

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.06.007

# 色母粒影响聚乳酸成型质量的实验研究

王忠飞, 魏 辉, 金 灵

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

**摘要:**针对不同添加剂(色母粒等)的聚乳酸(PLA)材料,在熔融沉积式(FDM)打印机成型质量不同的问题上,对 FDM 打印机成型过程涉及的工艺参数进行归纳研究,提出了一种根据 PLA 添加剂(色母粒等)不同而进行调整 FDM 成型工艺参数的方法。基于材料力学的理论知识,建立了 PLA 材料成型过程的数学模型,选取了某厂家同批次的 6 种 PLA 材料,用正交试验方法验证了不同添加剂(色母粒等)的 PLA 材料对成型质量的影响。实验结果表明,添加剂色母粒对聚乳酸成型质量有较大影响,使用不同色母粒添加剂的聚乳酸时,必须适当调整成型工艺参数,以保证成型质量,并能够有效指导 PLA 材料在桌面版 3D 打印机的应用。

**关键词:**PLA;FDM;褶皱变形;工艺参数;色母粒

中图分类号:TH164;TH140

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)06-0679-06

## Effect of masterbatch to the printing quality of polylactic acid

WANG Zhong-fei, WEI Hui, JIN Ling

(The Ministry of Education Key Lab of Mechanical Manufacture & Automation,  
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of printing quality with different additives(masterbatch etc.) in polylactic acid(PLA), technological parameter was researched, a method was presented to adjust the technological parameter according to the PLA with different additives. A mathematic model of printing process was established based on the theory of material mechanics, an experiment was designed to verify the influence that the additives(masterbatch, etc.) on printing quality. 6 kinds of PLA materials with different kinds of masterbatch with the same batch, on the desktop FDM printer were tested and verified by the orthogonal experiment. The experimental results show that the masterbatch in PLA has great influence on printing quality. To obtain a better printing effect, the technological parameter should be adjusted because of the physical properties changed by the additives in PLA. The research can effectively guide the application of the PLA materials on desktop 3D printer.

**Key words:** polylactic acid (PLA); fused deposition modeling (FDM); fold deformation; technological parameter; masterbatch

## 0 引 言

随着 3D 打印技术的快速发展,越来越多的桌面版 FDM 打印机进入家庭,办公室等场合<sup>[1-4]</sup>。PLA 以其无毒、无刺激性、不污染环境等优良特性成为最受欢迎的桌面版 FDM 打印机的成型材料<sup>[5]</sup>。同种 PLA 材

料添加色母粒种类和比例的不同,对材料的实际收缩率影响,目前尚未发现有文献记录。成型过程中 PLA 的收缩特性,导致模型表面有翘曲变形和大倾角褶皱变形。当前国内外在成型过程中翘曲变形问题上已有一定研究<sup>[6-7]</sup>,但对于模型外表面的褶皱变形问题,尚未有较好的解决方案。

一般来说,同一厂家出产的同种类型的 PLA 材

收稿日期:2016-02-17

作者简介:王忠飞(1971-),男,河南南阳人,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事机电系统控制技术、并联机器人机构及相关理论方面的研究。E-mail:wzf1225@hznc.com

料,其主要成分及比例是相同的,通过添加不同种类、不同比例的色母粒颗粒以实现各种颜色。由于不同颜色的 PLA 材料其添加剂色母粒的种类以及比例不同,不同颜色的 PLA 材料,其物理特性不同,对打印工艺的要求也不同<sup>[8]</sup>。因此,如何调整工艺参数以适合不同颜色的 PLA 材料的物理特性成了能否获得较好的成型质量至关重要的问题<sup>[9-10]</sup>。

因此,基于材料力学理论,本研究建立 PLA 成型过程中外表面褶皱缺陷的数学模型,并分析成型过程中涉及的几个重要工艺参数(层厚,喷嘴温度,倾角,速度)对成型过程中褶皱缺陷的影响,然后针对不同添加剂的 PLA 材料设计实验,用正交法对 FDM 打印机成型的几个重要工艺参数进行研究,以获得较好的成型效果;根据反复实验的结果分析,可为用户或研究者提供一个调整工艺参数的参考。

## 1 模型成型问题的分析

色母粒是由高比例颜料或添加剂与热塑性树脂,经过良好的分散而成的塑料着色剂,其所选用的树脂对着色剂具有良好的分散作用,并与被着色材料相容性良好。不同颜色的 PLA 材料是由添加剂色母粒的种类以及比例不同。原生态的 PLA 材料的结晶度为 0—1%,而色母粒等添加剂会改变 PLA 的结晶度。结晶度的不同从而影响 PLA 材料的收缩系数,抗拉强度等物理特性<sup>[11]</sup>,这样在 FDM 成型机成型过程中对打印工艺的要求也不同。因此,如何调整工艺参数<sup>[12]</sup>以适合不同颜色的 PLA 材料的物理特性成了能否获得较好的成型质量至关重要的问题。

在熔融沉积(FDM)成型过程中,PLA 材料经历了固态、熔融态、固化这 3 个阶段。PLA 材料经过固化这个阶段中,挤出机构的喷嘴温度( $T_{\text{outer}}$ )冷却固化到室温( $T_e$ ),模型内部产生的内应力会使模型体积收缩,最终导致变形。

成型过程中,实体的每一层都是由内圈,外圈和填充组成,FDM 成型过程褶皱变形原理图如图 1 所示。假设新的一层冷却固化后自由收缩,与其前一层完全分离,如图 1(b)所示,这样其堆积层收缩量为: $\varepsilon = \alpha\Delta T$ ,内应力: $\sigma = 0$ (其中: $\alpha$ —材料的收缩系数, $\Delta T = T_{\text{out}} - T_e$ )。

笔者期望的情况为当前层与上层模型或者平板粘结在一起,没有变形,如图 1(a)所示,即: $\varepsilon = 0$ 。则此时内应力: $\sigma = -E\alpha\Delta T$ (其中: $E$ —材料的热变形阶段的弹性模量)。

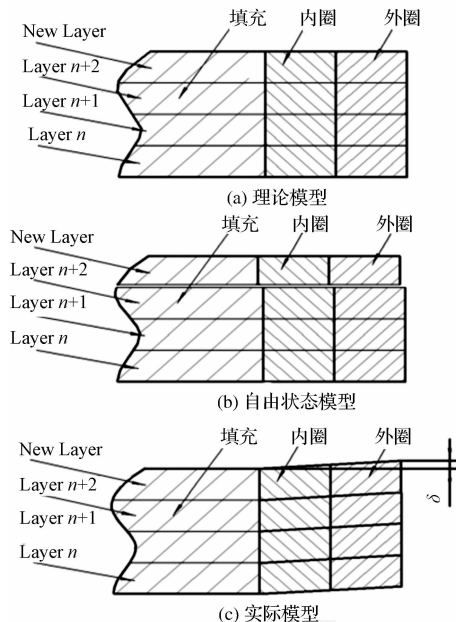


图 1 FDM 成型过程褶皱变形原理图

实际情况如图 1(c)所示,新的堆积层冷却固化产生的内应力  $\delta$  作用在已成型部分,已成型部分发生弯曲变形。此时模型受到材料的热塑性收缩产生的内应力  $\sigma_1$ ,成型件的弯曲应力为  $\sigma_2$ ,以及已成型模型施加在其上的应力  $\sigma_*$ 。此时以当前层作为研究对象,其作用力为:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_* \quad (1)$$

式中: $\sigma_1 = -E\alpha\Delta T$ , $\sigma_2 = E(z-d)/\rho$ , $z$ —成型件的高度, $\rho$ —褶皱变形的翘曲半径, $d$ —弯曲中性轴到喷嘴运动面的距离。

该过程总应力为 0,应力产生的合力矩也为 0,此时设  $n=1$ ,则对其积分得到:

$$\int_0^z \sigma dz = 0 \quad (2)$$

$$\int_0^z \sigma z dz = 0 \quad (3)$$

在已成型部分中( $0 \leq z \leq s$ ),假设此层成型后温度始终在  $T_e$ 。

可得模型翘曲曲率:

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{6\alpha\Delta T}{h} \left(1 - \frac{s}{h}\right) \quad (4)$$

褶皱变形数学模型如图 2 所示,有:

$$\delta = \rho \left[1 - \cos \frac{L}{\rho}\right] \quad (5)$$

$$\cos \frac{L}{\rho} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{L}{\rho}\right)^2 + \dots \quad (6)$$

$$\delta = \frac{L^2}{2\rho} = 3\alpha\Delta T^2 \frac{s}{h^3 \Delta h} \quad (7)$$

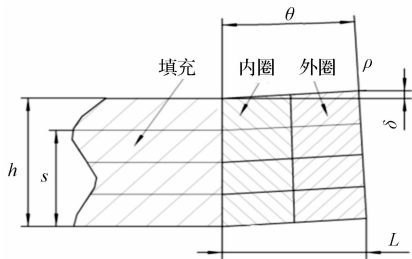


图2 褶皱变形数学模型

上述针对模型上、下层为竖直排布的情况下分析的,实际成型过程,大部分模型竖直方向是有一定倾斜度的,即上层不一定完全成型在下层之上。

倾角模型成型细节图如图3所示。

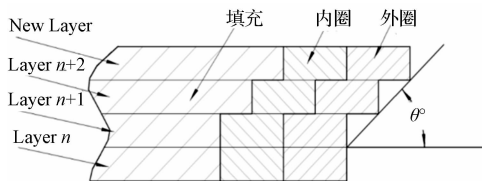


图3 倾角模型成型细节图

对于模型来说,倾角  $\theta$  的大小对于模型外表面的成型质量至关重要。本研究引进新的变量翘曲率  $\eta$ , 则最终的翘曲变形量如下式所示:

$$\delta^* = \delta\eta = 3\alpha\eta\Delta T^2 \frac{s}{h^3\Delta h} \quad (8)$$

式中: $\theta$ —模型外表面法向量与  $Z$  向夹角; $\eta$ —翘曲率, 其与夹角  $\theta$  成正比,即  $\eta = k\theta$ 。

由上面分析计算可知,影响 FDM 成型翘曲,以及表面褶皱缺陷的主要因素有如下:堆积层厚数  $n$ ,壁厚  $L$ ,材料的收缩系数  $\alpha$ ,成型温度  $T$ ,室温  $T_e$ ,以及成型层法向量与  $Z$  向量负方向夹角  $\theta$ 。这些参数相互作用耦合,最终共同影响原型的成型质量<sup>[13]</sup>。

本研究设计实验验证这一理论上的数学关系是否正确。

## 2 实验验证

### 2.1 实验设计

国际上比较知名的创客杂志《Make》在评测家用 3D 打印机时用到的测试模型如图 4 所示。该模型由 Andreas Bastain 设计,本研究用来测试模型的外表面成型质量。该模型的相应区域上已经标注其法向量与  $Z$  轴方向夹角,分别为  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ 。下面实验就是测量该模型相应的外表面区域的变形量来确认工艺参数对模型质量的影响。



图4 测试模型

根据式(8)可知,模型成型过程中,其表面褶皱变形与温差  $\Delta T$ ,收缩系数  $\alpha$ ,翘曲率  $\eta$  成正比,层厚  $\Delta h$  成反比关系。其中收缩系数  $\alpha$  与 PLA 材料添加剂色母粒的种类和比例有关, $\eta$  为翘曲率,其与夹角  $\theta$  成正比,即:

$$\eta = k\theta \quad (9)$$

该实验选取杭州乐伴科技有限公司的孩宝打印机和 Sting 公司的 PLA 材料(黄,橙,紫,银,天蓝,粉色),用正交实验法对喷嘴温度  $T_{outer}$ ,模型倾角  $\theta$ ,成型速度,以及层厚  $\Delta h$  工艺参数进行验证。

实验工艺参数如表 1 所示。成型速度  $V_{normal}$  设置为外圈  $V_{outer} = 30 \text{ mm/s}$ ,内圈  $V_{inner} = 45 \text{ mm/s}$ ,填充  $V_{infill} = 60 \text{ mm/s}$ 。

表1 工艺参数

成型室温度	喷嘴直径/mm	喷丝宽度/mm	层厚/mm	壁厚/mm
室温	0.4	0.4	0.2	0.8

### 2.2 倾角对成型质量影响

本研究在室温,成型速度,层厚,喷嘴温度  $T_{outer} = 195^\circ\text{C}$  一样的条件下,测试不同类型 PLA 材料,模型倾角  $\theta$  对模型表面褶皱变形的影响,测试模型在实验条件下成型的实物图如图 5 所示(由左至右分别为黄色,橙色,紫色,银色,天蓝色,粉色材料的成型件)。

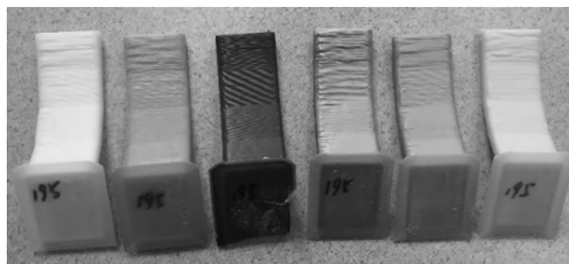


图5 倾角测试模型图

测试模型倾角-形变图如图 6 所示。

由图 6 可知随着模型外表面倾角  $\theta$  的增大,各类型材料褶皱变形各不相同,但褶皱变形随着倾角的增

大而逐步增大。

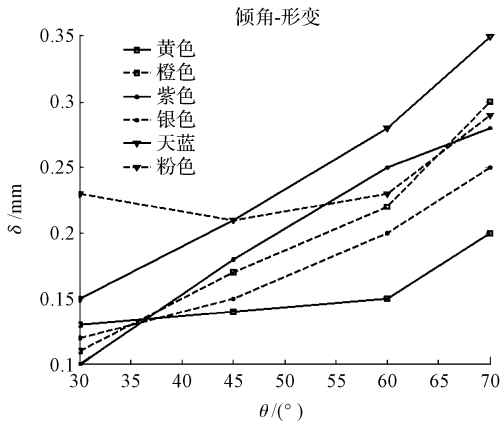


图6 倾角-形变图

### 2.3 温度对成型质量影响

本研究在室温,成型速度,层厚一样的条件下,测试不同类型的PLA材料,喷嘴温度  $T_{\text{outer}}$  在 185  $^{\circ}\text{C}$ , 190  $^{\circ}\text{C}$ , 195  $^{\circ}\text{C}$ , 200  $^{\circ}\text{C}$ , 205  $^{\circ}\text{C}$ , 210  $^{\circ}\text{C}$  下对模型表面褶皱变形的影响,测试模型温度-形变图如图7所示。

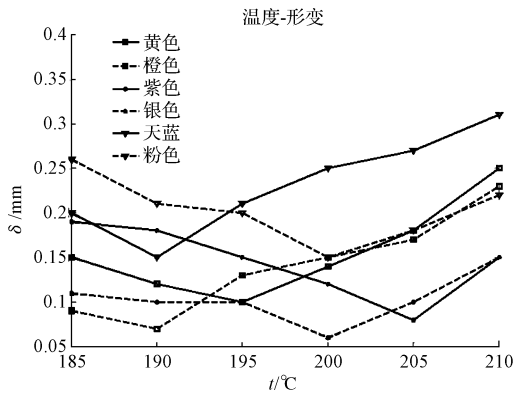


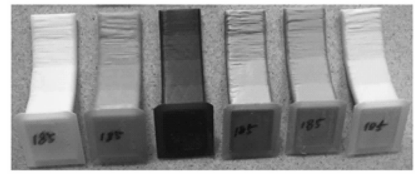
图7 温度-形变图

由图7可知,喷嘴温度  $T_{\text{outer}}$  对各种类型PLA材料影响各不相同,但都有一个适宜温度,低于该温度时,随着温度增加变形量变小,之后变大。如天蓝色,橙色的最优温度在 190  $^{\circ}\text{C}$  左右等。因此,在成型过程中,要根据材料特性选取合适的成型温度。

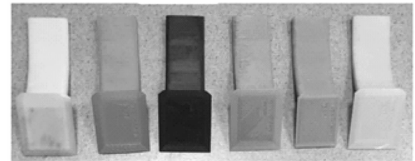
测试模型在不同温度条件下成型的实物图如图8所示。

### 2.4 层厚对成型质量影响

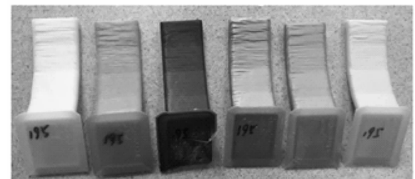
本研究在室温,成型速度,外表面倾角  $\theta = 45^{\circ}$ ,以及喷嘴温度  $T_{\text{outer}} = 195^{\circ}\text{C}$  一样的条件下,测试不同类型的PLA材料,分层层厚在 0.1 mm, 0.15 mm, 0.2 mm 时,对模型表面褶皱变形影响,测试模型在不同层厚条件下成型的实物图如图9所示。



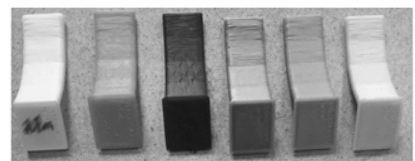
(a) 喷嘴温度185  $^{\circ}\text{C}$



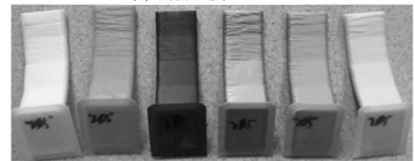
(b) 喷嘴温度190  $^{\circ}\text{C}$



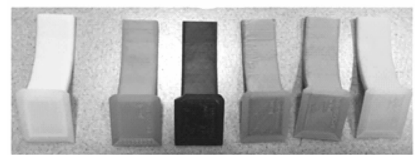
(c) 喷嘴温度195  $^{\circ}\text{C}$



(d) 喷嘴温度200  $^{\circ}\text{C}$

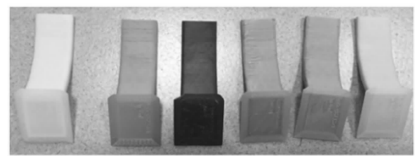


(e) 喷嘴温度205  $^{\circ}\text{C}$

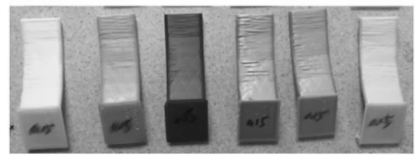


(f) 喷嘴温度210  $^{\circ}\text{C}$

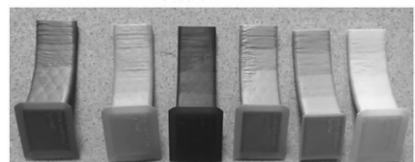
图8 温度测试模型图



(a) 层厚0.1 mm



(b) 层厚0.15 mm



(c) 层厚0.2 mm

图9 层厚测试模型图

测试模型层厚-形变图如图 10 所示。

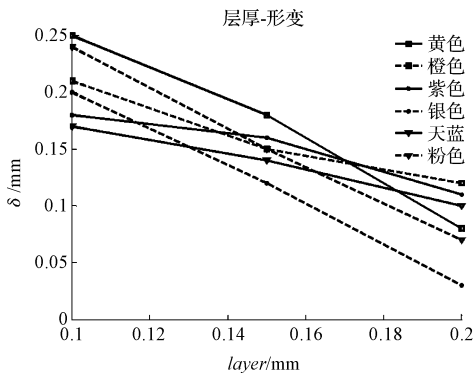


图 10 层厚-形变图

随着层厚的增加,模型外表面褶皱变形逐渐减小(如图 10 所示)。但是层厚太大,模型表面的台阶效应会明显。因此,在表面质量要求能够满足的情况下可以适当提高层厚,以减少外表面褶皱变形。

### 2.5 打印速度对成型质量影响

本研究在室温,层厚,喷嘴温度  $T_{outer} = 195\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,外表面倾角  $\theta = 45^{\circ}$  一样的条件下,测试不同类型 PLA 材料,成型速度  $0.5V_{normal}, V_{normal}, 2V_{normal}$  时。测试模型在不同速度条件下成型的实物图如图 11 所示。

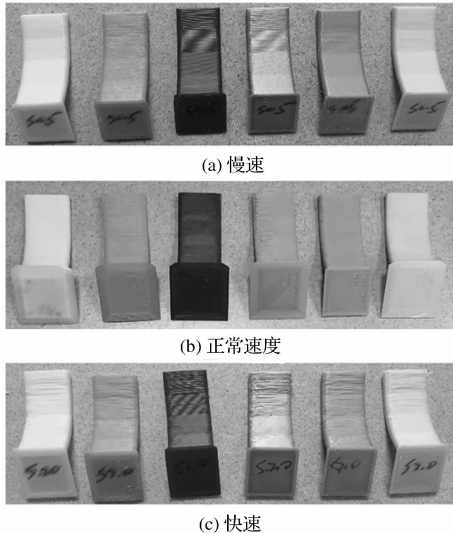


图 11 速度测试模型图

测试模型速度-形变图如图 12 所示。

由图 12 可知,成型速度在慢速 0.5 倍  $V_{normal}$ , 正常

速度  $V_{normal}$ , 快速  $2V_{normal}$  倍情况下,速度越快,其褶皱变形越大。但是成型速度太慢,其成型效率随之低,因此应根据情况选择合适的成型速度。

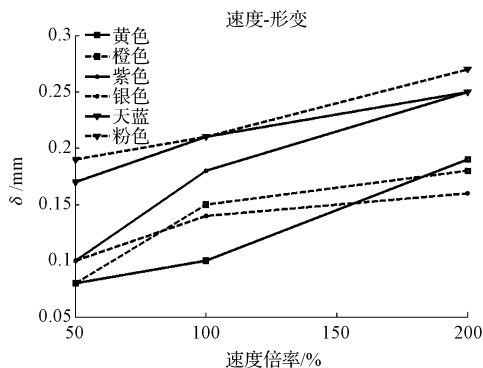


图 12 速度-形变图

## 3 减小模型表面褶皱缺陷的措施

从上述理论以及实验可得,在成型室温、散热条件、喷嘴直径、喷丝宽度相同的情况下,模型的外表面倾角越大,其表面褶皱变形越明显,成型层厚越大,其模型表现效果越好,成型温度需要根据各个材料特性设置。上述参数都与材料的本身特性有关,然而不同的 PLA 材料,由于其添加剂(色母粒等)的不同,其物理特性也不同。喷嘴温度过高,导致材料的流动性过好,在前一层未凝固,下层材料就堆积上,这样就会导致模型表面的褶皱和坍塌。温度过低会导致喷嘴的堵塞。

因此在快速成型模型的过程中,为了获取比较好的表现,有如下建议:

- (1)在设计过程中,考虑到模型表面法向量向下的情况下,法向量正方向与 Z 向夹角尽可能的大。
- (2)为获得较好的效果,适当降低打印速度,提高层厚。但是层厚越大,其台阶效应越明显,精度越差,在能接受的情况下,层厚越大,其表面褶皱缺陷越小。
- (3)除了要寻找比较好的工艺参数,还要根据不同材料的特性,对打印参数作出相应的调整,如成型温度等等。

(下转第 688 页)

#### 本文引用格式:

王忠飞,魏 辉,金 灵. 色母粒影响聚乳酸成型质量的实验研究[J]. 机电工程,2016,33(6):679-683,688.

WANG Zhong-fei, WEI Hui, JIN Ling. Effect of masterbatch to the printing quality of polylactic acid[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(6):679-683,688.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>