

## 凹版胶印中印刷夹角对油墨转移的影响

王奇, 唐正宁, 刘孟才, 李俊锋, 宋波

(江南大学, 无锡 214122)

**摘要:** 对凹版胶印中油墨转移过程进行了分析, 并且针对油墨剪切力建立了理论模型。印刷方向与印刷线条方向的夹角增大会导致剪切力的减小, 从而减小油墨的转移量, 且线宽越小受这种影响就越大。使用 30  $\mu\text{m}$  和 80  $\mu\text{m}$  两种线宽进行实验, 以验证印刷夹角对剪切力和油墨转移的影响。结果表明, 印刷导线的横截面积随着印刷夹角的增大而减少, 且 30  $\mu\text{m}$  线宽的印刷导线受印刷夹角的影响更大一些。通过分析实验数据对理论模型进行了优化, 进一步提高了模型的精度。

**关键词:** 凹版胶印; 印刷夹角; 油墨转移; 剪切力

**中图分类号:** TS085; TS807 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)13-0014-04

### Influence of Printing Angle on Ink Transfer in Gravure-offset Printing

WANG Qi, TANG Zheng-ning, LIU Meng-cai, LI Jun-feng, SONG Bo

(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** The ink transfer process was analyzed and a shear force model was established. The shear force decreases when the angle between printing direction and the printed line increases. This effect is more significant when thin lines are printed. Lines with width of 30 and 80 micrometers were printed to verify the shear force model. The result showed that the cross sectional areas of printed lines decrease when the print angle increases, and the 30-micrometer-wide lines suffer more from this effect. The model was optimized based on experiment result to improve its accuracy.

**Key words:** gravure-offset; printing angle; ink transfer; shear force

在过去的十几年中, 导电油墨的应用为一些电子产品提供了高效的生产方式, 例如印刷晶体管电路、柔性显示器、RFID 标签、电磁波干扰屏蔽膜和触摸显示屏等。和传统的蚀刻工艺相比, 印刷方法更简单明了, 成本更低, 污染更小<sup>[1]</sup>。目前用于电子制造的印刷方式有喷墨印刷、凹版印刷、丝网印刷、柔性版印刷等。在众多的印刷工艺中, 凹版胶印被认为是最有竞争力的方法, 因为它可以适用于刚性和柔性 2 种基材, 并且有较高的分辨率和生产效率。

很多学者针对凹版胶印的油墨转移过程进行了理论分析和仿真研究。Schwartz 等人在 1998 年提出了油墨从网穴中分离的简化物理模型。模型建立在一个润滑模型基础上, 对三维不稳定的液体运动系统进行了仿真。Yin 和 Kumar 用一维润滑模型研究了网穴之间的液体流动, 模型中以雷诺方程控制流体, 网墙会影响流体的平衡位置。Wei-xi Huang 和 Dewan Hasan

Ahmed 等人在 2008 年和 2010 年分别进行了针对牛顿流体和非牛顿流体的凹版胶印油墨分离过程的仿真, 把油墨的转移过程分为拉伸、断裂和回弹 3 个阶段, 研究了接触角、表面张力和印刷速度对油墨转移率的影响<sup>[2]</sup>。针对油墨从凹印网穴中分离的过程受到的剪切作用, 笔者提出了一个新的理论模型, 研究了印刷方向和印刷图案方向的夹角(以下称印刷夹角)对油墨转移的影响。

### 1 凹版胶印的油墨转移过程

在凹版胶印过程中, 凹版滚筒首先从墨槽中上墨, 经刮墨刀刮墨之后去除多余的油墨。印版滚筒与橡皮布滚筒合压, 将油墨转移到橡皮布滚筒表面, 之后橡皮布滚筒和压印滚筒挤压接触, 将油墨转移到承印物上, 经干燥装置干燥后形成需要的线形<sup>[3]</sup>。凹版胶印的油

收稿日期: 2012-05-05

作者简介: 王奇(1988—), 男, 山东临沂人, 江南大学硕士生, 主攻凹版胶印技术。

墨转移过程见图 1。

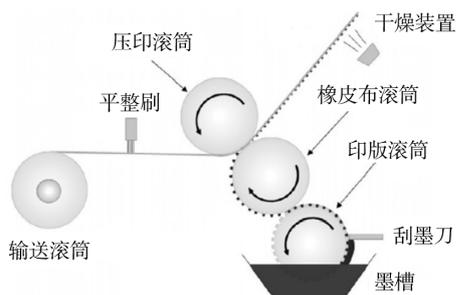


图 1 凹版胶印油墨转移示意

Fig. 1 Schematic of gravure offset ink transfer

## 2 油墨转移的剪切力模型

### 2.1 油墨从网穴中转移时的受力分析

在实际的印刷过程中,油墨从凹版网穴到橡皮布上的转移率,要小于从橡皮布上到承印物上的转移率,通常油墨的转移率主要受前者的影响<sup>[4]</sup>。对油墨从凹印网穴中分离的过程进行建模分析,并且重点研究印刷夹角对剪切力的影响。

雷诺数  $R_e$  在流体运动中常用来描述惯性力和粘滞力的比值,对于凹版胶印中常用的导电油墨,  $R_e < 0.01$ <sup>[5]</sup>,因此在分析油墨从网穴中转移的过程中应主要考虑粘性力的影响。油墨的受力情况见图 2。  $F_g$  为

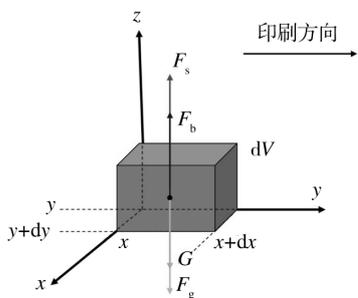


图 2 油墨转移过程的受力分析

Fig. 2 Force analysis of ink in transfer process

印版端( $z$ 轴负方向)的油墨的粘着力,  $F_b$  为橡皮布端( $z$ 轴正方向)油墨的粘着力,  $F_s$  为已转移油墨对未转移油墨的剪切力,  $G$  是油墨自身的重力。这些作用力的合力为:

$$F = F_b + F_s - F_g - G \quad (1)$$

### 2.2 印刷夹角为 0 时的剪切力分析

建立如图 2 所示坐标系,  $x, y, z$  分别是在印刷平面内和印刷方向垂直的方向、印刷方向以及和印刷平面垂直向上的方向。  $u, v, w$  分别为  $x, y, z$  方向的速度。

根据粘性不可压缩流体的剪切力计算,可知油墨所受到的剪切力为:

$$F_s = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (2)$$

凹版胶印中使用的油墨为非牛顿流体,表面张力很小,有很强的剪切稀化效应,其黏度最适合使用 Carreau 模型来描述<sup>[6]</sup>,即:

$$\mu = \mu_0 [1 + (\lambda \dot{\gamma}^2)]^{\frac{n-1}{2}}$$

其中:  $\mu_0$  为剪切率为 0 时油墨的黏度;  $\lambda$  为时间常量;  $n$  为幂律指数;  $\dot{\gamma}$  为剪切率。一个无穷小体积  $dV$  油墨所受到的剪切力为:

$$dF_s = \mu_0 [1 + (\lambda \dot{\gamma}^2)]^{\frac{n-1}{2}} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

考虑到凹版网墙的影响,可设置权重系数  $a$  和  $b$  ( $0 \leq a, b \leq 1$ ),则剪切力的表达式变为:

$$dF_s = \mu_0 [1 + (\lambda \dot{\gamma}^2)]^{\frac{n-1}{2}} \left( a \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + b \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

当印刷夹角  $\theta = 0$  时,可以忽略网墙对  $y$  方向的影响,即  $b = 1$ 。此时  $x$  方向的速度分量为 0,则剪切力可以描述为:

$$F_{s(\theta=0)} = \int_V dF_{s(\theta=0)} dV = \int_V \mu_0 [1 + (\lambda \dot{\gamma}^2)]^{\frac{n-1}{2}} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} dV \quad (5)$$

### 2.3 印刷夹角不为 0 时的剪切力分析

当印刷方向和线形方向有一定夹角,即  $0 < \theta \leq 90^\circ$  时,需建立新的坐标系,见图 3。  $X, Y$  分别为印刷导

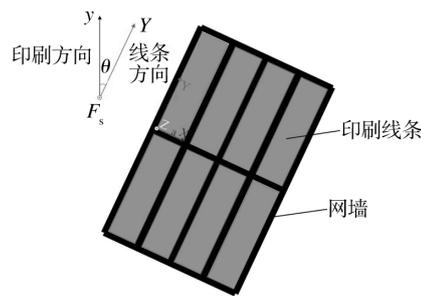


图 3  $0 < \theta \leq 90^\circ$  时的坐标系

Fig. 3 Coordinate system when  $0 < \theta \leq 90^\circ$

线方向和其垂直方向。在新的坐标系下,剪切力的计算公式为:

$$dF_s = \mu_0 [1 + (\lambda \dot{\gamma}^2)]^{\frac{n-1}{2}} \left( a \frac{\partial^2 w}{\partial X^2} + b \frac{\partial^2 w}{\partial Y^2} \right) \quad (6)$$

通过旋转变形,可以得到:

$$y = X \sin \theta$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial X^2} = \frac{\partial}{\partial X} \frac{\partial w}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial X} \frac{\partial y}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} \sin \theta \frac{\partial y}{\partial X} =$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \sin^2 \theta$$

同理,  $\frac{\partial^2 w}{\partial Y^2} = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \cos^2 \theta$ , 所以:

$$dF_s = \mu_0 [1 + (\lambda \gamma^2)]^{\frac{n-1}{2}} \left( a \frac{\partial^2 w}{\partial X^2} + b \frac{\partial^2 w}{\partial Y^2} \right) =$$

$$\mu_0 [1 + (\lambda \gamma^2)]^{\frac{n-1}{2}} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} (a \sin^2 \theta + b \cos^2 \theta)$$

$$F_s = \int_V \mu_0 [1 + (\lambda \gamma^2)]^{\frac{n-1}{2}} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} (a \sin^2 \theta +$$

$$b \cos^2 \theta) dV = F_{s(\theta=0)} (a \sin^2 \theta + b \cos^2 \theta) \quad (7)$$

如果印刷线足够大,则网墙的效果可以忽略,即  $a=b=1$ 。此时  $F_s = F_{s(\theta=0)}$ ,即任意方向上的剪切力都和  $\theta=0^\circ$  的时候相同。对于较窄的印刷线,即  $a \ll b < 1$  时, X 方向所受到的阻力更大,此时:

$$F_s = F_{s(\theta=0)} (a \sin^2 \theta + b \cos^2 \theta) = F_{s(\theta=0)} b \left( \frac{a}{b} \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \right) = F_{s(\theta=0)} b \cos^2 \theta \quad (8)$$

油墨的受力情况为:

$$F = F_b - F_g - G + F_{s(\theta=0)} b \cos^2 \theta \quad (9)$$

剪切力会随着印刷夹角的变大而变小,在  $\theta=90^\circ$  时取得最小值,此时的油墨转移率也应该为最小。

### 3 实验验证

#### 3.1 方法

为验证印刷夹角对油墨转移的影响,使用凹版胶印系统来进行实验。使用的油墨粘度为  $10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,剪切率为  $0.02$ ,毛细管数  $C_a$  很大。这说明印刷过程中剪切力会占主导作用,可以暂不考虑油墨表面张力的影响<sup>[6]</sup>。实验中使用的印版形状见图 4,分  $30 \mu\text{m}$  和  $80 \mu\text{m}$  2 种线宽。

#### 3.2 结果分析

印刷导电线的电导为  $G = \frac{S}{\rho l}$ 。其中  $S$  为导电线的横截面积; $\rho$  为导电线的电阻率,主要和油墨属性有关; $l$  为导电线的长度。这样印刷导电线的导电性能主要和横截面积  $S$  有关,横截面积也直接受油墨转移量的影响,因此实验中重点分析印刷导线横截面积的变化。导电线的横截面可以近似为矩形,通过测量印刷导电线的线宽和线高,可计算导电线的横截面积。

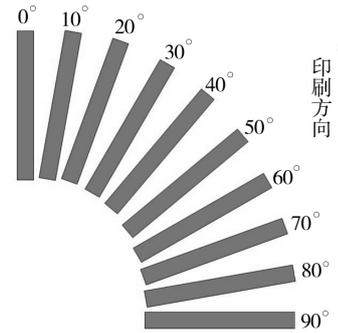
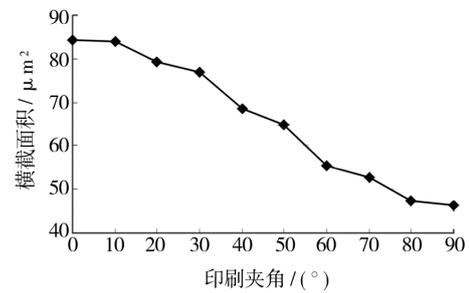


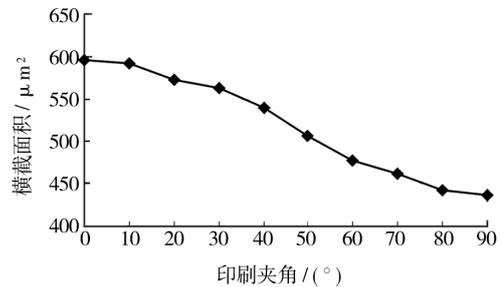
图 4 印版上的线条形状

Fig. 4 Shape of lines in the gravure plate

实验结果见图 5。



a 30 μm 宽导线



b 80 μm 宽导线

图 5 导电线的横截面积

Fig. 5 The cross section areas of wide lines

由图 5 可知,导电线的横截面积都随着印刷夹角的增大而减小,夹角为  $90^\circ$  时取得最小值。 $30 \mu\text{m}$  宽导线横截面积的最大变化率为  $44.9\%$ ,  $80 \mu\text{m}$  宽导线横截面积的最大变化率为  $26.6\%$ ,可见窄的导电线受到印刷夹角的影响更大。

#### 3.3 剪切力模型的验证与优化

若油墨从橡皮布到承印物可实现  $100\%$  转移,则可假定油墨的转移量(以横截面积  $S$  表示)与油墨在网穴中分离时受到的力成线性关系,比例系数为  $k$ <sup>[7]</sup>。实验中印刷导电线都相对较窄,可以使用式(9)进行计算。为了验证剪切力模型,可以用下面的方法

进行计算分析。

$$\text{令: } S^* = \frac{S_\theta - S_{90}}{S_0 - S_{90}} \times 100\%$$

根据式(9),可知:

$$S^* = [k(F_b - F_g - G + F_{s(\theta=0)} b \cos^2 \theta) - k(F_b - F_g - G + F_{s(\theta=0)} b \cos^2 90^\circ)] / [k(F_b - F_g - G + F_{s(\theta=0)} b \cos^2 0^\circ) - k(F_b - F_g - G + F_{s(\theta=0)} b \cos^2 90^\circ)] \times 100\% = \cos^2 \theta$$

实验数据和理论曲线的对比见图 6, 2 种线宽和

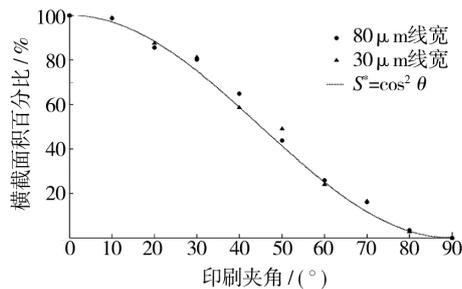


图 6 实验数据和优化前的理论曲线

Fig. 6 Experimental results and theoretical curve before correction

理论值之间的标准差分别为  $\sigma_{30} = 0.0352$ ,  $\sigma_{80} = 0.0313$ , 实验数据和理论推导吻合, 验证了理论模型。但是还可以对理论曲线进一步进行优化。将实验数据导入 MATLAB R2011a, 使用最小二乘法对  $\cos \theta$  的次数进行修正。修正结果发现  $S^* = \cos^{1.8} \theta$  时, 曲线拟合的误差最小。优化后 2 种线宽与理论值之间的标准差分别为  $\sigma'_{30} = 0.0278$ ,  $\sigma'_{80} = 0.0216$ , 比优化前分别降低了 21% 和 31%。优化结果见图 7。

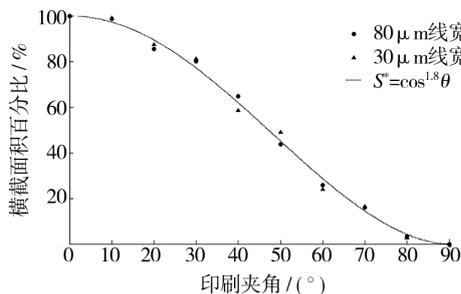


图 7 实验数据和优化后的理论曲线

Fig. 7 Experimental results and theoretical curve after correction

优化后印刷导电线的横截面积可以表示为:

$$S_\theta = (S_0 - S_{90}) \cos^{1.8} \theta + S_{90} \quad (10)$$

## 4 结论

在研究凹版胶印油墨转移过程中, 针对剪切力的作用建立了一个理论模型, 证明了印刷夹角对剪切力的影响。模型解释了夹角增大引起油墨转移率下降的原因, 也说明了较窄的导电线更容易受印刷夹角的影响。实验结果和理论模型比较吻合, 并且通过实验数据的分析对模型进行了优化, 进一步提高了模型精度。研究对实际的凹版胶印生产具有指导意义, 同时对其他印刷工艺中印刷夹角的研究也具有一定的参照作用。下一步还需要研究印刷速度、印刷材料等对剪切力的影响以及其他应力对凹版胶印油墨转移的影响。

### 参考文献:

- [1] CHOI B-O, KIM C H, KIM D S. Manufacturing Ultra-High-Frequency Radio Frequency Identification Tag Antennas by Multilayer Printings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 224: 149.
- [2] 夏雪, 唐正宁. 凹版胶印油墨传递过程对印刷质量的影响[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]. Packing Engineering, 2009, 30(2): 82-84.
- [3] MARKKU L. Gravure offset printing for fabrication of electronic devices and Integrated Components in LTCC Modules[D]. Oulu: University of Oulu, 2008.
- [4] 夏雪. 凹版胶印过程分析——凹版胶印过程中油墨传递模型的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.  
XIA Xue. Analysis of Gravure Offset Printing Process——Research of Ink Transfer Model of Gravure Offset Printing [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009.
- [5] HUANG Wei-xi, LEE Seung-Hyun, SUNG Hyung Jin. Simulation of Liquid Transfer Between Separating Walls for Modeling Micro-Gravure-Offset Printing[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29(5): 1436-1446.
- [6] AHMED Dewan-Hasan, SUNG Hyung-Jin, KIM Dong-Soo. Simulation of non-Newtonian Ink Transfer between Two Separating Plates for Gravure-Offset Printing[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2011, 32(1): 298-307.
- [7] LEE Taik-Min, LEE Seung-Hyun, NOH Jae-Ho, et al. The Effect of Shear Force on Ink Transfer in Gravure Offset Printing[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2010, 20(12): 125026.