

基于 MJF 的极小曲面结构力学行为及吸能特性研究*

肖江海 侯俊玲** 李 群

(复杂服役环境重大装备结构强度与寿命全国重点实验室, 西安交通大学航天航空学院, 西安, 710049)

摘要 极小曲面结构是一种表面连续光滑的曲面多孔结构, 具有低密度、高强度以及优良的减震吸能等特性, 在航空航天、汽车工业、机械装备等领域的结构轻量化设计方面, 具有广泛的应用前景. 本文采用多射流熔融 (MultiJet Fusion, MJF) 增材制造技术, 结合参数化建模方法, 以尼龙 PA12 为原料制备了体积分数同为 20% 的 3 种极小曲面多孔结构 (G 曲面、P 曲面、D 曲面). 利用准静态压缩试验和数值模拟, 分析了不同极小曲面结构的力学响应和吸能特性. 研究发现: 在力学响应方面, 3 种极小曲面的平台名义应力分别为 4.0 MPa、2.1 MPa 和 4.75 MPa, 明显高于相同体积分数下 BCC 点阵结构的平台名义应力 (2.0 MPa), 具有更好的承载能力; 在吸能方面, G 曲面、P 曲面和 D 曲面的单位体积吸能量近似可达 BCC 点阵结构的 7 倍、4 倍、8 倍. 综上所述, 与传统 BCC 点阵结构相比, MJF 增材制造工艺制备的极小曲面结构能够更好的分散压力, 减少应力集中, 表现出优异的力学性能和吸能特性, 具有非常好的应用前景.

关键词 极小曲面, 多孔结构, 增材制造, 力学性能, 吸能特性

DOI: 10.19636/j.cnki.cjasm42-1250/o3.2023.050

0 引言

轻量化设计是指在一定的边界条件下, 如满足寿命和可靠性的要求下, 努力降低结构自身重量的设计理念^[1]. 汽车行业最早提出轻量化的概念, 主要目标是在保证汽车结构寿命和可靠性的前提下, 降低汽车质量、提高汽车制动性, 从而实现节能减排, 降低能耗的要求. 尤其是在新能源汽车领域, 汽车自身重量越轻, 在相同的电池容量下, 续航里程就越长. 随着资源的日益短缺和人类节能减排的意识不断提高, 轻量化设计的理念已经由汽车行业发展到各行各业^[2-7]. 例如: 在航空航天设计方面, 运载火箭末级每减重 1 kg, 便可以多携带 1 kg 的科研仪器设备; 在战斗机、装甲车等军事装备方面的轻量化减重设计, 不仅可以提高装备的续航能力, 更能有效提升其机动性和灵巧性, 提高作战性能. 因此, 开展结构轻量化设计的研究具有重要的科学意义和工程

应用价值.

采用多孔结构是实现结构轻量化设计的重要方法之一. 常见的有序多孔结构有蜂窝结构^[8,9], 点阵结构^[10,11]等. 其中, 蜂窝结构最早是被用在航空结构的轻量化上, 但其结构和性能具有显著的各向异性^[12], 结构参数的变化对蜂窝多孔结构的力学性能有很大影响, 而且实际工况中结构往往处于多个方向的复合载荷下, 任何一个方向的承载能力不足都会影响整个结构的性能. 点阵结构被认为是继蜂窝结构之后最有前景的轻量化多孔结构之一. 汪飞雪等^[13]研究了不同径长比和杆件夹角的四棱锥型 BCC 点阵结构, 发现结构的抗压强度和弹性模量随着径长比的增大而增大. 姚龙飞等^[14]通过优化 BCC 点阵结构杆的直径和长度, 提高了点阵结构的弹性模量和屈服强度. 点阵结构现在也被用于医疗领域^[15], 作为可植入结构植入人体, 其多孔结构非常适合人体组织生长. 尽管目前有关蜂窝结构、点阵结构等多孔结构的设计、制备和力学性能等方面的研

* 国家自然科学基金项目 (12002256, 12172270), 中央高校基本科研业务费 (xzy12023021) 和浙江省自然科学基金探索项目 (LQ20A020010) 资助.

2023-09-14 收到修改稿, 2023-09-20 网络首发.

** 通讯作者. E-mail: junhou@mail.xjtu.edu.cn.

研究工作取得了一定的进展,但是随着装备复杂程度的提高以及对多孔结构性能要求的提升,研究人员仍在不断探索结构更加复杂,性能更加优越的轻量化多孔结构。

近年来,一种表面连续光滑、造型特殊的曲面结构,获得了研究人员的广泛关注,成为近些年轻量化多孔结构的研究热点^[16]。这种曲面在一定边界条件下表面积最小,因此被称为极小曲面。极小曲面问题是微分几何领域中一个重要的问题^[17],最早由 Lagrange 开始研究,后来比利时物理学家 Plateau 在这个问题上做出了巨大的贡献^[18],他发现极小曲面问题在物理上类似于肥皂泡现象,并进行了大量的实验研究。极小曲面具有结构稳定、比表面积大、孔隙连续贯通等多种优良的物理和化学特性,在吸声降噪,传热散热,减震吸能等方面具有广泛的应用前景。杨喆等^[19]研究了极小曲面的换热性能;Jaemin 等^[20]对比了三周期极小曲面 P 曲面与传统的棱柱、圆柱点阵的力学性能,发现 P 曲面结构应力分布更加均匀,应力集中少,在体积分数相同条件下具有更好的承载能力;曾寿金等^[21]基于 SLM 工艺设计制备了极小曲面多孔股骨柄模型,结果表明,P 曲面结构能够有效提高股骨柄的稳定性,减少应力遮挡效应。

受限于传统的铸造以及机械加工制造技术,早期针对极小曲面的研究大多数停留在极小曲面的建模方法^[22],美术建筑艺术设计^[23]等方面,随着增材制造技术的快速发展^[24],为复杂几何拓扑结构的设计制造提供了可能,对极小曲面的研究也进入了新的阶段。增材制造技术,因其生产速度快,又被称为快速成型(RP)技术,其原理是根据零件的三维模型,通过计算机程序精准控制,由点成线,由线成面的方式,逐步增加材料,进而形成零件的数字制造技

术。增材制造的工艺方法根据其使用的原材料不同,加工方式不同,又分为不同的工艺。多射流熔融(MultiJet Fusion)简称 MJF 工艺,是近年来发展较为迅速的一种工艺。该工艺关键核心部件是铺粉模块和热喷头模块。MJF 工艺因其生产效率高,零件成型精度高,不需要添加支撑即可打印复杂镂空零件,生产成本较低等等优势,在增材制造市场上占据了较高的市场份额。

本文采用参数化建模方法,探究不同关键设计参数与结构体积分数之间的规律,并建立了一系列体积分数相同的 3 种极小曲面多孔结构,采用多射流熔融(MultiJet Fusion)增材制造技术,尼龙 PA12 为原料进行生产制备,并对其进行了准静态压缩试验和数值仿真模拟,分析不同结构的准静态压缩下的能量吸收和承载能力。本研究可为极小曲面结构的工程应用提供设计参考。

1 多孔结构的设计

为对比分析不同极小曲面多孔结构的力学性能,本文设计了 3 种体积分数同为 20% 的极小曲面结构:G 曲面、P 曲面和 D 曲面,此外,设计了一种相同体积分数的传统 BCC 点阵结构作为对照。极小曲面的数学建模方法有许多,其中,极小曲面的隐式三角函数表达式如下:

$$\varphi_{(r)} = \sum_1^k A_k \cos \left[\frac{2\pi(h_k r)}{\delta_k} + p_k \right] - C = 0 \quad (1)$$

式中, A_k 为幅度因子; r 为位置矢量; h_k 为倒数空间的第 k 个格矢量; δ_k 为周期的波长; p_k 为相位; C 为阈值。本研究选取的三种极小曲面多孔结构(G 曲面、P 曲面和 D 曲面)的三角函数表达形式如表 1 所示。建模软件采用 Grasshopper 参数化建模软件,该

表 1 极小曲面的三角函数表达式

Table 1 Trigonometric expressions of minimal surfaces

极小曲面类型	三角函数形式
G 曲面	$\varphi_{(G)} = \sin(X)\cos(Y) + \sin(Y)\cos(Z) + \sin(Z)\cos(X) - C = 0$
P 曲面	$\varphi_{(P)} = \cos(X) + \cos(Y) + \cos(Z) - C = 0$
D 曲面	$\varphi_{(D)} = \cos(X)\cos(Y)\cos(Z) - \sin(X)\sin(Y)\sin(Z) - C = 0$

软件能够有效地将逻辑运算与模型创建相结合,可以通过调整设计参数直接改变模型的尺寸、形状、数量,是一款快捷的参数化建模工具^[25],具有可编程、可视化、逻辑清晰、动态展示等优点。

由于多孔结构的单元壁厚,单元尺寸和单元数量等因素都会影响结构的体积分数和力学性能,有研究指出^[26],极小曲面多孔结构随着单元阵列数目的增加,其力学性能会出现变化;但是,当单元阵列数量达到 $2 \times 2 \times 2$ 的八胞结构以上,其力学性能将趋于稳定。因此,本研究设计的极小曲面多孔结构为 $2 \times 2 \times 2$ 八胞结构。本文为了探究单元壁厚对多孔

结构体积分数和力学性能的影响,将模型都设计为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的八胞结构。通过软件编程保证单元的尺寸和数量相同,通过改变极小曲面多孔结构的壁厚, BCC 点阵结构的连杆直径,来探究单元壁厚对多孔结构的体积分数的影响。最终,通过调节 BCC 点阵结构的连杆直径 d 以及 G、P 和 D 三种极小曲面多孔结构的壁厚 h , 获得了四种体积分数同为 20% 的多孔结构。表 2 中给出了体积分数相同时, BCC 点阵结构和 3 种不同极小曲面多孔结构的关键控制参数值。

表 2 体积分数为 20% 时不同多孔结构的控制参数

Table 2 Control parameters of different porous structures with 20% volume fraction

多孔结构	BCC 点阵	G 曲面	P 曲面	D 曲面
	连杆直径 d	壁厚 h	壁厚 h	壁厚 h
关键参数	2.68 mm	1.045 mm	1.365 mm	0.965 mm

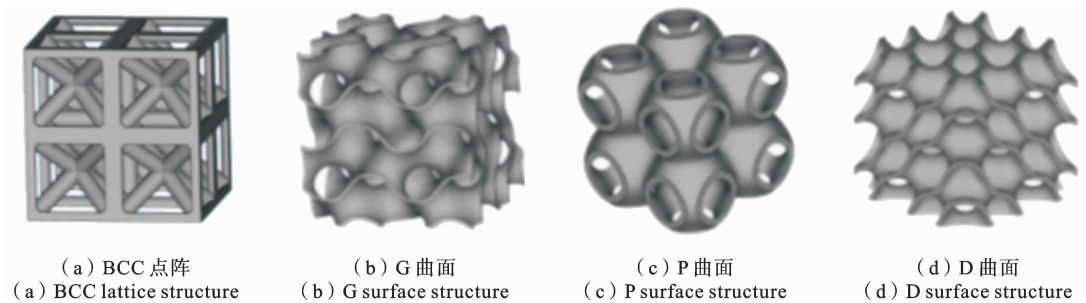


图 1 体积分数为 20% 的四种多孔结构

Fig. 1 Four porous structures with 20% volume fraction

2 实验研究

2.1 材料和制备

目前,常用的 3D 打印材料大致分为三大类:高分子聚合物材料、金属及其合金材料、陶瓷和复合材料等。聚酰胺(PA)材料属于高分子聚合物材料之一,通常被称为尼龙,是一种具有优良的力学性能、耐冲击性、其耐热性、抗老化性等等工程塑料,是目前应用最广泛的 3D 打印材料之一^[27],本次研究选择聚酰胺(PA12)为原材料进行制备。

实验采用的设备为惠普 HP-4200,打印层厚设

置为 0.05 mm,为了确保打印的温度,湿度,材料颗粒等条件相同,所有结构均使用 Magic 切片软件,进行排版切片,由同一个打印机同时上机制作。惠普 HP-4200 设备制造工艺大致如下:数据处理,模型通过切片软件处理好后,输入打印机;设备铺粉模块通过上下往复移动,在打印平台上铺设一层厚度为 0.05 mm 的材料粉末;设备热喷头模块通过左右往复移动在铺好的材料粉末上,根据软件切片的分层图案,高速精准的喷射熔融剂、细化剂两种辅助试剂;两侧的热源加热融化打印区域的材料和辅助化学试剂,喷有熔融剂和细化剂的材料部分会固化成型;整个过程会往复进行,直至打印程序完成。冷

却后处理,回收多余的粉末,即可得到最终打印模型.

2.2 实验方案

实验选用三思-CMT4304型微机控制电子拉力试验机,对试件进行准静态压缩实验,设备参数如表3所示.实验采用等速压缩的方式对试件进行加载,

对试件进行压缩时其上下压盘可视为刚性体,变形度为0.实验时上压盘以一定的速度匀速向下运动,保持下压盘不动,对试件进行压缩,记录实验过程中的载荷、位移、时间等数据.实验参数设置为:压缩速度为1 mm/min,采样频率为50 Hz,压缩应变统一设置为10%.如图2是P曲面准静态压缩试验图.

表3 CMT4304 电子万能试验机设备参数

Table 3 The equipment parameters of CMT4304 electronic universal testing machine

设备规格、型号	CMT4304 系列
设备名称	微机控制电子万能试验机
最大试验力	30 kN
试验机准确度等级	0.5
数据采样频率	50 Hz—1600 Hz, 频率可调;
试验力测量范围	0.4%—100%FS(最大负荷)
试验力示值相对误差	示值的±0.5%以内
位移分辨力	0.025 μm
最大变形测量范围(可选配件)	10-800 mm;
最大变形示值相对误差	示值的±0.5%以内

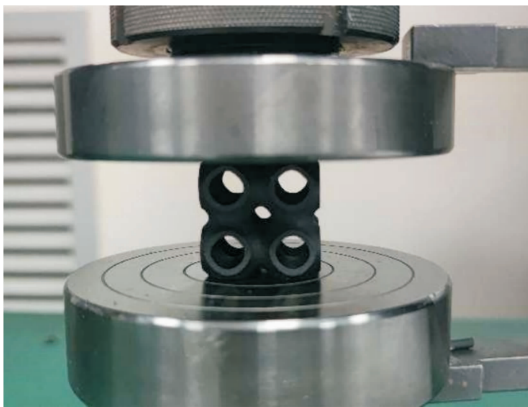


图2 P曲面准静态压缩试验

Fig. 2 Quasi-static compression test of P-surface

3 数值模拟

为验证实验结果的可靠性,采用Abaqus软件进行准静态压缩实验的对应数值分析.因压缩涉及到塑性阶段,需要获得材料塑性阶段的真实应力-应变曲线.按照GB/T1040.2-2006《塑料拉伸性能的测定》制备拉伸实验试件,试件标距50 mm、宽20 mm、厚4 mm.在进行实验前,先对试件进行尺寸测量,记录试件的宽度和厚度,实验过程中采集相应的力-位移曲线数据,各项数据如表4所示.图4中给出了聚酰胺(PA12)材料的真实应力-真实应变曲线.

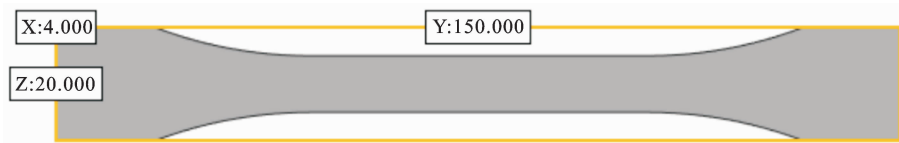


图3 拉伸试件尺寸图

Fig. 3 Tensile specimen size

表 4 试件拉伸数据

Table 4 Specimen tensile data

参数	宽度 w (mm)	厚度 H (mm)	最大力 F (N)	拉伸强度 σ (MPa)	弹性模量 E (MPa)	断裂拉伸应变 ϵ (%)
值	10.06	4.25	1953.4	45.69	912.6	16.8

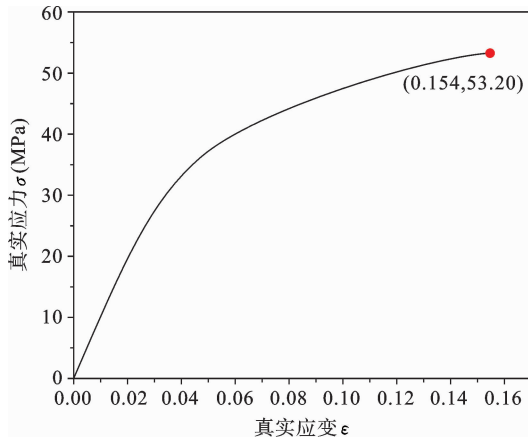


图 4 PA12 材料的真实应力应变曲线

Fig. 4 True stress-strain curve of PA12 material

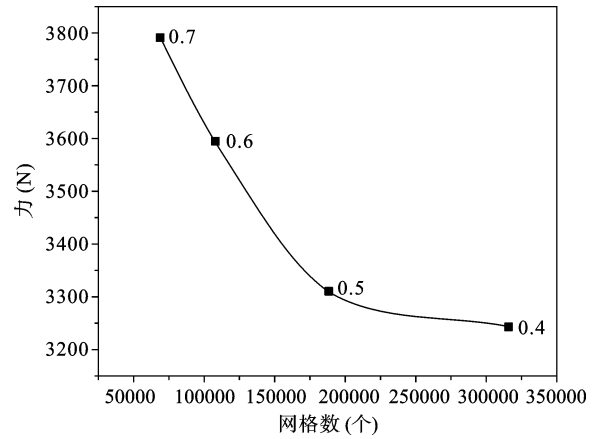


图 5 网格收敛性分析

Fig. 5 Grid convergence analysis

由于极小曲面的结构较为复杂,当采用不同的网格划分尺寸时,得到的网格数量不同.因此,在划分网格时首先对网格无关性进行验证.当网格尺寸为 0.7 mm 时,网格数量为 69132 个;当网格尺寸为 0.6 mm 时,网格数量为 108297 个;当网格尺寸为 0.5 mm 时,网格数量为 188542 个;当网格尺寸为 0.4 mm 时,网格数量为 315731 个;对网格进行收敛性分析,如图 5 所示,当网格划分尺寸为 0.5 mm 以下时,网格数量急剧增大,且对仿真结果的精度影响较小,误差小于 3%,故本次模型采用网格尺寸为 0.5 mm 进行网格划分.网格类型采用线性四面体单元(C3D4),网格划分结果如图 5 所示.

根据测得的材料参数和模型网格划分结果,建立有限元仿真模型.将设计好的多孔结构模型导入 Abaqus 软件中,添加上下两个刚体平面,模拟压头.设置上下两个刚体面和模型接触,接触类型选择通用接触.设置下刚性面限制 6 个方向的自由度,即为完全固定约束,完全固定,设置上刚性面沿 Z 轴方向以一定速度移动,模拟准静态压缩过程.

从有限元数值模拟结果中可以提取出 MJF 多孔结构准静态压缩过程中的载荷-位移曲线,为了得

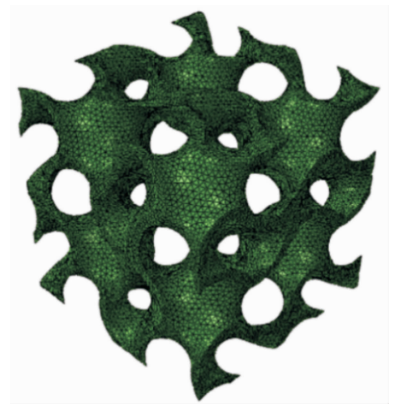


图 6 G 曲面网格划分

Fig. 6 Meshing of G surface

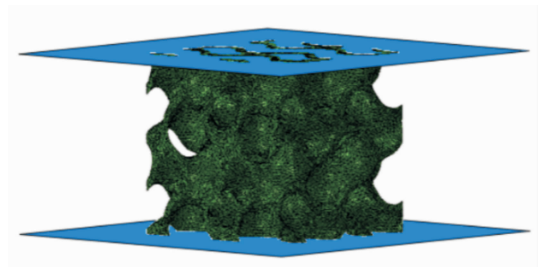


图 7 G 曲面多孔结构的有限元模型

Fig. 7 Finite element model of G surface porous structure

到对应的名义应力-应变曲线,用上刚性面反力 F 除以多孔结构的初始横截面积 A_0 ,可得多孔结构名义应力 σ_{nom} ;用压缩位移量 Δl 除以多孔结构的初始高度 l_0 ,可得多孔结构名义应变 ϵ_{nom} ,如式(2)、式(3)所示.

$$\sigma_{nom} = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

$$\epsilon_{nom} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3)$$

4 结果与讨论

4.1 力学性能

为详细分析 4 种不同多孔结构的力学性能,本节讨论了准静态压缩试验与数值模拟的对比分析结果.由图 8 可知,对 BCC 点阵结构进行压缩试验时,当压缩应变达到 10%,在 BCC 点阵结构的横梁交接处位置有明显的应力集中,Mises 应力值达到 40

MPa 以上(如图 8(b)的橙色、橘黄色和红色区域所示).此时,横梁处的 Mises 应力值很小(如图 8(b)的蓝色区域所示),在结构承载中发挥作用较小.随着压缩的进行,结构纵向支撑梁发生弯曲和变形,同时伴有明显的响声,结构出现断裂破坏.对照图 8(a)的压缩实验过程,可以看出仿真和实验的结果趋势一致.类似地,图 9 中给出了表面连续光滑的极小曲面 G 曲面结构的压缩实验图、仿真结构图和 Mises 应力云图结果.可以看出,极小曲面 G 曲面结构的应力集中位置分布于 G 曲面的孔洞处,相比 BCC 点阵结构,极小曲面 G 曲面结构的 Mises 应力值达到 40 MPa 以上的区域更多,应力分布较为均匀,这说明极小曲面 G 曲面结构相比 BCC 点阵结构可以更好的分散和传导压力,整体结构具有更好结构承载能力.并且,在相同压缩应变(10%)下,极小曲面 G 曲面结构没有出现明显的断裂破坏.

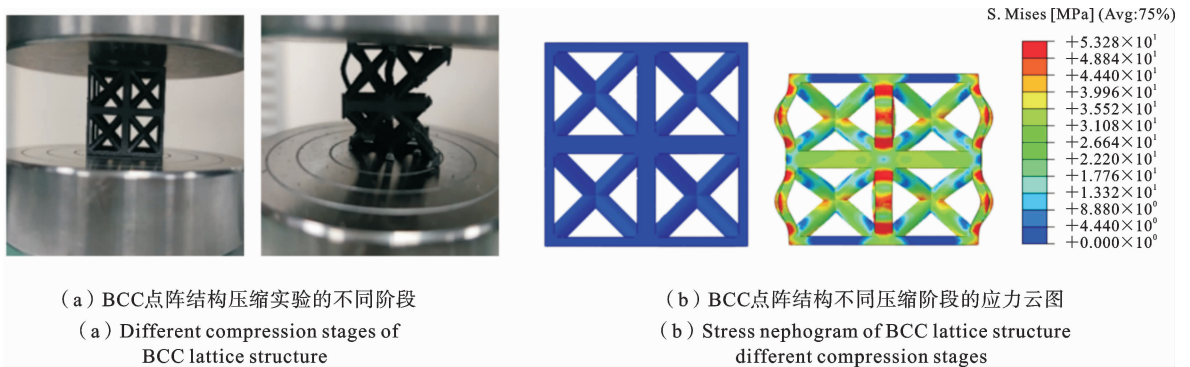


图 8 BCC 点阵结构的压缩实验和仿真结果

Fig. 8 Experimental and simulation results of BCC lattice structure

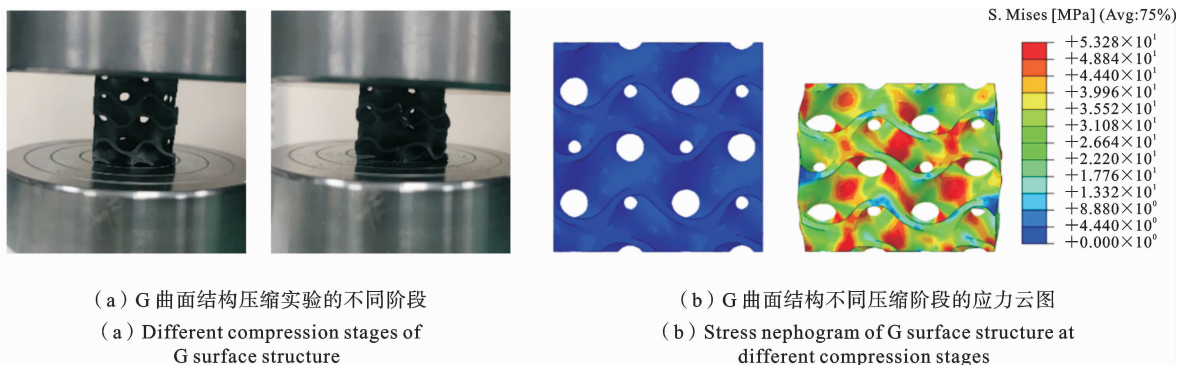


图 9 G 曲面结构的压缩实验和仿真结果

Fig. 9 Experimental and simulation results of G surface structure

图 10 中压缩应变达到 10% 时,极小曲面 P 曲面结构的压缩实验和仿真结果. 特别的,考虑到极小曲面 P 曲面是一种半封闭的包裹结构,图 11 中给出了从面 A-A 剖开后的内部 Mises 应力云图结果. 由图 10 和 11 可以看出,极小曲面 P 曲面结构的应力分布

也较为均匀,相比 BCC 点阵结构表现出更好的结构承载力学性能. 与极小曲面 G 曲面结构的压缩实验相比,极小曲面 P 曲面结构在曲面孔洞部分有较明显的 Mises 应力集中,当压缩应变达到 10% 时,极小曲面 P 曲面结构在左上侧孔洞处发生了断裂破坏.

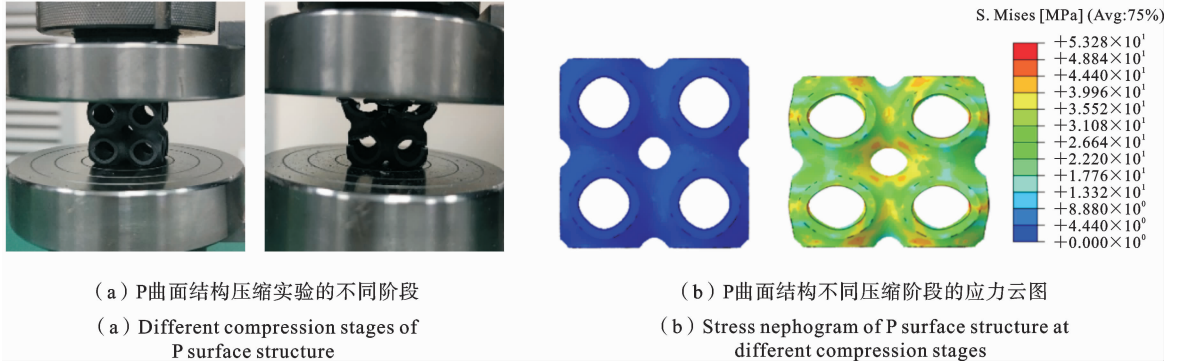


图 10 P 曲面结构的压缩实验和仿真结果

Fig. 10 Experimental and simulation results of P surface structure

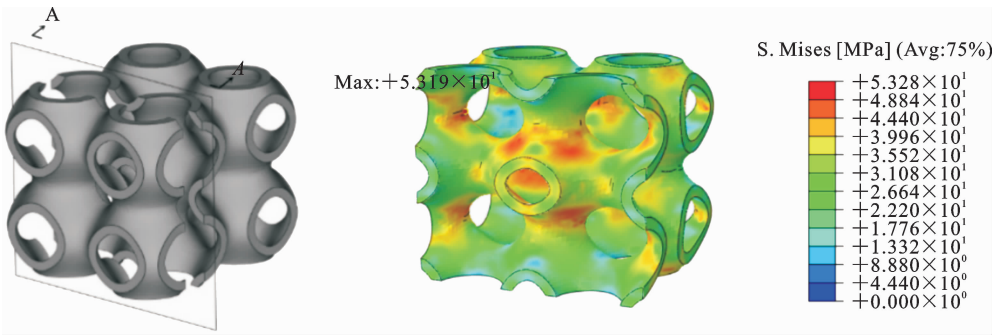


图 11 P 曲面结构仿真结果剖视图

Fig. 11 Section view of the simulation results of the surface structure

与极小曲面 P 曲面结构的半封闭不同,本研究的第三种极小曲面多孔结构-D 曲面结构式一种开

放式多孔结构. 图 12 中给出了极小曲面 D 曲面结构的压缩实验和 Mises 应力结果图. 对比图 8、9、10

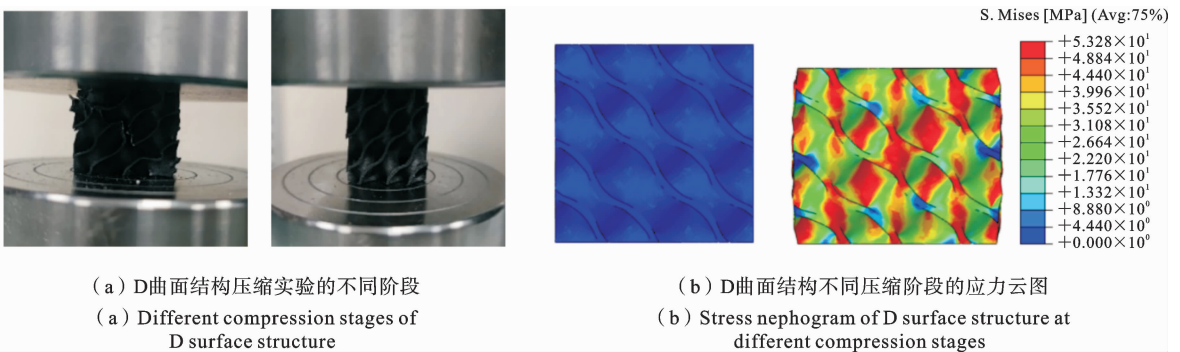


图 12 D 曲面结构的压缩实验和仿真结果

Fig. 12 Experimental and simulation results of D surface structure

和 12 可以发现,极小曲面 D 曲面结构相比 BCC 点阵结构和以上两种极小曲面多孔结构(G 曲面和 P 曲面),其结构的应力分布更加均匀,整体结构承载能力更强.对比压缩试验可以看出,当压缩应变达到 10%时,极小曲面 D 曲面结构整体变形更大,且没有发生断裂破坏.这说明,极小曲面 D 曲面结构还有进一步压缩及承载的潜力.

图 13 中给出了不同多孔结构的压缩试验与数值模拟获得的名义应力-应变曲线.从图中可以看出,曲线大致都分为两个阶段,弹性压缩阶段和平台吸能阶段.在弹性压缩阶段,多孔结构的名义应力与应变基本成正比;当应变达到一定程度,多孔结构开始进入平台吸能阶段,该阶段中压缩应变增加时,名义应力变化不大,维持在一个较为平缓的平台阶段,该阶段可以起到良好的吸能减震效果.对于多孔结

构来说,平台应力越高,代表整体结构的承载能力越好.由图 13 可以看出,BCC 点阵结构的平台应力为 2.0 MPa,三种极小曲面结构(G 曲面、P 曲面和 D 曲面)的平台应力分别为 4.0 MPa、2.1 MPa 和 4.75 MPa,均高于 BCC 点阵结构的平台应力.其中,极小曲面 D 曲面的平台名义应力近似达到 BCC 点阵结构平台名义应力的两倍以上.从图 13 中可以得到,BCC 点阵结构和三种极小曲面结构(G 曲面、P 曲面和 D 曲面)的弹性模量分别为 41.6 MPa、60 MPa、29.16 MPa 和 68.19 MPa.对照图 8-12 中的压缩实验可以看出,当四种结构都承受 10%的压缩应变时,弹性模量较小的 BCC 点阵结构和 P 曲面发生断裂破坏,而弹性模量较大的 G 曲面结构和 D 曲面结构仍未发生断裂,尚有进一步压缩的可能.本研究中,极小曲面 D 曲面结构的弹性模量最大,平台应

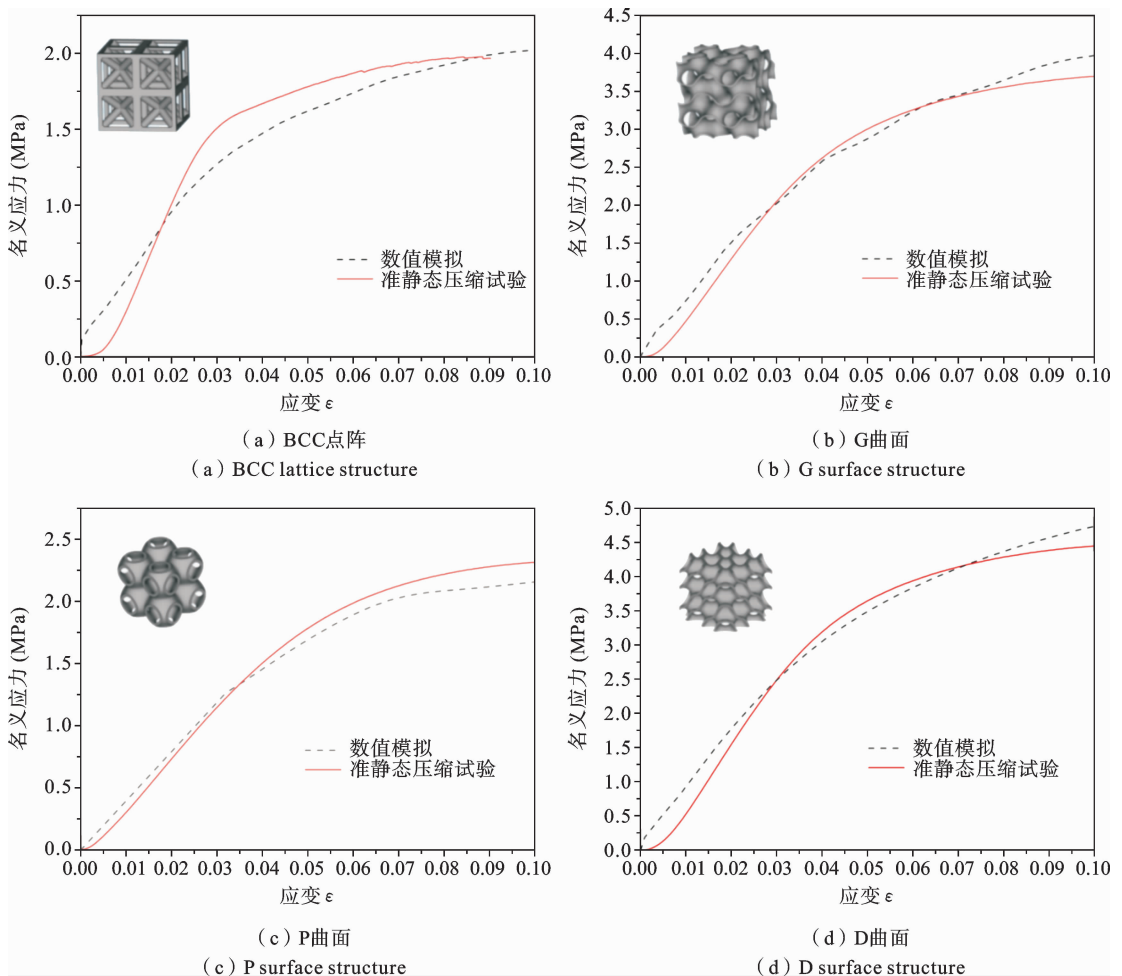


图 13 四种结构实验与数值模拟得到的名义应力-应变曲线

Fig. 13 The nominal stress-strain curves of four structures obtained by experiments and numerical simulations

力最大,承载能力最好.对比图 13(a)-(d)可以看出,本研究的数值模拟结果与实验曲线吻合较好,验证了结果的可靠性.

4.2 吸能特性

结构的吸能特性的常用评价指标有平均压缩力,吸能效率,单位体积吸能量等.其中平均压缩力代表了结构的承载能力,其大小和压缩位移共同决定了整个结构的能量吸收能力;吸能效率是指结构的吸能总量与峰值载荷 F_{\max} 的比值,表征了结构压缩从平台阶段向压实阶段的过渡点;单位体积吸能量是指结构的吸能总量与结构体积的比值,是比较实际结构的能量吸收能力的一个重要指标.考虑到结构轻量化和高效吸能的需要,本文采用单位体积吸能量作为评价多孔材料吸能性能的关键指标^[28].将多孔结构压缩至断裂,分析其吸能特性和承载能力.结构吸收的能量即为结构的应变能.其值越高,说明结构吸收的能量越多.结构的单位体积吸能量可以通过下式得到:

$$W = \int \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (4)$$

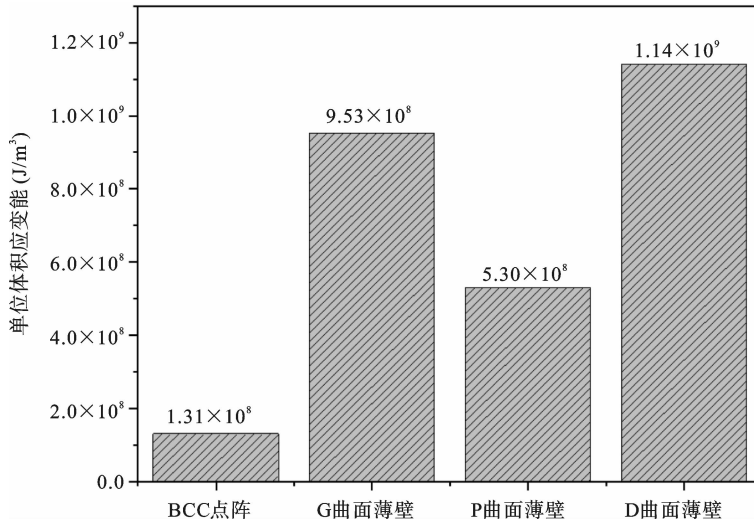


图 14 四种结构单位体积吸能量

Fig. 14 Strain energy per unit volume of four structures

5 结论

本文结合压缩试验和数值模拟,研究了 MJF 工

式中, ϵ 为压缩应变, $\sigma(\epsilon)$ 为应变为 ϵ 的名义应力.

通过式(4)计算出四种多孔结构的单位体积吸能量,其中 BCC 点阵结构的单位体积吸能量为 $1.31 \times 10^8 \text{ J/m}^3$,G 曲面的单位体积吸能量为 $9.53 \times 10^8 \text{ J/m}^3$,P 曲面的单位体积吸能量为 $5.30 \times 10^8 \text{ J/m}^3$,D 曲面的单位体积吸能量为 $1.14 \times 10^9 \text{ J/m}^3$,如图 14 所示.可以看出,三种极小曲面多孔结构单位体积吸能量显著高于 BCC 点阵结构.其中,D 曲面的单位体积吸能量是 BCC 点阵结构单位体积吸能量的 8 倍左右,证明极小曲面的连续曲面结构可以更好的分散压力,具有更好的吸能特性和承载能力.G 曲面的单位体积吸能量是 BCC 点阵结构单位体积吸能量的 7 倍左右,也是一种吸能特性良好的多孔结构.P 曲面由于局部应力集中发生破坏,但其单位体积吸能量仍能达到 BCC 点阵结构单位体积吸能量的 4 倍左右.结果表明:具有连续曲面的极小曲面多孔结构可以更好的分散压力,具有更好的吸能特性和承载能力.

艺制造的 PA12 材料极小曲面结构的力学响应;并开展压溃实验,讨论了三种极小曲面多孔结构(P、D 和 G)的吸能能力,并与常见的 BCC 点阵结构进行了对比分析.其主要的结论总结如下:

(1) 通过多孔结构的压缩试验与数值模拟的应力应变曲线对比发现:在相同的体积分数条件下,极小曲面多孔结构在平台应力显著优于传统 BCC 点阵结构.这是由于具有连续曲面的极小曲面多孔结构可以更好的分散压力,减少应力集中,具有更好的承载能力.

(2) 从实验观察和仿真云图中可以看出,三种极小曲面多孔结构中承载能力最差的 P 曲面在局部发生了弯曲变形,但是此时 P 曲面多孔结构的大部分材料尚未达到材料的极限应力,其性能依然优于传统 BCC 点阵结构.

(3) 对比不同多孔结构的单位体积吸能总量,可以看出极小曲面多孔结构单位体积吸能总量显著高于 BCC 点阵结构,三种极小曲面多孔结构中吸能能力最好的是 D 曲面,其单位体积吸能量可达 BCC 点阵结构的 8 倍左右.

参考文献

- [1] (德)克莱恩.轻量化设计[M].北京:机械工业出版社,2010.((German) Klein. Lightweight Design [M]. Beijing: China Machine Press, 2010. (in Chinese))
- [2] Giannitelli S M, Accoto D, Trombetta M, Rainer A. Current trends in the design of scaffolds for computer-aided tissue engineering [J]. *Acta Biomaterialia*, 2014, 10(2): 580-594.
- [3] 赵景丽.蜂窝夹层结构复合材料的性能研究[D].陕西:西北工业大学,2002.(Zhao J L. Performance Study of Honeycomb Sandwich Structure Composite Materials [D]. Shaanxi: Northwestern Polytechnical University, 2002. (in Chinese))
- [4] 邵志成.面向增材制造的机械结构轻量化设计方法研究[D].山东:青岛理工大学,2018.(Shao Z C. Research on Lightweight Design Methods of Mechanical Structures for Additive Manufacturing [D]. Shandong: Qingdao University of Technology, 2018. (in Chinese))
- [5] Rana, Liu. Effects of ceramic particles and composition on elastic modulus of low density steels for automotive applications [J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2014, 53(3): 300-316.
- [6] Bradley A Newcomb. Processing, structure, and properties of carbon fibers [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 91: 262-282.
- [7] 林鹏,于洋洋,田洪雷,户迎灿,陈书杰.面向不锈钢地铁整车结构的显式拓扑优化设计[J].*固体力学学报*,2022,43(01):111-120.(Lin P, Yu Y Y, Tian H L, Hu Y C, Chen S J. Explicit topology optimization design of stainless steel metro car body [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2022, 43(01): 111-120. (in Chinese))
- [8] Widawski G, Rawiso M, François B. Self-organized honeycomb morphology of star-polymer polystyrene films [J]. *Nature*, 1994, 369: 387-387.
- [9] 张平,周丽,邱涛.基于可变形蜂窝的柔性蒙皮力学性能分析与结构设计[J].*固体力学学报*,2013,34(05):433-440.(Zhang P, Zhou L, Qiu T. Mechanical property analysis and structural design of flexible skin based on deformable honeycomb [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2013, 34(05): 433-440. (in Chinese))
- [10] Wang X J, Xu S Q, Zhou S W, Xu W, Leary M, Choong P, Qian M, Brandt M, Yi M, Xie Y M. Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review [J]. *Biomaterials*, 2016, 83: 127-141.
- [11] 熊健,马力,杨金水,吴林志.碳纤维复合材料金字塔点阵结构制备工艺及力学性能研究[J].*固体力学学报*,2011,32(S1):8-13.(Xiong J, Ma L, Yang J S, Wu L Z. Fabrication and mechanical response of carbon fiber sandwich panels with pyramidal truss cores [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2011, 32(S1): 8-13. (in Chinese))
- [12] 王博.正交各向异性蜂窝材料多功能优化设计[J].*复合材料学报*,2008,03:202-209.(Wang B. Optimum design of multi-functional orthotropic honeycomb materials [J]. *Journal of Composite Materials*, 2008, 03: 202-209. (in Chinese))
- [13] Wang F X, Zhang T Y, Liu P J, et al. Mechanical properties of 316L pyramid lattice structure based on SLM process [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28(10): 99-106.
- [14] 姚龙飞.基于SLM的四棱锥点阵结构优化及变密度设计研究[D].河北:燕山大学,2021.(Yao F L.

- Research on Optimization of Pyramid Lattice Structure Based on Slm and Its Variable Density Design [D]. Hebei: Yanshan University, 2021. (in Chinese))
- [15] 史小全. 基于增材制造的 Ti6Al4V 股骨支架孔隙结构设计及性能研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2018. (Shi X Q. Pore Structure Design and Performance Study of Ti6Al4V Femoral Tissue Engineering Scaffold Based on Additive Manufacturing [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese))
- [16] 闫鑫, 田李昊, 彭昊, 吕琳. 三周期极小曲面结构设计及应用综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2023, 35(03): 329-340. (Yan X, Tian L H, Peng H, Lyu L. Design and applications of triply periodic minimal surfaces: A survey [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer, 2023, 35(03): 329-340. (in Chinese))
- [17] Osserman R. Lectures on minimal surfaces, Vol. 1. By Johannes C C. Nitsche [J]. The American Mathematical Monthly, 1991, 98(1): 72-74.
- [18] Rado. On Plateau's problem [J]. Annals of Mathematics, 1930, 31(2): 457-469.
- [19] 杨喆, 刘飞, 张涛, 邓兴, 张文正. TPMS 多孔铝-石蜡复合相变材料蓄热过程数值模拟及实验[J]. 化工进展, 2022, 41(09): 4918-4927. (Yang Z, Liu F, Zhang T, Deng X, Zhang Z W, Numerical simulation and experiment of heat storage process of TPMS porous aluminum-paraffin composite phase change material [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(09): 4918-4927. (in Chinese))
- [20] Shin J, Kim S, Lee D, Kim J. A parallel multigrid method of the Cahn-Hilliard equation [J]. Computational Materials Science, 2013, 71: 89-96.
- [21] 曾寿金, 刘广, 李传生, 叶建华, 李涤尘. 基于 SLM 的股骨柄多孔结构设计及力学性能分析[J]. 中国激光, 2022, 49(02): 174-187. (Zeng S J, Liu G, Li C S, Ye J H, Li D C. Porous structure design and mechanical properties analysis of femoral stem based on selective laser melting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(02): 174-187. (in Chinese))
- [22] 江振彦. 极小曲面的参数化生成与设计[D]. 南京大学, 2018. (Jiang Z Y. Parameterized Generation and Design of Minimal Surfaces [D]. Nanjing University, 2018. (in Chinese))
- [23] 郝永霞. 极小曲面造型中的相关问题研究[D]. 大连理工大学, 2013. (Hao Y X. Some Researches on Minimal Surface Modelling [D]. Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [24] 李涤尘, 苏秦, 卢秉恒. 增材制造--创新与创业的利器[J]. 航空制造技术, 2015, 479(10): 40-43. (Li D C, Su Q, Lu B H, Additive manufacturing--tool for innovation and entrepreneurship [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 479(10): 40-43. (in Chinese))
- [25] 戴欣伟. 基于 Grasshopper 的参数化设计在产品中的应用探索[J]. 设计, 2016, 242(11): 122-123. (Dai X W. The application and exploration of parametric design used in product design based on Grasshopper [J]. Design, 2016, 242(11): 122-123. (in Chinese))
- [26] 杨辉. 多孔结构的建模方法研究[D]. 江苏: 东南大学, 2017. (Yang H. Research on Modeling Method of Porous Structure [D]. Jiangsu: Southeast University, 2017. (in Chinese))
- [27] 唐鹿. 3D 打印聚酰胺材料的研究进展[J]. 化工新型材料, 2021, 01: 28-31+36. (Tang L. Research progress of PA 3D printing materia [J]. New Chemical Materials, 2021, 01: 28-31+36. (in Chinese))
- [28] Ma Z B, Zhang D Z, Liu F, Jiang J J, Zhao M, Zhang T. Lattice structures of Cu-Cr-Zr copper alloy by selective laser melting: Microstructures, mechanical properties and energy absorption [J]. Materials & Design, 2020, 187: 108406.

The Study on Mechanical Behavior and Energy Absorption Characteristics of Minimal Surface Structures Based on MJF

Jianghai Xiao Junling Hou Qun Li

(State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049)

Abstract The minimal surface structure is a continuous and smooth porous structure. It has the advantages of low density, high intensity, and excellent energy absorption capability. This paper has studied the mechanical properties and energy absorption characteristics of the minimal surface prepared by additive manufacturing process using nylon PA12. First, using the parametric modelling method, three kinds of minimal surface porous structures(G-surface, P-surface, and D-surface) with the same volume fraction of 20% are designed. The corresponding minimal surface structures are manufactured with Multi Jet Fusion (MJF) additive manufacturing technology. The mechanical response and energy absorption characteristics of different minimal surface structures are then analyzed by combining quasi-static compression tests and numerical simulations. For the mechanical response, it is found that the three kinds of minimal surface structures show better load-bearing capacities compared with the traditional BCC lattice structure. In detail, the nominal stresses of the three minimal surface structures(G-surface, P-surface, and D-surface) are 4.0 MPa, 2.1 MPa, and 4.75 MPa, respectively. The nominal stress value of the BCC lattice structure under the same volume is 2.0 MPa. It is clear that all values of the three minimal surface structures are significantly higher than that of the BCC lattice structure. For the study of energy absorption, the energy absorption per unit volume is used as one of key parameter to evaluate the energy absorption characteristic of the porous structure. The results indicate that the values of the energy absorption per unit volume for the three minimal surface structures(G-surface, P-surface, and D-surface) are all higher than that of the BCC lattice structure. The energy absorption per unit volume for the three minimal surface structures can approximately reach 7, 4, and 8 times that of the BCC lattice structure. In conclusion, the minimal surface structure can show excellent characteristics of mechanical property and energy absorption and has extensive application prospects in the fields of aerospace, automotive industry, and machinery.

Key words minimal surface, porous structure, additive manufacturing, mechanical property, energy absorption characteristic