

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.12.014

基于熔融沉积成型 3D 打印翘曲变形的工艺参数优化

闫存富¹, 乔雪涛¹, 郭晓红², 查保秀²

(1. 中原工学院机电学院, 郑州 450007; 2. 郑州唐隆机电有限公司, 郑州 450007)

摘要:以熔融沉积成型(FDM)3D打印制件的翘曲变形为研究对象,设计正交试验,研究成型室温度、喷嘴温度、成型速度对FDM3D打印翘曲变形的影响,采用极差分析和方差分析得到最佳工艺参数组合。结果表明,工艺参数的最优组合为成型室温度70℃,喷嘴温度235℃,成型速度45 mm/s,此时制件的翘曲变形量最小,为0.409 mm,对制件翘曲变形影响的主次顺序为:成型室温度>喷嘴温度>成型速度。随着成型室温度的增加,制件的翘曲变形量呈现逐渐减小的趋势;随着喷嘴温度的增加,制件的翘曲变形量呈现先增大后减小的趋势;随着成型速度的增加,制件的翘曲变形量呈现先减小后增大的趋势。

关键词:熔融沉积成型;正交试验;翘曲变形;工艺参数

中图分类号:TH16 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2021)12-0077-04

Optimization of Process Parameters for 3D Printing Warpage Deformation based on FDM

Yan Cunfu¹, Qiao Xuetao¹, Guo Xiaohong², Zha Baoxiu²

(1. School of Mechatronics Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China;

2. Zhengzhou Tanglong Mechatronics Co., Ltd., Zhengzhou 450007, China)

Abstract: The warping deformation of fused deposition modeling (FDM) 3D printed parts was studied based on the orthogonal experiments. The influences of parameters which include forming temperature, nozzle temperature and forming speed on FDM 3D printed parts warping deformation were studied. The optimal combination of process parameters is obtained by the range analysis and variance analysis method. The results show that the optimal parameters are forming temperature 70℃, nozzle temperature 235℃ and forming speed 45 mm/s, and the minimum deformation reaches the smallest value of 0.409 mm. The rank of the significant parameters affecting the warping deformation of the formed part is: forming temperature > nozzle temperature > forming speed. The warping deformation of formed part decreases with the increase of forming temperature, first increases and then decreases with the increase of nozzle temperature, and first decreases and then increases with the increase of forming speed.

Keywords: fused deposition modeling; orthogonal test; warping deformation; process parameter

熔融沉积成型(FDM)是将热塑性材料加热到一定状态,通过喷嘴挤压沉积到运动的工作台上,经过逐层堆积、粘结、冷却成型的一种快速成型工艺。自研制成功以来,因其具有制造成本较低、使用维护方便、成型工艺简单等优点而广泛应用于各个领域,已成为一种重要的快速成型制造技术之一^[1-3]。用于FDM的热塑性塑料有聚乳酸(PLA)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)、尼龙等。其中,PLA作为FDM的一种主要材料,具有良好的生物相容性、加

热熔融时无刺激性气味等优点,是一种环境友好的成型材料^[4-5]。很多学者对FDM的翘曲变形进行了研究,张捷等^[6]对翘曲变形过程及机理进行了研究,构建了FDM过程中翘曲变形发生的数学模型,定量分析了膨胀系数、成型室温、层厚与层数对翘曲变形的影响,并提出一些减小控制翘曲的具体措施。张志利^[7]用正交试验研究了分层厚度、成型速度、挤出温度和热床温度四种工艺参数对FDM制件翘曲变形的影响规律。张耿彬等^[8]采用正交试验研

基金项目:中原工学院博士科研启动项目(34110601)

通信作者:闫存富,博士,教授,机械工程师,主要从事快速成型制造方面的研究

收稿日期:2021-10-12

引用格式:闫存富,乔雪涛,郭晓红,等.基于熔融沉积快速成型3D打印翘曲变形的工艺参数优化[J].工程塑料应用,2021,49(12):77-80.

Yan Cunfu, Qiao Xuetao, Guo Xiaohong, et al. Optimization of process parameters for 3D printing warpage deformation based on FDM[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(12): 77-80.

究了喷嘴温度、平台温度和层厚对 PLA/木粉复合材料丝材 FDM 制件翘曲变形的影响。白鹤等^[9]研究了扫描速度、喷嘴温度、热床温度以及切片厚度等参数对 FDM 3D 打印过程中制件常见翘曲变形的影响规律。郭文霞^[10]以 ABS 树脂为成型材料,研究了堆积层片厚度、支撑结构、填充率等工艺参数对 FDM 制件翘曲变形的影响。曹师增等^[11]通过正交试验,采用矩阵分析法研究了喷嘴温度、填充速度和分层厚度三因素对 FDM 3D 打印翘曲变形量的综合影响程度。谢卓^[12]建立了翘曲变形量的数学模型,并通过正交试验研究了制件线性长度、分层厚度、成型温度以及成型层对 FDM 翘曲变形影响的主次顺序。桑鹏飞等^[13]分析了翘曲变形产生的根源,定量分析了沉积层数、材料收缩率和环境温度对翘曲变形的影响。陈葆娟等^[14]以 ABS 丝材为例,构建了 FDM 过程中翘曲变形理论模型,研究了堆积层数、成型室温度、制件尺寸和扫描速度等因素对 FDM 过程中制件的翘曲变形的影响程度。

以上学者从不同角度对 FDM 制件的翘曲变形现象进行了研究。翘曲变形现象普遍存在于快速成型工艺中, FDM 过程中的翘曲变形是指成型过程中,成型材料由熔融态向固态转变时体积收缩而导致的成型件形状沿一定方向偏离设计模型形状的变形现象,是 FDM 制件常见的缺陷之一,对成型件的质量有很重要的影响,因此研究 FDM 中的翘曲变形问题对提高 FDM 制件的质量具有重要的意义。如何合理选择成型参数,减小成型过程中制件的翘曲变形量已成为当前 FDM 研究的重要课题之一。

笔者以 PLA 为成型材料,基于正交试验,研究成型室温度、喷嘴温度及成型速度三因素对 FDM 工艺过程中的翘曲变形现象的影响,对试验结果进行方差和极差分析,并分析了各因素对翘曲变形影响的变化趋势,为提高 FDM 制件的质量提供理论参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PLA 丝材:直径为 1.75 mm,密度为 1 290 kg/m³,河南奥氟森高分子材料科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

桌面 FDM 3D 打印机:DO300 型,珠海西通电子有限公司;

百分表:精度为 0.01 mm,量程为 0~5 mm,上海量具厂。

1.3 正交试验设计及试样制备

利用 Inventor 软件绘制 20 mm×20 mm×5 mm 的长方体制件模型,保存为 STL 文档后,导入 3D 打印机中,逐层打印。设计三因素三水平正交试验,结果见表 1,研究成型室温度(A)、喷嘴温度(B)与成型速度(C)三个因素对成型件翘曲变形的影响,确定最优工艺参数组合;根据各因素数和水平数,选取 L₉(3³)进行正交试验,结果见表 2。为保证打印质量,打印前将喷嘴温度预热到 210℃,底板温度预热到 60℃,并清除喷嘴内的残料,设定打印层厚为 0.1 mm,填充率为 100%,工作台与喷嘴的接触间隙小于等于 0.088 mm。根据表 2 给出的试验条件打印制件模型。打印结束后,所有制件均先放置 30 min,待其自然冷却到稳定状态后,采用百分表分别测量制件四个角点和每条边中点处的最大翘曲量,为保证测量的准确性,每个点测量 3 次,对 3 次测量值取平均值,取测量的最大值作为试验的分析数据,测量结果见表 2。

表 1 正交试验因素水平

水平	因素		
	A/℃	B/℃	C/(mm·s ⁻¹)
1	45	215	35
2	55	225	45
3	70	235	55

表 2 正交试验结果

序号	A/℃	B/℃	C/(mm·s ⁻¹)	翘曲变形量/mm
1	45	215	35	0.563
2	45	225	45	0.506
3	45	235	55	0.525
4	55	215	45	0.435
5	55	225	55	0.421
6	55	235	35	0.535
7	70	215	55	0.425
8	70	225	35	0.415
9	70	235	45	0.409

2 结果与讨论

由表 2 可知,第 9 组试验的翘曲变形量测量值最小,为 0.409 mm,因此在所进行的 9 组试验中,参数的最优组合为 A₃B₃C₂,即成型室温度为 70℃,喷嘴温度为 235℃,成型速度为 45 mm/s。但由于正交试验只是做了全面试验中的部分试验,在确定上述最优组合时,并没有考虑剩余的试验结果,所以需要对试验数据进行理论分析,以确认上述最优组合是否就是需要的最优组合。

2.1 极差分析

对试验数据进行极差分析,结果见表 3。表 3 中 k_j 表示某一因素在 j (j=1,2,3) 水平时的翘曲变

形量均值,极差 R 表示某一因素的极差值。各因素对翘曲变形量影响程度的大小可用极差值来判断。因素的极差越大,表示在试验范围内该因素的取值对测量指标的影响越大^[15]。由表 3 极差分析结果可知,在试验取值范围内,对翘曲变形量影响最大的是 A ,其次 B ,对制件翘曲变形影响最小的是 C 。翘曲变形量最小的参数组合为 $A_3B_3C_2$,这与试验结果一致。

表 3 极差分析结果

项目	$A / ^\circ\text{C}$	$B / ^\circ\text{C}$	$C / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$
k_1	0.531 3	0.474 3	0.491 3
k_2	0.463 7	0.491 7	0.450 0
k_3	0.416 3	0.447 3	0.457 0
R	0.115 0	0.044 3	0.041 3

2.2 方差分析

极差分析法不能估计试验过程及试验结果中误差的大小,无法确定各因素对试验结果影响的显著性^[16]。而方差分析可以评价各因素对试验结果影响的显著性大小,因此,采用方差分析法来研究各因素对翘曲变形量影响的显著性。表 4 为方差分析结果。

表 4 方差分析结果

因素	离差平方和	自由度	F 值	响应度 / %
A	0.0200	2	12.947	62.65
B	0.0086	2	5.583	20.97
C	0.0052	2	3.385	16.38

从表 4 可以看出,在试验条件下, A , B 和 C 的 F 值分别为 12.947, 5.583, 3.385; 响应度分别为 62.65%, 20.97%, 16.38%。取显著性水平 $\alpha=0.05$, 查 F 分布表可知 $F_{0.05}(2,2)=19.0$, 由此可知, A , B , C 对制件的翘曲变形影响都不显著,其影响顺序大小依次为 $A > B > C$,这与极差分析结果一致。

2.3 单因素试验分析

为更直观地说明各因素对制件翘曲变形的影响规律,采用单因素法研究成型室温度、喷嘴温度和成型速度三因素对制件翘曲变形的影响。不同因素水平下制件的 k_j 如图 1 所示。

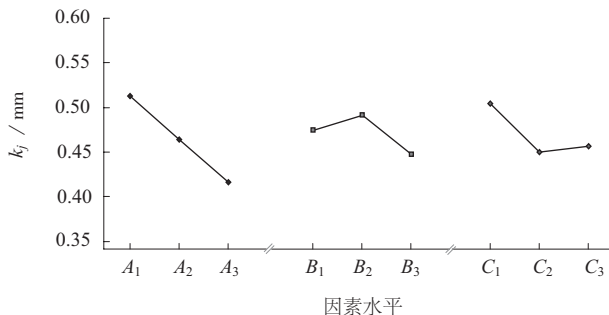


图 1 不同因素水平下制件的 k_j

由图 1 可知,随着成型室温度的增加,制件的翘曲变形量呈现逐渐减小的趋势。这是因为与挤出的新堆积层上、下表面接触的介质不同,新堆积层的上表面与空气接触,在成型室温度下自由收缩;下表面与已成型面粘结在一起,收缩时受到已成型面的阻力作用,表现为新堆积层上表面的收缩量大于下表面的收缩量。成型室温度越低,新堆积层的上表面与成型室温度差越大,冷却速度越快;而新堆积层与已堆积层接触的下表面温差变化很小,冷却速度变化也小,导致新堆积层上、下表面的收缩量的差值也越大,最终表现为成型室温度越高,制件翘曲变形量越小。这与前述极差分析结果一致。

由图 1 可知,随着喷嘴温度的增加,制件的翘曲变形量呈现先增大后减小的趋势。这与前述极差分析结果一致。这是因为喷嘴温度主要保证喷嘴内的成型材料维持在一定的熔融状态,以确保成型过程中成型材料能够顺利挤出。太低的喷嘴温度会增大喷嘴内材料的黏度,增大材料的挤压力,降低了材料的挤出速度,导致层间粘结强度降低,甚至产生剥离现象,影响制件表面质量。喷嘴温度太高时,会使喷嘴内的材料偏向于液态,降低了材料的黏度,同时会破坏材料的分子结构,增加了挤出过程的控制难度,甚至出现当后一层开始沉积时,前一层还没来得及完全凝固的现象,对前一层产生破坏作用,影响成型件的成型质量。因此在实际成型过程中,应针对不同的材料合理设定喷嘴温度。

成型速度是指成型过程中喷嘴的移动速度。由图 1 可知,随着成型速度的增加,制件的翘曲变形量呈现先减小后增大的趋势。这与前述方差分析结果一致。这主要是因为较大的成型速度能提高成型层间的粘结质量;当成型速度较小时,材料的固化时间增加,成型表面收缩变形增大,表现为较大的翘曲变形。但在实际的成型过程中,并不是成型速度越大越好,太大的成型速度容易增加成型装置的不稳定性。因此在实际成型过程中,应在保证成型装置稳定性的前提下,选用与挤出速度相匹配的尽量快的成型速度。

3 结论

基于设计的正交试验,采用方差分析法和极差分析法对试验数据进行分析,确定了最优成型工艺参数组合为 $A_3B_3C_2$,即成型室温度为 70°C ,喷嘴温度为 235°C ,成型速度为 45 mm/s ,此时制件的翘曲变形量最小,为 0.409 mm 。影响翘曲变形的工

艺参数主次顺序为:成型室温度>喷嘴温度>成型速度,三个参数的响应度依次为:62.65%,20.97%,16.38%。随着成型室温度的增加,制件的翘曲变形量呈现逐渐减小的趋势;随着喷嘴温度的增加,制件的翘曲变形量呈现先增大后减小的趋势;随着成型速度的增加,制件的翘曲变形量呈现先减小后增大的趋势。

参考文献

- [1] Guo Nannan, Leu M C. Additive manufacturing: Technology, applications and research needs[J]. Front Mech Eng, 2013, 8(3):215-243.
- [2] Boschetto A, Giordano V, Veniali F. 3D roughness profile model in fused deposition modeling[J]. Rapid Prototyping Journal, 2013, 19(4):240-252.
- [3] Bulanda K, Oleksy M, Oliwa R, et al. Biodegradable polymer composites used in rapid prototyping technology by melt extrusion polymers[J]. Polimery, 2020, 65(6):430-436.
- [4] 杨裕金,林鸿裕,杨晨,等.基于正交实验的熔融沉积成型工艺参数的优化[J].中国塑料,2019,33(6):69-75.
Yang Yujin, Lin Hongyu, Yang Chen, et al. Optimization of process parameters of fused deposition modeling based on orthogonal experiment[J]. China Plastics, 2019, 33(6):69-75.
- [5] 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, Wang Wanjuan, et al. Effect of 3D printing parameters on mechanical properties of polylactic acid[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(12):67-69.
- [6] 张捷,顾海,李彬,等.FDM工艺零件翘曲变形分析及实验研究[J].制造业自动化,2017,39(8):48-49,60.
Zhang Jie, Gu Hai, Li Bin, et al. The analysis and experimental research for warp deformation in FDM process[J]. Manufacturing Automation, 2017, 39(8):48-49,60.
- [7] 张志.FDM中PLA长方体翘曲变形数值模拟及工艺参数优化[D].南昌:江西理工大学,2021.
Zhang Zhi. Numerical simulation of warping deformation of PLA cuboid in FDM and optimization of process parameters[D]. Nanchang: Jiangxi University of Science and Technology, 2021.
- [8] 张耿彬,魏宝强,欧文靖,等.FDM 3D打印PLA/木粉复合材料翘曲变形影响因素分析[J].装备制造技术,2020(1):74-77.
- Zhang Gengbin, Wei Baoqiang, Ou Wenjing, et al. Analysis of factors influencing warpage of PLA/wood flour composite printed by FDM 3D[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2020(1):74-77.
- [9] 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):60-63,68.
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):60-63,68.
- [10] 郭文霞.熔融沉积成型技术中产生翘曲变形的工艺优化研究[J].内蒙古工业大学学报:自然科学版,2018,37(4):260-265.
Guo Wenxia. Research on process optimization of the buckling deformation in the process of fused deposition modeling[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology: Natural Science Edition, 2018, 37(4):260-265.
- [11] 曹师增,宋发成,刘元义,等.基于FDM的3D打印翘曲变形优化研究[J].塑料工业,2017,45(10):51-54.
Cao Shizeng, Song Facheng, Liu Yuanyi, et al. Research on optimization of warpage deformation of 3D printing based on FDM[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(10):51-54.
- [12] 谢卓.熔融沉积成型精度分析及工艺参数研究[D].合肥:合肥工业大学,2016.
Xie Zhuo. Study on Process and precision of fused deposition modeling[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [13] 桑鹏飞,刘凯,王扬威.熔融沉积成型中的原型翘曲变形分析[J].机械设计与研究,2015,31(3):118-120,124.
Sang Pengfei, Liu Kai, Wang Yangwei. A model research for prototype warp deformation in the FDM process[J]. Machine Design & Research, 2015, 31(3):118-120,124.
- [14] 陈葆娟,梁延德,何福本.熔融沉积成形试件翘曲成因的分析与优化[J].电加工与模具,2012(4):33-36.
Chen Baojuan, Liang Yande, He Fuben. Factor analysis and optimization of warpage deformation in FDM[J]. Electromachining & Mould, 2012(4):33-36.
- [15] Yan Cunfu, Li Shujuan, Yang Leipeng, et al. Investigation of FEF process liquid phase migration using orthogonal design of experiments[J]. Rapid Prototyping Journal, 2019, 25(3):388-396.
- [16] Wu Xuan, Leung D Y C. Optimization of biodiesel production from camelina oil using orthogonal experiment[J]. Applied Energy, 2011, 88(11):3 615-3 624.
- Mo Quanhu, Zhang Xuegang. Research on the influence of layer thickness to the forming precision of 3D printing[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2017, 46(4):25-29.
- [16] Celebi A. Investigation of fused deposition modeling processing parameters of 3D PLA specimens by an experimental design methodology[J]. Materials Testing, 2019, 61(5):405-410.

(上接第76页)

research on supporting structure parameters for fused deposition modeling[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2016, 14(6):520-524.

- [15] 莫泉湖,张学刚.3D打印成型方向和层厚对成型精度的影响研究[J].机械设计与制造工程,2017,46(4):25-29.