

# 凹胶印刷电子油墨铺展过程分析及实验

刘世朴<sup>1a,1b,2</sup>, 李艳<sup>1a,1b,2</sup>, 王麒麟<sup>3</sup>

(1.北京印刷学院 a.机电工程学院 b.数字化印刷装备北京市重点实验室, 北京 102600;  
2.印刷装备北京市高等学习工程研究中心, 北京 102600; 3.北京市盛峰律师事务所, 北京 100080)

**摘要:** **目的** 为清晰直观地认识凹胶印刷电子油墨铺展过程的微观机理。**方法** 根据油墨铺展运动过程, 建立其静态的物理和几何模型, 利用幂律流体理论, 分析油墨粘度与剪切速率之间的关系, 特别是纳米银导电油墨的幂律流体函数模型, 最后利用实验验证这一模型的正确性。**结果** 幂律流体理论表明, 纳米银导电油墨的粘度与剪切速率存在  $\eta = 198.3 \times \gamma^{0.8189-1}$  的数量关系, 实验结果表明, 在印刷压力为 49 N, 线宽扩大率最大时, 印刷速度为 21.88 mm/s, 验证该条件下的方阻值为 5.915  $\Omega$ ; 在印刷速度为 45 mm/s, 线宽扩大率最大时, 印刷压力为 49.36 N, 验证该条件下的方阻值为 5.908  $\Omega$ ; 在印刷压力为 49 N, 印刷速度为 45 mm/s 下, 线宽扩大率最大时, 油墨粘度为 0.78 Pa·s, 验证该条件下的方阻值为 4.8998  $\Omega$ ; 油墨粘度  $\eta$  与印刷速度  $v$  之间存在  $\frac{v}{478.93} \cdot e^{\frac{-v^2}{957.86}} = \frac{\eta}{0.6097} \cdot e^{\frac{-\eta^2}{1.2194}}$  的函数关系。**结论** 纳米银导电油墨是一种假塑性流体, 其粘度与剪切速率呈负相关变化, 剪切速率是影响油墨铺展过程的关键参数。

**关键词:** 凹胶印刷; 铺展; 印刷电子; 柔性电子

**中图分类号:** TS802 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)13-0246-06

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.13.036

## Analysis and Experiment on Spreading Process of Gravure Printing Electronic Ink

LIU Shi-pu<sup>1a,1b,2</sup>, LI Yan<sup>1a,1b,2</sup>, WANG Qi-li<sup>3</sup>

(1.Beijing Institute of Graphic Communication, a.School of Mechanical and Electrical Engineering  
b.Beijing Key Laboratory of Digital Printing Equipment, Beijing 102600, China;  
2.Printing Equipment Beijing Higher Learning Engineering Research Center, Beijing 102600, China;  
3.Beijing Shengfeng Law Firm, Beijing 100080, China)

**ABSTRACT:** The work aims to clearly and intuitively understand the microscopic mechanism of the process of spreading the electronic ink of the gravure printing. According to the ink spreading process, the static physical and geometric models were established. The power law fluid theory was used to analyze the relationship between ink viscosity and shear rate, especially the power law fluid function model of nano silver conductive ink. Finally, the experiment was used to verify the correctness of such model. The power law fluid theory showed that the viscosity and the shear rate of nano silver conductive ink was subject to a numerical relationship  $\eta = 198.3 \times \gamma^{0.8189-1}$ . The experimental results showed that, when the printing pressure was 49 N, the line width expansion rate was the largest and the printing speed was 21.88 mm/s, the sheet resistance under such condition was verified to be 5.915  $\Omega$ ; when the printing speed was 45 mm/s, the line width expansion rate was the largest and the printing pressure was 49.36 N, the sheet resistance under such condition was verified to

收稿日期: 2019-03-20

作者简介: 刘世朴(1994—), 男, 北京印刷学院硕士生, 主攻精细丝网印刷电子成型机理。

通信作者: 李艳(1965—), 女, 北京印刷学院教授、硕导, 主要研究方向为柔性电子印刷的工艺与装备、TRIZ 理论及应用、印刷装备创新设计。

be 5.908 Ω. When the printing pressure was 49 N, the printing speed was 45 mm/s, the line width expansion rate was the largest and the ink viscosity was 0.78 Pa·s, the sheet resistance under such condition was verified to be 4.8998 Ω. There was a functional relationship  $\frac{v}{478.93} \cdot e^{\frac{-v^2}{957.86}} = \frac{\eta}{0.6097} \cdot e^{\frac{\eta^2}{1.2194}}$  between ink viscosity  $\eta$  and printing speed  $v$ . Nano silver conductive ink is a pseudo plastic fluid with a negative correlation between viscosity and shear rate. The shear rate is a key parameter affecting the ink spreading process.

**KEY WORDS:** gravure printing; spreading; printed electronics; flexible electronics

柔性印刷电子因其具有弯曲、可伸展、可作为智能穿戴设备实时监测人体表征的特点,被认为是电子行业未来发展的重要研究方向<sup>[1]</sup>。王丰军<sup>[2]</sup>指出,印刷电子设备逐渐向小型化、多功能方向发展。而在众多柔性电子印刷方式中,凹胶印刷因其具有低成本、生产效率高和使用承印物范围广的优点,被柔性电子印刷行业广泛关注。

凹胶印刷的过程,就是油墨向印版滚筒上墨,然后通过橡皮滚筒,向承印物转移油墨的过程。李路海等<sup>[3]</sup>指出印刷电子实现的是产品功能器件的属性,追求的是产品的功能、精度和用途;而传统的研究方法是对印后产品进行印品质量检测 and 评价,由于凹胶印刷过程是瞬时过程,并且极易受到很多因素的影响,这就导致传统的研究方法无法对油墨转移过程进行微观机理分析。Fatemeh 等<sup>[4]</sup>指出,凹胶印刷电子导电油墨是一种粘度比牛顿流体高,表面张力比牛顿流体低的非牛顿流体,因而选用幂律流体理论对油墨转移过程进行模拟分析。

Marko 等<sup>[5]</sup>通过实验,验证了纳米银导电油墨在辊式凹胶印刷过程中可以实现 100% 的成功印刷。目前对凹胶印刷电子的研究理论中,对油墨从橡皮滚筒向承印物转移过程的研究很少,对油墨铺展过程的研究更少,故文中主要对油墨向承印物转移的铺展过程进行微观机理研究,并用实验数据加以验证。

### 1 油墨的铺展过程分析

凹胶印刷是一种间接印刷方式,油墨的铺展过程就是墨迹在承印物上的扩展。Sikalo 等<sup>[6]</sup>利用粘性不同的液滴在不同的速度下撞击石蜡和玻璃板面,并用高速摄像机拍摄撞击后板面的变形,得到了速度和油墨粘度对液滴铺展过程的影响;毕菲菲等<sup>[7]</sup>实验研究了液滴撞击固体表面后的铺展特性,得到了液滴粘性和撞击速度对液滴铺展过程的影响;Taikmin 等<sup>[8]</sup>在研究凹版胶印的可靠性问题时,发现其与印刷速度、印刷压力和胶布材料有关。由此可见,油墨的铺展不仅受到橡皮滚筒与压印滚筒间的压力、张力和自身重力的作用影响,还与油墨粘度以及承印物的移动速度有关。

Emmel 等<sup>[9]</sup>利用有色油墨的扩散作用,建立了一个统一的颜色预测模型,证明了油墨的扩散过程是一种网点增益现象。为了能够形象客观地描述油墨的铺展过程,将油墨的铺展过程模型简化为物理模型,只分析油墨在受到压力、张力和重力作用的铺展过程。在建立物理模型之前,油墨形状简化为球形,铺展后为椭圆形,同时,模型的建立过程不考虑承印物表面粗糙度的影响。故油墨铺展过程的物理模型见图 1。

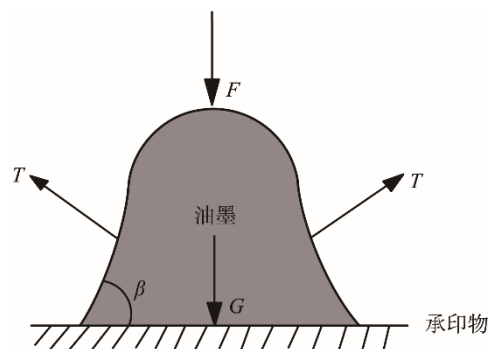


图 1 油墨铺展过程物理模型  
Fig.1 Physical model of ink spreading process

式中： $T$  为油墨所受张力； $F$  为两滚筒间的压力； $G$  为油墨的重力； $\beta$  为油墨与承印物间的接触角。

为了能够直观地表达油墨铺展过程的微观机理,建立静态的油墨铺展几何模型,处理方法是取橡皮滚筒和压印滚筒的直径无穷大,即橡皮滚筒与包裹在压印滚筒上的承印物简化为 2 个平板,见图 2。

式中： $u, v$  分别为橡皮滚筒的径向和切向速度；

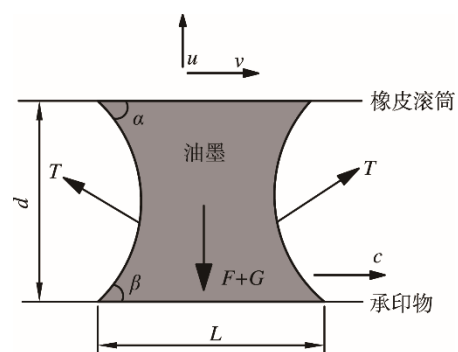


图 2 油墨铺展过程的几何模型  
Fig.2 Geometric model of ink spreading process

$d$  为橡皮滚筒与承印物间的距离,  $a$  为油墨与橡皮滚筒间的接触角;  $c$  为承印物的移动速度;  $L$  为油墨与承印物线接触的宽度。

## 2 幂律流体理论的建立及分析

该实验室凹胶印刷所使用的油墨是由北京市印刷电子工程中心配制的纳米银导电油墨, 其主要参数: 粘度为  $1\sim 3\text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 密度为  $1\sim 2.5\text{ g/cm}^3$ , 表面张力为  $0.03\sim 0.36\text{ N/m}$ , 屈服值  $>0.1\text{ N/cm}^2$ , 流动度为  $20\text{ mm}$ ,  $\text{pH}=8\sim 9$ 。

纳米银导电油墨是一种非牛顿流体, 其剪切力和切变速度呈非线性关系。幂律流体理论是研究非牛顿流体的一种方法, Starov<sup>[10]</sup>指出, 关于铺展过程油墨粘度与剪切速率之间的关系为:

$$\mu = k \cdot \gamma^{n-1} \tag{1}$$

式中  $\mu$  为流体粘度 ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )  $k$  为稠度系数 ( $\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{n}$ );  $\gamma$  为油墨剪切速率 ( $\text{s}^{-1}$ );  $n$  为幂律指数, 为常数。

吴延鹏等<sup>[11]</sup>通过实验验证了假塑性流体与胀流型流体的判断理论依据, 即在幂律流体公式中,  $n=1$  为牛顿流体;  $n>1$  为胀流型流体, 表示流体粘度随着剪切速率的增加而增加;  $n<1$  为假塑性流体, 表示流体粘度随剪切速率的增加而降低;  $n$  偏离 1 的程度越大, 表示流体的非牛顿性越强。

幂律流体理论指出, 油墨粘度与运动的剪切速率有关。建立油墨的运动过程模型, 能够方便地求出油墨的剪切速率。模型见图 3。

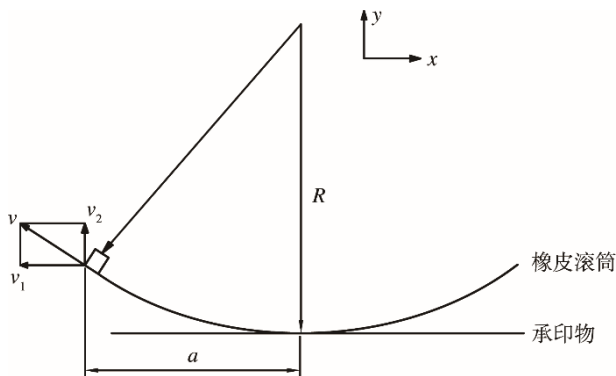


图 3 油墨运动过程模型  
Fig.3 Model of ink motion process

油墨的剪切速率可表示为:

$$\gamma = \frac{dv}{dx} = \frac{v_2}{a} = \frac{v}{R} \tag{2}$$

式中:  $R$  为橡皮滚筒半径 ( $\text{m}$ );  $v_2$  为油墨速度  $v$  在  $y$  轴上的分量 ( $\text{m/s}$ );  $a$  为  $v_2$  与接触线的水平距离 ( $\text{m}$ )。

席瑛等<sup>[12]</sup>在对胶印油墨铺展过程的研究中, 根据去粘剂质量分数和油墨胶印时粘度, 利用 Fluent 拟合出了幂律流体函数模型, 见表 1。

表 1 Fluent 下幂律流体拟合函数  
Tab.1 Fitting function of power law fluid under fluent

| 去粘剂质量分数/% | 拟合公式                                | 胶印时粘度/(Pa·s) |
|-----------|-------------------------------------|--------------|
| 0         | $\eta=447.8\times\gamma^{0.6905-1}$ | 198.79       |
| 1         | $\eta=292.7\times\gamma^{0.7774-1}$ | 163.21       |
| 2         | $\eta=259.8\times\gamma^{0.7761-1}$ | 144.37       |
| 4         | $\eta=198.3\times\gamma^{0.8189-1}$ | 123.29       |
| 6         | $\eta=172.4\times\gamma^{0.7935-1}$ | 100.28       |
| 8         | $\eta=154.9\times\gamma^{0.7349-1}$ | 77.26        |
| 10        | $\eta=151.5\times\gamma^{0.6836-1}$ | 66.04        |

所用油墨为纳米银导电油墨, 其去粘剂所占质量分数为 3.8%, 油墨胶印时粘度为  $120\text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 根据表 1 数据, 近似选取的拟合函数可表示为:

$$\eta = 198.3 \times \gamma^{0.8189-1} \tag{3}$$

根据拟合函数, 建立纳米银导电油墨粘度与剪切速率之间的函数关系, 见图 4。

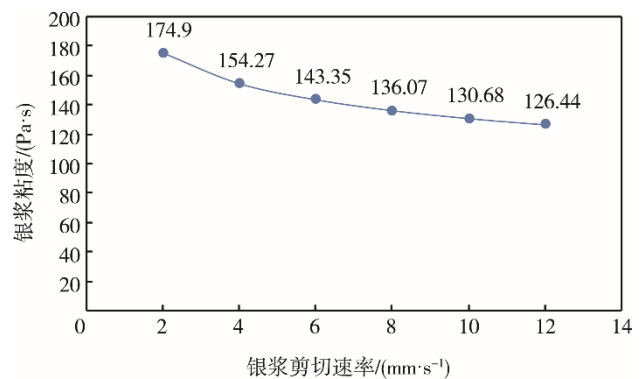


图 4 纳米银导电油墨粘度  $\eta$  与剪切速率  $\gamma$  函数关系  
Fig.4 Functional relationship between viscosity  $\eta$  and shear rate  $\gamma$  of nano silver conductive ink

从图 4 看出, 纳米银导电油墨的粘度与剪切速率呈非线性关系, 再一次证明了纳米银导电油墨是一种非牛顿流体。同时, 也能够定量得出纳米银导电油墨在铺展过程中, 不同剪切速度下对应的粘度大小。

## 3 实验数据分析

利用幂律流体理论分析了非牛顿流体纳米银导电油墨的铺展过程, 在进行实验时所使用的承印物材料为 PET 薄膜。通过凹胶印刷实验, 得到了不同的印刷压力、印刷速度和油墨粘度下, 印刷线条宽度的实验数据。在对数据处理的一些案例当中, Murthy 等人<sup>[13]</sup>利用瑞利概率分布函数对印度喜马拉雅邦哈米尔复杂丘陵地区的风力发电进行密度估算, 得出的估算结果被广泛认可; 柳叶<sup>[14]</sup>通过建立大型风电场机的瑞利分布模型, 确定风机每年 2 次维修可以实现风能的最大利用率。文中对数据处理的方法是: 首先根据实验数据利用瑞利分布拟合出变量因子与评

价标准之间的函数,然后在该函数的条件下求出变量的最大值,即为最大影响因子。评价的标准是方阻值和线宽扩大率<sup>[15]</sup>。方阻可表示为:

$$\square = \frac{\rho}{w} \quad (4)$$

式中:  $\square$  为方阻 ( $\Omega$ );  $\rho$  为电阻率 ( $\Omega \cdot \mu\text{m}$ );  $w$  为薄层材料墨层厚度 ( $\mu\text{m}$ )。

线宽扩大率  $\theta$  可表示为:

$$\theta = \frac{\text{线宽} - \text{印版宽}}{\text{印版宽}} \quad (5)$$

探究印刷压力和印刷速度对印刷质量影响因素时,选择油墨粘度为  $C=1.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  作为定量,得到的实验数据见表 2。印版线宽为  $30 \mu\text{m}$ ,根据式(5)可以求得各个不同印刷压力和印刷速度下对应的线宽扩大率。

表 2 印刷压力和印刷速度的影响结果  
Tab.2 Results of effects of printing pressure and speed

| 印刷压力/N | 印刷速度/(mm·s <sup>-1</sup> ) | 表面方阻/ $\Omega$ | 印刷线宽/ $\mu\text{m}$ | 线宽扩大率 $\theta$ |
|--------|----------------------------|----------------|---------------------|----------------|
| 19.6   | 10                         | 5.67           | 76.247              | 1.542          |
| 19.6   | 30                         | 6.64           | 87.159              | 1.905          |
| 19.6   | 45                         | 6.51           | 45.090              | 0.503          |
| 49     | 10                         | 6.52           | 47.192              | 0.573          |
| 49     | 30                         | 5.42           | 59.385              | 0.980          |
| 49     | 45                         | 4.95           | 41.73               | 0.391          |
| 98     | 10                         | 5.56           | 101.81              | 2.394          |
| 98     | 30                         | 6.43           | 86.598              | 1.887          |
| 98     | 45                         | 6.28           | 53.931              | 0.798          |

在数据处理过程中,首先根据表 2 的实验数据,利用瑞利分布函数,分别求出变量因子与线宽扩大率数学函数模型,找出最大线宽扩大率下对应的印刷速度和印刷压力,然后再利用表 2 的方阻验证是否合理。

选择表 2 中印刷压力为 49 N,构建该压力下速度与线宽扩大率之间的数学函数模型:

变量: 10, 30, 45 mm/s。

方差:

$$S^2 = \frac{\left(10 - \frac{85}{3}\right)^2 + \left(30 - \frac{85}{3}\right)^2 + \left(45 - \frac{85}{3}\right)^2}{3} = 205.56$$

瑞利分布概率密度:

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

其中:  $\sigma^2 = \frac{2S^2}{4 - \pi} = 478.93$ 。

则利用瑞利分布概率密度建立的函数:

$$\theta(v) = \frac{v}{478.93} \cdot e^{-\frac{v^2}{957.86}} \quad (7)$$

式中:  $v$  不小于 0。对式(7)进行求导,得到:

$$\theta' = \frac{1}{478.93} \cdot e^{-\frac{v^2}{957.86}} \left(1 - \frac{v^2}{478.93}\right) \quad (8)$$

当  $\theta' > 0$  时,  $0 < v < 21.88$ , 即  $v$  在区间(0, 21.88) 单调递增,在区间(21.88, + $\infty$ ) 单调递减。故  $v=21.88 \text{ mm/s}$  时,  $\theta(v)$  为最大。

根据表 2 数据,利用最小二乘法,建立方阻与印

刷速度  $v$  的函数模型:

$$\square(v) = -0.045v + 6.9 \quad (9)$$

将  $v=21.88 \text{ mm/s}$  带入式(9)中,得出方阻值为  $5.915 \Omega$ 。

根据表 2,选取  $v=45 \text{ mm/s}$  下的印刷压力分别为 19.6, 49, 98 N,利用瑞利分布,构建印刷压力  $F$  与线宽扩大率  $\theta$  之间的函数关系:

$$\theta(F) = \frac{F}{2436.53} e^{-\frac{F^2}{4873.06}} \quad (10)$$

处理方法与式(7)的处理方法一样,得到  $F=49.36 \text{ N}$  时,  $\theta(F)$  为最大。利用最小二乘法,建立方阻与印刷压力  $F$  之间的关系:

$$\square(F) = 0.00017F + 5.90 \quad (11)$$

将  $F=49.36 \text{ N}$  带入式(11),得到方阻值为  $5.908 \Omega$ 。

探究油墨粘度对印刷质量的影响时,采用控制变量法,选择表 2 中线宽扩大率最小的一组数据作为定量,即印刷压力为 49 N,印刷速度为 45 mm/s,来探究不同的油墨粘度  $\eta$  对方阻和线宽  $E$  的影响效果,见表 3—4。

印版线宽为  $30 \mu\text{m}$ ,印刷压力为 49 N,印刷速度为 45 mm/s,根据式(5)求得油墨粘度为 1.55, 2.1, 2.8 Pa·s 时,对应的线宽扩大率分别为 2.028, 1.379, 1.683。利用瑞利分布概率密度,建立油墨粘度  $\eta$  与线宽扩大率  $\theta$  之间的函数关系:

$$\theta(\eta) = \frac{\eta}{0.6097} e^{-\frac{\eta^2}{1.2194}} \quad (12)$$

与式(7)和(10)的处理方法相同,得到  $\eta=0.78$

表 3 不同油墨粘度对方阻的影响  
Tab.3 Effect of different ink viscosity on the sheet resistance

Ω

| 粘度/(Pa·s) | □ <sub>1</sub> | □ <sub>2</sub> | □ <sub>3</sub> | □ <sub>4</sub> | □ <sub>5</sub> | 平均值  |      |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|------|
| 1.55      | 5.44           | 3.72           | 4.21           | 4.10           | 5.50           | 4.59 | 4.88 |
|           | 5.13           | 4.96           | 4.87           | 5.63           | 5.28           | 5.17 |      |
| 2.1       | 5.10           | 5.54           | 3.84           | 3.54           | 3.82           | 4.37 | 4.06 |
|           | 3.67           | 4.51           | 3.60           | 3.42           | 3.54           | 3.75 |      |
| 2.8       | 4.44           | 9.08           | 3.63           | 5.37           | 4.58           | 4.51 | 4.43 |
|           | 3.22           | 3.55           | 5.20           | 5.41           | 4.34           | 4.34 |      |

表 4 不同油墨粘度对印刷线宽影响  
Tab.4 Effect of different ink viscosity on printing line width

| 粘度/(Pa·s) | E <sub>1</sub> | E <sub>2</sub> | E <sub>3</sub> | E <sub>4</sub> | E <sub>5</sub> | 平均值    |        |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|--------|
| 1.55      | 96.15          | 96.39          | 97.50          | 76.91          | 90.28          | 91.446 | 90.84  |
|           | 98.51          | 98.29          | 100.85         | 95.86          | 84.61          | 90.235 |        |
| 2.1       | 66.87          | 72.49          | 66.86          | 68.31          | 72.49          | 69.404 | 71.378 |
|           | 76.61          | 75.27          | 78.31          | 65.53          | 71.04          | 73.352 |        |
| 2.8       | 87.77          | 89.19          | 84.98          | 83.58          | 87.75          | 85.437 | 80.501 |
|           | 83.59          | 80.80          | 74.03          | 72.55          | 66.86          | 75.566 |        |

Pa·s 时,  $\theta(\eta)$  为最大。选取 3 组方阻的平均值 4.88, 4.06, 4.43 Ω, 利用最小二乘法, 建立方阻与粘度  $\eta$  之间的函数关系:

$$\square(\eta) = -0.3233\eta + 5.152 \quad (13)$$

将  $\eta = 0.78 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  带入式 (13) 得到方阻值为 4.8998 Ω。

由于凹胶印刷过程为非在线粘度测量, 油墨粘度是在印刷实验前通过粘度计测量得到, 橡皮滚筒半径在印刷过程中保持不变, 因此, 探究油墨粘度与剪切速率之间的关系, 就是探究油墨粘度与印刷速度之间的关系, 采用的方法是以线宽扩大率作为中间量, 根据实验结果拟合出的式 (7) 与 (12), 间接得出印刷速度与油墨粘度之间的关系:

$$\frac{v}{478.93} \cdot e^{-\frac{v^2}{957.86}} = \frac{\eta}{0.6097} \cdot e^{-\frac{\eta^2}{1.2194}} \quad (14)$$

由式 (14), 建立油墨粘度  $\eta$  与印刷速度  $v$  之间的关系, 见图 5。

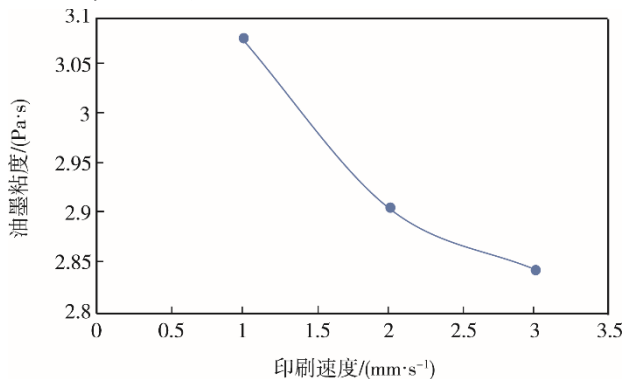


图 5 油墨粘度  $\eta$  与印刷速度  $v$  之间的关系  
Fig.5 Relationship between ink viscosity  $\eta$  and printing speed  $v$

根据图 5 结果, 油墨粘度  $\eta$  随着印刷速度  $v$  的增加而减小, 实验验证了纳米银导电油墨是一种假塑性流体; 同时也定量得出了油墨粘度  $\eta$  与印刷速度  $v$  之间的函数关系。

## 4 结 语

首先对凹胶印刷中油墨向承印物转移过程进行了微观机理分析, 建立了其静态的物理和几何模型, 这也便于清晰直观地认识油墨的铺展过程。同时, 运用幂律流体理论建立了油墨粘度与剪切速率间的函数关系, 根据实验室所使用的纳米银导电油墨中去粘剂所占质量分数和胶印时粘度大小, 选取合适的拟定函数, 从而定量分析了纳米银导电油墨粘度与剪切速率之间的关系。

1) 纳米银导电油墨是一种假塑性流体, 其铺展过程就是油墨在力的作用下向承印物的转移过程。同时, 根据幂律流体理论也定量得到其剪切速率与粘度之间存在着函数关系, 即  $\eta = 198.3 \times \gamma^{0.8189-1}$ 。

2) 通过实验数据拟合出的印刷速度、油墨粘度与线宽扩大率之间的关系, 间接得到油墨粘度与印刷速度之间的函数关系, 即  $\frac{v}{478.93} \cdot e^{-\frac{v^2}{957.86}} = \frac{\eta}{0.6097} \cdot e^{-\frac{\eta^2}{1.2194}}$ 。实验验证了纳米银导电油墨是一种假塑性流体。

3) 利用瑞利分布概率密度对实验数据进行数理统计, 得到在印刷压力为 49 N, 线宽扩大率最大时,

印刷速度为 21.88 mm/s, 验证该条件下方阻值为 5.915  $\Omega$ ; 在印刷速度为 45 mm/s, 线宽扩大率最大时, 印刷压力为 49.36 N, 验证该条件下方阻值为 5.908  $\Omega$ ; 在印刷压力为 49 N, 印刷速度为 45 mm/s 下, 线宽扩大率最大时, 油墨粘度为 0.78 Pa·s, 验证该条件下方阻值为 4.8998  $\Omega$ 。

#### 参考文献:

- [1] 固态电池柔性化顺势可为前景可期[EB/OL]. (2019-03-05)[2019-03-07]. <http://www.chinatft.org>. Solid State Battery Flexibility Homeopathic Prospect[EB/OL]. (2019-03-05)[2019-03-07]. <http://www.chinatft.org>.
- [2] 王丰军. 印刷电子设备市场的最新创新[J]. 印刷杂志, 2018(10): 26—29.  
WANG Feng-jun. The Latest Innovation in the Printing Electronic Equipment Market[J]. Print Magazine, 2018(10): 26—29.
- [3] 李路海, 辛智青, 刘世丽. 从印刷电子看功能印刷[J]. 印刷杂志, 2016(6): 5—9.  
LI Lu-hai, XIN Zhi-qing, LIU Shi-li. Functional Printing from the Perspective of Printing Electronics[J]. Printing Magazine, 2016(6): 5—9.
- [4] FATEMEH G, DEWAN H A, HYUNG J S, et al. Non-newtonian Ink Transfer in Gravure Offset Printing[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2011, 32: 308—317.
- [5] MARKO P, JUHA H S L. Gravure Offset Printing of Polymer Inks for Conductors[J]. Progress in Organic Coatings, 2004, 49: 324—335.
- [6] SIKALO S, TROPEA C, GANIC E N. Dynamic Wetting Angle of a Spreading Droplet[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2005, 29(7): 795—802.
- [7] 毕菲菲, 郭亚丽, 沈胜强. 液滴撞击固体表面铺展特性的实验研究[J]. 物理学报, 2012, 61(18): 295—300.  
BI Fei-fei, GUO Ya-li, SHEN Sheng-qiang. Experimental Study on Spreadability of Droplets Impacting Solid Surfaces[J]. Journal of Physics, 2012, 61(18): 295—300.
- [8] LEE T M, NOH J H, KIM I, et al. Reliability of Gravure Offset Printing under Various Printing Conditions[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(10): 102802.
- [9] EMMEL, PATRICK, HERSCH, et al. Modeling Ink Spreading for Color Prediction[J]. Society for Imaging Science and Technology, 2002, 46(3): 237—246.
- [10] STAROV V M, TYATYUSHKING A N, VELARDE M G. Spreading of Non-newtonian Liquids over Solid Substrates[J]. Colloid Interface Sci, 2003, 257(2): 284—290.
- [11] 吴延鹏, 王晓东, 张欣欣. 非牛顿幂律流体液滴铺展特性[J]. 沈阳建筑大学学报, 2008, 24(6): 1060—1064.  
WU Yan-peng, WANG Xiao-dong, ZHANG Xin-xin. Droplet Spreading Characteristics of Non-newtonian Power Law Fluid[J]. Journal of Shenyang University of Architecture, 2008, 24(6): 1060—1064.
- [12] 席瑛, 曹从军, 夏为民. 胶印油墨铺展过程的 Fluent 模拟[J]. 西安理工大学学报, 2013, 29(3): 343—378.  
XI Ying, CAO Cong-jun, XIA Wei-min. Fluent Simulation of Offset Printing Ink Spreading Process[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2013, 29(3): 343—378.
- [13] MURTHY K S R, RAHI O P. Wind Power Density Estimation Using Rayleigh Probability Distribution Function[C]// Applications of Artificial Intelligence Techniques in Engineering, 2019: 265—266.
- [14] 柳叶. 基于瑞利分布的大型风电场机维护方案优化[J]. 数学的实践与认识, 2018, 48(7): 165—174.  
LIU Ye. Maintenance Scheme Optimization of Large-scale Wind Farm Machine Based on Rayleigh Distribution[J]. Mathematical Practice and Understanding, 2008, 48(7): 165—174.
- [15] 王麒麟. 基于 TRIZ 流分析的印刷电子试验平台研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2017.  
WANG Qi-li. Research on Printing Electronics Test Platform Based on TRIZ Flow Analysis[D]. Beijing Institute of Graphic Communication, 2017.