

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.10.017

数字光处理光固化成型智能监控系统设计及工艺优化

陈钰杭, 申金福, 余敏, 韩小瑜

(浙江科技大学生物与化学工程学院, 杭州 310023)

摘要: 数字光处理(DLP)技术凭借其卓越的成型精度、出色的表面质量以及高效的打印速度,已成为光敏树脂增材制造小批量高精度部件的主流技术之一。然而,在DLP光固化成型过程中,树脂温度波动及已固化树脂层与离型膜之间的离型力异常易引发打印模型翘曲、开裂或脱落等缺陷,显著影响成型质量与制件效率,制约了该技术的产业化应用。构建了以STM32F407微控制器为核心的多参数协同监控系统,集成拉压力传感器(量程0~50 N)、热电偶(精度 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)及蠕动泵液位探测器,搭建温度与液位闭环控制体系,结合实时操作系统(FreeRTOS)多任务调度与上位机可视化界面,实现了离型力与树脂温度的实时监测、异常自动断电及报警功能。系统通过Qt平台(一种跨平台应用程序开发框架)开发的上位机界面实现100 Hz数据刷新率的可视化监控。实验结果表明,离型力在40层后稳定在5 N;30~35 $^{\circ}\text{C}$ 时树脂黏度与离型力达到最佳平衡,可保持较好的树脂流动性和成型件的结构完整性;10 mm/s离型速度可兼顾成型效率与稳定性;离型力在曝光时间为16 s时达到峰值6.3 N,且随掩膜灰度降低而下降,同时与曝光面积呈正相关;建立了曝光面积与离型力的线性预测模型,预测误差未高于8%;系统运行时温控精度达 $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,液位上下波动不超过0.2 mm,异常响应时间不超过100 ms,能有效减少模型脱落与变形。开发的智能监控系统为DLP工艺提供了集实时监测、预测预警与闭环控制于一体的智能化解决方案,显著提升了成型过程稳定性与产品质量控制水平,具有广阔的工程应用前景。

关键词: 数字光处理技术;光固化成型;多参数协同监控;离型力;工艺优化

中图分类号: TP368.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)10-0133-08

Design of digital light processing photocuring intelligent monitoring system and process optimization

CHEN Yuhang, SHEN Jinfu, YU Min, HAN Xiaoyu

(School of Biological and Chemical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract : Digital light processing (DLP) technology has become one of the widely used processes in photosensitive resin-based additive manufacturing of small-batch high-precision parts due to its excellent forming accuracy, surface quality, and efficient printing speed. However, during the DLP photocuring molding process, the resin temperature fluctuation and the abnormal release force between the cured resin layer and the release film are likely to cause defects such as warpage, cracking or shedding of the printing model, significantly affecting the molding quality and product efficiency, and restricting the industrial application of the technology. A multi-parameter collaborative monitoring system with STM32F407 microcontroller as the core was constructed. The tension and compression load cell with a range of 0 to 50 N, thermocouple with an accuracy of $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and peristaltic pump liquid level detector were integrated to build a closed-loop control system of temperature and liquid level. Combined with free real-time operating system (FreeRTOS) multi-task scheduling and host computer visualization interface, the real-time monitoring, abnormal automatic power off and alarm functions of release force and resin temperature were realized. The system realizes the visual monitoring of 100 Hz data refresh rate through the host computer interface developed by Qt platform (a cross-platform application development framework). The experimental results show that the release force is stable at 5 N after 40 layers. The balance between the resin viscosity and release force reaches the best at 30–35 $^{\circ}\text{C}$, which can maintain good resin fluidity and structural integrity of molded parts. The release speed with 10 mm/s can take into account the molding efficiency and stability. The release force reaches the peak

基金项目: 浙江省基础公益计划项目(LGL22B020001)

通信作者: 韩小瑜, 博士, 硕士生导师, 研究方向为光固化功能材料开发及应用

收稿日期: 2025-07-29

引用格式: 陈钰杭, 申金福, 余敏, 等. 数字光处理光固化成型智能监控系统设计及工艺优化[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(10): 133–140.

CHEN Yuhang, SHEN Jinfu, YU Min, et al. Design of digital light processing photocuring intelligent monitoring system and process optimization[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(10): 133–140.

value of 6.3 N when the exposure time is 16 s, and decreases with the decrease of mask gray scale, while being positively correlated with the exposure area. A linear prediction model of exposure area and release force is established, and the prediction error is not more than 8%. When the system is running, the temperature control accuracy is $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, the liquid level fluctuated up and down within 0.2 mm, and the abnormal response time is not greater than 100 ms, which can effectively reduce the model shedding and deformation. The developed intelligent monitoring system provides an intelligent solution for the DLP process, which integrates real-time monitoring, prediction and early warning, and closed-loop control. It significantly improves the stability of the molding process and the level of product quality control, and has broad engineering application prospects.

Keywords : digital light processing technology ; light curing molding ; multi-parameter collaborative monitoring ; release force ; process optimization

数字光处理(DLP)凭借其卓越的成型精度与表面质量,已成为以光敏树脂为核心材料的高精度原型制作与小批量部件制造的主流增材制造技术之一^[1-2]。DLP的核心材料为光敏树脂,其组分及对应的功能通常包含:丙烯酸酯类低聚物形成力学骨架、活性稀释剂调节黏度与流动性,以及在385~405 nm波段响应的光引发剂触发聚合反应。在DLP工艺中,已固化层与离型膜之间的离型力以及随之产生的挤压力直接影响打印件的尺寸精度与表面完整性^[3];若控制不当,易引发打印件翘曲、开裂或脱落^[4]。研究表明,离型力受树脂-薄膜界面润湿性、材料力学性能、平台抬升速度、树脂温度与黏度等多因素影响^[5],因此需要通过多物理量协同监测以实现精准控制。

面对DLP光固化成型中离型过程的高度非线性与多因素耦合特性,学者围绕其在线监测与控制展开探索。Jiang等^[6]在打印机底部集成力传感器,连续测量每层树脂离型时的最大黏附力,并与理论曲线实时对比,当偏差超过阈值时自动中断打印,有效避免离型失效导致的缺陷。Yang等^[7]在改装的DLP打印系统中,集成实时力传感,记录聚二甲基硅氧烷(PDMS)膜与打印件界面的离型力曲线,发现这种方法可精准识别高离型力阶段并降低缺陷风险。Manizani等^[8]聚焦DLP工艺中的离型阶段,通过对比不同膜材料和固化区域截面形状,探讨了平台抬升速度与图像几何特征对离型力的复合作用,强调了过程参数对离型行为精准控制的重要性。Song等^[9]设计了滚筒式可变张紧系统,利用伺服电机实时调节膜张力,优化离型过程。该系统不仅显著降低了离型力峰值,还使离型时间在不同材料与工艺参数下平均缩短约25%,同时保持打印精度稳定,并减少因离型力异常引发的翘曲、层线缺陷等质量问题。Zhang等^[10]提出了一种原位超声波监测方法,通过分析DLP打印过程中固化层与氟化乙烯

丙烯共聚物(FEP)薄膜界面反射信号的动态变化,精准捕捉黏附状态的微观演变过程。研究表明,该方法可有效识别因界面黏附异常引发的离型失效,为理解成型过程中与离型力变化密切相关的界面行为提供了全新的非接触式监测路径,显著提升了过程稳定性与异常预警能力。与此同时,人工智能增强增材制造框架已将深度卷积神经网络与多源监测数据结合,用于在线故障预测与实时反馈控制^[11-12],大幅提升打印质量的稳定性与一致性。尽管上述研究在多种增材制造工艺中取得了显著成果,但针对DLP工艺中离型力、树脂温度与液位高度三者协同在线监测系统尚未见深入报道。

鉴于此,笔者设计基于S型梁式应变片力学传感器、K型热电偶与蠕动泵液位探测器的三传感器协同监控系统,运行于STM32F407+FreeRTOS平台^[13],通过多任务并发实时采集离型力、树脂温度与液位数据,研究关键工艺参数包括打印层数、离型速度、曝光时长、曝光面积及掩膜灰度等对离型力的影响机理,构建曝光面积与最大离型力的线性预测模型,旨在提升DLP成型过程的稳定性与成品合格率,为工程塑料领域的高精度增材制造提供了新的技术路径。

1 系统设计与研究方法

上拉式光固化成型质量监控系统以STM32微控制器为核心,融合硬件感知、软件调度与上位机交互功能,形成“数据采集-处理分析-控制执行-可视化监控”的闭环架构。系统总体架构如图1所示,主要包含监控系统、打印系统及上位机三大模块,各模块通过数据交互协同实现对打印过程的实时监控与优化。

1.1 控制系统总体设计

1.1.1 硬件结构

硬件系统作为物理层,承担信号采集与执行功能,由核心控制、传感、通信、控制执行及辅助模块

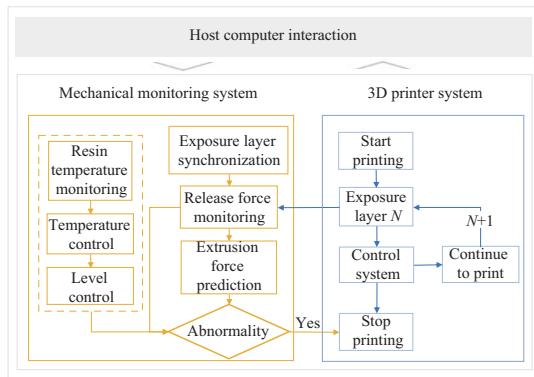


图1 系统功能流程图

Fig. 1 System function flow chart

构成。结构设计如图2所示,核心控制采用STM32F407ZG微控制器,基于ARM Cortex-M4内核,主频168 MHz,集成浮点运算单元(FPU)和数字信号处理器(DSP)指令,可高效处理多传感器数据与复杂算法;传感模块包括S型拉压力传感器搭配HX710A芯片采集拉压力信号,以及K型热电偶(精度 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)与MAX6675组成的测温单元传输温度数据;通信模块支持串行外设接口(Serial Peripheral Interface, SPI)、通用输入输出端口(General-Purpose Input/Output, GPIO)、通用同步异步收发传输器(Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter, USART)调试与基于ESP8266的Wi-Fi无线通信,实现多设备组网监控;控制执行模块中,TMC2208步进电机驱动的蠕动泵调节树脂温度与液位,液位控制无需额外传感器,异常处理模块则在触发异常时断电报警;辅助模块通过12 V开关电源搭配LM2596降压,提供稳定电压保障系统供电。

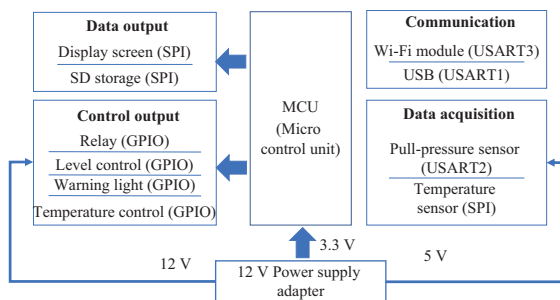


图2 硬件结构设计

Fig. 2 Hardware structure design

1.1.2 软件架构与通信

软件系统基于FreeRTOS实时操作系统设计,通过任务划分与通信机制实现多模块协同。如图3所示,系统分为数据采集、数据处理、异常处理及数据输出四大类任务:数据采集任务负责采集拉压力

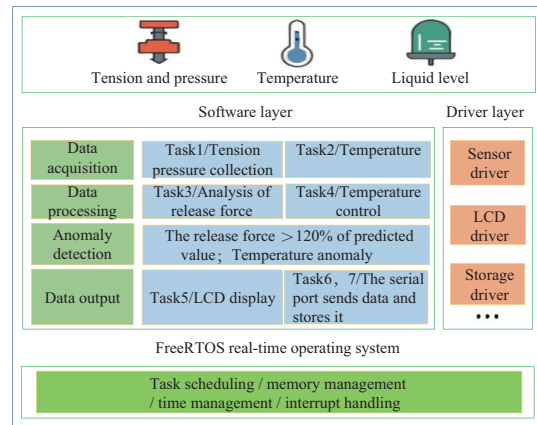


图3 软件系统结构图

Fig. 3 Software system structure diagram

和温度,并通过消息队列缓存原始数据;数据处理任务对采集数据进行解析运算,包括分析离型力特征和执行温度PID控制^[14-15];异常处理任务监测离型力是否超过预测值120%或温度是否异常,触发后立即启动断电与报警;数据输出任务则通过驱动LCD显示、串口发送数据和存储数据实现信息多渠道输出。任务间通过事件标志组与消息队列同步,例如温度采集需等待拉力数据入队后再执行入队操作,以确保数据时间戳对齐。上述软件架构与任务调度逻辑经自主开发与验证,并与商用打印设备原厂程序解耦运行,以增强系统的针对性;同时对判停阈值、采样/刷新周期及队列深度等关键参数提供可配置支持,使系统可随树脂与工艺窗口快速调参。

1.2 上位机可视化界面

图4为基于Qt平台(一种跨平台应用程序开发框架)^[16-17]开发的上位机可视化用户界面,该界面集成连接配置、数据可视化、参数控制及数据管理功能,实现光固化成型过程的直观监控。界面左侧为连接配置区,支持串口(可设串口号、波特率等)与

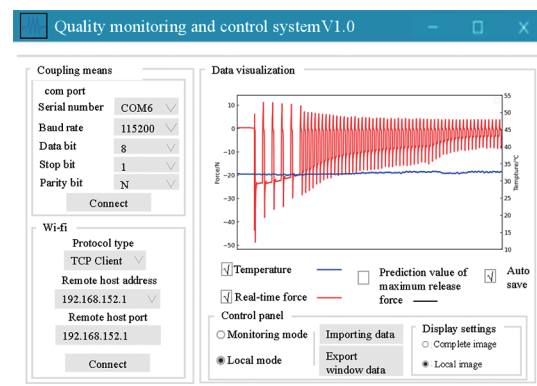


图4 上位机用户界面

Fig. 4 Host computer user interface

Wi-Fi (需输入主机地址及端口)两种通信模式,确保与下位机实时数据交互。

中央区域为核心数据可视化区,以动态曲线分别展示实时力(红色实线)、树脂温度(蓝色实线)及最大离型力预测值(黑色实线),横轴为时间轴,纵轴区分力值(N)与温度(°C),支持“完整图像”或“局部图像”切换,便于聚焦关键数据波动。右侧控制面板可切换监控模式,并提供数据导入/导出、自动保存等功能,通过颜色区分与实时刷新(100 Hz),助力操作人员快速识别异常,为成型工艺优化提供直观依据。

1.3 材料与方法

1.3.1 实验材料与设备

在对光固化成型技术的研究中,笔者使用的光敏树脂为自由基丙烯酸酯体系(eSUN eResin-PLA Pro),由中科三维科技有限公司生产。该光敏树脂为环保型聚乳酸(PLA)改性配方,具有高精度成型能力及优良表面质量,适用于DLP光固化打印。该树脂的撕裂强度、弯曲强度、冲击韧性及硬度均表

现优异,打印细节清晰、收缩率低、兼容性佳,适用于牙科模型、精密原型及高质量打印。本实验所用打印设备为ANYCUBIC Photon Ultra型DLP 3D打印机(深圳市纵维立方科技有限公司生产),采用DLP光固化面成型技术,搭载进口405 nm波长灯芯,可与上述eSUN eResin-PLA Pro光敏树脂完美适配,保障树脂固化精准稳定。设备核心精度参数优异:XY分辨率0.08 mm (像素1 280×720,720P),Z轴精度0.01 mm,支持0.01~0.15 mm的层厚度调节,能充分发挥树脂高精度成型优势,确保打印件尺寸精度、表面细节及层间结合质量符合测试要求。监测与控制模块(硬件/软件与算法)为笔者课题组自研,并与原厂程序相互独立。

1.3.2 实验方案与参数设置

笔者以50 mm×50 mm×20 mm方块试样为测试对象,在STM32F407平台上,采用S型拉压力传感器(量程0~50 N,采样频率100 Hz)和温度监测模块,按表1默认工艺参数进行基准实验并采集数据。

表1 实验默认工艺参数

Tab. 1 Default process parameters of experiment

Parameter	Set point	Parameter	Set point
Bottom layer number/layer	5	Lifting speed/(mm·s ⁻¹)	2
Bottom exposure time/s	40	Return speed/(mm·s ⁻¹)	3
Single-layer exposure time/s	3	Lamination thickness/mm	0.05
Wait time before exposure/s	7	Thermoregulation	Room temperature

默认打印参数下,根据图5基准测试实验所示,离型力分两阶段:前40层波动剧烈,1~5层的峰值超10 N,图5中A显示平台需克服固化层黏附力与真空吸附力。在DLP上拉式成型过程中,平台需克服的这两种力的合力即为离型力,离型力反映了固化层从离型膜分离所需的总外力大小,是评价成型过程稳定性的重要参数。

图5中B显示回程时承受固化树脂挤压力及平台均布压力;40层后稳定在约5 N,因膜-平台间距增大且树脂流动性提高干扰减弱。树脂温度随层数缓慢

上升,为温控提供依据。离型力异常判定与模型训练均以40层以后稳定数据为基准。

在完成基准模式下的离型力与温度监测后,从温度、离型速度、曝光时间、曝光面积和掩膜灰度5个方面深入研究关键参数,以完善监控系统的判停阈值与预测模型精度,具体实验方案与参数设置见表2。

表2 具体实验方案及参数设置

Tab. 2 Specific experimental scheme and parameter setting

Experimental category	Conceptual design
Temperature (T)/°C	15~40
Release velocity (v)/(mm·s ⁻¹)	2,4,6,8,10
Exposure time (t _e)/s	2,4,8,16,32,64,128
Exposure area (A)/cm ²	1,4,9,16,25,32
Mask gray scale (G) (0~255)	128,160,190,220,255
Stopping conditions	Peeling force > 120% of predicted value or temperature > 60 °C

2 结果与讨论

在进行参数实验前,对系统整体性能进行了稳定性验证,结果表明温控精度为±1.5 °C,液位上下

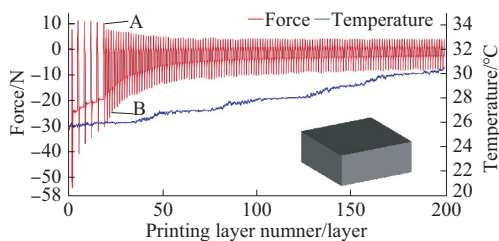


图5 打印过程中力、温度变化曲线

Fig. 5 Force and temperature change curves in printing process

波动小于0.2 mm,异常响应时间约100 ms,能够满足实时监测与闭环控制需求。

2.1 树脂温度与离型速度分析

2.1.1 温度的影响

在评估温度对离型过程的影响时,依托 ANYCUBIC Photon Ultra 型 DLP 3D 打印机的成型系统,在15~40 °C范围内设置5 °C梯度(15,20,25,30,35,40 °C)开展实验,实验参数采用离型速度10 mm/s、曝光时间16 s、曝光面积25 cm²。实验过程中同步测量树脂黏度、采集离型力数据,并观测50 mm×50 mm×20 mm方块打印件的结构完整性,其中温度对树脂黏度的影响结果如图6所示。

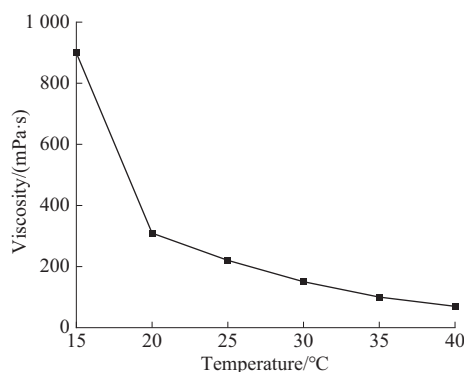


图6 温度对树脂黏度的影响

Fig. 6 Effect of temperature on viscosity of resin

温度由15 °C升至20 °C时,树脂黏度从900 mPa·s骤降至310 mPa·s,此区间内15 °C和20 °C下的离型力分别为8.6 N±0.4 N和6.2 N±0.3 N,且打印件均出现边缘翘曲现象(翘曲量>0.3 mm),20 °C条件下还伴随层间结合不紧密的缺陷;25~30 °C时,树脂黏度从220 mPa·s降至180 mPa·s,离型力稳定在5.5 N±0.2 N,但25 °C时树脂流平时间需8 s,对打印效率产生影响;30~35 °C区间内,树脂黏度维持在120~180 mPa·s,离型力稳定在5.2 N±0.3 N,流平时间缩短至3~5 s,打印件固化收缩率保持2.8%,无翘曲、裂纹等缺陷,尺寸误差≤0.1 mm;当温度继续升至40 °C时,树脂黏度虽降至80 mPa·s,离型力略降至4.9 N±0.4 N,但树脂收缩率增至4.2%,打印件边缘出现微裂纹,同时打印机离型膜因高温产生热变形,破坏后续层的定位精度。

从实验结果可知,过低温度区间(15~20 °C)因树脂黏度偏高、流动性不足,导致离型阻力显著增加,易引发层厚不均、翘曲等成型缺陷;过高温区间(>35 °C)则会因树脂过度收缩产生微裂纹,且离型膜的热变形会损害打印件尺寸精度。因此,30~

35 °C区间既能保证树脂具备良好流动性以匹配打印节奏,又能维持成型件的结构完整性与尺寸精度,充分兼顾流动性与结构完整性,因此被确立为系统温控的最佳范围。

2.1.2 离型速度的影响

在离型速度对离型力的影响研究中,实验控制树脂温度为30~35 °C、曝光面积为25 cm²,通过力学传感模块(100 Hz采样频率)测试了2,4,6,8,10 mm/s五种速度下的离型力变化,结果如图7所示。当离型速度从2 mm/s提升至10 mm/s时,最大离型力仅呈微幅上升,增幅始终低于8%。这表明在2~10 mm/s区间内,速度对离型力的影响较小。结合成型效率考虑,可将离型速度优化至10 mm/s,既能缩短打印周期,又不会增加离型风险,为监控系统的速度参数设置提供了参考。

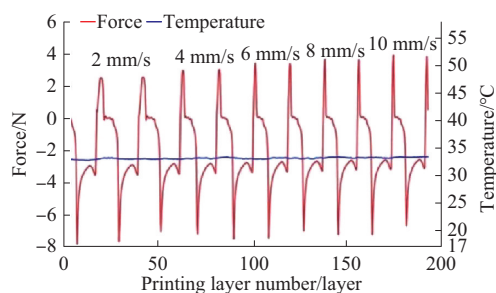


图7 离型速度对最大离型力的影响

Fig. 7 Effect of release velocity on maximum release force

2.2 曝光能量对离型力的影响

曝光能量 E 由曝光强度 I 与曝光时间 t 共同决定($E=I \times t$)。鉴于笔者所用打印机在实验周期内曝光强度固定为 I_0 ,且掩膜灰度可通过削弱紫外光透过强度来调控局部曝光能量,因此通过两种方式控制曝光能量以研究其对离型力的影响:一是以曝光时间 t 等效控制能量($E=I_0 \times t$),二是通过调控掩膜灰度改变局部曝光能量。

2.2.1 曝光时间的影响

实验以30~35 °C的树脂温控区间与10 mm/s的离型速度为工艺参数,通过调控曝光时间(变量范围为2~128 s),系统监测并记录DLP成型过程中的离型力变化规律,结果如图8所示。实验数据显示,离型力与曝光时间的关联呈现阶段性特征:当曝光时间从2 s逐步增加至16 s时,离型力呈显著上升趋势,并在16 s时达到6.3 N的峰值;而当曝光时间进一步延长(从16 s持续增至128 s)时,离型力未延续上升态势,反而表现出明显的下降趋势。

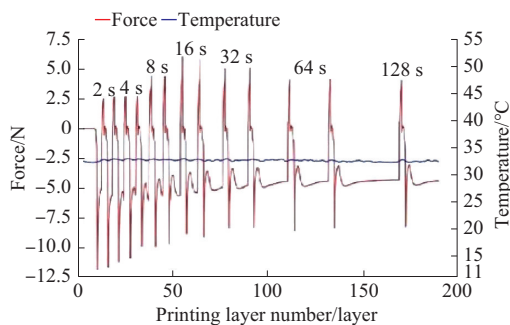


图8 曝光时间对最大离型力的影响

Fig. 8 Influence of exposure time on maximum release force

以上实验现象与树脂固化程度及界面结合状态相关:2~16 s曝光阶段,随紫外光能量的持续累积,树脂分子链交联反应不断推进,固化层交联密度与力学性能(如拉伸强度、弹性模量)显著提升,其与离型膜表面间的范德华力、氢键作用及机械嵌合力共同增强,直接导致离型力呈阶段性上升趋势;当曝光时间超过16 s后,树脂体系已达到交联饱和状态,过量紫外光会引发过度固化效应:一方面使固化层内部产生不可逆的热应力与体积收缩应力,导致其与离型膜界面出现微裂纹缺陷,削弱界面结合强度;另一方面会加剧固化层的脆化转变,在离型过程中易发生局部脆性断裂,进一步降低有效黏附面积。上述两方面因素共同作用,使得离型力随曝光时间延长呈现下降特征。由此可见,曝光能量是影响最大离型力的关键参数:适当降低曝光能量可通过调控固化层交联程度降低离型力,但需警惕该操作可能同步引发的打印层固化不充分、层间结合强度下降等问题,进而增加层间离型、尺寸偏差等打印失败风险。

2.2.2 掩膜灰度处理的优化

明确曝光时间对离型力的“先增后减”规律后,进一步考察掩膜灰度的调控效果。低灰度值可削弱紫外光透过强度,从而减少局部曝光能量。在边界像素宽度 ≥ 20 px、相邻层错开处理的条件下,分别测试了四档不同灰度级别下的最大离型力的变化,如图9所示。结果显示,随着灰度值从255依次降低至220,190,160和128,最大离型力分别下降约8%,10%,16%和20%。这一趋势表明,通过在边界区精细填充灰度纹理,可有效降低局部曝光能量,从而降低离型力峰值而不损伤制件细节。该策略为监控系统的曝光参数动态调整提供了有力支持。

2.3 曝光面积对离型力的影响

在探讨了温度、离型速度、曝光时间和掩膜灰

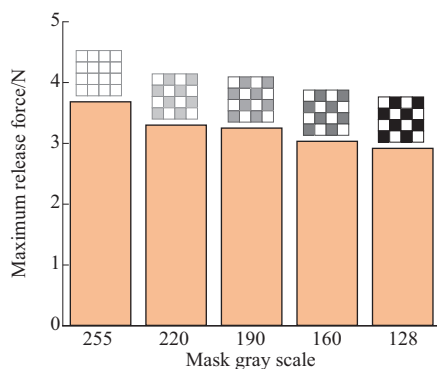


图9 掩膜灰度对最大离型力的影响

Fig. 9 Influence of mask gray scale on maximum release force

度对离型力的影响后,进一步探究曝光面积与离型力的定量关系,为离型力预测模型提供基础数据。考虑到DLP光固化成型是从最底层开始往上逐层打印(共200层),且第1层因工艺需求厚度较大,实验特别设计阶梯型模型,各层数区间对应的曝光面积如下:0~75层为 32 cm^2 ,75~100层为 25 cm^2 ,100~125层为 16 cm^2 ,125~150层为 9 cm^2 ,150~175层为 4 cm^2 ,175~200层为 1 cm^2 。在树脂温度 $30\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、离型速度 10 mm/s 、曝光时间32 s的固定条件下,通过系统力学传感模块采集对应离型力数据,结果如图10所示。实验结果显示,离型力与曝光面积呈显著正相关,随着打印从底层向上推进,曝光面积随层数增加逐步减小(从 32 cm^2 降至 1 cm^2),最大离型力也从初始的约10 N线性降低至打印末期的约2 N,数据离散度低且一致性良好,这是因为随着打印层数增加,曝光面积减小,固化层与离型膜接触面积同步减少,黏附力随之下降,与上拉式成型中“离型力随接触面积缩小而减小”的机理一致。结合图10中的数据趋势(随打印层数增加,离型力峰值逐步降低且波动收窄趋于稳定),可以清晰看到200层打印过程中曝光面积与离型力的变化规律。该结果为离型力预测模型的建立奠定关键基础,也为监控系统根据模型截面面积动态调整预警阈值提供了实验依据。

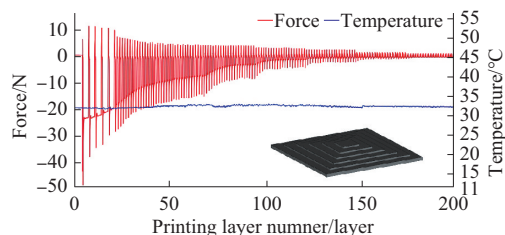


图10 曝光面积对最大离型力的影响

Fig. 10 Influence of exposure area on maximum release force

基于上述曝光面积对离型力的影响规律,为实现监控系统对离型力的精准预判,以曝光面积为自变量(x)、最大离型力为因变量(y),对1~32 cm²范围内的实验数据进行线性拟合。拟合结果如图11所示,曝光面积与最大离型力的线性关系显著,得到回归方程: $y=0.114\ 5x+0.614$,决定系数 $R^2=0.98$,表明模型对数据的解释度达98%。通过验证实验可知,该模型的预测误差 $\leq 8\%$,能够满足监控系统对离型力异常预警的精度需求。

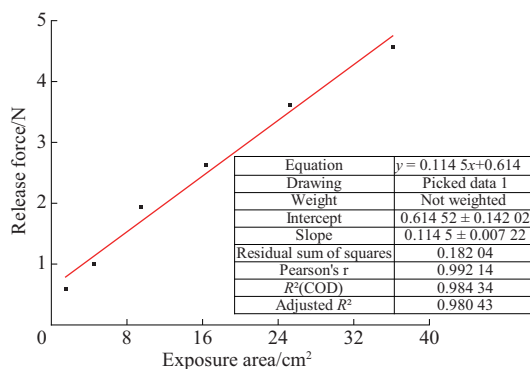


图11 曝光面积与离型力的拟合

Fig. 11 Exposure area and release force

此模型的建立为系统实现“根据模型截面面积实时预测离型力阈值”提供了量化工具,使异常识别从被动监测升级为主动预判,进一步提升了监控系统的响应效率。

3 结论

(1)笔者设计的上拉式光固化成型质量监控系统以STM32F407微控制器为核心,集成S型拉压力传感器、K型热电偶及蠕动泵液位探测器,构建了温度与液位闭环控制体系,结合FreeRTOS多任务控制和Qt上位机可视化界面,实现了离型力与树脂温度的实时监测、异常自动断电及报警功能,系统温控精度达 $\pm 1.5\ ^\circ\text{C}$,液位上下波动不超过0.2 mm。

(2)实验揭示了离型力的动态变化规律:前40层波动剧烈,初始1~5层峰值超10 N,40层后稳定在约5 N;30~35 $^\circ\text{C}$ 时树脂黏度与离型力达到平衡,35 $^\circ\text{C}$ 时树脂黏度可降至120 mPa·s;离型速度从2 mm/s增至10 mm/s,最大离型力增幅未超过8%,可兼顾效率与稳定性。

(3)曝光能量对离型力影响显著:曝光时间16 s时离型力达峰值6.3 N,超过该时间后离型力随时间延长而下降;掩膜灰度从255降至128时,可使最大离型力降低约20%,从而能有效降低离型力峰值。

(4)离型力与曝光面积呈显著正相关,基于1~

32 cm²范围内的实验数据建立线性预测模型 $y=0.114\ 5x+0.614$ ($R^2=0.98$),预测误差 $\leq 8\%$,可为监控系统动态调整预警阈值提供量化依据。

(5)该系统显著减少因离型力异常、温度波动引发的模型脱落与变形,提升设备运行稳定性及成品合格率,为高精度光固化成型工艺的智能化控制提供可行方案。

本研究在特定树脂与设备的匹配条件下开展,所得结论、工艺方案及离型力预测模型在该体系中具有可靠性;对于具有其他化学体系、波长响应或流变特性的树脂,需结合具体树脂的黏度-温度曲线、固化收缩率及设备光源参数,重新校准工艺参数与离型力预测模型系数。未来可围绕多体系下“树脂—设备—工艺—质量”的关联映射展开研究,为DLP技术多场景应用提供更多技术支撑。

参考文献

- [1] NAM J, KIM M. Advances in materials and technologies for digital light processing 3D printing[J]. Nano Convergence, 2024, 11(1). DOI:10.1186/s40580-024-00452-3.
- [2] YI J H, YANG S Q, YUE L, et al. Digital light processing 3D printing of flexible devices: Actuators, sensors and energy devices[J]. Microsystems & Nanoengineering, 2025, 11. DOI:10.1038/s41378-025-00885-8.
- [3] PARAL S K, LIN D Z, CHENG Y L, et al. A review of critical issues in high-speed vat photopolymerization[J]. Polymers, 2023, 15(12). DOI:10.3390/polym15122716.
- [4] YANG C J, WU S S. Comprehensive performance of a low-cost spring-assisted mechanism for digital light processing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(9):4 099–4 118.
- [5] 郭靖. 基于可变形水凝胶离型膜的高速光固化3D打印[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
GUO Jing. High-speed photocuring 3D printing based on deformable hydrogel release film[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [6] JIANG T, YAN B, JIANG M Z, et al. Study of forming performance and characterization of DLP 3D printed parts[J]. Materials, 2023, 16(10). DOI:10.3390/ma16103847.
- [7] YANG F M, KAZI A, MARMO A, et al. Characterizing the separation behavior of photocurable PDMS on a hydrogel film during vat photopolymerization: A benchmark study[J]. Additive Manufacturing, 2022, 58. DOI:10.1016/j.addma.2022.103070.
- [8] MANIZANI S M, ZAMANI J, SALEHI M, et al. Investigating the effect of separation speed and image cross-section geometry on the separation force in DLP method using FEP and PP polymer membranes[J]. International Journal of Advanced Design and

- Manufacturing Technology, 2023, 16(3):9–17.
- [9] SONG H T, RODRIGUEZ N A, SEEPERSAD C C, et al. Development of a variable tensioning system to reduce separation force in large scale stereolithography[J]. Additive Manufacturing, 2021, 38. DOI:10.1016/j.addma.2020.101816.
- [10] ZHANG Y, ZHANG H L, ZHAO X Y. In-situ interferometric curing monitoring for digital light processing based vat photopolymerization additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2024, 81. DOI:10.1016/j.addma.2024.104001.
- [11] SANI A R, ZOLFAGHARIAN A, KOUZANI A Z. Artificial intelligence-augmented additive manufacturing: insights on closed-loop 3D printing[J]. Advanced Intelligent Systems, 2024, 6(10). DOI:10.1002/aisy.202400102.
- [12] CICCONE F, BACCIAGLIA A, CERUTI A. Optimization with artificial intelligence in additive manufacturing: A systematic review[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2023, 45(6). DOI:10.1007/s40430-023-04200-2.
- [13] 田野. STM32F407 和 FreeRTOS 的嵌入式测试系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2023, 23(11):54–58.
- TIAN Ye. Design of embedded testing system based on STM32F407 and FreeRTOS [J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2023, 23(11):54–58.
- [14] BORASE R P, MAGHADE D K, SONDKAR S Y, et al. A review of PID control, tuning methods and applications[J]. International Journal of Dynamics and Control, 2021, 9(2):818–827.
- [15] 张跃瀚, 胡嘉杰, 卜方鑫, 等. 基于 WOA 的低温 3D 打印系统模糊 PID 温度控制策略研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2025, 25(1):1–11.
- ZHANG Yuehan, HU Jiajie, BU Fangxin, et al. Research on fuzzy PID temperature control strategy for low-temperature 3D printing systems based on whale optimization algorithm[J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition), 2025, 25(1):1–11.
- [16] ZHU J F. Research and application of Qt graphic view framework [J]. Advances in Engineering Technology Research, 2023, 4(1). DOI:10.56028/aetr.4.1.189.2023.
- [17] 黄周林, 周敏, 李鑫炎, 等. 基于机器视觉的 3D 打印异常诊断方法[J]. 机床与液压, 2024, 52(13):212–218.
- HUANG Zhoulin, ZHOU Min, LI Xinyan, et al. Abnormal diagnosis method of 3D printing based on machine vision[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(13):212–218.