

基于BCC与I-WP互穿晶格结构的多孔结构力学与渗透性能研究

杨绍莹, 黄仁凯

江西理工大学机电工程学院, 赣州 江西

收稿日期: 2026年4月2日; 录用日期: 2026年5月13日; 发布日期: 2026年5月21日

摘要

针对传统实心螺纹支架因弹性模量过高易引发应力遮挡效应的问题, 本研究设计了一种基于体心立方(BCC)与I-WP三周期极小曲面(TPMS)的互穿晶格结构, 旨在降低钛合金植入体的弹性模量并提升其力学与生物传输性能。通过引入组合参数 ω 调控内部BCC结构在整体结构中的体积分数, 构建了五种不同互穿比例的多孔结构, 并采用有限元分析方法系统评估其力学承载能力与流体渗透特性。结果表明, 互穿结构($\omega = 0.3, 0.5, 0.8$)相较于单相结构($\omega = 0$ 与 $\omega = 1$)具有更均匀的应力分布和更优的承载效率, 其中 $\omega = 0.5$ 表现出最佳综合力学性能; 在渗透性能方面, 互穿结构虽流动阻力略高, 但其复杂的微孔网络可增强细胞附着与物质交换能力, 有利于组织再生。本研究为高性能骨组织工程支架的结构设计与优化提供了理论依据与技术参考。

关键词

多孔结构, 力学性能, 渗透性能

Study on Mechanical and Permeability Properties of Porous Structure Based on BCC and I-WP Interpenetrating Lattice Structure

Shaoying Yang, Renkai Huang

School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi

Received: April 2, 2026; accepted: May 13, 2026; published: May 21, 2026

Abstract

Aiming at the problem of stress shielding effect caused by the high elastic modulus of traditional

solid threaded stents, an interpenetrating lattice structure based on body-centered cubic (BCC) and I-WP three-period minimal surface (TPMS) was designed in this study, the purpose is to reduce the elastic modulus of titanium alloy implants and improve their mechanical and biological transmission properties. By introducing the combination parameter ω to regulate the volume fraction of the internal BCC structure in the overall structure, five porous structures with different interpenetrating ratios were constructed, and the structure of the interpenetrating layer was analyzed, and the finite element analysis method was used to systematically evaluate their mechanical bearing capacity and fluid permeability characteristics. The results show that the interpenetrating structure ($\omega = 0.3, 0.5, 0.8$) has more uniform stress distribution and better bearing efficiency than the single-phase structure ($\omega = 0$ and $\omega = 1$), where $\omega = 0.5$ shows the best comprehensive mechanical properties. In terms of permeability, although the flow resistance of the interpenetrating structure is slightly higher, its complex microporous network can enhance the ability of cell attachment and material exchange, which is conducive to tissue regeneration. This study provides a theoretical basis and technical reference for the structural design and optimization of high-performance bone tissue engineering scaffolds.

Keywords

Porous Structure, Mechanical Properties, Permeability

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

骨骼, 作为人体生物力学的核心支柱与生命活动的基本石, 有着支撑身体、保护内脏器官、运动功能、造血和储存矿物质等重要作用, 是人身体十分重要的器官[1] [2]。然而, 近些年以来, 因事故受伤、外科手术或骨肿瘤切除术等造成的骨骼损伤病例每年都在增加[3]。全球每年都会进行超过两百万次的骨移植手术, 仅在美国就有超过 50 万例。当骨缺损超过 4 mm 时, 仅依赖自身身体或异体骨骼移植治疗已经无法实现有效的修复, 其主要原因是异体骨骼量捐献供应不足, 可移植骨组织存在严重短缺, 供需矛盾日益突出或是植入后需要面临身体免疫系统排斥风险[4]。

传统实心螺纹支架经过数十年的临床验证, 其长期成功率已达到 90%以上, 但植入人体后非常容易产生免疫排斥效应, 轻微的会发烧炎症, 重则将感染休克致死。主要是由于目前临床广泛使用的 Ti6Al4V 钛合金弹性模量过高约为 110 GPa, 与人体骨骼相差过大难以匹配, 这种显著的刚度差异容易引发应力遮挡效应: 高模量的种植体承担了大部分咬合载荷, 导致周围骨组织因缺乏必要的力学刺激而出现废用性萎缩, 进而引发骨吸收、界面结合强度下降, 最终可能造成种植体松动甚至脱落。近几十年来国内外学者在多孔结构研究上颇有建树, 多孔结构不仅在降低材料弹性模量上具有较好的表现, 并且其结构特性仍可保持原有材料的性能[5] [6]。针对 Ti6Al4V 合金材料, 若将多孔结构应用于原实心材料(110 GPa), 将大大降低结构的弹性模量, 同时其弹性模量随着孔隙率的增加呈现衰减的趋势, 由 3.7 GPa 逐渐降低到 1.7 GPa, 相较实心结构, 其弹性模量呈现巨大的降低程度[7]。体心立方(BCC)结构与 I-WP 结构同属三周期极小曲面(TPMS)多孔的经典拓扑结构, 凭借可调控的力学性能、优异的孔道连通性与生物传输特性, 成为骨科植入体拓扑构型设计的优选方案, 在骨缺损修复、人工关节、牙科种植体等临床领域应用价值突出[8] [9]。

然而, 对于单相 TPMS 结构, 其力学行为和物理属性主要受设计参数的控制, 限制了设计自由度, 多细胞设计的出现, 包括互穿晶格、多细胞异质晶格和多细胞交织晶格, 为设计高性能多孔钛合金支架

提供了一个有前景的方向[10] [11]。互穿晶格由两个独立且不相互连接的晶格相组成。与单相结构不同, 互穿晶格表现出广泛可调节的物理和力学性能的潜力[12]-[15]。

基于这一考虑, 本文设计了基于体心立和 I-WP 结构的互穿晶格结构, 用于骨组织工程中。采用有限元分析(FEA)模拟了其在外部载荷下的力学性能, 在水流动下的渗透性能, 旨在全面评估其未来的应用潜力。

2. 设计方法

2.1. 互穿结构的设计

使用三周期极小曲面(TPMS)定义晶格结构。对于互穿晶格结构来说, 单元格包含一个内部晶格结构和一个外部晶格结构, 如图 1 所示所示。在本研究中, 选择体心立方晶格结构(BCC)作为内部结构, 外部结构为 I-WP 晶格结构。基于 TPMS 的内部 BCC 晶格结构的方程由以下公式给出:

$$F_{\text{BCC}} = \cos(2kx) + \cos(2ky) + \cos(2kz) - 2(\cos(kx)\cos(ky) + \cos(ky)\cos(kz) + \cos(kz)\cos(kx)) \leq t_1$$

其中, k 是用于控制 x 、 y 和 z 方向上单位尺寸的 TPMS 函数周期。 t_1 是 TPMS 的偏移参数, 可用于控制体积分数。为了生成外晶格结构并避免内外晶格结构的交集, 将基于外部 TPMS 的 I-WP 晶格结构方程定义如下:

$$F_{\text{I-WP}} = -F_{\text{BCC}} \leq t_2$$



Figure 1. Design diagram based on TPMS interpenetrating lattice structure
图 1. 基于 TPMS 互穿晶格结构设计图

为了研究不同质量比例的 BCC 和 I-WP 晶格结构的力学特性, 引入了一个组合参数 ω , 定义为 BCC 网络结构在整个结构中的比例:

$$\omega = \frac{\rho_{\text{BCC}}^*}{\rho^*}$$

其中 ρ_{BCC}^* 是内部 BCC 晶格结构的体积分数, ρ^* 是互穿晶格结构的总体积分数。值得注意的是, 这个设计方法可以进一步应用于任何基于 TPMS 的晶格结构。图 2 显示了不同互穿参数的单胞晶格结构。

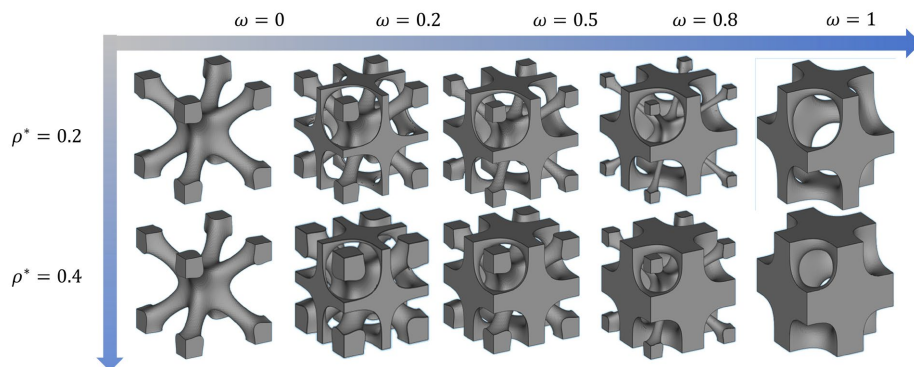


Figure 2. Unit cell structures with different interpenetration parameters
图 2. 不同互穿参数的单胞结构

由于 I-WP 晶格结构包含锥形支撑, 在制造过程中容易转化为独立和无支撑的部件, 这意味着需要额外的打印支撑。因此, 为了提高制造性, 引入形态参数 α 来修改 TPMS 公式并优化 I-WP 格子结构的形态特征。如图 3 所示, I-WP 格子结构的优化公式可以表示为:

$$F_{BCC} = \cos(2kx) + \cos(2ky) + \cos(2kz) - \alpha(\cos(kx)\cos(ky) + \cos(ky)\cos(kz) + \cos(kz)\cos(kx)) \leq t_1$$

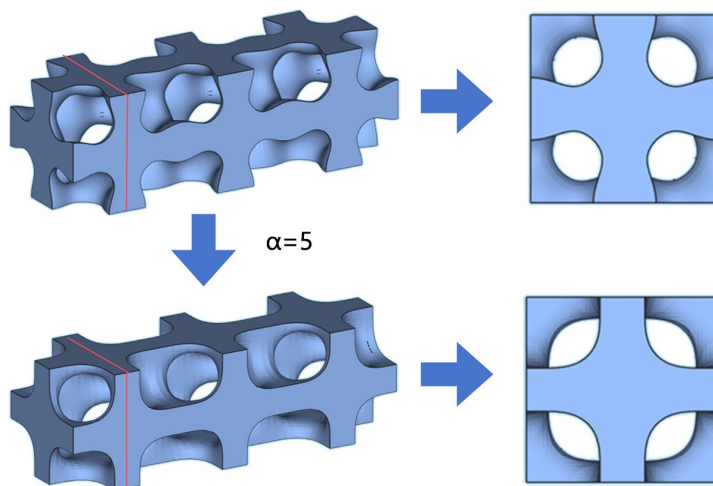


Figure 3. Results of shape optimization of I-WP lattice structure
图 3. I-WP 格子结构的形态优化结果

2.2. 力学性能边界条件

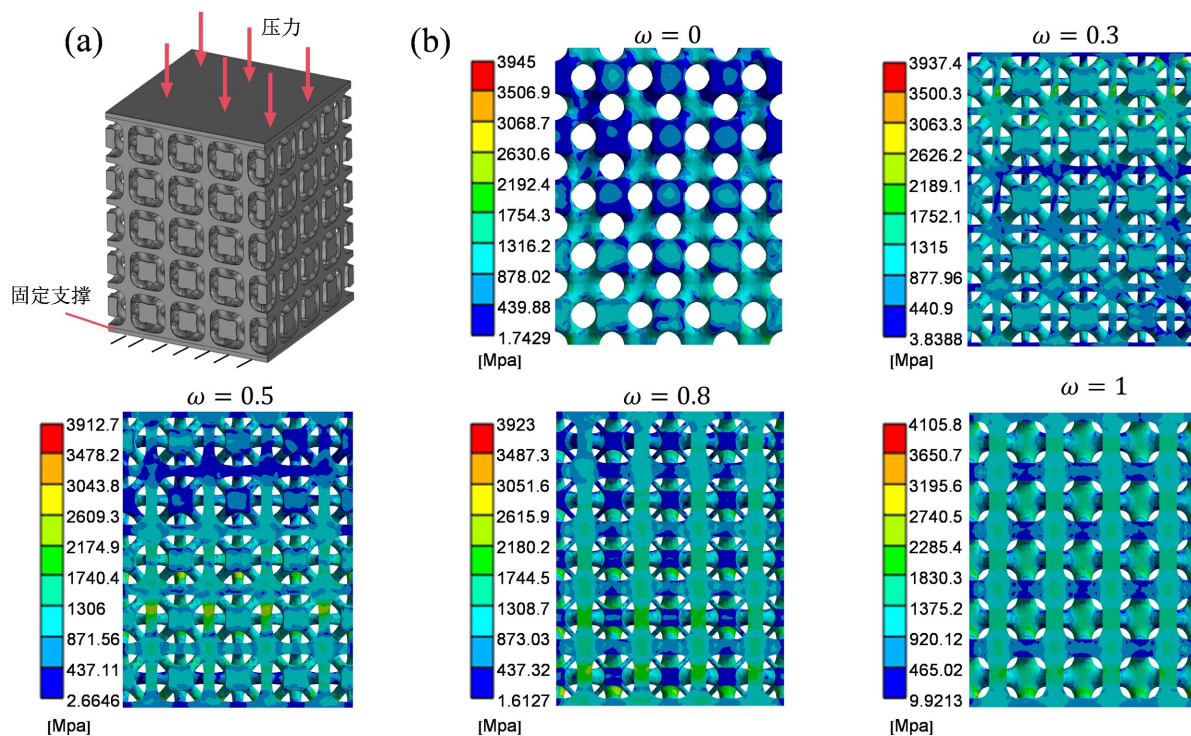


Figure 4. (a) Compression boundary condition; (b) Stress nephogram of interpenetrating structure
图 4. (a) 压缩边界条件; (b) 互穿结构的应力分布云图

采用 ANSYS 软件, 基于有限元方法, 系统分析了不同设计参数下互穿结构的力学性能与变形行为。为了更贴近真实实验条件, 将模型材料设定为 Ti6Al4V 合金, 来模拟钛合金结构在实际加载过程中的变形情况, Ti6Al4V 的弹性模量在不同工况下会有所差异, 波动范围在 108~117 GPa 之间。由于该幅度不大, 本研究统一将 Ti6Al4V 弹性模量设定为 110 GPa, 泊松比为 0.3。如图 4(a)所示, 为探究互穿参数 ω 对力学性能的影响, 选取 ω 分别为 0、0.3、0.5、0.8 和 1 的五种参数取值, 在总体积分数固定为 0.4 的条件下, 构建了支架几何形状为 $8 \times 8 \times 10 \text{ mm}^3$ 的长方体进行研究。以 $\omega = 0.3$ 为例, 图 4(a)展示了互穿结构的三维模型, 并清晰标示了载荷与边界条件: 结构顶面施加均匀分布的轴向压缩载荷, 使结构产生 20% 的压缩形变, 底面则设置为固定约束。通过上述加载方式, 实现对模型施加 20%位移量的压缩模拟。

2.3. 渗透性能边界条件

采用 ANSYS 软件中的流体动力学(CFD)板块, 对互穿多孔结构的流体渗透性能开展数值模拟研究。模型构建为竖直放置的多孔通道, 以模拟流体在结构内部的层流行为。在边界条件设置方面, 构建了一个略高于模型的矩形流体域, 将介质定义为密度 1000 kg/m^3 和粘度 $0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的液体水, 如图 5(a)所示。模型顶部设为速度入口, 入口流速为 0.001 m/s , 用以模拟水流的稳定流入过程; 出口处压力设为 0 Pa , 充分发展出流条件; 通道侧壁则设为无滑移壁面边界条件, 以准确反映固壁对流体流动的粘性阻滞效应。通过上述设置, 实现对互穿多孔结构内流体渗透特性与流动分布的高精度数值预测。

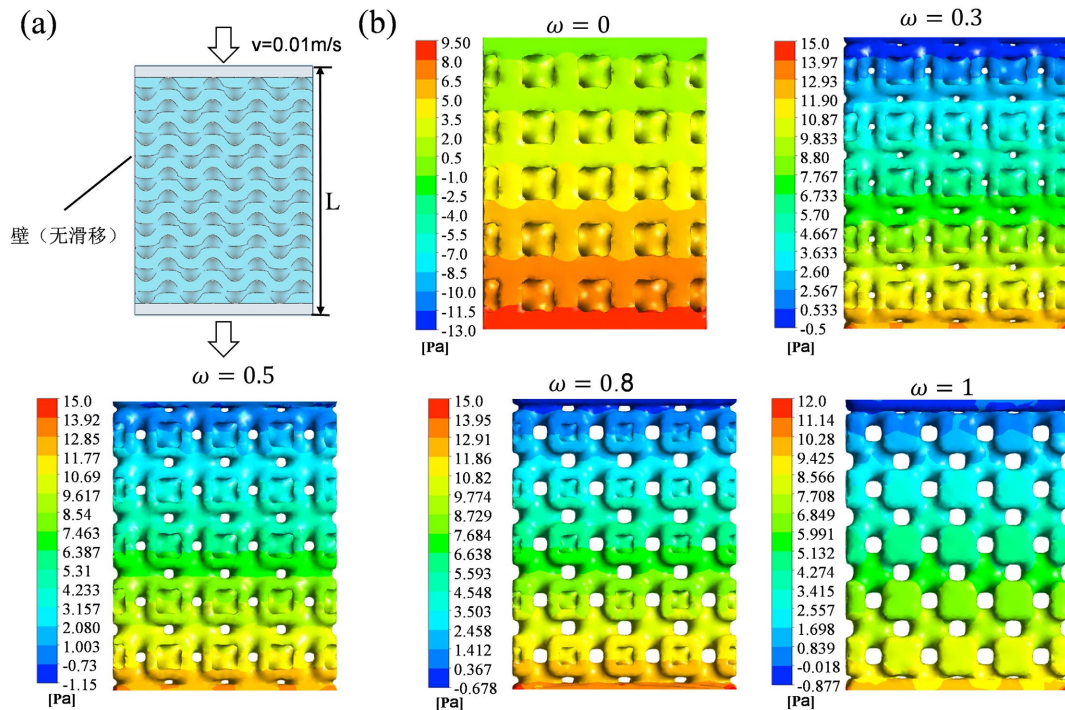


Figure 5. (a) Fluid boundary setting; (b) Fluid pressure nephogram of interpenetrating structure
图 5. (a) 流体边界设置; (b) 互穿结构流体压力云图

3. 结果与讨论

3.1. 力学性能

为系统评估互穿多孔结构的力学承载特性, 对 5 种不同互穿体积分数($\omega = 0, 0.3, 0.5, 0.8, 1.0$)的结构

进行了 20% 准静态压缩有限元仿真, 获得了等效应力云图(如图 4(b)所示)。结果表明, 5 种结构的最大等效应力分别为: 3945 MPa, 3937.4 MPa, 3912.7 MPa, 3923 MPa, 4105.8 MPa。从应力分布形态与峰值特征来看, 互穿结构($\omega = 0.3, 0.5, 0.8$)展现出显著优于单相结构($\omega = 0$ 与 $\omega = 1$)的力学性能: 由图可以看出, 相比于单相结构($\omega = 0$ 和 $\omega = 1$), 互穿结构的应力分布更加均匀, 高应力区从局部交界点扩展为连续承载带, 避免了局部过载失效风险。说明互穿结构可构建高效力传导路径, 在相同孔隙率下实现更高的刚度与承载效率, 且有效降低了单相结构的应力集中效应, 高应力区从局部交界点扩展为连续承载带, 避免了孔壁屈曲、断裂等脆性失效模式, 显著提升结构的力学可靠性与疲劳寿命。为结构植入物设计提供了基础的力学稳定性。

3.2. 渗透性能

图 5 展示了 5 种不同互穿参数的多孔结构在入口流速为 0.001 m/s 时的流体压力分布云图, 直观揭示了互穿构型对流体渗透行为的调控机制。从整体规律来看, 5 种结构的压力分布均呈现一致的梯度特征: 流体从结构上表面流入后, 压力沿流动方向逐步累积, 下表面压力达到峰值, 形成自上而下的压力梯度。定量对比可见, 单相结构($\omega = 0$ 与 $\omega = 1$)的整体压差显著低于互穿结构, 这一现象可归因于互穿结构独特的空间构型: 内外两层晶格在三维空间中相互穿插、交织缠绕, 不仅延长了流体的有效传输路径, 更显著提升了流道的曲折度与拓扑复杂性, 进而增大了流体流动阻力与整体压力降。但同时晶格内部形成更加复杂精密的微孔网络和更多的表面界面区域, 能够为细胞提供更多的初始粘附位点, 促进细胞外基质的沉积与营养物质的交换, 从而促进组织再生进程。

4. 结论

本研究提出了一种基于体心立方晶格的互穿结构, 该结构具有低应力屏蔽和高强度的组合, 适用于牙科应用。采用有限元压缩模拟和流体流动模拟实验, 评估了结构的力学性能和渗透性能可以得出以下结论:

1) 应力云图分析表明, $\omega = 0.3, 0.5, 0.8$ 的互穿多孔结构, 在应力均匀性、承载效率、力学稳定性及临床适配性方面均显著优于单相结构($\omega = 0$ 和 $\omega = 1$)。其中 $\omega = 0.5$ 展现出最优的综合力学性能, 而 $\omega = 0.3$ 与 $\omega = 0.8$ 可分别满足不同部位的临床需求, 为功能梯度多孔结构的设计与优化提供了重要的力学依据。

流体压力云图分析表明, $\omega = 0.3, 0.5, 0.8$ 的互穿多孔结构, 尽管在流动阻力略高于单相晶格结构, 不利于物质的运输, 但由于具有较高的孔隙曲折度, 为细胞提供更多的附着点, 较大的流动阻力也为细胞停留提高了更高的可能性。为功能梯度多孔结构的流体微环境设计与优化提供了重要依据。

参考文献

- [1] 皇磊, 王晓丽, 王思明, 等. 骨组织工程支架的制备方法研究进展[J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(29): 4710-4716.
- [2] Percival, K.M., Paul, V. and Hussein, G.A. (2024) Recent Advancements in Bone Tissue Engineering: Integrating Smart Scaffold Technologies and Bio-Responsive Systems for Enhanced Regeneration. *International Journal of Molecular Sciences*, **25**, Article 6012. <https://doi.org/10.3390/ijms25116012>
- [3] 林昕, 杨博, 朱鲲鹏, 等. 基于 Gyroid 三周期极小曲面的多孔骨支架梯度结构设计及力学性能分析[J]. 武汉科技大学学报, 2023, 46(2): 109-117.
- [4] Kanwar, S. and Vijayavenkataraman, S. (2021) Design of 3D Printed Scaffolds for Bone Tissue Engineering: A Review. *Bioprinting*, **24**, e00167. <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2021.e00167>
- [5] Zhang, L., Liu, H., Yao, H., Zeng, Y. and Chen, J. (2022) Preparation, Microstructure, and Properties of ZrO₂(3Y)/Al₂O₃ Bioceramics for 3D Printing of All-Ceramic Dental Implants by Vat Photopolymerization. *Chinese Journal of*

Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers, **1**, Article ID: 100023.

<https://doi.org/10.1016/j.cjmeam.2022.100023>

- [6] Baltatu, M.S., Tugui, C.A., Perju, M.C., Benchea, M., Spataru, M.C., Sandu, A.V., *et al.* (2019) Biocompatible Titanium Alloys Used in Medical Applications. *Revista de Chimie*, **70**, 1302-1306. <https://doi.org/10.37358/rc.19.4.7114>
- [7] Nouri, A., D., P. and We, C. (2010) Biomimetic Porous Titanium Scaffolds for Orthopedic and Dental Applications. In: Mukherjee, A., Ed., *Biomimetics Learning from Nature*, InTech, 415-450. <https://doi.org/10.5772/8787>
- [8] Zhao, Z., Li, J., Wei, Y. and Yu, T. (2022) Design and Properties of Graded Polyamide12/Hydroxyapatite Scaffolds Based on Primitive Lattices Using Selective Laser Sintering. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **126**, Article ID: 105052. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.105052>
- [9] Feng, J., Fu, J., Yao, X. and He, Y. (2022) Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) Porous Structures: From Multi-Scale Design, Precise Additive Manufacturing to Multidisciplinary Applications. *International Journal of Extreme Manufacturing*, **4**, Article ID: 022001. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ac5be6>
- [10] Jin, J., Wu, S., Yang, L., Zhang, C., Li, Y., Cai, C., *et al.* (2024) Ni-Ti Multicell Interlacing Gyroid Lattice Structures with Ultra-High Hyperelastic Response Fabricated by Laser Powder Bed Fusion. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **195**, Article ID: 104099. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2023.104099>
- [11] Chen, M., Lin, D., Yang, L., Zhang, C., Qiao, H., Kang, L., *et al.* (2025) Multicell Interlacing IWP Lattice Metamaterials with Superior Low-Frequency Vibration Isolation Performance Fabricated by Laser Powder Bed Fusion. *Additive Manufacturing*, **99**, Article ID: 104681. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2025.104681>
- [12] Zhao, M., Li, X., Zhang, D.Z. and Zhai, W. (2023) TPMS-Based Interpenetrating Lattice Structures: Design, Mechanical Properties and Multiscale Optimization. *International Journal of Mechanical Sciences*, **244**, Article ID: 108092. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.108092>
- [13] White, B.C., Garland, A., Alberdi, R. and Boyce, B.L. (2021) Interpenetrating Lattices with Enhanced Mechanical Functionality. *Additive Manufacturing*, **38**, Article ID: 101741. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101741>
- [14] White, B.C., Garland, A. and Boyce, B.L. (2023) Toughening by Interpenetrating Lattices. *Matter*, **6**, 570-582. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2022.11.025>
- [15] Luo, Z., Tang, Q., Song, J., Zhang, Y., Feng, Q., Ma, S., *et al.* (2024) TPMS-Based Strut-Shell Interpenetrating Lattice Metamaterial with Wide-Range Customizable Mechanical Properties and Superior Energy Absorption. *Composite Structures*, **349**, Article ID: 118555. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118555>