

引用: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.

Citation:ZHANG Yunlong, LIU Debao, REN Xiaoxue, WANG Weie, LI Chenghai, ZHAI Ziyu, WANG Junqing, WANG Zhaobin, YANG Hui. Research progress of titanium alloy additive manufacturing technology based on TPMS structure design [J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2025,38(6):918-926.

文章编号 1672-6634(2025)06-0918-09

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2025050012

基于 TPMS 结构设计的钛合金增材 制造技术的研究进展

张云龙¹,刘德宝¹,任晓雪²,王伟娥³,李成海¹,翟梓棫¹,王俊青¹,王兆彬¹,杨慧¹

(1. 佳木斯大学 材料科学与工程学院,黑龙江 佳木斯 154007;2. 黑龙江农业工程学院 机械工程学院,
黑龙江 哈尔滨,150036;3. 佳木斯大学 药学院,黑龙江 佳木斯,154007)

摘要 近年来,增材制造(AM)技术作为一种数字化制造技术,具有加工精度高、制造周期短等特点,在装备制造等领域备受关注。钛合金因其高强度、低密度和良好的耐腐蚀性,逐渐成为 AM 技术应用的重要材料之一。三周期最小曲面(TPMS)结构因其独特的几何特性,能兼顾材料轻量化设计和提升力学性能的特点。将 TPMS 结构设计应用于钛合金 AM,有望进一步提升构件的综合性能。本文旨在探讨基于 TPMS 结构设计的钛合金 AM 技术的最新研究进展,重点阐述了 TPMS 结构独特的几何特征,介绍以激光选区熔化等为主的制造工艺及参数优化方法。从力学、物理和耐腐蚀以及热管理等方面分析其性能特点,并简述了航空航天、生物医用、汽车制造等领域的应用成果,这为高性能钛合金体系材料的深入研究和应用范围拓展提供参考。

关键词 三周期最小曲面结构;增材制造;钛合金;性能特点;工程应用

中图分类号 TG146.2

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Research progress of titanium alloy additive manufacturing technology based on TPMS structure design

ZHANG Yunlong¹, LIU Debao¹, REN Xiaoxue², WANG Weie³, LI Chenghai¹,
ZHAI Ziyu¹, WANG Junqing¹, WANG Zhaobin¹, YANG Hui¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China; 2. College of Mechanical
Engineering, Heilongjiang University of Agricultural Engineering, Harbin 150036, China;
3. College of Pharmacy, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China)

收稿日期:2025-05-27

基金项目:国家自然科学基金项目(52101222);黑龙江省教育厅科研项目(2022-KYYWF-0581, 2023-KYYWF-0558, 2021-KYYWF-0589);黑龙江省口腔生物医学材料及临床应用重点实验室开放课题项目(KQSW202303)资助

通信作者:张云龙,男,汉族,博士,教授,研究方向:先进复合材料的智能制造,E-mail: jmsdxzhang@126.com;王伟娥,女,汉族,博士,副教授,研究方向:基于光谱学用途的新型检测材料的制造与研发,E-mail: wwwekuale_1980@163.com;李成海,男,汉族,博士,副教授,研究方向:新型生物医用材料的设计与制造,E-mail: Lichenghai213@163.com.

Abstract In recent years, as a digital manufacturing technology, additive manufacturing (AM) technology has attracted much attention in equipment manufacturing fields due to its characteristics of high processing accuracy and short manufacturing cycle. Titanium alloys have gradually become one of the important materials for the application of AM technology due to their high strength, low density and good corrosion resistance. Due to its unique geometric characteristics, three-period minimum surface (TPMS) structure can take into account both the lightweight design of materials and the improvement of mechanical properties. The AM of titanium alloys is expected to further enhance the comprehensive performance of components based on the TPMS structural design. This review aims to explore the latest research progress of titanium alloy AM technology based on TPMS structural design. The unique geometric characteristics of TPMS structure are elaborated emphatically and the manufacturing processes and parameter optimization methods mainly are introduced based on laser selective melting. The performance characteristics were analyzed from the aspects of mechanics, physics, corrosion resistance, thermal management and so on. The application achievements in fields such as aerospace, biomedicine and automotive manufacturing were briefly described, which would provide a reference for the in-depth research and application scope expansion of high-performance titanium alloy materials.

Keywords three-period minimum surface structure; additive manufacturing; titanium alloy; performance characteristics; engineering application

0 引言

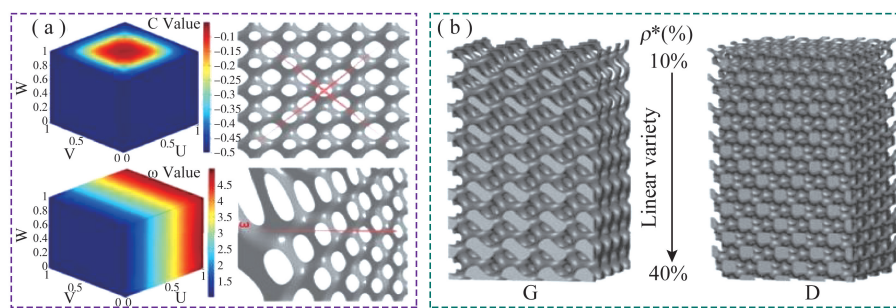
三周期最小曲面(TPMS)结构的钛合金兼具钛合金高强度、轻量化、耐腐蚀及生物相容性等特性,以及 TPMS 的零平均曲率、高比表面积、参数可调梯度的结构优势^[1]。凭借选区激光熔化(SLM)、选区激光烧结(SLS)等增材制造技术能够实现复杂多孔结构的精确制造。在生物医学领域,尤其适用于骨科植入物设计^[2],如通过梯度孔隙调控实现与人体松质骨弹性模量匹配并促进骨整合,在航空航天领域可用于制造轻量化吸能部件。核心技术涵盖孔隙率与力学性能协同优化、表面生物活性改性及其疲劳寿命的提升等方面^[3]。未来将围绕多尺度结构设计、多功能复合集成及规模化生产工艺开发等方向深入探索 TPMS 结构设计的应用。

1 TPMS 结构的几何特征

TPMS 结构具有独特且丰富的几何特征,这些特征使其在众多领域展现出巨大的应用潜力。其三维连续双曲面特征赋予材料高比表面积、梯度刚度及多场耦合响应特性。从基本属性来看,TPMS 属于隐式曲面,整体几何形状能够通过代数方程 $f(x, y, z) = C$ 精确表达(式中 x 、 y 和 z 是三维空间中的笛卡尔坐标变量; C 为等值面常数),这一特性使其被视作等值面。Rajagopalan S^[4]在 2006 年首次提出 TPMS 的数学表达式及周期性特征,为后续研究奠定了理论基础。TPMS 在三维空间的三个独立方向上呈现出周期性分布,其分布范围和周期可通过调整函数参数灵活控制。尤为特殊的是,TPMS 属于极小曲面,平均曲率为零,这赋予了它类似肥皂泡和树叶般的光滑表面,与存在尖锐边缘和连接点的晶格结构形成鲜明对比。

在结构而言,TPMS 可分为网络 TPMS 和片状 TPMS。Feng 等人^[5]提出了一种片状 TPMS 的生成策略,通过曲面偏移和壁厚控制实现结构设计,进一步阐述了 TPMS 的隐式曲面特性及其在多孔支架设计中的应用。网络 TPMS 由 TPMS 曲面划分空间形成的两部分构成,其体积比受曲率参数(c)的影响。Liu 等人^[6]详细讨论了网络 TPMS 的相对密度控制方法,通过调整曲率参数实现结构优化。通过调整如周期参数(ω)、曲率参数和壁厚等关键参数,能够实现对 TPMS 结构的多样化设计。在此基础上,改变这些参数可以生成梯度 TPMS 结构,如图 1 所示。Yang 等人^[7]在 2016 年首次提出数学定义的梯度多孔材料,为梯度 TPMS 的设计提供了理论依据,孔隙率呈现连续变化趋势,就像人体骨骼从松质骨到皮质骨孔隙率逐渐改变一样,这种结构在模仿自然架构方面优势显著。Zhou 等人^[8]结合选区 SLM 技术,验证了梯度 TPMS 的

可制造性及其性能方面的优势。此外还可以构建异质 TPMS 结构,将不同的 TPMS 单元组合在不同区域,充分发挥各单元的优势,满足复杂的应用需求。Yang 等人^[9]探讨了多形态过渡的异质 TPMS 设计方法,通过组合不同 TPMS 单元优化结构性能。Maskery 等人^[10]提出了基于体积分数和单元类型梯度的异质 TPMS 设计与仿真方法。TPMS 结构还可以与复杂的外部形状相结合。尽管传统的 CAD 算法在处理此类结构时存在计算效率低、模型误差大以及难以控制内外结构相对位置等问题。但目前有学者提出了新的改进策略,如 Feng 等人^[11]采用固体 T-spline 和基于 2D 切片的设计策略,实现了 TPMS 与自由曲面的融合设计,解决了复杂外部形状与内部多孔结构的协同设计难题,这将为定制化多孔结构提供新的研究思路。



注:(a) 调整 c 和 ω 生成渐变曲面;(b) 分级网络 TPMS。

图 1 梯度 TPMS 多孔结构^[5-6]

Fig. 1 Graded TPMS porous structures^[5-6]

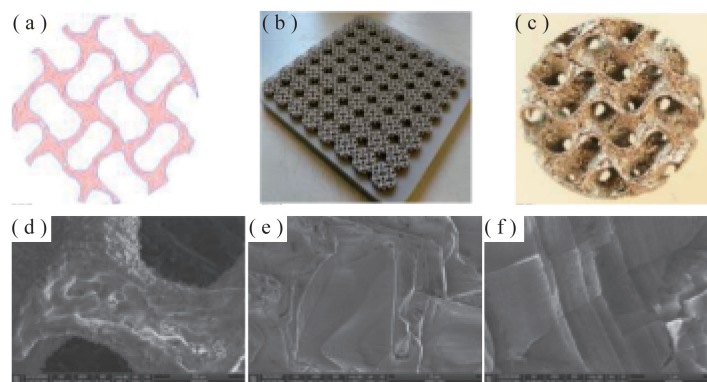
2 TPMS 结构钛合金的增材制造工艺

TPMS 结构钛合金的增材制造工艺以 SLM 和激光粉末床熔融(L-PBF)为核心,通过优化激光功率、扫描速度和路径规划技术,如隐函数直接切片、差异化参数控制从而实现高精度复杂曲面成型,结合电弧熔丝增材制造的高效低成本优势和电子束熔融的真空纯净成型特性,可覆盖从精密薄壁到大型复杂结构的多样化需求^[12];通过 TPMS 多孔支撑结构的优化设计可提升材料利用率,结合磁弧振荡细化晶粒或真空环境控制材料纯净度,在航空航天、轻量化部件、医疗植入物和高性能换热器等领域展现显著的优势。

2.1 增材制造工艺

作为钛合金增材制造技术的代表,SLM 技术主要通过激光逐层熔化粉末材料来构建物体。基于 SLM 技术的升级技术,结合光束整形(如环形光斑与高斯光斑切换),提升打印效率近 3 倍,同时还能保持零件致密度大于 99.95%,还可通过精准地调整光斑类型来实现平衡填充区域的效率和轮廓细节的精度。SLM 技术在制造 TPMS 结构时,结合其独特的工艺原理和特点,能实现复杂多孔结构的高精度制造。但目前仍存在一些关键技术问题有待解决,如 SLM 的激光光斑和粉末尺寸对制造质量影响较大,制造的 TPMS 结构表面易出现粘结颗粒,导致表面粗糙度增加。此外在 SLM 制造多孔 TPMS 结构的研究中,设计参数与制造精度的调控备受关注。Fan 等人^[13]通过 TC4 粉末制备梯度 TPMS 结构时发现,由于梯度设计导致局部支撑不足,较薄区域的制造厚度误差显著增大(误差范围 27.6~95.3 μm),如图 2 所示,且在孔结构的上内壁区域出现最大几何偏差。这一现象揭示出梯度结构设计在提升功能特性的同时对制造精度提出了高难度的新挑战。基于此,Yavari 等人^[14]提出优化扫描策略的方案,试图解决上述问题。在设计 TC4 多孔植入物时,将激光扫描路径设定为非重叠轮廓(间距为 77 μm),并采用逐层旋转 90°的扫描方式,成功地实现了制造壁厚与 CAD 模型的高度吻合(误差小于 6.6%)。该策略能够有效减少半熔化粉末附着和热变形,使得最终结构的孔隙率(71±6.2)%与理论值(76±0.2)%基本一致,验证了工艺参数优化对提升制造精度的重要性。Ma 等人^[15]进一步通过 CT 扫描对比发现,SLM 制造的 316L 不锈钢 TPMS 结构普遍存在孔尺寸缩减现象(误差 46~80 μm),这与 Fan 等人观察到的局部增厚趋势形成互补。研究表明,表面粗糙度和内部孔隙是导致尺寸偏差的主要原因,而梯度设计通过动态调整孔隙率(75.1%~88.8%),可将制造误差从 24.6%降低至 6.9%。上述报道证明,制造精度不仅依赖于工艺参数优化,更与结构设计的复杂性密切相关。Til-

ton M 等人^[16]使用 L-PBF 技术通过精确调控激光功率、扫描速度和分层制造工艺,制造出具有仿生骨小梁结构的 TC4 合金 TPMS 支架多孔植入物,通过壁厚调控实现孔隙率 20%~64% 的梯度结构变化。虽然表面存在有少量粉末团聚,但并未显著影响整体结构完整性,展现出优异的生物力学适配性。Li 等人^[17]结合 P-表面模型并利用 L-PBF 技术制备出 TPMS 结构 TC4 材料,通过调控函数参数 C 实现孔隙直径 100~700 μm 、孔隙率约 49.54% 的梯度分布。采用 EOSINT-M280 设备,优化工艺参数制备出与设计高度较为吻合的三维实体材料。微观结构分析发现,TPMS 结构表面多孔互连,弹性模量为 3.07~7.33 GPa、屈服强度为 353~606 MPa,显著低于块体钛合金模量,有效降低了植入体与骨组织的弹性模量失配问题。



注:(a) 填充扫描与轮廓扫描的切片示意图;(b, c) 梯度 TPMS 多孔样品的宏观形貌;(d~f) 逐层堆叠涂层的扫描电子显微镜(SEM)特征图像。

图2 增材制造工艺中激光扫描路径设计及多孔结构表征^[13]

Fig. 2 Additive manufacturing process for laser scanning path design and porous structure characterization^[13]

2.2 工艺参数优化方法

具有 TPMS 结构的钛合金,凭借其独特的几何特性、力学性能和轻量化的技术优势,成为增材制造领域的研究热点,广泛应用于航空航天、汽车及生物学等领域。近年来,学者们努力通过工艺优化和结构设计,来不断提升其力学性能。Ge 等人^[18]采用 SLM 技术制备出孔隙率为 70% 的 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ -Schön Gyroid 支架,通过优化工艺参数(激光功率为 240 W、扫描速度为 240 mm/s)和交替扫描策略抑制残余应力,并结合真空退火(900 $^{\circ}\text{C}$ /2 h)实现“ α/α' ”相向“ $\alpha+\beta$ ”相转变,在保持孔隙率稳定的同时,使得拉伸强度提升 14.5%、断裂伸长率增加 200%。Günther 等人^[19]基于固体各向同性材料惩罚模型,通过 L-PBF 技术对 Ti-42Nb 合金 Schön Gyroid 和 I-WP 结构进行多载荷优化,引入设计域($\varphi=0.4\sim0.6$)和被动域($\varphi=0.075\sim0.15$)分级控制,实现压缩刚度提升 80%,强度增加 61%,并保持了类松质骨的密度梯度分布。Wallat 等人^[20]采用相场法(PFM)对 Diamond、Gyroid 和 Primitive 单元进行形状优化,优化前后结构如图 3 所示,在保持体积分数 85% 和 x/z 方向周期性的条件下,通过最小化应变能密度使 Diamond 结构有效杨氏模量提升 55%(从 2.186 到 3.403),Gyroid 结构提升 40%(从 1.748 到 2.444),Primitive 结构提升 20%(从 0.989 到 1.190),同时维持了表面体积比的稳定程度。从工艺调控、数值优化和计算模拟等三个维度协同提升了 TPMS 结构的性能,这为生物学植入体和轻量化工程提供了创新设计方法。

3 TPMS 结构钛合金的性能研究

钛合金凭借优异的比强度、耐蚀性及其生物相容性,逐渐成为高端装备制造的核心材料。传统实体钛合金的最佳性能受限于材料的本征属性,而多孔结构的钛合金虽可通过孔隙率调控实现轻量化,但其随机多孔结构则存在着力学性能各向异性显著、功能集成度低等诸多缺陷。因此,具有微结构可控属性的 TPMS 结构为解决这一问题提供了新的思路。

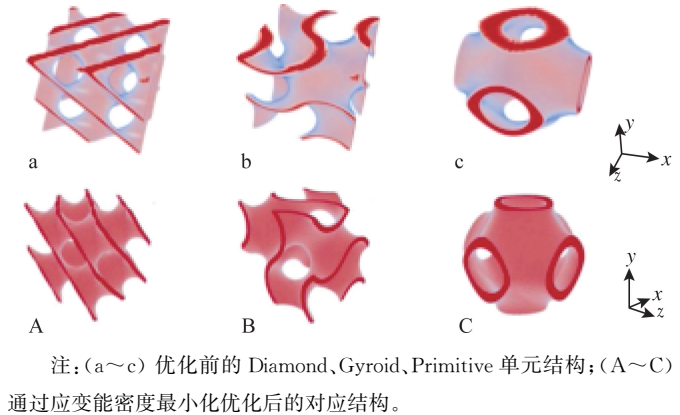
3.1 力学性能

TPMS 结构的钛合金材料因其优异的力学性能和仿生特性备受关注。Tilton 等人^[16]通过 L-PBF 技术制备了 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ -Schön I-WP 和 Primitive TPMS 支架,揭示了 IWP 结构在疲劳性能上的显著优势,即在相

同孔隙率和应力幅值下,其疲劳寿命较 Primitive 高出 97% ($p < 0.05$),其中 IWP-0.35 和 IWP-0.45 组在 50% 屈服强度应力下成功承受 10^5 次循环而未失效。Gain 等人^[21]采用 SLM 技术开发的孔隙梯度 TPMS 结构(孔隙尺寸 250~745 μm),其弹性模量(16.8~25.7 GPa)、压缩强度(185.7~462.3 MPa)和拉伸强度(171.5~488.3 MPa)与人类皮质骨高度匹配,通过非均匀变形和裂纹分支机制实现了能量吸收能力的提升。Shi 等人^[22]通过 L-PBF 技术制备的 Diamond、Gyroid 和 Primitive 结构进一步表明,单元胞旋转角度优化可显著提升力学性能: Diamond 单元旋转 18° 后弹性模量和压缩强度分别提升约 13.55% 和 9.54%, Primitive 单元旋转 45° 后弹性模量和压缩强度分别提升了 26.8% 和 94.5%,能量吸收增加了 171.86%。上述研究表明,从疲劳性能优化、梯度仿生设计和几何调控等三个维度可以拓展 TPMS 结构的工程应用范围,将为高性能植入体的开发提供了理论支撑与技术路径。

3.2 物理性能

钛合金三明治结构是一种由上下实心钛合金面板与中间 TPMS 多孔芯层组成的复合结构。Kong 等人^[23]采用选择性 SLM 技术制备了三明治 TPMS 结构,制备成型过程示意图如图 4 所示。通过调整体积分数、面板厚度和胞层数实现其结构优化。结果表明,体积分数为 20%、面板厚为 1.0 mm、胞层数为 3C 的 GP10 结构吸声性能最优,吸声系数达 0.36,其吸声带宽因 Gyroid 结构较大的孔径而显著拓宽。Guo 等人^[24]通过 L-PBF 技术构建梯度无序单元的 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ 多孔合金,发现规则度 $R=0.8$ 且含 1 层无序单元的结构能量吸收量较完全有序结构提升约 156.3%,效率提升为 122.8%。结果发现,适度无序可通过分散应力抑制剪切带形成,但过度无序(如 4 层)会导致应力集中,削弱吸能效果。Zhang 等人^[25]进一步通过壁厚梯度设计结合 MgO 纳米颗粒改性,使钛基 TPMS 结构的比能量吸收(SEA)从 $(17.5 \pm 2.3) \text{ J/g}$ 提升至 $(28.5 \pm 3.1) \text{ J/g}$,增幅为 63%,其性能优于多数金属和聚合物晶格的结构。上述研究证明,通过结构参数优化(如梯度无序设计)与材料改性(如纳米颗粒强化)的协同作用,能够显著地提升钛合金多孔结构的吸声与能量吸收性能,这为轻量化工程应用提供了重要设计范式。



注: (a~c) 优化前的 Diamond、Gyroid、Primitive 单元结构; (A~C) 通过应变能密度最小化优化后的对应结构。

图 3 基于 PFM 的 TPMS 结构优化前后对比^[20]

Fig. 3 Comparison of TPMS structure optimization before and after based on PFM^[20]

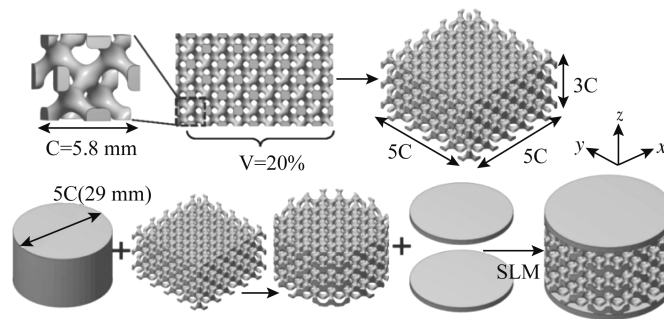


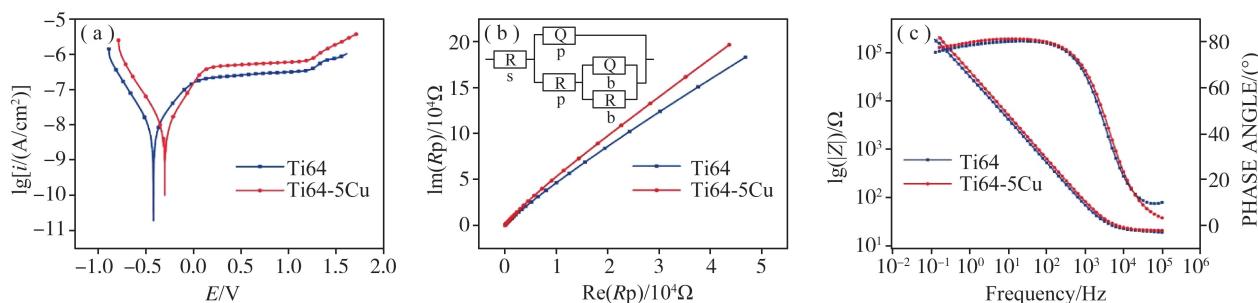
图 4 夹芯结构设计及成型示意图^[24]

Fig. 4 Design and molding diagram of sandwich structure^[24]

3.3 耐腐蚀性能

TPMS 结构的钛合金具有独特的多孔特性和良好的化学性能。Zhou 等人^[26]通过 L-PBF 技术制备出孔隙率为 70% 的 Ti64-5Cu 合金 Gyroid(G)、Diamond(D)和 Primitive(P)型 TPMS 结构,结果发现 G 型结构渗透率达 $5.490 \times 10^{-9} \text{ m}^{-2}$,材料运输能力较 D 型提升 42%,且流速波动更小,展现出更为优秀的流体稳定性。极化曲线测试结果表明, Ti64-5Cu 的腐蚀电流密度为 $15.85 \mu\text{A}/\text{cm}^2$,明显低于 Ti64 的 $45.70 \mu\text{A}/\text{cm}^2$,体现出更低的腐蚀倾向。电化学阻抗谱测试中, Nyquist 图显示 Ti64-5Cu 的阻抗弧半径显著大于

Ti64; Bode 图则显示其阻抗模值更高,且相位角峰值更宽,进一步表明其电荷转移电阻增大,电极反应过程的阻力增加。分析其作用机理,Cu 合金化后形成的富 Cu 氧化膜能够有效阻碍腐蚀介质的渗透,同时释放的 Cu^{2+} 可抑制细菌附着,从而在提升材料耐蚀性的同时赋予其抗菌性能(图 5)。Sharp 等人^[27]通过 L-PBF 制备具有不同孔隙率(60%和 80%)的 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ 陀螺状晶格,孔隙率为 60%样品的点蚀起始敏感性最高(击穿电位为 1 590 mV),80%样品次之(1 842 mV),但 Tafel 分析表明多孔结构腐蚀速率更低(如 80%样品的腐蚀率 $2.5 \mu\text{m/a}$),且所有样品击穿电位均高于 ASTM F2129 标准(800 mV),证实其临床应用具有可行性。Zhou 等人^[28]结合 SLM 与放电等离子烧结技术制备出 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ -Ti-5Cu 复合材料,结果表明 TCCU-70 结构在质量分数为 0.9%的 NaCl 溶液中腐蚀电流密度低至 $(1.58 \pm 0.74) \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$,优于单一 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ 和 Ti-5Cu 合金,表明界面冶金结合与均匀分布的 Ti_2Cu 析出相协同抑制微电偶腐蚀。上述研究表明,通过材料改性(如 Cu 合金化)与结构优化(如 G 型 TPMS),能够协同提升钛合金植入体的耐腐蚀性、抗菌性及生物相容性,这将为新型骨科植入物设计提供试验依据。



注:(a) 极化曲线;(b) Nyquist 图;(c) Bode 图。

图 5 Ti64 合金和 Ti64-5Cu 合金电化学曲线^[26]

Fig. 5 Corrosion electrochemical curves of Ti64 and Ti64-5Cu alloy^[26]

3.4 热管理性能

在电子设备与航空航天等领域的热管理系统研究中,TPMS 结构的高效散热特性备受关注。Baobaid 等人^[29]发现,基于 TPMS 的散热器依托互连多孔拓扑与高比表面积,能够显著强化自然对流热交换,顶部与底部开放的边界条件可实现最佳散热效果,热辐射对总传热贡献达 23%,相较传统针翅散热器散热能力提升 48%~61%。Sun 等人^[30]发现 NiTi 基 TPMS 结构多孔架构有效热导率降至 $0.49 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,比传统结构降低 10.9%,并通过孔隙率与取向优化实现更大的温差降,在高温环境中兼具优异热管理能力与结构稳定性。Chen 等人^[31]进一步通过梯度厚度设计为 $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ 优化 TPMS 的热交换能力,使对流换热系数较均匀结构提升约 60.10%,同时压降最大降低值约 18.05%。当雷诺数处于 100~125 时,梯度比例 2:4:6 的结构较 6:4:2 方案整体效率提升 30.22%,为高效低阻热交换器设计提供了参数优化依据。上述研究证实了 TPMS 结构在多场景热管理系统中的技术优势与设计的高度灵活性。

4 TPMS 结构钛合金的应用领域

考虑到传统均匀结构钛合金在轻量化与多功能性协同优化方面存在难以同时兼顾的技术瓶颈问题,需要通过结构创新,突破传统材料的性能极限。TPMS 作为一种典型的仿生多孔结构,为钛合金的性能调控提供了新的思路。

4.1 航空航天领域

在航空航天领域中,TPMS 结构钛合金已应用于发动机轻量化部件与热管理系统。轻量化设计与高性能结构的兼容问题是当前亟待解决的关键挑战。Ferro 等人^[32]通过选区 SLM 技术制备了 Gyroid、Schwartz、Diamond 等 TPMS 结构晶格试件。在相对密度为 35%时,Schwartz diamond 结构的最大抗压强度($\sigma_{\max}$)和弹性模量达 248 MPa 和 6 495 MPa,而在相同密度下 Gyroid 的 $\sigma_{\max}$ 和模量为 207 MPa 和 4 809 MPa,上述性能均显著优于传统桁架结构。设计实验(DOE)分析结果表明,相对密度对整体性能起到关键作用,而

TPMS 结构因无支撑梁设计,抗变形能力更加稳定,较适合于更为复杂载荷环境。应用于飞机抗冰系统时可将密度最高可降至实体材料的 35% 左右,有效降低了系统重量,并能提升燃油效率。Li 等人^[33]利用 SLM 技术制备了 TC4 合金的 TPMS 结构,并在其孔隙中填充 ZL102 铝合金,获得 Ti/Al 互穿相复合材料,该材料的屈服应力达 305 MPa、杨氏模量为 64 GPa、抗拉强度为 420 MPa,比单一 TC4 结构的性能提升效果显著,这为航空航天部件的轻量化结构设计提供了新方案。Chen 等^[34]针对激光通信终端光学外壳需求,设计出 TA15 钛合金晶格填充薄壁结构,材料密度增加约 50%,但结构一阶固有频率达 1 300 Hz(远超 100 Hz 设计要求),热变形较 Al-SiC 外壳降低 16.1%,重量仅 490 g,并且加工成本和制造时间减半,且其振动测试验证其结构的可靠性,这为航天光学系统提供了兼顾轻量化与刚度的解决方案。上述研究表明,基于 SLM 的 TPMS 结构及其复合材料的拓扑设计,通过优化相对密度与几何形态参数,可实现航空航天领域中复合材料设计时兼顾减重、高性能与低成本的协同技术突破。

4.2 生物医用材料领域

在牙科修复材料领域中,有限元分析(FEA)已成为植入物优化设计的主要工具,通过模拟应力分布揭示结构与骨组织的相互作用。Kök 等人^[35]采用 SLM 技术制备了 Ti64 的 TPMS 结构植入物,其 Gyroid 的单元胞尺寸 2 mm、壁厚 0.35 μm 。通过 FEA 对比发现,其应力屏蔽较传统均匀植入物降低约 15%,尤其是孔隙率为 48% 的结构设计使得其机械性能与天然骨更为匹配。Emanuelli 等人^[36]通过 L-PBF 技术制备了 β -Ti21S 合金的 TPMS 2.5 股骨柄假体材料,其参数为单元胞为 2.5 mm,韧带厚度为 1.01~1.52 mm,孔隙尺寸为 0.94~1.44 mm。该 TPMS 2.5 合金的疲劳强度达 42.8 MPa,弹性模量约 13.94 GPa,与皮质骨高度匹配,且细胞代谢活性显著高于 TPMS 1.5 结构,这表明经优化后的孔隙参数能够有效促进骨整合。Zhao 等人^[37]通过拓扑优化设计了 TO-C、TO-T、TO-B 等三种 TPMS 结构,其中设计的 TO-B 型 TPMS 结构脊柱融合器,在 60% 孔隙率下比表面积达 6.06 mm^2/g ,渗透率为 $9.49 \times 10^{-9} \text{ m}^{-2}$,性能显著优于其他结构;且其互连通孔结构不仅降低了应力屏蔽,通过增大比表面积和渗透率,促进细胞黏附和体液运输,为骨组织生长提供适合的微环境。基于 SLM 的 TPMS 结构通过几何参数优化(如单元胞尺寸、壁厚)和材料设计选择(如 β -Ti21S 合金),可同时提升植入物的机械性能、生物相容性以及抗疲劳能力,这为解决应力屏蔽问题和促进骨整合提供新路径。

4.3 汽车制造领域

在汽车轻量化与安全性能提升需求推动下,TPMS 钛合金结构凭借其独特的几何优势成为当前研究的焦点。Zhou 等人^[38]采用选择性 SLM 技术制备 Gyroid-蜂巢结构保险杠吸能盒。在面内压缩时,该结构应力波动小,能量吸收能力比传统桁架蜂巢结构高约 26%。且在高、低压压缩速度下表现优秀。当压缩速度为 1 m/s 时,能量吸收比传统结构高约 69%,这为车辆耐撞设计提供了新策略。Abdelaal 等人^[39]利用增材制造技术制备了 TPMS Diamond 型钛合金晶格车架纵梁结构,通过 SLM 工艺调控试件的晶格尺寸和相对密度。经有限元分析,发现其在不同密度下失效模式存在差异。当相对密度为 10% 时,呈现为脆性坍塌,而当相对密度为 20%~50% 时,则呈 45° 对角线失效形式。该研究将为汽车轻量化制造、高性能结构设计提供了参考依据。Waqar 等人^[40]通过 L-PBF 技术制备 Ti6Al4V 八面体晶格结构,进而研究功能梯度设计对其性能的影响作用规律。部分功能梯度结构的抗压强度提升程度达到 25%,而单向梯度结构和双向垂直梯度结构能量吸收能力分别提升 91% 和 101%,这有助于提升汽车性能和安全性,将为汽车结构设计提供优化设计思路。

5 结论

本文系统梳理了基于 TPMS 结构的钛合金增材制造技术、性能特点及其应用进展。TPMS 结构凭借零平均曲率、高比表面积等优势,在轻量化、生物相容性及力学性能优化方面表现出巨大的潜力。SLM、L-PBF 等增材制造技术可精确构建复杂 TPMS 结构,但仍面临制造精度控制难度大、孔隙率存在偏差等挑战。性能方面主要涵盖力学性能、物理性能、耐蚀性能及热管理性能高等多个维度,应用拓展至航空航天、生物医用、汽车制造等领域。

未来研究应聚焦以下方向:(1) 增材制造缺陷智能控制:开发机器学习原位监测系统,结合多物理场耦合优化,降低制造误差至 $\pm 3\%$,变形率降至 0.5% 以下;(2) 结构复杂度与精度平衡:采用混合建模-切片技术及双光束协同工艺,解决梯度结构支撑不足问题,兼顾粗糙度(小于 $15\text{ }\mu\text{m}$)与效率(提升3倍);(3) 多尺度设计与功能集成:构建纳米-微米-宏观跨尺度结构(如羟基磷灰石涂层),结合形状记忆合金实现自感知/修复功能;(4) 生物医学精准化:建立孔径-细胞行为定量模型,开发药物缓释-力学支撑一体化结构(强度大于 200 MPa);(5) 绿色制造与循环利用:优化废粉回收技术(纯度大于 99.5%),开发低温工艺(温度降至 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,能耗降 40%)。未来需通过跨学科交叉创新,突破 TPMS 钛合金工程化应用瓶颈,推动其在高端装备领域的应用。

参 考 文 献

- [1] FENG J W, FU J Z, YAO X H, 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.
- [2] 鲁涛,敬石开,聂靖轩,等. 电弧增材制造钛合金成形工艺与过程控制[J]. *稀有金属*, 2023, 47(5): 618-632.
- [3] 袁晓慧,李瑞迪,袁铁锤. Nb 含量对激光定向能量沉积 Ti-Al-Nb 合金组织与性能的影响[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2025, 30(3): 204-214.
- [4] RAJAGOPALAN S, ROBB R A. Schwarz meets Schwann: design and fabrication of biomorphic and durataxic tissue engineering scaffolds[J]. *Medical Image Analysis*, 2006, 10(5): 693-712.
- [5] 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.
- [6] LIU F, MAO Z F, ZHANG P, et al. Functionally graded porous scaffolds in multiple patterns: new design method, physical and mechanical properties[J]. *Materials & Design*, 2018, 160: 849-860.
- [7] YANG N, DU C F, WANG S J, et al. Mathematically defined gradient porous materials[J]. *Materials Letters*, 2016, 173: 136-140.
- [8] ZHOU X Y, JIN Y, DU J K. 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.
- [9] YANG N, QUAN Z, ZHANG D W, et al. Multi-morphology transition hybridization CAD design of minimal surface porous structures for use in tissue engineering[J]. *Computer-Aided Design*, 2014, 56: 11-21.
- [10] 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.
- [11] FENG J W, FU J Z, SHANG C, et al. Efficient generation strategy for hierarchical porous scaffolds with freeform external geometries[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 31: 100943.
- [12] 朱金岭,程军,陈靛瑜. 激光粉末床熔融 Ti-6Al-4V 热处理的研究现状:微观组织演变和耐腐蚀性能[J]. *工程科学学报*, 2024, 46(8): 1393-1402.
- [13] FAN X J, TANG Q, FENG Q X, 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.
- [14] AMIN YAVARI S, CROES M, AKHAVAN B, et al. Layer by layer coating for bio-functionalization of additively manufactured meta-biomaterials[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 32: 100991.
- [15] MA S, TANG Q, HAN X 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.
- [16] TILTON M, BORJALI A, GRIFFIS J C, et al. Fatigue properties of Ti-6Al-4V TPMS scaffolds fabricated via laser powder bed fusion[J]. *Manufacturing Letters*, 2023, 37: 32-38.
- [17] LI L, SHI J P, ZHANG K J, et al. Early osteointegration evaluation of porous $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ scaffolds designed based on triply periodic minimal surface models[J]. *Journal of Orthopaedic Translation*, 2019, 19: 94-105.
- [18] GE J G, HUANG Q, WANG Y, et al. Microstructural optimization and mechanical enhancement of SLM $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ TPMS scaffolds through vacuum annealing treatment[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 934: 167524.
- [19] GÜNTHER F, PILZ S, HIRSCH F, et al. Shape optimization of additively manufactured lattices based on triply periodic minimal surfaces[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 73: 103659.
- [20] WALLAT L, REDER M, SELZER M, et al. Shape optimization of porous structures by phase-field modeling with strain energy density reduction[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 37: 107018.

- [21] GAIN A K, CUI Y, ZHANG L C. Pore-gradient $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ alloy mimicking the properties of human cortical bones: the design of TPMS structures by selective laser melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 915: 147220.
- [22] SHI W T, LIN Y X, LI J, et al. Optimization of mechanical properties of Ti-6Al-4V triply periodic minimal surface porous structures prepared by laser beam powder bed fusion technology based on orientation control[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 894: 146183.
- [23] KONG X N, LIU B, LI Z H, et al. Research on sound absorption properties of tri-periodic minimal surface sandwich structure of selective laser melting titanium alloy[J]. *Materials Transactions*, 2023, 64(4): 861-868.
- [24] GUO S Y, ZHAO R S, HUANG Z F, et al. Optimizing porous Ti-6Al-4V alloys: gradients disordered cell enhance mechanical properties and energy absorption[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, 137: 342-362.
- [25] ZHANG J Q, LIU Y G, BABAMIRI B B, et al. Enhancing specific energy absorption of additively manufactured titanium lattice structures through simultaneous manipulation of architecture and constituent material[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 55: 102887.
- [26] ZHOU J, GUI Y Q, XU Q P, et al. Investigation of permeability and biocompatibility of TPMS structures printed by laser powder bed fusion using Ti64-5Cu alloy for orthopedic implants[J]. *Materials Letters*, 2024, 355: 135552.
- [27] SHARP R, PELLETIER M H, WALSH W R, et al. Corrosion resistance of 3D printed $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ gyroid lattices with varying porosity [J]. *Materials*, 2022, 15(14): 4805.
- [28] ZHOU Y, ZHAO Q, HONG R C, et al. Exploring construction of biomedical $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ -Ti₅Cu composite alloy with interpenetrating structure: microstructure and corrosion resistance[J]. *Materials*, 2025, 18(3): 491.
- [29] BAOBAID N, ALI M I, KHAN K A, et al. Fluid flow and heat transfer of porous TPMS architected heat sinks in free convection environment[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022(33): 101944.
- [30] SUN J F, GU D D, LIN K J, et al. Laser additive manufacturing of a novel NiTi doubly periodic continuous surface for dispersing in-plane stresses and improving thermo-mechanical protection[J]. *Additive Manufacturing*, 2025(98): 104643.
- [31] CHEN F, JIANG X, LU C X, et al. Heat transfer efficiency enhancement of gyroid heat exchanger based on multidimensional gradient structure design[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 149: 107127.
- [32] FERRO C G, VARETTI S, MAGGIORE P. Experimental evaluation of mechanical compression of lattice trusses made with $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ for aerospace use[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, 37(5): 520-532.
- [33] LI Z, MO H T, TIAN J H, et al. A novel Ti/Al interpenetrating phase composite with enhanced mechanical properties[J]. *Materials Letters*, 2024, 357: 135723.
- [34] CHEN F, HOU J, GUO S, et al. Lattice-filled TA15 titanium alloy optics housing for laser communication terminals: design and dynamics validation[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 35: 6786-6796.
- [35] KÖK H I, KICK M, AKBAS O, et al. Reduction of stress-shielding and fatigue-resistant dental implant design through topology optimization and TPMS lattices[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2025, 165: 106923.
- [36] EMANUELLI L, BABAEI M, DE BIASI R, et al. Optimising β -Ti21S alloy lattice structures for enhanced femoral implants: a study on mechanical and biological performance[J]. *Materials*, 2025, 18(1): 170.
- [37] ZHAO L S, WANG Y K, WANG Q, et al. Optimization design and SLM manufacturing of porous titanium alloy femoral stem[J]. *Materials*, 2024, 17(19): 4896.
- [38] ZHOU H L, ZHAO M, HE N H, et al. Compressive response and energy absorption of additive manufactured Ti-6Al-4V triply periodic minimal surface honeycomb structure[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 982: 173744.
- [39] ABDELAAL A F, AL-ATHEL K, ABUBAKAR A, et al. Advancements in computational modeling of mechanical properties of TPMS lattice structures[C]//ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2024, 88605: V002T03A010.
- [40] WAQAR S, HUSSAIN S, REN C X, et al. Superior strength and energy absorption capability of LPBF metallic functionally graded lattice structures[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 205: 112471.

(责任编辑:蒲锡鹏)