

DOI:10.13475/j.fzxb.20200307106

织物表面导电路径喷射打印起始端 凸起形成过程研究

肖渊^{1,2}, 王盼¹, 张威¹, 张成坤¹

(1. 西安工程大学 机电工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安工程大学 西安市现代智能纺织装备重点实验室, 陕西 西安 710600)

摘要 为提高织物表面微滴喷射打印导电路径的成形质量, 针对导电路径喷射打印过程中线路沉积形貌的起始端凸起现象, 利用高速相机对线路成形过程进行采集, 研究微滴间融合振荡过程中左右接触角的动态变化, 微滴与线路融合以及液体向线路起始端的输送过程, 提出线路起始端凸起的消除方案并进行实验。结果表明: 在融合振荡过程中, 微滴向起始端的振荡趋势始终大于向另一侧的振荡趋势, 导致打印线路起始端的织物基板润湿区域不断扩大; 微滴与线路接触后, 其中一部分液体润湿织物基板拓展线路长度, 一部分通过线路以恒定速度输送至起始端, 在线路起始端形成凸起; 利用抗坏血酸溶液润湿织物表面后, 成形线路起始端凸起现象得到消除, 整体线路路径均匀, 沉积形貌良好。

关键词 智能纺织品; 微滴喷射; 导电路径; 沉积形貌; 起始端凸起

中图分类号: TH 16; TS 19 文献标志码: A

Research on forming process of bulge at start of jet printing conductive circuit on fabric surfaces

XIAO Yuan^{1,2}, WANG Pan¹, ZHANG Wei¹, ZHANG Chengkun¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. Xi'an Key Laboratory of Modern Intelligent Textile Equipment, Xi'an Polytechnic University,
Xi'an, Shaanxi 710600, China)

Abstract In order to improve the forming quality of the conductive circuit on a fabric surface printed by the microdroplet jet printing technique, a high-speed camera was used to capture the process of droplet-jet printing conductive circuit in view of the bulged deposition lines at the start. The dynamic changes of left and right contact angles during the fusion oscillation between droplet, the fusion of droplet with the circuits and the process of transporting liquid to the starting of the line were studied according to the bulge elimination scheme. The results show that during the oscillation process of droplets coalescence, the oscillation trend towards the starting end is always greater than the other end, causing continuous expansion of the substrate wetting area at start of the printing circuit. After the droplets contact the circuit, part of the liquid wets the substrate to extend the length of the circuit, and the rest of the liquid is transported to the starting of the circuit at a constant speed to form a bulge. The surface of the fabric moistened with the ascorbic acid solution eliminates the bulging at the start of the forming circuit, leading to formation of expected uniform dimension of the deposited lines.

Keywords intelligent textile; microdroplet jetting; conductive circuit; deposition formation; bulge at start

收稿日期: 2020-03-27 修回日期: 2020-08-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51475350); 西安市现代智能纺织装备重点实验室资助项目(2019220614SYS021CG043)

第一作者: 肖渊(1975—), 男, 教授, 博士。主要研究方向为机电控制技术、微滴喷射自由成形技术和新型传感器及现代检测技术。E-mail: xiaoyuanjidian@xpu.edu.cn。

智能纺织品是将传统纺织品与电子信息技术相融合的一类新型纺织品,具有对外界刺激感知与反应的能力,在军事、医疗卫生等领域有广泛的应用前景^[1-3],其主要由功能元件(电源、通信、处理器、执行器、传感器)和承载功能元件的纺织品组成^[1,4],各功能元件之间相互连接的导电路路柔性化制备是智能纺织品发展的关键。目前,常见的导电路路制备方法有植入式和丝网印刷等^[5];植入式是通过刺绣、缝纫、织造和编织等方法将导电纤维或导电纱线掺入织物纹理中形成导电路路,对丝线的强度和弹性要求较高且制备工艺复杂;丝网印刷是在网格表面涂覆导电浆料或油墨制备导电路路的方法,受网格和导电复合材料的影响,该方法成形线路成本高,材料利用率较低。微滴喷射技术具有成本低、效率高、非接触等优点^[6],广泛应用于 3D 打印制造^[7]、生物工程^[8]、微电子制造^[9]、柔性导电路路成形^[10]等领域。

微滴喷射技术打印线路过程中,线路是由微滴在基板表面碰撞、铺展、渗透以及相互融合而形成的,常会出现边缘波动、鼓胀、起始端凸起等不稳定现象,影响导电路路成形质量。边缘波动现象是由硝酸银与抗坏血酸 2 种溶液微滴连续沉积连接造成的,而鼓胀现象是由于液体表面张力与实验过程中的扰动造成的,起始端凸起现象则是由于线路打印过程中,线路内部的液体流动聚集造成的。改善线路成形不稳定现象,对利用微滴喷射打印成形高质量导电路路,保证智能纺织品中功能元件的正常工作至关重要,国内外学者和科研机构针对此问题展开了深入研究。Duineveld^[11]针对喷射打印线路的稳定性,建立了连续性鼓胀的动力学模型,研究打印线路稳定成形的条件。Schiaffino 等^[12]以水和石蜡为材料,研究了线路成形过程中接触角对线路稳定性的影响,提出了线路波动增长率理论模型。Stringer 等^[13]对 Duineveld 的模型进一步优化,给出了不稳定凸起的显式解析表达式。Lee 等^[14]研究发现,线路不稳定与液体内部聚力及微滴与基板粘附力有关,通过改变基板的润湿性,提高了打印导线的稳定性。Lian 等^[15]通过对相邻液滴间的干燥和重叠过程调控,制备了均匀的石墨烯线路。王春晖^[16]通过研究发现,线路边缘光滑度与微滴直径和微滴间距的比值相关,微滴直径与微滴间距的比值越小,则线路边缘平整性越好,通过调整线路成形过程中基板的移动速度与微滴喷射频率以调整微滴间距从而有效消除这种现象。

基于此,本文通过高速相机拍摄微滴融合和液体输送过程,分析微滴融合过程中动态接触角和线

路表面轮廓的动态变化过程,以及线路增长过程中液体向起始端的输送状况,明确起始端凸起的形成过程及成因,提出消除线路起始端凸起的方法,为织物表面喷射打印成形高质量导电路路奠定基础。

1 实验部分

1.1 微滴喷射打印系统

本课题组开发的气动式微滴按需喷射打印成形系统如图 1^[17]所示,主要由微滴产生模块、运动平台控制模块、图像采集模块和人机交互界面等组成。微滴产生模块主要由函数发生器(Nextkit)、电磁阀与喷嘴等组成,用于按需产生均匀的微滴;运动平台控制模块由移动平台(KSA300-12-X 型,北京卓立汉光仪器有限公司)和运动控制器(MC600 型,北京卓立汉光仪器有限公司)组成,控制基板按照指定轨迹运动;图像采集模块由高速摄像机(OLYMPUS i-SPEED3 型)和 LED 光源等组成,实现微滴沉积过程的采集;人机交互界面主要由各模块软件操作界面组成。系统各部分协同工作,将硝酸银与抗坏血酸微滴定点沉积于基板表面,2 种溶液经氧化还原反应生成银单质,从而构成导电路路。

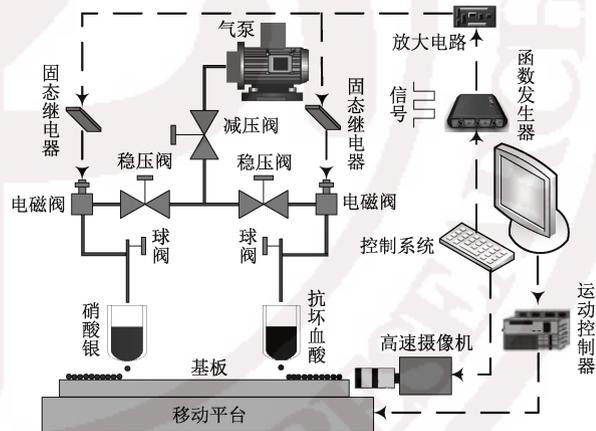


图 1 气动式微滴喷射打印沉积系统

Fig.1 Pneumatic droplet-jet printing deposition system

1.2 实验材料与设备参数

在进行导电路路打印时,硝酸银和抗坏血酸 2 种水基溶液反应,其在织物基底上的沉积及融合过程与去离子水相似。基于此,实验中以去离子水为喷射材料进行沉积研究,其中喷嘴孔径为 120 μm ,在供气压力为 0.02 MPa、脉冲宽度为 1.953 ms、频率为 1 Hz、球阀开口大小为 30°等条件下按需喷射。设置基板移动速度为 0.3 mm/s,在涤纶/棉(80/20)平纹机织物(面密度为 120 g/m^2 ,市售)基底上进行喷射打印,利用高速摄像机拍摄微滴融合过程,帧频为 10 000 帧/s。

2 结果与讨论

2.1 微滴喷射打印微滴融合过程

微滴融合过程如图 2 所示, 图中箭头方向为移动平台运动方向。可知, 0 ms 时微滴下落, 2 ms 时微滴与基板液体接触, 3.5 ms 时微滴与基板液体融合, 5.5 ms 时振荡至左侧极限, 8.4 ms 时振荡至右侧极限, 17.6 ms 时振荡停止。微滴与基板原有液体融合后经左右多次振荡产生局部聚集, 使织物表面润湿区域增大。

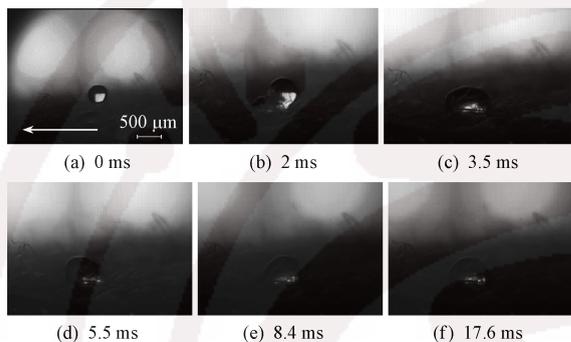


图 2 线路起始端微滴融合过程

Fig.2 Droplet coalescence process at start of circuit

为直观描述微滴的融合过程, 对微滴融合过程中的基板润湿区域以及质量中心位置进行描述, 如图 3 所示。液滴与基板液体融合时, 液体会优先向图 3 中所示的质量中心和基板已润湿的区域铺展^[18], 从而使液体整体向上一颗微滴的位置聚集, 通过不断振荡与融合最终形成凸起。

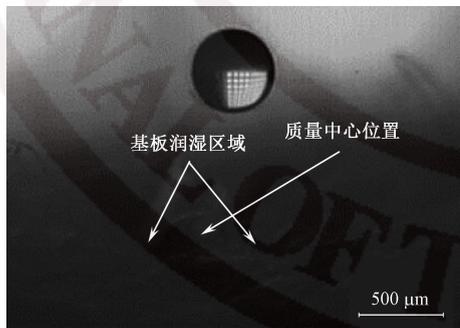


图 3 质量中心位置及基板润湿区域示意图

Fig.3 Schematic diagram of mass center position and substrate wetting area

为进一步分析微滴融合过程的振荡现象, 在所拍摄图像中, 定义液滴轮廓线与基板接触左侧为左侧接触角 α , 接触右侧为右侧接触角 β , 测量结果如图 4 所示。

利用图 4 所示左右接触角测量方法对图 2 中不同时刻液滴在基板上左右接触角变化进行测量, 得

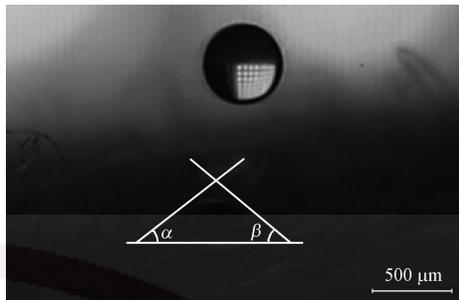


图 4 左、右接触角测量示意图

Fig.4 Left and right contact angle measurement diagram

到微滴融合过程中接触角动态变化如图 5 所示。可知, 0~3 ms 时左、右接触角同时增加, 3~5.5 ms 时右侧接触角减小, 左侧接触角继续增大, 液体整体向左侧振荡, 此时线路起始端润湿范围增大, 在 5.5 ms 时振荡至左侧极限。之后液体向右侧振荡, 如此反复此过程, 直至能量完全消耗。由此可知, 微滴融合时首先向线路起始端振荡, 再向另一侧振荡。同一时刻的左、右接触角差值可反映振荡强弱程度, 微滴融合之后向左侧(起始端)振荡程度大于右侧, 使起始端润湿区域增大, 导致微滴在此处聚集。

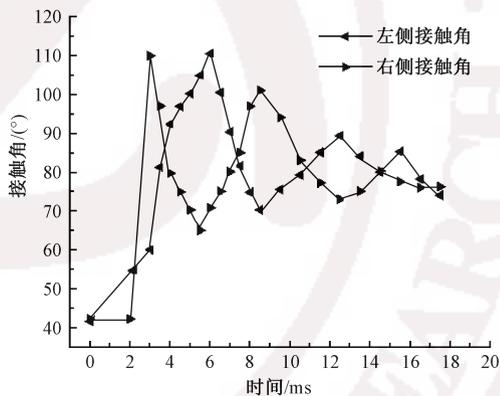


图 5 左、右接触角在微滴融合过程中的变化

Fig.5 Left and right contact angle changes at droplet coalescence process

2.2 微滴喷射打印液体输送过程

随着导电路径喷射打印线路长度的增加, 液体不断向线路起始端输送, 本节通过线路表面轮廓动态变化的分析, 对液体向线路起始端的输送过程进行研究。

2.2.1 微滴喷射打印线路增长

保持 2.1 节实验条件不变, 在织物基底上进行微滴喷射打印成线实验, 利用高速摄影机得到微滴成线过程如图 6 所示。可知, 微滴在 0 ms 时与基板接触, 0~14 ms 时与线路融合, 14~29 ms 时向打印线路起始端输送, 90 ms 时线路整体稳定。在一定长度内, 微滴与线路接触后, 从撞击位置通过线路将一部分液体输送至线路凸起处, 另一部分在撞击位置铺展并润湿基板增加了线路的长度。后续微滴都

会重复上述过程,致使线路起始端的凸起现象不断发展,直至线路产生新的凸起。

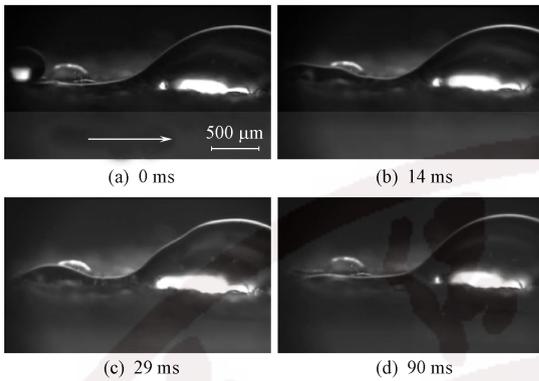


图 6 织物基板上微滴喷射打印过程

Fig.6 Process of microdrop jet printing on a fabric

2.2.2 液体向起始端输送过程

为研究打印线路中液体的输送过程,对不同时刻的线路表面波动状况进行测量,分析液体向线路起始端的输送过程,线路表面轮廓测量示意图如图 7 所示。

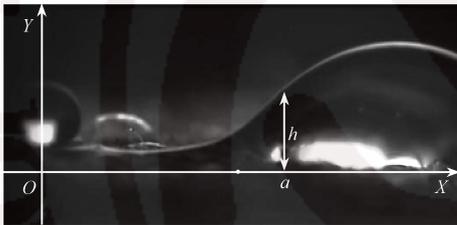


图 7 线路表面轮廓测量示意图

Fig.7 Schematic diagram of circuit surface profile measurement

以基板水平线方向为 X 轴,微滴喷射方向为 Y 轴,交点作为坐标原点 O 建立坐标系。为定量描述线路表面轮廓变化,取 h 为 a 位置处表面轮廓高度,从原点开始至凸起处依次选取 $x_1 = 505 \mu\text{m}$ 、 $x_2 = 729 \mu\text{m}$ 、 $x_3 = 1\ 009 \mu\text{m}$ 这 3 点,对其不同时刻线路表面轮廓高度变化进行测量,3 处线路表面轮廓高度随时间变化过程如图 8 所示。

由图 8 可看出,线路 x_1 、 x_2 、 x_3 处轮廓高度随时间振荡衰减,于 25 ms 左右趋于稳定。打印线路轮廓高度最大值分别为 425 、 320 、 $230 \mu\text{m}$ 。各位置首次到达线路轮廓高度极大值的时间分别为 1.8 、 2.0 、 2.4 ms 。打印线路波动及液体输送的方向从 x_1 到 x_3 ,且轮廓高度最大值在传播过程中逐渐减小。为明确液体在线路中的输送速度,对线路各个位置首次到达轮廓高度极大值的时间进行记录,得到的结果如图 9 所示。可知,距微滴下落位置越远,线路表面首次到达轮廓高度极大值越晚,表明液体从微

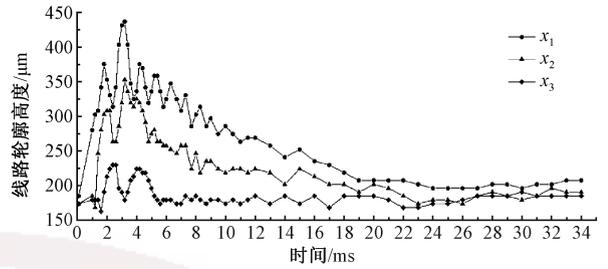


图 8 x_1 、 x_2 、 x_3 处线路轮廓高度随时间变化过程

Fig.8 Change process of x_1 , x_2 , x_3 point profile in circuit with time

滴下落位置向上一颗微滴方向输送。下落液滴与基板打印线路融合接触后,每颗微滴都向打印线路的起始端输送,使线路的起始端的凸起不断增长。将位置关于时间求导可知液体的输送速度。通过拟合其位置 X 与时间 t 关系,得到:

$$X = 396.04t + 23.907$$

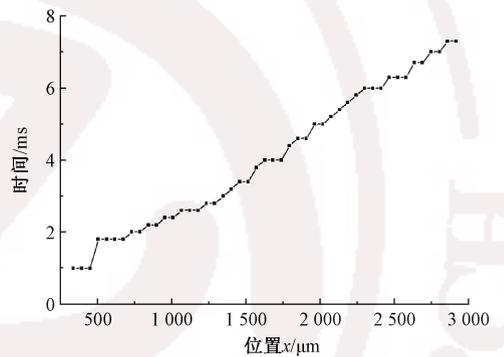


图 9 线路不同位置首次达高度极大值时间

Fig.9 Time for first reach maximal height of each position on circuit

通过位置关于时间求导可知,液体通过线路输送至起始端凸起的速度为定值。Berger^[19] 在研究中提出,液体通过线路的输送流速 Q 可表示为

$$Q = \frac{s\Delta PS^2}{\mu l_r}$$

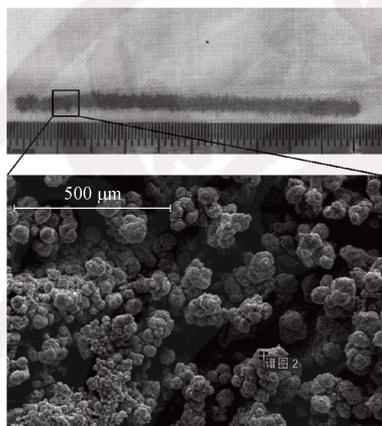
式中:s 为线路横截面的形状因子;S 为横截面面积, mm^2 ; μ 为液体黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; l_r 为微滴下落处至凸起处的中心距离, mm ; ΔP 为液体输送至凸起处的驱动压力, N 。

由公式可知,单颗微滴与线路融合过程中,上述参数均为定值,因此,液体通过线路的输送流速为定值。本文实验测量结果与该理论基本一致。

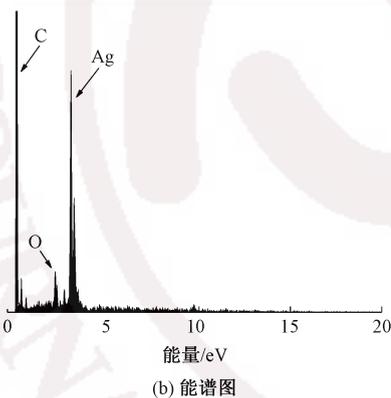
2.3 线路起始端凸起现象的消除

从上述研究可知,线路起始端的凸起现象是由于微滴融合过程中的左右振动以及线路成形过程中液体的流动等原因引起的,该过程受织物的润湿性能影响较大,因此,实验中将织物完全

浸湿到质量分数为 30% 的抗坏血酸溶液中后取出平铺在运动平台上备用, 调节气动式微滴按需喷射系统于织物基底上喷射打印质量分数为 50% 的硝酸银溶液。通过硝酸银微滴与织物纤维中渗透的抗坏血酸发生化学反应, 减小液体流动并限制银单质沉积区域, 从而消除线路起始端凸起现象, 得到平整均匀的线路, 并通过对线路微观形貌与能谱测试得到线路表面扫描电镜与其能谱图, 如图 10 所示。



(a) 扫描电镜照片



(b) 能谱图

图 10 成形线路扫描电镜照片及能谱图

Fig.10 SEM image (a) and EDS diagram (b) of shaped circuit

由图 10 可知, 经抗坏血酸浸湿的织物成形线路形貌良好, 线路起始端凸起现象得到消除, 线路宽度均匀, 成形线路宽度约为 2 mm, 符合线路成形要求。硝酸银微滴撞击织物后, 会迅速与织物纤维中的抗坏血酸溶液发生反应, 不会产生微滴的融合与溶液的输送过程, 因此, 不会在起始端产生凸起现象。同时, 撞击位置的抗坏血酸会迅速与硝酸银发生反应生成银颗粒, 这由图 10(b) 能谱图得到印证, 同时由扫描电镜照片可看出, 银颗粒连接良好, 形态均匀。此反应在一定程度上限制了硝酸银溶液在织物内部的渗透, 使成形线路的线宽得到控制, 并保证了线路沉积形貌。

3 结 论

本文对影响线路沉积形貌的线路起始端凸起现象进行研究, 得到微滴融合过程以及液体输送过程的一般规律, 提出了消除导电路径起始端凸起的方法, 得到以下结论。

1) 织物基板表面微滴之间的融合主要包括微滴与基板液体融合、液滴向左右两侧振荡、液滴静止 3 个阶段, 且在微滴融合之后, 液体会优先向融合液滴的质量中心以及已润湿区域铺展。

2) 微滴与线路融合过程经历了微滴与基板接触、微滴与线路融合、液体向打印线路起始端输送、线路稳定 4 个阶段, 液体在线路中的输送方向是从微滴下落位置至线路起始端凸起处, 单颗微滴在线路中的输送速度为恒值。

3) 利用抗坏血酸溶液润湿的织物表面, 成形线路起始端凸起现象得到消除, 整体线径均匀, 沉积形貌良好。

FZXB

参考文献:

- [1] 李思明, 吴官正, 胡雨洁, 等. 压力分布监测袜的制备及其传感性能[J]. 纺织学报, 2019, 40(7): 138-144. LI Siming, WU Guanzheng, HU Yujie, et al. Preparation of pressure distribution monitoring socks and related sensing properties [J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(7): 138-144.
- [2] BHUVANESHWARI B, PRADEEP N, KUMAR P, et al. Smart army jacket [J]. Perspectives in Communication, Embedded-systems and Signal-Processing, 2019, 2(10): 241-244.
- [3] FERNÁNDEZ-CARAMÉS T, FRAGA-LAMAS P. Towards the internet-of-smart-clothing: a review on iot wearables and garments for creating intelligent connected e-textiles [J]. Electronics, 2018, 7(12): 405.
- [4] 杨晨啸, 李鹞. 柔性智能纺织品与功能纤维的融合[J]. 纺织学报, 2018, 39(5): 160-169. YANG Chenxiao, LI Li. Integration of soft intelligent textile and functional fiber [J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(5): 160-169.
- [5] GHAREMANI H M, LATIFI M. Overview of wearable electronics and smart textiles [J]. The Journal of The Textile Institute, 2017, 108(4): 631-652.
- [6] 谢丹, 张鸿海, 舒霞云, 等. 气动膜片式微滴喷射装置理论分析与实验研究 [J]. 中国机械工程, 2012, 23(14): 1732-1737. XIE Dan, ZHANG Honghai, SHU Xiayun, et al. Theoretical analysis and experimental research on pneumatically diaphragm-driven drop-on-demand inkjet generator [J]. China Mechanical Engineering, 2012,

- 23(14):1732-1737.
- [7] 李素丽,魏正英,杜军,等. 基于金属 3D 打印技术成形嵌套零件工艺研究[J]. 材料科学与工艺, 2016, 24(6):1-7.
LI Suli, WEI Zhengying, DU Jun, et al. Research of 3D printing technology based on metal double nozzle to form the hanging parts [J]. Materials Science and Technology, 2016, 24(6):1-7.
- [8] NEGRO A, CHERBUIN T, LUTOLF M P. 3D inkjet printing of complex, cell-laden hydrogel structures[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 17099.
- [9] JALKANEN T, MÄKILÄ E, MÄÄTTÄNEN A, et al. Porous silicon micro- and nanoparticles for printed humidity sensors [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(26): 263110-263114.
- [10] 张楠, 林健, 王同举, 等. 用于打印柔性导线的液态金属微滴制备过程研究[J]. 电子元件与材料, 2018, 37(7):1-7.
ZHANG Nan, LIN Jian, WANG Tongju, et al. Formation process of liquid metal droplets using for printing flexible conductive wires [J]. Electronic Components and Materials, 2018, 37(7):1-7.
- [11] DUINEVELD P C. The stability of ink-jet printed lines of liquid with zero receding contact angle on a homogeneous substrate[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2003, 477: 175-200.
- [12] SCHIAFFINO S, SONIN A A. Formation and stability of liquid and molten beads on a solid surface[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 343: 95-110.
- [13] STRINGER J, DERBY B. Formation and stability of lines produced by inkjet printing[J]. Langmuir, 2010, 26(12): 10365-10372.
- [14] LEE S H, CHO Y J. Characterization of silver inkjet overlap-printing through cohesion and adhesion [J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2012, 7(1): 91-96.
- [15] LIAN H, QI L, LUO J, et al. Uniform nitrogen-doped graphene lines with favorable outlines printed by elaborate regulation of drying and overlapping [J]. Applied Surface Science, 2019, 473: 614-621.
- [16] 王春晖. 基于微流体数字化喷射技术的直写导线技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006:41-49.
WANG Chunhui. Research on the technology of direct write wire based on microfluidic digital jet technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006:41-49.
- [17] 肖渊,尹博,李岚馨,等. 微滴喷射化学沉积工艺条件对成形银导线的影响[J]. 纺织学报, 2019, 40(5): 78-83.
XIAO Yuan, YIN Bo, LI Lanxin, et al. Influence of process conditions on silver conductive lines by micro-droplet jet printing solution reaction [J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(5): 78-83.
- [18] CASTREJON-PITA J R, BETTON E S, KUBIAK K J, et al. The dynamics of the impact and coalescence of droplets on a solid surface[J]. Biomicrofluidics, 2011, 5(1): 014112.
- [19] BERKER R A. Intégration des équations du mouvement d'un fluide visqueux incompressible [M]. Berlin: Handbuch der Physik, 1963, 3: 1-34.