

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.01.012

基于田口试验法的熔融沉积成型 PLA 制品工艺优化

文周^{1,2}, 薛美贵¹, 王旭红¹

(1. 东莞职业技术学院, 广东东莞 523808; 2. 西安科技大学机械学院, 西安 710054)

摘要: 为了提高熔融沉积成型(FDM)制品的质量,采用田口试验法研究填充密度、沉积方向和填充图案三个因素对聚乳酸(PLA)制品拉伸性能的影响。结果表明,加工工艺参数对拉伸弹性模量和拉伸强度的影响程度均为沉积方向>填充密度>填充图案,其中拉伸弹性模量最优化的参数组合为填充密度100%、沉积方向45°、填充图案网格形状,拉伸强度最优化的参数组合为填充密度70%、沉积方向45°、填充图案网格形状。通过扫描电子显微镜对拉伸试验失效断面进行观察分析,探究了FDM打印工艺参数之沉积方向、填充密度对PLA试样拉伸失效的影响及其失效机理,其表征分析与试验结果高度吻合,表明该研究结果具有较好的借鉴意义。

关键词: 熔融沉积成型;打印参数;田口试验;拉伸性能

中图分类号: TH145 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)01-0058-05

Optimization of PLA Product Process by Melt Deposition Based on Taguchi Test

Wen Zhou^{1,2}, Xue Meigui¹, Wang Xuhong¹

(1. Dongguan Polytechnic, Dongguan 523808, China;

2. College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract : In order to improve the quality of fused deposition modeling (FDM) printed products, taguchi test was used to study the effects of filling density, deposition direction and filling pattern on the tensile properties of PLA products. The results show that the influence of processing parameters on the elastic modulus and tensile strength is as follows : deposition direction > filling density > filling pattern ; the optimal parameter combination for elastic modulus is the filling density of 100%, the deposition direction of 45° and the filling pattern mesh shape ; the optimal parameter combination for tensile strength is 70% of the filling density, 45° in the deposition direction and the mesh shape of the filling pattern. The failure section of tensile test was observed and analyzed by scanning electron microscopy, and the influence of the deposition direction and filling density of FDM printing process parameters on the tensile failure of PLA samples and the failure mechanism were investigated. The characterization and analysis are highly consistent with the test results, indicating that the research results are of good reference significance.

Keywords : fused deposition modeling ; printing parameter ; taguchi method ; tensile behavior

增材制造技术也被称为快速成型技术,是一种在产品制造加工领域具有光明应用前景的技术^[1]。增材制造技术是将CAD设计的三维产品分层切片后堆积打印,可用于生产复杂的功能构件^[2]。在众多增材制造技术中,熔融沉积成型(FDM)因其系统结构简单、制作成本低、可扩展性强、材料更换方便且利用率高等优点吸引了广大学者和工程技术人员的关注^[3-5]。FDM技术常用的打印材料有丙烯腈-

丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)、聚乳酸(PLA)、聚碳酸酯(PC)和尼龙等^[6-8],其中PLA材料因其具有较好的力学性能和优良的生物相容性被广泛应用于物流、医疗工业等领域^[7-9]。

FDM加工工艺参数对打印件力学性能影响较大,而其加工工艺参数数量众多、内部联系机理复杂。因此,通过优化加工工艺参数,提高PLA材料3D打印件品质与力学性能具有重要的意义^[10]。近

基金项目: 国家自然科学基金(11972282)、陕西省自然科学基金(2018 JZ1001)、东莞市科技特派员项目

通信作者: 文周,讲师,博士,研究方向为3D打印和包装机械 E-mail: 396944920@qq.com

收稿日期: 2020-10-16

引用格式: 文周,薛美贵,王旭红. 基于田口试验法的熔融沉积成型 PLA 制品工艺优化[J]. 工程塑料应用,2021,49(1):58-62.

Wen Zhou, Xue Meigui, Wang Xuhong. Optimization of PLA product process by melt deposition based on taguchi test[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(1):58-62.

年来,许多学者研究了 3D 打印加工工艺参数对打印件性能的影响。F. Gorski 等^[11]研究了打印角度等参数对 ABS 材料力学性能的影响,发现打印角度越大拉伸性能越低。陈延凯等^[12]采用正交试验法研究分层厚度、成型室温度等参数对表面粗糙度和拉伸强度的影响,研究发现分层厚度对表面粗糙度和拉伸强度影响最大。F. V. Miguel^[13]研究了填充密度对打印件性能的影响,发现拉伸强度和硬度随着填充密度的增大而提高。

目前,虽有部分文献研究了 FDM 打印参数对 PLA 材料性能的影响,但大部分研究的是光栅宽度、打印角度、光栅厚度等打印参数对拉伸性能及表面粗糙度的影响,而有关沉积方向等打印参数对材料力学性能影响的文献较少。材料的力学性能好坏很大程度上取决于其拉伸性能,故研究 PLA 材料的拉伸性能是非常有必要的。

笔者采用 FDM 技术加工 PLA 试样,选取了沉积方向、填充密度、填充图案三个打印参数作为研究对象,每个打印参数选取三个水平,每个水平加工三个试样。若采用全因子试验法,该研究需要加工 3×3^3 (81) 个试样,需要耗费较多的时间和较大的经济成本。故笔者引入田口试验法,采用该方法只需 3×9 (27) 个试样,可有效节省时间、降低成本。首先建立 $L_9(3^3)$ 正交试验表,打印正交试验表中的九组试样(每组三个);然后对每组试样进行拉伸试验,记录结果用 Minitab 软件进行统计分析;最后,对失效试样的表面特征用扫描电子显微镜 (SEM) 进行微观观察和分析研究。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PLA 线材: 15M05, 白色, 1.75 mm, 天威 3D 打印材料有限公司。

1.2 主要设备及仪器

桌面 3D 打印机: MBot Grid II 型, 杭州铭展网络科技有限公司;

电子万能材料试验机: E45 UTM 型, 美国 MTS 公司;

SEM: Phenom pro 型, 荷兰飞纳科学仪器公司。

1.3 试验设计

选取沉积方向、填充密度、填充图案三个因素对拉伸性能进行研究, 每个因素选择三个水平。沉积方向如图 1 所示, 其中 θ 取 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 。填充图案如图 2 所示, 选择网格、蜂窝、直线三种图案。填

充密度选择 35%, 70%, 100% 三种填充比例, 以网格图案为例, 如图 3 所示。

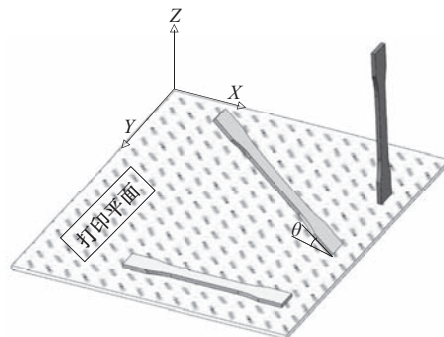
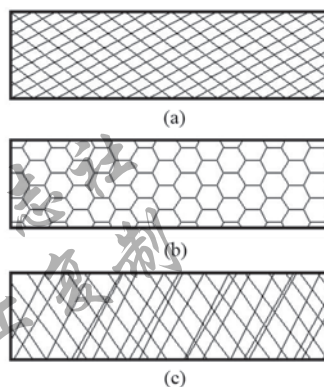


图 1 沉积方向



a—网格; b—蜂窝; c—直线

图 2 填充图案

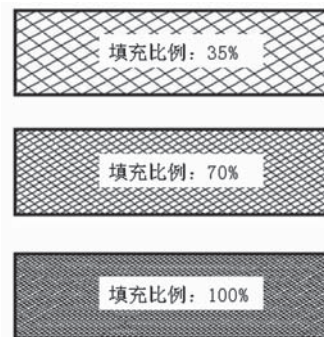


图 3 填充密度

根据田口静态试验法理论, 建立 $L_9(3^3)$ 正交试验表, 见表 1。

表 1 正交试验设计

试验号	填充密度 (A) / %	沉积方向 (B) / ($^\circ$)	填充图案 (C)
1	35	0°	网格
2	35	45°	蜂窝
3	35	90°	直线
4	70	0°	蜂窝
5	70	45°	直线
6	70	90°	网格
7	100	0°	直线
8	100	45°	网格
9	100	90°	蜂窝

1.4 试样制备

试样的形状和尺寸根据 ASTM D638-2010 确定如图 4 所示,使用 Solidworks 软件绘制试样三维模型,并导出为 STL 文件,将其加载到控制软件中进行分层切片处理,最终生成 3D 打印机所能识别的 Gcode 代码。

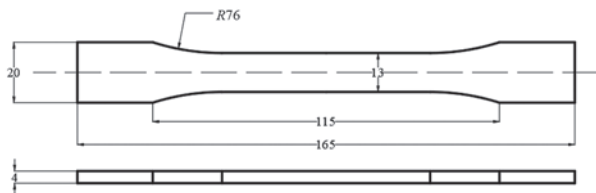


图 4 拉伸试验试样尺寸

根据正交试验表的试验号,依次打印试样,每组拉伸试验制备三个试样。试验所用 3D 打印机匹配的控制软件为 MPrint,打印参数在该软件中设置。每组试样的填充密度、沉积方向和填充图案三个参数依据试验号对应值进行设置,其它打印参数设置成恒定值,主要打印参数包括层厚 0.1 mm、打印温度 210℃、扫描速度 90 mm/s 等。

1.5 拉伸试验

采用万能材料试验机按 ASTM D638-2010 试验,加载速度为 2 mm/min。拉伸强度为最大拉应力与试样中间位置截面的面积之比,弹性模量为应力-应变曲线处于线性阶段的应力与应变之比。

2 结果与讨论

2.1 拉伸试验结果分析

将拉伸应变-应力数据导入 Origin9.1 软件中,绘制应力-应变曲线,如图 5 所示。

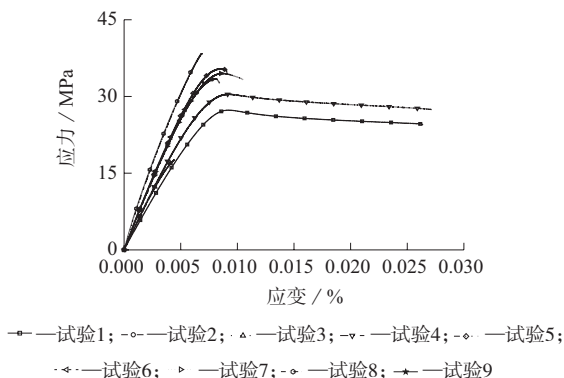


图 5 不同打印工艺参数试样的应力-应变曲线

从图 5 可发现,不同打印工艺参数的试样其拉伸强度差异较大,试验 3 试样的拉伸强度最小,为 17.60 MPa;试验 8 试样的拉伸强度最大,为 38.36 MPa。经过计算,发现试验 1 试样的拉伸弹

性模量值最小,为 4.049 GPa,试验 8 试样的拉伸弹性模量值最大,为 7.428 GPa。

2.2 信噪比及主要影响因素分析

运用 Minitab17 统计软件对试验数据进行统计分析,因期望获得较好的力学性能,数据分析时选择望大特性^[14-15],信噪比(S/N)计算公式为: $S/N = -10\lg[\Sigma(1/Y^2)/n]$ 。输入计算所得的 9 组拉伸弹性模量值,进行田口试验分析,可得拉伸弹性模量信噪比响应见表 2。

表 2 拉伸弹性模量信噪比响应

水平	填充密度(A)	沉积方向(B)	填充图案(C)
1	13.63	13.58	14.89
2	14.65	15.96	14.68
3	15.84	14.59	14.55
秩	2.21	2.38	0.34
排列	2	1	3

分析表 2 可知,沉积方向对拉伸弹性模量的影响最大,其秩值最大为 2.38;填充密度对拉伸弹性模量的影响次之,其秩值为 2.21;填充图案对拉伸弹性模量的影响最小,其秩值为 0.34。

Minitab17 运算所得拉伸弹性模量信噪比响应见图 6。

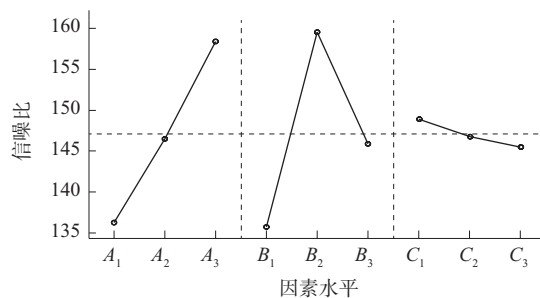


图 6 拉伸弹性模量信噪比响应

观察图 6 可发现,沉积方向的斜率最大,说明其对拉伸弹性模量的影响最为明显,填充密度对拉伸弹性模量的影响次之,填充图案的影响最小。若要获取最大拉伸弹性模量,最优的打印参数组合是 $A_3B_2C_1$,即填充密度为 100%、沉积方向为 45°、填充图案为网格形状。

输入记录的 9 组试验拉伸强度数据,进行田口试验分析,可得拉伸强度信噪比响应见表 3。

表 3 拉伸强度信噪比响应

水平	填充密度(A)	沉积方向(B)	填充图案(C)
1	28.06	29.73	29.87
2	29.95	31.06	28.59
3	29.35	26.57	28.90
秩	1.89	4.48	1.27
排列	2	1	3

分析表 3 可知,沉积方向对拉伸强度的影响最大,其秩值最大为 4.48;填充密度对拉伸强度的影响次之,其秩值为 1.89;填充图案对拉伸强度的影响最小,其秩值为 1.27。Mintab17 运算所得拉伸强度信噪比响应如图 7 所示。

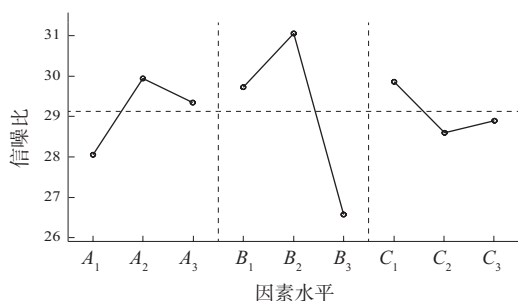


图 7 拉伸强度信噪比响应

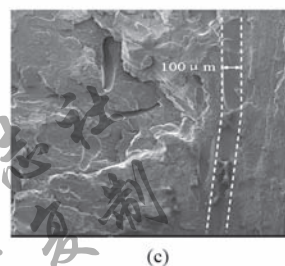
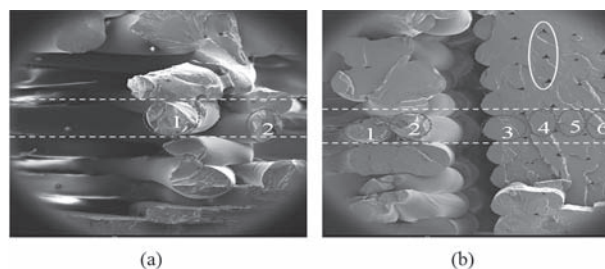
观察图 7 可发现,沉积方向的斜率最大,说明其对拉伸强度的影响最为明显,填充密度对拉伸强度的影响次之,填充图案的影响最小。若要获取最大拉伸强度,最优的打印参数组合是 $A_2B_2C_1$,即填充密度为 70%、沉积方向为 45° 、填充图案为网格形状。

2.3 拉伸试验失效试样断面分析

通过主要因素分析可知,影响拉伸强度和拉伸弹性模量的主要因素均为沉积方向,次要因素是填充密度。固定填充图案为直线,选取沉积方向和填充密度两个因素进行对比分析,使用 SEM 观察密度 35%/沉积方向 0° 、密度 70%/沉积方向 0° 、密度 70%/沉积方向 90° 三个试样的断裂面,如图 8 所示。

对比图 8a、图 8b 可发现,在长度、宽度相同的单位面积内(虚线),密度为 35% 的试样只有 2 根断裂丝材,而密度提高到 70% 后有 6 根断裂丝材。这说明提高密度可以增加试样的密实度、减少试样的空隙;提高密度后试样断裂需要破坏更多丝材的分子结构,因此需要更大的断裂能,其拉伸强度与拉伸弹性模量也相应增大。在图 8b 的右上角有较多三角形的小孔(如实线内的孔),这是丝材在熔融叠加过程中,聚合物熔体分布不均匀或层间粘结力较小造成的。对比图 8b、图 8c 可看出,图 8b 断面形貌粗糙,而图 8c 断面较为光滑,这是因为图 8b 试样(沉积方向 0°)拉伸试验载荷施加方向与其丝材长度方向平行,试样断裂需拉断丝材,故断面较为粗糙;而图 8c 试样(沉积方向 90°)拉伸试验载荷施加方向与其沉积平面垂直,故断面为沉积面,较为平整。观察图 8c 也可以发现有一条宽度约为

100 μm (与层厚相同)的拉痕,此拉痕为两个沉积面剥离后所留。当沉积方向为 0° 时,试样断裂需要破坏丝材的分子结构,所需断裂能大,其拉伸强度与拉伸弹性模量也大;当沉积方向为 90° 时,试样断裂只需要剥离相邻的两个沉积面,所需克服的粘结强度弱,其拉伸强度与拉伸弹性模量也小。



a—密度 35%/沉积方向 0° ; b—密度 70%/沉积方向 0° ;
c—密度 70%/沉积方向 90°

图 8 拉伸试验失效试样断裂面微观结构

3 结论

(1) 通过田口试验法的信噪比和主因素分析,得出在试验范围内,沉积方向对 FDM 打印 PLA 试样的拉伸性能影响最为明显,填充密度次之,填充图案影响最弱。

(2) 通过 SEM 对失效断面进行观察分析,探究了 FDM 打印工艺参数之沉积方向、填充密度对 PLA 试样拉伸失效的影响及其失效机理。其表征分析与试验结果高度吻合,表明该研究结果具有较好的借鉴意义。

参考文献

- [1] 杨伟,陈正江,补辉,等. 基于工程塑料的 3D 打印技术应用研究进展[J]. 工程塑料应用,2018,46(2):143-147.
Yang Wei, Chen Zhengjiang, Bu Hui, et al. Research progress of 3D printing technology based on engineering plastics[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(2):143-147.
- [2] Liu Y, Liang X, Saeed A, et al. Properties of 3D printed dough and optimization of printing parameters[J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2019, 54:9-18.
- [3] Melenka G W, Cheung B K O, Schofield J S, et al. Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures[J]. Compos Struct, 2016, 153:866-875.

- [4] Kotlinski J. Mechanical properties of commercial rapid prototyping materials[J]. Rapid Prototyp J, 2014, 20(6):499—510.
- [5] 欧阳生,孔德洋. 工业4.0时代中国制造业新出路——《精益智能制造》推荐阅读[J]. 中国机械工程, 2018, 29(16):2010—2015. Ouyang Sheng, Kong Deyang. The new way out for China's manufacturing industry in the era of industry 4.0—“Lean Smart Manufacturing” recommended reading[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(16):2010—2015.
- [6] Zou R, Xia Y, Liu S, et al. Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material[J]. Composites Part B:Engineering, 2016, 99:506—513.
- [7] Goyanes A, Martinez P R, Buanz A, et al. Effect of geometry on drug release from 3D printed tablets[J]. Int J Pharm, 2015, 494(2):657—663.
- [8] Durgun I, Ertan R. Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost. Rapid Prototyp, 2014, 73:1243—1250.
- [9] Miguel F V. Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing[J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2016, 3:183—192.
- [10] Alvarez K L, Lagos R F, Aizpun M. Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS part[J]. Ing Invest, 2016, 36(3):110—116.
- [11] Gorski F, Kuczek W, Wichniarek R. Impact strength of ABS parts manufactured using fused deposition modeling technology[J]. Arch Mech Tech, 2014, 31(1):1—12.
- [12] 陈延凯,史延春,张建辉. 打印参数对FDM成型ABS制品性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(10):47—52. Chen Yankai, Shi Yanchun, Zhang Jianhui. Influence of printing parameters on properties of fused deposition modeling ABS samples[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(10):47—52.
- [13] Miguel F V. Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing[J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2016, 3:183—192.
- [14] Yuping E. The effect of SLM process parameters on density, hardness, tensile strength and surface quality of Ti-6Al-4V[J]. Int J Adv Manuf Tech, 2018, 9:670—677.
- [15] Ebel E, Sinnemann T. Fabrication of FDM 3D objects with ABS and PLA and determination of their mechanical properties[J]. Int J Adv Manuf Tech, 2014, 11:917—923.

欢迎订阅 2021 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

也可直接通过邮局或银行汇款向《工程塑料应用》杂志社订阅《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘,请注明订阅期刊/光盘的名称、收件人、邮编及地址。

《工程塑料应用》国内外公开发行的全国性塑料专业技术类刊物,月刊,大16开本,每月10日出版。本刊为中文核心期刊,是中国合成树脂供销协会会刊,荣获首届、第二届、第三届全国期刊奖等多项国家、省部级优秀期刊奖,入选美国化学文摘(CA)千种表。2021年定价20元/期,全年240元。目前杂志社尚有部分2000年以来的单册和合订本库存,如需订阅,请联系杂志社。

《化学分析计量》国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物,月刊,大16开本,每月20日出版。本刊为中国科技核心期刊,荣获多项省部级优秀期刊奖,入选美国化学文摘(CA)千种表。2021年定价20元/期,全年240元。目前杂志社尚有部分2000年以来的单册和合订本库存,如需订阅,请联系杂志社。

《工程塑料应用》、《化学分析计量》合订本光盘 杂志社已将《工程塑料应用》自创刊号(1973年)至2020年底共48卷374期的期刊电子化,并制成合订本光盘,现公开发售;同时也将《化学分析计量》自创刊号(1992年)至2020年底

共29卷141期的期刊电子化,并制成合订本光盘,现公开发售。合订本光盘既可按作者、文题、关键词、年、期等分类查阅各期刊已发表的所有科技文章和科技信息的全文,又可根据读者自定义的关键词进行全文检索,非常方便、实用。《工程塑料应用》合订本光盘优惠售价550元;《化学分析计量》合订本光盘优惠售价260元。

邮局汇款:

收款地址:济南市天桥区田庄东路3号

收款单位:《工程塑料应用》杂志社

邮编:250031

电话:(0531)85878223 85878057 85878278

传真:(0531)85947355

银行汇款:

户名:山东非金属材料研究所

开户银行:济南市工商银行经十一路支行

账号:1602001229014425546

网上订阅: <http://www.epa1973.com>