最为优异。

参考文献:

[1] TANG Shiyan, YANG Li, FAN Zitian, et al. A Review of Additive Manufacturing Technology and Its Application to Foundry in China[J]. China Foundry, 2021, 18(4): 249-264.

[2] ZHU Jihong, ZHOU Han, WANG Chuang, et al. A Review of Topology Optimization for Additive Manufacturing: Status and Challenges[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(1): 91-110.

[3] 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 Dongdong, ZHANG Hongmei, CHEN Hongyu, et al. Laser Additive Manufacturing of High-performance Metallic Aerospace Components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500002.

[4] CLOUGH E C, ENSBERG J, ECKEL Z C, et al. Mechanical Performance of Hollow Tetrahedral Truss Cores[J]. International Journal of Solids and Structures, 2016, 91: 115-126.

[5] 罗云锋. 具有特定几何特征的增材制造结构拓扑优化设计方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.

LUO Yunfeng. Topology Optimization of Structures with

- Specific Geometric Features for Additive Manufacturing [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [6] 郭中泽, 张卫红, 陈裕泽. 结构拓扑优化设计综述[J]. 机械设计, 2007, 24(8): 1-6.
GUO Zhongze, ZHANG Weihong, CHEN Yuze. An Overview on the Topological Optimization Design of Structures[J]. Journal of Machine Design, 2007, 24(8): 1-6.
- [7] 文桂林, 刘杰, 陈梓杰, 等. 非线性连续体拓扑优化方法综述[J]. 力学学报, 2022, 54(10): 2659-2675.
WEN Guilin, LIU Jie, CHEN Zijie, et al. A Survey of Nonlinear Continuum Topology Optimization Methods[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(10): 2659-2675.
- [8] 高杰. 基于参数化水平集的结构/材料多尺度拓扑优化设计研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
GAO Jie. Research on Topology Optimization for Multi-scale Design of Structure-Material Based on Parametric Level Set [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [9] 杨伟东, 李浩南, 王媛媛, 等. 面向增材制造的非均匀点阵结构综述[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(8): 1283-1296.
YANG Weidong, LI Haonan, WANG Yuanyuan, et al. Review of Non-uniform Lattice Structures for Additive Manufacturing[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2024, 43(8): 1283-1296.
- [10] 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[J]. 重庆大学学报, 2024, 47(5): 76-86.
ZENG Yuanhui, ZHAO Miao, ZHANG Zhengwen, et al. Optimization Design for TPMS Lattice Structures Combining Density Gradient with Hybridization [J]. Journal of Chongqing University, 2024, 47(5): 76-86.
- [11] 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.
ZHANG Mingkang. Optimal Design of Porous Structure with Implicit Surface Gradient and Mechanical Properties of Laser Selective Melting Forming [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [12] LIN Yuxiang, SHI Wentian, SUN Xiaohong, et al. Influence of Density Gradient on the Compression of Functionally Graded BCC Lattice Structure[J]. Materials, 2023, 16(2): 520.
- [13] HAO Bo, ZHAO Yuxin, ZHU Zhiming. Study on the Mechanical Properties and Energy Absorption of Gyroid Sandwich Structures with Different Gradient Rules[J]. Archive of Applied Mechanics, 2024, 94(11): 3535-3553.
- [14] WALLAT L, ALTSCUH P, REDER M, et al. Computational Design and Characterisation of Gyroid Structures with Different Gradient Functions for Porosity Adjustment [J]. Materials, 2022, 15(10): 3730.
- [15] PLOCHER J, PANESAR A. Effect of Density and Unit Cell Size Grading on the Stiffness and Energy Absorption of Short Fibre-reinforced Functionally Graded Lattice Structures[J]. Additive Manufacturing, 2020, 33: 101171.
- [16] ZHONG Minting, ZHOU Wei, XI Hui Feng, et al. Double-level Energy Absorption of 3D Printed TPMS Cellular Structures via Wall Thickness Gradient Design[J]. Materials, 2021, 14(21): 6262.
- [17] 牛国法, 纪小刚, 王伟, 等. 柔弹性复合点阵结构面内剪切性能及交互机制研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(5): 1103-1110.
NIU Guofa, JI Xiaogang, WANG Wei, et al. Study on In-plane Shear Behavior and Interaction Mechanism of Flexible Elastic Composite Lattice Structures [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(5): 1103-1110.

(编辑 王旻玥)

作者简介:王广阳,男,2001年生,硕士研究生。研究方向为CAD/CAM、点阵结构等。E-mail: wgywjtwdz@163.com。
纪小刚*(通信作者),男,1977年生,教授。研究方向为逆向工程、计算机辅助设计技术、柔弹性材料增材制造。E-mail: bhearts@jiangnan.edu.cn。

本文引用格式:

王广阳,纪小刚,牛国法,等. 密度梯度的IWP点阵结构力-能协同响应[J]. 中国机械工程, 2026, 37(1): 192-200.

WANG Guangyang, JI Xiaogang, NIU Guofa, et al. Density Gradient IWP Lattice Structural Force-energy Synergistic Response[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(1): 192-200.