DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.06.028

基于 FDM 的 3D 打印机喷头系统热分析

童和平,李达人

(广东开放大学 机电工程学院, 广东 广州 510091)

摘 要:基于 FDM 技术的 3D 打印机喷头系统热分析的思路,利用 ANSYS Workbench 有限元分析法,针对 2 种不同材料、2 种不同喉管截面积和 5 种环槽宽度共 9 种比较方案,进行喷头系统热分析。结果表明:喷嘴出口处变形最大,接触部分的温度最高,上下端的极限位置温度最低;不锈钢材质更有利于喉管温度分布;有喉管环槽的喷嘴可以减少喷头热量损失;合理径宽比更有利于喉管的散热。

关键词:FDM;3D 打印;喷头系统;热分析

中图分类号:TH122 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2024)06-0142-04

Research on Thermal Analysis of FDM 3D Printer Nozzle System

TONG Heping, LI Daren

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong Open University, Guangzhou 510091, China)

Abstract: With the mindset of the thermal analysis on 3D printer nozzle system based on FDM technology, and by means of ANSYS Workbench finite element analysis method, a thermal analysis of the nozzle system was conducted for a total of 9 comparison schemes, including two different materials, two different throat cross-sectional areas, and five ring groove widths. The results show that the maximum deformation occurs at the nozzle outlet, with the highest temperature at the contact area and the lowest temperature at the upper and lower limit positions, stainless steel material is more conducive to the temperature distribution of the throat, nozzles with throat grooves can reduce the heat loss of the nozzle, a reasonable aspect ratio is more conducive to the throat.

Keywords: FDM; 3D printing; spray nozzle system; thermal analysis

0 引言

20世纪90年代,美国麻省理工学院对3D打 印技术进行了大量的研究,国外对3D打印技术 发展的研究较为成熟。我国自20世纪末开始,清 华大学、西安交通大学、华南理工大学等高校对 3D打印技术进行了积极探索和研究^[1-3]。谭富 德等^[4]设计了一种新型喷头,通过公式推导了流 量、喷嘴尺寸、材料黏度、速度与压力之间的关系, 并通过打印模型验证了该结构可以提高最大流量 以及材料挤出的稳定性;陈德裕等^[5]分析了3D 打印喷嘴,对入口直径、出口直径、收缩角和筒壁 长对打印效果的影响,通过Fluent软件模拟,获得 了工艺参数对喷嘴出口速度的影响;陈为平等^[6] 对喷头系统进行了热力学分析与结构优化,通过 仿真软件分析了喷头系统各组成部分温度与变形 的关系,对关键部件进行了优化设计。FDM 3D 打印核心部件是打印机的喷头,喷头结构的好坏 与喷嘴出丝的均匀性有关,将直接影响产品打印 的表面质量和加工精度,本文研究重点是对 FDM 3D 打印机的喷头结构进行分析^[7]。

1 FDM 3D 打印机喷头的工作原理

FDM 3D 打印机喷头共有 4 个功能结构,分别 为给进机构、加热机构、挤出机构、打印介质。在 FDM 3D 打印机中,FDM 喷头是其技术含量最高 的设备组件。图 1 为 FDM 3D 打印机喷头工作原 理图。给进机构通过 2 个给进轮将打印介质挤入 到加热机构中,进入加热通道后的打印介质最后 进入挤丝系统机构,打印介质从喷头挤出,进而生 成打印模型。打印模型受喷嘴的最小厚度 H_{min}、 最小直径 D_{min}、最小体积 V_{min}、最大塑化时间 t_{max}等 参数影响,这些参数直接影响着模型的表面质量 和加工精度。喷头结构设计的合理与否,将直接

基金项目:广东省教育厅 2018 年度重点科研平台和科研项目(2018KQNCX408);广东开放大学 2024 年创新强校项目 (2024CQ-20);广东开放大学 2019 年度科研项目(YB1912)

第一作者简介:童和平(1986—),男,江西景德镇人,博士研究生,研究方向为 3D 打印与智能制造, hptong@ gdrtvu.edu.cn。

影响喷嘴出丝的顺畅情况,进而影响打印模型表 面质量和精度^[8-9]。



图 1 FDM 喷头的工作原理

2 FDM 喷嘴的温度场和应力场分析

2.1 喷嘴的模型建立及材料添加

为了更好地研究喷头系统的热分析,首先利用 SolidWorks 建立喷头系统的三维立体图和二维 CAD 图,图 2 为喉管的 3D 立体模型,并将建立好 的三维立体模型导入 ANSYS Workbench 中。



图 2 喉管三维立体模型及二维 CAD 图

FDM 3D 打印机的喷嘴材料选择黄铜,主要 原因是黄铜的高耐磨性、较好的使用年限、较低的 黏度系数和较光滑的内壁质量使得打印的模型表 面质量和精度更好。

2.2 FDM 喷嘴的网格划分

图 3 为 FDM 喷嘴网格划分图。由于 FDM 喷 嘴 的 三 维 立 体 构 造 较 为 简 单,在 ANSYS Workbench 有限元分析中,研究者对 FDM 喷嘴的 连接螺纹和倒角进行简化,这种简化处理可以有 效地避免因细小结构而导致网格划分数量过多, 从而提高喷嘴的仿真运算效率。在边界条件中, 本文设定 FDM 喷嘴与周围自然环境的对流系数 为 $1.24 W/(m^2 \cdot C)$,初始温度为 $25 \circ$,喷嘴与 加热块的接触温度为 $230 \circ$ ^[10-11]。



图 3 FDM 喷嘴网格划分图

2.3 喷嘴的温度场分析

为了更好地分析喷嘴的温度场,假设喉管的 高度为 δ ,喉管截面积为A,两侧表面各自维持均 匀温度且不存在内热源,喉管与喷头的接触温度 为 t_1 ,喉管顶部的温度为 t_2 ,可以得出喷嘴的温度 分布表达式:

$$l = \left(\frac{t_2 - t_1}{\delta}\right) x + l_1 \tag{1}$$

可以看到 δ_{x_1, t_2} 都是固定的数值,喷嘴的温 度符合一元函数表达式,则温度分布的斜率 $k = \frac{t_2 - t_1}{\delta}$ 为常数,将斜率k再代入傅里叶定律,得出热 流量q的表达式:

$$q = \frac{\lambda \cdot (t_1 - t_2)}{\delta} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \Delta t \tag{2}$$

根据物理热能知识,热量的传递本质是能量 转移的过程,喉管在导热过程中,热量流的计算公 式如下:

$$\phi = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{A\lambda}} = \frac{\Delta t}{R} \tag{3}$$

由式(3)可知,要减小热量向喉管传递,可以 增加喉管的高度 δ ;减小喉管的截面积A以及选 用较小导热系数 λ 的喉管材料^[12-13]。

2.4 喷嘴的应力场分析

由于热胀冷缩原理,当 FDM 喷嘴温度发生变 化时,喷嘴的体积就会发生膨胀或收缩,同时由于 喷嘴各部分的不均匀变形,在其内部产生互相平 衡的附加应力。一般情况下,FDM 3D 打印机在 正常工作时,需要对支撑板提前预热,当喷嘴温度 处于稳定状态下,可以得到温度应力;当温度处于 变形状态下,则采用胡克定律来计算温度场和应 力场^[14-15]。

$$\begin{cases} \varepsilon_{x} = \frac{\sigma_{x} - \mu(\sigma_{y} + \sigma_{z})}{E} + \alpha T \\ \varepsilon_{y} = \frac{\sigma_{y} - \mu(\sigma_{x} + \sigma_{z})}{E} + \alpha T \\ \varepsilon_{z} = \frac{\sigma_{z} - \mu(\sigma_{x} + \sigma_{y})}{E} + \alpha T \end{cases}$$

$$\begin{cases} \gamma_{yz} = \frac{2(1 + \mu)}{E} \tau_{yz} \\ \gamma_{xz} = \frac{2(1 + \mu)}{E} \tau_{xz} \\ \gamma_{xy} = \frac{2(1 + \mu)}{E} \tau_{xy} \end{cases}$$

$$(5)$$

式中: μ 为泊松比;E 为材料的弹性模量; α 为弹性体的膨胀率系数; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为温度应力分量; $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ 为切应力分量。

利用 ANSYS Workbenc 有限元分析软件得到 喷嘴的等效应力云图和总变形云图,如图 4 所示。



从图 4 可以看出,变截面直径没有发生变化, 应力最小且基本没有变化;喷嘴出口处的应力最 大,这说明应力最大发生在变截面处。分析表明: 当变形量过大时,喷嘴喷射出的丝材就会发生畸 变,导致打印机支撑板上的实际成型模型与理论 模型发生位置偏差。根据图 4 的有限元数据分 析,喷嘴变形量的最大值远小于喷嘴的直径,变形 量可以忽略不计,本文的喷嘴结构设计较为合理。

3 FDM 3D 打印机喷头系统的热分析

3.1 材料对喷头系统温度分布的影响

常见的喷头加热材料有金、银、铜和铝合金。 金银的导热系数最大,但性价比最低;铜的导热系 数比较大,但密度较高,影响喷头工作的稳定性; 铝合金材料的导热系数不错,密度小且质量轻;不 锈钢的热传导系数最小,但也满足喷头所需的热 导系数,且具有较高的强度和耐高温性。本文采 用铝合金和不锈钢两种加热块材料进行有限元分 析,得出喷头系统的温度分布云图如图5所示。



图 5 喷头系统的温度分布云图

图 5(a)为铝合金加热块,加热块及喷头区域 温度区间为 228.56 \mathcal{C} ~ 230.00 \mathcal{C} ,喉管与喷嘴配 合处的最高温度为 228.56 \mathcal{C} ,喉管的最低温度为 215.48 \mathcal{C} ,喷嘴和加热铝块的温度分布差别不大, 铝合金喉管温度梯度较为明显。图 5(b)图为不 锈钢加热块,加热块及喷头区域的温度区间为 226.85 \mathcal{C} ~ 230.00 \mathcal{C} ,两端的温度差为 32.87 \mathcal{C} 。 这主要是因为当热流量 ϕ 不变时,喉管高度 δ 越 大,喉管两端的温度差 Δt 就越大。铝合金喉管温 度分布较高的原因是因为铝制喉管的导热系数 高,两端的温度差值小;相比于铝合金喉管,不锈 钢喉管的顶端最低温度下降了 21.50 \mathcal{C} ,研究得 出材料对喷头系统温度的影响较大。

3.2 喉管截面积对喷头系统温度分布的影响

根据上述研究,当热流量 ϕ 一定时,喉管两端 的温度差 Δt 与喉管的截面积 A 成反比。为了分 析喉管截面积 A 对喷头系统温度分布的影响,本 文设计了有环槽和无环槽的喷头系统进行热分 析。其中,第一组为喉管与喷嘴的螺纹连接处右 侧有宽度为 4 mm 的环槽;第二组为喉管与喷嘴的 螺纹连接处右侧无环槽。环槽温度分布云图如图 6 所示。



由图 6 可以看出, 无环槽时喉管的最低温度 为 200.12 ℃, 有 环 槽 时 喉 管 的 最 低 温 度 为 193.98 ℃,喉管环槽外表面直径减小 1 mm, 温度 降低了 6.14 ℃。研究表明:随着喉管截面积 A 减 小,喉管两端的温度差 Δt 越大。在设计 3D 喷头 时,应该将喉管的中间段直径设计出一段环槽结 构,这样可以阻止热量往喉管环槽以上部分的传 输,既减少了热量的损失,又提高了喷头处的温控 精度。

3.3 环槽宽度对喷头系统温度分布的影响

本组试验研究环槽大小对喷头系统温度分布 的影响,利用单因素试验分别选取环槽宽度为 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm 5 种情况,将这 5 种 模型导入有限元分析软件,得出不同环槽宽下的 喉管温度分布情况如图 7 所示。



图 7 不同环槽宽下的喉管温度分布情况

从图 7 可以看出:随着环槽宽度的增大,喉管 温度差也变得越来越大;环槽宽度为 4 mm 时,喉 管温度差最大,为 35.73 ℃;但当环槽宽度大于 4 mm 时,喉管温度差又开始逐渐变小。这说明, 当环槽的宽度变化时,喉管的温度分布也随着改 变,但总体变化不是特别明显,且存在一个对喉管 散热最为有利的环槽值。因此,在设计喷头时应 合理设计喉管的径宽比值。

4 结语

本文分析了 FDM 3D 打印机喷头的工作原 理;利用 ANSYS Workbench 软件进行有限元分 析,研究了 FDM 喷嘴的温度场和应力场,确定了 喷嘴的温度分布和应力变化最大的位置;研究了 喷头系统的热分析,确定了不同材料、喉管截面积 和环槽宽度对喉管温度分布的影响。研究表明: 喷嘴出口处变形最大,接触部分的温度最高,上下 端的极限位置温度最低;不锈钢材质更有利于喉 管温度分布;减小喉管截面积,有利于降低整个喉 管的温度;设计合理径宽比更有利于喉管的散热。 本文为优化 FDM 3D 打印机喷头系统结构提供了 可行的改进方法,对利用增材制造技术提高产品 打印精度具有重要意义。

参考文献:

- [1] 王春香,张辉.FDM 型 3D 打印机喷头结构的进展[J]. 塑料,2021,50(3):93-98.
- [2] 马玉琼,郑红伟,王铁成,等.基于 FDM 技术的多喷头
 3D 打印机关键技术研究[J]. 机床与液压,2020,48(4):33-36.
- [3] 童和平,李达人,肖晓兰.基于 FDM 技术的多喷头 3D 打印机机械结构和控制系统关键技术研究[J]. 机电 工程技术,2023,52(8):35-37,86.
- [4] 谭富德,王克用,郭根清,等.3D 打印机喷头结构以及 材料优化及温度场有限元分析[J].农业装备与车辆 工程,2022,60(10):140-144.
- [5] 陈德裕,李培芬,甄炜彬.熔融沉积成型 3D 打印喷头 热力场分析及散热优化[J].制造技术与机床, 2020(9):97-102.
- [6] 陈为平,黄捷,禹杰,等.基于 FDM-3D 打印机喷头系 统温度场分析与优化设计[J].齐鲁工业大学学报, 2022,36(3):46-52.
- [7] 郭文霞,吴永军,刘海亮.FDM 工艺精度影响因素的实验分析 [J]. 机械制造与自动化,2023,52(5):100-103.
- [8] 杨鹏.基于反馈控制的 3D 打印精度提升技术研 究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):19-22.
- [9] 周蕊,杨利,郭韬,等.基于 FDM 的薄壁结构零件打印 工艺分析与研究[J]. 机械设计,2019,36(增刊2): 182-185.
- [10] 王垚垚, 臧剑波, 石禹鹏, 等. 基于机械系统动力学自动分析的多喷头 3D 打印机运动学研究[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(27): 33-36.
- [11] 童和平.FDM 3D 打印机喷头设计[J]. 制造技术与 机床,2021(8):122-126.
- [12] 梁宪涛.3D 打印机喷头温控系统调试结果[J]. 科学 技术创新,2019(34):80-81.
- [13] 潘盛湖,刘云强,胡涵,等.基于多喷头并联的 3D 打印机控制系统的研究[J].工程设计学报,2022,29(1):100-106.
- [14] 杨志.FDM 3D 打印机关键机构的改进及其试验研 究[D]. 苏州:苏州大学,2018.
- [15] 江波.基于有限元的 FDM-3D 打印机打印头优化及 成型精度研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2021.
- [16] 朱博文,赵永强.不同材料 3D 打印挤出头的热力耦 合分析[J]. 汽车实用技术,2020,45(17):160-163.

收稿日期:2024-01-30