

丝网印刷电子工艺参数对印刷质量的影响

田野^{1,2,3}, 李艳^{1,2,3}, 袁英才^{1,2,3}, 刘富^{1,2,3}

(1. 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校工程研究中心, 北京 102600; 3. 北京市印刷电子工程技术研究中心, 北京 102600)

摘要: **目的** 研究丝网印刷过程中刮胶角度、刮胶速度、离网间距、刮胶压力对印刷品质的影响规律, 为丝网印刷电子的实际应用提供技术参考。**方法** 利用现有丝网印刷试验台, 对 4 个印刷参数进行正交试验; 运用偏最小二乘法对实验中的数据进行影响因素主次判断。**结果** 离网间距对印刷电子中导电线条宽度和导电线条表面粗糙度的影响最为明显, 刮胶压力、刮胶角度和刮胶速度在确定范围内对导电线条表面粗糙度和宽度的影响并不明显; 经由正交试验分析出丝网印刷的最优工艺条件为 $C_3A_1D_1B_3$ 。**结论** 通过偏最小二乘法对实验数据进行分析, 验证了正交试验的合理性; 在丝网印刷电子印制过程中, 正确选用合理的离网间距是获得高品质印品的关键。

关键词: 丝网印刷; 印刷质量; 工艺参数; 正交试验; 偏最小二乘法

中图分类号: TS871.1; TS801.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)05-0250-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.05.036

Influence of Screen Printing Electronic Process Parameters on Printing Quality

TIAN Ye^{1,2,3}, LI Yan^{1,2,3}, YUAN Ying-cai^{1,2,3}, LIU Fu^{1,2,3}

(1. Beijing Key Laboratory of Digitization Printing Equipment, Beijing 102600, China;
2. Engineering Research Center of Printing Equipment of Beijing Universities, Beijing 102600, China;
3. Beijing Engineering Research Center of Printed Electronics, Beijing 102600, China)

ABSTRACT: The work aims to study the law of effects of squeegee angle, squeegee speed, off-grid spacing and squeegee pressure on the quality of printed products during screen printing, so as to provide technical reference for the practical application of screen printing electronics. The orthogonal test was carried out on the four printing parameters with the existing screen printing test bench. The partial least squares method was used for the primary and secondary judgment on the influencing factors of the data in the experiment. The off-grid spacing had the most obvious influence on the width and surface roughness of the conductive lines in the printed electronics. The effect of the squeegee pressure, the squeegee angle and the squeegee speed on the surface roughness of conductive lines was not obvious. Based on the orthogonal test analysis, the best technological condition for screen printing was $C_3A_1D_1B_3$. The experimental data were analyzed by partial least squares method to verify the rationality of the orthogonal test. In the screen printing electronic printing process, the correct selection of reasonable off-grid spacing is the key to obtain high quality printed products.

KEY WORDS: screen printing; printing quality; process parameters; orthogonal test; partial least squares method

收稿日期: 2019-05-29

基金项目: 科技创新服务能力建设项目 (Ec201714)

作者简介: 田野 (1995—), 男, 北京印刷学院硕士生, 主攻精细丝网印刷电子成型技术。

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。

丝网印刷在电子工业领域应用十分广泛，其中，在印刷电子领域应用最为广泛。印刷电子技术是以印刷工艺的方式加工生产电子产品的制造技术，通过研究分析丝网印刷中主要工艺参数对印品质量的影响，对提升实际生产试验中丝网印刷电子产品的精度有十分重要的意义。影响丝网印刷精度的因素较多，文中基于实验室自行研制的丝网印刷电子试验台，以纳米银导电油墨为标准油墨，就研究丝网印刷过程中刮胶角度、刮胶速度、离网间距、刮胶压力对印刷品质量的影响规律。

1 实验

1.1 丝网印刷电子评价指标的建立

印刷电子行业对丝网印刷印品线条精度的要求要远大于传统丝网印刷行业对印刷印品线条精度的要求，因此对于丝网印刷电子质量的评价，建立一个恰当的质量评价指标是十分重要且有意义的。

车龙^[1]通过对丝网印刷电子领域的高分辨率导电布线技术的分析，得出了分辨率的准确定义，他将线宽作为分辨率的评价指标。刘富^[2]指出导电线条的线厚和印刷粗糙度可同时作为丝网印刷电子的评价指标。文中综合上述 2 种评价方法以导电线条的宽度和表面粗糙度作为丝网印刷电子印刷质量的评价标准，使用的检测仪器是激光共聚焦形貌测量显微镜。

李飞^[3]通过模拟固定式网版在印刷过程中变形的情况，得出刮板在运动过程中，刮板位置、网版及图文之间存在当刮板从网版边缘开始向网版中心移动时，网版变形最严重，当刮板移动到网版中心时，变形急剧减小并趋于平稳的关系。该次试验采用固定式网版的方式印制规格长为 150 mm，宽为 150 μm 的导电线条，为了防止印刷时因刮板运动造成网版和图文变形，将导电线条均匀分成 A，B，C 等 3 段，见图 1。目的是在后期的试验数据分析中能更精确地分析印刷工艺参数对印品质量的影响。印品线条实物见图 2。

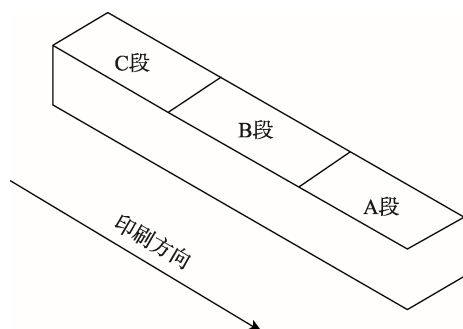


图 1 导电线条均分示意

Fig.1 Schematic diagram of equally divided conductive lines

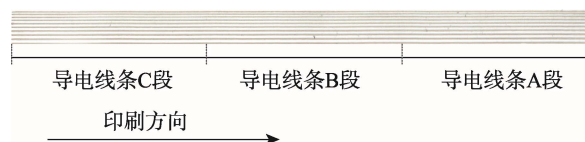


图 2 印品线条实体

Fig.2 Print line entity

1) 导电线条宽度。对于印刷电子，线宽是权衡印刷电子印品质量的重要指标之一，为了取得精度高的线条，需要印刷分辨率足够高。印刷分辨率常见的 2 种表示方法分别为：利用印品的线条宽度（线宽）作为印刷分辨率，印品线宽表示见图 3a，分辨率表示为 r ；为了更精准地形容线条的精细度，设置 2 个参数即线间距和线宽，见图 3b，分辨率记为 r/d 。导电线条的宽度是关键性的评价指标。导电线条宽度越小，即分辨率越高，对印刷电子产品的性能越有利。反之，容易造成导电线路短路，从而影响电子器件的正常性能。印品线宽测量见图 4。由图 4 可以看出，印品导电线条明显宽于设计尺寸，出现了图案的整体宽化。引起图案整体宽化的原因非常多，其中 2 个主要原因是：浆料的流动特性^[4]；“咖啡环”效应引起的“钉扎”作用^[4]。

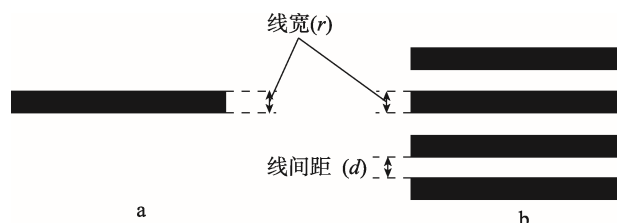


图 3 印品线宽

Fig.3 Print line width

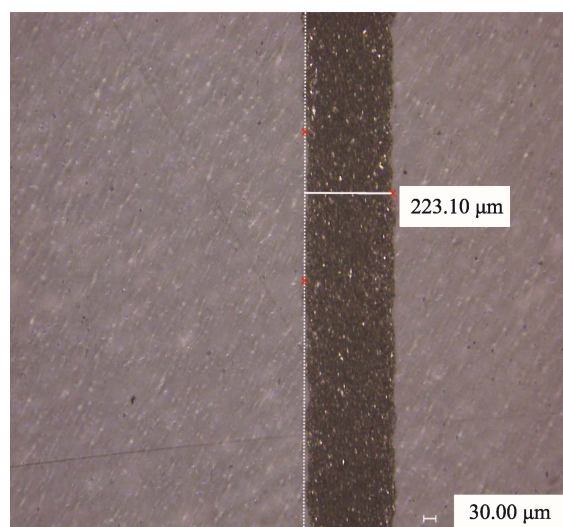


图 4 印品线宽测量

Fig.4 Print line width measurement

2) 导电线条表面粗糙度。为了评估导电线条的印刷质量，提出导电线条的表面粗糙度的评价指标。

表面粗糙度是表面微观几何形状的误差。在印刷过程中,由于印刷工艺和油墨流平性等各种因素的共同影响,从而形成了印品线条表面较小峰谷的微观几何误差。

对于如何选用电线条的表面粗糙度评定参数,国家标准推荐优先采用轮廓算数平均偏差 R_a 。在一个取样长度 l 内,纵坐标 $Z(x)$ 绝对值的算术平均值见图 5。印刷粗糙度测量图见图 6,其中横坐标表示印品线条的宽度,纵坐标表示印品线条的表面高度。计算轮廓算数平均偏差 R_a 见式(1)。

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx \quad (1)$$

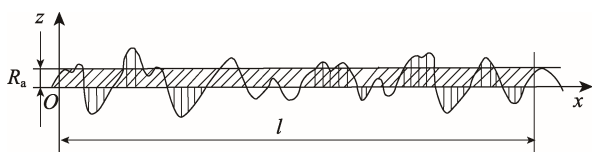


图 5 轮廓算数平均偏差

Fig.5 Arithmetical mean deviation of the profile

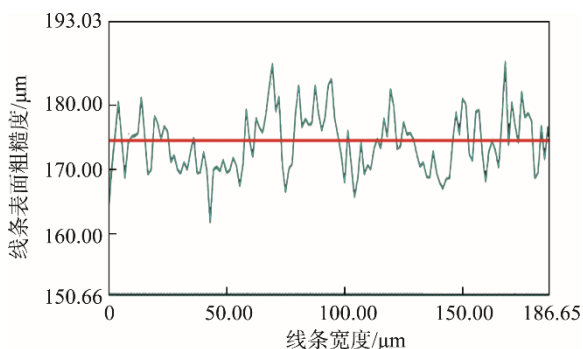


图 6 印刷粗糙度测量

Fig.6 Printing roughness measurement

R_a 值越小导电线条的表面粗糙度越小,印品导电性能越好、性能越稳定;相反,导电线条的表面粗糙度过大则影响导电性,甚至可能造成印品线路断路的严重后果。

1.2 主要材料和仪器

试验仪器:数字显示搅拌机(RW20 数显型、GermanyIKA)(仪器型号、生产厂商),粘度计(DV2TRV 型、US BROOKFIELD),力学法表面张力仪(K100、GermanyKRUSS),超声波清洗仪(KKQ5200、昆山超声仪器有限公司),激光共聚焦形貌测量显微镜(VK-X200、JapanKEYENCE),印刷电子试验台(自主研发)。

试验材料:稀释液(工业级、嘉宝莉化工集团),无水乙醇(98%,分析纯、北京化工厂有限责任公司),丝网网版清洗液(工业级、嘉宝莉化工集团),银浆导电油墨(试验纳米级、北京印刷电子工程技术中心)。

实验所用纳米银导电油墨都来自北京印刷电子工程技术中心,对于纳米银导电油墨的基本属性可以认定不会改变,即纳米银导电油墨的基本参数是固定的。在设计实验中纳米银导电油墨的粘度和浓度对印刷质量不产生影响。

激光共聚焦形貌测量显微镜采用日本KEYENCE 公司的 VK-X200 型仪器,在观测能力方面该显微镜具有非常大的景深和高分辨率,可以清晰聚焦图像,其测量头具有可拆卸的功能,允许测量任意尺寸的待测样品,并且采用 16 比特激光彩色观察系统,测量速度快,可以实现精细测量。

1.3 因素水平的确定

此次实验采用正交实验设计法,正交试验设计法是研究多因素多水平的一种设计方法,它是根据正交性从全面试验中筛选出最具代表性的几个点进行试验分析,这些有代表性的点的特点是均匀分散、齐整可比。正交试验设计是分式析因设计的主要方法,是一种经济、高效、快速的实验设计方法^[5]。

根据李茜^[6]对丝网印刷导电油墨转移率的影响因素的研究,该次实验确定每个因素均取 3 个水平。导电油墨的转移率随印刷压力的增加而增加,当到达一定值时,转移率不变,确定刮胶压力的 3 个水平分别为 60, 100, 140 N;随着印刷速度的增加,油墨转移率逐渐减小,确定刮胶速度的 3 个水平分别为 60, 80, 100 mm/s;当刮胶角度在一定范围改变时,角度越小,导电油墨转移率越高,但刮胶角度并非越小越好,刮胶角度的选择应与印刷速度、油墨粘度、网版材质等因素相适应,确定刮胶角度分别为 60°, 65°, 70°。根据刘富^[2]对影响丝网印刷质量的研究和王珊^[7]对丝网印刷工艺对印刷效果的研究可知,丝网网版会在印刷过程中会产生形变,从而引起印刷图案在承印物上发生位移或变形,考虑实际印刷情况和网版材质,确定离网间距分别为 1, 2, 3 mm。因素水平见表 1。

表 1 因素水平

Tab.1 Factor level

水平	因素			
	刮胶角度 A/(°)	刮胶速度 B/(mm·s ⁻¹)	离网间距 C/mm	刮胶压力 D/N
1	60	60	1	60
2	70	80	2	100
3	65	100	3	140

1.4 方案设计

实验为四因素三水平实验,所以可选用正交表 $L_9(3^4)$,具体正交试验方案见表 2。

表 2 正交试验方案
Tab.2 Orthogonal test plan

试验编号	试验因素			
	刮胶角度	刮胶速度	离网间距	刮胶压力
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

1.5 实验条件

实验环境条件 :丝网印刷试验台周围环境温度为 (25±2)℃ , 周围环境中空气的相对湿度为(49±5)%。

1.6 实验过程

实验过程流程见图 7。

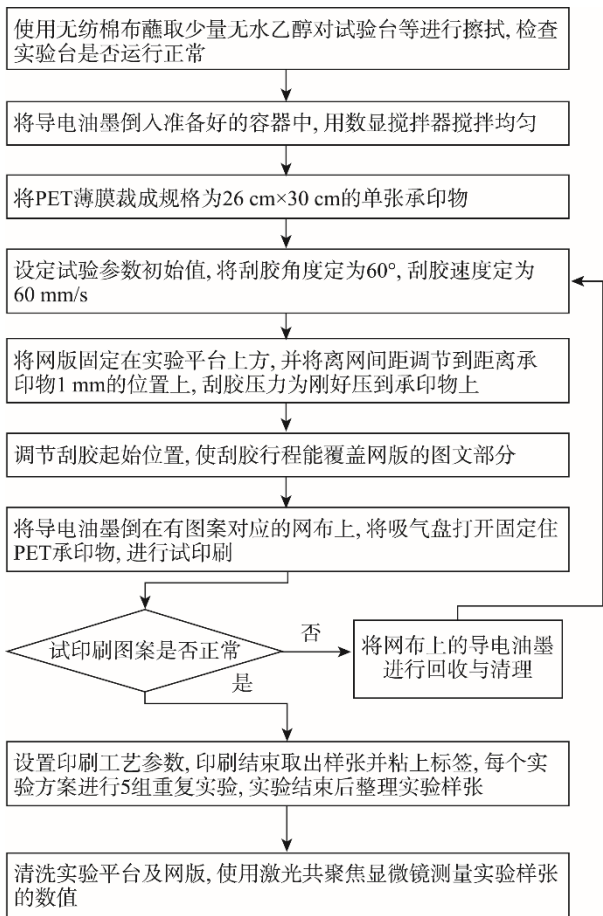


图 7 实验过程流程
Fig.7 Experimental process flow chart

2 结果与分析

2.1 印刷参数对印刷质量的影响

文中以导电线条表面粗糙度和导电线条宽度为丝网印刷电子中印品质量评价指标。该次实验以定性的方法分析实验参数对印刷品质量的影响,通过偏最小二乘法对实验数据进行分析,得出定量评价模型。

2.1.1 A 段导电线条表面粗糙度

4 种印刷参数对导电线条 A 段表面粗糙度的影响见图 8。由图 8a 可以看出,导电线条表面粗糙度在刮胶角度在 60 ° ~ 65 ° 范围内逐步增加,在 65 ° ~ 70 ° 逐步降低;由图 8b 可以看出,当刮胶速度在 60 ~ 80 mm/s 范围时,导电线条表面粗糙度连续增大,在 80 ~ 100 mm/s 时降低;由图 8c 可以看出,当离网间距在 1 ~ 2 mm 范围时,导电线条表面粗糙度连续降低,当距离在 2 ~ 3 mm 时开始上升;由图 8d 可以看出,当刮刀压力在 60 ~ 100 N 范围时,导电线条表面粗糙度连续增大,在 100 ~ 140 N 范围内降低。

2.1.2 B 段导电线条表面粗糙度

4 种印刷参数对导电线条 B 段表面粗糙度的影响见图 8。由图 8a 可以看出,导电线条表面粗糙度在刮胶角度 60 ° ~ 65 ° 范围时开始连续增加,在 65 ° ~ 70 ° 时呈缓慢降低趋势;由图 8b 可以看出,当刮胶速度在 60 ~ 80 mm/s 范围时,导电线条表面粗糙度逐步降低,在 80 ~ 100 mm/s 时缓慢增加;由图 8c 可以看出,导电线条表面粗糙度随离网间距增大而逐渐降低;由图 8d 可以看出,导电线条表面粗糙度随印刷压力的增加连续增大。

2.1.3 C 段导电线条表面粗糙度

4 种印刷参数对导电线条 C 段表面粗糙度的影响见图 8,由图 8a 可以看出,导电线条表面粗糙度在刮胶角度在 60 ° ~ 65 ° 范围内开始连续降低,在 65 ° ~ 70 ° 时缓慢增加;由图 8b 可以看出,导电线条表面粗糙度随刮胶速度增加而逐步减小;由图 8c 可以看出,当离网间距在 1 ~ 2 mm 范围时,导电线条表面粗糙度逐步减小,当距离在 2 ~ 3 mm 时逐步增加;由图 8d 可以看出,导电线条表面粗糙度随刮刀压力增大而减小。

2.1.4 导电线条宽度

4 种印刷参数对导电线条宽度的影响见图 9,由图 9a 可以看出,导电线条宽度在刮刀角度在 60 ° ~ 65 ° 范围内时,逐步降低,在 65 ° ~ 70 ° 时缓慢增加;由图 9b 可以看出,导电线条宽度随刮胶速度增加而逐步降低;由图 9c 可以看出,导电线条宽度随离网间距增加而逐步减小;由图 9d 可以看出,导电线条

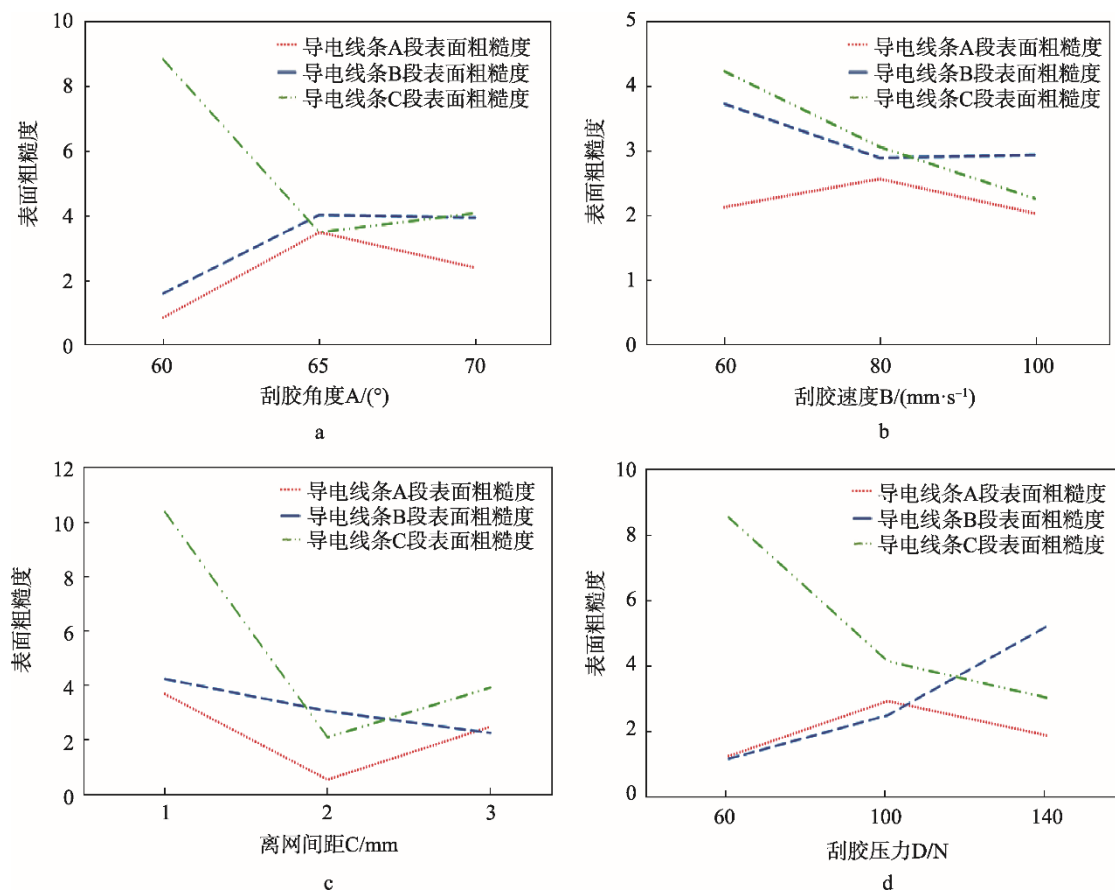


图 8 印刷工艺参数的改变对导电线条粗糙度的影响

Fig.8 Influence of changes in printing process parameters on the roughness of conductive lines

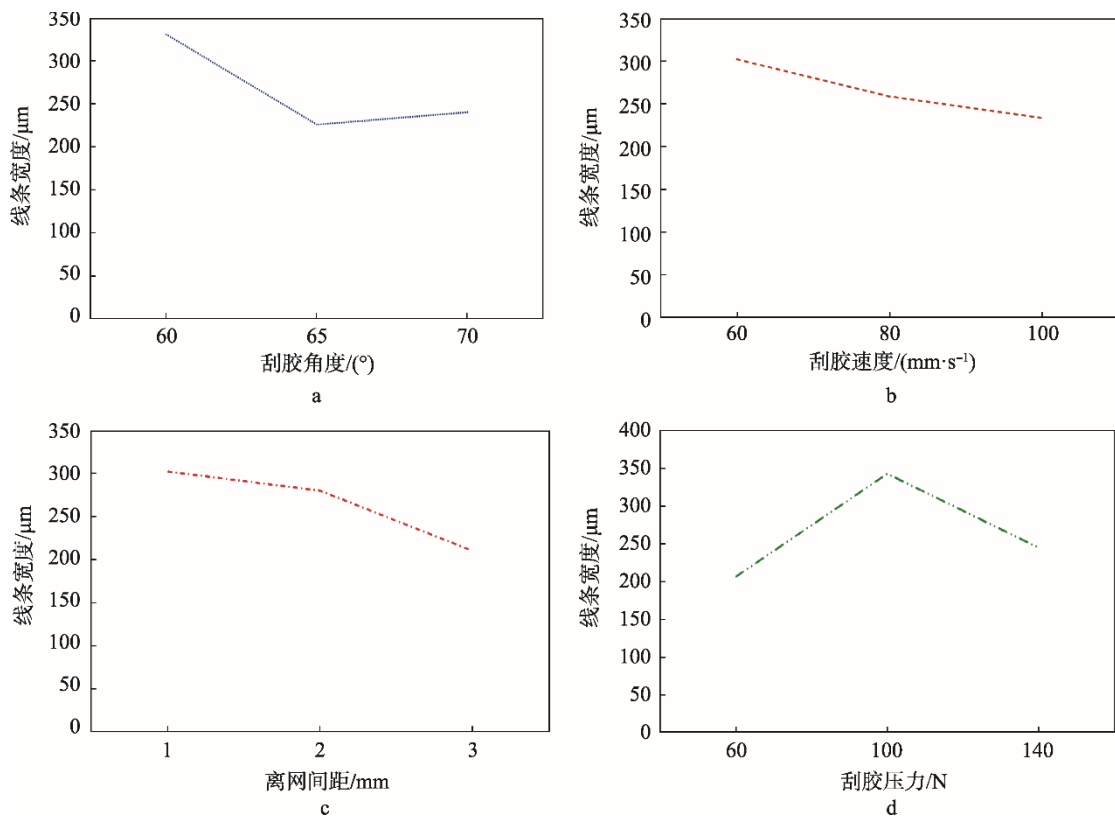


图 9 印刷工艺参数的改变对导电线条宽度的影响

Fig.9 Influence of changes in printing process parameters on the width of conductive lines

宽度在刮刀压力在 60 ~ 100 N 范围时,逐步增大,在 100 ~ 140 N 时逐步减小。

导致图 8 中 A, B, C 等 3 段导电线条粗糙度值范围差异的原因如下所述。

1) 由于网版与回墨刀接触距离不合适,导致回墨刀匀墨时纳米银导电油墨不能完全填充到网版网穴中,从而影响同一印品线条 A, B, C 3 段表面粗糙度不一致。

2) 刮胶在挤压纳米银导电油墨或转移纳米银导电油墨的过程中,刮胶刀刃处变形不一致,导致同一印品线条 A, B, C 3 段表面粗糙度不一致。

3) 印刷环境温度过高或者印刷时间过长,纳米银导电油墨粘度增加或局部凝固,导致网版局部堵塞,使得漏墨过程中油墨转移率降低,从而影响同一印品线条 A, B, C 等 3 段表面粗糙度不一致。

4) 吸气盘对承印材料吸力过大,导致承印材料局部呈凹陷状,在同一印刷条件及环境下,吸气盘作用力过大处会发生墨层厚度较小的情况,从而影响同一印品线条 A, B, C 等 3 段表面粗糙度不一致。

5) 吸气盘对承印材料局部吸力不足,导致印刷时承印材料受网版与纳米银导电油墨的摩擦力影响,发生轻微位移,从而出现局部线条线宽扩大。

对于自主研发的丝网印刷电子实验台还存在一些细微改进的地方,日后会针对特殊功能及问题进行改进。

3 讨论

3.1 确定最优试验方案

此次试验对测量结果中的坏值采用狄克逊准则进行清除^[5],然后取实验数据的平均值将结果填加到实验数据分析表中。文中对试验数据采用综合平衡法进行分析,首先分别对每个指标进行单指标直观分析,进而得到实验影响因素的主次顺序,依据实践经验和理论知识,将印刷评价指标(导电线条表面粗糙度和导电线条宽度)的结果进行全面比对和解析,最后得出最佳丝网印刷参数组合方案。

3.1.1 计算极差,确定主次顺序

K_i 表示任意一列印刷工艺参数(刮胶角度 A、刮胶速度 B、离网间距 C、刮胶压力 D)水平号为 i 时所对应的实验数据之和。

k_i 表示任意一列印刷工艺参数(刮胶角度 A、刮胶速度 B、离网间距 C、刮胶压力 D)因素取水平 i 时所得实验数据的算术平均值。 k_i 的方程见式(2)。

$$k_i = \frac{K_i}{s}$$

(2)

式中: s 为任一列上各水平出现的次数。

极差 R 的方程为:

$$R = \max \{K_1, K_2, K_3\} - \min \{K_1, K_2, K_3\}$$

(3)

或

$$R = \max \{k_1, k_2, k_3\} - \min \{k_1, k_2, k_3\}$$

(4)

各列极差不同,表示各因素水平的变换对试验结果的作用是不相同,极差的值越大代表这列因素的数值在试验范畴内的改变会引起试验指标在数值上有更大的改变,极差数值最大列就是因素的水平对试验所测数值影响最大的因素,即主要因素。

3.1.2 优选方案的确定

优选方案是指在所做的试验范畴中,各因素比较中最优的水平组合。最优水平的判定与试验指标有关,若指标需要越大越好,则需采用使指标大的水平,即 K_i (或 k_i) 中最大数值对应的水平;反之,若需要指标越小越好,则需采用使指标数值最小对应的水平。该次试验中,导电线条的表面粗糙度和导电线条宽度应采用指标小的水平。

3.1.3 实验数据

由正交实验得到的 9 组实验结果^[2],见表 3。

实验中 A 段导电线条表面粗糙度的数据处理见表 4。

实验中, B 段导电线条表面粗糙度的数据处理见表 5。

实验中, C 段导电线条表面粗糙度的数据处理见表 6。

实验中,导电线条宽度的数据处理见表 7。

按照极差 R 与实验评价指标数值的大小来拟定 4 个因素的最佳水平组合。

对 A 段导电线条表面粗糙度最佳水平组合为: $C_2B_3D_3A_3$; 对 B 段导电线条表面粗糙度最佳水平组合为: $D_1A_1C_3B_2$; 对 C 段导电线条表面粗糙度最佳水平组合为: $C_2A_1D_1B_3$; 对导电线条宽度最佳水平组合为: $D_1A_3C_3B_3$ 。

表 3 实验结果

Tab.3 Test results

μm

编号	表面粗糙度			导电线条宽度
	A 段导电线条	B 段导电线条	C 段导电线条	
1	21.601	1.41	1.421	347.812
2	2.661	0.731	0.412	418.542
3	2.232	2.693	0.761	225.821
4	3.12	6.622	0.46	273.902
5	4.102	0.931	2.21	121.741
6	5.021	4.28	4.541	324.82
7	5.46	3.201	4.532	287.302
8	4.421	7.031	5.121	237.641
9	0.581	1.872	0.822	151.931

表 4 A 段导电线条表面粗糙度的数据处理
Tab.4 Data processing of surface roughness of A segment conductive lines

μm

实验因素	刮胶角度 A	刮胶速度 B	离网间距 C	刮胶压力 D	主次因素	优选方案
K_1	26.494	30.184	31.043	26.284	CBDA	$C_2B_3D_3A_3$
K_2	12.243	11.184	6.362	13.142		
K_3	10.462	7.834	11.794	9.773		
k_1	8.831	10.061	10.348	8.761		
k_2	4.081	3.728	2.121	4.381		
k_3	3.487	2.611	3.931	3.258		
极差 R	5.344	7.45	8.227	5.503		

表 5 B 段导电线条表面粗糙度的数据处理
Tab.5 Data processing of surface roughness of B segment conductive lines

μm

实验因素	刮胶角度 A	刮胶速度 B	离网间距 C	刮胶压力 D	主次因素	优选方案
K_1	4.832	11.233	12.721	4.213	DACB	$D_2A_3C_3B_3$
K_2	11.833	8.693	9.225	8.212		
K_3	12.14	8.843	6.823	16.344		
k_1	1.611	3.744	4.24	1.404		
k_2	3.944	2.898	3.075	2.737		
k_3	4.047	2.948	2.274	5.448		
极差 R	2.436	0.846	1.966	4.044		

表 6 C 段导电线条表面粗糙度的数据处理
Tab.6 Data processing of surface roughness of C segment conductive lines

实验因素	刮胶角度 A	刮胶速度 B	离网间距 C	刮胶压力 D	主次因素	优选方案
K_1	2.595	6.413	11.083	4.453	CADB	$C_2A_1D_1B_3$
K_2	7.211	7.743	1.694	9.485		
K_3	10.475	6.124	7.503	6.342		
k_1	0.865	2.138	3.694	1.483		
k_2	2.404	2.581	0.565	3.162		
k_3	3.492	2.041	2.501	2.114		
极差 R	2.627	0.54	3.129	1.679		

表 7 导电线条宽度的数据处理
Tab.7 Data processing of conductive line width

实验因素	刮胶角度 A	刮胶速度 B	离网间距 C	刮胶压力 D	主次因素	优选方案
K_1	992.175	909.016	910.273	621.484	DACB	$D_1A_3C_3B_3$
K_2	720.463	777.924	844.375	1030.664		
K_3	676.874	702.572	634.864	737.364		
k_1	330.725	303.005	303.424	207.161		
k_2	240.154	259.308	281.458	343.555		
k_3	225.625	234.191	211.621	245.788		
极差 R	105.1	68.814	91.803	136.394		

对导电线条表面粗糙度进行综合评价, 因素 C (离网间距) 的影响最大, 选择 C 为主要因素, 按实验数据多数倾向以 C_3 为优, 选择因素 A 为次主要因素, 按实验数据多数倾向采用 A_1 为优; 其次为 D_1 , 最后为 B_3 。

对导电线条宽度进行综合评价, 因素 D (刮胶压

力) 的影响最大, 选择因素 D 为主要因素, 按实验数据多数以 D_1 为优, A 为次优选择, 按实验数据多数以 A_1 为优, 接着为 C_3 , 最后为 B_3 。

综合分析上述 2 个指标, 对印品质量影响最大的因素为 C (离网间距), 所以导电线条最优印刷工艺条件为: $C_3A_1D_1B_3$ 。

3.2 偏最小二乘法

为了进一步验证正交实验确定的最佳印刷工艺条件的可靠性,采用偏最小二乘法对实验数据进行分析,工艺参数与印品质量评价指标之间的偏最小二乘法回归方程为见式(5)。

$$y_i = b_i + a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + a_{i4}x_4 \tag{5}$$

式中： y_i ($i=1,2,3,4$) 分别为 A 段导电线条表面粗糙度、B 段导电线条表面粗糙度、C 段导电线条表面粗糙度、导电线条宽度 4 个印品评价指标； x_1, x_2, x_3, x_4 依次为刮胶角度、刮胶速度、离网间距、刮胶压力 4 个印刷工艺参数； $a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, a_{i4}$ ($i=1,2,3,4$) 为偏最小二乘回归方程中刮胶角度、刮胶速度、离网间距、刮胶压力等 4 个印刷参数的回归系数； b_i ($i=1,2,3,4$) 为偏最小二乘回归方程中的常数项。

3.2.1 决定系数

为评价曲线拟合效果,引入决定系数,用于验证回归方程对样本观测值的契合程度。一般可以用决定系数 R^2 来进行评价。 R^2 的表达式见式(6—8)。

$$R^2 = 1 - \frac{T_{SSE}}{T_{SST}} \tag{6}$$

$$T_{SSE} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \tag{7}$$

$$T_{SSE} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \tag{8}$$

T_{SSE} 为残差平方和,反应了一个线性模型中衡量模型拟合程度的一个量。 T_{SST} 为总离差平方和,表示回归平方和与残差平方和的和。

谢兰^[9]在非线性回归方法的应用与比较中介绍, T_{SSE} 在 T_{SST} 中所占比例越小,回归方程的决定系数 R^2 的值越接近 1,表明预测值与实际值的变化趋势一致性越好。

偏最小二乘法模型对 B 段导电线条表面粗糙度 (y_2)、导电线条宽度 (y_4) 这 2 个指标进行了良好的预测。而对 A 段导电线条表面粗糙度 (y_1) 和 C 段导电线条表面粗糙度 (y_3) 的回归模型精度显然低于 B 段导电线条表面粗糙度 (y_2)、导电线条宽度 (y_4) 2 个指标,即联系性略差。可知,对于 A、C 段导电线条粗糙度,印刷方式的影响是显著的。如实验中丝网印刷采用固定式网版的印刷方式,A、C 等 2 段均处于网版边缘处,当刮板在网版边缘处运动时,网版变形严重^[3],引起图文质量受到影响即 A、C 等 2 段粗糙度增大。各印品质量评价指标偏最小二乘法方程和 R^2 见表 8。

偏最小二乘法回归方程的回归系数见表 9。表 9 能够更直接地反映出印刷工艺参数对印品评价指标

表 8 偏最小二乘法分析结果
Tab.8 Partial least squares analysis results

评价指标	回归方程	R^2
y_1	$y_1=-8.351944+0.154000x_1+0.034000x_2+1.456667x_3+0.007875x_4$	0.4538
y_2	$y_2=-15.43194+0.233333x_1-0.007667x_2-0.490000x_3+0.050542x_4$	0.7888
y_3	$y_3=58.11972-0.475000x_1-0.108500x_2-3.110000x_3-0.068792x_4$	0.6621
y_4	$y_4=943.5483-9.057000x_1+0.264222x_2-79.38222x_3+0.482833x_4$	0.7125

表 9 偏最小二乘法回归方程的系数
Tab.9 Coefficient of partial least squares regression equation

导电线条	刮胶角度 (a_1)	刮胶速度 (a_2)	离网间距 (a_3)	刮胶压力 (a_4)
A 段导电线条	0.154 000	0.034 000	1.456 667	0.007 875
B 段导电线条	0.233 333	-0.007 667	-0.490 000	0.050 542
C 段导电线条	-0.475 000	-0.108 500	-3.110 000	-0.068 792
导电线条宽度	-9.057 000	0.264 222	-79.382 220	0.482 833

的影响,从表 9 中可以看出离网间距对 4 个最小二乘法回归方程解释能力最强。其他 3 个因素(刮胶角度、刮胶速度、刮胶压力)对 4 个最小二乘回归方程解释

能力均相对较差。与正交实验结论一致,并且通过偏最小二乘法可以证明正交实验设计的工艺最优顺序是可靠的,从而证明正交实验的准确性和可靠性。与图 8 中正交实验所得出的印刷工艺参数对印品质量的影响相比,偏最小二乘法中的回归系数表在显示工艺参数对相关印品质量评价指标的正负相关性是非常明确的。

4 结语

文中通过正交实验确定了主要影响因素为离网间距以及在离网间距为 3 mm、刮胶角度为 60°、刮胶压力为 60 N、刮胶速度为 80 mm/s 时是该次实验的最优实验方案;建立了各个印品质量评价指标偏最小二乘法预测模型,得出偏最小二乘法回归方程与回归系数直方图,通过回归系数直方图再次证明出各工艺参数中主要影响因素为离网间距,从而证明正交实

验的准确性与可靠性。

参考文献:

- [1] 车龙, 堵永国. 丝印导电布线分辨率降低的现象及其机理[J]. 电工材料, 2016(1): 15—19.
CHE Long, DU Yong-guo. The Phenomenon of Reduced Resolution of Screen Printed Conductive Wiring and Its Mechanism[J]. Electrical Materials, 2016(1): 15—19.
- [2] 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 Based on TRIZ Flow Analysis[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2019: 38—47.
- [3] 李飞. 丝网印刷工艺与参数研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007: 15—20.
LI Fei. Screen Printing Process and Parameters Research[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2007: 15—20.
- [4] SINGH M, HAVERINEN H M, DHAGAT P, et al. Jabbour. Inkjet Printing—Process and Its Applications[J]. Advanced Materials, 2010, 22(6): 673—685.
- [5] 邱轶兵. 试验设计与数据处理[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008: 77—165.
QIU Yi-bing. Experiment Design and Data Processing[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2008: 77—165.
- [6] 李茜. 基于丝网印刷导电油墨转移率的影响因素研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2019: 23—26.
LI Qian. Study on the Factors Affecting the Transfer Rate of Conductive Ink Based on Screen Printing[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2019: 23—26.
- [7] 王珊. 氧化铝陶瓷基片的金属化及共烧工艺研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2015: 31—40.
WANG Shan. Metalization and Co-sintering of the Alumina Ceramic Substrate[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2015: 31—40.
- [8] 杨淑男, 刘彦平. 谈正交试验设计方法的推广与应用[J]. 质量春秋, 2011(2): 48—50.
YANG Shu-nan, LIU Yan-ping. On the Extension and Application of Orthogonal Experimental Design Method[J]. Quality Spring and Autumn, 2011(2): 48—50.
- [9] 谢兰, 高东红. 非线性回归方法的应用与比较[J]. 数学的实践与认识, 2009, 39(10): 117—121.
XIE Lan, GAO Dong-hong. Application and Comparison of Nonlinear Regression Methods[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2009, 39(10): 117—121.
- [10] 孙冰, 何亮, 陈春霞, 等. 涂布纸水性柔版印刷质量的影响因素综合分析[J]. 包装工程, 2017, 38(11): 170—175.
SUN Bing, HE Liang, CHEN Chun-xia, et al. A Comprehensive Analysis of Factors Affecting Waterborne Flexographic Printing Quality of Coated Paper[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(11): 170—175.
- [11] 司龙飞. 纸张印刷适性与印品质量的实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018: 19—30.
SI Long-fei. Experimental Study on Paper Printing Suitability and Print Quality[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018: 19—30.
- [12] 崔铮. 中国印刷电子产业现状与前景展望[J]. 印制电路信息, 2013(12): 4—7.
CUI Zheng. Current Status and Prospects of China's Printed Electronics Industry[J]. Printed Circuit Information, 2013(12): 4—7.
- [13] 刘云圻. 弘扬中华民族发明精神, 再创印刷电子世界辉煌[J]. 科技导报, 2017, 35(17): 1.
LIU Yun-qi. Carrying Forward the Spirit of the Chinese Nation and Recreating the Brilliant World of Printing Electronics[J]. Science and Technology Review, 2017, 35(17): 1.
- [14] 王永秋. 影响丝网印刷质量的工艺参数分析[J]. 网印工业, 2018(1): 34—37.
WANG Yong-qiu. Analysis of Process Parameters Affecting Screen Printing Quality[J]. Screen Printing Industry, 2018(1): 34—37.
- [15] 张江帆. 基于高斯过程回归模型的锂电池数据处理[D]. 北京: 北京交通大学, 2017: 8—18.
ZHANG Jiang-fan. Data Processing of Lithium Battery Based on Gaussian Process Regression Model[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017: 8—18.
- [16] 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: 63—69.
WANG Qi-li. Research on Printed Electronic Test Platform Based on TRIZ Flow Analysis[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2017: 63—69.
- [17] 郭金运, 徐晓飞, 沈毅. 整体最小二乘算法及测量应用研究综述[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 1—12.
GUO Jin-yun, XU Xiao-fei, SHEN Yi. A Review of the Research on Global Least Squares Algorithm and Measurement Application[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2016, 35(4): 1—12.
- [18] DRABCZYK K. Fine Line Screen Printed Silver Electrodes for Copper Electrodeposition[J]. Soldering & Sur-

- face Mount Technology, 2018(Special SI): 129—134.
- [19] VIORICA C, CIJANA, JANA, et al. The Study of the Screen Printing Quality Depending on the Surface to be Printe[J]. Matec Web of Conferences, 2018, 178 [2018-07-24]. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817803015>.
- [20] SEIGO I, MIKAMI, YUUKI. Porous Carbon Layers for Counter Electrodes in Dye-sensitized Solar Cells: Recent Advances and a New Screen-printing Method[J]. Pure and Applied Chemistry, 2011(11): 2089—2106.
- [21] KAPURN, ABBOTTS J, DOLDEN E D, et al. Predicting the Behavior of Screen Printing[J]. IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology, 2013, 3(3): 508—515.
- [22] OK K H, LEE C J, KWAK M G, et al. Effect of Ag Nanowire Addition Into Nanoparticle Paste on the Conductivity of Ag Patterns Printed by Gravure Offset Method[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2014, 14(11): 8808—8812.