

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.01.013

FDM 3D 打印工艺参数对 PLA 制件力学性能的影响

白鹤¹, 苏亚辉¹, 王核心¹, 刘亚明^{2,3}, 何石磊^{2,3}, 张振庚⁴

(1. 宝鸡职业技术学院机电信息学院, 陕西宝鸡 721013; 2. 宝鸡石油钢管有限责任公司钢管研究院, 陕西宝鸡 721008;

3. 国家石油天然气管材工程技术研究中心, 陕西宝鸡 721008; 4. 北京三维博特科技有限公司, 北京 100085)

摘要: 采用五因素四水平正交试验设计, 对 16 组不同工艺参数 (打印层厚、填充密度、打印温度、填充速度、外壳厚度) 的 FDM 3D 打印聚乳酸 (PLA) 制件力学性能进行了测试和结果分析, 确定了影响 PLA 制件力学性能的主要因素, 其中, 外壳厚度对制件力学性能影响最为明显, 打印温度影响最小, 同时分析得到了在打印层厚 0.15 mm, 填充密度 40%, 打印温度 210℃, 填充速度 60 mm/s, 外壳厚度 1.6 mm 条件下可获得力学性能最佳的制件。最后对试验数据进行回归分析, 拟合得到了 FDM 打印工艺参数与 PLA 制件力学性能指标的数学模型; 通过对不同打印工艺参数的试样进行试验验证, 表明该模型拟合误差小 (5% 以内), 可靠性高, 可用来对 FDM 3D 打印制件的加工提供参考。

关键词: 正交试验; FDM; 聚乳酸; 力学性能; 工艺参数; 数学模型

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)01-0068-04

Influence of FDM 3D-printing Process Parameters on Mechanical Property of PLA Sample

Bai He¹, Su Yahui¹, Wang Hexin¹, Liu Yaming^{2,3}, He Shilei^{2,3}, Zhang Zhengeng⁴

(1. College of Mechatronics and Informatics, Baoji Vocational & Technical College, Baoji 721013, China; 2. Welded Pipe Research Institute of Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, China; 3. National Petroleum and Gas Tubular Goods Engineering Technology Research Center, Baoji 721008, China; 4. Beijing CANVBOT Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: This paper reported a study on the effect of FDM 3D-printing process parameters such as layer thickness, filling rate, printing temperature, filling speed, contour thickness on the mechanical property by using orthogonal test with five-factors and four-levels. The main factors affecting the mechanical properties of PLA parts were determined. The most significant influence factor is contour thickness and the least important factor is printing temperature. The optimal property sample can be obtained with the layer thickness 0.15 mm, filling rate 40%, printing temperature 210℃, filling speed 60 mm/s and contour thickness 1.6 mm. Mathematical model of the FDM 3D-printing process parameters and PLA sample mechanical property was built by using regression analysis and verified by using samples made by different printing parameters. The verification results show that the model error is lower than 5% and reliability is high. This model will be helpful for producing FDM 3D-printing parts.

Keywords: orthogonal test; FDM; polylactic acid; mechanical property; process parameter; mathematical model

3D 打印技术又可称为快速成型技术或增材制造技术, 其是以数字模型文件为基础, 使用丝状材料、液态材料或粉末状材料, 采用逐层累加的方式加工制造任何复杂形状、结构物体的技术^[1-5]。该技术不仅可加工各种形状复杂的工件, 同时还可大幅降低生产过程中的材料损耗^[6-7]。随着我国加工制造水平的不断发展, 3D 打印技术已成为了目前最具发展潜力的技术之一^[8]。

FDM (熔融沉积) 成型技术是目前使用最为广泛的 3D 打印技术之一, 其凭借简洁的操作、低廉的成本和无毒环保等特点, 迅速获得了各行各业的青睐, 而具有良好生物降解性的聚乳酸 (PLA) 材料, 则成为了 FDM 工艺中使用比例最高的材料之一^[9-13]。随着 3D 打印成型产品应用领域越来越广, 人们对其性能要求越来越高, 成型产品性能与材料、工艺之间的关系便成为了工程技术人员研究的重要课题。

基金项目: 陕西省职教学会 2019 年度职业教育研究课题项目 (SZJYB19-036), 陕西省教育科学“十三五”规划 2018 年度课题项目 (SGH18V062)

通讯作者: 白鹤, 讲师, 工程师, 主要从事 3D 打印技术教学与研究 E-mail: shawu1983@163.com

收稿日期: 2019-11-03

引用格式: 白鹤, 苏亚辉, 王核心, 等. FDM 3D 打印工艺参数对 PLA 制件力学性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(1):68-71.

Bai He, Su Yahui, Wang Hexin, et al. Influence of FDM 3D-printing Process Parameters on Mechanical Property of PLA Sample[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(1):68-71.

笔者采用正交试验设计,利用 FDM 工艺打印 PLA 试样,研究了打印层厚、填充密度、打印温度、填充速度以及外壳厚度等工艺参数对试样力学性能的影响,同时利用回归分析,拟合得出了多元回归方程,并用试验对方程可靠性加以验证,为 FDM 3D 打印制件性能提升和工艺的优化提供了参考。

1 试验部分

1.1 主要原材料

PLA:丝状耗材,直径 1.75 mm,北京三维博特(CANVBOT)科技有限公司。

1.2 主要设备及仪器

3D 打印机:CANVBOT T800-II 型,北京三维博特科技有限公司;

万能材料试验机:AGS-X10KN 型,日本岛津公司。

1.3 试样制备

拉伸试样按照 GB/T 1040.2-2006 标准要求进行制样,具体尺寸如图 1 所示,其中试样总长 $L_3=150$ mm,宽平行部分距离 $L_2=110$ mm,半径 $R=25$ mm^[14]。利用三维建模软件完成试样电子模型绘制,保存成 STL 格式文件后导出,随后使用 Cura 软件进行数字模型的切片和打印参数的设置,其中打印头直径 0.4 mm,热床温度 50℃,填充角度 45°,试样摆放取向为大面水平放置^[15]。打印层厚、填充密度、打印温度、填充速度以及外壳厚度按照五因素四水平的正交试验方法进行设定,具体参数设置见表 1。根据五因素四水平正交试验和 GB/T 1040.2-2006 标准要求,本次试验共制作 16 组试样,每组包含 5 个平行试样。

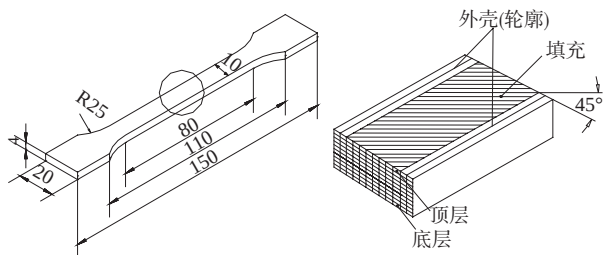


图 1 拉伸试样形状尺寸及截面局部放大图

表 1 因素水平表

水平	因素				
	打印层厚 (A)/mm	填充密度 (B)/%	打印温度 (C)/℃	填充速度 (D)/(mm·s ⁻¹)	外壳厚度 (E)/mm
1	0.1	10	210	40	0.4
2	0.15	20	220	50	0.8
3	0.2	30	230	60	1.2
4	0.25	40	240	70	1.6

1.4 性能测试

按照 GB/T 1040.2-2006 标准进行 16 组试样拉伸性能测试,其中试验速度为 5 mm/min,引伸计标距为 50 mm^[16]。

2 结果与讨论

2.1 正交试验结果

为避免试验误差,每组试验完成 5 个平行试样的力学性能测试后取平均值,记为该因素水平下试样的力学性能,其检测结果见表 2。

表 2 正交试验结果

试验号	试验因素					拉伸强度 /MPa
	A	B	C	D	E	
1 [#]	1(0.1)	1(10)	1(210)	1(40)	1(0.4)	23.09
2 [#]	1(0.1)	2(20)	2(220)	2(50)	2(0.8)	26.18
3 [#]	1(0.1)	3(30)	3(230)	3(60)	3(1.2)	29.14
4 [#]	1(0.1)	4(40)	4(240)	4(70)	4(1.6)	30.45
5 [#]	2(0.15)	1(10)	2(220)	3(60)	4(1.6)	30.91
6 [#]	2(0.15)	2(20)	1(210)	4(70)	3(1.2)	28.74
7 [#]	2(0.15)	3(30)	4(240)	1(40)	2(0.8)	25.68
8 [#]	2(0.15)	4(40)	3(230)	2(50)	1(0.4)	25.42
9 [#]	3(0.2)	1(10)	3(230)	4(70)	2(0.8)	22.46
10 [#]	3(0.2)	2(20)	4(240)	3(60)	1(0.4)	22.91
11 [#]	3(0.2)	3(30)	1(210)	2(50)	4(1.6)	31.22
12 [#]	3(0.2)	4(40)	2(220)	1(40)	3(1.2)	29.43
13 [#]	4(0.25)	1(10)	4(240)	2(50)	3(1.2)	26.43
14 [#]	4(0.25)	2(20)	3(230)	1(40)	4(1.6)	29.69
15 [#]	4(0.25)	3(30)	2(220)	4(70)	1(0.4)	22.78
16 [#]	4(0.25)	4(40)	1(210)	3(60)	2(0.8)	26.54

由表 2 可知,11[#] 试验获得材料拉伸强度最高,为 31.22 MPa,而 9[#] 试验获得的材料拉伸强度最差,为 22.46 MPa。

2.2 极差分析

对试验数据进行极差分析,其结果见表 3。

表 3 极差分析结果

极差	A	B	C	D	E
K_1	108.86	102.89	109.59	107.89	94.2
K_2	110.75	107.52	109.3	109.25	100.86
K_3	106.02	108.82	106.71	109.5	113.74
K_4	105.44	111.84	105.47	104.43	122.27
k_1	27.22	25.72	27.40	26.97	23.55
k_2	27.69	26.88	27.33	27.31	25.22
k_3	26.51	27.21	26.68	27.38	28.44
k_4	26.36	27.96	26.37	26.11	30.57
R	1.33	2.24	1.03	1.27	7.02

由表 3 可知,对于制件拉伸强度来说,影响因素 A, B, C, D, E 的极差值分别为 1.33, 2.24, 1.03, 1.27, 7.02, 结合图 2 可知,五个影响因素中外壳厚度(E)对制件的拉伸强度影响最为明显,填充密度(B)次之,随后是打印层厚(A)和填充速度(D)的影响,而打印温度(C)对制件拉伸性能影响较小,同时得到最佳工艺方案为 A2B4C1D3E4。

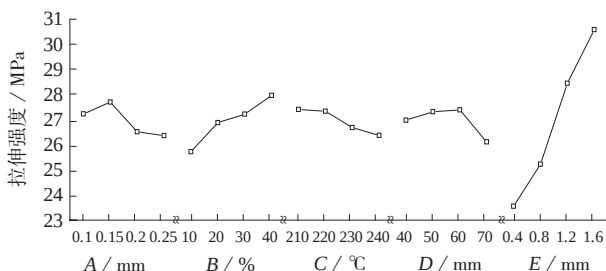


图2 各因素不同水平时制件的拉伸强度

2.3 回归分析

为进一步给 PLA FDM 3D 打印制件的生产制造提供参考,利用专业数据分析软件对本次试验结果进行回归分析并构造多元回归方程,具体方程结构形式如下:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 \quad (1)$$

其中 β_0 和 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ 分别为常数项和各自变量 (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) 的偏回归系数。根据最小二乘法原理,引入向量和矩阵,构建正规方程组的矩阵形式。

$$X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} & \cdots & X_{m1} \\ 1 & X_{12} & X_{22} & \cdots & X_{m2} \\ 1 & X_{13} & X_{23} & \cdots & X_{m3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{1n} & X_{2n} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_m \end{bmatrix}$$

$$A = X^T X, B = X^T Y, \text{ 得到 } A\beta = B \quad (2)$$

通过求解矩阵方程 (2) 得到 $\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y$, 本次试验中 $m=5, n=16$ 。

随后经回归分析,得到方程的常数项、偏回归系数值、偏回归系数置信区间以及检验统计量,具体分析结果见表 4。

表4 回归模型计算结果

回归系数	回归系数估计值	回归系数置信区间	检验统计量
β_0	30.23	[20.37, 40.08]	$R^2=0.95$
β_1	-7.50	[-15.81, 0.82]	$F=38.71$
β_2	0.07	[0.03, 0.11]	$P=0.00$
β_3	-0.04	[-0.08, 0.01]	$S^2=0.70$
β_4	-0.03	[-0.07, 0.02]	
β_5	6.07	[5.03, 7.11]	

根据表 4 所得的数据,得到以下回归方程:

$$Y = 30.23 - 7.5X_1 + 0.07X_2 - 0.04X_3 - 0.03X_4 + 6.07X_5 \quad (3)$$

根据检验统计量计算结果,其中相关系数平方 $R^2=0.95, F=38.71 > F_{0.05}(\alpha \text{ 按照常规取值,取 } 0.05), P=0 < \alpha=0.05, S^2=0.70$,均可说明方程拟合程度较好,回归效果理想。

2.4 验证试验

为了进一步验证数学模型的可靠性,任意选

择了三种打印工艺的试样进行验证,每种工艺试样取五个平行样,并计算出平均值记为该工艺下试样的拉伸强度。具体工艺参数、试验结果及预测分析见表 5。从验证结果可以看出,任意选择的三种工艺所获得的试样拉伸强度 σ_m 分别为 33.04, 29.73, 20.57 MPa,通过回归方程预测的试样拉伸强度值分别为 31.42, 28.56, 19.78 MPa,预测结果与实际测量结果误差分别为 4.9%, 3.9%, 3.8%,误差数值非常小,表明通过正交试验和回归分析建立的回归方程具有较高的重复性,拟合得到的数学模型可靠。

表5 正交试验结果

编号	试验因素					试验值 /	预测值 /	误差
	A	B	C	D	E	MPa	MPa	
1	2(0.15)	4(40)	1(210)	3(60)	4(1.6)	33.04	31.42	4.9%
2	1(0.1)	3(30)	2(220)	2(50)	3(1.2)	29.73	28.56	3.9%
3	4(0.25)	1(10)	4(240)	4(70)	1(0.4)	20.57	19.78	3.8%

2.5 讨论

根据正交试验结果,可知打印层厚、填充密度、打印温度、填充速度以及外壳厚度五个影响因素中,外壳的厚度对 PLA 制件的拉伸强度影响最为显著,其主要原因是试样在成型时选择大面水平的摆放取向, FDM 打印过程中,外壳的成型是丝材沿着拉伸载荷的方向进行沉积的,在进行拉伸试验时,分子之间本身的断裂强度远大于层间的粘结强度,因此外壳厚度越大,抵抗拉伸载荷的分子越多,拉伸强度提高^[17]。填充密度、打印层厚和填充速度对制件拉伸强度也有一定影响,从图 2 中可以看出,填充密度越高,制件拉伸强度越高,填充密度的增加会提高制件打印的填充程度,从而拉伸强度随之提升,但提升填充密度会降低加工效率,因此应按照制件要求选择合理的填充密度。打印层厚对拉伸强度的影响基本呈先升高后降低的趋势,层厚的增加会使单片固化层纵向拉伸能力提升,但层厚超过一定厚度之后会使固化层层间粘结面积减小,从而使拉伸强度降低。当采用较低的填充速度 (40, 50 mm/s 等) 时,制件拉伸强度基本变化不大,而填充速度超过一定值时,制件拉伸强度有所降低,其主要是由于过快的填充速度使得制件在成型过程中产生空洞、凹坑,而层与层之间的粘结强度也会减弱,从而影响制件拉伸强度。

3 结论

(1) 通过正交试验结果的极差分析,得出在试验范围内,外壳厚度对 PLA FDM 制件力学性能最为显著,填充密度、打印层厚和填充速度对制件拉伸强

度也有一定影响,而打印温度对制件拉伸强度影响较小。

(2) 由正交试验结果分析可知,PLA FDM 打印制件拉伸强度随外壳厚度和填充密度的升高而升高;随打印层厚和填充速度的升高呈现先升高后降低;随打印温度的升高基本保持不变。

(3) 通过实验结果分析可以得到获得最佳力学性能 PLA FDM 打印制件的工艺组合为 A2B4C1D3E4,即打印层厚 0.15 mm、填充密度 40%、打印温度 210℃、填充速度 60 mm/s、外壳厚度 1.6 mm。

(4) 采用正交试验和回归分析,拟合得到了 PLA FDM 打印制件力学性能与打印参数之间的数学回归方程,并用试验对方程可靠性进行验证,试验结果表明方程具有较高的重复性,可靠性良好。

参考文献

- [1] 朱艳青,史继富,王雷雷,等.3D 打印技术发展现状[J].制造技术与机床,2015(12):50-57.
Zhu Yanqing, Shi Jifu, Wang Leilei, et al. Current status of the three-dimensional printing technology[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2015(12):50-57.
- [2] 利普森,库曼.3D 打印:从想象到现实[M].北京:中信出版社,2013.
Hod Lipson, Melba Kurman. Fabricated the New World of 3D Printing[M]. Beijing: China Citic Press, 2013.
- [3] Brian Evans. 解析 3D 打印机:3D 打印机的科学与艺术[M].北京:机械工业出版社,2014.
Brian Evans. Practical 3D printers: The science and art of 3D printing[M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [4] 罗军.中国 3D 打印的未来[M].北京:东方出版社,2014.
Luo Jun. The future of China 3D printing[M]. Beijing: People's Oriental Press, 2014.
- [5] 卢秉恒,李涤尘.增材制造(3D 打印)技术发展[J].机械制造与自动化,2013,42(4):1-4.
Lu Bingheng, Li Dichen. Development of the additive manufacturing (3D Printing) technology[J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(4):1-4.
- [6] 王康,黄筱调,袁鸿.3D 打印技术最新进展[J].机械设计与制造工程,2015,44(10):1-6.
Wang Kang, Huang Xiaodiao, Yuan Hong. The latest development of 3D printing technology[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2015, 44(10):1-6.
- [7] 白鹤,赵明侠,王核心,等.FDM 3D 打印翘曲变形成因分析及解决对策[J].塑料工业,2019,47(1):60-68.
Bai He, Zhao Mingxia, Wang Hexin, et al. Analysis and countermeasures of warpage deformation in FDM 3D printing process[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(1):60-68.
- [8] 刘新宇,张乔石,赵凌锋,等.3D 打印精度影响及翘曲成因的分析与优化[J].科技创业月刊,2016(11):114-118.
Liu Xinyu, Zhang Qiaoshi, Zhao Lingfeng, et al. Analysis and optimization of 3D printing accuracy influence and warping cause[J]. Pioneering with Science & Technology Monthly, 2016(11):114-118.
- [9] Lee B H, Abdullah J, Khan Z A. Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169(1):54-61.
- [10] 雷芳,张燕琴,孟鑫沛.FDM 工艺成型参数对软材料 TPU 制品力学性能的影响[J].塑料,2019,48(2):123-126.
Lei Fang, Zhang Yanqin, Meng Xinpei. Influence of molding parameters on the mechanical properties for soft material tpu products in FDM process[J]. Plastics, 2019, 48(2):123-126.
- [11] 白鹤,周有源,王核心,等.基于 ABAQUS 的 FDM 工艺 3D 打印机喷嘴温度场模拟及结构优化[J].制造技术与机床,2019(4):41-44.
Bai He, Zhou Youyuan, Wang Hexin, et al. Temperature field simulation and structure optimization of FDM 3D-printing machine nozzle based on ABAQUS[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2019(4):41-44.
- [12] 王晗,杨卫民,焦志伟,等.FDM 工艺中填充率对塑料制品力学性能的影响[J].塑料,2018,47(1):92-112.
Wang Han, Yang Weimin, Jiao Zhiwei, et al. Effects of filling ratio in FDM technology on the mechanical properties of plastic products[J]. Plastics, 2018, 47(1):92-112.
- [13] 高伟娜,赵雄燕,孙占英,等.聚乳酸复合材料的研究进展[J].塑料,2014,43(5):39-41.
Gao Weina, Zhao Xiongyan, Sun Zhanying, et al. Research progress of polylactic acid composite materials[J]. Plastics, 2014, 43(5):39-41.
- [14] 李磊.基于 FDM 成型技术的 3D 打印工件机械性能及质量研究分析[D].广州:华南理工大学,2016.
Li Lei. Research and analysis on mechanical property and quality for 3D printing workpiece based on FDM molding technology[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [15] 徐运祺,潘永红,王万卷,等.3D 打印参数对聚乳酸力学性能的影响[J].塑料工业,2017,45(12):67-69.
Xu Yunqi, Pan Yonghong, Wan Wanjuan, et al. Effect of 3D printing parameters on mechanical properties of polylactic acid[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(12):67-69.
- [16] 迟百宏,解利杨,高晓东,等.FDM 工艺中构建取向对塑料制品力学性能的影响[J].塑料,2015,44(4):40-42.
Chi Baihong, Xie Liyang, Gao Xiaodong, et al. Effects of build orientation in FDM technology on mechanical properties of plastic products[J]. Plastics, 2015, 44(4):40-42.
- [17] 汪绍兴.基于 PLA 丝材的 FDM 试件机械性能分析及优化[D].大连:大连理工大学,2015.
Wang Shaoxing. Analysis and optimization of the mechanical properties for FDM specimens based on PLA filament[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.