

喷蜡材料可打印性研究 及蜡模尺寸精度控制

张攀^{1, 2, 3}, 汪东红^{1, 2}, 郝新⁴, 马鑫⁴, 储广金^{1, 2, 3}, 郑行⁴, 孙宝德^{1, 2}

(1. 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室, 上海 200240;

2. 上海交通大学, 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200240;

3. 嘉兴铸为增材科技有限公司, 浙江嘉兴 314101; 4. 中国航发南方工业有限公司, 湖南株洲 412001)

摘要: 喷蜡3D打印技术为复杂结构铸件蜡模的快速制造提供了新的途径, 本文以涡轮叶盘为研究对象, 通过测试蜡料的流变、表面张力等热物理特性, 对液滴的可打印性进行评估; 在此基础上, 提出了一种多区域协同偏差变形的控制方法, 其中基准区域尺寸保持不变, 并结合均匀放缩与反向变形补偿策略, 对蜡模成形及冷却过程中的收缩与变形进行设计阶段控制。结果表明, 所选蜡料在打印温度下的Z值为3.83, 具备良好的可打印性; 优化后的蜡模整体尺寸偏差可稳定控制在 ± 0.1 mm范围内, 叶片尖端等关键区域的变形得到有效控制。本研究为喷蜡3D打印蜡模的快速、高精度制造提供了理论依据和技术支撑。

关键词: 喷蜡3D打印; 尺寸精度; 流变特性; 可打印性; 涡轮叶盘

中图分类号: TG249.5; TF124.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 06-0605-07

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0080

Research on Printability of Wax Spraying Material and Dimensional Accuracy Control of Wax Pattern

ZHANG Pan^{1, 2, 3}, WANG Dong-hong^{1, 2}, HAO Xin⁴, MA Xin⁴,
CHU Guang-jin^{1, 2, 3}, ZHENG Hang⁴, SUN Bao-de^{1, 2}

(1. Shanghai Key Laboratory of Advanced High-Temperature Materials and Precision Forming, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. State Key Lab of Metal Matrix Composites, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Jiaxing Zhuwei Additive Technology Co., Ltd., Jiaxing 314101, Zhejiang, China;

4. China Aviation Engine Corporation Southern Industrial Co., Ltd., Zhuzhou 412001, Hunan, China)

Abstract: Wax jet 3D printing offers a new approach for the rapid fabrication of complex wax patterns. This study takes a turbine bladed disc as the investigation object to evaluate the printability of the droplets by testing the rheological properties, surface tension, and other thermophysical characteristics of the wax material; based on this, a multi-zone coordinated deviation and deformation control method was proposed, in which the dimensions of the reference zone remain unchanged, and a combination of uniform scaling and reverse deformation compensation strategies was applied to control the shrinkage and deformation during the wax pattern forming and cooling processes at the design stage. The results show that the Z value of the selected wax material at the printing temperature falls within the appropriate ejection range, indicating good printability; after optimization, the overall dimensional deviation of the wax pattern can be consistently controlled within ± 0.1 mm, and the deformations in key areas such as the blade tips are effectively suppressed. This study provides a theoretical basis and technical support for the rapid and high-precision manufacturing of wax patterns using wax jet 3D printing.

Key words: wax jet 3D printing; dimensional accuracy; rheological property; printability; turbine bladed disc

熔模铸造是一种近净成形工艺, 通过使用精确的模具铸造出尺寸非常准确和表面质量较高的铸件, 减少了后续加工的需求^[1]。航空发动机的核心部件,

如叶片、涡轮和导向器, 通常由高温合金铸件制成。这类铸件主要通过熔模精密铸造成形, 但工艺流程复杂、周期长, 模具成本高, 精铸工艺的开发和迭代效

基金项目: 国家自然科学基金 (52575417); 中国航空发动机集团产学研合作项目 (HFZL2025CXY011)。

收稿日期: 2026-02-12 收到初稿, 2026-04-13 收到修订稿。

作者简介: 张攀 (1998-), 男, 博士生, 主要研究方向为喷蜡增材制造。E-mail: 3181723369@qq.com

通信作者: 汪东红, 男, 副研究员, 博士生导师, 主要研究方向为喷蜡增材制造与智能铸造。E-mail: wangdh2009@sjtu.edu.cn

引用格式: 张攀, 汪东红, 郝新, 等. 喷蜡材料可打印性研究及蜡模尺寸精度控制 [J]. 铸造, 2026, 75 (6): 605-611.

ZHANG Pan, WANG Donghong, HAO Xin, et al. Research on printability of wax spraying material and dimensional accuracy control of wax pattern [J]. Foundry, 2026, 75 (6): 605-611.

率也较低。在原型机阶段，由于铸件结构需反复调整，采用传统蜡模注射成形时，模具制造和修改成本高，复杂零件的蜡模制备甚至可能占据整个制造周期的70%以上，模具损坏或无法修复还会严重延缓新机研制进度。

随着全球制造业的快速发展，快速熔模精密铸造（Rapid Investment Casting, RIC）逐渐成为解决上述问题的重要技术。RIC 将快速成形（Rapid Prototyping, RP）与熔模铸造技术结合，通过数字建模、计算机控制、信息技术、材料成形、激光加工以及精密铸造等手段，大幅缩短零件制造周期^[2-4]。其中，快速成形蜡模技术可直接打印用于熔模铸造的蜡

模，避免了昂贵的模具制作费用，降低了成本，非常适合单件或小批量生产。目前快速熔模精密铸造技术采用的原材料有蜡、光敏树脂和聚苯乙烯^[5-7]等。相比之下，非蜡材质打印蜡模制备的陶瓷型壳在焙烧中因易开裂、型壳变形不均或焙烧残留而受限^[8]。随着材料和成本限制等难题被攻破，喷蜡打印快速成形蜡模逐渐成为最有前途的方法^[9]。

从20世纪90年代开始，3D打印蜡模技术开始应用于精密铸造。3D打印蜡模技术主要包括熔融沉积成形（FDM）技术、选择性激光烧结（SLS）技术、光固化成形（SLA）技术与喷蜡打印技术。各种蜡模打印技术优缺点对比见表1。

表1 各种蜡模打印技术优缺点
Tab. 1 The advantages and disadvantages of various printing technologies

项目	SLA	SLS	FDM	喷蜡打印
材料成分	光敏树脂	聚苯乙烯	工程塑料	紫蜡
产品精度/mm	0.1	0.2	>0.2	0.1
表面粗糙度/ μm	0.6~6.3	5.6~8.2	9.5~14.5	0.6~3.2
一体成形尺寸/mm	800 × 800 × 500	500 × 500 × 450	500 × 500 × 450	294 × 212 × 150
可成形细节/mm	0.3	1	1	0.01
成本	适中	较低	较低	高
污染物产生量	较低	较多	多	低
生产效率	较高	较高	低	低

国内蜡模喷蜡成形3D打印技术起步较晚，初期依赖进口设备。近年来，国内企业和研究机构加大研发投入，逐步实现技术突破。喷墨打印头、控制系统和材料等核心部件取得进展，部分企业实现国产化，降低了对进口的依赖。该技术已广泛应用于珠宝行业的制造，并开始小批量应用于航空航天、汽车制造、医疗器械等精密铸造领域的小型铸件蜡模研制。大量研究表明^[10-13]，在整个精密铸造流程中，有三大关键工序对铸件尺寸和变形的影响最为显著：蜡模制备、型壳制备以及铸件凝固。随着熔模铸造流程的进行，误差不断累计，最后导致尺寸不合格。在熔模铸造过程中，由于多个工序的影响，铸件尺寸偏差会逐步累积并传递，最终可能无法满足设计要求。作为熔模铸造的第一阶段产品，蜡模的质量直接关系到后续型壳和铸件的成品质量。蜡模尺寸偏差占铸件尺寸偏差的10%~70%，蜡模成形过程中的变形规律是实现近净成形熔模铸造的基础，蜡模制造是熔模铸造的关键步骤^[14]。

喷蜡3D打印技术虽为复杂铸件的快速原型制造提供了理想解决方案，但其产业化应用仍受制于两大瓶颈：其一，蜡料的可打印性是成形的基础，其流变、

热物理特性直接影响打印过程的连续性与初始成形质量；其二，蜡模的尺寸精度是保证最终铸件近净成形的关键，其打印及后处理过程中的收缩、变形等偏差若不加控制，将在熔模铸造后续工序中被累积与放大，最终导致零件报废。基于此，本课题以涡轮叶盘蜡模为研究对象，聚焦于喷蜡打印工艺中的蜡模尺寸精度控制问题。从蜡料的成分、性能、可打印性以及蜡模尺寸精度控制等多个角度出发，探讨了打印蜡模尺寸精度的控制方法，旨在为我国高端精密铸造中蜡模的快速、高精度制造提供理论依据与技术支持，并对涡轮等复杂结构铸件的蜡模尺寸精度控制提供有效指导，推动熔模铸造技术的进步。

1 试验材料及方法

1.1 材料性能

本研究所用材料为上海交通大学自主研发的ZWWAX-1 3D打印蜡。其针入度和灰分含量分别依据ASTM D1321和ASTM D5630-13A标准进行测试，蜡料的基本性能如表2所示。

表2 ZWWAX-1蜡料的基本性能
Tab. 2 Basic properties of the wax material ZWWAX-1

针入度	熔点/°C	软化点/°C	灰分
8	63	55	<0.01

1.2 打印设备与工艺

喷蜡3D打印技术作为最快、最精确的3D打印技术之一，其基本原理是打印喷头喷射出液滴，液体在外界环境影响下固化并逐层堆积制造零件^[15-16]，如图1所示。与其他3D打印技术相比，喷蜡3D打印技术表现出更高的尺寸精度和更精细的细节还原能力，在制造复杂形状和高精度要求的蜡模时，成为更具优势的选择^[17]。喷蜡打印技术可选择材料种类丰富，支持纯蜡打印，并能通过多喷嘴同时喷射成形蜡和支撑蜡材料。支撑材料在打印完成后易于去除，不会影响蜡模结构或表面质量，同时能够实现较高的精度和良好的表面光滑度。喷蜡打印技术与喷墨打印机原理相关，通过喷嘴或微孔将液体滴状物选择性地喷射出来，逐渐堆叠成三维形态。喷蜡3D打印技术在熔模铸造蜡模制备领域得到了广泛的应用，该技术可以以极高的效率去控制管理不同材料的沉积，使得蜡模具备较高的尺寸精度和表面质量，适用于生产复杂几何结构的蜡模^[18-19]。

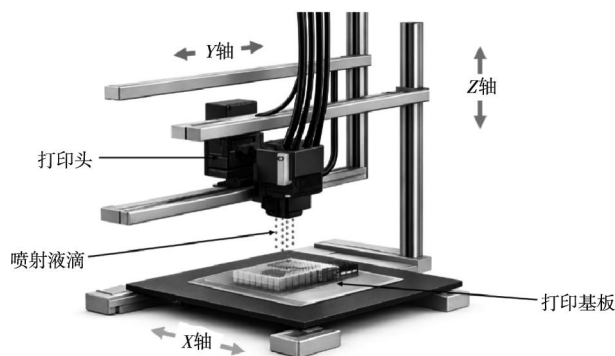


图1 喷蜡3D打印工作原理图

Fig. 1 Working principle diagram of the wax jet 3D printing

基于上述研究背景与方法，本研究选用ZW-300打印机作为实验平台进行涡轮蜡模的成形试验。该设备由嘉兴铸为增材科技有限公司研发，是一款喷蜡3D打印机，可实现高精度、高表面质量的铸造用蜡模快速制造。设备主要由打印头、滚筒与打印平台三部分组成：打印头用来精准喷射蜡材与支撑材料；滚筒逐层铺平材料，确保层间结合质量与表面平整度；打印平台则为成形过程提供稳定的基准平面，如图1所示。该设备打印分辨率为XYZ方向1 200 × 1 200 × 1 600 DPI，每层的高度为16 μm，主要工艺参数如表3所示。

表3 ZW-300打印机主要工艺参数
Tab. 3 Main process parameters of ZW-300 printer

工艺参数	ZW-300
喷孔内径/μm	约39
喷出方式	喷墨打印
蜡液喷出温度/°C	95
蜡液预热温度/°C	85

2 结果与讨论

2.1 喷蜡 3D 打印蜡料的可打印性研究

对于喷蜡打印技术来说，可打印性是功能性蜡液主要的限制。如果蜡液配方不合适，喷射过程就容易出现不稳定现象，例如在喷嘴出口形成细长的液体拖尾，从而降低打印质量。拖尾的长度及其存在时间会直接影响液滴落在基底上的位置精度，进而限制图案的清晰度和可控性，也就是蜡液的可打印性。因此，能否形成稳定、清晰且无明显拖尾的液滴，是整个打印过程中的首要环节，也是保证打印质量的基础。蜡液的流变学特性和粘弹性均会影响蜡液的可打印性。Fromm首先提出无量纲常数 Oh 来表征液滴的形成。并进一步定义了其相反数 Z ，用以描述喷射过程中液滴的整体表现，其表达式如下^[20]：

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\eta}{\sqrt{(\sigma\rho a)}} \quad (1)$$

$$Z = \frac{1}{Oh} = \frac{\sqrt{(\sigma\rho a)}}{\eta} \quad (2)$$

式中： We （Weber）数为惯性力和表面张力的比值； Re （Reynolds）数为惯性力和粘性力的比值； η 为粘度； ρ 为液滴密度； a 为喷嘴直径； σ 为表面张力。 Z 常数仅与墨水物理参数及喷头的喷嘴直径相关。Fromm首次提出当 $Z > 2$ 时，墨水是适合打印的^[20]。为了更精确预测墨水可打印范围，Brian Derby和Nuno Reis^[21]以液滴形成过程中方程和数据拟合为依据，用 Re 和 We 描述墨水特性和打印条件，如图2所示^[22]。图2中红色虚线分别代表 $Z=1$ 和 $Z=10$ 。常数将空间分为三个区域，中间区域（ $Z=1\sim 10$ ）是可喷射范围。对于太粘的墨水（ $Z < 1$ ），液滴不能从喷孔中喷射出来。

因此，在评估蜡液的可打印性时，需要重点关注其粘度、表面张力以及密度。如图3所示，蜡料展现典型非牛顿流体行为，粘度随剪切速率增大呈不断减小（剪切变稀效应）趋势。同一温度下，高剪切速率区（ $> 1\ 500\ s^{-1}$ ），分子链解缠达到饱和，粘度趋于稳定。ZWWAX-1 3D打印蜡在高剪切速率下的粘度为7.45 mPa·s。

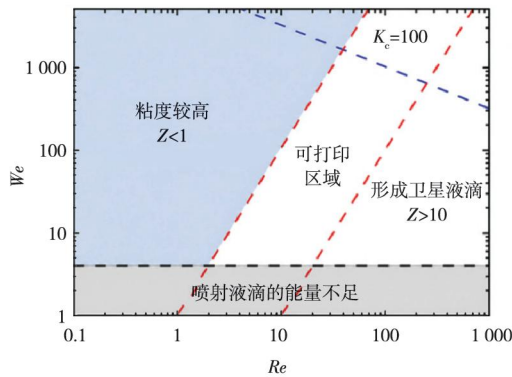


图2 在We作为Re常数关系函数中的可打印区域

Fig. 2 The zone could be printed in the function of We being as a constant relationship of Re

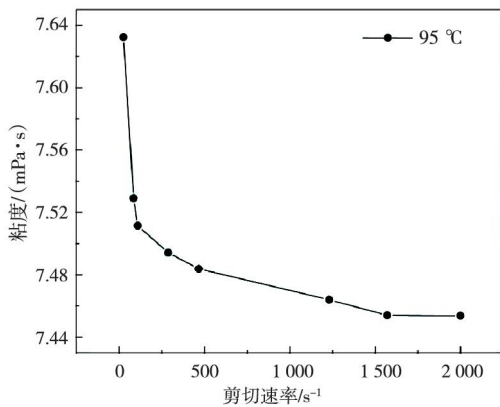


图3 蜡料剪切粘度试验测试结果

Fig. 3 Test results of shear viscosities of the wax material

ZWWAX-1 3D打印蜡在95 °C时的表面张力为26.03 mN/m, 如图4所示。

ZWWAX-1 3D打印蜡在95 °C时(喷头打印温度)的物理性质和无量纲数如表4所示。基于这些参数计算得到的Z值为3.83, 处于适合喷射的合理区间内。为验证这一判断, 在打印设备上对该蜡料进行了单点喷射和连续线条测试, 结果如图5所示。试验结果表明, 该蜡料在实际打印过程中能够稳定形成液滴, 具备良好的打印适用性。

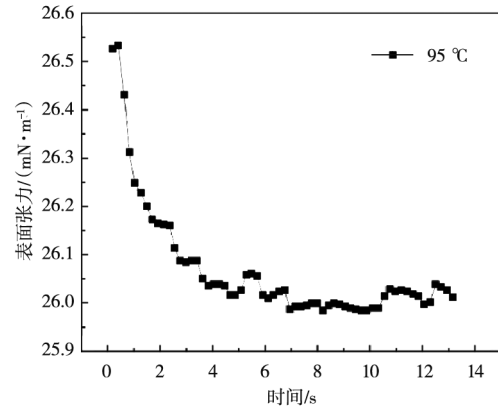
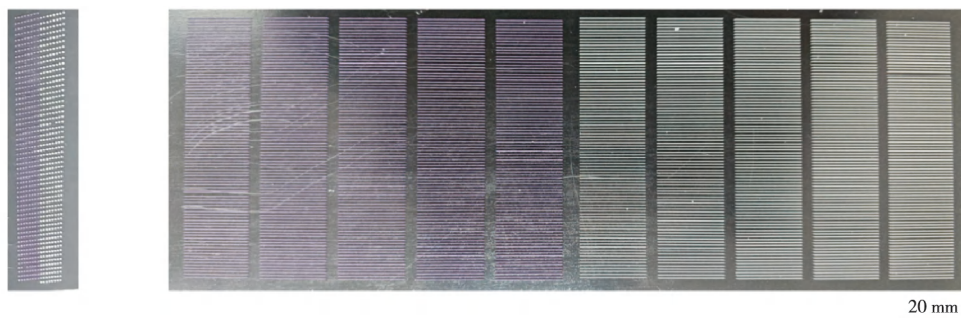


图4 蜡料表面张力试验测试结果

Fig. 4 Surface tension test results of wax material

表4 ZWWAX-1的物理性质和无量纲数
Tab. 4 Physical properties and dimensionless number of ZWWAX-1

密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	粘度/($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	表面张力/($\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$)	Z
800	7.45	26.03	3.83



(a) 单点喷射照片

(b) 测试条打印结果

图5 单点喷射和连续线条测试

Fig. 5 Single point injection and continuous line test

2.2 蜡模尺寸精度控制

蜡模在成形过程中产生的变形主要分为以下两种类型^[23]。

(1) 线性收缩: 线性收缩是指蜡模在冷却过程中, 由于体积收缩而引起的尺寸变形, 表现为各方向上的比例缩小, 线性收缩通常可以通过试验测得一个

定量的收缩率。

(2) 弯曲变形: 弯曲变形是指蜡模在冷却过程中因内应力分布不均而产生的翘曲或弯曲现象。这种变形通常是非均匀的, 更具复杂性。

均匀放缩法是一种用于补偿三维打印蜡模在冷却过程中因尺寸缩小而产生偏差的常用方法。其核心思

路是在打印之前，对三维模型在X、Y和Z三个方向进行等比例调整，以抵消材料冷却后带来的尺寸变化，从而使最终成形的蜡模尺寸尽可能接近设计目标。为有效评估冷却收缩对尺寸精度的影响，需要对蜡模的收缩率进行计算，其计算方法如式(3)所示。其中S表示蜡模的收缩率， D_d 指的是三维模型于X、Y、Z方向的设计尺寸， D_m 则为蜡模在X、Y、Z方向上的实际测量尺寸。通过计算所获取的收缩率，能够助力蜡模在冷却过程中对尺寸变化的程度展开评估，进而为后续的模型优化提供依据。

$$S = \left| \frac{D_d - D_m}{D_d} \right| \times 100\% \quad (3)$$

按照GB/T 42603.1—2023 的要求，对蜡料的线收缩率进行了测量，模型如图6所示。将打印得到的阶梯型蜡模在恒温恒湿条件下放置 24 h，以确保尺寸稳定，随后对其X方向线收缩率进行测量，结果汇总于表5。对蜡模的Y和Z方向进行测量，得到的收缩率分别为0.4%和0.53%。

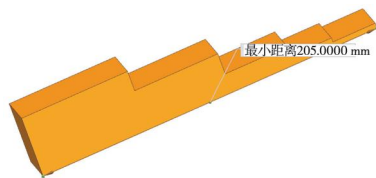


图6 喷蜡3D打印阶梯试样模型

Fig. 6 Wax-sprayed 3D printing step sample model

表5 ZWWAX-1的X方向线收缩率测量结果
Tab. 5 The measurement results of X-direction linear shrinkage of ZWWAX-1

编号	模型尺寸/mm	测量值/mm	收缩率/%
1		204.12/204.08	0.44
2	205	204.3/204.2	0.37
3		204.1/204.2	0.41
线收缩率/%		0.41	

综上，蜡模在X、Y和Z方向上的收缩率分别为0.41%、0.40%和0.53%。在三维模型设计阶段针对不同方向的尺寸进行相应调整，可有效抵消成形与冷却过程中产生的尺寸变化，从而获得满足精度要求的蜡模。使用调整收缩后的模型进行打印，如图7所示。对收缩后的蜡模进行尺寸精度分析，结果如图8所示。由结果统计分析可以得到蜡模整体尺寸偏差在-0.104 3~0.104 3 mm之间，标准偏差为0.040 5。可以看出优化后的蜡模整体尺寸偏差在-0.1~0.1 mm之间，达到了CT3级别的精度要求。



(a) 支撑蜡和蜡模

(b) 蜡模

图7 喷蜡3D打印涡轮叶盘蜡模实物

Fig. 7 Physical model of the turbine bladed disc wax patterns

2.3 蜡模尺寸优化

通过引入反向变形补偿，可在蜡模冷却过程中有效抵消材料收缩引起的形状变化，使成形结果更加接近设计目标。该方法适用于三维打印、注射成形等多种制造工艺，能够显著降低由温度变化和材料特性导致的尺寸偏差。如图8所示，经优化后的涡轮蜡模在关键几何部位均表现出较高的尺寸精度，表明通过合理的设计调整与收缩补偿可有效减小整体尺寸误差。然而，在部分叶片尖端仍存在一定程度的变形，主要源

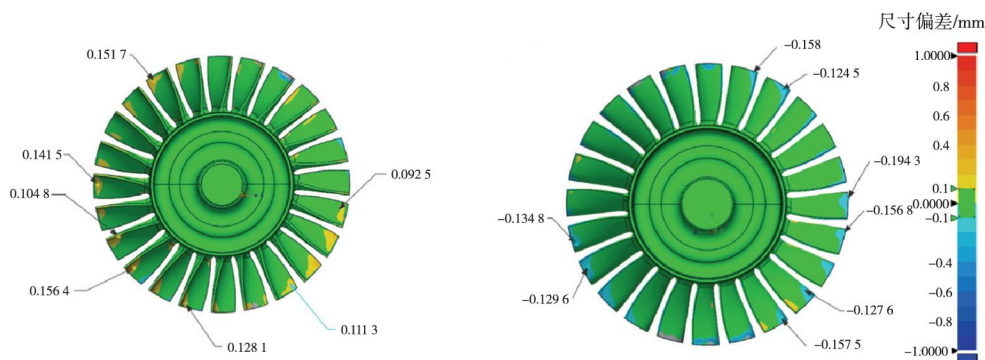


图8 涡轮叶盘蜡模变形3D尺寸对比

Fig. 8 3D dimensional comparison of the turbine bladed disc wax pattern deformation

于去除支撑材料过程中局部结构发生翘曲。

针对上述问题,本研究根据蜡模的实际变形特征对涡轮三维模型进行了进一步优化。将叶片沿高度方向划分为三部分:基准区域、过渡区域和偏移区域,如图9(c)所示。其中,叶片顶端的区域向下偏移0.1 mm,以补偿叶片的尖端变形;叶片中部至偏移区域之间设置为过渡区域。采用优化后的模型进行打印,其结果如图10(a)所示,对应的尺寸精度分析结果如图10(b)所示。可以看出,优化后蜡模的整体尺

寸偏差均控制在 $-0.1\sim 0.1$ mm范围内,叶片尖端等关键部位的尺寸偏差得到有效抑制。结果表明,在设计阶段根据不同位置的收缩和变形特性进行针对性调整,可显著提高蜡模的整体尺寸精度。在此基础上,本文提出了一种面向叶片结构的变形控制方法,通过将叶片划分为基准区域、过渡区域和偏移区域,并结合均匀放缩与反向变形补偿策略,实现对蜡模成形及冷却过程中收缩与变形的设计阶段控制。

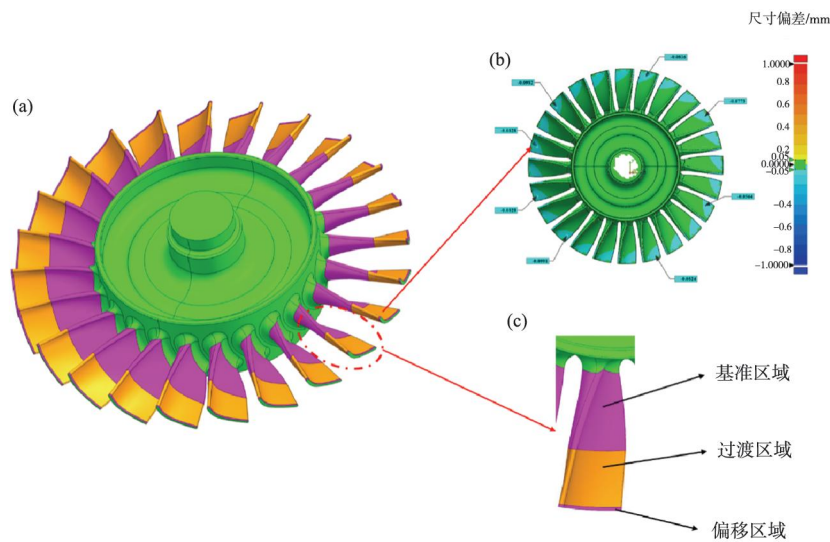
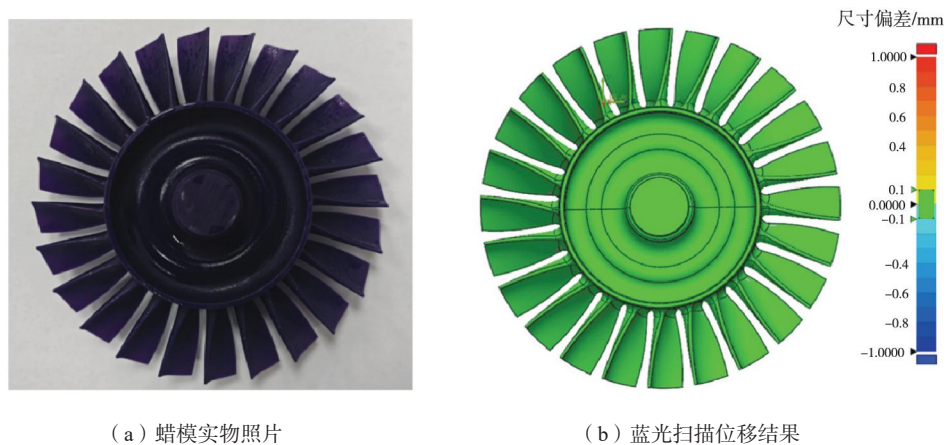


图9 涡轮叶盘模型补偿方法

Fig. 9 Turbine blade model compensation method



(a) 蜡模实物照片

(b) 蓝光扫描位移结果

图10 优化模型打印的涡轮叶盘蜡模成形精度验证结果

Fig. 10 Experimental validation of the forming accuracy of the turbine blade disc wax pattern printed using the optimized model

3 结论

(1) 通过对蜡料剪切粘度和表面张力等性能进行测试,结果表明,该蜡料在打印温度 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下具有良好的流变与界面特性。在高剪切速率区域($>1\ 500\ \text{s}^{-1}$)时,蜡料粘度趋于稳定,其粘度约

为 $7.45\ \text{mPa}\cdot\text{s}$,同时表面张力保持在适宜喷射的范围内,使液滴能够稳定形成并顺利从喷嘴喷出,从而保证喷射过程的连续性并获得良好的打印表面质量。

(2) 基于蜡料的粘度、表面张力及密度等参数计算得到无量纲参数 $Z=3.83$,该值处于稳定喷射范围 $1\sim 10$ 之间,表明该蜡料在喷蜡3D打印过程中能够形成

稳定液滴而不会产生明显卫星液滴或拖尾现象。喷点及测试条打印结果进一步验证了该蜡料具有良好的可打印性和稳定的喷射行为。

(3) 针对叶片尖端的变形问题, 将叶片划分为基准区域、过渡区域和偏移区域, 并对叶片顶端区域进行

偏移补偿, 同时结合均匀放缩与反向变形补偿策略进行优化设计。试验结果表明, 优化后的涡轮蜡模整体尺寸偏差可稳定控制在 $-0.1\sim 0.1$ mm范围内, 叶片尖端变形得到有效抑制, 显著提高了复杂蜡模的尺寸精度, 为高端精密铸造提供了可靠的工艺基础和技术支撑。

参考文献:

- [1] 官邦, 汪东红, 马洪波, 等. 熔模铸件尺寸控制的数字孪生建模关键技术与应用 [J]. 金属学报, 2024, 60 (4): 548-558.
- [2] 熊旭. 基于SLS快速熔模精铸的尺寸精度及传递规律研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
- [3] 伍林, 姜卫国, 郝悦, 等. 熔模铸造用硅溶胶面层涂料关键参数动态演化过程及胶凝机理 [J]. 铸造, 2025, 74 (7): 967-974.
- [4] 曹林强. 精密铸造蜡模3D打印机设计研究 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2016.
- [5] SABARINATHAN P, NARAIN K S, AHMED S D. A peanut-hull-PLA based 3D printing filament with antimicrobial effect [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2026, 160: 242-253.
- [6] GREUL M, PINTAT T, GREULICH M. Rapid prototyping of functional metallic parts [J]. Computers in Industry, 1995, 28 (1): 23-28.
- [7] NGUYEN T T, TRAN V T, NGUYEN V T, et al. Effect of infill ratios in SLA 3D printing on mechanical properties of castable wax patterns for molded shells in investment casting [J]. PLOS ONE, 2025, 20 (2): e0311245.
- [8] YAO W L, LEU M C. Analysis and design of internal web structure of laser stereolithography patterns for investment casting [J]. Materials & Design, 2000, 21 (2): 101-109.
- [9] 练健. 熔模铸造用蜡模3D打印工艺研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [10] ROSEN R, VON WICHERT G, LO G, et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing [J]. IFAC-Papers On Line, 2015, 48 (3): 567-572.
- [11] BAGALE N R, DOIJODE S. A review on design, simulation and optimization of feeder system for reducing casting defects [J]. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 2020, 8 (8): 284-288.
- [12] WANG Donghong, HE Bo, LI Fei, et al. Numerical simulation of the wax injection process for investment casting [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2013, 28 (2), 220-224.
- [13] WANG Donghong, YU Jiangping, YANG Chao, et al. Dimensional control of ring-to-ring casting with a data-driven approach during investment casting [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119, 691-704.
- [14] 周乐尧, 汪东红, 刘淑梅, 等. 大尺寸燃气轮机叶片蜡模注射成型与尺寸精度控制 [J]. 铸造, 2023, 72 (6): 641-647.
- [15] FROMM J E. Numerical calculation of the fluid dynamics of drop-on-demand jets [J]. IBM J. Res. Dev. 1984, 28 (3): 322-333.
- [16] 汪东亮, 汪东红, 刘淑梅, 等. 叶盘蜡模3D打印与注射成型尺寸精度控制研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45 (10): 1441-1447.
- [17] ZHANG Hengyuan, WANG Donghong, LIU Shumei, et al. Manufacturing of blade wax patterns based on material jetting printing: research on printing orientation and voltage parameters [J/OL]. Rapid Prototyping Journal, 2026. <https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2025-0205>
- [18] YOO S Y, KIM S K, HEO S J, et al. Dimensional accuracy of dental models for Three-Unit prostheses fabricated by various 3D printing technologies [J]. Materials, 2021, 14 (6): 1550.
- [19] CUI Xiaofeng, BOLAND T. Human microvasculature fabrication using thermal inkjet printing technology [J]. Biomaterials, 2009, 30 (31): 6221-6227.
- [20] CZYŻEWSKI J, BURZYŃSKI P, GAWEŁ K, et al. Rapid prototyping of electrically conductive components using 3D printing technology [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209 (12): 5281-5285.
- [21] JANG D, KIM D, MOON J. Influence of fluid physical properties on Ink-Jet printability [J]. Langmuir, 2009, 25 (5): 2629-2635.
- [22] DU Zhonghui, YU Xinhong, HAN Yanchun. Inkjet printing of viscoelastic polymer inks [J]. Chinese Chemical Letters, 2018, 29 (3): 399-404.
- [23] 王继锋, 卜昆, 张丹. 基于位移场的涡轮叶片模具型腔优化设计 [J]. 航空制造技术, 2006, 49 (10): 73-75.