

精细丝网印刷电子影响因素及实验研究

刘世朴¹, 李艳¹, 张彦辉²

(1.北京印刷学院 a.数字化印刷装备北京市重点实验室 b.印刷装备北京市高等学校工程研究中心
c.北京市印刷电子工程技术研究中心, 北京 102600; 2.北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

摘要: **目的** 为了分析网版参数、印刷工艺和油墨粘度对丝网印刷过程的影响情况及影响程度。**方法** 以印品线宽、线厚和印刷粗糙度为评价指标, 根据精细丝网的印刷过程, 采用静态描述法建立油墨向网孔中填墨、油墨从网孔向承印物转移以及油墨在承印物上的流平铺展的物理模型; 采用实验方法探究网版参数、印刷工艺和油墨粘度对丝网印刷过程的影响; 建立相同印刷条件下, 各个影响因子对应的线宽数值, 线宽越小, 其影响程度就越大的描述模型, 以对影响因子进行比较。**结果** 结合最小网点直径与网版目数、线径的数学模型, 获知网版的选择与最小网点直径有关, 最小网点直径越小, 所选网版就越好; 在一定范围内, 刮刀角度越小, 刮刀压力越大, 刮刀速度越大, 其印品质量就越好, 超出这个范围就会影响其印品质量; 离网间距不宜过大, 也不宜过小, 在刮刀角度为 60°, 刮刀速度为 0.08 m/s 下的离网间距最佳为 2 mm; 纳米银导电油墨粘度对印刷质量的影响不是同步变化, 若追求低厚度和小粗糙度印品, 则选择低粘度油墨; 若追求低线宽, 则选择高粘度油墨。**结论** 精细丝网印刷质量影响程度由高到低排序为网版参数>刮刀压力>离网间距>油墨粘度>刮刀角度>刮刀速度。

关键词: 精细丝网; 印刷电子; 柔性电子; 影响因素

中图分类号: TS801.9; TS871.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)13-0243-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.13.035

Influencing Factors and Experimental Research of Fine Screen Printing Electrons

LIU Shi-pu¹, LI Yan¹, ZHANG Yan-hui²

(1.Beijing Institute of Graphic Communication a.Beijing Key Laboratory of Digitization Printing Equipment
b.Research Center of Printing Equipment of Beijing Universities c.Beijing Engineering Research Center of
Printed Electronics, Beijing 102600, China; 2.School of Mechanical Engineering, University of Science
and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the influence of screen parameters, printing process and ink viscosity on screen printing process. With the print line width, line thickness and printing roughness as the evaluation indexes, the physical models of ink filling the mesh, ink transfer from the mesh to the substrate and ink spreading on the substrate were established in the static description method according to the fine screen printing process. The effect of screen parameters, printing process and ink viscosity on the screen printing process was explored by conducting experiments. Under the same printing conditions, the description model for the line width value corresponding to each influencing factor was estab-

收稿日期: 2019-11-29

基金项目: 科技创新服务能力建设项目 (Ec201714)

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。

lished to compare the influencing factors. The narrower the line width was, the greater the influence degree of the description model was. Combined with the mathematical model for the minimum dot diameter, mesh number and line diameter, it was known that the selection of the screen was related to the minimum dot diameter. The smaller the minimum dot diameter was, the better the selected screen was. In a certain range, the smaller the doctor blade angle, the greater the doctor blade pressure and the faster the doctor blade speed, the better the quality of the printed matter. Beyond this range, the quality of the printed matter would be affected. The off-screen spacing should be neither too wide nor too narrow. When the doctor blade angle was 60° and the doctor blade speed was 0.08 m/s, the best off-screen spacing was 2 mm. The influence of the viscosity of nano-silver conductive ink on the printing quality was not synchronous. In pursuit of the prints with low thickness and small roughness, the low viscosity ink should be selected. In pursuit of the narrow line width, the high viscosity ink should be selected. The order of the influence degree of the following factors on the fine screen printing quality from high to low is screen parameters>doctor blade pressure>off-screen spacing>ink viscosity>doctor blade angle>doctor blade speed.

KEY WORDS: fine screen; printed electronics; flexible electronics; influencing factors

印刷电子是印刷技术与电子技术相结合的一种综合类技术,与传统的刻蚀相比,印刷电子具有低成本、柔性化、小型化、绿色环保等特点,逐渐被认为是制备电子元件的重要发展方向^[1]。在众多的印刷方式^[2]中,丝网印刷因其具有对油墨的适应性强、印刷墨层厚、对承印物的适印面广等优点,已成为柔性电子当中应用最广泛的一种印刷方式。

丝网印刷本质上是油墨润湿承印物的过程,将涂有感光材料的网布绷在网框上,网布上非图文部分的感光材料发生硬化,从而封堵网孔,使油墨无法通过;图文部分的感光材料被清洗掉,油墨可以通过网孔^[3]。精细丝网印刷就是做印品线宽不大于 50 μm 的丝网印刷。丝网印刷是一种直接印刷方式,其印刷过程就是油墨转移过程。Taylor^[4]在建立刮板模型的基础之上,得出丝网印刷过程分为填墨、挤压、粘连、脱离和转移过程。丝网印刷过程主要包括 4 个方面内容^[5]:在油墨自身重力下,导电油墨充满网孔但不与承印物接触过程;在刮刀压力作用下,导电油墨从网孔转移到承印物过程;刮刀刮过,网版与承印物分离过程;网版弹起,油墨在承印物上流平铺展,最后趋于稳定的过程。

目前国内外有很多对丝网印刷电子的研究理论,但对油墨转移的理论研究却很少。故文中主要通过建立丝网印刷过程的静态微观模型来分析该过程的影响因素,并用实验对各个影响因子的影响情况进行探究与验证。

1 模型的建立

在进行丝网印刷时,网版与承印物之间具有一定的距离,刮墨刀压下网版,使网版拉伸,直到网版在刮刀压力下正对那一点接触承印物,一旦刮刀刮过,网版从刮刀通过的地方与承印物分离并恢复原状,从

而使油墨留在承印物上,并获得一定的设计形状。丝网印刷过程见图 1。

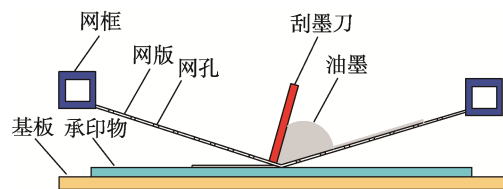


图 1 丝网印刷过程
Fig.1 Screen printing process

研究精细丝网的影响因素,需要对丝网印刷导电油墨的转移过程进行分析,其内容包括油墨向网孔中填墨,油墨从网孔向承印物转移以及油墨在承印物上的流平铺展,最后趋于稳定。为了能够清晰地表达油墨转移的微观过程,所建立的模型均为静态的物理模型。

在建立油墨向网孔填墨的物理模型时,将网版上网孔简化为梯形槽,油墨仅在自身重力下向网孔中填墨,油墨在网孔中趋于稳定后,呈现凹形。故建立的油墨在网孔中填墨过程的物理模型见图 2。

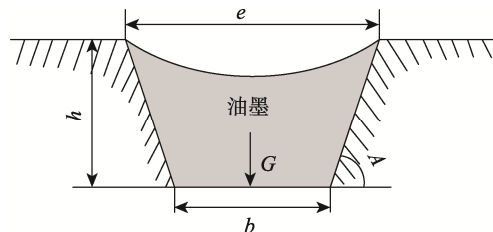


图 2 油墨向网孔中填墨的物理模型
Fig.2 Physical model of ink filling the mesh

图 2 中, e 为网孔开口宽度; h 为网孔深度; b 为网孔底边宽度; A 为网孔侧壁倾斜角; G 为网孔中油墨重力。

为了能够清楚地表达油墨从网孔向承印物转移机理，建立该过程的物理模型时，不考虑网版的张力作用，取网孔和承印物无限长，将网孔与承印物简化为 2 个平行平板，建立的物理模型见图 3。

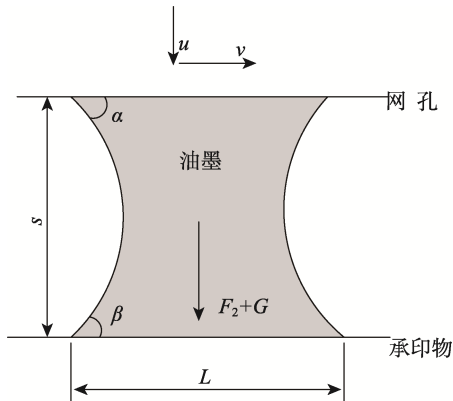


图 3 油墨从网孔向承印物转移的物理模型
Fig.3 Physical model of ink transfer from the mesh to the substrate

图 3 中， u 为油墨的竖直速度； v 为刮墨刀速度； s 为网间距； F_2 为刮墨刀在竖直方向的压力； L 为油墨与承印物线接触的宽度； α 为油墨与网孔间的接触角； β 为油墨与承印物间的接触角。

在建立油墨在承印物上流平铺展过程的物理模型时，将油墨简化为球形，流平铺展后为椭圆形。该过程的物理模型见图 4。

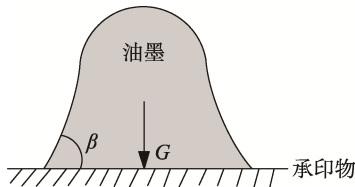


图 4 油墨在承印物上流平铺展的物理模型
Fig.4 Physical model of the ink spreading on the substrate

根据建立的丝网印刷导电油墨转移过程的静态模型可知，印品导电性能的好坏与网版网孔参数、刮刀速度、刮刀压力、油墨粘度、离网间距有关。

2 质量评价指标的建立

传统的丝网印刷主要从主体感官出发，所追求的是印品图文的清晰，而精细丝网印刷所要求导电性能的良好和稳定。车龙^[6]通过对丝印导电布线分析，得出了分辨率的准确定义，其中一种就是将线宽作为分辨率的评价指标，线宽越小，其分辨率就越高，导电性能就越好。刘富^[7]指出印品线厚和印刷粗糙度可作为丝网印刷电子的评价指标，在线宽一定时，线条越厚，其导电性能越好；线条印刷粗糙度越小，其导电性能越好，性能就越稳定，因此，文中通过激光共聚

焦形貌测量显微镜来对印品线条厚度、线条宽度和印刷粗糙度进行测量。

2.1 线条宽度

线宽作为评价印品分辨率的重要指标。印品线宽越小，其分辨率就越高。印品线宽的测量方式见图 5。

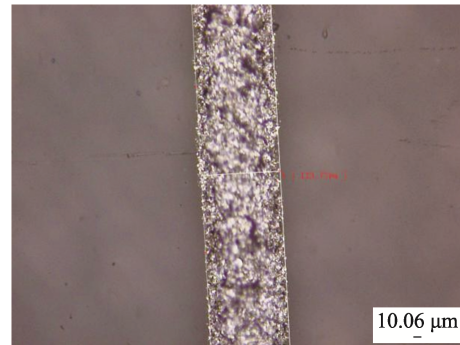


图 5 印品线宽测量
Fig.5 Print line width measurement

由于油墨在印品上的各个位置分布不均匀，因此测量印品线宽时需要在各个不同位置进行多次测量，求平均值，以保证测量结果的准确性。

2.2 线条厚度

精细丝网印刷的导电线条横截面积大致呈梯形。印品线条厚度越厚，其导电性能就越好。印品线条厚度测量方式见图 6。

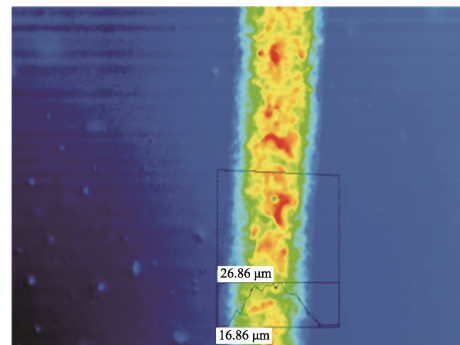


图 6 印品线厚测量
Fig.6 Print line thickness measurement

根据图 6 结果可知，最大值与最小值之差就是线条厚度。在测量印品线条厚度时，为了保证测量结果的准确性，同样采取对线条不同位置的厚度进行多次测量，求平均值的方法。

2.3 印刷粗糙度

印刷粗糙度包括表面粗糙度和边缘粗糙度。表面粗糙度是指垂直于横截面的中线截面的表面轮廓在取样长度内，轮廓偏距绝对值的算术平均值；线条边缘粗糙度是指在沿线条长度方向的一侧边缘轮廓在

取样长度内,轮廓偏距绝对值的算术平均值^[8]。印刷粗糙度越小,印品质量就越好,性能越稳定。印刷粗糙度的测量见图7。

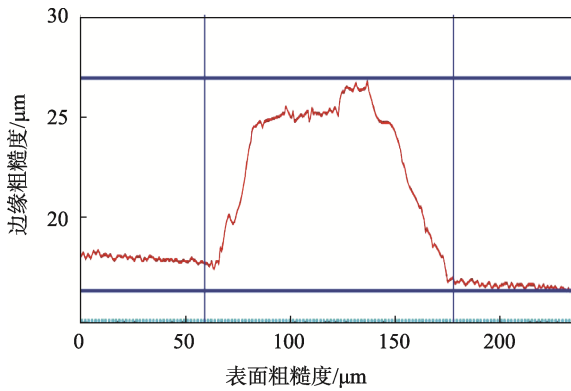


图7 印刷粗糙度测量
Fig.7 Printing roughness measurement

3 影响因素及实验分析

李飞^[9]通过模拟实验,指出丝网印刷质量影响最大的因素是网版参数,其次是网距。张彦辉^[8]指出丝网印刷过程中,油墨在刮墨刀下方始终随着刮墨刀的移动做回转式流动,转动回流状态与刮墨刀的运动速度和动力粘度有关。倪文虎^[10]通过建立油墨的压力变化数学模型,指出丝网印刷过程与刮刀压力有关;Lee等^[11]在研究凹版油墨对聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)和双向拉伸聚丙烯(BOPP)高速印刷时发现,印刷速度、印刷压力、网穴大小以及稀释剂都会影响印刷效果和油墨转移率。由此可见,精细丝网印刷质量与网版参数、刮刀速度、刮刀角度、刮刀压力、油墨粘度和离网间距有关。为了准确获得各个影响因子对印品导电性能的影响情况,该实验室使用丝网印刷电子试验台进行相关实验探究与验证。

3.1 网版参数的影响及实验分析

目数 M_c 和线径 d 是网版的 2 个重要参数。网版参数对精细丝网印刷质量的影响,也就是目数 M_c 和线径 d 对最小网点直径 D 的影响,它们存在的数量关系见式(1)。

$$D = \sqrt{2} \times \frac{1 + M_c \cdot d}{M_c} \quad (1)$$

式中: M_c 为网版目数; d 为线径(m);

网版的目数 M_c 越大,线径 d 越小,对应的最小网点直径 D 就越小,印品的分辨率就越高,质量就越好。

目前最适合精密印刷的网版为不锈钢网版^[12],故该实验室选用的网版为不锈钢网版。几种常见的不锈钢参数见表1。

表1 几种常见的不锈钢网版参数

Tab.1 Several common stainless steel screen parameters

品名	目数 M_c /英寸	线径 $d/\mu\text{m}$
SNS-380/14	380	14
SNS-360/16	360	16
SNS-325/16	325	16
SNS-290/20	290	20

注: 1英寸=0.0254m

将表1中数据代入式(1)中,得到几种常见的不锈钢网版的最小网点直径 D 见表2。

表2 几种常见的不锈钢网版的最小网点直径

Tab.2 Minimum dot diameter of several common stainless steel screens

品名	最小网点直径 D/m
SNS-380/14	1.9946
SNS-360/16	0.1547
SNS-325/16	0.171
SNS-290/20	0.192

根据表2数据,为了得到分辨率高的印品,需要选择网点直径 D 最小的网版,即 SNS-360/16 型号的不锈钢网版。这与实验事实相符,故验证了不锈钢网版的选择是正确的。

3.2 印刷工艺的影响及实验分析

精细丝网印刷工艺主要包括刮刀压力、刮刀速度、刮刀角度和离网间距^[13]。为了便于直观地分析印刷工艺对精细丝网印刷的影响过程,建立其静态的几何模型,见图8。由于油墨重力 G 与压力 F 相比,非常小,可忽略不计。

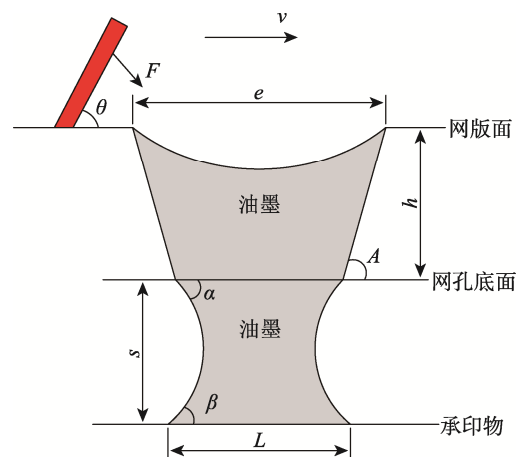


图8 油墨印刷过程的几何模型
Fig.8 Geometric model of the ink printing process

图 8 中， F 为刮墨刀对油墨压力； θ 为刮墨刀角度； v 为刮墨刀速度。

李婧伟^[14]粗略地指出刮刀压力与油墨粘度、刮刀速度、刮刀角度和刮刀前油墨量之间的数学关系，见式(2)。

$$F \approx \eta \cdot v \cdot \frac{\sqrt{W}}{\sin^2 \theta} \quad (2)$$

式中： η 为油墨动力粘度 (Pa·s)； W 为刮墨刀前方受压处的油墨量，根据量纲换算，得到刮刀前的油墨量 (m^2)。

探究刮墨刀角度对精细丝网印刷的影响时采用控制变量法，即保持离网间距为 2 mm，刮刀速度为 0.08 m/s 不变。该实验室所用的油墨为纳米银导电油墨，25 °C 下粘度为 2.265 Pa·s，刮刀前方受压处油墨量为 6.84 m^2 ，则得到刮刀角度与其对应的刮刀压力

对印刷质量的影响见表 3。

为了更加直观地体现出刮刀角度与其对应的刮刀压力对印刷质量的影响情况，绘制出曲线，见图 9—10。

根据表 3，得出当刮刀角度越小，其对应的刮刀压力越大，所生产出来的印品线条厚度、线条宽度和印刷粗糙度也就越大。由于承印物对油墨的吸收并不是无限制的，所以当刮刀角度超过一定值时，就不再遵循此规律。这与实验事实相符，即刮刀角度和刮刀压力不宜过大也不宜过小。

探究刮刀速度对精细丝网印刷的影响时，仍采用控制变量法，即控制刮刀角度为 60°，离网间距为 2 mm 不变。实验时所用的油墨仍为纳米银导电油墨，粘度为 2.265 Pa·s，刮刀前方受压处油墨量仍为 6.84 m^2 ，刮刀速度与其对应的刮刀压力对印刷质量的影响情况，实验数据见表 4。

表 3 刮刀角度与其对应的刮刀压力对印刷质量的影响

Tab.3 Effect of doctor blade angle and corresponding doctor blade pressure on printing quality

刮刀角度/(°)	刮刀压力/N	线条厚度/ μm	线条宽度/ μm	表面粗糙度/ μm	边缘粗糙度/ μm	印刷粗糙度/ μm
50	0.8076	13.4	56.2	1.40	7.6	9
55	0.7062	13.2	53.0	1.33	6.7	8.03
60	0.6319	12.8	46.9	1.30	5.2	6.5
65	0.5679	12.6	44.1	1.31	4.9	6.21
70	0.5367	12.2	39.6	1.28	4.3	5.58

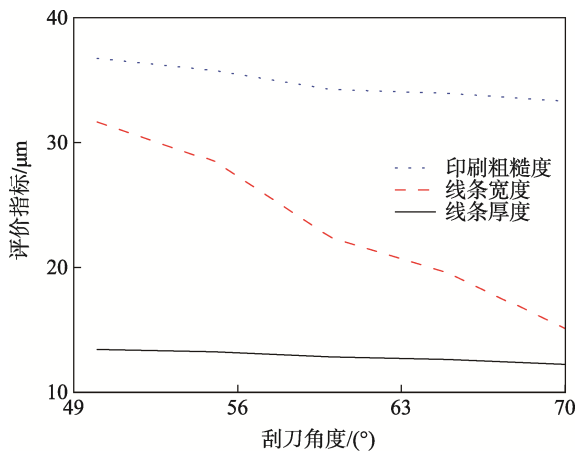


图 9 刮刀角度对印刷质量影响情况

Fig.9 Effect of doctor blade angle on printing quality

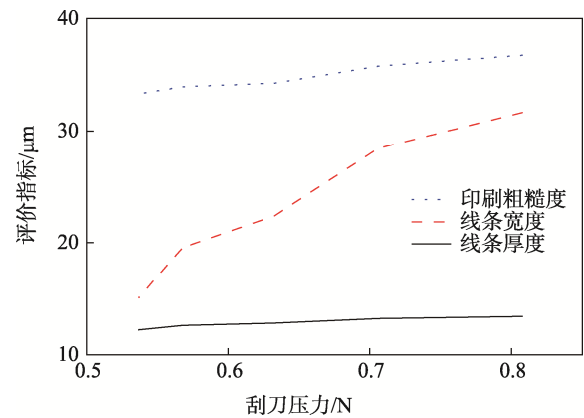


图 10 不同刮刀角度下对应刮刀压力与印刷质量之间关系

Fig.10 Relationship between corresponding doctor blade pressure and printing quality at different doctor blade angles

表 4 刮刀速度与其对应刮刀压力对印刷质量的影响

Tab.4 Impact of doctor blade speed and its corresponding pressure on printing quality

刮刀速度/($m \cdot s^{-1}$)	刮刀压力/N	线条厚度/ μm	线条宽度/ μm	表面粗糙度/ μm	边缘粗糙度/ μm	印刷粗糙度/ μm
0.04	0.3159	14.7	53.6	0.77	3.9	4.67
0.06	0.4739	14.7	54.1	1.00	4.1	5.1
0.08	0.6319	14.6	54.6	1.15	4.3	5.45
0.10	0.7898	14.5	54.9	1.35	4.4	5.75

为了更加直观地体现刮刀速度与其对应的刮刀压力对印刷质量的影响情况，绘制出曲线，见图11—12。

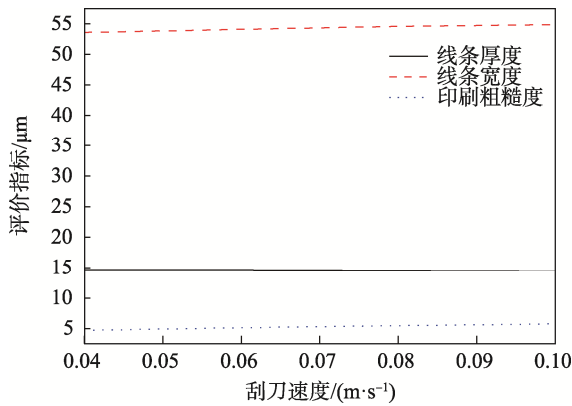


图 11 刮刀速度对印刷质量的影响情况

Fig.11 Effect of doctor blade speed on printing quality

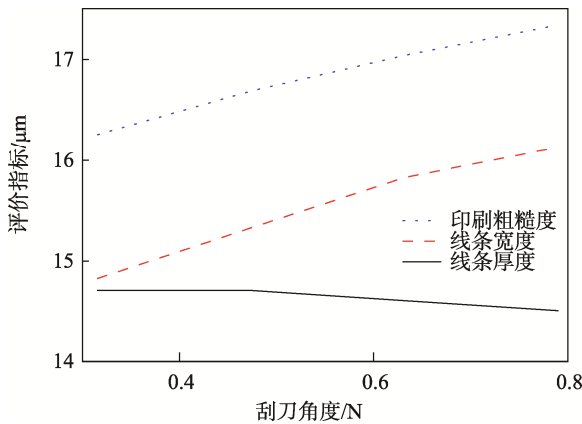


图 12 不同刮刀速度下对应刮刀压力与印刷质量之间的关系

Fig.12 Relationship between corresponding doctor blade pressure and printing quality at different doctor blade speeds

根据表 4，得出当刮刀速度越大，其对应的刮刀压力也就越大，但所生产出来的印品线条厚度、线条宽度和印刷粗糙度基本保持不变，这说明刮刀速度对精细丝网印刷影响不大。在实际实验过程中发现，若刮刀速度过大，会使得油墨粘性下降，流动性增加，导致印品出现油墨杠现象；若刮刀速度过小，会发生油墨渗透现象，导致印品尺寸过大和出现锯齿现象。

探究离网间距对精细丝网的影响时，同样采用控制变量法，即控制刮刀角度为 60°，刮刀速度为 0.08 m/s 不变，得到离网间距对印刷质量的影响情况，实验数据见表 5。

为了更加直观地体现出离网间距对印刷质量的影响情况，绘制出曲线，见图 13。

根据图 13 可知，随着离网间距增加，印品的线条厚度越来越厚，线条宽度和印刷粗糙度呈现先减小后增加的趋势。离网间距跟网版张力、刮刀压力和网

表 5 离网间距对印刷质量的影响
Tab.5 Influence of off-screen spacing on printing quality

离网间距/mm	线条厚度/ μm	线条宽度/ μm	表面粗糙度/ μm	边缘粗糙度/ μm	印刷粗糙度/ μm
1.0	10.5	45.5	1.30	8.1	9.4
1.5	11.0	38.0	1.25	6.4	7.65
2.0	12.1	36.4	1.30	4.6	5.9
2.5	13.7	41.0	1.40	4.8	6.2

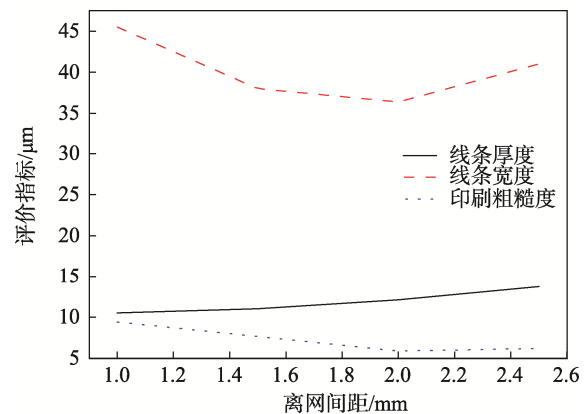


图 13 离网间距对印刷质量影响情况

Fig.13 Effect of off-screen spacing on printing quality

版的变形系数有关。若离网间距过大，会使得网版不能与承印物紧贴，导致印品图形不饱满；若离网间距过小，当刮刀刮过，网版不能立即弹回，导致印品图形模糊，表面粗糙。实验结果证明，此条件下离网间距为 2 mm 时印刷质量是最好的。

3.3 油墨粘度的影响及实验分析

该实验室精细丝网印刷所用油墨为纳米银导电油墨，该油墨是一种假塑性流体，属于层流^[15]。在探究油墨粘度对精细丝网印刷的影响时，采用单一因素实验法，即保持刮刀角度为 60°，离网间距为 2 mm，刮刀速度为 0.08 m/s 不变，只研究油墨粘度对印刷质量的影响。刮刀前方受压处的油墨量仍然为 6.84 m²。得到油墨粘度与其对应的刮刀压力对印刷质量的影响数据见表 6。

为了更加直观地体现出油墨粘度与其对应刮刀压力对印刷质量的影响情况，绘制出曲线，见图 14—15。

根据表 6 可知，随着油墨粘度的增加，刮刀压力也随着增加，印品线条厚度和印刷粗糙度呈现增加的趋势，线条宽度呈现先减小后增加的趋势。分析线宽变化趋势的原因，可能是在实验过程中，精细丝网印刷设备出现过大的振动，导致在进行油墨粘度为 2.5 Pa·s 的实验时，出现线条宽度增加的趋势。

表 6 油墨粘度与其对应刮刀压力对印刷质量的影响
Tab.6 Influence of ink viscosity and its corresponding doctor blade pressure on printing quality

油墨粘度/(Pa·s)	刮刀压力/N	线条厚度/ μm	线条宽度/ μm	表面粗糙度/ μm	边缘粗糙度/ μm	印刷粗糙度/ μm
1.0	0.279	10.2	50.4	1.1	4.5	5.6
1.5	0.418	11.9	48.1	1.4	5.3	6.7
2.0	0.558	12.3	43.1	1.8	6.6	8.4
2.5	0.697	13.5	44	2.5	7.5	10.0

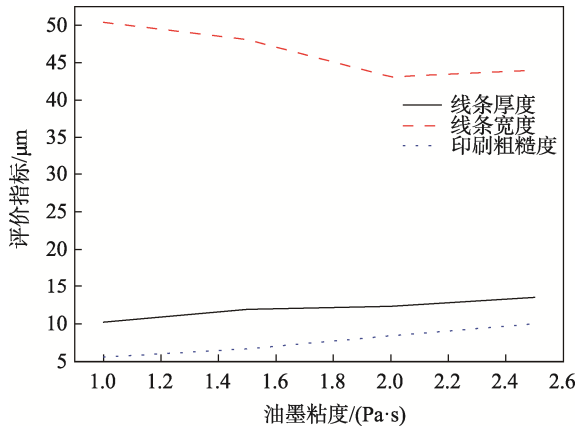


图 14 油墨粘度对印刷质量影响情况
Fig.14 Effect of ink viscosity on printing quality

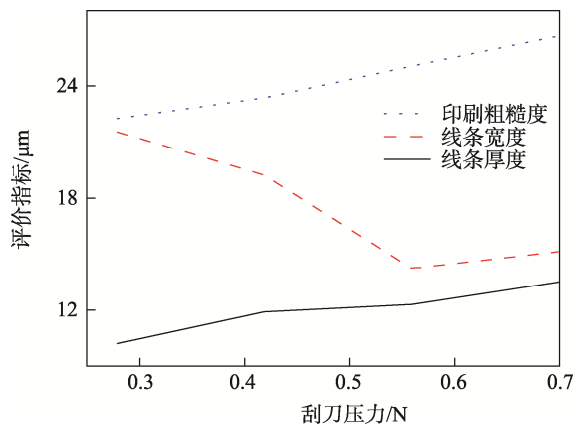


图 15 不同油墨粘度下对应刮刀压力与印刷质量之间的关系
Fig.15 Relationship between corresponding doctor blade pressure and printing quality for different ink viscosities

4 影响因子比较

根据实验结果，选取印刷条件为 SNS-360/16 型号的不锈钢网版、印刷角度为 60° 、离网间距为 2 mm、印刷速度为 0.08 m/s、油墨粘度为 2.265 Pa·s。得到各个影响因子对应的评价指标数据见表 7。

精细丝网印刷中影响最大的是网版^[8]。根据式 (2) 可知，印刷角度、印刷速度、油墨粘度决定印刷压力的大小，而离网间距又与印刷压力有关，因此印刷压力影响次之。

表 7 各个影响因子对应下的评价指标数据
Tab.7 Evaluation index data corresponding to each impact factor

影响因子	线条厚度/ μm	线条宽度/ μm	印刷粗糙度/ μm
离网间距	12.1	36.4	5.9
油墨粘度	12.3	43.1	>8.4
刮刀速度	14.6	54.6	5.45
刮刀角度	12.8	46.9	6.5

根据表 7 的数据结果分析，相同印刷条件下，各个影响因子对线条厚度和印刷粗糙度的影响数据相差不大，因此选用线条宽度作为比较各个影响因子的指标。由于线条宽度越小，印品质量就越好，所以建立相同印刷条件下，线宽越小，其对应的影响因子影响就越大描述模型，得到对精细丝网印刷质量影响的结果为离网间距>油墨粘度>刮刀角度>刮刀速度。

5 结语

首先对精细丝网印刷过程做了详细的分析；接着将精细丝网印刷过程的微观机理分为 3 个部分，即油墨向网孔中填墨机理、油墨从网孔向承印物转移机理以及油墨在承印物上的流平铺展，最后趋于稳定机理，并建立了相应的静态物理模型。分析了网版参数、印刷工艺和油墨粘度对精细丝网印刷质量的影响，并利用实验数据加以验证。文中得出的主要结论如下所述。

1) 油墨仅在自身重力下，向网孔中填墨，稳定后呈现凹形。在油墨向承印物转移过程中，不考虑丝网张力作用，仅仅依靠刮刀压力和自身重力作用，实现油墨的转移。在油墨自身重力下流平铺展，最后趋于稳定，完成一次印刷。

2) 网版目数和线径直接影响最小网点的直径。网点直径越小，印品分辨率就越高，印刷质量就越好。文中验证了 SNS-360/16 型号的不锈钢网版是最佳的。

3) 在一定范围内，刮刀角度越小，刮刀压力越大，刮刀速度越大，其印品质量就越好，超出这个范围就会影响其印品质量。离网间距不宜过大，也不宜

过小,在刮刀角度为 60° ,刮刀速度为 0.08 m/s 下的离网间距最佳为 2 mm 。

4) 纳米银导电油墨粘度对印刷质量的影响不是同步变化的,若追求低厚度和小粗糙度印品,则选择低粘度油墨;若追求低线宽印品,则选择高粘度油墨。

5) 比较各个影响因子对精细丝网印刷质量的影响程度,得到的结果由高到低排序为网版参数>刮刀压力>离网间距>油墨粘度>刮刀角度>刮刀速度。

6) 由于实验条件限制,文中只是粗略地得到丝网印刷各个影响因子对印品导电性能的影响程度大小。由此上升至导电油墨转移的微观机理,各个影响因子对油墨转移到承印物上落墨量的影响情况有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 庄严. 印刷电子学发展[J]. 电子元件与材料, 2010, 29(9): 1—5.
ZHUANG Yan. Development of Printed Electronics[J]. Electronic Components and Materials, 2010, 29(9): 1—5.
- [2] 赵冬柏. 丝网印刷工艺[M]. 长沙: 湖南科技出版社, 2012: 1—20.
ZHAO Dong-bai. Screen Printing Process[M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 2012: 1—20.
- [3] 叶义成. 丝网印刷工艺参数分析与研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007: 1—5.
YE Yi-cheng. Analysis and Research on Screen Printing Process Parameters[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007: 1—5.
- [4] TAYLOR G I. On Scraping Viscous Fluid from a Plane Surface[J]. *Miszellaneen der Angewandten Mechanik*, 1962, 28(4): 313—315.
- [5] 岳洋. 浅析丝印用刮墨刀影响质量的关键因素[J]. 印刷质量与标准化, 2015(9): 26—27.
YUE Yang. Analysis of the Key Factors Affecting the Quality of Screen Printing With Squeegee[J]. *Printing Quality and Standardization*, 2015(9): 26—27.
- [6] 车龙. 丝印导电布线分辨率降低的现象及其机理[J]. 电工材料, 2016, 11(1): 15—19.
CHE Long. The Phenomenon of Reduced Resolution of Screen Printed Conductive Wiring and Its Mechanism[J]. *Electrical Materials*, 2016, 11(1): 15—19.
- [7] 刘富. 基于TRIZ流分析的丝网印刷电子关键技术研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2019: 38—47.
LIU Fu. Research on Key Technologies of Screen Printing Electronics for TRIZ Flow Analysis[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2019: 38—47.
- [8] 张彦辉. 印刷电子的丝网印刷关键技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018: 5—7.
ZHANG Yan-hui. Research on Key Technologies of Screen Printing for Printed Electronics[D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2018: 5—7.
- [9] 李飞. 丝网印刷工艺与参数研究-精细丝网印刷工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007: 36—44.
LI Fei. Screen Printing Process and Parameters Research-fine Screen Printing Process Research[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2007: 36—44.
- [10] 倪文虎. 工业网版印刷的数学模型研究[J]. 包装工程, 2010, 31(15): 102—105.
NI Wen-hu. Research on Mathematical Model of Industrial Screen Printing[J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(15): 102—105.
- [11] LEE J E, MUN K K, YOO Y T, et al. A Comparative Study on Roll-to-roll Gravure Printing on PET and BOPP Webs with Aqueous Ink[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2009, 64(1): 98—108.
- [12] 刘彦辉. 不锈钢印刷丝网简介[J]. 丝网印刷, 2013, 4(5): 30—32.
LIU Yan-hui. Introduction to Stainless Steel Printing Screen[J]. *Screen Printing*, 2013, 4(5): 30—32.
- [13] 唐利锋, 曹坤, 程凯, 等. 影响高精细丝网印刷质量的因素[J]. 材料与工艺, 2012, 32(2): 188—191.
TANG Li-feng, CAO Kun, CHENG Kai, et al. Factors Affecting the Quality of High-definition Screen Printing[J]. *Materials and Crafts*, 2012, 32(2): 188—191.
- [14] 李婧伟. 精细丝网印刷技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009: 16—18.
LI Jing-wei. Research on Fine Screen Printing Technology[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009: 16—18.
- [15] 刘世朴, 李艳, 王麒邴. 凹胶印刷电子油墨铺展过程分析及实验[J]. 包装工程, 2019, 40(13): 246—251.
LIU Shi-pu, LI Yan, WANG Qi-li. Analysis and Experiment of the Spreading Process of Gravure Printing Electronic Inks[J]. *Packaging Engineering*, 2019, 40(13): 246—251.