

压电式喷墨的建模与分析

常莹莹, 唐正宁, 李俊锋

(江南大学, 无锡 214122)

摘要: 通过建立一维喷墨模型, 对压电式喷墨过程进行了阶段分析, 并结合牛顿第二定律、动量守恒定律和能量守恒定律, 对作用在压电元件上的电压与相应的压力之间关系进行了分析, 对油墨在管腔中的运动进行了描述, 并分析了液滴形成的条件以及形成液滴的大小和速度变化, 最后通过实验分析了表面张力和喷射速度对墨滴形成的影响。

关键词: 压电喷墨印刷; 墨滴速度; 液滴体积; 表面张力

中图分类号: TS853⁺.5; TS803 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)17-0122-04

Modeling and Analysis of Piezoelectric Ink-jet Printing

CHANG Ying-ying, TANG Zheng-ning, LI Jun-feng

(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: One-dimensional ink-jet model was established. Stage analysis was carried out on piezoelectric inkjet process. The relation between voltage and the corresponding pressure was analyzed combined with Newton's second law, the law of conservation of momentum, and energy conservation law. The movement of the ink in nozzle was described. The condition of drop formation and the droplet's volume and speed was analyzed. The influence of surface tension and jet speed on ink drop formation was analyzed through experiment.

Key words: piezoelectric inkjet printing; droplet velocity; droplet volume; surface energy

自 11 世纪活字版印刷术发明, 揭开了现代印刷发展的序幕。20 世纪 30 年代末期静电照相成像过程被提出, 60 年代, 喷墨成像的概念被提出, 直至 70 年代出现连续喷墨和按需喷射喷墨成像技术和系统。现如今, 喷墨技术得到不断完善, 并在应用领域中不断扩大^[1]。

在压电式喷墨中, 压电驱动器在电场的作用下会发生变形, 到一定程度时, 压电喷墨借助于变形所产生的压力将墨水从墨腔中挤出, 从喷嘴中喷射出来, 图文数据信号控制压电晶体的变形量, 进而控制喷墨量的多少。因此在设计打印机时, 了解设计参数与打印效果之间的关系是很有必要的。本文对压电式喷墨过程进行分阶段分析建模, 对压力传导、墨水在腔体中的流动以及墨滴的形成于喷射进行理论分析, 并对一些基本参数进行了实验分析。

1 模型描述

压电式喷墨是利用电压脉冲驱动压电驱动器, 使之产生变形, 对腔体中的液体进行挤压, 最终形成墨滴的喷墨方式。整个喷墨过程均通过喷墨头进行。典型的压电喷射装置由压电驱动器、腔体、蓄墨池、入口和喷嘴几部分构成, 压电式喷头的一维简化示意图见图 1^[2]。

从图 1 可见, 墨滴喷射的整个过程共分为 4 个阶段: (1) 压电驱动器在信号的控制下收缩, 腔内液体处于平衡状态, 喷孔处液面内凹呈新月形; (2) 压电驱动器产生形变, 挤压腔体内部的液体, 导致腔体内部液体压力上升, 喷嘴处液体被加速; (3) 喷孔处压力达到最大值, 此时液面外凸最大呈半球形, 此时喷嘴内部一粒液滴喷出; (4) 压电驱动器恢复原来的形状, 腔体

收稿日期: 2012-06-08

作者简介: 常莹莹(1988—), 女, 湖北人, 江南大学硕士生, 主攻喷墨印刷。

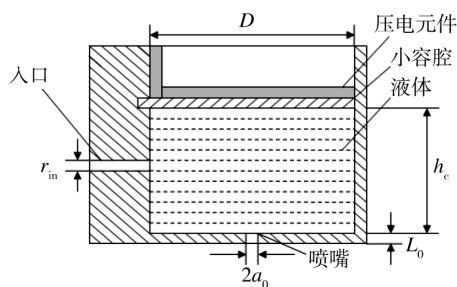


图1 压电式喷墨头示意图

Fig. 1 Simplified schematic of piezoelectric inkjet head

内部产生负压,补充液体,喷嘴处液面内凹成新月形。

笔者只对第2和第3阶段进行模拟分析,研究它们的动态变化。为了方便分析,对喷墨模型的初始条件作如下假定:(1)流体为不可压缩的牛顿流体,且流体的流动为层流流动;(2)流体的性质为常数;(3)管腔边界条件以无滑移边界来处理^[3]。

压电式喷墨的工作周期见图2。

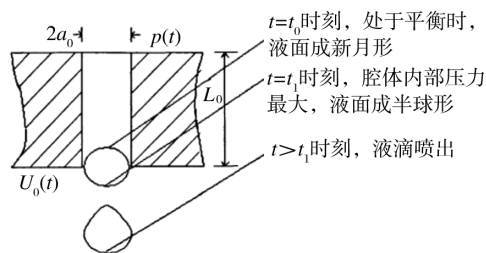


图2 压电式喷墨的工作周期

Fig. 2 Work cycle of piezoelectric inkjet

1.1 液体在腔体中的运动

1.1.1 压电驱动器的受力分析

压电驱动器受到电压的作用,向下运动并挤压液体,但由于压电驱动器自身弹性和刚性对这个过程有着很大的影响,因此在探讨压电驱动器在电压作用下对液体产生的压力大小,需要将压电驱动器自身的性质考虑在其中。将此模型进行简化,则压电元件的受力情况模型可变为图3所示的弹性系统。

根据图3和牛顿第二定律可知:

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} = F(t) - p(t)S - kz \quad (1)$$

结合压电驱动器的性质与所加电压的变化情况,可用下列方程表示出压电驱动器的受力情况:

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} + \left(k + \frac{1}{\beta}\right)h = \frac{\alpha}{\beta}U - pS \quad (2)$$

式中: m 为压电元件的质量; h 为压电元件的纵

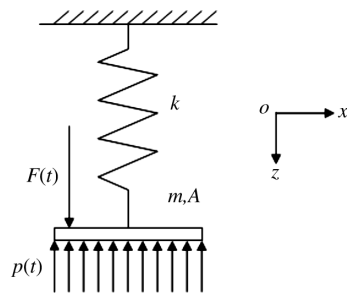


图3 压电元件的简化受力模型

Fig. 3 Simplified force model of piezoelectric actuators

向位移; t 为时间; k 为金属膜片的刚度系数; α 和 β 为常数,由式 $h = \alpha U - \beta F$ 确定; U 为压电元件两端所加的电压, F 为压电元件所受外力; p 为腔体内的压力; S 为金属膜片的面积^[2]。利用式(2)可以清楚的得到所加电压与形成的压力之间的相应关系。

1.1.2 液体在腔体中的运动

液体在腔体中的运动可以用一维波动方程来进行描述,由于液体是连续介质,在研究液体的运动时,可以认为液体是连续地充满它所占据的空间。因此液体在腔体中的运动是满足连续方程和动量守恒方程的。流体在腔体中运动的一维连续方程和动量方程可以下列形式表示:

$$\frac{d}{dt}(\rho A dx) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho A u dx) = \sum F \quad (4)$$

在脉冲的作用下,管体中随之产生的液体运动,式(3)和(4)可以进一步表示为:

$$\frac{1}{\rho a^2} \frac{dp}{dt} + \frac{u}{S} \sigma(x) + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{f u |u|}{2D} = 0 \quad (6)$$

式中: a 表示在流体中的波速; $\sigma(x) = \partial A / \partial x$ 是截面积的变化率; ρ 是液体的密度; f 是沿程摩阻系数,来之于达西-魏斯巴赫公式($h_f = f \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}$),它并不是一个常数值,大多数情况下由实验确定^[4-5]; S 为截面积; D 为管径。通过式(5)和(6)可对液体在腔体中的运动情况进行描述。

1.2 液滴的形成

1.2.1 液滴的形成条件

液滴要正常形成,必须综合考虑到惯性、粘性力和表面张力的影响。对于液滴形成的特点来说,这里

提出 Ohnesorge(Oh)值的概念。因为它能够表达出粘性力和表面张力惯性的平衡关系。油墨的印刷适性是依照 Oh 值的倒数 z 来进行度量的。考虑到墨滴的成形、定位的精准性及允许的最高喷墨效率,将 z 值得可印刷范围定义在 4~14 之间。

$$Oh = \frac{We}{Re^2} = \frac{\eta^2}{\rho \gamma L} \quad (7)$$

式中: γ 为表面张力; η 粘性力; ρ 为密度; L 为特征长度比值(一般情况下用液滴的直径表示); Re 为雷诺数; We 为韦伯数^[6]。如果 Oh 值太小,则液体的表面张力为主要影响参数,微滴喷射之前的液柱将延伸得更长,这通常易产生影响喷射质量的卫星液滴;如果 Oh 值较大,则液体的粘性力为主要影响参数,这样就需要较大的压力来产生液滴,并导致液滴的速度降低,液滴喷射之前的液柱变短。

1.2.2 液滴的喷射

根据压电喷射系统的简化结构模型得到由喷嘴喷出的液体近似体积计算式为:

$$V_n = \int q_n(t) dt \approx \frac{R_r}{R_n + R_r} \int \frac{dV}{dt} dt = \frac{1}{\frac{R_n}{R_r} + 1} \Delta V \quad (8)$$

$$r = \frac{R_n}{R_r} = \frac{l_n S_r^2}{l_r S_n^2} \quad (9)$$

式中: V_n 为压电元件向下运动时,喷嘴处喷出的液体体积; q_n 为压电元件向下运动时,喷嘴处喷出的液体流量; t 为压电元件的作用时间; V 为腔体的容积; ΔV 为压电元件向下运动时,腔体的总容积变化量; R_r 和 R_n 分别为喷头腔体的进口和出口(喷嘴处)的液阻; l_r 和 l_n 分别为腔体进口和出口的长度; S_r 和 S_n 分别为腔体进口和出口的截面积^[7]。式中仅表现出喷嘴的性质和压电驱动器的运动对液滴体积的影响,并未考虑到液体运动到喷嘴外部由于表面张力的影响而产生的液柱断裂回缩情况,因此式(8)只是液滴体积的近似计算,与实际体积有一定的误差。

液体在腔体中运动至喷嘴处,由于液体自身加速到一定的速度。因此可近似看做一段柱状的液体通过喷嘴喷出,柱体液体的速度即为喷嘴内液体的速度。液体要形成液滴必须要克服喷嘴处液面的表面张力作用,因此从能量的角度来看,流出液体的动能等于液滴动能加上剩余表面能这个条件得到满足时,液滴才能形成^[8]:

$$W_0 = W(T) + \sigma O_1 L \quad (10)$$

式中: σ 为液体的比表面能; O_1 是喷嘴周长; L 为液柱的长度; t 是离收缩开始的时间; W_0 为液体发生收缩前的动能; $W(T)$ 为随着收缩的发生液体的动能随时间的变化。

2 实验及分析

前一部分内容对液滴在喷嘴中的运动进行了大体的描述,但是在生产应用中,更关心的是喷墨打印最后的喷射效果,例如喷射液滴形成的时间、液滴的大小以及液滴的速度等。该实验部分选取分析了液体的表面张力和流速对液滴形成时间的影响^[9]。

2.1 表面张力对液滴形成的影响

选取毛细管直径为 1.6 mm,毛细管入口处的初速度为 2.1 mm/s,液体的密度和粘度均保持不变,分别为 1.143 g/cm³ 和 10.9 mP·s。在这种情况下,由于适用于印刷的油墨的表面张力系数有一定的范围,故选取表面张力系数为 40,45,50,55,60,65,70,75 dyn/cm 的 8 种液体来模拟液滴形成情况,实验得到对应的墨滴形成时间分别为 2.54,2.65,2.73,2.94,3.10,3.31,3.54,3.79 s,见图 4。

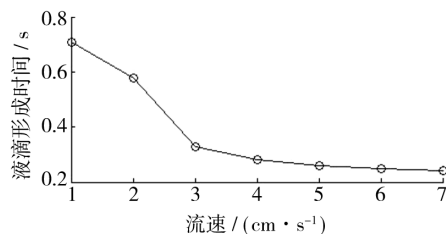


图 4 表面张力对液滴形成时间的影响

Fig. 4 Influence of surface tension on drop formation time

从图 4 中可以看出,曲线呈上升趋势,也就是说,随着表面张力的增大,液滴的形成时间增大。由式(7)分析可知,液滴的表面张力越大则 Oh 值越小,则液滴喷射之前的液柱将延伸的更长,这样液滴形成的时间也会被拉长。

2.2 流速对液滴形成的影响

实验选取毛细管直径仍为 1.6 mm,选取同一种溶液即 85% 并三醇溶液进行试验,设定初速度分别为 1,2,3,4,5,6 和 7 cm/s 等 7 个等间距数值来描述流速对液滴形成的影响趋势,在这 7 种情况下观察得到的液滴形成时间分别为 0.71,0.58,0.33,0.28,0.26,0.25,0.24 s,见图 5。

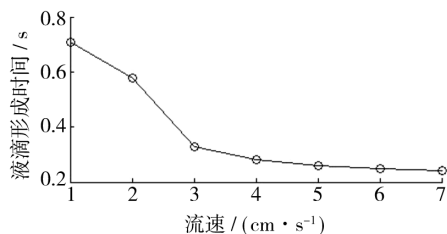


图5 流速对液滴形成时间的影响

Fig. 5 Influence of speed on drop formation time

从图5可以看出曲线呈下降趋势,也就是说液滴的形成时间随着流速的增大而变小。由式(10)可知,液体的流速越大即液体的初始动能越大,在表面能同等变化的情况下,喷嘴外的液体的运动动能也就越大,则形成液滴的时间也就短。

由以上2个实验可以得到液体的表面张力大,形成液滴所需的时间长,液体的流速大,则液滴的形成时间短,实验结果与理论分析是相符的,从而可以证明理论的正确性。

3 结论

通过建立一维模型,分析在压电驱动器作用下,腔体中的液体的受力情况,并结合牛顿第二定律、能量守恒等公式,推出了液体在墨腔中的运动情况,并能有效地表示出腔管中以及在喷口处液体断裂前后过程中液体的运动速度。从而为更好地分析墨滴的形成与影响因素之间的关系提供了一定的理论依据,能达到更好地控制印刷过程的目的,最终印刷出满足条件的印刷品。

参考文献:

- [1] 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,2011,32(19):93-96.
SONG Bo, TANG Zheng-ning. Parameter Analysis of Droplet Ejection of Piezoelectric Ink-jet Printing [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(19): 93-96.
- [2] 魏大忠,张人佶,吴任东,等. 压电驱动微滴喷射过程的数学模型[J]. 中国机械工程,2005,16:611-614.
WEI Da-zhong, ZHANG Ren-ji, WU Ren-dong, et al. Mathematical Model of Piezoelectric Actuated Microdroplet Jetting Process [J]. Chinese Mechanical Engineering, 2005, 16: 611-614.
- [3] 王振宁,唐正宁. 压电喷墨印刷中液滴形成过程的数值模拟[J]. 中国印刷与包装研究,2010(11):190-194.
WANG Zhen-ning, TANG Zheng-ning. Numerical Simulation of Droplet Formation of Piezoelectric Ink-jet Printing [J]. China Printing and Packaging Study, 2010 (11): 190-194.
- [4] CHEN Ping-hei, PENG Hsin-yah, LIU Hsin-yi, et al. Pressure Response and Droplet Ejection of a Piezoelectric Ink-jet Printhead [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1999, 41: 235-248.
- [5] SHIELD T W, BOGY D B, TALKE F E. Drop Formation by DOD Ink-jet Nozzles: A Comparison of Experiment and Numerical Simulation [J]. IBM J RES Develop, 1987, 31: 96-110.
- [6] JANG Daehwan, KIM Dongjo, MOON Jooho. Influence of Fluid Physical Properties on Ink-jet Printability [J]. Department of Materials Science and Engineering, 2009, 25(5): 2629-2635.
- [7] KOLTAY P, STEGER R, BIRKLE G. Microdispenser Array for Highly Parallel and Accurate Liquid Handling: Proceedings of SPIE, Adelaide, December, 17-19, 2001 [C]. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2001.
- [8] 魏大忠,张人佶,吴任东,等. 压电微滴喷射装置的设计[J]. 清华大学学报,2004,44(8):1107-1110.
WEI Da-zhong, ZHANG Ren-ji, WU Ren-dong, et al. Design of the Piezoelectric Droplet Injection Device [J]. J Tsinghua Univ, 2004, 44(8): 1107-1110.
- [9] 王振宁,唐正宁. 液体表面张力和粘度对压电喷射液滴形成影响的数值模拟[J]. 包装工程,2010,31(13):24-27.
WANG Zhen-ning, TANG Zheng-ning. Numerical Simulation of Effect of Liquid Surface Tension and Viscosity on the Droplet Formation of Piezoelectric Ejection [J]. Packaging Engineering, 2010, 13: 24-27.