

成型加工
与设备基于熵值法和灰色关联的 FDM 3D 打印机
喷嘴结构优化设计*

邓文强, 郭润兰, 李典伦, 薛凯

(兰州理工大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 喷嘴结构对熔融沉积成型 (FDM) 三维 (3D) 打印机的成型精度有重要影响, 有必要根据各种工艺情况对其进行优化设计以获得理想的打印精度。而现有的喷嘴结构优化研究, 存在试验变量少、优化目标单一等不足, 忽略了挤出速度和挤出温度对成型精度的耦合效应, 导致优化结果往往与实际情况相差较远。针对上述问题, 本文以喷嘴加热长度、散热长度、出口长度和收敛角为试验因素, 以喷嘴出口截面速度均值、速度标准差、温度均值和温度标准差为优化指标, 采用熵值法和灰色关联法对其进行优化设计, 并通过 3D 打印实验进一步验证了优化结果的准确性。结果表明: 经过优化, 喷嘴出口截面速度均值和温度均值提高了 1.1% 和 0.6%, 速度标准差和温度标准差降低了 2.4% 和 46.8%, 打印零件 x 、 y 、 z 方向的平均尺寸误差降低了 39.5%、44.4% 和 48.5%。

关键词: 3D 打印; 喷嘴; 熵值法; 灰色关联法; 优化设计

中图分类号: TH122; TQ320

文献标识码: A

文章编号: 1005-5770 (2020) 11-0060-06

doi: 10.3969/j.issn.1005-5770.2020.11.012

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Optimization Design for the Nozzle Structure of FDM 3D Printer Based on the Entropy Method and Grey Correlation

DENG Wen-qiang, GUO Run-lan, LI Dian-lun, XUE Kai

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The nozzle structure was important to the precision of fused deposition modeling (FDM) three dimensional (3D) printer, and it was necessary to optimize the nozzle structure according to various technological conditions to obtain the ideal printing precision. While the current nozzle structure optimization research was insufficient for the fewer test variables, single optimization goal, as well as ignoring the coupling effect of extrusion speed and temperature on manufacturing precision. As a result, the optimization results were often far from the actual situation. In order to solve these problems, taking the nozzle heating length, heat dissipation length, exit length and convergence angle as test factors, and taking nozzle exit section velocity average, velocity standard deviation, temperature average and temperature standard deviation as optimization indicators, the entropy method and grey correlation method were used to optimize the nozzle, and the accuracy of the optimization results were further verified by 3D printing experiments. The results show that the average velocity and average temperature of the nozzle exit section increase 1.1% and 0.6%, respectively, by the optimization. While the velocity standard deviation and temperature standard deviation reduce 2.4% and 46.8%, respectively. Furthermore, the 3D printing parts average size error in x , y , z direction reduces 39.5%, 44.4% and 48.5%, respectively.

Keywords: Three Dimensional Printing; Nozzle; Entropy Method; Grey Correlation Method; Optimal Design

熔融沉积成型 (FDM) 是一种典型的三维 (3D) 打印技术, 具有操作简单、成本低廉、材料利用率高等优点, 在航空航天、生物医疗、新产品开发、汽车制造等领域得到了广泛的应用^[1-2]。喷嘴是 3D 打印机的核心部件, 喷嘴结构对熔融材料挤出速度和挤出温度有重要影响, 喷嘴结构设计的不合理, 常常会导致打印过程喷嘴堵料和成型精度差等一系列

问题^[3-4]。

针对上述问题, 许多学者进行了研究与尝试。丁文捷等^[5]分析熔融材料在喷嘴内部的热流分布, 通过对隔热机构和散热机构的改进优化了喷嘴; 朱黎立等^[6]通过分析喷嘴内部熔融材料的温度分布和应变情况, 对喷嘴的冷却装置进行了改进优化; 白鹤等^[7]对喷嘴温度场进行有限元模拟, 通过改变喷嘴

加热长度、六方体高度和圆锥体实现了喷嘴的优化; 王君等^[8]发现打印组件结构设计不合理是导致喷嘴堵料的主要原因, 通过改变隔热管的长度对喷嘴进行了优化; 汤耿等^[9]研究了喷嘴直径比、过渡圆弧半径和收敛角对打印材料流动性能的影响规律, 并以此为基础对喷嘴结构进行了优化; 高强等^[10]以喷嘴收敛角、过渡圆弧半径和整流段长度为试验因素, 以喷嘴出口速度为优化指标, 采用田口法和有限体积法对喷嘴结构进行了优化; 李卫飞等^[11]以喷嘴加热腔长度、加热腔温度和丝料过道长度为试验因素, 以喷嘴出口截面的速度均值和标准差为优化指标, 采用田口方法对喷嘴进行了优化。

以上研究, 或优化了喷嘴挤出温度, 或优化了喷嘴挤出速度, 优化目标单一, 忽略了挤出速度和挤出温度对打印精度的耦合影响, 导致优化结果往往与实际情况相差较远。因此, 本文从喷嘴挤出速度优化和挤出温度优化两方面出发, 以喷嘴加热长度、散热长度、出口长度和收敛角为试验因素, 以喷嘴出口截面速度均值、速度标准差、温度均值和温度标准差为优化指标, 利用熵值法和灰色关联法对喷嘴进行优化设计, 从而降低喷嘴堵料概率, 提高打印精度。

1 模型建立

1.1 喷嘴物理模型

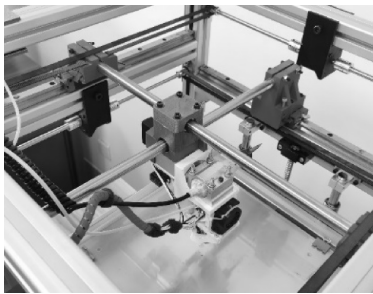


图 1 FDM 3D 打印机
Fig 1 FDM 3D Printer

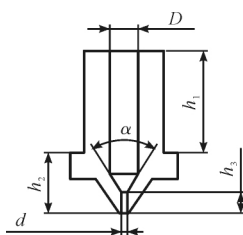


图 2 喷嘴结构
Fig 2 Nozzle structure

图 1 为本文研究的 FDM 3D 打印机, 其喷嘴结构如图 2 所示。喷嘴的主要参数包括入口直径 D 、出

口直径 d 、加热长度 h_1 、散热长度 h_2 、出口长度 h_3 和收敛角 α 等。初始条件下, 喷嘴入口直径 $D=2$ mm、出口直径 $d=0.4$ mm, 加热长度 $h_1=9.5$ mm, 散热长度 $h_2=6.5$ mm、出口长度 $h_3=1.5$ mm、收敛角 $\alpha=120^\circ$ 。

1.2 喷嘴流体仿真数学模型

丝料的相变过程遵循质量守恒定律、能量守恒定律, 喷嘴和流体的传热遵循三维稳态温度场方程。

(1) 能量守恒方程

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} + w \frac{\partial t}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

式中, u 、 v 、 w —流体速度分量; α —热扩散率;

(2) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

式中, ρ —密度; t —时间; u_x 、 u_y 、 u_z —分别为流体 x 、 y 、 z 方向的速度分量。

(3) 喷嘴传热学模型

$$\begin{cases} -\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = q \\ -\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1} = 0 \\ -\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = \alpha (T - T_0) \end{cases} \quad (3)$$

式中, T —温度; q —热源密度; T_0 — Γ_2 介质的温度; α — Γ_2 的换热系数; λ — Γ_1 和 Γ_2 法向导热系数; λ_x 、 λ_y 、 λ_z —分别为介质 x 、 y 、 z 方向的导热系数。

2 喷嘴优化设计

熔融材料挤出的速度和温度对打印精度有重要影响, 加热温度设置合理且恒定时, 挤出速度和挤出温度越高越好。喷嘴入口直径和出口直径由丝料确定, 一般情况下不宜改动。因此, 在其他参数不变的情况下, 本文以喷嘴加热长度、散热长度、出口长度和收敛角为试验因素, 以喷嘴出口截面速度均值、速度标准差、温度均值和温度标准差为优化指标, 利用熵值法和灰色关联法对喷嘴结构进行多目标优化设计。

2.1 正交试验设计

表 1 正交试验因素和水平

Tab 1 Orthogonal experiment factors and levels

水平	试验因素			
	加热长度 h_1 / mm	散热长度 h_2 / mm	出口长度 h_3 / mm	收敛角 α / ($^\circ$)
1	5.5	4.5	0.5	115
2	7.5	5.5	1.0	120
3	9.5	6.5	1.5	125

口直径 d 、加热长度 h_1 、散热长度 h_2 、出口长度 h_3 和收敛角 α 等。初始条件下, 喷嘴入口直径 $D=2$ mm、出口直径 $d=0.4$ mm, 加热长度 $h_1=9.5$ mm, 散热长度 $h_2=6.5$ mm、出口长度 $h_3=1.5$ mm、收敛角 $\alpha=120^\circ$ 。

根据优化要求，各因素向下和向上各取一个水平进行正交试验，具体如表1所示。根据表1进行正交试验设计，结果如表2所示。

表2 正交试验表

Tab 2 Orthogonal design table

序号	试验因素			
	加热长度 h_1 / mm	散热长度 h_2 / mm	出口长度 h_3 / mm	收敛角 $\alpha / (^\circ)$
1	5.5	4.5	0.5	115
2	5.5	5.5	1	120
3	5.5	6.5	1.5	125
4	7.5	4.5	1.5	120
5	7.5	5.5	0.5	125
6	7.5	6.5	1	115
7	9.5	4.5	1	125
8	9.5	5.5	1.5	115
9	9.5	6.5	0.5	120

2.2 流体仿真分析

(1) 边界条件设置

根据正交试验表，绘制各试验方案的喷嘴三维模型，然后将其导入 ANSYS Fluent 软件进行流体仿真。分析时，将喷嘴材料设为黄铜，打印材料设为聚乳酸 (PLA)，两种材料的详细物理参数设置见表3。网格划分时，采用四面体网格划法，网格大小为 0.25 mm，并采用膨胀层对流体域网格进行加密处理。

表3 黄铜和 PLA 的物理参数

Tab 3 Physical parameters of brass and PLA

材料名称	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	泊松比	比热容/ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	热导率/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	动力黏度/ $\text{Pa} \cdot \text{s}$
黄铜	8 500	0.30	380	130	-
PLA	1 250	0.35	2 040	0.231	1 200

熔融材料在喷嘴内为不可压缩黏性流体的定常流动，打开能量方程，流动状态设为层流。定义喷嘴与加热块接触的区域为热源，喷嘴与空气接触的区域为自然对流换热表面。环境温度设为 20 °C，加热温度设为 210 °C，对流换热系数取 20 W / (m² · K)，丝料入口速度 $v = 2 \text{ mm/s}$ ，流体出口为自由出口。

(2) 仿真结果

计算得到各试验方案喷嘴出口截面的速度云图和温度云图，分别如图3和图4所示。

将各试验方案喷嘴出口截面的仿真数据导入 excel 分别计算均值和标准差，结果如表4所示。

表4 各试验数据的均值和标准差

Tab 4 The mean and standard deviation of each experiment data

序号	仿真试验结果			
	平均速度 $/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	速度标准差 $/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	平均温度 $/^\circ\text{C}$	温度标准差 $/^\circ\text{C}$
1	26.093 6	23.027 9	199.871 1	8.278 0
2	28.227 7	23.322 9	200.215 4	7.555 5
3	27.265 3	23.069 2	201.809 3	6.067 4
4	27.455 1	23.363 5	202.694 5	5.880 0
5	27.239 4	23.778 7	203.224 8	5.184 3
6	27.947 4	23.754 0	203.994 4	4.483 4
7	28.232 0	24.007 2	204.285 0	4.540 8
8	27.874 4	24.034 3	205.707 5	3.220 5
9	28.033 3	23.878 0	205.579 7	3.178 8

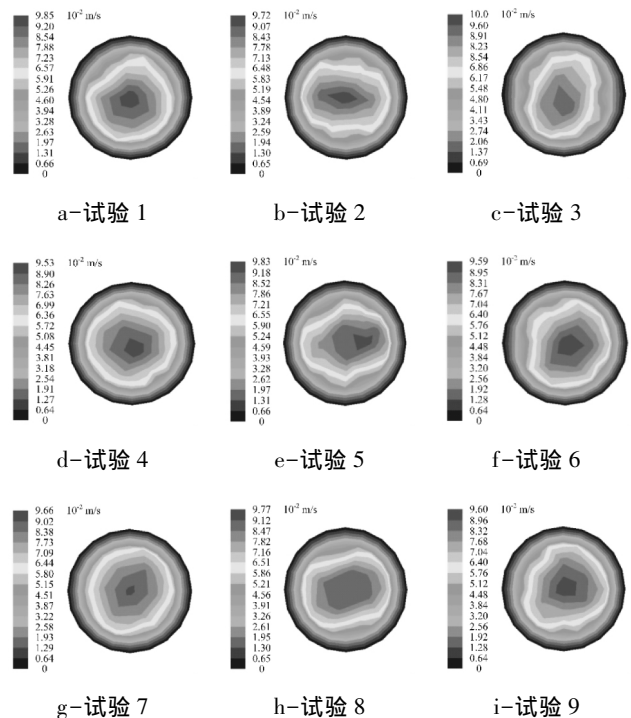


图3 喷嘴出口截面速度云图

Fig 3 Nozzle exit section velocity cloud diagram

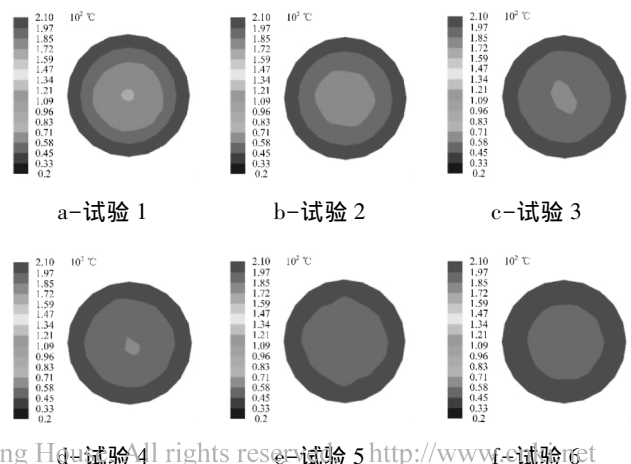


图4 喷嘴出口截面温度云图

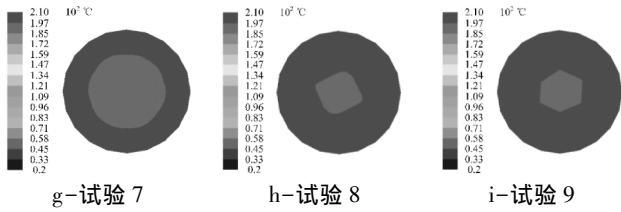


图 4 喷嘴出口截面温度云图

Fig 4 Temperature cloud diagram of nozzle outlet section

2.3 试验数据处理

(1) 计算灰色关联矩阵

按照灰色关联法^[12]建立矩阵 A (第一至第四列分别为速度均值、速度标准差、温度均值和温度标准差)。

$$A = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} & x_{1,4} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} & x_{2,4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{9,1} & x_{9,2} & x_{9,3} & x_{9,4} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对速度均值和温度均值归一化处理:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{9j})}{\max(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{9j}) - \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{9j})} \quad (5)$$

对速度标准差和温度标准差归一化处理:

$$r_{ij} = \frac{\max(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{9j}) - x_{ij}}{\max(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{9j}) - \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{9j})} \quad (6)$$

式中, $i=1, 2, \dots, 9; j=1, 2, \dots, 4$ 。

根据优化要求, 构造目标矩阵 $K = [k_1, k_2, \dots, k_m]$, $k_m = \max(r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{9j})$ 。记 ξ_{ij} 为第 i 个比较序列与目标序列 K 中第 j 项指标的关联系数。

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j |k_j - r_{ij}| + \rho \max_i \max_j |k_j - r_{ij}|}{|k_j - r_{ij}| + \rho \max_i \max_j |k_j + r_{ij}|} \quad (7)$$

式中, ρ -分辨系数, 取 0.5。

矩阵 A 经过 (4) ~ (7) 处理后得到关联系数矩阵 ξ :

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_{1,1} & \xi_{1,2} & \xi_{1,3} & \xi_{1,4} \\ \xi_{2,1} & \xi_{2,2} & \xi_{2,3} & \xi_{2,4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \xi_{9,1} & \xi_{9,2} & \xi_{9,3} & \xi_{9,4} \end{bmatrix} \quad (8)$$

(2) 熵值法计算权重

计算第 j 项指标下第 i 项数据的比重:

$$a_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (9)$$

计算第 j 项指标的熵值:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m a_{ij} \ln a_{ij} \quad (10)$$

计算第 j 项指标的差异系数:

$$h_j = 1 - e_j \quad (11)$$

计算第 j 项指标的权重:

$$w_j = \frac{h_j}{\sum_{i=1}^m h_j} \quad (12)$$

(3) 计算各试验方案关联系数:

$$\gamma = \xi w \quad (13)$$

式中, w -优化指标权重系数矩阵; γ -试验方案的灰色关联度矩阵。

(4) 最优参数组合求解

由式 (4) ~ (13) 得到各试验方案的灰色关联度, 如表 5 所示。由表 5 得到各因素水平的平均关联度, 如表 6 所示。由表 6 可知, 喷嘴结构尺寸的最优参数组合为: 加热长度 $h_1 = 9.5$ mm, 散热长度 $h_2 = 6.5$ mm、出口长度 $h_3 = 1.5$ mm、收敛角 $\alpha = 120^\circ$ 。为验证优化结果的准确性, 将喷嘴初始模型和优化后模型分别导入 ANSYS Fluent 软件中进行流体仿真, 结果如表 7 所示。

表 5 各试验方案的灰色关联度

Tab 5 Grey correlation degree of each experiment plan

序号	加热长度 h_1 /mm	散热长度 h_2 /mm	出口长度 h_3 /mm	收敛角 $\alpha/(^\circ)$	相关度
1	5.5	4.5	0.5	115	0.496 0
2	5.5	5.5	1	120	0.587 8
3	7.5	6.5	1.5	125	0.584 2
4	7.5	4.5	1.5	120	0.539 1
5	7.5	5.5	0.5	125	0.505 7
6	9.5	6.5	1	115	0.625 0
7	9.5	4.5	1	125	0.670 0
8	9.5	5.5	1.5	115	0.769 1
9	9.5	6.5	0.5	120	0.796 1

表 6 各因素水平的平均关联度

Tab 6 Average correlation degree of each factor level

加热长 度 h_1 / mm	相关度	散热长 度 h_2 / mm	相关度	出口长 度 h_3 / mm	相关度	收敛角 α / $(^\circ)$	相关度
5.5	0.556 0	4.5	0.568 3	0.5	0.599 3	115	0.630 0
7.5	0.556 6	5.5	0.620 9	1.0	0.627 6	120	0.641 0
9.5	0.745 1	6.5	0.668 5	1.5	0.630 8	125	0.586 6

由表 7 可知, 经过优化, 喷嘴出口截面的平均速度和平均温度提高了 1.1% 和 0.6%, 速度标准差和温度标准差降低了 2.4% 和 46.8%。相比优化前, 优化后喷嘴出口截面的速度和温度分布更均匀, 喷嘴出丝更加顺畅, 可以降低打印过程堵料的概率, 同时熔融材料的收缩形变大幅降低, 可有效提高打印精度。

表7 优化前后流体仿真结果

Tab 7 Fluid simulation results before and after optimization

参数	平均速度 /mm · s ⁻¹	速度标准差 /mm · s ⁻¹	平均温度 /°C	温度标准差 /°C
优化前	27.617 8	24.107 4	203.301 7	5.190 8
优化后	27.910 8	23.537 1	206.101 9	2.763 0
变化率/%	1.1	-2.4	0.6	-46.8

3 实验验证

为进一步验证优化结果的准确性，在图1所示的FDM 3D打印机上安装优化前和优化后的喷嘴进行长方体零件的3D打印实验，每组实验分别做3次，共获得6个成型件（每次打印的工艺参数设置相同）。优化前喷嘴和优化后喷嘴的部分打印成品如图5所示。打印完成后，分别测量各成型件x、y、z方向上的尺寸误差，然后取各测量数据的平均值作为成型精度的评价指标，实验结果如表8所示。

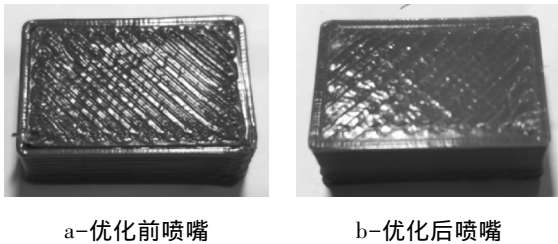


图5 部分3D打印成品

Fig 5 Part of 3D printing end product

表8 实验结果对比

Tab 8 Comparison of experimental results

	x方向误差/mm	y方向误差/mm	z方向误差/mm
优化前喷嘴	0.38	0.45	0.33
优化后喷嘴	0.23	0.25	0.17
变化率/%	-39.5	-44.4	-48.5

由表8可知，采用优化后喷嘴打印零件的尺寸误差普遍降低了40%左右，打印的精度明显得到了提高。打印实验进一步验证了优化结果的准确性。

4 结论

1) 喷嘴挤出速度和挤出温度呈明显的分层现象，越靠近喷嘴出口截面外圆，挤出速度越小、温度越高，越靠近出口截面中心，挤出速度越大，温度越低，这是导致喷嘴堵料和打印精度差的主要原因。

2) 喷嘴最优参数组合为：加热长度 $h_1 = 9.5$ mm、散热长度 $h_2 = 6.5$ mm、出口长度 $h_3 = 1.5$ mm、收敛角 $\alpha = 120^\circ$ 。经过优化，喷嘴出口截面速度和温度的均值提高了1.1%和0.6%，速度和温度的标准差降低了2.4%和46.8%，挤出性能得到有效提高。

3) 相比优化前，优化后喷嘴打印的零件x、y、z方向上的平均尺寸误差分别降低了39.5%、44.4%和48.5%，实验数据进一步验证了优化结果的准确性。研究结果为提高3D打印精度提供了理论参考。

参考文献

[1] 秦瑞冰, 乌日开西·艾依提, 腾勇. FDM式3D打印技术研究进展 [J]. 制造技术与机床, 2020 (2): 40-44.
QIN R B, WURIKAIXI A, TENG Y. Recent progress on FDM 3D printing [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2020 (2): 40-44.

[2] 刘洋子健, 夏春蕾, 张均, 等. 熔融沉积成型3D打印技术应用进展及展望 [J]. 工程塑料应用, 2017, 45 (3): 130-133.
LIU Y Z J, XIA C L, ZHANG J, et al. Application progress and prospect of fused deposition molding 3D printing [J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45 (3): 130-133.

[3] 吴彦之, 侯和平, 徐卓飞, 等. 熔融沉积成型喷头系统的研究进展 [J]. 中国塑料, 2019, 33 (9): 116-124.
WU Y Z, HOU H P, XU Z F, et al. Research progress of fused deposition molding nozzle system [J]. China Plastics, 2019, 33 (9): 116-124.

[4] 孔甜甜, 薛平, 蔡建臣. 喷嘴结构对FDM制备玻璃纤维增强聚乳酸复合材料性能的影响 [J]. 塑料工业, 2017, 45 (8): 39-43.
KONG T T, XUE P, CAI J C. Effect of nozzle structure on properties of glass fiber reinforced polylactic acid composites fabricated by FDM [J]. China Plastics Industry, 2017, 45 (8): 39-43.

[5] 丁文捷, 丁子元, 郝洪涛, 等. FDM型3D打印喷头的传热结构分析与设计 [J]. 塑料, 2020, 49 (3): 94-97.
DING W J, DING Z Y, HAO H T, et al. Analysis and design of heat transfer structure of FDM 3D printing nozzle [J]. Plastics, 2020, 49 (3): 94-97.

[6] 朱黎立, 周敏, 高强, 等. FDM 3D打印机喷头温度场分析与结构优化 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018 (8): 18-22, 28.
ZHU L L, ZHOU M, GAO Q, et al. FDM 3D printer nozzle temperature field analysis and structure optimization [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018 (8): 18-22, 28.

[7] 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 H, ZHOU Y Y, WANG H X, 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.

- [8] 王君, 陈红杰, 龚雅静, 等. 3D 打印机喷头组件结构优化设计 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017 (10): 157-160.
WANG J, CHEN H J, GONG Y J, et al. Structural optimization design of printing nozzle assembly for 3D printer [J]. Modular Machine Tool and Automatic Processing Technology, 2017 (10): 157-160.
- [9] 汤耿, 徐卫平, 伍权, 等. 基于 ANSYS CFX 的三维打印喷头结构优化设计 [J]. 贵州师范大学学报 (自然科学版), 2014, 32 (1): 96-99.
TANG G, XU W P, WU Q, et al. Structure optimization design of 3D printing head based on ANSYS CFX [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2014, 32 (1): 96-99.
- [10] 高强, 周敏, 朱黎立, 等. FDM 3D 打印机喷嘴流场分析与结构优化 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018 (11): 34-37, 47.
GAO Q, ZHOU M, ZHU L L, et al. Flow field analysis and structure optimization of FDM 3D printer nozzle [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018 (11): 34-37, 47.
- [11] 李卫飞, 王贤琳, 陈梦雪, 等. 基于 Fluent 的 FDM 3D 打印机喷头分析与结构优化 [J]. 机床与液压, 2019, 47 (16): 129-134.
LI W F, WANG X L, CHEN M X, et al. Sprinkler analysis and structure optimization of FDM 3D printer based on fluent [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47 (16): 129-134.
- [12] 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): 2041-2046.
LIU S F, CAI H, YANG Y J, et al. Advance in grey incidence analysis modelling [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 33 (8): 2041-2046.
(本文于 2020-08-13 收到)
- (上接第 45 页)
- [12] GAVGANI J N, ADELNIA H, SADEGHI G M M, et al. Intumescent flame retardant polyurethane/starch composites: Thermal, mechanical, and rheological properties [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 131 (23): 243-254.
- [13] RÉTI C, CASETTA M, DUQUESNE S, et al. Flammability properties of intumescent PLA including starch and lignin [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2008, 19 (6): 628-635.
- [14] XIONG Z, YANG Y, FENG J X, et al. Preparation and characterization of poly (lactic acid) /starch composites toughened with epoxidized soybean oil [J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 92 (1): 810-816.
- [15] XIONG Z, ZHANG L S, MA S Q, et al. Effect of castor oil enrichment layer produced by reaction on the properties of PLA/HDI-g-starch blends [J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 94 (1): 235-243.
- [16] JIA P Y, XIA H Y, TANG K H, et al. Plasticizers derived from biomass resources: A short review [J]. Polymers, 2018.
- [17] JIA P Y, BO C Y, ZHANG L Q, et al. Synthesis of castor oil based plasticizers containing flame retarded group and their application in poly (vinyl chloride) as secondary plasticizer [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015, 28: 217-224.
- [18] 胡云, 冯国东, 周永红. 植物油基含磷增塑剂 DOPO-ESO 的合成及应用 [J]. 工程塑料应用, 2014 (8): 90-93.
HU Y, FENG G D, ZHOU Y H. Synthesis and application of vegetable oil-based phosphoric plasticizer DOPO-ESO [J]. Engineering Plastics Application, 2014 (8): 90-93.
- [19] JIA P Y, ZHANG M, HU L L, et al. Thermal degradation behavior and flame retardant mechanism of poly (vinyl chloride) plasticized with a soybean-oil-based plasticizer containing phosphaphenanthrene groups [J]. Polymer Degradation and Stability, 2015, 121: 292-302.
- [20] SOARES R M D, LIMA A M F, OLIVERIA R V B, et al. Thermal degradation of biodegradable edible films based on xanthan and starches from different sources [J]. Polymer Degradation and Stability, 2005, 90 (3): 449-454.
- [21] 黄邹松, 龙丽娟, 黄伟江, 等. 一种 DOPO 衍生物合成及其对 PLA 阻燃性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47 (5): 127-136.
HUANG Z S, LONG L J, HUANG W J, et al. Synthesis of a DOPO derivative and its effect on flame retardancy of poly-lactic acid [J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47 (5): 127-136.
- [22] WANG X, HU Y, SONG L, et al. Flame retardancy and thermal degradation of intumescent flame retardant poly (lactic acid) /starch biocomposites [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50 (2): 713-720.
- [23] WANG X, HU Y, SONG L, et al. Flame retardancy and thermal degradation of intumescent flame retardant starch-based biodegradable composites [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009, 48: 3150-3157.
- [24] 张通, 龙丽娟, 何文涛, 等. 9, 10-二氢-9-氧杂-10-磷杂菲-10-氧化物衍生物阻燃聚乳酸的性能研究 [J]. 高分子学报, 2019, 50 (1): 79-89.
ZHANG T, LONG L J, HE W T, et al. Flame-retardant properties of 9, 10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide derivatives in poly (lactic acid) [J]. Acta Polymerica Sinica, 2019, 50 (1): 79-89.
(本文于 2020-07-29 收到)