

The application and precision control of additive manufacturing technology in the customized production of complex thermodynamic mechanical parts

Fengtao Wang

Xinjiang Railway Vocational and Technical College, Hami, Xinjiang, 839000, China

Abstract

This study focuses on the application and precision control of additive manufacturing technology in the customized production of complex thermodynamic mechanical parts. At present, there is a strong demand for customization of complex thermodynamic mechanical parts, which is difficult to meet with traditional manufacturing technology, and additive manufacturing technology brings opportunities, but it faces the problem of dimensional accuracy control. This paper comprehensively uses literature research, case analysis and experimental research methods to analyze the principle and classification of additive manufacturing technology, as well as its application in the customized production of typical parts such as aero engine turbine blades, and verifies the significant advantages of this technology in the manufacturing of complex structures and customized production. At the same time, the influence of materials, process parameters and other factors on accuracy is analyzed, and the precision control strategy is proposed from the aspects of optimizing material selection and pretreatment, and accurately controlling printing process parameters. In the future, in-depth research should be conducted in the direction of material research and development, process innovation, equipment upgrading and multidisciplinary integration to promote the development of additive manufacturing technology.

Keywords

additive manufacturing; complex thermodynamic mechanical parts; Customized production; Dimensional accuracy control

增材制造技术在复杂热动机械零部件定制化生产中的应用与精度控制

王峰涛

新疆铁道职业技术学院，中国·新疆 哈密 839000

摘 要

本研究聚焦增材制造技术在复杂热动机械零部件定制化生产中的应用与精度控制。当前，复杂热动机械零部件定制化需求旺盛，传统制造技术难以满足，增材制造技术虽带来机遇，但面临尺寸精度控制难题。研究综合运用文献研究、案例分析与实验研究法，分析了增材制造技术原理、分类，以及在航空发动机涡轮叶片等典型零部件定制化生产中的应用，验证了该技术在复杂结构制造和定制化生产方面的显著优势。同时，剖析了材料、工艺参数等因素对精度的影响，并从优化材料选择与预处理、精确控制打印工艺参数等方面提出精度控制策略。未来，应在材料研发、工艺创新、设备升级及多学科融合等方向深入研究，推动增材制造技术发展。

关键词

增材制造；复杂热动机械零部件；定制化生产；尺寸精度控制

1 引言

现代制造业中，复杂热动机械零部件定制化需求飙升，传统制造技术难以适配，增材制造技术应运而生，却面临尺寸精度控制难题。攻克这一难题，对完善理论、推动产业升级意义重大。美、德、日等发达国家和国内科研主体，已对增材制造开展研究。但现有研究存在工艺参数耦合效应不

明、材料适配性差、设备成本高且稳定性欠佳，以及应用研究普适性不足等问题。本研究运用文献研究、案例分析与实验研究法，梳理研究现状，总结实践经验，搭建实验平台并构建数学模型。本研究从三方面创新：多维度剖析零件结构与制造环境对精度的影响；融合材料科学、机械工程等多学科知识解决精度问题；提出多参数协同优化与实时监测反馈策略，实现工艺参数优化与精度动态控制。

【作者简介】王峰涛（1993-），男，中国河南信阳人，本科，工程师，从事机械设计制造及其自动化研究。

2 增材制造技术与复杂热动机械零部件定制化生产概述

增材制造技术原理与分类：增材制造基于离散-堆积原理，先通过 CAD 软件建模，再用切片软件将模型切成二维层面，最后由设备逐层堆积材料成型。比如熔融沉积成型（FDM）技术，将丝状热塑性材料加热挤出，按路径堆积成实体。依据材料供给、成型原理等，增材制造可分为多种类型。材料挤出型的 FDM 设备成本低、操作简单；粉末床熔融型的 SLM、EBM 能制造高精度金属零件，分别用于航空航天和医疗领域；光固化型的 SLA 精度高、DLP 打印速度快；层叠制造型的 LOM、DDM，前者用于制作大型模型，后者应用于电子制造；热喷涂型的 WAAM 沉积速率高、PTA 可提升零件表面性能；生物打印型则有望解决器官移植供体短缺问题^[1]。

复杂热动机械零部件定制化生产特点与需求：复杂热动机械零部件结构复杂，如航空发动机涡轮叶片有扭曲形状和冷却通道，热交换器有曲折流道。此外，快速交付能满足客户需求，数字化设计和自动化生产可显著缩短交付周期。增材制造技术在定制化生产中的优势：增材制造能突破传统限制，制造复杂结构零部件，如一体成型航空发动机涡轮叶片。在小批量定制化生产上，它摆脱模具依赖，通过修改数字模型就能生产，成本效益高、灵活性强。该技术还能大幅缩短生产周期，跳过模具制造环节，快速响应紧急订单。在成本方面，增材制造材料利用率超 90%，降低了材料成本，尤其适用于小批量和定制化生产。

3 增材制造技术在复杂热动机械零部件定制化生产中的应用案例分析

3.1 航空发动机涡轮叶片定制化生产

航空发动机涡轮叶片工作环境恶劣，对性能和结构要求极高，传统铸造难以满足定制需求。某企业采用选区激光熔化（SLM）技术制造叶片。设计阶段，借助 CAD 与流体热传导分析，优化冷却通道，相比传统叶片，表面温度降低 10%~15%。制造时，SLM 无需模具，生产周期缩短 30%~40%，尺寸精度 $\pm 0.05\text{mm}$ ，表面粗糙度 $\text{Ra}3.2\text{--}6.3\mu\text{m}$ 。微观组织上，晶粒尺寸减小 30%~50%，高温抗拉、屈服强度提升。飞行试验显示，使用增材制造叶片的发动机燃油效率提高 5%~8%，推力增加 3%~5%。

3.2 汽车发动机缸体定制化制造

汽车发动机缸体结构复杂，砂型铸造定制成本高、周期长。某企业运用 SLM 工艺制造缸体，通过 CAE 分析优化水套、油道，缸体表面温度降低 8%~12%，零部件磨损率降低 15%~20%。SLM 技术无需模具，生产周期缩短 40%~50%，尺寸精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ，表面粗糙度 $\text{Ra}6.3\text{--}12.5\mu\text{m}$ ，抗拉、屈服强度提升。道路测试表明，搭载增材制造缸体的汽车燃油经济性提高 5%~7%，动力性能提升 8%~10%。

3.3 工业汽轮机转子定制化生产

工业汽轮机转子工况复杂，传统锻造和加工定制受限。某企业采用电子束选区熔化（EBM）技术，设计时结合 CAD 与有限元分析，优化转子结构，效率提高 5%~8%。EBM 在真空中作业，无需模具，生产周期缩短 30%~40%，尺寸精度 $\pm 0.08\text{mm}$ ，表面粗糙度 $\text{Ra}3.2\text{--}6.3\mu\text{m}$ ，抗拉、屈服强度和疲劳寿命显著提升。运行测试显示，使用增材制造转子的汽轮机维护周期延长 30%~50%^[2]。

4 增材制造技术在复杂热动机械零部件生产中的精度影响因素分析

4.1 材料因素对精度的影响

材料的热膨胀系数、收缩率与流动性，从本质上影响着零部件的成型精度。在 SLM 打印进程中，高膨胀系数的钛合金材料，因打印时局部温度骤变，热胀冷缩不均，致使内部产生较大热应力，尺寸偏差可达 $\pm 0.2\text{--}0.5\text{mm}$ 。FDM 打印使用的 ABS 材料，收缩率在 0.4%~0.9% 之间，以汽车内饰件这类大型零件为例，尺寸可能缩小 1~2mm，严重影响适配性，同时表面粗糙度显著上升。粉末床熔融工艺里，不锈钢粉末若流动性欠佳，零件内部孔隙率增加 5%~10%，尺寸偏差达到 $\pm 0.1\text{--}0.3\text{mm}$ ，极大削弱零件的力学性能。

4.2 工艺参数对精度的影响

打印速度、层厚与温度等参数，直接决定了零件的精度。SLM 打印钛合金时，打印速度过快，粉末无法充分熔化，孔隙率增加 5%~10%，尺寸偏差 $\pm 0.1\text{--}0.3\text{mm}$ ；速度过慢，零件长时间受热，热变形量最高可达 $\pm 0.5\text{--}1.0\text{mm}$ 。FDM 工艺中，层厚过厚，表面台阶效应显著，粗糙度增加 2~3 倍，尺寸偏差 $\pm 0.2\text{--}0.5\text{mm}$ ；层厚过薄，层间结合不牢，缺陷发生率增加 10%~15%。以航空发动机叶片的 EBM 打印为例，打印温度过高，高温合金晶粒增大 30%~50%，变形量 $\pm 0.3\text{--}0.8\text{mm}$ ；温度过低，层间结合强度降低 30~50%。采用合理扫描策略，SLM 打印零件变形量可降低 30%~50%，精度显著提升 1~2 个等级。

4.3 设备性能对精度的影响

设备的机械精度、喷头定位精度，对零件精度影响极大。FDM 设备机械精度不足，在打印过程中定位偏差，零件尺寸偏差可达 $\pm 0.2\text{--}0.5\text{mm}$ 。SLA 设备喷头定位精度误差为 $\pm 0.05\text{mm}$ 时，对于微纳光学元件这类微纳结构零件，尺寸偏差达到 $\pm 0.1\text{--}0.3\text{mm}$ ，严重影响其光学性能。打印平台若不平整，大型金属零件因各部分受力不均，变形量可达 $\pm 0.5\text{--}1.0\text{mm}$ 。设备稳定性差，打印过程中频繁抖动，零件尺寸偏差增加 30%~50%，缺陷发生率大幅提高^[3]。

4.4 环境因素对精度的影响

环境温度、湿度与振动等环境因素，对打印精度产生重要作用。SLM 打印大型金属结构件时，环境温度过高，冷却过程温差异常，尺寸偏差 $\pm 0.5\text{--}1\text{mm}$ ；温度过低，钛合金零件冷却过快，内部应力集中，极易出现裂纹。在金属

粉末床熔融工艺中,湿度过高,粉末吸收水分,打印时产生气体,零件孔隙率增加 5%~10%,尺寸偏差 $\pm 0.1\sim 0.3\text{mm}$ 。在打印微机电系统(MEMS)这类精细结构时,外界振动干扰材料沉积,零件尺寸偏差达到 $\pm 0.05\sim 0.1\text{mm}$ 。

5 增材制造技术在复杂热动机械零部件生产中的精度控制策略

5.1 优化材料选择与预处理

材料选择直接关系增材制造的精度。粉末床熔融技术中,镍基高温合金粉末是航空发动机零部件的理想之选,其出色的高温强度、抗氧化和抗热腐蚀性,能满足极端工况需求。合适粒度分布与球形度的粉末用于 SLM 打印,可减少内部孔隙,提升致密度与尺寸精度,良好的粉末流动性也有助于降低尺寸偏差。航空航天领域对重量要求严苛,钛合金凭借低密度、高强度和耐腐蚀性脱颖而出。选择钛合金粉末时,需严控化学成分均匀性与氧含量,过高的氧含量会降低零件韧性与精度。在 EBM 制造钛合金零件时,高质量粉末可让内部组织更均匀,力学性能更稳定,保障尺寸精度。材料预处理同样重要。筛分金属粉末能去除团聚物,保证粒度均匀,使铺粉更均匀,减少零件内部缺陷,SLM 打印时尺寸偏差可降低 20%~30%。干燥易吸潮的铝合金粉末,能改善打印性能,降低气孔率 30%~50%。打印前对金属材料表面清洁活化,如激光熔覆前对基体喷砂,可增强层间结合强度,提升尺寸精度与力学性能。

5.2 精确控制打印工艺参数

构建参数优化模型是精确控制工艺参数的核心。借助正交、响应面实验,研究打印速度、层厚等参数对精度的影响,通过回归分析建立数学模型,预测最优参数组合。基于神经网络、遗传算法等机器学习算法,输入大量实验和生产数据进行训练,模型便能依据零件设计信息与材料特性,自动预测最优参数,提升优化效率与准确性。增材制造中各工艺参数相互耦合,多参数协同控制至关重要。以打印速度和温度为例,两者关联紧密,打印速度过快且温度过低,会加剧零件缺陷与尺寸偏差。采用多变量自适应控制算法,依据温度场分布、材料沉积状态等实时数据,动态调整多个参数。在控制扫描策略时,也要综合考虑零件结构与热分布,合理调整相关参数,确保各区域成型质量与精度。利用温度、位移等多种传感器,对打印过程关键参数实时监测。在打印平台和喷头部位安装传感器,获取温度和喷头运动轨迹数据,及时发现异常并调整。结合光学测量、X 射线检测等在线检测技术,实时检测零件尺寸与内部质量,对比设计模型,修正尺寸偏差,保障打印稳定性与精度^[4]。

5.3 提高设备性能与智能化水平

提升打印机机械精度是基础。FDM 打印机采用高精度滚珠丝杠和直线导轨,定位精度可达 $\pm 0.01\text{mm}$,重复定位精度 $\pm 0.005\text{mm}$,大幅提升运动平稳性与精度。优化关键

零部件设计,如采用高强度铝合金并增加加强筋设计打印平台,增强刚性与稳定性,减少因振动和变形导致的精度影响。定期校准和维护打印机,确保机械精度长期稳定。控制系统的稳定性对增材制造精度影响显著。选用高稳定性硬件,如德国倍福 TwinCAT 运动控制器,其先进的实时操作系统和高性能处理器,可实现对各运动轴的精确控制。采用自适应、模糊控制等先进算法,根据实时数据自动调整控制参数,减少参数波动导致的尺寸偏差。做好屏蔽、滤波,降低电磁干扰,保证控制系统稳定可靠。智能化打印设备是未来发展方向。设备应具备自适应控制功能,根据温度、压力等实时数据自动调整工艺参数,优化打印过程。

5.4 改进后处理工艺

后处理工艺对提升零件尺寸精度与综合性能作用关键。热处理能消除打印内应力,改善微观组织和力学性能。镍基高温合金零件经固溶和时效处理,内应力降低 50%~70%,屈服强度提高 15%~25%,尺寸偏差控制在 $\pm 0.05\sim 0.1\text{mm}$ 。机械加工可修正尺寸偏差,提高表面精度。精密铣削汽车发动机缸筒内壁,能将内径尺寸精度控制在 $\pm 0.03\text{mm}$ 以内,圆柱度误差 $\pm 0.005\text{mm}$ 以内,表面粗糙度降至 $\text{Ra}0.8\sim 1.6\mu\text{m}$ 。磨削工业汽轮机叶片型面,可消除表面台阶效应和尺寸偏差,使尺寸精度达到 $\pm 0.02\text{mm}$,表面粗糙度 $\text{Ra}0.4\sim 0.8\mu\text{m}$ 。表面处理能提升零件表面质量与性能。电镀镀铬、镀锌可提高零件耐磨性和耐腐蚀性,活塞镀铬后耐磨性提高 3~5 倍。化学镀镍在零件表面形成镍磷合金镀层,增强耐腐蚀性和耐磨性。喷丸处理在零件表面引入残余压应力,提高航空发动机压气机叶片疲劳寿命 20%~30%。

6 总结

本研究围绕增材制造技术在复杂热动机械零部件定制化生产中的应用与精度控制展开。应用层面,通过航空发动机涡轮叶片等案例,证实该技术在复杂结构制造、定制化生产等方面优势显著。精度控制上,剖析了材料、工艺参数等因素对精度的影响,提出针对性策略。从材料选择与预处理,到工艺参数的优化控制,再到设备性能提升和后处理工艺改进,有效提高了零件的尺寸精度和质量。未来,材料研发需开发高性能材料,调控微观结构。工艺创新要探索多材料、多工艺融合技术,优化打印路径。设备升级应提升精度、速度与稳定性,推进智能化。

参考文献

- [1] 董斌,刚润振.金属增材制造技术在农业机械领域的应用与发展[J].南方农机2024,55(10):33-35.
- [2] 许子桐.精密加工技术与农业机械制造工艺的研究[J].农机使用与维修,2025(01):79-82.
- [3] 周玉婷.增材制造聚醚醚酮电致形状记忆驱动特性及其仿生研究[D].吉林:吉林大学,2023.
- [4] 董洁,龙玲,殷国富.增材制造技术在汽车行业的应用研究[J].机械,2019,46(02):41-45+67.