

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.11.016

基于灰色关联分析的 FDM 工艺参数与制件精度关系研究

白鹤¹, 张章¹, 刘亚明², 庞瑞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. 中国石油宝鸡石油钢管有限责任公司钢管研究院, 陕西宝鸡 721008;
3. 宝鸡石油钢管厂职工子弟学校, 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 $L_{16}(4^5)$ 正交试验设计, 对工艺参数 (打印层厚、热床温度、打印温度、填充速度、填充路径图案) 不同的 16 组熔融沉积成形 (FDM) 3D 打印聚乳酸 (PLA) 制件 X, Y, Z 三个方向成型精度进行了检测和分析, 确定了各因素对制件每个方向成型精度的影响显著性和最佳工艺组合, 并在此基础上利用灰色关联分析法和极差计算, 建立了制件尺寸精度多目标优化模型, 得到制件尺寸精度综合最优的工艺参数组合为打印层厚 0.15 mm, 热床温度 55℃, 打印温度 220℃, 填充速度 45 mm/s 以及同心圆的填充方式。最后对所建立模型进行试验验证, 结果表明该模型可靠性高, 可为 FDM 3D 打印制件成型精度提升和工艺优化提供参考。

关键词: 聚乳酸; 灰色关联分析; 正交试验; 熔融沉积成形; 工艺参数; 精度

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)11-0080-05

Research on the Relationship between FDM Process Parameters and Part Accuracy Based on Grey Relational Analysis

Bai He¹, Zhang Zhang¹, Liu Yaming², Pang Rui³, 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. Baoji Steel Pipe Factory School, Baoji 721008, China; 4. Beijing CANVBOT Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: Three directions (X, Y, Z) part accuracy of 16 groups of polylactic acid (PLA) parts with different FDM 3D-printing process parameters (layer thickness, worktable temperature, printing temperature, filling speed, filling path) were tested and analyzed by using $L_{16}(4^5)$ orthogonal test. In each direction, the influence of every factor and the best process parameters combination were determined. On this basis, the gray relational analysis method and range analysis were used to establish the multi-objective optimization model which can obtain the best dimensional accuracy part. The optimal process parameters are layer thickness 0.15 mm, worktable temperature 55℃, printing temperature 220℃, filling speed 45 mm/s and filling path concentric. At last, the verification test was carried out. The results show that the model reliability is high. This model could supply references for improving FDM 3D-printing part accuracy and optimizing process.

Keywords: polylactic acid; grey relational analysis; orthogonal test; FDM; process parameters; accuracy

3D 打印技术也可叫增材制造技术或减维制造技术, 主要是利用数字模型, 将液态材料或固态丝材、粉材通过层层叠加的工艺方式加工生产具有复杂外形和内部结构物体的技术^[1-5]。相比传统的减材制造工艺, 3D 打印技术可极大程度减少加工过程中的材料浪费^[6-7]。随着我国推进智能制造步伐的

进一步加快, 3D 打印技术已成为当今社会最具有发展潜力的技术之一^[8]。

熔融沉积成型简称 FDM 成型, 是众多 3D 打印工艺中发展最成熟, 使用最广泛的工艺之一, 其特点是成本低、操作简单方便, 所使用的聚乳酸 (PLA) 材料也拥有良好的生物降解性, 进一步体现了对环

基金项目: 宝鸡职业技术学院 2020 年度院级课题 (2020037Z), 陕西省教育厅 2020 年度科学研究计划 (20JK0492)

通信作者: 白鹤, 讲师, 工程师, 主要从事 3D 打印技术研究及教学 E-mail: shawu1983@163.com

收稿日期: 2020-09-02

引用格式: 白鹤, 张章, 刘亚明, 等. 基于灰色关联分析的 FDM 工艺参数与制件精度关系研究 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(11): 80-84, 94.

Bai He, Zhang Zhang, Liu Yaming, et al. Research on the relationship between FDM process parameters and part accuracy based on grey relational analysis[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(11): 80-84, 94.

境的友好性,因此,FDM 3D 打印工艺迅速受到了各行业的关注^[9-14]。随着我国制造业的不断发展,人们对 FDM 3D 打印制品要求越来越高,制品成型精度与材料、加工工艺的关系也成为了目前众多科研工作者的研究方向。

笔者采用五因素四水平正交试验设计,使用 FDM 3D 打印的 PLA 制件,讨论了打印层厚、热床温度、打印温度、填充速度以及填充路径图案对制件成型尺寸精度的影响,并采用灰色关联分析,得出制件的三个方向尺寸精度指标综合最优的工艺参数组合,并通过实验进行验证,为 FDM 3D 打印制件成型精度提升和工艺优化提供参考。

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。

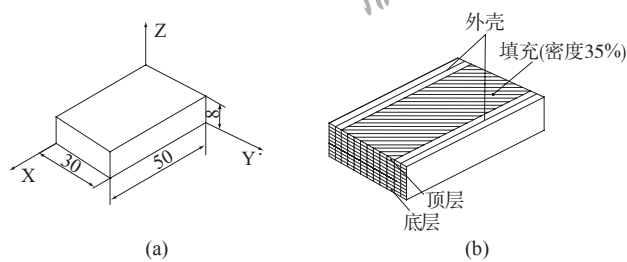
1.2 主要设备及仪器

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

游标卡尺:Eee 3V 数显游标卡尺(0~200 mm),台湾数控工具有限公司。

1.3 试样制备

笔者采用长方体形制件,其结构和尺寸如图 1 所示。



a—制件尺寸;b—制件形状及结构

图 1 制件形状及尺寸

其中长度(X方向) $L=50$ mm,宽度(Y方向) $W=30$ mm,高度(Z方向) $H=8$ mm。首先,根据制件形状和尺寸要求进行三维建模,并保存成 STL 格式文件输出,随后采用专用切片软件 Cura 进行模型切片和打印参数设置,其中打印头直径 0.4 mm,填充密度设置为 35%,外壳厚度 0.8 mm,制件顶层和底层厚度为 1 mm。试样大面水平放置。打印层厚(A)、热床温度(B)、打印温度(C)、填充速度(D)以及填充路径图案(E)按照 $L_{16}(4^5)$ 正交试验方法进行设定,具体数据详见表 1^[15]。根据 $L_{16}(4^5)$ 正交试验要求,

笔者共制作 16 组试样,所采用的填充路径图案如图 2 所示。

表 1 正交试验因素水平表

水平	A/mm	B/℃	C/℃	D/(mm·s ⁻¹)	E
1	0.1	40	200	35	直线
2	0.15	45	210	45	交叉
3	0.2	50	220	55	网格
4	0.25	55	230	65	同心圆



(a) (b) (c) (d)

a—直线;b—交叉;c—网格;d—同心圆

图 2 制件填充路径图案示意图

1.4 尺寸精度测量方法

成型试件尺寸精度测量主要采用高精度数显游标卡尺分别对 X、Y、Z 三个方向尺寸值进行测量,每个方向均测量三次,求其平均值后计算该平均值与对应方向理论值之差的绝对值,以此值代表三个方向的尺寸误差。

2 结果与讨论

2.1 正交试验结果

制件 X、Y、Z 三方向的尺寸误差分别记为: ΔX 、 ΔY 、 ΔZ ,测量结果见表 2。

表 2 正交试验结果

试验号	试验因素					ΔX / mm	ΔY / mm	ΔZ / mm
	A	B	C	D	E			
1 [#]	1(0.1)	1(40)	1(200)	1(35)	1 直线	0.54	0.22	0.07
2 [#]	1(0.1)	2(45)	2(210)	2(45)	2 交叉	0.61	0.16	0.09
3 [#]	1(0.1)	3(50)	3(220)	3(55)	3 网格	0.66	0.19	0.01
4 [#]	1(0.1)	4(55)	4(230)	4(65)	4 同心圆	0.48	0.14	0.10
5 [#]	2(0.15)	1(40)	2(210)	3(55)	4 同心圆	0.61	0.18	0.02
6 [#]	2(0.15)	2(45)	1(200)	4(65)	3 网格	0.75	0.30	0.05
7 [#]	2(0.15)	3(50)	4(230)	1(35)	2 交叉	0.59	0.18	0.03
8 [#]	2(0.15)	4(55)	3(220)	2(45)	1 直线	0.58	0.13	0.01
9 [#]	3(0.2)	1(40)	3(220)	4(65)	2 交叉	0.63	0.22	0.10
10 [#]	3(0.2)	2(45)	4(230)	3(55)	1 直线	0.86	0.35	0.00
11 [#]	3(0.2)	3(50)	1(200)	2(45)	4 同心圆	0.49	0.10	0.03
12 [#]	3(0.2)	4(55)	2(210)	1(35)	3 网格	0.70	0.25	0.09
13 [#]	4(0.25)	1(40)	4(230)	2(45)	3 网格	0.83	0.39	0.06
14 [#]	4(0.25)	2(45)	3(220)	1(35)	4 同心圆	0.53	0.14	0.10
15 [#]	4(0.25)	3(50)	2(210)	4(65)	1 直线	0.86	0.37	0.14
16 [#]	4(0.25)	4(55)	1(200)	3(55)	2 交叉	0.54	0.15	0.13

由表 2 可知,10[#]、15[#] 试样在 X 方向误差最大,为 0.86 mm,4[#] 试样在 X 方向误差最小,为 0.48 mm;13[#] 试样在 Y 向误差最大,0.39 mm, Y 向误差最小的试样为 11[#] 试样,误差值为 0.1 mm;15[#] 试样在 Z 方向误差最大,为 0.14 mm,而 10[#] 试样 Z 向误差为 0,为所有试样中 Z 方向误差最小的。

2.2 极差分析

对试验数据进行极差分析,其结果如图3所示,由于分析对象为尺寸误差,其值越小则说明制件精度越高,因此,对于制件X方向尺寸精度来说,最佳工艺方案为A1B4C1D1E4,五个因素的极差值分别为0.118,0.113,0.115,0.09,0.208;填充路径图案影响最为显著,其次是打印层厚、打印温度和热床温度,填充速度影响最小;在制件Y方向,五个因素极差值为0.085,0.085,0.095,0.063,0.143,填充路径图案依然为影响最显著的因素,打印层厚、打印温度和

热床温度影响显著性相当,填充速度影响最小;最佳工艺方案为A1B4C3D2E4;保证Z方向尺寸精度的最佳方案为A2B3C4D3E3,五个因素的极差值分别为0.08,0.03,0.038,0.058,0.035。打印层厚是最显著因素,填充速度次之,其余三因素极差值相近,显著性较低。通过数据分析,发现各因素在影响制件X,Y,Z三个方向尺寸精度方面,显著性各不同,且每个方向的最佳工艺方案也不同,因此,要获得制件综合精度最佳的工艺方案,可采用灰色关联分析法。

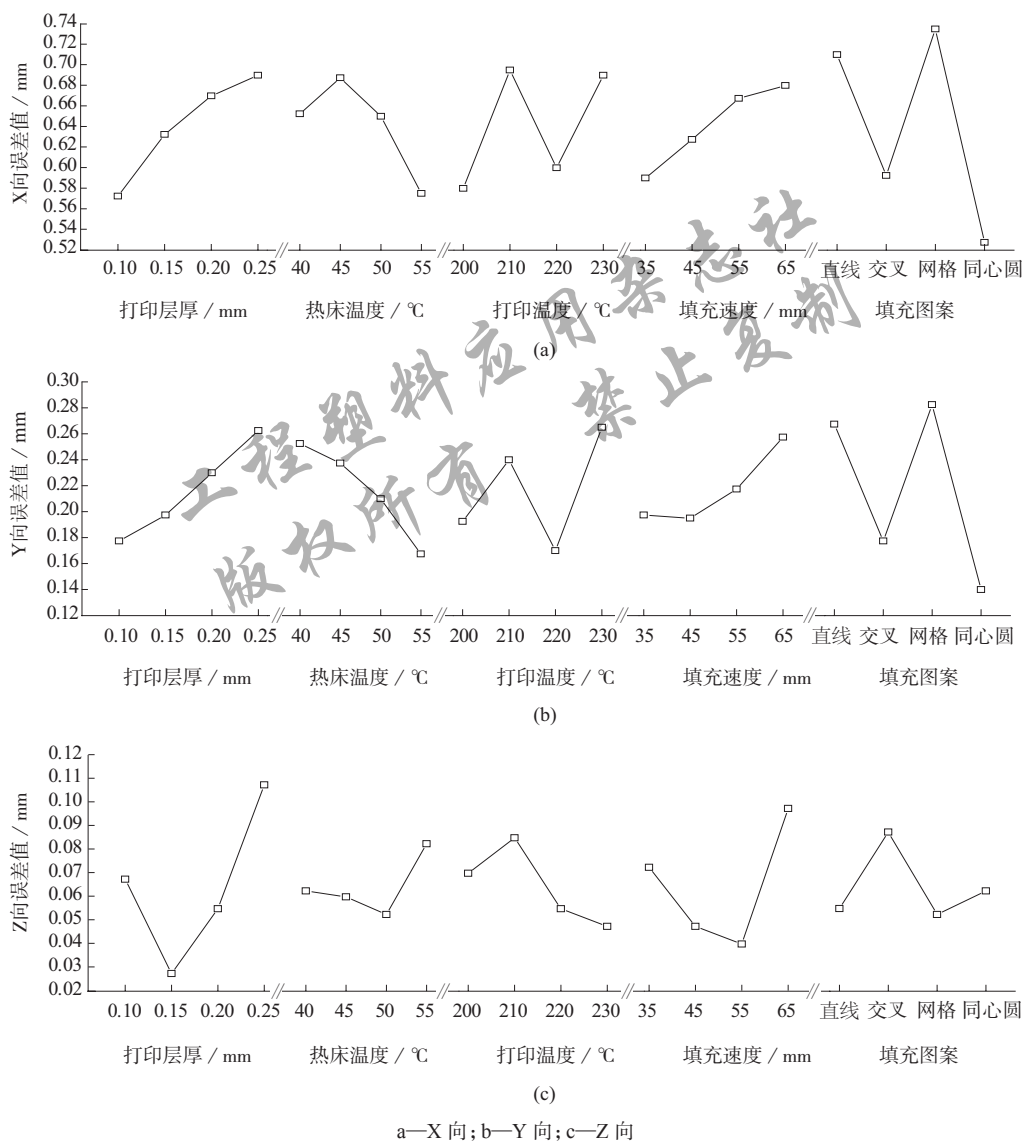


图3 各因素不同水平时制件X,Y,Z三个方向误差值的极差分析

2.3 灰色关联分析

灰色关联分析是根据因素之间发展趋势的相似或相异程度(灰色关联度),作为衡量因素间关联程度的一种方法^[16]。它反映一个对象相对于最优

对象关联度的大小,关联度越大越接近于最优,相反则越差,该方法是一种成熟、准确的计算方法^[17-18]。灰色关联分析可分为以下三个步骤。

(1) 灰生成,其过程就是确定参考和比较数列,

并对原始数据进行无量纲数据处理。由于本次试验分析的是制件三个方向实际尺寸和理论尺寸之差的绝对值,该值越小,制件精度越高,因此,采用望小特性的数据处理公式^[19]。

$$x_{ij} = \frac{\max_j y_{ij} - y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}} \quad (i=1, \dots, m; j=1, \dots, n) \quad (1)$$

上式中 x_{ij} 为生成序列, y_{ij} 为指标序列, m 为对象数,本次试验取 16, n 为指标数,取 3。

(2) 计算灰关联系数。

$$\lambda(x_{0j}, x_{ij}) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \zeta \Delta_{\max}} \quad (i=1, \dots, m; j=1, \dots, n) \quad (2)$$

式中 λ 为灰关联系数, Δ_{ij} 为 x_{0j} 与 x_{ij} 差的绝对值, ζ 为分辨系数,一般取值为 0.5^[20], $\Delta_{\min}$ 为 Δ_{ij} 值中的最小值, $\Delta_{\max}$ 为 Δ_{ij} 的最大值。

(3) 灰关联度,在得到灰关联系数后,采用下式计算灰关联度 Γ 。

$$\Gamma(x_0, x_i) = \sum_{j=1}^n w_j \lambda(x_{0j}, x_{ij}) \quad (i=1, \dots, m; j=1, \dots, n) \quad (3)$$

其中 x_i 为生成序列, $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$, w_j 为权重系数,由具体问题类型所决定,且在单

个对象中所有指标权重系数之和等于 1^[19],本次实验 X, Y, Z 三个方向尺寸误差权重系数均取 0.333。表 3 为灰关联度计算结果。

表 3 灰关联度计算结果

试验号	灰生成			灰关联系数			灰关联度 Γ
	ΔX	ΔY	ΔZ	λ_1	λ_2	λ_3	
1 [#]	0.84	0.59	0.50	0.76	0.55	0.50	0.60
2 [#]	0.66	0.79	0.36	0.59	0.71	0.44	0.58
3 [#]	0.53	0.69	0.93	0.51	0.62	0.88	0.67
4 [#]	1.00	0.86	0.29	1.00	0.78	0.41	0.73
5 [#]	0.66	0.72	0.86	0.59	0.64	0.78	0.67
6 [#]	0.29	0.31	0.64	0.41	0.42	0.58	0.47
7 [#]	0.71	0.72	0.79	0.63	0.64	0.70	0.66
8 [#]	0.74	0.90	0.93	0.66	0.83	0.88	0.79
9 [#]	0.61	0.59	0.29	0.56	0.55	0.41	0.51
10 [#]	0.00	0.14	1.00	0.33	0.37	1.00	0.57
11 [#]	0.97	1.00	0.79	0.95	1.00	0.70	0.88
12 [#]	0.42	0.48	0.36	0.46	0.49	0.44	0.46
13 [#]	0.08	0.00	0.57	0.35	0.33	0.54	0.41
14 [#]	0.87	0.86	0.29	0.79	0.78	0.41	0.66
15 [#]	0.00	0.07	0.00	0.33	0.35	0.33	0.34
16 [#]	0.84	0.83	0.07	0.76	0.74	0.35	0.62

对灰色关联度进行极差分析,并绘制曲线,见图 4 所示。从图 4 可以看出, A2B4C3D2E4 工艺组合为制件三方向尺寸精度指标综合最优工艺参数。

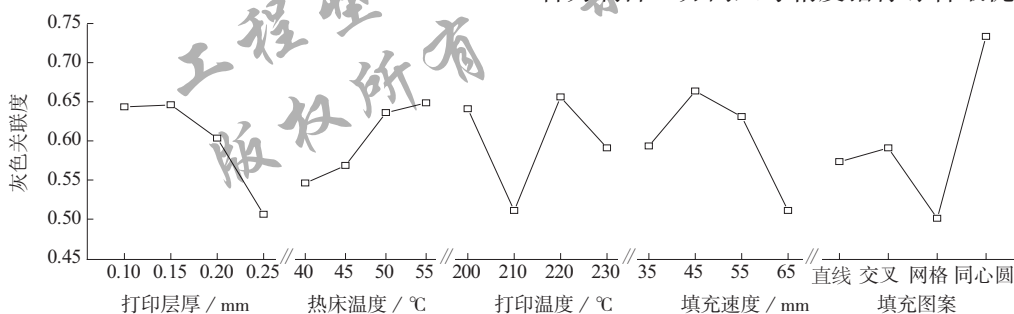


图 4 灰色关联度极差分析图

2.4 灰色关联度结果分析

从灰色关联度极差分析结果可以看出,五种因素对 FDM 3D 打印的 PLA 制件精度均有影响,打印层厚对制件尺寸精度影响呈现先升高后降低的趋势,0.15 mm 层厚制件精度最高,当打印层厚太小时,材料在沉积过程中挤压严重,同时加之温降所产生的收缩,导致制件变形,影响精度,当打印层厚较大时,会导致制件细节部分缺失,从而造成制件精度降低。在 40~55℃ 范围内,随热床温度升高,制件精度呈上升趋势,这是因为热床温度越高,材料在沉积冷却过程中温差越小,内应力越低,使得制件精度提高。打印温度 220℃ 时,制件精度最高,适当的喷嘴温度会使丝材熔融状态良好,材料之间的结合力高,同时还有利于控制材料的应力。如图 4 所示,

随填充速度升高,制件精度先升后降,在 45 mm/s 时,制件精度最高,其是由于较低的填充速度使材料堆积冷却时温度梯度大,内应力增加,制件变形,过高的填充速度会使材料加热时间变短,熔融程度低,粘结力差,易被喷嘴拉动产生位移,从而降低制件精度。四种填充图案中,采用交叉和同心圆的填充方式加工的制件精度相对较高,这是因为上述两种填充方式在制件时不存在自相交,同时材料冷却时应力的分布也符合热力学冷却规律。

2.5 验证试验

按照分析得到的最优工艺参数 A2B4C3D2E4 进行制样,并开展试验验证,与表 3 中最佳工艺参数的 11[#] 试样相比,试验样件 X, Y, Z 三个方向误差分别从 0.49, 0.10, 0.03 mm 降到 0.46, 0.05, 0.02 mm,

灰色关联度 Γ 为 0.93, 比 11[#] 试样高出 0.05, 因此, 通过多目标优化模型所得到的工艺参数组合是所有工艺参数组合中的最佳组合。同时也验证了填充路径图案是影响 X, Y 方向误差的显著因素, 特别是采用不存在自相交现象的交叉和同心圆填充方式, 可有效提升制件 X, Y 方向的精度。

3 结论

(1) 通过正交试验极差分析, 发现五种因素对制件 X, Y, Z 三个方向成型精度影响显著性各有不同, 最佳工艺方案也不同。X 方向上, 填充路径图案为最显著因素, 其次是打印层厚、打印温度和热床温度, 最佳工艺方案为 A1B4C1D1E4; Y 方向最显著影响因素依然是填充路径图案, 打印层厚、打印温度和热床温度影响显著性相当, 最佳工艺方案为 A1B4C3D2E4; 保证 Z 方向尺寸精度最佳方案为 A2B3C4D3E3, 打印层厚是最显著因素, 填充速度次之。

(2) 在正交试验基础上, 基于灰色关联分析法和极差计算, 建立了制件尺寸精度多目标优化模型, 得到制件尺寸精度综合最优的工艺参数组合为 A2B4C3D2E4, 即为打印层厚 0.15 mm, 热床温度 55℃, 打印温度 220℃, 填充速度 45 mm/s 以及同心圆的填充方式。

(3) 对建立的模型进行试验验证, 结果表明, 验证试验制件较正交试验中灰关联度最高的 11[#] 制件, X, Y, Z 三个方向误差均有所降低且灰关联度升高, 说明该模型有效可靠。

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, 赵凌峰, 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] 王微, 阚玉锦, 王宏琴, 等. FDM 3D 打印参数对打印件精度的影响研究 [J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2019, 37(1):123-125.
Wang Wei, Kan Yujin, Wang Hongqin, et al. Study on the influence of FDM 3D printing parameters on the precision of printed parts[J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition, 2019, 37(1):123-125.
- [10] 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.
- [11] 陈勇, 黄筱调, 袁鸿, 等. 熔融沉积成型工艺参数优化研究 [J]. 现代制造工程, 2016(11):73-78, 83.
Chen Yong, Huang Xiaodiao, Yuan Hong, et al. FDM technical parameters optimization research[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2016(11):73-78, 83.
- [12] 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.
- [13] 祝洲杰, 沈建云, 金济民. FDM 制件的收缩现象分析及控制措施研究 [J]. 制造技术与机床, 2016(12):29-32.
Zhu Zhoujie, Shen Jianyun, Jin Jimin. The shrinkage analysis and control methods research of FDM products[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(12):29-32.
- [14] 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.

- 2016,30(10):91-96.
- Zhang Weihe. Design of a large-sized and precision injection mould for automobile headlight lenses[J]. China Plastics, 2016, 30(10):91-96.
- [8] 高慧,张文兵,沈建新,等. 汽车油箱密封盖注塑模具的研制[J]. 中国塑料, 2015, 29(11):113-116.
- Gao Hui, Zhang Wenbing, Shen Jianxin. Development of injection molds for automobile fuel tank sealing covers[J]. China Plastics, 2015, 29(11):113-116.
- [9] 程国飞,丁立刚,魏文强,等. 带斜孔的U形支座注塑模具设计[J]. 现代塑料加工应用, 2020, 32(2):46-49.
- Cheng Guofei, Ding Ligang, Wei Wenqiang, et al. Design of injection mold for U-shaped base with inclined hole[J]. Modern Plastics Processing And Applications, 2020, 32(2):46-49.
- [10] 唐联耀,侯贤州. 一种薄壁船形车篮成型模具的设计[J]. 现代塑料加工应用, 2018, 30(6):61-63.
- Tang Lian Yao, Hou Xianzhou. Design of a thin-walled boat-shaped basket forming mould[J]. Modern Plastics Processing And Applications, 2018, 30(6):61-63.
- [11] 杨军,曾霞文,王雪红. 烟花塑料底座多向斜抽芯注射模设计[J]. 模具工业, 2016, 42(12):45-51.
- Yang Jun, Zeng Xiawen, Wang Xuehong. Design of injection mould with multi-ram inclined core—pulling for plastic firework base[J]. Die & Mould Industry, 2016, 42(12):45-51.
- [12] 张维合. 汽车风箱右盖注塑模具设计[J]. 现代塑料加工应用, 2015, 27(6):45-48.
- Zhang Weihe. Design of injection mold for car's airtank-right[J]. Modern Plastics Processing And Applications, 2015, 27(6):45-48.
- [13] 易忠奇,贺柳操. 汽车雨挡导流片浮顶式侧抽芯机构注射模设计[J]. 中国塑料, 2020, 34(5):97-101.
- Yi Zhongqi, He Liucan. Design of injection mold with floating roof side core pulling mechanism for rain deflector[J]. China Plastics, 2020, 34(5):97-101.
- [14] 汤定德,田科. 无人机叶片特殊三次脱模机构简化型模具设计[J]. 中国塑料, 2019, 33(12):80-88.
- Tang Dingde, Tian Ke. Design of simplified mold with special three-step demolding mechanism for blade of unmanned aerial vehicle[J]. China Plastics, 2019, 33(12):80-88.
- [15] 肖露云,张建卿. 双模旋转式嵌件自动装载注塑模具设计[J]. 中国塑料, 2019, 33(4):100-105.
- Xiao Luyun, Zhang Jianqing. Design of automatic loading injection mold with double mold rotary insert[J]. China Plastics, 2019, 33(4):100-105.
-
- (上接第84页)
- 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.
- [15] 陈文,徐小兵,李增超,等. 基于CAE和正交试验的工艺参数对翘曲变形的研究[J]. 塑料科技, 2019, 47(6):99-102.
- Chen Wen, Xu Xiaobing, Li Zengchao et al. Study on warpage deformation of process parameters based on CAE and orthogonal test[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(6):99-102.
- [16] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2002:122-124.
- Deng Julong. Basic of grey theory[M]. Wuhan Huazhong University of Science & Technology Press, 2002:122-124.
- [17] 刘思峰,蔡华,杨英杰,等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8):2 041-2 046.
- Liu Sifeng, Cai Hua, Yang Yingjie, et al. Advance in grey incidence analysis modelling[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013, 33(8):2 041-2 046.
- [18] 侯菊池. Grey relational analysis method for multiple attribute decision making in intuitionistic fuzzy setting[J]. Journal of Convergence Information Technology, 2010, 5(10):194-199.
- [19] 张媛. 熔融沉积快速成型精度及工艺研究[D]. 大连:大连理工大学, 2009.
- Zhang Yuan. Study on process precision of fused deposition modeling[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [20] 李生鹏. 熔融沉积成型零件精度及机械性能研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2015.
- Li Shengpeng. Research on accuracy and mechanical property for fused deposition modeling part[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.