

引用格式: 杨宝, 王春锋, 张泽宇, 等. 钛基复合材料的研究进展[J]. 航空材料学报, 2025, 45(3): 117-130.

YANG Bao, WANG Chunfeng, ZHANG Zeyu, et al. Advances in research of titanium matrix composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(3): 117-130.

钛基复合材料的研究进展

杨宝^{1,2*}, 王春锋¹, 张泽宇¹, 余涵¹, 付振坡¹, 张慧²

(1. 陕钢集团汉中钢铁有限责任公司, 陕西 勉县 724207; 2. 钢铁研究总院 连铸技术国家工程研究中心, 北京 100081)

摘要: 综述钛/钛合金复合材料的最新研究现状与应用前景, 阐述其在高比强度、轻量化、耐热稳定性及耐磨性能方面的优势, 使之成为航空航天、军事装备和医学等高科技领域的关键材料。概括添加增强相使得钛基复合材料力学性能、耐磨性以及热稳定性方面稳步提升的研究成果, 揭示不同加工技术改善复合材料晶粒和性能的进展, 指出复合材料在高温、高压环境下稳定性及界面黏结强度方面仍面临挑战, 需要通过优化增强体分布、结合方式及新型复合体系来解决。此外, 表面纳米化技术与数字化仿真的结合为钛基复合材料性能优化提供新途径, 而界面强化和热稳定性研究将成为未来发展的关键。最后, 明确钛基复合材料的性能提升与加工技术的创新是实现其在极端环境下广泛应用的核心, 亦是推动复合材料性能进一步突破的方向。

关键词: 钛基复合材料; 力学性能; 增强相; 增材制造; 表面纳米化; 数字化仿真

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2024.000090

中图分类号: V257; TG146

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)03-0117-14

Advances in research of titanium matrix composites

YANG Bao^{1,2*}, WANG Chunfeng¹, ZHANG Zeyu¹, YU Han¹, FU Zhenpo¹, ZHANG Hui²

(1. Shaanxi Steel Group Hanzhong Iron and Steel Co., Ltd., Mianxian 724207, Shaanxi, China; 2. National Engineering Research Center of Continuous Casting Technology, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: This article provides an overview of the latest research status and application prospects of titanium/titanium alloy composite materials, highlighting their advantages in high specific strength, lightweight properties, thermal stability, and wear resistance, which position them as crucial materials in high-tech sectors such as aerospace, military equipment, and medicine. It summarizes research outcomes demonstrating the steady enhancement of mechanical properties, wear resistance, and thermal stability of titanium matrix composites through the addition of reinforcing phases. The review also reveals advancements in various processing technologies that have improved the grain structure and performance of these composites, while pointing out that challenges persist regarding the stability of these materials under high temperature and pressure conditions, as well as the bonding strength at interfaces. These issues necessitate the optimization of reinforcement distribution, bonding methods, and the exploration of novel composite systems. Furthermore, the combination of surface nanotechnology with digital simulation offers new avenues for optimizing the properties of titanium-based composites. Interface reinforcement and thermal stability research are identified as pivotal for future developments. Ultimately, the essay underscores that the enhancement of titanium-based composite properties and innovations in processing technologies are central to realizing their extensive application in extreme environments. This dual focus also constitutes the direction for pushing the boundaries of composite material performance even further.

Key words: TMCs; mechanical properties; reinforcing phases; additive manufacturing; surface nanotechnology; digital simulation

在当今材料科学与工程领域, 钛及其合金因其卓越的综合性能, 包括高比强度、优异的耐腐蚀

性、良好的生物相容性以及极端环境下的稳定性等, 成为航空航天、海洋工程、生物医疗、能源以及

化工等众多高科技领域的关键材料^[1]。然而,单一的钛或钛合金在某些特定应用中仍存在性能局限,如耐磨性、热稳定性或成本效益等方面的挑战^[2],这促使科研人员不断探索利用复合材料技术进一步提升钛基材料综合性能的可能。

钛基复合材料是材料科学研究的重要方向之一。通过将陶瓷颗粒、碳纳米管、石墨烯等第二相增强体引入钛或钛合金基体,旨在将基体材料良好的韧性、延展性与增强体的高强度、高模量或特殊功能特性相结合,从而实现性能的跨越式提升^[3]。这种复合材料的设计和制备,不仅突破了单一材料的限制,也为满足未来高性能应用的需求提供新的可能性^[4]。在航空航天领域,钛基复合材料的低密度和高强度特性,有助于减轻结构质量,同时保持结构强度,从而提高燃料效率和飞行性能^[5]。此外,钛基复合材料在高温环境下展现出的稳定性和抗氧化性,使其成为发动机叶片、燃烧室等高温部件的理想选择^[6]。

在生物医用植入领域,钛合金因其出色的生物相容性和耐腐蚀性,已被广泛应用于骨科植入物。钛基复合材料进一步发展,尤其是通过加入生物活性陶瓷,可以显著提升植入物的骨整合能力和长期稳定性^[7]。在海洋工程和化工设备等腐蚀性环境中,通过复合陶瓷等材料,钛基复合材料的耐腐蚀性能得到显著增强,满足这些领域对材料耐腐蚀性的高要求^[8]。有些含有导电或磁性增强体的钛基复合材料,因其优异的电屏蔽和吸收能力,在电子设备屏蔽和军事隐身技术中展现出巨大的应用潜力^[9]。此外,钛基复合材料在热管理领域也显示出优势。通过优化其微观结构,这些材料能够实现高效的热传导和热扩散,适用于需要快速散热的高性能电子设备和激光系统^[10]。

近年来,随着纳米科技、粉末冶金、新型合成方法以及材料表征技术的飞速发展,钛/钛合金复合材料的研究取得显著进展。从增强体的选择与分散均匀性优化,到复合材料的界面设计与控制,再到复合材料成形加工技术的创新,每一环节的进步都为实现材料性能的精准调控和功能集成开辟了新途径^[11]。此外,对复合材料微观结构与性能之间关系的深入理解,以及环境友好型和成本效益高的制备工艺的探索,也是当前研究的热点。

本文旨在全面回顾并分析钛/钛合金复合材料的最新研究进展,探讨其在不同应用领域的优势、存在的问题与挑战以及未来的研究趋势。通过对国内外相关研究成果的系统梳理,将重点概括复合

材料性能研究现状,特别是在提高材料的力学性能、耐磨耐蚀性以及热稳定性等方面的最新成果。同时,对先进技术制备钛基复合材料领域的现状、复合材料加工技术的发展现状及钛基复合材料制备及加工过程存在的问题进行归纳总结,也指出钛基复合材料制备及加工技术在未来发展的趋势与展望,包括但不限于增材制造技术的发展、辅助技术的更新、表面纳米化技术、数字化仿真技术以及二者相结合等方面,以期为该领域后续的科学研究和革新提供参考与启示。

1 钛合金及其复合材料的基本特性

1.1 钛合金的物理和化学特性

钛合金作为20世纪50年代起迅速崛起的先进结构材料,凭借其独特的物理和化学性能,在航空航天、生物医学、化工等多个尖端领域展现出广泛的应用潜力。物理特性方面,钛合金显著的特点在于其非凡的力学性能:抗拉强度范围在686~1176 MPa,极端情况下可攀升至1764 MPa,此强度超过一些高强钢,且密度仅为钢的60%左右,约4.54 g/cm³,较钢轻盈很多,密度在铝的2倍与镁的5倍之间。此外,钛合金展现出卓越的高温耐受力,熔点高达1942 K,远超黄金近1000 K,较Fe亦高出近500 K,其中TC21钛合金能在500℃以下环境持续工作,表现出优良的热稳定性。尽管其硬度高,加工难度大,氮化钛硬化处理能有效增强其耐磨性与硬度。钛合金具有低的弹性模量以及良好的柔韧性,在特定应用中优势明显。化学特性上,钛合金表现活跃,尤其在常温条件下与氧气快速形成一层致密、结合力强且高度稳定的氧化膜,有效防护本体免受腐蚀侵害。这一特性加之其广泛的耐腐蚀能力,即使是面对多种酸碱介质及盐类侵蚀,钛合金依然能保持良好的稳定状态。

1.2 钛基复合材料性能的研究

钛基复合材料(titanium matrix composites, TMCs)通过集成基体钛合金的高强塑性与增强体的高模量特性,超越了单一钛合金的性能界限。与传统钛合金相比,TMCs不仅展现出卓越的强度与塑性,还兼具显著的耐磨性能。通过结合钛合金本体优异的延展性与增强相的高硬度与抗磨损性能,成就了一种新型材料体系,不仅在强度与韧性上有所增进,更是在耐磨性方面体现出明显优势^[12-13]。因此,增强相是影响复合材料性能的主要因素。现有研究中的增强相主要包含:SiC、Al₂O₃、TiC、石

墨烯、碳纳米管和 TiB 等^[14]。

由于应用环境的限制,针对复合材料的研究以力学性能和耐磨性能为主。在钛基材料中引入增强相,不仅是由于增强相自身优异的性能,更主要的是外来相细晶强化和弥散强化作用是提升材料力学性能的基础。Pan 等^[15]使用纳米超细 TiB 晶作为增强相,采用选取激光熔化技术(SLM)制备的钛基复合材料抗拉强度 851 MPa,断后伸长率 10.2%。基于 Ti 和 BN 原位反应,该过程生产的纳米 TiB 晶叠

加 α 钛得到的复合材料硬度达 10.4 GPa,弹性模量达 165 GPa,性能同比分别提升 304% 和 170%^[16]。图 1 为钦兰云等在 TC4 粉末中加入不同质量分数的 TiB₂ 粉末后材料的微观组织和 α 片层尺寸分析结果^[17]。由图可见,随着增强相质量分数的增加,复合材料中晶粒细化、 α 片层尺寸明显减小。同时,随着增强相添加量的增加,增强相出现成簇和联结生长的现象,抗拉强度、显微硬度和屈服强度均明显提升。

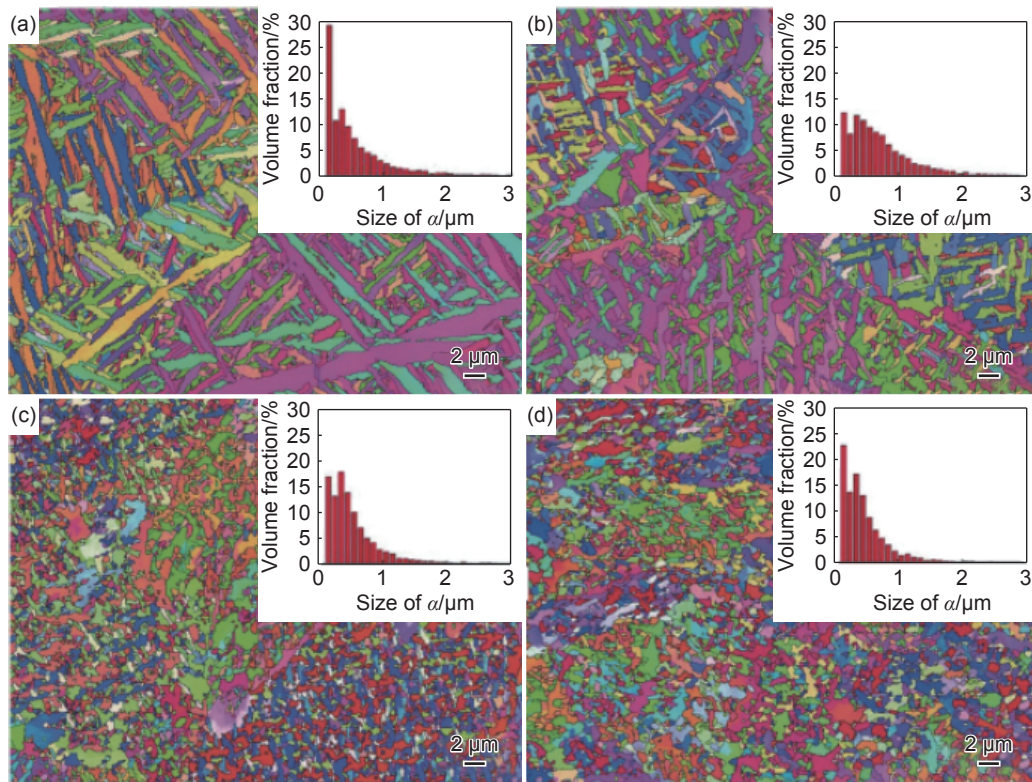


图 1 TC4 及钛基不同质量分数的 TiB₂ 粉末后的材料的微观组织和 α 片层尺寸分析^[17]
(a)TC4; (b)0.16% TiB₂; (c)1.61% TiB₂; (d)3.22% TiB₂

Fig. 1 Microstructure and analysis of α lamellar size in materials after the addition of TiB₂ powder with varying mass fractions to TC4^[17] (a)TC4; (b)0.16% TiB₂; (c)1.61% TiB₂; (d)3.22% TiB₂

Xiong 等^[18]在 TA15 钛合金中引入 0.5%~2.0% (质量分数,下同)Ti₃AlC₂ 增强相改善合金性能,结果表明经 LEBM 处理后形成 Ti₃AlC₂/TiC 增强相三维网络,1.0%Ti₃AlC₂/TA15 复合材料的拉伸屈服强度达 958 MPa、断后伸长率为 8.56%、显微硬度达 369.7HV、压缩屈服强度为 1271 MPa,展现出优异的力学性能与耐磨性。Markovsky 等^[19]使用氯化钛混合元素粉末冶金技术制备 TiC 颗粒增强的 Ti-6Al-4V 金属基复合材料。TiC 与基体发生化学反应,形成牢固的界面结合,并且能够形成 TiC 和 TiAlC 的硬质化合物,使复合材料的硬度提高 40% 以上。王振玲等^[20]利用真空感应悬浮熔炼炉

制备 (TiC+TiB)/Ti-6Al-4Sn-8Zr-0.8Mo-1.5Nb-1W-0.25Si 复合材料,增强体占比分别为 0%、2%、4% (体积比)。复合材料中随着增强体数量增加, α -Ti 长径比显著减小, β -Ti 晶粒细化。在 650~700 °C 范围内钛基复合材料强度显著提高,2% 增强体复合材料在 650 °C 强化效果最优,4% 增强体复合材料在 700 °C 强化效果最优。当温度超过 700 °C 后,增强体强化效果减弱,复合材料塑性总体较低。

Wei 等^[21]按照石墨烯与碳纳米管 5:1 的比例,采用热压烧结法制备的钛基复合材料强度和硬度分别达 1387.1 MPa 和 771.5HV,相对纯钛性能分别提升 745 MPa 和 150%。Hu 等^[22]和 Liu 等^[23]对

引入氧化石墨烯的钛基复合材料性能研究发现,复合材料的弹性模量、维氏硬度和屈服强度较基体均有不同程度的提高,但过量的氧化石墨烯则导致屈服强度降低。神祥博^[24]对 TiB/Ti 复合材料研究发现,随着增强相含量提升,复合材料的硬度不断增大,但是抗拉强度呈现出先增后减的变化趋势,同时随着烧结温度的提升,断后伸长率亦呈现下降趋势。不难发现,虽然增强相可以有效提升复合材料的硬度与强度,但是可能会导致塑性不合格的问题

产生。因此,如何有效维持新材料的强度和韧性平衡是设计材料的新思路。Huang 等^[25]通过控制增强相的分布同步提升了钛基复合材料的强度和韧性。图 2^[26]为复合材料增强相分布控制示意图。图中存在增强相富集区和贫瘠区,其中增强相富集区阻碍位错运动的发生,进一步提高强度,而贫瘠区则为位错的运动和增殖提供足够的空间,从而增强韧性。另外,也有部分研究认为不同种类的增强相结合更易平衡钛基复合材料的强度和韧性^[27]。

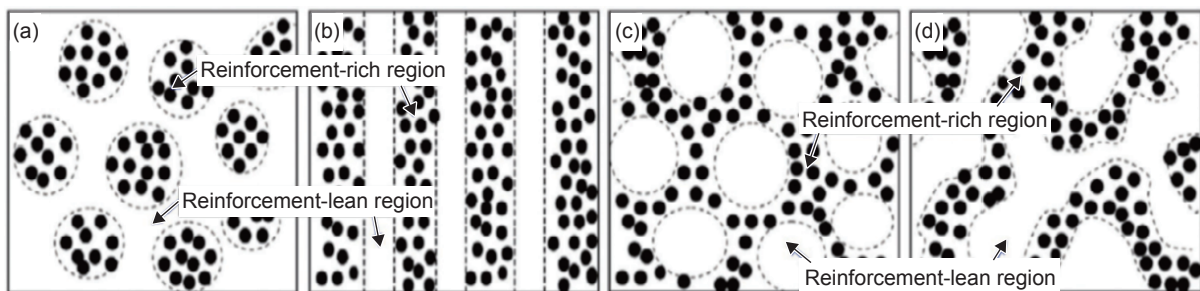


图 2 复合材料增强相分布控制示意图^[26] (a)聚集形; (b)有序形; (c)环形; (d)无序形

Fig. 2 Schematic diagram illustrating control of reinforcing phase distribution in the composite material^[26]
(a) aggregated form; (b) ordered form; (c) annular form; (d) disordered form

钟亮等^[2]对钛基复合材料耐磨性研究进展进行了较为完整的综述,主要包含复合材料耐磨性表征方法和摩擦磨损行为,同时也阐述了高耐磨复合材料的设计和表面耐磨改性技术的相关内容。一般认为,复合材料的自身耐磨性与其表面所受的剪切力相关,在载荷相同的条件下,表面剪切力与摩擦因数呈正相关。Cai 等^[28]以 TiB 为增强相、TC4 为基体形成的复合材料摩擦因数随着 TiB 含量的增加而降低,当加入增强相为 8%TiB 时,复合材料的摩擦因数相对基体下降 33.8%。Zhang 等^[29]将 Ti_3AlC 与 TA15 钛合金复合后,在 200 r/min 转速和 15 N 载荷的条件下,复合材料的磨损率为

$3.98 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 相对基体磨损率降低了 20%。图 3 为 Bai 等^[30]制备的 TiC/TC4 多孔蜂窝状复合材料,蜂窝主要是由于 TiC 相包裹 Ti64 基体形成, TiC 界面处的纳米硬度为 12.4 GPa, 磨损率较基体降低 28%。Gürbüz 等^[31]采用 0.15% 的石墨烯复合制备钛基复合材料,在 10 N 载荷下磨损速率为 $2.86 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 磨损量较小。

除了提升复合材料自身的耐磨性,通过表面处理技术优化 TMCs 的耐磨性能也被广泛研究^[32]。黄雪丽等^[33]运用电弧离子镀膜工艺,在钛合金外表制备了一层 TiN/CrN 纳米多层薄膜,其硬度达到 24 GPa,且该纳米多层薄膜与基底的黏合强度极

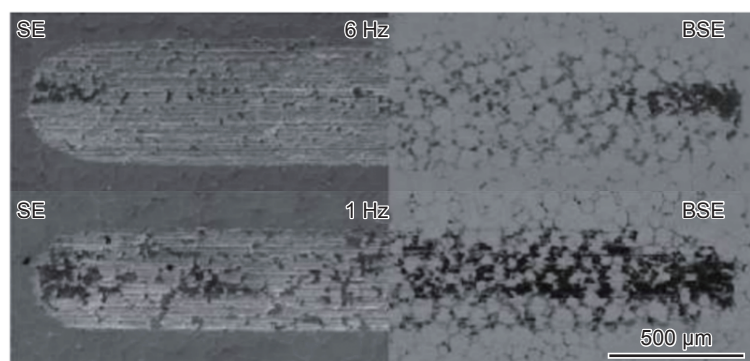


图 3 TiC/TC4 多孔蜂窝状复合材料^[30]

Fig. 3 Porous honeycomb structured TiC/TC4 composite material^[30]

为牢固。同时以 Al_2O_3 为研磨球进行平板摩擦磨损测试时,观察到 TiN/CrN 薄膜的磨损量仅为 $3.44 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。刘元才等^[34]采用微弧氧化技术对 TB8 进行表面改性处理,其耐磨性随着电解液中 BN 含量增加而提升。目前,在耐磨 TMCs 的成型制备方面,增材制造技术和先进喷射成型技术已进入广大研究者的视野,激光熔覆沉积技术也是最先进的技术之一^[3]。现阶段,无论是提高钛基复合材料的耐磨性还是对其表面改性处理,多数研究都集中在室温耐磨性能上,而随着钛基复合材料大量应用到航空航天和基地航海领域,极限温度下钛基复合材料的耐磨性、耐蚀性和力学性能是未来主要关注的方向之一。

随着钛合金材料在航空发动机方面的应用,必须考虑其零部件存在钛火风险^[35],这就要求钛合金材料热强性和热稳定性相互匹配。为了满足 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上钛合金材料的性能要求,在钛基体中引入增强相,使得复合材料硬度、屈服强度和抗拉强度显著增强。为了满足高温钛合金所需的热稳定性,国内主要通过添加稀土元素的方法提升材料的热稳定性,其原理为:稀土元素与合金中 S 等反应,其反应产物在晶界析出,该产物还与合金中的氧反应,二次反应产物稀土氧化物可细化晶粒,不仅可以净化基体,抑制位错产生,还能提升材料的热稳定性^[36]。通过向 Ti600 与钛基复合材料中添加稀土 Y,丁超等^[37]发现合金和钛基复合材料的热稳定性均提高。目前钛基复合材料热稳定性研究较少,面对钛基复合材料在航空领域进一步推广,使用增材制造技术促进稀土元素对复合材料热稳定性影响研究是改善钛基复合材料综合力学性能的方向。

2 先进技术在钛基复合材料中的应用

2.1 粉末冶金技术

粉末冶金技术作为一种高效、灵活的材料制备方法,在钛基复合材料的制备中扮演着至关重要的角色。该技术通过精确控制粉末的混合、成形和烧结过程,不仅实现增强体与钛基体的均匀分散,还显著提升材料的力学性能和高温稳定性。

在钛基复合材料微观结构、力学性能和强度提升方面,专家学者不仅探索了多种类型的增强体,包括碳化物、硼化物、硅化物等陶瓷颗粒,并调整增强体的粒径、形态和含量,以提高材料的高温性能和强度^[2],而且通过界面工程的策略,如控制烧

结气氛和添加中间相,显著提升增强体与钛基体之间的界面结合强度^[38]。此外,采用放电等离子烧结 (SPS)、机械合金化 (MA) 等创新工艺,能进一步提高材料的致密化程度和增强体的均匀分散。

近年来研究表明,粉末冶金技术在钛基复合材料的制备中不断取得突破。黄陆军等^[39]采用粉末冶金技术成功制备具有网状结构的钛基复合材料,显著提高材料在 $600 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温下的强度、抗氧化和抗蠕变性能。此外,北京科技大学新材料技术研究院在颗粒增强钛基复合材料的制备工艺及力学性能方面也取得显著成果,通过优化粉末冶金工艺,实现复合材料性能的进一步提升^[40]。尽管粉末冶金技术在钛基复合材料的制备中展现出巨大的优势和潜力,但仍面临一些挑战和问题。例如,增强体与钛基体之间的界面反应控制、成本效益分析以及环境友好型发展等方面仍需要进一步研究和改进。

2.2 增材制造技术

3D 打印技术,又称为增材制造 (additive manufacturing, AM),是一种从无到有、依据分层累加原理的现代制造方法。此技术依托诸如激光、电子束及电弧放电等能量传递手段^[41],选用包括金属、陶瓷材料、聚合物以及新型工程材料在内的广泛原料,通过材料的热熔化及逐层叠加,高效构建实体结构。增材制造技术的一大革新点在于,其无需依赖传统模具,能够自由塑造高度复杂的结构,提供广阔的设计空间与提升材料的使用效率,积极推动航空航天工业制造领域的变革趋势^[42]。

增材制造技术依据热源类型大致分为 3 类:激光增材制造 (LAM)^[43]、电子束增材制造 (EBAM)^[44] 和电弧增材制造 (WAAM)^[45]。与电子束增材制造相比,激光增材制造不需要真空环境,并且在包层、修复、再生和添加剂制造方面具有广泛的适用性^[46]。与电弧增材制造相比,激光增材制造具有高定位精度和高分辨率的优势^[47]。因此,其成为一种很有前途和流行的增材制造技术,用于生产包括 TMCs 在内的金属基复合材料。激光增材制造 (LAM) 分为激光熔融沉积法 (LMD) 和选区激光熔化法 (SLM)。采用增材制造方法生产钛基复合材料,其性能均与增强相的种类、增材制造工艺参数和粉末参数有关。Liu 等^[48]利用波长为 1064 nm 的连续波光纤激光器,揭示激光熔融沉积中激光功率对含 10% (体积分数) TiC 的 TC4 复合材料显微结构的影响,见图 4。结果表明,优化后的激光功率可有效避免树突状 TiC 和缺陷的形成。还有探索最低

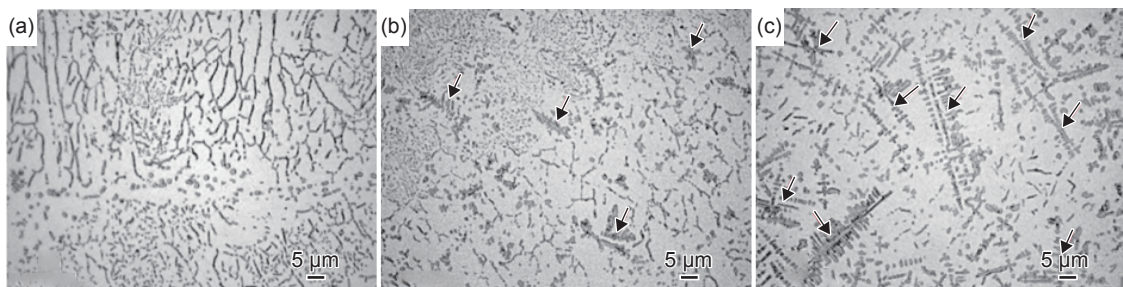


图4 不同激光功率下复合材料中树突状 TiC 的形成和形貌演化^[48] (a)230 W; (b)250 W; (c)300 W
Fig. 4 Formation and morphological evolution of dendritic TiC in the composite at different laser powers^[48]
(a)230 W; (b)250 W; (c)300 W

能量密度条件下,提高粉末进料速率以增加层高的研究。Liu 等^[49]通过激光熔融沉积制备体积分数 5%~15%TiC 的 TiC/TA15 复合材料。结果表明,5% TiC 的抗拉强度最高,而 10% 和 15% TiC 降低了复合材料的抗拉性能,甚至比 TA15 基体更差。

Zhou 等^[50]和 Zhao 等^[51]对 SLM 制备的钛/钛复合材料和纯钛进行比较实验以评价它们的耐腐蚀性能。氮化钛作为微阴极加速阳极反应, Ti 消耗有助于维持钝化状态。因此, TiN/Ti 复合材料的腐

蚀电流密度下降的速率随腐蚀能力的降低较纯 Ti 快,见图 5^[50]。随着二氧化钛薄膜和不溶性产物的积累,它们将基体从溶液中分离出来,从而抑制了钛基体的进一步溶解,最终在一定程度上减缓了腐蚀过程。Li 等^[52]采用 SLM 制备(TiB + TiN)/Ti 复合材料,研究发现有纳米 TiB 棒和纳米氮化钛颗粒沉淀并团聚形成团簇。与(TiB + TiC)杂化增强体一样,这些纳米(TiB + 氮化钛)沉淀物促进 Ti 晶粒的细化,并通过分散强化增强复合材料的力学性能。

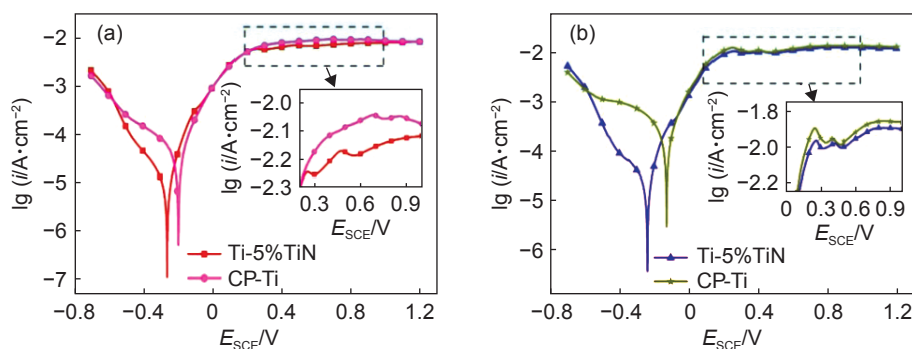


图5 纯 Ti 和 TiN/Ti 复合材料在 0.5 mol/L 盐酸溶液中浸泡 0 天(a)和 15 天(b)后的极化曲线^[50]
Fig. 5 Polarization curves of pure Ti and TiN/Ti composite materials after immersion in 0.5 mol/L hydrochloric acid solution for 0 day(a) and 15 days(b)^[50]

虽然利用 LAM 技术制造 TMCs 在技术改进、参数控制和优化方面进行了丰富的研究,但 LAM 引入的一些内在问题也成为限制材料进一步改进和增强的瓶颈。在 LAM 过程中,由于熔池中的高温/应力梯度、对流、低熔点元素的蒸发、梯度表面张力^[53-54]等复杂因素,很容易诱发孔隙、裂纹和不可控的微观结构。另外,热处理、超声处理和电磁处理等已被证实可有效改善这些问题。同时,模拟研究可以为推进这一领域的探索提供指导,帮助人们更深入地了解复杂的多尺度热力学演化的行为^[4]。未来的研究方向包括开发新的增材制造技术、优化工艺参数、提高材料的综合性能,并解决现有的技术难题^[55]。

2.3 表面纳米化技术与数字化仿真技术的结合

表面纳米化技术通过在材料表面形成纳米尺度的微观结构,可以显著提高材料的综合性能。研究表明钛及钛合金的表面自纳米化可以赋予其优异的强度、硬度、耐磨性、耐蚀性和抗疲劳性能^[56]。此外,表面纳米化还可以通过细化晶粒、促进薄膜形核等方式显著提高材料的力学性能^[57]。

数字化仿真技术通过计算机模拟和数值分析,可以预测和优化材料的微观结构和性能。例如,利用 ProDesign 等软件进行多晶体材料和复合材料的数字化仿真与数值化模拟,可以实现对材料微观组织结构的精确控制^[58]。这种技术不仅可以优化材料的设计,还可以指导实验工艺,提高材料性能的

可控性和可靠性。

将表面纳米化技术与数字化仿真技术结合可以进一步提升钛基复合材料的性能。通过数字化仿真技术可以在设计阶段预测和优化表面纳米化后的材料性能,从而在实验中更有效地制备出具有高强度、高耐磨性和优异耐蚀性的钛基复合材料^[59]。此外,数字化仿真还可以帮助研究者理解材料的界面反应、界面结构和微观构型等关键因素对材料性能的影响规律^[60]。

在实际应用中,表面纳米化技术和数字化仿真技术的结合可以为钛基复合材料在航空航天、国防工业、交通运输等领域提供更高的性能保障。石墨烯增强钛基复合材料由于其高强度、低密度和优异的耐蚀性,被广泛应用于这些领域^[38]。通过数字化仿真技术,可以进一步优化这些材料的设计和制备工艺,确保其在实际应用中的性能达到预期目标^[61]。表面纳米化技术和数字化仿真技术在钛基复合材料方面的研究不仅可以显著提高材料的综合性能,还可以通过精确的设计和优化,推动钛基复合材料在各个领域的应用。

2.4 颗粒增强钛基复合材料的加工技术

颗粒增强钛基复合材料作为一种重要的战略性结构材料,因其高比强度、轻量化、耐热稳定性以及耐磨蠕变性能而在航空航天、空间技术和军事装备等高科技领域展现出广阔的应用前景。然而,其固有的加工难度大、室温塑性差等特性对实现高精度加工提出了挑战。韩远飞等^[62]综述了颗粒增强钛基复合材料的传统热加工与特殊加工技术进展,特别是热加工、置氢加工、超塑性加工、激光制造等的机制与性能,展望了材料加工技术的发展趋势。

传统热加工,如锻造、挤压、轧制等是基本方式,但需严格控制参数以适应窄窗口和增强体影响。吕维洁等^[63]发现锻造使得(TiB+TiC/Ti10)复合材料晶粒细化和性能提升,并且使得复合材料的断后伸长率翻倍。热挤压同样重要,如Wei等^[64]采用累积叠轧加工TiB_w/Ti6Al4V复合材料,使得其断后伸长率显著提升。王敏涓等^[65]对连续SiC纤维增强钛基复合材料实施大塑性变形加工,使其组织发生动态再结晶。

在特殊加工领域,增材制造和超塑性变形是两种重要的技术^[66]。韩远飞等^[62]综述了TiB_w/Ti6V的超塑性变形、热图以及动态再结晶机制。这些技术通过细化晶粒和提高材料的强韧性,从而改善材料的整体性能。置氢加工则是一种通过氢掺入钛合金

中以改善其加工性和增材性能的方法。弭光宝等^[67]讨论了氢辅助热变形的效果,指出这种方法可以细化柱状晶并降低变形抗力,从而改善切削加工性。此外,超声波检测技术也在复合材料质量保证中发挥着重要作用,该技术可以分为反射法和穿透法,能够有效检测复合材料中的缺陷和质量问题。其他技术如水射流、电火花等^[68]虽然存在局限,但仍需关注,因为它们在某些特定应用场景中可能具有独特的优势。

等温变形技术也在材料加工中得到广泛应用。此外,有进行等温变形TiB_w/Ti4V进一步细化晶粒并提高材料性能的研究。吕维洁等^[63]通过热图技术分析了TiB+Ti-10的热加工过程,并指导工艺参数的优化,这对于提高材料加工效率和最终性能至关重要。未来,提高材料利用率、降低能耗、多工艺结合、发展近净成形技术、深入分析加工技术及创新塑性变形工艺等是重点研究的方向^[62]。

3 现存问题与挑战

3.1 钛基复合材料在高温、高压环境下的稳定性问题

钛基复合材料在高温条件下表现出优异的性能,包括高比强度、高比模量、抗蠕变性能和热稳定性等。采用TiB+La₂O₃增强的钛基复合材料在高温下具有良好的力学性能和耐腐蚀性^[69]。然而,当温度超过700℃时,增强体的强化效果会减弱,导致材料的塑性总体较低^[20]。钛基复合材料中增强体的分布均匀性和与基体的结合良好程度对材料的高温性能有显著影响。相关研究表明,原位自身合成的增强体能够实现这些要求,从而提高材料的整体性能^[69]。此外,多尺度不连续增强钛基复合材料通过不同尺度下的协同增强机制,产生了具有高强度、良好的延展性和高温耐久性的轻质材料^[70]。

钛基复合材料的制备方法对其高温性能也有重要影响。增材制造技术(3D打印)可以通过快速凝固使颗粒增强钛基复合材料中晶粒细化,从而提升力学性能^[4,71]。这种技术为基于成分调控与结构设计的高性能钛基复合材料的开发带来机遇^[71]。尽管钛基复合材料在高温下表现出色,但仍存在一些局限性。高楚寒等^[4]认为,钛合金的使用温度普遍局限于600℃左右,超过这个温度范围,合金的耐热性会降低,热强性与热稳定性难以匹配协调,导致抗氧化性和疲劳性能下降。这表明在设计 and 应用钛基复合材料时,需要考虑其在极端高温环境下的稳定性。

未来的研究应着重于进一步提高钛基复合材料的高温性能,解决其在高温、高压环境下的稳定性问题。这包括优化增强体的分布和与基体的结合方式、改进制备工艺以及开发新的增强相和复合体系^[14]。钛基复合材料在高温、高压环境下的稳定性问题需要综合考虑材料的微观结构、增强体的作用、制备方法以及高温下的局限性等多个因素。通过不断优化这些方面,有望显著提高钛基复合材料在极端环境下的应用潜力。

3.2 钛基复合材料界面黏结强度的提升需求

钛基复合材料界面黏结强度的提升需求主要源于其在航空航天、汽车工业和其他高要求领域的广泛应用。这些应用对材料的力学性能提出了更高的要求,尤其是在极端环境下的稳定性和耐久性。从现有的研究来看,钛基复合材料的界面黏结强度直接影响到材料的整体性能。诸如, SiC 纤维增强钛基复合材料(SiC_f/Ti)因其高比强度和高比模量而被广泛用于航空航天领域,但其横向性能较差,这与界面黏结强度有直接关系^[72]。原位自生法制备的 TiC 颗粒增强钛基复合材料,其增强相分布均匀,界面黏结良好,这表明通过优化界面微观结构可以显著提高界面黏结强度^[73]。

此外,纳米碳和 TiB 等新型增强相的引入为提高界面黏结强度提供了新的途径。纳米碳强化钛基复合材料通过优化界面结构和性能,取得了一系列研究进展^[74]。同样, TiB 增强钛基复合材料的第一性原理研究也表明,通过控制界面结合的强度和性质可以有效提升材料的宏观力学性能^[75]。然而,不同的增强相在与钛基体的结合过程中可能会出现化学反应或相互作用,这些因素都会影响界面的黏结效果。

激光增材制造技术也为提高界面黏结强度提供了新的可能性。通过精确控制激光烧结过程中的界面连接机理,可以显著提高 WC_p 钛基复合材料的界面黏结强度^[76]。此外,微波烧结原位合成 TiC 增强钛基复合材料显示,原位生成的 TiC 增强相分布均匀,且界面黏结良好,这是制备不连续 TiC 增强钛基复合材料的一种经济有效方法^[77]。另外,粉末冶金法、真空压力浸渍法、机械合金法以及原位自生法等制备技术也各有优劣,选择合适的制备技术是提高界面黏结强度的关键。

总之,钛基复合材料界面黏结强度的提升需求主要源于其在高要求领域的应用需求。通过采用先进的增强相、优化制备工艺和改善界面结构,可以显著提高材料的界面黏结强度,从而提升其整体

力学性能和应用前景。

3.3 高精度、高质量加工技术的难题

钛基复合材料的变形难度较大,强度高,这使得传统的切削加工方法难以实现高精度和高质量的加工结果^[62]。传统的机械加工方法在处理超硬陶瓷颗粒、晶须和纤维增强相时,往往会导致加工过程中的不平稳和表面质量差^[78]。

为了解决这些问题,研究者们探索了多种先进加工技术。其中包括复合能场加工、锻造加工和增材制造等方法^[66]。例如,激光 3D 打印技术通过原位反应减少裂纹的产生,同时平衡了传统加工过程中强度与断后伸长率难以兼顾的问题。此外,碳包覆钛复合粉体的应用也为 3D 打印领域提供了新的研究思路和技术支持^[79]。

尽管如此,当前的研究仍然存在一些主要问题。高速磨削加工性研究表明,陶瓷 CBN 砂轮与电镀 CBN 砂轮在高速磨削过程中,磨削力与力比、磨削温度与热分配等方面仍需进一步优化^[80]。此外,增材制造技术虽然在提高材料的力学性能方面取得了一定进展,但其认证过程中的设计、材料、工艺和检测等环节仍需要严格控制,以确保零件的质量^[81]。

总之,钛基复合材料的高精度、高质量加工技术尚需进一步研究和优化。未来的研究方向应侧重:1)探索更高效的切削加工方法;2)优化复合能场加工、锻造加工和增材制造等先进加工技术;3)加强对高速磨削加工性的研究;4)严格控制增材制造过程中的各个环节,以确保零件的高质量^[66,80-81]。

4 未来发展趋势与展望

4.1 增材制造技术在钛基复合材料中的进一步应用

随着增材制造(AM)技术工业化进程的推进,材料-工艺-结构-性能/功能的相互关系和集成将得到越来越多的重视。在激光增材制造(LAM)技术制备钛基复合材料的过程中,如钛碳化物、钛硼化物和钛氮化物等陶瓷材料越来越受到青睐^[82-86]。一方面,这些陶瓷材料因其高模量、高硬度以及与钛合金的良好兼容性,能够显著增强和硬化钛材料,有望拓宽高性能 TMCs 的应用场景;另一方面,LAM 技术以其高能量密度、高效、灵活性和低材料浪费等优势,为耐火陶瓷增强复合材料的生产提供了有效途径。这也将加速先进 LAM 技术的发展。

考虑到传统方法如大型炉设备、充足的加工时间和精确的工艺控制会增加研发和生产成本,因此

迫切需要一种更高效且简单的方法来调和 TMCs 的综合力学性能。已有多种先进的辅助工艺成功应用于原位合成 TMCs 或 LAM 制造的钛合金,如超声波处理(超声振动、超声冲击、超声滚压等)、表面处理(喷丸、激光冲击强化、超声喷丸等)、电脉冲处理等^[87-92]。目前,针对 LAM 制备 TMCs 采用这些处理技术的研究较少。未来,尝试结合这些领域可能会有助于发现有效方法,突破 LAM 制备 TMCs 面临的挑战。

另外,不同的辅助工艺也可引入 TMCs 的 LAM 制造中,为调整它们的微观结构和力学性能带来更多机会。各种技术的结合意味着必须全面考虑多物理场耦合的复杂问题,包括热场、声场、磁场和形变场等^[93]。对于 TMCs 而言,基体和增强材料各自相演变行为及强化/增韧机制的深入研究将进一步扩大研究范围。随着各种模拟理念、方法论和计算工具的发展,这些深层机制和科学问题将得到更好的阐明。

4.2 表面纳米化技术与数字化仿真技术的深入研究

随着科技进步和材料科学的飞速发展,钛基复合材料(TMCs)作为高性能材料的代表,其表面纳米化技术与数字化仿真技术的结合正成为推动领域革新与突破的关键力量。在未来趋势中,表面纳米化技术通过精确调控材料表面的纳米结构,不仅能够显著增强 TMCs 的表面硬度、耐磨性和耐腐蚀性,还能通过引入生物活性涂层等策略优化其生物相容性,为医疗器械和植入物应用开拓新的可能性。此外,纳米结构的可控设计还能促进特殊功能性表面的定制,如自清洁或增强与其他材料的界面结合力,进一步拓宽 TMCs 的应用场景^[59]。

与此同时,数字化仿真技术,特别是多尺度模拟和人工智能算法的融入,为 TMCs 的设计、制造与性能预测提供了前所未有的精确度和效率。通过构建“过程-结构-性能”之间的内在联系模型,仿真技术能够优化 LAM(激光添加剂制造)工艺参数,预测热物理行为,减少缺陷形成,从而在制造前就可确保材料的高品质。此外,智能化仿真平台的持续发展将使材料设计更加灵活,加速新材料的探索与验证,为 TMCs 的性能优化和新型复合体系开发提供强有力支持^[94]。

总之,表面纳米化技术与数字化仿真技术的协同演进,预示着钛基复合材料领域将迎来一个融合高效制造、精准设计与性能优化的新时代。未来研究将侧重于两者的深度整合,旨在实现材料性能的极限提升,缩短研发周期,以及推动面向航空航天、

生物医疗等高精尖领域的定制化解决方案,开启 TMCs 创新应用的新篇章。

参考文献:

- [1] GAO K, ZHANG Y, YI J, et al. Overview of surface modification techniques for titanium alloys in modern[J]. *Material Science: A*, 2024, 14(1): 148.
- [2] 钟亮,付玉,徐永东,等. 钛基复合材料耐磨性研究进展[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(6): 36-42.
ZHONG L, FU Y, XU Y D, et al. Research progress on wear resistance of titanium matrix composites[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(6): 36-42.
- [3] 杨宇承,潘宇,路新,等. 粉末冶金法制备颗粒增强钛基复合材料的研究进展[J]. *粉末冶金技术*, 2020, 38(2): 150-158.
YANG Y C, PAN Y, LU X, et al. Research progress on particle-reinforced titanium matrix composites prepared by powder metallurgy method[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2020, 38(2): 150-158.
- [4] 高楚寒,吴文恒,张亮. 高温钛合金及钛基复合材料增材制造技术研究现状[J]. *粉末冶金技术*, 2023, 41(1): 55-62.
GAO C H, WU W H, ZHANG L. Research status of additive manufacturing technology used for high temperature titanium alloys and titanium matrix composites[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2023, 41(1): 55-62.
- [5] MIRACLE D B, DONALDSON S L. Metal matrix composites: from science to technological advancement[J]. *Composites Science and Technology*, 2016, 129: 54-61.
- [6] BANERJEE R, FRASER H L. High-temperature oxidation and hot corrosion of titanium and titanium alloys[J]. *International Materials Reviews*, 2010, 55(3): 131-160.
- [7] GEETHA M, SINGH A K, ASOKAMANI R. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants—a review[J]. *Progress in Materials Science*, 2009, 54(3): 397-425.
- [8] SCULLY J R, YOUNG D J J, FRANKEL G S. Corrosion and corrosion control[M]//ASM Handbook, Volume 13B: Corrosion: Materials. Ohio: ASM International, 2003: 1-57.
- [9] CHUNG D L. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials[J]. *Carbon*, 2001, 39(2): 279-285.
- [10] LIU W, CHEN L. Thermal management of high-power electronic devices using phase change materials[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 104: 1-21.
- [11] 韩远飞,邱培坤,孙相龙,等. 非连续颗粒增强钛基复合材料制备技术与研究进展[J]. *航空制造技术*, 2016,

- 59(15): 62-74.
- HAN Y F, QIU P K, SUN X L, et al. Preparation techniques and research progress of discontinuous particle-reinforced titanium matrix composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(15): 62-74.
- [12] 于振涛, 余森, 程军, 等. 新型医用合金材料的研发和应用现状[J]. *金属学报*, 2017, 53(10): 1238-1264.
- YU Z T, YU S, CHENG J, et al. Development and application of novel biomedical titanium alloy materials[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 53(10): 1238-1264.
- [13] 谭启明, 隋楠. 颗粒增强钛基复合材料的研究与进展[J]. *新材料产业*, 2019(1): 59-64.
- TAN Q M, SUI N. Research and progress of particle-reinforced titanium matrix composites[J]. *New Materials Industry*, 2019(1): 59-64.
- [14] 谷树德. 钛基复合材料制备方法 & 性能研究进展[J]. *材料开发与应用*, 2023, 38(1): 85-97.
- GU S D. Advances in preparation methods and performance research of titanium matrix composites[J]. *Materials Development & Application*, 2023, 38(1): 85-97.
- [15] PAN D, ZHANG X, HOU X D, et al. TiB nano-whiskers reinforced titanium matrix composites with novel nanoreticulated microstructure and high performance *via* composite powder by selective laser melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 799: 140137.
- [16] OTTE J A, ZOU J, PATEL R, et al. TiB nanowhisker reinforced titanium matrix composite with improved hardness for biomedical applications[J]. *Nano Materials (Basel, Switzerland)*, 2020, 10(12): E2480.
- [17] 钦兰云, 门继华, 赵朔, 等. TiB 含量对选区激光熔化 TiB/Ti-6Al-4V 复合材料组织及力学性能的影响[J]. *中国激光*, 2021, 48(6): 0602102.
- QIN L Y, MEN J H, ZHAO S, et al. Effect of TiB content on microstructure and mechanical properties of TiB/Ti-6Al-4V composites formed by selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(6): 0602102.
- [18] XIONG Y, DU M, ZHANG F, et al. Preparation and mechanical properties of titanium alloy matrix composites reinforced by Ti_3AlC and TiC ceramic particulates[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 886: 161216.
- [19] MARKOVSKY A P E, SAVVAKINA D G, STASYUK O O, et al. Significant hardening effect of high-temperature aging of alloy Ti-6Al-4V composite reinforced with TiC[J]. *Materials & Design*, 2023, 234: 112208.
- [20] 王振玲, 于玉城, 李睿智, 等. 真空感应悬浮熔炼 (TiC+TiB) 增强钛基复合材料组织及高温拉伸性能研究[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(5): 54-61.
- WANG Z L, YU Y C, LI R Z, et al. Microstructure and high temperature tensile properties of (TiC+TiB) reinforced titanium matrix composites by vacuum induction suspension melting[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(5): 54-61.
- [21] WEI L X, LIU X Y, GAO Y Z, et al. Synergistic strengthening effect of titanium matrix composites reinforced by graphene oxide and carbon nanotubes[J]. *Materials & Design*, 2021, 197: 109261.
- [22] HU Z, TONG G, NIAN O, et al. Laser sintered single layer graphene oxide reinforced titanium matrix nanocomposites[J]. *Composites Part B*, 2016, 93: 352-359.
- [23] LIU J O, HU N, LIU X Y, et al. Microstructure and mechanical properties of graphene oxide-reinforced titanium matrix composites synthesized by hot-pressed sintering[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2019, 14: 114.
- [24] 神祥博. SPS 制备 TiB 增强 Ti 基复合材料的组织结构及力学性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- SHEN X B. Microstructure and mechanical properties of *in situ* TiB reinforced titanium matrix composite prepared by SPS dissertation[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
- [25] HUANG L J, GENG L, PENG H X. Microstructurally inhomogeneous composites: is a homogeneous reinforcement distribution optimal[J]. *Progress in Materials Science*, 2015, 71: 93-168.
- [26] HUANG L, AN O, GENG L, et al. Multiscale architecture and superior high-temperature performance of discontinuously reinforced titanium matrix composites[J]. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla)*, 2021, 33(6): e2000688.
- [27] LIU C, HUANG L J, GENG L, et al. *In situ* synthesis of (TiC + Ti_3SiC_2 + Ti_5Si_3)/Ti-6Al-4V composites with tailored two-scale architecture[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2015, 17(7): 933-941.
- [28] CAI C, SONG B, OIU C, et al. Hot isostatic pressing of *in-situ* TiB/T-6Al-4V composites with novel reinforcement architecture, enhanced hardness and elevated tribological properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 710: 364-374.
- [29] ZHANG F, DU M, FAN K, et al. Fabrication and mechanical properties of network structured titanium alloy matrix composites reinforced with Ti_2AlC particulates[J]. *Materials Science and Engineering*, 2020, 776(3): 139065.
- [30] BAI M, MOHSEN R, XU Y, et al. *In-situ* Ti-6Al-4V/TiC composites synthesized by reactive spark plasma sintering: processing microstructure, and dry sliding wear behaviour[J]. *Wear*, 2019, 432/433: 202944.
- [31] GÜRBÜZ M, MUTUK T, UYAN P. Mechanical, wear and thermal behaviors of graphene reinforced titanium

- composites[J]. *Metals and Materials International*, 2020, 118: 1-9.
- [32] 姬寿长, 李京龙, 李争显, 等. TC21 钛合金表面处理技术的研究现状[J]. *热加工工艺*, 2021(4): 17-20.
JI S C, LI J L, LI Z X, et al. Research status surface treatment technology on TC21 titanium alloy[J]. *Hot Working Process*, 2021(4): 17-20.
- [33] 黄雪丽, 谭君国, 张腾飞, 等. 钛合金表面 TiN/CrN 纳米多层薄膜的制备及耐磨、耐腐蚀性能[J]. *材料导报*, 2021, 35(4): 4139-4143.
HUANG X L, TAN J G, ZHANG T F, et al. Deposition and anti-wear/corrosion properties of nano-multilayer TiN/CrN films on titanium alloy[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(4): 4139-4143.
- [34] 刘元才, 孙启胜, 刘志远, 等. 氮化硼对 TB8 钛合金微弧氧化膜及其耐磨性的影响[J]. *青岛理工大学学报*, 2020, 41(6): 102-107.
LIU Y C, SUN Q S, LI Z Y, et al. Effect of BN on micro arc oxidation film and wear resistance of TB8 titanium alloy[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2020, 41(6): 102-107.
- [35] 刘世锋, 宋玺, 薛彤, 等. 钛合金及钛基复合材料在航空航天中的应用和发展[J]. *航空材料学报*, 2020, 40(3): 77-94.
LIU S F, SONG X, XUE T, et al. Application and development of titanium alloy and titanium matrix composites in aerospace field[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2020, 40(3): 77-94.
- [36] 汤海芳, 赵永庆, 洪权, 等. 稀土元素对高温钛合金组织和性能的影响[J]. *钛工业进展*, 2010, 27(1): 16-21.
TANG H F, ZHAO Y Q, HONG Q, et al. Effects of rare earth elements on the structure and properties of high-temperature titanium alloy[J]. *Titanium Industry Progress*, 2010, 27(1): 16-21.
- [37] 丁超. 粉末冶金 Ti600 合金组织和性能的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
DING C. Study on the microstructure and properties of powder metallurgy Ti600 alloy[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
- [38] 穆啸楠, 张洪梅, 王宇. 石墨烯增强钛基复合材料研究进展[J]. *中国材料进展*, 2024, 43(3): 212-221.
MU X N, ZHANG H M, WANG Y. Progress on graphene reinforced titanium matrix composites[J]. *Materials China*, 2024, 43(3): 212-221.
- [39] 黄陆军. 粉末冶金网状结构钛基复合材料基础与应用探索[J]. *粉末冶金技术*, 2024, 42(1): 1-10.
HUANG L J. Exploration of the basic and application of titanium matrix composites with porous metal structure[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2024, 42(1): 1-10.
- [40] PAN U, YANG Y C, ZHOU Q J, et al. Achieving synergy of strength and ductility in powder metallurgy commercially pure titanium by a unique oxygen scavenger[J]. *Acta Materialia*, 2024, 263: 119845.
- [41] 刘静怡, 李文辉, 李秀红, 等. 航空零部件的金属增材制造光整加工技术研究进展[J]. *表面技术*, 2023, 52(12): 20-41.
LIU J Y, LI W H, LI X H, et al. Advances in finishing techniques for metal additive manufactured aerospace components[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(12): 20-41.
- [42] CHEN L, HE Y, YANG Y X, et al. The research status and development trend of additive manufacturing technology[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89(9): 3651-3660.
- [43] ALADESANMI V L, FATOBA O S, AKINLABI E T, et al. Regression analysis of hardness property of laser additive manufactured (LAM) Ti and TiB₂ metal matrix composite[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 44: 1249-1253.
- [44] NIU H Z, YIN B G, ZHANG H R, et al. Multiphase polymorphic nanoparticles reinforced titanium matrix composite produced by selective electron beam melting of a prealloyed composite powder[J]. *Scripta Materialia*, 2021, 200: 113916.
- [45] WANG Z, BAI X, QUE M, et al. Wire arc additive manufacturing of network microstructure (TiB+TiC) / Ti6Al4V composites using flux-cored wires[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(3): 4168-4176.
- [46] ZHONG C, GASSER A, BACKES G, et al. Laser additive manufacturing of Inconel 718 at increased deposition rates[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 844: 143196.
- [47] ELMER J W, GIBBS G, CARPENTER J S, et al. Wire-based additive manufacturing of stainless steel components[J]. *Welding Journal*, 2020, 99(1): 8s-24s.
- [48] LIU S, SHIN Y C. The influences of melting degree of TiC reinforcements on microstructure and mechanical properties of laser direct deposited Ti6Al4V-Ti composites[J]. *Material & Design*, 2017, 136: 185-195.
- [49] LIU D, ZHANG Q, LI A, et al. Microstructure and tensile properties of laser melting deposited TiC/TA15 titanium matrix composites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 485(1): 156-162.
- [50] ZHOU S, ZHAO Y, WANG X, et al. Enhanced corrosion resistance of Ti-5 wt, % TiN composite compared to commercial pure Ti produced by selective laser melting in HCl solution[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 820: 153422.
- [51] ZHAO Y, WU C, ZHOU S, et al. Selective laser melting

- of Ti-TiN composites: formation mechanism and corrosion behaviour in H_2SO_4/HCl mixed solution[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 863: 158721.
- [52] LI B, HAN C, VIVEGANANTHAN P, et al. Refined microstructure and ultrahigh mechanical strength of (TiN + TiB)/Ti composites *in situ* synthesized via laser powder bed fusion[J]. *Additive Manufacturing Letters*, 2022, 3: 100082.
- [53] 覃群, 王天国, 范宏训. 粉末冶金原位合成法制备钛基复合材料的研究进展[J]. *粉末冶金工业*, 2010, 20(5): 42-46.
- QIN Q, WANG T G, FAN H X. Research progress in preparation of titanium matrix composites by *in-situ* synthesis via powder metallurgy[J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2010, 20(5): 42-46.
- [54] LEE K H, YUN G J. A novel heat source model for analysis of melt pool evolution in selective laser melting process[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 36: 101497.
- [55] LI H. Micro selective laser melting of NiTi shape memory alloy: defects, microstructures and thermal/mechanical properties[J]. *Opt Laser Technol*, 2020, 131: 106374.
- [56] ZHENG Y Z, WANG J D, LIU X R, et al. Laser additive manufacturing of ceramic reinforced titanium matrix composites: a review of microstructure, properties, auxiliary processes, and simulations[J]. *Composites Part A*, 2024, 177: 107941.
- [57] 徐圣航, 沈凯杰, 张惠斌, 等. 钛及钛合金表面自纳米化行为研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(11): 3141-3160.
- XU S H, SHEN K J, ZHANG H B, et al. Progress in research on self-nanocrystallization behavior of titanium and titanium alloys surfaces[J]. *Journal of China Nonferrous Metals Society*, 2021, 31(11): 3141-3160.
- [58] 于春杭, 邵红红, 许晓静. 钛基材料纳米化对 TiO_2 薄膜力学性能影响研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41(2): 320-323.
- YU C H, SHAO H H, XU X J. Study on the influence of nanocrystallization of titanium substrate on the mechanical properties of TiO_2 films[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41(2): 320-323.
- [59] 任淮辉, 李旭东. 三维材料微结构设计数值模拟[J]. *物理学报*, 2009, 58(6): 4041-4052.
- REN H H, LI X D. Three-dimensional microstructural design and numerical simulation of materials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(6): 4041-4052.
- [60] 段冰冰, 王治国, 蔡晋, 等. 钛合金表面纳米化强化研究进展[J]. *表面技术*, 2021, 50(12): 202-216.
- DUAN B B, WANG Z G, CAI J, et al. Advances in nanocrystalline strengthening of titanium alloy surfaces[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(12): 202-216.
- [61] 陶然, 贺春旺, 罗俊荣, 等. 复合材料构件设计理论及仿真研究进展[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(1): 121-130.
- TAO R, HE C W, LUO J R, et al. Advances in design theory and simulation research of composite components[J]. *China Engineering Science*, 2023, 25(1): 121-130.
- [62] 韩远飞, 孙相龙, 邱培坤, 等. 颗粒增强钛基复合材料先进加工技术研究进展[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(8): 1625-1635.
- HAN Y F, SUN X L, QIU P K, et al. Research and progress on advanced machining technologies for particle-reinforced titanium matrix composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 2017, 34(8): 1625-1635.
- [63] 吕维洁, 韩远飞, 孙相龙, 等. 颗粒增强钛基复合材料等温热变形与组织演化规律[J]. *精密成形工程*, 2017, 9(4): 12-16.
- LV W J, HAN Y F, SUN X L, et al. Isothermal hot deformation and microstructural evolution of particle-reinforced titanium matrix composites[J]. *Journal of Net-shape Forming Engineering*, 2017, 9(4): 12-16.
- [64] WEI S, HUANG L J, LI X, et al. Network-strengthened Ti-6Al-4V/(TiC+TiB) composites: powder metallurgy processing and enhanced tensile properties at elevated temperatures[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2019, 50(8): 3629-3645.
- [65] 王敏涓, 黄浩, 王宝, 等. 连续 SiC 纤维增强钛基复合材料应用及研究进展[J]. *航空材料学报*, 2023, 43(6): 1-19.
- WANG M J, HUANG H, WANG B, et al. Application and research progress of continuous SiC fiber reinforced titanium matrix composites[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2023, 43(6): 1-19.
- [66] 汪广平, 陈涛, 徐志鹏, 等. 钛基复合材料加工技术研究进展[J]. *金属加工(冷加工)*, 2023(7): 1-8.
- WANG G P, CHEN T, XU Z P, et al. Research progress in machining technologies for titanium matrix composites[J]. *Metal Processing(Cold Working)*, 2023(7): 1-8.
- [67] 弭光宝, 陈航, 李培杰, 等. 石墨增强钛基复合材料界面调控及强化机理研究进展[J]. *航空材料学报*, 2023, 43(6): 20-35.
- MI G B, CHEN H, LI P J, et al. Advances in interface modulation and strengthening mechanisms of graphite reinforced titanium matrix composites[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2023, 43(6): 20-35.
- [68] 李德溥, 姚英学, 袁哲俊. 颗粒增强金属基复合材料的特种加工研究现状[J]. *机械制造*, 2006, 44(10): 65-68.
- LI D P, YAO Y X, YUAN Z J. Current research status of special processing of particle-reinforced metal matrix composites[J]. *Machinery Manufacturing*, 2006, 44(10): 65-68.

- [69] 张珍桂. 耐热钛基复合材料(TiB+La₂O₃)/Ti的微结构及力学性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
ZHANG Z G. Microstructure and mechanical properties of heat-resistant titanium matrix composites (TiB+La₂O₃)/Ti[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [70] ZHANG Y, LI X, WANG C, et al. Hierarchical microstructure design for synergistically strengthening and toughening titanium matrix composites at elevated temperatures[J]. *Composites Part B*, 2022, 230: 109532.
- [71] 高翔, 鲁晓楠, 李建超, 等. 增材制造钛基复合材料体系与组织结构研究[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(4): 1633-1652.
GAO X, LU X N, LI J C, et al. System and microstructure design of additively manufactured titanium matrix composite materials[J]. *Journal of Composite Materials*, 2024, 41(4): 1633-1652.
- [72] 成小乐, 尹君, 屈银虎, 等. 连续碳化硅纤维增强钛基(SiC_f/Ti)复合材料的制备技术及界面特性研究综述[J]. *材料导报*, 2018, 32(5): 796-807.
CHENG X L, YIN J, QU Y H, et al. A review on preparation techniques and interfacial characteristics of continuous silicon carbide fiber reinforced titanium matrix (SiC_f/Ti) composites[J]. *Materials Reports*, 2018, 32(5): 796-807.
- [73] 胡满银. 原位自生制备 TiC 颗粒增强钛基复合材料的组织与性能研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2021.
HU M Y. Study on the microstructure and properties of in situ synthesized TiC particle reinforced titanium matrix composites[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2021.
- [74] 董龙龙, 王圆梦, 崔文芳, 等. 纳米碳强化钛基复合材料界面结构与性能优化研究进展[J]. *中国材料进展*, 2023, 42(12): 942-958.
DONG L L, WANG Y M, CUI W F, et al. Advances in interface structure and property optimization of nano-carbon reinforced titanium matrix composites[J]. *Progress in Materials Science in China*, 2023, 42(12): 942-958.
- [75] FAN R, ZHENG Q, LIU Y, et al. Insights into the interfacial bonding strength of TiB/Ti: a first principles study[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 126(3): 035304.
- [76] 吴诚福, 李新意, 陈洪胜, 等. 激光增材制造 WC_p 钛基复合材料界面连接机理及力学性能[J]. *焊接学报*, 2023, 44(3): 44-53.
WU C F, LI X Y, CHEN H S, et al. Interface bonding mechanism and mechanical properties of laser additive manufactured WC_p-titanium matrix composites[J]. *Welding Journal*, 2023, 44(3): 44-53.
- [77] 胡满银, 欧阳德来, 崔霞, 等. 微波烧结原位合成 TiC 增强钛复合材料的性能[J]. *材料研究学报*, 2021, 35(4): 277-283.
HU M Y, OUYANG D L, CUI X, et al. Properties of microwave sintered *in situ* synthesized TiC reinforced titanium composites[J]. *Journal of Materials Research*, 2021, 35(4): 277-283.
- [78] 董国军, 王磊, 高胜东. TiB_w 网状增强钛基复合材料旋转超声磨削的磨削力模型[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2022, 42(1): 97-103.
DONG G J, WANG L, GAO S D. Grinding force model of rotary ultrasonic grinding of TiB_w network-reinforced titanium matrix composites[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2022, 42(1): 97-103.
- [79] 李少夫, 杨亚锋. 用于制备高性能钛基复合材料的碳包覆钛复合粉体研究进展[J]. *粉末冶金技术*, 2022, 40(5): 421-430.
LI S F, YANG Y F. Research progress of carbon-coated titanium composite powder for preparing high-performance titanium matrix composites[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2022, 40(5): 421-430.
- [80] 赵彪. 钛基复合材料高速磨削加工性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
ZHAO B. Research on high-speed grinding machinability of titanium matrix composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [81] 陈玮, 李志强. 航空钛合金增材制造的机遇和挑战[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(10): 30-37.
CHEN W, LI Z Q. Opportunities and challenges of additive manufacturing of aerospace titanium alloys[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(10): 30-37.
- [82] WEI W, ZHANG Q, WU W, et al. Agglomeration-free nanoscale TiC reinforced titanium matrix composites achieved by *in-situ* laser additive manufacturing[J]. *Scripta Mater*, 2020, 187: 310-316.
- [83] WEI W, WU W, FAN S, et al. *In-situ* laser additive manufacturing of Ti6Al4V matrix composites by gas-liquid reaction in dilute nitrogen gas atmospheres[J]. *Material & Design*, 2021, 202: 109578.
- [84] YANG Y, ZHANG J, WEI W. Microstructure and mechanical properties of TiC/Ti6Al4V nanocomposites fabricated by gas-liquid reaction laser powder bed fusion[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 869: 144829.
- [85] WEI W, ZHU L, WU W, et al. TiC/Ti6Al4V functionally graded composite fabricated by *in-situ* laser additive manufacturing *via* gas-liquid reaction[J]. *J Alloy Compd*, 2022, 900: 163406.
- [86] ZHU L, ZHANG K, FAN S, et al. Ti6Al4V matrix composites fabricated by laser powder bed fusion in dilute

- nitrogen[J]. *Mater Sci Tech-Lond*, 2022, 38(4): 207-214.
- [87] WEN Y, WU Y, HUA L, et al. Effects of shot peening on microstructure evolution and mechanical properties of surface nanocrystal layer on titanium matrix composite[J]. *Material & Design*, 2021, 206: 109760.
- [88] LV J, LUO K, LU H, et al. Achieving high strength and ductility in selective laser melting Ti-6Al-4V alloy by laser shock peening[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 899: 163335.
- [89] CHI J, CAI Z, ZHANG H, et al. Combining manufacturing of titanium alloy through direct energy deposition and laser shock peening processes[J]. *Material & Design*, 2021, 203: 109626.
- [90] ZHANG Q, DUAN B, ZHANG Z, et al. Effect of ultrasonic shot peening on microstructure evolution and corrosion resistance of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy[J]. *J Mater Res Technol*, 2021, 11: 1090-1099.
- [91] SHAO H, ZHANG H, SHAN D, et al. Evolution behavior of abnormal grain region in Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe titanium alloy under the electro pulsing treatment[J]. *Mater Charact*, 2021, 181: 111504.
- [92] XU X, KANG Q, LIU Y, et al. Effects of electro pulsing treatment on the microstructural evolution of hot-rolled TiB_w/TA15 composite billet with a network architecture[J]. *Mater Charact*, 2022, 194: 112341.
- [93] TAN C, LI R, SU J, et al. Review on field assisted metal additive manufacturing[J]. *Int J Mach Tool Manu*, 2023, 189: 104032.
- [94] ANDREA B, YANG S. Recent findings from University of California Berkeley Provides new insights into artificial intelligence (a state-of-the-art review on machine learning-based multiscale modeling, simulation, homogenization and design of materials) [N]. *Robotics & Machine Learning Daily News*, 2022.

收稿日期: 2024-06-07; 录用日期: 2024-12-26

通讯作者: 杨宝(1991—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为新材料研发、炼钢过程工艺优化和连铸坯质量控制等, 联系地址: 陕西省汉中市勉县定军山镇陕钢集团汉中钢铁有限责任公司(724207), E-mail: ybvip1991@163.com

(本文责编: 王俊丽)