

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.09.004

视觉反馈的硅胶挤出增材制造路径均匀化方法

邱龙, 夏链, 韩江, 马丁逸飞, 田晓青

(合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对硅胶挤出增材制造过程中拐角处的过填充和起始处的欠填充缺陷,文章提出一种基于视觉反馈的硅胶挤出缺陷优化方法。首先搭建硅胶挤出增材制造实验平台,利用视觉传感器监测打印过程并获取打印图像;针对实验中的打印线条图像设计相应的图像处理算法,根据该算法得到打印线条的线宽,设计正交试验研究打印线宽与工艺参数之间的影响关系,得到不同打印参数(层厚 h 、喷嘴移动速度 v_t 、喷嘴挤出速度 v_d)下的打印线条线宽数据,并对线宽数据采用最小二乘法拟合得到线宽数学模型;通过线宽模型分析硅胶挤出过程中喷嘴在拐角和打印起始处的挤出速度变化规律,创建喷嘴的挤出速度变化模型,并利用该模型和线宽模型优化打印模型G代码,使喷嘴的移动速度与挤出速度在拐角和打印起始处保持一定的匹配关系,改善硅胶挤出过程中的过填充和欠填充缺陷。硅胶挤出打印实验结果验证了文章优化方法的有效性。

关键词:硅胶;增材制造;图像处理;挤出缺陷;离线优化

中图分类号:TP391.73 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)09-1176-07

Visual feedback for path homogenization in silicone extrusion additive manufacturing

QIU Long, XIA Lian, HAN Jiang, MA Dingyifei, TIAN Xiaoqing

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Aiming at the overfilling at the corner and underfilling at the start in the silicone extrusion additive manufacturing process, this study proposes a silicone extrusion defect optimization method based on visual feedback. Firstly, a silicone extrusion additive manufacturing experimental platform is set up, and the visual sensor is used to monitor the printing process and obtain the printing images. Then the corresponding image processing algorithm is designed for the printed line images in the experiment, and the line widths of the printed lines are obtained according to this algorithm. In order to study the relationship between the printed line width and process parameters, a set of orthogonal experiments are designed, the printed line width data under different printing parameters (layer thickness h , nozzle moving speed v_t , and nozzle extrusion speed v_d) are gotten, and the line width data are fitted using least squares method to get the mathematical model of the line width. The extrusion speed change rule of the nozzle at the corner and the start of printing in the silicone extrusion process is analyzed through the line width model, the extrusion speed change model of the nozzle is established, and the G code of the printing model is optimized by using the extrusion speed change model of the nozzle and the line width model, so as to make the moving speed and extrusion speed of the nozzle maintain a certain matching relationship at the corner and the start of printing, thus improving the overfilling and underfilling defects of the silicone extrusion. Finally, silicone extrusion printing experiments verify

收稿日期:2023-12-12; **修回日期:**2024-03-22

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFA1005204)

作者简介:邱龙(1999—),男,安徽亳州人,合肥工业大学硕士生;

夏链(1964—),女,四川乐山人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师;

韩江(1964—),男,河南洛阳人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师;

田晓青(1987—),女,河北石家庄人,博士,合肥工业大学副教授,博士生导师,通信作者, E-mail: tianxiaoqing@hfut.edu.cn.

the effectiveness of the optimization method.

Key words: silicone; additive manufacturing; image processing; extrusion defects; off-line optimization

硅胶是一种具备低毒性、耐性、热稳定性、生物相容性等多种优良性质的材料^[1-2]。硅胶产品的传统加工工艺主要有注塑、模压等方式,但是这些方式难以制造复杂腔体形状的零件。随着 3D 打印技术的快速发展,其具备的加工效率高、成本低以及可以制造复杂三维几何形状产品等优点给硅胶产品的加工提供了一种新的思路。目前,硅胶材料的 3D 打印技术已经被广泛应用于医疗、软体机器人、生物传感器等领域^[1-6]。

随着硅胶材料在 3D 打印技术中的广泛应用,研究者发现,由于硅胶材料本身的特性、3D 打印机喷嘴内壁的摩擦等因素会造成硅胶挤出过程中喷嘴挤出速度的不稳定,导致零件加工过程中出现过填充和欠填充缺陷。针对该问题,国内外学者主要从离线优化^[7-12]和实时控制^[13-16]两方面进行了研究。文献[7]通过数值模拟仿真实验证明,在 3D 打印过程中保持喷嘴的移动速度与挤出速度相匹配可以很好地改善打印过程中的过填充缺陷;文献[8]针对熔融沉积成型中弯曲路径的材料沉积缺陷,提出一种通过保持喷嘴挤出速度与切向移动速度匹配关系的方法改善上述缺陷;文献[9]针对增材制造中拐角的过填充缺陷提出一种通过圆弧路径代替拐角路径,通过减少喷嘴移动速度频繁变化的方法改善拐角的过填充问题;文献[10]针对增材制造过程中的零件沉积质量问题,提出一种基于打印轮廓层级水平导出的隐士算法,减少打印路径中的拐角数量,同时利用轮廓的曲率信息调整路径上的打印点,对光滑路径进行了局部优化。

目前关于硅胶挤出过程中的过填充和欠填充缺陷的相关研究,其改进方法主要是通过减少拐角出现的次数或利用圆弧路径代替拐角路径^[7-12],而并未真正地解决欠填充和过填充问题。因此,本文提出一种通过视觉传感器监测打印过程,分析喷嘴的挤出速度变化规律,建立喷嘴挤出速度的变化模型,利用该模型优化喷嘴的移动速度和挤出速度,通过保持硅胶挤出过程中喷嘴的挤出速度与移动速度时刻处于匹配状态,改善硅胶增材制造过程中的过填充和欠填充缺陷。

1 材料和实验平台

1.1 材料

本实验中使用道康宁 737 型号的硅胶材料

(美国密歇根州米德兰市),静态条件下物理密度为 1.04 g/cm^3 ,黏度为 $62.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,表面干燥时间为 10 min ,具备优异的生物相容性。该材料目前已被广泛应用于医疗器械、密封件、汽车零部件制造以及航空航天零部件制造等领域^[1-2,6]。

硅胶是一种非牛顿流体,其黏度模型遵循卡罗流体模型^[13],即

$$u_s = u_\infty + (u_0 - u_\infty)[1 + (\lambda\gamma)^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (1)$$

其中: u_s 为硅胶的黏度; u_∞ 为硅胶在无限剪切速率下的黏度; u_0 为硅胶在 0 剪切速率下的黏度; λ 为硅胶松弛时间; γ 为硅胶的剪切速率; n 为幂次指数。

由式(1)可知,硅胶的黏度会随着剪切速率的变化而变化,然而硅胶黏度的变化也会导致硅胶挤出过程中喷嘴的挤出速度与移动速度不匹配,最终导致硅胶挤出过程中的过填充和欠填充缺陷。

1.2 实验平台

本文搭建的硅胶挤出实验平台如图 1 所示。图 1b 中:1 表示硅胶容器;2 表示螺杆点胶泵;3 表示白色同轴光源;4 表示 GigE 工业相机。

该硅胶挤出实验平台主要包含移动系统、挤出系统和视觉检测系统。移动系统由编码伺服电机加丝杆组成,其中编码伺服电机编码位数最高为 17 位,丝杆的导程为 10 mm ,平台的理论运动精度可达微米级;移动系统的主要作用是完成挤出系统的 X、Y、Z 轴方向上的移动。挤出系统由硅胶容器和螺杆点胶泵组成,硅胶容器是一种透明的注射器,主要作用是给螺杆点胶泵提供挤出材料;螺杆点胶泵是一种具备挤出速度可控、挤出精度高的挤出装置,挤出量在 $0.1 \mu\text{L}$ 至 $100 \mu\text{L}$ 之间,单圈挤出量为 $120 \mu\text{L}$,挤出精度 $0.1 \mu\text{L}$ 。视觉检测系统由白色同轴光源和 GigE 工业相机组成;白色同轴光源主要作用是提高相机视野范围的亮度,使视觉传感器的拍摄图像更加清晰;GigE 工业相机主要作用是对打印过程进行监控,完成打印线条图像数据的获取,其中工业相机的视野范围(长×宽)为 $3.2 \text{ mm} \times 2.4 \text{ mm}$,图像像素分辨率为 $1\,920 \times 1\,200$,图像数据传输利用千兆网,保证了图像数据传输的可靠性与实时性。

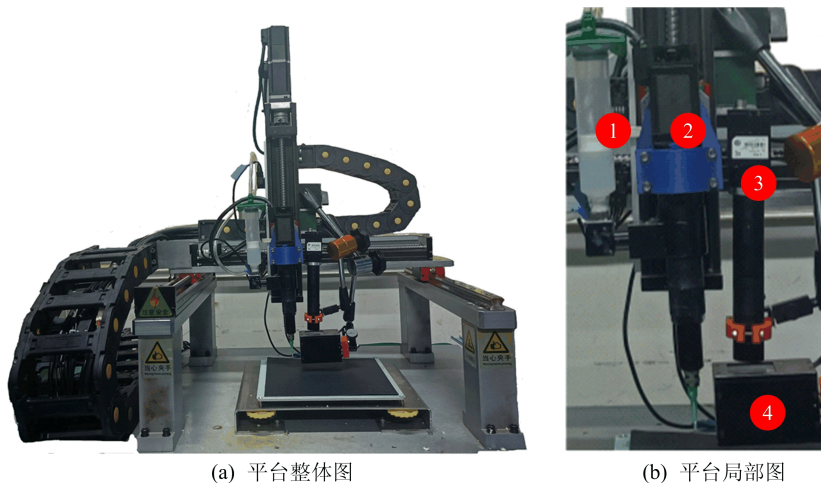


图 1 增材制造实验平台

2 实验步骤

为确保实验的可重复性以及确保硅胶的凝固速度不会因人为的原因而造成改变,本文所有实

验均在 20 ~ 25 °C、50% ~ 60% 的湿度环境下进行。

2.1 图像处理算法

本文设计的图像处理算法流程如图 2 所示。

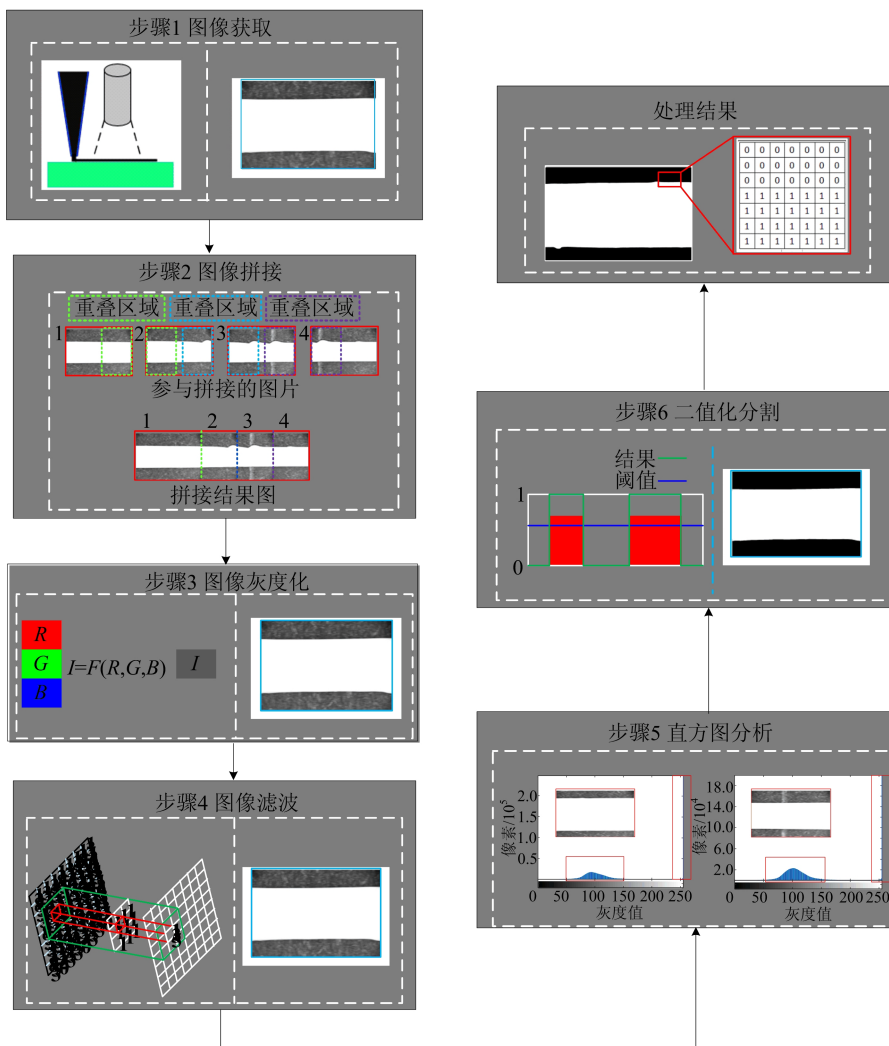


图 2 图像处理算法流程

图像处理的算法流程包含图像的获取、拼接、灰度化处理、滤波、直方图分析以及二值化分割等步骤。

由于实验中视觉传感器视野范围仅有 $3.2\text{ mm} \times 2.4\text{ mm}$, 为保证不同打印参数下线宽数据提取的准确性, 在对图像数据进行预处理之前进行图像拼接(图 2 中步骤 2)操作。根据图片的拍摄帧数得到相邻两张图片之间的拍摄时间间隔 Δt , 结合相机随着喷嘴移动的速度 v_t , 即可得到相机在拍摄相邻两张图片之间的移动距离 L 为:

$$L = v_t \Delta t / 60 \quad (2)$$

视觉传感器的图像分辨率为 $1\ 920 \times 1\ 200$, 根据相邻两帧图片之间相机的移动距离 L 可以获得相邻两帧图片之间的重叠像素个数 N , 计算公式如下:

$$N = 1\ 920L/H \quad (3)$$

其中, H 为相机拍摄图片在水平方向上的尺寸, $H=3.2\text{ mm}$ 。

利用上述方法完成一组参数下图像的拼接操作后, 再按照本文设计的图像处理算法对其进行处理。首先是图像的灰度化操作, 将 RGB 图像转成灰度图像, 降低后续图像算法操作的计算量; 然后通过图像滤波操作消除由于光照、数据传输等因素造成的图像噪音点, 增强数据提取结果的准确性; 其次为实现图片中前景物体与目标物体的精确分割, 对图片进行直方图分析, 观察图像的像素整体分布, 从图 2 中步骤 5 可以发现图像直方图呈现双峰形状, 目标与背景之间存在明显的分界线; 最后通过选取分界线像素作为全局阈值进行图像的二值化操作, 提取目标物体, 得到二值化图像。

2.2 线宽提取算法

经过上述图像处理流程, 得到一张仅由 0 和 1 组成的二值化图像(如图 2 中处理结果), 其中 1 为目标物体像素值。

通过遍历二值化图像每一列像素 1 的个数并结合相机视野范围, 即可得到目标线条的线宽大小。线宽计算公式如下:

$$\omega = VN/1\ 200 \quad (4)$$

其中: ω 为打印线条线宽; V 为相机的垂直方向视野大小, 为 2.4 mm ; N 为图像每一列目标像素值 1 的个数。

2.3 建立线宽实际模型

在硅胶挤出过程中影响打印线条线宽 ω 的

主要因素^[6,13]有喷嘴的移动速度 v_t 、喷嘴的挤出速度 v_d 和层厚 h 。为了对硅胶挤出过填充和欠填充缺陷处的喷嘴挤出速度变化规律进行分析, 需要得到线宽与工艺参数之间的线宽实际模型 $F(\omega, v_t, v_d, h)$ 。选取 ω 为因变量, v_t, v_d, h 为自变量, 设计正交试验, 其中层厚参数选择 1.2、1.5、1.8 mm, 挤出速度选择 1.2、1.5、1.8 mm/s, 移动速度选择 600、800、1 000 mm/min; 利用图像处理算法和线宽提取算法得到不同打印参数下打印线条的线宽数据 ω 。正交试验数据见表 1 所列。

表 1 正交试验数据表

$v_d/$ (mm/s)	$v_t/$ (mm/min)	h/mm		
		1.2 mm/s	1.5 mm/s	1.8 mm/s
1.2	600	1.42	1.37	1.22
	800	1.14	1.06	1.02
	1 000	1.01	0.94	0.92
1.5	600	1.80	1.49	1.30
	800	1.37	1.23	1.20
	1 000	1.14	1.11	1.07
1.8	600	2.07	1.68	1.50
	800	1.77	1.51	1.35
	1 000	1.30	1.27	1.17

利用最小二乘法对线宽数据进行一阶线性拟合和二阶非线性拟合。一阶线性拟合的决定系数 R^2 为 0.965, 样本数据与预测数据之间的均方差为 0.063; 二阶非线性拟合的决定系数 R^2 为 0.976, 样本数据与预测数据之间的均方差为 0.055。

从拟合结果发现, 虽然二阶非线性拟合误差相较于一阶线性拟合有一定的提升, 但是效果并不显著。考虑到后续实验中利用该模型对喷嘴挤出速度变化规律探索的便利性, 本实验选取一阶线性拟合模型作为线宽与打印参数之间的线宽实际模型, 结果为:

$$F(\omega, v_t, v_d, h) = 2.3822 - 0.0015v_t + 0.7245v_d - 0.5873h \quad (5)$$

2.4 欠填充现象分析

通过正交试验得到硅胶挤出过程中打印参数 v_t, v_d, h 与打印线条线宽 ω 之间的线宽实际模型 $F(\omega, v_t, v_d, h)$, 利用该模型对硅胶挤出欠填充缺陷区域的喷嘴挤出速度进行提取分析。

首先进行不同打印参数下的硅胶挤出打印实验, 不同打印参数下起始点处打印的欠填充现象如图 3 所示。

图 3 中:绿色虚线所围是打印过程中硅胶的理论填充区域;白色表示硅胶的实际填充区域。

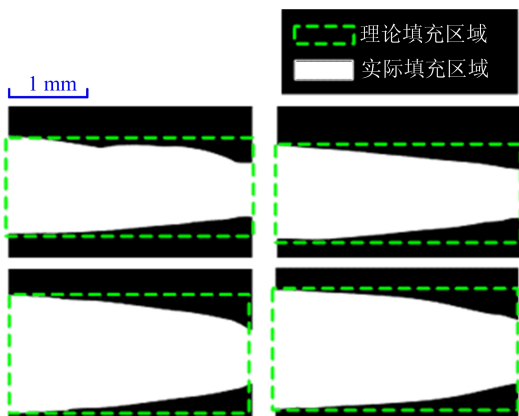
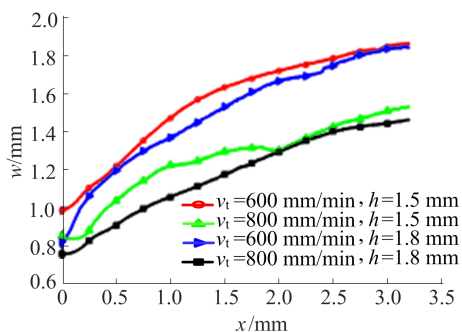


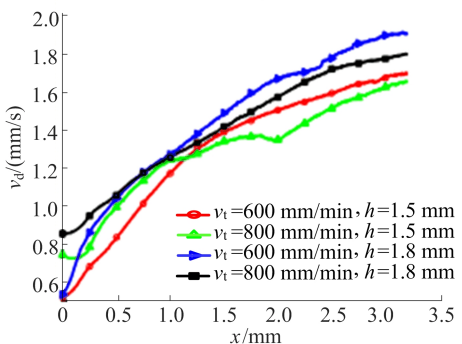
图 3 起始点处欠填充现象

从图 3 可以看出,在硅胶挤出打印起始处存在明显的材料欠填充缺陷。

通过图像处理算法和线宽提取算法提取硅胶挤出打印起始处的打印线条线宽变化规律,如图 4a 所示。在打印过程中打印层厚 h 和喷嘴的移动速度 v_t 已知,因此可以通过线宽模型 $F(w, v_t, v_d, h)$ 根据线宽变化规律计算喷嘴的实际挤出速度变化规律,如图 4b 所示。图 4 中, $v_d = 1.8 \text{ mm/s}$ 为喷嘴挤出速度的理论值,下同。



(a) 线宽变化规律($v_d=1.8 \text{ mm/s}$)



(b) 实际挤出速度变化规律($v_d=1.8 \text{ mm/s}$)

图 4 欠填充缺陷分析

从图 4b 可以看出,起始处喷嘴的挤出速度呈

现出类似指数曲线的变化趋势,且层厚 h 的变化对喷嘴挤出速度的影响并不明显。

为探究不同打印参数下喷嘴实际挤出速度的变化规律,设置喷嘴移动速度 v_t 为 600 mm/min ,实际挤出速度 v_d 为 1.5 mm/s ,对喷嘴实际挤出速度与喷嘴所处位置 x 之间的函数 $F(v_d, x)$ 进行拟合,结果为:

$$F(v_d, x) = K[1.6649 - 0.1372 \exp(2.16 - x)] \quad (6)$$

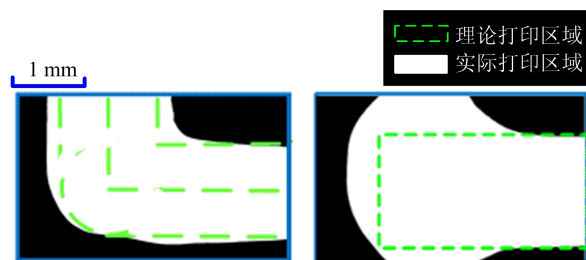
其中, K 为缩放因子,当打印参数 v_t 与 v_d 发生变化时,可以对 $F(v_d, x)$ 进行等比例缩放, K 值取为 $1.5v_t/(600v_d)$ 。

2.5 过填充现象分析

硅胶挤出过程中拐角处欠填充的打印现象如图 5a 所示。从图 5a 可以看出,在硅胶挤出过程中拐角处存在明显的过填充缺陷。

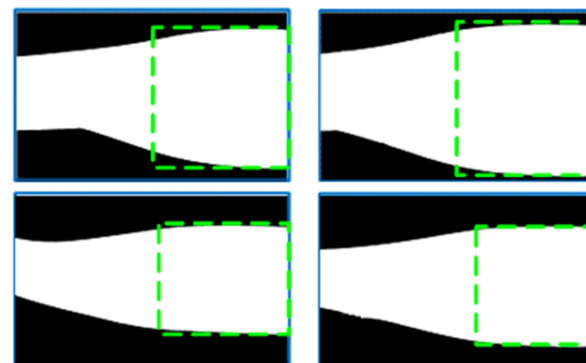
为获取硅胶挤出过程中拐角处喷嘴挤出速度的变化规律,观察喷嘴在运动停止处的挤出现象,如图 5b 所示。从图 5b 可以看出,在喷嘴停止移动的位置处存在明显的材料堆积现象。由此可知,当喷嘴停止移动后,喷嘴的挤出并未立即停止。

因此,通过在打印实验过程中提前将喷嘴的挤出速度设置为 0,喷嘴保持正常的移动,观察喷嘴在打印停止处的挤出情况。不同打印参数下喷嘴在打印停止处的挤出结果如图 5c 所示。



(a) 拐角堆积现象

(b) 停止处堆积现象



(c) 停止处喷嘴挤出延迟现象

图 5 拐角处过填充现象

图 5 中:绿色虚线为该组打印参数下的理论填充区域;白色实线为实际填充区域。

通过线宽提取算法提取打印线条线宽,并利用线宽实际模型计算喷嘴的挤出速度变化规律。不同打印参数下硅胶挤出过填充缺陷处的线宽与喷嘴实际挤出速度之间的变化规律如图 6 所示。

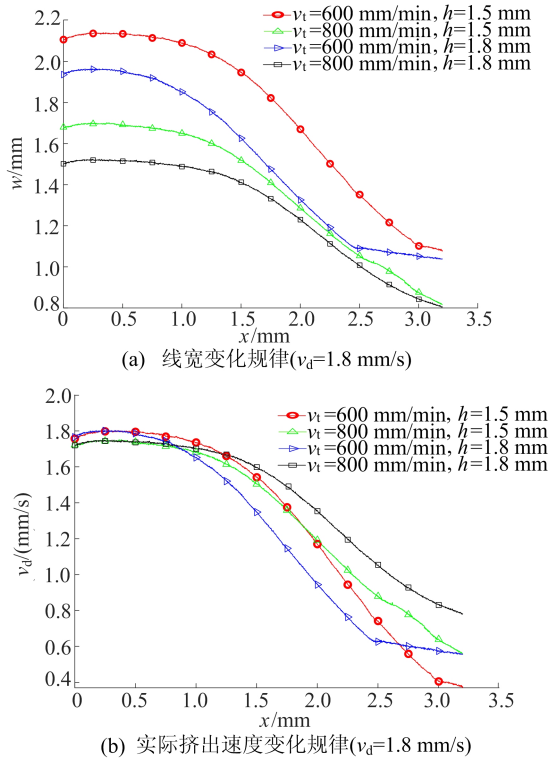


图 6 过填充缺陷分析

从图 6b 可以看出,打印停止时喷嘴挤出速度呈现一个缓慢降低的趋势。

采用与欠填充缺陷分析过程中相同的数据拟合思路,建立喷嘴在打印停止处的挤出速度 v_d 随喷嘴位置 x 变化的模型 $F(v_d, x)$, 即

$$F(v_d, x) = K(1.800 - 0.2867e^x + 0.0018e^{2x} + 0.0015e^{3x}) \quad (7)$$

3 结果与讨论

通过对硅胶挤出增材制造过程中的过填充和欠填充现象的分析,得到过填充和欠填充区域的喷嘴挤出速度变化模型。利用该模型 $F(v_d, x)$ 可以获取某一缺陷位置处的喷嘴挤出速度,然后结合线宽实际模型 $F(w, v_t, v_d, h)$ 即可获得该组打印参数下与喷嘴挤出速度相匹配的喷嘴移动速度大小。本实验对打印模型中打印起始处和拐角处的模型 G 代码进行工艺参数调整,在距离起始点处或者拐角位置停止处的某一位置进行打印点插

值,通过喷嘴挤出速度变化模型 $F(v_d, x)$ 并根据不同的打印参数计算相应位置 x 处的喷嘴挤出速度 v_d ,然后利用线宽模型 $F(w, v_t, v_d, h)$ 计算与之相匹配的喷嘴移动速度 v_t ,对打印 G 代码进行相应的预处理。G 代码处理结果示例如图 7 所示。

```

%G 代码插值示例
II II
G00 X80 Y30 F600
G01 X60.0 F600 E3
G01 Y50.0 F600 E3.0
G01 X80 F600 E3
G01 Y30 F600 E3
II II
G 代码插值之前
%G 代码插值示例
II II
G00 X80 Y30 F600;
G01 X79.3333 E0.185382 F323.656;
G01 X78.6667 E0.126114 F475.762;
G01 X78 E0.108486 F553.067;
G01 X62 E0.120845 F496.503;
G01 X61.3333 E0.218954 F274.031;
G01 X60.6667 E0.89074 F67.3597;
G01 X60 E3 F600;
II II
G 代码插值之后
    
```

图 7 G 代码插值示例

分别对优化前和优化后的模型 G 代码进行相应的硅胶挤出打印实验,打印结果如图 8 所示。

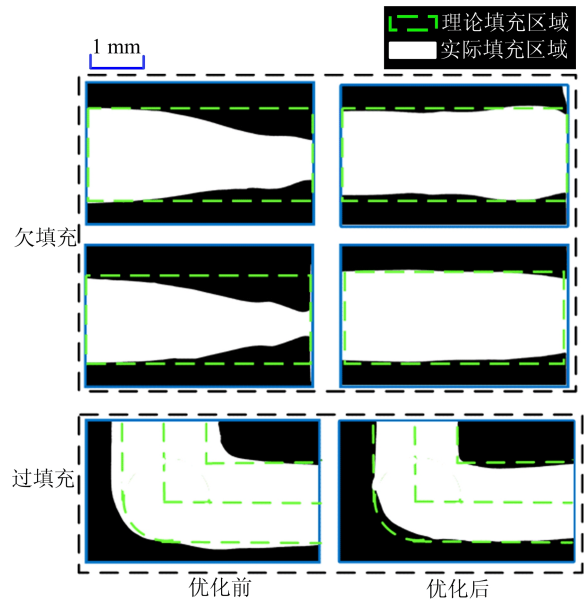


图 8 缺陷优化结果对比

图 8 中:绿色虚线为该组打印参数下的理论填充区域;白色实线为实际打印区域。从图 8 可以明显看出,优化后模型 G 代码的打印结果对打印起始处的欠填充缺陷有了明显改善,并且拐角

处的过填充缺陷在优化后的模型 G 代码打印中线条更加均匀,更加贴近理论填充区域。实验结果验证了本文提出的硅胶挤出增材制造中过填充和欠填充缺陷改善方法的有效性。

4 结 论

本文提出一种基于视觉检测的硅胶挤出欠填充和过填充缺陷的离线优化方法。通过视觉传感器监测打印过程,结合正交试验,获取不同打印参数下的打印线条线宽数据,得到硅胶挤出线宽模型;通过线宽模型分析了喷嘴在硅胶挤出欠填充和过填充缺陷处的喷嘴挤出速度变化规律,建立了速度变化模型,通过对打印模型 G 代码路径中起始处和拐角处的喷嘴挤出速度与移动速度进行重新规划,使之保持匹配关系,改善了硅胶挤出过程中的欠填充和过填充缺陷。实验结果验证了本文优化方法的有效性。

[参 考 文 献]

- [1] KHORASANI M, GHASEMI A, ROLFE B, et al. Additive manufacturing a powerful tool for the aerospace industry [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2022, 28(1): 87-100.
- [2] CLET J A G, LIOU N S, WENG C H, et al. A parametric study for tensile properties of silicone rubber specimen using the bowden-type silicone printer [J]. *Materials*, 2022, 15(5): 1729.
- [3] OU H, SAHLI M, BARRI ÈRE T, et al. Multiphysics modelling and experimental investigations of the filling and curing phases of bi-injection moulding of thermoplastic polymer/liquid silicone rubbers [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(9): 3871-3882.
- [4] LUIS E, PAN H M, SING S L, et al. 3d direct printing of silicone meniscus implant using a novel heat-cured extrusion-based printer [J]. *Polymers*, 2020, 12(5): 1031.
- [5] PLOTT J, TIAN X, SHIH A J. Voids and tensile properties in extrusion-based additive manufacturing of moisture-cured silicone elastomer [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 606-617.
- [6] MA D, TIAN X, WANG S, et al. Strand-morphology-based process optimization for extrusion-based silicone additive manufacturing [J]. *Polymers*, 2021, 13(20): 3576.
- [7] COMMINAL R, SERDECZNY M P, PEDERSON D B, et al. Numerical modeling of the material deposition and contouring precision in fused deposition modeling [C]// *Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin: Austin University of Texas, 2018: 1855-1864.
- [8] ERTAY D S, YUEN A, ALTINTAS Y. Synchronized material deposition rate control with path velocity on fused filament fabrication machines [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 19: 205-213.
- [9] WANG D, ZHANG J. Two improved scanning path planning algorithms and a 3D printing control system with circular motion controller [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2022, 28(4): 695-703.
- [10] JIN Y, DU J, MA Z, et al. An optimization approach for path planning of high-quality and uniform additive manufacturing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(1/2/3/4): 651-662.
- [11] ARMSTRONG A A, NORATO J, ALLEYNE A G, et al. Direct process feedback in extrusion-based 3D bioprinting [J]. *Biofabrication*, 2019, 12(1): 015017.
- [12] TIAN X, LI Y, MA D, et al. Strand width uniformly control for silicone extrusion additive manufacturing based on image processing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119 (5/6): 3077-3090.
- [13] HAN W, JAFARI M A. Coordination control of positioning and deposition in layered manufacturing [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54 (1): 651-659.
- [14] RAO P K, LIU J, ROBERSON D, et al. Online real-time quality monitoring in additive manufacturing processes using heterogeneous sensors [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2015, 137(6): 061007.
- [15] LOMBARDI J P, SALARY R, WEERAWARNE D L, et al. Image-based closed-loop control of aerosol jet printing using classical control methods [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2019, 141(7): 071011.
- [16] HAN W, JAFARI M A, DANFORTH S C, et al. Tool path-based deposition planning in fused deposition processes [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, 124(2): 462-472.

(责任编辑 胡亚敏)