

http://pmse.scu.edu.cn

## 螺杆挤出式熔融沉积成型工艺的 3D 打印螺杆技术进展

张龙昊<sup>1</sup>, 王世標<sup>1</sup>, 朱家威<sup>1</sup>, 王泽欣<sup>1</sup>, 杨华光<sup>2</sup>, 杨卫民<sup>3</sup>, 鉴冉冉<sup>1,3</sup>

(1. 青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061; 2. 金发科技股份有限公司企业技术中心, 广东 广州 510663;

3. 北京化工大学英蓝实验室, 北京 100029)

**摘要:** 螺杆挤出式熔融沉积成型(FDM)3D 打印机的螺杆结构研究正逐步深入,旨在应对制造成本、成型尺寸和材料选择等方面的挑战。螺杆结构优化是提升 FDM 技术性能的关键,直接影响材料塑化质量和选择多样性,进而影响打印效率和制作质量。文中从螺杆结构参数优化、外部结构配合及创新型螺杆结构 3 个方面探讨了国内研究人员在提升 FDM 打印性能方面的努力。此外,对材料特性的定制设计、外部辅助结构的创新应用及系统化设计规范的建立进行了总结与展望。这些研究为螺杆挤出式 3D 打印机的未来发展提供了新的技术路径和理论支持。

**关键词:** 3D 打印;熔融沉积成型;3D 打印螺杆;挤出工艺

**中图分类号:** TP391.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7555(2026)03-0149-10

自 20 世纪 80 年代以来,随着计算机辅助设计、材料科学和激光技术的飞速发展,3D 打印技术已成为智能制造领域的重要组成部分。这项技术通过逐层堆叠材料,突破了传统制造工艺的限制,实现了从设计到成品的快速转化,被誉为“第三次工业革命”的关键生产工具<sup>[1]</sup>。根据美国材料与试验协会(ASTM)标准,增材制造工艺体系涵盖七大类别:材料挤出、材料喷射、黏结剂喷射、粉末床熔融、定向能量沉积、光聚合及薄材层压<sup>[2]</sup>。在此框架下,衍生出多种具体工艺,如选择性激光熔融(SLM)<sup>[3]</sup>、激光烧结(SLS)<sup>[4]</sup>、电子束熔化(EBM)、激光近净成形(LENS)<sup>[5]</sup>、立体光固化(SLA)<sup>[6]</sup>、熔融沉积成型(FDM)<sup>[7]</sup>和直写打印(DIW)等。在众多 3D 打印技术中,FDM 技术因其高成型自由度、高材料利用率<sup>[8]</sup>和短制造周期<sup>[9]</sup>等优点得到了广泛应用。然而,该技术仍面临成型件表面粗糙度高、最大成型尺寸受限及打印材料单一等问题<sup>[10]</sup>,这限制了其在工业领域的发展。挤出系统作为 3D 打印过程中的关

键部分,直接影响打印质量和效率。因此,亟须通过挤出系统的结构创新来突破这些瓶颈。目前,材料挤出工艺的进料机制主要分为三类:螺杆挤出式、柱塞推动式和线材熔融式<sup>[11]</sup>。其中,螺杆挤出式 FDM 工艺展现出良好的发展前景,尤其是在拓宽材料适用范围、提高材料兼容性及改善 FDM 材料熔融不均匀等方面表现出显著优势。

作为增材制造领域的重要发展方向,螺杆挤出式 FDM 打印技术逐渐成为制造业功能组件的关键技术。螺杆挤出技术的引入为克服现有难题提供了新的解决方案。然而,目前 FDM 打印螺杆结构设计尚未形成标准化和工业化的成熟体系,迫切需要进一步的技术创新与突破,以确保其在工业应用中的可靠性和效率。本文系统总结了螺杆挤出式 FDM 3D 打印机螺杆结构的研究现状,重点探讨了螺杆结构的参数设计、外部结构的配合及创新性螺杆设计的进展,以及其在提升打印效率和制件质量方面的潜在应用前景,为未来研究和工业应用提供了参考。

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0034

收稿日期: 2025-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52206095); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2021QE232); 山东省高等学校青创科技支持计划(2023KJ102)

通讯联系人: 鉴冉冉, 主要从事高分子材料加工成型与先进制造技术研究, E-mail: jianrr@foxmail.com

## 1 螺杆结构优化设计研究进展

### 1.1 参数设计对打印性能的影响

在螺杆式 FDM 打印机中,螺杆结构参数的优化对于提升加工效率和力学性能至关重要。螺杆的优化策略聚焦于关键参数的协同设计,包括几何参数(如直径、螺距、螺旋升角)、功能性比例参数(如压缩比、长径比)及装配参数(如螺杆料筒的间隙控制)。这些措施不仅可以改善螺杆的加工性能,还为工业应用提供了坚实的技术支持。

优化工艺基本参数是提高打印效率和成型质量的关键因素。通过调整螺杆结构的几何参数,如直径、段长、螺棱宽度、螺距、螺旋升角、螺纹槽深度等,来适应不同材料和打印需求。其中,螺杆直径( $D$ )作为核心参数,直接影响材料输送能力和剪切热的产生。螺杆直径增大可以通过优化流道设计来改善剪切应力分布,但会导致局部剪切速率升高,从而加剧剪切热积累。研究表明,桌面级设备中  $D=10\sim 20$  mm 可兼顾高精度需求<sup>[12-16]</sup>,而工业级设备中  $D=30$  mm 可提升扭矩与挤出量<sup>[17]</sup>。在此基础上,螺距( $S$ )通常与直径呈一定的比例关系( $S\approx D$ )<sup>[18]</sup>,由于螺杆式 FDM 打印机中通常采用单头螺杆,根据单头螺杆的几何关系,螺旋升角可以通过螺距和直径的比值来计算。当螺距与直径的比值为 1 时,螺旋升角约为  $17.7^\circ$ 。研究表明,螺旋升角的优化需要平衡材料的推进速度与混合均匀性,因此,可以通过适当调节  $S/D$  的值来适配不同材料。低黏度材料(如 PLA)宜用较大螺旋升角( $15^\circ\sim 17^\circ$ ),以提高输送效率;高黏度材料(如 PC)建议取较小螺旋升角( $12^\circ\sim 14^\circ$ ),以增强剪切混合<sup>[13-20]</sup>。螺杆槽深( $H$ )遵循  $H=(0.18\sim 0.25)D$  的经验公式<sup>[12]</sup>,槽深直接影响材料的填充率和剪切热的产生。较深的螺槽可以容纳更多材料,但会降低剪切应力,从而影响熔融效率。在研究螺杆结构参数对打印性能提升的影响时,发现以上 4 种基本参数对不同打印材料虽有一定适应性,但最优设计与材料性能存在紧密关联。因此,若依据材料特性对螺杆结构参数进行个性化设计,将显著提高打印性能。例如,螺杆段长的设计对材料加工效率和打印精度具有重要影响。李超凡<sup>[19]</sup>研究表明,螺杆式 FDM 3D 打印机的螺杆通常分为 3 个部分:加料段、压缩段和计量段。这种分段方式有助于材

料的充分加工,进而提升打印精度。但是,由于各段对材料的加工作用不同,其长度有所不同,且不同材料所需的最优段长也存在差异。研究人员通过大量实验确定了不同材料的最优螺杆段长。一般来讲,无定形塑料的加料段通常占螺杆总长的 20%~30%,压缩段占 45%~50%,计量段占 25%~30%;结晶型塑料的加料段占螺杆总长的 40%~60%,压缩段占 10%~15%,计量段占 30%~45%。螺棱宽度的最优设计也与材料密切相关。对于低黏度材料,适当增加螺棱宽度有助于减少漏流现象,但过大的宽度可能会导致动力消耗增加和过热问题。通常,螺棱宽度( $e$ )的选取范围为  $(0.08\sim 0.12)D$ <sup>[13]</sup>。螺棱宽度不仅会影响剪切应力的分布,还会影响材料的熔融均匀性和挤出稳定性<sup>[21]</sup>。

与传统螺杆挤出机相比,螺杆式 FDM 3D 打印机在打印速度上相对较慢,但打印复杂结构和精细部件时具有显著优势。这种特点对螺杆的功能性比例参数提出了更高要求。在设计过程中,需要根据不同材料的特性来选择最优的螺杆参数,以确保打印质量和效率。研究表明,在螺杆压缩比方面,较高的压缩比通常能够提高材料的混合效果,但其必须依据材料的熔融速率和加工特性来确定。任礼<sup>[20]</sup>总结了常见材料对应的螺杆式 FDM 3D 打印机的螺杆压缩比范围,如,PP 为 2.5~4,ABS 为 1.6~2.5,PLA 为 2.5~3.0,PC 为 2.5~3.0。此外,螺杆式 FDM 3D 打印机螺杆的长径比( $L/D$ )直接影响物料在机筒内的停留时间和塑化能力。不同材料的  $L/D$  也各有差异,如 PC 材料的  $L/D$  为 25~30,PA66 和 PET 为 18~20,PMMA 为 20~22,PVC 为 16~20<sup>[18]</sup>。因此,螺杆式 FDM 3D 打印机的螺杆设计不仅需要满足高精度要求,还需针对不同材料的特性进行参数优化,不仅包括螺杆的压缩比和长径比,还需综合考虑材料的熔融速率和加工特性,以实现最佳的打印效果。

由于螺杆式 FDM 3D 打印机的设计重点在于精确控制材料的挤出量和挤出位置,以保证打印精度和质量,因此,其装配与间隙类参数相比传统螺杆挤出机具有更高的控制要求,以避免因漏流引起的挤出不稳定。研究人员建议在螺旋套筒与定轴不相互干涉的前提下,尽量减小螺杆与料筒的间隙,应尽量控制在 0.05 mm 以下<sup>[14]</sup>。较小间隙可以确保流场参

数接近理想状态,从而提升喷头的建压能力、混合塑性性能及最终挤出流率。同时,为了提高螺杆与料筒的加工和装配精度,研究人员建议采取有效的定位措施,以防止料筒轴线偏离螺杆轴线,从而确保两者之间的良好配合。综上所述,现有关于螺杆基本参数的研究为提高FDM 3D打印机的进料效率和打印性能提供了重要参考。然而,这些研究尚未形成系统化、标准化的螺杆参数数据库,这在一定程度上限制了螺杆设计和优化的普及与推广。未来的研究可以借鉴螺杆挤出机领域已经建立的螺杆参数数据库,进一步开发适用于螺杆式FDM 3D打印机的数据库,并制定相关的使用规范。这样不仅能有效简化后续设计工作,还能为不同材料、不同打印条件下的螺杆参数优化提供科学依据,有助于进一步提升3D打印的整体性能和生产效率。同时,机器学习技术在螺杆式FDM 3D打印中的应用前景广阔。通过机器学习算法分析大量实验数据,可快速筛选最优螺杆参数组合,缩短研发周期和成本。

随着熔融沉积成型技术向汽车、航空航天等高精密领域拓展,传统螺杆参数的通用化设计逐渐暴露出多材料适配性不足的短板,推动研究转向基于材料流变特性的个性化优化策略。针对无定形塑料ABS的黏弹性特征,Li等<sup>[22]</sup>通过瞬态CFD模拟与正交实验,揭示了螺距(15 mm)、螺槽深度(1.3 mm)及计量段长度(85 mm)的梯度压缩结构与材料松弛时间的匹配机制,使挤出效率提升37%,波动系数降至8%以内,建立了时变特性驱动的螺杆设计范式。在此基础上,Zhang等<sup>[22]</sup>针对结晶型塑料PP的相变收缩难题,创新地提出螺杆段长比例与结晶度分布的调控关联,通过压缩段/计量段为3:2的黄金分割比设计结合梯度降温工艺,将打印件尺寸精度提升至 $\pm 0.15$  mm,形成了工艺结构动态适配的系统解决方案。而对于高黏度材料PEEK的流动稳定性挑战,Tseng等<sup>[24]</sup>提出突破性螺杆设计方案,采用长径比20:1的三区段结构,其中喂料段(9D)、压缩段(5D)和计量段(6D)精准对应材料熔融的物理相变过程,喂料段通过大螺槽深度(4.8 mm)实现固态颗粒高效输送,压缩段以2.56的压缩比对物料施加渐进式增压,而计量段则以1.9 mm的浅螺槽深度强化剪切塑化。这种梯度式结构使熔体黏度平稳过渡,

成功提升挤出速度的同时,流动波动率控制在5%以内,首次构建了基于螺杆功能段压力-温度双场耦合的高黏材料流变控制模型,为航空航天领域PEEK构件的高精度打印提供了理论支撑。这些研究标志着螺杆优化从单一参数调整向多物理场耦合的系统工程演进,无定形材料聚焦时变特性匹配,结晶材料强调相变过程调控,高黏材料突破流场稳定性瓶颈,最终形成“材料流变特性-螺杆功能段设计-工艺参数映射”的普适性方法论,为增材制造从经验驱动向模型驱动的范式升级奠定了基础,并为未来智能算法赋能的动态自适应优化开辟了新路径。

## 1.2 结构形状对打印效率的提升

在研究螺杆式FDM 3D打印机的螺杆结构优化时,发现合理设计螺纹形状、剪切元件、螺杆形式及头部形状等关键因素,能显著提升设备性能和生产效率<sup>[25]</sup>。通过优化螺杆结构可加快材料输送与熔化速度,提高挤出精度,减少停机时间,从而整体提升3D打印效率。

螺杆结构形状的设计可以显著提高材料的输送速度和加工效率。合理的螺杆结构能够确保材料从料仓顺利输送至加热区,避免堵塞和输送不均等问题,从而提高打印效率。首先,螺杆头部的设计对螺杆式FDM 3D打印机的整体性能至关重要。如图1所示,圆锥形螺杆头因其具有优化材料流动性和压力分布的能力,被广泛应用于此类设备。王权杰<sup>[21]</sup>和岳奇<sup>[13]</sup>的研究表明,这种设计不仅提升了混合均匀性和打印精度,还可以精确控制材料的输出量,避免浪费材料或过多堆积,从而提高打印的整体精度和速度。但此结构不适用于大型转向型螺杆,因此,秦望等<sup>[26]</sup>设计了一款新型压降式喷头,该结构填补了大型螺杆式FDM 3D打印机螺杆喷头的设计空白,该喷头采用独特的压降结构,显著提升了热塑性聚物流体的流动性。此设计支持物料的顺畅换向,确保水平与垂直方向的平滑过渡,同时能有效减少拐角处的滞留区。这些改进直接提高了打印效率,确保了恒温控制和挤出成型的稳定性。其次,在螺杆形状方面,梯形螺纹结构在螺杆式FDM 3D打印机中展现出显著优势。经模拟对比分析,梯形螺纹在颗粒出口质量流量方面优于其他螺纹形状,表现出最高的流量效率<sup>[27]</sup>。如图2所示,梯形螺纹不

仅具备高承载能力和传动效率,还因其强耐磨性大幅提升了螺杆的传动性能和进料效率,满足了多样化的生产需求。在螺杆形式的选择上,岳奇等<sup>[15]</sup>通过分析指出,螺杆设计能优化材料处理和打印效率。渐变型螺杆因其在过渡段对温度和压力的逐步调整,能够更加平稳地处理热敏性和结晶性材料,减少材料的分解和不良结晶现象。然而,渐变型螺杆的挤出速度相对较慢,不适用于需要快速产出的应用场景。相比之下,突变型螺杆由于过渡段较短,能够快速加热和挤出黏度低、熔点不稳定的材料,在打印速度上具有优势。因此,突变型螺杆更适用于对材料稳定性要求较低但追求打印速度的场合。最后,螺杆区域结构的设计可以提高材料的压缩和混合效果。王龙等<sup>[28]</sup>提出在螺杆式 FDM 3D 打印机中加入剪切段区域设计,该设计通过增强螺杆的剪切场强度,提升螺杆的建压能力和剪切速率,从而提高物料的熔融均化程度,确保挤出过程的稳定性,并能加快打印速度,提高材料利用率。这一创新设计在回收材料加工中展现出独特优势,Mi 等<sup>[29]</sup>针对聚丙烯和聚对苯二甲酸乙二醇酯混合回收物的分离难题,开发了一种剪切螺杆打印机。尽管因滞留效应导致共混降解水平略有上升,但其强剪切作用大幅提升了共混效率,同时简化了回收流程,实现了混合回收材料经单次熔融即可直接成型。在此基础上,李超凡等<sup>[30]</sup>进一步研究了圆环型、S 型、棱柱型和圆柱型等不同形状的剪切段,发现它们会产生不同的剪切力。这种灵活的设计允许根据具体加工条件和材料特性选择最合适的剪切段,从而优化混合效果,并提升打印效率。

尽管螺杆内部结构的优化在提升 FDM 3D 打印性能方面取得了显著进展,但现有设计仍存在局限性。首先,螺杆参数的优化主要依赖于实验和经验公式,缺乏材料复杂流变行为的理论支持。其次,内部结构优化难以完全解决材料在螺杆中的非均匀剪切和局部过热问题,这些问题会直接影响打印质量和材料性能。此外,随着 FDM 技术向多材料和高性能应用的拓展,单一的内部结构优化已无法满足复杂材料体系的加工需求。因此,仅依靠螺杆内部结构的改进已不足以突破现有技术瓶颈。外部辅助结构的创新设计成为进一步提升打印效率和设备稳定

性的关键。外部结构优化不仅能弥补内部结构的不足,还能通过协同作用增强设备对不同材料的适应性,为 FDM 3D 打印技术的发展提供了新的思路 and 方向。

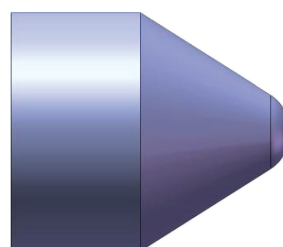


Fig. 1 Conical screw nozzle

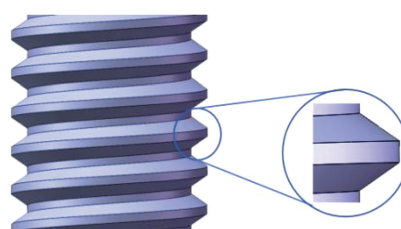


Fig. 2 Local structure of trapezoidal screw

## 2 外部辅助结构协同优化

在螺杆式 FDM 3D 打印机螺杆结构的外部配合设计研究中,针对设备性能和打印质量的提升,研究者对进料区优化和温度与振动辅助调节等方面进行了深入探索。这些探索旨在弥补螺杆内部结构设计的局限性,增强设备对各种材料的适应性。

### 2.1 进料效率改进

优化外部结构可以显著提高进料效率,特别是在 FDM 3D 打印机中,进料方式决定了材料的流动性和打印质量。不同进料方式会在进料路径中产生不同的阻力,不仅影响材料的顺畅输送,还可能引发堵塞或材料不均匀等问题。为此,研究人员优化螺杆外部进料系统,提出了多种提升进料效率的方案。首先,进料口的圆角设计是优化进料效率的重要研究方向。霍恩光<sup>[31]</sup>针对进料过程中的阻力问题,提出了优化进料口的圆角型进料方案。通过在进料口设置不同半径的圆角,减少颗粒接触力,并优化进料角度与圆角的配合。从流体力学的角度来看,圆角设计能够降低颗粒在进料口处的应力集中,减少颗

粒与进料口内壁的摩擦阻力。这种设计基于颗粒流动的流体力学模型,通过减少颗粒在进料口处的堆积和卡塞,显著提高了材料的输送效率。在此基础上,邵瞳<sup>[32]</sup>设计了一款具有露出腔体进口结构的进料螺杆,如 Fig.3 所示,该螺杆与进料漏斗相配合。该结构减少了进料阻力,提升了材料分布的均匀性和输送效率,从而有效提高了 FDM 3D 打印机的整体性能。露出腔体进口结构能够改善颗粒的流动路径,减少颗粒在进料口处的湍流和回流现象,进一步优化材料的输送过程。此外,陈磊等<sup>[33]</sup>探讨了螺杆转速与进料角度的关系,在低速范围内,进料角度对质量流量的影响较小,而在转速高于 0.1 r/s 时,选择圆形漏斗的进料效果较优。这表明在较高转速下,圆形漏斗能够更好地引导颗粒流动,减少颗粒在进料口处的堆积和堵塞。圆形漏斗的进料口设计能够降低颗粒的流动阻力,同时减少颗粒之间的碰撞和摩擦,从而提高进料效率。尽管如此,由于重力进料系统在使用过程中仍存在卡料问题,研究人员开始积极探索创新性的进料方式。王天明等<sup>[34]</sup>设计了一种微型螺旋挤压喷头推杆凹槽进料机构,由电磁铁、推杆及转换接头构成。通过推杆凹槽在料斗与料筒间的往复运动,实现颗粒的间歇进给,有效改善了传统螺旋送料连续性不足的问题。这种设计基于颗粒流动的间歇性控制,通过精确控制颗粒的输送量,减少了颗粒在进料口处的堆积和堵塞,提高了进料的稳定性和均匀性。总体而言,通过优化螺杆外部结构,如进料口形状、进料角度和螺杆设计,可以有效解决进料阻力、卡塞和流量不稳定等问题。这些研究为进一步提升 3D 打印技术的进料效率和打印质量提供了新的方向和依据。

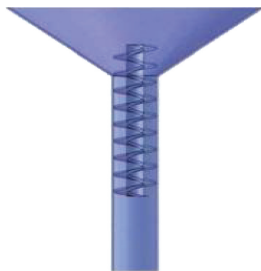


Fig. 3 Feed screw

## 2.2 温度与振动调控技术

温度与振动的协同调控技术有利于改善螺杆式 FDM 3D 打印机的打印质量和物料混合效果。由于传统螺杆结构在这些方面存在一定的局限性,许多研究者开始探索外部结构的优化设计,以辅助螺杆功能,提高其整体性能。在温度控制技术方面, Tim 等<sup>[35]</sup>通过创新性结构设计开发了单螺旋挤出热端系统。该系统的核心创新在于采用双加热筒与温度传感器组成的温控组件,通过双区协同加热机制显著优化了热端温度场分布。这种设计能够实现材料熔融过程的精准控制。双区协同加热机制通过分段控制加热区域的温度,减少了材料在熔融过程中的热梯度,从而避免了局部过热和热降解现象。这种优化不仅提升了材料熔融的均匀性,还扩展了适用于熔融沉积建模的材料种类,突破了传统热端对高黏度材料的加工限制。此外,秦望等<sup>[26]</sup>研究了电磁加热器与螺杆的结合应用。电磁加热技术通过高频电磁场直接作用于材料,实现对温度的精准控制。电磁加热能够快速响应温度变化,减少热滞后现象,从而提高设备的温度调节能力。这种技术不仅提高了设备的响应速度,还增强了温度稳定性,为螺杆式 3D 打印的温度控制提供了新的思路。任礼等<sup>[36]</sup>通过在加热套上均匀安装 8 个加热电阻,显著加快了料筒升温的响应速度,同时设计了隔热板、散热圈等辅助装置。这些结构改进有效提升了温度调控的精度与效率,确保了在整个打印过程中温度的稳定性和均匀分布。相较于传统加热方式,这一设计不仅提高了加热效率,还避免了局部过热的情况,从而进一步优化了材料熔融和挤出效果。钱崇伟<sup>[16]</sup>探讨了升降温装置与螺杆系统的协同作用,指出合理控制温度的升降过程对于螺杆保持在最佳加工温度下运行至关重要。材料在加工过程中需要保持在稳定的熔融温度区间,以确保其流动性和混合均匀性。通过协调升降温装置与螺杆的工作模式,可提高挤出系统的整体性能,同时优化材料性能和最终产品质量。但同时也指出,添加外部升降温装置会占用一定的空间,影响其余装置的工作和控制系统,因此,研究人员需要对其进行合理设计与装配。在振动协同方面,秦望等<sup>[26]</sup>提出的外部超声振动装置通过增强熔融材料的混合效果,显著提高了打印产品的性

能和质量。超声振动能够产生高频的剪切力和压力波动,从而改善熔融材料的流动性和混合均匀性。这种振动控制方式能够打破材料在螺杆中的层流状态,促进熔体的径向和轴向混合,减少材料在加工过程中的滞留和堆积。通过超声振动的辅助,材料的混合效果得到显著提升,进一步优化了打印精度和产品质量。总体来看,这些研究围绕外部结构设计对螺杆式 FDM 3D 打印机的改进展开,从振动与温度调控的协同作用出发,探索了如何通过优化外部结构设计来提升设备的整体效率和材料的混合性。随着这些技术的不断完善,FDM 3D 打印技术在提高打印质量和材料性能方面将取得进一步的发展。

### 3 新型螺杆结构设计与应用

在面对 FDM 打印材料选择与打印效率的挑战时,研究者积极探索了多种创新的特殊螺杆结构设计,旨在优化打印性能并拓展材料的应用范围。研究主要集中在特殊螺杆结构设计方案、双螺杆挤出打印技术 2 个方面,探讨了其在 FDM 3D 打印中的应用潜力。

#### 3.1 特殊螺杆结构

在特殊螺杆结构设计方面,首先,研究者通过多级协同与场耦合机制创新,显著拓展了熔融沉积成型技术的材料适用边界。钱崇伟等<sup>[16]</sup>提出了一种创新的二级式螺杆结构,以解决 FDM 打印中材料选择的局限性。该设计结合了“塑化熔融螺杆、储料系统和挤出螺杆”的生产模式,通过精确调节塑化熔融装置与二级熔体挤出装置之间的供求关系,有效降低了螺杆挤出速度与打印速度之间的匹配难度。针对工业级产品加工需求,Liu 等<sup>[37]</sup>开发了基于塑料颗粒原料的大型二级式螺杆 FDM 3D 打印设备。该设备通过双级螺杆协同送料机制实现了高黏度材料的高效塑化,为工业领域大规模塑料制品快速成型提供了经济性解决方案。这种设计不仅提高了材料的塑化效率,还显著降低了生产成本,为工业级 FDM 打印技术的推广奠定了基础。其次,研究者通过创新性地设计特殊形状结构,进一步提升了螺杆在复杂材料加工中的适应性和性能表现。为改善常规螺杆塑化能力弱、挤出均匀性差等问题,朱家威等<sup>[38]</sup>设计了一种场协同扭转 3D 打印螺杆。场协同扭转元

件通过其几何结构引导聚合物熔体在螺杆通道内产生周期性螺旋流动。这一流动模式显著增强了熔体的径向传质能力,实验数值模拟结果表明,该设计使 PP 材料的熔融均匀性提升了 27%,螺杆末端温度分布标准差由 $\pm 5.2$  °C 降至 $\pm 2.1$  °C,有效解决了传统螺杆因层流主导导致的传热效率低下问题。同时该研究团队从打印工艺出发,将传统制造工艺(注射成型)的原理引入到 FDM 制造中,采用模塑成型方式进行增材制造,创新性地提出了“预打印壳体-后注射壳芯”的注射打印技术,为实现高效高强熔融沉积成型提供了一种创新型的解决方案<sup>[39]</sup>。为突破传统线材限制,Leng 等<sup>[40]</sup>创新性地设计了基于锥形螺杆的挤出沉积(CSBED)系统,该结构采用大锥度锥形螺杆实现聚合物颗粒的直接塑化挤出。新型结构系统不仅打破了材料限制,在医疗领域表现出巨大的潜力,为 FDM 技术在高精度、高性能应用中的拓展提供了新的思路。

#### 3.2 双螺杆挤出技术

在熔融沉积成型技术中,传统丝料进给系统与单螺杆挤出装置虽被广泛采用,但其材料兼容性受限<sup>[41-43]</sup>、熔体均质化不足<sup>[44]</sup>及挤出动态稳定性缺陷<sup>[45]</sup>等瓶颈问题,推动了双螺杆挤出技术的创新性研究。双螺杆技术的核心优势在于其对高分子复合材料的混合和分散能力,尤其是在处理多材料体系时,能够显著提升材料的混合均匀性和挤出稳定性。基于协同啮合结构的双螺杆系统通过分布混合强化<sup>[46]</sup>与剪切热历程精准调控<sup>[47]</sup>的协同作用,在连续化生产<sup>[48]</sup>和高性能复合材料增材制造中展现出显著优势。双螺杆的啮合机制和剪切场分布是实现高效混合的关键。在双螺杆系统中,螺杆的旋转方向(同向或异向)和螺杆间隙对剪切场的强度和分布有重要影响。例如,同向旋转双螺杆通过捏合元件的动态解耦,能够显著增强剪切场的强度,从而提高材料的混合效率;而异向旋转双螺杆则通过优化应力场分布,降低高黏度材料的挤出压力。在此基础上,Bai 等<sup>[49]</sup>通过端面轮廓建模,提出了导程 24 ~ 36 mm、转速 8 ~ 15 r/min 的优化区间,为平衡流量稳定性与混炼效率提供了量化基准。Qin 等<sup>[50]</sup>结合热-流-固多场耦合分析,证实 20 mm 外径与 0.2 mm 间隙配置可提升热场均匀性 40%,其正位移输送特性

使异质材料混合效率跃升3~4倍。与此同时,秦望等<sup>[51]</sup>的异向等速小型化设计(长径比18/间隙0.2 mm)通过应力场优化降低高黏度材料挤出压力32%,与周婧团队<sup>[52]</sup>的三段式变螺距策略形成技术互补,后者在高固含量陶瓷浆料挤出中实现了亚微米级混合精度。从高分子复合材料的角度来看,双螺杆技术通过优化剪切场和混合机制,能够有效改善分散相和连续相的行为。在复合材料中,分散相(如填料、纤维等)的均匀分布对于材料性能至关重要。双螺杆的剪切场能够提供足够的剪切应力,使分散相在连续相中均匀分散,从而提高材料的整体性能。Manoel等<sup>[53]</sup>的同向双螺杆-笛卡尔平台集成系统通过捏合元件的动态解耦,使粉末基生物复合材料的塑化效率提升了2.8倍,标志着该技术在功能梯度材料制造中的跨越。研究表明,双螺杆技术正沿着“结构参数优化-热机械协同控制-多材料工艺适配”的路径发展,其中,啮合间隙(0.2~0.4 mm)、长径比(18~24)等参数优化窗口已形成共识,转速调控(1~15 r/min)与剪切场设计的协同效应成为突破多材料界面性能的关键。尽管在打印分辨率和复杂结构成型方面取得进展,但多材料黏度匹配、梯度界面控制及在线监测集成仍是亟待攻克的核心挑战,这为未来研究提供了明确的技术突破方向。

#### 4 结语与展望

(1)螺杆式FDM 3D打印机的发展正在向高性能、高效率 and 智能化方向迈进,特别是在螺杆结构设计方面,针对不同材料和应用场景的定制化设计显得尤为关键。例如,在处理陶泥浆料和高分子塑料时,通过优化螺纹形状、剪切元件和螺杆段长等内部结构,可以显著提升打印性能,并有效解决材料进料不均和打印质量不稳定等问题。新型3D打印螺杆结构和双螺杆技术的创新发展,也为螺杆挤出式3D打印技术的发展提供了助力。

(2)在对螺杆式FDM 3D打印机的螺杆结构进行优化设计时,仅依赖螺杆内部结构的改进存在一定局限性,尤其在温度等关键参数的控制方面。因此,外部辅助结构的创新设计成为提高打印效率和设备稳定性的重要补充。例如,外载超声振动装置和改进进料系统,可以显著提高打印效率和设备的

运行稳定性,同时确保成型速率和长期精度。然而,这些外部辅助装置可能会占用一定空间,并增加控制复杂性。

(3)由于螺杆式FDM 3D打印机在处理不同材料时的特性差异较大,建立系统化的设计规范至关重要。目前,螺杆设计多基于传统挤出机的参数,缺乏针对不同材料和工艺的专门设计标准。未来的研究应着重完善这些设计规范,推动螺杆式FDM 3D打印机向工业级产品设计过渡,从而将研究成果与实际生产紧密结合,实现高效、高质量的规模化生产,进一步拓展FDM技术的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] Berman B. 3-D printing: the new industrial revolution[J]. *Business Horizons*, 2012, 55: 155-162.
- [2] Gibson I, Rosen D W, Stucker B, *et al.* Additive manufacturing technologies[M]. New York: Springer, 2010.
- [3] Yang Y, Ren Z, Zhou C, *et al.* 3D-printed robust dual superlyophobic Ti-based porous structure for switchable oil/water emulsion separations[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33: 2212262.
- [4] Han W, Kong L, Xu M. Advances in selective laser sintering of polymers[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2022, 4: 042002.
- [5] Zhang C, Li Z, Zhang J, *et al.* Additive manufacturing of magnesium matrix composites: comprehensive review of recent progress and research perspectives[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11: 425-461.
- [6] Quan H, Zhang T, Xu H, *et al.* Photo-curing 3D printing technique and its challenges[J]. *Bioactive Materials*, 2020, 5: 110-115.
- [7] Compton B G, Kemp J W, Novikov T V, *et al.* Direct-write 3D printing of NdFeB bonded magnets[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2018, 33: 109-113.
- [8] Ngo T D, Kashani A, Imbalzano G, *et al.* Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 143: 172-196.
- [9] Benié K, Barrière T, Placet V, *et al.* Introducing a new optimization parameter based on diffusion, coalescence and crystallization to maximize the tensile properties of additive manufacturing parts[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 69: 103538.
- [10] Elsonbaty A A, Rashad A M, Abass O, *et al.* A survey of fused deposition modeling (FDM) technology in 3D printing[J].

- Journal of Engineering Research and Reports, 2024, 26: 304-312.
- [11] Suwanpreecha C, Manonukul A. A review on material extrusion additive manufacturing of metal and how it compares with metal injection moulding[J]. Metals, 2022, 12: 429-485.
- [12] 马世博, 闫华军, 李硕超, 等. 基于 FDM 技术的多料口粒料 3D 打印供料及挤料系统设计[J]. 河北科技大学学报, 2019, 40(5): 438-445.
- Ma S B, Yan H J, Li S C, *et al.* Design of feeding and squeezing system for multi-feed grain 3D printing based on FDM technology[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2019, 40(5): 438-445.
- [13] 岳奇. 基于螺杆挤出原理 3D 打印机控制系统的研究与开发[D]. 西安: 陕西科技大学, 2022.
- Yue Q. Research and development of control system for 3D printer based on screw extrusion principle[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2022.
- [14] 任礼, 白海清, 鲍骏, 等. 螺杆挤出式 3D 打印机结构设计与仿真分析[J]. 中国塑料, 2021, 35(4): 98-105.
- Ren L, Bai H Q, Bao J, *et al.* Structure design and simulation analysis of screw extrusion 3D printer[J]. China Plastics, 2021, 35(4): 98-105.
- [15] 岳奇, 葛正浩, 乔宇杰. 螺杆式 3D 打印控制参数及成型精度优化[J]. 塑料, 2023, 52(1): 44-49.
- Yue Q, Ge Z H, Qiao Y J. Control parameters and molding accuracy optimization of screw 3D printing[J]. Plastics, 2023, 52(1): 44-49.
- [16] 钱崇伟. 熔融沉积 3D 打印机螺杆式挤出装置的设计及耗材制备与性能研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- Qian C W. Design of screw extrusion device for FDM 3D printer and preparation and performance research of consumable materials[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022.
- [17] 董莘, 赵寒涛, 吴冈, 等. 工业级熔融沉积式 3D 打印机供料挤出螺杆的研究与设计[J]. 机械工程师, 2016, 48(6): 82-85.
- Dong X, Zhao H T, Wu G, *et al.* Research and design of feed extrusion screw for industrial melt deposition 3D printer[J]. Mechanical Engineer, 2016, 48(6): 82-85.
- [18] 杨磊, 马睿, 黄部东, 等. FDM 3D 打印挤出螺杆设计及应用研究[J]. 铸造设备与工艺, 2017, 6(3): 8-10.
- Yang L, Ma R, Huang B D, *et al.* Study on application and design of extrusion screw for FDM 3D printing[J]. Foundry Equipment and Technology, 2017, 6(3): 8-10.
- [19] 李超凡. 熔融沉积式螺杆挤出 3D 打印机设计及其实验研究[D]. 汉中: 陕西理工大学, 2023.
- Li C F. Design and experimental study of screw extrusion fused deposition modeling 3D printer[D]. Hanzhong: Shaanxi University of Technology, 2023.
- [20] 任礼. FDM 型螺杆挤出式 3D 打印机的设计与仿真研究[D]. 汉中: 陕西理工大学, 2022.
- Ren L. Research on design and simulation of FDM screw extrusion 3D printer[D]. Hanzhong: Shaanxi University of Technology, 2022.
- [21] 王权杰. 基于 FDM 的螺杆式 3D 打印机设计及实验研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019.
- Wang Q J. Design and experimental study of screw extrusion 3D printer based on FDM[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2019.
- [22] Li B, Zhang P, Gu H, *et al.* Structure analysis and optimization design of FDM wire extruder screw[J]. Journal of Physics Conference Series, 2021, 1802: 022003.
- [23] Zhang Y, Bai H, Mi D, *et al.* Precision control and parameter optimization in screw extrusion 3D printing of polypropylene materials[J]. Heliyon, 2024, 10: e32605.
- [24] Tseng J W, Liu C Y, Yen Y K, *et al.* Screw extrusion-based additive manufacturing of PEEK[J]. Materials & Design, 2018, 140: 209-221.
- [25] Chen K, Cui Y H, Wang S W, *et al.* Characterization of plasticizing process of single screw extruder with grooved melting zone[J]. Journal of Polymer Research, 2020, 27: 1-11.
- [26] 秦望, 白海清, 贾仕奎, 等. 新型 3D 打印成型设备喷头结构热应力耦合分析[J]. 塑料, 2020, 49(3): 52-57.
- Qin W, Bai H Q, Jia S K, *et al.* Thermal stress coupling analysis of nozzle structure of new 3D printing molding equipment[J]. Plastics, 2020, 49(3): 52-57.
- [27] 郇瞳, 刘丹, 张振铎, 等. 基于 3D 打印螺杆挤出装置颗粒流动特性数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(10): 2229-2234.
- Tai T, Liu D, Zhang Z D, *et al.* Numerical simulation of particle flow characteristics in 3D printing screw extruder[J]. Chinese Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(10): 2229-2234.
- [28] 王龙, 白海清, 李超凡, 等. 聚丙烯 3D 打印剪切螺杆设计及仿真分析[J]. 塑料科技, 2023, 51(8): 98-102.
- Wang L, Bai H Q, Li C F, *et al.* Design and simulation analysis of shear screw for 3D printing of polypropylene[J]. Plastic Science and Technology, 2023, 51(8): 98-102.
- [29] Mi D, Zhang J, Zhou X, *et al.* Direct 3D printing of recycled PET/PP granules by shear screw extrusion[J]. Polymers, 2023, 15: 4620.
- [30] 李超凡, 白海清, 杨思瑞, 等. 螺杆挤出式 3D 打印机的设计与剪切性能分析[J]. 塑料工业, 2022, 50(10): 89-95.
- Li C F, Bai H Q, Yang S R, *et al.* Design and shear performance analysis of screw extrusion 3D printer[J]. Plastics Industry, 2022, 50(10): 89-95.

- [31] 霍恩光. 螺杆式塑料颗粒3D打印机的优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- Huo E G. Optimization design of screw plastic particle 3D printer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [32] 邵瞳. 基于3D打印的螺杆挤出装置颗粒流动及熔融特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- Tai T. Research on particle flow and melting characteristics of screw extruder based on 3D printing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [33] 陈磊, 张继春, 王世博. 新型塑料颗粒3D打印机技术方案的研究[J]. 机械设计与制造, 2018, 36(1): 83-85.
- Chen L, Zhang J C, Wang S B. Research on the technical scheme of a new plastic particle 3D printer[J]. Machine Design & Manufacture, 2018, 36 (1): 83-85.
- [34] 王天明, 刁俊通, 金焯. 颗粒体进料微型螺旋挤压堆积喷头的设计[J]. 机械工程学报, 2006, 42(9): 178-184.
- Wang T M, Xi J T, Jin Y. Design of mini screw extrusion and deposition nozzle for granule-feed[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(9): 178-184.
- [35] Tim F, Markus T. Design and characterization of a screw extrusion hot-end for fused deposition modeling[J]. Molecules, 2021, 26(3): 590-600.
- [36] 任礼, 白海清, 贾仕奎, 等. 单螺杆挤出式3D打印机优化设计与温度场分析[J]. 塑料工业, 2020, 48(12): 90-95.
- Ren L, Bai H Q, Jia S K, *et al.* Optimization design and temperature field analysis of single-screw extruder 3D printer[J]. Plastics Industry, 2020, 48(12): 90-95.
- [37] Liu X, Chi B, Jiao Z, *et al.* A large-scale double-stage-screw 3D printer for fused deposition of plastic pellets[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134: 45147.
- [38] 朱家威, 王世櫟, 王泽欣, 等. 基于场协同原理的注射打印技术高效塑化螺杆设计[J]. 塑料工业, 2024, 52(11): 85-94.
- Zhu J W, Wang S L, Wang Z X, *et al.* High-efficiency plasticization screw designs for the injection printing technology based on the field synergy principle[J]. China Plastic Industry, 2024, 52(11): 85-94.
- [39] 鉴冉冉. 一种桌面级3D打印和复印装置及方法: 中国, 112571791A[P]. 2021-03-30.
- [40] Leng J, Wu J, Chen N, *et al.* The development of a conical screw-based extrusion deposition system and its application in fused deposition modeling with thermoplastic polyurethane[J]. Rapid Prototyping Journal, 2020, 26: 1541-1551.
- [41] Deb D, Jafferson J M. Natural fibers reinforced FDM 3D printing filaments[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 1308-1318.
- [42] Ju Q, Tang Z, Shi H, *et al.* Thermoplastic starch based blends as a highly renewable filament for fused deposition modeling 3D printing[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 219: 175-184.
- [43] Fekete I, Ronkay F, Lendvai L. Highly toughened blends of poly(lactic acid) (PLA) and natural rubber (NR) for FDM-based 3D printing applications: the effect of composition and infill pattern[J]. Polymer Testing, 2021, 99: 107205.
- [44] Liu T, Tian X, Zhang Y, *et al.* High-pressure interfacial impregnation by micro-screw in-situ extrusion for 3D printed continuous carbon fiber reinforced nylon composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 130: 105770.
- [45] Justino N J M, Idogava H T, Frezzatto S L E, *et al.* Screw-assisted 3D printing with granulated materials: a systematic review[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115: 2711-2727.
- [46] Alexandre A, Cruz S F A, Boudaoud H, *et al.* Mechanical properties of direct waste printing of polylactic acid with universal pellets extruder: comparison to fused filament fabrication on open-source desktop three-dimensional printers[J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2020, 7: 237-247.
- [47] Hertle S, Kleffel T, Wörz A, *et al.* Production of polymer-metal hybrids using extrusion-based additive manufacturing and electrochemically treated aluminum[J]. Additive Manufacturing, 2020, 33: 101135.
- [48] Netto J M J, Silveira Z C. Design of an innovative three-Dimensional print head based on twin-screw extrusion[J]. Journal of Mechanical Design, 2018, 140: 125002.
- [49] Bai H, Qin W, Jia S K, *et al.* A new type of 3D printing molding equipment: overall structural design and the numerical simulation for the flow field characteristics of its screw module[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2021, 22: 1693-1708.
- [50] Qin W, Li S, Bai H, *et al.* Structural design and heat transfer analysis of twin-screw extrusion 3D printer[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 130: 5601-5618.
- [51] 秦望, 白海清, 贾仕奎, 等. 基于螺杆挤出式3D打印设备的双螺杆设计与仿真[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(8): 87-92.
- Qin W, Bai H Q, Jia S K, *et al.* Design and simulation of twin-screw based on screw extrusion 3D printing equipment[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(8): 87-92.
- [52] 周婧, 贺后祥, 李亚, 等. 双螺杆多材料3D打印挤出机构设计与仿真分析[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2023, 50(3): 92-100.
- Zhou J, He H X, Li Y, *et al.* Design and simulation analysis of a twin-screw multi-material 3D printing extrusion mechanism[J]. Journal of Beijing University of Chemical

Technology (Natural Science Edition), 2023, 50(3):92-100.  
[53] Netto J M J, Sarout A I, Santos A L G, *et al.* Design and validation of an innovative 3D printer containing a co-rotating

twin screw extrusion Unit[J]. Additive Manufacturing, 2022, 59: 103192.

## Progress of 3D Printing Screw Technology in Screw-Extruded Fused Deposition Molding Process

Longhao Zhang<sup>1</sup>, Shilin Wang<sup>1</sup>, Jiawei Zhu<sup>1</sup>, Zexin Wang<sup>1</sup>, Huaguang Yang<sup>2</sup>, Weimin Yang<sup>3</sup>, Ranran Jian<sup>1,3</sup>

(1. College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China;

2. Kingfa Science and Technology Company Limited, Guangzhou 510663, China;

3. En-Learn Laboratory, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**ABSTRACT:** Research on the screw structure of screw extrusion-based fused deposition molding (FDM) 3D printer is gradually deepening, aiming to meet the challenges of manufacturing cost, molding size and material selection. The optimization of screw structure is the key factor to improve the performance of FDM technology, which directly affects the plasticization quality and selection diversity of materials, and then affects the printing efficiency and the quality of parts. This paper discussed the efforts of domestic researchers in improving the performance of FDM printing from three aspects of screw structure parameter optimization, external structure coordination and innovative screw structure. In addition, the custom design of material properties, the innovative application of external auxiliary structures and the establishment of systematic design specifications were summarized and prospected. These studies provide a new technical path and theoretical support for the future development of screw extrusion 3D printers.

**Keywords:** 3D printing; fused deposition molding; 3D printing screw; extrusion process