

基于 FDM 的管状成型 3D 打印机关键部件设计

曹江

四川建筑职业技术大学

DOI:10.32629/pe.v4i3.21054

[摘要] 针对石油、天然气等工业领域对管状零件快速成型的需求,以及传统熔融沉积成型(FDM)3D打印机在打印该类零件时存在的尺寸精度低、打印速度慢、需大量辅助支撑导致材料浪费等问题,本文提出并设计了一种专用的管状成型3D打印机机械结构。首先,设计了集成防堵与高效散热功能的挤出机,通过喉管内置铁氟龙软管解决了熔融材料倒流与喷嘴堵塞问题;喷嘴口径为0.4mm,适配1.75mm PLA线材。其次,创新性地设计了旋转轴热床,以替代传统平面热床,该系统由三爪卡盘、过渡盘及减速装置构成,通过57步进电机与同步带轮(传动比6:1)驱动,实现了旋转体零件的直接、高效打印。再次,构建了基于滚珠丝杠的双轴直线传动系统,Z轴与Y轴分别采用FSL40系列模组与定制直线导轨,行程为200mm与250mm,定位精度达 $\pm 0.05\text{mm}$,确保了喷嘴在旋转轴上的精确三维定位。最后,采用3030铝型材搭建了整机框架。本研究设计的机械结构,可有效提升管状零件的打印效率与表面质量,降低材料损耗,为特种FDM 3D打印设备的研发提供了可行的技术方案。

[关键词] 管状成型3D打印; 熔融沉积成型; 机械结构设计; 旋转轴热床; 挤出机; 传动系统

中图分类号: F416.44 **文献标识码:** A

Design of Key Components for Tubular Forming 3D Printers Based on FDM

Jiang Cao

Sichuan Vocational University of Architecture

[Abstract] In response to the rapid prototyping requirements for tubular parts in the petroleum and natural gas industries, as well as the problems such as low dimensional accuracy, slow printing speed, and excessive material waste caused by traditional fused deposition modeling (FDM) 3D printers when printing such parts, this paper proposes and designs a dedicated mechanical structure for tubular part 3D printing. Firstly, an extruder with integrated anti-blockage and efficient heat dissipation functions was designed. The built-in Teflon hose in the throat solved the problems of melt material backflow and nozzle blockage. The nozzle diameter was 0.4mm, suitable for 1.75mm PLA filament. Secondly, an innovative design of a rotating shaft heat bed was implemented to replace the traditional flat heat bed. This system consists of a three-jaw chuck, a transition plate, and a reduction device, driven by a 57 stepper motor and a synchronous belt wheel (with a transmission ratio of 6:1), enabling direct and efficient printing of rotating body parts. Thirdly, a double-axis linear transmission system based on ball screws was constructed. The Z-axis and Y-axis respectively adopted FSL40 series modules and custom linear guides, with a travel of 200mm and 250mm, and a positioning accuracy of $\pm 0.05\text{mm}$, ensuring the precise three-dimensional positioning of the nozzle on the rotating shaft. Finally, a whole machine frame was built using 3030 aluminum profiles. The mechanical structure designed in this study can effectively improve the printing efficiency and surface quality of tubular parts, reduce material waste, and provide a feasible technical solution for the development of special FDM 3D printing equipment.

[Key words] Tubular forming 3D printing; Fused Deposition Modeling; Mechanical structure design; Rotating axis hot bed; Extruder; Transmission system

1 引言

熔融沉积成型 (Fused Deposition Modeling, FDM) 技术因其

设备成本低、操作简单、材料范围广等优势,已成为应用最广泛的增材制造技术之一。其基本原理是将PLA、ABS等热塑性线材

加热至熔融态后,按预设路径逐层堆积,最终形成三维实体。然而,当FDM技术应用于石油、天然气输送管道等管状零件的快速成型时,传统的平面热床结构暴露出显著不足。在传统FDM打印机上打印圆管、球体等旋转体零件,通常需要添加大量内部和外部辅助支撑。这不仅严重降低了打印速度,浪费了线材,更导致成型工件表面粗糙,后期处理困难,且整体尺寸精度难以满足工业应用要求。现有设备在打印原理上对旋转体零件的“增材制造”过程缺乏针对性优化,导致此类零件的快速成型存在技术瓶颈。

针对上述问题,本文聚焦于管状成型3D打印机的专用机械结构设计。核心设计思路在于:摒弃传统平面热床,创新性地采用可旋转的圆柱轴作为打印基体,并重新设计与之匹配的挤出装置与传动系统。本文将从挤出机、旋转轴热床以及双轴直线传动机构三个核心模块出发,还设计了支撑上述模块的整机工作框架。详细阐述该专用打印机的机械结构设计方案、关键参数及工作原理,旨在为高精度、高效率的管状零件FDM打印提供一种全新的设备实现路径。

2 挤出机

挤出机是FDM打印机的核心部件,其性能直接决定了打印精度、成功率与工件质量。本设计将挤出机细分为喷嘴组件、散热组件与动力组件进行优化。

2.1 喷嘴组件

喷嘴组件负责将固态线材加热至熔融态并按设定直径挤出。为实现尺寸小型化,本设计统一采用M6螺纹作为喉管与喷嘴的连接标准。喉管选用304不锈钢,长度为40mm,为便于加工,设计了螺纹退刀槽。为彻底解决传统设计中熔融材料易在加热腔内残留、倒流乃至堵塞的问题,本设计在喉管内部嵌入铁氟龙软管。该材料具有-190℃至260℃的耐温范围、极低的摩擦系数及突出的表面不粘性,可有效防止线材堵塞。喷嘴则选用导热性能优异的黄铜材质,出丝口径为0.4mm,适配1.75mm的PLA线材。喷嘴外形三维模型如图2.1所示。

加热装置采用尺寸为26×20×12mm的铝块,内嵌尺寸为D6×20mm的不锈钢加热棒及NTC100K型热敏电阻(用于实时温度监测)。加热铝块通过M6内螺纹与喷嘴及喉管连接螺母(M10外螺纹与加热块相连,M6内螺纹与喉管相连)实现稳固装配,确保热传导效率。加热铝块的外形三维模型如图2.2所示。



图2.1 喷嘴外形三维模型



图2.2 加热铝块外形三维模型

2.2 散热装置

为防止加热块热量向上传递导致喉管内线材过早软化、膨胀而产生过大阻力或倒流,必须对喉管进行高效散热。本设计在喉管上端集成了特制散热器,其中间薄壁结构用于阻隔热传导,而大尺寸散热环则用于增大散热面积。同时,配合主动散热风扇并在喉管表面涂抹导热硅脂,可有效将喉管温度维持在PLA线材的玻璃化转变温度以下,使可能倒流的微量熔融材料迅速凝固,形成“冷端密封”,从根本上阻断倒流路径。散热器与喉管主体均采用导热性能良好的铝合金材质。

2.3 挤出装置

挤出装置为线材输送提供驱动力。本设计采用42步进电机(机身长度40mm)作为动力源,其步距角固定,可通过控制脉冲实现精确定位。电机带动26齿的黄铜挤出齿轮,在弹簧的弹力作用下,使从动轮与挤出齿轮紧密夹持PLA线材,保证挤出力有效传递。为防止线材受力弯曲而产生侧向分力导致挤出失败,在进料口设计了黄铜线材接头,确保线材垂直进入挤出机构。深沟球轴承(型号623 GB 276-94)用于支撑转动部件,减少摩擦。整个挤出装置通过挤出基板、挤出按块及DIN 912 M3/M4系列内六角螺钉进行可靠连接与固定。挤出装置的三维模型图如图2.3所示:

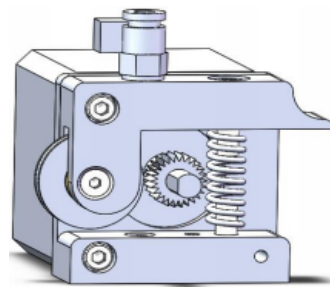


图2.3 挤出装置的三维模型图

3 管状成型3D打印机热床旋转轴

为解决传统平面热床打印管状零件的弊端,本设计创新性地开发了圆柱形旋转轴热床,其具有提高线材使用率、提升打印速度、增强圆管类零件表面光洁度等优势。本设计选定热床旋转轴直径为15mm。该部分设计包含三爪卡盘组件、过渡盘组件及减速组件。

3.1 三爪卡盘组件

三爪卡盘用于固定并驱动旋转轴。选用外径80mm、内径16mm的卡盘,通过三个45钢制作的卡爪实现对圆柱形旋转轴的自动定心与夹持。卡盘体同样采用45钢,保证了强度与耐磨性。旋转轴本身采用质量轻、延展性好的铝合金材料。

3.2 过渡盘组件

过渡盘是连接动力源与三爪卡盘的桥梁。其外径80mm, 内径12mm。过渡盘通过DIN 912 M6×10螺钉与卡盘连接, 内部设计有套筒以定位两个深沟球轴承(型号6205 GB/T 276-1994), 确保旋转运动平稳可靠。动力通过一个4×4×12mm的普通A型平键从光轴传递至过渡盘。过渡盘采用45钢制造, 以保证承受扭矩的强度与同轴度。

3.3 减速组件

鉴于喷嘴出丝速度有限, 旋转轴的转速不宜过高, 因此设计了减速组件。动力源选用57步进电机(机身长度76mm)。采用同步带传动, 主动轮为TAAXL12齿, 从动轮为TAAXL72齿, 传动比为6:1。选用XL型同步带(带宽12.7mm, 厚2.3mm)。该传动方式具有传动比恒定、无滑动、效率高、免维护等优点。从动轮通过平键与输出轴连接, 并配有盖板实现轴向定位。

4 管状成型3D打印机传动机构

4.1 Z轴传动

Z轴传动负责带动挤出机上下移动。由于打印层厚很小, 需要极高的定位精度。本设计选用FSL40系列滚珠丝杠直线模组(行程200mm, 重量2.3kg), 其主要参数为: 丝杠直径16mm, 导程5mm, 定位精度±0.05mm。该模组为半封闭结构, 本体宽度60mm, 结构紧凑。模组集成了57步进电机(机身长度56mm)、G1605滚珠丝杠、直线导轨及滑块。滑块底座、螺母座等采用6061铝合金, 丝杠、导轨及轴承则采用GCr15轴承钢, 并通过梅花联轴器连接电机与丝杠。FSL40-200直线模组的三维模型图如图4.1所示。



图4.1 FSL40-200直线模组三维模型图

4.2 Y轴传动

Y轴传动负责驱动热床旋转轴进行水平移动。考虑到可能打印较长的管状工件, 其有效行程设计为250mm。据此设计了长度为480mm、宽度120mm的铝合金导轨底座。采用双直线导轨, 每条导轨尺寸为455×15×10mm。丝杆同样采用直径16mm、导程5mm的规格。滑块(宽32mm, 长42.1mm)及滑块连接板在导轨上滑动, 传递运动。动力同样由一台57步进电机(机身长度76mm)通过梅花联轴器提供, 并由两端轴承支撑丝杠。

5 管状成型3D打印机工作框架

前述挤出机、旋转轴热床及传动机构需集成于稳固的支撑框架上, 工作框架限定了成型零件的最大尺寸, 并决定了各运动轴的相对位置关系。本设计选用3030铝型材搭建框架。主要型材长度为: Z轴方向550mm, X轴方向660mm, Y轴方向500mm。各部件通过圆头内六角螺钉配合铝型材专用T型螺母进行紧固。Y轴

直线导轨滑块固定在X轴铝型材中间位置; 热床旋转轴通过其固定座安装在Y轴滑块上; Z轴FSL40模组固定在X轴上, 确保其上的喷嘴轴线与Y轴上的旋转轴线相互垂直。整机最终实现Z轴垂直移动、Y轴水平移动及热床自身旋转运动的三轴联动。

6 结语

本文围绕管状零件FDM打印的机械结构需求, 开展了一项专用方案研究。在挤出系统方面, 通过喉管内置铁氟龙软管、设计薄壁散热器并配合主动风冷, 有效解决了熔融材料倒流与喷嘴堵塞问题, 确保了线材输送的连续性与稳定性。在热床系统方面, 摒弃传统平面结构, 创新设计了由57步进电机、6:1同步带减速机构及三爪卡盘驱动的旋转轴热床, 可直接夹持并驱动直径15mm的圆柱形基体进行周向运动, 从根本上避免了打印管状零件所需的大量辅助支撑, 有助于提高打印速度、降低材料损耗并改善旋转体表面质量。在传动系统方面, 基于滚珠丝杠副构建了双轴直线运动模组: Z轴采用FSL40集成模组(行程200mm), Y轴采用定制直线导轨(行程250mm), 两轴定位精度均达±0.05mm, 配合57步进电机及梅花联轴器, 实现了喷嘴在旋转轴上的精确三维定位。整机以3030铝型材搭建框架, 明确了各运动轴的空间布局, 形成了Z轴垂直移动、Y轴水平移动与热床旋转运动的三轴联动系统。

后续研究可从以下方面深入: 优化旋转轴热床的加热与温控功能, 使其兼具支撑与热成型作用; 探索适配多种管径的快换夹持机构; 引入闭环控制提升定位与旋转精度; 针对实际管状零件进行打印工艺实验, 验证并迭代当前方案。本研究成果为高精度、高效率的管状零件增材制造专用设备研发提供了可行的技术参考。

参考文献

- [1] 金秋. 3D打印应用技术[M]. 机械工业出版社, 2024.4:216.
- [2] 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(08):35-37+86.
- [3] 冯晓晖. 基于FDM技术的3D打印机挤出机构研究与设计[J]. 农业工程与装备, 2022, 49(04):28-30.
- [4] 王宗兴. 激光辅助两段式螺杆快速熔融沉积喷头的设计与研究[D]. 青岛大学, 2021.
- [5] 陈迪. 3D打印机配置设计关键技术研究[D]. 湖北工业大学, 2018.
- [6] 张洋. 基于FDM技术的3D打印机机械结构设计及控制系统研究[D]. 长春工业大学, 2017.
- [7] 葛庆, 汪鉴. 基于FDM技术的3D打印机挤出机构研究与设计[J]. 现代电子技术, 2016, 39(22):100-103+107.

作者简介:

曹江(1995—), 男, 汉族, 四川泸州人, 本科, 助教, 研究方向: 机械电子工程。