

碳纤维增强树脂基3D打印机结构设计

梁睿豪, 黄仁凯

江西理工大学机电工程学院, 江西 赣州

收稿日期: 2026年8月2日; 录用日期: 2026年8月31日; 发布日期: 2026年9月14日

摘要

针对短切碳纤维增强树脂基材料打印中喷嘴磨损、挤出阻力大、热稳定性和运动刚度要求高等问题, 文章开展桌面级碳纤维增强树脂基3D打印机结构设计研究。通过比较普通移动热床式直角坐标结构、固定热床式CoreXY结构和高刚性轻量化笛卡尔结构, 确定以高刚性轻量化笛卡尔结构作为整机方案; 完成机架、三轴运动系统、热端挤出系统和热床系统设计, 并对直线导轨、同步带、步进电机、0.6 mm硬化钢喷嘴及200 W热床进行选型与校核。结果表明, X轴所需转矩为0.0497 N·m, Y轴单侧所需转矩为0.0414 N·m, 均小于0.40 N·m步进电机额定保持力矩; X轴横梁最大挠度约为0.0492 mm, 热床由25℃升至100℃的理论时间约为6.4 min。所设计方案能够满足短切碳纤维增强树脂基材料的基本打印需求。

关键词

短切碳纤维, 树脂基复合材料, 3D打印机, 结构设计, 校核计算

Structural Design of Carbon Fiber Reinforced Resin Based 3D Printer

Ruihao Liang, Renkai Huang

School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi

Received: August 2, 2026; accepted: August 31, 2026; published: September 14, 2026

Abstract

A desktop-level 3D printer for chopped carbon fiber reinforced resin-based materials was designed to address nozzle wear, high extrusion resistance, thermal stability, and structural stiffness requirements. Three schemes, including a moving-bed Cartesian structure, a fixed-bed CoreXY structure, and a high-rigidity lightweight Cartesian structure, were compared. The high-rigidity lightweight Cartesian structure was selected as the final scheme, and the frame, three-axis motion system, hot-end extrusion system, and heated-bed system were designed. Key parts such as linear guide rails, timing

belts, stepper motors, a 0.6 mm hardened steel nozzle, and a 200 W heated bed were selected and checked. The required torque is 0.0497 N·m for the X axis and 0.0414 N·m for one side of the Y axis, both lower than the 0.40 N·m rated holding torque. The maximum deflection of the X-axis beam is about 0.0492 mm, and the theoretical heating time from 25°C to 100°C is about 6.4 min. The design can meet the basic printing requirements of chopped carbon fiber reinforced resin-based materials.

Keywords

Chopped Carbon Fiber, Resin-Based Composite, 3D Printer, Structural Design, Checking Calculation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

纤维增强树脂基复合材料兼具低密度、高比强度、耐腐蚀和可设计性强等特点, 在航空航天、汽车轻量化、轨道交通、电子电器及工程工装夹具中具有较高应用价值[1]。随着产品迭代速度加快和小批量复杂零件需求增加, 传统模压、注塑和机加工方法在模具成本、制备周期和结构自由度方面存在限制。增材制造技术以数字模型为基础, 通过逐层堆积完成零件成形, 为复合材料构件的快速制造提供了新的技术路线。

熔融沉积成形(Fused Deposition Modeling, FDM)因设备结构简单、维护方便、材料适配范围较广, 仍是桌面级工程材料打印中应用较多的一类方案[2]。如图 1 所示, 将短切碳纤维与热塑性树脂混炼后制成复合丝材, 可以在基本不改变 FDM 成形原理的基础上提高材料刚度、尺寸稳定性和耐热变形能力[3]。与普通 PLA、PETG 等材料相比, 短切碳纤维增强丝材打印得到的零件更适合用于支架、夹具和结构样件等承载场景。

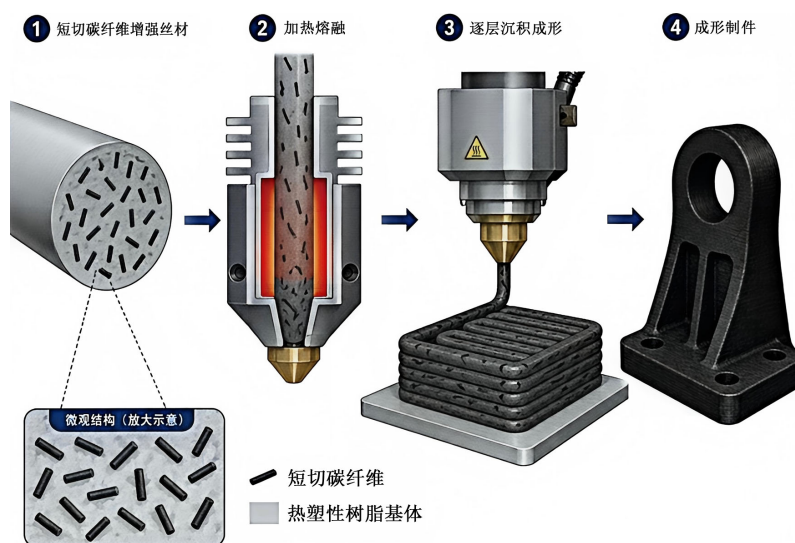


Figure 1. Forming principle of short cut carbon fiber reinforced thermoplastic material

图 1. 短切碳纤维增强热塑性材料成形原理

然而, 短切碳纤维增强树脂基材料也对设备提出了更高要求。首先, 纤维填料会显著增加喷嘴和熔融通道的磨粒磨损, 普通黄铜喷嘴长期使用后容易出现孔径扩大、线宽失控和表面质量下降等问题[4]。其次, 复合熔体黏度较高, 打印时对热端温度稳定性、挤出力和喷嘴孔径更加敏感。再次, 尼龙基、聚酯基或耐热工程塑料基碳纤维增强材料通常对热床温度、环境温度和耗材干燥程度较为敏感, 若温控能力不足, 容易出现翘曲、气泡、层间结合不足等缺陷[5]。因此, 围绕短切碳纤维增强树脂基材料开展专用 3D 打印机结构设计, 不仅需要满足普通 FDM 设备的运动精度要求, 还必须在机架刚度、传动稳定性、热端耐磨性和热管理能力方面进行针对性设计。

本文以桌面级短切碳纤维增强树脂基 3D 打印机为对象, 基于材料成形特点确定整机技术指标, 比较不同结构方案并完成关键标准件选型与校核计算, 旨在形成一套结构清晰、便于制造和图样表达、具有一定工程可行性的打印机设计方案。

2. 总体方案与结构设计

2.1. 设计要求

根据短切碳纤维增强热塑性树脂材料的打印需求, 整机设计应满足材料适配、运动稳定、结构可靠和维护方便等基本要求。本文确定的主要技术指标为: 成形尺寸不小于 260 mm × 200 mm × 200 mm; 采用 1.75 mm 复合丝材; 喷嘴直径选取 0.6 mm; 热端最高工作温度不低于 300℃; 热床最高温度不低于 100℃; 常用打印速度范围为 40~120 mm/s。整机采用步进电机驱动, 并通过合理的导向和传动布置满足中高速打印时的定位稳定性。

上述指标的确定遵循“材料适配优先、结构可靠、图纸表达清晰”的原则。其中 0.6 mm 喷嘴相较 0.4 mm 喷嘴具有更低堵塞风险, 适合含纤维填料的复合丝材挤出; 高温全金属热端和较高温热床则是保证 PA-CF、PETG-CF、ASA-CF 等材料稳定成形的重要条件[6]。

2.2. 方案比较与确定

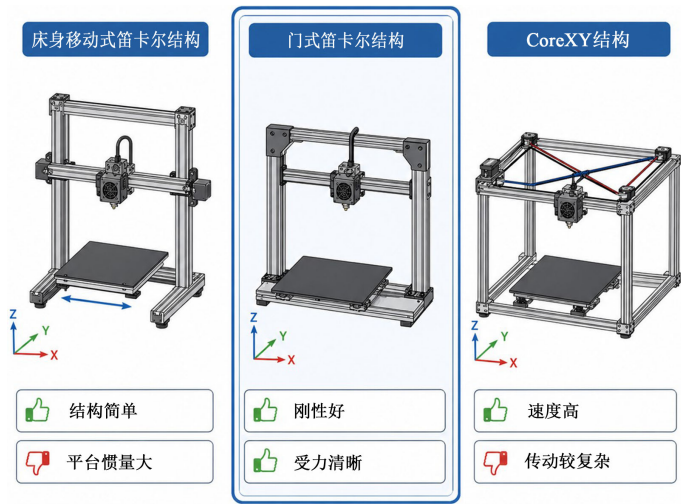


Figure 2. Comparison and determination of three structural schemes
图 2. 三种结构的方案对比与确定

针对桌面级 FDM 设备, 本文比较了三种典型结构方案。第一种为普通移动热床式直角坐标结构, 该方案结构简单、成本低、维护方便, 但 Y 轴平台承载热床和工件后惯量较大, 高速换向时容易产生振动,

不利于碳纤维增强材料的稳定沉积。第二种为固定热床式 CoreXY 结构, 该方案平面运动部件较轻, 速度潜力较高, 工件稳定性较好, 但皮带回路复杂, 对装配精度、张紧一致性和调试能力要求较高, 在本科结构设计和工程图表达中实现难度偏大。第三种为高刚性轻量化笛卡尔结构, 其运动链路清晰, 受力路径明确, 可通过轻量化 Y 轴工作台、双侧导向和较高刚度机架改善动态稳定性, 同时保留较好的制造和维护便利性。

综合比较后, 本文选择高刚性轻量化笛卡尔结构作为整机总体方案。该方案在机架刚度、运动性能、实现难度和图纸表达之间取得较好平衡, 能够较好适应短切碳纤维增强材料打印对稳定沉积、热端支撑和结构刚度的要求[7]。整机总体布局为: 底部设置 Y 轴工作台与热床组件, 中部为打印区域, 上部安装 X 轴横梁和喷头小车, 左右立柱布置 Z 轴双电机升降机构, 电控与辅助模块相对独立布置, 以减少热源对电子元件的影响。如图 2 所示。

2.3. 关键结构设计

机架系统采用铝合金型材与连接板组合结构, 底部框架用于承载 Y 轴运动系统、热床和电控模块, 左右立柱支撑 Z 轴升降机构, 上横梁作为 X 轴导向与喷头组件安装基准。为提高抗弯和抗扭能力, 在横梁与立柱连接处设置加强结构, 并尽量缩短喷头载荷至支撑结构的力传递路径。

X 轴系统主要承担喷头横向定位任务, 由 X 轴横梁、直线导轨、同步带传动机构、步进电机和喷头小车组成。喷头小车集成热端、挤出机、冷却风扇及安装支架, 是整机运动系统中的集中质量部件, 因此 X 轴设计需兼顾刚度和轻量化。Y 轴系统负责工作台前后运动, 采用轻量化热床小车和对称驱动方案, 以降低平台运动惯量并减小偏载。Z 轴系统采用双电机升降结构, 使横梁两侧受力较均匀, 并为后续调平控制预留基础。如图 3 所示:

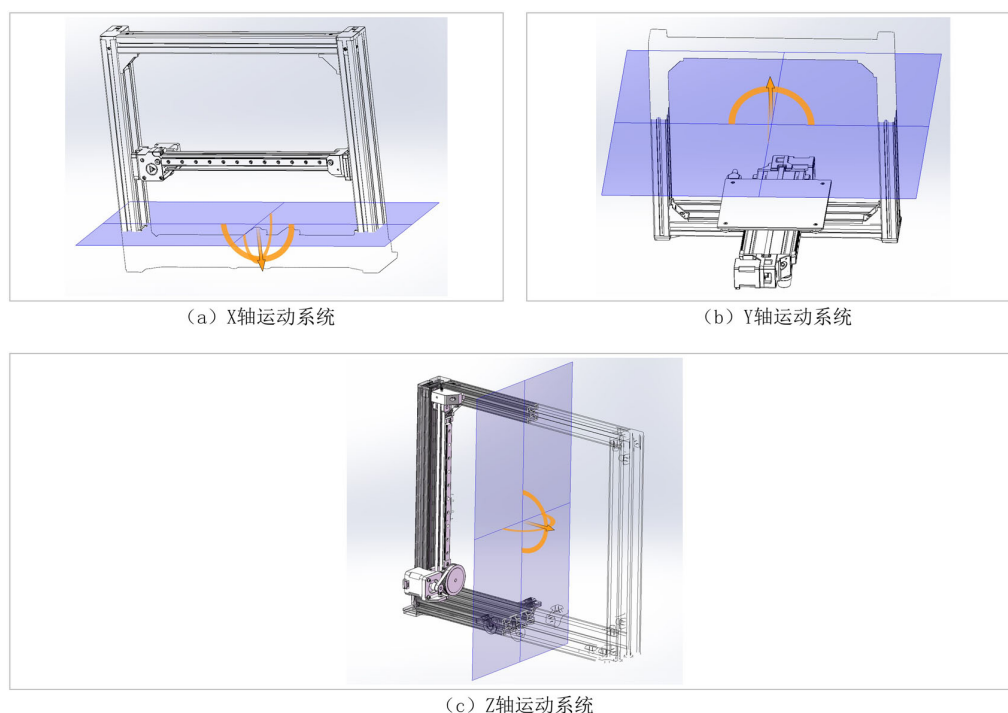


Figure 3. Structural design of three-axis motion system: (a) X-axis motion system; (b) Y-axis motion system; (c) Z-axis motion system

图 3. 三轴运动系统结构设计: (a) X 轴运动系统; (b) Y 轴运动系统; (c) Z 轴运动系统

热端与挤出系统是实现短切碳纤维增强丝材稳定成形的核心。本文采用全金属高温热端和近端直驱式挤出机构, 喷嘴选用 0.6 mm 硬化钢喷嘴。近端挤出能够缩短丝材自由送料长度, 提高回抽响应和送丝稳定性; 硬化钢喷嘴可减轻碳纤维填料对喷孔的磨损; 较大喷嘴孔径有助于降低复合熔体背压和堵塞风险[8]。热床系统采用 200 W 加热板配合铝合金基板, 以保证首层附着和底部温度稳定。电控辅助系统包括主控板、步进驱动器、电源、温度采集、限位检测、断料检测、调平探测、照明和线缆管理等模块。

3. 标准件选型与校核分析

3.1. 运动系统标准件选型

直线导轨是保证喷头和工作台运动平稳性的关键部件。结合整机尺寸、承载要求和采购便利性, 本文选用 12 规格微型滚动直线导轨, 其中 X 轴采用 MGN12H 直线导轨, Y 轴两侧布置 MGN12H 或同等级高预紧导轨, Z 轴使用两组 MGN12H 导轨配合升降机构。该规格导轨截面紧凑、接触刚度较高, 能够满足喷头快速换向和热床升降导向要求[9]。

传动系统采用 GT2 同步带与 20 齿同步轮组合。GT2 同步带节距为 2 mm, 与 1.8° 步进电机及细分驱动配合时可获得较高位移分辨率。X 轴和 Z 轴负载较小, 采用 6 mm 宽 GT2 同步带; Y 轴需要带动热床小车运动, 负载和惯量较大, 因此采用 9 mm 宽 GT2 同步带以提高抗拉伸能力。20 齿同步轮每转对应理论位移为 40 mm, 便于步距分辨率和电机扭矩计算[10]。

动力元件选用 NEMA17 规格两相步进电机。X 轴使用 1 台电机, Y 轴采用双侧电机对称驱动, Z 轴采用双电机升降, 挤出系统采用近端减速式挤出机构。该配置兼顾通用性、成本和维护便利性, 可满足桌面级复合材料打印机的基本运动需求。

3.2. 热端、喷嘴与热床选型

短切碳纤维增强树脂基材料打印时, 热端需具有较高温度裕量和稳定熔融能力。本文选用最高工作温度不低于 300℃ 的全金属高温热端, 以适配尼龙基、聚酯基及耐热工程塑料基复合丝材。喷嘴材料选用硬化钢, 孔径为 0.6 mm。与普通黄铜喷嘴相比, 硬化钢喷嘴耐磨性更好; 与 0.4 mm 喷嘴相比, 0.6 mm 孔径更适合含纤维填料材料的稳定挤出[11]。如图 4 所示:

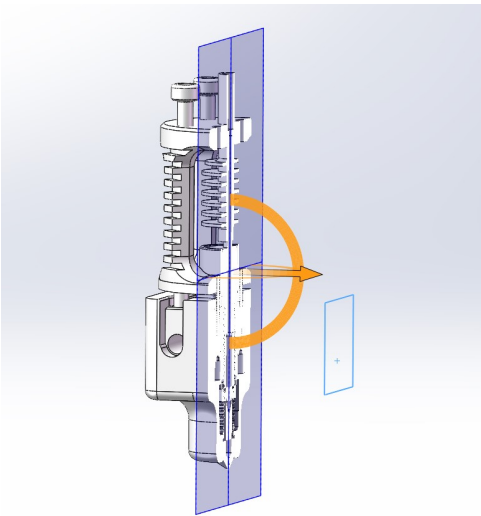


Figure 4. Structural design of hot end and extrusion system
图 4. 热端与挤出系统结构设计

挤出机构选用适配 1.75 mm 丝材的减速式近端挤出机, 传动形式可采用双齿轮夹持或高摩擦驱动轮结构, 以提高丝材咬合可靠性。热床系统选用 200 W 级加热板和铝合金热床基板, 最高工作温度不低于 110℃, 能够满足 PA-CF、ASA-CF 等材料对首层附着和温度稳定性的要求。

3.3. 校核结果分析

为验证所选标准件和结构参数的合理性, 本文对 X/Y 轴步进电机扭矩、X 轴横梁刚度、Y 轴同步带受力、Z 轴升降系统转矩、热床加热能力和喷嘴适配性进行校核。设正常工作加速度为 5 m/s^2 , 同步轮节圆半径为 0.00637 m, X 轴等效运动质量为 1.2 kg, Y 轴等效运动质量为 2.0 kg, 载荷修正系数取 1.3。计算得到 X 轴所需驱动力为 7.8 N, 最小输出转矩为 0.0497 N·m; Y 轴采用双侧驱动, 单侧电机所需输出转矩约为 0.0414 N·m。与所选 0.40 N·m 步进电机额定保持力矩相比, X/Y 轴均具有较大扭矩裕量。

X 轴横梁按两端简支梁并承受中部集中载荷进行估算, 横梁跨度取 0.40 m, 喷头组件及安装件等效集中载荷取 25 N, 横梁材料按 6063-T5 铝合金处理, 截面近似为外边长 30 mm、壁厚 2 mm 的方管结构。计算得到截面惯性矩约为 $2.94 \times 10^{-8} \text{ m}^4$, 最大挠度约为 0.0492 mm, 处于 FDM 打印设备可接受的结构变形范围内。有限元分析中最大 von Mises 应力约为 10 MPa, 如图 5 所示, 明显小于材料屈服强度 145 MPa, 说明横梁强度和刚度均满足设计要求[12]。

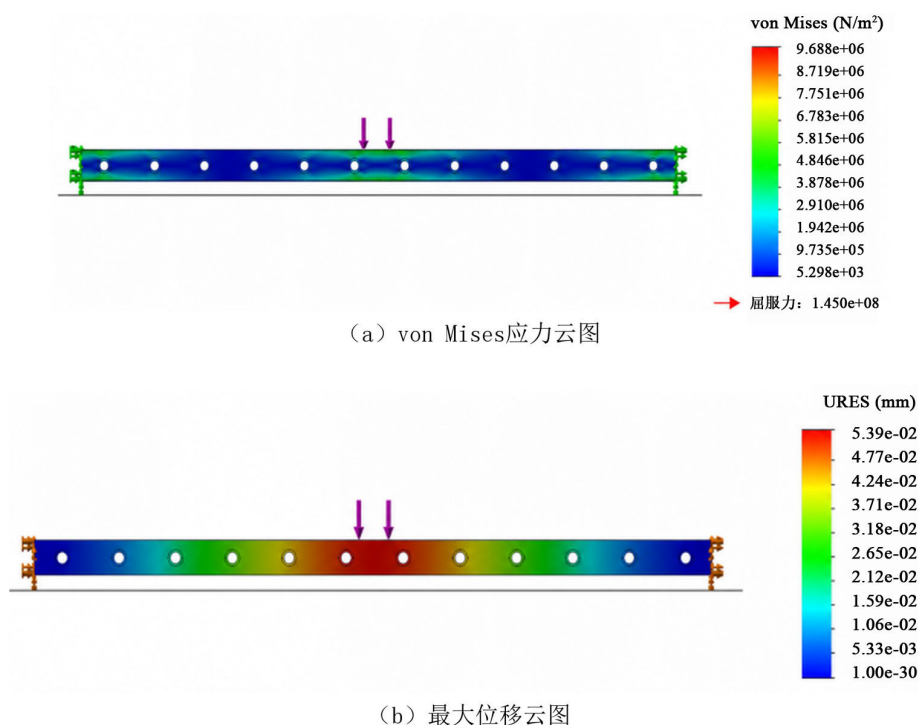


Figure 5. Finite element verification results of X-axis crossbeam: (a) von Mises stress cloud map; (b) Maximum displacement cloud map

图 5. X 轴横梁有限元校核结果: (a) von Mises 应力云图; (b) 最大位移云图

Y 轴同步带总驱动力约为 13.0 N, 双侧驱动时单侧有效驱动力约为 6.5 N, 考虑动载修正系数 1.5 后单侧同步带等效工作拉力约为 9.75 N。该载荷对于 9 mm 宽 GT2 同步带属于较低水平, 能够满足正常工作加速度下的传动要求。Z 轴升降系统按总承载质量 3.5 kg 计算, 总重力为 34.3 N, 双侧电机平均承担后单侧静载荷为 17.15 N, 考虑修正系数后单侧等效载荷为 25.73 N。在 80:20 同步带轮减速结构和 0.90

传动效率条件下, 单侧 Z 轴电机所需转矩约为 0.0455 N·m, 低于所选步进电机额定保持力矩, 能够满足通电工作状态下的升降和位置保持要求。

热床加热能力按等效质量 0.80 kg、比热容 900 J/(kg·K)、温升 75 K 估算, 热床由 25℃ 升至 100℃ 所需热量约为 54,000 J。考虑综合热效率 0.70 和 200 W 加热功率, 理论升温时间约为 386 s, 即约 6.4 min, 能够满足短切碳纤维增强尼龙或耐热型复合材料的预热需求。喷嘴磨损属于材料摩擦磨损和工艺适配问题, 难以通过简单静力公式精确评价, 但从材料硬度、孔径和堵塞风险来看, 0.6 mm 硬化钢喷嘴与短切碳纤维增强树脂基丝材具有较好适配性[13]。

4. 结论

本文围绕短切碳纤维增强树脂基材料的 FDM 成形需求, 完成了一台桌面级碳纤维增强树脂基 3D 打印机的总体方案设计、关键标准件选型和主要零部件校核。通过分析材料对喷嘴耐磨性、热端温度、热床稳定性、送丝能力和运动系统刚度的要求, 确定了高刚性轻量化笛卡尔结构作为整机方案。该方案运动链路清晰、结构实现难度适中、便于装配调试和图样表达, 适合本科毕业设计阶段的结构设计任务。

在关键标准件方面, 本文选用 MGN12H 直线导轨、GT2 同步带与 20 齿同步轮、NEMA17 步进电机、全金属高温热端、近端减速式挤出机、0.6 mm 硬化钢喷嘴和 200 W 热床加热板。上述配置能够兼顾材料适配性、运动稳定性、采购通用性和维护便利性。

校核结果表明, X 轴和 Y 轴电机所需转矩分别为 0.0497 N·m 和 0.0414 N·m, 均明显小于 0.40 N·m 步进电机额定保持力矩; X 轴横梁最大挠度约为 0.0492 mm, 满足喷头支撑稳定性要求; Y 轴同步带工作拉力较低, 双侧驱动方案合理; Z 轴单侧电机所需转矩约为 0.0455 N·m, 能够满足横梁升降和位置保持要求; 200 W 热床加热板可在约 6.4 min 内完成由 25℃ 至 100℃ 的预热; 0.6 mm 硬化钢喷嘴能够较好地适应短切碳纤维增强材料的耐磨和防堵需求。总体来看, 本文设计方案能够满足短切碳纤维增强树脂基材料的基本打印要求, 可为后续样机制作、工程图绘制和工艺优化提供参考。

参考文献

- [1] 李岩, 龙昱, 郝璐岑, 等. 3D 打印纤维增强复合材料力学性能研究进展[J]. 力学季刊, 2022, 43(4): 731-750.
- [2] Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J. and Wang, S. (2015) Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites Using Fused Deposition Modeling. *Composites Part B: Engineering*, **80**, 369-378. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>
- [3] Yasa, E. and Ersoy, K. (2019) Dimensional Accuracy and Mechanical Properties of Chopped Carbon Reinforced Polymers Produced by Material Extrusion Additive Manufacturing. *Materials*, **12**, Article 3885. <https://doi.org/10.3390/ma12233885>
- [4] 罗盟, 田小永, 尚俊凡, 等. 高性能纤维增强聚醚醚酮复合材料挤出成型增材制造现状与挑战[J]. 航空制造技术, 2020, 63(15): 39-47.
- [5] Dul, S., Fambri, L. and Pegoretti, A. (2021) High-Performance Polyamide/Carbon Fiber Composites for Fused Filament Fabrication: Mechanical and Functional Performances. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **30**, 5066-5085. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05635-1>
- [6] Ning, F., Cong, W., Hu, Y. and Wang, H. (2017) Additive Manufacturing of Carbon Fiber-Reinforced Plastic Composites Using Fused Deposition Modeling: Effects of Process Parameters on Tensile Properties. *Journal of Composite Materials*, **51**, 451-462. <https://doi.org/10.1177/0021998316646169>
- [7] 单忠德, 范聪泽, 孙启利, 等. 纤维增强树脂基复合材料增材制造技术与装备研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31(2): 221-226.
- [8] 明越科, 段玉岗, 王奔, 等. 高性能纤维增强树脂基复合材料 3D 打印[J]. 航空制造技术, 2019, 62(4): 34-38+46.
- [9] Gómez-Ortega, A., Piedra, S., Mondragón-Rodríguez, G.C. and Camacho, N. (2024) Dependence of the Mechanical Properties of Nylon-Carbon Fiber Composite on the FDM Printing Parameters. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **186**, Article 108419. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108419>

-
- [10] 李昊然. 碳纤维复合材料 3D 打印机喷头分析和设计[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2019.
 - [11] 成大先. 机械设计手册[M]. 第 6 版. 北京: 化学工业出版社, 2016.
 - [12] 杨可桢, 程光蕴, 李仲生, 等. 机械设计基础[M]. 第 7 版. 北京: 高等教育出版社, 2020.
 - [13] Brenken, B., Barocio, E., Favaloro, A., Kunc, V. and Pipes, R.B. (2018) Fused Filament Fabrication of Fiber-Reinforced Polymers: A Review. *Additive Manufacturing*, **21**, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.01.002>