

# Research on the Microstructure and Mechanical Properties of Titanium Alloy 3D Printed Materials in the Aerospace Field

Ruichen Sun

Shenyang Yicheng Technology Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110000, China

## Abstract

The paper reviews the current research status of titanium alloy 3D printing materials, explores the material properties of titanium alloys and their applications in aerospace, and analyzes in detail the microstructure non-uniformity caused by complex thermal history and cooling rate changes during the 3D printing process. This non-uniformity may have a significant impact on the overall performance of the material, especially in terms of tensile and fatigue properties. Subsequently, the influence of 3D printing technology on the microstructure of titanium alloys, including the control of printing parameters and microstructure characteristics, was analyzed in detail. The mechanical properties of titanium alloy 3D printing materials were studied, and the relationship between tensile and fatigue properties was explored. Finally, the effect of different heat treatments on material properties was analyzed, providing insights for titanium alloy 3D printing. The optimization design of alloy 3D printing materials provides a reference.

## Keywords

titanium alloy; 3D printing; microstructure; mechanical properties

# 航空航天领域钛合金 3D 打印材料的微观结构与力学性能研究

孙瑞辰

沈阳易橙科技有限公司, 中国 · 辽宁 沈阳 110000

## 摘要

论文综述了钛合金 3D 打印材料的研究现状, 探讨了钛合金的材料特性及其在航空航天中的应用, 并详细分析了在 3D 打印过程中, 由于复杂热历史和冷却速率变化所导致的微观结构非均匀性, 这种非均匀性可能对材料的整体性能产生显著影响, 尤其是在拉伸和疲劳性能方面, 随后分析了 3D 打印工艺对钛合金微观结构的影响, 包括打印参数的控制与微观组织特征, 对钛合金 3D 打印材料的力学性能进行了详细分析, 研究了拉伸性能和疲劳性能, 探讨了微观组织与力学性能之间的关系, 最后分析了不同热处理对材料性能的影响, 为钛合金 3D 打印材料的优化设计提供了参考。

## 关键词

钛合金; 3D 打印; 微观结构; 力学性能

## 1 引言

由于钛合金具有极佳的强度重量比、抗腐蚀性和高温性能, 在航天航空领域得到了广泛的应用。传统的制造方式存在着限制其更广泛应用的加工困难和大量浪费材料的问题。钛合金的制造工艺随着增材制造(3D 打印)技术的发展而有了很大的创新。3D 打印技术可以实现复杂形状部件的高效制造, 通过材料的层层添加, 材料浪费明显减少。在航空航天产业中, 制造钛合金轻量、高性能零部件普遍采用 3D 打印技术, 促进了零部件设计与制造方式的变革。对最终力

学性能产生重要影响的材料内部微观结构的非均匀性, 可能是 3D 打印过程中所涉及的复杂热历史和冷却速率造成的。

## 2 钛合金 3D 打印材料的研究现状

### 2.1 钛合金的材料特性

在航天航空领域, 钛合金占有举足轻重的地位。其比强度, 即材料的强度与密度之比, 使钛合金成为轻量化设计的首选材料, 其强度远远超过钢、铝合金等传统结构材料。对航空航天器而言, 重量的减轻意味着在提高飞行性能和经济效益的同时, 还能搭载更多的燃料或载荷。对于飞机发动机、导弹壳体等需要承受极端条件的部件来说, 钛合金还具有优异的耐高温性能, 能在 600°C 以上的高温环境下保持稳

【作者简介】孙瑞辰(1996-), 男, 中国辽宁沈阳人, 本科, 助理工程师, 从事钛合金变形机理和增材基础性能研究。

定的强度和抗氧化能力<sup>[1]</sup>。钛合金的优异性能不仅表现在高比强度、耐高温等方面,在抗腐蚀性方面,钛合金的优异性能也是钛合金中的佼佼者。钛合金具有极高的抗腐蚀能力,在海水、酸性环境和航空燃料中都是如此,尤其适用于对材料耐腐蚀要求极为苛刻的海军飞行器和航天器。钛合金在长时间承受较高应力的条件下,仍能保持材料性能稳定,抗疲劳、抗变形能力较好。对于需要长时间飞行或在极端情况下工作的航天器部件,如机翼结构件和起落架等,这种特性显得尤为重要。

## 2.2 3D 打印技术在航空航天中的应用

增材制造技术打破了传统减材制造(如切削、铸造)在形状和材料利用率上的限制,通过材料逐层沉积的方式,可以直接从数字模型中生成复杂的三维结构部件。这一制造技术使得研发周期和生产成本大幅缩短,在设计和生产过程中可以迅速实现换代。高复杂度和高性能往往涉及航空航天领域对零部件的要求,而3D打印技术的应用恰好符合这一需求。通过3D打印技术,能够制造出涡轮叶片、燃烧室等内部结构复杂的钛合金部件和不仅重量轻,在极端环境下也能展现卓越性能的轻量化机身结构部件。

3D打印技术在提高航空航天零部件制造效率的同时,也为其设计和优化带来了新的机遇。传统制造方法由于受到加工工艺的限制,对设计师在零件设计时必须考虑工艺的可行性和经济性的要求形成了一定的制约。3D打印技术使设计师能够突破这一限制,创造出更符合力学和流体动力学要求的复杂结构件,从而在性能上得到进一步的提高。3D打印技术在航空航天领域的维护和备件供应链中同样具有举足轻重的作用,为降低维护成本和提高备件供应的可持续性提供了便利<sup>[2]</sup>。3D打印技术可在飞行器操作地点进行“按需制造”,减少备件库存和物流费用,提高维护效率和反应速度,对延长飞行器寿命意义重大,特别是在远程或极端环境下,3D打印技术成为目前飞行器制造领域的一个重要趋势。

## 3 钛合金 3D 打印工艺对微观结构的影响

### 3.1 打印参数的控制

在最终成品的微观结构中,钛合金3D打印过程中的打印参数是至关重要的。打印参数主要包括直接影响材料熔池形态、冷却速度以及晶粒的形成和生长的激光功率、扫描速度、层厚度、预热温度和冷却速率等。影响熔池温度和能量输入的关键参数是激光功率(Laser Power)。若激光功率过大,熔池温度过高,则可能造成物料熔化过度,形成晶粒较大,表面粗糙的现象;但若激光功率过低,熔池温度不足,则有可能造成材料熔融不全,形成缺陷,如孔隙、裂纹等,使材料力学性能受到影响。扫描速度与激光功率有很大关系,更快的扫描速度能降低热输入、提高冷却速度,对晶粒的细化有帮助,但也可能造成熔池不稳定、孔隙率增大;扫描速度变慢,可能造成晶粒变粗,料子韧性降低。

层厚度直接影响材料的致密程度和微观结构的均匀程度,是打印的另一个重要参数。厚层厚度能提高打印效率,但也可能造成层与层之间的结合不佳,出现层叠、毛孔粗大等瑕疵;而薄层厚度可以提高机件的致密性和表面光洁度,但会使打印效率降低,制造时间和制造成本也会提高。主要影响材料热应力和残余应力的是预热温度和冷却速度。较高的预热温度可以降低打印时产生的热应力,有助于减少裂纹的形成,但如果预热温度过高,则可能导致晶粒生长,对材料的力学性能造成影响,在打印过程中,热应力冷却速率对晶粒的生长有着重要的影响,而快速的冷却通常会造成功晶粒的细化,从而使材料的强度和硬度都得到了提高;而缓慢降温则可能造成颗粒变粗,使料子韧性降低,不耐疲劳<sup>[3]</sup>。钛合金3D打印过程中的微观结构优化,合理控制打印参数是必不可少的。

### 3.2 微观组织特征

在3D打印过程中,由于材料的微观组织与传统的制造方式存在明显差异,因此材料经历了快速的熔融和凝固过程。材料内部会因激光或电子束的快速扫描和多次重复加热而形成晶粒形态不规则、微观分层、柱状晶粒等复杂的微观组织特征。这些微观组织特征通常表现为高度的各向异性,也就是对材料力学性能会产生重要影响的不同方向的晶粒大小和形状的表现。例如,通常沿着热流方向生长的柱状晶粒,在拉伸或压缩载荷下表现出较高的强度和韧性等特定方向,可能导致材料具有优于其他方向的力学性能。

3D打印钛合金时,由于快速凝固和不均匀的冷却速率,材料内部容易形成残余应力和微观缺陷,这些残余应力有可能造成材料在后续使用过程中变形或开裂,从而降低材料的服役寿命。同样由于微观缺陷的存在如孔隙裂纹分层等,也会使钛合金的力学性能下降,如降低拉伸强度和疲劳寿命以及断裂韧性等,因此在实际应用中通常需要通过后续的热处理工艺来改善材料的微观组织特征并消除残余应力和微观缺陷,从而使材料的整体性能得到提高。

## 4 钛合金 3D 打印材料的力学性能分析

### 4.1 拉伸性能

钛合金3D打印材料在实际应用中的抗拉性能是考核其是否能够承受静负荷的一个重要指标。钛合金在航空航天领域广泛应用于结构件,以强度高、延展性好著称。3D打印技术可以通过对打印参数的精确控制,使钛合金材料具有与传统制造方法相媲美的抗拉性能,甚至可以达到更好的抗拉性能。微观组织特征通常会显著影响3D打印材料的拉伸性能。3D打印制备的钛合金材料,由于其特有的快速凝固和多次热循环,晶粒结构可能会直接影响到材料的屈服强度、抗拉强度和断裂延展性,表现出柱状晶体等轴状晶体或树枝状晶体等各种不同的微观组织特征。

拉伸性能检测一般包括测定材料的屈服强度、抗拉力、断

裂延伸率三个方面。研究发现,3D打印钛合金材料由于3D打印过程中急剧降温而产生的精炼晶粒效应,其屈服强度和抗拉强度往往比传统锻造材料更高。由于孔隙、裂纹、分层等微观缺陷的存在,断裂延展性可能会降低。尤其是这些微观缺陷在拉伸测试过程中,常成为应力集中的起始点,造成应变程度较低的材料断裂。拉伸性也受到材料内部残余应力的影响,这种应力通常会导致材料在拉伸载荷下提前屈服或脆性断裂,因为3D打印过程中冷却和热循环不均匀而产生。

使材料的拉伸性能得到优化,可通过调整打印参数及后续热处理工艺来实现。降低层厚度优化扫描策略以及适当提高预热温度,都能使材料得到更好的拉伸性能。适当的热处理,如退火或时效处理,能消除残余应力并使微观组织均匀化从而使材料的综合拉伸性能得到提高。对3D打印钛合金在航空航天结构中应用进行拉伸性能研究具有十分关键的作用,也是使3D打印技术在要求高的领域得到推广应用的其中之一。3D打印技术应用于航空航天结构件中的拉伸性能研究意义重大。对于材料在极端条件下仍能表现出优异的力学性能的保证。

#### 4.2 疲劳性能

钛合金3D打印材料在循环载荷条件下,特别是在航空航天领域,其疲劳性能是评价其长期服役能力的重要指标,疲劳性能决定了结构件的使用寿命和可靠性<sup>[4]</sup>。材料的抗疲劳性能直接影响到飞行器的安全性和维护成本,因为航天器在飞行过程中经常承受交变载荷。由于钛合金具有极佳的疲劳性能,3D打印技术为钛合金部件提供了一条制造复杂形状和内部结构的新途径,钛合金在高应力部件中的应用非常广泛。

通常3D打印钛合金材料比传统锻造材料的疲劳性能要低一些。这一现象主要归因于在疲劳测试中容易成为裂纹萌生源的3D打印过程中可能形成的孔隙、未熔区域等微观缺陷,从而在应力水平较低的情况下造成材料疲劳失效。若层间结合不良,材料在循环载荷下易产生分层裂纹,使疲劳寿命进一步降低,打印层与层之间的结合强度也直接影响疲劳性能。

减少空隙率和微观缺陷的形成,从而提高材料的疲劳强度,通过降低激光功率,提高扫描速度。后续的热处理工艺,如热等静压(HIP)处理,使物料内部的气孔、微裂等明显减少,并且都对微组织进行了优化处理,使疲劳性能得到改善。通过表面状态的改善和压应力的导入,如喷丸处理或激光表面熔覆等表面处理技术也能显著改善材料的疲劳寿命。这些工艺的优化为确保钛合金3D打印材料在极端环境下的可靠性和长寿命表现,在航空航天领域得到广泛应用打下了基础。

### 5 微观结构与力学性能的关联性研究

#### 5.1 显微组织与力学性能的关系

3D打印过程中,材料内部常形成各种微观组织特征,

如柱状晶粒、轴状晶粒、树枝状晶粒等。通常沿着热流方向生长的柱状晶粒能够提供较高的强度在拉、伸荷载方向,这对于材料的抗拉力和抗疲劳性的提升都是必不可少的。柱状晶粒的各种相向性特性,可能会导致不同方向的材料力学性能出现显著的差异,从而对其整体力学性能产生影响。等轴晶粒通常能提供较均匀的力学性能,但在冷却速度和热梯度的熔池中,它们的生长是受到控制的。晶粒的大小和分布,对材料的韧性、强度、疲劳性等也有着不可忽视的影响。由于细小的晶粒有助于阻碍裂纹的扩展,改善材料的断裂韧性,因此精细的晶粒结构通常能够提高材料的强度和韧性。而粗大的晶粒则有可能在高应力集中点造成材料脆性增大、易断裂等问题。

#### 5.2 不同热处理对材料性能的影响

热处理工艺可以改变材料的微观组织,从而对材料的力学性能进行优化,以满足不同应用场景的需要<sup>[5]</sup>。退火处理一般用来使材料晶粒细化并消除打印过程中的残余应力,退火后可使材料的韧性和塑性有明显提高,同时也使材料的抗疲劳性能得到提高。时效处理通过在材料中析出强化相来增强材料的抗拉强度和硬度,使其在高应力环境下具有更好的稳定性。而热等静压处理,通过消除材料内部的孔隙和微裂纹,使材料的致密性得到显著提高,从而对材料的力学性能进行有效的提高。

### 6 结论

在3D钛合金打印材料应用于航空航天领域时,合理控制打印参数和优化热处理工艺是获得卓越力学性能的关键,具体地说就是能够对打印参数进行精确调整,如激光功率、扫描速度和层厚度等,以控制材料的晶粒大小和分布,并减少微观缺陷的产生,从而增强材料的抗拉强度和疲劳寿命。3D打印钛合金材料中,微观结构的均匀性和致密性是直接影响其可靠性和稳定性的重要因素,所以针对不同的应用需求,选择恰当的工艺参数和热处理方式是必不可少的,这对实现高性能钛合金3D打印零件的制造起着至关重要的作用。

#### 参考文献

- [1] 刘浩,石永亮,党海青.挤出成形3D打印仿生骨植入钛合金支架制备工艺及性能研究[J].粉末冶金技术,2024,42(4):367-373.
- [2] 李风伟,谢英密,毛貽旒,等.粉末粒径对粘结剂喷射3D打印TC4钛合金致密度和性能影响[J/OL].特种铸造及有色合金,1-6[2024-09-01].
- [3] 王路,李贤海,刘宪翠,等.3D打印钛合金椎间融合器联合含PRP同种异体骨在ACDF中的应用效果[J].中华全科医学,2024,22(7):1133-1137+1174.
- [4] 潘黎.3D打印技术在钛及钛合金精密铸造工艺中的应用研究[J].信息记录材料,2024,25(6):49-51.
- [5] 吴建.3D打印钛合金的制备与组织性能研究[J].太原学院学报(自然科学版),2024,42(2):69-73.