

# 基于有限元的熔模铸造蜡模熔融沉积成形过程研究

崔馨检, 练 健, 张新平

(南京理工大学材料科学与工程学院, 江苏南京 210094)

**摘要:** 采用熔模铸造用石蜡直接熔融沉积成形熔模铸造蜡模可缩短研制周期, 但蜡模尺寸精度不高是熔融沉积成形常见问题。影响蜡模尺寸精度的主要因素是打印速度、喷头温度及环境温度。以熔模铸造用石蜡为材料, 基于有限元法对熔模铸造蜡模熔融沉积成形过程进行模拟, 得到了蜡模熔融沉积成形过程中温度场及应力场分布。通过正交试验法确定了最佳的工艺参数, 其中打印速度为40 mm/s、喷头温度为85 °C、环境温度为25 °C。采用该工艺参数打印件的最大变形量为20.5 μm。

**关键词:** 熔模铸造; 蜡模; 熔融沉积成形; 工艺优化; 有限元法

熔融沉积成形技术(Fused Deposition Modeling, FDM)操作简单、打印速度快、材料利用率高, 在3D打印技术中应用广泛<sup>[1-3]</sup>。熔模铸造行业采用熔融沉积成形技术制造蜡模, 可降低制造成本、缩短研制周期, 适合小批量具有复杂内腔蜡模的生产<sup>[4-6]</sup>。但现有熔模铸造用蜡模3D打印材料大多数是以PS、ABS为代表的塑料以及一些复合石蜡<sup>[7]</sup>。它们熔点高于100 °C, 不能使用传统的蒸汽脱蜡技术, 需新的技术及设备, 且密度(1.04~1.2 g/cm<sup>3</sup>)均比石蜡高, 相同体积的蜡模需更多的材料, 这些都增加了成本。此外, 采用FDM打印的蜡模尺寸精度低, 也制约了其在熔模铸造行业的应用。为解决以上问题, 探索熔模铸造用石蜡3D打印工艺意义重大。

国内学者对熔模铸造用石蜡FDM过程已开展研究。郑凯特<sup>[8]</sup>、张金松<sup>[9]</sup>、李娇娇等人<sup>[10]</sup>研究了气压、喷嘴直径、基板与喷嘴距离、平台移动速度、注蜡温度、输料温度、喷头温度等参数对石蜡沉积精度的影响。但大多数石蜡FDM工艺优化只依靠试验结论, 并未从机理上分析工艺参数对石蜡FDM过程的影响。

若想从机理上分析工艺参数的影响以进一步提高打印件尺寸精度, 则必须掌握石蜡FDM过程中打印件的温度和应力的变化过程。而传统试验手段难以测量FDM过程中的温度和应力, 且优化工艺所需时间较长、耗材较多<sup>[11-13]</sup>。利用软件模拟石蜡FDM过程, 可把握打印件各点变化情况, 可在较短时间内完成工艺优化且节省成本。因此, 本文基于有限元软件对石蜡FDM过程开展研究, 分析石蜡FDM过程中温度及应力的变化, 研究打印速度、喷头温度及环境温度对石蜡尺寸精度的影响, 优化工艺参数, 提高打印件的尺寸精度。

## 1 熔模铸造用蜡模FDM过程建模

### 1.1 熔模铸造用石蜡 FDM 原理

熔模铸造用石蜡FDM是通过导管将石蜡送至打印喷头, 加热体将其加热至熔融态后挤出, 打印喷头按预定程序移动, 完成一层轮廓后提升一定高度, 重复上述过程, 直至打印出所需蜡模<sup>[8-10]</sup>。根据该原理, 做以下合理假设。

(1) 只探究石蜡打印喷头喷出后滴落在底板之后的温度、应变及应力的变化。

作者简介:

崔馨检(1996-), 女, 硕士生, 主要研究方向为石蜡3D打印工艺研究。E-mail: cxj13270729037@163.com

通讯作者:

张新平, 男, 教授, 博士, 博士生导师。电话: 13951652648, E-mail: xpzhang@njjust.edu.cn

中图分类号: TG249

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)

11-1203-04

收稿日期:

2020-05-13 收到初稿,

2020-06-05 收到修订稿。

喷头与底板距离很小时,液滴滴落时间非常短,如打印喷头距底板约为0.5 mm左右,由 $h=\frac{1}{2}gt^2$ 可知 $t$ 约为0.01 s,对应的热量散失非常小,视为保持喷头温度。

(2) 材料的堆积过程等效为小正方体单元的堆积过程。

(3) 假设底板绝热,且与石蜡不润湿,不考虑液滴的扩展现象。

## 1.2 材料参数

选取熔模铸造用石蜡为打印材料,密度 $0.9\text{ g/cm}^3$ ,比热容 $2.5\text{ J/(kg}\cdot\text{°C)}$ ,熔点 $87\text{ °C}$ ,热膨胀系数 $2.4\times 10^{-4}/\text{K}$ ,热导率 $0.12\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ,弹性模量 $30\text{ MPa}$ ,泊松比 $0.38$ 。

## 1.3 几何模型及网格划分

结合实际建立尺寸为 $30\text{ mm}\times 12\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 的薄板状长方体,并将其分为若干个打印单元,依次激活打印单元实现石蜡FDM过程的模拟。为保证模拟准确性,对蜡模细化网格,共 $25\ 600$ 个网格单元,采用C3D8T网格单元类型。基于Python进行Abaqus软件二次开发,完成打印模拟。

## 1.4 模拟方案

温度-应变场耦合方法有直接法和间接法。直接法可看到打印过程中的温度及应力的变化。但当单元数较多时,直接法所需时间过长,采用间接法可大大缩短模拟时间。故采用直接法<sup>[14-15]</sup>定性分析石蜡FDM过程温度及应力的变化,设环境温度 $T_0$ 为 $20\text{ °C}$ 、喷头温度 $T_p$ 为 $80\text{ °C}$ 、打印速度 $v$ 为 $30\text{ mm/s}$ 、喷嘴直径 $0.4\text{ mm}$ 、冷却时间为 $30\text{ s}$ 。

采用间接法,基于正交试验方法研究 $v$ 、 $T_p$ 、 $T_0$ 对打印件尺寸精度的影响,方案如表1所示。考核指标为打印件最大变形量。

假设每秒形成10个新的打印单元, $v$ 不同时则1 s内打印长度不同,打印单元沿打印方向的长度为 $v/10$ 。通过这种方法可考察打印速度的影响。

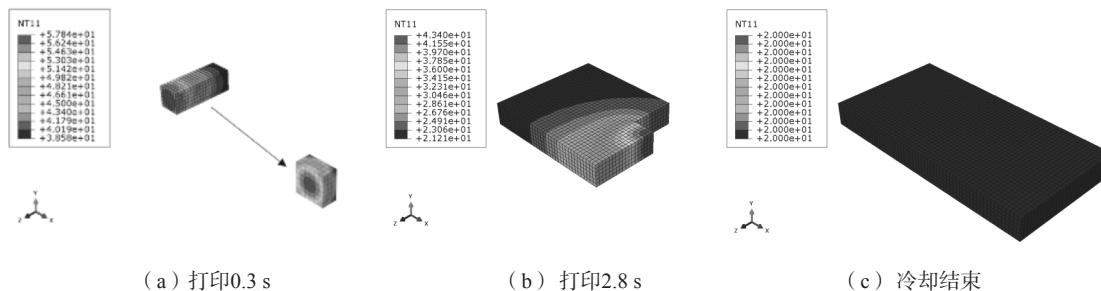


图2 石蜡打印过程中温度分布

Fig. 2 Temperature distribution during paraffin printing

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 模拟结果的正确性分析

为验证模拟的正确性,采用文献[10]的材料、几何与工艺参数,模拟 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 长方体打印件变形情况,模拟结果显示打印件四个角处翘曲变形量最大值为 $0.589\text{ mm}$ ,如图1所示。与文献[16]试验中相同部位处平均翘曲变形量 $0.775\text{ mm}$ 相比差异很小,证明模拟结果与试验结果吻合程度较高。

### 2.2 温度场模拟结果

图2为石蜡FDM过程中温度分布。图2a箭头所指模型为打印首个单元时单元中心剖面温度分布,可见打印件表面通过热对流及辐射散热较快,温度较低,心部通过热传导向表面散热较慢,温度较高。

打印初始时(图2a),新打印部分温度较高,已打印部分由于与空气进行对流及辐射换热温度较低。随打印的持续进行(图2b),整个模型的最高温度区域不断发生变化,导致热影响区逐渐扩大。当冷却结束时,整个模型的温度达到室温(图2c)。此外,随着打印的进行,已打印模型的最低温度逐渐降低。当打印从 $0.3\text{ s}$ 进展到 $5\text{ s}$ 时,模型最低温度由 $38.58\text{ °C}$ 降低到 $20.13\text{ °C}$ 。

### 2.3 应力场模拟结果

图3显示了石蜡FDM过程中应力分布。打印初始时(图3a),由于单元心部与表面的温差较大,单位时

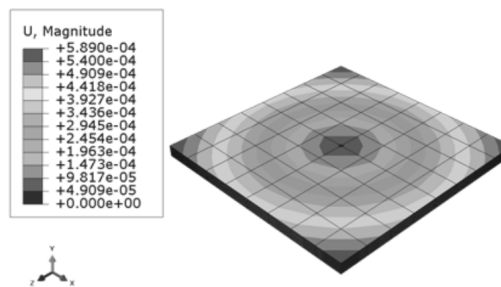


图1 文献[16]试验对应的模拟结果

Fig. 1 Simulation result corresponding to experiment in reference [16]

间内表面温度下降得多，因而表面收缩量大，心部温度下降得少，因此收缩量少。这导致表面受拉应力，心部受压应力。在单元连接处，为保持材料的连接性，单元连接处存在拉应力。

随着打印进行（图3b），已打印部分继续冷却，表面温度与室温接近，与空气间的热交换较少，而心部与表面温差及流向表面的热流较大，温度下降的较

快，进而导致表面和心部因温差导致体积收缩差减少，相互胀缩的牵制作用和内应力减少。新打印部分与已打印部分之间为了保持材料的连接性，其之间的连接处拉应力较大。打印件拐角部分主要受到压应力。当冷却结束时（图3c），打印件单元连接处为拉应力，四个角区域为压应力，如图3c标记圈的区域部分所示。

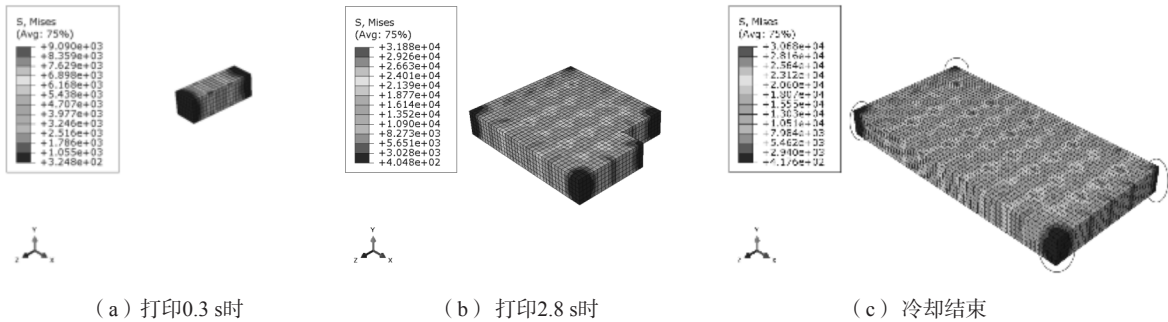


图3 石蜡打印过程中应力分布  
Fig. 3 Stress distribution during paraffin printing

### 2.4 工艺参数对石蜡成形精度的影响

正交试验结果如表1所示，工艺因素对石蜡打印尺寸精度影响如图4所示。工艺参数对尺寸精度的影响顺序为：打印速度>环境温度>喷头温度。文献[10]试验结果显示，打印速度对打印件精度影响大于喷头温度的影响，与本研究一致，证明了本试验模拟的正确性。

不同打印速度的打印件尺寸精度由高到低依次为：精度40 > 精度20 > 精度30。增大打印速度会使在相同时间内打印单元沿打印方向的长度增大，已打印部分表面积增大，加快了表面温度下降速度，使得心部与表面温差增大，由此引起的变形增大。但增大打印速度也会使新打印单元与已打印单元之间温差减小，从而减小打印件的变形。

打印件尺寸精度随喷头温度的上升而提高。喷头温度过低会导致喷嘴堵塞，适当提高喷头温度会使石蜡融化完全。但喷头温度过高时，会导致石蜡固化时间过长，造成打印失败。

环境温度为25℃时打印件尺寸精度最高。环境温度过低会使石蜡未到底板便凝固，从而造成打印失败。适当提高环境温度可减小其与喷头温度的差值，降低打印件收缩量。

由工艺影响趋势可知优化工艺为打印速度40 mm/s、喷头温度85℃、环境温度25℃。该工艺的最大变形量为20.5 μm。而表1中最小的最大变形量为25.6 μm（试验9）。因此，最优石蜡FDM工艺方案为：打印速度40 mm/s、喷头温度85℃、环境温度25℃。

优化后结果符合德国熔模铸件线性尺寸公差标准，即打印件厚度尺寸在0~6 mm内，公差为±0.1 mm，有公

表1 正交试验方案与结果  
Table 1 Orthogonal experiment scheme and results

试验	$v/(mm \cdot s^{-1})$	$T_p/^\circ C$	$T_0/^\circ C$	误差列	最大变形量/ $\mu m$
1	20	75	15	1	86.8
2	20	80	20	2	105.3
3	20	85	25	3	107
4	30	75	20	3	181.7
5	30	80	25	1	56.6
6	30	85	15	2	83
7	40	75	25	2	32.3
8	40	80	15	3	107.4
9	40	85	20	1	25.6
均值1	99.7	100.3	92.4	56.3	
均值2	107.1	89.8	104.2	73.5	
均值3	55.1	71.9	65.3	132	
极差	52	28.4	38.9	75.7	

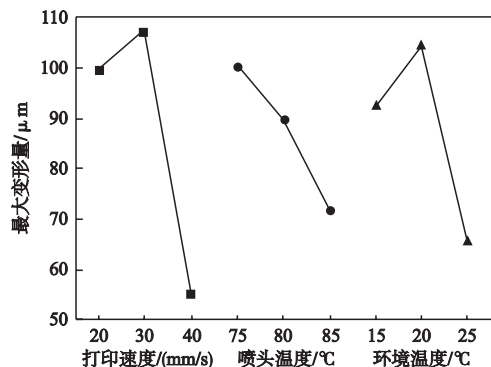


图4 各个因素对石蜡打印件尺寸精度的影响趋势  
Fig. 4 Trend of factors affecting dimensional accuracy of paraffin prints

差要求的重要尺寸公差为  $\pm 0.08 \text{ mm}^{[17]}$ ，且大大缩小了打印件的变形量，提高了打印件精度。

### 3 结论

(1) 打印过程中，打印单元连接处拉应力较大，由于打印单元心部与表面之间的温度差异，导致表面处存在压应力。

(2) 不同打印速度的打印件尺寸精度由高到低依次为：精度40 > 精度20 > 精度30；打印件尺寸精度随喷头温度的上升而提高；环境温度为25 °C时打印件尺寸精度最高。

(3) 最优工艺参数为：打印速度40 mm/s、喷头温度85 °C、环境温度25 °C，对应的最大变形量20.5  $\mu\text{m}$ 。

#### 参考文献：

- [1] 汪洋, 叶春生, 黄树槐. 熔融沉积成型材料的研究与应用进展 [J]. 塑料工业, 2005 (11): 9-11.
- [2] 何冬林, 韩福国, 王钊, 等. 基于熔融沉积成型的3D打印在药物制剂中的研究进展 [J]. 药学学报, 2016 (11): 1659-1665.
- [3] CHEN H, YANG X, CHEN L, et al. Application of FDM three-dimensional printing technology in the digital manufacture of custom edentulous mandible trays [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 19207.
- [4] 于彦奇. 3D打印技术的最新发展及在铸造中的应用 [J]. 铸造设备与工艺, 2014 (2): 1-4.
- [5] 薛春江, 张巍. 基于FDM技术和PLA的金属工艺品熔模铸造工艺 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (4): 66-68.
- [6] 徐攀, 李涛, 徐刚. 基于FDM技术的锡制品熔模铸造 [J]. 铸造设备与工艺, 2019 (5): 20-22.
- [7] 杨斌, 孙少纯, 郭常振, 等. FDM技术在熔模铸造生产中的运用 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (2): 374-378.
- [8] 郑凯特, 刘先锋, 伊春明, 等. 气压驱动石蜡FDM工艺研究及优化 [J]. 计量与测试技术, 2017, 44 (11): 60-63.
- [9] 张金松, 郑凯特, 渠国洋. 石蜡熔融沉积的线宽试验优化设计 [J]. 中国工程机械学报, 2018, 16 (2): 170-174.
- [10] 李娇娇. 铸造蜡3D打印机的设计与研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2018.
- [11] 乔女. ABS塑料3D打印过程中热应力耦合场分析与优化 [J]. 塑料, 2017 (5): 8-22.
- [12] 贾先, 谭栓斌, 雷鸿春, 等. 3D打印工艺参数对PLA压缩性能的影响研究 [J]. 制造技术与机床, 2018 (4): 29-32.
- [13] 韩江, 王益康, 田晓青, 等. 熔融沉积 (FDM) 3D打印工艺参数优化设计研究 [J]. 制造技术与机床, 2016 (6): 139-142.
- [14] 魏士皓, 屠晓伟, 任彬, 等. PLA材料在FDM过程中翘曲变形的优化 [J]. 制造技术与机床, 2019 (8): 26-29.
- [15] 张宝庆, 孟凡越, 潘建超, 等. 基于热力耦合的FDM成型过程模拟仿真与研究 [J]. 制造业自动化, 2017, 39 (7): 39-42.
- [16] 卢涵. 熔融沉积成型有限元模拟与支撑结构优化研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- [17] 德国熔模铸件线性尺寸公差标准[EB/OL]. [2020-04-10]. <https://wenku.baidu.com/view/c666317dbceb19e8b9f6baae.html>.

## Process of Investment Casting Wax Pattern Formed by Fused Deposition Modeling Based on Finite Element Method

CUI Xin-jian, LIAN Jian, ZHANG Xin-ping

(School of Material Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

#### Abstract:

Investment casting wax pattern can be created and the development cycle can be shortened by using the fused deposition modeling (FDM) 3D printing with paraffin. However, the low dimensional accuracy of the wax pattern is a common problem of FDM. The main factors affecting the dimensional accuracy of the wax pattern are the printing speed, nozzle temperature and ambient temperature. In the present study, the distributions of temperature and stress during the FDM process of paraffin were simulated based on the finite element method. The optimal process parameters were determined through orthogonal experiment method, among which the printing speed was 40 mm/s, nozzle temperature was 85 °C, and ambient temperature was 25 °C. The maximum deformation of the wax pattern printed with the above-mentioned parameters was 20.5  $\mu\text{m}$ .

#### Key words:

investment casting; wax pattern; fused deposition modeling; process optimization; finite element method