doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.053

基于 EHD 微尺度 3D 打印喷射机理与规律研究

杨建军　张志远　兰红波　彭子龙　王　飞
(青岛理工大学机械工程学院, 青岛 266520)

摘要: 基于电流体动力学(EHD)微尺度 3D 打印(电流体动力喷射打印或电喷印)的成形机理复杂,成形影响因素较多,首先对泰勒锥的受力状况进行了理论分析,然后用有限元数值模拟和实验方法进行验证,探索了该微尺度 3D 打印方法的喷射机理,并揭示了电压、压力对锥射流喷射性能的影响规律。结果表明,电压越大,锥形越短;入口压力越大,锥形越长,同时也表明了在一定的电压和气压范围内喷印均可以正常进行,而不是特定的电压或气压,从而可以通过调节电压和气压改善锥射流及喷印质量。用光固化树脂材料进行的喷印实例中获得了较好的喷印质量。

关键词: 微纳尺度 3D 打印; 电流体动力喷射打印; 锥射流; 喷射机理; 影响规律
中图分类号: TH164; O361.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2016)06-0401-07

Jetting Mechanism and Rules of Micro Scale 3D Printing Based on EHD

Yang Jianjun　Zhang Zhiyuan　Lan Hongbo　Peng Zilong　Wang Fei
(*School of Mechanical Engineering*, *Qingdao University of Technology*, *Qingdao* 266520, *China*)

Abstract: Micro scale 3D printing based on electrohydrodynamic (electrohydrodynamic jet printing, E-jet printing) is an emerging and promising micro/nano scale 3D printing processes, which was demonstrated with outstanding strengthens and high potentials in terms of high resolution, low cost and easy operation. Micro scale 3D printing was utilized in various areas, including tissue engineering, electronics, micro fuel cell, composite materials, etc. Different from the traditional jet printing technology, the EHD jet is driven by electric field to draw a very fine jet from the top of the liquid cone. The forming mechanism of micro scale 3D printing based on EHD was complex, and there were several influencing factors and process parameters. The stress state of Taylor cone was analyzed theoretically, and then the finite element simulation and experimental methods were used to verify the theory. Through the investigation, the jetting mechanism of the micro scale 3D printing method was explored, and the influences of voltage and pressure of cone-jet mode on E-jet printing were revealed, and some useful conclusions were achieved. The result showed that the Taylor cone was shortened with the increase of voltage, and it was lengthened with the increase of inlet. Meanwhile, it was shown that the printing can be carried out in a certain range of voltage and pressure, rather than specific values of voltage or pressure, so the cone jet and printing quality can be improved by adjusting the voltage and air pressure. A printing example of light curing resin material was given, and the printing quality was good. The research results provided theoretical basis and guidance for improving the forming accuracy and control performance of micro scale 3D printing based on EHD.

Key words: micro scale 3D printing; electrohydrodynamic jet printing; cone jet; jetting mechanism; influence rule

收稿日期: 2016-01-04　修回日期: 2016-01-31
基金项目: 国家自然科学基金项目(51375250)和青岛市创业创新领军人才计划项目(13-CX-18)
作者简介: 杨建军(1977—),男,副教授,博士,主要从事 3D 打印和系统优化设计研究,E-mail: yjjdem@163.com
通信作者: 兰红波(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事微纳制造、纳米压印和微纳尺度 3D 打印研究,E-mail: hblan99@126.com

引言

微纳尺度 3D 打印技术目前主要有:微立体光刻[1]、基于 EHD 微尺度 3D 打印[2-3]、双光子聚合 3D 打印[4-5]、电化学沉积[6]、微激光烧结[7]等。与其他技术相比,基于 EHD 微尺度 3D 打印技术在成本、效率、材料适应性、可操控性、打印面积等方面具有优异的性能,在柔性电子、再生组织、微光学器件制造等领域已有初步应用[8-10]。在目前微纳尺度 3D 打印技术中,基于 EHD 微尺度 3D 打印技术是最具发展前景的技术之一[11-12]。

基于 EHD 微尺度 3D 打印也称为电流体动力喷射打印或电喷印,是一种基于电流体动力学的微液滴喷射沉积成形技术,其成形机理和影响规律较复杂,本文在理论分析的基础上,采用有限元数值模拟和实验方法进行验证,探索电喷印的喷射机理,研究电压、压力对锥射流喷射性能的影响规律。

1 理论分析

电喷印的基本原理和结构[13-15]如图 1 所示。对喷嘴处施加高电压(通常为上千伏),使喷嘴和接收基板之间形成强电场,利用强电场产生的电场力使液体在喷嘴口处拉伸形成泰勒锥,产生小于喷嘴尺寸的射流,并沉积在接收基板上,结合承片台在水平面内的运行和喷嘴工作台在垂直方向的运动,从而制造出复杂的三维微纳结构。电喷印采用流体静电场喷射中的锥射流模式,通过按需喷印产生细小均匀的液滴,形成高精度图案,并能利用强电场力克服喷嘴易堵塞的问题。

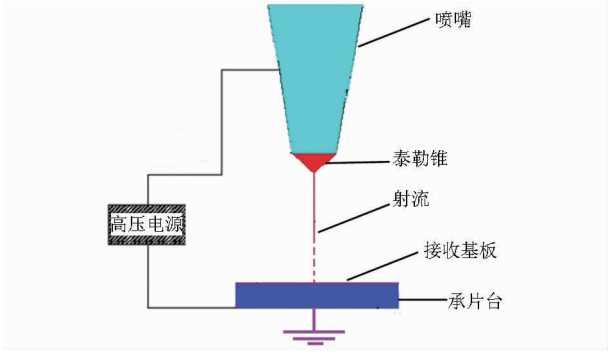

图 1 电喷印基本原理和结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of basic principle and structure of E-jet printing

喷嘴和接收基板之间有场强足够高的电场,当液体匀速通过导电喷嘴时,喷嘴尖端液滴在电场的作用下,会在其表面形成电荷,并受到外加电场的作用而在流体表面产生电场力。沿液面切向方向的电场力使得液滴拉伸变形,成为锥状液面,即泰勒锥。随着电荷密度的不断增加,尖端的电场力大于表面张力,最终从泰勒锥尖端发射出小于喷嘴直径的射流,该喷射模式即为锥射流模式。

理想的电喷印要求锥射流细小且稳定。这样既可以得到高精度的喷印图案,又可以减少误差,提高可控性。喷印过程中喷嘴的直径和电极高度一般保持不变,一种简单易行的控制方法是,通过控制电压和入口压力来控制锥射流的形式,最终控制喷印效果。

电喷印过程中泰勒锥的受力分析如图 2 所示。尖端处的电场力必须克服黏性力和表面张力才能形成射流。圆锥面上液体的法向电场力必须与表面张力及流体内外压差保持平衡,这样才能维持泰勒锥的稳定;同时切向电场力应大于黏性力,以便流体在切向得到加速,并在泰勒锥的内部产生回流[16]。

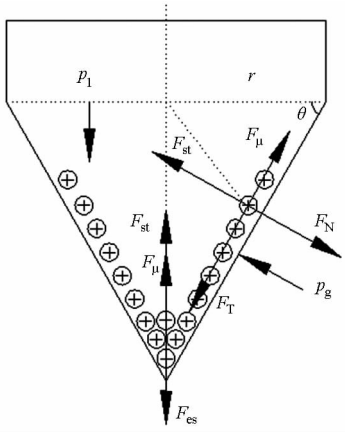

图 2 泰勒锥的受力分析图

Fig. 2 Stress analysis diagram of Taylor cone

锥射流模式处于稳定状态时,可得到

$$p_l - p_g + F_{es} > F_{st} + F_\mu \tag{1}$$

$$p_l - p_g + F_N = \frac{\sigma}{r\sin\theta} = F_{st} \tag{2}$$

$$F_T - F_\mu = ma^2 \tag{3}$$

式中 p_l——液相压力 p_g——气相压力

F_{es}——尖端电场力 F_{st}——表面张力

F_μ——黏性力 a——加速度

F_N——圆锥面的法向电场力

σ——流体表面的张力系数

r——喷嘴半径 F_T——切向电场力

m——流体单位质量

式(1)说明了形成射流必须有足够高的电场,使得流体在尖端克服表面张力和黏性力。式(2)是得到稳定泰勒锥的必要条件[17],即在法线方向上,流体液面内外压差与电场力的合力等于表面张力。当电场增强时,F_N增大,为维持平衡,θ 减小,泰勒锥的锥形缩短;相反,则泰勒锥的锥形被拉长。当入口

压力增大时，流速增加，p_1相应增大，为维持平衡，法向电场力 F_N 变小使得 θ 增大，锥形被拉长；相反则锥形缩短。当电场强度过大时，将使锥面上 F_N远大于 F_{st}，则平衡关系被破坏，使射流不稳定；当压力过大时，θ 过大，泰勒锥消失。式(3)表示流体沿锥形切线方向流动，LI 等[18]认为，锥形内部的回流是泰勒锥稳定的必要条件。电压增大时，对应 F_T增加，切向流速变大，内部回流增强，喷射的液体减少，为维持泰勒锥的稳定，此时锥形会缩短，以减小切向力并渐弱回流，使液体喷射量等于流速；相反，电压减小时，锥形拉长。而电压不变时，由于压力的增大使 θ 增大，F_T相应的增大，F_T的增大使得回流加强，维持增大的流速与喷射的液体量之间的平衡；压力减小则 θ 减小，回流减弱。

2　有限元数值模拟

为进一步探索不同电压和压力对喷印过程的影响规律，本文基于有限元方法，采用多物理场耦合分析软件 COMSOL Multiphysics，使用 CFD 接口和电磁场接口建立模拟模型。

EHD 微喷印本质上是流体在电场力、表面张力、内外压力等共同作用下所发生的变化。本文假设流体不可压缩、黏性、低速运动，把电场力作为体积力添加到 Navier－Stokes 方程[19](N－S 方程)中，同时采用相场理论[20]对气液两相问题和表面张力进行计算。

电场力 F_{es}添加到 N－S 方程可得

$$F_{es} = QE - \frac{1}{2}E^2 \nabla \varepsilon \tag{4}$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla(\rho u^2) = \rho g - \nabla p + \mu \nabla^2 u + F_{st} + F_{es} \tag{5}$$

式中　Q——电荷密度　　E——电场场强

ε——流体介电常数

ρ——密度　　u——速度

g——重力　　p——压力

μ——动力粘度

2.1　计算模型

图 3 为模型的几何条件。其中，A 为毛细管内的流体，材料为含水率 6% 的乙醇；B 为毛细管管壁，材料为不锈钢；C 为空气。流体属性如表 1 所示，几何尺寸和边界条件如表 2 所示，毛细管端口到接地基板的距离为 0.6 mm，默认初始时毛细管尖端的流体呈平面分布。

综合考虑模型的计算时间和性能，对部分网格进行手动调整参数。B 部分仅计算电场的分布，相应网格划分较稀疏；A 和 C 流体部分网格划分细密，分别设置最大单元尺寸为 16 μm，最小单元尺寸为 1 μm，且最大单元生长率设为 1.05，最终得到域单元 25 149 个，边界单元 685 个。根据控制方程中有关于时间的分量，选定求解类型为瞬态，时间步长设定为 5×10^{-6} s，采用直接求解器进行求解。

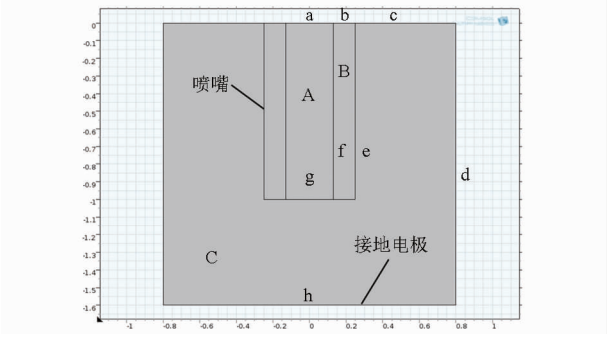

图 3　模型几何条件

Fig. 3　Geometry conditions of model

表 1　流体在 20℃时的性质

Tab. 1　Basic properties of fluid at 20℃

流体	相对介电常数	动力粘度/(Pa·s)	密度/(kg·m^{-3})
含水率 6% 的乙醇	28.4	1.4×10^{-3}	808
空气	1	1.79×10^{-5}	1.29

表 2　模型几何尺寸及边界条件

Tab. 2　Geometry dimensions and boundary conditions of model

边界	流体力学	静电场	尺寸/mm
a	入口压力，p = 85 Pa	电势 V	0.26
b	速度 u = 0	电势 V	0.12
c	开边界，p = 0	nD = 0	0.55
d	开边界，p = 0	nD = 0	1.60
e	无滑移，速度 u = 0	电势 V	1.00
f	无滑移，速度 u = 0	电势 V	1.00
g	两相界面	电势 V	0.26
h	出口，p = 0	接地，V = 0	1.60

2.2　模拟结果与分析

图 4 是在电压为 1.9 kV、入口压力为 85 Pa 条件下流体形态随时间变化的模拟过程图，在电场力的作用下流体逐渐形成锥形。随着尖端电荷密度增加，电场力逐渐增大，最终突破表面张力形成射流。

2.2.1　速度场

图 5 是泰勒锥表面电荷分布示意图，可以看出，电荷主要分布在表面，在泰勒锥尖端处有聚集，因此尖端电场力增大产生泰勒锥并形成射流。图 6 为泰勒锥内部速度场模拟图，在切向电场力的作用下，流体沿锥面切向加速，并在中心附近向上回流，同时泰勒锥内部形成 2 个对称的漩涡，此为泰勒锥的重要形成标志之一[16]。

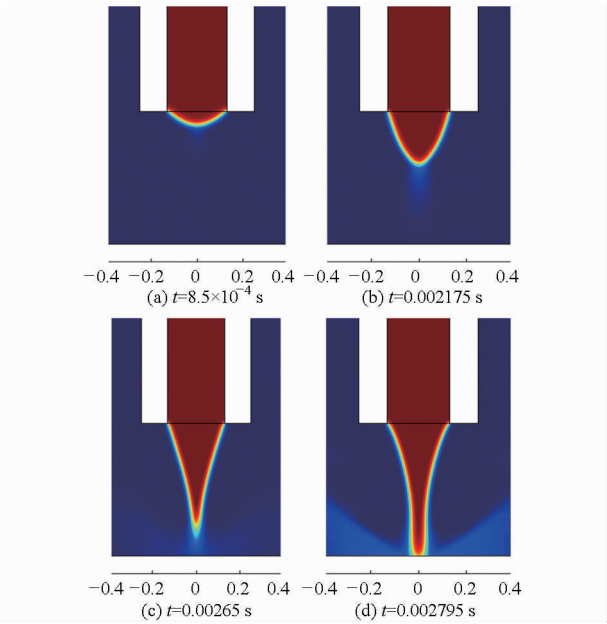

图 4 流体形态随时间变化的模拟图

Fig. 4 Simulated diagram of fluid form varying with time

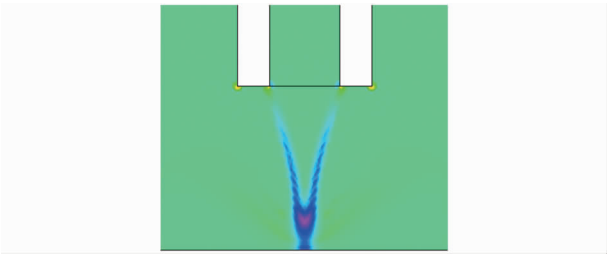

图 5 流体表面电荷密度分布示意图

Fig. 5 Distribution sketch map of surface charge density of fluid

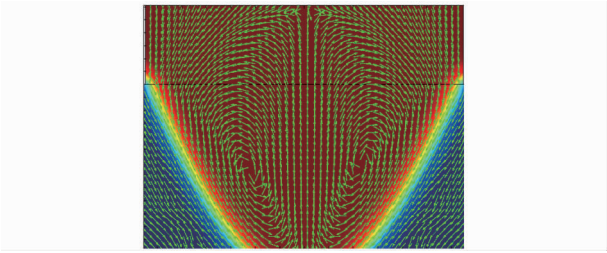

图 6 泰勒锥内部速度场模拟图

Fig. 6 Simulated diagram of velocity field in Taylor cone

2.2.2 电压

图 7 为施加不同电压时得到的喷印状态模拟图。图 7a 为电压在 1.4 kV 下模拟所得的状态,此时电压过小,电场力不足以克服表面张力,未产生锥射流模式;随着电压的升高,锥射流模式开始出现,通过比较不同电压下的锥射流锥形可以看出,锥形逐渐缩短,但仍可正常喷印;当电压升至 3.0 kV 时,出现多股射流,射流不稳定,不能进行正常喷印。这与理论分析相吻合。

2.2.3 入口压力

将外加电压设置为 1.7 kV 不变,图 8 为不同入口压力下得到的喷印状态模拟图。通过对比 75 Pa 压力到 125 Pa 压力范围内的喷印状态变化,能够看出锥射流的锥形越来越长;同时观察 125 Pa 压力下的喷印状态,可以看出此时的锥形已经开始不明显,这将会影响喷印的稳定性。该仿真结果的变化趋势也与理论分析一致。

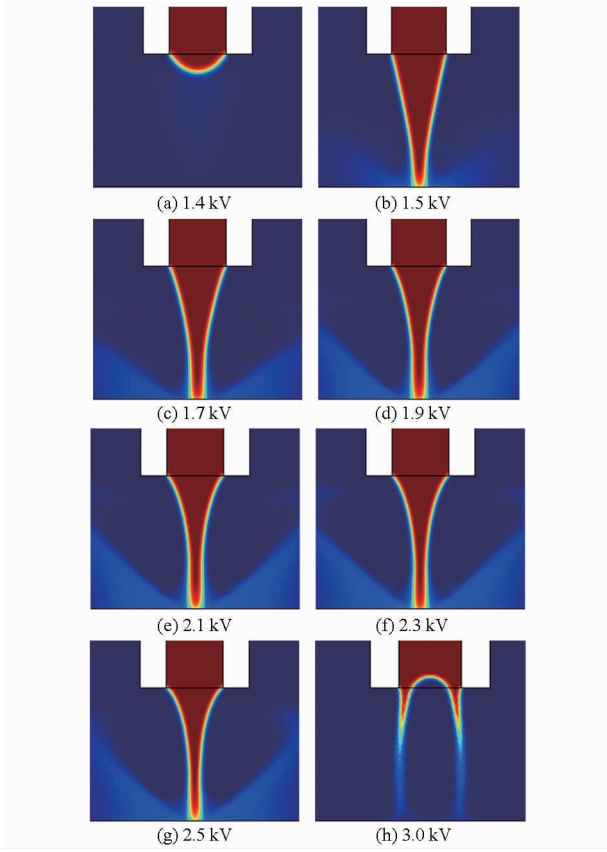

图 7 模拟时流体在不同电压下的喷印状态

Fig. 7 Jet printing states at different voltages in simulation

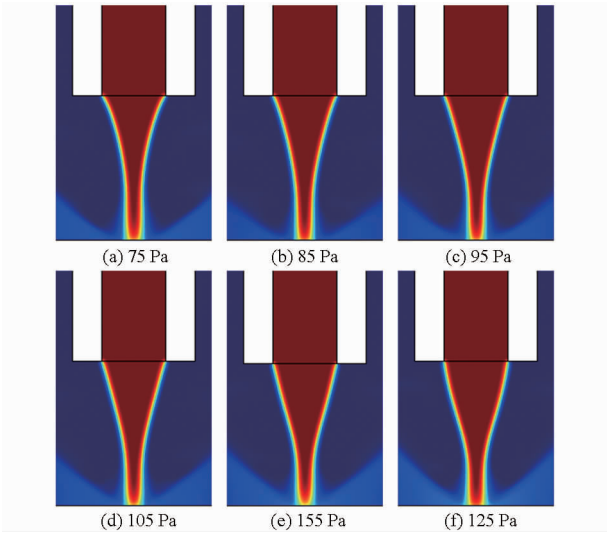

图 8 模拟时流体在不同压力下的喷印状态

Fig. 8 Jet printing states at different pressures in simulation

3 实验

通过搭建实验平台,来对数值模拟的结果进行

进一步验证。数值模拟中的压力是距离毛细管端口 1 mm 处所施加的，而实际操作时是对气动管道整体施加压力，因此先对管道系统进行模拟仿真，得出气动管道的入口压力，然后再进行相关实验。图 9 为搭建的实验平台，包括三轴点胶机器人、高压电源、信号发生器、微型空压机、精密减压阀、点胶胶筒、不锈钢针头、接收基板、图像采集系统和计算机等器材。

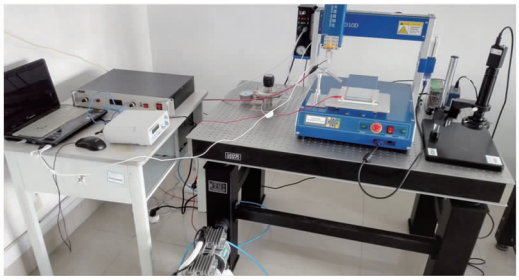

图 9　实验平台

Fig. 9　Experiment platform

实验材料为含水率为 6% 的乙醇溶液；环境温度为 20℃；喷头采用精密不锈钢点胶针头，型号为 25 G，内、外径分别为 0.26 mm、0.50 mm；电极间距离为 0.6 mm。

3.1　电压

选定与仿真中入口压力为 85 Pa 的状态作对比，经仿真得到整个气动管道入口压力为 1 530 Pa，结合实验条件，施加管道入口压力 1.5 kPa。图 10 是流体在不同电压下实验所观测的喷印状态，与仿真所得结果变化趋势类似，施加电压低于 1.1 kV 时，毛细管端液体没有形成锥射流，由于毛细管壁的亲水性而聚集在喷嘴处；电压升高到 1.2 kV 后，锥射流模式开始出现，随着电压逐渐升高，锥射流的锥形逐渐缩短。施加电压为 2.3 kV 时，锥射流模式转变为多股射流模式。可以看出，电压过小或过大对于喷印过程都是不利的，而正常喷印过程在一定电压范围内均可顺利完成。

3.2　入口压力

图 11 是流体在不同压力下实验所观测到的喷印状态，电压固定为 1.7 kV。可以看出，锥射流锥形变化趋势与理论分析和仿真模拟相一致。气压介于 1.25 kPa 和 2.1 kPa 时，锥射流模式正常，锥形随着入口压力的增大而逐渐变长，喷印正常进行。压力升高至 2.5 kPa 时，锥射流失去稳定状态，喷印不能正常进行。这与不同电压下的喷印状态变化类似，在一定气压范围内，喷印过程也可以正常进行。

4　打印实例

为了实现微结构喷印，用光固化树脂材料进行液滴沉积实验。针头选用内外径分别为 0.16 mm、0.31 mm 的 30 G 不锈钢点胶针头，采用脉冲频率为 300 Hz 脉冲电源，峰值电压为 1.9 kV，气动管道入口压力为 13 kPa。喷印获得的液滴如图 12 所示，液滴直径在 50 μm 左右，获得了较好的喷印精度。

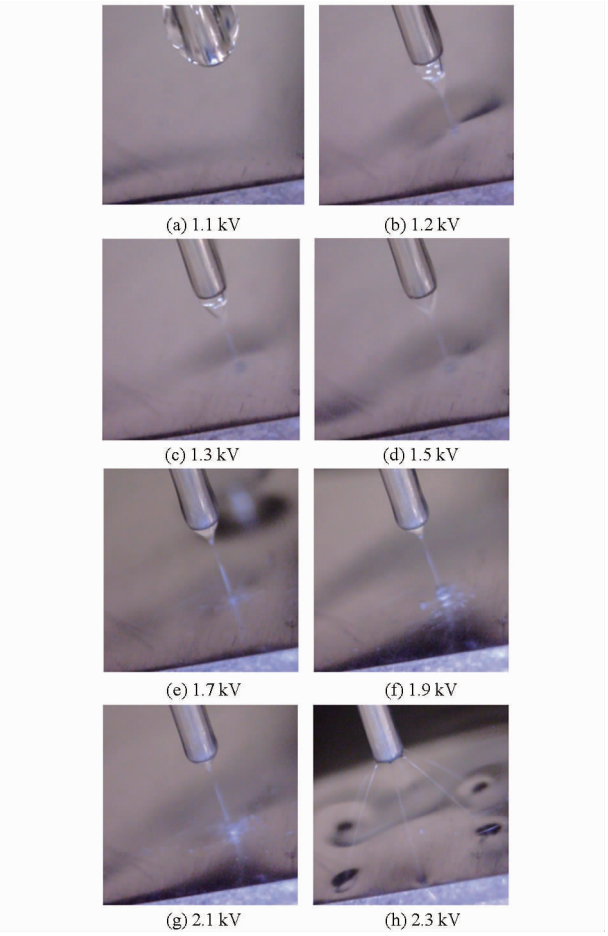

图 10　实验中流体在不同电压下的喷印状态

Fig. 10　Jet printing states of fluid at different voltages in experiment

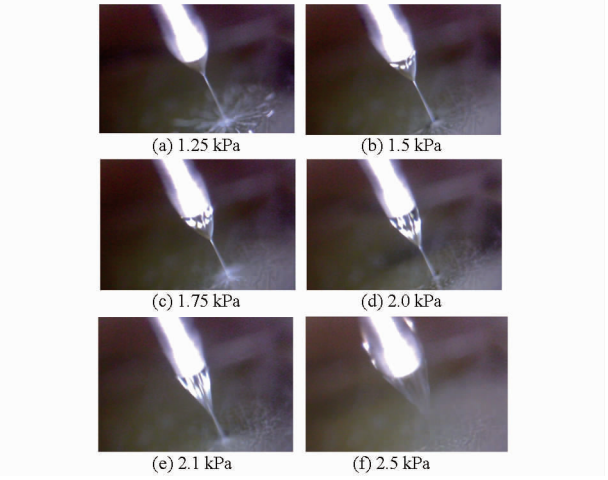

图 11　实验中流体在不同压力下的喷印状态

Fig. 11　Jet printing states of fluid at different pressures in experiment

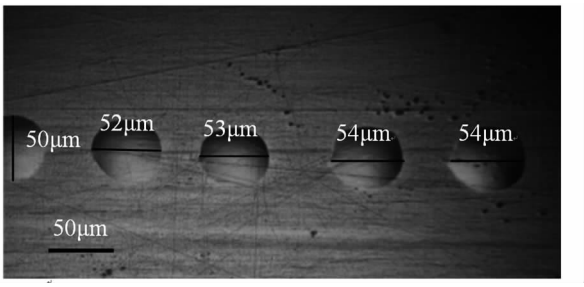

图 12 喷印树脂液滴沉积图

Fig. 12 Figure of droplet deposition of resin

5 结论

(1)对静电场下锥射流模式中的受力进行了分析,通过分析力的平衡,探讨了不同电压和气压下电喷印过程中锥射流模式的变化,建立了锥射流模式的理论模型,揭示了锥射流模式的演化和作用机理。

(2)建立了静电场下锥射流模式的仿真模型,计算得到了喷印过程中锥射流模式的演化过程,模拟结果表明:电荷主要分布在表面,在泰勒锥尖端处有聚集,泰勒锥内部会出现对称的漩涡,中心附近有向上的回流。

(3)模拟计算了不同电压和压力下的电喷印模型,得到了锥射流模式的变化规律。施加电压升高时,锥射流模式锥形呈现缩短趋势;施加的入口压力升高时,锥形呈拉长趋势。一定的电压和气压范围内喷印均可正常进行,从而可以通过调节电压和气压改善锥射流及喷印质量。当电压过高时,锥射流模式不稳定,并最终会转变为多股射流模式;当压力过高时会导致锥射流现象消失。

(4)设计并搭建了电喷印实验平台,观测不同电压和气压下喷印状态的变化,来验证理论分析和数值模拟结果,最终实验结果与这两者趋势吻合,验证了理论分析和数值模拟的正确性。

参 考 文 献

1 XU G S, ZHAO W H, TANG Y P, et al. Development of a high-resolution rapid prototyping system for small size objects[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 31(9 – 10): 941 – 947.

2 RAJE P V, MURMU N C. A review on electrohydrodynamic-inkjet printing technology[J]. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2014, 4(5): 174 – 183.

3 SUTANTO E, TAN Y, ONESES M S, et al. Electrohydrodynamic jet printing of micro-optical devices[J]. Manufacturing Letters, 2014, 2(1): 4 – 7.

4 LEE K S, YANG D Y, PARK S H, et al. Recent developments in the use of two-photon polymerization in precise 2D and 3D microfabrications[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2006, 17(2): 72 – 82.

5 PARK S H, YANG D Y, LEE K S. Two-photon stereolithography for realizing ultraprecise three-dimensional nano/microdevices [J]. Laser & Photonics Review, 2009, 3(1 – 2): 1 – 11.

6 COHEN A, CHEN R, FRODIS U, et al. Microscale metal additive manufacturing of multi-component medical devices[J]. Rapid Prototyping Journal, 2010, 16(3): 209 – 215.

7 REGENFUSS P, STREEK A, HARTWIG L, et al. Principles of laser micro sintering[J]. Rapid Prototyping Journal, 2007, 13(4): 204 – 212

8 尹周平,黄永安,布宁斌,等. 柔性电子喷印制造:材料、工艺和设备[J]. 科学通报, 2010, 55(25): 2487 – 2509.
YIN Zhouping, HUANG Yongan, BU Ningbin, et al. Inkjet printing for flexible electronics: materials, processes and equipments [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(25): 2487 – 2509. (in Chinese)

9 VAEZI M, SEITZ H, YANG S. A review on 3D micro-additive manufacturing technologies[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(5 – 8): 1721 – 1754.

10 兰红波,李涤尘,卢秉恒. 微纳尺度 3D 打印[J]. 中国科学:技术科学, 2015, 45(9): 919 – 940.
LAN Hongbo, LI Dichen, LU Bingheng. Micro-and nanoscale 3D printing[J]. Scientia Sinica Technologica, 2015, 45(9): 919 – 940. (in Chinese)

11 ONESES M S, SONG C, WILLIAMSON L, et al. Hierarchical patterns of three-dimensional blockcopolymer films formed by electrohydrodynamic jet printing and self-assembly[J]. Nature Nanotechnology, 2013, 8(9): 667 – 675.

12 LEWIS J A, AHN B Y. Device fabrication: Three-dimensional printed electronics[J]. Nature, 2015, 518(7537): 42 – 43.

13 PARK J U, HARDY M, KANG S J, et al. High-resolution electrohydrodynamic jet printing[J]. Nature Materials, 2007, 6(10): 782 – 789.

14 HUANG Y, BU N, DUAN Y, et al. Electrohydrodynamic direct-writing[J]. Nanoscale, 2013, 5(24): 12007 – 12017.

15 BARTON K, MISHRA S, ALLEYNE A, et al. Control of high-resolution electrohydrodynamic jet printing[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(11): 6537 – 6542.

16 HAYATI I, BAIKEY A I, TADROS T F. Mechanism of stable jet formation in electrohydrodynamic atomization[J]. Nature, 1986, 319(6048): 41 – 43.

17 王晓英, 闻建龙. 静电雾化锥射流模式下液锥形态的研究[J]. 实验力学, 2013, 28(3): 347 – 351.
WANG Xiaoying, WEN Jianlong. Research on the cone-shaped liquid of electrostatic atomization in the cone-jet mode[J].

Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(3):347 – 351. (in Chinese)

18 LI J L. EHD sprayings induced by the pulsed voltage superimposed to a bias voltage[J]. Journal of Electrostatics, 2007, 65(12):750 – 757.

19 JAENSNOON N O, HULSEN M A, ANDERSON P D. Stokes-Cahn-Hilliard formulations and simulations of two-phase flows with suspended rigid particles[J]. Computers & Fluids, 2015,111:1 – 17.

20 WEI W, GU Z L, WANG S, et al. Numerical simulation of the cone-jet formation and current generation in electrostatic spray-modeling as regards space charged droplet effect[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering,2013, 23(1):015004 – 1 – 11.

(上接第 400 页)

17 孟飞,陶刚,张美荣,等. 自动变速器比例电磁阀优化设计与分析[J]. 兵工学报,2014, 25(5):590 – 596.
MENG Fei, TAO Gang, ZHANG Meirong, et al. Optimization design and analysis of high speed wet proportional solenoid valve [J]. Acta Armamentarii, 2014, 25(5):590 – 596. (in Chinese)

18 梁旭,黄明,宁涛,等. 现代智能优化混合算法及其应用[M]. 北京:电子工业出版社,2014:1 – 11.

19 黄平,孟永钢. 最优化理论与方法[M]. 北京:清华大学出版社,2009:189 – 200.

20 张家旭,李静. 基于遗传算法的汽车 ESP 液压系统参数辨识[J]. 农业机械学报,2015, 46(8):308 – 313.
ZHANG Jiaxu, LI Jing. Parameter identification of automotive ESP hydraulic system based on genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015, 46(8):308 – 313. (in Chinese)

21 方鸽飞,王惠祥,黄晓烁. 改进遗传算法在无功优化中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报,2003, 15(4):15 – 18.
FANG Gefei, WANG Huixiang, HUANG Xiaoshuo. An improved genetic algorithm for reactive power optimization [J]. Proceedings of the CSU – EPSA, 2003, 15(4):15 – 18. (in Chinese)