

EHD喷印技术相关参数数值分析

王莎莎, 唐正宁, 缪斌鹰, 陈家祥
(江南大学, 无锡 214122)

摘要:目的 对基于电-液耦合动力学原理(简称EHD)喷印技术的相关参数,进行锥射流和滴落模式下的数值分析研究。方法 在锥射流模式中,对毛细凝结加热液体喷射的物理模型进行调整,以适用于EHD喷印;对滴落模式的液滴沉积过程,引入表面张力概念进行数值分析。运用数值法得到了锥射流的轮廓图,集中讨论了流量和净高度对射流直径的影响;重点研究了液滴直径与电压频率和液体表面张力之间的关系,并将理论结果与实验和经验数据进行了比较分析。结果 锥射流模式在一定条件下,射流直径随着流量和净高度的增大而增加;在滴落模式中,得到的液滴直径随电压频率和流体表面张力的增大而减小,且数值分析得到的结果与实验结果相一致。结论 对相关参数进行数值分析是对实验研究的补充,为EHD喷印技术研究提供了理论参考。

关键词: EHD喷墨印刷; 数值分析; 锥射流; 液滴直径; 表面张力

中图分类号: TS853+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)07-0145-04

Numerical Analysis of the Relevant Parameters in EHD Micro-jet Printing

WANG Sha-sha, TANG Zheng-ning, MIAO Bin-ying, CHEN Jia-xiang
(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The aim of this work was to study the relevant parameters in electro-hydrodynamic (EHD) micro-jet printing technology for numerical analysis in cone-jet mode and dripping mode. In the cone-jet mode, the physical model of condensation-heating of capillary liquid jet was adjusted to be applicable for EHD printing; in the dripping mode, the concept of surface tension was introduced in the droplet formation process on the collector under pulse voltage for numerical analysis. The profile of Taylor cone in cone-jet mode was obtained using the numerical method, and the influence of the flow rate and net height on the jet diameter was focused; the correlations of droplet diameter and the pulse voltage frequency, the surface tension of the liquid in the dripping mode were emphasized, and the theoretic data were compared and analyzed with the experimental and experiential data. In the cone-jet mode, the jet diameter increased with the increase of the flow rate and the decrease of the net height under certain conditions; in the dripping mode, the droplet diameter decreased as the voltage frequency and the liquid surface tension increased respectively. The conclusions from numerical analysis showed good agreements with the experimental ones.

KEY WORDS: EHD micro-jet printing; numerical analysis; cone-jet flow; droplet diameter; surface tension

基于EHD原理(电-液耦合动力学原理)的相关技术已经应用在许多领域,如EHD喷墨印刷、EHD泵、EHD强化传热和EHD喷雾纳米技术等。其中,EHD喷印是一种新型的喷墨印刷技术,无需接触、无需压力、无需印版,能定量精确沉积形成所需要的图案或产品^[1-2]。随着大量可溶性有机材料的出现,EHD喷

印技术不仅应用于传统的印刷领域,还在生化、微结构制造及精密化工等领域发挥了独特的作用^[3]。

EHD喷印技术是由传统的电纺丝和电喷雾技术发展而来的^[4],静电纺丝技术沉积的是精细、连续性的纤维,静电喷雾沉积的是扩散性的雾状微滴,而EHD喷印技术旨在直接沉积功能性的图文信息^[5-6]。

收稿日期: 2014-09-04

作者简介: 王莎莎(1989—),女,山西运城人,江南大学硕士生,主攻喷墨印刷技术。

通讯作者: 唐正宁(1963—),男,江苏苏州人,江南大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为包装与印刷工艺。

EHD 喷印技术使用电场力的作用,替换了传统喷墨印刷中热泡、压电、声波和静电等的作用。在电场作用下,喷嘴中的液体离子被吸引,弯液面发生变形,形成锥形,又称泰勒锥(TAYLOR,1969)。当电场力克服表面张力等作用力,使得平衡被破坏时,就会有射流从喷嘴喷出。这种喷印技术对油墨黏度没有特殊的限制,且产生的射流直径远小于喷嘴尺寸,不易造成喷嘴堵塞。喷墨印刷中墨滴大小直接影响喷墨印刷的清晰度^[7],可实现高精度的印刷。EHD 喷印技术克服了传统喷印技术的不足,具有成本低、设置简单、沉积速度快和可实现高黏度溶液的喷印等优点。作为一种新型的微纳米制造技术,它在有高精度要求的印刷电子制造方面具有很大的潜力,引起了众多行业人士的广泛关注和积极探索。

1 EHD 喷墨印刷原理

一般的 EHD 喷印结构见图 1^[6]。当带电液体以较低的流速供给毛细管喷嘴时,喷嘴顶端首先形成悬滴。如果喷嘴和收集板之间所加的电压增大,提供的电场力克服液体表面张力等的作用,悬滴就会由球冠形伸长为双曲面,最后会在喷嘴的顶端形成稳定的锥形,见图 2。随着电场强度的继续增加,锥形变得不稳定,从泰勒锥的顶端喷射出微小的射流,这就是所谓的 cone-jet 模式^[8]。

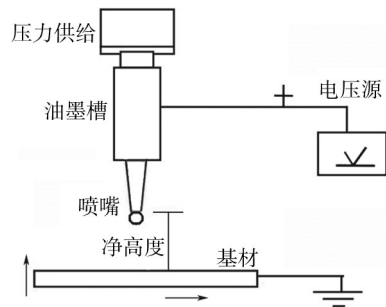


图 1 EHD 喷印的结构

Fig.1 Schematic diagram of EHD micro-jet printing technology

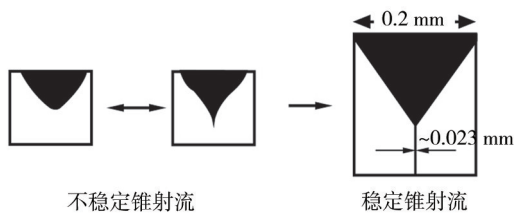


图 2 锥射流的不稳定和稳定状态

Fig.2 Unsteady and steady states of cone-jet flow

在此过程中,液体首先形成圆锥形结构,接着从

圆锥的顶端产生射流,因而液滴的直径通常比喷嘴的直径要小得多,可以产生微纳米级的液滴^[6]。喷嘴顶端射流表面形状的变化被 Marginean 等通过高速的图像采集系统获得,并将它们分为积累、锥形成、液体喷射和松弛等 4 个阶段^[9],见图 3。EHD 喷印模式较为常见的有滴落和锥射流模式。

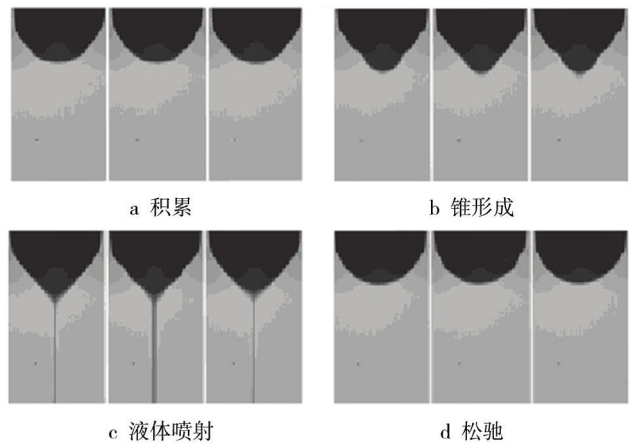


图 3 喷嘴顶端液面变化

Fig.3 Liquid surface changes on the top of the spray nozzle

2 锥射流模式射流形状数值分析

锥射流的物理模型见图 4^[8],其相关参数包括流体流量 Q ,流体表面张力 σ_L ,流体密度 ρ ,流体动力黏度 μ ,流体初始流速 v_0 和喷嘴半径 r_0 。在 Q 一定时,喷嘴上施加的电势对锥射流直径的影响较小,因此在分析锥射流直径时可忽略外加电势的影响,仅考虑流体自身的流动^[10]。

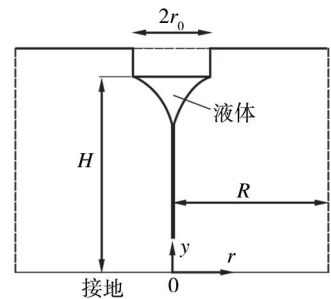


图 4 锥射流物理模型

Fig.4 Configuration of the physical model of cone-jet flow

通过对毛细凝结加热液体喷射的物理模型进行调整,Scheuermann 计算得到了 EHD 喷印过程中动量守恒方程的解析解,从而得到此过程中射流长度和射流半径之间的关系:

$$\frac{1}{F_r} \cdot \frac{x}{r_0} = \frac{1}{\psi^4} - m + \left(2W_e + \left((2W_e)^2 + \frac{24}{R_e F_r} \right)^{1/2} \right) \cdot$$

$$\left(\frac{1}{\psi} - n\right) \quad (1)$$

$$\text{式中: } F_r = \frac{v_0^2}{gd_0}, \psi = \frac{r_s}{r_0}, W_e = \frac{\sigma_L}{d_0 v_0 \rho},$$

$$R_e = \frac{v_0 d_0}{\mu} = \frac{\rho v_0 d_0}{\eta_N}.$$

式中: x 为距离喷嘴的距离; r_s 为锥射流半径; η_N 为绝对黏度。在结果分析中, 选取的锥射流喷嘴内径 d_0 为 0.2 mm, 净高度 H 为 1 mm。对于轴对称的锥射流, 这里只研究锥射流的右半边轮廓。见图 4, 以喷嘴的轴向 y 为坐标系的纵轴, 径向 r 为坐标的横轴, 收集板上射流的中心点为原点, 可以得到:

$$y = H - x \quad (2)$$

使用质量分数为 3% 的聚氧化乙烯 (PEO) 溶液, 其电导率为 0.107 mS/m, 相对介电常数为 37.7, 表面张力为 48 mN/m, 黏度为 17.3 mPa·s, 密度为 1113 kg/m³[11]。

将方程 (1) 代入方程 (2) 可得:

$$x = H - F_r r_0 \left(\frac{1}{\psi^4} - m + \left(2W_e + \left((2W_e)^2 + \frac{24}{R_e F_r} \right)^{1/2} \right) \cdot \left(\frac{1}{\psi} - n \right) \right) \quad (3)$$

使用前述聚氧化乙烯的参数, 取 $m=1$, $n=4$ (Anno, 1977), 使用 Matlab 对锥射流的轴向距离进行有限划分。不同流量下轴对称锥射流的右半边轮廓见图 5。当聚氧化乙烯的流速分别为 1.5, 3, 6, 15 nL/s 时, 到达收集板锥射流的直径分别为 19.6, 23.4, 27.2, 38.4 μm 。在不同净高度下, 聚氧化乙烯溶液锥射流的右半边轮廓见图 6。当净高度分别为 1, 2, 3, 4 mm 时, 到达收集板的锥射流直径分别为 23.4, 22.8, 22.4, 22.0 μm 。

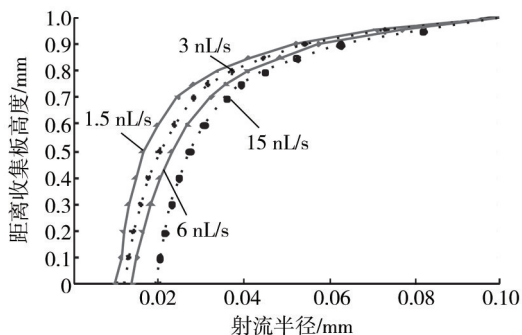


图5 不同流量下锥射流的右半边轮廓

Fig.5 Right half profile of the cone-jet flow at different flow

由此可知, 喷射液体的流量越大, 形成锥射流的直径就越大, 形成的液滴也会越大; 在一定条件范围内, 喷嘴与收集板的净高度增加, 形成锥射流的直径

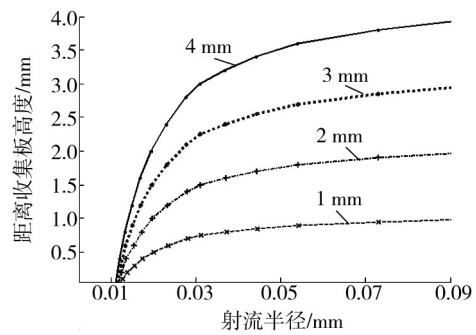


图6 不同净高度下锥射流的右半边轮廓

Fig.6 Right half profile of the cone-jet flow at different net height

就越小, 形成的液滴也会越小。由此, 在电压等条件一定的情况下, 可以通过控制流量和净高度来对液滴的直径进行控制。

3 滴落模式收集板上液滴状态数值分析

滴落模式下收集板上得到的一系列液滴, 其直径 d 和高度 h 的比为常数, 假设此常数为 k , 且 k 与液体表面张力 σ_L 和收集板表面张力 σ_s 存在一定的关系。下面利用界面张力的相关理论, 得到 k , σ_L , σ_s 之间的关系。

液滴到达收集板的状态见图 7, 液滴受到液体表面张力、收集板表面张力和它们之间的界面张力等 3 个力的作用, 这里忽略液滴自身的重力影响。

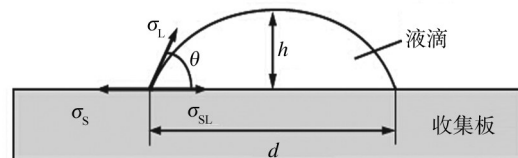


图7 收集板上液滴形态

Fig.7 Morphology of a droplet on the collector

根据牛顿第一定律, 液滴在以上 3 个力的作用下达到平衡状态:

$$\sigma_s = \sigma_L \cos \theta + \sigma_{SL} \quad (4)$$

式中: θ 为接触角; σ_{SL} 为固-液的界面张力。式 (4) 称为润湿方程, 也称为杨氏方程^[12], 是 T.Young 在 1805 年提出来的。

利用见图 7 的几何关系和半角公式, 可以推导出:

$$k = \frac{d}{h} = 2 \sqrt{\frac{\sigma_L + \sigma_L - \sigma_{SL}}{\sigma_L - \sigma_L + \sigma_{SL}}} \quad (5)$$

式中: σ_{SL} 为关于 σ_L , σ_s 的函数。

$$\sigma_s = \frac{\sigma_L}{2} (\sqrt{1 + \sin^2 \theta} + \cos \theta) \quad (6)$$

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{2}{k} \quad (7)$$

用上述方法得到的理论值,通过圆缺的体积公式,可以得到:

$$d = 2k \left[\frac{3Q}{(3k^2 + 4)\pi f} \right]^{1/3} \quad (8)$$

3.1 电压频率与液滴直径的关系

对方程(9)进行分析,在流量一定的情况下,若提供的流体和收集板确定,可以得到电压频率 f 和液滴直径 d 的关系。下面对方程(9)进行可行性分析。

当 $\sigma_L=48$ mN/m, $\sigma_s=42$ mN/m时,利用 Matlab 中的 fzero 函数进行计算,得到 $k=3.0222$ 。可以看出,计算值 k 与经验值 $^{[13]}d:h=3:1$ 非常接近,说明上述假设是成立的。理论值和实验值、经验值相比较,见图8,可以看出,3种数据基本吻合,且随着电压频率的增大液滴直径减小,且减小的速度是由大慢慢变小。

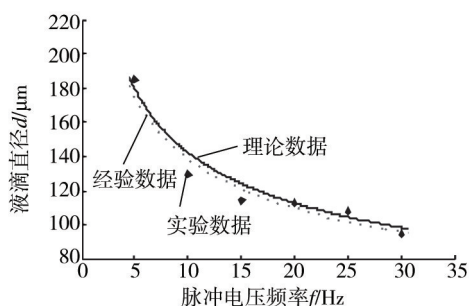


图8 电压频率与液滴直径的关系

Fig.8 Relationship between voltage frequency and the diameter of the droplets

当 $\sigma_L=52$ mN/m, $\sigma_s=42$ mN/m时,再次使用 Matlab 计算可以得到 $k=2.4963$,与经验值 $^{[15]}d:h=2.5:1$ 也非常接近,假设同样适用。

3.2 表面张力与液滴直径的关系

当外加的脉冲电压频率和流量一定时,液滴的直径是关于流体表面张力的函数。取流量 $Q=70$ μ L/h, 频率 $f=5$ Hz, 流体的表面张力 σ_L 为0.043~0.072 N/m, 收集板的表面张力 σ_s 为0.042 N/m,对应的系数 k 为5.4462~1.5843。

σ_L/σ_s 与液滴直径的关系见图9,其中连续的虚线表示 σ_L/σ_s 与液滴直径的数值模拟关系。其结果与使用不同质量分数(相应的表面张力为0.045~0.065 N/m)的PEO溶液所得数据 $^{[14]}$ 进行比较,模拟结果与实验数据的变化趋势相同,且基本吻合。从图9可以看出,随着 σ_L/σ_s 的增大,液滴直径 d 减小。由于PEO溶

液的表面张力随着其质量分数的增大而减小,此结论与液滴直径随着PEO溶液质量分数的增加而增大的实验结果相一致,因此,滴落模式下液滴的直径会随着流体表面张力的增加而减小,可以通过控制流体的表面张力而得到一定直径的液滴。

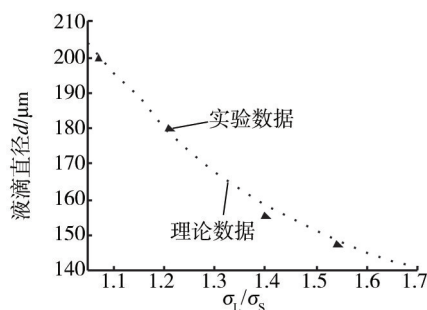


图9 σ_L/σ_s 与液滴直径的关系

Fig.9 Variation of drop diameter as a function of the surface tension

4 结语

EHD喷印过程涉及电场、流场中的多个物理量,工艺参数的影响作用复杂,因此,EHD喷印技术的机制和控制方法是当前研究的重点与难点问题 $^{[15]}$ 。研究了锥射流模式中流量和净高度对锥射流直径的影响,对毛细凝结加热液体喷射的物理模型进行调整,使用数值分析方法,得到了EHD喷印过程锥射流的轮廓图,通过比较可知,在一定条件下射流直径随着流量的增大而增加,随着净高度的增大而减小;将表面张力理论应用到滴落模式中,数值分析结果与实验结果相吻合,得到液滴直径随着电压频率和流体表面张力的增大而减小。EHD喷印技术相关参数的数值分析是对实验研究的补充说明,为今后的研究和发展奠定了一定的理论基础。

参考文献:

- [1] 刘春格,唐正宁.基于压电喷墨印刷的墨滴速度大小的理论研究[J].包装工程,2010,31(15):36—38.
LIU Chun-ge, TANG Zheng-ning. Theoretical Research of the Ink Droplet Velocity Based on Piezoelectric Inkjet Printing [J]. Packaging Engineering, 2010, 31(15): 36—38.
- [2] 宋波,唐正宁.压电式喷墨印刷中液滴喷射参数分析[J].包装工程,2010,32(19):93—96.
SONG Bo, TANG Zheng-ning. Parameter Analysis of Droplet Ejection of Piezoelectric Ink-jet Printing [J]. Packaging Engineering, 2010, 32(19): 93—96.
- [3] 王振宁,唐正宁.液体表面张力和黏度对压电喷射液滴形

(下转第153页)

- tics Demand[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(11): 196—198.
- [9] 赵方庚, 石晓燕. 加强军用物资集装化建设的策略分析[J]. 包装工程, 2013, 34(9): 127—130.
- ZHAO Fang-geng, SHI Xiao-yan. Strategy Analysis of Enhancing Military Material Containerization Construction[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(9): 127—130.
- [10] 张春和, 马维平, 蔡志强, 等. 现代战争后勤保障对军品包装的需求研究[J]. 包装工程, 2011, 32(23): 91—94.
- ZHANG Chun-he, MA Wei-ping, CAI Zhi-qiang, et al. Requirements Investigation of Modern War Logistic Support on Military Product Packaging[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(23): 91—94.
- [11] 孟令东, 梁志杰, 乔玉林, 等. 装甲装备器材保养包装模式研究与体系建设[J]. 包装工程, 2012, 33(1): 126—128.
- MENG Ling-dong, LIANG Zhi-jie, QIAO Yu-lin, et al. Mode Study and System Construction of Maintenance Packaging of Armored Equipment[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(1): 126—128.
- [12] 贺兵, 刘扬. 模块化设计在包装机械设计中的应用[J]. 包装工程, 2008, 29(10): 140—142.
- HE Bing, LIU Yang. Application of Modular Design in Packaging Machinery Design[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(10): 140—142.
- [13] 蔡惠平, 陈黎敏, 赵振. 包装设备的一种综合选型方法[J]. 包装工程, 2007, 28(7): 94—95.
- CAI Hui-ping, CHEN Li-min, ZHAO Zhen. Type Selection Method of Packaging Equipment[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(7): 94—95.
- [14] 罗书强. 面向成本设计技术在包装机械设计中的应用[J]. 包装工程, 2008, 29(5): 112—114.
- LUO Shu-qiang. Research on Application of Design for Cost in Packaging Machinery Design[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(5): 112—114.
- [15] CHUNG K J. A Simplified for the Economic Design of X-charts[J]. Int J of Prod Res, 1993, 28(7): 1239—1246.
- [16] 王东爱, 王岭松. 包装机械的模块化设计研究[J]. 包装工程, 2008, 29(11): 41—43.
- WANG Dong-ai, WANG Ling-song. Research on Modular Design of Packaging Machine[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(11): 41—43.

(上接第 148 页)

- 成过程影响的数值模拟[J]. 包装工程, 2010, 31(13): 24—27.
- WANG Zhen-ning, TANG Zheng-ning. Numerical Simulation of the Effect of Liquid Surface Tension and Viscosity on the Droplet Formation of Piezoelectric Ejection[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(13): 24—27.
- [4] HUANG Yong-an, BU Ning-bin, DUAN Yong-qing, et al. Electrohydrodynamic Direct-writing[J]. Nanoscale, 2013(5): 12007—12017.
- [5] 徐磊. 电液耦合喷印技术的发展[J]. 武汉工程职业技术学院学报, 2012(4): 5—8.
- XU Lei. The Development of Electro-hydrodynamic Printing Technology[J]. Journal of Wuhan Engineering Professional Technology Institute, 2012(4): 5—8.
- [6] 谭姣姣. 印刷电子技术分析与印制工艺研究——EHD微喷印技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013.
- TAN Jiao-jiao. The Analysis of Printed Electronics Technology and Research on Printing Process—research on EHD Micro-printing Technology[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.
- [7] 邵文, 唐正宁. 喷墨印刷中墨滴分裂过程的研究[J]. 包装工程, 2012, 33(1): 88—91.
- SHAO Wen, TANG Zheng-ning. Research on Break off Process of Ink Drop in Inkjet Printing[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(1): 88—91.
- [8] FANG Yan, FAROUKA B, KOB F. Numerical Modeling of an Electrostatically Driven Liquid Meniscus in the Cone-jet Mode[J]. Journal of Aerosol Science, 2003, 34(1): 99—116.
- [9] MARGINEAN I, PARVIN L, HEFFERNAN L, et al. Flexing the Electrified Meniscus: the Birth of a Jet in Electrosprays[J]. Anal Chem, 2004, 76: 4202—4207.
- [10] MITROVIC J, RICOEUR A. Fluid Dynamics and Condensation-heating of Capillary Liquid Jets[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1995, 38(8): 1483—1494.
- [11] TAN Jiao-jiao, TANG Zheng-ning, WANG Qi. The Research on EHD Micro-jet Printing Technology under Pulse Voltage[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 262: 243—246.
- [12] 陈剑锋, 唐正宁, 李俊锋. 喷墨印刷纸上液滴的铺展机制研究[J]. 包装工程, 2012, 33(23): 129—132.
- CHEN Jian-feng, TANG Zheng-ning, LI Jun-feng. On Drop-let Spreading Mechanism on Ink-jet Paper[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(23): 129—132.
- [13] KIM J, OH H, KIMS S. Electrohydrodynamic Drop-on-demand Patterning in Pulsed Cone-jet Mode at Various Frequencies[J]. Journal of Aerosol Science, 2008, 39(9): 819—825.
- [14] 戴银宏. 电液动力喷印技术的实验研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2009.
- DAI Yin-hong. Experimental Research on EHD Printing[D]. Xiamen: Xiamen University, 2009.
- [15] TAN Jiao-jiao, TANG Zheng-ning, WANG Qi. The Study of Correlations Among Parameters in Electrohydrodynamics Micro-jet Printing System[J]. Key Engineering Materials Vols, 2013, 562/565: 701—706.