

高压物理学报

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

刘嘉婧 李子豪 王志华 刘志芳 李世强

Hybrid Design of Triply Periodic Minimal Surface Structure and Its Mechanical Behavior under Impact Loading

LIU Jiajing, LI Zihao, WANG Zhihua, LIU Zhifang, LI Shiqiang

引用本文:

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[J]. 高压物理学报, 2024, 38(5):054102. DOI: 10.11858/gywlb.20240783

LIU Jiajing, LI Zihao, WANG Zhihua, et al. Hybrid Design of Triply Periodic Minimal Surface Structure and Its Mechanical Behavior under Impact Loading[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(5):054102. DOI: 10.11858/gywlb.20240783

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240783>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

3D打印梯度Gyroid结构的动态冲击响应

Dynamic Behavior of 3D Printed Graded Gyroid Structures under Impact Loading

高压物理学报. 2021, 35(3): 034201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210701>

多层次夹芯结构的变形与能量吸收

Deformation and Energy Absorption of Multi-Hierarchical Sandwich Structures

高压物理学报. 2019, 33(5): 055902 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180707>

基于位错动力学方法的动态塑性变形研究

Overview of the Study of Dynamical Plastic Deformation Based on Dislocation Dynamics Method

高压物理学报. 2019, 33(3): 030107 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190727>

3D打印浆砌层合结构复合材料层间断裂韧性的数值模拟

Numerical Simulation on Interlaminar Fracture Toughness of 3D Printed Mortar Laminated Composites

高压物理学报. 2020, 34(4): 044206 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190827>

仿生BCC结构的准静态压缩数值模拟及吸能性

Numerical Simulation of Quasi-Static Compression and Energy Absorption of Bionic BCC Structure

高压物理学报. 2020, 34(6): 062402 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200578>

3D打印贝壳仿生复合材料的拉伸力学行为

Tension Mechanical Behavior of 3D Printed Composite Materials Inspired by Nacre

高压物理学报. 2020, 34(1): 014102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190768>

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

刘嘉婧, 李子豪, 王志华, 刘志芳, 李世强

(太原理工大学机械与运载工程学院应用力学研究所, 山西 太原 030024)

摘要:三周期极小曲面 (triply periodic minimal surface, TPMS) 结构材料作为一种高孔隙率和高能量吸收效率的多孔介质,在许多领域得到广泛应用。以 Gyroid 和 IWP 结构作为设计基元,利用 Sigmoid 函数构建圆柱形过渡层,将外层 IWP 结构与内层 Gyroid 结构连接,设计了内外嵌套的 GIP 混合胞元结构。通过选择性激光熔融技术打印了 Gyroid 结构、IWP 结构和 GIP 混合结构试样,并利用直撞式霍普金森杆对其进行了实验研究。结合 LS-DYNA 软件进行了更大冲击速度范围的数值模拟,分析了试件的变形演化过程和动态应力-应变关系。结果表明:结构的初始峰值应力和比吸能表现出不同程度的应变率敏感性。与 Gyroid 和 IWP 结构相比,GIP 混合结构材料的应力-应变曲线表现出更明显的应变硬化趋势和更强的能量吸收能力。相较于 GIP-1 结构 (冲击方向与圆柱形过渡层轴线方向相同),随着冲击速度的提高,GIP-2 结构 (冲击方向与圆柱形过渡层轴线方向垂直)具有更低的初始峰值应力和更大的比吸能,因而具有更优异的抗冲击性能。

关键词:TPMS 混合结构; 3D 打印; 动态加载; 能量吸收

中图分类号:O521.9; O347.1

文献标志码:A

多孔介质材料具有超强韧、质量轻、吸能性好、抗冲击性强和设计灵活等特点。在国防、民用等工程领域得到广泛应用^[1-5]。由于材料的机械性能与其细观组织结构密切相关,为满足工程应用,已研发出各种不同细观结构的多孔介质材料。其中,三周期极小曲面 (triply periodic minimal surface, TPMS) 结构是一种处处具有零平均曲率和大比表面积的三维周期结构材料^[6],具有空间无限延伸永不相交、表面光滑且连续的几何特点,因其在比强度、比能量吸收等方面的突出表现而备受关注,是近年来力学领域的研究热点^[7-9]。Zhang 等^[10]使用选择性激光熔融 (selective laser melting, SLM) 3D 打印技术制备了 3 种类型的不锈钢 TPMS 结构 (Primitive、Diamond 和 Gyroid),并通过准静态压缩实验研究了结构的能量吸收能力,结果表明,TPMS 结构在表面积、刚度、平台应力和能量吸收能力等方面显著优于体心立方 (body-centered cubic, BCC) 晶格结构。Al-Ketan 等^[11]探究了 7 类 TPMS 结构的拓扑形状与力学性能之间的关系,结果表明,基于壳结构的 TPMS 表现出以拉伸为主的变形行为,基于杆结构的 TPMS 表现出以弯曲为主的变形行为。此前的大部分研究工作主要聚焦于 TPMS 结构的准静态压缩行为,随着研究的深入,学者们开始通过实验和数值模拟对 TPMS 结构的动态行为开展探索。与准静态加载相比,

* 收稿日期: 2024-04-03; 修回日期: 2024-04-23

基金项目:国家自然科学基金 (12072219, 12272254); 山西省自然科学研究面上项目 (202203021211170); 海安太原理工大学先进制造与智能装备产业研究院开放研发项目 (2023HA-TYUTKFYF016); 山西省科技创新人才团队 (领军) 专项 (202204051002006)

作者简介:刘嘉婧 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事轻质材料冲击动力学行为研究。

E-mail: liujiajing199709@163.com

通信作者:李世强 (1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构冲击动力学行为研究。E-mail: lishiqiang@tyut.edu.cn

动态冲击下 TPMS 结构表现出明显的应变率效应, 这为更全面地理解其力学性能提供了新的视角。Li 等^[12]通过实验和数值模拟研究了 316L 不锈钢 Gyroid 结构在动态载荷下的压缩行为, 发现结构的屈服强度、平台应力和能量吸收能力均表现出明显的应变率敏感性。这些新的研究动向不仅拓宽了 TPMS 多孔材料的研究领域, 也为其在实际工程应用中的性能优化提供了重要的理论依据。

与单一晶格结构相比, 混合晶格超结构至少由 2 种或 2 种以上类型的基元组成, 其在静、动态加载条件下的能量吸收能力更高, 应力场分布更均匀, 变形更协调^[13-14]。Yu 等^[15]设计了由八角晶格和菱形十二面体晶格单胞组成的混合结构, 通过神经网络训练得到了具有特定目标性能的混合晶格结构, 结果表明, 混合晶格结构具有比单一八角晶格和菱形十二面体晶格结构更强的能量吸收能力。Zhang 等^[16]在单一 TPMS 结构的基础上设计了混合 TPMS 晶格超结构, 实现了多级平台吸能和多级防护一体化结构设计, 结果表明, 基元按屈服强度大小沿加载方向排列的 TPMS 混合方法是实现多级吸能的最佳方式。目前, 学者们对 TPMS 晶格结构的静态力学性能已进行了深入研究, 揭示了其轻质高强的结构特性。然而, 针对 TPMS 晶格结构动态性能的研究尚显不足。此外, 混合 TPMS 晶格超结构因形态不同而展现出的力学性能差异及其相互间的联系也尚未引起广泛关注。因此, 对动态载荷下混合 TPMS 结构进行研究, 可以更全面地理解 TPMS 晶格结构的性能特点。

本研究将能量吸收能力更强的壳体 Gyroid 结构作为内层, 将承载能力更强的壳体 IWP 结构作为外层, 通过 Sigmoid 函数构建圆柱形过渡层将内外层有效连接, 从而设计内外嵌套的 GIP 混合结构。利用 SLM 技术打印 316L 不锈钢 Gyroid、IWP 和 GIP 混合结构试件。通过直撞式霍普金森杆(direct impact Hopkinson bar, DIHB)对试件进行动态冲击实验, 结合数值模拟分析不同应变率下结构的力学响应, 详细讨论这类结构材料的应力-应变关系和变形演化过程。

1 结构设计

1.1 单一 TPMS 结构设计

根据水平集法, 采用 2 种隐式函数近似描述典型 TPMS 单胞结构 Gyroid 与 IWP^[9]

$$\varphi_{\text{Gyroid}}(X, Y, Z) = \sin X \cos Y + \sin Y \cos Z + \sin Z \cos X = C \quad (1)$$

$$\varphi_{\text{IWP}}(X, Y, Z) = 2(\cos X \cos Y + \cos Y \cos Z + \cos Z \cos X) - [\cos(2X) + \cos(2Y) + \cos(2Z)] = C \quad (2)$$

式中: $X = 2\pi x/L$, $Y = 2\pi y/L$, $Z = 2\pi z/L$, L 为单胞尺寸, x 、 y 、 z 为 3 个互相垂直的笛卡尔坐标值^[17], C 为水平集常数。2 种 TPMS 的基本单胞构型如图 1 所示。

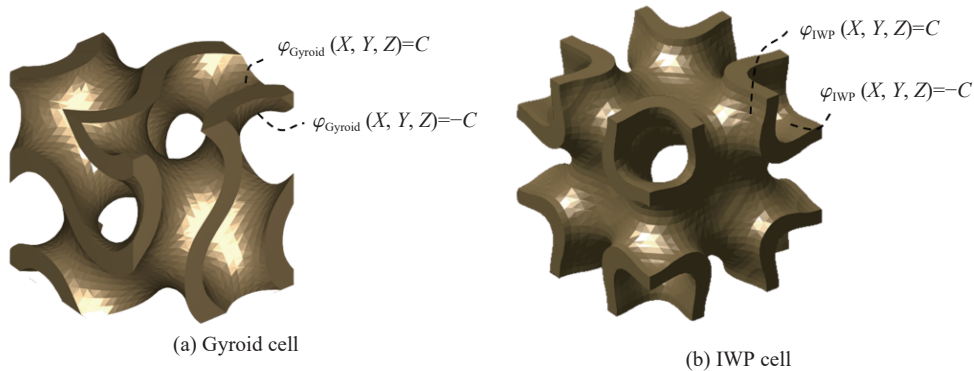


图 1 2 种 TPMS 单胞构型

Fig. 1 Single-cell configurations of two TPMSs

本研究中的密度 ρ^* 为结构的相对密度, 可以表示为

$$\rho^* = \frac{m}{V\rho_s} \quad (3)$$

式中: m 为结构的质量, V 为结构的体积, ρ_s 为基体材料的密度。

水平集常数与相对密度的关系如图 2 所示。其中, ρ_{Gyroid}^* 和 ρ_{IWP}^* 分别为 Gyroid 和 IWP 结构的相对密度。从图 2 可以看出, 水平集常数 C 是构成 TPMS 结构的重要参数, 通过改变 C 的大小可以实现曲面的偏移, 从而进一步控制 TPMS 结构的孔隙大小, 并且相对密度 ρ^* 与 C 呈线性关系。例如, 相对密度为 36% 时, Gyroid 和 IWP 结构的水平集常数分别为 0.557 和 1.357。在相同的相对密度下, Gyroid 结构相对于 IWP 结构有着更高的曲面面积。

1.2 混合 TPMS 结构设计

图 3 给出了 GIP 混合结构的设计方法, 将 Gyroid 结构作为内层结构镶嵌在 IWP 结构内部混合半径 $R=6 \text{ mm}$ 的范围内。通过设置内外相同的水平集常数, 使 IWP 与 Gyroid 结构的质量比约为 3 : 2, 混合结构的相对密度为 36%, 从而实现在相同相对密度下超材料结构的多功能集成。混合结构 GIP 的设计表达式可以表示为

$$\varphi_{\text{GIP}} = A\varphi_{\text{Gyroid}} + (1 - A)\varphi_{\text{IWP}} \quad (4)$$

式中: $A(x, y, z)$ 为在 0~1 之间变化的空间过渡函数, 用来连接 Gyroid 和 IWP 结构。本研究采用 Sigmoid 函数^[18]来设计平滑圆柱形过渡边界, Sigmoid 函数可以表示为

$$A(x, y, z) = \frac{1}{1 + e^{-kG(x, y, z)}} \quad (5)$$

式中: k 为描述不同拓扑形式点阵之间过渡宽度的参数。在不同的 Sigmoid 函数下, k 值越小, 过渡区域越宽, 过渡越光滑。本工作对 $k=1$ 的情况进行研究。为实现内、外的径向混合效果, 将 $G(x, y, z)$ 定义为圆心函数, 用于控制 2 个 TPMS 子结构相交的边界。

本研究中晶格结构的单胞尺寸为 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$, 受多孔结构边界效应的影响, 结构单胞数量可能会影响结构的整体力学性能。根据数值模拟结果^[19-20]并综合考虑力学性能和计算效率, 选取 $4 \times 4 \times 4$ 的单胞个数对 TPMS 结构进行力学性能研究, 几何模型如图 3 所示。

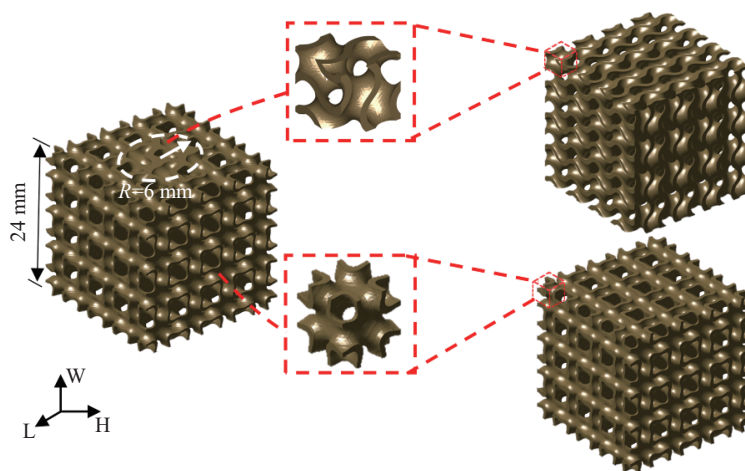


图 3 试件的几何模型

Fig. 3 Geometric modeling of the specimens

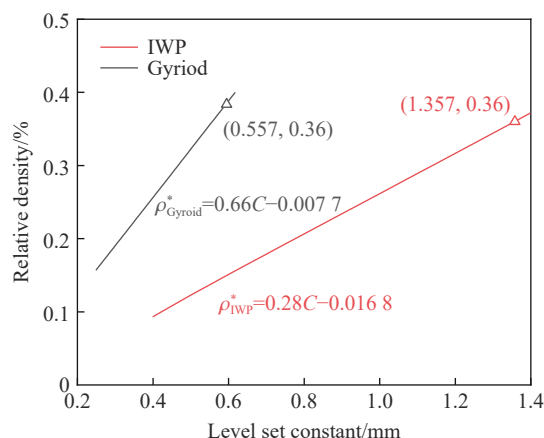


图 2 水平集常数与相对密度的关系

Fig. 2 Level set constants versus relative densities

2 实验测试与有限元模拟

2.1 样品制备

利用金属 3D 打印机制作了 3 种构型的 TPMS 结构(Gyroid 结构、IWP 结构和 GIP 混合结构),将冲击方向与圆柱形过渡层轴线方向相同的结构记为 GIP-1,冲击方向与圆柱形过渡层轴线方向垂直的结构记为 GIP-2。选择 316L 不锈钢作为 3D 打印成型材料,SLM 工艺参数如下:激光功率为 270 W,扫描速度为 950 mm/s,光斑直径为 70 μm ,不锈钢粉末颗粒直径为 15~53 μm ,单层铺粉厚度为 50 μm 。对固化后的试样进行吹粉和喷砂处理,以克服材料在加工过程中的一些缺陷。打印试样采用的晶格数量为 4×4×4 单元格,立方体边长为 24 mm,相对密度为 36%。打印的 3 种 TPMS 结构试件如图 4 所示。

为了获得 316L 不锈钢材料的真实参数,通过 SLM 技术制备了标准拉伸试样(ASTM E8/E8M 标准),并对其进行了准静态拉伸实验。3D 打印制备的拉伸试样尺寸参数和实验曲线如图 5 所示。316L 不锈钢材料的应力-应变曲线表现出明显的双线性特征,具体的力学参数如下:密度为 7 830 kg/m³,杨氏模量 $E=208\text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.3$,初始屈服应力 $\sigma_0=466\text{ MPa}$ 。

为了确定打印试样的打印精度,对试样质量进行测量,每种试样均测量 3 次,并取 3 次测量结果的平均值,结果如表 1 所示。

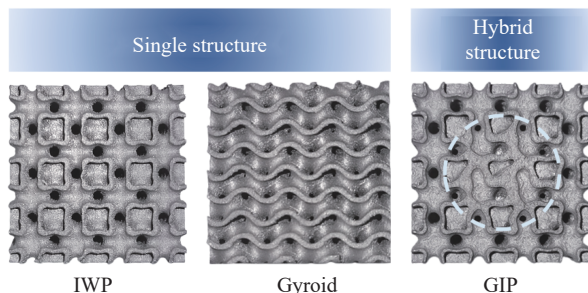


图 4 SLM 打印试样

Fig. 4 SLM printed specimens

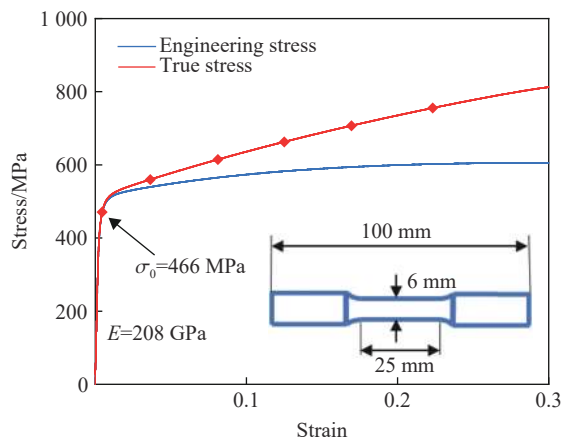


图 5 SLM 打印标准件在单轴拉伸下的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of SLM-printed standard parts in uniaxial tension

表 1 测试试样的质量
Table 1 Masses of test specimens

Specimen	Designed mass/g	Specimen mass/g	Mass deviation/%	Designed relative density/%	Relative density of specimen/%	Relative density deviation/%
Gyroid-1	38.96	40.52	4.00	36	37.43	3.97
Gyroid-2	38.96	40.35	3.56	36	37.27	3.52
IWP-1	38.96	40.21	3.20	36	37.14	3.16
IWP-2	38.96	40.12	2.97	36	37.06	2.94
GIP-1	38.96	40.65	4.33	36	37.55	4.30
GIP-2	38.96	40.37	3.61	36	37.29	3.58

从表 1 可以看出,测量得到的打印试样的平均质量为 40.37 g,平均相对密度为 37.29%,测量误差均在 5% 以内。

2.2 直撞式霍普金森杆实验

采用直撞式霍普金森杆装置对试件进行中速动态冲击实验,将试样粘贴在测试杆的端部,并使用空气动力气枪加速撞击杆对试样施加直接冲击,实验装置如图 6 所示。

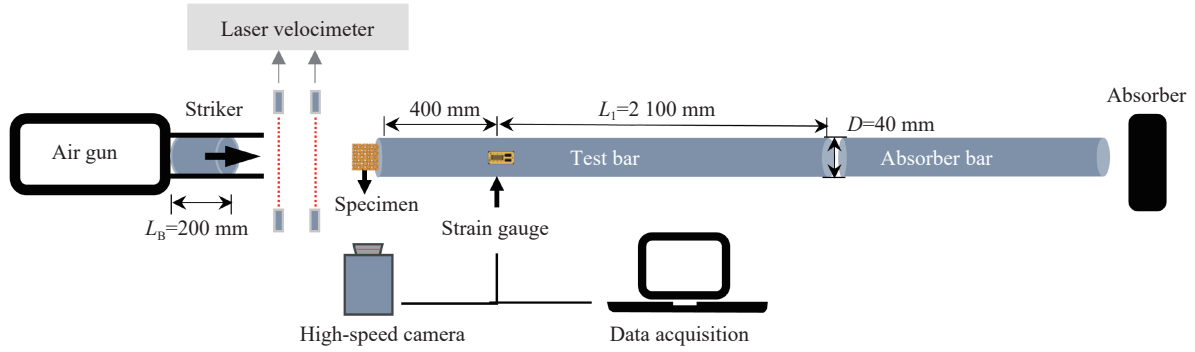


图 6 直撞式霍普金森杆实验布局

Fig. 6 Direct impact Hopkinson bar experiment setup

测试杆和撞击杆均由 GCr15 钢制成, 材料的杨氏模量为 210 GPa, 密度为 7 850 kg/m³, 杆的直径 D 均为 40 mm, 测试杆长度 $L_t=2\ 500$ mm, 撞击杆长度 $L_B=200$ mm, 应力波在杆中传播的波速 C_0 为 4 499 m/s, 试件的长度 $L_s=24$ mm。使用一对应变计(对臂半桥)采集传输到测试杆的电信号, 应变片粘贴在距离测试杆远端 $L_t=2\ 100$ mm 处, 如图 6 所示。使用高速摄像机拍摄图像, 像素为 320×128, 帧率为 $1\times 10^5\text{ s}^{-1}$ 。加载速度由红外测速仪确定。

直撞式霍普金森杆技术是研究材料在高应变率下的动态力学性能的方法之一, 尤其适用于晶格超结构的动态表征^[21]。该装置由传统霍普金森杆实验装置改进而成, 撞击杆直接撞击的加载方式可以使试件产生更高的冲击应变, 并能够将动能从撞击器直接传递到试件。实验时, 当应力波传播到撞击杆与试件的界面时, 由于撞击杆与试件之间的波阻抗不匹配, 一部分冲击脉冲透过试件进入测试杆形成透射脉冲, 另一部分则反射回撞击杆形成反射脉冲, 通过分析连接在测试杆上的应变片数据确定试样与测试杆接触面处的应力。从测试杆远端反射的信号到达应变片之前的时间间隔 $\Delta t = 2L_t/C_0 = 0.93\text{ ms}$, 而入射波脉冲持续时间(脉冲宽度) $t_i = 2L_B/C_0 = 0.089\text{ ms}$, 因此, 反射波不会对记录信号产生影响。采用如下推导方法, 从记录中提取单个波的相关数据, 计算试件的应力-应变关系

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{1}{L_s} \left[v_B - \int_0^t \frac{A_0 E_0 \varepsilon_t^*(\tau)}{M_B} d\tau - C_0 \varepsilon_t^*(t) \right] \quad (6)$$

$$\varepsilon_s(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}_s(\tau) d\tau \quad (7)$$

$$\sigma_s(t) = \frac{A_0}{A_s} E_0 \varepsilon_t^*(t) \quad (8)$$

式中: E_0 为压杆的杨氏模量, $A_0 = \pi D^2/4$ 为压杆的横截面积, A_s 为试件的横截面积, v_B 和 M_B 分别为撞击杆的速度和质量, $\varepsilon_t^*(t)$ 为安装在测试杆上的应变片记录的试件作用引起的右行应力波。

2.3 TPMS 结构变形演化过程

TPMS 结构均由 MS Lattice^[18] 创建, 采用 Hypermesh 软件对结构进行网格重划分, 综合考虑计算精度和计算效率, 设置网格尺寸为 0.3 mm, 网格类型为八节点六面体实体单元。材料模型使用 PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY(MAT_24)模型, 将实验曲线作为材料参数直接输入, 同时考虑基体材料的应变率效应, 采用 Cowper-Symonds 模型

$$\sigma_d = \sigma_y \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/P} \right] \quad (9)$$

式中: σ_d 为动态屈服应力, σ_y 为静态屈服应力, C 和 P 为应力放大因子。根据参考文献 [12, 22], 分别设置 C 和 P 为 $1\ 704.5\text{ s}^{-1}$ 和 5.2。杆与试件之间选用 AUTOMATIC_GENERAL 的接触方式, 静态和动态的摩擦系数分别设置为 0.3 和 0.2^[23]。通过创建撞击杆来施加压缩载荷, 并设置相应的初始速度。通过实验观测到结构在变形过程中未出现破坏失效, 因此, 在有限元模拟中不考虑失效。

将单一结构和混合结构在直撞式霍普金森杆冲击下的有限元模拟结果与实验结果进行比较。应力-应变曲线和变形演化过程如图 7 和图 8 所示, 可以看出, 数值模拟结果与实验结果吻合良好。表明该有限元建模方法能够较好地模拟 TPMS 结构的动态行为。

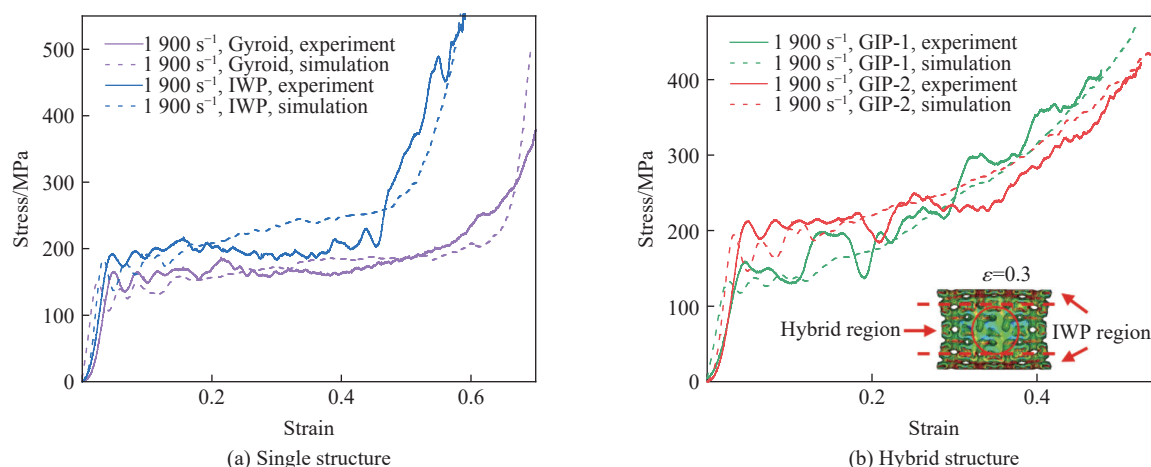


图 7 实验与数值模拟验证

Fig. 7 Experimental and numerical simulation validation

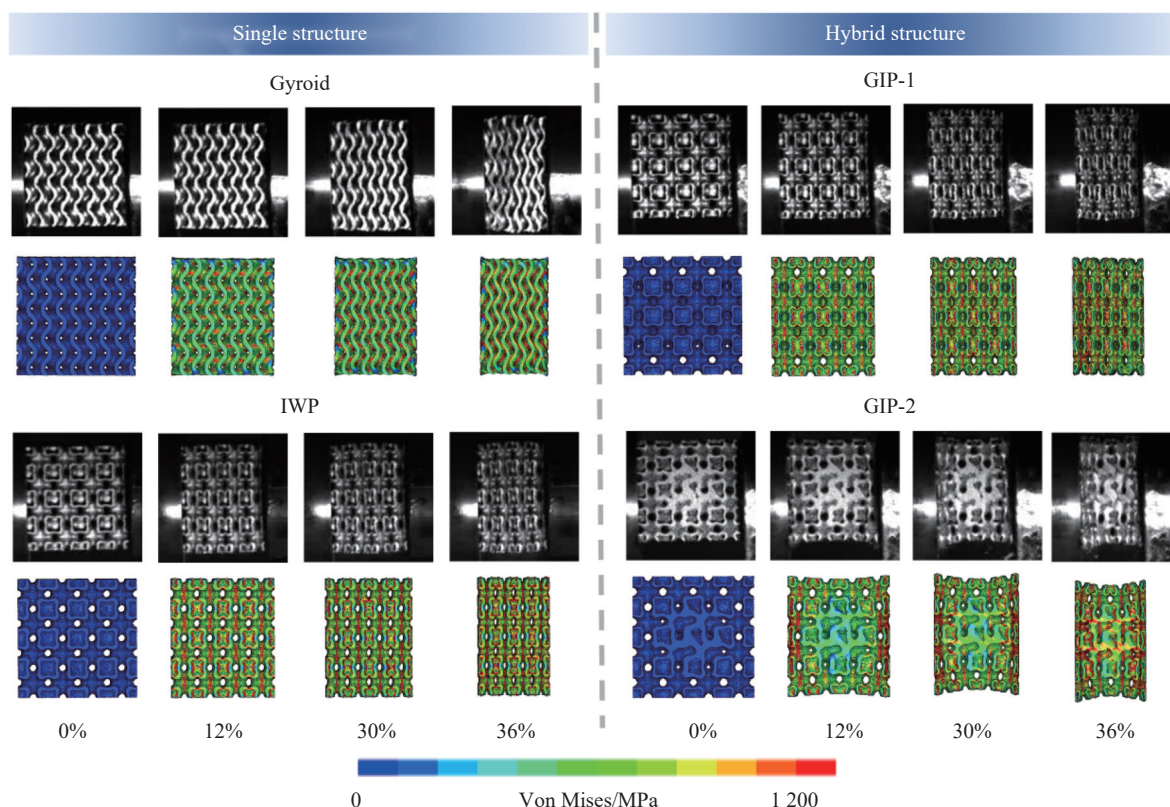


图 8 50 m/s 冲击加载下单一结构和混合结构的实验与模拟变形模式

Fig. 8 Deformation modes of experiment and simulation for single and hybrid structures under 50 m/s impact loading

图 8 给出了实验和数值模拟得到的单一结构和混合结构在应变率为 1900 s^{-1} (冲击速度为 50 m/s) 的动态冲击下的变形演化过程。从图 8 中可以看出, Gyroid 和 IWP 结构均呈现出均匀的压缩变形模式。在受到冲击载荷时, 混合结构 GIP-1 从变形初期直至密实化都呈现均匀压溃的变形模式。相较于单一结构, 混合结构 GIP-1 展现出了独特的优势, 其 Gyroid 子域和 IWP 子域并非孤立存在, 而是协同工

作, 共同有效地承受外部载荷。这种协同作用不仅增强了结构的整体稳定性, 还使得混合结构 GIP-1 在承受冲击时能够展现出更加优异的性能。图 9 给出了在 50 m/s 冲击载荷下混合结构 GIP-1 的 1/2 有限元模型剖面。可以看出, 在混合结构 GIP-1 的内部, 圆柱形区域经过特殊设计, 形成了大范围的塑性铰。这些塑性铰的存在使得结构在受到外力作用时能够发生塑性变形, 从而吸收大量的冲击能量。这种设计不仅显著提高了混合结构 GIP-1 的刚度和强度, 还进一步增强了其能量吸收能力, 使其在防护和能量吸收领域具有广阔的应用前景。

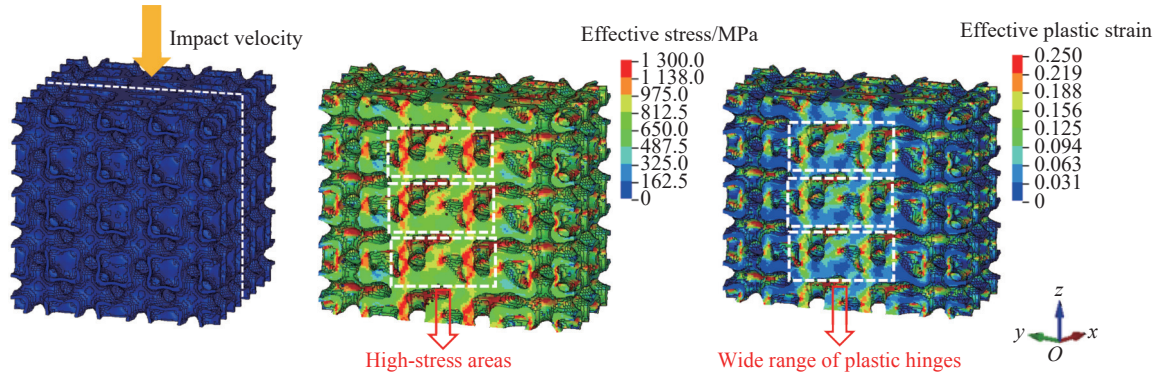


图 9 50 m/s 冲击加载下 GIP-1 结构的 1/2 有限元模型剖面

Fig. 9 1/2 finite element model section of GIP-1 structure at 50 m/s impact loading

防护结构的设计需要具备多级能量吸收能力, 为了实现这一目标, 第一平台的设计显得尤为重要。它不仅需要具有较小的初始峰值应力, 以减轻碰撞时产生的冲击力, 还需要具备良好的缓冲能力, 以有效地吸收和分散冲击能量。然而, 当结构压缩到一定程度时, 承载力需要加强并提供高的能量吸收效率。实验结果显示, 混合结构 GIP-2 具有明显的多级平台承载和变形能力。在动态载荷作用下, 混合结构 GIP-2 的变形首先集中在模型两端的 IWP 子域, 此时 IWP 结构内部的相互作用增强, 吸能迅速增大。随着压缩位移的继续增加, 混合结构 GIP-2 由两端向中间混合层方向对称逐层变形直至达到密实化。图 7(b) 中绿色区域块标记了应力-应变曲线的 2 个能量吸收阶段。可以看出, 第 1 阶段显示出较大的应力波动, 波动中波峰和波谷交替出现, 其中波谷对应于每层单胞的屈曲, 波峰对应于每层单胞密实化后结构的高变形阻力。第 2 阶段的能量吸收在应变达到 0.3 时开始, 此时靠近杆两端的 IWP 子域首先出现变形, 并逐渐达到局部密实状态。这一变化标志着第 1 阶段能量吸收结束和第 2 阶段能量吸收开始。随着两端 IWP 子域的密实化, 中间的混合基元层开始发挥主导作用, 应力水平较高, 该平台阶段有一定程度的应变硬化, 在混合结构 GIP-2 的抗冲击过程中扮演着重要角色。这一阶段的能量吸收主要通过混合层的变形来实现, 其幅度远大于第 1 阶段。因此, 混合结构 GIP-2 通过两级能量吸收机制实现了大幅度的能量吸收。首先, 通过 IWP 子域的局部密实化吸收一部分能量; 然后, 中间混合层的主导作用进一步增强了结构的能量吸收能力, 使其在抗冲击过程中表现出色。这种设计思路为开发高性能的能量吸收结构提供了新的途径。

3 结果与讨论

3.1 抗冲击性能评价

以初始峰值应力 σ_{peak} 、平台应力 σ_{pl} 和比吸能 (specific energy absorption, SEA) 作为评价指标来评估 TPMS 结构的耐撞性能。平台应力 σ_{pl} ^[12] 表示为

$$\sigma_{\text{pl}} = \frac{1}{\varepsilon_d - \varepsilon_1} \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (10)$$

式中: ε_1 为屈服应力点对应的应变, ε_d 为结构的密实化应变。密实化应变 ε_d 可由能量吸收效率曲线 $\eta(\varepsilon)$ 确定^[24]

$$\eta(\varepsilon) = \frac{\int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma(\varepsilon)} \quad (11)$$

$\eta(\varepsilon)$ 曲线的峰值点对应的应变为密实化应变 ε_d 。

TPMS 结构吸收的总能量 (W) 可以表示为^[25]

$$W = \int_0^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (12)$$

比吸能 E_{SA} 的表达式为

$$E_{SA} = W/\rho \quad (13)$$

式中: ρ 为晶格结构的密度。

3.2 响应过程及能量吸收曲线

图 10 给出了不同冲击速度下 TPMS 各胞元的应力-应变曲线。从图 10 可以看出, 不同冲击速度下各结构的应力-应变曲线具有 3 个阶段, 即线弹性阶段、强化阶段和密实化阶段, 曲线整体没有出现明显的应力波动, 表明 TPMS 结构在受到冲击时能够保持稳定的性能, 避免了因应力波动而导致的结构失效或性能下降。如图 10(a) 所示, 当冲击速度为 1 m/s 时, 在初始短暂的线弹性阶段后, 结构出现塑性变形, 应力-应变曲线出现一个较长的强化阶段。随着结构被进一步压缩, 胞元之间的相互作用增强, 应力迅速上升, 进入密实化阶段。如图 10(b) 所示, 由于载荷的作用时间较短, 在 50 m/s 的冲击速度下, 单一 TPMS 结构 (Gyroid 和 IWP) 均达到了密实化, 其中 Gyroid 结构的强化效果并不明显, 表现出较长

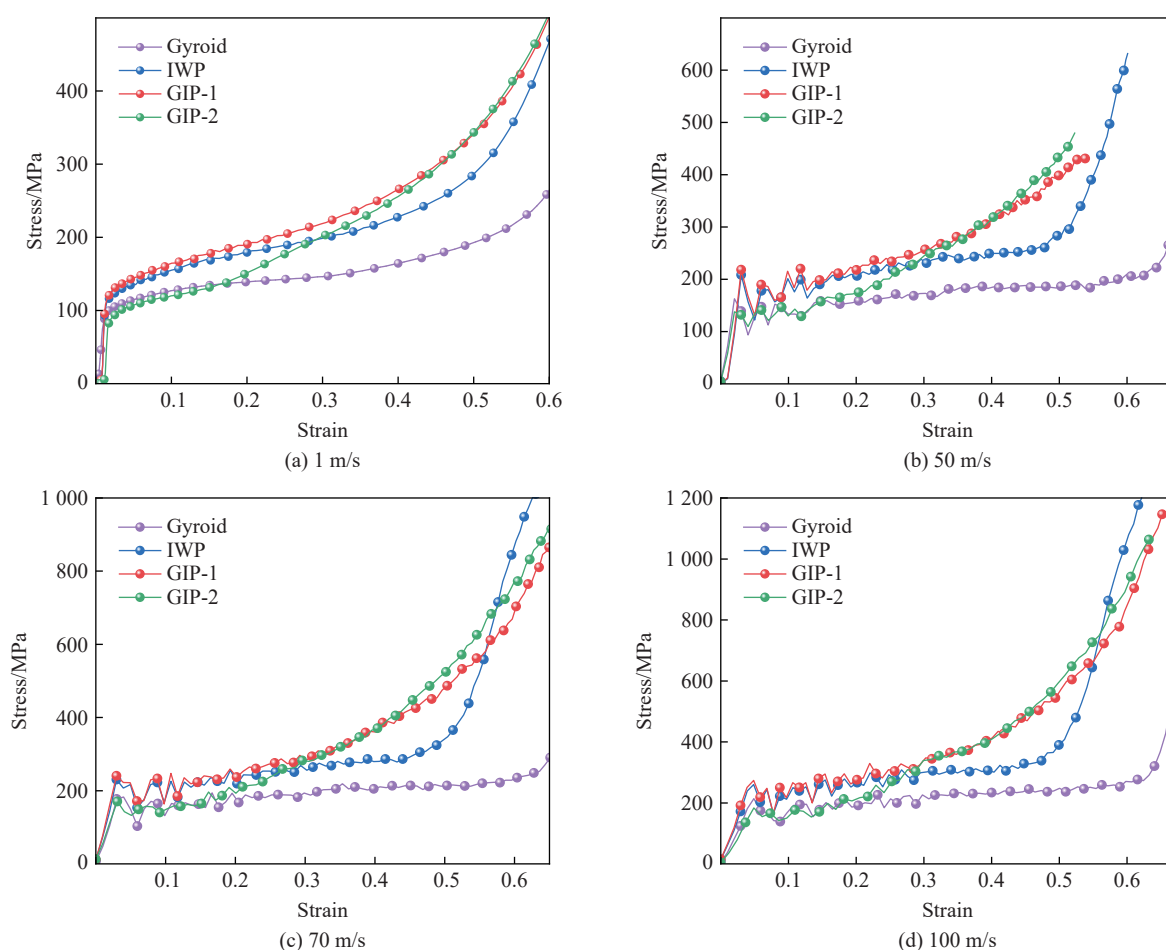


图 10 不同加载速度下结构的应力-应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curves of structures with different loading velocities

的平台阶段。混合结构在强化阶段变形结束, 具有较好的抗冲击承载能力, GIP-1 结构表现出较高的初始峰值应力, 而 GIP-2 结构的初始峰值应力较低, 但其强化效果更加明显。如图 10(c) 和图 10(d) 所示, 当冲击速度高于 50 m/s 时, 所有结构均进入密实化阶段, 初始峰值应力有明显提高。

图 11 给出了单一结构和混合结构的能量吸收效率和密实化应变曲线。从图 11 可以看出, Gyroid 和 IWP 结构的密实化应变分别为 0.55 和 0.49; 对于混合结构 GIP, 当沿圆柱形过渡层轴线方向冲击时 (GIP-1), 密实化应变为 0.51, 垂直于圆柱形过渡层轴线方向冲击时 (GIP-2), 密实化应变为 0.52。由此可以看出, 混合结构 GIP 的密实化应变介于单一结构 Gyroid 和 IWP 的密实化应变之间。

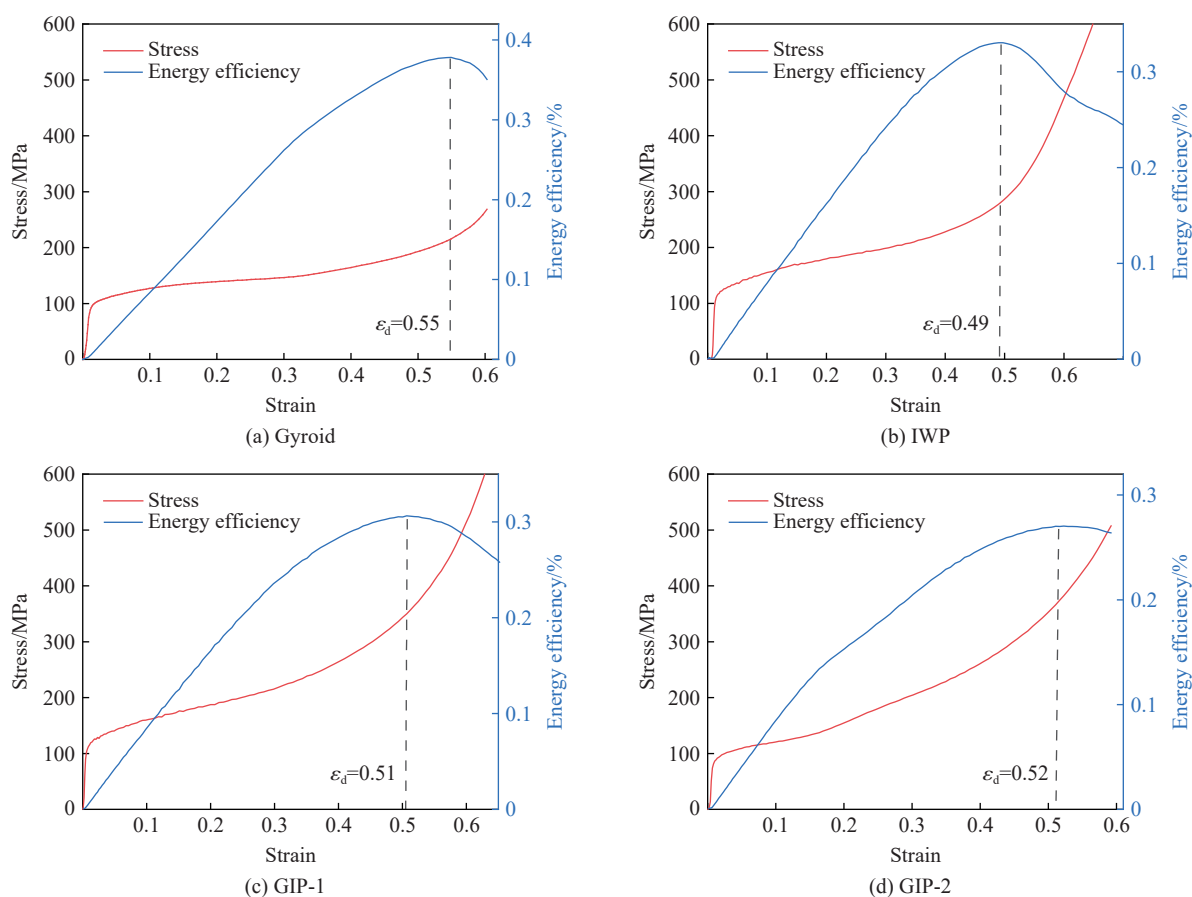


图 11 单一结构和混合结构的能量吸收效率曲线和密实化应变

Fig. 11 Energy absorption efficiency curves and densification strains for single structures and hybrid structures

图 12 给出了不同结构的初始峰值应力和比吸能对比, 从图 12 中可以看出, 与单一结构 Gyroid 和 IWP 相比, 混合结构 GIP 在能量吸收方面有明显提高, 在不同加载条件下, GIP-2 结构总是具有最小的初始峰值应力。在 1 m/s 冲击速度下, GIP-1 的比吸能大于 GIP-2, 但是随着冲击速度的提升, GIP-2 结构的吸能效果不断增强。在 50 m/s 的冲击速度下, GIP-1 与 GIP-2 结构的比吸能趋于相同。在 70 m/s 的冲击速度下, GIP-1 结构的比吸能相较于单一的 Gyroid 结构和 IWP 结构分别提升了 17.95% 和 22.11%; 而 GIP-2 结构在这一冲击速度下显示出最高的比吸能, 与 Gyroid 结构和 IWP 结构相比, GIP-2 结构的比吸能分别高出了 43.65% 和 35.25%。吸能性能的显著提升主要归功于 GIP-2 结构设计的独特性。这种混合设计不仅结合了 Gyroid 结构和 IWP 结构的优点, 还在结构内部形成了大范围的塑性铰, 从而实现了高效的能量吸收。此外, GIP-2 结构在冲击过程中的多级能量吸收机制也为其优异的力学性能提供了有力支撑。

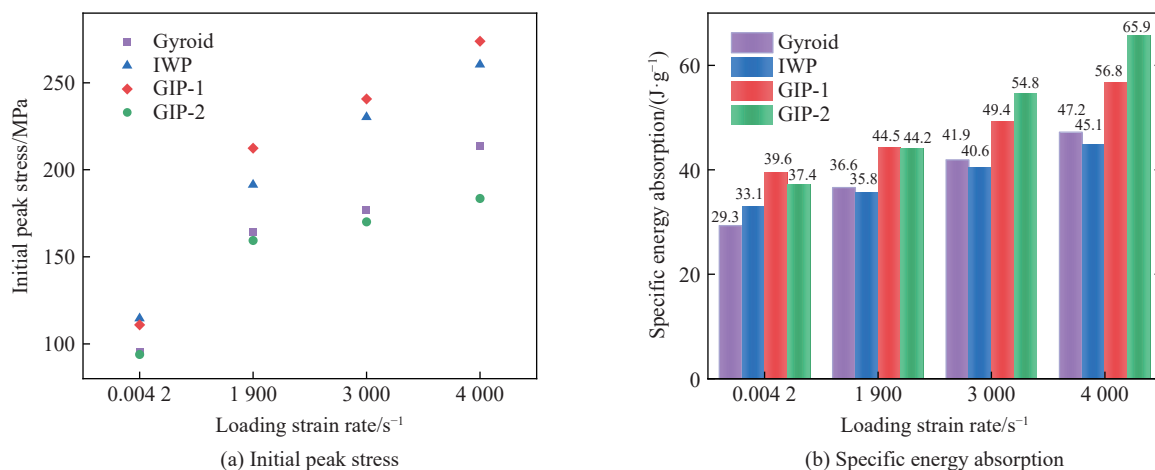


图 12 加载速度对初始峰值应力和比吸能的影响

Fig. 12 Effect of loading velocity on initial peak stress and specific energy absorption

图 13 给出了不同加载条件下的初始峰值应力和比吸能的应变率敏感性。所有加载条件下的结果均通过准静态下的计算结果归一化来描述结构的应变率敏感性^[12]。可以看出,所有结构的初始峰值应力和比吸能均表现出明显正相关的应变率效应。GIP-1 结构的初始峰值应力对应变率变化敏感,而 GIP-2 结构的初始峰值应力对应变率变化比较敏感,表现出更好的稳定性。GIP-2 结构的比吸能受应变率影响最显著,当应变率高于 $3\,000\,s^{-1}$ (冲击速度为 $70\,m/s$) 时具有最好的能量吸收能力。由此可以看出,混合结构 GIP 在垂直于圆柱形过渡层轴线方向冲击时 (GIP-2),能够更好地发挥 Gyroid 和 IWP 基元结构的冲击吸能效果。

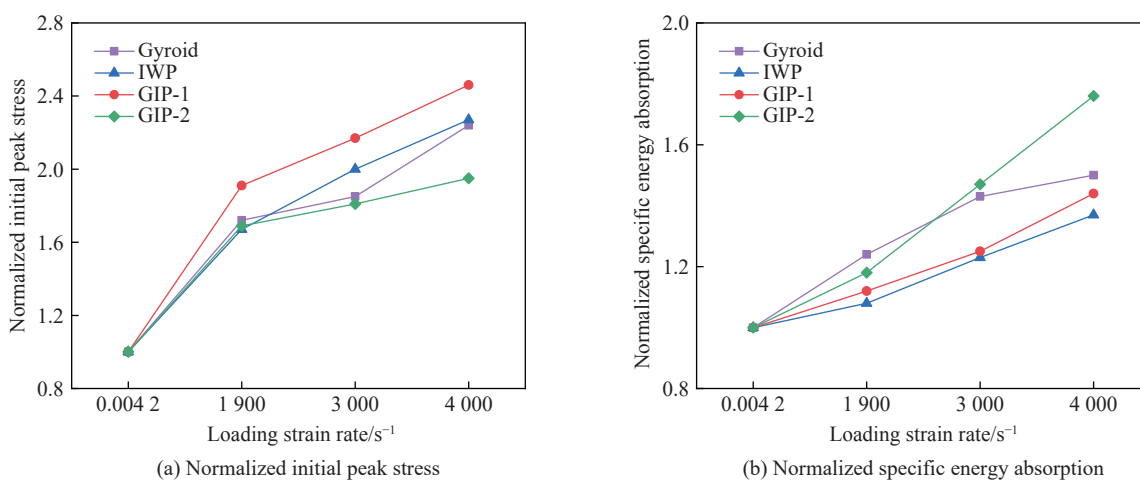


图 13 加载速度对归一化参数的影响

Fig. 13 Effect of loading velocity on normalized parameters

4 结 论

对单一 TPMS 结构 (Gyroid 和 IWP) 和混合结构 GIP 在直撞式霍普金森杆冲击加载下的动态力学响应进行了实验及有限元模拟, 分析了不同加载条件下拓扑构型和冲击速度对结构动态力学性能的影响, 得到以下主要结论。

(1) TPMS 晶格超结构的应力-应变曲线表现出典型的 3 个阶段: 线弹性阶段、强化阶段以及密实化阶段, 并显示出一定程度的应变硬化; 混合结构 GIP 的应力-应变曲线相比单一 TPMS 结构具有更强的硬化效果。

(2) 混合 TPMS 结构设计使得结构的能量吸收能力大幅度提升。在 70 m/s 的冲击速度下, GIP-1 结构的比吸能相较于单一的 Gyroid 结构和 IWP 结构分别提升了 17.95% 和 22.11%。GIP-2 结构在不同加载条件下始终具有最低的初始峰值应力, 并保持了混合设计带来的增大比吸能的优势, 与 IWP 结构相比, GIP-2 结构的初始峰值应力至少降低了 16.68%。GIP-2 结构能够更有效地将冲击能量转化为结构的变形能, 是最佳的抗冲击结构设计。

(3) 所有结构均显示出不同程度的应变率敏感性。结构的初始峰值应力和比吸能均随应变率的增加而增大, 其中初始峰值应力受应变率的影响更大。在更高的冲击应变率下, 相较于其他结构, GIP-2 结构低初始峰值应力和高比吸能的优点更为突出。

参考文献:

- [1] ZHANG J W, ZHAO J X, RONG Q G, et al. Machine learning guided prediction of mechanical properties of TPMS structures based on finite element simulation for biomedical titanium [J]. *Materials Technology*, 2022, 37(1): 1–8.
- [2] CHATZIGEORGIOU C, PIOTROWSKI B, CHEMISKY Y, et al. Numerical investigation of the effective mechanical properties and local stress distributions of TPMS-based and strut-based lattices for biomedical applications [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2022, 126: 105025.
- [3] ZHANG S N, DA D, WANG Y J. TPMS-infill MMC-based topology optimization considering overlapped component property [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 235: 107713.
- [4] SANTIAGO R, RAMOS H, ALMAHRI S, et al. Modelling and optimisation of TPMS-based lattices subjected to high strain-rate impact loadings [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 177: 104592.
- [5] 冯根柱, 于博丽, 李世强, 等. 多层级夹芯结构的变形与能量吸收 [J]. *高压物理学报*, 2019, 33(5): 055902.
FENG G Z, YU B L, LI S Q, et al. Deformation and energy absorption of multi-hierarchical sandwich structures [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(5): 055902.
- [6] FENG J W, FU J Z, SHANG C, et al. Porous scaffold design by solid T-splines and triply periodic minimal surfaces [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2018, 336: 333–352.
- [7] LIU B, LIU M Y, CHENG H Q, et al. A new stress-driven composite porous structure design method based on triply periodic minimal surfaces [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 181: 109974.
- [8] FENG J W, LIU B, LIN Z W, et al. Isotropic porous structure design methods based on triply periodic minimal surfaces [J]. *Materials & Design*, 2021, 210: 110050.
- [9] WANG H, TAN D W, LIU Z P, et al. On crashworthiness of novel porous structure based on composite TPMS structures [J]. *Engineering Structures*, 2022, 252: 113640.
- [10] ZHANG L, FEIH S, DAYNES S, et al. Energy absorption characteristics of metallic triply periodic minimal surface sheet structures under compressive loading [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 23: 505–515.
- [11] 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.
- [12] LI X, XIAO L J, SONG W D. Compressive behavior of selective laser melting printed gyroid structures under dynamic loading [J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 46: 102054.
- [13] NAZIR A, HUSSAIN S, ALI H M, et al. Design and mechanical performance of nature-inspired novel hybrid triply periodic minimal surface lattice structures fabricated using material extrusion [J]. *Materials Today Communications*, 2024, 38: 108349.
- [14] LI S, ZHU H, FENG G, et al. Influence mechanism of cell-arrangement strategy on energy absorption of dual-phase hybrid lattice structure [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 175: 104528.
- [15] YU G J, XIAO L J, SONG W D. Deep learning-based heterogeneous strategy for customizing responses of lattice structures [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 229: 107531.
- [16] ZHANG J, XIE S, LI T, et al. A study of multi-stage energy absorption characteristics of hybrid sheet TPMS lattices [J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 190: 110989.
- [17] SREEDHAR N, THOMAS N, AL-KETAN O, et al. Mass transfer analysis of ultrafiltration using spacers based on triply periodic minimal surfaces: effects of spacer design, directionality and voidage [J]. *Journal of Membrane Science*, 2018, 561: 89–98.

- [18] AL-KETAN O, ABU AL-RUB R K. MSLattice: a free software for generating uniform and graded lattices based on triply periodic minimal surfaces [J]. *Material Design & Processing Communications*, 2021, 3(6): e205.
- [19] 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 [J]. *Polymer*, 2018, 152: 62–71.
- [20] YIN H F, ZHENG X J, WEN G L, et al. Design optimization of a novel bio-inspired 3D porous structure for crashworthiness [J]. *Composite Structures*, 2021, 255: 112897.
- [21] NOVAK N, TANAKA S, HOKAMOTO K, et al. High strain rate mechanical behaviour of uniform and hybrid metallic TPMS cellular structures [J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 191: 111109.
- [22] 厉雪, 肖李军, 宋卫东. 3D 打印梯度 Gyroid 结构的动态冲击响应 [J]. *高压物理学报*, 2021, 35(3): 034201.
LI X, XIAO L J, SONG W D. Dynamic behavior of 3D printed graded gyroid structures under impact loading [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2021, 35(3): 034201.
- [23] 李吉祥. 基于三周期极小曲面的三维点阵结构的防护性能研究 [D]. 泉州: 华侨大学, 2023.
LI J X. Study on protective performance of three-dimensional lattice structures based on triply periodic minimal surfaces [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2023.
- [24] DUAN Y, DU B, SHI X P, et al. Quasi-static and dynamic compressive properties and deformation mechanisms of 3D printed polymeric cellular structures with Kelvin cells [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 132: 103303.
- [25] XI H, ZHOU Z, ZHANG H, et al. Multi-morphology TPMS structures with multi-stage yield stress platform and multi-level energy absorption: design, manufacturing, and mechanical properties [J]. *Engineering Structures*, 2023, 294: 116733.

Hybrid Design of Triply Periodic Minimal Surface Structure and Its Mechanical Behavior under Impact Loading

LIU Jiajing, LI Zihao, WANG Zhihua, LIU Zhifang, LI Shiqiang

(*Institute of Applied Mechanics, College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China*)

Abstract: Triply periodic minimal surface (TPMS) structural material is widely used in many fields as a porous medium with high porosity and high energy absorption efficiency. In this paper, the Gyroid and IWP structures were used as the design elements, and the Sigmoid function was used to construct the cylindrical transition layer. The outer IWP structure was connected with the inner Gyroid structure, hence the inner and outer nested GIP hybrid cellular structure was designed. Gyroid structure, IWP structure and GIP hybrid structure samples were printed by selective laser melting technology, and the experimental study was performed by direct impact Hopkinson bar. Combined with LS-DYNA software, the numerical simulation of larger impact velocity range was carried out, and the deformation evolution process as well as dynamic stress-strain relationship of the specimen were analyzed. The results show that the initial peak stress and specific energy absorption of the structure present different strain rate sensitivity. Compared with Gyroid and IWP structures, the stress-strain curves of GIP hybrid structural materials exhibit more obvious strain hardening trend and stronger energy absorption capacity. With the increase in impact velocity, the GIP-2 structure (the impact direction is perpendicular to the axis direction of the cylindrical transition layer) presents lower initial peak stress and larger specific energy absorption than the GIP-1 structure (the impact direction is the same as the axis direction of the cylindrical transition layer), which demonstrates its better impact resistance.

Keywords: TPMS hybrid structure; 3D printing; dynamic loading; energy absorption