

Analysis of the Influence of Process Parameters on the Microstructure and Properties of Titanium Alloy Additive Manufacturing

Mengyao Li¹ Yongchun Guo²

1. School of Aviation Maintenance Engineering, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China; lms0612@126.com

2. School of Aeronautical Manufacture Engineering, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China

Abstract

Titanium alloys, as high-performance metallic materials combining structural integrity and functional properties, are extensively utilized in aerospace, marine engineering, military equipment, and medical implants due to their advantages including low density, high specific strength, resistance to extreme temperature corrosion, and excellent biocompatibility. Particularly in aerospace applications, the quantity of titanium alloy components has become a key indicator of equipment advancement. However, with the increasing demands for structural complexity, customization, and lightweight design in advanced manufacturing, traditional processing methods (such as casting, forging, and mechanical cutting) have proven inadequate. These methods suffer from low material utilization rates, prolonged processing cycles, difficulties in forming complex structures, and high production costs, making them insufficient for modern manufacturing needs.

Keywords

titanium alloy; additive manufacturing; process parameters; microstructure; mechanical properties

工艺参数对钛合金增材制造成品组织性能的影响分析

李梦瑶¹ 郭永春²

1. 西安航空职业技术学院 航空维修工程学院, 中国·陕西 西安 710089

2. 西安航空职业技术学院 航空制造工程学院, 中国·陕西 西安 710089

摘要

钛合金作为一种兼具结构性能与功能特性的优质金属材料,其低密度、高比强度、耐高低温腐蚀及良好的生物相容性等优势,使其在航空航天、海洋工程、军事装备、医疗植入等领域得到广泛应用,尤其在航空航天领域,钛合金构件的用量已成为衡量装备先进程度的重要指标之一。随着高端制造领域对构件结构复杂性、个性化及轻量化要求的不断提升,传统钛合金加工工艺(铸造、锻造、机械切削等)存在材料利用率低、加工周期长、复杂结构难以成型、生产成本高等弊端,已无法满足现代制造业的发展需求。

关键词

钛合金; 增材制造; 工艺参数; 微观组织; 力学性能

1 引言

钛合金作为一种兼具结构性能与功能特性的优质金属材料,其低密度、高比强度、耐高低温腐蚀及良好的生物相容性等优势,使其在航空航天、海洋工程、军事装备、医疗

植入等领域得到广泛应用,尤其在航空航天领域,钛合金构件的用量已成为衡量装备先进程度的重要指标之一。随着高端制造领域对构件结构复杂性、个性化及轻量化要求的不断提升,传统钛合金加工工艺(铸造、锻造、机械切削等)存在材料利用率低、加工周期长、复杂结构难以成型、生产成本高等弊端,已无法满足现代制造业的发展需求。

2 钛合金增材制造主流工艺

2.1 激光选区熔化(SLM)工艺

SLM工艺的核心特点是激光能量集中、加热速度快、冷却速度极快(冷却速率可达 $10^4\sim 10^6\text{K/s}$),这种快速熔凝过程使得钛合金凝固组织呈现典型的非平衡结晶特征,易形

【基金项目】制造专业群2-3科研处24JP087钛合金激光-TIG电弧复合熔丝增材制造工艺及性能调控(项目编号:

24JP087; 11525727/81)。

【作者简介】李梦瑶(1995-),女,中国陕西西安人,硕士,助教,从事材料冶金工程,精细有机合成化学研究。

成细晶组织，但同时也会产生较大的热应力，增加裂纹产生的风险。SLM工艺的关键参数主要包括激光功率、扫描速度、扫描间距、层厚、粉末温度、激光光斑尺寸等，其中激光功率与扫描速度决定了能量输入密度，是影响熔池形态与凝固过程的核心参数。

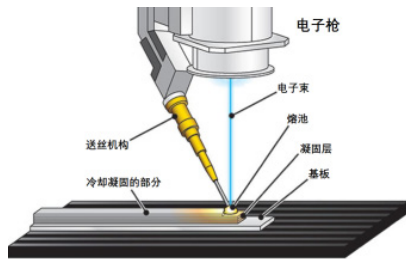


图 1: 激光选区熔化 (SLM) 工艺

2.2 电子束粉末床熔融 (EBM) 工艺

EBM工艺以高能电子束为热源，在真空环境下，电子束按照预设路径扫描钛合金粉末床，使粉末吸收能量熔化并凝固成型，逐层堆积形成完整构件。与SLM工艺相比，EBM工艺具有能量密度高、加热范围广、粉末预热温度高(可达600~1000℃)、真空环境可有效避免钛合金氧化等优势，同时真空环境与高温预热可显著降低热应力，减少裂纹缺陷的产生。

EBM工艺的冷却速率相对较慢(约 $10^3\sim 10^6\text{K/s}$)，凝固过程中晶粒有充足的生长时间，因此成品微观组织相对粗大，但组织均匀性较好，力学性能稳定性高。该工艺适用于中大型钛合金构件的精密制备，尤其在航空航天领域大型承力构件的制造中具有显著优势。EBM工艺的关键参数主要包括电子束功率、扫描速度、扫描间距、层厚、粉末预热温度、电子束光斑尺寸等，其中粉末预热温度是区别于SLM工艺的核心参数，对热应力分布与微观组织形成具有决定性影响^[1]。

3 工艺参数对钛合金增材制造成品微观组织的影响

钛合金增材制造的微观组织主要由晶粒尺寸、晶粒形态、相组成及缺陷分布(孔隙、裂纹、未熔合等)构成，其形成过程主要取决于熔池的温度场、流场及凝固速率，而工艺参数通过调控能量输入与热传导过程，直接决定了熔池的形态与凝固特性，进而影响微观组织的最终状态。以下结合主流工艺，重点分析关键工艺参数对钛合金增材制造成品微观组织的影响规律。

3.1 能量输入类参数的影响

激光/电子束功率是决定能量输入强度的核心参数，在其他参数不变的情况下，功率的升高会显著增加能量输入密度，使熔池温度升高、熔池尺寸增大、熔化深度增加，同时延长熔池存在时间，改变凝固速率与晶粒生长行为。

对于SLM工艺，当激光功率较低时，能量输入不足，钛合金粉末无法完全熔化，易产生未熔合、孔隙等缺陷，微观组织中存在大量未熔粉末颗粒，晶粒细小但不均匀，且存

在明显的层间界面。随着激光功率的升高，能量输入密度增加，粉末完全熔化，熔池尺寸增大，熔池内对流作用增强，层间结合更加紧密，未熔合与孔隙缺陷减少；但当功率过高时，能量输入过量，熔池温度过高，冷却速率显著降低，晶粒有充足的生长时间，易形成粗大的柱状晶或等轴晶，同时过高的温度会导致钛合金氧化，形成氧化夹杂，且熔池过大易产生飞溅，增加孔隙缺陷的产生概率。

相关研究表明，采用SLM工艺制备Ti-6Al-4V钛合金时，当激光功率在150~250W范围内，能量输入适中，可获得致密度高于99.2%、晶粒尺寸均匀的细晶组织；当功率超过300W时，晶粒尺寸从 $1\sim 3\mu\text{m}$ 增大至 $5\sim 8\mu\text{m}$ ，孔隙率从0.5%升高至1.8%以上^[2]。

3.2 几何参数的影响

钛合金增材制造的几何参数通过影响熔池的重叠程度与层间结合质量，进而影响微观组织的均匀性与缺陷分布，与能量输入类参数协同作用，决定成品的微观组织状态。

扫描间距是指相邻两条扫描轨迹之间的距离，其大小直接决定了相邻熔池的重叠程度，进而影响层内组织的均匀性与致密度。扫描间距过大时，相邻熔池重叠程度不足，层内会出现未熔合区域，形成明显的间隙与孔隙缺陷，微观组织不均匀，存在明显的扫描轨迹边界；扫描间距过小时，相邻熔池重叠程度过高，能量输入过于集中，熔池温度升高，冷却速率减慢，晶粒易长大，且易产生飞溅，增加孔隙率，同时过高的重叠度会导致热应力集中，增加裂纹产生的风险。

对于L-DED工艺，扫描间距主要影响熔覆层的宽度与重叠程度，合理的扫描间距可使熔覆层宽度均匀，层内组织致密，避免出现未熔合与孔隙缺陷。

3.3 其他关键参数的影响

粉末温度是EBM工艺的独特参数，也是影响其微观组织与缺陷分布的核心参数。EBM工艺的粉末预热温度通常在600~1000℃范围内，高温预热可显著降低熔池与基体之间的温度梯度，减少热应力，避免裂纹缺陷的产生；同时，高温预热可延长熔池存在时间，使晶粒生长更加均匀，减少组织不均匀性；此外，高温预热可促进钛合金的相变充分进行，改善相组成，提升微观组织稳定性^[3]。

4 工艺参数对钛合金增材制造成品力学性能的影响

钛取决于其微观组织状态工艺参数通过调控微观组织(晶粒尺寸、相组成、缺陷分布)，进而间接影响成品的力学性能。因此，工艺参数对力学性能的影响规律与对微观组织的影响规律密切相关，以下结合主流工艺，重点分析关键工艺参数对钛合金增材制造成品力学性能的影响合金增材制造成品的力学性能(硬度、抗拉强度、塑性、耐腐蚀性等)。

4.1 对硬度的影响

硬度是钛合金增材制造成品的重要力学性能指标，主要取决于晶粒尺寸、相组成及缺陷分布，遵循霍尔-佩奇关系(晶粒越细小，硬度越高)。工艺参数通过影响晶粒尺寸

与相组成,直接决定成品的硬度。

对于 SLM 工艺,激光功率与扫描速度是影响硬度的核心参数。当激光功率较低、扫描速度较快时,能量输入密度适中,冷却速率快,晶粒细小,且微观组织中存在大量的马氏体相(α' 相),马氏体相硬度较高,因此成品硬度较高;随着激光功率升高、扫描速度降低,能量输入密度增加,冷却速率减慢,晶粒长大,马氏体相分解为 $\alpha+\beta$ 双相组织, α 相硬度较低,因此成品硬度降低。

4.2 对抗拉强度与塑性的影响

抗拉强度与塑性是钛合金增材制造成品最关键的力学性能指标,直接决定构件的承载能力与服役安全性,其主要取决于晶粒尺寸、相组成、缺陷分布及层间结合质量。抗拉强度与硬度类似,遵循霍尔-佩奇关系,晶粒越细小,抗拉强度越高;而塑性则与晶粒尺寸、缺陷分布密切相关,晶粒过于细小或缺陷过多,都会导致塑性下降。

对于 SLM 工艺,激光功率与扫描速度的协同作用决定了抗拉强度的高低。低功率、高扫描速度时,晶粒细小,缺陷较少,抗拉强度较高;功率过高或扫描速度过低时,晶粒粗大,孔隙率增加,抗拉强度降低;功率过低或扫描速度过高时,未熔合缺陷增加,层间结合质量下降,抗拉强度显著降低。研究发现,SLM 工艺制备 Ti-6Al-4V 钛合金时,最优参数组合(激光功率 200W、扫描速度 1000mm/s、层厚 30 μ m、扫描间距 35 μ m)下,成品抗拉强度可达 1100~1150MPa,屈服强度可达 950~1000MPa,显著高于传统铸造工艺(抗拉强度约 900MPa)。

5 钛合金增材制造工艺参数优化策略

5.1 单参数定向调控

针对具体的性能需求进行单参数的定向调整,是工艺参数优化的基础。若需提高钛合金成品的强度和硬度,可在 SLM 工艺中适当提高激光功率、降低扫描速度,形成细针状 α' 马氏体组织;若需提高塑性和韧性,可采用 EBM 工艺并提高预热温度,使组织转变为稳定的 $\alpha+\beta$ 相,或在 SLM 工艺中适当提高层间温度,抑制粗大 α' 马氏体的形成。针对成形缺陷的控制,若成品存在未熔合孔隙,可提高激光功率/电子束流、减小扫描间距,增加能量输入和熔道重叠程度;若存在球化效应和表面粗糙度高的问题,可降低激光功率、提高扫描速度,减少热积累。

5.2 多参数协同优化

以能量密度为核心指标,开展多参数的协同优化,是实现钛合金组织性能综合提升的关键。通过正交试验、响应面法等实验设计方法,探究激光功率、扫描速度、扫描间距、层厚等参数的最佳组合,使能量密度处于最优范围,实现熔池的稳定熔化和凝固,获得高致密度、细晶粒的组织。例如等离子弧增材制造 Ti6Al4V 时,通过正交试验确定基值电流、峰值电流、沉积速度的最佳组合,可显著提高成品的成形性和显微硬度。多参数协同优化需兼顾各参数的耦合效应,避免单一参数调整导致的其他性能劣化。

5.3 外场辅助的参数调控

在传统工艺参数调控的基础上,引入外场辅助技术,可有效改善钛合金的凝固行为和组织形态,拓宽工艺参数的调控窗口。LDED 工艺中采用层间和轨间强制冷却技术,可快速降低层间温度,阻断 β 晶粒的连续生长,细化组织,改善力学性能的各向异性;在 SLM 工艺中引入超声振动,可通过空化效应细化熔池晶粒,减少气孔和裂纹缺陷;通过磁场辅助调控,可改变晶粒的生长方向,实现织构的优化。外场辅助与工艺参数的结合,能够实现对钛合金组织性能的精准调控。

5.4 数据驱动的智能优化

借助数值模拟、机器学习等数据驱动方法,实现工艺参数的智能预测和优化,是钛合金增材制造的发展趋势。通过建立熔池的热-力耦合数值模型,模拟不同工艺参数下的熔池动态、凝固行为和晶粒生长规律,可快速筛选出最优的参数组合,减少实验成本;基于机器学习算法构建工艺参数与成品质量指标的预测模型,可实现熔池深度、表面粗糙度、孔隙类型等指标的快速预测,同时量化各参数的贡献度和耦合效应。例如基于 XGBoost 和 SHAP 解释框架的机器学习模型,可准确预测钛合金激光粉末床熔融的成品质量,为工艺参数的优化提供定量指导。

此外,工艺参数的优化需与后处理工艺相结合,增材制造钛合金经去应力退火、热等静压、固溶时效等处理后,可有效消除残余应力、改善组织形态,进一步提升性能。例如 SLM 制备的 Ti6Al4V 经热等静压处理后,疲劳强度从 320MPa 提高到 420MPa,结合化学腐蚀处理后,疲劳强度可提升至 640MPa,与传统锻态合金相当。

6 结论

激光功率升高、扫描速度降低会使熔池温度升高、停留时间延长,促使晶粒粗化并增加 β 相含量,导致成品硬度略有下降但塑性提升;层厚与扫描间距过大易引发孔隙、未熔合等缺陷,显著降低成品致密度与力学性能,过小则会增加应力集中,诱发裂纹。合理匹配工艺参数可获得细小均匀的 $\alpha+\beta$ 双相组织,使成品兼具良好的强度与塑性,本研究结论可为钛合金增材制造工艺优化、提升成品质量提供理论支撑与实践参考。

参考文献

- [1] 王秋平,陈提提,胡胜强,等.钛合金增材制造技术及组织性能研究进展[J/OL].中国有色金属学报,1-46[2026-01-29].
- [2] 郝佳琦,方虹泽,薛兴芳,等.激光增材制造近 β 钛合金的微观组织调控与强韧性协同提升机制[J].铸造,2025,74(11):1424-1440.
- [3] 增材制造含铜钛合金的抗亚稳点蚀作用机制研究[C]//ICC 国际腐蚀理事会,中国腐蚀与防护学会,海洋腐蚀与防护国家重点实验室.第22届世界腐蚀大会摘要集(下).[出版者不详],2025:290-292.
- [4] 编辑部.我国首项增材制造产品类标准正式发布[J].粉末冶金工业,2025,35(05):156.