

增材制造 Ti 基复合材料的研究进展

宫书林, 张煜, 宋美慧, 李岩, 李艳春

(黑龙江省科学院高技术研究院, 哈尔滨 150000)

摘要: 随着航空航天、汽车工业等领域的快速发展, Ti 基复合材料 (TMCs) 因其高强度、低密度、高温耐久性和优异的耐磨性而受到广泛的关注, 通过增材制造技术制备的 Ti 基复合材料有着广泛的应用前景。在 Ti 基材料中添加合适的强化相可改变复合材料的微观结构和性能。介绍了几种常用的增材制造方法及其特点, 包括选区激光熔化 (SLM)、激光金属沉积技术 (LMD)、电子束熔化技术 (EBM) 和激光近净成形技术 (LENS), 综述了通过原位反应生成和直接添加强化相对 Ti 基复合材料的影响, 为进一步研究增材制造增强钛合金及复合材料性能提供了理论依据。

关键词: 增材制造; Ti 基复合材料; 强化相; 力学性能

中图分类号: TB333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8646(2024)16-0027-05

Research Progress on Additive Manufacturing of Ti-matrix Composites

Gong Shulin, Zhang Yu, Song Meihui, Li Yan, Li Yanchun

(Institute of Advanced Technology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150000, China)

Abstract: With the rapid development of aerospace and automotive industries, Ti-matrix composites (TMCs) have received extensive attention from advanced engineering materials due to their high strength, low density, high temperature durability, and excellent abrasion resistance. Ti-matrix composites prepared by additive manufacturing technology have a wider range of application prospects. By adding suitable reinforcing phases to Ti-matrix materials, the microstructure and properties of composites can be changed. The study introduces several commonly used additive manufacturing methods and their characteristics, including selective laser melting (SLM), laser metal deposition (LMD), electron beam melting (EBM) and laser near-net-shaping (LENS); and summarizes the effects of generating and directly adding reinforcing phases to Ti-matrix composites through in situ reaction, so as to provide a theoretical basis for further research on the properties of Ti-matrix composites reinforced by additive manufacturing.

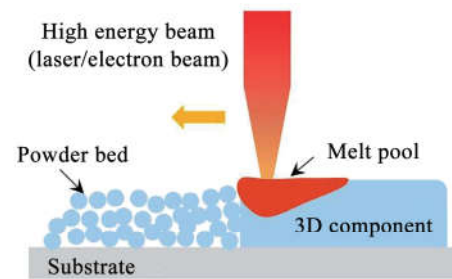
Key words: Additive manufacturing; Ti-matrix composites; Intensive phase; Mechanical properties

0 引言

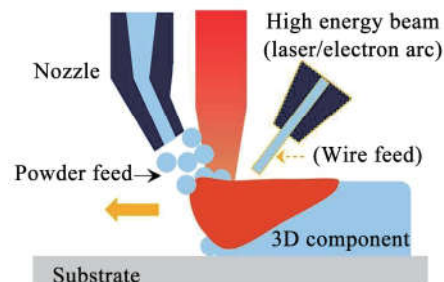
增材制造 (AM) 也被称为 3D 打印、快速成形 (RP) 或固体自由成形 (SFF), 是一种在基体上逐层添加材料并创造实物的过程。其克服了传统减材加工技术存在的局限性, 在近几年得到了迅速发展, 引起了广泛关注。与传统技术相比, 增材制造具有明显的优势, 不仅可以减少加工工序, 缩短加工周期, 在理论上可以在没有模具的情况下制造任何形状的结构, 进而避免材料制备过程中的浪费^[1-3]。

随着新材料和增材制造方法的不断发展, 金属材料在增材制造领域的应用更为广泛。金属增材制造

(MAM) 可分为粉末床融合技术 (PBF) 和直接能量沉积技术 (DED) 两大类, 如图 1 所示^[4]。



(a) 粉末床融合技术



(b) 直接能量沉积技术

图 1 金属增材制造

Fig. 1 Metal additive manufacturing

收稿日期: 2024-04-01

基金项目: 黑龙江省科学院人才项目 (RC2023GY01); 省属科研院所科研业务费项目 (CZKYF2023-1-C039)

作者简介: 宫书林 (1997-), 男, 硕士, 研究实习员。

通讯作者: 张煜 (1988-), 男, 博士, 副研究员。研究方向: 功能复合材料。E-mail: zhangyunjust@163.com。

PBF 主要通过激光等热源熔化粉末使其与前一层或底座融合,逐层构建金属部件,包括选区激光熔化 (SLM)^[5]、选区激光烧结(SLS)^[6]、直接金属激光烧结 (DMLS)^[7]及电子束熔化 (EBM)^[8]等工艺。DED 是在所需构建的位置上直接输入能量,将金属粉末或丝材熔化并逐渐堆积构件进而制造零件,包括直接金属沉积(DMD)^[9]、激光近净成形 (LENS)^[10]、激光金属沉积(LMD)^[11]和电弧增材制造(WAAM)^[12]等工艺。

钛合金是一种新型轻质金属材料,具有密度低、比强度高、耐腐蚀性好等优点^[13],在航空航天、车辆轨道交通、医学工程等领域发挥着重要作用。但其存在硬度低、耐磨性差、高温氧化抗力差等问题,限制了其应用范围,故探索利用增材制造技术来克服磨损、腐蚀和疲劳等问题。

本研究综述了几种常用的金属增材制造工艺及通过添加适当的强化相来改善 Ti 基复合材料组织和性能,对此类材料的发展前景进行展望,为进一步研究激光加工增强钛合金及复合材料性能提供理论依据。

1 金属增材制造技术

1.1 选区激光熔化

选区激光熔化技术是通过与 CAD 相结合,将几何数据模型加载到软件中,利用高能量激光束对粉末进行逐层扫描,使其通过熔化、凝固达到冶金结合的增材制造工艺。图 2 为 SLM^[14]。SLM 可加工的材料范围广,如镍基高温合金、钛合金、钴铬合金、难熔金属等,其制备的材料成形精度高,后续处理较为容易,利用高能激光束熔化金属粉末可制备形状复杂的结构^[15-16]。作为 PBF 技术之一,其采用铺粉的方式进行逐层制造,因此粉末的初始状态(流动性、球形度、粉末粒度、致密度等)对部件的成形有很大影响。

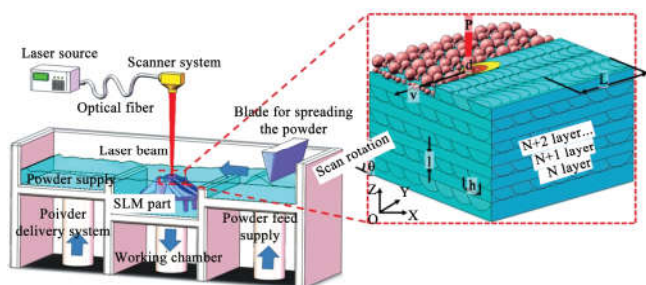


图 2 选区激光熔化

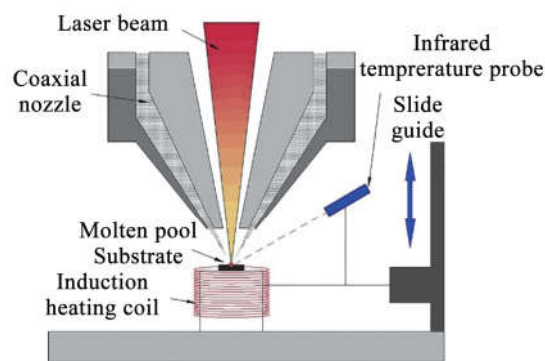
Fig. 2 SLM

1.2 激光金属沉积

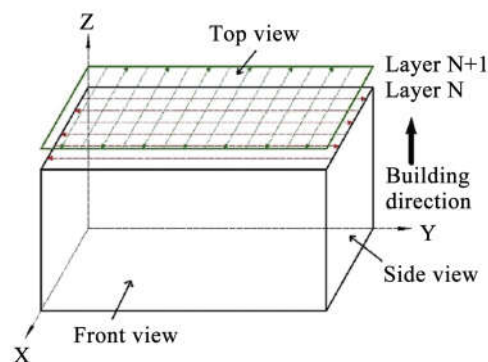
激光金属沉积是一种重要的金属增材制造技术,是 DED 的一个重要分支,以激光作为能量源熔化粉末状金属颗粒并采用逐层累加的方法制造实体,是一种自下而上的制造方法,相对于利用传统材料的减材制

造技术,实现了直接从 CAD 模型到零件的制造,如图 3 所示^[17]。

目前,LMD 技术已广泛应用于航空航天、汽车制造、船舶海洋等多个领域^[18-19]。与 SLM 相比,其技术优势是突破了制造零件的尺寸限制,冷却速度较快,组织更细小^[20],可获得更优异的力学性能。刘泽人等^[21]利用 LMD 技术制备了 Ti-Zr-Ta 难熔金属型含能结构材料,合金致密度达到 98.75%,具有良好的力学性能,准静态抗拉强度达到 1202 MPa。



(a) 感应加热



(b) 激光金属沉积扫描策略

图 3 激光金属沉积成形工艺

Fig. 3 LMD forming process

1.3 电子束熔化

电子束熔化利用超高速电子束作为热源,采用较大粒径粉末实现近净成形,可实现逐层加热与保温,达到降低温度梯度和热应力的作用^[22],如图 4 所示^[23]。EBM 具有更高的能量密度,扫描速度快,可提供更高效的制造率,与传统的铸件相比,能生产出机械性能更好的全致密件。

与其他增材制造技术方法相比,EBM 作为逐层制造金属零件的成熟技术,在制备复杂结构方面具有独特的工艺优势,特别是以 Ti 基材料为基础,生产具有全密度、预制外部形状和内部结构的多孔结构^[24]。预热是 EBM 中特有的步骤,在真空环境下可有效减少增材制造零件的热裂倾向^[25-26]。使用 EBM 生产的零件在涡轮叶片、泵叶轮、涡轮增压器和轮毂中都有广泛应用^[27]。

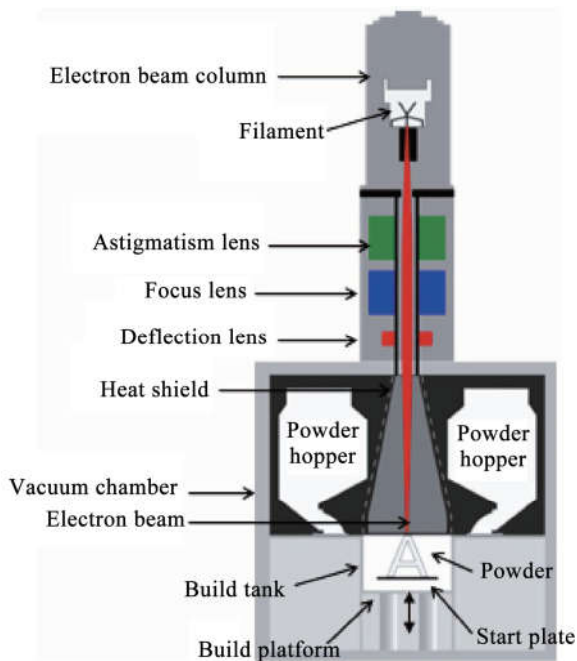


图4 电子束熔化
Fig. 4 EBM

1.4 激光近净成形

激光近净成形作为一种增材制造技术,适用于金属材料的制造,其根据 CAD 进行三维近净成形,制备高密度金属零件,采用高能激光束,以逐轨逐层模式在基底上直接沉积设计好的三维部件^[28]。图 5 为 LENS,利用高能激光束在 X-Y 工作台的基板上形成熔池,粉末被送到熔池中直至熔化,随着 X-Y 工作台按程序移动,液态金属迅速凝固,形成单层沉积。随后,粉末输送系统和激光头向上移动一层厚度开始沉积第二层。此过程重复进行,以产生一定高度的沉积^[29]。LENS 可加工多种金属,包括 Ti、Ni 基超合金、不锈钢和工具钢等,能够控制材料的凝固速率,制备单晶材料及定向结构材料,可对零件进行修复和翻新。但不足之处是表面光洁度差、沉积速度慢、制造精度低等^[30],与 SLM 相比不易制备较为复杂的结构。

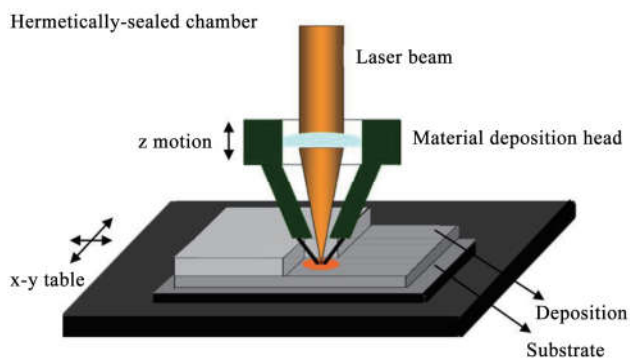


图5 激光近净成形
Fig. 5 LENS

2 Ti 基材料的强化相

与传统的合金相比,金属基复合材料是以改善机

械性能、耐蚀耐磨性能、抗高温氧化性能等为目的应用于特定环境下^[31],增强相可分布在基材中,包括晶须、纤维及颗粒形状,其中纤维包括长短纤维,沿着长纤维的方向具有较好的力学性能,但具有各向异性,而短纤维会呈现各向同性,特定性能没有长纤维好^[32],而颗粒相分布在材料中具有更优的综合性能,成本相对较低,得到了广大研究者的青睐。颗粒相可以通过原位或非原位加工方法获得,原位生成强化相的复合材料具有更好的热稳定性和界面结合能力^[33]。以下是改善 Ti 基材料主要应用的增强相。

2.1 原位制备强化相

在 Ti 基体中通常添加含有 B、C 等作为增强复合材料的元素,在复合材料中通过原位合成方法制备的 TiB 增强相具有热力学的稳定性、细小的尺寸、分布均匀、与 Ti 基的冶金结合度高、刚度和硬度优异等优势,对 Ti 合金的耐磨性有改善^[34],但 Ti 是强碳化物形成元素,与碳容易发生化学反应快速原位生成 TiC,进而改善复合材料的性能。Hu 等^[35]利用激光近净成形工艺原位制备了 TiB 增强 Ti 基复合材料(TiB-TMCs),在其组织内部生成了棱柱形初生 TiB 和针状共晶 TiB 两种新相,TiB-TMCs 具有较好的耐磨损性能,通过优化激光功率,减少了内部缺陷,改善了复合材料的磨损性能。Zhao 等^[36]利用 SLM 技术,将 TC4 合金粉末和石墨烯粉末混合,制备纳米 TiC 颗粒增强的 Ti6Al4V 复合材料。在复合材料中,纳米 TiC 可有效阻碍位错、细化晶粒,提高复合材料的机械性能。Dadbakhsh 等^[37]采用选择性激光熔化制备 Ti/10.5 wt. % Mo₂C 复合材料。原位生成的 TiC 晶须增强亚稳 β -Ti 基体,利用原位生成的 TiC 增强 β -Ti 合金的硬度超过 500 HV,杨氏模量为 126 GPa,极限抗压强度为 1642 MPa。TiN 是具有高熔点、高硬度和良好化学稳定性的高温结构材料^[38],在高能激光束的作用下 Ti 基复合材料与 BN 相互作用,可发生化学反应原位合成 TiB 和 TiN 相。

2.2 非原位添加强化相

TiB₂ 颗粒是一种具有高强度、高熔点和高模量的陶瓷颗粒,粒径为 80 ~ 500 nm,凭借出色的特性在复合材料领域受到了广泛关注^[39-40]。由于热膨胀系数相似,TiB 和 Ti 之间界面的残余应力会受到抑制^[30],TiC 颗粒作为钛合金中的增强材料^[41]具有良好的导热性、高模量和与 Ti 相近的密度,是增强材料的理想选择^[42-43]。Radhakrishnan 等^[44]利用激光定向能量沉积制备 Ti/TiC 复合材料,并对其性能进行探究。结果表明,随着 TiC 的加入可使复合材料的硬度、耐磨性等

得到改善。TiC 的加入可以在一定程度上保持复合材料的轻量化。与传统的 Ti 合金相比,加入 SiC 强化相制备的 Ti 基复合材料具有更高的比强度、比刚度和更优异的抗蠕变及疲劳性能,在航空航天、轨道交通等领域具有越来越重要的地位^[45]。杨延清等^[46]对 SiC 纤维增强 Ti 基复合材料的界面进行研究。结果表明,界面反应产物通常呈层状分布,产物类型与基体种类和纤维涂层种类有关。

WC 作为一种陶瓷颗粒相,具有较高的硬度、良好的耐磨性及化学稳定等特点, Farayibi^[47]在 Ti 基材料中加入 WC 颗粒相,提高了复合材料的硬度和耐磨性,这是由于 WC 本身具有较高的硬度,WC 颗粒与 Ti 基体形成 TiC 和 W 固溶体沉淀,从而进一步提高了复合材料的耐磨性。吴诚福等^[48]选用激光增材选区熔化技术制备 WC 颗粒增强 TC4 复合材料,在 WC/基体的界面处形成了一层 TiC 和 W_2C 界面层,界面结合性能良好。当 WC 含量为 10%、激光功率为 180 W 时,复合材料的最高抗拉强度可达 1037 MPa,断裂机理主要为 WC 颗粒的脆性断裂和沿 WC - W_2C 界面的层状撕裂。Zhao 等^[49]采用 SLM 制备 Ti - TiN 复合材料,对其显微组织及腐蚀行为进行分析。与商业纯钛(CP - Ti)相比,Ti - TiN 复合材料具有更高的腐蚀抗性,这归因于细小的晶粒、初期的快速钝化和 α' - Ti 中合金反应层的腐蚀阴影保护效应的共同影响。

3 展望

Ti 合金作为近年来应用最为广泛的一类合金与传统的 Ti 合金加工手段相比,利用金属增材制造 Ti 合金可节约原材料,实现近净成形,降低成本,提高生产效率,满足复杂结构件的性能要求。通过原位生成或直接加入强化相制备的 Ti 基复合材料具有优异的力学性能、生物相容性和耐腐蚀性等,在航空航天、汽车领域具有广泛的应用前景。随着金属增材制造技术的发展,Ti 基复合材料研究将成为未来的研究热点之一。

增强相的选择和优化及提高材料性能与应用范围是 Ti 基复合材料的主要关注点。在 Ti 基复合材料中,常见的强化相包括陶瓷相(如 TiC、TiN 等)、金属相(如 W、Mo、Al 等)及长短纤维等形态的强化相。对不同强化相进行选择和优化能够进一步提高材料的强度、硬度和耐磨性等。加工方法和工艺对 Ti 基复合材料的显微组织和性能具有很大影响,通过引入新的工艺方法如 SLM、LMD、EBM、LENS 等,可实现对复合材料显微组织的精确控制和优化,提升其综合性能。为

满足更为严苛的应用环境,需进一步优化其耐高温、耐腐蚀等性能。

参考文献:

- [1] Wang WQ, Zhang L, Dong XJ, et al. Additive manufacturing of fiber reinforced ceramic matrix composites: advances, challenges, and prospects[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(14): 19542 - 19556.
- [2] Mohamad A, Guilé NM, Bahaa S, et al. Advancements in laser wire-feed metal additive manufacturing: a brief review[J]. *Materials*, 2023, 16(05): 2030.
- [3] Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, et al. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 143: 172 - 196.
- [4] Liu ZY, Zhao ZD, Wang P, et al. Additive manufacturing of metals: microstructure evolution and multistage control[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 100(05): 224 - 236.
- [5] 耿冬妮,陈晋市,师海月. 激光增材制造技术制备高熵合金研究进展[J]. *粉末冶金技术*, 2022, 40(03): 195 - 203.
- [6] 刘景博,刘世锋,刘全明,等. 选区激光烧结对粉末材料研究进展[J]. *兵器材料科学与工程*, 2018, 41(04): 111 - 116.
- [7] Ramosena LA, Dzugbewu TC, Preez WD. Direct metal laser sintering of the ti6al4v alloy from a powder blend [J]. *Materials*, 2022, 15(22): 8193.
- [8] Necati U, Adem Ç, Kubilay A. Machinability of 3D printed metallic materials fabricated by selective laser melting and electron beam melting: a review[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 80: 414 - 457.
- [9] 黄涛,宋立军,李思萌. 激光直接金属沉积熔池温度控制作用研究[J]. *应用激光*, 2019, 39(06): 949 - 955.
- [10] 江吉彬,刘畅,汤绍钊,等. 体能量密度对 Ni60/WC 激光近净成型形貌和性能的影响[J]. *激光与红外*, 2021, 51(09): 1165 - 1173.
- [11] 吴斌,唐鼎承,贺小帆,等. 激光金属沉积 TA15 钛合金工字梁疲劳性能研究[J]. *稀有金属*, 2022, 46(05): 545 - 553.
- [12] 张丽炜,李嘉宁,刘立强,等. 激光及电弧增材制造技术研究进展[J]. *山东建筑大学学报*, 2020, 35(02): 68 - 75.
- [13] 郝海凌,侯红玲,吴浪,等. 钛合金及其激光加工技术的应用[J]. *激光杂志*, 2022, 43(06): 1 - 8.
- [14] Chang C, Yan XC, Bolot R, et al. Influence of post-heat treatments on the mechanical properties of CX stainless steel fabricated by selective laser melting[J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(19): 8303 - 8316.
- [15] Yap CY, Chua CK, Dong ZL, et al. Review of selective laser melting: materials and applications[J]. *Applied Physics Reviews*, 2015, 2(04): 1 - 21.
- [16] 易林,常成,岳术俊,等. 激光选区熔化镁合金研究进展[J]. *材料研究与应用*, 2022, 16(03): 337 - 352.
- [17] Li QY, Zhang H, Li DC, et al. Comparative study of the microstructures and mechanical properties of laser metal deposited and vacuum arc melted refractory NbMoTa medium-entropy alloy [J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2020, 88: 105195.
- [18] 杨胶溪,柯华,崔哲,等. 激光金属沉积技术研究现状与应用进

- 展[J]. 航空制造技术,2020,63(10):14-22.
- [19] 吴斌,唐鼎承,贺小帆,等. 激光金属沉积 TA15 钛合金工字梁疲劳性能研究[J]. 稀有金属,2022,46(05):545-553.
- [20] 符成学,雷小伟,贾晓飞,等. 钛合金激光增材制造技术研究与应用进展[J]. 焊管,2023,46(08):11-18,24.
- [21] 刘泽人,赵孔勋,唐宇,等. 激光金属沉积 Ti-Zr-Ta 合金的制备及其冲击释能特性研究[J]. 稀有金属材料与工程,2023,52(06):2296-2301.
- [22] Zhang LC, Liu YJ, Li SJ, et al. Additive manufacturing of titanium alloys by electron beam melting: a review[J]. *Advanced Engineering Materials*,2018, 20(05):1700842.
- [23] Mohammadhosseini A, Masood SH, Fraser D, et al. Dynamic compressive behaviour of Ti-6Al-4V alloy processed by electron beam melting under high strain rate loading [J]. *Advances in Manufacturing*,2015,3(03):232-243.
- [24] Riedlbauer D, Scharowsky T, Singer RF, et al. Macroscopic simulation and experimental measurement of melt pool characteristics in selective electron beam melting of Ti-6Al-4V [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,2017,88:1309-1317.
- [25] Giovanni R, Manuela G, Luca I. Simulating the sintering of powder particles during the preheating step of electron beam melting process: review, challenges and a proposal [J]. *Procedia CIRP*,2022,112:388-393.
- [26] Lin BC, Chen W. Mechanical properties of TiAl fabricated by electron beam melting-a review[J]. *China Foundry*,2021,18(04):307-316.
- [27] Kolamroudi MK, Asmael M, Ilkan M, et al. Developments on Electron Beam Melting (EBM) of Ti-6Al-4V: a review [J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*,2021,74(04):783-790.
- [28] Zhai YW, Lados DA, Brown EJ, et al. Understanding the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V and Inconel 718 alloys manufactured by Laser Engineered Net Shaping [J]. *Additive Manufacturing*,2019,27:334-344.
- [29] Zhai YW, Lados DA, Lagoy JL. Additive manufacturing: making imagination the major limitation [J]. *JOM*,2014,66(05):808-816.
- [30] Ning FD, Hu YB, Cong WL, et al. Microstructure and mechanical property of TiB reinforced Ti-matrix composites fabricated by ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping [J]. *Rapid Prototyping Journal*,2019,25(03):581-591.
- [31] Wang Z, Qu RT, Scudino S, et al. Hybrid nanostructured aluminum alloy with super-high strength [J]. *NPG Asia Materials*,2015,7(12):e229.
- [32] 苗润,刘兵亮,任思雨,等. 颗粒增强钛基复合材料制备方法与组织性能研究进展[J]. 精密成形工程,2021,13(03):25-39.
- [33] Anil C, Sergio S, Mohsen K, et al. Synthesis and characterization of Nanocrystalline Mg - 7.4% Al powders produced by mechanical alloying [J]. *Metals*,2013,3(01):58-68.
- [34] 李邦盛,尚俊玲,郭景杰,等. 原位 Ti-B 晶须增强钛基复合材料的磨损机制 [J]. 摩擦学学报,2005(01):18-22.
- [35] Hu YB, Ning FD, Wang H, et al. Laser engineered net shaping of quasi-continuous network microstructural TiB reinforced titanium matrix bulk composites: microstructure and wear [J]. *Optics & Laser Technology*,2018,99:174-183.
- [36] Zhao ZY, Wang SW, Du WB, et al. Interfacial structures and strengthening mechanisms of in situ synthesized TiC reinforced Ti6Al4V composites by selective laser melting [J]. *Ceramics International*,2021,47(24):34127-34136.
- [37] Dadbakhsh S, Mertens R, Vanmeensel K, et al. In situ transformations during SLM of an ultra-strong TiC reinforced Ti composite [J]. *Scientific Reports*,2020, 10(01):10523.
- [38] 王琪,李智,张海军,等. 增材制造 Ti6Al4V 基复合材料研究进展 [J]. 中国材料进展,2023,42(05):375-390.
- [39] Liu ZW, Xie PP, Chen M, et al. Effects of ultrasound assisted solidification on the microstructure and mechanical properties of nano-sized TiB₂/Al-4.5Cu composites [J]. *Materialia*,2021,15:101024.
- [40] Wang HY, Yong L, Xu GM, et al. Effect of nano-TiC/TiB₂ particles on the recrystallization and precipitation behavior of AA2055-TiC + TiB₂ alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 871:144927.
- [41] Li S, Kondoh K, Imai H, et al. Strengthening behavior of in situ synthesized (TiC-TiB)/Ti composites by powder metallurgy and hot extrusion [J]. *Materials & Design*,2016,95:127-132.
- [42] Vasanthakumar K, Ghosh S, Koundinya N, et al. Synthesis and mechanical properties of TiC_x and Ti (C, N) reinforced titanium matrix in situ composites by reactive spark plasma sintering [J]. *Materials Science and Engineering: A*,2019,759:30-39.
- [43] 韩威,姜中涛,杨鑫,等. Ti(C_{0.5}N_{0.5})颗粒增强钛基复合材料显微组织和力学性能的研究 [J]. 钢铁钒钛,2022,43(03):59-64.
- [44] Radhakrishnan M, Hassan MM, Long BE, et al. Microstructures and properties of Ti/TiC composites fabricated by laser-directed energy deposition [J]. *Additive Manufacturing*,2021,46:102198.
- [45] 王江,刘凯,孙华君,等. 激光增材制造用 SiC 粉末制备及成形工艺探索 [J]. 材料科学与工艺,2018,26(02):9-14.
- [46] 杨延清,罗贤,黄斌,等. SiC 纤维增强 Ti 基复合材料的界面反应规律 [J]. 中国体视学与图像分析, 2016,21(01):58-65.
- [47] Farayibi PK. Microstructural evolution of metal matrix composites formed by laser deposition of Ti-6Al-4V wire and WC-W₂C powder [J]. *Advanced Engineering Forum*,2018,26:22-32.
- [48] 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(03):44-53,131-132.
- [49] Zhao Y, Wu CY, Zhou SF, et al. Selective laser melting of Ti-TiN composites: Formation mechanism and corrosion behaviour in H₂SO₄/HCl mixed solution [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 863:158721.

(上接第 26 页)

- [3] 李小波,晏鑫,胡胜阳,等. 相转移法制备高性能石墨烯/环氧树脂复合材料 [J]. 西南科技大学学报,2023,38(04):23-29.
- [4] 周兆懿,龚婕,贾凯凯. 石墨烯改性纤维检测标准研究 [J]. 中国纤检,2024(03):89-93.
- [5] 陈加亮,卫敏. 改性石墨烯对锦纶复合材料性能影响研究 [J]. 中国纤检,2024(03):99-102.
- [6] 文湘隆,廖思凡,陈凯,等. 环氧树脂/玻璃纤维/石墨烯复合材料的电磁吸波性能 [J]. 工业塑料应用,2024,52(03):126-131.
- [7] 侯金霞,刘胜凯,裴晓园. 石墨烯量子点对环氧树脂抗辐射性能的影响 [J]. 辐射研究与辐射工艺学报,2024,42(01):40-46.
- [8] 邓靖. 石墨烯涂料防腐可靠性的探究 [J]. 建筑施工, 2024, 46(03):298-301.