

# 基于粉末床熔融的钛合金3D打印组织演变与力学性能分析

王苏东

江苏威拉里新材料股份有限公司 江苏 徐州 221000

**摘要:** 粉末床熔融技术凭借逐层熔化沉积特性,为钛合金复杂构件制造带来革新。通过深入剖析打印过程中钛合金凝固组织枝晶形态、 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变规律,揭示气孔、裂纹等缺陷形成机制,并提出微观组织调控策略。系统研究其拉伸、疲劳、冲击及蠕变性能,明确打印工艺参数、组织特征与力学性能间的关联。研究成果为优化钛合金3D打印工艺、拓展其在航空航天等领域的应用提供理论依据与技术支持。

**关键词:** 粉末床熔融; 钛合金3D打印; 组织演变; 力学性能

## 引言

随着航空航天、生物医疗等领域对高性能钛合金构件需求激增,传统制造工艺难以满足复杂结构设计 with 性能要求,粉末床熔融3D打印技术应运而生。该技术通过激光或电子束逐层熔化钛合金粉末,实现构件近净成形。然而,快速凝固、循环热载荷等特殊加工条件,导致打印件组织与性能呈现独特性。本文聚焦粉末床熔融钛合金3D打印,深入分析组织演变规律与力学性能特征,旨在为突破技术瓶颈、提升打印件质量提供理论指导。

### 1 粉末床熔融钛合金 3D 打印技术原理

粉末床熔融钛合金3D打印技术以钛合金粉末为原料,通过逐层熔化与凝固实现复杂构件的精密制造。该技术基于离散-堆积成型原理,在成型缸内铺展一层均匀的钛合金粉末,粉末粒径通常控制在20-63微米之间,以确保良好的流动性与成型精度。高能量密度的激光或电子束作为热源,根据零件三维模型切片数据,在计算机控制系统引导下,对粉末床特定区域进行选择性扫描。扫描过程中,热源将钛合金粉末快速加热至熔点以上,使粉末颗粒之间形成冶金结合,随后迅速冷却凝固,完成单层实体结构的构建。完成单层扫描后,成型缸下降一个切片厚度的距离,通常为20-100微米,再由铺粉装置在已成型表面均匀铺设新的粉末层,重复上述扫描、熔化、凝固过程,层层叠加直至完成整个零件的制造。为保证成型质量,加工过程需在惰性气体保护环境下进行,通常采用氩气或氮气,将氧含量控制在极低水平,避免钛合金在高温下与氧气发生剧烈反应导致性能劣化。通过预热基板至适当温度(如200-400°C),可有效降低成型过程中的热应力,抑制裂纹产生。在材料特性方面,钛合金因高比强度、良好的耐腐蚀性及生物相容性,成为粉末床熔融3D打印技术的理想材料。该技术能够精确控制钛合金微观组织形态,通过调整工艺参

数实现细晶组织或定向凝固结构,显著提升构件的力学性能。打印过程中,可实现梯度材料设计,通过改变不同区域的合金成分或孔隙率,满足复杂工况下对构件强度、韧性、轻量化等多性能指标的协同要求。凭借无需模具、成型自由度高、材料利用率高等优势,粉末床熔融钛合金3D打印技术在航空航天、生物医疗、高端装备制造等领域展现出独特的应用价值,为复杂钛合金构件的近净成形制造提供了革命性解决方案。

## 2 基于粉末床熔融的钛合金 3D 打印组织演变分析

### 2.1 凝固组织特征

在粉末床熔融的钛合金3D打印进程中,凝固组织特征受多种因素交织影响。激光或电子束作为热源,瞬间释放高能量使粉末迅速熔化,随即进入快速凝固阶段。因该过程中热传导、对流等传热机制复杂,熔池内温度梯度与凝固速率分布不均,致使凝固组织呈现显著特征。一般而言,紧邻熔池底部区域,温度梯度大且凝固速率相对低,晶体倾向于沿温度梯度反方向优先生长,形成粗大柱状晶。随着向熔池中心推进,温度梯度减小而凝固速率增大,柱状晶生长受抑,逐渐转变为等轴晶。由于钛合金自身特性,不同合金成分体系下凝固组织亦有差异。例如, $\alpha$ 钛合金凝固时,因 $\alpha$ 相形核与长大特点,易形成针状马氏体 $\alpha'$ 组织、针状马氏体 $\alpha'+$ 岛状 $\alpha_m$ 混合组织或岛状 $\alpha_m$ 组织; $\beta$ 钛合金在凝固后,微观组织常呈现为柱状 $\beta$ -Ti基体包围薄壳状组织的形态。这些凝固组织特征直接关联材料后续性能,如粗大柱状晶易导致材料力学性能各向异性,而等轴晶分布则有利于提升材料性能的均匀性<sup>[1]</sup>。

### 2.2 相变行为

钛合金具有同素异构转变特性,在粉末床熔融3D打印的复杂热循环下,相变行为极为关键。打印过程中,钛合金经历快速加热与冷却,温度瞬间超越 $\beta$ 转变温度,

随后快速冷却,这促使合金内部发生一系列相变。当从高温 $\beta$ 相区快速冷却时,对于 $\alpha+\beta$ 钛合金,如常用的Ti-6Al-4V合金, $\beta$ 相可能转变为针状马氏体 $\alpha'$ 相,这是由于冷却速率极快,原子来不及充分扩散,以无扩散型相变方式形成马氏体。在冷却速率相对较低时, $\beta$ 相可能通过扩散型相变,先析出初生 $\alpha$ 相,剩余 $\beta$ 相再转变为次生 $\alpha$ 相或保留为残余 $\beta$ 相。相变过程中还可能伴随亚稳相的形成与转变,如 $\omega$ 相。 $\omega$ 相通常在特定成分与热历史条件下,由 $\beta$ 相经共格切变形成,对合金的力学性能,尤其是强度与硬度,产生显著影响。相变产物的类型、形态、尺寸及分布,极大程度决定了3D打印钛合金的最终性能,如马氏体组织虽能赋予材料高硬度与强度,但往往使材料塑性降低,而合理控制相变得到适宜比例的 $\alpha$ 相与 $\beta$ 相,则有望实现良好的强度-塑性匹配。

### 2.3 缺陷形成机制

粉末床熔融3D打印钛合金时,多种因素易致使缺陷产生,严重影响材料性能与制件质量。从粉末层面来看,粉末粒径分布不均、形状不规则以及粉末流动性差等,均可能导致铺粉不均匀,在后续熔化过程中,引发局部未熔合缺陷。在打印过程中,激光能量密度不足或过高都存在问题。能量密度不足时,粉末无法充分熔化,造成粉末与已固化层之间、粉末颗粒之间熔合不良;能量密度过高,则可能使熔池过度蒸发,形成匙孔,匙孔不稳定闭合后易产生气孔缺陷。热应力也是不可忽视的因素。由于打印过程是逐层堆积,每层经历快速加热与冷却,热胀冷缩效应致使层间产生较大热应力。当热应力超过材料的屈服强度时,材料发生塑性变形;若热应力持续累积超过材料的抗拉强度,则会引发裂纹,裂纹可能沿晶界或穿晶扩展,严重破坏材料的连续性与完整性。在电子束粉末床熔融打印中,真空环境控制不佳,引入杂质气体,也可能在材料内部形成气孔或夹杂等缺陷<sup>[2]</sup>。

### 2.4 微观组织调控

为优化3D打印钛合金的性能,对微观组织进行有效调控至关重要。从工艺参数优化角度出发,调整激光功率、扫描速度、扫描策略以及粉层厚度等参数,能够改变熔池的温度场与流场分布,进而影响凝固组织与相变行为。例如,提高激光功率或降低扫描速度,可增大激光能量密度,使熔池尺寸增大、冷却速率降低,有利于获得粗大柱状晶向等轴晶转变的组织,改善材料各向异性。合理设计扫描策略,如采用旋转扫描、分区扫描等方式,能够打破柱状晶生长方向的一致性,细化晶粒组织。在合金成分设计方面,通过添加微量元素,如B、C、N等,可起到变质剂的作用,促进异质形核,细化

晶粒。不同合金元素对相变过程有显著影响,调整合金元素含量,能够控制相变产物的类型与比例,实现对微观组织的调控。后续热处理也是调控微观组织的重要手段。固溶处理可使合金元素充分溶解,消除成分偏析,为后续时效处理创造良好条件;时效处理则通过析出第二相,实现沉淀强化,提升材料强度。

## 3 基于粉末床熔融的钛合金 3D 打印力学性能分析

### 3.1 拉伸性能

(1)粉末床熔融3D打印钛合金的拉伸性能受微观组织形态显著影响,柱状晶沿打印方向的择优生长形成各向异性,导致沿打印方向与垂直打印方向的抗拉强度和伸长率存在差异。细小均匀的等轴晶组织可有效提升材料的塑性变形能力,而未熔合缺陷、孔隙等微观缺陷会降低材料的承载能力,在拉伸过程中成为裂纹萌生的源头,显著削弱抗拉强度和延展性。(2)打印工艺参数对拉伸性能的调控作用关键,激光功率与扫描速度的合理匹配可优化熔池形状和尺寸,避免出现过度熔化或未熔合现象。过高的激光功率会导致熔池尺寸过大,产生气孔、热裂纹等缺陷,降低拉伸性能;过低的扫描速度则会增加热输入,引起晶粒长大,弱化材料强度。预热温度和层厚的优化能够改善层间结合质量,提升整体拉伸性能。(3)后处理工艺是改善拉伸性能的重要途径,热等静压处理可有效消除内部孔隙,细化晶粒,使材料的致密度接近100%,显著提升抗拉强度和伸长率。时效处理能够通过析出强化机制,在基体中形成弥散分布的强化相,增强材料抵抗塑性变形的能力,进一步优化拉伸性能。

### 3.2 疲劳性能

(1)粉末床熔融钛合金的疲劳性能与微观缺陷密切相关,内部孔隙、夹杂等缺陷在循环载荷作用下易产生应力集中,成为疲劳裂纹萌生的起始点。研究表明,缺陷尺寸越大、数量越多,疲劳寿命越短。打印过程中形成的粗糙表面,由于存在微观凸起和凹槽,也会增加应力集中程度,加速疲劳裂纹的萌生和扩展。(2)打印工艺参数通过影响微观组织和缺陷分布,间接影响疲劳性能。优化扫描策略可减少层间搭接缺陷,降低应力集中风险;调整激光能量密度能够控制熔池凝固过程,细化晶粒组织,提高材料的抗疲劳性能。例如,适当降低激光能量密度,可获得细小的晶粒结构,增加晶界数量,阻碍疲劳裂纹的扩展路径,从而延长疲劳寿命。(3)表面处理技术对提升疲劳性能效果显著,喷丸处理可在材料表面引入残余压应力,抵消部分循环载荷产生的拉应力,抑制裂纹萌生;电火花加工、电解抛光等方法可降

低表面粗糙度,减少表面缺陷,提高疲劳强度。采用适当的热处理工艺,如退火处理,能够消除打印过程中产生的残余应力,改善材料的疲劳性能<sup>[3]</sup>。

### 3.3 冲击韧性

(1) 粉末床熔融钛合金的冲击韧性受微观组织和缺陷的双重影响,其中粗大柱状晶与缺陷会加剧不利作用,因其各向异性,在冲击载荷下易沿晶界发生裂纹扩展,降低冲击韧性;细小均匀的等轴晶组织能够有效阻碍裂纹扩展,吸收更多的冲击能量,提升材料的韧性。内部存在的孔隙、未熔合等缺陷会降低材料的连续性,成为裂纹快速扩展的通道,显著削弱冲击韧性。(2) 打印工艺参数对冲击韧性的影响主要体现在对微观组织和缺陷的控制上,合适的激光功率和扫描速度能够保证粉末充分熔化和良好的层间结合,减少缺陷产生,优化微观组织。例如,较低的扫描速度和适中的激光功率可使熔池凝固更加缓慢,有利于形成细小的晶粒组织,提高冲击韧性。优化铺粉厚度和扫描间距,能够改善材料的致密度,间接提升冲击性能。(3) 后处理工艺是改善冲击韧性的有效手段,固溶处理可使合金元素充分溶解于基体中,均匀化学成分,消除成分偏析,提高材料的韧性;时效处理能够析出弥散分布的强化相,在保证强度的同时,增强材料的韧性。热等静压处理可消除内部缺陷,改善材料的均匀性,从而有效提升冲击韧性。

### 3.4 蠕变性能

(1) 粉末床熔融钛合金的蠕变性能与高温下的微观组织稳定性密切相关,晶粒尺寸对蠕变行为影响显著,细小晶粒在高温下具有较高的晶界面积,晶界滑动和扩散蠕变机制更为活跃,在较低应力水平下易发生蠕变变形;粗大晶粒由于晶界数量少,晶界对滑移的阻碍作用强,具有较好的抗蠕变性能。高温下合金元素的扩散速率加快,若微观组织中存在不稳定相,会在蠕变过程中发生相转变,影响材料的蠕变性能。(2) 打印工艺参

数通过影响微观组织形态和残余应力状态,对蠕变性能产生重要影响,较高的激光能量密度和较慢的扫描速度会导致热输入增加,使晶粒长大,在一定程度上有利于提高蠕变性能,但同时也可能引入更多的内部缺陷,降低材料的高温承载能力。合理控制打印过程中的冷却速率,能够优化微观组织中相的分布和形态,改善高温下的组织稳定性,进而提升蠕变性能。(3) 高温热处理工艺是提升蠕变性能的关键,通过固溶处理可使合金元素均匀分布,消除微观组织中的应力集中,提高材料的高温稳定性;时效处理能够析出稳定的强化相,这些强化相在高温下能够有效阻碍位错运动,抑制蠕变变形的发生。热等静压处理不仅可以消除内部缺陷,还能改善材料的致密度和组织均匀性,显著提高钛合金在高温下的蠕变抗力<sup>[4]</sup>。

### 结语

综上所述,对粉末床熔融钛合金3D打印组织演变与力学性能的研究,明晰了凝固组织、相变行为、缺陷形成与工艺参数的内在联系,掌握了打印件在不同载荷下的力学响应机制。但在复杂服役环境下的性能演变规律仍需深入探索,多尺度组织调控与性能优化技术有待进一步完善。未来研究可朝着工艺-组织-性能协同优化方向发展,推动钛合金3D打印技术迈向更高水平。

### 参考文献

- [1]王泽宇,冯泉,杨森,等.激光粉末床熔融3D打印TC4钛合金的研究进展[J].阀门,2025(2):210-219.
- [2]冉兴,王哲,朱明渝,等.激光粉末床熔融钛合金用粉体研究进展[J].有色金属工程,2024,14(12):189-204.
- [3]果春焕,王磊,邵帅齐,等.激光粉末床熔融金属点阵结构力学性能研究进展[J].材料导报,2025,39(6):212-221.
- [4]王亮,门正兴,陈雯,等.固溶及时效温度对激光粉末床熔融WE43镁合金组织与力学性能的影响[J].材料热处理学报,2024,45(10):25-33.