文章编号: 1671−7872(2026)05−0511−11



蒋福林 博士,湖南大学材料科学与工程学院副教授、博士生导师。湖南大学与McMaster University联合培养博士,曾任Kyushu University博士后研究员及助理教授。主要研究方向包括金属材料先进制备与加工、材料性能优化,以及AI驱动增材制造合金设计等。主持国家自然科学基金面上项目、青年科学基金项目及湖南省自然科学基金等科研项目,参与国家“973”项目子课题、国家自然科学基金及教育部博士点基金等项目。在*Nature Communications*、*Materials Today*、*International Journal of Plasticity*、*International Journal of Extreme Manufacturing*等期刊发表论文100余篇。获2023年中国有色金属工业科学技术奖一等奖、湖南省科技进步奖二等奖,入选湖南省“荷尖”人才计划、湖南省普通高校青年骨干教师。

基于三周期极小曲面结构的金属增材制造技术研究进展

曾 敏[a],傅定发[a],滕 杰[a,b],蒋福林[a,b]
(湖南大学 a. 材料科学与工程学院; b. 硬质合金全国重点实验室,长沙 410082)

摘要: 随着航空航天、生物医用、热管理及轻量化承载等领域对复杂多孔金属构件需求的不断增长,三周期极小曲面(TPMS)结构因兼具低密度、高比强度、优异的能量吸收能力及良好的可设计性,已成为金属增材制造领域的研究热点。本文遵循“结构设计–增材制造工艺–性能研究”的逻辑主线,系统综述相关研究进展。首先概述TPMS结构的基本特征与典型构型,分析均匀、梯度和混合等设计方式对其性能的调控作用;其次归纳Ti−6Al−4V、316L不锈钢、AlSi10Mg铝合金及镍基合金等材料体系,以及选区激光熔化、选区激光烧结和电子束粉末床熔融等主流增材制造技术的应用现状;最后从力学性能、渗透性能与生物性能、热管理性能三个方面评述金属TPMS结构的性能特征。总体而言,该结构通过几何参数与工艺参数的协同优化,可实现承载、吸能、传质及换热等多功能集成。然而,当前研究仍面临成形缺陷、尺寸偏差、粉末残留及性能预测不足等挑战。未来需进一步揭示结构参数、制造缺陷与服役性能之间的内在关联,以提升性能预测精度、制造一致性和工程应用可靠性。

关键词: 三周期极小曲面; 金属增材制造; 力学性能; 渗透性能; 热管理; 成形质量
中图分类号: TG 14; TH 16 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671−7872.26119

收稿日期: 2026−08−06; **修回日期:** 2026−08−28
基金项目: 国家自然科学基金项目(52574434)
作者简介: 曾敏(2003—),男,湖南娄底人,硕士生,主要研究方向为金属增材制造。
通信作者: 蒋福林(1988—),男,江西吉安人,博士,副教授,博士生导师,主要研究方向为金属材料先进制备与加工。
引文格式: 曾敏,傅定发,滕杰,等. 基于三周期极小曲面结构的金属增材制造技术研究进展[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2026, 43(5):511−521.
Citation: ZENG M, FU D F, TENG J, et al. Research Progress on Metal Additive Manufacturing Technology Based on Triply Periodic Minimal Surface Structures[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2026, 43(5):511−521.

Research Progress on Metal Additive Manufacturing Technology Based on Triply Periodic Minimal Surface Structures

ZENG Min[a], FU Dingfa[a], TENG Jie[a,b], JIANG Fulin[a,b]

(a. School of Materials Science and Engineering; b. State Key Laboratory of Cemented Carbide, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: With the growing demand for complex porous metal components in fields such as aerospace, biomedical engineering, thermal management, and lightweight load-bearing applications, triply periodic minimal surface (TPMS) structures have emerged as a critical research focus in metallic additive manufacturing, owing to their advantages of low density, high specific strength, excellent energy absorption capacity, and high design flexibility. A systematic review was presented following the logical framework of "structural design-additive manufacturing processes-performance studies". First, the basic characteristics and typical configurations of TPMS structures are outlined, and the design approaches of uniform, graded, and hybrid structures, together with their effects on structural performance, are analyzed. Second, the applications of material systems including Ti−6Al−4V, 316L stainless steel, AlSi10Mg aluminum alloy, and nickel-based alloys, as well as major additive manufacturing technologies including selective laser melting, selective laser sintering, and electron beam powder bed fusion, are summarized. Finally, the performance characteristics of metallic TPMS structures are reviewed in terms of mechanical properties, permeability and biological properties, and thermal management performance. Overall, metallic TPMS structures can achieve the integration of multiple functions, including load bearing, energy absorption, mass transfer, and heat transfer, through the synergistic optimization of geometric and process parameters. However, current studies still face challenges such as forming defects, dimensional deviations, powder entrapment, and limitations in performance prediction. Future research should further reveal the intrinsic relationships among structural parameters, manufacturing defects, and service performance to improve the accuracy of performance prediction, manufacturing consistency, and engineering reliability of metallic TPMS structures.

Keywords: triply periodic minimal surface; metallic additive manufacturing; mechanical properties; permeability; thermal management; forming quality

随着航空航天、生物医用及汽车制造等领域的快速发展，工程构件正日益趋向轻量化、高承载与多功能一体化。点阵结构因设计空间广阔、微结构可调性强且孔隙率可控，已成为实现轻质、高强韧及高吸能等特性的理想载体[1−4]。在众多点阵构型中，三周期极小曲面 (triply periodic minimal surface, TPMS) 结构凭借优异的力学性能、仿生形态和可设计性，展现出优于传统杆状点阵结构的发展潜力[5−6]。然而，TPMS 结构内部拓扑复杂、孔道精细，传统工艺难以实现其高精度与高效率制备。增材制造技术，特别是选区激光熔化与选区激光烧结，为 TPMS 复杂多孔结构的可控制造提供了有效途径[7−9]。因此，系统开展金属 TPMS 结构的设计理论、成形工艺与服役性能研究，对推动轻量化多功能金属构件在高端装备中的应用具有重要意义。

近年来，国内外围绕 TPMS 结构设计、增材制造工艺及性能评价开展了大量研究。设计方面，通过调控单胞类型、壁厚及尺寸等参数，均匀、梯度及混合构型可有效调控刚度、强度、渗透率及吸能性能[10]。制造方面，Ti−6Al−4V、316L 不锈钢、AlSi10Mg 铝合金、CoCrMo 合金及 Inconel 镍基高温合金等材料已被广泛采用，激光粉末床熔融是当前最普遍的成形方式之一[11]。性能方面，研究已涵盖压缩性能、弹性模量、屈服强度、能量吸收、疲劳性能、渗透性能、生物相容性及换热性能等多维度[12−13]。已有成果虽验证了金属 TPMS 结构在复杂构型设计、增材制造成形及多功能性能调控方面的可行性，但仍存在不足：一方面，几何参数、材料体系、成形工艺与性能表现之间耦合程度较强，尚缺乏系统性归纳；另一方面，力学承载、生物植入和热管理等不同应用场景的评价指标与设计侧重点差异显著，亟待按功能目标进行分类评述，以明确各场景

下的结构调控规律与工艺选择依据。为此, 以结构设计、制造工艺与性能调控三者协同为视角, 综述金属 TPMS 结构的研究进展, 以期建立从结构设计到工艺适配再到性能调控的系统性认识。

1　TPMS 结构特点与设计方法

TPMS 结构设计涉及 3 个依次递进的问题: 曲面的数学表达与实体化方式、空间排布形式, 以及壁厚、单胞尺寸、孔隙率等关键几何参数的选取与控制。其中, 曲面表达与实体化策略是结构生成的起点, 均匀、梯度及混合等空间排布形式决定性能的分布特征, 而壁厚、单胞尺寸、孔隙率等参数则将设计意图转化为可量化的建模变量。

1.1　TPMS 结构的基本特征

TPMS 结构是一种典型的多孔结构, 其几何形貌通常由三维隐式函数描述。相较于离散体素和传统参数化建模, 连续隐式表示更适用于描述具有光滑曲面和复杂孔道的此类结构[14]。通过调节函数形式、周期参数和等值面常数 C 等, 可实现不同单元形貌与孔隙特征的可控设计[15]。其基本表达形式为 $f(x,y,z)=C$。其中 x, y, z 为坐标变量。

常见构型包括 Gyroid, Diamond, Primitive, I–WP 和 Neovius 等 (图 1), 各构型对应的隐函数 (F_G, F_D, F_P, F_I, F_N) 分别如下:

$$F_G(x,y,z)=\sin X\cos Y+\sin Y\cos Z+\sin Z\cos X-C \quad (1)$$

$$F_D(x,y,z)=\cos X\cos Y\cos Z-\sin X\sin Y\sin Z-C \quad (2)$$

$$F_P(x,y,z)=\cos X+\cos Y+\cos Z-C \quad (3)$$

$$F_I(x,y,z)=2(\cos X\cos Y+\cos Y\cos Z+\cos Z\cos X)-(\cos 2X+\cos 2Y+\cos 2Z)-C \quad (4)$$

$$F_N(x,y,z)=3(\cos X+\cos Y+\cos Z)+4\cos X\cos Y\cos Z-C \quad (5)$$

其中:

$$X=\frac{2\pi n_x x}{L_x},\quad Y=\frac{2\pi n_y y}{L_y},\quad Z=\frac{2\pi n_z z}{L_z}$$

式中: L_x, L_y, L_z 分别为结构在 x, y, z 方向上的整体尺寸; n_x, n_y, n_z 分别为 3 个方向上的单胞数量。

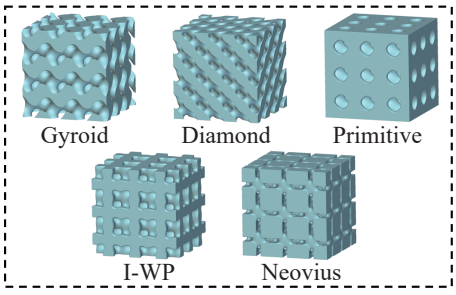


图1　常见 TPMS 结构

Fig. 1　Common TPMS structures

实体化策略主要分为 2 种 (图 2): 一是对 TPMS 曲面赋予壁厚, 形成连续片状结构 (sheet-based), 通过调节壁厚控制孔隙率; 二是填充曲面分隔的空间区域, 形成骨架结构 (skeletal-based), 主要通过改变等值面常数 C 实现。Al–Ketan 等[16]比较了杆状点阵、骨架型 TPMS 和片状型 TPMS 的拓扑与力学性能, 指出拓扑形式显著影响刚度、强度和变形行为。Fisher 等[17] 整理了多种 TPMS 及方程驱动点阵结构的几何形式和均匀化性能数据, 为构型选择和性能预测提供了重要参考。此外, Xu 等[18] 构建了类 TPMS-like 壳体点阵, Teng 等[19] 对不同增材制造点阵结构的拓扑和力学性能进行了比较, 均表明拓扑形式是影响结构性能的关键因素。

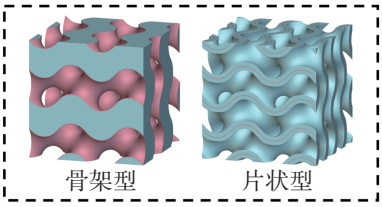


图2　2 种不同的实体化方式

Fig. 2　Two different solidification methods

1.2　TPMS 结构的主要设计方式

根据结构参数是否随空间变化及是否由单一拓扑构型组成, TPMS 结构可分为均匀、梯度、混合三类, 如图 3 所示。

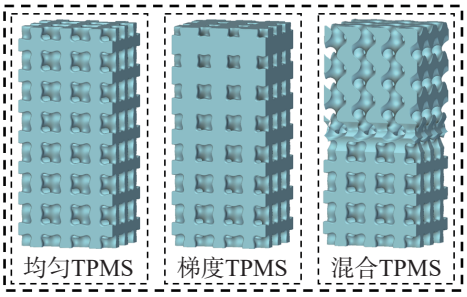


图3　TPMS 结构主要设计方式

Fig. 3　Main design method of TPMS structures

均匀 TPMS 结构在整个构件中采用相同的参数, 建模过程较为简单, 便于建立单胞拓扑与宏观性能之间的对应关系, 常被用于比较 Gyroid, Diamond, Primitive 等构型在压缩性能、能量吸收性能和渗透性能方面的差异。然而, 其性能在空间上基本一致, 难以满足复杂服役环境中不同区域对刚度、孔隙率或传质能力的差异化需求。

梯度 TPMS 结构通过引入空间变化参数实现性能调控, 是近年来的重要发展方向。Maskery 等[20] 提出了基于体积分数梯度和单胞类型梯度的设计与仿真方法, 表明改变体积分数或单胞类型能够实现

点阵结构性能的空间调控。Al–Ketan 等[21] 研究了相对密度梯度、单胞尺寸梯度和多形态拓扑梯度等形式，并分析了其对可制造性及力学性能的影响。

单一 TPMS 点阵在压缩过程中常面临变形不稳定、应力集中等问题，导致吸能效率与力学稳定性难以兼顾。混合 TPMS 结构通过组合 2 种或以上 TPMS 单胞，或将其与其他点阵或实体结构耦合，可发挥各组成单元的性能优势。Zhang 等[22] 以 Primitive, Gyroid 和 Diamond 3 种均匀 TPMS 点阵为基础，设计了多种混合片状结构，并通过实验和数值模拟揭示混合设计对平台应力阶段和变形响应的调控作用，为吸能防护类 TPMS 结构设计提供了参考。Zhao 等[23] 提出了基于 TPMS 的互穿点阵结构，展示了不同结构相互嵌套对设计空间的拓展效果。Chen 等[24] 将 Schwarz Primitive 结构与立方胞元结构组合，发现不同变形机制的耦合有助于提升能量耗散能力。Zhang 等[25] 进一步提出一维至三维的多维混合设计方法，并通过 AlSi10Mg 样件验证了混合设计在提高比吸能和调控变形行为方面的有效性。

1.3 TPMS 结构设计参数

TPMS 结构设计的核心在于通过几何参数调控性能，主要参数包括壁厚、单胞类型、单胞尺寸、孔隙率和孔径等，如图 4 所示 (其中 l 为单胞尺寸，t 为壁厚)。各参数并非孤立作用，而是共同决定相对密度、承载路径、孔道连通性及制造难度。

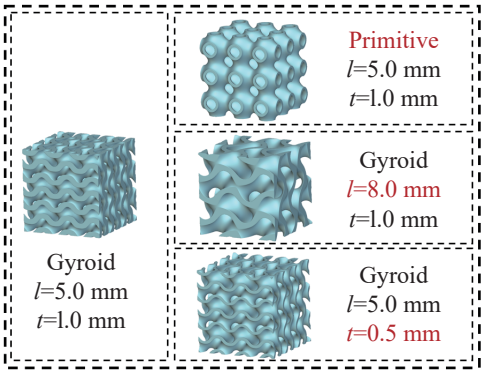


图4 TPMS 结构设计参数

Fig. 4 Design parameters of TPMS structures

壁厚是影响片状 TPMS 结构力学性能的关键参数。Ma 等[26] 采用基于应变能的优化算法，设计了变厚度 TPMS 壳点阵以降低弹性各向异性。Mishra 等[27] 研究了 AlSi10Mg 合金不同壁厚 Primitive 和 Diamond 结构的力学性能，结果表明单胞尺寸一定时，增加壁厚可提高压缩承载能力。

单胞类型与尺寸是决定孔道形貌与承载路径的基础几何参数。Poltue[28] 等对 Primitive, Gyroid, Diamond, Neovius, FRD 和 IWP 6 种 TPMS 结构的分析表明，不同构型相对密度相同，其孔尺寸、弹性模量和各向异性程度仍差异显著，其中 Primitive 与 Neovius 呈高度各向异性，而 Gyroid 与 IWP 更接近各向同性；单胞尺寸则通过改变相对密度连续调节弹性模量与渗透性。Zhou 等[29] 进一步结合相对密度和单胞尺寸，实现了支架内部孔径分布的可编程控制。然而，单胞尺寸的选取需兼顾制造约束，Acikgöz 等[30] 研究表明，单胞尺寸过大 (如 20 mm) 因自支撑效应减弱易导致局部变形或结构缺陷，而过小 (如 2 mm) 与高孔隙率组合时则使片材厚度低于打印分辨率，造成结构不完整或脆弱。

孔隙率和孔径主要影响结构的轻量化程度、传质能力及生物相容性，在组织工程应用中尤为关键。Vijayavenkataraman 等[31] 将孔隙率、弹性模量和孔径等作为主要设计约束，优化了仿生骨架结构。Wang 等[32] 设计了具有对称孔径梯度的 Ti−6Al−4V Primitive 曲面骨支架，以模拟骨组织中孔径与力学性能的空间分布。

近年来，机器学习辅助逆向设计为 TPMS 结构优化提供了新思路。Li 等[33] 结合双向生成对抗网络与力学性能目标，实现了 Primitive 和 I–WP 组合 TPMS 结构的自动生成，用于调控结构的缓冲和能量吸收性能。尹兴鹏等[34] 指出，数据驱动方法可建立结构参数与性能间的映射关系，快速筛选满足目标性能的结构方案，推动设计从“正向建模–性能测试”向“目标性能–结构反推”转变。

2 金属 TPMS 结构的增材制造工艺

增材制造是实现金属 TPMS 结构由设计模型向物理实体转化的关键环节。然而，其微孔道、薄壁及大比表面积等几何特征对增材成形构成特殊约束：材料选择需兼顾工艺热物理匹配与服役性能，不同工艺的可达特征尺度与成形质量各异，复杂曲面引发的尺寸偏差与缺陷机制也迥异于传统点阵结构。因此，从材料适配、工艺路线和共性缺陷三方面梳理现有研究，明确金属 TPMS 增材制造的技术现状与关键问题。

2.1 材料选择与工艺适应性

金属 TPMS 结构的材料选择通常与服役场景、成形工艺及目标性能密切相关。现有增材制造中常用的材料主要包括 Ti−6Al−4V、316L 不锈钢、Inconel 镍基合金和 AlSi10Mg 铝合金等，其中 Ti−6Al−4V 是研究最为充分的材料之一[35−37]。

从应用方向看, Ti−6Al−4V 及纯钛凭借比强度高、耐腐蚀性好、生物相容性优良, 常用于骨植入体和多孔支架, 通过 TPMS 多孔设计降低等效弹性模量; 316L 不锈钢因成形稳定性好、成本较低, 多用于金属 TPMS 结构的基础成形和力学性能研究; CoCrMo 合金强度和耐磨性突出, 适用于高承载医用或耐磨构件; Inconel 625 等镍基合金则适用于耐高温、耐腐蚀的复杂服役环境。不同材料在 TPMS 结构中的应用侧重点各异, 选择应以服役场景与功能需求为基础, 同时结合具体增材工艺加以考量。

2.2　主要增材制造方法

2.2.1　选区激光熔化

选区激光熔化是目前应用最广泛的 TPMS 结构制备工艺之一。其原理是: 在惰性气体保护下, 将金属粉末逐层铺展于成形平台, 利用高能激光束按切片轮廓对目标区域进行选择性熔化, 凝固后形成单层实体, 经逐层堆叠获得三维金属构件。

在钛合金 TPMS 医用支架方面, 研究集中于可制造性、力学性能及实际成形与设计结构间的偏差。Soro 等[38] 采用选区激光熔化制备了基于 Primitive 单胞的 Ti−6Al−4V 生物医用多孔支架 (图 5), 考察了可制造性、压缩力学行为及制造偏差对结构响应的影响, 验证了该工艺制造复杂钛合金 TPMS 多孔结构的可行性。Ataee 等[39] 制备了钛 Gyroid 多孔支架, 通过调控结构参数获得了兼具较高强度和较低弹性模量的植入体。Ma 等[40−41] 制备了 Gyroid 骨仿生支架, 研究了其力学行为与传质性能, 随后从可制造性、力学性能、传质性能及生物相容性等方面综合评价了选区激光熔化 TPMS 多孔支架的性能。

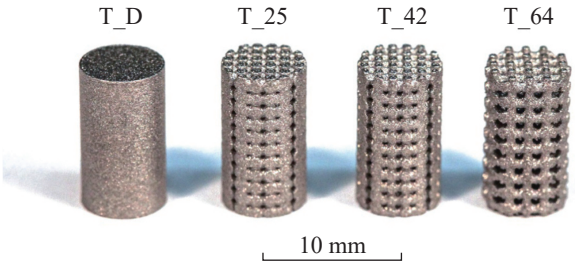


图5　基于选区激光熔化制备的 TPMS 结构

Fig. 5　TPMS structures fabricated by selective laser melting

选区激光熔化也用于不锈钢和铝合金等材料的 TPMS 结构制备。Fu 等[42] 采用微尺度激光粉末床熔融制备了 316L 不锈钢 TPMS 壳体点阵, 结果表明提高激光成形分辨率有利于制造低密度、小特征尺寸的金属 TPMS 结构。Sun 等[43] 制备了 AlSi10Mg 片状 TPMS 结构, 研究了其力学性能和能量吸收能力, 展示了铝合金 TPMS 结构在轻量化吸能构件中的应用前景。Fan 等[44] 设计并制备了梯度壁厚 TPMS 结构, 发现壁厚梯度设计可改善结构压缩变形和吸能能力。Yang 等[45] 研究了 Gyroid 型 TPMS 多孔结构的压缩–压缩疲劳行为, 指出选区激光熔化制备的金属 TPMS 结构除静态压缩性能外, 疲劳稳定性同样值得关注。

总体而言, 选区激光熔化适用于 Ti−6Al−4V、纯钛、316L 不锈钢及 AlSi10Mg 等多种金属材料, 可实现复杂 TPMS 结构的精确成形。但 TPMS 内部孔道复杂、壁厚较薄, 实际制造中仍易出现表面黏粉、未熔合、局部过熔、壁厚偏差和粉末残留等问题, 需综合考量激光功率、扫描速度、层厚、扫描策略、最小壁厚及粉末去除能力等工艺参数。

2.2.2　选区激光烧结

选区激光烧结同样属于基于粉末床的激光增材制造工艺, 其基本原理是利用激光束对粉末床目标区域局部加热, 使粉末颗粒发生烧结、熔结或局部熔化, 进而通过逐层铺粉与逐层烧结实现三维结构的形成。

Singh 等[46] 综述了金属粉末选区激光烧结工艺的研究进展, 指出该技术可根据三维模型逐层制备复杂金属零件, 在航空航天、汽车及生物医疗等领域具有广泛应用前景。研究表明, 成形件的质量与力学性能受材料类型、粉末特性及工艺参数多种因素的耦合影响, 而这种参数与性能之间的可控性, 为制造复杂多孔金属结构提供了工艺自由度。Maszybrocka 等[47] 采用该技术成功制备了 Ti−6Al−4V 多孔点阵结构, 如图 6 所示, 并通过扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 和 X 射线显微计算机断层扫描 (micro-computed tomography, micro-CT) 表征证实其结构完整、孔隙特征与设计模型高度吻合, 表明 SLS 技术在周期性多孔结构精确成形方面具有显著潜力。

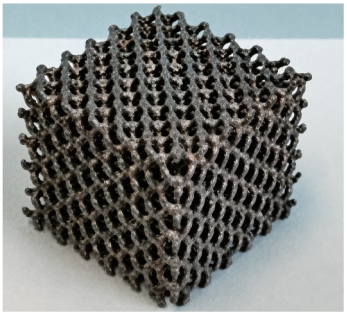


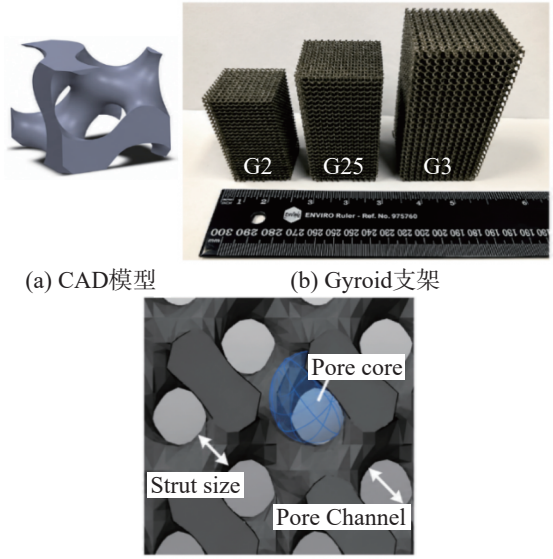
图6　基于选区激光烧结制备的 TPMS 结构

Fig. 6　TPMS structures fabricated by selective laser sintering

2.2.3 电子束粉末床熔融

电子束粉末床熔融 (electron beam powder bed fusion, EBPBF) 是以电子束为热源的金属增材制造工艺。其原理为: 真空环境中铺展金属粉末, 利用电子束对粉末床进行整体预热与选择性熔化; 凝固后形成单层实体, 逐层铺粉与熔化后获得三维金属构件。相较于激光束, 电子束能量密度更高, 且成形时粉床预热温度较高, 利于降低残余应力与变形。

在 EBPBF 成形 TPMS 结构的研究中, 构建方向、壁厚输入方式及单胞尺度是影响成形质量与力学性能的关键因素。Ataee 等[48] 采用电子束熔化制备了 Ti−6Al−4V Gyroid 多孔支架 (图 7), 研究了构建方向对结构各向异性及力学性能的影响, 结果表明该工艺能够制造高孔隙率 Gyroid 支架, 但构建方向与单胞尺寸会显著改变其力学响应。Khrapov 等[49] 进一步探讨了片状 TPMS 结构的制造策略, 指出设计模型、壁厚输入方式与实际成形精度之间存在密切关联。Polley 等[50] 则结合显微 CT、准静态压缩和疲劳测试, 分析不同单胞尺寸对 Gyroid 支架孔隙率、孔径分布、压缩强度及疲劳性能的影响, 为 EBPBF 成形多孔结构的性能调控提供了实验依据。



(a) CAD模型 (b) Gyroid支架

(c) 支架几何参数

图7 基于电子束粉末床熔融制备的 TPMS 结构

Fig. 7 TPMS structures fabricated by electron beam powder bed fusion

EBPBF 工艺在钛合金 TPMS 医用支架及高孔隙率多孔结构的制备中具有显著优势, 尤其适用于对残余应力较敏感的金属多孔构件。然而, 该工艺仍面临表面粗糙度偏高、尺寸精度受限及细小孔道内粉末残留等挑战。因此, 在采用 EBPBF 制备 TPMS 结构时, 需对单胞尺寸、壁厚、构建方向、粉末去除策略及后处理工艺进行系统优化。

2.3 成形质量与共性缺陷问题

由于 TPMS 结构内部孔道复杂、壁面连续且局部曲率变化明显, 实际打印构件容易出现壁厚偏差、表面黏粉、未熔合、局部过熔、粉末残留及表面粗糙度偏高等问题。这些缺陷导致实际结构与设计模型存在偏差, 并影响其成形质量与服役性能。

上述缺陷的产生机制各异。壁厚偏差方面, Ding 等[51] 利用实验、数值模拟和理论分析研究了 LPBF 制造薄壁结构的厚度偏差, 揭示了压缩增厚、刮擦致减薄及熔池深度引起阶梯效应 3 种主要机制。表面黏粉主要出现在 TPMS 下倾曲面区域, 因该区域直接接触松散粉末, 局部熔池易使邻近粉末部分熔化并黏附于成形表面, 造成表面粗糙化和局部尺寸增大。Ibhadode 等[52] 对 LPBF 制备的 AlSi10Mg Gyroid 结构的分析验证了这一现象, 下倾表面存在明显的部分熔化粉末颗粒黏附, 导致该区域表面粗糙度远高于上表面和侧面。未熔合缺陷则主要源于局部能量输入不足及工艺参数与薄壁尺度的不匹配。Kelly 等[53] 研究 Gyroid 发现, 壁厚变化会改变适宜的激光能量输入范围, 当能量输入不足以形成稳定且连续的熔池时, 内部缺陷由气孔逐渐转变为未熔合, 因此不同壁厚需匹配相应的成形参数。粉末残留与 TPMS 内部孔道狭窄、曲折及表面粗糙密切相关。Khrapov 等[54] 指出, 高相对密度 TPMS 结构中的窄孔道和粗糙内壁阻碍粉末排出, 而超声振动可显著提高复杂孔道内的粉末去除效率。

缺陷表征方面, 扫描电子显微镜可观察表面黏粉、熔融形貌及粗糙表面, X 射线显微计算机断层扫描则能对壁厚、内部孔道及缺陷空间分布进行三维无损表征。Günther 等[55] 利用计算机断层扫描 (CT) 获得了 LPBF 制备 TPMS 结构的实际成形形貌, 实现了对多余材料、表面不规则性及几何偏差的三维重构。总体而言, 金属 TPMS 结构的成形质量由局部几何特征与增材制造过程共同决定, 需结合表面形貌与内部三维结构开展多尺度质量评价。

3 金属 TPMS 结构的性能

金属 TPMS 结构的性能评价涉及力学承载、生物适配与热管理等多个维度, 各维度关注的核心指标与失效机制差异显著。力学性能是结构服役的基础, 需关注构型影响、参数调控及疲劳失效; 渗透与生物性能面向骨植入等医用场景, 重点解决力学支撑与物质输运的匹配问题; 热管理性能则聚焦换热

强化与流动阻力的协同优化。基于上述性能差异，本文从三方面分别进行综述。

3.1　力学性能

力学性能是金属 TPMS 结构评价的核心内容，涵盖弹性模量、屈服强度、压缩强度、平台应力、致密化应变、能量吸收能力、拉伸断裂行为及疲劳寿命等指标。与传统实体材料不同，TPMS 结构在受载过程中呈现出显著的结构响应特征，其应力–应变曲线通常分为弹性阶段、平台阶段和致密化阶段，对其力学性能的评价需结合变形过程、吸能效率与失效模式进行综合分析。

TPMS 结构的力学性能受构型与几何参数共同调控。在构型影响方面，Zhang 等[56] 研究了选区激光熔化制备的 316L 不锈钢 Primitive, Diamond 和 Gyroid 片状结构的压缩性能与吸能潜力，发现 Diamond 和 Gyroid 结构应力分布更均匀、变形过程更稳定，而 Primitive 结构较早出现对角剪切带及局部壁面屈曲。Qiu 等[57] 对 8 种 TPMS 结构的实验与数值分析表明，优势构型随相对密度变化：低于 30% 时 F–RD 结构吸能占优，高于 30% 时 Diamond 结构表现更好。Ravichander 等[58] 通过准静态压缩测试分析了梯度 TPMS 结构的变形行为，指出不同构型在吸能效率和变形模式方面存在明显差异。Laskowska 等[59] 聚焦 Diamond 型 TPMS 圆柱结构，验证了其在压缩载荷下变形过程的稳定性，适用于轻量化吸能设计。Khanna 等[60] 则发现 AlSi10Mg TPMS 结构的变形机制同时受单胞拓扑和相对密度影响，且构型优势随评价应变范围而变化。

几何参数同样对力学性能产生显著影响。Park 等[61] 考察了 CoCrMo 合金 Neovius 和 Schoen's I–WP 片状点阵结构在不同单胞尺寸下的拉伸行为，发现单胞尺寸减小时，屈服强度和杨氏模量降低、延伸率增加；相同单胞尺寸下 Neovius 结构具有更高的屈服强度、抗拉强度和延伸率。Rezapourian 等[62] 针对 Ti−6Al−4V Split–P 型结构的研究表明，相对密度和单胞形貌影响其成形质量、压缩响应与能量吸收能力，部分结构的力学性能可接近松质骨或皮质骨范围。综合来看，TPMS 结构的力学性能对构型和几何参数敏感，最优设计因应用场景而异。

疲劳性能是评价金属 TPMS 结构长期服役可靠性的关键指标。Gandhi 等[63] 研究了激光粉末床熔融 Ti−6Al−4V 的 Gyroid, Primitive 和 Diamond 结构在多轴低周疲劳下的响应，断口分析显示疲劳裂纹多从匙孔孔隙、未熔粉末颗粒等制造缺陷处萌生，并在循环载荷作用下扩展；不同结构的裂纹扩展路径与断裂模式存在差异，Gyroid 以渐进扩展为主，Diamond 则更易突然断裂。Dyer 等[64] 采用多种方法关联了多孔与实体试样的疲劳数据，提出了基于名义循环载荷和应力强度因子的寿命预测模型。

总体而言，TPMS 结构的疲劳失效具有局部损伤特征，其可靠性评价需结合实际缺陷、局部应力状态及循环加载条件，从裂纹萌生、扩展至断裂全过程进行系统分析。

3.2　渗透性能与生物性能

金属 TPMS 结构凭借连续互连的孔道网络和较高比表面积，在骨植入体、组织工程支架及传质结构中展现出重要应用价值。对于生物医用多孔支架而言，理想设计需同时满足力学支撑、弹性模量匹配、营养物质输运、细胞黏附和骨组织长入等多重功能要求。

在构型设计层面，Qin 等[65] 以 Ti−6Al−4V 为材料制备了不同轴径比的 Primitive 型 TPMS 仿生支架，并通过数值模拟与实验评价了其静态压缩性能、渗透性能及细胞黏附效果。结果表明，非 1∶1 轴径比结构在力学匹配和流体传输方面均优于均匀支架，其中 P1–3 支架的渗透率达 1.28×10^{-8}~1.60×10^{-8} m^2，接近人体松质骨渗透率范围，且内壁细胞黏附效果良好。Ye 等[66] 研究了选区激光熔化制备的融合型 TPMS 多孔支架，指出结构方向与孔道形貌共同影响流体通过能力及力学响应。

结构参数是调控支架综合性能的关键。孔隙率、孔径、壁厚及孔道连通性直接影响渗透与生物性能：较高的孔隙率有利于营养物质传输和组织长入，但会削弱承载能力；较低的孔隙率可提升强度和刚度，却可能限制流体输运与骨整合。因此，生物医用 TPMS 结构须在力学性能与传质性能间寻求合理平衡。门玉涛等[67] 构建了 I–WP 型 TPMS 骨小梁多孔支架，采用有限元方法分析了壁厚和周期参数对孔隙率、等效弹性模量、应力分布及流体性能的影响。结果显示，不同参数组合下支架孔隙率为 68.01%~96.48%，等效弹性模量为 0.655~18.602 GPa；经拓扑优化后，等效弹性模量基本不变，而渗透性提高 52.3%。张艺海等[68] 基于隐式曲面法建立了 Gyroid, I–WP, Primitive 和 Diamond 4 种径向梯度 TPMS 骨小梁支架，通过激光选区熔化制备不同孔隙率样件并开展形貌观察与准静态压缩实验。结果表明，G 型径向梯度支架在压缩过程中平台应力波动较小、塑性变形能力较好，其中 55% 孔隙率 G 型支架的弹

性模量处于人体松质骨范围内，屈服强度接近人体皮质骨最大屈服强度。

3.3 热管理性能

除力学承载与生物医用方向外，金属 TPMS 结构在换热器、冷板、散热器及流体通道等热管理领域亦备受关注。现有研究主要通过数值模拟与实验测试两类方法展开。

数值模拟侧重于揭示几何参数、构型及流动状态与热–水力性能的内在关系。Attarzadeh 等[69] 建立了 TPMS 换热器的计算设计与分析流程，对热效率、传热系数和压力降进行预测，并结合多目标遗传算法开展结构优化。Min 等[70] 对原始及混合 TPMS 换热器进行数值模拟，发现 Gyroid–Diamond 结构具有较高的换热效率和对流换热系数，但伴随较大的压力损失。Renon 等[71] 进一步建立了 Gyroid 和 Diamond 流道的 Nusselt 数与摩擦因子关联式，结果表明 2 种结构在传热性能相近时，Diamond 结构的压力损失相对较低。

实验研究主要用于验证增材制造 TPMS 结构在实际工况下的热–水力性能，并评估制造质量对测试结果的影响。Gao 等[72] 制备了纯铜 TPMS 换热器，考察了单胞尺寸及其梯度对传热与流阻的影响，结果表明减小单胞尺寸可提高总传热系数，但同时亦增加压力降；较小单胞具有较高的体积功率密度，而较大单胞因压力损失较低表现出更优的综合性能评价指标。Yan 等[73] 对增材制造 Gyroid 换热器进行了磨粒射流抛光处理，结果显示内表面粗糙度降低后压差下降约 40%，换热能力基本保持不变，表明实际表面状态对流动性能具有显著影响。Liu 等[74] 通过 LPBF 制备了 AlSi7Mg TPMS 散热结构，发现强制对流条件下 Primitive 结构综合换热性能较优，自然对流条件下 Gyroid 结构表现更佳，梯度 Primitive 设计可进一步改善换热性能。

综上所述，数值模拟与实验研究均表明，金属 TPMS 热管理结构的性能评价需兼顾换热强化与压力损失，并充分考虑几何参数及制造质量的影响。

4 结论与展望

4.1 结论

本文围绕金属增材制造 TPMS 结构的研究进展，从结构设计、增材制造工艺和性能研究三个方面进行系统综述。

1) 在结构设计方面，TPMS 可通过隐式函数实现参数化建模，并采用片状型或骨架型等实体化策略。均匀、梯度和混合结构是当前常见的设计形式，壁厚、单胞类型及单胞尺寸等几何参数则构成了性能调控的主要手段。总体来看，现有研究已形成由基本构型、设计方式到参数设置的较为完整体系，为后续功能导向型设计奠定了方法基础。

2) 在增材制造方面，Ti−6Al−4V、316L 不锈钢、AlSi10Mg 等金属材料已广泛应用于 TPMS 结构的制备，材料选择需兼顾服役需求与工艺适应性。选区激光熔化、选区激光烧结及电子束粉末床熔融等工艺均已被成功采用，但实际成形中仍普遍存在壁厚偏差、表面黏粉、未熔合、局部过熔及粉末残留等缺陷，制约了结构性能的进一步提升。

3) 在性能研究方面，力学性能关注静态压缩与拉伸行为、能量吸收及疲劳失效，不同构型与几何参数对应各异的承载、变形和失效特征；生物医用领域聚焦力学支撑、渗透性能与生物相容性之间的协调匹配；热管理研究则主要围绕构型与几何设计对流动及传热行为的影响展开。尽管各方向已积累丰富数据，但目前性能研究多针对单一目标，力–热–流等多性能协同优化及结构–工艺–性能一体化研究仍有不足。

4.2 展望

1) 现有研究已能够通过壁厚、单胞类型、单胞尺寸、孔隙率和孔径等参数实现 TPMS 结构的精确建模，但增材制造后的实际壁厚、局部曲面形貌及孔道尺寸仍会偏离设计值，且这种偏差与局部悬垂特征及结构尺度密切相关。后续研究可关注不同悬垂角及特征尺度下几何偏差的变化规律，明确补偿策略在不同材料与工艺组合中的适用范围。

2) 不同 TPMS 构型并不存在脱离应用场景的统一优势，其性能表现受材料、几何参数及服役条件等因素共同影响。后续研究可针对骨植入、轻量化承载、吸能防护及热管理等具体应用，明确相应的评价指标、约束条件及服役工况，并将实际成形偏差及制造质量纳入评价体系，形成更为明确的构型选择依据。

3) 随着 TPMS 结构设计参数、材料体系及性能指标的不断增加，设计空间持续扩大，不同性能目标之间也存在明显耦合，依靠传统参数分析与逐一实验难以高效获得满足多重约束的结构方案。近年来，机器学习已能够实现 TPMS 结构的多性能预测、逆向设计及实验验证，后续可进一步关注模型在不同构型、材料及工艺条件下的适用性，为复杂约束条件下的 TPMS 结构筛选及优化提供更可靠依据。

参考文献:

[1] CHEN L Y, LIANG S X, LIU Y, et al. Additive manufacturing of metallic lattice structures: unconstrained design, accurate fabrication, fascinated performances, and challenges[J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2021, 146:100648.

[2] 段晟昱, 王潘丁, 刘畅, 等. 增材制造三维点阵结构设计、优化与性能表征方法研究进展 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(14):36−48,57.
DUAN S Y, WANG P D, LIU C, et al. Research progress on design, optimization and performance characterization methods of additively manufactured three-dimensional lattice structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(14):36−48,57.

[3] LI Y, JIANG D, ZHAO R, et al. High mechanical performance of lattice structures fabricated by additive manufacturing[J]. Metals, 2024, 14(10):1165.

[4] MIAO X, HU J, XU Y, et al. Review on mechanical properties of metal lattice structures[J]. Composite Structures, 2024, 342:118267.

[5] 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[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2022, 4(2):022001.

[6] HOSSAIN M S, HOSSAIN M M, NILUFAR S. An overview of additive manufacturing of triply periodic minimal surface structures[J]. Polymers, 2025, 17(24):3307.

[7] LI J, WANG L, HE X, et al. Additively manufactured metallic TPMS lattice structures: design strategies, fabrication, multifunctional properties, and applications[J]. npj Advanced Manufacturing, 2025, 2:45.

[8] 张云龙, 刘德宝, 任晓雪, 等. 基于 TPMS 结构设计的钛合金增材制造技术的研究进展 [J]. 聊城大学学报 (自然科学版), 2025, 38(6):918−926.
ZHANG Y L, LIU D B, REN X X, et al. Research progress on titanium alloy additive manufacturing technology based on TPMS structural design[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2025, 38(6):918−926.

[9] 黄心语, 汤华远, 王磊, 等. 基于增材制造的三周期极小曲面结构关键力学性能研究进展 [J]. 力学学报, 2024, 56(11):3099−3115.
HUANG X Y, TANG H Y, WANG L, et al. Research progress on key mechanical properties of triply periodic minimal surface structures based on additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2024, 56(11):3099−3115.

[10] AHMAD S Z, MASOOD M H, KHATTAB M U, et al. Recent developments in novel TPMS lattice materials: design optimization, performance control, and applications in biomimetic scaffolds[J]. Materials, 2025, 18(22):5209.

[11] RIVA L, GINESTRA P S, CERETTI E. Mechanical characterization and properties of laser-based powder bed-fused lattice structures: a review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113:649−671.

[12] KAUR I, SINGH P. Critical evaluation of additively manufactured metal lattices for viability in advanced heat exchangers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 168:120858.

[13] AMARA K, SAGHIR M Z, ABDELJABAR R. Review of triply periodic minimal surface (TPMS) structures for cooling heat sinks[J]. Energies, 2025, 18(18):4920.

[14] 李明, 张乘虎, 扈婧乔, 等. 多孔模型设计方法 [J]. 图学学报, 2022, 43(6):1037−1047.
LI M, ZHANG C H, HU J Q, et al. Design methods of porous models[J]. Journal of Graphics, 2022, 43(6):1037−1047.

[15] 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(3):329−340.
YAN X, TIAN L H, PENG H, LYU L. Review on design and application of triply periodic minimal surface structures[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2023, 35(3):329−340.

[16] 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.

[17] FISHER J W, MILLER S W, BARTOLAI J, et al. Catalog of triply periodic minimal surfaces, equation-based lattice structures, and their homogenized property data[J]. Data in Brief, 2023, 49:109311.

[18] XU Y, PAN H, WANG R, et al. New families of triply periodic minimal surface-like shell lattices[J]. Additive Manufacturing, 2023, 77:103779.

[19] TENG F, SUN Y, GUO S, et al. Topological and mechanical properties of different lattice structures based on additive manufacturing[J]. Micromachines, 2022, 13(7): 1017.

[20] MASKERY I, AREMU A O, PARRY L, et al. Effective design and simulation of surface-based lattice structures featuring volume fraction and cell type grading[J]. Materials & Design, 2018, 155:220−232.

[21] AL−KETAN O, LEE D W, ROWSHAN R, et al. Functionally graded and multi-morphology sheet TPMS lattices: design, manufacturing, and mechanical properties[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2020, 102:103520.

[22] 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.

[23] ZHAO M, LI X, ZHANG D Z, et al. TPMS-based interpenetrating lattice structures: design, mechanical properties and multiscale optimization[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 244:108092.

[24] CHEN Z, WU B, CHEN X, et al. Energy absorption and impact resistance of hybrid triply periodic minimal surface(TPMS) sheet-based structures[J]. Materials Today Communications, 2023, 37:107352.

[25] ZHANG X, YAN S, XIE X, et al. Multi-dimensional hybridized TPMS with high energy absorption capacity[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 273:109244.

[26] MA Q, ZHANG L, DING J, et al. Elastically-isotropic open-cell minimal surface shell lattices with superior stiffness via variable thickness design[J]. Additive Manufacturing, 2021, 47:102293.
[27] MISHRA A K, CHAVAN H, KUMAR A. Effect of cell size and wall thickness on the compression performance of triply periodic minimal surface based AlSi10Mg lattice structures[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 193:111214.
[28] POLTUE T, KARUNA C, KHRUEADUANGKHAM S, et al. Design exploration of 3D-printed triply periodic minimal surface scaffolds for bone implants[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 211:106762.
[29] ZHOU X, JIN Y, DU J. Functionally graded scaffolds with programmable pore size distribution based on triply periodic minimal surface fabricated by selective laser melting[J]. Materials, 2020, 13(21):5046.
[30] ACIKGÖZ S, WIGGER C, MERBACH T, et al. Design guidelines for laser powder bed fusion of triply periodic minimal surface structures for applications in smart reactors[J]. Progress in Additive Manufacturing, 2026, 11:2215−2237.
[31] VIJAYAVENKATARAMAN S, ZHANG L, ZHANG S, et al. Triply periodic minimal surface sheet scaffolds for tissue engineering applications: an optimization approach toward biomimetic scaffold design[J]. ACS Applied Bio Materials, 2018, 1(2):259−269.
[32] WANG S, SHI Z A, LIU L L, et al. The design of Ti6Al4V primitive surface structure with symmetrical gradient of pore size in biomimetic bone scaffold[J]. Materials & Design, 2020, 193:108830.
[33] LI Z, LI J, TIAN J, et al. Inverse design of cellular structures with the geometry of triply periodic minimal surfaces using generative artificial intelligence algorithms[J]. Engineering Structures, 2024, 321:118988.
[34] 尹兴鹏, 李俊豪, 唐新桢, 等. 机器学习辅助的三周期极小曲面结构逆设计研究进展 [J]. 钢铁钒钛, 2025, 46(5): 133−144.
YIN X P, LI J H, TANG X Z, et al. Research progress on machine learning-assisted inverse design of triply periodic minimal surface structures[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2025, 46(5):133−144.
[35] KAN W H, CHIU L N S, LIM C V S, et al. A critical review on the effects of process-induced porosity on the mechanical properties of alloys fabricated by laser powder bed fusion[J]. Journal of Materials Science, 2022, 57:9818−9865.
[36] LV Y, WANG B, LIU G, et al. Metal material, properties and design methods of porous biomedical scaffolds for additive manufacturing: a review[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2021, 9:641130.
[37] XU K, CAO J, ZHENG Z, et al. Deformation behavior of Inconel 625 alloy with TPMS structure[J]. Materials, 2025, 18(2):396.
[38] SORO N, ATTAR H, WU X, et al. Investigation of the structure and mechanical properties of additively manufactured Ti−6Al−4V biomedical scaffolds designed with a Schwartz primitive unit-cell[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 745:195−202.
[39] ATAEE A, LI Y, BRANDT M, et al. Ultrahigh-strength titanium gyroid scaffolds manufactured by selective laser melting(SLM) for bone implant applications[J]. Acta Materialia, 2018, 158:354−368.
[40] MA S, TANG Q, FENG Q, et al. Mechanical behaviours and mass transport properties of bone-mimicking scaffolds consisted of gyroid structures manufactured using selective laser melting[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2019, 93:158−169.
[41] MA S, TANG Q, HAN X, et al. Manufacturability, mechanical properties, mass-transport properties and biocompatibility of triply periodic minimal surface(TPMS) porous scaffolds fabricated by selective laser melting[J]. Materials & Design, 2020, 195:109034.
[42] FU J, DING J, QU S, et al. Improved light-weighting potential of SS316L triply periodic minimal surface shell lattices by micro laser powder bed fusion[J]. Materials & Design, 2022, 222:111018.
[43] SUN Q, SUN J, GUO K, et al. Investigation on mechanical properties and energy absorption capabilities of AlSi10Mg triply periodic minimal surface sheet structures fabricated via selective laser melting[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31:9110−9121.
[44] FAN X, LI X, ZHANG L, et al. Design, mechanical properties and energy absorption capability of graded-thickness triply periodic minimal surface structures fabricated by selective laser melting[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 204:106586.
[45] YANG L, YAN C, CAO W, et al. Compression-compression fatigue behaviour of gyroid-type triply periodic minimal surface porous structures fabricated by selective laser melting[J]. Acta Materialia, 2019, 181:49−66.
[46] SINGH S, SHARMA V S, SACHDEVA A. Progress in selective laser sintering using metallic powders: a review[J]. Materials Science and Technology, 2016, 32(8):760−772.
[47] MASZYBROCKA J, STWORA A, GAPIŃSKI B, et al. Morphology and surface topography of Ti6Al4V lattice structure fabricated by selective laser sintering[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, 2017, 65(1):85−92.
[48] ATAEE A, LI Y, FRASER D, et al. Anisotropic Ti−6Al−4V gyroid scaffolds manufactured by electron beam melting (EBM) for bone implant applications[J]. Materials & Design, 2018, 137:345−354.
[49] KHRAPOV D, KOZADAYEVA M, MANABAEV K, et al. Different approaches for manufacturing Ti−6Al−4V alloy with triply periodic minimal surface sheet-based structures by electron beam melting[J]. Materials, 2021, 14(17):4912.
[50] POLLEY C, RADLOF W, HAUSCHULZ F, et al. Morphological and mechanical characterisation of three-dimensional gyroid structures fabricated by electron beam melting for the use as a porous biomaterial[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2022, 125:104882.
[51] DING J, QU S, ZHANG L, et al. Geometric deviation and compensation for thin-walled shell lattice structures fabricated by high precision laser powder bed fusion[J].

Additive Manufacturing, 2022, 58:103061.
[52] IBHADODE O, RISHMAWI I Z, KIRBY M, et al. Topological fidelity of additively manufactured AlSi10Mg gyroid structures[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 108:671−684.
[53] KELLY C N, KAHRA C, MAIER H J, et al. Processing, structure, and properties of additively manufactured titanium scaffolds with gyroid-sheet architecture[J]. Additive Manufacturing, 2021, 41:101916.
[54] KHRAPOV D, PAVELEVA A, KOZADAYEVA M, et al. Trapped powder removal from sheet-based porous structures based on triply periodic minimal surfaces fabricated by electron beam powder bed fusion[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 862:144479.
[55] GÜNTHER F, PILZ S, HIRSCH F, et al. Experimental and numerical characterization of imperfect additively manufactured lattices based on triply periodic minimal surfaces[J]. Materials & Design, 2023, 233:112197.
[56] 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.
[57] QIU N, WAN Y, SHEN Y, et al. Experimental and numerical studies on mechanical properties of TPMS structures[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 261:108657.
[58] RAVICHANDER B B, JAGDALE S H, KUMAR G. Surface morphology, compressive behavior, and energy absorption of graded triply periodic minimal surface 316L steel cellular structures fabricated by laser powder bed fusion[J]. Materials, 2022, 15(23):8294.
[59] LASKOWSKA D, SZATKIEWICZ T, BAŁASZ B, et al. Mechanical properties and energy absorption abilities of diamond TPMS cylindrical structures fabricated by selective laser melting with 316L stainless steel[J]. Materials, 2023, 16(8):3196.
[60] KHANNA P, SOOD S, MISHRA P, et al. Analysis of compression and energy absorption behaviour of SLM printed AlSi10Mg triply periodic minimal surface lattice structures[J]. Structures, 2024, 64:106580.
[61] PARK S Y, KIM K S, ALMANGOUR B, et al. Effect of unit cell topology on the tensile loading responses of additive manufactured CoCrMo triply periodic minimal surface sheet lattices[J]. Materials & Design, 2021, 206:109778.
[62] REZAPOURIAN M, JASIUK I, SAARNA M, et al. Selective laser melted Ti6Al4V split-P TPMS lattices for bone tissue engineering[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 251:108353.
[63] GANDHI R, SALMI M, ROY B, et al. Multiaxial fatigue behavior of triply periodic minimal surface lattice structures in Ti6Al4V fabricated by laser powder bed fusion under combined axial-torsional loading[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 38:3655−3671.
[64] DYER K, AMJADI M, SHAO S, et al. Understanding fatigue of additively manufactured TPMS metallic metamaterials: experiments and modeling[J]. Additive Manufacturing, 2025, 111:104966.
[65] QIN Y, WANG Q, SHI C, et al. Structural design and performance study of primitive triply periodic minimal surfaces Ti6Al4V biomimetic scaffold[J]. Scientific Reports, 2022, 12:12759.
[66] YE J, HE W, WEI T, et al. Mechanical properties directionality and permeability of fused triply periodic minimal surface porous scaffolds fabricated by selective laser melting[J]. ACS Biomaterials Science & Engineering, 2023, 9(8):5084−5096.
[67] 门玉涛, 汤绍灿, 陈炜, 等. 基于三周期极小曲面法骨小梁支架的设计与性能研究 [J]. 生物医学工程学杂志, 2024, 41(3):584−594.
MEN Y T, TANG S C, CHEN W, et al. Design and performance study of bone trabecular scaffolds based on triply periodic minimal surface method[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2024, 41(3):584−594.
[68] 张艺海, 商鹏, 马奔原, 等. 径向梯度三周期极小曲面骨小梁支架结构设计与力学性能分析 [J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(5):741−746.
ZHANG Y H, SHANG P, MA B Y, et al. Structural design and mechanical property analysis of radial gradient triply periodic minimal surface trabecular bone scaffolds[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2024, 28(5):741−746.
[69] ATTARZADEH R, ATTARZADEH−NIAKI S H, DUWIG C. Multi-objective optimization of TPMS-based heat exchangers for low-temperature waste heat recovery[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 212:118448.
[70] MIN R, WANG Z, YANG H, et al. Heat transfer characterization of waste heat recovery heat exchanger based on flexible hybrid triply periodic minimal surfaces (TPMS)[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 157:107760.
[71] RENON C, JEANNINGROS X. A numerical investigation of heat transfer and pressure drop correlations in Gyroid and Diamond TPMS-based heat exchanger channels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 239:126599.
[72] GAO S, QU S, DING J, et al. Influence of cell size and its gradient on thermo-hydraulic characteristics of triply periodic minimal surface heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 232:121098.
[73] YAN K, DENG H, XIAO Y, et al. Influence of polishing process on surface morphology and thermo-hydraulic performance of additively manufactured Gyroid-structured heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 253:123828.
[74] LIU C, ZHANG M, BI G, et al. Research on comprehensive heat dissipation characteristics of AlSi7Mg TPMS heat sinks manufactured by laser powder bed fusion[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 261:124941.

责任编辑: 何莉