

基于 3D 打印技术的机械零件设计研究与应用综述

樊硕 葛宣赫 史新鹏 耿启迅 王登瑶

山东建筑大学机电工程学院, 山东济南, 250101;

摘要: 3D 打印技术通过逐层堆积成型原理突破传统制造局限, 推动机械零件向轻量化、功能集成化方向革新。3D 打印技术通过数字化建模与分层制造机制革新传统制造模式, 突破了复杂结构零件的成型限制。对此, 本文阐述了机械零件 3D 打印技术的类型与基本原理, 其主流工艺涵盖熔融沉积、光固化、粉末烧结及金属沉积等技术, 其中金属直接能量沉积技术已成功应用于航空航天领域的高性能构件制造, 光固化技术则在精密医疗器械领域展现独特优势。进一步分析总结了国内外在零件设计、材料工艺、质量控制等方面的前沿技术, 结合高精度制造发展需求, 讨论了未来 3D 打印技术主要发展趋势与技术挑战, 以突破更高打印精度的工业级应用门槛, 为高端装备的定制化、功能化制造提供可靠技术支撑。

关键词: 3D 打印; 零件设计; 材料工艺; 质量控制; 技术应用

DOI: 10.69979/3041-0673.25.08.023

引言

随着全球制造业向智能化、定制化方向加速转型, 3D 打印技术作为颠覆性制造方式, 正逐步突破传统机械制造的固有边界^[1-3]。传统铸造、切削等减材制造受限于模具开发周期长、材料利用率低以及复杂结构加工困难等问题, 难以满足高端装备领域对轻量化、功能集成化零件的迫切需求。当前, 3D 打印技术在实现复杂结构制造、提高材料利用率、缩短生产周期等方面具有显著优势, 将 3D 打印技术应用于机械零件设计, 可有效提升设计效率与质量, 提升产品市场竞争力, 为机械零件设计带来了新的机遇与挑战。

机械零件一般是由多个部件组合而成, 每一个部件都具有自己的特征。机械零件的设计要考虑很多因素, 如机械零件与机器设备要求的匹配性、材料的适配性、工艺可行性等^[4-6]。现有的二维图形软件能够对机械零部件设计产品的功能、结构进行分析和优化, 但不能很好地实现产品功能的整合。3D 打印技术在机械零部件的设计中得到了越来越多的应用^[7]。一方面计算机建模与仿真技术的进步, 将三维造型与仿真技术应用于机械零件设计, 已成为现代制造及其它行业应用计算机技术进行设计制造的重要手段^[8]。另一方面利用 3D 打印技术, 可将多个零件集成到同一个三维模型中, 实现产品功能集成^[9]。为此, 本文围绕“零件设计-材料工艺-质量控制”技术链分析框架, 系统梳理 3D 打印技术在机械零件关键技术的前沿研究, 分析传统与 3D 材料性能与工艺优化现状, 并基于实际应用场景分析现有技术瓶颈与未来

挑战, 为 3D 打印技术高效低损的应用提供理论参考。

1 机械零件 3D 打印技术

3D 打印技术以计算机辅助设计与计算机辅助制造技术为主要手段的数字化制造技术, 既可直接加工计算机生成的数字模型, 又可用于对产品物理性能进行仿真, 实现产品结构和性能的最优设计。利用 3D 打印技术, 可替代传统制造方法, 实现智能制造, 大幅降低生产成本。

逐层堆积成型(FDM)^[10]是 3D 打印技术的核心工艺, 其通过将三维模型切片为二维层片, 逐层叠加材料形成实体零件, 如图 1 所示。分层堆积时, 必须保证每一道工序的工艺参数一致, 才能保证产品的质量与性能。通过挤压机构将丝材连续输送至喷嘴内并加热, 再将熔融的材料从喷嘴挤出沉积。冷却过程中, 材料发生热收缩, 层间通过分子链扩散实现结合。通过将丝状材料加热熔化后挤出, 按照预定路径逐层堆积形成实体零件。该技术的关键在于精确控制每一层的厚度、材料沉积路径和温度场。

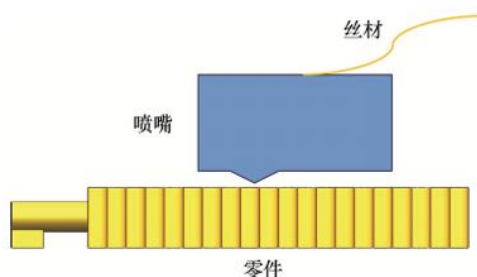


图 1 FDM 打印原理示意图

立体光固化 (SLA)^[11] 采用紫外激光或数字投影选择性照射液态光敏树脂表面, 光引发剂吸收光子后产生活性自由基, 触发树脂单体聚合交联, 如图 2 所示。升降平台逐层下移, 未固化树脂通过刮刀重新铺平。固化收缩易导致翘曲, 需通过支撑结构抑制变形, 实现高精度、高表面质量的零件制造。

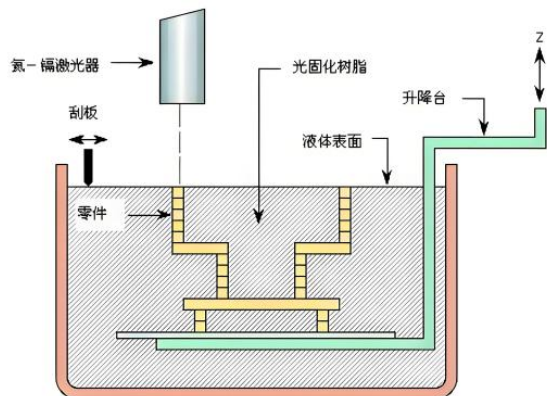


图 2 立体光固化 (SLA) 原理示意图

选择性激光烧结 (SLS)^[12] 采用 CO_2 激光选择性烧结聚合物粉末, 使用激光束选择性地烧结粉末材料, 激光能量使粉末表层熔融粘结, 形成三维实体, 如图 3 所示。未烧结粉末作为支撑, 成型腔需预热至材料玻璃化转变温度附近以减少热应力。可处理多种粉末材料, 如塑料、金属等, 能够制造具有复杂内部结构的零件, 但在烧结过程中可能出现粉末粘结不均匀等问题, 影响零件质量。

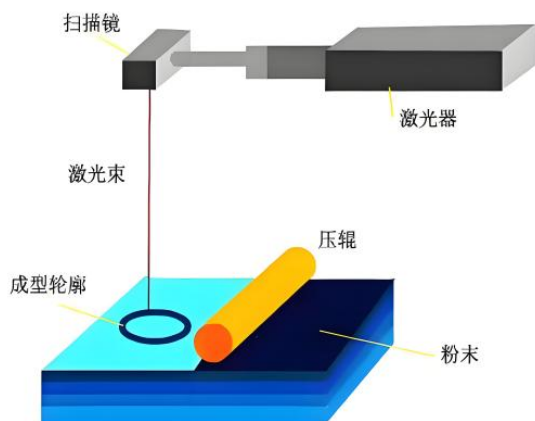


图 3 选择性激光烧结 (SLS) 原理示意图

直接金属沉积 (DMD)^[13] 采用高功率激光在基板上形成熔池, 同轴送粉喷嘴将金属粉末送入熔池, 熔融金属快速凝固形成沉积层, 如图 4 所示。在打印过程中需要严格控制参数, 工艺需平衡激光功率、送粉速率与扫描速度以抑制裂纹与孔隙。

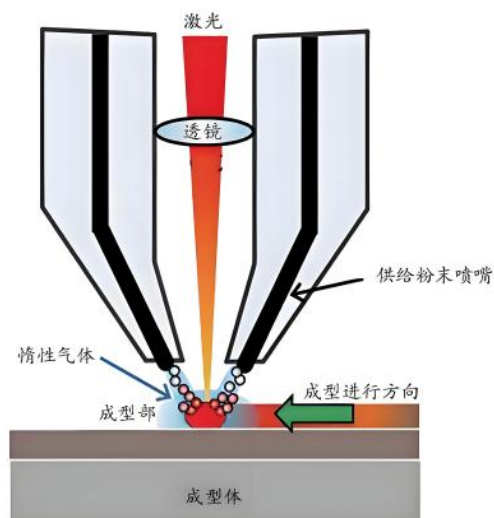


图 4 直接金属沉积 (DMD) 原理示意图

2 机械零件 3D 打印零件设计研究

在机械零件的设计中, 3D 打印技术主要涉及到三维模型的建立和仿真, 材料的选取和匹配, 以及打印参数的设定^[14]。利用 3D 打印技术可有效提升机械零部件的设计效率与精度, 实现产品的智能化、自动化与柔性化^[15]。

三维建模与仿真技术是 3D 打印机械零件设计的核心, 贯穿从概念设计到性能验证的全流程。通过计算机辅助设计软件构建零件的参数化模型后, 需结合拓扑优化算法 (如变密度法、水平集法) 与多物理场仿真工具 (ANSYS、COMSOL) 进行迭代优化。胡敏蕙^[16] 采用 SolidWorks 对螺栓连接件进行三维建模, 如图 5 所示。通过分层处理后使用 Artist 3D 打印机完成逐层打印, 验证了复杂螺纹结构的快速成型可行性, 模型精度误差控制在 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 以内。韩佳彤等^[17] 针对小型无人机结构优化问题, 采用 SolidWorks 构建三维参数化模型, 结合 Flow Simulation 模块进行气动特性分析, 通过 ANSYS Workbench 开展静力学仿真验证, 验证了数字化建模对气动优化的有效性。



图 5 螺栓 SolidWorks STL 导出及 3D 打印

基于已知的设计空间和工况条件以及设计约束,考虑工艺约束,如增材制造的悬垂角,确定刚度最大、质量最小的设计方案。通过拓扑优化,可以去除零件中不必要的材料,实现轻量化设计,同时保证零件的结构强度和刚度。黄林琪等^[18]利用 Altair Inspire 对山地自行车连接件进行拓扑优化,通过重构几何空间和调整工艺参数,如图 6 所示。最终实现减重 38.46%,动态载荷下的最大应力降低 22%。刘旭红和欧笛声^[19]基于 SIMP 变密度法优化注塑机固定模板,在保证刚度前提下减少质量 9.5%,并通过有限元验证了变形量下降 3.5%。在飞轮结构优化中,王冲^[20]采用双向渐进结构优化法,将初始质量 3.2 kg 的钢制飞轮优化至 1.8kg,转动惯量保持率 92%,最大应力下降 37%。通过变密度法建立刚度-质量多目标模型,结合 MATLAB 与 UG 实现几何重构,最终成型件经疲劳测试满足 106 次循环载荷要求。吴志学^[21]提出的相对应力优化法应用于连杆设计,使应力集中系数从 2.7 降至 1.8,质量减轻 19%,优化效率较传统方法提高 60%。



图 6 拓扑优化及轻量化设计输出模型子模型

对于复杂功能零件的多材料集成设计,多物理场耦合仿真技术至关重要。多材料 3D 打印技术的发展有利于多功能一体化打印机器人,实现智能材料混合打印和梯度硬度材料打印,从而减少后期处理,增加机器人连接精度和可靠性。胡宝文等^[22]针对航空涡轮叶片电解加工过程,建立电场-流场-温度场耦合模型,通过 COMSOL 模拟得出加工间隙内电解液流速分布规律,优化后叶片型面误差从 0.15 mm 降至 0.05 mm。李国倡等^[23]开发

电缆附件硅橡胶多场耦合模型,揭示温度梯度导致界面电场畸变规律:当温差达 50℃时,局部场强增幅达 43%。通过 COMSOL 建立电-热-力耦合模型,预测寿命误差小于 15%,指导配方调整使击穿场强提升 28%。

3 零件 3D 打印的材质特性及工艺优化

3D 打印机械零件的选材与性能优化直接关系到零件的精度与精度。3D 打印机械零部件的材质可分为三大类:金属、非金属、复合材料^[24]。

3.1 成型材料特性

材料选择与匹配技术是 3D 打印机械零件设计的核心环节,材料性能的适配性直接影响零件功能实现与工艺可行性。其主要包括材料的选择和参数的设定,需综合考虑材料力学性能、工艺兼容性与功能需求。

在材料选择上,根据材料特性和成型方式,选择适合 3D 打印的材料。不同的成型方法对材料的要求各不相同,如熔融沉积成形(FDM)技术中常用的材料有 ABS, PLA 等。对于金属打印,尽可能地选择与打印部件性能接近的原料,比如:铝合金,由于它的强度高,刚度大,容易成形,所以可以选用比强度高的材料。在 3D 打印过程中,由于金属材料具有一定的强度、刚度和弹性,所以可以提高成形精度。周松^[25]研究 SLM 成型 AISI 10Mg 轻量化结构,发现激光功率 250W、层厚 30 μm 时,抗拉强度达 420MPa,较铸造件提升 58%。通过拓扑优化设计的卫星支架质量减轻 37%,振动测试中一阶固有频率提高 22%。Gonzalez- Nurhudan 等^[26]开发铜粉填充聚合物线材,经脱脂烧结后电导率达 90% IACS,热导率 380W/m·K,成功应用于高频连接器制造。

在聚合物复合材料方向,复合材料需强化界面结合与功能梯度设计,具有低密度,高强度,高弹性模量,抗腐蚀性和抗疲劳性能。张振华^[27]采用石墨烯改性 AZ31 镁基复合材料,界面结合强度提升 63%,通过分子动力学模拟发现 G0/MgO 界面抑制裂纹扩展,使复合材料弯曲强度达 586 MPa。姚庆强团队^[28]研发的多孔钛假体,孔隙率 65%时压缩模量匹配松质骨,细胞增殖率较实体结构提高 82%。

对于非金属材料,利用密度小的特点,可直接进行 3D 打印;若密度较大,应适当加入填料,或加入塑料、树脂等。非金属材料需平衡密度与成型速度,在 ASA 材料打印中,层厚 0.15 mm、填充密度 80%时拉伸强度达 5

1.8 MPa, 弯曲模量 2.1 GPa。Hameed 等^[29]分析显示层厚对强度贡献率 42%, 栅格角度 45° 时各向异性指数降低至 1.3。袁发庭等^[30]优化干式电抗器工艺, 绕组用量减少 17%同时温升控制在 65 K 以内, 通过 Kriging 模型确定最优层间间隙为 1.2 mm。

在多材料集成设备方面,Zhao 等^[31]开发了基于多喷头协同控制的 DIW 系统, 通过集成碳纳米管导电墨水与 PDMS 弹性体墨水, 实现了柔性电子皮肤的多层异质结构打印。Zeng 等^[32]提出了一种气动驱动多材料 3D 打印装置, 结合 PCL 热塑性弹性体与 PLA 刚性材料, 成功制备了仿生梯度力学性能的骨科植入物。

3.2 工艺参数的优化

工艺参数优化是平衡质量、效率与成本的核心。对工艺参数进行优化即选择最佳工艺。3D 打印必须尽量保证零件的精度, 优化打印精度, 否则将对产品质量产生不利影响。同时需要综合考虑零件的精度、生产率以及生产成本等因素, 对印刷速度进行优化, 选择适当的工艺参数。不同的材质在印刷过程中会产生不同的影响, 要根据产品的特点选用适当的材质。中国工程物理研究院全旭松^[33]针对 KDP 晶体装配开发多点支撑优化方案, 如图 7 所示, 通过调整 12 个支撑点位置使面形畸变 PV 值从 $\lambda/2$ 降至 $\lambda/10$ 。采用有限元模拟确定最优支撑间距为 38mm, 使激光透过率提升至 99.6%。此外, 不同类型的 3D 打印工艺, 其成型周期也是不同的, 所以要根据产品的生产要求、零件的尺寸、精度和材料性能等因素, 选择合适的成型周期和工艺参数。

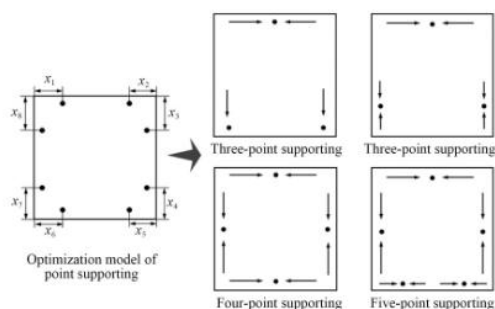


图 7 多点支撑装配附加面形畸变抑制工艺优化方案

打印参数设置技术直接影响零件的成型质量与性能。在机械零件设计中, 通过优化 3D 打印工艺参数, 实现零件的性能优化与优化。一般设定 3D 打印工艺参数主要有: 设定喷头位置, 设定层厚, 设定温度等。毛剑^[34]研究铝合金-丁腈橡胶界面成型工艺, 如图 8 所示,

确定硫化温度 160℃、压力 15MPa 时界面结合强度达 4.2MPa。通过正交试验优化保压时间至 30 min, 使密封件疲劳寿命延长至 2×10^6 次循环。

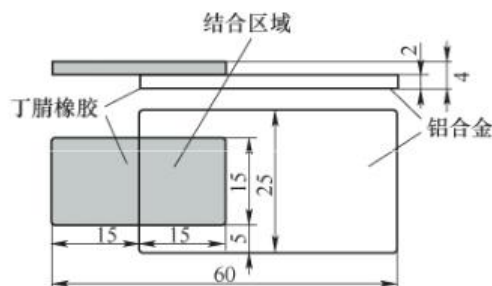
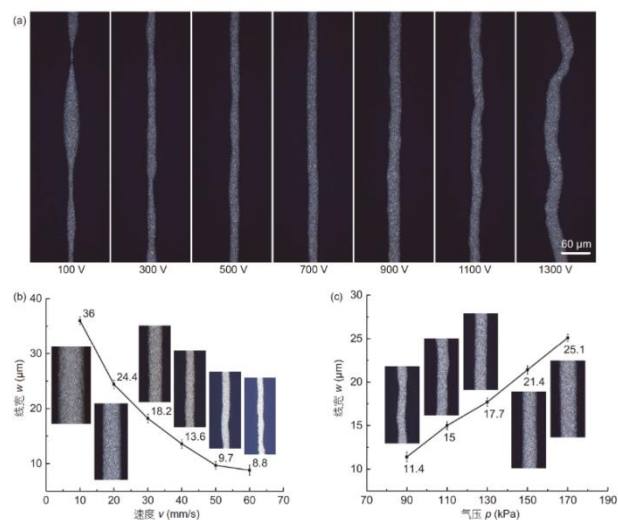


图 8 试验试样结构

多材料打印的参数协同优化是近年研究热点。在多材料 3D 打印中, 每种材料都有不同的熔点、收缩率、层间粘合度等。如果打印参数不对, 就可能导致层错位、粘结不牢、甚至材料开裂。Ghosh 等^[35]开发了多喷头协同打印参数匹配系统, 在碳纤维/PEEK 复合材料成型中, 通过精确控制喷头温差 ($\pm 3^\circ\text{C}$) 和层间间隔 (0.2 s), 使层间剪切强度提升至 65 MPa, 弯曲模量达 120 GPa, 高温蠕变寿命延长 2.8 倍。刘明杨等^[36]优化电场驱动喷射 3D 打印参数, 如图 9 所示, 发现当电压从 100 V 增至 1300 V 时, 金属网格线宽由 35 μm 减至 8 μm 。通过建立速度-气压协同模型, 实现透光率 92%、方阻 0.8 Ω/sq 的透明导电膜。



(a) 电压与金属网格形貌的关系; (b) 速度与金属网格线宽的关系; (c) 气压与金属网格线宽的关系。

图 9 打印工艺参数对金属网格的影响

人工智能调整工艺可以实时监控打印过程, 识别问题, 根据传感器反馈自动调整温度、打印速度和挤出量, 让每一层的结合更稳定。比如不同材料的融合温度不同,

人工智能可以动态调整打印顺序和温度，确保材料之间的结合更牢固；支撑结构不稳、层间粘结不牢，然后自动调整打印参数，防止成品报废。清华大学团队^[37]采用 U-Net 深度学习模型优化 FDM 工艺参数，如图 10 所示，在 PLA 材料打印中，通过分析 300 组正交试验数据，确定喷嘴温度 215℃、层厚 0.15 mm、填充率 90%为最优组合，拉伸强度达 58 MPa，各向异性指数降至 1.05。优化后的参数用于农机齿轮制造，经 10 万次载荷测试磨损量仅 0.12 mm。华北电力大学顾雪平团队^[38]将细菌群体趋化算法应用于 FDM 工艺优化，如图 10 所示，建立喷嘴温度-填充率-打印速度的三维响应模型。通过局部学习机确定最优参数组合（215℃/85%/60mm/s），使 PLA 件拉伸强度提升至 58MPa。

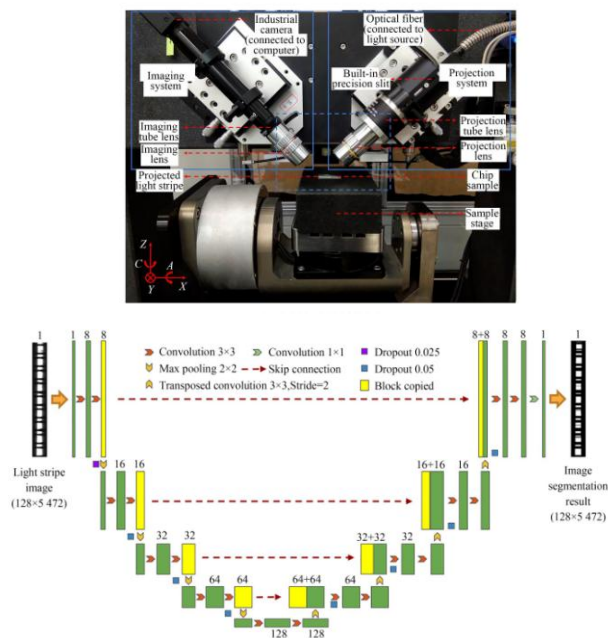


图 10 测量系统的组成及优化后 U-Net 模型结构参数

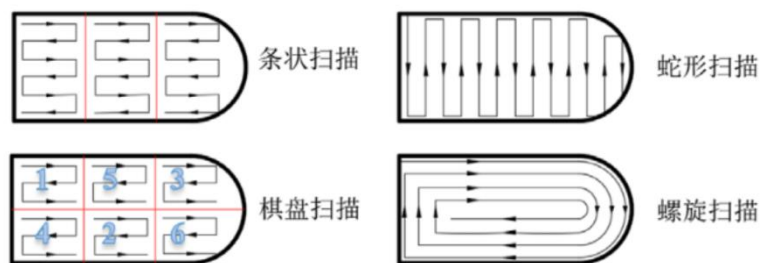


图 11 扫描方式示意图

材料本征特性对表面精度的作用机制同样不可忽视。高粘度光敏树脂在面投影光固化（DLP）过程中易因氧阻聚效应产生边缘翘曲，Yuan 等^[43]等采用热辅助 DLP 技术打印高粘度环氧树脂，在 60℃预热条件下实现

4 3D 打印零件的质量控制技术

4.1 表面精度控制技术

3D 打印机械零件的表面精度控制是制约其工程化应用的关键技术瓶颈，其影响因素涵盖材料热物理特性、成形工艺参数耦合作用及后处理工艺适配性等多维度挑战。其表面精度的劣化主要源于逐层堆积过程中的阶梯效应、熔池动态行为失稳及热致变形等机理，需通过工艺-材料-设备的系统性优化实现精度跃升。

在成形工艺层面，不同能量输入方式对表面形貌的调控机制差异显著。激光选区熔化（SLM）技术中，郭帅东^[39]通过优化激光重熔工艺参数显著提升 Incone1 718 合金表面精度。研究表明，采用 285 W 重熔功率和 960 mm/s 扫描速度时，表面粗糙度降至 1.679 μm ，同时孔隙率降低至 0.097%，有效抑制了熔池动态失稳和球化效应。魏建锋^[40]在镍基高温合金 SLM 成形中创新性提出复合扫描策略，如图 11 所示，针对复杂几何特征采用蛇形扫描与螺旋扫描的协同路径规划，使侧表面粗糙度降低至 Ra 6.2 μm ，较传统单路径策略提升精度达 32%。在熔融沉积成形（FDM）领域，Viveros^[41]开发了基于实时热成像的 FDM 闭环控制系统，通过红外反馈动态调节喷嘴温度 $\pm 5^\circ\text{C}$ ，使 PA12 制件表面粗糙度标准差降低至 1.2 μm ，达到 ISO 2768-m 级精度标准。吴伟等^[42]通过正交实验法系统分析了填充密度、层厚和打印速度对 PLA 制件表面质量的影响规律。当填充密度提升至 80%、层厚设置为 0.1 mm 且打印速度降至 40 mm/s 时，Z 轴方向表面波纹度降低至 0.12 mm，XY 平面粗糙度 Ra 值优化至 5.8 μm 。

粘度从 850 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 降至 320 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ，成形件表面粗糙度 Ra 值由 3.2 μm 优化至 1.5 μm ，热变形温度提升至 125℃。曹阳等^[44]研制的混杂型树脂通过引入 1% 纳米 ZnO 颗粒，将体积收缩率控制在 2.1%，配合 244 $\text{mPa} \cdot \text{s}$

的粘度特性, 成功实现 $50\ \mu\text{m}$ 级精细结构的稳定成形, 表面粗糙度 R_a 值达 $0.8\ \mu\text{m}$ 。

后处理工艺的创新为表面精度提升提供了二次修正路径。Seo 等^[45]开发了等离子体辅助抛光技术, 对 SLM 成形的 316L 不锈钢零件处理后, 表面粗糙度 R_a 值从 $8.7\ \mu\text{m}$ 降至 $0.2\ \mu\text{m}$, 同时将残余压应力层深度增加至 $50\ \mu\text{m}$ 。李彬等^[46]将数控加工与 FDM 工艺结合, 如图 12 所示, 使 PLA 制件表面粗糙度从 $24.4\ \mu\text{m}$ 降至 $1.8\ \mu\text{m}$, 尺寸误差控制在 $\pm 0.01\ \text{mm}$ 。

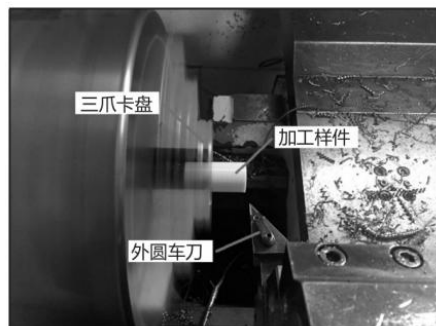


图 12 加工过程图

4.2 尺寸质量控制技术

尺寸精度控制是 3D 打印零件功能实现的核心保障。三维打印零件的外形质量主要体现在两个方面。机械零件加工完毕后, 可将其装入专用模具内进行检测与修复。相对于传统的机械零件制造工艺, 3D 打印技术具有快速、低成本和高效率的特点。但在实际应用中, 必须严格控制成形工艺及加工工艺, 才能确保零件的外形质量达到设计要求。

金属增材制造的尺寸偏差主要源于熔池凝固收缩与热应力释放的协同作用。Mukhtarkhanov 等^[47]通过多尺度热-力耦合模型揭示了 316L 不锈钢 SLM 成形过程中残余应力分布规律, 发现激光功率从 $200\ \text{W}$ 增至 $280\ \text{W}$ 时, Z 向收缩率从 0.8% 升至 1.5% , 通过优化层间旋转角度至 67° , 成功将圆筒构件圆度误差控制在 $\pm 0.05\ \text{mm}$ 以内。Halidar^[48]开发了双波长在线监测系统, 通过熔池辐射光谱分析实时修正激光偏移量, 使 Inconel 718 涡轮叶片的喉道面积误差从 $\pm 3.2\%$ 优化至 $\pm 0.8\%$ 。聚合物打印领域, Dey 等^[49]发现 PA12 在 FDM 过程中结晶度从 23% 提升至 35% 时, 收缩率从 1.8% 增至 2.7% , 通过引入 0.5% 纳米蒙脱土成核剂, 使 X/Y 向尺寸偏差稳定在 $\pm 0.05\ \text{mm}$ 以内。

针对异质材料界面难题, Martins 等^[50]采用梯度能量密度策略打印 316L-CuCrZr 复合材料, 界面过渡区厚

度从 $200\ \mu\text{m}$ 优化至 $50\ \mu\text{m}$, 热循环载荷下界面剥离强度保持 $72\ \text{MPa}$ 。

5 技术发展趋势与挑战

3D 打印技术为机械零件制造带来革新潜力, 但仍面临多重挑战:

5.1 工艺创新与多材料集成

FDM、SLA、SLS、DMD 等工艺并行发展, SLS 支持金属/非金属复合粉末加工, DMD 实现高致密度金属构件快速成型。界面结合强度不足、热膨胀失配 (如金属-非金属层间应力集中), 需优化材料配比与粉末预处理工艺。

5.2 智能设计与仿真深化

变密度法、BESO 算法提升零件性能, 多物理场仿真预测精度达 85% (如电场畸变)。熔池动态行为与微观组织演化预测不足, 跨尺度建模 (原子-宏观) 需突破算法与算力限制。

5.3 质量与后处理瓶颈

SLM 优化使铝合金抗拉强度提升 30% ; DMD 闭环反馈抑制裂纹孔隙, 但依赖实验数据积累。金属件热处理需平衡氧化控制, 复合材料后固化易致界面分层, 精细特征易受抛光破坏。

未来方向: 跨学科协同攻克界面结合、残余应力预测等难题, 开发低碳材料与标准化工艺, 加速工业化应用。

6 总结与展望

本文系统分析了 3D 打印技术在机械零件设计中的应用, 对比了 FDM、SLA、SLS、DMD 等工艺的技术特征, 总结了零件设计、材料工艺与质量控制的研究进展及现存问题 (如界面结合强度不足、仿真精度不足等), 并提出智能化、绿色化与标准化的发展方向。未来需聚焦跨尺度建模 (原子-宏观) 以优化残余应力预测, 开发低碳材料与节能工艺, 同时突破多学科壁垒并建立行业标准, 推动 3D 打印技术从实验室向工业化应用转化, 支撑高端装备定制化制造。

参考文献

- [1] 刘哲. 基于 3D 打印技术的机械零件创新自由设计[J]. 内燃机与配件, 2018, (08): 22-23.

- [2]Gu G Y, Zou J, Zhao R K, et al. Softwall-climbing robots[J]. Soft Robots, 2018, 28874: 1-12.
- [3]张德龙. 基于 3D 打印技术下机械零件创新自由设计的思考[J]. 现代制造技术与装备, 2018, (06): 80-82.
- [4]叶冬森, 沈培良, 张大川, 等. 3D 打印技术与传统加工技术对比的优缺点[J]. 民用飞机设计与研究, 2021, (04): 126-130.
- [5]Zhou L Y, Gao Q, Zhan J F, et al. Three-dimensional printed wearable sensors with liquid metals for detecting the pose of snakelike soft robots[J]ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(27): 23208-23217.
- [6]Zhao T T, Yu R, Li X P, et al. A comparative study on 3D printed silicone-epoxy/acrylate hybrid polymers via pure photopolymerization and dual-curing mechanisms[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(6): 5101-5111.
- [7]肖文哲. 基于 3D 打印技术的机械零件设计研究[J]. 山东工业技术, 2019, (09): 39-40.
- [8]Kuang X, Roach D J, Wu J T, et al. Advances in 4D printing: Materials and applications[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 2(29): 1805290-1805291.
- [9]白洁. 3D 打印技术在机械加工中的应用分析[J]. 造纸装备及材料, 2021, 50(12): 68-70.
- [10]施建平, 杨继全, 王兴松. 多材料零件 3D 打印技术现状及趋势[J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46(02): 1-17.
- [11]李传涛. 3D 打印技术在航空铝合金薄壁零件上的应用[J]. 机电信息, 2019, (15): 80-81.
- [12]Zhou L Y, Gao Q, Fu J Z, et al. Multimaterial 3D printing of highly stretchable silicone elastomers[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(26): 23573-23583.
- [13]Nadgorny M, Xiao Z Y, Chen C, et al. Three-dimensional printing of pH-responsive and functional polymers on an affordable desktop printer[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(42): 28946-28954.
- [14]Odent I, Wallin T J, Pan W, et al. Highly elastic, transparent, and conductive 3D-printed ionic composite hydrogels[J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(33): 1701807.
- [15]邢恒远, 孟宪庄, 陈娜. 3D 打印技术在机械制造领域中的应用[J]. 机电工程技术, 2021, 50(04): 209-210.
- [16]胡敏蕙. 3D 打印技术与 SolidWorks 软件在机械零件三维建模中的应用研究[J]. 机械设计与制造, 2017(9): 45-48.
- [17]韩佳彤, 李召波, 张宏娜, 等. 基于 Solidworks 三维建模的无人机结构设计及气动仿真[J]. 机械工程学报, 2023, 59(3): 112-120.
- [18]黄林琪, 陈显扬, 陈韵律, 等. 基于 3D 打印的机械零件轻量化设计与制造[J]. 机电工程技术, 2021, 50(8): 96-100.
- [19]刘旭红, 欧笛声. 基于 SIMP 优化理论的注塑机固定模板拓扑优化[J]. 中国塑料, 2008, 22(2): 90-92.
- [20]王冲. 渐进结构优化方法及其在回转体拓扑优化中的应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2012.
- [21]吴志学. 机械零件形状优化设计的仿生学方法[J]. 机械强度, 2005, 27(3): 334-338.
- [22]胡宝文, 穆瑞元, 黄亮, 等. 航空叶片电加工多物理场耦合仿真及实验研究[J]. 制造技术与机床, 2021, (9): 43-48.
- [23]李国倡, 郭孔英, 张家豪, 等. 电缆附件用硅橡胶力-热老化特性及电-热-力多物理场耦合仿真研究[J]. 物理学报, 2024, 73(07): 23-34.
- [24]Chen T T, Bakhshi H, Liu L, et al. Combining 3D printing with electrospinning for rapid response and enhanced designability of hydrogel actuators [J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(19): 1800514.
- [25]周松. 基于 SLM 的金属 3D 打印轻量化技术及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [26]Nurhudan A I, Supriadi S, Whulanza Y, et al. Additive manufacturing of metallic based on extrusion process: A review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 66: 228-237.
- [27]张振华, 韩佳凝. GO/MgO 界面强化镁基复合材料研究[J]. 复合材料学报, 2023, 40(4): 2231-2240.
- [28]姚庆强, 吴成铁, 王黎明, 等. 3D 打印骨关节修复重建技术体系[J]. 中华骨科杂志, 2017, 37(12): 785-792.
- [29]Hameed A Z, Aravind Raj S, Kandasamy J, et al. 3D printing parameter optimization using

taguchi approach to examine acrylonitrile styrene acrylate (ASA) mechanical properties[J]. *Polymers*, 2022, 14(16): 3256.

[30] 袁发庭, 吕凯, 唐波, 等. 干式电抗器多物理场协同优化[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(22): 7897-7905.

[31] Zhao R, Smith J. Multi-nozzle DIW for flexible electronic skin[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2022, 7(8): 2100894.

[32] Zeng F, Liu B, Pan Y, et al. Sub-nanometric amorphous V-O clusters without grain boundaries bonded in yolk-shell carbon nanospheres for superior sodium-ion storage[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 252: 110532.

[33] 全旭松, 独伟锋, 褚东亚, 等. 大口径 KDP 晶体装配附加面形畸变抑制工艺优化[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(09): 1347-1356.

[34] 毛剑, 林微超, 宫宁宁, 等. 铝合金-丁腈橡胶复合密封件的界面结合性能[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(10): 95-101.

[35] Ghosh A, Orasugh J T, Ray S S, et al. Integration of 3D printing-coelectrospinning: Concept shifting in biomedical applications[J]. *ACS omega*, 2023, 8(31): 28002-28025.

[36] 刘明杨, 齐习猛, 朱晓阳, 等. 基于电场驱动喷射微 3D 打印和辊轮辅助热压印制造嵌入式金属网格柔性透明导电薄膜[J]. *科学通报*, 2020, 65(12): 1151-1164.

[37] 刘振宇, 李志强, 黄文, 等. 基于机器学习的 FDM 工艺参数多目标优化[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(11): 67-71.

[38] 顾雪平, 李扬, 吴献吉. 基于局部学习机和细菌群体趋药性算法的电力系统暂态稳定评估[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(10): 271-279.

[39] 郭帅东. 激光选区熔化成形 Inconel718 表面精度控制与组织性能优化[D]. 上海: 上海第二工业大学, 2022.

[40] 魏建锋. 镍基高温合金 SLM 成形质量研究及工艺优化[D]. 无锡: 江南大学, 2020.

[41] Viveros M F C, Arciniegas A J R. Development of a closed-loop control system for the movements of the extruder and platform of a FDM 3D printing system[C]//NIP & Digital Fabricatio

n Conference. Society for Imaging Science and Technology, 2018, 34: 176-181.

[42] 吴伟, 张云霄, 邓继旺, 等. 熔融沉积(FDM)工艺参数对制件表面精度及力学性能影响的实验研究[J]. *北华航天工业学院学报*, 2019, 29(01): 11-13.

[43] Yuan X, Mai Z, Li Z, et al. A 3D-printing approach toward flexible piezoelectronics with function diversity[J]. *Materials Today*, 2023, 69: 160-192.

[44] 曹阳, 张晨, 陈笑, 等. 应用于紫外 DLP-3D 打印系统的低体积收缩率和高固化速度的光敏树脂研究[J]. *功能材料*, 2019, 50(07): 7024-7028, 7034.

[45] Seo B, Park H K, Kim H G, et al. Corrosion behavior of additive manufactured CoCr parts polished with plasma electrolytic polishing[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 406: 126640.

[46] 李彬, 张捷, 康徐红, 等. 数控加工参数对 FDM 成型精度影响研究[J]. *机械设计与制造*, 2018, (12): 199-201.

[47] Mukhtarkhanov M, Perveen A, Talamona D. Application of stereolithography based 3D printing technology in investment casting[J]. *Micromachines*, 2020, 11(10): 946.

[48] Halder B. Enhancing Dimensional Accuracy in Budget-Friendly 3D Printing through Solid Model Geometry Tuning and Its Use in Rapid Casting[J]. *Machines*, 2023, 11(11): 1020.

[49] Dey A, Yodo N. A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics[J]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019, 3(3): 64.

[50] Martins G, Vicente C M S, Leite M. Polymer-metal adhesion of single-lap joints using fused filament fabrication process: Aluminium with carbon fiber reinforced polyamide[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(7): 4429.

作者简介: 樊硕(2004.5—), 男, 汉族, 安徽滁州人, 山东建筑大学, 本科在读, 研究方向暂无