

凹版胶印油墨分离产生卫星液滴研究

张士洲,唐正宁

(江南大学,无锡 214122)

摘要: **目的** 研究凹版胶印过程中的第 3 阶段,即油墨从橡皮布滚筒向承印物转移时,油墨黏度和分离速度对卫星液滴的影响。**方法** 利用 Maxwell 粘弹性模型,从理论的角度分析油墨黏度和分离速度与卫星液滴产生之间的关系,并模拟凹版胶印中油墨转移的第 3 个过程,即油墨在两平板间的分离,论证三者之间的关系。**结果** 分离速度 $v=0.1$ m/s、黏度 $\mu=0.25$ Pa·s 时产生的卫星液滴为 4 个,且大小几乎相同并集中;分离速度和黏度较小时,所产生的卫星液滴数目越少,但其中一定有 1 个最大的卫星液滴;分离速度和黏度较大时,所产生的卫星液滴小而多,且分散。**结论** 分离速度 v 和油墨黏度 μ 与卫星液滴产生的数目成正相关关系,在印刷速度(分离速度)一定时,减少甚至消除“卫星液滴”应当选择低黏度、高弹性模量的油墨,从而降低油墨的应力松弛时间。

关键词: 卫星液滴;分离速度;油墨黏度;凹版胶印

中图分类号: TS853 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2014)13-0150-05

Satellite Droplets Generation from Ink Transferring in Gravure-Offset

ZHANG Shi-zhou, TANG Zheng-ning

(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: Objective To study the effects of ink viscosity and separation speed on the satellite droplets at the third stage of Gravure-Offset process, namely, during the transferring of ink from blanket to substrates. **Methods** From theoretical point of view, the relation between viscosity, separation speed and satellite droplets were analyzed using Maxwell viscoelastic model. We then simulated the third stage of Gravure-Offset process, namely, ink transferring between the two separating plates, in order to demonstrate the relation among them. **Results** When the separation speed v and μ viscosity were 0.1 m/s and 0.25 Pa·s, respectively, there were four relatively concentrated satellite droplets with almost the same size. When the speed v and μ viscosity were low, there were few satellite droplets, but there must be a largest satellite droplet among them. When the speed v and μ viscosity were large, there were many dispersive and small satellite droplets. **Conclusion** The separation speed v and μ ink viscosity were positively correlated with the amount of satellite droplets generated. At a certain printing speed (separation speed), ink with low viscosity and high elasticity should be chosen to decrease the stress relaxation time of the ink, thus reduce or eliminate satellite droplets.

KEY WORDS: satellite droplet; separation speed; ink viscosity; Gravure-Offset

目前,已经能够使用丝网印刷、喷墨印刷和凹版胶印^[1,2]来制造 RFID 电子标签^[3,4]、薄膜晶体管(TFT)、传感器、薄膜太阳能电池、液晶显示器等^[5]。但是,喷墨印刷^[6,7]是一种数字印刷没有印刷压力,其生产速度相对较慢;丝网印刷^[8]由于网孔在刮墨过程中容易变形、扩大,从而会影响其印刷的精度。凹版胶印工艺

收稿日期: 2014-03-11

作者简介: 张士洲(1988—),男,湖北荆州人,江南大学硕士生,主攻凹版胶印技术及其应用。

是在传统的凹版印刷工艺上加上橡皮布滚筒,这样既继承了凹版印刷工艺的高精度、高速的特点,也能适应刚性和柔性承印材料^[9]。

在电子元件的制作过程中,所印制的导电线条是否具有笔直的边缘是决定其质量好坏的关键因素之一^[10]。凹版胶印过程中涉及3次主要的油墨分离^[11-12],油墨从一个表面转移到另一个表面,经历拉伸形成液桥、断裂、回弹,最终完成油墨的分离。当应力作用时间在油墨自身的应力松弛时间以内时,在断裂阶段就会产生“卫星液滴”,这些“卫星液滴”不仅直接影响线条边缘而且污染环境,危害工作人员的健康。对此,利用Maxwell粘弹性模型,从理论的角度分析“卫星液滴”产生的原因;并借助Ansys12.0模拟凹版胶印中油墨转移的第3个过程(油墨从橡皮布上转移到基材表面),论证如何控制“卫星液滴”的产生。

1 “卫星液滴”产生的理论机制

用于印刷电子中的导电油墨为非牛顿流体,也是一种粘弹性流体,这种粘弹性流体在分离过程中会产生“卫星液滴”,Maxwell粘弹性模型可以很好地解释其产生的原因。Maxwell粘弹性模型把粘弹性行为模拟成2部分:一部分是纯弹性的弹簧,弹性模量为 G ;另一部分是纯粘性的粘壶,粘度为 μ 。采用弹簧和粘壶的串联来分析油墨的粘弹性行为。Maxwell粘壶模型的原理见图1。

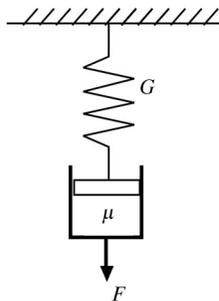


图1 Maxwell粘壶模型原理
Fig.1 the schematic diagram of Maxwell viscoelastic model

对于粘弹性流体,弹性和粘性共存。当弹性的作用相对于粘性的作用占主导地位时,可以作为弹性体分析;反之,当粘性作用占主导地位时,可以作为粘性流体进行分析。对于Maxwell粘壶模型,总的应变 $\varepsilon_{总}$ 是弹性应变 $\varepsilon_{弹}$ 与粘性应变 $\varepsilon_{粘}$ 之和($\varepsilon_{总} = \varepsilon_{弹} + \varepsilon_{粘}$)。

因此,总的应变 $\varepsilon_{总}$ 对时间 t 的导数为:

$$\frac{d\varepsilon_{总}}{dt} = \frac{d\varepsilon_{弹}}{dt} + \frac{d\varepsilon_{粘}}{dt} = \frac{1}{G} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\mu} \quad (1)$$

式中: G 为弹性模量(体积模量); μ 为流体的黏度; ε 为应变; σ 为应力; t 为时间。应力松弛时间 λ 是总的变形量 $\varepsilon_{总}$ 随时间 t 的变形率为0时(即 $\frac{d\varepsilon_{总}}{dt} = 0$)的解,也是方程(1)的解,此时粘性行为和弹性行为共存,即:

$$\frac{1}{G} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\mu} = 0 \quad (2)$$

设初始应力为 σ_0 ,令 $\lambda = \frac{\mu}{G}$,解方程得:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-t/\lambda} \quad (3)$$

以时间 t 为横坐标,应力 σ 为纵坐标,得应力松弛特征曲线见图2。应力松弛特征曲线的物理意义是:在应变一定时($\frac{d\varepsilon}{dt} = 0$),应力会随着时间的推移逐渐减小,直至趋于零。

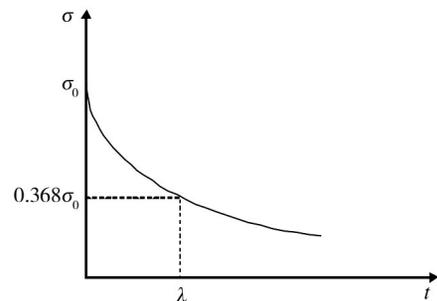


图2 应力松弛特征曲线
Fig2 characteristic curve of stress relaxation

$\lambda = \frac{\mu}{G}$ 即为应力松弛时间,是材料的本身属性,由黏度 μ 和弹性模量 G 决定。从Maxwell粘弹性模型的角度,对于油墨在分离和转移过程中,之所以能够产生“卫星液滴”,是因为应力作用时间 t 在油墨应力松弛时间 λ 以内,即 $t < \lambda = \frac{\mu}{G}$ 。当所选择的油墨一定时,流体的黏度 μ 和体积模量 G 也就一定,那么油墨的应力松弛时间 $\lambda = \frac{\mu}{G}$ 也就唯一。如果分离速度 v 较大,那么应力作用时间 t 就较小,当 $t < \lambda$ 时,此时油墨表现出弹性行为,油墨容易聚集大量的弹性势能来不及转化为粘性形变,这样在液丝断裂的时候就容

易产生“卫星液滴”;当分离速度 v 一定时,那么应力作用时间 t 就一定,如果油墨黏度 μ 较大,体积模量 G 较小,此时也会出现应力作用时间 $t < \lambda = \frac{\mu}{G}$,油墨容易表现出弹性行为,而产生“卫星液滴”。

2 模拟分析

为了验证上述分离速度 v 和油墨粘度 μ 对“卫星液滴”产生的影响,采用Ansys12.0模拟分析凹版胶印油墨转移过程中的第3阶段,即油墨在橡皮布和承印基材之间的分离过程。此分离过程可以用油墨在2平板之间的分离模型来代替。采用Ansys模拟油墨在两平板间的分离需经过模型的建立、网格划分、环境参数和流体性质参数的设定、求解以及后处理,从而得到各情况下的轮廓图。采用能够描述此种粘弹性流体特性的Carreau模型: $\mu = \mu_0 [1 + (\lambda \dot{\epsilon})^2]^{(n-1)/2}$ 。其中, μ 为黏度; μ_0 为0剪切率时的黏度; λ 为特征时间常量; $\dot{\epsilon}$ 为剪切率; n 为幂律指数。这里的特征时间常量 $\lambda = 0.7$ s,幂律指数 $n = 0.72$,由此最终的Carreau方程为:

$$\lg \left(\frac{\mu}{\mu_0} \right) = -0.14 \lg (1 + 0.49 \dot{\epsilon}^2) \quad (4)$$

该项研究中不考虑液滴的重力,对于其界面重构采用VOF方法,所用的N-S方程为不可压缩粘性控制方程:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot (\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu}{\rho} \nabla \cdot (\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) \quad (6)$$

见图3,是液滴在2平板间分离的初始网格模型,无滑移的边界条件被用到了底部和顶部的网墙上,左右边界作为固定的压力出口。在计算中,中心线的位置用到了对称的边界条件。在固体边界,自由表面和网墙接触的位置形成接触线。虽然在求解控制方程时,用到了非滑移的边界条件,但是接触线是允许在网墙上自由移动的,在自由表面重构时,接触角保持恒定。在此次模拟中,下面的网墙(下版)是固定的,上面的网墙是垂直向上运动。Ansys首先用有限元的方法对上述控制方程离散化,对每个网格依次计算,每个时间步长对整体计算1次,该项研究中所设定的时间步长是 $\Delta t = 0.1 \mu\text{s}$,设定的终止时间是 $t = 90 \mu\text{s}$,即需完成900次的计算。表1列出了模

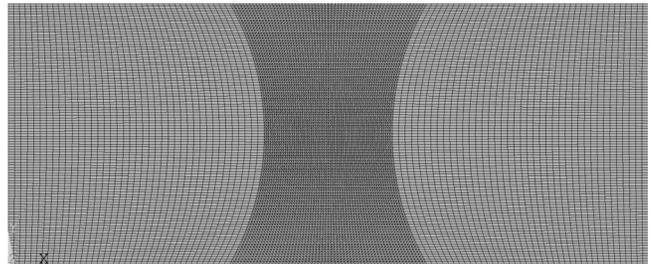


图3 网格模型

Fig.3 mesh model

表1 几何和流体性质参数

Table1 Parameters of geometry and Fluid properties

参数名称	参数值
液体的密度 $\rho_l / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2000
油墨的初始黏度 $\mu_l / (\text{Ns} \cdot \text{m}^{-2})$	0.25
表面张力系数 $\sigma / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	0.03
周围空气的密度 $\rho_g / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.22
周围空气的初始粘度 $\mu_g / (\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2})$	1.18×10^{-5}
重力加速度/g	0
上、下两板的长度 $L / \mu\text{m}$	20
液体的体积(面积) $S_0 / \mu\text{m}^2$	32
两版间的初始距离 $d_0 / \mu\text{m}$	8
计算的时间步长 $\Delta t / \mu\text{s}$	0.01
分离速度 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.1

型的几何和流体性质参数。

2.1 分离速度对“卫星液滴”的影响

图4显示了分离速度对附液滴产生影响的轮廓。为了研究分离速度和“卫星液滴”之间的关系,保持了油墨黏度 $\mu_l = 0.25 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,设计了4组分离速度 v ,分别为0.05, 0.1, 0.2, 0.4 m/s,油墨与上下两板的接触角均为 60° 。从图4中可以看出,对于非牛顿流体性质的油墨在这4种分离速度下都会产生“卫星液滴”;随着分离速度的增加,“卫星液滴”的数量也在增加,这是因为在油墨本身黏度 μ 固定的情况下,其自身的应力松弛时间 λ 也固定。当分离速度 v 越大,应力作用的时间 t 越小,更加容易表现出弹性行为,液丝所聚集的弹性势能越大,液丝断裂时所形成的附液滴也就越多。反之,当分离速度 v 越小时,应力作用的时间 t 越大,液丝在断裂时聚集的弹性势能小,产生“卫星液滴”的数量也较少。

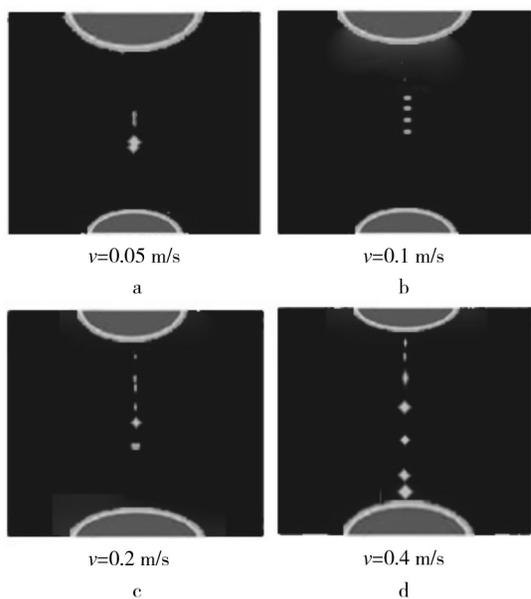


图4 分离速度对卫星液滴产生的影响

Fig4 Effect of separation speed on the satellite droplets

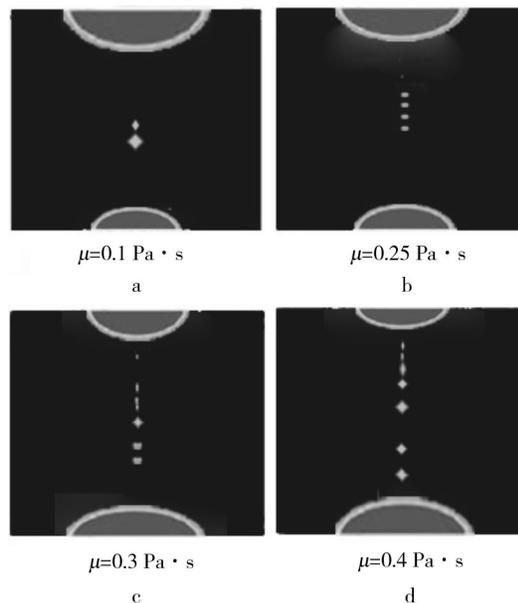


图5 油墨黏度对卫星液滴产生的影响

Fig.5 Effect of ink viscosity on the satellite droplets

2.2 油墨黏度对“卫星液滴”的影响

见图5,显示了油墨黏度对附液滴产生影响的轮廓图。为了研究油墨黏度和“卫星液滴”之间的关系,保持了分离速度 $v=0.1\text{ m/s}$,设计了4组油墨黏度 μ ,分别为 $0.1, 0.25, 0.3, 0.4\text{ Pa}\cdot\text{s}$,油墨与上下两板的接触角均为 60° 。从图5中可以看出,对于非牛顿流体性质的油墨都会产生“卫星液滴”;随着油墨黏度的增加,“卫星液滴”的数量也在增加,这是因为油墨黏度越大,则油墨本身的应力松弛时间 λ 就越大,在分离速度 v 固定的条件下,应力作用时间 t 也是固定的,当油墨黏度 μ 较大时,也就意味着应力作用时间 t 较油墨的应力松弛时间 λ 小,更加容易表现出弹性行为,液丝所聚集的弹性势能越大,液丝断裂时所形成的“卫星液滴”也就越多。反之,油墨黏度 μ 较小时,也就意味着应力作用时间 t 较油墨的应力松弛时间 λ 大,液丝在断裂时聚集的弹性势能小,产生的“卫星液滴”的数量也较少。

由于所研究油墨的流体性质为非牛顿流体,“卫星液滴”一定会产生。分离速度 v 越大,应力作用的时间 t 越小,更加容易表现出弹性行为,液丝所聚集的弹性势能越大,液丝断裂时所形成的“卫星液滴”也就越多;油墨黏度 μ 越大,则油墨本身的应力松弛时间 λ 就越大,再分离速度 v 固定的条件下,应力作用时间 t

也是固定的,当油墨黏度 μ 较大时,也就意味着应力作用时间 t 较油墨的应力松弛时间 λ 小,更加容易表现出弹性行为,液丝所聚集的弹性势能越大,液丝断裂时所形成的“卫星液滴”也就越多。分离速度 v 和油墨黏度 μ 与卫星液滴产生的数目成正相关的关系;当分离速度 $v=0.1\text{ m/s}$ 、黏度 $\mu=0.25\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时产生的卫星液滴为4个,大小几乎相同且集中;分离速度 v 和黏度 μ 较小时,所产生的卫星液滴数目越少,但其中一定有1个最大的卫星液滴;分离速度和黏度较大时,所产生的卫星液滴小而多,且分散。

3 结语

利用Maxwell粘弹性模型从理论的角度解释了“卫星液滴”产生的机制,并模拟凹版胶印中油墨转移的第3个过程,论证三者之间的关系,得出分离速度和油墨黏度与卫星液滴产生的数目成正相关的关系。提出要想减少甚至消除“卫星液滴”,在印刷速度(分离速度)一定时,应当选择低黏度、高弹性模量的油墨,从而降低油墨的应力松弛时间。

参考文献:

- [1] MENARD E, PARK J, JEON S, et al. Micro and Nanopatterning Techniques for Organic Electronic and Optoelectronic

- Systems[J]. Chemical Reviews, 2007, 107: 1117—1160.
- [2] BOEUF J. Plasma Display Panels: Physics, Recent Developments and Key Issues[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36: 53.
- [3] LEE T M, NOH J H, KIM C H, et al. Development of a Gravure Offset Printing System for the Printing Electrodes of Flat Panel Display[J]. Thin Solid Films, 2010, 518(12): 3355—3359.
- [4] JUNG M, KIM J, NOH J, et al. All-Printed and Roll to Roll Printable 13.56 MHz Operated 1 Bit RF Tag on Plastic Foils [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2010, 57(3): 571—580.
- [5] ALSAID D A, REBROSOVA E, JOYCE M. Gravure Printing of ITO Transparent Electrodes for Applications in Flexible Electronics[J]. Display Technology, 2012, 8(7): 391—396.
- [6] 沈丽燕, 钱军浩. 基于喷墨印刷的RFID标签天线性价比优化方法研究[J]. 包装工程, 2012, 33(15): 121—124.
SHEN Li-yan, QIAN Jun-hao. Cost-effective Optimization of RFID Tag Antenna by Ink-jet Printing[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(15): 121—124.
- [7] 陈剑锋, 唐正宁, 李俊峰. 喷墨印刷纸上液滴的铺展机制研究[J]. 包装工程, 2012, 33(23): 129—132.
CHEN Jian-feng, TANG Zheng-ning, LI Jun-feng. On Drop-let Spreading Mechanism on Ink-jet Paper[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(23): 129—132
- [8] 李俊峰, 唐正宁, 黄蜜. 丝网印刷中油墨流变分裂转移理论的修正[J]. 包装工程, 2011, 32(9): 94—97.
LI Jun-feng, TANG Zheng-ning, HUANG Mi. Modification of Ink Rheology Splitting Transfer Theory in Screen Printing[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(9): 94—97
- [9] LANTTO V. Gravure Offset Printing[M]. Oulu: Oulu University Press, 2008.
- [10] 刘筱霞, 陈春霞. 现代电子标签及其印刷技术[J]. 包装工程, 2008, 29(5): 190—192.
LIU Xiao-xia, CHEN Chun-xia. Modern Radio Frequency Identification and Its Printing Technology[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(5): 190—192.
- [11] 夏雪, 唐正宁. 凹版胶印油墨传递过程对印品质量的影响[J]. 包装工程, 2009, 30(2): 82—84.
XIA Xue, TANG Zheng-ning. Influence of Ink Transfer Process of Gravure Offset Printing on Print Quality[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(2): 82—84.
- [12] 王奇, 唐正宁, 刘孟才. 凹版胶印中印刷夹角对油墨转移的影响[J]. 包装工程, 2012, 33(13): 14—17.
WANG QI, TANG Zheng-ning, LIU Meng-cai. Influence of Printing Angle on Ink Transfer in Gravure-offset Printing[J]. Packaging Engineering, 2012, 30(13): 14—17.
- [13] PUDAS M. Gravure-Offset Printing the Manufacture of Ultra Fine Line Thick-Films for Electronics[D]. Oulu: Oulu University, 2004.
- [14] CHOI N, WEE H, NAM S. A Modified Offset Roll Printing for Thin Film Transistor Applications[J]. Microelectronic Engineering, 2012, 91: 93—97.
- [15] ALEJANDRO. Roll Printed Electronics: Development and Scaling of Gravure Printing Techniques[D]. Berkeley: University of California, 2009.

(上接第95页)

- [12] WATANABE K, DOOLEY R B. Supplementary Release on Backward Equations for Region 3[C]// The International Association for the Properties of Water and Steam, Kyoto, Japan, 2004: 1—34.
- [13] 孟丹, 高军. 机械设计参数优化[J]. 天津商学院学报, 2007, 27(3): 41—44.
MENG Dan, GAO Jun. Mechanical Design of Parameter Optimization[J]. Journal of Tianjin University of Commerce, 2007, 27(3): 41—44.
- [14] JAMES M L, JOS J G, JOHN E P. Parameter Optimization[M]. Springer New York, 2014.
- [15] WANG Zheng-jia, WANG Yu-hui, YIN Zhou-ping. A Multi-physics Simulation Based Parameters Optimization for Anisotropic Conductive Adhesive Interconnection in Electronic Packaging[C]// Intelligent Robotics and Applications, 2008: 896—905.