中国科学: 物理学 力学 天文学 2026 年 第 56 卷 第 11 期: 114623
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica physcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文 超材料: 新型力-热功能设计专题

可重复使用TPMS力学超材料的压溃行为及能量吸收特性

唐浩楠[1], 石甜[1], 张威[2], 原媛[3], 范学领[1], 白春玉[4], 张宇[4], 贾贺[5], 王永滨[5], 范东宇[5], 秦庆华[1*]

1. 西安交通大学航天航空学院, 极端环境服役性能与防护技术西安市重点实验室, 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 710049
2. 武汉科技大学物理与力学学院, 武汉 430065
3. 上海海事大学物流工程学院, 上海 201306
4. 中国飞机强度研究所, 强度与结构完整性全国重点实验室, 西安 710065
5. 北京空间机电研究所, 北京 100094

*联系人, E-mail: qhqin@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2026-03-19; 接受日期: 2026-05-20; 网络出版日期: 2026-08-26
国家自然科学基金(编号: 12472391, 12572439, 12372183)和航天进入减速与着陆技术实验室开放基金(编号: 23-11-064-W)资助项目

摘要 三周期极小曲面(Triply Periodic Minimal Surface, TPMS)力学超材料是一类拓扑构型可调控的多孔材料, 兼具轻质、高比刚度、高比强度、优异缓冲吸能特性, 在航空航天、防护工程、生物医疗等领域有广泛的应用前景. 采用选择性激光烧结技术制备了三种不同构型的TPMS力学超材料试样, 通过准静态压缩和循环加载试验分别研究了TPMS力学超材料的能量吸收能力与可重复使用性, 分析了三种典型胞元构型材料在压缩载荷下的压溃行为与变形机理. 研究结果表明: TPMS力学超材料在首个加载循环后应力水平明显降低, 而自第二个循环起力学响应趋于稳定, 且应力-应变响应曲线与构型密切相关; 三种构型在压溃过程中均表现为整体均匀变形模式; 数值模拟的压溃变形模式与试验结果一致, 应力-应变响应吻合良好.

关键词 三周期极小曲面, 力学超材料, 循环载荷, 压溃, 能量吸收

PACS: 46.32.+x, 46.35.+z, 46.25.-y, 46.70.-p

1 引言

具有点阵结构的力学超材料是一类受金属晶格结构启发, 由杆件和节点周期性排布构成的轻质高强结构形式, 具有优异的比强度、比刚度以及良好的抗冲击、吸能和吸声降噪等多功能一体化特性[1]. 凭借上述优势, 具有点阵结构的力学超材料在航空航天、车辆工程和生物医药等领域得到了广泛应用[2,3]. 根据胞元类型, 点阵结构可分为桁架点阵[4–6]、平板点阵[7]和曲壳点阵[8]. 其中, 三周期极小曲面(Triply Periodic Minimal

引用格式: 唐浩楠, 石甜, 张威, 等. 可重复使用TPMS力学超材料的压溃行为及能量吸收特性. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 114623
Tang H, Shi T, Zhang W, et al. Crushing behavior and energy absorption characteristics of reusable TPMS mechanical metamaterials (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 114623, doi: 10.1360/SSPMA-2026-0205

© 2026《中国科学》杂志社

Surface, TPMS)结构是一种受自然界结构形态[9]启发提出的三维曲壳点阵结构, 因其在孔隙率可调性、表面连续性和拓扑连通性等方面的独特优势, 近年来已成为轻量化结构设计和能量吸收领域的研究热点.

TPMS在数学上定义为三维坐标系中周期性排列的、在给定边界条件下面积最小且平均曲率为零的一类曲面[10]. 这类曲面在自然界中广泛存在于蝴蝶翅膀[11]和甲壳虫外壳[12]等生物结构中. 得益于其连续变化的曲率半径以及内部不存在自相交区域, 基于TPMS构型的力学超材料能够显著降低甚至近乎完全消除结构中的应力集中现象. Maskery等人[13]通过试验分别研究了Primitive构型、Gyroid构型和Diamond构型块状TPMS力学超材料的准静态力学行为, 发现块状P构型TPMS力学超材料在三种构型材料中有最高弹性模量和最低的承载能力. Al-Ketan等人[14]通过试验与数值模拟研究, 发现片状G构型和D构型材料的弹性模量和屈服强度显著高于块状构型和八面体桁架点阵材料. Abou-Ali等人[15]通过实验与仿真发现片状TPMS的不连续性, 能够最大限度地减少材料应力集中的影响. Zhou等人[16]发现片状TPMS力学超材料在表面积、刚度、平台应力和能量吸收能力方面均明显优于BCC (Body-Centered Cubic)点阵材料, 其中D构型材料表现出最优异的力学性能, 而P构型材料由于弯曲胞壁的局部屈曲, 在初始峰值应力后表现出显著软化和应力波动. 除了均匀TPMS力学超材料, 学者对梯度TPMS力学超材料的力学行为进行了初步研究. Yang等人[17]设计并制备了钛合金(Ti-6Al-4V)材料的密度梯度TPMS超材料, 试验表明, 块状梯度TPMS超材料表现为脆性的逐层压溃的变形模式, 而片状梯度TPMS超材料具有逐层屈曲的变形模式. 不仅如此, 片状梯度TPMS超材料的应力分布均匀, 在屈服后阶段的应力波动小, 具有优异的能量吸收特性. Liu等人[18]通过试验与有限元仿真, 开展了冲击载荷下混合TPMS力学超材料的压溃行为和缓冲吸能机理研究, 分析了胞元构型和动态效应等因素对其力学行为的影响. 在TPMS力学超材料的理论研究方面, Yin等人[19]利用折叠元理论和能量守恒原理对TPMS超材料的力学性能进行了理论预测, 揭示结构参数对TPMS超材料吸能的影响规律. Liang等人[20]研究了梯度TPMS力学超材料的准静态力学行为, 发现梯度TPMS超材料具有比均匀TPMS超材料更好的能量吸收能力. 此外, 杂化设计也是TPMS结构的重点发展方向, Liu等人[21]对TPMS进行仿生杂化设计, 发现仿生杂化TPMS力学超材料在准静态压缩下表现出优异的力学性能和吸能能力. Singh等人[22]研究了基于$AlSi_{10}Mg$材料的Gyroid试样和I-WP (I-Wrapped Package)试样的疲劳性能, 发现较低的加载频率会导致疲劳棘轮应变和疲劳损伤应变的显著累积. Cebrian Carcavilla和Zaki[23]研究了基材为NiTi形状记忆合金的Schwarz Primitive构型超材料在循环载荷作用下有效相变阈值的演变. 此外, Wan等人[24]通过准静态循环加载试验, 研究了4种均匀TPMS试样能量耗散和变形恢复能力, 发现I-WP点阵因其均匀的应变分布而具有最强的变形恢复能力.

综上所述, TPMS力学超材料的性能与力学行为受基材类型、拓扑构型、相对密度以及加载速率等多种因素的共同影响. 现有研究主要集中于结构单调加载条件下的静动态力学行为, 对于循环载荷作用下TPMS力学超材料力学行为的系统研究仍较为匮乏. 本文构筑了三种典型构型的片状可重复使用TPMS力学超材料, 通过准静态循环压缩试验和有限元仿真模拟, 研究了可重复使用TPMS力学超材料的压溃行为与能量吸收特性, 重点分析了胞元构型对其力学性能和变形机制的影响规律, 为高性能、可重复使用的吸能防护结构设计提供理论依据和技术支持.

2　TPMS构筑与试验方法

2.1　TPMS胞元构型及几何建模

TPMS可以使用水平集近似方程[25]直接数学描述, 通过几个三角函数直接在三维空间中生成周期性曲面. 曲面的几何形状是连续、不相交的, 将空间划分为两个区域. 对应的水平集近似方程如下:

$$\varphi(r)=\sum_{k=1}^{k}A_k\cos\left[\frac{2\pi(h_k\cdot r)}{\lambda_k}+P_k\right]=c, \tag{1}$$

其中, r是欧几里得空间的位置向量, A_k为振幅, h_k为周期数目, k为单元尺寸, P_k是相位偏移, c是水平常数, 直接调控结构体积分数. 本文主要研究Primitive, Gyroid和Diamond三种典型的TPMS曲面(图1), 其表达式[26]如下所示:

$$\varphi_{\mathrm{P}}=\cos x+\cos y+\cos z, \tag{2}$$

$$\varphi_{\mathrm{G}} = \sin x\cos y + \sin y\cos z + \sin z\cos x, \tag{3}$$

$$\varphi_{\mathrm{D}} = \cos x\cos y\cos z - \sin x\sin y\sin z, \tag{4}$$

其中, P, G和D分别为Primitive, Gyroid和Diamond单胞的简称.

利用Mathematica软件, 通过调节上述TPMS表达式中的相关参数可以实现对不同TPMS构型相对密度的有效调控. 采用双侧偏移法生成TPMS构型STL (Stereolithography)模型: 沿曲面法向方向往两侧分别进行等距偏移, 形成两个新的曲面, 并将两曲面之间的区域定义为实体, 其余空间则作为孔隙区域[27]. 图2给出了采用双侧偏移法构建的G构型力学超材料模型图.

2.2　试样制备及材料性能

采用选择性激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS)技术制备TPMS材料. 基材所用材料为LUVOSINT-X92A-2型热塑性聚氨酯(TPU)粉末, 其主要打印参数列于表1. 如图3所示, 三种TPMS材料试样的相对密度均为30%, 单胞边长为16 mm, 整体结构由5×5×5个胞元周期性排列组成.

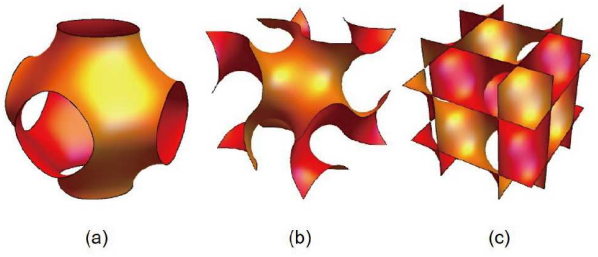


图 1　(网络版彩图)三种TPMS曲面示意图. (a) Primitive; (b) Gyroid; (c) Diamond

Figure 1　(Color online) Schematic diagrams of three TPMS surfaces. (a) Primitive; (b) Gyroid; (c) Diamond.

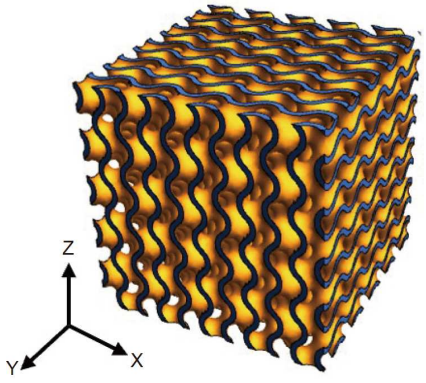


图 2　(网络版彩图) Gyroid力学超材料

Figure 2　(Color online) Gyroid mechanical metamaterial.

为表征SLS成形TPU材料的力学性能及其各向异性特征, 分别沿三种不同打印方向制备TPU标准拉伸试样, 并开展单轴拉伸试验. 每个打印方向上打印了2个试样, 试样标距为25 mm, 厚度为3 mm, 单轴拉伸试验按照GB/T 528-2009标准(哑铃形试样)执行, 加载速率设定为5 mm/min. 名义应力-应变曲线如图4所示. 试验结果表明, TPU在X与Y两个打印方向上的力学性能差异较小, 表明可近似认为是横观各向同性材料.

2.3　循环压缩试验

采用如图5所示的100 kN电子万能试验机对每个试样进行3次准静态循环加载试验. 试样放置在圆盘的中心, 将其与点阵结构的上下表面无缝隙接触, 利用传感器将测试系统与电脑相连, 通过控制上压盘向下移动实现加载, 压盘加载速率为5 mm/min, 并采用相机全程记录试样的压溃变形过程.

2.4　性能评价指标

为量化评估TPMS力学超材料的力学特性, 以材

表 1　SLS打印参数

Table 1　SLS printing parameters

SLS打印参数	数值
扫描速率(mm/s)	4000
激光功率(W)	40
层间厚度(μm)	20
打印温度(°C)	98

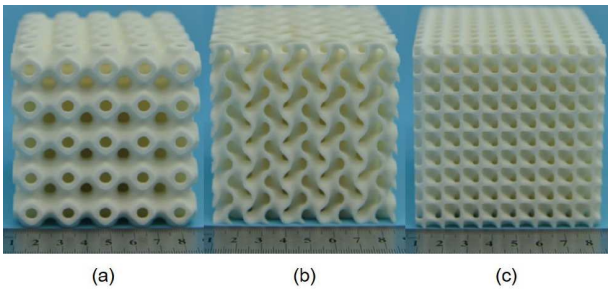


图 3　(网络版彩图) SLS制备的TPMS试样. (a) P构型; (b) G构型; (c) D构型

Figure 3　(Color online) TPMS specimens prepared by SLS. (a) P-configuration; (b) G-configuration; (c) D-configuration.

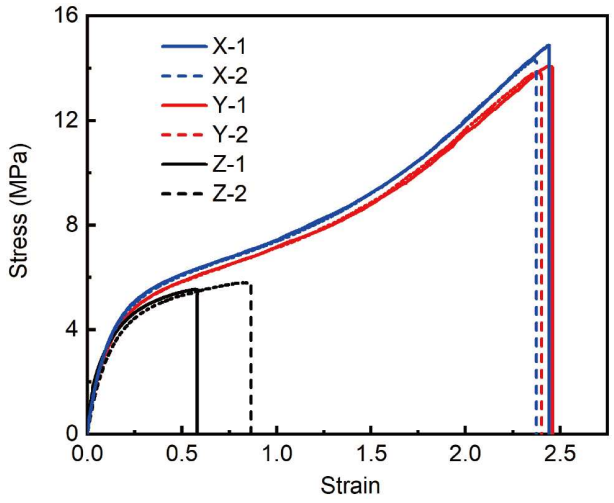


图 4　(网络版彩图)单轴拉伸下TPU材料的应力-应变曲线
Figure 4　(Color online) Stress-strain curve of TPU standard specimen under uniaxial tension.

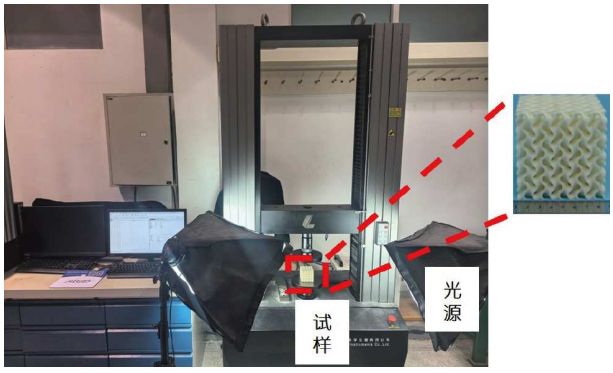


图 5　(网络版彩图)电子万能试验机
Figure 5　(Color online) Electronic universal testing machine.

料弹性模量、屈服强度、平台应力、密实应变、吸能及比吸能特性为评价指标. 通过能量吸收效率法来确定密实应变, 能量效率-应变曲线中能量效率达到最后一个极值处的应变为密实应变. 能量效率法[28]的表达式如下:

$$\eta(\varepsilon)=\frac{\int_0^{\varepsilon}\sigma(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon}{\sigma(\varepsilon)}, \tag{5}$$

其中, $\eta(\varepsilon)$为能量吸收效率, $\sigma(\varepsilon)$为压溃应力, ε为试样压溃过程中的应变. 能量吸收效率对应变求导, 导数为0时对应的应变值为构型的密实应变:

$$\frac{\mathrm{d}\eta(\varepsilon)}{\mathrm{d}\varepsilon}\Big|_{\varepsilon_d}=0, \tag{6}$$

其中, ε_d为密实应变. 平台应力σ_p通过以下公式计算:

$$\sigma_p=\frac{\int_{\varepsilon_y}^{\varepsilon_d}\sigma(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon}{\varepsilon_d-\varepsilon_y}, \tag{7}$$

其中, ε_y为屈服应变.

比吸能SEA (Specific Energy Absorption)描述了构型单位质量的能量吸收能力, 其表达式为

$$\mathrm{SEA}=\frac{E_v}{\rho}, \tag{8}$$

其中, ρ为结构密度, E_v为构型单位体积的吸收能量, 其表达式为

$$E_v=\int_0^{\varepsilon_d}\sigma(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon, \tag{9}$$

其中, ε_d为密实应变, ε为瞬时压缩应变. 比吸能值越大, 则材料能在更小的质量下吸收更多能量, 具有更优秀的能量吸收能力.

3　单次压缩数值模拟与验证

3.1　有限元建模

采用有限元软件Abaqus对准静态压缩载荷作用下TPMS力学超材料的压溃行为进行数值模拟. 有限元模型(Finite Element Model, FEM)包括TPMS力学超材料和上、下刚性面板三部分, TPMS力学超材料置于上下面板中间, 建模流程如图6所示. 上面板仅释放Z轴方向的平移自由度, 对TPMS力学超材料施加压缩位移, 加载速率为1 m/s, 下面板为完全固定的支撑端. 所有表面法向定义为“硬接触”, 切向定义为“罚接触”, 摩擦系数为0.2. 采用修正的十节点二阶四面体单元(C3D10M)对TPMS模型进行网格划分. 材料模型采用Arruda-Boyce超弹性模型, 试验获得的应力-应变曲线数据作为TPU基体材料的材料参数.

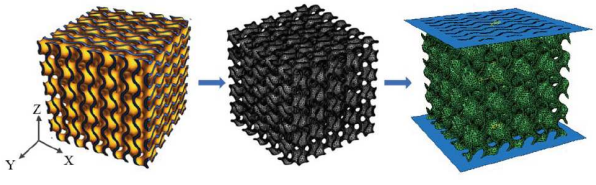


图 6　(网络版彩图) Gyroid力学超材料数值建模流程
Figure 6　(Color online) Numerical modelling process of the Gyroid mechanical metamaterial.

3.2　数值模拟验证

如图7所示，整个加载过程中，模型的动能始终低于内能的2%，惯性效应可以忽略，加载条件满足准静态模拟要求. 已有研究[29]表明，相比于4×4×4和6×6×6的胞元阵列，5×5×5的胞元排列在显著降低计算成本的同时，能够对材料整体力学性能提供可靠的预测. 因此本文选用5×5×5的胞元阵列.

图8给出了试验与数值模拟获得的应力-应变曲线对比结果. 从应力-应变曲线图中可以看出，数值模拟结果与试验结果在整体变化趋势及关键力学特征上具有良好一致性, 验证了有限元仿真模型的有效性.

4　结果与讨论

4.1　单次压缩加载

图9(a)给出了三种TPMS力学超材料在单次准静态压缩加载下的应力-应变曲线. 可以看到，三种超材料的力学响应均可划分为三个阶段：线弹性阶段、平台阶段以及密实阶段. 不同于传统弹塑性材料中平台阶段通常对应于屈服后的塑性流动，TPMS力学超材料的平台阶段主要由弹性屈曲与胞元的渐进致密化共同主导，其宏观表现为应力基本保持稳定而材料整体发生大变形, 属于典型的非线性弹性响应过程.

不同构型的TPMS力学超材料的应力-应变曲线存在较大差异. P构型在经历线弹性阶段进入平台阶段后出现轻微的应力软化现象，随后形成一个较长且平坦的平台阶段; G构型的平台阶段相对较短, 应力随应变持续增加, 表现出明显的应变强化特征; D构型的整体响应趋势与G构型相似，但其应力波动幅度相对较小, 力学响应更加平稳. 根据式(1)和(2)计算得到的各构型力学性能参数汇总于表2. 其中，D构型具有最高的弹性模量；G构型在初始峰值应力和比吸能方面均表现出明显优势，其比吸能相较于P构型提高约50.98%；P构型的比吸能最低, 仅为0.51 J/g. 综合比较可知, G构型具有最优的能量吸收能力, 而P构型的能量吸收性能相对较弱.

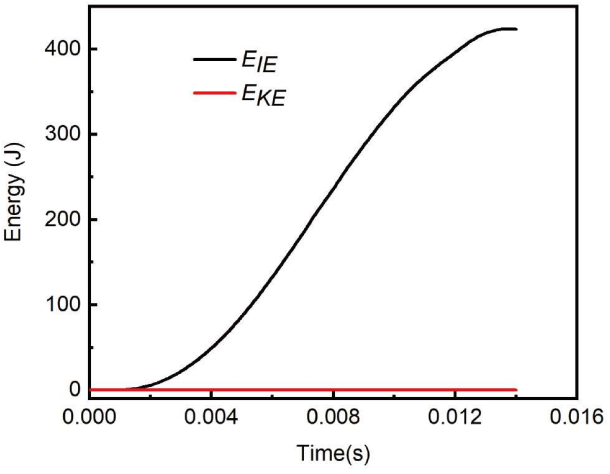


图 7　(网络版彩图) Gyroid力学超材料内能、动能与时间关系图

Figure 7　(Color online) Diagram of internal energy and kinetic energy as functions of time for the Gyroid mechanical metamaterial.

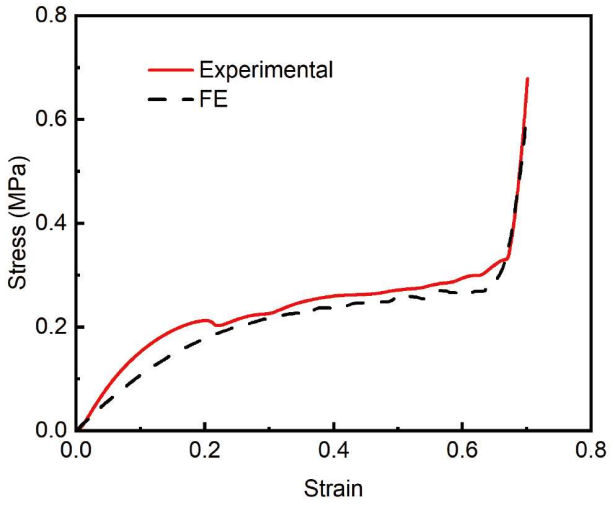


图 8　(网络版彩图) Gyroid力学超材料有限元仿真模型验证

Figure 8　(Color online) Finite element model validation for the Gyroid mechanical metamaterial.

为进一步揭示不同构型力学响应差异的变形机理，图9(b)–(d)展示了三种TPMS力学超材料在准静态压缩下的典型变形模式及von Mises应力分布云图. 对于P构型，在30%应变时，由于纵向压应力与横向拉应力的共同作用, 中部发生明显膨胀, 呈现出典型的鼓形变形模式; 当应变增至50%时, 变形逐渐向构型中心聚集, 并形成“X”形变形带; 进一步压缩至70%应变后, 胞元之间发生充分接触，结构进入致密化阶段. 相比之下，G构型在相同加载条件下整体应力分布更为均匀, 在压缩过程中未出现明显的局部变形带，表现为稳定的均匀变形模式. D构型在30%应变时同样呈现较为均匀的应力分布; 当应变达到50%时, 应力主要集中于加载端与支撑端附近, 材料整体发生横向失稳, 随后逐步进入致密实阶段.

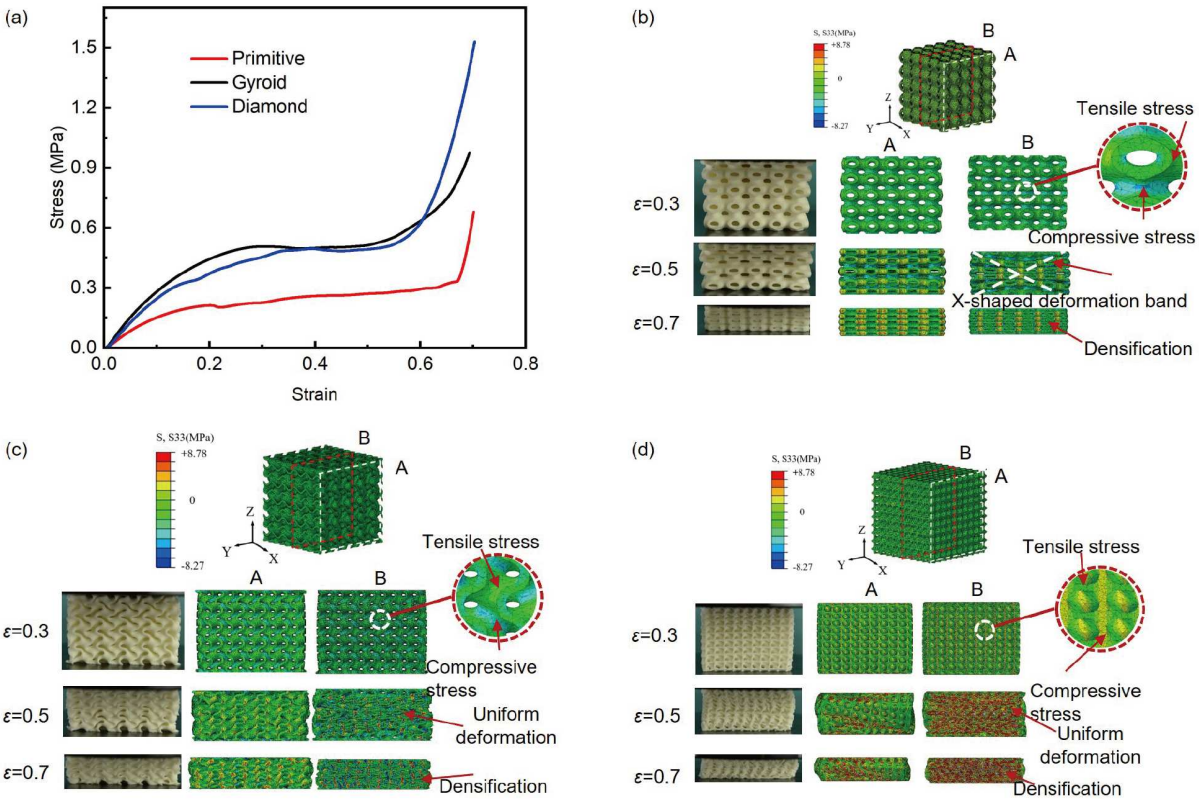


图 9　(网络版彩图) (a) 三种TPMS力学超材料在单次压缩下的应力-应变曲线. (b) P构型、(c) G构型和(d) D构型的材料试验与数值模拟变形图比较

Figure 9　(Color online) (a) Stress-strain curves of three TPMS mechanical metamaterials under uniaxial compression. Deformation pattern comparison between experiment and numerical simulation for (b) P-configuration, (c) G-configuration, and (d) D-configuration metamaterials.

表 2　力学性能对比

Table 2　Mechanical properties comparison

构型	弹性模量 (MPa)	初始峰值应力 (MPa)	比吸能 (J/g)
P	1.76	0.21	0.51
G	2.39	0.51	0.77
D	2.84	0.33	0.74

总体而言，得益于极小曲面结构连续光滑的曲面几何特征，三种不同构型的TPMS力学超材料在整个压缩过程中均未出现明显的应力集中现象，整体表现为均匀塌缩的压溃模式.

4.2　循环加载

进一步基于单次准静态压缩试验，开展了不同构型TPMS力学超材料的循环加载试验. 图10(a)给出了P-30构型在3次加载-卸载循环过程中的应力-应变曲线. 可以观察到, 在第一个加载循环中材料表现出明显的应力软化现象, 而从第二个循环起, 其力学响应趋于稳定, 加载与卸载路径基本重合. 各循环结束后的残余应变约为0.05–0.07，表明P-30构型具有较好的形状恢复能力. 从第二个加载周期开始，变形曲线均遵循相同的路径. 需要指出的是，形状恢复是通过在相邻循环之间施加近似为0的载荷来实现的，当应变回落至0.05–0.07区间时，应力水平降为0，随后结构依靠黏性流动逐步恢复形状，即表现为非弹性驱动的形状恢复过程[30]. 整体来看，P构型TPMS力学超材料在循环加载过程中展现出良好的力学稳定性和重复性.

这种初始循环中的应力衰减主要源于TPU材料的Mullins效应[31]. 在第一次循环加载过程中，材料内部部分分子链发生不可逆损伤; 在随后的加载循环中, 由于受损分子链无法有效参与承载，相同应变水平下所需应力明显降低，从而导致应力-应变曲线整体下移. 随着加载次数的增加，Mullins效应逐渐减弱直至稳定[32], 因此第二次及之后的循环响应基本保持一致.

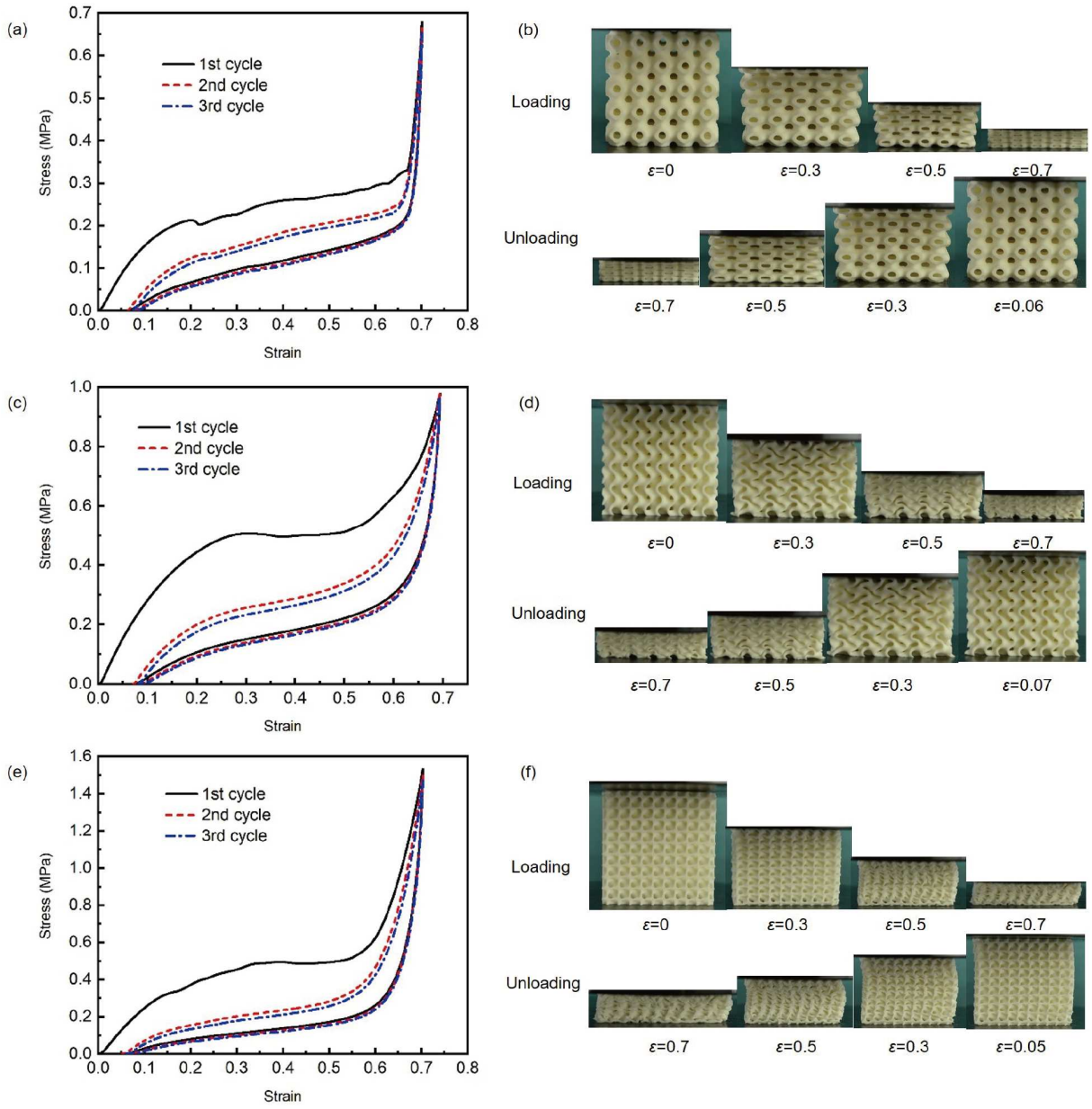


图 10　(网络版彩图) (a) P构型、(c) G构型和(e) D构型材料在3个加载-卸载循环内的应力-应变曲线. (b) P构型、(d) G构型和(f) D构型材料在首个加载-卸载循环内的压溃变形图

Figure 10　(Color online) Cyclic stress-strain curves under three loading-unloading cycles of (a) P-configuration, (c) G-configuration, and (e) D-configuration metamaterials. Deformation pattern upon the first loading-unloading cycle of (b) P-configuration, (d) G-configuration, and (f) D-configuration metamaterials.

图10(c)和(e)分别给出了G构型和D构型在准静态循环加载工况下的应力-应变曲线. 与P构型类似, 两种构型材料均在经历弹性阶段后出现轻微软化, 随后进入持续的应变强化过程. 值得注意的是, 相较于P构型, G构型与D构型的应力-应变曲线波动幅度明显更小, 这主要归因于其在压缩过程中未形成显著的逐层压溃和局部失稳模式, 从而表现出更稳定的整体变形行为.

为进一步揭示不同构型的TPMS力学超材料在循环加载过程中的变形特征, 图10(b)给出了P构型在首个加载-卸载循环内的变形演化过程. 在加载阶段, 当应变为0.3和0.5时, 各层胞元始终保持均匀变形状态, 直至进入密实阶段; 卸载过程与加载过程基本互为逆

过程，各层胞元形变能够均匀恢复，最终产生约0.064的不可恢复应变. 通过加载前与卸载后的试样变形模式可知，TPMS力学超材料具有极高的变形可恢复能力, 回弹率均超过90%.

图10(d)与(f)分别为G构型与D构型在首个加载-卸载循环内的变形过程图. 两种构型材料在加载与卸载过程中同样呈现出与P构型类似的整体均匀变形模式, 最终不可恢复应变分别为0.072与0.052. 综合三种构型的循环响应可以发现，虽然在首个循环中应力水平存在一定程度的降低，但从第二个循环起，各构型的应力-应变响应曲线近似重合, 且循环响应特征主要由构型本身决定, 而不随加载次数的增加而发生显著变化.

上述宏观力学响应与变形模式的显著差异，源于三种TPMS构型在几何与拓扑连通性上的不同. P构型的水平集曲面由三轴正交的鞍形面拼接而成，局部存在大量近似平坦区域，致使应力迅速向胞壁传递并诱发横向膨胀；纵向压应力与横向拉应力的耦合作用使构型在剪切主导下形成鼓形变形, 并在50%应变时发展为贯穿性的“X”形剪切带，这种局部化变形限制了其平台应力水平与能量吸收能力. 相比之下，Gyroid曲面为严格的三周期极小曲面，处处具有零平均曲率，且不存在平坦区域或尖锐棱边；这种连续光滑的曲壳几何特征使其在压缩下必须通过面内拉伸与均匀弯曲的协同变形来维持曲面连续性, 从而将轴向载荷均匀分散至整个胞元空间, 避免了应力集中与局部屈曲带的形成; 随着压缩进行, 相邻壳面间的接触面积逐步增大, 因而具有持续的应变强化特征与最优的比吸能. 而D构型则由四重螺旋通道构成，具有体心立方对称性；加载初期，其轴向取向的曲面区域表现出较强的柱式承载特征, 因而弹性模量最高; 然而, 螺旋结构导致剪切柔度较大, 当压缩应变达到50%左右时, 端部约束与斜向曲面共同诱发端部剪切滑移，应力分布由均匀状态突变为加载端/支撑端的双峰集中，随后发生横向失稳并快速进入致密化阶段. 因此D构型虽弹性模量最大, 但平台阶段相对较短且最终比吸能略低于G构型.

从能量角度分析，TPMS力学超材料在准静态压溃过程中，大部分能量以弹性变形形式储存，这与TPU材料的超弹性特性密切相关. 图11为三种构型材料在不同循环加载次数下初始峰值应力、能量损失率以及比吸能对比图. 在第一次加载-卸载循环过程中, 应力-应变曲线所围成的闭合面积对应于能量耗散，能量损失率约为60%; 而在第二次循环中, 该值降低至约40%后趋于稳定. 随着Mullins效应的逐步减弱, 应力水平及能量耗散特性趋于稳定. 多次重复加载试验结果表明，TPU制备的TPMS力学超材料在循环加载条件下仍能够保持稳定的力学响应和优异的形状恢复能力, 显示出良好的耐久性与可重复使用潜力.

5　结论

本文对三种典型构型可重复使用TPMS力学超材料的压溃行为和能量吸收机制进行了研究，重点分析了不同构型对循环加载下TPMS力学超材料变形模式、吸能特性和机理的影响, 主要结论如下:

(1) 循环加载下三种典型构型TPMS力学超材料均在首个加载循环后出现明显的应力水平降低，而自

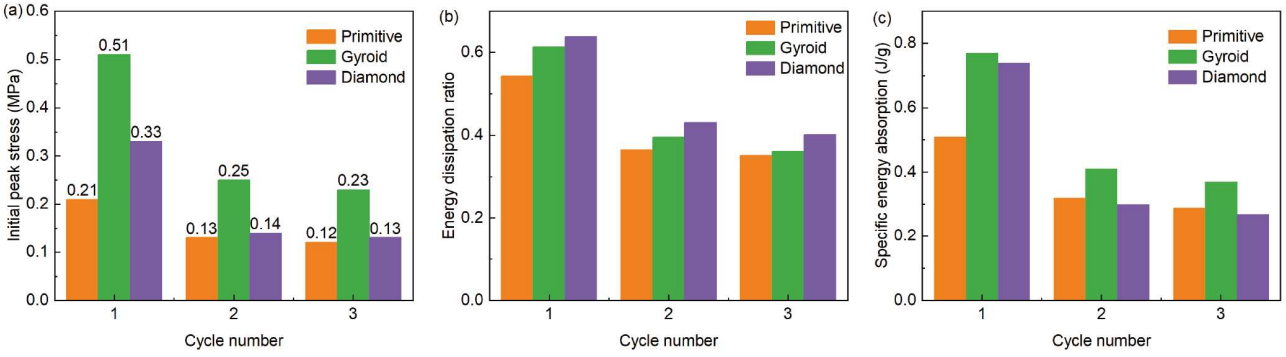


图 11　(网络版彩图)不同循环次数下吸能特性对比. (a) 初始峰值应力; (b) 能量损失率; (c) 比吸能

Figure 11　(Color online) Comparison of the energy absorption characteristics under different loading cycle numbers. (a) Initial peak stress; (b) energy dissipation ratio; (c) specific energy absorption.

第二个循环起, 其力学响应趋于稳定, 加载-卸载响应曲线趋于一致, 具有优异的形状恢复能力和优良的可重复使用性, 且其循环响应特征与构型密切相关.

(2) 循环加载下TPMS力学超材料首次加载-卸载循环中Mullins效应主导了应力软化与能量耗散, 自第二次循环起力学响应与耗散特性趋于稳定, 结构展现出优异能量吸收稳定性.

(3) 三种典型构型TPMS力学超材料在压溃过程中均表现为整体均匀变形模式, 未出现明显的局部失稳或应力集中现象. 其中, G构型展现出最优的能量吸收性能, D构型次之, P构型相对较弱, 表明极小曲面拓扑构型的吸能特性具有良好的调控性.

(4) 可重复使用TPMS力学超材料具有首次循环后力学响应快速稳定、残余应变小(回弹率>90%)的特性, 解决了传统聚氨酯泡沫一次性压实后需频繁更换的问题, 可应用于可重复使用缓冲包装与精密仪器防护领域. 此外, TPMS连续光滑曲面易于共形贴合人体曲面, 且连通孔隙结构保证透气性, 优于传统杆式点阵的各向异性与应力集中问题, 在可穿戴防护装备领域具有潜在重要的工程应用.

参考文献

1 Wu W W, Xia R. Design of lightweight lattice metastructures and multi-functional mechanical properties manipulating approaches (in Chinese). Adv Mech, 2022, 52: 673–718 [吴文旺, 夏热. 轻质点阵超结构设计及多功能力学性能调控方法. 力学进展, 2022, 52: 673–718]

2 Alkebsi E A A, Ameddah H, Outtas T, et al. Design of graded lattice structures in turbine blades using topology optimization. Int J Comput Integr Manuf, 2021, 34: 370–384

3 Peng C, Fox K, Qian M, et al. 3D printed sandwich beams with bioinspired cores: Mechanical performance and modelling. Thin-Walled Struct, 2021, 161: 107471

4 Zhang X, Vyatskikh A, Gao H, et al. Lightweight, flaw-tolerant, and ultrastrong nanoarchitected carbon. Proc Natl Acad Sci USA, 2019, 116: 6665–6672

5 Wang R Z, Zhang Y, Li S Q. Analysis of the deformation mechanism and mechanical properties of graded body-centered cubic nested body-centered cubic lattice material (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2023, 53: 244611 [王润洲, 张越, 李世强. 组合点阵材料GBCC-BCC变形机制及力学性能分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 244611]

6 Huang X F, Zhang Z H. Static mechanical properties of three-dimensional polyurea-coated lattice structures with negative Poisson's ratio (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 054601 [黄秀峰, 张振华. 聚脲涂覆三维负泊松比点阵结构的静态力学性能研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 054601]

7 Berger J B, Wadley H N G, McMeeking R M. Mechanical metamaterials at the theoretical limit of isotropic elastic stiffness. Nature, 2017, 543: 533–537

8 Han S C, Lee J W, Kang K. A new type of low density material: Shellular. Adv Mater, 2015, 27: 5506–5511

9 Han S C, Choi J M, Liu G, et al. A microscopic shell structure with Schwarz's D-surface. Sci Rep, 2017, 7: 13405

10 Kapfer S C, Hyde S T, Mecke K, et al. Minimal surface scaffold designs for tissue engineering. Biomaterials, 2011, 32: 6875–6882

11 Winter B, Butz B, Dieker C, et al. Coexistence of both Gyroid chiralities in individual butterfly wing scales of Callophrys rubi. Proc Natl Acad Sci USA, 2015, 112: 12911–12916

12 Han L, Che S. An overview of materials with triply periodic minimal surfaces and related geometry: From biological structures to self-assembled systems. Adv Mater, 2018, 30: 1705708

13 Maskery I, Sturm L, Aremu A O, et al. Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer additive manufacturing. Polymer, 2018, 152: 62–71

14 Al-Ketan O, Rezgui R, Rowshan R, et al. Microarchitected stretching-dominated mechanical metamaterials with minimal surface topologies. Adv Eng Mater, 2018, 20: 1800029

15 Abou-Ali A M, Al-Ketan O, Lee D W, et al. Mechanical behavior of polymeric selective laser sintered ligament and sheet based lattices of triply periodic minimal surface architectures. Mater Des, 2020, 196: 109100

16 Zhou H, Zhao M, Ma Z, et al. Sheet and network based functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting: Design, mechanical properties, and simulation. Int J Mech Sci, 2020, 175: 105480

17 Yang X, Yang Q, Shi Y, et al. Effect of volume fraction and unit cell size on manufacturability and compressive behaviors of Ni-Ti triply periodic minimal surface lattices. Add Manuf, 2022, 54: 102737
18 Liu J J, Li Z H, Wang Z H, et al. Hybrid design of triply periodic minimal surface structure and its mechanical behavior under impact loading (in Chinese). Chin J High Press Phys, 2024, 38: 054102 [刘嘉婧, 李子豪, 王志华, 等. 三周期极小曲面结构混合设计及其在冲击载荷下的力学行为. 高压物理学报, 2024, 38: 054102]
19 Yin H, Wang N, Wu L, et al. Theoretical prediction for energy absorption properties of 3D lattice structures. Thin-Walled Struct, 2025, 210: 113043
20 Liang Y, He H, Yin J, et al. Energy absorption of gradient triply periodic minimal surface structure manufactured by stereolithography. Rev Adv Mater Sci, 2024, 63: 20230185
21 Liu Z, Wang M, Guo P, et al. Bio-inspired wall thickness modulation of hybrid TPMS structures for enhanced energy absorption. Eng Struct, 2025, 343: 121020
22 Singh A, Jaber A, Karathanasopoulos N. Fatigue performance of TPMS-based $AlSi_{10}Mg$ architected cellular materials fabricated via hybrid and powder bed fusion methods. Int J Fatigue, 2025, 193: 108758
23 Cebrian Carcavilla A, Zaki W. Effective superelastic domains of schwarz Primitive shape memory alloy lattices subjected to cyclic loading. Adv Eng Mater, 2023, 25: 2300432
24 Wan Y, Qiu N, Xiao M, et al. Energy dissipation of 3D-printed TPMS lattices under cyclic loading. Int J Mech Sci, 2025, 294: 110245
25 Gandy P J F, Bardhan S, Mackay A L, et al. Nodal surface approximations to the P, G, D and I-WP triply periodic minimal surfaces. Chem Phys Lett, 2001, 336: 187–195
26 Feng J, Fu J, Yao X, et al. Triply periodic minimal surface (TPMS) porous structures: From multi-scale design, precise additive manufacturing to multidisciplinary applications. Int J Extrem Manuf, 2022, 4: 022001
27 Wang J Y. Microporous Structure Design and Performance Analysis of Bionic Bone Tissue Scaffolds (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. 11–26 [汪靖宇. 仿生硬骨支架微孔结构设计及性能分析. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020. 11–26]
28 Li Q M, Magkiriadis I, Harrigan J J. Compressive strain at the onset of densification of cellular solids. J Cell Plasts, 2006, 42: 371–392
29 Yin H, Zheng X, Wen G, et al. Design optimization of a novel bio-inspired 3D porous structure for crashworthiness. Compos Struct, 2021, 255: 112897
30 Yuan S, Bai J, Kai Chua C, et al. Characterization of creeping and shape memory effect in laser sintered thermoplastic polyurethane. J Comput Inf Sci Eng, 2016, 16: 041007
31 Mullins L. Softening of rubber by deformation. Rubber Chem Tech, 1969, 42: 339–362
32 Zhou W H. The Study of Mechanical Constitutive Relation Rubber Materials (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021 [周纬华. 橡胶材料力学本构关系研究. 硕士学位论文. 南京: 南京航空航天大学, 2021]

Crushing behavior and energy absorption characteristics of reusable TPMS mechanical metamaterials

TANG Haonan[1], SHI Tian[1], ZHANG Wei[2], YUAN Yuan[3], FAN Xueling[1], BAI Chunyu[4], ZHANG Yu[4], JIA He[5], WANG Yongbin[5], FAN Dongyu[5] & QIN Qinghua[1*]

[1] *Xi'an Key Laboratory of Extreme Environment and Protective Technology, State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*
[2] *School of Physics and Mechanics, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China*
[3] *Logistics Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China*
[4] *National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China*
[5] *Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China*
**Corresponding author (email: qhqin@mail.xjtu.edu.cn)*

Triply periodic minimal surface (TPMS) mechanical metamaterials constitute a class of architecturally tunable cellular materials that exhibit an exceptional combination of lightweight characteristics, high specific stiffness and strength, along with superior energy absorption capabilities, rendering them promising candidates for aerospace, protective engineering, and biomedical applications. In this study, three distinct TPMS metamaterial samples were fabricated by selective laser sintering (SLS). Quasi-static compression and cyclic loading tests were conducted to characterize their energy absorption performance and reusability, respectively, while the crushing behavior and underlying deformation mechanisms of the three cellular configurations under compressive loading were systematically analyzed. The results indicate that TPMS metamaterials exhibit significant stress softening following the initial loading cycle, with mechanical responses stabilizing from the second cycle onward; furthermore, the stress-strain behavior is highly configuration-dependent. All three configurations demonstrate a uniform global deformation mode during crushing. Numerical simulations accurately captured the crushing deformation patterns observed in experiments, and the predicted stress-strain responses were in excellent agreement with the experimental measurements.

triply periodic minimal surface, mechanical metamaterial, cyclic loading, crushing, energy absorption

PACS: 46.32.+x, 46.35.+z, 46.25.-y, 46.70.-p

doi: 10.1360/SSPMA-2026-0205