

Theoretical Analysis and Measurement of Printing Ink Tack

YUAN Ye, DING Fan*, FAN Yu-run

(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Ink tack has important influence on improving printing quality and efficiency. The paper presents the structure and composition of Reed Inkometer. A high precision force sensor has been used to detect tack-force. The result has a precision of 0.01 N. It analyses the rheological characteristics of ink and dynamic process of tack-measurement system, a practical formula for ink tack estimating has been obtained and verified by experiment. Practical test shows that ink tack bears a linear relationship to roller speed, and has an exponential relationship with temperature. The research result provides theoretical and experimental basis for ink production and use.

Key words: printing ink; tack theory; force sensor; inkometer

EEACC:7230;7320G

印刷油墨粘性的理论分析与测量

袁野, 丁凡*, 范毓润

(浙江大学流体传动及控制国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 印刷油墨的粘性对提高印刷质量和效率有重要影响, 本文阐述了雷德式油墨粘性测量系统的结构与组成, 采用高精度力传感器有效解决了粘性测量问题, 精度可达到 0.01 N, 分析了油墨流变学特性与粘性测量系统的动力学过程, 得到了油墨粘性值的实用估算公式并通过实验验证。结果表明: 油墨粘性值与转速成线性, 与温度成指数关系。研究结果为油墨的生产和使用提供了理论与实验依据。

关键词: 印刷油墨; 粘性理论; 力传感器; 油墨粘性仪

中图分类号: TS805

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)10-1812-05

印刷油墨是一种胶体分散体系, 油墨粘性对提高印刷质量和效率具有重要影响, 它被作为选用油墨的最重要指标之一。为分析印刷油墨的粘性现象, 目前国内外采用的模型主要有 Maxwell 线性粘弹性模型和 Stefan 粘性力经验公式等。Maxwell 模型被用于解释印刷中的飞墨现象^[1], Stefan 经验公式可用于分析油墨在不同粗糙度的承印物上粘性力大小的差异^[2]。但这些模型只能定性分析粘性现象, 无法估算油墨在各档转速和温度下的粘性值。油墨粘性仪是检测油墨在特定转速和温度下粘性值的专用测量仪器, 研究粘性测量过程的动力学模型对于明确粘性值的检测机理具有重大意义。

本文基于油墨流变学粘度与粘性模型, 分析了油墨粘性测量系统的动力学过程, 获得了粘性值实

用公式, 采用高精度力传感器设计并完成了相关实验。研究结果为粘性值的理论研究与测量提供了参考依据。

1 流变学分析

1.1 油墨的粘度理论

油墨属于典型的非牛顿流体, 其流变特征主要表现为: 具有塑性和触变性^[3]; 粘度呈指数形式^[4]。指数粘度模型的形式如下:

$$\eta_a = \eta(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (1)$$

式中: η_a ——某一速度梯度下的表观粘度;

η ——粘度常数;

$\dot{\gamma}$ ——速度梯度。

油墨属于剪切稀化流体。该类流体 $n < 1$, 其粘

度随剪切速度的增高而减小, 使维持流体运动的剪切力相应减小。

油墨的粘温关系符合阿累尼乌斯方程^[5], 实用形式是:

$$\ln \eta = -\frac{B\Delta T}{T_1 T_2} \quad (2)$$

式中: T_1, T_2 ——绝对温度;

ΔT —— $T_2 - T_1$, 绝对温度差;

η, η_e ——对应 T_1, T_2 时的粘度;

B ——与活化能有关的常数。

式(2)表明, 油墨粘度随温度的升高以指数形式降低。由于物质分子间受力与温度有关, 随着温度升高, 分子运动趋于活跃, 分子间粘滞力下降, 使流体的粘度下降。

1.2 油墨的粘性理论

Maxwell 模型仅适用于油墨在小变形下的情况, 无法用于计算拉丝与断裂时的应力。大变形下须采用 Stefan 经验公式^[3,6], 公式原型如下:

$$F = \frac{3\eta r^4 U}{4(H_0 - \lambda)^3} \quad (3)$$

式中: η ——油墨粘度;

r ——墨丝半径;

U ——墨层分离的速度;

H_0 ——墨层总厚度;

λ ——承印物镀层厚度。

公式综合了粘性力与墨层分离速度、墨层厚度、油墨粘度等参数的关系, 可作为油墨从辊间分离时拉伸应力的计算依据。

2 粘性仪的动力学模型

2.1 粘性仪结构

粘性仪的关键部件是三辊结构, 三辊指主铜辊, 合成胶辊与匀墨辊。油墨在三辊间不断进行揉和与分离, 以模拟油墨在印刷过程中的工况。基于三辊结构构建的粘性测量系统可称之雷德式粘性检测方式, 其测试过程如图 1(匀墨辊未画出)。

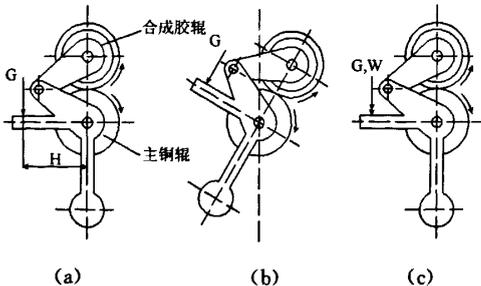


图 1 雷德式粘性仪测试原理

为平衡粘性测量系统不涂墨空转时各个转动辊之间的摩擦力, 需在胶辊支架上施加平衡力 G 。仪器涂墨运转后, 油墨在辊间不断转移、揉和与分离, 使胶辊支架相对主铜辊中心产生一个附加力矩, 系统再次处于不平衡状态(图 1(b))。在胶辊支架上施加力 W 可使仪器重新平衡, 平衡力 W 表征了被测油墨的粘性大小, 通过力 W 的检测计算, 即可获得被测油墨的粘性值。

测量系统工作时需要对主铜辊转速与表面温度进行控制。一般, 主铜辊转速通过档位 200 r/min, 400 r/min, 800 r/min, 1 200 r/min 和 1 600 r/min 进行分级控制。主铜辊的表面温度通常设定在 32℃, 精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

2.2 动力学分析

测量系统辊间油墨的传递具有非常复杂的动力学过程。附着在主铜辊与合成胶辊表面的油墨随辊筒的旋转进入辊间接触区, 此过程油墨受力以压延为主; 随着两辊分离油墨发生拉丝与断裂, 此时油墨受力以拉伸为主。辊间压延流动由图 2 定义, 结构参数如表 1 所示。

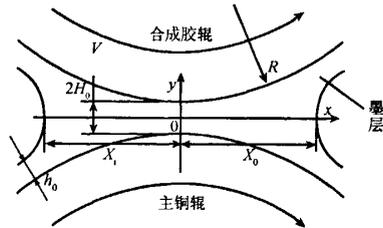


图 2 辊间压延流动的结构参数

表 1 辊间压延流动参数定义

结构参数	意义说明
R	合成胶辊和主铜辊半径
V	合成胶辊和主铜辊表面线速度
h_0	油墨在辊面上的厚度
$2H_0$	辊间最窄处墨层厚度
X_0	接触区出口横坐标
X_i	接触区入口横坐标
h	辊间辊面任意点的纵坐标

假设辊筒沿辊心方向为无限长, 不计墨层的侧泄漏与胶辊变形, 忽略油墨拉伸, 认为合成胶辊的高度固定。若油墨处于恒温状态且不可压缩, 压延流动动量方程如下式所示:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \quad (4)$$

式中: P ——辊间油墨压力;

τ_{yx} —— x 向剪切应力。

油墨粘度符合指数模型, 将式(1)代入式(4):

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\eta \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^n \right] \quad (5)$$

式中： η ——油墨粘度；
 v_x —— x 向速度。

由此可得单位辊宽下的体积流量 Q 为：

$$Q = 2 \int_0^h v_x dy = 2h \left[V - \frac{n}{2n+1} \left(\frac{1}{\eta} \frac{\partial P}{\partial x} \right)^{\frac{1}{n}} h^{\frac{2n+1}{n}} \right] \quad (6)$$

对于印刷油墨, n 可近似为 1, 式(6)改写成压力分布形式：

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{3\eta}{h^2} \left(V - \frac{Q}{2h} \right) \quad (7)$$

设定两个无量纲变量 α 与 β , α 消除了辊筒半径的影响, β 是与辊间流量相关的参数^[5]：

$$\alpha = \frac{x}{\sqrt{2RH_0}}, \beta = \sqrt{\frac{Q}{2VH_0} - 1} = \frac{X_0}{\sqrt{2RH_0}} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)得辊间压延的应力分布：

$$\frac{\partial P}{\partial \alpha} = \frac{\eta V}{H_0} \sqrt{\frac{18R}{H_0}} \left[\frac{\alpha^2 - \beta^2}{(1 + \alpha^2)^3} \right] \quad (9)$$

图 3 给出了不同 β 值下的辊间应力分布, 结合式(9)可知, 辊间流量增大使接触区域变宽, 峰值压力提高, 辊间墨层的承载能力相应增大。由于峰值压力出现在 $\alpha < 0$ 时, 曲线并不关于两辊辊心连线对称。

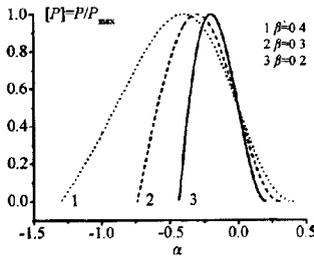


图 3 辊间压延流动的应力分布

在辊间压延流动的后期, 油墨受力状态转向拉伸, 根据 Stefan 经验公式, 对于测量系统而言, $\lambda = 0$, 墨层分离速度 U 可由转速 V 表示：

$$U \approx V \frac{x}{R} \quad (10)$$

代入式(3)得拉伸应力：

$$P_T = \frac{3\eta r^2 V x}{4RH_0^3} \quad (11)$$

辊间墨丝从形成到断裂是瞬间完成的, 为求解拉伸应力, 须获得墨丝半径 r 随墨层拉伸的变化规律。认为墨丝在辊间最窄处形成, 为单轴拉伸方式。假设墨丝是均匀的圆柱体, 高度等于辊间距离, 且拉伸时体积不变, 如图 4 所示。由此可得墨丝半径和高度之间的关系式为：

$$r = r_0 \sqrt{\frac{2H_0}{2h}} = r_0 \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{x^2}{2RH_0}}} \quad (12)$$

式中： r_0 ——墨丝形成时的初始半径。

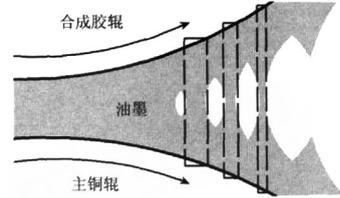


图 4 辊间墨丝变化

图 5 给出了辊间分离时墨丝半径的变化。式(12)可由曲线 1 描述, 曲线 2 是采用 $\zeta = e^{-2x}$ 对曲线 1 的拟合。曲线 1 表明墨丝半径 r 随应变增大而变化趋于缓和。但在实际情况下, 大应变时墨丝会发生颈缩, 使墨丝半径锐减为零。为使应变较大时接近实际情况, 采用 $\zeta = e^{-2x}$ 进行拟合。

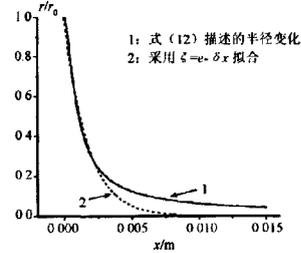


图 5 辊间墨丝半径变化

Stefan 经验公式由此可整理为：

$$P_T = \frac{3\eta r_0^2 V}{4RH_0^3} x e^{-2\delta x} \quad (13)$$

图 6 给出了不同拟合参数 δ 下的拉伸应力分布, 理论上 δ 是反映拉丝变化状态的因素, 其值越大墨丝断裂越快。结合式(13)可知, 拉伸应力分布随 δ 增大变窄, 峰值应力相应减小, 削弱了胶辊支架对主铜辊辊心的不平衡力矩。

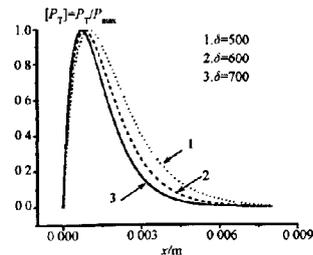


图 6 辊间拉伸过程的应力分布

2.3 粘性实用公式

假设压延与拉伸过程可线性叠加, 单位辊长合成胶辊支架对主铜辊辊心的力矩可表示为：

$$T = \sum T_i = \int_0^{x_0} P_{Tx} dx - \int_{x_1}^{x_0} P_x dx \quad (14)$$

式中: T ——合成胶辊支架的综合力矩;

T_i ——各接触点应力到辊心的转矩。

C H Lim 等人的研究表明^[7], 在考虑胶辊胶面变形及胶辊自重后, 辊间压延应力关于两辊辊心连线对称, 由此得 $|X_i| = |X_0|$, 式(14) 第二项积分为零, 可得油墨粘性仪的粘性实用公式:

$$Tack = K \times T = K \int_0^{x_0} P_{Tx} dx = \frac{3K\eta r_0^2 V}{16RH_0^3 \delta^3} \quad (15)$$

式中: $Tack$ ——粘性值, 无单位;

K ——比例系数。

式(15) 表明, 粘性值与辊筒转速成线性关系。温度通过阿累尼乌斯方程影响油墨粘度, 进而影响粘性值。 V 和 R 是仪器的固有参数, H_0 , r_0 和 δ 是测试的动态参数, 在式中以高次方出现, 特别是 H_0 和 r_0 , 它们受转速影响很大^[8], 是粘性测试过程的主要误差来源。

3 实验研究

3.1 实验系统结构

油墨粘性实验系统如图 7 所示。油墨粘性力通过高精度力传感器检测, 传感器受力与综合转矩 T 满足如下关系式:

$$W = \frac{T}{L} \quad (16)$$

式中: W ——传感器受力, 即系统粘性力;

L ——传感器对主铜辊辊心的力臂。

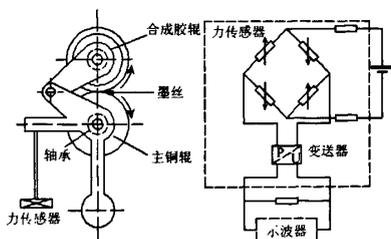


图 7 实验系统结构

主铜辊转速采用交流伺服控制方式, 精度为 ± 1 r/min, 水浴温控精度为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$, 测得的粘性力可精确到 0.01 N。

3.2 测试结果分析

实验在同一环境湿度下进行, 实验操作过程符合 GB/T 14624. 5-93(油墨粘性检测方法)。实验墨样特性如表 2 所示。

表 2 实验墨样特性

墨号	A	B	C
出厂粘性值	13	18.4	8.8

当水浴温度为 32°C 时, 墨样 A、B 在转速 200 r/min, 400 r/min, 800 r/min, 1200 r/min 和 1 600 r/min 下的粘性力如图 8 所示。图 8(a) 与图 8(b) 分别反映 A 与 B 在转速递增与递减时的粘性力差异, 图 8(c) 与图 8(d) 分别为 A 和 B 实验数据的直线拟合结果。实测数据表明: 所测粘性力与转速基本成线性, 与动力学分析结果吻合; 在高速时(1 200 r/min 以上), 实用公式(15) 存在一定误差, 这是由于在压延流动中, 转速一定程度上决定了墨层的负载能力, 转速增高后, 由于负载不变, 胶辊将上提, 墨层增厚, 反过来削减压延压力, 使达到一个新的平衡的 H_0 。同时, 高速下油墨拉伸更快更剧烈, 影响参数 r_0 和 δ 。

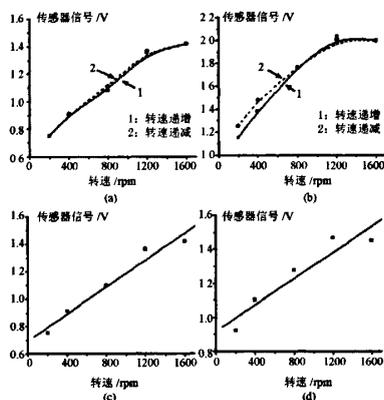


图 8 墨样 A、B 粘性-转速实验曲线

图 9 是墨样 C 在转速为 400 r/min, 800 r/min, 1 200 r/min 下传感器信号与温度实验数据的指数拟合结果。实验表明: 所测粘性力与温度基本成指数关系, 与动力学分析结果吻合; 油墨温度对于粘性力的有很大影响, 以图中曲线 3 为例, 温度相差 30°C ($15^\circ\text{C} \sim 45^\circ\text{C}$), 粘性值相差 4 倍。

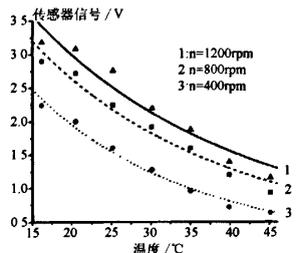


图 9 墨样 C 粘性-温度实验曲线

由实验可知, 对于标准油墨, 粘性实用公式在 32°C 下 200~1 600 r/min 范围内误差 $\leq 7\%$, 400~800 r/min 范围内误差 $\leq 2\%$ 。在 400 r/min 下 $15^\circ\text{C} \sim 45^\circ\text{C}$ 范围内误差 $\leq 6\%$, $25 \sim 32^\circ\text{C}$ 范围内误差 $\leq 3\%$ 。实际生产中, 所测油墨粘性多在转速 400~

800 r/min, 温度 25~32℃ 范围内, 在这段上公式精度足以满足实际要求。

4 结论

本文阐述了雷德式油墨粘性测量系统的结构与组成, 采用高精度力传感器有效解决了粘性测量问题, 精度可达到 0.01 N, 分析了油墨流变特性与粘性测量系统的动力学过程, 得到了油墨粘性值的实用估算公式(式(15))并得到实验验证, 结果表明: 油墨粘性值与转速成线性, 与温度成指数关系。研究结果为油墨的生产和使用提供了理论与实验依据。

参考文献:

- [1] 周春霞, 唐正宁. 用粘弹性模型解释印刷油墨转移中的几个问题[J]. 包装工程, 2006, 27(6):139-141.
 [2] Hélène Angellier, Douglas W. Bousfield, Emmanuel D. Dimo-

takis. Lithographic Ink Setting on Uncoated Paper. Journal of Graphi Technology[J], 2003, 1(3):35-41.

- [3] 王正青, 王相田, 荆建芬. 胶印油墨流变特性研究[J]. 华东理工大学学报, 1997, 23(5):585-589.
 [4] 杜飞龙, 徐东. 具有非牛顿流体特性的油墨软弹性接触的完全数值解[J]. 株洲工学院学报, 1998, 12(2): 1-8.
 [5] 伦克, R. S. (Lenk, R. S.), 宋家琪, 徐支祥, 戴耀松. 聚合物流变学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.
 [6] Yang Xiang, Douglas W. Bousfield, Peter C. Hayes, John Kette and Lena Hultgren. Effect of Lates: Swelling on Ink Setting on Coated Paper. Journal of Graphi Technology[J], 2003, 1(1):13-23.
 [7] C H Lim, M F J Bohan, T C Claypole, D T Gethin and B J Roylance. A Finite Element Investigation into a Soft Rolling Contact Supplied by a Non-Newtonian Ink. J. Phys. D: Appl. Phys. 1996, 29(07):1894-1903.
 [8] 董明达, 王城. 纸张油墨的印刷适性[M]. 北京: 印刷工业出版社, 1988.



袁野(1984-), 男, 浙江大学流体传动及控制国家重点实验室硕士研究生, 主要从事机械电子控制, 流体传动及控制的研究, ericyuanye@163.com



丁凡(1952-), 男, 浙江大学流体传动及控制国家重点实验室教授, 博士研究生导师, 主要从事机械电子控制, 流体传动及控制教学与科研工作, 发表论文百余篇, 获国家发明专利 20 余项, 获省部级科技奖 5 项, fding@zju.edu.cn