

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.08.009

工艺路径规划算法对 FDM 打印质量与效率的影响

叶总一¹, 薛迪强², 薛迪亮², 薛伟¹, 曹孟辉¹, 张财², 曹宇¹

(1. 温州大学机电工程学院, 浙江温州 325035; 2. 浙江起迪科技有限公司, 浙江温州 325000)

摘要: 为了研究熔融沉积成型 (FDM) 3D 打印技术的工艺路径规划 (挤出路径、打印速度及挤出量等) 对打印质量和打印效率的影响, 提高 FDM 的打印效果, 使用三款不同的工艺软件 (QidiPrint, FlashPrint 及 Simplify3D) 对工艺路径进行规划。通过分析三款不同的工艺软件的工艺路径规划算法和打印实体模型, 发现三者的挤出方式虽然不同, 但均采用复合挤出的方式, 将偏置挤出和往复直线挤出的优点最大化, 且由外向内的挤出方式打印模型表面质量更优; 层间连贯轨迹的设计能增加打印的连贯性, 可使产品具有更好的整体性; 通过合理地安排挤出路径, 有助于提高产品的表面工艺质量, 减少打印过程中的走空路径, 降低“台阶效应”和拉丝现象, 节省打印时间和耗材用量。

关键词: 熔融沉积成型; 表面质量; 挤出路径; 拉丝

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)08-0046-06

Influences of Process Path Planning Algorithm on FDM Printing Quality and Efficiency

Ye Zongyi¹, Xue Diqiang², Xue Diliang², Xue Wei¹, Cao Menghui¹, Zhang Cai², Cao Yu¹

(1. College of Mechno-Electronic, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China;

2. Zhejiang Qidi Technology Co., Ltd., Wenzhou 325000, China)

Abstract : In order to study the influences of process path planning (extrusion path, printing speed and extrusion amount, etc.) of fused deposition molding (FDM) 3D printing technology on printing quality and printing efficiency, and improve the printing effect of FDM, three different process software (QidiPrint, FlashPrint and Simplify3D) were used to plan the process path. By analyzing the processes of three different process software path planning algorithm and print the entity model, it is found that although three extrusion ways are different, but they all adopt the way of compound extrusion, it will maximize the advantages of offset extrusion and reciprocating linear extrusion, and the outside-in extrusion mode's surface quality is better. The design of interlayer coherent trajectory can increase the consistency of printing and make the product more holistic. By reasonably arranging path can improve the quality of the mode's surface, reduce the empty path in the process of printing, reduce the "step effect" and the phenomenon of drawing, save printing time and dosage of consumables.

Keywords : fused deposition molding ; surface quality ; extrusion path ; wire drawing

3D 打印技术 (亦称增材制造或快速成型技术) 是一种以三维 CAD 模型为基础, 采用高温、激光或其它方式将液态、粉末、片状等拥有特殊性质的材料逐层堆积, 将二维平面累积成三维实体模型的先进制造技术^[1]。3D 打印技术因其能够快速制备复杂型面零部件、耗材最小化以及完全数字化设计与制造的显著优点^[2-3], 近几年得到飞速的发展, 在航天航空、医疗器械、工业制造、建筑模型、汽车等领域都

得到了广泛的应用^[4]。目前, 较成熟的 3D 打印技术包括: 光固化成型 (SLA)、分层实体制造 (LOM)、选择性激光烧结 (SLS)、熔融沉积成型 (FDM)、选择性激光熔化 (SLM) 等技术^[5]。

FDM 技术最初于 1988 年由美国学者 Scott Crump 博士提出, 1993 年 Stratasys 公司推出了全球第一台商业化的 FDM 设备^[6]。FDM 的工艺原理是通过将热塑性材料送入高温喷头中, 使其加热至熔

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1609209), 浙江省自然科学基金杰出青年团队项目 (LR15E05003), 温州市公益性科技项目 (G20170001)

通讯作者: 曹宇, 博士, 副教授, 主要研究方向为激光加工技术 E-mail: yucaao@wzu.edu.cn

收稿日期: 2018-06-05

引用格式: 叶总一, 薛迪强, 薛迪亮, 等. 工艺路径规划算法对 FDM 打印质量与效率的影响 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(8): 46-51, 57.

Ye Zongyi, Xue Diqiang, Xue Diliang, et al. Influences of process path planning algorithm on FDM printing quality and efficiency[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(8): 46-51, 57.

融态后通过挤压使熔融态的材料从喷头流出,在工作台上逐渐冷却凝固、与周围材料粘结并逐层累积而成型^[7-8],如图 1 所示。因为其特有的工作方式,所以 FDM 拥有设备成本低、环保、成型材料广泛和后处理简单等特点。随着相关技术的不断发展,多喷头、高精度、多色彩、大型器件等各种难题也不断被攻克^[9-10]。

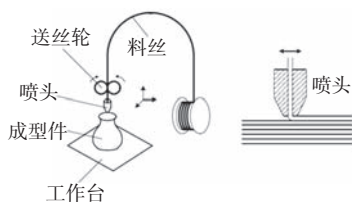


图 1 FDM 成型原理图

目前国外大多数 3D 打印机产商都会开发适合自己产品的工艺软件,适合桌面级 3D 打印机的有 QidiPrint, FlashPrin, Slic3r, Cura、Simplify3D 和 Kisslicer 等^[11]。其中 Simplify3D 具有较好的兼容性,支持绝大多数桌面级打印机,不仅能够对模型进行切片,还能修复模型中出现的问题,被称为 FDM 工艺软件中的“瑞士军刀”。国内的 3D 打印工艺软件起步较晚,在 20 世纪 90 年代才开始涉足 3D 打印技术领域^[12],近年来从事 3D 打印的相关企业不断涌现,自主开发的工艺软件功能也日益完善^[11-13]。

对 FDM 工艺而言,三维模型的精度和效率是评价 3D 打印技术的重要指标,影响较大的工艺参数主要有挤出路径、打印速度和挤出量等^[14],而这三个参数均由 FDM 工艺软件直接生成并固化在驱动打印机挤出头运动的 G-code 中,所以 FDM 工艺软件的工艺规划算法优劣将直接影响到打印质量的好坏^[15]。一般打印速度和挤出量会对模型的表面质量影响较大,典型的缺陷有如“台阶效应”、拉丝、缺丝等;而挤出路径则对模型的整体形貌影响较大,典型的缺陷如翘曲变形和表面塌陷等^[16-17]。笔者对比了国内外三款不同 FDM 工艺软件的工艺规划算法,通过对照打印模型实验,研究其打印质量优劣的内在机理,为工程领域 FDM 工艺软件开发提供共性的技术方案。

1 实验部分

1.1 主要原材料

聚乳酸 (PLA) 丝材: 4032D, 直径为 1.75 mm, 深圳市华海天贸科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

3D 打印机: X-SMART 型, 浙江起迪科技有限

公司;

QidiPrint 软件: V4.2.10 版本, 浙江起迪科技有限公司;

FlashPrint 软件: V3.20.0 版本, 浙江闪铸三维科技有限公司;

Simplify3D 软件: V4.0.1 版本, 德国 RepRap 公司。

1.3 实验方法

采用控制变量法设计对比实验。首先使用三款不同的工艺软件在相同打印工艺参数设置下对两组模型进行切片, 生成挤出头运动路径代码 G-code, 然后使用 X-SMART 型 3D 打印机进行打印测试。最后对打印生成的模型的表面质量以及切片软件生成的 G-code 进行对比, 并分析不同的工艺路径规划算法对产品的打印质量及打印效率的影响机理。

实验中采用的打印工艺参数列于表 1。

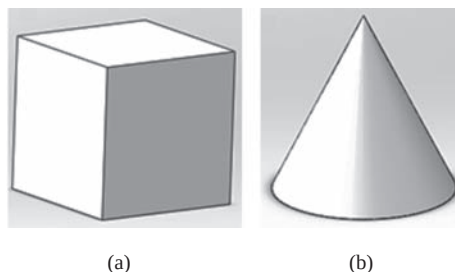
表 1 FDM 打印工艺参数

项目	参数
层厚 / mm	0.18
填充密度 / %	15
填充图案	直线
打印温度 / °C	190
打印平台温度 / °C	45
喷嘴直径 / mm	1.75
打印速度 / (mm · s ⁻¹)	50
走空速度 / (mm · s ⁻¹)	60

2 结果与讨论

2.1 三维模型的切片填充算法

使用 QidiPrint, FlashPrint, Simplify3D 软件对两个基本几何体模型 (边长为 20 mm 的立方体和高度为 20 mm、底径为 20 mm 的圆锥体), 如图 2 所示。基于表 1 中的 FDM 打印工艺参数, 分别进行切片、填充, 并打印测试。



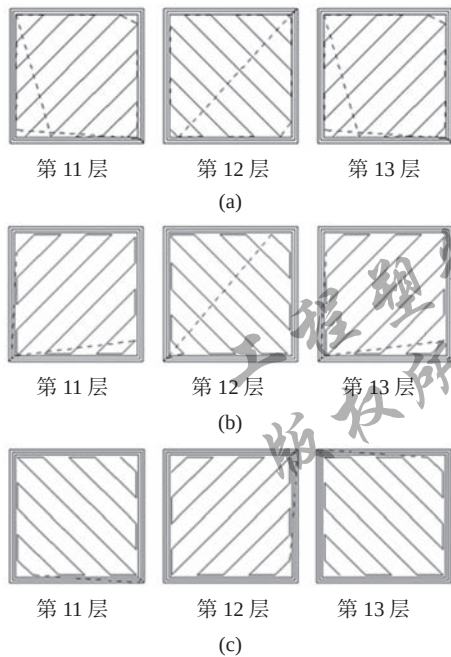
a—边长为 20 mm 的立方体; b—高度为 20 mm、底径为 20 mm 的圆锥体

图 2 对比测试的两个基本几何体的三维模型

将这两个模型以 STL 格式保存, 用三款软件分别切片、填充后得到 6 个 G-code 文件。分析 G-code 文件内容可知, 立方体的 3 个切片层数均为 111 层, 与层厚设置一致; 圆锥体的 3 个切片层

数中,FlashPrint为完整的111层,而QidiPrint和Simplify3D均为108层,缺失了圆锥体尖部的3层。经模型仿真可知,此缺失的3层切片本质上为高度0.54 mm、底径0.27 mm的相似圆锥体,可以判断QidiPrint和Simplify3D对于此类尖细结构采用了工艺算法优化。这是由于目前的FDM工艺无法做到完全停丝,恰好可利用打印结束时多余的出丝来补足圆锥体尖部的3层。

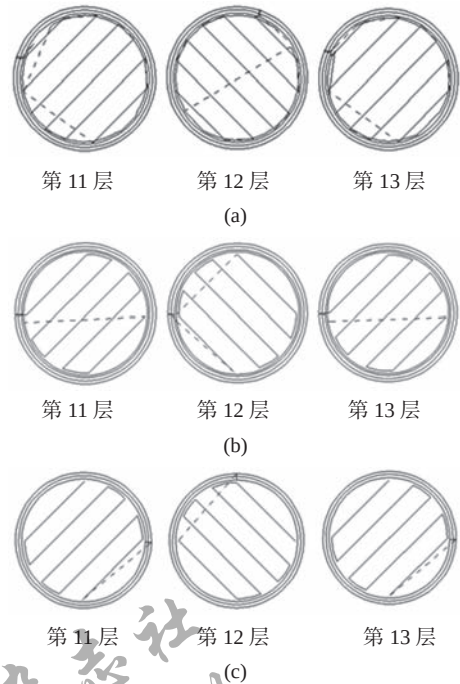
进一步比较三款软件的挤出路径规划算法差异。分别取6个G-code文件的第11至13层gcode,将其挤出路径用AutoCAD绘制,如图3、图4所示。图中从左边到右依次为第11,12,13层,实线代表挤出路径,虚线代表走空路径。



应用软件: a—QidiPrint 软件; b—FlashPrint 软件; c—Simplify3D 软件

图3 立方体第11~13层的挤出路径规划算法

目前,FDM打印技术的挤出方式已有多种,其主要包括往复直线挤出、偏置挤出、自适应挤出、分层变向挤出等。往复直线挤出是最先提出的挤出方式,它简单、快速、使用非常方便,但容易产生拉丝和“台阶效应”,使成型精度降低;偏置挤出虽然成型精度较高,但轮廓偏置会出现自相交,导致算法比较复杂;自适应挤出能够解决挤出间距与分层厚度的误差等问题。同一方向的挤出会使模型在各个方向上的力学性能不同,会引起模型的翘曲变形,而采用分层变向挤出能解决这一问题。对比图3和图4可以清楚地看到,3款软件在整体上均采用分层变向挤出,而对于每一单层则采用外壳为偏置挤出、内部填



应用软件: a—QidiPrint 软件; b—FlashPrint 软件; c—Simplify3D 软件

图4 圆锥体第11~13层的挤出路径规划算法

充为往复直线挤出的复合挤出。根据G-code可知,使用QidiPrint软件时采用先打印内部填充、后打印外壳的方法;而使用FlashPrint和Simplify3D软件时则采用先打印外壳、后打印内部填充的方法。在QidiPrint软件所生成的挤出路径中,走空行程最多,而Simplify3D软件的走空路径最少;Simplify3D软件以前一层的打印结束点作为后一层的打印起始点,而QidiPrint和FlashPrint软件则需在每一层打印结束之后回到一个固定点,再进行下一层的打印。这种层间过渡方式上的差别会对产品的表面质量和整体性能产生较大影响。此外,使用FlashPrint软件在打印过程中会根据情况的不同精细调整打印速度:在打印外壳时打印速度由25 mm/s的起步速度逐渐增至50 mm/s,并在外壳打印即将结束时打印速度由50 mm/s逐渐降至5 mm/s,内部填充的打印速度为35 mm/s;而使用QidiPrint和Simplify3D软件则对打印速度没有详细的调整:使用QidiPrint软件时的外壳打印速度为25 mm/s,内部填充打印速度为50 mm/s,而使用Simplify3D软件时的外壳打印速度为16.6 mm/s,内部填充的打印速度为33.1 mm/s。

基于上述6个G-code打印出来的模型实际几何尺寸,测量结果列于表2。可以发现,三款软件的几何尺寸精度均较高,除了使用QidiPrint软件的圆

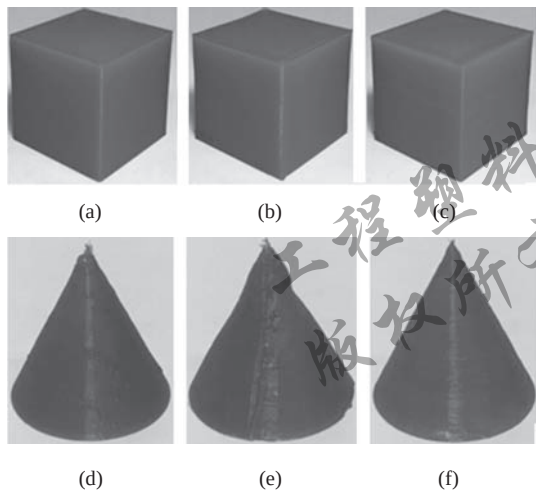
锥高度以外,其余尺寸偏差均在 ± 0.5 mm 以内,并且相比之下,使用 FlashPrint 和 Simplify3D 软件的打印模型几何尺寸精度比使用 QidiPrint 软件稍高。这是由于使用 QidiPrint 软件先内部填充再外壳的工艺规划算法导致的。

表 2 不同工艺软件的模型打印几何尺寸测量结果 mm

模型		理论尺寸	QidiPrint 软件		FlashPrint 软件		Simplify3D 软件	
			测量值	尺寸偏差	测量值	尺寸偏差	测量值	尺寸偏差
立方体	长度	20	20.30	+0.30	20.00	0	20.10	+0.10
	宽度	20	20.28	+0.28	20.10	+0.10	20.08	+0.08
	高度	20	20.10	+0.10	20.04	+0.04	20.10	+0.10
圆锥	底径	20	19.90	-0.10	19.96	-0.04	19.80	-0.20
	高度	20	19.32	-0.68	19.72	-0.28	19.82	-0.18

2.2 成型零件的表面质量分析

基于三款软件 G-code 打印的立方体和圆锥体模型成品照片图 5 所示。



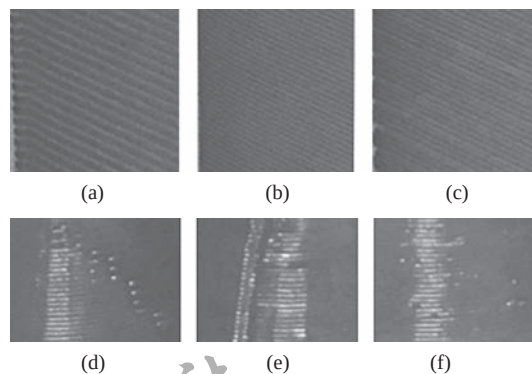
应用软件: a, d—QidiPrint 软件; b, e—FlashPrint 软件; c, f—Simplify3D 软件

图 5 基于三款软件 G-code 打印的立方体和圆锥体模型成品照片

由图 5 可以看出,使用 QidiPrint 和 Simplify3D 软件打印的成品质量较好,而使用 FlashPrint 软件打印的成品有明显的表面缺陷:立方体的四个顶角有凸起,圆锥的顶部出现严重拉丝和塌陷,且有一条明显的凸起条纹,在该处有明显的耗材堆积过量的现象。通过观察打印过程可以发现,这是由于 FlashPrint 软件无法控制 X-SMART 的挤出头回抽造成的,在打印立方体的拐角时会减速并回抽耗材,在打印圆锥顶部时喷头会远离圆锥顶部,暂停等待耗材冷却,导致了严重的堆积过量和拉丝问题的产生。根据 G-code 可计算出使用 QidiPrint, FlashPrint 和 Simplify3D 软件分别打印立方体模型的第 11 层所挤出的耗材量分别为 9.554 2, 12.039 8,

9.955 9 mm, FlashPrint 软件的挤出量明显比其它两个多,而 Simplify3D 的挤出量比 QidiPrint 略高是因为其内部填充所消耗的材料多一些。

使用 QidiPrint, FlashPrint 和 Simplify3D 软件打印立方体侧棱细微形貌及圆锥体表面细微缺陷照片如图 6 所示。



应用软件: a, d—QidiPrint 软件; b, e—FlashPrint 软件; c, f—Simplify3D 软件

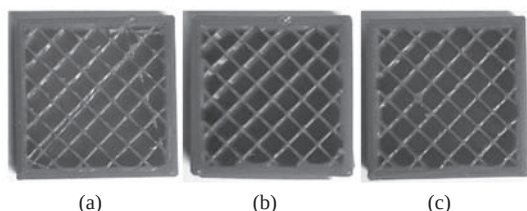
a, b, c—立方体侧棱; d, e, f—圆锥体表面

图 6 使用三款软件打印的立方体模型侧棱及圆锥体模型表面细微形貌照片

对立方体而言,使用 QidiPrint, FlashPrint 和 Simplify3D 软件打印的立方体表面均存在不同程度的“台阶效应”,并且在棱上更加明显。由于 QidiPrint 和 Simplify3D 软件采用的是固定打印速度 (3000 mm/min),而 FlashPrint 软件采用变速的打印策略 (由 G-code 可知,使用 FlashPrint 软件对最外层的外壳打印速度降低到 994 ~ 1500 mm/min 之间),相对较慢的打印速度将使得 PLA 材料有更多的时间与前层表面熔融结合,从而降低了使用 FlashPrint 软件打印立方体模型的表面粗糙度。然而,对圆锥体而言,这种变速度打印策略使得 FlashPrint 软件打印的圆锥顶部由于挤出量的配合不易合拍导致出现严重的拉丝现象,如图 6e 所示,而使用 QidiPrint 和 Simplify3D 软件打印的圆锥呈现出了较好的锥度,表面虽然仍然存在大量的缺丝,但每一处都较轻微。

使用 QidiPrint, FlashPrint 和 Simplify3D 软件打印的立方体模型截面照片如图 7 所示。

由图 7 可以看出,使用 QidiPrint 软件打印的立方体内部存在相对较多的拉丝现象,而使用 FlashPrint 和 Simplify3D 软件打印的立方体内部则拉丝现象较少。这是因为在成型机理上,喷头出口处的耗材是处于熔融状态的,具有较好的粘性,由于

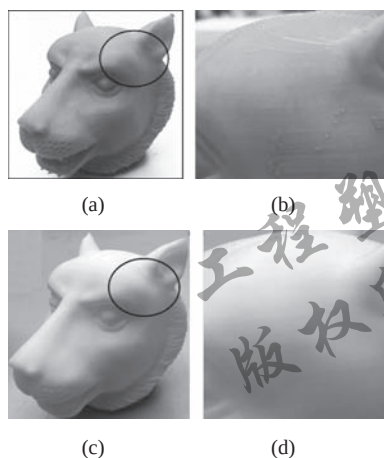


应用软件: a—QidiPrint 软件; b—FlashPrint 软件;
c—Simplify3D 软件

图7 使用三款软件打印的立方体模型截面照片

重力作用即使利用回抽来控制也无法完全避免拉丝现象的产生, QidiPrint 软件工艺路径规划中较多的走空行程导致产品内部出现更多的拉丝现象。

为了进一步研究挤出路径对打印质量的影响, 选取打印速度和挤出量比较相近、但挤出路径差异较大的 QidiPrint 及 Simplify3D 两款软件打印的虎头模型及局部放大照片如图 8 所示。

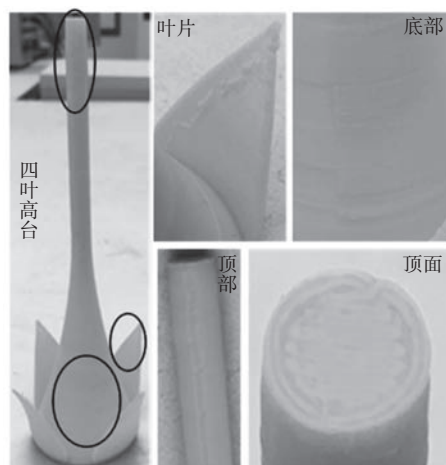


应用软件: a, b—QidiPrint 软件; c, d—Simplify3D 软件
a, c—虎头模型; b—a 图的局部 (椭圆圈) 放大图;
d—c 图的局部 (椭圆圈) 放大图

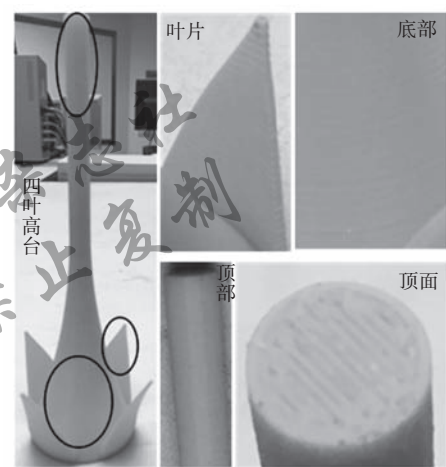
图8 使用 QidiPrint 和 Simplify3D 软件打印的
虎头模型及局部放大照片

由图 8 可以看出, 使用 QidiPrint 软件打印的虎头模型表面有较多的拉丝现象。通过对使用 QidiPrint 和 Simplify3D 软件打印的虎头模型的侧面进行局部放大, 可以明显看出, 使用 QidiPrint 软件打印的虎头表面有明显的“台阶效应”以及缺丝、多丝现象, 而使用 Simplify3D 软件打印的虎头表面则比较光滑、平整。

在打印过程中, 顶部的误差会随着层数的增加逐渐增大。相比虎头模型, 四叶高台模型更高、更细, 因此其顶部受到的影响会变得非常明显。使用 QidiPrint 软件打印的四叶高台模型及局部放大照片如图 9 所示。



(a)



(b)

应用软件: a—QidiPrint 软件; b—Simplify3D 软件

图9 使用 QidiPrint 和 Simplify3D 软件打印的
四叶高台模型及局部放大照片

由图 9 可以看出, 使用 QidiPrint 软件打印四叶高台模型时, 过多的走空路径造成叶片表面比使用 Simplify3D 软件打印时有更多的拉丝现象, 且模型底部有不规则台阶。在模型顶部, 使用 QidiPrint 软件打印的四叶高台模型变得凹凸不平, 表面有明显的连接缝隙, 且其顶面变成了椭圆; 而使用 Simplify3D 软件打印时则能保持良好的工艺质量。造成这种现象的原因主要是由于使用 QidiPrint 软件打印时在每层打印结束都会回到同一个点, 在该点的短暂停留使得该处的材料堆积过量, 热量也逐渐累积。而使用 Simplify3D 软件打印时则避免了该问题的发生, 而且其打印速度更慢, 有充分的时间让热量散发, 使打印模型具有更好的整体性。

3 结论

通过分析和对比三款 3D 打印工艺软件的工艺

路径规划算法及打印实体模型,得到如下结论:

(1) 复合挤出能够充分结合偏置挤出和往复直线挤出的优点,使用成型精度较高的偏置挤出打印模型的外壳,然后使用挤出速度较快的往复直线挤出打印模型的内部填充,并结合自适应挤出和分层变向挤出对挤出路径加以调整,先打印模型表面,再打印内部填充层能够得到较好的表面质量。

(2) 相比在一层打印结束之后回到一个固定点,然后开始下一层打印的打印方式,在一层打印结束之后,以该层的终点作为下一层的打印起点,直接开始下一层打印的打印方式,能够较好地避免打印过程中在起点处的耗材堆积过量现象的发生。

(3) 通过合理安排挤出路径,能使走空路径降至最低,避开交点的重复打印,在减少打印时间的同时也减少了耗材的损耗。

(4) 挤出路径、打印速度及挤出量对打印质量有着直接的影响,尤其是不同挤出路径对表面质量有着较大的影响,也直接决定了模型整体性的优劣,合理地安排这三个参数能够大幅度提高打印质量。

参考文献

- [1] 唐通鸣,张政,邓佳文,等.基于FDM的3D打印技术研究现状与发展趋势[J].化工新型材料,2015,43(6):228-230,234.
Tang Tongming, Zhang Zheng, Deng Jiawen, et al. Research status and trend of 3D printing technology based on FDM[J]. New Chemical Materials, 2015, 43(6):228-230, 234.
- [2] 周胜.3D打印工艺的优化设计[D].武汉:武汉理工大学,2015.
Zhou Sheng. Optimizing design of the process in the 3D printing[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2015.
- [3] 马昊鹏,迟百宏,焦志伟,等.FDM工艺制品精度分析及优化方法[J].塑料,2017,46(3):92-95,102.
Ma Haopeng, Chi Baihong, Jiao Zhiwei, et al. The accuracy analysis of FDM technology product and the optimization methods[J]. Plastics, 2017, 46(3):92-95, 102.
- [4] 晁艳艳.基于FDM技术的3D打印路径规划技术研究[D].长春:长春工业大学,2016.
Chao Yanyan. Research on 3D printing path planning technology based on FDM technology[D]. Changchun:Changchun University of Technology, 2016.
- [5] 迟百宏.聚合物熔体微分3D打印成形机理与实验研究[D].北京:北京化工大学,2016.
Chi Baihong. Forming mechanism and experimental study of polymer melt differential 3D printing[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [6] 侯章浩.熔融沉积成型的路径规划研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2015.
Hou Zhanghao. Research on the path planning of fused deposition modeling[D]. Urumchi:Xinjiang University, 2015.
- [7] 郭宇鹏.FDM桌面型3D打印机的整体设计及成型工艺研究[D].太原:中北大学,2017.
Guo Yupeng. Study on the overall design and forming technology of FDM desktop 3D printer[D]. Taiyuan:North University of China, 2017.
- [8] 于彦东,孟陈力.基于PLA丝材的FDM试件综合性能的研究[J].哈尔滨理工大学学报,2018(3):60-65.
Yu Yandong, Meng Chenli. How the filling patterns influence the comprehensive performance on FDM specimens based of PLA filament[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2018(3):60-65.
- [9] 张洋.基于FDM技术的3D打印机机械结构设计及控制系统研究[D].长春:长春工业大学,2017.
Zhang Yang. Research on mechanical structure design and control system for the 3D printer based on FDM technology[D]. Changchun:Changchun University of Technology, 2017.
- [10] 沈冰夏,管宇鹏.FDM型混色3D打印机的设计[J].北京信息科技大学学报:自然科学版,2016,31(5):60-63.
Shen Bingxia, Guan Yupeng. A design of color mixing fused deposition modeling 3D printer[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University:Natural Science Edition, 2016, 31(5):60-63.
- [11] 郭翠平.基于STL模型的冰模快速成型切片算法研究[D].淄博:山东理工大学,2017.
Guo Cuiping. Research on slicing algorithm of ice mold rapid prototyping based on STL model[D]. Zibo:Shandong University of Technology, 2017.
- [12] 田明海.3D打印机等层厚切片算法研究及软件实现[D].沈阳:沈阳工业大学,2016.
Tian Minghai. Research of equal thickness slicing algorithm and realization for 3D printer software[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology, 2016.
- [13] 陈鹏,刘焱,梅永亮.FDM桌面3D打印机的创新设计[J].机械设计,2017,34(2):126-128.
Chen Peng, Liu Yan, Mei Yongliang. Innovative design of FDM desktop 3D printing machine[J]. Journal of Machine Design, 2017, 34(2):126-128.
- [14] 王占礼,晁艳艳,胡艳娟,等.改进的Hilbert曲线在FDM路径规划中的应用[J].机械设计与制造,2016(3):186-188,192.
Wang Zhanli, Chao Yanyan, Hu Yanjuan, et al. Application of improved hilbert curve in the path planning of FDM[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(3):186-188, 192.
- [15] 韩江,王益康,田晓青,等.熔融沉积(FDM)3D打印工艺参数优化设计研究[J].制造技术与机床,2016(6):139-142,146.
Han Jiang, Wang Yikang, Tian Xiaqing, et al. Design and study

- gloves[J]. China Rubber, 2017, 33(17):19–23.
- [2] 黄东, 骆雁. PVC 糊树脂技术及市场分析[J]. 中国氯碱, 2016(7):15–19.
- Huang Dong, Luo Yan. Domestic technique and market analysis of PVC paste resin[J]. China Chlor-Alkali, 2016(7):15–19.
- [3] 王久根, 章维明. 仿手掌皮肤的手套设计[C]//2006 全国摩擦学学术会议论文集. 哈尔滨:[出版者不详], 2006.
- Wang Jiugen, Zhang Weiming. Bionic desin of gloves mimicking palm skin[C]//National Tribology Conference Proceedings 2006. Harbin:[s. n.], 2006.
- [4] 江林峰, 陈雷, 李一新. Al_2O_3 防滑粒料对防滑涂层防滑及磨损性能的影响[J]. 涂料工业, 2014(1):6–11.
- Jiang Linfeng, Chen Lei, Li Yixin. Effects of Al_2O_3 nonskid particles on antiskid and wear performance of non-skid coating[J]. Paint & Coatings Industry, 2014, 1:6–11.
- [5] Fan Chuanjie, Zhou Xiaodong. Effect of emulsifier on poly (urea-formaldehyde) microencapsulation of tetrachloroethylene[J]. Polymer Bulletin, 2011, 67(1):15–27.
- [6] 刘燕, 王月, 张少峰. PVC 木塑发泡复合材料的力学性能和密度[J]. 塑料, 2014, 43(5):83–85.
- Liu Yan, Wang Yue, Zhang Shaofeng. Mechanical properties and density of PVC wood-plastic composite[J]. Plastics, 2014, 43(5):83–85.
- [7] 吴成海. BF-470HB 型钡锌复合热稳定剂在 PVC 发泡革中的应用[J]. 塑料助剂, 2018(1):35–37, 45.
- Wu Chenghai. The application of barium zinc composite heat stabilizer BF-470HB in PVC foaming leather[J]. Plastics Additives, 2018(1):35–37, 45.
- [8] 胡晓丽. PVC 发泡板及 PP 塑料在室内植物墙工程中的应用研究[J]. 当代化工, 2017(12):2 603–2 605, 2 609.
- Hu Xiaoli. Study on application of PVC foaming board and PP plastic in indoor plant wall engineering[J]. Contemporary Chemical Industry, 2017(12):2 603–2 605, 2 609.
- [9] 李静, 刘浩, 刘容德, 等. PVC 木塑发泡材料性能的研究[J]. 聚氯乙烯, 2017(1):9–19.
- Li Jing, Liu Hao, Liu Rongde, et al. Study on properties of PVC-based wood-plastic composite foamed materials[J]. Polyvinyl Chloride, 2017(1):9–19.
- [10] 钱志轩. 关于聚氯乙烯树脂常见发泡材料种类的讨论[J]. 西部皮革, 2017(12):18.
- Qian Zhixuan. Discussion on kinds of common foaming materials for PVC resins[J]. West Leather, 2017(12):18.
- [11] 吴晓红, 蒋彩云, 李晓华, 等. 白酒接触塑料中增塑剂迁移规律研究[J]. 广州化工, 2015(1):105–107.
- Wu Xiaohong, Jiang Caiyun, Li Xiaohua, et al. Research for migration rule of plasticizer in liquor contact plastics[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2015(1):105–107.
- [12] 谢世汉. 为什么静摩擦系数大于动摩擦系数[J]. 江西师范大学学报:自然科学版, 1984(2):44–46.
- Xie Shihan. Why static friction coefficient is greater than dynamic friction coefficient[J]. Journal of Jiangxi Normal University:Natural Sciences Edition, 1984(2):44–46.
- [13] 罗珊, 王武康. 家具防震设计中脚垫材料与不同地面间静摩擦系数的研究[J]. 木材加工机械, 2017(1):27–30.
- Luo Shan, Wang Wukang. The research on the coefficient of static friction between the different ground and the furniture feet mats materials in the furniture shockproof design[J]. Wood Processing Machinery, 2017(1):27–30.
- [14] 段晓霞, 孙世戎, 冯伟宏, 等. 聚氨酯弹性体跟面不同性能之间关系的研究[J]. 中国皮革, 2014, 43(24):104–107.
- Duan Xiaoxia, Sun Shiyu, Feng Weihong, et al. Research on relationship among different porperties of polyurethane elastomer heel [J]. China Leather, 2014, 43(24):104–107.
- [15] 王豪清, 童宏拓, 王祝兵, 等. 合成革及皮革与布料间的摩擦系数研究[J]. 中国皮革, 2016, 45(11):8–11.
- Wang Haoqing, Tong Hongtuo, Wang Zhubing, et al. Rsearch on friction coefficient between synthetic leather or natural leather and cloth [J]. China Leather, 2016, 45(11):8–11.
- [16] 王梦蛟, 王进文. 填料对轮胎抗湿滑性能的影响(一):水的润滑作用与填料-弹性体的相互作用(上)[J]. 世界橡胶工业, 2013, 40(2):1–9.
- Wang Mengjiao, Wang Jinwen. Effect of filler on the resistance to tire-slip of tire (I):The interaction of water lubrication and filler-elastomer (Part I)[J]. World Rubber Industry, 2013, 40(2):1–9.

(上接第 51 页)

- of fused deposition modeling(FDM) 3D printing process parameters optimization[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(6):139–142, 146.
- [16] 王建, 张弓, 王卫军, 等. FDM 成型技术中的扫描路径生成方法研究[J]. 制造技术与机床, 2018(1):107–110.
- Wang Jian, Zhang Gong, Wang Weijun, et al. Research on scanning path generation approach in FDM molding technology[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018(1):107–110.
- [17] 曹师增, 刘元义, 宋发成, 等. 基于矩阵分析法的 FDM 样件翘曲变形参数优化研究[J]. 山东理工大学学报:自然科学版, 2018, 32(4):61–64.
- Cao Shizeng, Liu Yuanyi, Song Facheng, et al. Parameters optimization study in warp deformation of FDM parts based on matrix analysis method[J]. Shandong University of Technology:Natural Science Edition, 2018, 32(4):61–64.