

液压式熏香 3D 打印机参数试验与结果分析

陈亚茹, 孙维连, 王志超, 张成杰
(河北农业大学 机电工程学院, 保定 071000)

摘要: **目的** 研究了熏香 3D 打印机的初级试验参数, 达到为后续优化和批量生产提供技术规范和数据支持的目的。**方法** 基于课题组前期设计试制的熏香 3D 打印机进行试验, 通过试验分析挤出压力、打印速度、出料口与打印平台的距离、模型复杂程度、出料口直径、水料混合比等参数对熏香 3D 打印机的打印效果和打印效率的影响, 分析研究影响熏香打印机的主、次参数。**结果** 挤出压力为 0.4~0.6 MPa, 打印速度为 1800~2400 mm/min 时, 打印效果较好; 出料口与打印平台的最适宜距离为 10~12 mm。**结论** 挤出压力与打印速度是影响熏香成型效果的最重要的 2 个因素。

关键词: 熏香; 3D 打印机; 试验参数; 回归模型

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)21-0150-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.21.027

Parameter Test and Result Analysis of Hydraulic Incense 3D Printer

CHEN Ya-ru, SUN Wei-lian, WANG Zhi-chao, ZHANG Cheng-jie
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China)

ABSTRACT: The paper aims to research parameters for preliminary test of incense 3D printer to provide technical specifications and data support for subsequent optimization and mass production. Based on the experimental design of the incense 3D printer, the test was carried out to analyze the extrusion pressure, printing speed, distance between the discharge port and the printing platform, model complexity, outlet diameter, water mix ratio and other parameters. Their influences on printing effect and printing efficiency of the incense 3D printer were analyzed to analyze and research main and secondary parameters affecting the incense printer. When the extrusion pressure was 0.4 MPa to 0.6 MPa and the printing speed was 1800 mm/min to 2400 mm/min, the printing effect was better; the optimum distance between the discharge port and the printing platform was 10 mm to 12 mm. Extrusion pressure and printing speed are the two most important factors affecting the effect of incense molding.

KEY WORDS: incense; 3D printer; experimental parameter; regression model

目前市场上销售的熏香以线香、盘香为主, 其中线香是由液压缸挤压熏香原料, 使其通过网状模具形成线条; 盘香是将未干燥硬化的线香放置于旋转的盘香机上, 人工操作制作完成。随着市场需要的变化, 动物造型香的需求量逐渐上升。动物造型以及其他造型的熏香是通过小型模具拓制或手工循迹制作完成的, 手工制作劳动强度大, 效率低, 报废率高^[1]。采用 3D 打印的方法制作动物造型熏香以及其他造型的

熏香是解决目前困难的一个可行的方法。熏香的 3D 打印模拟人工制作的主要流程, 且以效率高、浪费少、成品率高、降低劳动强度为基本设计要求。

熏香的主要原料是木粉、香料、黏合剂等纯天然物质, 不能采用现有 3D 打印技术中的熔融沉积或激光烧结等方法成型^[2], 不能使用合成的化学黏合剂, 只能采用成型后自然晾干的方式, 才能保证香产品原有成分和功效, 因此采用 3D 打印技术生产熏香具有

收稿日期: 2018-07-08

基金项目: 河北省教研基金(1009032)

作者简介: 陈亚茹 (1992—), 女, 河北农业大学硕士生, 主攻机电一体化。

通信作者: 孙维连 (1956—), 男, 河北农业大学教授、博导, 主要研究方向为机电一体化。

非常大的技术难度。文中通过大量实验，分析得到了熏香 3D 打印成型的最优参数组合，并对优化后的参数组合进行了实验验证，验证结果满足了熏香产品的打印要求^[3]。

1 液压式熏香 3D 打印机的结构与工作原理

1.1 结构

液压式熏香 3D 打印机装置的结构见图 1。该打印装置主要由三维运动机构、间歇性传送机构以及出料系统组成。其中三维运动机构是 3D 打印机实现运动的主要部分,主要包括 xyz 方向的同步带转送单元,伺服电机、减速机等^[4]。数控系统控制各轴方向的电机的转动速度和方向,进而控制三维机构的运动,打印头固定在 z 轴上随三维机构的运动而运动。间歇性传送机构是为实现连续打印而设计的,主要由伺服电机、主动链轮、从动链轮、传送链板等构成。出料系统主要由液压缸、调压阀、电磁阀、液压站、料筒、料筒活塞及固定板等附件组成,见图 2。为了保证挤出装置整体的刚度和强度,固定板采用长度为 1000 mm,宽度为 100 mm,厚度为 10 mm 的铝板制作而成,通过螺栓与三维运动机构 y 轴上的移动滑块固定在一起,这种装配方法装配容易、维修方便、便于调整间隙。

1.2 工作原理

该装置采用机、电、液一体化设计,进行 3D 打印熏香时,首先将熏香粉末与水揉成团状。然后装入料筒,选择不同的打印头并配合一定的挤出动力^[5]。打开数控系统中编辑好的 G 代码,通过数控系统与三维运动机构的连接,实现三维立体熏香的打印。

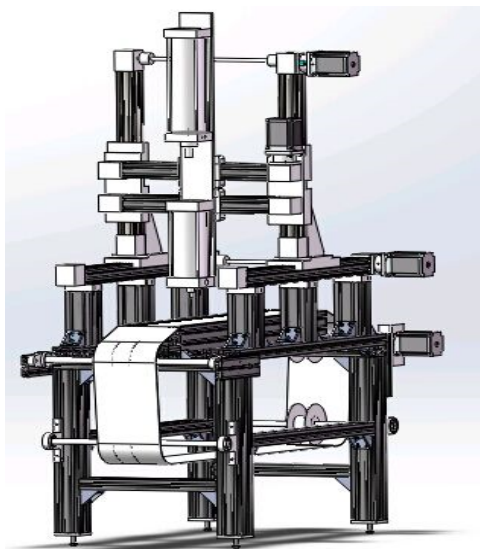


图 1 熏香 3D 打印机三维结构
Fig.1 Tri-dimensional structure of incense 3D printer

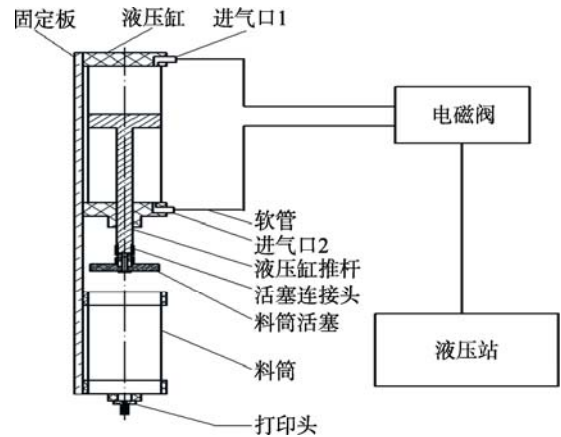


图 2 出料系统
Fig.2 Discharge system

2 试验

2.1 材料

试验采用的材料是某熏香企业提供的不同材料、不同混合比的熏香粉末。试验用水为普通自来水,加热沸腾后,冷却至 60~70 ℃使用。主要仪器设备:前期试制的熏香 3D 打印机、电子秤(精度为 0.01 g)、量筒(容量 500 mL,精度 5 mL)。

为后续试验可以顺利进行,需先将熏香粉末与水揉成团状。用电子秤量取 500 g 熏香粉末,用量筒量取 60~70 ℃的热水 1000 mL,将水缓慢加入熏香粉末中,并揉和直至熏香粉末和水完全融合,成为团状,揉和时注意其粘合程度,以不与手粘连为宜。

2.2 方法

通过分析前期的准备试验可知,影响熏香打印成型效果的因素包括:挤出压力、打印速度、出料口与打印平台的距离、出料口直径、打印平台材质、水料混合比、模型复杂程度等。在这些影响因素中有主要因素也有次要因素,通过试验确定各因素对成型效果的影响程度,并优化选择主要因素的参数。

熏香打印成型后的主要指标为熏香线条缺失情况、重叠情况、断续情况等定性指标,通过外观整体判断将这些定性指标打分量化,按照定量指标处理;次要指标为打印时间。

为提高试验成功的概率,提高产品的自动化程度,保证产品的打印效果,熏香 3D 打印机的参数由数控系统控制。试验时分别采用不同材质的打印平台承载打印的产品,以检验不同材质的支撑板对成型效果的影响;根据设计要求,不同的模型采用不同直径的打印头,必要时更换打印头,观察不同直径的打印头打印的同一产品的外观效果;在确定一些必要条件后,通过一系列的不同试验确定其他参数的范围。

根据设计需要,打印头准备有 $\Phi 4$ mm, $\Phi 5$ mm, $\Phi 6$ mm 这 3 种不同的规格,其中螺旋熏香采用 $\Phi 5$ mm 的打印头,动物造型熏香视其模型复杂程度采用不同直径的熏香,模型较简单、细节处较少的采用 $\Phi 6$ mm 的打印头,模型较复杂,细节较多时,采用 $\Phi 4$ mm 的打印头。

通过前期的准备试验,该试验选取了对熏香成型效果影响较大的 5 个关键因素:水料混合比、挤出压力、打印速度、出料口与打印平台距离、模型的复杂程度。

1) 水料混合比。熏香打印使用的原料为粉末状,需将其与一定温度的水按一定比例混合,因此水料混合比便直接影响产品的打印效果,若水的含量过多,造成原料过稀,产品打印时,熏香线条由圆柱状变为扁平状,发生严重变形,熏香线条之间发生粘连,甚至直接从出料口中溢流出来,无法打印;若水的含量过少,则原料与料桶壁的摩擦阻力过大,活塞无法将原料挤出。

2) 挤出压力。该试验采用气压挤压原料成型的方法,因此挤出压力的大小成为影响产品成型效果的最关键因素之一。打印机工作时,压缩空气推动气压缸的推杆,通过与推杆相连的活塞挤压原料,喷射成型^[6]。挤出压力的大小直接影响原料的喷射量,挤出压力过大,原料的喷射量较大,造成打印熏香线条较粗,甚至出现堆积的情况;挤出压力过小,原料的喷射量不足,会造成打印熏香线条不连续、中断,有时出现拖拽已打印完成的熏香线条的现象。

3) 打印速度。打印速度是指打印头的移动速度,该速度由数控系统设置。打印速度是与挤出压力最密切的一个影响因素,也是影响产品成型效果的最关键因素之一^[7]。打印速度的设置须与挤出压力相适应。在一定的挤出压力下,若打印速度过快会造成打印熏香线条断续、拖拽等现象;若打印速度过慢,则会产生打印熏香线条过粗、原料堆积等现象,因此,必须在一定的挤出压力范围之下讨论打印速度的设置,单纯的讨论打印速度对成型效果的影响是没有意义的。

4) 出料口与打印平台的距离。若出料口与打印平台距离较远,原料由出料口挤出后不能迅速与打印平台粘连,熏香线条在空中发生扭转,与打印平台粘连后出现明显的锯齿状,甚至熏香线条出现位置变动,打印图形与设计图形出现较大偏差,影响成型效果^[8]。若出料口与打印平台的距离较小,原料挤出后迅速与打印平台粘连,虽然避免了出现空中旋转的现象,但是会出现出料口刮擦打印熏香线条的现象,造成打印的熏香线条表面有凹槽,严重时甚至出现刮料现象。

5) 模型的复杂程度。模型的复杂程度虽没有具

体的数值来衡量,但其对成型效果的影响也是不能忽略的一个关键因素。通过肉眼观察其曲线的弯曲程度、拐角的大小和数量等,判断其复杂程度,模型愈复杂,成型后越易发生翘曲变形,效果愈不好。

2.3 单因素试验设计

为确定各因素对成型效果的影响,首先进行单因素试验设计,即在试验过程中只有一个因素变化,其余各因素均保持不变^[9-10]。通过分析单因素的试验结果可大致确定各因素对成型效果的影响程度和因素调整范围,为进一步进行正交试验,优化试验参数范围提供数据支持。

2.4 参数试验方案

试验选取水料混合比、挤出压力、打印速度、出料口与打印平台距离、模型复杂程度等 5 个参数作为自变量,逐次进行单因素试验,观察成型效果随自变量的变化趋势^[11]。

1) 水料混合比的确定。挤出压力定为 0.6 MPa,打印速度为 1000 mm/min,出料口与打印平台距离为 10 mm,打印模型为螺旋形熏香模型,水料质量混合比分别为 1:1, 2:1, 3:1, 依次进行试验,观察并记录挤出效果。

2) 挤出压力范围选择。水料质量混合比为 2:1,打印速度为 1000 mm/min,出料口与打印平台距离为 10 mm,打印模型为螺旋形熏香模型,挤出压力分别为 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 MPa, 共 6 组,依次实验,观察挤出效果。

3) 打印速度范围选择。水料质量混合比为 2:1,挤出压力为 0.4 MPa,出料口与打印平台距离为 10 mm,打印模型为螺旋形熏香模型,打印速度分别为 600, 800, 1000, 1200, 1400 mm/min, 共 5 组,依次进行挤出试验,观察挤出效果。

4) 出料口与打印平台距离的范围确定。水料质量混合比为 2:1,挤出压力为 0.4 MPa,打印速度为 1000 mm/min,打印模型为螺旋形熏香模型,出料口与打印平台的距离依次选取 8, 10, 12, 14 mm 进行试验,共 4 组,并记录挤出效果。

5) 模型复杂程度的影响。水料质量混合比为 2:1,挤出压力为 0.04 MPa,打印速度为 1000 mm/min,出料口与打印平台距离为 10 mm,打印模型为螺旋形熏香模型、较复杂的兔子模型、复杂的龙等十二生肖模型,共 13 组,观察打印效果。

2.5 参数试验结果与分析

试验结果判定:由于熏香打印完成后,其成型效果并不是可以直接测量的定量指标,而是定性指标,这样并不利于对试验结果的分析,须将该定性指标量化,因此将熏香成型结果分为优、良、一

般、差 4 个等级, 并按百分制进行打分, 便于结果的统计分析^[12-13]。

1) 不同水料混合比试验结果分析。水料混合比单因素试验的挤出结果为: 水料质量混合比为 1:1 时, 香粉颗粒较松散, 原料粘度较小, 手感较差, 与料桶壁摩擦力较大, 挤出时速度较慢, 且挤出后熏香线条容易开裂, 不易成型; 随着比例渐增, 成型效果越来越好, 当水料质量混合比为 2:1 时, 熏香粉与水充分融合, 原料粘度适中, 手感较好, 挤压时出料流畅, 成型效果好; 当水料混合比达到 2:1 时, 若继续增加水料混合比例, 成型效果趋于下降, 当水料质量混合比为 3:1 时, 原料具有一定的流动性, 放入料筒中后, 原料因自重从出料口中缓慢流出, 挤压时呈喷射状快速挤出, 熏香线条较粗, 易和较近的熏香线条发生干涉。将成型结果按照百分制打分并制作成折线图, 见图 3。

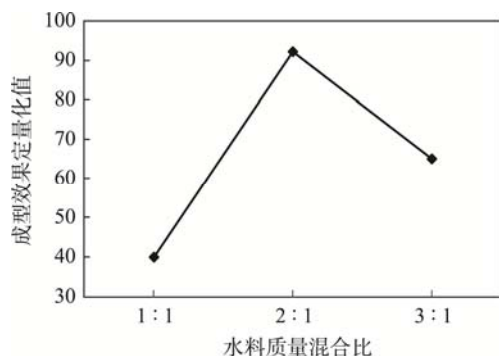


图 3 不同水料混合比条件下的成型效果
Fig.3 Forming effects of different moisture content

2) 不同压力下试验结果分析。不同挤出压力条件下, 挤出试验成型效果见图 4。挤出压力为 0.3 MPa 时, 熏香线条缓慢从出料口中挤出, 与打印平台接触后, 由于出料速度小于打印速度, 造成熏香线条断裂, 因此打印成型的熏香不连续, 且与断裂的熏香线条发生刮擦, 成型效果最差; 挤出压力为 0.6~0.8 MPa 时, 熏香线条以较快的速度从出料口中挤出, 由于打印速度较慢, 造成熏香线发生堆积变粗的现象, 成型效果也较差; 当压力为 0.4 MPa 时, 熏香线条的挤出速度与打印头的移动速度匹配最好, 成型效果最好; 当挤出压力为 0.4~0.6 MPa 时, 熏香线条的挤出速度增大, 打印在平台上后堆积增粗现象逐渐明显, 成型效果逐渐变差。

3) 不同打印速度下试验结果分析。不同打印速度下, 熏香成型效果试验结果见图 5。在试验选定的速度范围内, 随着打印速度的增加, 成型效果由差逐渐变好, 当打印速度为 2000 mm/min 时, 成型效果达到最优, 打印速度继续增大, 超过 2400 mm/min 后, 打印效果迅速变差。

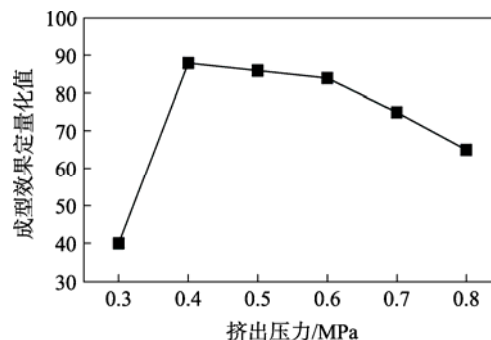


图 4 不同挤出压力下的成型效果走势
Fig.4 Forming effect of different extrusion pressure

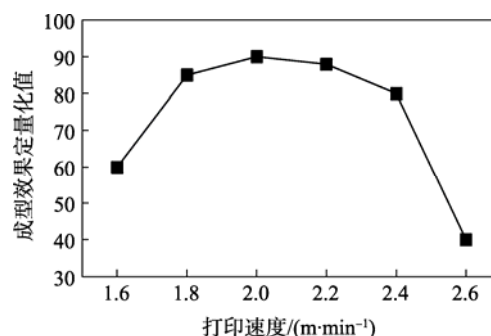


图 5 不同打印速度下成型效果走势
Fig.5 Forming effect of different printing speed

在一定的挤出压力条件下, 打印速度成为影响成型效果最重要的因素。速度较慢时易产生原料堆积; 速度较快时易产生拖拽断裂现象。通过初步试验发现打印速度最佳范围为 1800~2400 mm/min。

4) 不同出料口与打印平台距离下试验结果分析。出料口与打印平台距离不同时成型效果变化趋势见图 6。当距离为 10 mm 时成型效果最好; 距离太大时线条悬空长度较大易发生弯曲, 距离太小时打印头容易刮擦已成型的熏香线条。综合试验结果, 出料口与打印平台距离为 8~12 mm 是最适宜的。

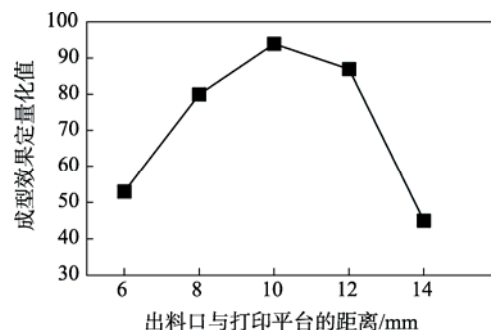


图 6 不同出料口与打印平台距离条件下的成型效果走势
Fig.6 Forming effect of different distance between printing platform and extruder

5) 不同模型复杂程度下试验结果分析。模型的复杂程度是指模型曲线的曲率、曲线折弯数量、曲线之间的距离等因素, 曲线曲率越大, 折弯数量越多,

曲线之间距离越近表示模型越复杂,为将该定性指标定量化,以数字表示模型的复杂程度,数字越大,模型越复杂。

试验发现,螺旋熏香和十二生肖中造型较简单的熏香模型,例如鼠、兔等,成型后熏香线条均匀排布,干燥后变形程度小,效果较好;而造型较复杂的模型,例如龙、鸡等,成型后熏香线条容易发生粘连,有时在打印过程中便发生了刮擦、拖拽的现象,模型曲线曲率较大处、熏香线条距离较近处,干燥后发生翘曲变形,成型效果较差。在其他试验因素条件保持不变的情况下,模型越复杂,成型效果越差。

由于熏香原料在高压挤出后会有一定的膨胀,模型越复杂,熏香线条膨胀后越易发生粘连,因而成型效果越差,因而应当适当的简化模型;在一定情况下,可以适当选择较细的打印头,以抵消熏香线条失水而引起的变形现象。

3 二次回归旋转正交试验

正交试验是研究多因素多水平的一种试验设计方法,根据正交性在全部试验因素中挑选出部分具有代表性的点进行试验,这些点具有整齐分散、均衡搭配的特点^[14]。在熏香 3D 打印试验中影响成型效果的因素有很多,每一个因素又有较大的变化范围,因此用正交试验法选择参数、调整范围并对参数进行优化是合适的。

3.1 试验设计

根据前期单因素的试验结果,选取挤出压力 X_1 、打印速度 X_2 、出料口与打印平台距离 X_3 、模型复杂程度 X_4 作为影响因素,设计了四因素五水平二次正交旋转组合试验,试验因素水平表见表 1。

表 1 试验因素水平
Tab.1 Test factor and level table

水平	因素			
	挤出压力 X_1/MPa	打印速度 $X_2/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	出料口与打 印平台距离 X_3/mm	模型复 杂程度 X_4
上星号臂 ($\gamma=+2$)	0.7	2.4	12	5
上水平 ($+1$)	0.6	2.2	11	4
零水平 (0)	0.5	2	10	3
下水平(-1)	0.4	1.8	9	2
下星号臂 ($\gamma=-2$)	0.3	1.6	8	1

3.2 回归模型

根据选择的试验因素和水平,该次试验设计方案以及试验结果见表 2。采用 Design-Expert 数据分析软件对所得到的试验结果进行分析,消除选择最优工艺参数过程中的误差干扰,提高精确程度。以模型成型效果为响应函数,以影响因素为自变量建立回归方程,见式(1)。

$$y=115.7+257.9X_1-0.08X_2+14.3X_3-58.5X_4+0.1X_1X_2-1.9X_1X_3+21.9X_1X_4-0.01X_2X_3+0.01X_2X_4+1.9X_3X_4-594.8X_1^2+0.6X_4^2 \quad (1)$$

式中: X_1, X_2, X_3, X_4 分别为挤出压力、打印速度、出料口与打印平台距离、模型复杂程度的实际值。

表 2 二次旋转正交组合试验方案与结果
Tab.2 Program and results of test of quadratic rotation-orthogonal combination

试验 序号	试验因素和水平				指标
	挤出 压力 X_1/MPa	打印速度 $X_2/$ ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	出料口至打 印平台的距 离 X_3/mm	模型复 杂程度 X_4	成型 效果 Y
1	0.4	2200	11	2	90
2	0.4	2200	9	4	88
3	0.5	2000	10	3	80
4	0.7	2000	10	3	50
5	0.5	2000	10	3	80
6	0.4	1800	11	4	85
7	0.5	1600	10	3	84
8	0.6	2200	9	2	75
9	0.4	1800	9	2	90
10	0.6	2200	11	4	80
11	0.5	2000	10	5	82
12	0.5	2000	10	3	86
13	0.6	1800	11	4	70
14	0.4	1800	9	4	85
15	0.6	2200	11	2	65
16	0.5	2000	10	3	89
17	0.6	1800	9	2	65
18	0.3	2000	10	3	70
19	0.5	2000	10	1	90
20	0.4	1800	11	2	92
21	0.5	2000	12	3	88
22	0.5	2400	10	3	92
23	0.5	2000	10	3	85
24	0.5	2000	8	3	80
25	0.6	2200	9	4	85
26	0.4	2200	9	2	96
27	0.6	1800	11	2	65
28	0.6	1800	9	4	55
29	0.5	2000	10	3	85
30	0.4	2200	11	4	95

根据试验数据,对回归方程进行显著性检验和失拟性检验,模型方差分析结果见表 3。结果表明:成型效果 $F_{\text{回归}}=9.33$, $P_{\text{回归}}<0.0001$,回归方程本身是高度显著的; $F_{\text{失拟}}=2.67$, $P_{\text{失拟}}=0.1448$ 失拟性不显著。综上所述,回归方程与熏香 3D 打印成型效果的实际情况具有较好的拟合性,选择二次回归的方法统计分析试验数据是合适的。

表 3 回归模型方差分析
Tab.3 Variance analysis of regression models

试验 指标	方差 来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
	模型	3469.28	14	247.81	9.33	<0.0001
成型	残差	398.58	15	26.57	—	—
效果 Y	失拟项	335.75	10	33.58	2.67	0.1448
	误差	62.83	5	12.57	—	—

3.3 试验结果响应面分析

响应面是指一个响应变量与一组自变量之间的函数关系,响应面分析法是一种优化选择方法,将响应变量与自变量之间的函数关系通过空间曲面的形式表现出来,通过直观的图形确定实验设计中的优化条件范围^[15]。在试验限定的条件中,熏香的成型效果至少受到 4 个因素的影响,且这 4 个因素同时发生作用,因此可以通过响应面分析法区分影响成型效果的主要因素和次要因素,并确定各因素的最优选择范围。

将试验设计方案及试验结果输入至数据分析软件 Design-Expert8.0.5b 中^[16],通过该软件生成各因素与成型效果的响应面关系。

通过试验分析,去除影响因素中的次要因素,将主要影响因素优化后的参数值制作成表格,见表 4。

表 4 优化后参数组合
Tab.4 Parameter combination after optimization

影响 因素	挤出压 力/MPa	打印速度/ (mm·min ⁻¹)	出料口至打印平 台的距离/mm
最优 参数值 组合	0.40	2000	12
	0.45	2000	12
	0.50	2200	10
	0.55	2400	10

4 结语

研究了对熏香打印成型效果有重要影响的 4 个参数:水料质量混合比、挤出压力、打印速度、出料口与打印平台的距离之间的关系。通过单因素试验确定了成型效果与各影响因素之间的关系,选择各影响

因素的最佳参数范围,得到了在 3 种适宜的挤出压力下,不同打印速度的配合关系,并通过实验验证得到了良好的效果。分析了其他影响因素对成型效果的影响,对在实际工作过程中出现的问题进行了研究并提出了相应的解决方法。为了更深入地研究各参数对成型效果的的影响,后续可以采用正交试验,对影响成型效果的主要因素和次要因素做进一步研究。

参考文献:

[1] 王雪莹. 3D 打印技术与产业的发展及前景分析[J]. 中国高新技术企业, 2012(26): 3—5.
WANG Xue-Ying. 3D Printing Technology and Industry Development and Prospect Analysis[J]. China High-tech Enterprise, 2012(26): 3—5.

[2] 王忠宏, 李扬帆, 张曼茵. 中国 3D 打印的现状 & 发展思路[J]. 经济纵横, 2013(1): 90—93.
WANG Zhong-hong, LI Yang-fan, ZHANG Man-yin. The Current Situation and Development Ideas of 3D Printing in China[J]. Economic Aspect, 2013(1): 90—93.

[3] 杜宇雷, 孙菲菲. 3D 打印材料的发展现状[J]. 徐州工程学院学报, 2014, 29(1): 20—24.
DU Yu-lei, SUN Fei-fei. Development Status of 3D Printing Materials[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology, 2014, 29(1): 20—24.

[4] 曾坤. 我国 3D 打印材料之殇及应对之道[J]. 中国再利用, 2012(9): 25—27.
ZENG Kun. China's 3D Printing Materials and Solutions[J]. China Reuse, 2012(9): 25—27.

[5] BARRY B. 3D Printing: The New Industrial Revolution[J]. Business Horizons, 2012, 55: 155—162.

[6] 李涤尘, 田小勇. 增材制造技术的发展[J]. 电加工与模具, 2012(1): 20—22.
LI Di-chen, TIAN Xiao-yong. Development of Additive Manufacturing Technology[J]. Electromachining and Moulds, 2012(1): 20—22.

[7] 谭剑锋, 吴志超. FDM 快速成型技术在动漫模型制作中的应用[J]. 机械设计与制造, 2014(6): 233—235.
TAN Jian-feng, WU Zhi-chao. Application of FDM Rapid Prototyping Technology in Animation Modeling[J]. Mechanical Design & Manufacture, 2014(6): 233—235.

[8] 朱艳青, 史继富. 3D 打印技术发展现状[J]. 制造技术与机床, 2015(12): 50—57.
ZHU Yan-qing, SHI Ji-fu. Development Status of 3D Printing Technology[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2015(12): 50—57.

[9] 徐荣建, 李宗安. 3D 打印产业及技术发展趋势概述[J]. 机械设计与制造工程, 2016, 45(3): 11—16.
XU Rong-jian, LI Zong-an. Overview of 3D Printing Industry and Technology Development Trends[J]. Mechanical Design & Manufacturing Engineering, 2016,

- 45(3): 11—16.
- [10] 张学军, 唐思熠, 肇恒跃, 等. 3D 打印技术研究现状和关键技术[J]. 材料工程, 2016, 44(2): 122—128.
ZHANG Xue-jun, TANG Si-yi, ZHAO Heng-yue, et al. Research Status and Key Technologies of 3D Printing Technology[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(2): 122—128.
- [11] 龙航. 国外先进 3D 打印技术案例参考[J]. 杭州科技, 2014(13): 53—57.
LONG Hang. Foreign Advanced 3D Printing Technology Case Reference[J]. Hangzhou Science and Technology, 2014(13): 53—57.
- [12] 赵静一, 姚成玉. 我国液压可靠性技术概述[J]. 液压与气动, 2013(10): 1—6.
ZHAO Jing-yi, YAO Cheng-yu. Overview of Hydraulic Reliability Technology in China[J]. Hydraulics & Pneumatics, 2013(10): 1—6.
- [13] 李浩, 邱超凡. 模糊方法在液压系统可靠性分析中的应用[J]. 液压气动与密封, 2012(1): 38—42.
LI Hao, QIU Chao-fan. Application of Fuzzy Method in Hydraulic System Reliability Analysis[J]. Hydro-pneumatic & Sealing, 2012(1): 38—42.
- [14] 俞韶秋, 汤华. 有限元离散元耦合分析方法及其工程应用[J]. 上海交通大学学报, 2013, 43(10): 1611—1615.
YU Shao-qiu, TANG Hua. Finite Element Discrete Element Coupling Analysis Method and Its Engineering Application[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 43(10): 1611—1615.
- [15] MOHAMED A A, Parametric Study of Using Only Static Response in Structural Damage Detection[J]. Engineering Structures, 2012, 34(2): 124—131.
- [16] 李丽, 张赛. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(8): 41—45.
LI Li, ZHANG Sai. Application of Response Surface Method in Experimental Design and Optimization[J]. Laboratory Research and Exploration, 2015, 34(8): 41—45.