

喷墨印刷中墨滴分裂过程的研究

邵文, 唐正宁

(江南大学, 无锡 214122)

摘要: 基于 VOF 模型, 利用 Flow3D 软件模拟了墨滴生成和断裂过程。与实验结果对比发现, 墨滴分裂时墨水的粘度和表面张力对主副墨丝的形成具有很大影响; 表面张力是所研究现象的驱动力, 驱动电压对墨丝尾部的速度没有影响。

关键词: 喷墨印刷; VOF 模型; 墨滴速度; 墨滴分裂

中图分类号: TS853⁺.5; TS802.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)01-0088-04

Research on Break off Process of Ink Drop in Inkjet Printing

SHAO Wen, TANG Zheng-ning

(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Ink drop formation and break off processes were simulated using Flow3D based on VOF model. Comparison was made with experiments. The results showed that viscosity and surface tension of ink has great influence on formation of main and secondary tails of ink drop; surface tension is the driving force behind most of the phenomena; the driving voltage has no impact on the tail-end speed.

Key words: inkjet printing; VOF model; ink drop speed; ink drop break off

喷墨印刷是一种液滴喷射技术, 通过计算机控制, 将相应的图形、位置信息转换为脉冲信号, 控制喷头移动和墨滴大小, 并使断裂的墨滴沉积到指定位置形成线条和图案^[1]。墨滴大小直接影响到喷墨印刷的清晰度^[2]; 墨滴速度影响着墨点沉积的准确性, 最终影响着印刷品的质量。笔者研究压电喷墨过程中的墨滴分裂现象。

1 压电喷墨过程

在驱动开始时刻给驱动器施加一个电压, 压电元件充电收缩, 使腔室的体积扩大, 此时在腔室内产生的液压都为负压, 并向油箱方向传播; 当到达油箱处, 因为其体积无限大, 负压力波会完全被反射变成正压力波; 当此正压力波到达腔室的中间, 也就是施加电压的位置, 压电元件放电, 腔室体积变为原来的体积, 产生一个正压力波, 使得原来的正压力波被加强; 加强的正压力波仍然继续传播, 当到达喷嘴处, 会将液

体由喷嘴挤出, 形成一个凸起。如果正压力波足够大的话, 会将液体由喷嘴挤出, 形成一个具有一定速度的液滴^[3]。

采用 VOF 分析法, 利用 Flow3D 软件模拟墨滴形成的具体过程。通道长度为 8 mm, 喷嘴直径 32 μm , 在 10, 20, ..., 80 μs 时观测到的墨滴状态见图 1。

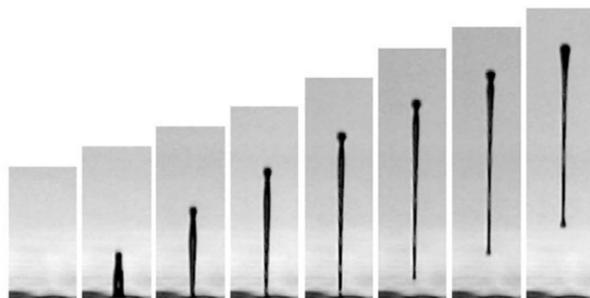


图 1 驱动开始后的墨滴状态

Fig. 1 Ink drop status after drive

所用墨水的粘度为 10 $\text{mPa} \cdot \text{s}$, 表面张力 30 mN/m 。相同情况下墨滴状态的模拟见图 2。

收稿日期: 2011-09-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60776056)

作者简介: 邵文(1988-), 男, 山东人, 江南大学硕士生, 主攻喷墨印刷在电子产品制作中的应用。

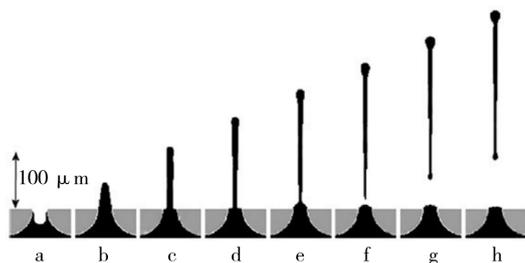


图2 驱动开始后的墨滴状态模拟图

Fig. 2 Simulated ink drop status after drive

在长 8 mm 的通道内,上述过程需要 15~20 μs ,由压力波在通道内总的传播时间决定。见图 1 及 2, 15~20 μs 后,喷嘴口生成具有较高速度的墨滴,刚喷射出的墨滴与弯液面具有相同的速度,达到 20 m/s。但是,由于墨滴拖着细长的墨丝,使得最终墨滴速度降低至 7 m/s,即墨滴形成时的初速度是最终速度的 2~3 倍。墨滴速度的降低主要受墨丝拖阻的影响。

墨滴速度对墨滴分布有很大影响,而且,不仅仅是最终的墨滴速度,由喷嘴喷出后墨滴速度的变化也很重要,因为墨滴速度的变化也会影响墨滴总的飞行时间。

2 墨滴分裂过程

2.1 墨丝形成

低粘度流体,液滴在靠近喷嘴处等体积断裂分离;而高粘度流体,液滴会形成细长墨丝^[4]。墨丝与喷嘴中的弯液面断裂后形成液滴。较高流速情况下,液滴形成过程会慢于液体的流动,导致分裂点转移至喷嘴外部,即形成如喷射型的液滴。

墨丝的性质和断裂的决定因素是表面张力、密度和粘度等墨水性质^[5]。表面张力是断裂后的驱动力,粘度是内部流动现象中特征长度因子的重要参数。表面张力引起拉普拉斯或毛细管压强,该压强与液滴表面的平均曲率成正比。表面张力则与压强梯度成正比。

断裂处曲率半径的增加引起压强梯度的加大,进一步加快了墨水由断裂点流向主墨丝。墨丝最小半径变的比粘度长度因子小时,粘性流体的流动受到抑制,墨丝细化停止,导致生成副墨丝。

2.2 墨丝断裂

断裂发生在曲率变化最大的位置,因为在该位置毛细管压强的变化以及总压强梯度是最大的。由过渡部位至墨滴端部或者喷嘴内的弯液面,平均曲率有很大变化。相对较低的驱动电压频率时,会形成较长的墨丝。此时,墨滴端部的曲率要比喷嘴处的小,所以曲率的最大变化发生在喷嘴内弯液面至过渡部位,断裂出现在弯液面(见图 1,2)。

驱动电压频率较高,意味着前一墨滴的墨丝未断裂时,新墨滴即生成。相应提高频率时,前一墨滴的墨丝会回聚到后一墨滴,见图 3。此时,最大曲率半

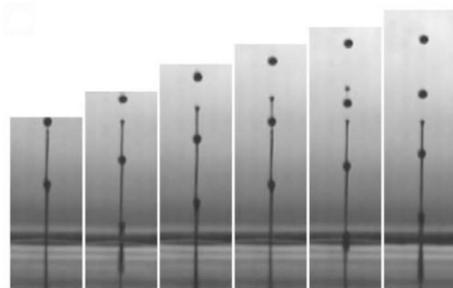


图3 墨滴形成过程

Fig. 3 Ink drop formation process

径不再位于弯液面,而是位于相邻 2 个墨滴中的某一墨滴的端部。由于前一墨滴的曲率半径会比较大,所以断裂出现在前一墨滴端部。

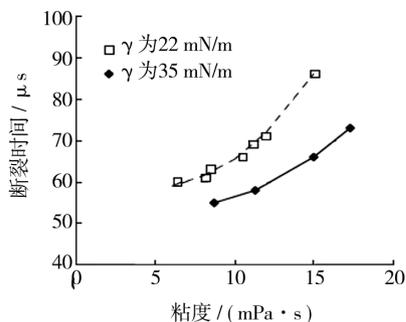
图4 墨水粘度及表面张力 γ 对断裂时间的影响

Fig. 4 Influence of ink viscosity and surface tension on break off time

墨水粘度及表面张力 r 对断裂时间的影响见图 4,虽然驱动电压频率的改变,导致了墨丝断裂的位置发生变化,但是断裂时间不受影响,因此,驱动电压、通道横截面结构、喷嘴内部结构对断裂时间均无影响,仅受粘度、表面张力等墨水性质的影响。该情况

可用液体流动的特征时间因子,即毛细时间因子和粘度时间因子 t_γ 和 t_η 表示为:

$$t_\gamma = \sqrt{\frac{\rho L^3}{\gamma}} \quad (1)$$

$$t_\eta = \frac{\rho L^2}{\eta} \quad (2)$$

式中: γ, ρ 和 η 分别为墨水表面张力、密度和粘度; L 为特征长度。墨丝分裂时,特征长度由粘度长度因子 $L_\eta = \frac{\eta^2}{\rho\gamma}$ 决定^[6]。 $L=L_\eta$ 时,可得:

$$t_\gamma = t_\eta = \frac{\eta^3}{\rho\gamma^2} \quad (3)$$

由图 4 及式(3)可知,高粘度、低表面张力会产生较大的特征时间因子和较长的断裂时间。

2.3 墨丝尾部速度

断裂后,墨丝状态仍可以由一维尺度分析进行描述^[7]。在断裂发生后,墨丝尾部以一定速度分离,由于初期的末端质量很小,而毛细管压强很大,墨丝尾部以非常高的速度分离。墨丝末端则随之增大,因此,毛细管压强降低。根据以下公式,墨丝尾部的速度也随之减小:

$$v_{tip} = 3c \frac{\sqrt{t_\eta}}{2\sqrt{t}(1+t_\eta/L_\eta)} \quad (4)$$

式中: t 是断裂发生后的时间。断裂前最小曲率半径一侧,常量 $c=17.452$;断裂前最大曲率半径一侧, $c=0.4476$ 。

墨丝尾部最初是副墨丝的末端,即断裂前墨丝尾部在最小曲率半径一侧。数微秒后,副墨丝与主墨丝断裂,墨丝尾部此时则为主墨丝末端,即断裂前最大曲率半径一侧。2 种情况下,由式(4)计算得到的最终墨丝尾部的速度见图 5,图中也包含了 Flow 3D 的计算结果。

断裂前,墨丝尾部与喷嘴内的墨水以相同速度运动。 $t=0$ 时,副墨丝由弯液面处断裂。副墨丝的尾部加速到式(4)预测的速度,即断裂前最小曲率半径一侧的速度。 $t=4 \mu\text{s}$ 时,主墨丝与副墨丝分离,主墨丝尾部的速度减速达到断裂前最大曲率半径一侧的速度。 $t=6 \mu\text{s}$ 后,由于墨丝尾部形成墨滴,见图 8,墨丝尾部再次加速,此时的驱动力来自拉普拉斯压强,即毛细管压强。细薄的墨丝会加速更快,原因是毛细管压强较大,而尾部墨水的质量很小。见图 6,相对于 $100 \mu\text{m}$ 的距离上,在至少 $15 \mu\text{s}$ 内的平均速度固定在 6 m/s 。

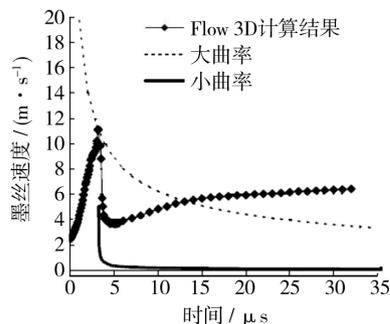


图 5 断裂后墨滴尾部速度的计算值

Fig. 5 Calculated speed of the tail end after break off

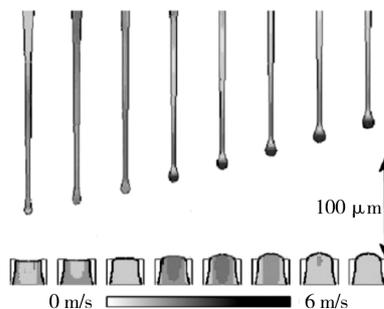


图 6 墨滴尾部生成过程的 Flow3D 模拟图

Fig. 6 Flow3D simulation of the formation of tail end of ink drop

整个现象是墨丝尾部的独立行为,其结果是增加驱动电压时,墨滴端部加速,但墨丝尾部不受影响。见图 7a 和 b,墨滴端部加速飞远后,尾部仍然停留在原来的位置。

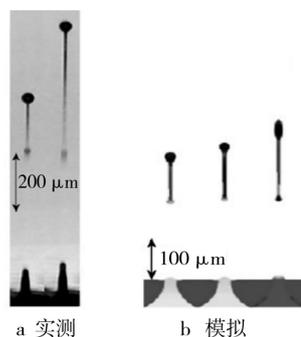


图 7 驱动电压不同时的墨滴形状实际观测图及模拟图

Fig. 7 Measured and simulated shape of the drop with different driving voltage

这意味着墨滴端部具有大于 6 m/s 的速度时,会形成很长的墨丝。为降低墨滴在承印物上分布时速度偏差造成的影响,需要尽可能高的速度,但是,长墨

丝的生成会限制最大合理墨滴速度。

墨滴的最终速度为 6 m/s 时,飞行 1 mm 约用时 $1 \mu\text{s}$,速度每变化 1 m/s,时间会有 $50 \mu\text{s}$ 的变化,见图 8。许多情况下,喷头以相对于承印物以 1 m/s 的

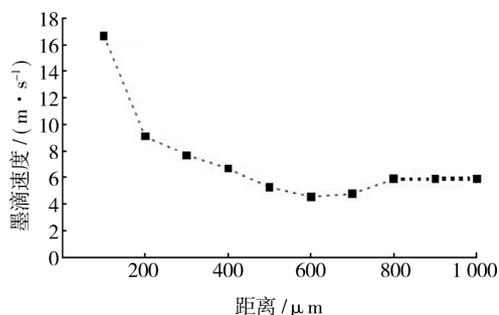


图 8 距喷嘴不同位置测得的墨滴速度

Fig. 8 Measured speed of ink drop at different position to the nozzle

速度运行,因此,墨滴速度变化 1 m/s,会导致墨滴位置偏差 $50 \mu\text{m}$ 。对于高精度喷墨印刷,一般采用 600 dpi 的分辨率,网点尺寸为 $42 \mu\text{m}$,而应用于电子产品生产的喷墨印刷精度要求更高,所以,为提高印刷质量,墨滴速度的变化要远小于 1 m/s。

3 结语

由于墨水的粘度,墨滴生成时产生墨丝,并导致墨滴端部速度的降低。墨丝断裂生成副墨丝,副墨丝最终形成很小的墨滴。最终的墨丝尾部速度主要受墨水粘度、表面张力等自身性质决定,驱动电压的振幅对墨丝尾部的速度没有影响。

参考文献:

- [1] 唐正宁,刘春格. 喷墨印刷技术在超高频天线制作中的应用[J]. 科技导报,2010,28(23):77-80.
TANG Zheng-ning, LIU Chun-ge. Application of Inkjet Printing Technology in the Production of UHF Antennas [J]. Science and Technology Review, 2010, 28(23): 77-80.
- [2] 王灿才. 喷墨印刷质量的分析与研究[J]. 包装工程, 2008, 29(2): 55-57.
WANG Can-cai. Analysis and Research of the Inkjet Printing Quality [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2): 55-57.
- [3] 刘春格,唐正宁. 基于压电喷墨印刷的墨滴速度大小的理论研究[J]. 包装工程, 2010, 31(15): 36-38.
LIU Chun-ge, TANG Zheng-ning. Theoretical Research of the Ink Droplet Velocity Based on Piezoelectric Inkjet Printing [J]. Packaging Engineering, 2010, 31(15): 36-38.
- [4] MORRISON N F, HARLEN O G. Viscoelasticity in Inkjet Printing [J]. Rheol Acta, 2010(49): 619-632.
- [5] JANG D, KIM D, MOON J. Influence of Fluid Physical Properties on Inkjet Printability [J]. Langmuir, 2009, 25: 2629-2635.
- [6] ROTHERT A, RICHTER R, REHBERG I. Formation of a Drop: Viscosity Dependence of Three Flow Regimes [J]. New Journal of Physics, 2003(5): 1-13.
- [7] SHINA Dong-youn, GRASSIAB P, DERBYA B. Numerical and Experimental Comparisons of Mass Transport Rate in a Piezoelectric Drop-on-demand Inkjet Print Head [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004(46): 181-199.