

喷印工艺控制参数对水性油墨墨滴形态的影响

赵闪闪, 尤飞, 江智
(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 为了提高水性油墨的喷墨印刷质量, 通过控制喷印工艺参数以获得良好的墨滴形态。**方法** 分析喷印工艺控制的关键参数以及墨滴形态的表征参数, 通过单因素工艺参数对墨滴形态影响的实验, 分析电压、点火频率和脉冲宽度对墨滴形态各评价指标的影响程度, 并运用 AHP 法构建墨滴形态的质量分析模型; 通过多因素工艺参数组合对墨滴形态影响的正交实验, 分析各工艺参数与墨滴形态参数之间的关联性, 并结合质量评价模型综合评判喷印工艺参数对墨滴形态的影响。**结果** 喷印工艺参数电压、点火频率和脉冲宽度共同影响墨滴形态的质量, 脉冲宽度对其影响最大, 点火频率次之, 电压的影响程度最小, 其权重分别为 0.462, 0.272, 0.266。**结论** 水性油墨喷印工艺中, 通过合理地控制喷印工艺的关键参数, 可以有效地提高墨滴形态质量, 从而获得良好的印刷品质量。

关键词: 喷墨印刷; 墨滴形态; 正交实验; 层次分析法; 灰色关联分析法

中图分类号: TS807 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)23-0236-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.23.035

Effect of Controlling Ink-jet Printing Process Parameters on Shape and State of Water-based Ink Drop

ZHAO Shan-shan, YOU Fei, JIANG Zhi

(University of Shanghai for science and technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The paper aims to improve the ink-jet printing quality of water-based ink, and obtain good ink droplet shape by controlling the process parameters of ink-jet printing. The key parameters of ink-jet printing process control and the characterization parameters of ink droplet morphology were analyzed. The influence of voltage, ignition frequency and pulse width on the evaluation indexes of ink droplet morphology was analyzed through the experiment of single factor process parameters on ink droplet morphology. The quality analysis model of ink droplet morphology was constructed by AHP method. The orthogonal experiment of the influence of multi-factor process parameters on the combination of ink droplet morphology was carried out. The correlation between the process parameters and the morphological parameters of ink droplets was analyzed, and the influence of the process parameters on the morphology of ink droplets was comprehensively evaluated with the quality evaluation model. Voltage, ignition frequency and pulse width jointly affected the quality of ink droplets. Pulse width had the greatest influence on the quality of ink droplets, followed by ignition frequency and voltage, with weights of 0.462, 0.272 and 0.266, respectively. In the waterborne ink ink-jet printing process, the shape quality of ink droplets can be effectively improved by controlling the key parameters of the ink-jet printing process reasonably, and good printing quality can be obtained.

收稿日期: 2019-06-09

作者简介: 赵闪闪 (1992—), 女, 上海理工大学硕士生, 主攻印刷色彩再现理论。

通信作者: 尤飞 (1973—), 男, 博士后, 上海理工大学副教授, 主要研究方向为 CAD/CAM、印刷包装设备自动控制、图文信息处理。

KEY WORDS: ink-jet printing; shape and state of ink droplet; orthogonal experiment; analytic hierarchy process; grey relational analysis

由于喷墨印刷技术不断发展,其应用领域越来越广泛,因而喷墨印刷质量成为了研究热点之一。喷墨印刷质量的影响因素有很多,而喷墨过程中墨滴的形成状态会影响到墨滴在承印物上的铺展,从而直接影响印品的印刷质量^[1]。在喷墨印刷中,喷印工艺参数直接影响到墨滴的形态,故喷印工艺参数的控制直接影响印刷品的质量。刘洪哲等^[2]研究了喷墨中墨滴分裂过程,利用 Flow 3D 软件模拟了墨滴生成和分裂过程。杨晓等^[3]研究了在不同电压和点火频率下,墨滴速度、拖尾长度、体积和圆度的变化情况,通过实验验证了在特定的参数下可以使墨滴达到良好的效果。孙菁梅等^[4]研究了不同粘度的可食性油墨喷印时拖尾长度和体积的变化情况,经过实验验证得出了最佳粘度值,以提高印刷质量。屈贞财等^[5]研究了喷墨印刷工艺对导电油墨的导电性的影响,以提高导电线路的导电性。LI Min 等^[6]研究了丝绸喷墨印花中墨滴状态的影响因素,通过测试墨滴粘度、墨滴速度等参数,观察其对墨滴状态的影响。

基于以上的研究成果分析可知,有些学者研究了工艺参数对墨滴形态及墨滴与承印物的结合机理对印刷质量的影响,然而,研究水性油墨的喷印工艺参数对墨滴形态影响的研究成果并不多见,相关学者只是从单一工艺参数角度来考虑其对墨滴形态的影响。在实际喷墨印刷工艺中,多个工艺参数共同影响墨滴的形态,因此,文中针对水性油墨的喷印工艺,以墨滴形态的质量为研究对象,根据单一工艺参数控制的实验数据,分析各工艺参数对墨滴形态的影响,建立墨滴形态的质量评价模型;通过多因素工艺参数综合控制的实验数据,分析各工艺参数与墨滴形态质量的关联度,从而研究喷印工艺参数对印品质量影响的正负相关性。

1 墨滴形态的影响因素

1.1 喷印工艺参数

对于压电喷墨印刷工艺,喷印时的电压、点火频率和脉冲宽度是影响墨滴形态的关键因素。脉冲宽度产生的压力波变化情况、电压大小及点火频率等因素都对喷射墨滴的形态有着直接的影响。脉冲信号驱动压电元件使毛细管产生形变,随后转换成压力波在油墨通道内传递,并在喷嘴口形成墨滴,因此,脉冲宽度与墨滴的形成、体积、各阶段的速度,以及墨滴的稳定性都密切相关。对于水性油墨的压电喷墨印刷而言,因其流体粘度的特殊性,图形的喷印质量、

清晰度和精准定位都与喷射墨滴的形态和行为密切相关^[7]。

1.2 墨滴形态参数

由于压电陶瓷的力作用,腔室内的水性油墨在压力波的作用下流动至喷嘴处,油墨克服喷嘴处的摩擦阻力和自身液面的表面张力喷射而出,喷射出的墨滴形态是最终形成的墨滴质量的评判依据。其中,喷射微滴的形态参数包括体积、速度、圆度及拖尾长度尤为重要,直接影响着墨滴的质量,从而影响印刷质量^[8]。假设腔内的水性油墨为不可压缩液体,根据质量守恒定律,实际喷射过程中进入腔室内部的体积 V ,单位时间从供液系统中流入的液量 ϕ_r 与单位时间从喷嘴处喷出的液量 ϕ_n 存在以下关系:

$$\frac{d_v}{d_t} = \phi_r - \phi_n \quad (1)$$

项师^[9]通过实验测量方式研究了微滴速度,利用质量守恒定律,将喷头在单位时间内喷射出的液流理想化为与喷嘴直径大小一致的圆柱体。通过在固定时间内,记录所收集到的微滴质量 m ,喷嘴直径大小为 d_{jet} ,微滴密度大小为 ρ^{jet} ,从而推导出喷射微滴的平均速度 v_{jet} 为:

$$v_{jet} = \frac{4m}{\pi d_{jet}^2 \rho^{jet}} \quad (2)$$

在水性油墨的喷印工艺中,其墨点的理想形状为圆形。由于液体表面张力的作用,墨滴具有自动收缩其表面成为球状的趋势。设墨点的面积为 A ,周长为 P ,则墨滴圆度用式(3)来定义^[10]:

$$RD = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (3)$$

墨滴的圆度越接近 1,其质量就越好。墨滴的圆度直接影响着液滴在承印物上的铺展,从而影响印刷质量。此外,在不同的喷印工艺参数下,喷印时会产生卫星墨滴,增大了墨滴的拖尾长度,从而影响到墨滴的质量。

2 喷印工艺参数对墨滴形态的影响

2.1 实验材料及方法

实验材料为标准黑色颜料型水性油墨合格品(型号-MBK,惠彩电子有限公司),其成分以水为主要溶剂,由着色剂、表面活性剂、pH 值调节剂、催干剂及其他添加剂组成。实验设备为墨滴观测仪(型号-Mi-Jet,杭州米杰科技有限公司),仪器所使用的喷头

为 XAAR (型号-1001, 杭州米杰科技有限公司), 所用观测系统为 Mi-Watcher 软件 (杭州米杰科技有限公司)。

1) 单因素工艺参数影响墨滴形态的实验。分析墨滴的形态参数, 获得单因素工艺参数的敏感区域。设置点火频率为 3000 Hz, 脉冲宽度为 5 μs , 电压域为 14~21 V, 当电压以步长为 1 V 增加时, 观测并记录墨滴的形态参数; 设置电压为 16 V, 脉冲宽度为 5 μs , 点火频率域为 1000~4500 Hz, 当点火频率以步长为 500 Hz 增加时, 观测并记录墨滴的形态参数; 设置电压为 16 V, 点火频率为 3500 Hz, 脉冲宽度域为 3~7 μs , 当脉冲宽度以步长为 1 μs 增加时, 观测并记录墨滴的形态参数。

2) 多因素工艺参数影响墨滴形态的实验。根据单因素工艺参数的敏感区域, 设计多因素多水平工艺参数组合的正交实验。设置电压域为 15~19 V, 点

火频率域为 2500~4500 Hz, 脉冲宽度域为 3~7 μs , 见表 1。选取电压、点火频率和脉冲宽度 3 组工艺参数进行多水平组合实验, 观测并记录每一组墨滴形态的参数。

表 1 三因素五水平正交设计

Tab.1 Three-factor five-level orthogonal table

影响因素水平	电压/V	点火频率/Hz	脉冲宽度/ μs
水平 1	15	2500	3
水平 2	16	3000	4
水平 3	17	3500	5
水平 4	18	4000	6
水平 5	19	4500	7

2.2 单因素工艺参数影响墨滴形态的分析

不同喷印工艺参数下的墨滴形态见图 1。

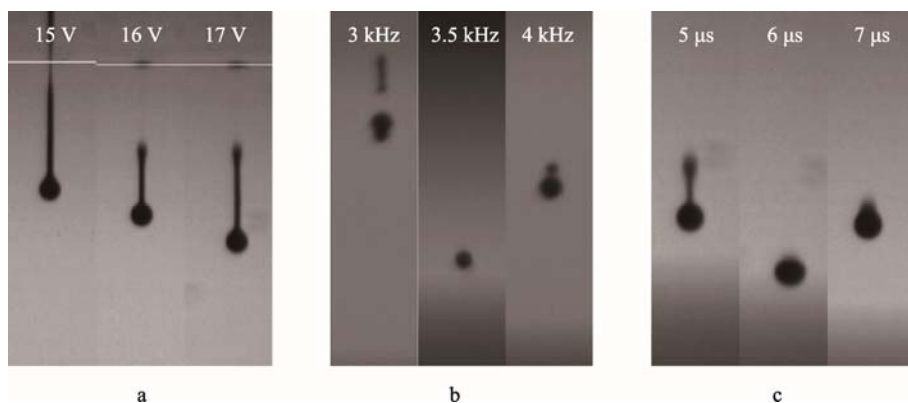


图 1 不同参数下墨滴形态

Fig.1 Ink droplet morphology under different parameters

由图 1 可知, 在其他相同条件下, 喷印工艺参数不同会对墨滴形态产生不同影响, 以下分别分析电压、点火频率和脉冲宽度差异对墨滴形态参数造成的影响。

2.2.1 电压对墨滴形态的影响

由图 2a 分析可知, 墨滴速度随着电压的增大而增大, 电压增大时压电陶瓷片产生较大的压力, 从而使液体速度变大。由图 2b 分析可知, 墨滴体积随着电压的增大先减小后趋于平稳, 电压升高导致墨滴速度增大, 喷孔壁对墨滴的阻力也增大, 则喷出的液滴体积减小; 又因墨滴自身的表面张力作用, 阻碍了液体的回流, 使液体体积趋于平稳。由图 2c 分析可知, 墨滴拖尾长度随着电压的增大呈现先减小后增大的趋势, 电压增大时喷孔内壁对液滴的阻力增大, 使墨滴的拖尾长度相应减小; 当电压太大时, 墨滴所受压力增大, 油墨自身的内聚力相对微弱, 使液滴的拖尾长度又增大。由图 2d 分析可知, 墨滴圆度随着电压增大呈现先增大后减小的趋势, 在 16 V 附近其最接近于理想圆度值。墨滴圆度直接影响着水性油墨与承

印物的结合, 圆度越好在承印物上的铺展越好, 印刷质量就越高。

2.2.2 点火频率对墨滴形态影响

由图 3a 可知, 墨滴速度随着点火频率的增大呈现先增大后减小的趋势, 当点火频率达到 4000 Hz 时, 墨滴未喷出时墨腔的负压产生了向上的牵引力, 使墨滴速度减小。由图 3b 可知, 墨滴体积随着点火频率的增大呈现先减小后增大的趋势, 当点火频率增大时, 因墨腔负压作用导致喷出的墨滴量减少; 当点火频率超过 3500 Hz 时, 由于卫星滴的现象导致墨滴量增多。由图 3c 可知, 墨滴拖尾长度随着点火频率的增大呈现先减小后增大的趋势, 当点火频率较小时, 墨滴与喷孔壁之间的作用力相对减小, 造成油墨喷出时尾部长度减小; 当点火频率较大时, 由于速度不断增大, 内聚力相对减小, 拖尾长度增大。由图 3d 可知, 墨滴圆度随着点火频率的增大呈现先增大后减小的平稳变化趋势, 当点火频率为 3500 Hz 时, 墨滴圆度呈现相对理想状态; 点火频率继续增大时, 产生了卫星滴现象, 导致墨滴圆度降低。

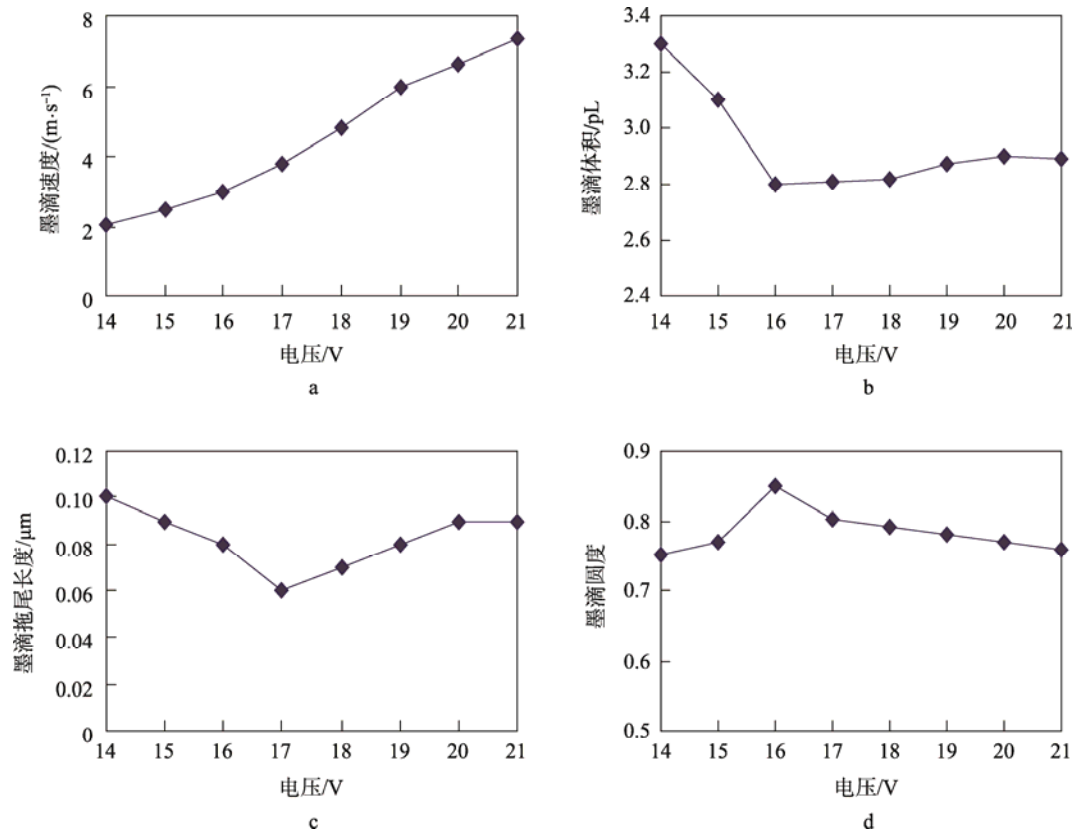


图 2 电压对墨滴形态的影响
Fig.2 Effect of voltage on ink droplet morphology

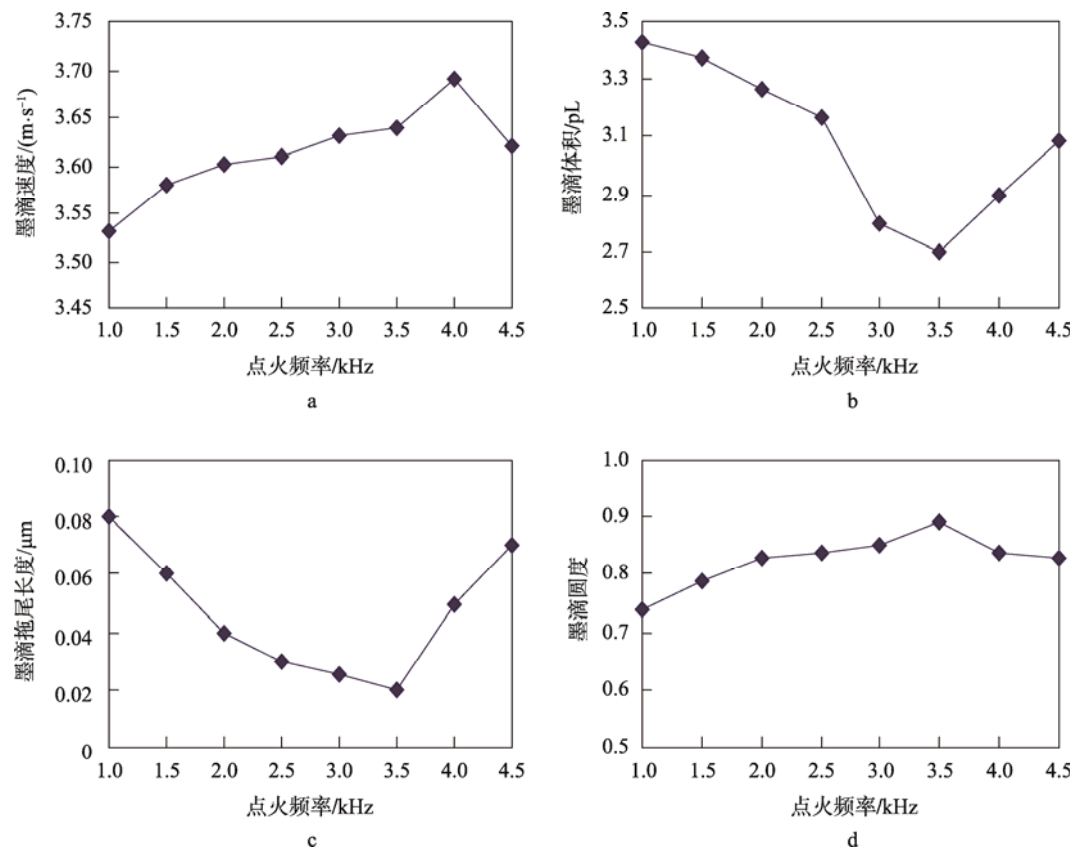


图 3 点火频率对墨滴形态的影响
Fig.3 Effect of ignition frequency on ink droplet morphology

2.2.3 脉冲宽度对墨滴形态影响

由图 4a 可知,随着脉冲宽度的增大墨滴速度呈现先增大后减小的趋势,当脉冲宽度增大时,压电元件施加给墨滴的力持续周期长,墨滴速度会增大;当脉冲宽度增大到一定程度时,因液体的内聚力导致墨腔内残余油墨对墨滴产生牵引力,使墨滴速度减小。由图 4b 可知,随着脉冲宽度的增大墨滴体积呈现缓慢减小的趋势,当脉冲宽度越大时,因液体的内聚力导致墨腔内残余油墨对墨滴的牵引力越大,则墨滴体积越小。由图 4c 可知,随着脉冲宽度的增大拖尾长

度呈现先减小后增大的趋势,当脉冲宽度增大时,墨滴速度会增大,弱化了墨腔内残余油墨对墨滴的牵引效果,拖尾长度减小;当脉冲宽度大于 $6\mu\text{s}$ 时,墨滴速度减小,墨腔内残余油墨的牵引效果加强,拖尾长度增大。由图 4d 可知,随着脉冲宽度的增大墨滴圆度呈现先增大后减小的趋势,当脉冲宽度增大时,墨腔内残余油墨的牵引效果逐渐减弱,墨滴圆度增大, $6\mu\text{s}$ 时墨滴圆度相对较大;当脉冲宽度继续增大时,墨腔内残余油墨的牵引效果逐渐增强,导致墨滴圆度降低。

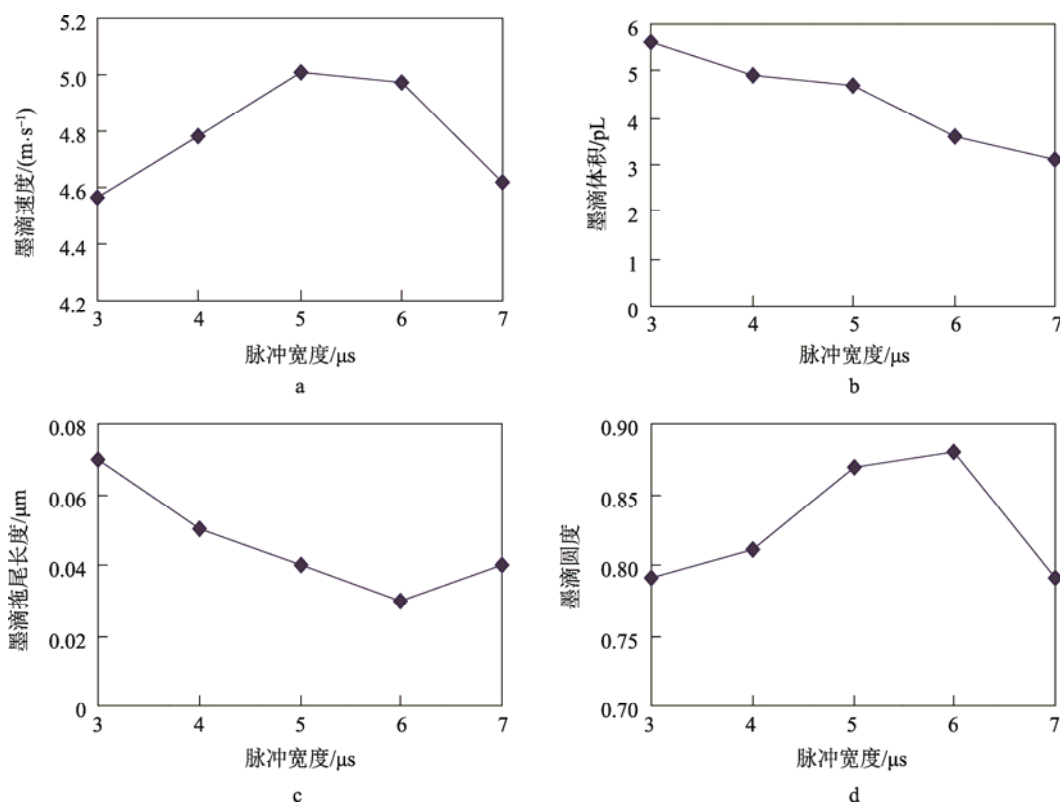


图 4 脉冲宽度对墨滴形态的影响

Fig.4 Effect of pulse width on ink droplet morphology

2.3 墨滴形态的质量评价模型

为了建立墨滴形态的质量分析模型,需要对含有不同量纲的各评价指标进行无量纲化处理。基于 AHP 分析属性的决策理论,拟采用平均型指标无量纲法对各评价指标进行分析^[11],即每一变量值除以其平均值。该方法在消除量纲和数量级影响的同时,保留了各变量取值差异程度上的信息,差异程度越大的变量对综合分析的影响也越大。

由单因素工艺参数的实验数据分析可知,喷墨工艺控制参数电压、点火频率和脉冲宽度都会影响墨滴形态的性能,其速度、体积、拖尾长度和圆度等参数出现不同的变化趋势。如图 5 所示,利用层次分析法建立墨滴形态质量的 AHP 模型,墨滴的质量评价公式为:

$$Q = w_1 q_1 + w_2 q_2 + w_3 q_3 + w_4 q_4 \quad (4)$$

式中: Q 表示墨滴质量; q_1, q_2, q_3, q_4 分别为墨滴速度、体积、拖尾长度和圆度的无量纲化值; w_1, w_2, w_3, w_4 分别为墨滴形态各参数的权重。

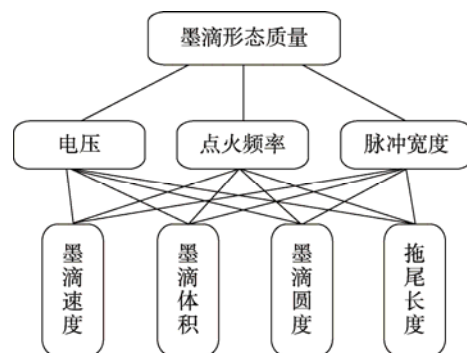


图 5 墨滴形态质量的 AHP 模型

Fig.5 Analytical hierarchy model of ink drop quality

1) 构造比较判断矩阵。根据墨滴形态质量的 AHP 模型, 比较各层中两两因素之间重要性的程度, 采用 1-9 标度法建立准则层对于目标层及指标层对于准则层的比较判断矩阵^[12]。

在墨滴形态质量的各评价指标中, 墨滴的拖尾长度和圆度对其质量的影响最大。由图 1—3 的实验数据分析可知, 脉冲宽度对拖尾长度和圆度的影响比点火频率重要, 比电压一般重要; 即脉冲宽度对墨滴形态质量的影响最重要, 点火频率次之, 则准则层对于目标层的比较判断矩阵 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 \\ 1/3 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

由图 1a—d 的实验数据分析可知, 电压对墨滴速度的影响比体积一般重要, 比拖尾长度明显重要, 比圆度稍为重要; 电压对墨滴体积的影响比拖尾长度稍为重要, 比圆度一般重要; 电压对墨滴圆度的影响比拖尾长度一般重要, 故建立比较判断矩阵 B_1 为:

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 & 3 \\ 1/2 & 1 & 3 & 2 \\ 1/4 & 1/3 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

相应地, 可以构造指标层对于准则层的比较判断矩阵 B_2 和 B_3 , 即:

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 2 & 1/2 \\ 2 & 1 & 3 & 1/2 \\ 1/2 & 1/3 & 1 & 1/3 \\ 2 & 2 & 3 & 1 \end{bmatrix}, B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 3 & 3 \\ 1/2 & 1/3 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1/3 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

2) 求解判断矩阵的特征值和特征向量, 并进行一致性检验。比较判断矩阵的满意一致性检验公式为^[13—15]:

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0.1 \quad (5)$$

其中: CR 为随机一致性比率; RI 为平均随机一致性指标; CI 为一致性指标, 若 n 阶方阵的最大特征根为 $\lambda_{\max}$, 则 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ 。

求得判断矩阵 A 的最大特征值及特征向量排序:

$w_A = (0.54, 0.16, 0.30)$, $\lambda_{\max} = 3.009$, $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0.0046$, $RI = 0.58$, $CR = 0.008 < 0.1$, A 矩阵具有满意一致性。同理可得: $w_{B1} = (0.46, 0.28, 0.10, 0.16)$, $\lambda_{\max} = 4.031$, $CI = 0.0103$, $RI = 0.9$, $CR = 0.011 < 0.1$, B_1 矩阵具有满意一致性; $w_{B2} = (0.18, 0.29, 0.11, 0.42)$, $\lambda_{\max} = 4.071$, $CI = 0.0237$, $RI = 0.9$, $CR = 0.026 < 0.1$, B_2 矩阵具有满意一致性; $w_{B3} = (0.26, 0.46, 0.14, 0.14)$, $\lambda_{\max} = 4.010$, $CI = 0.0033$, $RI = 0.9$,

$CR = 0.004 < 0.1$, B_3 矩阵具有满意一致性。

3) 对各层次因素进行总排序, 可以获得各项评价指标影响墨滴形态的权重, 见表 2。

表 2 墨滴形态质量影响因素的排序
Tab.2 Total ranking of influencing factors of ink droplet morphology and quality

层次 C	层次 B			总排序 $\sum_{i=1}^3 B_j C_{ij}$ ($i=1, 2, 3, 4$)
	B_1	B_2	B_3	
	0.54	0.16	0.30	
C_1	0.46	0.18	0.26	0.36
C_2	0.28	0.29	0.46	0.34
C_3	0.10	0.11	0.14	0.10
C_4	0.16	0.42	0.14	0.20

$CI = 0.54 \times 0.0103 + 0.16 \times 0.0237 + 0.3 \times 0.0033 = 0.1$, $RI = 0.54 \times 0.9 + 0.16 \times 0.9 + 0.3 \times 0.9 = 0.9$, $CR = 0.01 < 0.1$, 根据以上计算可知, 综合判断矩阵满足一致性要求, 各层次因素的总排序结果有效, 因此, 墨滴的速度、体积、拖尾长度和圆度对墨滴形态质量影响的权重为 $w_1 = 0.36$, $w_2 = 0.34$, $w_3 = 0.1$, $w_4 = 0.2$ 墨滴形态质量评价模型为:

$$Q = 0.36q_1 + 0.34q_2 + 0.1q_3 + 0.2q_4 \quad (6)$$

由墨滴形态的质量评价模型分析可知, 当喷墨工艺参数改变时, 对墨滴的速度和体积产生较大的影响, 对圆度的影响次之, 对拖尾长度的影响较小。

2.4 多因素工艺参数对墨滴形态影响的分析

在实际喷墨印刷过程中, 电压、点火频率和脉冲宽度共同影响着墨滴的形态, 使得墨滴形态参数的变化趋势出现叠加效应。为了研究多因素工艺参数综合作用下单一工艺参数对墨滴形态质量的影响, 采用正交实验法^[16]进行分析研究各工艺参数与墨滴形态参数之间的关联性, 从而进一步综合评判多因素工艺参数对墨滴形态质量的影响。

将喷印工艺参数的电压、点火频率和脉冲宽度作为系统的特征变量, 记为 y_1, y_2, y_3 ; 墨滴形态参数的速度、体积、拖尾长度和圆度作为相关的因素变量, 记为 x_1, x_2, x_3, x_4 , 则测得的原始实验数据见表 3。

为了简化计算及更准确地分析电压与墨滴形态参数之间的关联性, 以电压为主索引, 针对每一电压值下的 5 组墨滴形态参数分别进行均值化处理, 见表 4。

运用灰关联分析法对表 4 中的数据进行计算分析, 从而获得电压与墨滴的速度、体积、拖尾长度和圆度之间的关联度。具体算法流程如下所述。

表 3 原始实验数据
Tab.3 Raw experimental data

实验号	y_1/V	y_2/Hz	$y_3/\mu s$	$x_1/(m \cdot s^{-1})$	x_2/pL	$x_3/\mu m$	x_4
1	15	2500	3	2.92	2.57	0.08	0.65
2	15	3000	4	2.97	3.27	0.06	0.63
3	15	3500	5	3.51	3.40	0.04	0.74
4	15	4000	6	3.66	3.57	0.02	0.82
5	15	4500	7	3.86	3.23	0.06	0.62
.....							
25	19	4500	6	5.35	3.48	0.07	0.80

表 4 原始数据均值化处理
Tab.4 Averaging of raw data

y_1/V	$\bar{x}_1/(m \cdot s^{-1})$	$\bar{x}_2/pL$	$x_3/\mu m$	$\bar{x}_4$
15	3.38	3.21	0.05	0.69
16	3.55	3.43	0.04	0.86
17	3.84	3.65	0.04	0.76
18	4.76	3.67	0.06	0.77
19	4.88	3.79	0.07	0.72

1) 确定参考序列和比较序列。

设 $X_0 = (x_0(1), x_0(2) \cdots x_0(n))$ 为参考序列, $X_i = (x_i(1), x_i(2) \cdots x_i(n))$ 为相关因素序列, 其中 $i = 1, 2, \cdots, m$ 。

2) 初值变换, 无量纲化序列。令:

$$X_i' = \frac{X_i}{x_i(1)} = (x_i'(1), x_i'(2) \cdots x_i'(n)), \quad i = 0, 1, 2 \cdots m \quad (7)$$

3) 求绝对差序列。记:

$$\Delta_i(k) = |x_0'(k) - x_i'(k)|, \quad \Delta_i = (\Delta_i(1), \Delta_i(2) \cdots \Delta_i(n)), \quad i = 0, 1, 2, \cdots, m \quad (8)$$

4) 求两极最大差与两极最小差。记:

$$M = \max_i \max_k \Delta_i(k); \quad m = \min_i \min_k \Delta_i(k) \quad (9)$$

5) 求关联系数。

$$r_{0i}(k) = \frac{m + \zeta M}{\Delta_i(k) + \zeta M}, \quad \zeta \in (0, 1), \quad k = 1, 2 \cdots n; \quad i = 1, 2 \cdots m \quad (10)$$

6) 计算关联度。

$$r_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r_{0i}(k), \quad i = 1, 2 \cdots m \quad (11)$$

首先, 计算 y_1 与 x_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 的关联度。

1) 根据式 (7) 对表 4 的数据进行初值变换, 见表 5。

2) 根据式 (8) 计算绝对差序列, 见表 6。

3) 根据式 (9) 计算两级最大差和两级最小差;

$$M = \max_i \max_k \Delta_i(k); \quad m = \min_i \min_k \Delta_i(k)$$

4) 根据式 (10) 计算关联系数, 见表 7。

5) 根据式 (11) 计算关联度, 见表 8。

表 5 各因素序列无量纲变换

Tab.5 Dimensionless transformations of factor sequences

y_1	1.8325	1.9700	2.0725	2.3150	2.3650
$x_{1'}$	1.8445	1.8020	1.8528	2.0562	2.0634
$x_{2'}$	1.7517	1.7411	1.7612	1.5853	1.6025
$x_{3'}$	0.0273	0.0203	0.0193	0.0259	0.0296
$x_{4'}$	0.3765	0.4365	0.3667	0.3326	0.3044

表 6 各因素序列绝对差值

Tab.6 Absolute difference of each factor sequence

Δ_1	6.3411	6.3190	6.3498	5.7192	5.9704
Δ_2	6.4338	6.3807	6.4415	6.1901	6.4313
Δ_3	8.1583	8.1015	8.1834	7.7495	8.0042
Δ_4	7.8090	7.6853	7.8359	7.4428	7.7294

表 7 各因素序列关联系数

Tab.7 Correlation coefficients of each factor sequence

$x_{1(y1)}$	0.3922	0.3929	0.3919	0.4171	0.4066
$x_{2(y1)}$	0.3887	0.3907	0.3885	0.3979	0.3888
$x_{3(y1)}$	0.3340	0.3356	0.3333	0.3455	0.3383
$x_{4(y1)}$	0.3438	0.3474	0.3430	0.3547	0.3461

表 8 电压与墨滴形态各参数的关联度

Tab.8 Relevance degree between voltage and parameters of ink drop morphology

y_1	r_{11}	r_{12}	r_{13}	r_{14}
r_{01}	0.4001	0.3909	0.3373	0.3470

同理, 计算出点火频率、脉冲宽度与墨滴形态参数的关联度, 见表 9—10。

表 9 点火频率与墨滴形态各参数的关联度

Tab.9 Relevance degree between ignition frequency and parameters of ink drop morphology

y_2	r_{21}	r_{22}	r_{23}	r_{24}
r_{02}	0.3891	0.3890	0.3888	0.3889

表 10 脉冲宽度与墨滴形态各参数的关联度
Tab.10 Relevance degree of pulse width and ink drop morphology parameters

y_3	r_{31}	r_{32}	r_{33}	r_{34}
r_{03}	0.7607	0.7310	0.4333	0.4753

喷印工艺参数与墨滴形态参数的关联度矩阵 R 为：

$$R = \begin{bmatrix} U_{vc} & U_v & U_l & U_{cir} \\ f_{vc} & f_v & f_l & f_{cir} \\ US_{vc} & US_v & US_l & US_{cir} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4001 & 0.3909 & 0.3373 & 0.3470 \\ 0.3891 & 0.3890 & 0.3888 & 0.3889 \\ 0.7607 & 0.7310 & 0.4333 & 0.4753 \end{bmatrix}$$

其中： U_{vc} ， U_v ， U_l ， U_{cir} 分别为电压与墨滴速度、体积、拖尾长度和圆度之间的关联度； f_{vc} ， f_v ， f_l ， f_{cir} 分别为点火频率与墨滴速度、体积、拖尾长度和圆度之间的关联度； US_{vc} ， US_v ， US_l ， US_{cir} 分别为脉冲宽度与墨滴速度、体积、拖尾长度和圆度之间的关联度。

由各评价指标的关联度矩阵 R 和指标权重向量 $w=(w_1, w_2, w_3, w_4)$ ，求解出综合评判关联矩阵 R_C 为：

$$R_C = R \times w = \begin{bmatrix} 0.3801 \\ 0.3890 \\ 0.6608 \end{bmatrix}$$

将综合评判关联矩阵 R_C 归一化处理，则 $R_C=(0.266, 0.272, 0.462)$ 。

由综合评判关联矩阵 R_C 分析可知，喷印工艺参数对墨滴形态参数的影响程度由大到小依次为脉冲宽度、点火频率、电压；电压对墨滴速度的影响稍大，脉冲宽度对墨滴速度和体积的影响较大，点火频率对墨滴形态各参数的影响相差不大。

3 结语

以水性油墨为研究对象，分析喷印工艺参数控制对墨滴形态变化的影响趋势。通过单因素工艺参数对墨滴形态影响的实验分析可知，墨滴形态对电压的敏感中心为 16 V，对点火频率的敏感中心为 3500 Hz，对脉冲宽度的敏感中心为 6 μs。根据电压、点火频率和脉冲宽度对墨滴的速度、体积、拖尾长度和圆度的影响程度，运用 AHP 法构建墨滴形态质量的分析模型，并求得评价指标的权重分别为 0.36，0.34，0.1，0.2。由质量评价模型可知，喷印工艺参数改变很大程度地影响了墨滴的速度和体积，通过优化喷印工艺参数的方法，可以控制墨滴的速度和体积。

在实际的喷墨印刷工艺中，各喷印工艺参数综合作用于墨滴的形态，故通过喷印工艺参数多水平组合的正交实验，分析了其相互之间的关联度。同时，运用关联分析法结合质量评价模型综合评判喷印工艺参数对墨滴形态质量的影响，计算出电压、点火频率和脉冲宽度与墨滴形态质量的关联度分别为 0.266，0.272，0.462。由此可知，脉冲宽度对墨滴形态质量影响相对较大，点火频率次之，电压相对较小。显然，脉冲宽度和点火频率是影响水性油墨喷印质量的关键因素。通过选择合适的喷墨印刷的关键工艺参数，可以获得较高的墨滴形态质量，从而大大地提高喷墨印刷品的质量。

参考文献：

[1] SHIOKA Y, CHEN C, RYU S, et al. Ultra-low Threshold Lasing at 0.8 μm from Organic Micro-disk Cavity by the Ink-jet Printing Method[J]. Conference on Lasers and Electric-optics, 2016, 17(2): 2079—2081.

[2] 刘洪哲, 李松, 周勇, 等. 柔性基底喷墨打印墨滴数值模拟与实验[J]. 包装工程, 2018, 39(5): 173—178. LIU Hong-zhe, LI Song, ZHOU Yong, et al. Numerical Simulation and Experiment of Ink-jet Printing Ink Droplets on Flexible Substrates[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(5): 173—178.

[3] 杨晓, 黄蓓青, 魏先福. 喷墨控制参数对 UV 喷墨油墨墨滴状态的影响[J]. 北京印刷学院学报, 2013, 12(6): 45—48. YANG Xiao, HUANG Bei-qing, WEI Xian-fu. The Influence of Ink-jet Control Parameters on the Droplet State of UV Ink-jet Ink[J]. Journal of Beijing Printing College, 2013, 12(6): 45—48.

[4] 孙菁梅, 魏先福, 黄蓓青. 可食性喷墨油墨黏度对墨滴状态的影响[J]. 北京印刷学院学报, 2012, 20(4): 6—8. SUN Jing-mei, WEI Xian-fu, HUANG Bei-qing. Effect of Viscosity of Edible Ink-jet Ink on Ink Droplet Status[J]. Journal of Beijing Printing College, 2012, 20(4): 6—8.

[5] 屈贞财. 喷墨印刷工艺对导电墨水导电性能的影响[J]. 包装工程, 2016, 37(9): 152—155. QU Zhen-cai. The Effect of Ink-jet Printing Process on the Conductivity of Conductive Ink[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(9): 152—155.

[6] LI Min, ZHANG Ping, AN Ya-jie, et al. Relationship between Silk Fabric Pretreatment Droplet Spreading and Ink-jet Printing Accuracy of Reactive Dye Inks[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135(45): 368—375.

[7] 李明宇. 基于 CFD 的压电式喷墨过程仿真研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015. LI Ming-yu. Simulation of Piezoelectric Inkjet Process Based on CFD[D]. Shenyang: Northeast University, 2015.

- [8] DOMINNI K, SCHOEETTE L, FLORIAN L. A Novel Piezoelectric Print-head for High Melting Point Liquid Metals[J]. Conference on Micro Engineered and Molecular Systems, 2016, 12(8): 874—885.
- [9] 项帅. 墨滴是喷墨打印的关键[J]. 电子科技, 1999, 15(9): 7—12.
XIANG Shuai. Ink Droplets are the Key to Inkjet Printing[J]. Electronic Science and Technology, 1999, 15(9): 7—12.
- [10] 李艳云, 钱军浩. 基于墨点保真度的喷墨印刷质量分析与评价[J]. 包装工程, 2010, 31(19): 25—27.
LI Yan-yun, QIAN Jun-hao. Quality Analysis and Evaluation of Inkjet Printing Based on Ink Fidelity[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19): 25—27.
- [11] LI Yang-ling, HAN Kui-xia, WU Jian-wei. The Applicability Analysis and Improvement of Several Index Dimensionless Methods[J]. International Conference on Natural Computation, 2017, 11(9): 3084—3088.
- [12] 张建华, 王琪, 黄其冲. 基于 AHP 和灰色关联分析法的爆破参数优化[J]. 爆破, 2014, 31(4): 72—75.
ZHANG Jian-hua, WANG Qi, HUANG Qi-chong. Blasting Parameters Optimization Based on AHP and Grey Relational Analysis Method[J]. Blasting, 2014, 31(4): 72—75.
- [13] 李宁, 陈晖. 基于灰色层次分析法的作战指挥效能评估[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(5): 22—26.
LI Ning, CHEN Hui. Operational Command Effectiveness Evaluation Based on Grey Analytic Hierarchy Process[J]. Journal of Ordnance and Equipment Engineering, 2017, 38(5): 22—26.
- [14] 李旭辉. 基于 AHP 构建的城市吸引力评价体系[J]. 电子技术与软件工程, 2019, 21(13): 143—145.
LI Xu-hui. Urban Attraction Evaluation System Based on AHP[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2019, 21(13): 143—145.
- [15] CHEN Q, ZHOU Q, SUN Z, et al. Evaluation of Electricity Market Operation Efficiency Based on Analytic Hierarchy Process-Grey Relational Analysis[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018, 11(9): 245—249.
- [16] 冯芝娟, 肖建斌. 正交实验设计法研究 NR/EPDM 共混胶性能[J]. 橡塑技术与装备, 2016, 42(1): 20—23.
FENG Zhi-juan, XIAO Jian-bin. Study on the Properties of NR/EPDM Blends by Orthogonal Experimental Design[J]. Rubber and Plastic Technology and Equipment, 2016, 42(1): 20—23.