钛合金增材制造技术研究及其应用现状

崔亚迪[1]，吴志远[2]，赵　军[1]，刘宏宇[1]，陈晓明[1]，闫　平[1]，刘泊良[1]，刘田雨[1]，张立龙[1]

（1. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司，高端装备铸造技术全国重点实验室，辽宁沈阳 110022；
2. 沈阳工大重型设备制造有限公司，辽宁沈阳 110141）

摘要：钛合金作为良好的结构材料和功能材料，在众多行业均有广泛应用，愈发复杂的应用场景对于钛合金的加工制造技术提出了更高的要求。增材制造作为高效率的近净成形方法，适用于多场景下钛合金构件的一体化先进制造。当前国内外学者已针对钛合金增材制造进行了大量研究。本文梳理了近年来钛合金增材制造技术的相关研究，总结了基于熔化过程的钛合金不同增材制造方法及其优化策略的增材研究进展，包括各增材方法下钛合金的组织性能特点和成形效果等方面的研究成果。介绍了钛合金增材制造中常见的组织缺陷，以及采用合适的工艺和合金设计等解决办法。通过对不同钛合金增材制造方法的现状和优化策略的分析，为钛合金增材制造技术的进一步发展提供了有益的参考。

关键词：增材制造；钛合金；工艺参数；微观组织；力学性能；后处理工艺

钛合金因其优异的强度、耐磨性和生物相容性等材料性能[1-3]，在生物医学、航空航天、国防和汽车工业等领域得到广泛应用[4-6]。随着“十四五”规划和“双碳”目标的推动，推进绿色制造业发展，发展更节能环保的先进制造技术成为迫切需求。传统的钛合金构件制造方法如铸造、锻造、挤压、轧制和粉末冶金等，在“等材制造”和“减材制造”工艺中存在制造工艺复杂、柔性化程度低和材料浪费等问题[7-8]。相比之下，增材制造作为一种能量损耗低，材料利用率高和加工效率高的近净成形方法[9-11]，在钛合金制造中显示出巨大的优势。近年来，钛合金增材制造技术受到广泛关注。

钛合金增材制造技术在多个领域中展现了其应用价值[12]。在生物医学领域，钛合金作为一种具有良好生物相容性的材料常被用作人造骨骼材料，满足患者需求[13]。在航空航天领域，增材制造的钛合金构件能够满足复杂需求，缩短研发周期。此外，增材制造能够实现复杂结构的一体化制造[14-15]。然而，目前钛合金增材制造技术还存在一些不足之处，例如成形控制精度差，组织缺陷较多[16]，以及与传统工艺制备的钛合金构件性能存在差距[17]等问题。许多研究人员从增材工艺优化、材料选型设计和后处理工艺开发等方面努力，实现了组织性能的协同调控。本文综合国内外相关研究，通过综述钛合金增材制造技术的研究现状，介绍了主流钛合金增材制造技术的原理和特点，并阐述了不同增材制造技术制备钛合金构件的组织性能特点和后处理工艺。同时，还明确了各增材制造技术对组织特征的影响机理，从多个角度揭示了钛合金增材制造的工艺-组织-性能之间的内在联系，为钛合金增材制造技术方法的选择提供了有效参考。

1　钛合金的增材制造工艺

增材制造（Additive Manufacturing，AM）采用了“离散+堆积”的近净成形思想，在当前的研究中备受关注[18]。德国的“工业 4.0”和我国的高端装备制造战略都将AM技术作为重要战略技术。目前，选区激光熔化（Selective Laser Melting，

作者简介：
崔亚迪（1986–），男，硕士，工程师，主要研究方向为钛合金精密铸造技术。电话：18842377265，E-mail：364751380@qq.com

中图分类号：TG146.2
文献标识码：A
文章编号：1001-4977（2024）12-1635-12

收稿日期：
2024–09–26 收到初稿，
2024–10–26 收到修订稿。

SLM）、电子束粉末床熔融（Electron Beam Melting，EBM）技术、激光定向能量沉积技术（Laser Directed Energy Deposition，L-DED）和电弧增材技术（Wire and Arc Additive Manufacturing）是四种主流的金属增材制造技术。以TC4钛合金为例，不同技术制备的TC4钛合金力学性能如表1所示。

表1　不同制造方法制备的典型钛合金力学性能对比情况
Table 1 Comparison of mechanical properties of typical titanium alloys prepared by different manufacturing methods

制造方法	$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	ε_f/%	参考文献
铸造	886	955	20.15	[19]
SLM（XY）	1 237	1 332	8.32	
SLM（Z）	1 123	1 250	10.60	
EBM（XY）	810	895	11.39	[20]
EBM（Z）	751	838	4.83	
L-DED（XY）	970	1 087	17.60	[21]
L-DED（Z）	1 063	960	13.30	
WAAM	735	824	15.51	[22]

1.1　激光选区熔化技术

激光选区熔化技术基于激光束的高能量密度，通过局部熔融金属粉末来逐层构建复杂的三维零件，其工作原理如图1所示[23]。粉末的特性对成形质量和致密度具有重要影响，包括粉末的球形度、流动性以及增强相与基体粉末的混合程度等。此外，工艺参数也对成形样品的致密度和微观组织产生显著影响，从而影响材料的性能。因此，在SLM技术中，粉末的特性和工艺参数的控制都是关键因素，对于获得高质量的成形样品，实现所需致密度和性能具有重要意义[23]。

研究人员对SLM增材制造钛合金的工艺参数进行了探究。Gu等人研究发现，激光能量密度的提高，钛合金的密度显著提升，激光能量密度为0.33 kJ/m时，可获得接近完全致密的部件[24]。但Mazumder等人的研究表明，长时间的球磨会产生不规则形状的粉末颗粒，从而导致激光制造零件中孔隙率增加[25]。Thijs和Yadroitsev等人的研究表明，扫描间距显著影响了SLM生产零件的气孔率和表面粗糙度[26-27]。Motoyama等人研究发现在SLM加工和传统锻造Ti-6Al-4V的过程中屈服应力的差异高达43%，如图2所示[28]。

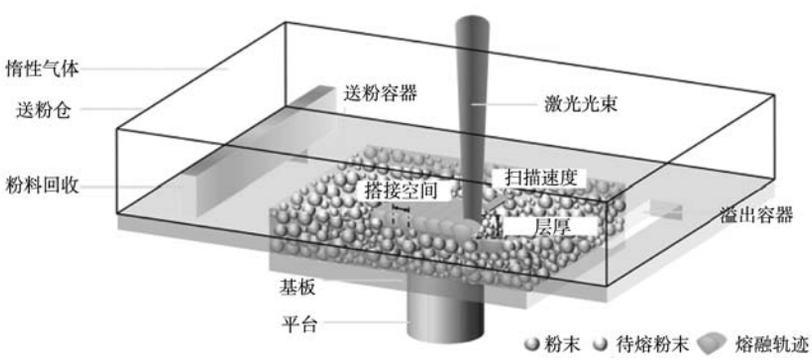


图1　激光选区熔化工作原理
Fig. 1 Working principle of laser selective melting

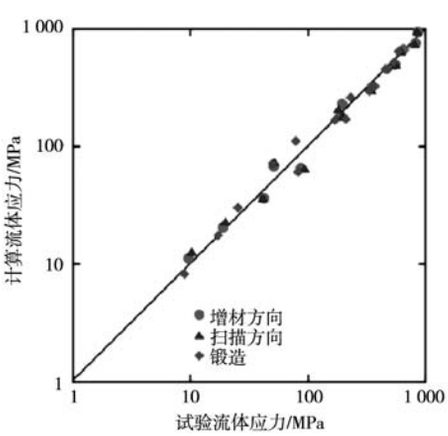
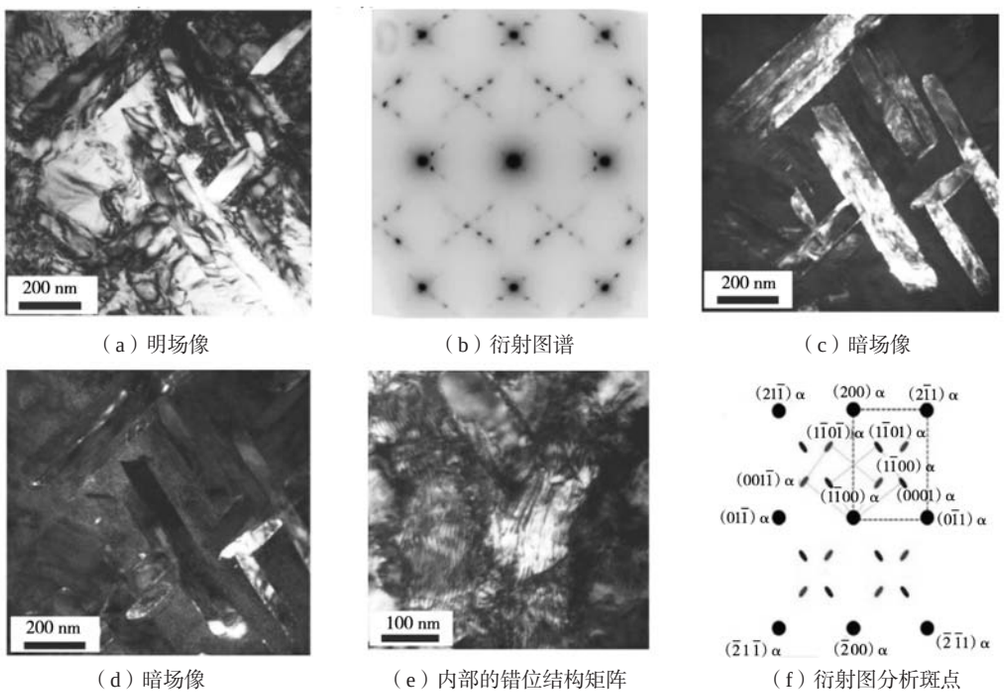


图2　SLM加工和锻造的Ti-6Al-4V的流动应力对比
Fig. 2 Flow stresses in SLM machined and forged Ti-6Al-4V obtained

钛合金激光选区增材制造主要的缺陷为组织致密度低，微观组织孔隙较多且分层严重。研究人员从工艺与材料的角度出发，进行组织优化。部分学者发现球化效应的出现会导致下一层粉末无法均匀沉积在之前加工的层上，从而在层间弱结合和热应力的作用下产生孔隙和分层[29-31]。通过减小熔池长宽比，采用更高的激光速率和更低的扫描速度可以明显改善这一现象。

为了改善钛合金构件的性能，研究人员对钛合金的微观组织进行了进一步的研究。Vrancken等人研究发现Ti6Al4V的SLM过程保温时间和冷却速率对组织没有明显影响[32]。高于相变点时，保温过程中初始的β柱状晶粒会长大成粗大的半等轴状β晶粒。Hamid Azizi

等人采用SLM制造了Ti-1Al-8V-5Fe，其微观组织具有纳米级析出物，使得样品表现出超高的强度和延展性，如图3所示[33]。这些纳米级析出物周围存在大量位错，进一步提升材料整体的强度和延展性。ATTAR等人研究了SLM成形的Ti-8.35 vol.% TiB原位自生钛合金的微观组织；研究发现与纯Ti相比，复合材料中的钛晶粒更细小，呈片层状，且原位生成的TiB弥散分布抑制了钛晶粒的长大，如图4所示[34]。SLM增材制造的钛合

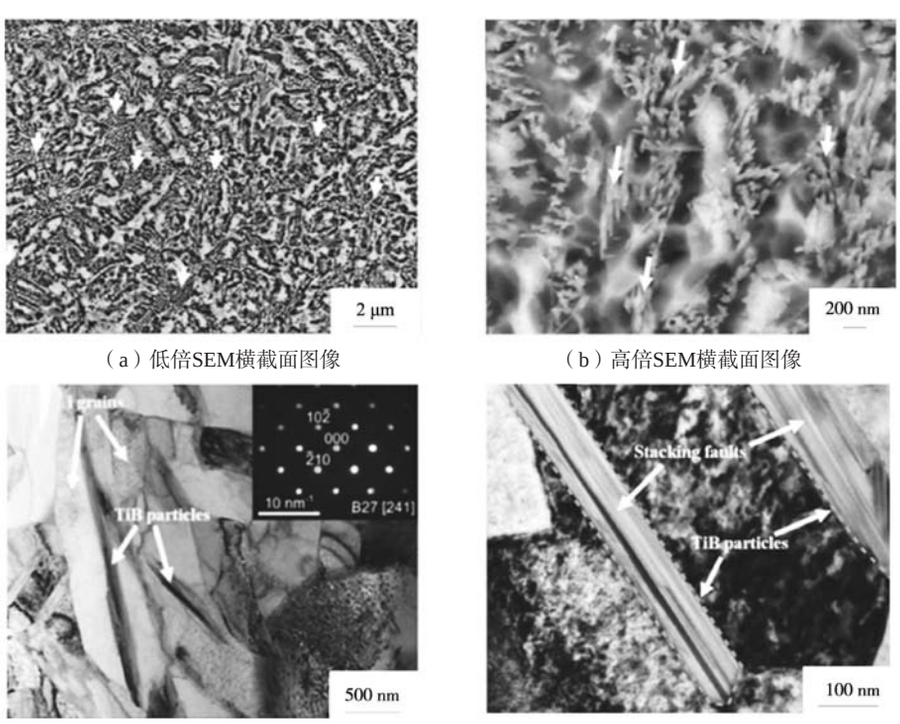


（a）明场像　（b）衍射图谱　（c）暗场像

（d）暗场像　（e）内部的错位结构矩阵　（f）衍射图分析斑点

图3　样品的透射电子图像

Fig. 3 Transmission electron image of the sample



（a）低倍SEM横截面图像　（b）高倍SEM横截面图像

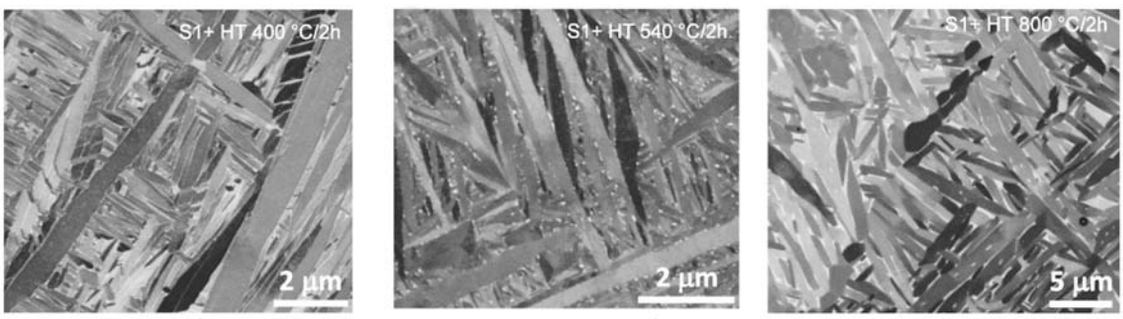
（c）嵌入具有层状结构的α-Ti颗粒基质中的针状TiB颗粒　（d）TiB颗粒内部的堆叠断层

图4　SLM成形Ti/TiB复合材料的微观组织

Fig. 4 Microstructure of SLM formed Ti/TiB composites

还存在着高强度和低塑性的问题，因此一些学者进行不同的热处理工艺，对其性能进行了改善。Xu等人的研究发现，热处理温度在钛合金相变点以下时，亚稳态α′马氏体会分解为片层状（α+β）相，如图5所示[35]，（α+β）相的交替排列能有效抑制晶粒长大。

肖等人将SLM制造的Ti-6Al-4V合金通过800 ℃退火处理后，室温力学性能接近同等级锻件[36]。在高温条件下，沉积态试样的抗拉强度相对退火态提高，但伸长率较低。Sun等人发现了类似的结果，将SLM制造的Ti-6Al-4V合金通过在850 ℃下热处理2 h，伸长率从9.5%提高到12.5%，冲击韧性从24.13 J/cm^{2}提高到47.51 J/cm^2[37]。



（a）400 ℃　（b）540 ℃　（c）800 ℃

图5　在120 min的等温处理后SLM制造的Ti-6Al-4V的显微结构

Fig. 5 Microstructure of Ti-6Al-4V fabricated by SLM after 120 minutes of isothermal treatment

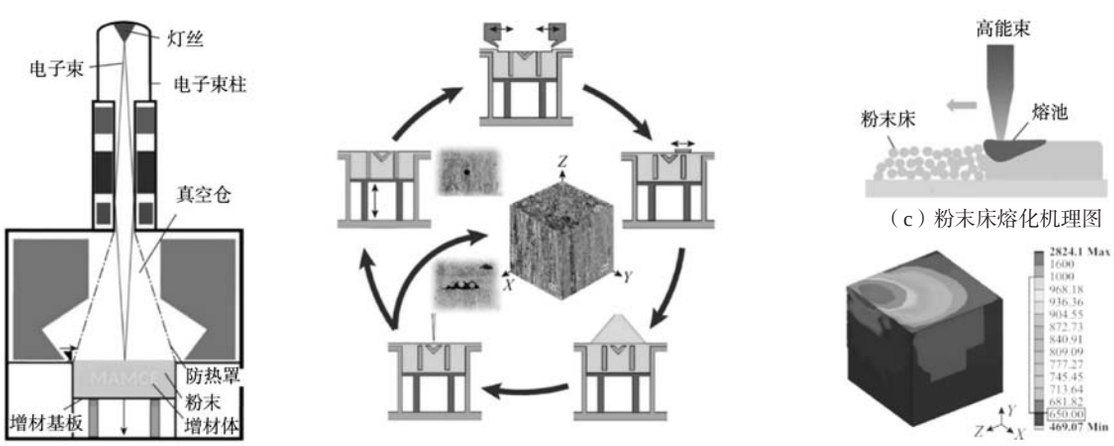
综上，通过工艺改良与合金化调控，SLM钛合金构件的组织实现了显著的优化，通过α和β相的比例调整，孔隙缺陷的消除，SLM钛合金构件实现了各向异性的消除与整体力学性能的提升，为其实现工业化应用提供重要基础。

1.2　电子束熔融技术（EBM）

EBM技术是一种采用高能电子束作为热源的精密金属增材制造技术。在工作舱体中，粉末被逐层铺设，并通过高能电子束的聚焦和扫描，实现金属粉末的精确熔融和凝固，逐层堆叠形成线状和面状金属层，原理如图6所示[2]。

目前，EBM技术制备的钛合金构件的主要缺陷是：表面成形质量较差，粉末球化造成的孔隙缺陷与未熔合缺陷。其大多受粉末的初始状态（如球形度、表面质量和流动性）以及工艺参数（如电子束功率、扫描速率和工作电流）的影响，因此工艺优化和参数调整是关键[38]。Tatsuro等人的试验结果证明增加扫描速度可以大幅度提高打印零件的外形精度[39]。Guo对扫描速度和电子束电流对TC4合金微观组织的影响进行了研究[40]，结果表明随着扫描速度的减小和束流的增加，组织中的针状α相变得更粗大，如图7所示[40]。

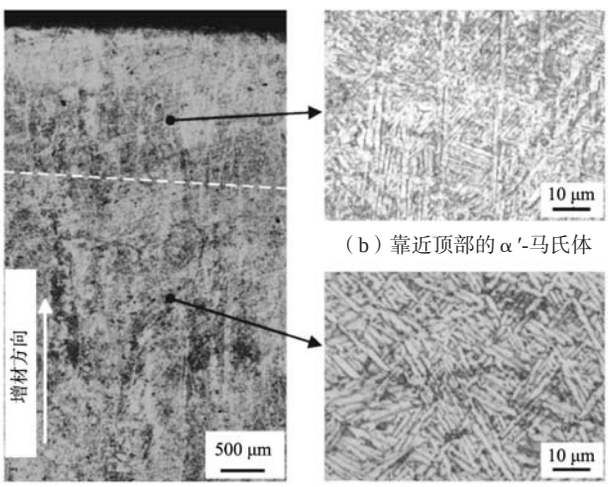
而Wesley的研究则发现，随着扫描长度的增加，α-β板条的宽度会减小，这是由于较长的扫描长度具



（a）EBM成形系统示意图　（b）EBM成形Ti-6Al-4V钛合金构件工艺各个阶段及三维组织形貌（*Z*轴为打印方向）、气孔和未熔融颗粒　（c）粉末床熔化机理图　（d）EBM成形工艺模拟

图6　EBM系统制造原理图

Fig. 6 Schematic diagram of the EBM system from design to final manufacture



（a）低倍镜 （b）靠近顶部的α′-马氏体 （c）远离顶部的α/β相

图7 II型样品C的显微结构

Fig. 7 Microstructure of type II sample C

有更高的冷却速率[41]。葛文君等人改变体能量密度（P/A），发现随着体能量密度的增加，其熔池尺寸增加，凝固组织中的马氏体厚度增加[42]。刘等人研究了工艺参数对电子束熔融工艺过程的影响[43]，研究结果表明，扫描线宽与电子束电流、加速电压和扫描速度呈明显的线性关系，当搭接率为0.5时，所获得的层面质量优于搭接率小于0.5时的层面质量。

EBM复杂的热循环和快速加热与冷却导致了TC4合金的组织演变。EBM过程中，相转变可以简化为三阶段。第一阶段是熔池状，经过快速冷却（约10^3~10^5 K/s）至构建温度（约650 ℃），发生非扩散性马氏体转变，将β相转变为α相马氏体。第二阶段是在构建温度下发生扩散性相变，将组织从α相马氏体转变为α+β相。第三阶段是温度从构建温度缓慢降至室温，在此阶段组织无明显变化，如图8所示[44]。

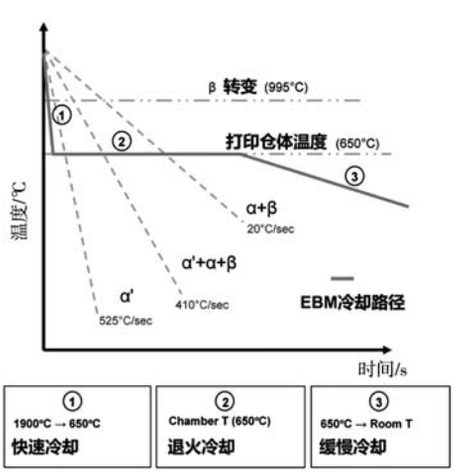


图8 Ti-6Al-4V微结构形成的冷却路径和临界冷却速率

Fig. 8 Cooling paths and critical cooling rates for the formation of Ti-6Al-4V microstructures

方等进行热处理试验，发现退火温度升高导致合金晶粒粗化，固溶处理温度升高增加了次生α相数量[45]。退火温度升高导致抗拉强度和塑性降低，而固溶处理温度升高，提高了抗拉强度，但降低了塑性。经过900 ℃×1 h固溶处理和水冷，随后550 ℃×4 h时效处理的合金，表现出最佳的力学性能。Srinivasan等人的研究探讨了热处理对EBM成形的TC4合金力学性能的影响[46]，结果显示，超过β转变温度后进行固溶处理再空冷，最后进行500 ℃时效10 h的合金具有最佳的拉伸性能。Hrabe等人的研究发现，孔洞是EBM制备的TC4合金疲劳裂纹萌生的主要原因，而残余应力对疲劳性能几乎没有影响，这是由于搭建平台和粉末层预热等因素导致的过程温度高所致[47]。此外，Chern等人发现疲劳性能还表现出各向异性，竖直构建方向的疲劳性能较差，这与内部熔化不良的孔隙位置有关，如图9所示[48]。

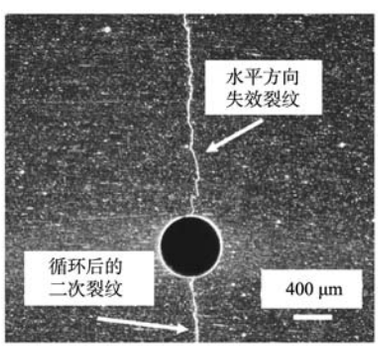


图9 横向试样中的裂纹启动的显微照片

Fig. 9 Micrograph of crack initiation in a transverse specimen

1.3 激光定向能量沉积技术（L-DED）

激光定向能量沉积中，原料以粉末或丝材的形式送进，受激光加热，熔化进而沉积，如图10所示[49]。与SLM工艺相比，L-DED具有更高的沉积速率，无沉积尺寸限制，因此，该技术可满足大型结构件快速制造需求[50]。

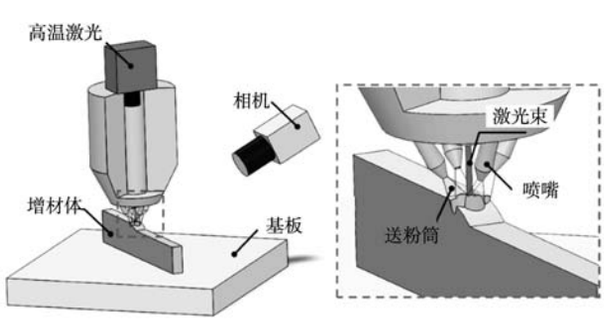
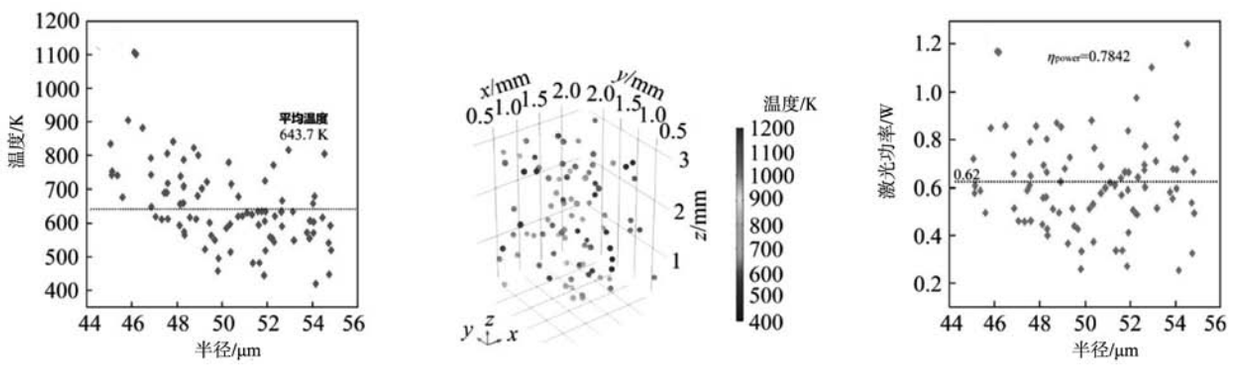


图10 激光定向能量沉积技术原理图

Fig. 10 Schematic diagram of the laser directed energy deposition technique

姚等人研究了L-DED过程中粉末形态的影响，发现窄粒度分布有利于获得均匀温度和较小的等轴晶，如图11所示[51]。L-DED方法制备钛合金的组织致密性优于SLM，但是在成形精度方面仍然存在差距，同时存在一定数量的层间未熔合与层间夹杂。Shinonaga等人采用喷砂和辐照复合方法改善了Ti-6Al-4V合金的表面粗糙度[52]。Sinclair等人研究发现，使用高的激光功率可减少钛合金增材过程中的有害烧结物[53]。



（a） 温度随颗粒半径的变化　（b）温度轮廓线　（c）消耗的激光功率随颗粒半径的变化

图11 粉末流速为15 g/min时的模拟结果

Fig. 11 Simulation results at a powder flow rate of 15 g/min

部分学者通过组织调控进一步优化性能。Sarah J等人使用原位高分辨率X射线成像，揭示了L-DED中四种类型孔隙的形成机制，如图12所示[54]。Gushchina等人发现较长的层间等待时间会促进α′相的形成，从而使材料变脆[55]。Xu等人研究了Ti6Al4V钛合金退火前后的变形和断裂机理，结果表明，塑性变形促进α相内部出现滑移带，α/β界面产生剪切带；在构建试样中，裂纹在等轴晶中萌生，沿柱状晶界扩展，呈现混合型断裂模式[56]。Fan等人通过L-DED制造高性能Ti-6Al-4V合金，研究发现通过调整激光感应参数，可以调整微观结构的相关性；β-晶粒和α-板条可以相对单独控制，显著提高沉积样品的延展性[57]。

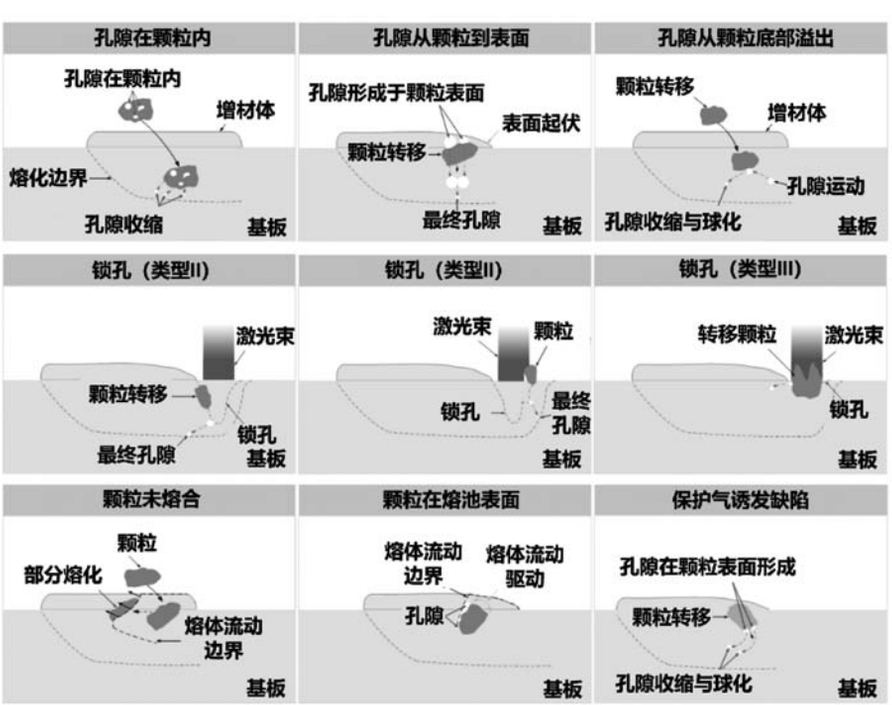


图12 DED过程中孔隙形成的动态机制

Fig. 12 Dynamic mechanism of pore formation during DED

Xue等人在L-DED的凝固和随后的热循环中协同控制β晶粒[58]。采用溶液+淬火热处理的方法，热处理后的Ti6A14V3Ni0.05B合金具有特殊的微观组织，其强度和塑性与DED制造的Ti6Al4V构件相当。

总的来说，由于L-DED的低热量输入，有助于材料保持其强度，因此它是一种以自动化方式制造和修复复杂部件的有效技术。

1.4 电弧增材技术（WAAM）

电弧增材制造技术是直接能量沉积技术的一种，其工艺性较好、设备简单、沉积速度快，目前在大尺寸钛合金构件的增材制造方面得到广泛应用。英国谢菲尔德大学的Baufeld利用电弧增材制造技术成功制备了表面光洁且成形质量较好的TC4钛合金试样，其组织主要由粗大β柱状晶构成，并且β柱状晶贯穿多个沉积层如图13所示[59]。在电弧增材过程中，柱状晶粒会沿着温度梯度方向持续向上生长。然而在顶部区域，由于冷却速度较快，并且未经历重熔，其组织为细小的α集束。在底部，在逐层沉积的影响下，组织冷却速度较慢并经历多次热循环，以粗大的网篮组织为主。力学性能测试表明，电弧增材制造TC4钛合金的拉伸性达到铸造件水平，部分甚至超过了锻造件水平。

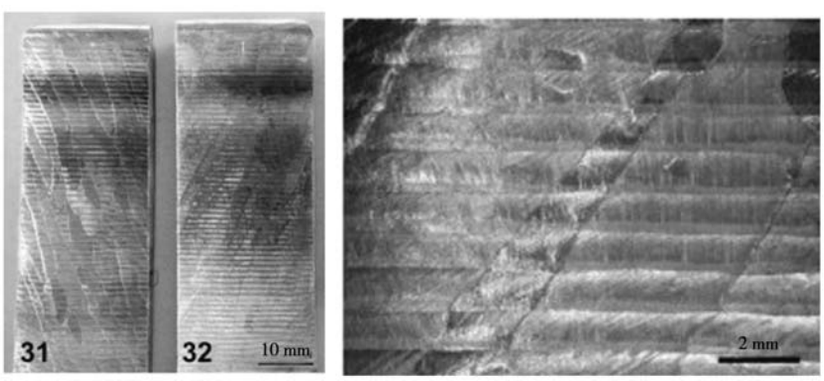


图13 电弧增材TC4钛合金的宏观组织

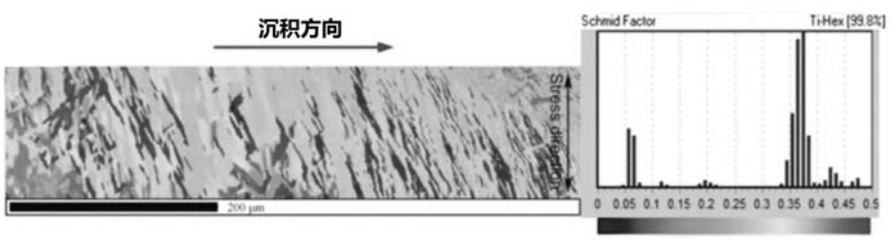
Fig. 13 The macrostructure of WAAM TC4 component

英国克兰菲尔德大学的Wang等研究人员深入研究了WAAM沉积TC4钛合金的宏观/微观组织特征与其力学性能，发现沉积层中柱状晶粒朝向基板方向生长，同时在沉积层之间形成了条纹状结构[60]。最顶层区域主要是马氏体组织，随着距离基板距离的减小，魏氏组织逐渐增加。在条纹状结构中，观察到粗大的集束状魏氏组织，而在两个条纹之间的过渡区域，组织逐渐从细小魏氏组织转变为粗大的魏氏组织。研究发现，钛合金沉积件的力学性能受到气孔率的严重影响，而清洁的焊丝和基板是获得无气孔沉积件的关键因素之一。拉伸试验结果显示，沉积件的强度（918 MPa）略低于锻件（1 033 MPa），但其塑性与锻件的塑性几乎相当。值得注意的是，相较于锻件的疲劳寿命（小于10^6次循环），无气孔的沉积件在最大载荷为600 MPa的交变载荷下具有明显更长的平均疲劳寿命（超过3×10^6次循环）。这一现象是因为电弧增材制备的TC4钛合金沉积件中的位错能够在集束组织中滑移，而不会导致位错堆积和应力集中，从而不容易引发微裂纹

此外，研究表明，与垂直方向相比，常规电弧增材制造工艺制备的钛合金在水平方向上具有更好的拉伸性能，但在水平和垂直方向上均具有较高的强度和较低的塑性。这一现象部分源于粗大的柱状晶和α集束组织的影响，它们导致了材料的各向异性[61-62]。具体到TC11钛合金的激光增材制造研究，研究者们发现在垂直方向上为$[10\bar{1}2]\alpha$强织构，导致该方向的力学性能呈现高强度低塑性特点。这是因为当受拉力方向垂直于沉积方向时，柱面滑移系（$10\bar{1}0$）α<$\bar{1}2\bar{1}0$>α的施密德因子比基面滑移系（0001）α<$2\bar{1}\bar{1}0$>α的施密德因子更大，因此柱面滑移更容易激活，如图14所示[63]。然而，由于柱面滑移相对于基面滑移较为困难，因此导致了垂直方向的塑性较低。

总的来说，在钛合金电弧增材制造中，晶粒内部存在大量平行排列的α相集束组织，形成强烈的织构特征，易导致脆性断裂、各向异性和高强度低塑性等问题。为了克服这些问题，研究人员通过调整焊接工艺参数、添加合金元素颗粒以及采用外部辅助工艺等方法，成功细化了传统钛合金晶粒，减弱或消除了织构特征，以达到减少各向异性，提高整体性能的目标[64-65]。例如，昆士兰大学的Bermingham等研究人员在TC4钛合金的电弧增材制造过程中添加了La_2O_3颗粒，利用异质形核点促进晶粒细化，使得晶粒尺寸减小了85%，在沉积层的上部形成了大量等轴晶粒，从而改变了电弧增材钛合金的织构[66-67]。同时，该课题组

（a）柱面滑移系下的晶粒滑移倾向



（b）基面滑移系下的晶粒滑移倾向

图14　滑移系施密德因子分布

Fig. 14 Distribution of Schmidt factor of TC11 alloy vertical to deposition direction

还研究了添加LaB_6颗粒对电弧增材制造TC4钛合金性能的影响。研究结果显示，添加LaB_6后，构件的抗拉强度提高了10%，但塑性有所下降。从组织特点考虑，高度规则排列的大尺度TiB颗粒是造成塑性降低和各向异性的主要原因，因此，减小TiB颗粒的尺寸并均匀分布将有助于提高强度和塑性。此外，克兰菲尔德大学的Martina等研究人员还采用随焊高压轧制方法[61]，将电弧增材制造的TC4钛合金沉积件中的柱状晶粒完全转变为直径小于1 mm的等轴晶粒，同时减小了β晶粒内的α板条宽度至约1 μm，从而消除了成形件的各向异性，并显著提高了抗拉强度和塑性。Ng等人则在一种亚稳态钛合金（Ti22V-4Al）中，引入了大量直径超过2 mm的大孔[68]。采用超横向热等静压工艺，可以得到织构减小、晶粒尺寸细化，延展性优异（伸长率超过32%）的无气孔零件。

2　增材制造钛合金的应用场景

3D打印技术已广泛应用于制造钛合金，其用途涵盖多个领域，展现出巨大的应用潜力。钛合金具有出色的强度重量比、耐腐蚀性和生物相容性，因此在许多高要求的应用场景中成为首选材料。

首先，在医疗领域，钛合金被用作模具镶件，广泛用于牙科修复，并成为髋关节、膝关节内假体等骨科植入物的理想材料。得益于增材制造技术，个性化定制植入物变得更加容易，这些植入物可根据患者的具体解剖特征进行设计，确保更好的适配性和更短的手术时间。此外，增材制造还用于研发新器官的模型以及制造复杂形状的生物医学植入物，如药物输送系统和心血管支架。钛合金的优异生物相容性和抗腐蚀特性，使其在长期植入的生物医学设备中具备很大的优势。随着计算机辅助设计（CAD）文件的引入和分享，使得全球范围内的生物医学部件制作和传输更加便捷。这种技术大大降低了复杂手术的需求，提高了治疗的效果和患者的康复速度。

其次，在航空航天工业，增材制造技术被广泛用于制造各种复杂零部件。钛合金是航空航天工业中常见的材料，因为其出色的轻量化特性有助于降低飞行器的重量，同时确保高强度和耐高温性能。通过AM技术，钛合金可以加工成接近净成形的零件（near-net-shape），减少了材料浪费，也降低了生产成本。增材制造尤其适合制造复杂几何设计的零件，如飞机机身部件、涡轮叶片以及燃料喷嘴（如GE LEAP航空发动机中使用的零件）。这种技术不仅使制造过程更加高效，且因其可重复使用钛合金粉末而显著减少材料消耗，而粉末的机械和物理特性在多次使用后依旧保持稳定。此外，增材制造技术可以通过减少部件的组装步骤，提升零件的整体结构强度，从而提高飞行器的可靠性和耐用性。

在国防与军事领域，钛合金增材制造技术同样得到越来越广泛的应用。钛合金的高强度和抗腐蚀性使其非常适合用于制造轻量化、强度高的军事装备部件，如无人机的关键部件、导弹结构和装甲车的防护装甲。通过增材制造技术，军工企业能够迅速生产出符合战场需求的零部件，从而提升军事装备的整体性能和维护效率。

在汽车工业，尤其是高性能和赛车领域，钛合金通过增材制造技术被用于制造发动机部件、排气系统以及结构性车体部件。由于钛合金具备极佳的强度重

量比，能够显著减轻汽车重量，从而提高燃油效率和加速性能。此外，AM技术使设计人员能够开发更复杂、更轻便的零件，有助于提高车辆的空气动力学特性。

增材制造钛合金还在能源工业（如石油、天然气和核能）中展现出潜力。这些领域常面临极端温度、高压和腐蚀性环境的挑战，传统制造工艺往往难以制造满足这些要求的复杂零部件。增材制造技术则能够通过逐层构建的方式，实现耐高温、抗腐蚀且结构复杂的部件的制造，从而提升设备的运行安全性和可靠性。

3 总结与展望

SLM、EBM、L-DED以及WAAM方法是钛合金及钛基复合材料增材制造中的核心技术。它们都具有独特的优点和适用范围，同时也存在一些局限性和挑战。

SLM技术以高能激光束将金属粉末逐层熔化和凝固，制造出具有优异性能的钛合金零件。其优点包括高精度、高强度、良好的表面质量和尺寸控制能力。SLM技术适用于复杂结构的制造，并可实现高度定制化的设计。然而，SLM技术存在制造速度较慢，残余应力较高，后处理工艺复杂等缺点。

EBM技术利用高能电子束将金属粉末熔化成形。其优点包括快速制造速度、较低的残余应力和良好的机械性能。EBM技术适用于大尺寸零件的制造和批量生产。然而，EBM技术存在成本较高，表面质量较差和精度有限等限制。

L-DED技术通过喷射金属粉末和激光束的结合，实现材料的沉积和熔化。其优点包括高度灵活性和可修复性和适用于大型零件的制造和材料加工的多功能性。L-DED技术在制造大型结构和修复工艺中具有发展潜力。然而，L-DED技术的成形精度较低、表面质量一般、残余应力较高。

WAAM技术是直接能量沉积技术的一种，其工艺性较好，设备简单，沉积速度快，在大尺寸钛合金构件的快速制造方面存在优势，但是其制造精度差，所制造构件需后续加工方可使用

综上所述，SLM、EBM、L-DED和WAAM等技术在钛合金及钛基复合材料增材制造领域均具有独特的优势和应用范围。但目前国内外研究人员大多聚焦于钛合金增材制造的微观组织分析与优化研究，对于新型增材制造技术的开发与增材过程路径规划的研究相对较少，随着人工智能技术的进一步发展，复杂结构的增材制造路径规划与优化应当实现新的突破，同时钛合金作为重要的结构材料，增材制造技术也为其带来更多拓扑优化上的可能，具有复杂结构的钛合金构件可以实现结构承载与复合功能一体化。因此，随着技术的进一步发展和创新，钛合金及钛基复合材料增材制造将为制造业带来更多的机遇和突破，推动材料科学和工艺技术的进步。

参考文献：

[1] 商国强，朱知寿，常辉，等. 超高强度钛合金研究进展 [J]. 稀有金属，2011，35（2）：286–291.

[2] 兰亮，白澄岩，高双，等. 电子束熔化成形Ti-6Al-4V钛合金研究进展和应用现状 [J]. 航空制造技术，2022，65（Z1）：20–31.

[3] NIHEI T，OHASHI K，HATTORI M，et al. A surveillance study of the demand of titanium and titanium alloys in Japan [J]. Dental Materials Journal，2020，39（1）：9–11.

[4] 赵永庆. 国内外钛合金研究的发展现状及趋势 [J]. 中国材料进展，2010，29（5）：1–8.

[5] 彭昂，毛振东. 钛合金的研究进展与应用现状 [J]. 船电技术，2012，32（10）：57–60.

[6] TONG J，BOWEN C R，PERSSON J，et al. Mechanical properties of titanium-based Ti-6Al-4V alloys manufactured by powder bed additive manufacture [J]. Materials Science and Technology，2017，33（2）：138–148.

[7] WANG M，LIN X，HUANG W. Laser additive manufacture of titanium alloys [J]. Materials Technology，2016，31（2）：90–97.

[8] ZHANG D，QIU D，GIBSON M A，et al. Additive manufacturing of ultrafine-grained high-strength titanium alloys [J]. Nature，2020，582（7811）：91–95.

[9] HAO Y，RUFENG H，HUAJUN C，et al. Research progress and prospects of CMT-based wire arc additive manufacturing technology for titanium alloys [J]. China Surface Engineering，2021，34（3）：1–15.

[10] DONG Bolun，XIA Yunhao，CAI Xiaoyu，et al. Addition of Sc in wire-based directed energy deposition of Al-Mg-Zn-Cu alloy：microalloying to refine grains and improve mechanical properties [J]. Additive Manufacturing，2023，67：103494.

[11] 林三宝，夏云浩，董博伦，等. 双丝电弧增材制备Al-Mg-Zn-Cu-Sc铝合金工艺与组织性能 [J]. 焊接学报，2022，43（11）：36–42，164–165.

[12] DENG J. Trend and new advance of titanium science and technology in china-review on the 9th china national conference on titanium and its alloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering，1997，26（1）：7–10.
[13] PALMQUIST A，JOLIC M，HRYHA E，et al. Complex geometry and integrated macro-porosity：clinical applications of electron beam melting to fabricate bespoke bone-anchored implants [J]. Acta Biomaterialia，2023，156：125–145.
[14] CHAKRABORTY D，TIRUMALA T，CHITRAL S，et al. The state of the art for wire arc additive manufacturing process of titanium alloys for aerospace applications [J]. Journal of Materials Engineering and Performance，2022，31（8）：6149–6182.
[15] XIA Yunhao，CAI Xiaoyu，DONG Bolun，et al. Wire arc additive manufacturing of Al-Mg-Sc alloy：an analysis of the effect of sc on microstructure and mechanical properties [J]. Materials Characterization，2023，203：113116.
[16] WANG X，LI W，LI Y，et al. Phased array ultrasonic testing of micro-flaws in additive manufactured titanium block [J]. Materials Research Express，2020，7（1）：016572.
[17] BISWAL R，ZHANG X，SYED A K，et al. Criticality of porosity defects on the fatigue performance of wire plus arc additive manufactured titanium alloy [J]. International Journal of Fatigue，2019，122：208–217.
[18] RENJITH S C，PARK K，OKUDAN KREMER G E. A design framework for additive manufacturing：integration of additive manufacturing capabilities in the early design process [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing，2020，21（2）：329–345.
[19] LI J，WANG M，LI Y，et al. On the evaluation of uniaxial tensile and fracture properties of Ti-6Al-4V by spherical indentation tests with different calculation models [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures，2023，46（10）：4053–4072.
[20] 刘征，刘建荣，赵子博，等. 电子束快速成形制备TC4合金的组织和拉伸性能分析 [J]. 金属学报，2019，55（6）：692–700.
[21] SOMLO K，POULIOS K，FUNCH C V，et al. Anisotropic tensile behaviour of additively manufactured Ti-6Al-4V simulated with crystal plasticity [J]. Mechanics of Materials，2021，162：104034.
[22] WANG J，LIN X，LI J，et al. Effects of deposition strategies on macro/microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti6Al4V [J]. Materials Science and Engineering A，2019，754：735–749.
[23] YU W H，SING S L，CHUA C K，et al. Particle-reinforced metal matrix nanocomposites fabricated by selective laser melting：A state of the art review [J]. Progress in Materials Science，2019，104：330–379.
[24] GU D，WANG H，ZHANG G. Selective laser melting additive manufacturing of Ti-based nanocomposites：the role of nanopowder [J]. Metallurgical and Materials Transactions A，2014，45A（1）：464–476.
[25] MAZUMDER J，DUTTA D，KIKUCHI N，et al. Closed loop direct metal deposition：art to part [J]. Optics and Lasers in Engineering，2000，34（4）：397–414.
[26] THIJS L，VERHAEGHE F，CRAEGHS T，et al. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V [J]. Acta Materialia，2010，58（9）：3303–3312.
[27] YADROITSEV I，BERTRAND PH，SMUROV I. Parametric analysis of the selective laser melting process [J]. Applied Surface Science，2007，253（19）：8064–8069.
[28] MOTOYAMA Y，TOKUNAGA H，KAJINO S，et al. Stress-strain behavior of a selective laser melted Ti-6Al-4V at strain rates of 0.001-1/s and temperatures 20-1000 degrees C [J]. Journal of Materials Processing Technology，2021，294：117141.
[29] MORGAN R，SUTCLIFFE C J，O′NEILL W. Experimental investigation of nanosecond pulsed Nd：YAG laser re-melted pre-placed powder beds [J]. Rapid Prototyping Journal，2001，7（3）：159–172.
[30] TOLOCHKO N K，MOZZHAROV S E，YADROITSEV I A，et al. Balling processes during selective laser treatment of powders [J]. Rapid Prototyping Journal，2004，10（2）：78–87.
[31] GU D D，MEINERS W，WISSENBACH K，et al. Laser additive manufacturing of metallic components：materials，processes and mechanisms [J]. International Materials Reviews，2012，57（3）：133–164.
[32] VRANCKEN B，THIJS L，KRUTH J P，et al. Heat treatment of Ti6Al4V produced by selective laser melting：microstructure and mechanical properties [J]. Journal of Alloys and Compounds，2012，541：177–185.
[33] AZIZI H，ZUROB H，BOSE B，et al. Additive manufacturing of a novel Ti-Al-V-Fe alloy using selective laser melting [J]. Additive Manufacturing，2018，21：529–535.
[34] ATTAR H，BOENISCH M，CALIN M，et al. Selective laser melting of in situ titanium-titanium boride composites：processing，microstructure and mechanical properties [J]. Acta Materialia，2014，76：13–22.
[35] XU W，BRANDT M，SUN S，et al. Additive manufacturing of strong and ductile Ti-6Al-4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition [J]. Acta Materialia，2015，85：74–84.
[36] 肖美立，柯林达，赖彩芳，等. SLM成形TC4钛合金高温拉伸力学性能及断裂机制分析 [J]. Applied Laser，2021，41（2）：350–356.
[37] SUN Q D，SUN J，GUO K，et al. Influences of processing parameters and heat treatment on microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V fabricated using selective laser melting [J]. Advances in Manufacturing，2022，10（4）：520–540.
[38] KOERNER C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting-a review [J]. International Materials Reviews，2016，61（5）：361–377.
[39] MORITA T，TSUDA C，NAKANO T. Influences of scanning speed and short-time heat treatment on fundamental properties of Ti-6Al-4V alloy produced by EBM method [J]. Materials Science and Engineering A，2017，704：246–251.

[40] GUO C，GE W，LIN F. Effects of scanning parameters on material deposition during electron beam selective melting of Ti-6Al-4V powder [J]. Journal of Materials Processing Technology，2015，217：148–157.
[41] EVERHART W，DINARDO J，BARR C. The Effect of scan length on the structure and mechanical properties of electron beam-melted Ti-6Al-4V [J]. Metallurgical and Materials Transactions A，2017，48A（2）：697–705.
[42] 葛文君，郭超，林峰. 工艺参数对电子束选区熔化成形Ti6Al4V合金显微组织的影响 [J]. 稀有金属材料与工程，2015，44（12）：3215–3218.
[43] 刘海涛，赵万华，唐一平. 电子束熔融直接金属成形工艺的研究 [J]. 西安交通大学学报，2007（11）：1307–1310.
[44] GALARRAGA H，WARREN R J，LADOS D A，et al. Effects of heat treatments on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting（EBM）[J]. Materials Science and Engineering：A，2017，685：417–428.
[45] 方星晨，李忠文，于治水. 电子束增材制造的TC4钛合金热处理后的显微组织和力学性能 [J]. 热处理，2021，36（4）：1–5.
[46] RAGHAVAN S，NAI M L S，WANG P，et al. Heat treatment of electron beam melted（EBM）Ti-6Al-4V：microstructure to mechanical property correlations [J]. Rapid Prototyping Journal，2018，24（4）：774–783.
[47] HRABE N，GNÄUPEL-HEROLD T，QUINN T. Fatigue properties of a titanium alloy（Ti-6Al-4V）fabricated via electron beam melting（EBM）：effects of internal defects and residual stress [J]. International Journal of Fatigue，2017，94：202–210.
[48] CHERN A H，NANDWANA P，MCDANIELS R，et al. Build orientation，surface roughness，and scan path influence on the microstructure，mechanical properties，and flexural fatigue behavior of Ti-6Al-4V fabricated by electron beam melting [J]. Materials Science and Engineering A，2020，772：138740.
[49] RAZAVYKIA A，BRUSA E，DELPRETE C，et al. An overview of additive manufacturing technologies-a review to technical synthesis in numerical study of selective laser melting [J]. Materials （Basel），2020，13（17）：3895.
[50] HEIGEL J C，MICHALERIS P，REUTZEL E W. Thermo-mechanical model development and validation of directed energy deposition additive manufacturing of Ti-6Al-4V [J]. Additive Manufacturing，2015，5：9–19.
[51] 姚欣欣，李健宇，王艺飞，等. 定向能量沉积增材制造过程中粉末对凝固影响的数值模拟（英文）[J]. 有色金属学报，2021，31（9）：2871–2884.
[52] SHINONAGA T，KOBAYASHI H，OKADA A，et al. Surface smoothing of additively manufactured Ti-6Al-4 V alloy by combination of grit blasting and large-area electron beam irradiation [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2023，127（11-12）：5127–5137.
[53] SINCLAIR L，CLARK S J，CHEN Y，et al. Sinter formation during directed energy deposition of titanium alloy powders [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture，2022，176：103887.
[54] WOLFF S J，WANG H，GOULD B，et al. In situ X-ray imaging of pore formation mechanisms and dynamics in laser powder-blown directed energy deposition additive manufacturing [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture，2021，166：103743.
[55] GUSHCHINA M O，KUZMINOVA Y O，KUDRYAVTSEV E A，et al. Effect of scanning strategy on mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy manufactured by laser direct energy deposition [J]. Journal of Materials Engineering and Performance，2022，31（4）：2783–2791.
[56] XU M，LI H，LIU Q，et al. In situ tensile observation of the effect of annealing on fracture behavior of laser additive manufactured titanium alloy [J]. Materials，2023，16（11）：3973.
[57] FAN W，TAN H，ZHANG F，et al. Overcoming the limitation of in-situ microstructural control in laser additive manufactured Ti-6Al-4V alloy to enhanced mechanical performance by integration of synchronous induction heating [J]. Journal of Materials Science & Technology，2021，94：32–46.
[58] XUE A，LIN X，WANG L，et al. Achieving fully-equiaxed fine beta-grains in titanium alloy produced by additive manufacturing [J]. Materials Research Letters，2023，11（1）：60–68.
[59] BAUFELD B，VAN DER BIEST O. Mechanical properties of Ti-6Al-4V specimens produced by shaped metal deposition [J]. Science and Technology of Advanced Materials，2009，10（1）：015008.
[60] WANG F，WILLIAMS S，COLEGROVE P，et al. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V [J]. Metallurgical and Materials Transactions A，2013，44（2）：968–977.
[61] MARTINA F，WILLIAMS S W，COLEGROVE P. Improved microstructure and increased mechanical properties of additive manufacture produced TI-6AL-4V by interpass cold rolling [C]//24th International SFF Symposium-An Additive Manufacturing Conference，SFF 2013. 2013：490–496.
[62] XIE Y，GONG M，ZHOU Q，et al. Effect of microstructure on fatigue crack growth of wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V [J]. Materials Science and Engineering：A，2021，826：141942.
[63] LIU Z，QIN Z X，LIU F，et al. The microstructure and mechanical behaviors of the Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si alloy produced by laser melting deposition [J]. Materials Characterization，2014，97：132–139.
[64] 张飞奇，陈文革，闫超峰. 微量硼元素添加对Ti6Al4V-*x*B组织及性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程，2018，47（3）：932–936.
[65] ZHANG J，WANG X，PADDEA S，et al. Fatigue crack propagation behaviour in wire+arc additive manufactured Ti-6Al-4V：Effects of microstructure and residual stress [J]. Materials & Design，2016，90：551–561.
[66] BERMINGHAM M J，MCDONALD S D，DARGUSCH M S. Effect of trace lanthanum hexaboride and boron additions on

microstructure，tensile properties and anisotropy of Ti-6Al-4V produced by additive manufacturing [J]. Materials Science and Engineering A，2018，719：1–11.

[67] BERMINGHAM M J，STJOHN D H，KRYNEN J，et al. Promoting the columnar to equiaxed transition and grain refinement of titanium alloys during additive manufacturing [J]. Acta Materialia，2019，168：261–274.

[68] NG C H，BERMINGHAM M J，DARGUSCH M S. Eliminating porosity defects，promoting equiaxed grains and improving the mechanical properties of additively manufactured Ti-22V-4Al with super-transus hot isostatic pressing [J]. Additive Manufacturing，2023，72：103630.

Research on Titanium Alloy by Additive Manufacturing Technology and Its Application Status

CUI Ya-di[1], WU Zhi-yuan[2], ZHAO Jun[1], LIU Hong-yu[1], CHEN Xiao-ming[1], YAN Ping[1], LIU Bo-liang[1], LIU Tian-yu[1], ZHANG Li-long[1]

(1. National Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, China Academy of Machinery Shenyang Researeh Institute of Foundry Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. Shenyang Gongda Heavy Equipment Manufacturing Co., Ltd., Shenyang 110141, Liaoning, China)

Abstract:

Titanium alloys are widely used in various industries as excellent structural and functional materials. However, the increasing complexity of application scenarios has raised higher demands on the processing and manufacturing technology of titanium alloys. Additive manufacturing has emerged as a highly efficient near-net forming method for integrated advanced manufacturing of titanium alloy components in diverse scenarios. Extensive research has been conducted by both domestic and international scholars on additive manufacturing of titanium alloys. In this comprehensive review, recent advancements in additive manufacturing technology for titanium alloys are examined. The progress of additive research on different methods based on the melting process, along with their optimization strategies, is summarized. The focus is on exploring microstructure property characteristics and forming effects of titanium alloys under each additive method. Furthermore, common microstructure defects encountered in additive manufacturing of titanium alloys are discussed, and potential solutions involving suitable processes and alloy designs are proposed. By analyzing the current status and optimization strategies of various additive manufacturing methods for titanium alloys, this review aims to provide valuable insights for the further development of titanium alloy by additive manufacturing technology. It serves as a useful reference for researchers and industry professionals in this field.

Key words:

additive manufacturing; titanium alloys; processing; microstructure; mechanical properties; post processing

（编辑：刘东辉，ldh@foundryworld.com）