三周期极小曲面设计及其3D打印PETG力学性能研究

邓壮壮，包 骥，刘世豪，肖明伟，邱 娜*

（海南大学机电工程学院，海南 海口 570228）

摘 要：三周期极小曲面（TPMS）结构具有较高的孔隙率与优异的能量吸收性能，在航空航天与汽车工程等领域展现出广阔的应用前景。基于Primitive（P）、Gyroid（G）和Diamond（D）晶格，以聚对苯二甲酸乙二醇酯-1，4环己烷二甲醇酯（PETG）为材料，采用3D打印设计并制造3种原位杂化TPMS晶格（PG、PD和GD），通过单轴压缩试验与数值模拟研究不同TPMS晶格在压缩载荷下的变形模式与力学特性。结果表明：PD杂化结构在单轴压缩过程中呈现稳定的逐层塌陷模式，显著提升吸能效率与吸能稳定性。与P晶格和D晶格相比，PD杂化结构的比吸能和平均碰撞力均显著提高。研究为PETG基轻质吸能结构的设计与应用提供了新的思路。

关键词：聚对苯二甲酸乙二醇酯-1，4环己烷二甲醇酯；三周期极小曲面；3D打印；有限元分析；力学性能

中图分类号：TQ323.4；TQ320.66 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-3360（2026）09-0156-07

DOI：10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.028

Study on Design of Triply Periodic Minimal Surfaces and Mechanical Properties of Their 3D-printed PETG

DENG Zhuangzhuang, BAO Ji, LIU Shihao, XIAO Mingwei, QIU Na*

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: Triply periodic minimal surface (TPMS) structures exhibit high porosity and excellent energy absorption performance, showing broad application prospects in aerospace and automotive engineering. Based on Primitive (P), Gyroid (G), and Diamond (D) lattices, three types of *in situ* hybrid TPMS lattices (PG, PD, and GD) were designed and fabricated by 3D printing using polyethylene terephthalate glycol (PETG) as the material. The deformation modes and mechanical properties of different TPMS lattices under compressive loading were investigated through uniaxial compression tests and numerical simulations. The results showed that the PD hybrid structure exhibited a stable layer-by-layer collapse mode during uniaxial compression, significantly enhancing its energy absorption efficiency and stability. Compared with the P lattice and D lattice, the PD hybrid structure exhibited notably higher specific energy absorption and mean crushing force. The study provides new insights for the design and application of PETG-based lightweight energy-absorbing structures.

Keywords: PETG; TPMS; 3D printing; Finite element analysis; Mechanical properties

三周期极小曲面(TPMS)具有独特的几何构型，在仿生[1-2]与工程材料[3-4]中展现出较高的比强度[5-6]、较大的孔隙率[7-8]以及出色的能量吸收能力[9-10]，在航空航天[11]、汽车缓冲[12]等轻量化与多功能结构领域受到广泛关注。在众多TPMS构型中，Primitive(P)、Gyroid(G)和Diamond(D)晶格因其各自不同的曲率特性与变形行为，在承载与吸能方面表现出不同的潜力。然而，单一类型的TPMS晶格在承受压缩载荷时往往存在变形不稳定或吸能效率受限等问题，难以兼顾高比吸能与变形可控性之间的平衡。

为拓展聚对苯二甲酸乙二醇酯-1,4环己烷二甲醇酯(PETG)在结构-功能一体化领域的应用，研究人员正致力于通过结构设计优化来实现这一目标[13-15]。YU等[16]采用连续玄武岩纤维和PETG为基材制备的加筋波纹夹芯结构具有优越的弯曲性能。ZAMANI等[17]设计一款山地自

收稿日期Submitted date 2025-09-22；修回日期Revised date 2025-10-25；录用日期Accepted date 2025-11-19

基金项目：国家自然科学基金项目（52475250）；海南省研究生创新科研课题项目（Qhys2024-226）

*联系人，nnaqiu@163.com

引用本文：邓壮壮，包骥，刘世豪，等.三周期极小曲面设计及其3D打印PETG力学性能研究[J].塑料科技，2026，54(9)：156-162.

Citation: DENG Z Z, BAO J, LIU S H, et al. Study on design of triply periodic minimal surfaces and mechanical properties of their 3D-printed PETG[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 156-162.

行车头盔，内衬为热塑性聚氨酯(TPU)制成的负泊松比次显微组织，外壳为PETG薄层，这种设计能够有效降低撞击的峰值加速度。SATHISHKUMAR等[18]发现，不同晶胞尺寸对增材P点阵结构能量吸收行为有显著影响。单一类型的TPMS晶格在压缩过程中易发生变形不稳、应力集中明显等问题，致使能量吸收效率与力学稳定性难以兼顾。因此，可将不同TPMS晶格在单胞尺度进行“原位杂化”，通过变形机制的协同与耦合实现PETG结构件综合力学性能的突破[19]。

现有研究多集中于单一TPMS构型，对多曲面几何耦合增强机制的探索不足。目前，针对PETG基TPMS晶格，尤其是多晶格杂化构型，仍缺乏系统性力学研究[20-22]。本研究基于Primitive(P)、Gyroid(G)和Diamond(D)三类TPMS晶格，采用熔融沉积成型(FDM)技术制备PETG基原位杂化晶格结构[23]，通过单轴压缩试验与数值模拟相结合的方法研究其在准静态压缩下的变形模式、能量吸收特性与力学响应规律，旨在为高性能PETG轻量化吸能结构的设计与开发提供试验依据。

1 结构设计制备与试验方法

1.1 TPMS结构设计

采用水平集方法对TPMS进行隐式表示是一种高效且灵活的方法。选择合适的水平集函数和参数可生成多种类型的TPMS。这些函数通过组合基本三角函数的叠加构建近似周期性极小曲面的数学模型。通过调整参数，生成的极小曲面可将三维空间划分为多个嵌套且连通的区域。其结构不仅支持高度灵活的用户自定义设计，还具备复杂的拓扑特征。单个立方单元胞内的P、G、D曲面可由式(1)~式(3)的水平集方程定义。

$$\mathrm{P}=\cos(X)+\cos(Y)+\cos(Z)=c \tag{1}$$

$$\mathrm{G}=\sin(X)\cos(Y)+\sin(Z)\cos(X)+\sin(Y)\cos(Z)=c \tag{2}$$

$$\mathrm{D}=\cos(X)\cos(Y)\cos(Z)-\sin(X)\sin(Y)\sin(Z)=c \tag{3}$$

式(1)~式(3)中：$X=\frac{2k\pi}{l}x$、$Y=\frac{2k\pi}{l}y$、$Z=\frac{2k\pi}{l}z$；k为控制三维空间中沿x、y、z方向的单位重复次数(即每个方向的周期数)；l为立方体域的大小；c为控制表面在立方体内的偏移量。

两个隐式曲面$\Phi_{\mathrm{P}}(x,y,z)$与$\Phi_{\mathrm{G}}(x,y,z)$通过线性插值混合为连续过渡曲面，从而生成兼具两者特性的复合网格。该混合函数的计算公式为：

$$\Phi_{\mathrm{Hybrid}}(x,y,z)=R\Phi_{\mathrm{P}}(x,y,z)+(1-R)\Phi_{\mathrm{G}}(x,y,z) \tag{4}$$

式(4)中：R为常数，取0.5。

在立方域内提取$\pm c$处的等值面，可获得两个TPMS壳面，二者共同构成闭合多孔结构。为量化该结构的体积分数，将相对密度(ρ)定义如下：

$$\rho=\frac{V_{\mathrm{TPMS}}}{V} \tag{5}$$

式(5)中：ρ为相对密度，%；V_{TPMS}为TPMS的体积，mm^3；V为立方体的体积，mm^3。

TMPS考虑到制造精度，本研究的设计参数设定为k=5，l=40，这意味着设计样品尺寸为40 mm×40 mm×40 mm，包含5×5×5单元胞晶格。针对P、G和D结构，均设定为30%的相对密度。执行MATLAB代码生成CAD模型，以立体光刻(STL)文件格式存储，作为制造及生成有限元模型的源文件。表1为不同TPMS晶格30%体积分数下的c值，图1为不同TMPS晶格30%体积分数下的CAD模型和体素化模型。

表1 不同TPMS晶格30%体积分数下的c值

Tab.1 c values of different TPMS lattices at 30% volume fraction

TPMS晶格	c值
P	0.527
G	0.477
D	0.262
PG	0.296
PD	0.143
GD	0.262

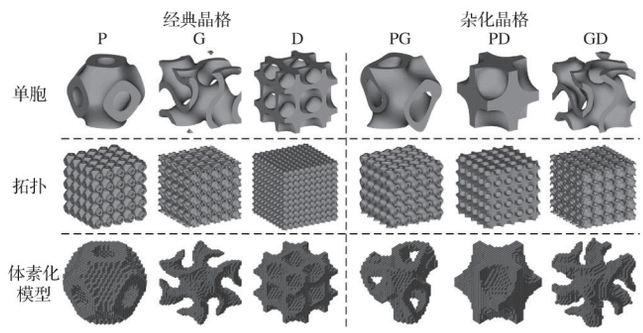


图1 不同TPMS晶格30%体积分数下的CAD模型和体素化模型

Fig.1 CAD models and voxelized models of different TPMS lattices at 30% volume fraction

1.2 标准件设计

压缩和拉伸试验的标准件分别采用ASTM D695—15和ASTM D638 (IV型)标准件[24]。标准件由3D打印制备成型，打印方式与各种晶格制备方式一致。图2为拉伸标准件和压缩标准件的CAD模型。从图2可以看出，拉伸标准件尺寸为115.0 mm×19.0 mm×4.0 mm，压缩标准件尺寸为25.4 mm×12.7 mm×12.7 mm。

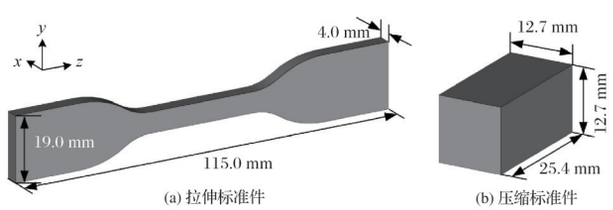


图2 拉伸标准件和压缩标准件的CAD模型

Fig.2 CAD models of standard tensile specimen and standard compressive specimen

1.3 TPMS样件制备

选用PETG线材，采用Bambu Lab P1P打印机通过FDM技术制作样品。通过Bambu Studio定义打印参数并切片STL文件以供打印。

图3为不同样件的打印走线方式。软件运行时，将实体STL模型精确切割为厚度均匀的多层结构，为每层规划专属打印程序。打印设备运行时，其加热块将PETG材料加热至设定温度，按照预设打印程序挤出熔融的PETG材料。待挤出的PETG材料冷却固化后，样品即成型。为确保研究结果的准确性并避免打印参数对样品力学性能产生干扰，整个制造过程均在恒定室温(26 ℃)下进行，所有打印参数保持一致。表2为FDM技术打印参数[25]。

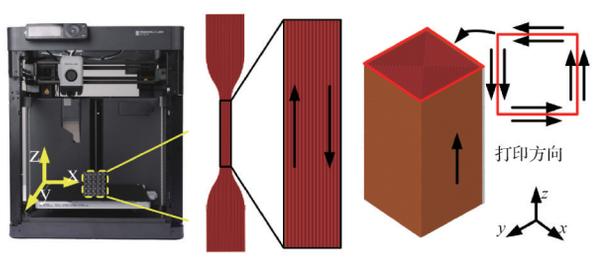


图3 不同样件的打印走线方式

Fig.3 Printing path patterns of different specimens

表2 FDM技术打印参数

Tab.2 FDM printing parameters

项目	数值
喷头直径/mm	0.4
打印速度/(mm·s^{-1})	20
热床温度/°C	70
喷头温度/°C	255
层高/mm	0.2
填充率/%	100

2 试验与仿真

2.1 试验与仿真工况

将TPMS结构置于固定的刚性板上，上刚性板以3 mm/min恒定速度施加压缩载荷。压缩位移设定为28 mm，占总尺寸的70%。压缩和拉伸试验均采用美国英斯特朗公司生产的Instron 3369万能材料试验机进行。图4为准静态压缩试验与仿真。所有TPMS晶格试验均采用3 mm/min的恒定加载速率。

2.2 网格划分

为研究TPMS结构的力学性能，采用ABAQUS/Explicit 2020有限元分析软件进行准静态压缩试验仿真。采用C3D4单元模拟刚性板，使用改进型八节点六面体实体单元(C3D8R)对TPMS结构进行离散化处理。为防止模型自侵入，采用摩擦系数为0.1的通用接触算法。材料本构模型采用弹塑性模型进行模拟。图5为CAD模型与体素化模型。以相对密度为30%的G晶格为例，进行网格尺寸收敛性分析，以确保模拟精度不受网格尺寸变化影响。选取5种不同的全局种子尺寸(0.30、0.32、0.35、0.40、0.50 mm)对同一结构进行网格划分，并在相同载荷条件下进行模拟。图6为网格收敛性分析曲线。从图6可以看出，当单元尺寸从0.35 mm减小至0.32 mm时，平台应力变化约为5%；当单元尺寸缩小至0.30 mm时，平台应力变化小于2%。综合考虑计算成本与精度，最终选定0.32 mm作为全局单元尺寸，整个结构共包含约60万个C3D8R单元。

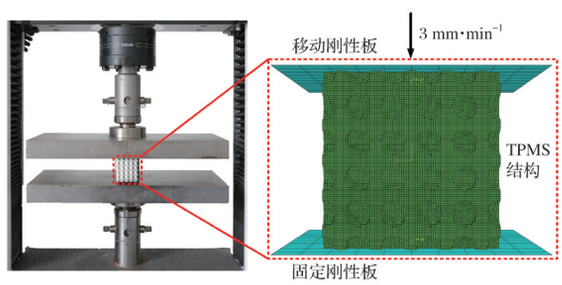
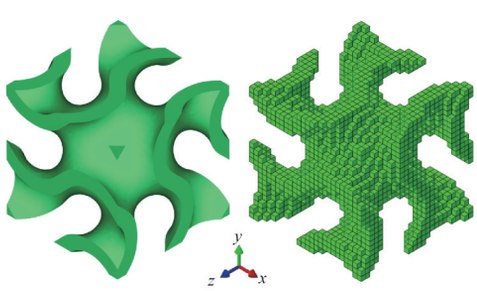


图4 准静态压缩试验与仿真

Fig.4 Quasi-static compression experiment and simulation



(a) CAD模型 (b) 体素化模型

图5 CAD模型与体素化模型

Fig.5 CAD model and voxelized model

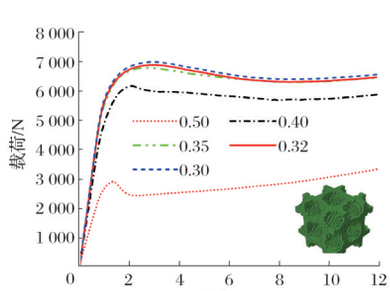


图6 网格收敛性分析曲线

Fig.6 Grid convergence analysis curves

2.3 性能指标

总吸收能量(W_{EA})：结构在加载过程中吸收的总能量，通常由载荷-位移曲线下的面积计算，是衡量防撞结构在冲击下的总能量耗散能力，其计算公式为：

$$W_{EA}=\int_0^{\delta_c}F(\delta)\,\mathrm{d}\delta \tag{6}$$

式(6)中：W_{EA}为总吸收能量，J；$F(\delta)$为压缩过程中的载荷，N；δ_c为压缩位移，mm；δ为位移，mm。

比吸能(S_{EA})：吸收能量与结构质量之比，衡量轻量化

结构在单位质量下的能量吸收能力，数值越大，能量吸收能力越强，其计算公式为：

$$S_{EA}=\frac{E_A}{m} \tag{7}$$

式(7)中：E_A为吸收能量，J；S_{EA}为比吸能，J/g；m为构件质量，g。

平均压溃载荷(M_{CF})：在有效变形位移范围内载荷的平均值，反映结构在稳定压溃过程中的承载水平，其计算公式为：

$$M_{CF}=\frac{W_{EA}}{\delta_c} \tag{8}$$

式(8)中：M_{CF}为平均压溃载荷，kN。

初始峰值载荷(I_{PCF})：压缩或冲击过程中出现的第一个最大载荷值。过高的峰值会产生过大冲击，应尽量降低I_{PCF}。

冲击效率(C_{FE})：平均压溃载荷与初始峰值载荷的比值，表征结构在降低峰值冲击和提高能量吸收能力之间的协调性，通常接近1为理想，其计算公式为：

$$C_{FE}=\frac{M_{CF}}{I_{PCF}} \tag{9}$$

式(9)中：C_{FE}为冲击效率，%；I_{PCF}为初始峰值载荷，kN。

3 结果与讨论

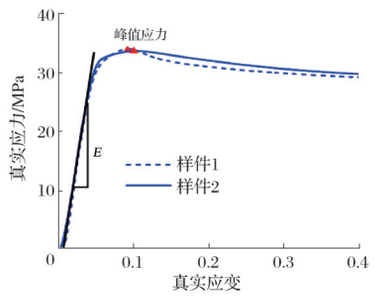
3.1 标准件压缩与拉伸试验

为了标定PETG材料性能，分别对标准件进行压缩试验和拉伸试验。图7为压缩标准件和拉伸标准件真实应力-应变曲线。从图7可以看出，压缩件和拉伸件的应力-应变曲线初始阶段均呈近似线性增长。其斜率对应材料的弹性模量(E)，反映材料在弹性变形阶段的刚度特性[26]。压缩件随着真实应变的增加，曲线在约0.08~0.10的真实应变范围内达到峰值应力，该峰值应力对应材料从弹性阶段过渡至屈服及塑性变形阶段的临界状态。超过峰值应力后，曲线略有下降并逐渐进入稳定变形阶段，表明材料在压缩过程中开始发生应变软化现象。根据准静态压缩试验和拉伸试验的结果，确定了TPMS结构中E等材料性能的模拟设置。为了简化模型，考虑一个完美的塑性材料模型。PETG的材料性能如下：密度为1.25 g/cm^3，E为750 MPa，泊松比为0.4，屈服应力为33 MPa。

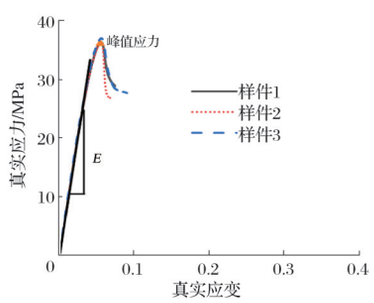
3.2 不同晶格压缩与拉伸试验

3.2.1 晶格的应力-应变曲线

图8为不同TPMS晶格在单轴压缩载荷下的应力-应变曲线，红色实线为试验结果，蓝色虚线为数值模拟结果。从图8可以看出，3D打印P晶格和PG晶格受层间连接的影响，导致试验数值低于仿真数值。这是由于简化的材料模型没有考虑破坏和失效，但整体来说仿真能够解释和说明试验的可靠性。从图8a~图8c可以看出，单一P、G、D晶格的压缩曲线均呈现典型的三阶段特征：初始线性弹性阶段、屈服后平台阶段及最终致密化阶段。与单一P、G、D晶格相比，图8d~图8f所示的PG、PD、GD杂化晶格在屈服后阶段表现出更高的承载能力和更平缓的应力波动，表明其结构在压缩过程中具有更优异的变形稳定性。基于P、G和D晶格的原位杂化设计可显著优化TPMS结构的应力分布，进而实现高效能量吸收。



(a) 压缩件



(b) 拉伸件

图7 压缩标准件和拉伸标准件真实应力-应变曲线

Fig.7 True stress-strain curves of standard compressive and tensile specimens

从图8还可以看出，杂化构型将两种不同晶格特征融合，优化了相对承载面积的分布，压缩应力在结构中更均匀地传递与分散，从而延缓局部失稳的发生。在所有杂化晶格中，PD杂化晶格的应力平台更高，吸能曲线更平稳，表明该结构在能量吸收效率与结构稳定性方面表现最佳。这与试验中观察到的逐层塌陷与局部致密化带形成相一致，验证了数值模拟结果的可靠性。杂化TPMS晶格在保留原有TPMS轻质特性的同时，显著提升了抗压强度与吸能性能，为轻质高能量吸收结构的设计提供了新的思路。

3.2.2 试验与仿真结果

图9为P、G和D晶格在单轴压缩变形过程中的应变云图。从图9可以看出，模拟结果以等效塑性应变(PEEQ)分布为主，颜色从蓝到红表示应变从低到高的变化趋势。3种晶格在压缩过程中均表现出由弹性阶段到屈服再到致密化阶段的典型变形演化规律，局部应变分布与变形模式存在显著差异。当应变为0.35时，P晶格的结构内部已出现明显的层状屈曲与局部失稳区域，出现“X”形剪切带，应变集中主要出现在水平层带上；当应变为0.70时，P晶格的结构沿压缩方向发生明显的层间塌陷，呈现出“逐层压溃”特征，与试验中观察到的分层塌陷模式一致。G晶格在压缩过程中整体形变较为均匀，应变集中区域较分散，表明其三维连续曲面结构有助于分散应力并延缓局部屈服的

发生。到高应变阶段(应变为0.70),虽然出现一定的整体塌陷,但仍保持较好的结构完整性和形变连续性。当应变为0.35时,D晶格的应变集中沿对角带状区域分布,表现出较强的剪切变形特征;当应变为0.70时,明显形成斜向塌陷带,表明在应力集中区,该结构的力学响应易发生局部失稳。

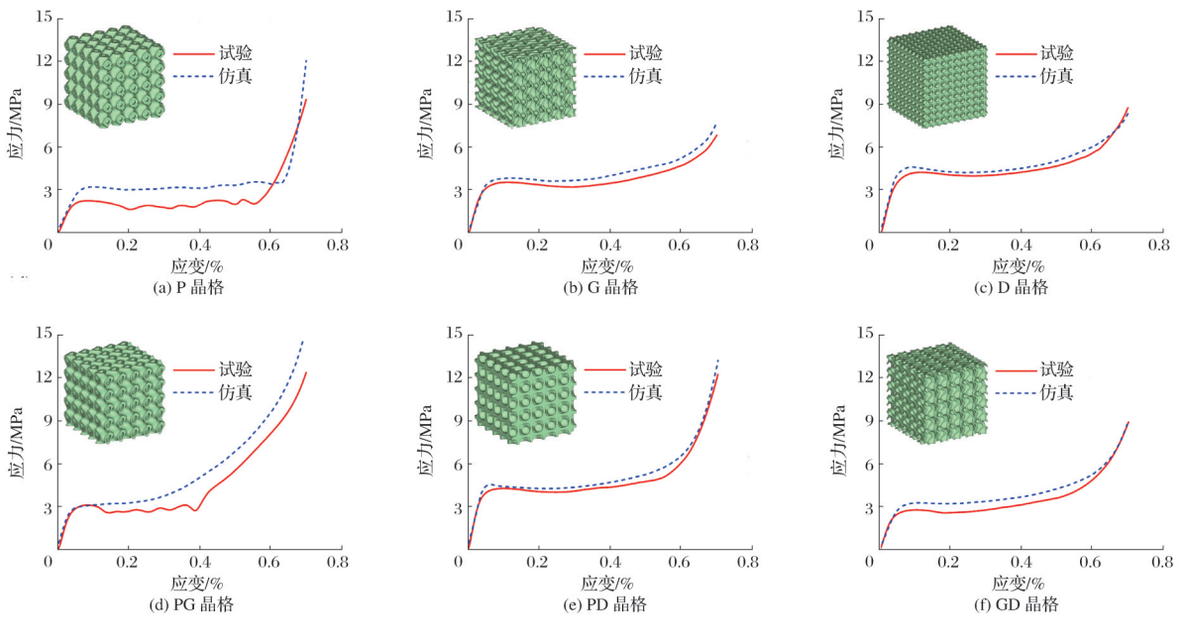


图8 不同TPMS晶格在单轴压缩载荷下的应力-应变曲线

Fig.8 Stress-strain curves of different TPMS lattices under uniaxial compressive loading

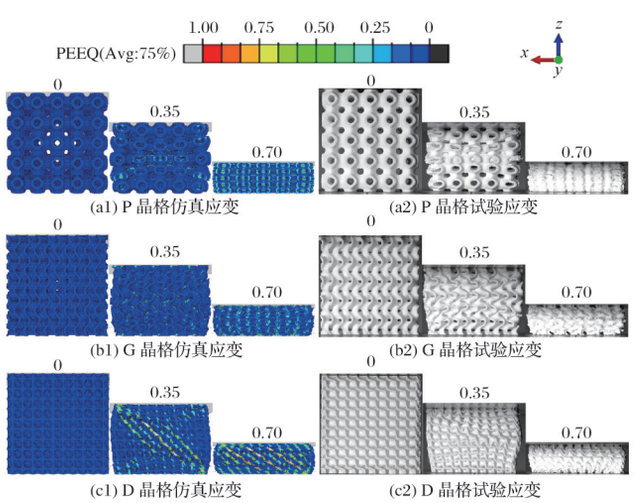


图9 P、G和D晶格在单轴压缩变形过程中的应变云图

Fig.9 Strain contour maps of P, G and D lattices during uniaxial compressive deformation

图10为PG、PD和GD晶格在单轴压缩变形过程中的应变云图。从图10可以看出,在变形模式和应变分布方面,当应变为0.35时,PG晶格的结构内部出现局部波纹状屈曲,应变集中主要分布于晶格界面过渡区域,表明晶格与晶格之间的结合处发生屈服;至高应变(应变为0.70)阶段,结构沿压缩方向逐层塌陷,形成明显的分层致密化带,且变形呈稳定推进模式。该逐层压溃的特征使PG结构在吸能过程中表现出良好的可控性与稳定性。当应变为0.35时,PD晶格出现较为均匀的应变分布,应变集中区域沿Z轴方向呈规则带状分布,表明两种晶格在界面处实现了较好的载荷传递,PD晶格拥有较好的承载能力;至高应变(应变为0.70)阶段,PD结构形成密集的层状压实带,塌陷过程稳定无突发失稳。该结构在试验中展现出显著的吸能能力与高平台应力,与仿真结果相吻合,在3种杂化结构中,PD的能量吸收性能最佳。当应变为0.35时,GD晶格结构的应变集中区域较为分散,表明其三维曲面几何有助于分散局部应力;在高应变阶段(应变为0.70),整体结构呈现连续塌陷,表现出良好的结构连续性和形变协调性。总体来看,数值模拟结果与试验现象高度吻合,验证了仿真模型的可靠性。

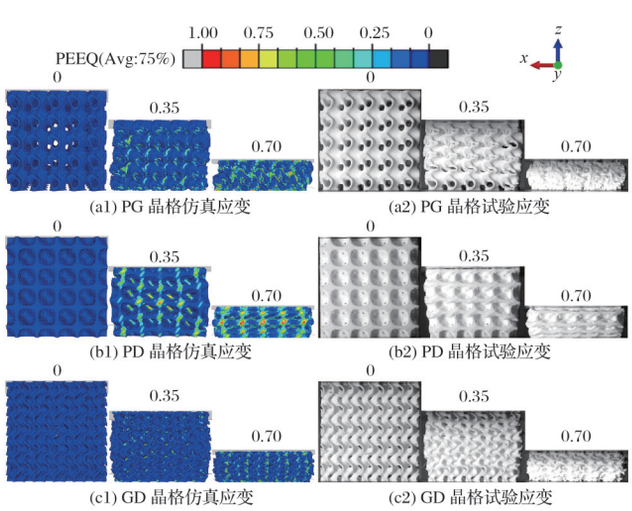


图10 PG、PD和GD晶格在单轴压缩变形过程中的应变云图

Fig.10 Strain contour maps of PG, PD and GD lattices during uniaxial compressive deformation

3.2.3 变形机理与性能分析

不同TPMS晶格在单胞高度方向的相对承载面积分布存在显著差异，这种差异反映了几何构型对力学响应特征的影响。图11为不同TPMS晶格的相对承载面积变化。从图11可以看出，单一P、G、D晶格的承载面积随高度呈双峰分布，其中P与D晶格在上、下端面处形成明显的承载集中区，最大承载面积分别为39.83%与39.63%，中部区域承载较弱，表明其力流传递主要沿垂直方向分层传递，易在中段产生屈曲失稳。而G晶格的承载面积分布相对平缓，最大承载面积为35.75%，表明其三维连续曲面有助于载荷均匀扩散，减弱了局部应力集中。

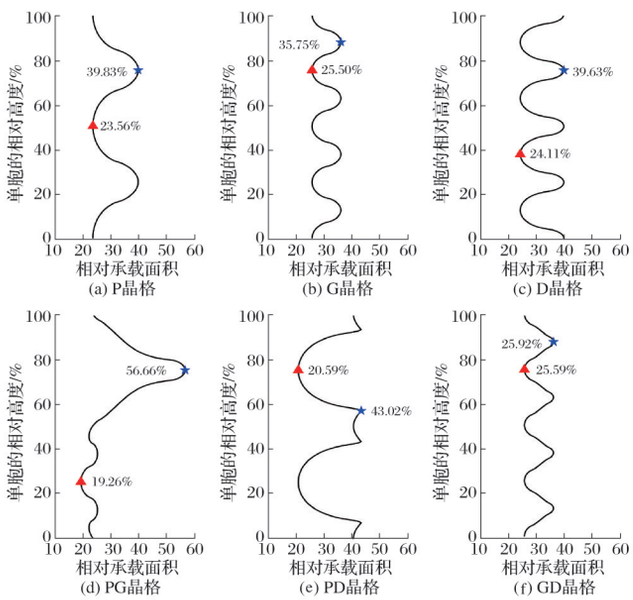


图11 不同TPMS晶格的相对承载面积变化

Fig.11 Variation of relative load-bearing area of different TPMS lattices

在杂化结构中，承载分布表现出更强的协同特性。PG晶格的最大承载面积为56.66%，底部存在较低承载区，容易导致分层塌陷的逐步推进。PD晶格的承载分布最为均衡，说明该结构在压缩过程中具备更好的载荷传递连续性与层间协同性。相比之下，GD晶格的峰值差异较小(25.92%与25.59%)，承载分布较为分散，体现出其整体形变的连续性，但局部吸能能力有限。

3.2.4 力学性能分析

图12为不同TPMS晶格的比吸能、平均压溃载荷和冲击效率。从图12a可以看出，单一晶格中D晶格的比吸能最高，为8.82 J/g；P晶格最低，为5.54 J/g。3种杂化构型比吸能均显著提升，其中PD晶格的比吸能达9.55 J/g，较P晶格与D晶格分别提高72.4%与8.3%。杂化设计通过几何函数叠加与拓扑过渡有效改善晶格内部的应力分布，使载荷在压缩过程中更均匀地传递，从而实现更高的能量吸收效率。其原因在于杂化晶格的多曲面耦合效应，使承载路径更连续，能量耗散更均匀。从图12b可以看出，D晶格的平均压溃载荷最高，约为6.64 kN，表明其在塑性阶段具有更强的持续承载能力和更稳定的吸能平台。与P晶格相比，PG与GD晶格的平均压溃载荷也有所提升，但提升幅度不大，表明不同杂化路径对应的承载协同效应存在差异。P晶格的冲击效率最低，而G、D、PD和GD的冲击效率接近1，效果更加理想。因此，3D打印PETG杂化TPMS结构能够在保持轻质特性的同时显著提升压缩承载能力与吸能性能。

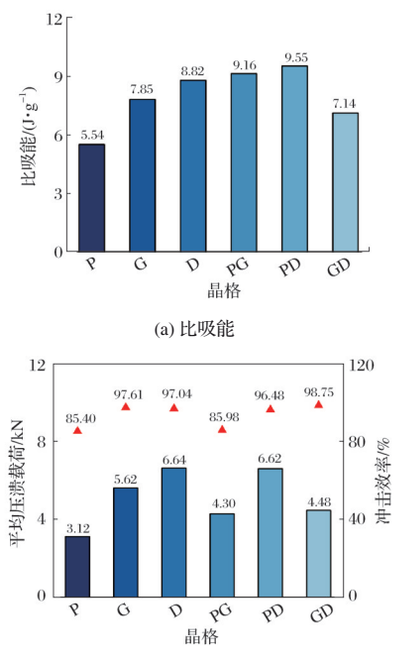


图12 不同TPMS晶格的比吸能、平均压溃载荷和冲击效率

Fig.12 Specific energy absorption, mean crushing load and impact efficiency of different TPMS lattices

4 结论

研究基于P、G和D晶格，以PETG为材料，采用3D打印设计并制造3种原位杂化TPMS晶格(PG晶格、PD晶格和GD晶格)，通过单轴压缩试验与数值模拟，研究不同TPMS晶格在压缩载荷下的变形模式与力学特性。结果表明：杂化设计能够显著改善TPMS结构的力学响应特征。在压缩载荷下，与单一P、G和D晶格相比，杂化晶格呈现更平缓的应力波动与更稳定的层状塌陷模式，整体结构表现出优异的承载连续性与形变协调性。其中，PD杂化结构在压缩过程中形成致密且稳定的层状压实带，可有效抑制局部失稳。杂化几何耦合提高了压缩承载能力与吸能性能。单一TPMS结构的承载面积沿高度方向呈双峰分布，易出现中部屈曲失稳；而杂化结构实现了承载路径的多峰平衡分布，应力传递更均匀，能量耗散更充分。PD晶格在上下两端实现平滑过渡，有效避免了局部屈曲。本文提出的建模方法可有效指导PETG材料3D打印制造TPMS结构的性能设计。

杂化晶格在几何分布上实现了承载面积的合理过渡，

使力流在高度方向上呈“多峰平衡型”分布，能够有效抑制局部失稳并提升压缩稳定性。杂化策略显著改善了TPMS结构在压缩载荷下的力学响应，为实现高比吸能与轻质高强设计提供新的思路。

参考文献

[1] 刘志鹏. 仿生薄壁多孔结构设计及其耐撞性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.

[2] 吴耀中, 王亚辉, 李学鹏, 等. 不同参数三周期极小曲面夹层结构三点弯曲性能的有限元模拟[J]. 机械工程材料, 2024, 48(12): 106-111.

[3] 李媛, 李洋, 班子豪, 等. 三周期极小曲面功能梯度点阵结构的动力学特性[J]. 机械工程材料, 2025, 49(8): 86-93.

[4] 秦世坤, 段明德, 梁士杰, 等. 基于三周期极小曲面的梯度多孔支架力学及渗透性能研究[J]. 机械强度, 2025, 47(3): 51-59.

[5] 吕程, 王龙, 郭阳阳. 选区激光烧结制备极小曲面结构及力学性能研究[J]. 中国机械, 2025(20): 53-56.

[6] 果春焕, 王磊, 邵帅齐, 等. 激光粉末床熔融金属点阵结构力学性能研究进展[J]. 材料导报, 2025, 39(6): 212-221.

[7] 张鹏. 基于TPMS的复杂多孔结构力学性能研究[D]. 长春:吉林建筑大学, 2025.

[8] 时艺, 乌日开西·艾依提, 张宇涛. 激光选区熔化制备三周期极小曲面多孔结构性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(1): 237-244.

[9] 程乾, 尹剑飞, 温激鸿, 等. 功能梯度三周期极小曲面静动态力学特性[J]. 力学学报, 2024, 56(9): 2646-2658.

[10] 程乾, 尹剑飞, 温激鸿, 等. 极小曲面力学超材料抗冲吸能特性分析[J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(7): 43-50.

[11] 张家中. 基于3D打印的三周期极小曲面吸能结构力学性能研究[D]. 海口: 海南大学, 2023.

[12] 油百川. 基于应力匹配的变密度混合TPMS结构设计及力学性能仿真研究[D]. 长春: 吉林大学, 2025.

[13] 黄程. 基于IM与FDM的PETG/ABS材料制备及力学性能研究[D]. 抚州: 东华理工大学, 2021.

[14] MELLOULI H, MALLEK H, ALLOUCH M, et al. Structural optimization of additively manufactured PETG/CF honeycomb sandwich structures for lightweight applications[J]. Progress in Additive Manufacturing, 2025, 10(8): 5447-5463.

[15] ROMEIJN T, BEHRENS M, PAUL G, et al. Instantaneous and long-term mechanical properties of polyethylene terephthalate glycol (PETG) additively manufactured by pellet-based material extrusion[J]. Additive Manufacturing, 2022, 59: 103145.

[16] YU Y, XU J S, JIA X X, et al. High-performance bending in 3D-printed reinforced-rib corrugated composites via continuous fiber additive manufacturing: A hybrid experimental-computational approach[J]. Thin-Walled Structures, 2025, 217: 113905.

[17] ZAMANI M H, HEIDARI-RARANI M, MIRKHALAF M. Design, optimization and additive manufacturing of an innovative bike helmet using auxetic metastructures[J]. International Journal of Solids and Structures, 2025, 310: 113240.

[18] SATHISHKUMAR N, ARUNKUMAR N, ROHITH S V, et al. Effect of varying unit cell size on energy absorption behaviour of additive manufactured TPMS PETG lattice structure[J]. Progress in Additive Manufacturing, 2023, 8(6): 1379-1391.

[19] ZHANG D, LI M Y, QIU N, et al. 4D-printed reusable metamaterial via shape memory effect for energy dissipation[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 275: 109309.

[20] ALAGHEBAND M, ZHANG Q, JUNG S. Accelerated creep prediction in 3D printed PETG components using the stepped iso-stress method[J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 182: 110120.

[21] BAKARDZHIEV V, SABEV S, CHUKALOV K. Studying influence of 3D printing parameters of PETG to improve hardness and maximum tensile strength[J]. Engineering Proceedings, 2025, 104(1): 39.

[22] CHOUHAN G, GUNJI B M, BIDARE P, et al. Experimental and numerical investigation of 3D printed bio-inspired lattice structures for mechanical behaviour under quasi static loading conditions[J]. Materials Today Communications, 2023, 35: 105658.

[23] RAMOS L L B, IWASAKI K M K, BECK R, et al. Influence of layer orientation on the mechanical properties of fused deposition modelling using PLA and PETG[J]. Materialia, 2025, 44: 102541.

[24] BARANOVSKYI D, WYSMULSKI P, ROZYLO P, et al. Investigation of buckling and failure in thin-walled columns fabricated from PLA and PETG using FDM 3D printing[J]. Materials, 2025, 18(14): 3346.

[25] KUMARESAN R, KADIRGAMA K, SAMYKANO M, et al. Optimization of inter-layer printing parameters for enhanced mechanical performance of PETG in fused deposition modeling (FDM) [J]. Results in Engineering, 2025, 25: 104564.

[26] KUMARESAN R, KADIRGAMA K, SAMYKANO M, et al. In-depth study and optimization of process parameters to enhance tensile and compressive strengths of PETG in FDM technology[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 37: 397-416.