

基于细胞打印的压电式喷墨头研究进展

夏京瑞, 周奕华, 钱俊, 张文菡

(武汉大学, 武汉 430079)

摘要: **目的** 综述细胞打印用压电式喷墨头的研究进展。**方法** 从压电式喷墨头的角度出发, 总结压电式喷墨头中影响细胞打印的关键因素, 主要包括喷墨腔内部的压力波形态、压电陶瓷驱动器、喷墨头内部流体动力学特征以及喷嘴几何形状设计等对压电式喷墨头喷射行为的影响, 同时针对各因素对细胞打印的具体影响进行分析讨论。**结论** 研究成果对当前普通桌面打印机如何改进应用于细胞打印, 优化细胞打印用压电式喷墨头的设计方案以及促进细胞打印的应用发展具有重要的指导意义。

关键词: 压电式喷墨头; 喷墨打印; 生物组织工程; 细胞打印

中图分类号: TS803 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)09-0129-05

Research Progress of Piezoelectric Inkjet Head Based on Cell Printing

XIA Jing-rui, ZHOU Yi-hua, QIAN Jun, ZHANG Wen-han

(Wuhan University, Wuhan 430079, China)

ABSTRACT: The research progress of piezoelectric inkjet heads for cell printing was reviewed. The critical factors that affect the print quality were summarized from the perspective of piezoelectric inkjet head, which mainly include the pressure wave form of the inkjet chamber, the piezoelectric ceramic driving power, the hydrodynamic characteristics of ink jet head and the geometric shape design of the nozzle. Meanwhile, the specific impacts of these factors on cell printing were analyzed and discussed. The research achievement has important reference significance for improving desktop printer applied to cell printing, promoting the design scheme of piezoelectric inkjet head for cell printing and accelerating the application development of cell printing.

KEY WORDS: piezoelectric inkjet head; inkjet printing; biological tissue engineering; cell printing

细胞打印的发展是建立在生物工程方法基础之上的, 目前所广泛使用的生物制造技术方式有压力挤压式、激光直写方式、微控阀门方式和喷墨打印方式^[1]。其中喷墨打印技术最初主要是应用在图文信息再现领域, 现已在生物组织工程领域得到大量的关注与研究^[2]。常规喷墨打印方式主要包括压电式和热泡式, 但在热泡式喷墨打印过程中内部加热元件通过发热产生气泡将油墨挤压形成墨滴, 该过程会对细胞造成热和压力的双重伤害, 影响打印后的细胞活性, 而

压电式可以很好地规避这一点, 压电式喷墨头的可调节参数也方便改进, 随着其制造成本的降低, 压电式打印逐渐成为细胞打印的主流方式^[3]。目前鉴于细胞打印过程的特殊性, 需要对细胞活性、打印产率以及打印流畅程度等条件进行保障^[4], 因此对基于细胞打印的压电式喷墨头主要参数的研究是十分有必要的, 为研究人员确定与相应细胞油墨匹配的喷墨头改进方案提供依据, 以期得到适用于所需细胞类型的压电式喷墨头改进方案。

收稿日期: 2015-09-02

基金项目: 湖北省科技支撑计划(YJG0261); 武汉市科技攻关项目(2014010101010002)

作者简介: 夏京瑞(1991—), 男, 山东临沂人, 武汉大学硕士生, 主攻压电式喷墨头和细胞打印。

通讯作者: 周奕华(1974—), 女, 河北张家口人, 博士, 武汉大学副教授, 主要研究方向为印刷电子工艺。

1 压电式喷墨头对细胞打印的影响

1.1 压力波形态对压电式喷墨头喷射行为的影响

随着喷墨技术在细胞打印中的应用,对喷墨技术的精度要求越来越高,不仅要求打印很小的细胞液滴,同时也要具备非常高的精度。为了实现更高的精度,可以通过降低打印线宽,即使用较小直径的喷嘴,但是喷嘴的直径过小会导致喷嘴容易堵塞,大大降低喷墨打印过程的可靠性和重复性。

Kwon^[5]基于波传导理论提出了一种压电喷墨打印的高速波形设计方法,将测得的压力波与由激光多普勒测振仪的测量结果进行比较,发现对于高速喷墨打印而言,改进所测量压力波的脉冲波形可以有效地抑制喷墨头喷射后的残余压力波。LEE^[6]通过压电式喷墨打印在聚酰亚胺表面形成精细线条图案,在打印过程中为了提高打印后的分辨率并未使用传统的降低喷墨头喷嘴尺寸的方法,主要是通过改进压力波的形态设计来缩短喷墨腔体压电陶瓷的形变周期,进而辅助喷射出速度更快、精度更高的液滴。

对于细胞打印而言,由于在打印过程中细胞油墨的黏度较高,且随着打印的进行,喷墨头经常会出现堵塞不喷的故障,经过上述分析可以通过对喷墨头内部的压力波形态进行改进设计,来改善这种现象,同时缩短喷墨腔体压电陶瓷的形变周期,在一定程度上可以提高细胞打印的速度。

1.2 压电陶瓷驱动器对压电式喷墨头的影响

1.2.1 压电陶瓷驱动电源

喷墨头驱动电源的主要性能直接决定了喷墨头的工作性能,涉及到喷墨头最终形成墨滴的尺寸、喷射速度、墨滴的均匀性、喷嘴喷射频率和墨滴脱离喷嘴后的直线性等因素,最终影响打印效果。应用于细胞打印的压电式喷墨打印机,需要对细胞的活性以及尺寸进行额外考虑,因此对压电驱动电源的标准需要提高^[7]。压电式喷墨头的驱动力源于压电陶瓷片的形变量,而压电陶瓷片的形变量主要是由驱动电源的脉冲电压所决定的,这直接影响最终喷射出的墨滴直径尺寸,驱动脉冲的频率直接影响到压电陶瓷片的形变速度,即液滴的喷射速度。驱动电源的设计必须使得喷射出墨滴的直径大于细胞尺寸,同时保证墨滴的喷射速度不会对细胞活性造成伤害。

在对压电陶瓷驱动电源的控制过程中,脉冲振幅

的精度是影响打印分辨率的关键因素^[8]。驱动电源的电压输出过程中,自激、非线性以及纹波等因素都会影响打印精度^[9],因此需要采取措施进行消除和降低。目前压电式喷墨头驱动电源的主要驱动方式分为电压型和电流型,然而对于喷墨头实际驱动效果来讲,2种驱动方式都会导致最后驱动力输出的迟滞和蠕变现象^[10]。为保证细胞打印的连续稳定性,压电喷墨头驱动电源输出电压的可控性和稳定性仍然是细胞打印机改进过程中需要重点考虑的。

1.2.2 压电陶瓷性能

打印过程中图文信息的传输和压电陶瓷激励脉冲的匹配情况影响喷墨的稳定性和准确性^[11]。压电陶瓷制动器的驱动原理是基于压电陶瓷材料自身固有的逆压电效应,见图1。当对压电陶瓷材料施加1个外部电压时,压电陶瓷材料在电压刺激下发生形变,当外部电压的方向发生变化时,相应的形变方向也会对应发生改变。

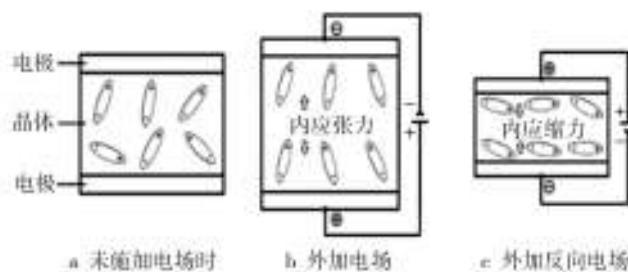


图1 压电陶瓷逆压电效应原理

Fig.1 Schematic of piezoelectric ceramic inverse piezoelectric effect

Chena^[12]等研究了锆钛酸铅压电陶瓷(PZT)在不同的功率电压驱动的谐振模式,PZT的稳定性在很大程度上取决于驱动功率。在较低的驱动功率下,压电陶瓷的性能非常稳定并且在长时间的连续振动后性能保持不变。张冬至^[13]等利用Ansys有限元分析软件对压电陶瓷片的最大位移量与外界加载电压之间的关系进行了模拟分析,发现两者之间呈现的线性关系结果见图2。

Yamaguchi等^[14]提出一种全新的压电式驱动模式,指出通过推-拉的压电驱动方法可以提高单细胞打印的产量。对于压电式喷墨头的压电陶瓷制动方法进行了对比研究,具体比较方法见图3。图中显示了在喷墨头中压电陶瓷“先拉伸后挤压”的致动方法可以产生更高的液滴喷射速度和更细长的液滴,而“先挤压后拉伸”的致动方法可以产生体积更大的液滴,喷射速率更平缓。对于细胞打印而言,尤其是单细胞的打印方法,“先挤压后拉伸”的致动方法被认为是更适合的。

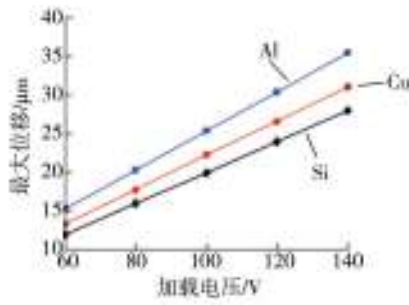


图2 压电陶瓷最大位移与电压关系

Fig.2 Relationship between the maximum displacement of piezo-electric ceramic and voltage

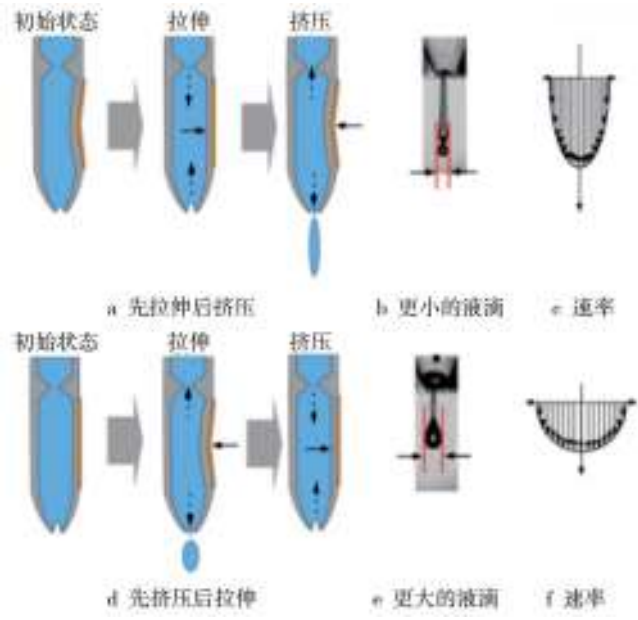


图3 压电陶瓷致动方法对比

Fig.3 Comparison of piezoelectric actuator methods

1.3 流体动力学特征对压电式喷墨头的影响

目前对于细胞打印技术的研究已经取得了明显的进步,但是如何应对细胞打印中细胞活性不高的问题仍处于发展阶段^[15]。在当前的细胞打印技术下,生命力十分旺盛的细胞,如酵母细胞和细菌等,能够保证经过打印后有大于90%的细胞存活率,但是某些自身活性较差的细胞,如神经元细胞等,打印后存活率则要低得多,一般也就维持在75%左右^[16]。有研究发现细胞的生存能力可以通过优化细胞打印过程中的打印参数,如液滴的生成条件和液滴冲击速度等,来提高打印后细胞的存活率^[17]。鉴于细胞打印过程中的众多参数,要想通过反复实验然后基于实验结果来寻找保持细胞高水平存活率的最佳优化方案是非常困难的。基于细胞打印和细胞损伤的各个流程中不断发展的流体动力学过程分析、模拟研究^[18],可以帮助人

们更好地寻找细胞活性损伤优化方案。

1.3.1 对传统压电式喷墨头流体动力学特征的研究

对于压电式喷墨打印过程的数值模拟可用来分析一些很难在实际实验中观察到的现象^[19],同时有利于对喷墨头的腔体设计和点火频率等核心参数^[20]进行进一步的优化改进。蔡昊^[21]等简化了压电式喷墨打印头的几何模型,根据模拟过程中的实验现象对油墨的表面张力和黏度对墨滴的形态影响进行了分析讨论。确定了油墨流变特性对喷墨墨滴形态的影响,并将模拟的实验结论应用到真实打印场景中,对比分析可知与模拟的实验数据基本吻合。数值模拟^[22]可以被用来优化细胞打印相关的实验方案和相关工艺参数的设计。

1.3.2 基于细胞打印的压电式喷墨头流体动力学特征

细胞打印过程中的喷墨液滴的流体动力学特征与其他情况是十分不一样的,尽管细胞打印的出现时间还比较短,但是关于如何更好进行打印的计算研究已经有很多,有研究发现,当细胞液滴喷射到水凝胶上面的运行速度过快会伤害到细胞的活性^[23]。

He Ping等^[24]对于单细胞打印过程中细胞被喷射在介质表面这一过程建立了一个新的模型,见图4,单个细胞(图示为小球体)包裹在打印液滴的中心(图示为大球体),液滴冲击到黏稠溶液中(图中圆柱体部分)。模拟表明,打印过程中细胞经历显著应力变化(0~数十千帕)和局部的膜表面面积的应变(0%~70%)。在细胞的着落过程中,Haller^[25]对经过打印机喷射到承印物表面的细胞液滴与表面之间快速短暂的碰撞作用进行了分析,通过建模发现碰撞后的液滴由于力的作用会发生形变,且形变量会随着喷射速度的增加发生变化,液滴的收缩效果会加大。Wang Wei^[26]等分析了含有细胞的墨滴脱离喷嘴后的降落过程,得出承印物表面涂覆水凝胶可以更好地保护细胞活性。由于细胞打印过程中较多的打印参数设置,为了更加准确地分析细胞打印过程,需要对更多的机械碰撞过程进行分析建模,同时添加更多的打印参数。

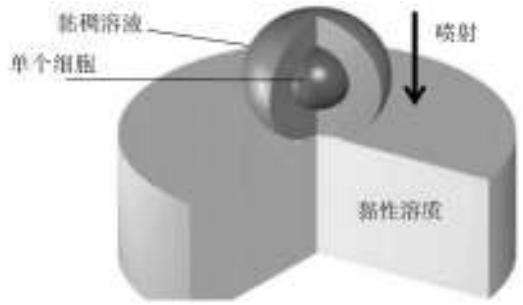


图4 单细胞打印过程中基于一个单元的切口视图

Fig.4 Cut view of a basic unit in a single cell printing process

1.4 喷嘴几何形状设计对压电式喷墨头的影响

压电晶体型喷嘴结构大致分为4种:撞击式、弯曲式、剪切式和挤压式^[27]。4种结构中由于剪切式喷嘴的激励不会对相邻喷嘴造成影响,所以目前大多数的喷墨头采用剪切模式的喷嘴结构设计方案。喷嘴几何形状设计会对打印后细胞的活性以及打印的流畅程度产生影响,通过文献研究发现类矩形的设计更适用于细胞打印。

2 细胞打印用压电式喷墨头设计方案

2.1 单细胞打印用压电式喷墨头

高产率的单细胞打印技术对于细胞的检测是非常重要的,适用于很多生物医学领域^[28]。单细胞打印后的样品会存在样品和样品之间的交叉污染,损失一部分细胞的活性^[29]。目前单细胞打印领域的主要挑战^[30]有以下4点:喷射到基板表面的细胞活性损伤问题;无法保证高产率的单细胞阵列;含有单细胞的墨滴精确喷射到基板指定位置;对打印质量的监控指标,不能实时监测喷射出的墨滴是否真的含有细胞。

Yusof等^[31]在研究中提出了一个全新的喷墨头设计,见图5,液滴生成由堆栈压电驱动器进行驱动,驱动器的厚度是260 μm,面积约为1 mm×1 mm的薄膜,此外喷嘴孔的微结构尺寸是40 μm×40 μm的矩形形状。对于空液滴或包含多个细胞的液滴在喷嘴处生成时将会被检测,同时偏转至废料盒中。Yamaguchi^[32]等人在研究中利用椭圆形的玻璃毛细管代替喷嘴部件,对细胞从喷嘴前端部排出的运动进行分析,得到了一种能够稳定地喷射细胞的结构设计方案,见图6。

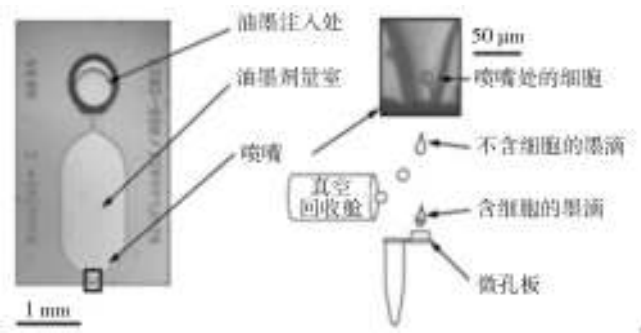


图5 喷墨头结构设计

Fig.5 Design of inkjet head structure

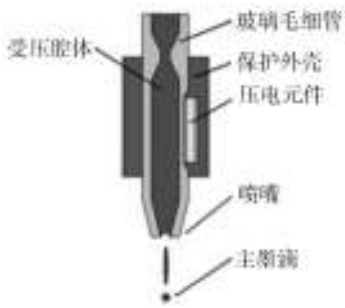


图6 一种细胞打印用喷墨头结构

Fig.6 An inkjet head structure for cell printing

2.2 多细胞打印用压电式喷墨头

继单细胞打印得到了大量的研究之后,架构更加复杂的多细胞打印得到了越来越多的关注^[33]。Uddin^[34]等引入一种新型的喷墨打印技术,用来涂覆具有3个抗癌剂,即5-氟尿嘧啶、姜黄素、顺铂的金属微针阵列工艺,该工艺主要用于对患者经皮肤给药。这种细胞打印的打印质量取决于喷嘴的尺寸,施加的电压(mV)和脉冲(ms)的持续时间。Xu^[35]等对于具有复杂的细胞形态、结构初级胚胎海马和皮层神经元,直接通过自动化的喷墨打印成功创建,使用的喷墨头驱动频率为5 kHz,印刷精度为85 μm,液滴体积大约为85 pL,所使用的细胞液浓度为每毫升2 000 000个细胞。最终得到的样品经过免疫染色分析和全细胞膜片记录分析表明,胚胎海马和皮层神经元保持基本细胞特性和功能,包括正常、健康的神经元表型和电特性。

3 结语

鉴于细胞打印过程中细胞活性易受损伤、喷墨头堵塞不喷等问题,可通过对喷墨头内部的压力波形态进行改进设计,缩短喷墨腔体压电陶瓷的形变周期,来有效提高细胞打印的速度,保障打印稳定性。对于细胞打印的喷墨头压电陶瓷使用“先挤压后拉伸”的致动方法更加适用,在喷嘴的几何形状设计上重点考虑矩形与椭圆形。根据实际打印的细胞类型,在参考各影响因素的基础上设计普通打印机的改进方案,可使其更适用于细胞打印。

参考文献:

[1] BIASE M, SAUNDERS E, TIRELLI N, et al. Inkjet Printing and Cellseeding Thermoreversible Photocurable Gel Structures[J]. Soft Matter, 2011(7):2639.
[2] BINDER K, ALLEN J, YOO J, et al. Drop-on-demand Inkjet

- Bioprinting: a Primer[J]. *Gene Therapy & Regulation*, 2011(1):33.
- [3] CUI X, DEAN D, RUGGERI M. Cell Damage Evaluation of Thermal Inkjet Printed Chinese Hamster Ovary Cells[J]. *Biotechnology & Bioengineering*, 2010, 106(6):963—969.
- [4] YAMAGUCHI S. Stable Ejection of Micro Droplets Containing Microbeads by a Piezoelectric Inkjet Head[J]. *Journal of Micro-Nano Mechatronics*, 2012, 7(7):87—95.
- [5] KWON K S, KIM W. A Waveform Design Method for High-speed Inkjet Printing Based on Self-sensing Measurement[J]. *Sensors and Actuators*, 2007(4):75—83.
- [6] LEE Y I, KWON Y T, LEE K J, et al. A Novel Method for Fine Patterning by Piezoelectrically Induced Pressure Adjustment of Inkjet Printing[J]. *Electronic Materials*, 2015, 44(8):2608—2614.
- [7] 李建超. 压电式喷头驱动电源的设计与研究[D]. 西安:西安理工大学, 2012.
- LI Jian-chao. Design and Research on the Driving Power of Piezoelectric Nozzle[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012.
- [8] KUSHNER J. A New Veonct for High-speed Positioning of Piezoelectric Actuators[J]. *Actuator*, 2006(1):82—85.
- [9] 冯灿东. 压电式喷墨头打印机压电陶瓷驱动电源研究[J]. *包装世界*, 2014(4):28—29.
- FENG Can-dong. Study on the Driving Power of Piezoelectric Inkjet Head Printer[J]. *Packaging World*, 2014(4):28—29.
- [10] YANG Y T, DING Y S, LIU J J. Design of Low-Voltage Power Supply Drive Circuit Based on the Piezoelectric Ceramic Transformer[J]. *Advanced Materials Research*, 2013(3):765—767.
- [11] KANG W S, KANG W S, KOH J H. $(1-x)\text{Bi}_0.5\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-TiO}_3$ Lead-free Piezoelectric Ceramics for Energy-harvesting Applications[J]. *Materials Science*, 2015(5):2057—2064.
- [12] CHENA W P, CHONG C P, CHAN H, et al. Degradation in Lead Zirconate Titanate Piezoelectric Ceramics by High Power Resonant Driving[J]. *Materials Science and Engineering*, 2002(9):203—206.
- [13] 张冬至, 童俊, 任旭虎, 等. 压电喷墨驱动器结构优化与仿真分析[J]. *实验室研究与探索*, 2013(3):87—91.
- ZHANG Dong-zhi, TONG Jun, REN Xu-hu, et al. Study and Exploration of the Structure Optimization and Simulation Analysis of Piezoelectric Inkjet Actuator[J]. *Laboratory Research and Exploration*, 2013(3):87—91.
- [14] THE R, YAMAGUCHI S. Piezoelectric Inkjet-Based Single-Cells Printing by Image Processing for High Efficiency and Automatic Cell Printing[C]// 17th International Conference on Miniaturized, 2013:1656—1658.
- [15] CHEN L Q, XIAO Z Y, CHAN P, et al. A Comparative Study of Droplet Impact Dynamics on a Dual-Scaled Superhydrophobic Surface and Lotus Leaf[J]. *Applied Surface Science*, 2011(21):8857—8863.
- [16] FERRIS C J, GILMORE K G, WALLACE G G. Panhuis MIH Biofabrication: an Overview of the Approaches Used for Printing of Living Cells[J]. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 2013, 97(10):4243—4258.
- [17] GROSS A, SCHOENDUBE J, NIEKRAWITZ S, et al. Single-cell Printer: Automated, on Demand, and Label Free[J]. *Journal of Laboratory Automation*, 2013, 18(6):504—518.
- [18] HE P. Fluid Dynamics of Cell Printing[D]. South Carolina: Clemson University, 2011.
- [19] GERARD C. Desmulliez, Inkjet Printing of Conductive Materials: a Review[J]. *Circuit World*, 2012, 38(4):193—213.
- [20] ZENG J, SCHMIDT C, LIU H. Multi-disciplinary Simulation of Piezoelectric Driven Microfluidic Inkjet[C]// ASME 2009 International Design Engineering Technical Conference & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC), 2009.
- [21] 蔡昊, 董春法, 张祥林. DOD式压电喷墨打印系统液滴形成过程的数值模拟[J]. *包装工程*, 2014, 35(15):113—117.
- CAI Hao, DONG Chun-fa, ZHANG Xiang-lin. Numerical Simulation of Droplet Forming Process in DOD Type Piezoelectric Ink Jet Printing System[J]. *Packaging Engineering*, 2014, 35(15):113—117.
- [22] HUANG J, CAI R Y, ZHANG K J. Experiments and Analysis of Drop on Demand Cell Printing[J]. *Engineering and Technology*, 2012, 4(2):93—96.
- [23] LIBERSKI A R, DELANEY J, SCHUBERT U. "One Cell-One Well": a New Approach to Inkjet Printing Single Cell Microarrays[J]. *Acs Combinatorial Science*, 2011, 13(2):190—195.
- [24] HE P, LIU Y, QIAO R. Fluid Dynamics of the Droplet Impact Processes in Cell Printing[J]. *Microfluidics & Nanofluidics*, 2014, 18(4):569—585.
- [25] HALLER K K, VENTIKOS Y, POULIKAKOS D, et al. Computational Study of High-Speed Liquid Droplet Impact[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92(5):2821—2828.
- [26] WANG W, YONG H, CHRISEY D. Numerical Study of Droplet and Hydrogel Coating Impact Process in Cell Direct Writing[C]// Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME, 2007:217—224.
- [27] WIJSBOFF H. The Dynamics of the Piezo Inkjet Printhead Operation[J]. *Physics Reports*, 2010(5):77v87.
- [28] TSENG P, JUDY J W, CARLO D. Magnetic Nanoparticle-Mediated Massively Parallel Mechanical Modulation of Single-Cell Behavior[J]. *Nat Methods*, 2012(11):1113—1119.
- [29] CHUNG K, RIVET C A, KEMP M L. Imaging Single-Cell Signaling Dynamics with a Deterministic High-Density Single-Cell Trap Array[J]. *Analytical Chemistry*, 2011, 83(18):

- arch and Manufacture of Nano-silver Conductive Ink[J]. China Printing and Packaging Study, 2010, 2(1): 358—361.
- [2] 辛秀兰, 魏亚娜. 水性油墨的研究进展[J]. 中国印刷与包装研究, 2011, 3(3): 1—8.
- XIN Xiu-lan, WEI Ya-na. Research Progress of Water-Based Ink[J]. China Printing and Packaging Study, 2011, 3(3): 1—8.
- [3] LEE K J, JUN B H, LEE Y L, et al. Metal Nanoparticles and Method for Producing the Same[P]. US: 20070018140, 2007—05—20.
- [4] 曹丽娜, 钱军浩. 导电油墨厚度对RFID标签天线辐射效率的影响[J]. 包装工程, 2012, 33(5): 122—125.
- CAO Li-na, QIAN Jun-hao. Influence of Conductive Ink Thickness on Radiation Efficiency of RFID Tag Antenna[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5): 122—125.
- [5] 潘光华, 李云, 李彬胜, 等. 导电油墨在包装防伪印刷中的应用研究[J]. 包装工程, 2012, 33(17): 130—134.
- PAN Guang-hua, LI Yun, LI Bin-sheng, et al. Application Research on Electrically Conductive Ink for Anti-counterfeit Package Printing[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(17): 130—134.
- [6] 付吉灿, 周奕华, 魏伟, 等. 分散剂含量对碳系导电油墨导电性能影响的研究[J]. 包装工程, 2014, 35(21): 118—122.
- FU Ji-can, ZHOU Yi-hua, WEI Wei, et al. Effects of Dispersant Content on the Conductivity of Carbon Conductive Ink[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(21): 118—122.
- [7] 张国锋, 王君涵, 魏安娜. 新型水性导电油墨的制备与性能研究[J]. 包装工程, 2010, 31(21): 92—94.
- ZHANG Guo-feng, WANG Jun-han, WEI An-na. Preparation and Property Research of New Type of Water-based Conductive Ink[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(21): 92—94.
- [8] ZHAI D D, ZHANG T Y, GUO J B, et al. Water-based Ultraviolet Curable Conductive Inkjet Ink Containing Silver Nano-Colloids for Flexible Electronics[J]. Colloids & Surfaces Physicochemical and Engineering Aspects, 2013(17): 1—9.
- [9] 陈海生, 屈贞财, 官燕燕, 等. 用于水性导电油墨的纳米银分散液的制备[J]. 包装工程, 2013, 34(13): 102—104.
- CHEN Hai-sheng, QU Zhen-cai, GUAN Yan-yan, et al. Preparation of Nano-silver Dispersions for Water-based Conductive Ink[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(13): 102—104.
- [10] CHERRINGTON M, CLAYPOLE T. Ultrafast Near-infrared Sintering of a Slot-die Coated Nano-silver Conducting Ink[J]. Journal of Materials Chemistry, 2011(21): 62—64.
- [11] MAGDASSI S, GROUCHKO M, BEREZIN O, et al. Triggering the Sintering of Silver Nanoparticles at Room Temperature[J]. American Chemical Society, 2010, 4(4): 1943—1948.
- [12] KOSMALA A, WRIGHT R, ZHANG Q, et al. Synthesis of Silver Nano Particles and Fabrication of Aqueous Ag Inks for Inkjet Printing[J]. Materials Chemistry and Physics, 2011(3): 1075—1080.
- [13] TANG B L, CHEN G X, CHEN Q F, et al. Research and Manufacture of Nano-Silver Conductive Ink[J]. Advanced Materials Research, 2011(4): 405—408.
- [14] YONG S, KIM C H, SHIN D Y, et al. Printed UHF RFID Antennas with High Efficiencies Using Nano-Particle Silver Ink[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2011, 11(7): 425—428.
- [15] LI W W, MO L X, FU J L, et al. Preparation of Water-Based Nano-Silver Gravure Conductive Ink Used for Printed Electronics[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013(2): 523—526.
- [16] FU J L, LI Y L, MO L X, et al. Preparation of Conductive Nano Silver Ink and Its Application on RFID Tags[J]. Advanced Materials Research, 2011(4): 121—125.
- [17] NIE X L, WANG H, ZOU J. Inkjet Printing of Silver Citrate Conductive Ink on PET Substrate[J]. Applied Surface Science, 2012, 261(8): 554—560.
- [18] LI W W, MO L X, FU J L. Influence of Post-Processing Methods on the Conductive Properties of Nano-silver Conductive Ink[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012(9): 115—118.
-
- (上接第133页)
- 7044—7052.
- [30] LIN L, CHU Y S, THIERY J P, et al. Microfluidic Cell Trap Array for Controlled Positioning of Single Cells on Adhesive Micropatterns[J]. Lab on A Chip, 2013, 13(4): 714—721.
- [31] SCHOENDUBE J, YUSOF A, KALKANDJIEV K, et al. Wafer Level Fabrication of Single Cell Dispenser Chips with Integrated Electrodes for Particle Detection[J]. Journal of Micro-mechanics and Microengineering, 2015, 25(2): 960—1317.
- [32] YAMAGUCHI S, UENO A, AKIYAMA Y, et al. Cell Patterning through Inkjet Printing of One Cell Per Droplet[J]. Biofabrication, 2012(12): 1—9.
- [33] ATALA A. Tissue Engineering and Regenerative Medicine: Concepts for Clinical Application[J]. Rejuvenation Research, 2004, 7(1): 15—31.
- [34] UDDIN M, SCOUTARIS N, KLEPETSANIS P, et al. Inkjet Printing of Transdermal Microneedles for the Delivery of Anticancer Agents[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2015(1): 1—10.
- [35] XU T, GREGORY C, MOLNAR P, et al. Viability and Electrophysiology of Neural Cell Structures Generated by the Inkjet Printing Method[J]. Biomaterials, 2007, 27(19): 3580—3588.