

木塑复合材料 3DP 设备微滴喷射过程仿真及关键参数研究

刘子昕, 王琦, 闫承琳, 王鑫旭, 李晓旭

(中国林业科学研究院 木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 【目的】以自主研发的木塑复合材料三维打印与胶黏(3DP)微滴喷射系统为基础, 开展紫外线固化黏结剂(UV 胶)微滴喷射过程的研究, 优化喷射系统工艺参数和阀体结构参数, 为木塑复合材料 3DP 工艺液滴铺展渗透研究提供数据支撑。【方法】对喷射阀撞针的位移特征、UV 胶的流变特性进行测定分析, 确定了影响木塑复合材料 3DP 设备微滴喷射过程的喷射参数。采用有限元法对微滴喷射过程进行仿真, 分析了微滴喷射过程中 UV 胶在喷嘴处速度、压力和质量流率的变化特征, 获得了喷射参数对微滴喷射过程的影响规律。选取撞针速度、喷嘴直径、供胶压力为自变量, 以液滴成形质量和主液滴速度为评价指标, 开展仿真试验求解优化参数组。【结果】单因素试验得到了撞针速度 $0.3\sim 0.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 喷嘴直径 $0.10\sim 0.20\text{ mm}$, 供胶压力 $0.1\sim 0.3\text{ MPa}$, 阀座锥角 $120^\circ\sim 130^\circ$ 的合理喷射参数范围。正交试验得到了喷嘴直径是影响液滴质量的显著因素, 供胶压力是影响液滴速度的显著因素, 并获得最优的喷射参数组合为喷嘴直径 0.10 mm , 撞针速度 $0.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 供胶压力 0.1 MPa 、阀座锥角 130° 。【结论】建立了基于木塑复合材料 3DP 微滴喷射过程的 VOF 有限元模型, 完成了喷射参数对微滴喷射影响的研究, 获得了最优的喷射参数组合。图 8 表 4 参 17

关键词: 木塑复合材料; 三维打印与胶黏(3DP); 撞针式喷射阀; 紫外光胶黏剂; 喷射参数

中图分类号: TQ351

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2024)03-0651-08

Simulation of micro-droplet injection process and key parameters based on 3DP equipment of wood-plastic composites

LIU Zixin, WANG Qi, YAN Chenglin, WANG Xinxu, LI Xiaoxu

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] Based on the self-developed wood-plastic composite material 3DP equipment micro-droplet injection system, research on the process of UV adhesive micro-droplet injection is aimed to optimize the processing parameters and the structural parameters of the micro-droplet injection system, and provide data support for the study of droplet spreading and infiltration in the 3DP process of wood plastic composite materials. [Method] The displacement characteristics of the needle-type jet valve and the rheological properties of the UV adhesive were analyzed to determine the injection parameters affecting the micro-droplet injection process of the wood plastic composite 3DP processing. The finite element method was used to simulate the micro-droplet injection process to analyze the influence of injection parameters and obtain the variation characteristics of droplet velocity, pressure and mass flow rate at the nozzle during the micro-droplet injection process. The needle velocity, nozzle diameter and UV adhesive supply pressure as evaluation factors, and the mass of the droplet and the main droplet velocity as evaluation indicators, simulation experiments were conducted to optimize parameter combination. [Result] The results of the single factor experiment indicated that needle speed $0.3 - 0.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, nozzle diameter $0.10 - 0.20\text{ mm}$, UV adhesive supply pressure $0.1 - 0.3\text{ MPa}$

收稿日期: 2023-10-18; 修回日期: 2023-12-04

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2020SY040)

作者简介: 刘子昕(ORCID: 0009-0007-4380-0621), 从事木质材料增材制造研究。E-mail: 490812099@qq.com。通信作者: 闫承琳(ORCID: 0009-0009-0014-8180), 副研究员, 博士, 从事木质材料增材制造技术与人造板机械等研究。E-mail: yanchenglin@126.com

were reasonable printing parameters. The results of the orthogonal experiment indicated that nozzle diameter is a significant factor of droplet mass, and the UV adhesive supply pressure is a significant factor of the droplet velocity. The droplet mass and droplet velocity are optimal when the nozzle diameter is 0.10 mm, the needle speed is $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the UV adhesive supply pressure is 0.1 MPa, and the valve seat cone angle is 130° . [Conclusion] The VOF finite element model of 3DP micro-droplet injection process of wood-plastic composite was established on the basis of pre-experiment and theoretical analysis. The study on the influence of injection parameters on micro-droplet injection has been completed, and the optimal combination of injection parameters has been obtained. [Ch, 8 fig. 4 tab. 17 ref.]

Key words: wood-plastic composite; three-dimensional printing and adhesive; needle-type jet valve; UV adhesive; injection parameters

木塑复合材料增材制造是一种新兴的木质材料成型技术,具有成型速度快、材料利用率高、绿色环保等特点。目前木塑复合材料增材制造方式主要包括熔融沉积 (fused deposition modelling, FDM) 技术^[1]、选择性激光烧结 (selective laser sintering, SLS) 技术^[2]和三维打印与胶黏 (three dimensional printing and gluing, 3DP) 技术^[3]。木塑复合材料 3DP 主要是针对木质纤维物理力学特性,利用微滴喷射与紫外光固化技术,实现木塑粉末材料常温下的高精度成型^[4]。成型过程结合了紫外线固化黏结剂 (UV 胶) 常温成型特性和微滴喷射技术高精度、高通量和高驱动频率等特点,解决了传统 3D 打印中木质纤维不耐高温的问题,为木质材料的 3D 打印提供新方案。

在 3DP 工艺中,液滴质量和液滴速度等液滴参数是打印过程的重要变量^[5-8],对 3DP 成型质量具有重要影响。木塑复合材料 3DP 中液滴参数受到喷射阀结构和液滴成形过程的影响,存在喷胶量偏大、高速打印液滴冲击导致粉层飞溅等问题,不能完全适应木塑复合材料 3DP 的成型需求。为实现对阀体结构参数和工艺参数的优化,提高打印过程的精度和稳定性。预试验测定了 UV 胶黏度、撞针工作速度等关键参数,基于喷射阀结构、撞针位移特性构和 UV 胶参数,建立了微滴喷射过程的流体体积函数 (volume of fluid, VOF) 仿真模型,并验证了模型的准确性。基于有限元模拟仿真和试验设计 (design of experiment, DOE) 方法^[9],通过单因素试验阐释喷射参数对液滴参数的影响过程,得到了合理的仿真参数范围,正交试验得到了最优微滴喷射因素组合,为木塑复合材料 3DP 微滴喷射过程的研究提供理论模型和数据支持。

1 材料与方法

1.1 设备与测定装置

采用的木塑复合材料 3DP 设备为自主设计研发,3DP 设备系统主要由铺粉系统、微滴喷射系统、控制系统等部分组成。喷射阀作为喷射系统的重要部件,其工作原理如图 1 所示。撞针在工作中处于常开状态,用于控制阀体的开闭,其工作过程可分为开阀、下降、关阀和上升等 4 个阶段,在微滴喷射过程中,下降阶段撞针的动能和关阀阶段的压差是液滴质量产生的主要因素^[10]。本研究重点对撞针下降阶段和关阀阶段进行仿真分析。

UV 胶 (A332, 奥斯邦); 科研级旋转流变仪 (Kinexus Ultra+, 耐驰); 激光位移传感器 (LK-G5001, 基恩士); 高速相机 (FASTCAM NovaS16, 活图隆)。

1.2 测定方法

采用旋转流变仪对 UV 胶进行恒定温度的流变特性测试。UV 胶的流变特性曲线如图 2 所示。UV 胶

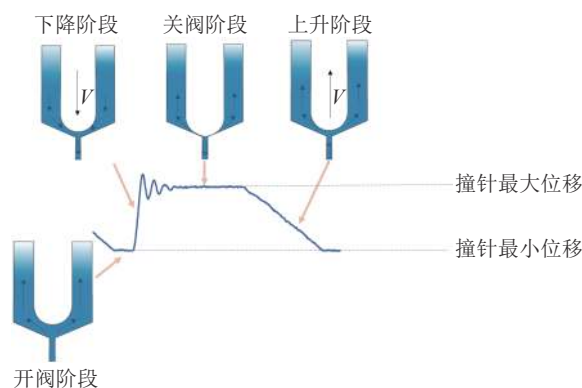


图 1 撞针工作原理示意图

Figure 1 Schematic diagram of the working principle of the striker

黏度受剪切速率影响明显。打印过程中喷嘴处 UV 胶的剪切速率高于 100 s^{-1} , 需要考虑黏度变化对微滴喷射过程的影响^[11]。采用激光位移传感器对针阀内撞针位移进行测定, 测得撞针稳定振幅为 0.185 mm , 最大振幅为 0.230 mm , 撞针位移和时间呈线性关系, 因为震荡时间较短, 仿真过程中通常将撞针下降速度视为匀速^[12], 其速度为 $0.1 \sim 0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.3 仿真模型

1.3.1 微滴喷射关键参数 根据预试验结果和实际工况, 喷射过程中工艺参数如下: UV 胶的密度为 $1050 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, UV 胶黏度为 $0.094\gamma^{-0.945} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (γ 指剪切速率), 撞针的下降速度为 $0.1 \sim 0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 供胶压力为 $0.1 \sim 0.5 \text{ MPa}$ 。流体在流道内中流动状态可以分为层流和紊流, 通常用雷诺数 (Re) 来表征流体流动情况^[13]。取喷嘴处液体的最大流速为 $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 计算喷嘴处的 Re 远小于 2 100, 判定 UV 胶喷射过程流动状态为层流。根据已知公式推知, 在微滴喷射过程中, 供胶压力、撞针速度、UV 胶黏度、喷嘴直径等喷射参数对微滴喷射过程有重要影响^[14]。

1.3.2 仿真模型建立 建立包含阀体结构参数和工艺参数的简化喷射阀二维模型如图 3 所示。其中撞针球头半径 (R) 为 1.00 mm , 撞针直径 (D) 为 0.1 mm , 喷嘴长度 (l) 为 1.4 mm , 腔体高度 (h) 为 5 mm , 喷嘴直径 (d) $0.10 \sim 0.30 \text{ mm}$, 撞针行程 (s) 取最大振幅为 0.23 mm , 阀座锥角 (θ) 为 $90^\circ \sim 130^\circ$, 阀座间隙 (δ) 为 $0.25 \sim 0.45 \text{ mm}$, 空气域的面积 $3 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。将撞针球面壁面设置为动网格, 采用 UDF 中宏函数 Define CG_motion 控制撞针沿 y 轴方向匀速下降。为验证阀体结构参数和工艺参数对微滴喷射过程的影响, 分别在喷嘴入口和出口处设置压力、流量和速度监测点, 设置每一仿真步数为 $1 \mu\text{s}$, 输出一次点位的仿真数据。并二维 (Q_{2D}) 与三维 (Q_{3D}) 质量流率的计算公式: $Q_{3D} = 1/2\pi R Q_{2D}$, 以积分换算的方式获得三维液滴的仿真质量参数。

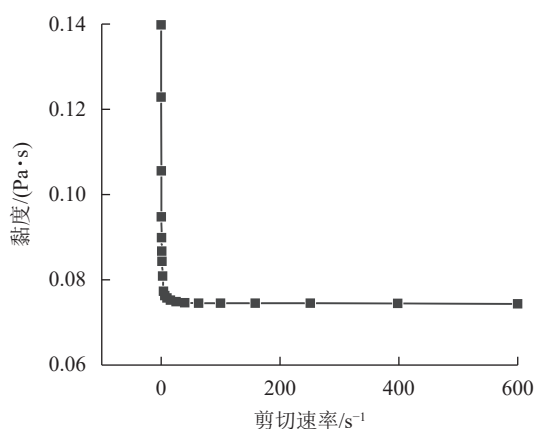


图 2 UV 胶流变特性曲线图

Figure 2 Rheological characteristic curve of UV adhesive

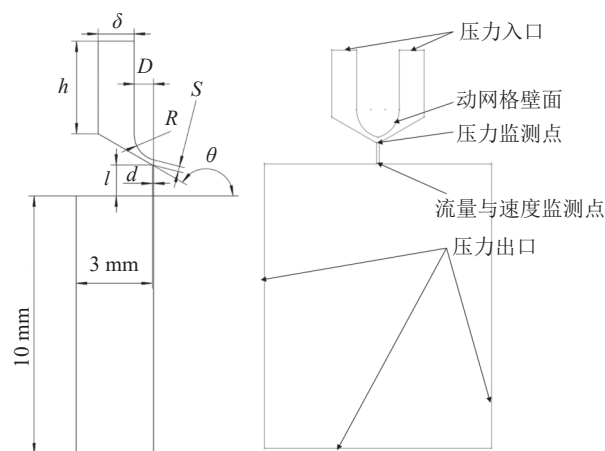


图 3 喷射阀二维模型示意图

Figure 3 Schematic diagram of two-dimensional model of needle-type jet valve

1.4 仿真模型的验证

模拟属于瞬态模拟, 需要进行网格无关性试验, 研究网格数量与仿真结果的相关性^[15]。取计算时间 6 ms 处主液滴最大速度验证。当网格密度为 0.04 、 0.08 、 0.16 mm 时液滴速度分别为 1.130 、 1.120 和 $1.122 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 速度变化范围在 2% 以内, 达到了仿真的要求。为了兼顾仿真效率和准确度, 取面网格密度为 0.08 mm 组进行后续仿真分析。

采用木塑复合材料 3DP 设备作为液滴发生装置, 以 A332UV 胶作为分散剂, 由空压机提供压力, 经输气管与胶筒连通, 利用高速相机进行图像采集, 设置采集频率为 5 kHz 。高速相机获取液滴的速度范围为 $0.616 \sim 1.080 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 仿真过程中液滴的速度变化范围为 $0.730 \sim 1.120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此外运动初期仿真液滴速度高于液滴实际速度。这主要由撞针运动过程的震荡被仿真简化为匀速运动引起。仿真过程误差小于 20% , 达到仿真的要求。

1.5 试验设计

以撞针速度、供胶压力、喷嘴直径、阀座锥角和腔体间隙等喷射参数为自变量,选取出口速度、出口压力和质量流率为过程参数,以液滴质量和主液滴速度等液滴参数为评价指标,研究自变量对微滴喷射成形过程的影响。

以单因素试验(表1)结果为基础,选取撞针速度、供胶压力、喷嘴直径3组参数为试验因素设计3因子3水平试验绘制 $L_9(4^3)$ 正交试验表(表2)。A、B、C分别指代喷嘴直径、撞针速度、供胶压力共3个变量,下标1、2、3分别指代低、中、高共3个参数水平。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

根据UDF函数设定,当撞针速度为0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时撞针达到最大行程时间(即撞针与阀座撞击时间点)分别为2.296、0.765、0.458、0.327、0.254 ms。根据仿真试验,因阀座间隙液滴参数的影响较小,故未列出其对液滴参数的影响曲线。

2.1.1 喷嘴直径对微滴喷射的影响 由图4可知:

液滴质量的变化率和终值均与喷嘴直径呈正相关。在喷嘴直径小于0.20 mm时,UV胶以液滴形式生成,喷嘴直径与液滴速度呈负相关,当喷嘴直径大于0.20 mm时,UV胶以液柱的形式喷射,出口速度和出口压力的峰值提前。随着喷嘴半径的升高,主液滴断裂时间延后,破碎液滴产生更高的相对初速度,因导致液滴速度呈先升高后降低的变化趋势。

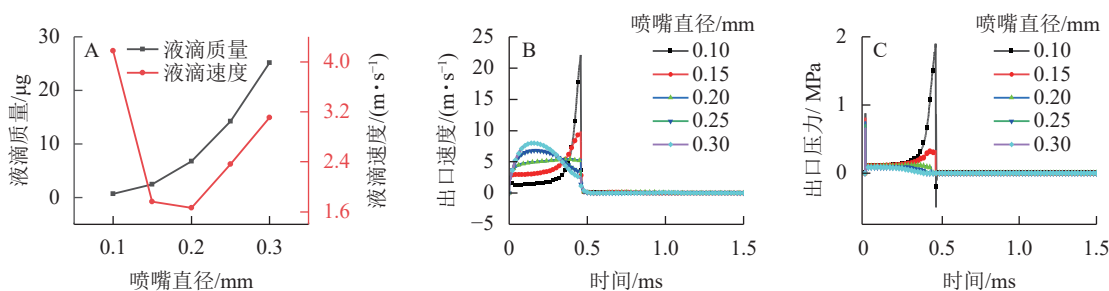


图4 不同喷嘴直径下液滴质量、液滴速度、出口压力变化线图

Figure 4 Droplet mass, droplet velocity and outlet pressure variation diagrams under different nozzle diameters

2.1.2 阀座锥角对微滴喷射的影响 图5显示:出口速度和出口压力的峰值大小与液滴阀座锥角呈正相关。UV胶速度和压力在撞针与阀座接触时产生剧烈变化。在下降阶段,阀座锥角对微滴喷射过程影响较小,随着撞针接近阀座,液滴质量急剧变化,且数值大小呈与阀座锥角呈负相关。较小的阀座锥角具有更大的纵向速度分量,可以在撞击过程产生更大的液滴驱动力,从而获得更高的液滴质量和速度。

2.1.3 撞针速度对微滴喷射的影响 图6显示:速度和压力的峰值与撞针速度呈正相关。液滴质量与撞针速度呈负相关,主液滴速度与撞针速度呈正相关。撞针速度与UV胶流体剪切速率呈正相关,根据UV胶流变特性,UV胶流体黏度大幅减小,导致出口速度极值和质量流率随撞针速度升高。随着剪切速率升高,黏度变化范围减小,液滴出口速度和质量流率随撞针速度增高变化不再显著,且由于撞针运

表1 单因素试验各水平取值

Table 1 Values for each level of single factor experiment					
水平	撞针速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	驱动气压/ MPa	喷嘴直径/ mm	阀座锥角/ ($^{\circ}$)	阀体间隙/ mm
1	0.1	0.1	0.10	90	0.25
2	0.3	0.2	0.15	100	0.30
3	0.5	0.3	0.20	110	0.35
4	0.7	0.4	0.25	120	0.40
5	0.9	0.5	0.30	130	0.45
中间组	0.5	0.2	0.20	120	0.35

表2 正交试验因素表

Table 2 Orthogonal experiment table					
组合 编号	喷嘴直径 (A)/mm	撞针速度 (B)/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	供胶压力 (C)/MPa	液滴质量/ μg	液滴速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
A ₁ B ₁ C ₁	0.10	0.3	0.1	1.162 2	0.90
A ₁ B ₂ C ₂	0.10	0.6	0.2	1.162 1	2.20
A ₁ B ₃ C ₃	0.10	0.9	0.3	1.166 8	3.60
A ₂ B ₁ C ₂	0.15	0.3	0.2	9.450 7	3.62
A ₂ B ₂ C ₃	0.15	0.6	0.3	7.299 5	3.38
A ₂ B ₃ C ₁	0.15	0.9	0.1	2.945 2	2.07
A ₃ B ₁ C ₃	0.20	0.3	0.3	21.563 4	5.84
A ₃ B ₂ C ₁	0.20	0.6	0.1	10.426 9	1.68
A ₃ B ₃ C ₂	0.20	0.9	0.2	12.048 1	3.95

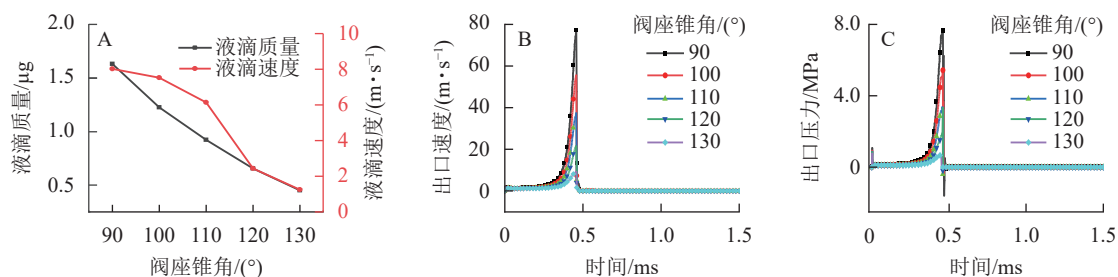


图 5 不同阀座锥角下液滴质量、液滴速度、出口压力变化线图

Figure 5 Droplet mass, droplet velocity and outlet pressure variation diagrams under different valve seat cone angles

动时间的差异 ($T_{0.1}=9T_{0.9}$), 在撞针速度较低时, 时间成为影响液滴质量的主要因素, 在撞针速度为 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 得到较大的液滴质量。

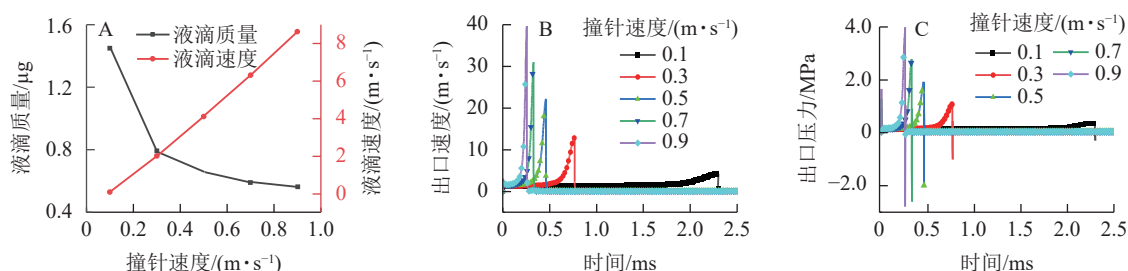


图 6 不同撞针速度下液滴质量、液滴速度、出口压力变化线图

Figure 6 Droplet mass, droplet velocity and outlet pressure change line chart under different impact needle velocities

2.1.4 供胶压力对微滴喷射的影响 图 7A 显示: 供胶压力与液滴质量呈正相关, 主液滴速度则随着供胶压力升高呈现先降低后升高的趋势。由图 7B 和 C 可得, 供胶压力的主要作用阶段为下降阶段。随着供胶压力增高, 下降阶段自喷嘴流出的液滴质量增加。关阀阶段, 撞针惯性力成为液滴断裂和喷射的主要驱动力。当供胶压力较高时, 在喷嘴处形成的液滴体积增加, 相较于低供胶气压组, 液滴断裂时间延后, 导致主液滴速度产生非规律性变化。

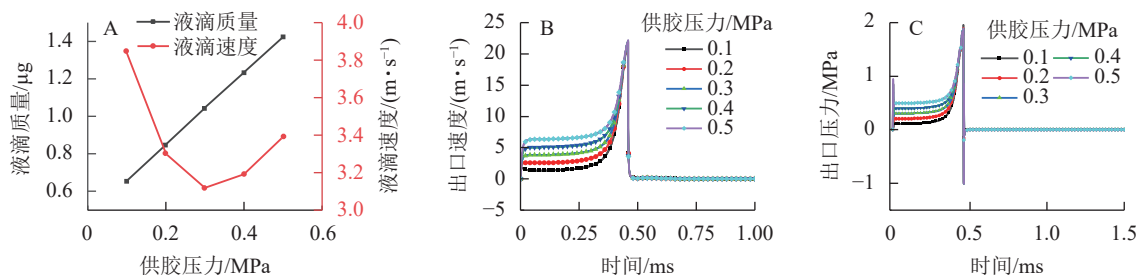


图 7 不同供胶压力下液滴质量、液滴速度、出口压力变化线图

Figure 7 Droplet mass, droplet velocity and outlet pressure change line chart under different glue supply pressure

由图 8 可得: 阀座锥角较小时, 液滴下落过程会产生破碎, 不适合 UV 胶材料的微滴喷射。较小的撞针速度无法驱动 UV 胶液柱断裂形成稳定液滴, 随着撞针速度增加, UV 胶黏度减小, 流动性增强, 因此获得较高的液滴速度。当供胶压力和喷嘴直径过高时, 过量液滴在关阀阶段前自喷嘴出口流出, 使液滴获得较大的成形体积。根据单因素结论和仿真相图分析, 能够实现单液滴喷射的参数范围为: 撞针速度 $0.3\sim 0.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 喷嘴直径 $0.10\sim 0.20 \text{ mm}$, 供胶压力 $0.1\sim 0.3 \text{ MPa}$, 阀座锥角 $120^\circ\sim 130^\circ$ 。因阀座锥角加工困难, 且在范围内液滴质量和主液滴速度变化极小, 以最小液滴质量为原则, 确定阀座锥角为 130° 。选取撞针速度、喷嘴直径和供胶压力作为自变量进行正交试验。

2.2 正交试验分析

2.2.1 极差结果分析 如表 3 所示: 以液滴质量为评测标准, 3 因素的排序为 $A>B>C$; 以主液滴速度为评价标准, 3 因素的排序为 $C>A>B$ 。液滴质量的最优标准为 $A_1B_3C_1$, 液滴速度的最优标准为

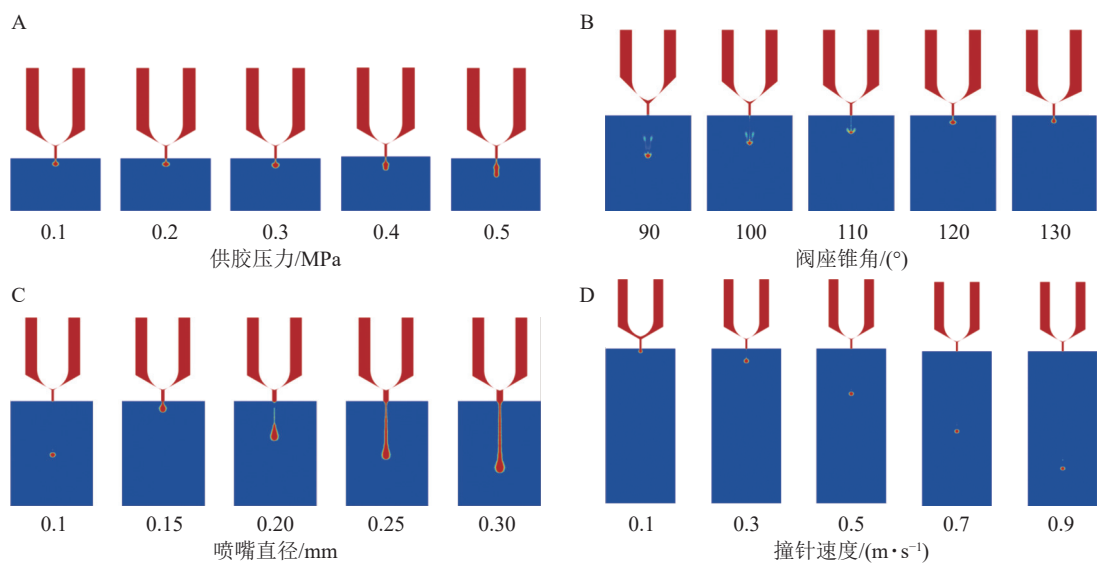


图 8 不同喷射参数的液滴相图

Figure 8 Droplet phase diagram of different injection parameters

表 3 正交试验极差表

Table 3 Orthogonal experiment range table

项目	液滴质量			项目	主液滴速度		
	A	B	C		A	B	C
K_1	1.164	10.725	4.845	K_1	2.233	3.420	1.550
K_2	6.565	6.296	7.554	K_2	3.023	2.420	3.257
K_3	14.679	5.387	10.010	K_3	3.790	3.207	4.240
R	13.516	5.339	5.165	R	1.557	1.000	2.690

$A_1B_2C_1$ 。考虑在微滴喷射过程中，液滴质量为主要结果参数，因此按照一定的系数比对极差结果进行折算，得到液滴的最优参数组为 $A_1B_3C_1$ 。即撞针直径为 0.10 mm，撞针速度为 $0.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，供胶压力为 0.1 MPa。

2.2.2 方差结果分析 如表 4 所示：建立了喷射参数关于液滴质量和液滴速度的一次线性回归模型，液滴速度 $=3.016-0.782A_1+0.008A_2+0.774A_3+0.404B_1-0.596B_2+0.190B_3-1.466C_1+0.241C_2+1.224C_3$ 。液滴质量 $=7.469-6.306A_1+0.904A_2+7.210A_3+3.256B_1-1.173B_2-2.083B_3-2.625C_1+0.084C_2+2.540C_3$ 。对于液滴质量，各喷头参数的 F 由大到小分别为 A、B、C，可以验证极差的结论，且喷嘴直径是影响液滴质量的显著因素 ($P<0.05$)。撞针速度和供胶压力对微滴喷射参数影响较小。对于液滴速度，各喷头参数的 F 由大到小分别为 C、A、B，供胶压力是影响液滴速度的显著因素 ($P<0.05$)。因此在能完成喷射的前提下，减少喷嘴直径和供胶压力，可以得到更小的液滴质量和速度。

表 4 正交试验方差表

Table 4 Orthogonal experiment variance table

方差来源	液滴质量					液滴速度				
	df	SS	MS	F	P	df	SS	MS	F	P
A	2	277.694	138.847	51.72	0.019	2	3.635 1	1.8175	6.75	0.129
B	2	48.948	24.474	9.12	0.099	2	1.6644	0.8322	3.09	0.245
C	2	40.050	20.025	7.46	0.118	2	11.1158	5.5579	20.63	0.046
误差	2	5.369	2.685			2	0.5388	0.2694		
合计	8	372.061				8	16.954 0			
$R^2=98.56\%$		$R^2_{\text{adj}}=98.56\%$								
			$R^2=96.82\%$	$R^2_{\text{adj}}=87.29\%$						

说明：df. 自由度；SS. 离差平方和；MS. 均方值。

根据以上分析，获得最优的喷射参数：喷嘴直径为 0.10 mm，撞针速度为 $0.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，供胶压力为 0.1 MPa、阀座锥角为 130° 。经过仿真结果分析，得到液滴质量为 $0.437\text{ }\mu\text{g}$ ，液滴速度为 $0.96\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对比最

小数据, 液滴速度增加了 6%, 但是液滴质量缩小 62%。综合速度和质量指标, 可得到 $A_1B_3C_1$ 为最优参数组合。

2.2.3 正交试验结果分析 正交试验得到了液滴速度和液滴质量的一次回归模型, 验证了喷嘴直径是影响液滴质量的显著因素, 供胶压力是影响液滴速度的显著因素, 根据极差和方差分析, 得到了最优的喷射参数: 喷嘴直径为 0.10 mm, 撞针速度为 $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 供胶压力为 0.1 MPa, 阀座锥角为 130° 。

3 讨论和结论

木塑复合材料 3DP 设备利用撞针式阀体驱动 UV 胶喷射到塑粉床, 将 UV 胶这种黏结剂喷射与紫外光固化成型结合后, 可以大大提高设备打印成型效率。木塑复合材料 3DP 是一种节能环保的成型技术, 在木塑复合材料增材制造方面有很大的应用前景^[4, 16]。本研究针对目前设备存在的喷射稳定度低、喷胶量不易控制等问题, 研究了撞针式阀体结构和工艺参数对液滴形成过程及液滴质量的影响, 阐释了喷嘴直径、阀体锥角、供胶压力和撞针速度等参数对液滴成形参数的作用机制^[17]。仿真试验中选择喷嘴直径 0.10 mm、撞针速度 $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、供胶压力 0.1 MPa 的打印组合, 得到 $0.437 \mu\text{g}$ 液滴质量。相较于喷嘴直径为 0.15 与 0.20 mm 试验组, 液滴质量得到明显改善。在实际试验中, 换用 0.10 mm 喷嘴直径得到的液滴质量明显降低, 且需要保持一定的撞针速度和供胶压力以实现喷射。在打印过程中喷嘴直径减小将增大喷射过程的黏滞力, 形成较小的喷胶量, 且需要较大的惯性力和供胶压力实现喷射过程, 这与仿真结论一致。仿真试验表明对液滴质量影响因素的排序为喷嘴直径 > 撞针速度 > 供胶压力。实际过程中对于液滴质量的影响因素分别为喷嘴直径 > 供胶压力 > 撞针速度。可能因为当供胶压力过大时, 开阀阶段残余的液滴质量、气道的内部结构均对仿真结果产生了影响, 这是仿真模型中未考虑的部分。未来优化仿真过程的结构参数和初始条件, 建立包含微滴喷射连续过程的流体体积函数有限元模型, 以期实现在更加复杂的工况下分析应用, 获得更可靠的研究结论。

本研究得到喷嘴直径是影响液滴质量的显著因素, 供胶压力是影响液滴速度的显著因素。获得最优喷射参数组合: 喷嘴直径为 0.10 mm, 撞针速度为 $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 供胶压力为 0.1 MPa, 阀座锥角为 130° 。本研究设计的木塑复合材料 3DP 微滴喷射流体体积函数模型可以实现对 UV 胶液滴参数的预测, 实现对撞针运动过程中阀体参数对速度、体积和压力影响过程的分析, 优化了木塑复合材料 3DP 的打印参数, 为木塑复合材料 3DP 成型参数的研究提供数据基础。

4 参考文献

- [1] 查瑶, 饶俊, 关莹, 等. 竹叶/HDPE复合材料的制备及性能[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(2): 343 – 349.
ZHA Yao, RAO Jun, GUAN Ying, et al. Preparation and properties of bamboo leaf/HDPE composites [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2020, 37(2): 343 – 349.
- [2] 杜春贵, 魏金光, 金春德, 等. 竹碎料/酚醛树脂制备竹材陶瓷的烧结工艺[J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33(3): 471 – 476.
DU Chungui, WEI Jinguang, JIN Chunde, et al. Sintering process of bamboo ceramics prepared from bamboo chips/phenolic resin [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2016, 33(3): 471 – 476.
- [3] ROSENTHAL M, HENNEBERGER C, GUTKES A, et al. Liquid deposition modeling: a promising approach for 3D printing of wood [J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018, 76(2): 797 – 799.
- [4] 闫承琳, 刘子昕, 刘东, 等. 基于黏结剂喷射的木质材料增材制造技术研究进展[J]. 世界林业研究, 2023, 36(1): 90 – 96.
YAN Chenglin, LIU Zixin, LIU Dong, et al. Research progress in additive manufacturing technology for wood materials based on 3DP [J]. *World Forestry Research*, 2023, 36(1): 90 – 96.
- [5] GAO Xiangyu, YANG Weidong, XIAN Hongxuan, et al. Numerical simulation of multi-layer penetration process of binder droplet in 3DP technique [J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2020, 124(1): 227 – 241.
- [6] HADI M, NIKNAM M, LI Yang. Effect of powder characteristics on parts fabricated via binder jetting process [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2019, 25(2): 332 – 342.
- [7] DENESUK M, SMITH G L, ZELINSKI B J J, et al. Capillary penetration of liquid droplets into porous materials [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1993, 158(1): 114 – 120.
- [8] NEFZAUI E, SKURTYS O. Impact of a liquid drop on a granular medium: inertia, viscosity and surface tension effects on

- the drop deformation [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, **41**: 43 – 50.
- [9] 雷永杰, 周建波, 傅万四, 等. 竹材索道集材运输装备跑车及悬索的设计与分析[J]. 浙江农林大学学报, 2023, **40**(6): 1348 – 1356.
LEI Yongjie, ZHOU Jianbo, FU Wansi, *et al.* Design and analysis of bamboo cableway skidding transportation equipment sports car and suspension cable [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(6): 1348 – 1356.
- [10] 路崧, 江海, 顾守东, 等. 液压式压电驱动喷射点胶阀设计与实验[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, **47**(3): 167 – 173.
LU Song, JIANG Hai, GU Shoudong, *et al.* Experiment and design for the hydraulic piezoelectric driven jet dispensing valve [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2015, **47**(3): 167 – 173.
- [11] 张伏, 付三玲, 佟金, 等. 玉米淀粉糊的流变学特性分析[J]. 农业工程学报, 2008, **24**(9): 294 – 297.
ZHANG Fu, FU Sanling, TONG Jin, *et al.* Rheological properties of maize starch pastes [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, **24**(9): 294 – 297.
- [12] 黄强强, 闫宝瑞, 汪扬烨, 等. 高聚物熔滴形成与断裂过程的数值模拟[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2017, **44**(1): 63 – 68.
HUANG Qiangqiang, YAN Baorui, WANG Yangye, *et al.* Numerical simulation of formation and fracture process in polymer droplets [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science)*, 2017, **44**(1): 63 – 68.
- [13] 闫大壮, 杨培岭, 赵桥. 滴头流道内部含沙水流流动特征的试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, **24**(2): 52 – 56.
YAN Dazhuang, YANG Peiling, ZHAO Qiao. Experimental study on suspensions flow hydraulic characteristics in dripper emitter path [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, **24**(2): 52 – 56.
- [14] 陈学锋, 徐言生, 胡建国, 等. 聚合物熔体二维非等温脉动流场模型[J]. 塑料, 2015, **44**(2): 85 – 88.
CHEN Xuefeng, XU Yansheng, HU Jianguo, *et al.* Models of 2D non-isothermal pulsating flow of polymer melt [J]. *Plastics*, 2015, **44**(2): 85 – 88.
- [15] 卢富明, 范雪琪, 丁雨晴, 等. 双向侧风木材干燥窑内流场的数值模拟与优化[J]. 林产工业, 2023, **60**(1): 33 – 39.
LU Fuming, FAN Xueqi, DING Yuqing, *et al.* Numerical simulation and optimization of the flow field in bilateral side-fan wood drying kiln [J]. *China Forest Products Industry*, 2023, **60**(1): 33 – 39.
- [16] 刘东, 刘子昕, 王琦, 等. 基于离散元的竹粉颗粒接触参数标定[J]. 浙江农林大学学报, 2023, **40**(4): 875 – 882.
LIU Dong, LIU Zixin, WANG Qi, *et al.* Calibration of contact parameters for bamboo powder particles based on DEM [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(4): 875 – 882.
- [17] 陈恒, 杨俊逸, 张志航, 等. 气动喷射点胶CFD仿真与实验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, **17**(31): 94 – 100.
CHEN Heng, YANG Junyi, ZHANG Zhihang, *et al.* CFD simulation and experimental study on pneumatic jetting [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, **17**(31): 94 – 100.