

瓷砖装饰用压电喷墨打印头关键技术研究

仲作金¹, 褚祥诚¹, 陈海超², 张淑兰², 崔宏超², 周 梅³

(1. 清华大学 材料学院新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室, 北京 100084;

2. 北京派和科技股份有限公司, 北京 100083; 3. 佛山市陶瓷研究所有限公司, 广东 佛山 528031)

摘 要: 压电喷墨技术是一种广泛应用于工业数字印刷领域的喷墨打印技术。根据压电陶瓷变形模式不同, 压电喷墨可分为挤压式、弯曲式、推动式和剪切式 4 种驱动原理。该文介绍了 4 种压电喷墨原理及相关研究方法。有限元分析和流体动力学计算可模拟墨滴生成与飞行的过程, 便于研究喷头电学参数和几何尺寸对喷墨性能的影响。并讨论了喷墨打印头的压电元件、喷嘴板等材料优化, 以及压电喷墨头研究进展及未来展望。

关键词: 喷墨打印; 压电陶瓷; 流体仿真; 电压波形; 喷嘴

中图分类号: TS853+.5; TM282

文献标识码: A

A Research Review on the Key Technologies of Piezoelectric Inkjet Printhead for Tile Decoration

ZHONG Zuojin¹, CHU Xiangcheng¹, CHEN Haichao², ZHANG Shulan², CUI Hongchao², ZHOU Mei³

(1. State Key Lab. of New Ceramics and Fine Processing, School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University,

Beijing 100084, China; 2. Paihe Science & Technology Holding Co., Ltd. Beijing, Beijing 100083, China;

3. Foshan Ceramics Research Institute CO., LTD, Foshan 528031, China)

Abstract: The piezoelectric inkjet technology is a kind of inkjet printing technology that is widely applied in industrial digital printing field. According to different deformation modes of piezoelectric ceramics, there are four types of operating principle of piezoelectric inkjet: squeeze mode, bend mode, push mode, and shear mode. The principles of those four types of piezoelectric inkjet and correlative research methods were introduced in this paper. FEM and CFD can be used to simulate the generation and flight of droplets, and make it easier to study the influences of electrical parameters and geometric dimensions on the inkjet performance. The optimization of piezo elements and nozzle plate materials was discussed, and domestic piezoelectric inkjet printhead research progress and future prospects were reviewed.

Key words: inkjet printing; piezoelectric ceramics; flow simulation; voltage waveform; nozzles

0 引言

喷墨打印是一种将墨水分散成微小液滴、液滴喷射到承印介质上完成图像输出的打印技术。喷墨技术广泛应用于数字印刷领域, 包括喷码、标识、纺织、陶瓷装饰、生物细胞打印及集成电路等^[1]。早在 1878 年, Lord Rayleigh 提出了一种流体分散成液滴的机制^[2]。基于此原理, 西门子公司申请了世界上第一台喷墨打印设备的专利。20 世纪 60 年代, 斯坦福大学的 Sweet 博士演示了墨水在电压波形作用下分解成大小相同、间距一致的墨滴, 墨滴被有选择地充电, 带电墨滴在通过电场后偏折飞入再循环墨槽, 不带电的墨滴则飞到介质上形成图像, 这个

过程就是连续喷墨技术^[3]。20 世纪 70 年代, IBM 开始将连续喷墨技术应用于计算机打印。但是连续喷墨技术产生的墨滴大多数进入再循环, 利用率较低^[1]。1979 年, 佳能发明了一种热发泡式喷射墨滴的方法, 靠加热产生气泡, 气泡长大、破裂, 从而挤出墨滴。佳能将其称为气泡喷墨。同期, 惠普开发了一种类似的技术, 并命名为热喷墨, 成功推出了第一款商业化的喷墨打印机 ThinkJet^[1, 4-5]。从 20 世纪 80 年代开始, 佳能和惠普将热发泡喷墨技术应用于办公打印机, 热喷墨统治着彩色打印机的市场^[3, 5]。20 世纪 70 年代, 德国人 E. L. Kyser 初次提出压电喷墨打印的技术原理, 此后压电喷墨技术成为除

收稿日期: 2015-06-09

基金项目: 北京市科委科技计划纳米科技产业园建设基金资助项目 (Z141100003814004); 佛山市科技创新专项基金资助项目 (2013AH100031)

作者简介: 仲作金 (1991-), 男, 甘肃民勤人, 硕士生, 主要从事压电器件相关研究。通信作者: 褚祥诚 (1971-), 男, 副教授, 博士。E-mail: chuxiangcheng@mail.tsinghua.edu.cn。

发泡喷墨外的按需喷墨的一种主要形式^[1]。至今,压电喷墨已成为数字印刷行业中应用最广泛的喷墨技术。基于压电喷墨技术,陶瓷装饰行业用陶瓷粉体、釉料等制成墨水,利用喷墨印刷设备将墨水直接打印到瓷砖表面作为装饰。压电喷墨技术可充分利用计算机资源,将数字化技术引入到传统的建筑陶瓷产业中。与传统装饰方法相比,压电喷墨技术具有以下优点:

- 1) 墨水兼容性好,无需加热墨水,不会影响墨水的化学成分。
- 2) 节能减排,无需制片、晒网、刻版等,缩短了生产周期,降低生产成本。
- 3) 压电式喷墨技术对墨滴控制更精确,图像效果更佳。
- 4) 墨水材料标准化,产品质量有保障^[1,6-7]。

1 压电喷墨技术分类

压电喷墨技术是利用逆压电效应,对压电陶瓷致动器施加电压引起陶瓷机械形变,形变在墨水腔中会产生压力或声波,致使墨水在喷嘴处获得能量断裂,并以一定速度喷射。根据压电陶瓷变形模式的不同,压电喷墨技术可分为挤压模式、弯曲模式、推动模式和剪切模式^[1,3,6],如图1所示。

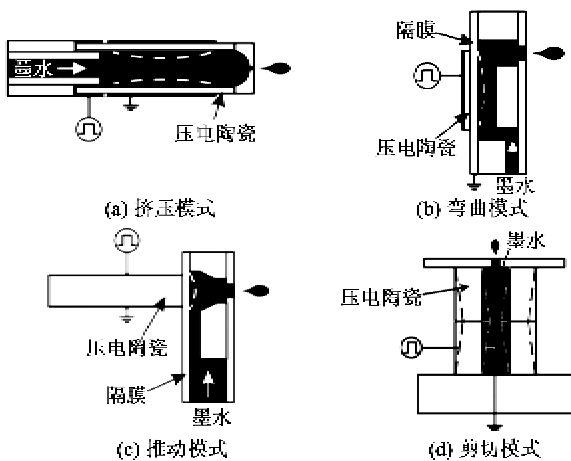


图1 压电喷墨的4种基本形式

1.1 挤压模式

挤压模式是采用圆管型压电陶瓷管作为致动器,墨水腔为玻璃管或其他改进的装置^[3],玻璃管端部拉制形成微孔,作为喷嘴。压电陶瓷管沿径向极化,内、外壁分别接电源两极。陶瓷管先向外扩张,墨水从入口处填充到玻璃管里,一定时间间隔后,陶瓷管向内压缩,将墨水从喷嘴挤出。压电陶瓷管恢复至初始状态,等待进入下一个喷射周期^[3]。这种挤压式的喷头原理在文献中研究较多,D. B. Bogy等^[10-11]就挤压式喷墨头提出墨水腔内压力波

传导理论,被广泛应用于驱动电压设计中。Hsuan-Chung Wu等^[12-13]通过有限元法分析了压力波形对挤压式喷墨头喷墨性能的影响。William Rone等^[14-15]利用COMSOL Multiphysics软件模拟挤压式喷墨头,其采用传感器测量腔内墨水上方压缩气体的气压变化,从而得到喷射墨滴的体积大小。E. Q. Li等^[9]采用PET/聚四氟乙烯(PTFE)作为墨水管,以提高墨腔变形量,可喷射墨水粘度相比于传统玻璃管喷头的 $20 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 提高至 $100 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,且PTFE具有良好的抗腐蚀性。商业化喷头中,西门子PT-80、Microdrop等公司的喷墨打印头采用了挤压式喷墨的技术原理。

1.2 弯曲模式

将片状压电陶瓷粘贴于隔膜上,陶瓷片的变形为 d_{31} 模式,中心位置会向内或向外鼓起,从而引起墨腔的容积变化,完成墨水吸入和液滴喷射的过程。墨滴大小与压电陶瓷片所加电压、脉冲持续时间及喷嘴孔径有关。泰克Phaser 300、爱普生Color Stylus 400等喷头都是基于此原理^[3]。1995年,爱普生推出MLChips型喷墨驱动器,以弯曲模式工作,压电元件封装在振动板上,电极沉积在压电陶瓷上、下两面^[8,16](见图2)^[16]。爱普生微压电技术采用仅 $1 \mu\text{m}$ 厚的压电陶瓷薄膜,喷头采用微机电系统(MEMS)技术加工而成,喷射精度高,主要应用于家庭和办公打印机。Spectra公司基于MEMS技术的弯曲模式喷头^[17]主要采用硅材料作喷头的墨腔,PZT陶瓷作驱动元件。MEMS成熟的工艺可保证喷头加工精度。Kuang-Chao Fan等^[18]设计并制备了一种弯曲模式的压电喷墨喷头,压电陶瓷作成蜂鸣器形状,圆周固定,中间部分产生“草帽”变形。采用频闪照相机观察墨滴产生与飞行形态。Tong-Miin Lion等^[15]对爱普生弯曲模式压电喷墨头进行压电-流体的全耦合分析,计算机模拟的正确性可通过实验观测加以验证。

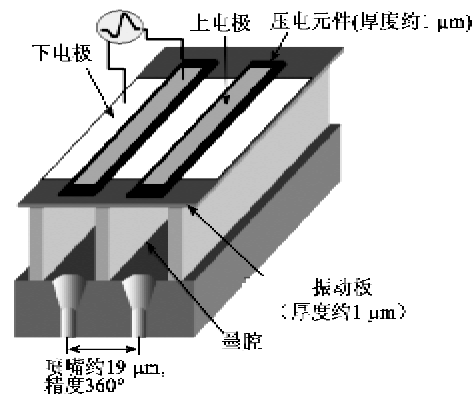


图2 爱普生微压电喷墨打印头原理图

1.3 推动模式

推动模式主要是采用柱状压电陶瓷的 d_{33} 伸缩变形作为驱动力。陶瓷收缩导致墨腔扩张,从而吸入墨水;陶瓷伸长,将墨水从喷嘴处喷射而出。Herman Wijshoff^[20-21]、Amol A. Khalate^[22-23] 等研究了一种挤压式喷墨打印头,如图 3 所示^[21],并将柱状陶瓷改进为叠层陶瓷,降低了陶瓷的驱动电压,并对喷头的仿真和测试都作了详尽的描述。作者深入研究了墨水腔内压力波衰减过程、残余震荡及多个喷射单元之间串扰等问题,通过调整驱动电压波形减少了上述因素对喷墨性能的不利影响。

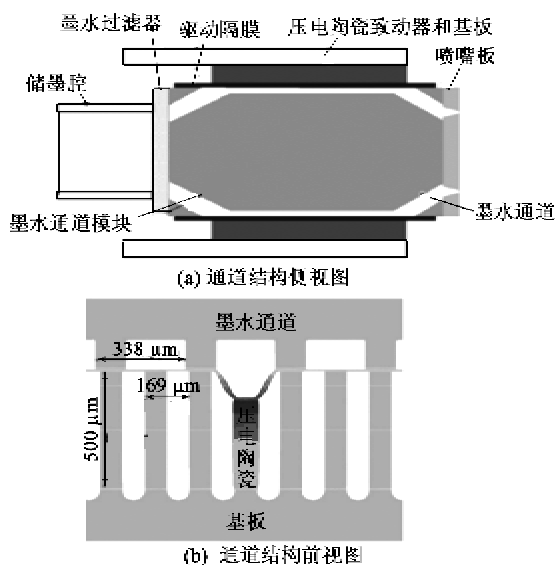


图 3 叠层陶瓷推动模式喷头

1.4 剪切模式

当压电陶瓷的极化方向和外电场方向垂直时,压电陶瓷会发生剪切变形,关键的压电系数为 d_{15} 。剪切模式的喷头主要有 XAAR 和 Spectra 等^[3, 21]。XAAR 1001 和 1002 喷头是陶瓷喷墨工业广泛采用的喷头,原理如图 1(d) 所示。在块体的 PZT 陶瓷上精密切割出宽度仅 $60\ \mu\text{m}$ 的墨水通道,通道壁的两侧面被电极。PZT 陶瓷分为上、下两块,极化方向相反,这样每一个通道壁的变形均为 V 型运动^[3]。XAAR 公司的剪切式喷头由于相邻通道共享壁,所以每 3 个墨水通道只能同时有一个工作。XAAR 1001 和 1002 的优势是实现了墨水的内循环,可及时带走杂质和气泡,保证喷头的正常工作^[24]。Spectra 剪切式喷头压电致动器如图 4 所示^[21],其墨腔结构类似于弯曲模式的喷头,但压电陶瓷属于剪切变形。由图可看出,压电致动器的电极位置和加电方式,中间电极接“+”,两端电极接地,当“+”极电压波形变化时,就可完成中间位置的上、下鼓起动作,从而喷射墨滴^[21]。

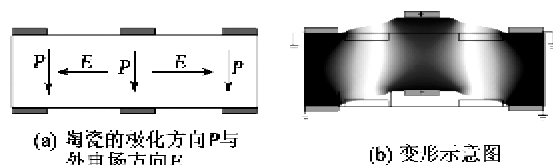


图 4 Spectra 剪切式喷头压电致动器示意图

C. H. Cheng 等^[25-26]提出了一种新型的剪切模式喷头,如图 5 所示。图中, P 为压电陶瓷极化方向, $+V$ 为电压; NP 为未极化区域。与图 4 对比可发现,二者的陶瓷极化方向与加电方式不同。

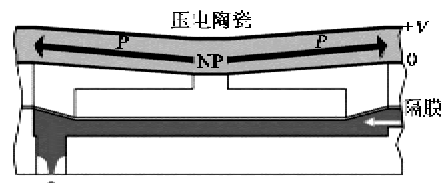


图 5 一种新型的剪切式喷头

2 压电喷墨过程的计算机模拟

压电喷墨过程的仿真涉及压电、机械、流体的多场耦合,直接耦合难度大,文献采取间接耦合法^[21, 27-28], Tong-Miin Lion 等^[19]对弯曲模式压电喷墨头进行了压电-流体的全耦合分析。压电部分的仿真包含压电致动器的振动及对墨腔产生的波动影响,主要采用有限元法 (FEM)。流体部分的仿真主要研究喷嘴处在给定入口条件下墨滴的产生与喷射过程,主要采用计算流体动力学 (CFD) 中的流体体积分数 (VOF) 模型。压电部分引起的振动波形作为流体部分的压力入口条件。D. B. Bogy 等^[10]关于挤压式喷墨头提出的“波传导理论”对研究压电致动器驱动电压波形有重大意义。

图 6 为文献[12]中模拟挤压式喷墨的墨滴生成与飞行过程。由图可看出,墨滴喷射的各时间点状态及喷嘴处弯月面的变化状态。可模拟电压波形、墨腔尺寸、喷嘴孔径等因素对于墨滴速度、体积的影响。不同结构的喷头模拟结果会存在一些差异,但是如果只考虑喷嘴部分,则墨滴的相关性质取决于喷嘴的入口条件,而该入口条件取决于压电陶瓷的驱动电压及墨腔尺寸。

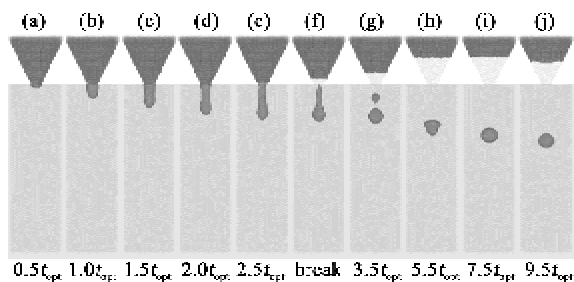


图 6 墨滴形成与喷射过程模拟

3 驱动电压波形设计

图 7 (a) 为压电喷墨头的驱动电压波形。上升沿 T_{rise} 和下降沿 T_{fall} 要求越短越好, 控制在 $5 \mu s$ 内, 而影响喷墨性能的关键参数是波形持续时间 T_{dwell} 和电压幅值。Bogy 波传导理论认为, T_{dwell} 与墨腔的几何尺寸及墨水中声速等有关^[19]。墨滴的体积和速度与电压幅值成正比。其他的波形图如图 7 (b)、(c) 所示。双脉冲波形适用于低粘度液体, 而双极脉冲适合高粘度液体^[30]。优化的电压波形可使墨腔压力波尽快衰减至消失, 减少相邻喷射单元的串扰^[21], 提高喷墨性能。

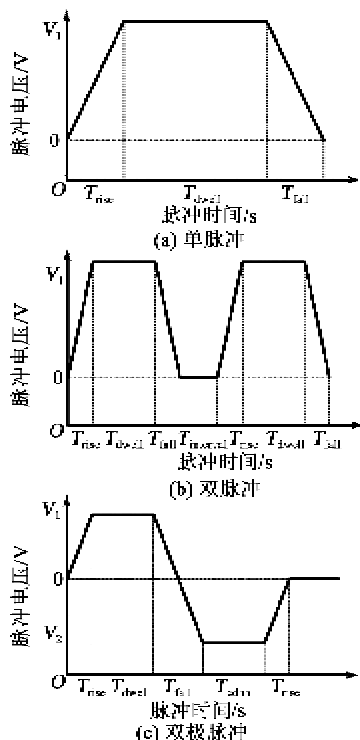
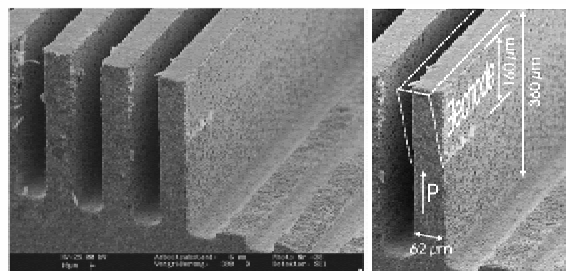


图 7 3 种不同的驱动电压波形

4 喷墨性能对压电材料的依赖性

压电喷墨头的使用性能及寿命依赖于压电陶瓷材料。一种 XAAR 的端喷剪切模式喷头使用的压电材料为 PZT^[3-4], 采用划片机在块体 PZT 材料上切割出如图 8 所示^[3] 的微槽, 壁宽 $62 \mu m$, 高 $360 \mu m$, 长 $10 mm$, 微槽作为喷头的墨水通道, 图 8 (b) 中虚线表示通道壁的变形。压电陶瓷壁的疲劳实验结果如下: 经过 90 000 次铁电循环后 (电场峰-峰值 $88.5 kV/cm$, 频率 $50 Hz$), PZT 材料的剩余极化强度由 $30.2 pC/cm^2$ 降为 $17.3 pC/cm^2$, 矫顽场由 $24.7 kV/cm$ 增大到 $34.1 kV/cm$ 。PZT 的疲劳性质直接决定喷头的使用寿命。



(a) 压电微槽 SEM 照片 ($\times 300$)

(b) 通道壁尺寸与变形方式

图 8 一种 XAAR 喷头的压电微槽结构

PZT 的压电性能优越, 其中 PZT-5 系列陶瓷机电耦合系数高, 适合各类机电转换装置。但是出于环境保护的考虑, 科学家试图采用无铅压电材料替代 PZT 陶瓷。Chiaki Tanuma 等^[31] 使用无铅压电材料 $Li_{0.98}(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.02}NbO_3$ 作为喷头致动器, 制备了 XAAR 公司的“V 型”剪切模式的喷头 (见图 1 (d)), 这种无铅压电材料的居里温度高于 PZT, 但压电系数较低, 所以, 与 PZT 相比, 其喷头需采用更大的驱动电压。

5 喷头喷嘴的寿命问题

陶瓷喷墨工业中现有的喷头质量受很多因素影响, 除上述的压电陶瓷材料外, 现有喷头还存在喷嘴易堵孔及不耐用等问题^[1, 32]。这是由于陶瓷喷墨所使用的墨水含有釉料颗粒, 硬度大。XAAR 喷墨头采用的喷嘴板材质为聚酯膜, 长期使用后喷嘴磨损严重。Spectra 的喷头采用金属材质喷嘴, 一定程度上提高了耐磨性, 但硬度还是低于墨水颗粒。为进一步改善喷头喷嘴的使用寿命, 清华大学、佛山陶瓷研究所有限公司、北京派和科技股份有限公司组成的研发团队^[33], 历时 1 年, 对多种材料的微孔成型工艺进行了摸索发现, 氧化锆或氧化铝等结构陶瓷材料薄板有望取代聚酯膜、金属膜, 作为喷头喷嘴板理想材料, 从而提高喷嘴耐磨性和耐腐蚀性, 延长喷头使用寿命。

6 新型喷墨头结构设计

由清华大学、佛山陶瓷研究所有限公司、北京派和科技股份有限公司组成的工业级压电喷墨头研发团队在对国外喷头技术深度解析的基础上, 提出了多种新型的喷墨头结构, 已申请多项专利。专利^[34] 提出一种基于多层压电陶瓷的压电喷墨头 (见图 9), 主要创新点是: 将多层压电陶瓷划槽后作为墨水通道, 每个通道壁可看作压电双晶片, 双晶片向外、向内的弯曲运动可完成墨滴喷射。喷嘴的物理

精度可通过调节多层陶瓷单层的厚度来改变。此外,研发团队还提出了采用压电双晶片作为致动器的喷墨喷头,包括单侧挤压及双侧挤压两种。针对喷头的内部结构,提出了采用结构陶瓷作为墨水通道,采用精密划片机已成功地在氧化铝等陶瓷上制备出几十微米至几百微米宽的微槽。

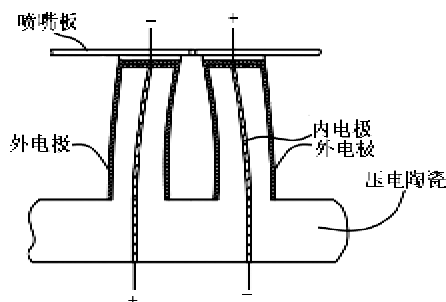


图9 一种基于多层压电陶瓷的喷墨单元

7 结束语

目前,国内陶瓷喷墨市场所使用的喷头全部来自进口,国内市场整体上是赛尔、Spectra 和精工三分天下^[7]。喷头是喷墨打印设备中的核心部件,喷头成本占喷墨产业的很大一部分。因压电喷墨喷头结构复杂,加工难,国产喷头产业化尚需很长一段产品工艺、可靠性的验证期。对于压电喷墨技术的原理,国外在每种原理的技术和产品应用上较成熟。国、内外对压电喷墨的研究局限于理论计算和喷头测试方面,对于工业级压电喷墨喷头的制备或加工工艺,国外对技术的保密十分严格。在国产喷墨头的研发中,结构设计的创新至关重要,优化的结构既可减少加工难度,同时也可保证喷墨性能。加工工艺也是喷墨头产业化的关键所在,国内还需在这些方面进行深入研究和追赶。

参考文献:

- [1] ROMANO F J. 喷墨印刷[M]. 王强,译. 北京:印刷工业出版社,2010.
- [2] STRUTT J W, RAYLEIGH L. On the instability of jets[J]. Proc London Math Soc,1878,10:4-13.
- [3] BRÜNAHL J, GRISHIN A M. Piezoelectric shear mode drop-on-demand inkjet actuator[J]. Sensors and Actuators A: Physical,2002,101(3):371-382.
- [4] BRÜNAHL J. Physics of piezoelectric shear mode inkjet actuators[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology,2003.
- [5] 付冰. 喷墨打印技术的进展和发展趋势(一)[J]. 信息记录材料,2002(3):36-42.
- [6] FU Bing. Progress and trends in Ink-jet printing technology(1)[J]. Information Recording Materials,2001(3):36-42.
- [7] 黄惠宁,柯善军,钟礼丰,等. 喷墨印刷技术在我国陶瓷领域中的应用现状[J]. 佛山陶瓷,2012(6):1-10.
HUANG Huining, KE Shanjun, ZHONG Lifeng, et al. Application progress of inkjet printing technology in the area of ceramic tile in China[J]. Foshan Ceramics, 2012(6):1-10.
- [7] 张柏清,王德良,钟树铭. 陶瓷喷墨打印技术的现状及发展[J]. 佛山陶瓷,2011,21(9):1-5.
ZHANG Baiqing, WANG Deliang, ZHONG Shuming. Present situation and progress of ceramic inkjet printing technology[J]. Foshan Ceramics,2011,21(9):1-5.
- [8] 何君勇,李路海. 喷墨打印技术进展[J]. 中国印刷与包装研究,2009(6):1-9.
HE Junyong, LI Luhai. Progress and trends of ink-jet printing technology[J]. China Printing and Packaging Study,2009(6):1-9.
- [9] LI E, XU Q, SUN J, et al. Design and fabrication of a PET/PTFE-based piezoelectric squeeze mode drop-on-demand inkjet printhead with interchangeable nozzle[J]. Sensors and Actuators A: Physical,2010,163(1):315-322.
- [10] BOGY D, TALKE F. Experimental and theoretical study of wave propagation phenomena in drop-on-demand ink jet devices[J]. IBM Journal of research and development,1984,28(3):314-321.
- [11] BUGDAYCI N, BOGY D B, TALKE F E. Axisymmetric motion of radially polarized piezoelectric cylinders used in ink jet printing[J]. IBM Journal of Research and Development,1983,27(2):171-180.
- [12] WU H C, LIN H J, HWANG W S. A numerical study of the effect of operating parameters on drop formation in a squeeze mode inkjet device[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering,2005,13(1):17.
- [13] WU H C, LIN H J. Effects of actuating pressure waveforms on the droplet behavior in a piezoelectric inkjet[J]. Materials Transactions,2010,51(12):2269-2276.
- [14] RONE W S, BEN-TZVI P. MEMS-based microdroplet generation with integrated sensing[C]//Boston: Proc COMSOL Conf,2011.
- [15] RONE W, BEN-TZVI P. Design and FE analysis of integrated sensing using gas compressibility for micro-

- droplet generation[J]. *Mechatronics*, 2013, 23(4): 397-408.
- [16] OKUMURA M, TAKAHASHI T. Novel micro piezo technology for ink jet printhead[C]//Anchorage; Proceedings of the NIP & Digital Fabrication Conference, Society for Imaging Science and Technology, 2007: 314-318.
- [17] MENZEL C, HOISINGTON P, BIBL A. MEMS solutions for precision micro-fluidic dispensing application [C]//Salt Lake City; Proceedings of the NIP & Digital Fabrication Conference, Society for Imaging Science and Technology, 2004: 169-175.
- [18] FAN K C, CHEN J Y, WANG C H, et al. Development of a drop-on-demand droplet generator for one-drop-fill technology [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 147(2): 649-655.
- [19] LIOU T M, CHAN CY, SHIH KC. Effects of actuating waveform, ink property, and nozzle size on piezo-electrically driven inkjet droplets[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2010, 8(5): 575-586.
- [20] WIJSHOFF H. Free surface flow and acousto-elastic interaction in piezo inkjet[C]//Boston; Proceedings of the Proc NSTI Nanotechnology Conf and Trade Show, 2004: 215-218.
- [21] WIJSHOFF H. The dynamics of the piezo inkjet printhead operation[J]. *Physics Reports*, 2010, 491(4): 77-177.
- [22] KHALATE A A, BOMBOIS X, BABUŠKA R, et al. Performance improvement of a drop-on-demand inkjet printhead using an optimization-based feedforward control method [J]. *Control Engineering Practice*, 2011, 19(8): 771-781.
- [23] KHALATE A A, BOMBOIS X, YE S, et al. Minimization of cross-talk in a piezo inkjet printhead based on system identification and feedforward control [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2012, 22(11): 115035.
- [24] <http://www.xaar.com/en>, 2015-06-05.
- [25] CHENG C, CHEN S, YOUNG S, et al. Effect of poling conditions on out-of-plane displacement for a shear mode PZT actuator [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 126(2): 386-395.
- [26] CHENG C, CHEN S, KUO H, et al. The poling design of a shear mode piezoelectric actuator [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15(11): 2163.
- [27] CHEN Y S, HUANG Y L, KUO C H, et al. Investigation of design parameters for droplet generators driven by piezoelectric actuators [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2007, 49(6): 733-740.
- [28] 徐荣泽. 压电式喷墨头的优化设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [29] 周诗贵. 压电驱动膜片式微滴喷射技术仿真分析与实验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [30] LIU Y F, TSAI M H, PAI Y F, et al. Control of drop-let formation by operating waveform for inks with various viscosities in piezoelectric inkjet printing [J]. *Applied Physics A*, 2013, 111(2): 509-516.
- [31] TANUMA C, SHIMOSATO M, NITTA N, et al. Shear-mode industrial inkjet head using lead-free piezoelectric ceramics [J]. *Jpn J Appl Phys*, 2012, 51(9S1): 09L013.
- [32] 吴益晓, 刘胜, 岳建平, 等. 弹簧式隔爆阀冲击强度有限元分析 [J]. *重庆理工大学学报(自然科学版)*, 2013(5): 36-39.
- WU Yixiao, LIU Sheng, YUE Jianping, et al. Finite element analysis of impact strength for spring loaded explosion-proof valve [J]. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)*, 2013(5): 36-39.
- [33] 褚祥诚, 仲作金, 张红军, 等. 喷墨打印头陶瓷喷孔的皮秒激光加工研究 [J]. *佛山陶瓷*, 2014, 12(7): 24-26.
- CHU Xiangcheng, ZHONG Zuojin, ZHANG Hongjun, et al. Research on picosecond laser drilling of inkjet printhead nozzle [J]. *Foshan Ceramics*, 2014, 12(7): 24-26.
- [34] 仲作金, 张淑兰, 崔宏超. 基于多层压电陶瓷的喷墨头及包括该喷墨头的打印设备: CN203854317U[P]. 2014-10-01.