

凹版印刷产品质量预测数学模型

赵龙¹, 田祥²

(1. 山东职业学院, 济南 250104; 2. 山东农业大学, 泰安 271018)

摘要: **目的** 预测凹版印刷产品的表面粗糙度和厚度, 以提高印刷图案的质量和速度, 实现智能化的快速印刷。**方法** 利用 2^4 全因子试验设计方法, 建立包括操作张力、印刷速度、油墨粘度和理论转移量等自变量的数学模型, 将各变量之间的相互作用进行帕累托统计分析。**结果** 印刷图案的表面粗糙度较高, 最大值、最小值分别为 1.812, 1.524 μm , 建立凹版印刷图案的厚度和表面粗糙度数学模型决定系数分别为 76.32% 和 82.25%, 通过考虑刮刀类型和压区压力等其他参数, 可以提高模型的决定系数 (R^2), 进而提高模型的精确度。在高张力 (4.0 N) 的操作条件下, 理论转移量 ($1.2 \text{ cm}^3/\text{m}^2$) 的表面粗糙度更均匀, 使用低粘度油墨会导致更大的图像厚度, 进而降低制造成本。**结论** 粘度、速度、张力*速度、速度*粘度、张力*粘度*理论转移量 (*表示几个因素共同作用) 为厚度变化的主要影响因素。理论转移量、张力*理论转移量、张力*速度、张力、粘度*理论转移量为表面粗糙度变化的主要影响因素, 且理论转移量是决定表面粗糙度的最重要因素。

关键词: 表面粗糙度; 厚度; 数学模型; 凹版印刷; 帕累托分析

中图分类号: TS206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)03-0246-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.03.037

Mathematical Model for the Quality Prediction of Gravure Printing Products

ZHAO Long¹, TIAN Xiang²

(1. Shandong Polytechnic, Jinan 250104, China; 2. Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

ABSTRACT: The work aims to predict the surface roughness and thickness of gravure printing products to improve the quality and speed of printing patterns, in order to realize the rapid intelligent printing. The mathematical model including such independent variables as operation tension, printing speed, ink viscosity and theoretical transfer volume was established by means of 2^4 full factorial experiment design method. Pareto statistical analysis was applied to analyze the interaction between the variables. The results showed that the surface roughness of printing pattern was high, with the maximum and minimum values of 1.812 μm and 1.524 μm , respectively. The determination coefficients of the mathematical models for thickness and surface roughness of gravure printing were 76.32% and 82.25%, respectively. By considering other parameters such as scraper type and pressure zone pressure, the determination coefficient (R^2) of the model could be improved, thus improving the model accuracy. Under the operating conditions of high tension (4.0 N), the surface roughness of the theoretical transfer volume ($1.2 \text{ cm}^3/\text{m}^2$) was more uniform, and the use of low viscosity ink would lead to a greater image thickness and then reduce the manufacturing cost. The major influencing factors for thickness change are viscosity, speed, tension*speed, speed*viscosity and tension*viscosity*theoretical transfer volume (* indicates the combined action of several factors). The major influencing factors for surface roughness are theoretical transfer volume, ten-

收稿日期: 2018-05-29

基金项目: 山东省自然科学基金重点资助项目 (ZR2015QZ008)

作者简介: 赵龙 (1963—), 男, 硕士, 山东职业学院讲师, 主要研究方向为应用数学、数学模型。

sion*theoretical transfer volume, tension*speed, tension, viscosity*theoretical transfer volume. The most significant factor in determining the surface roughness is the theoretical transfer volume.

KEY WORDS: surface roughness; thickness; mathematical model; gravure printing; Pareto statistical analysis

随着现代化物流行业的崛起,对包装业提出了高效率、高质量及高智能化的需求,逐渐发展出智能包装的现代化包装理念^[1-2]。智能包装的各个环节中均需要用到印刷技术,如何提高印刷工艺的智能化水平是亟待解决的关键问题。凹版印刷工艺由于其生产能力高、成本低、印刷速度快和印刷图像色彩丰富等优点,被越来越广泛地应用于各种印刷电子产品中^[3-4]。智能包装中,对于纸基材料的凹版印刷,已经进行了大量研究^[5-7],但是针对塑料基片的凹版印刷,受到材料本身高维稳定性、不可压缩性、非吸收性和高光滑性(纳米尺度)等因素的影响,塑料基片上的油墨转移和着墨工艺与纸基完全不同,其更容易发生溶剂残留、刀丝、高光小单元丢失和墨点污染等问题,该种基板是凹版印刷电子学面临的新挑战^[8-10]。许多研究都试图解决这一问题,SUN^[11]提出了各种单元和油墨参数对凹版印刷图案宽度和厚度的影响,图案厚度随油墨粘度的增加而显著增加,但当油墨粘度过大时,会出现“单元堵塞”现象,从而降低印刷厚度。Noh^[12]提出了一种使用基于银纳米粒子的油墨的优化的滚筒式凹版印刷系统,研究表明高厚度和油墨粘度导致低纵横比和高打印速度,高表面粗糙度性能和低油墨粘度导致高纵横比和打印速度。Michels^[13]研究了单元刻花深度、印刷速度和聚合物浓度对凹版印刷发光聚合物的平均印刷层厚度、相对均方根粗糙度和特征各向异性的影响。大部分研究已经表明,印刷图案的厚度和表面粗糙度是衡量印刷质量的主要参数^[14],油墨的配方、印刷速度和印刷单元的几何形状对印刷图案的厚度和表面粗糙度有着重要的影响,但是凹版印刷是一个复杂、非线性的动态过程^[15]。许多学者尝试从智能化控制入手,对凹版印刷过程中的参数进行控制,但大都是针对张力的控制^[16],而张力对凹版印刷质量和速度的影响并非始终处于主导地位。如何根据智能包装过程中印刷对象的不同性质,选择合适的印刷图案厚度及印刷质量,进一步确定合适的控制参数,以降低凹版硬刷成本,提高凹版印刷质量和速度,使之满足现代化智能包装的需要,具有重要的实际意义。

基于上述原因,文中以塑料基片的凹版印刷工艺为研究对象,建立一种预测印刷图案厚度和表面粗糙度的数学模型,考虑到印刷过程输入和输出之间的非线性关系,建立印刷质量的统计学模型,为降低试验成本,开展了 2^4 全因子试验研究,获得各独立变量及其之间的相互影响,对实现印刷质量的控制具有指导意义。

1 试验

1.1 布置

为研究各参数对凹版印刷质量的影响,在商业化的凹版印刷机上开展试验研究,无任何静电辅助,试验在 800 级洁净室内环境中进行,见图 1。凹版印刷机工作压力为 0.6 MPa,叶片压力为 5 MPa。印刷后,图案在 200 °C 的长 4 m 烘箱中干燥。使用高导电性纳米银粒子油墨(Parmod KCG-100)将图案印刷在原始聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)基底上,厚度为 120 mm,宽度为 200 mm。通过用乙酸正丙酯稀释并用粘度计进行表征来调节油墨粘度。



图 1 凹版印刷系统
Fig.1 Gravure printing system

待印刷图案见图 2。图 2 中,印刷线 1—8 用于检查印刷条件的稳定性,确认印刷过程是否存在单元缺失。为了便于测量印刷图案的厚度和表面粗糙度,在印刷图案上选取一个 2 mm×2 mm 的正方形和一个 2 mm×4 mm 的长方形,采用表面轮廓仪 NV2000 进行测量,测量过程中,用磁带固定样品,以防止柔性衬底的波动,每次测量采集 5 个样品,取其平均值作为测量结果。为研究油墨理论转移量的影响,选取单元深度分别为 10, 20 μm,将印刷图案放置于 SuperView W1 型白光干涉仪被测平台上,利用白光干涉法对单元体积进行表征,该仪器用于对各种精密器件表面粗糙度、微小形貌轮廓及尺寸进行测量,其测量精度可以达到纳米级。

1.2 方案

影响表面粗糙度和图案厚度的自变量包括操作张力(A_1)、印刷速度(A_2)、油墨粘度(A_3)和理论传递体积(A_4),各自变量的参数范围见表 1。进一步,基于 4 个独立变量开展 2^4 全因子开展试验设

计, 各试验参数组合下凹版印刷表面粗糙度和图案厚度测量结果见表 2。

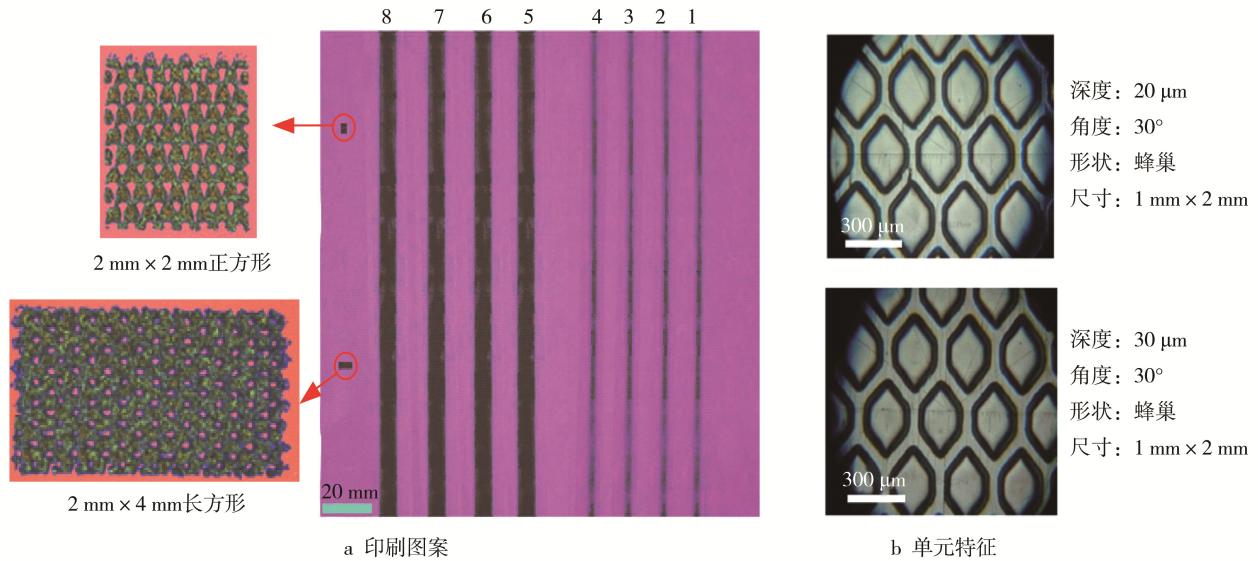


图 2 凹版印刷图案及单元特征

Fig.2 Gravure printing patterns and cell features

表 1 自变量参数范围

Tab.1 Parameter range of independent variables

自变量	张力/N	印刷速度/(m·min ⁻¹)	油墨粘度/(mPa·s)	理论转移量/(cm ³ ·m ⁻²)
符号	A_1	A_2	A_3	A_4
最小值	2	2.5	80	1
最大值	4	4.5	120	1.2

表 2 表面粗糙度和图案厚度试验结果

Tab.2 Test results of surface roughness and pattern thickness

序号	参数				图案厚度/μm		表面粗糙度/μm	
	张力 A_1	印刷速度 A_2	油墨粘度 A_3	理论转移量 A_4	均值	标准差	均值	标准差
1	2.0	2.5	80	1.00	3.264	0.156	1.812	0.048
2	4.0	2.5	80	1.00	3	0.12	1.584	0.108
3	2.0	4.5	80	1.00	3.06	0.132	1.8	0.036
4	4.0	4.5	80	1.00	3.132	0.108	1.716	0.012
5	2.0	2.5	120	1.00	2.916	0.156	1.788	0.108
6	4.0	2.5	120	1.00	2.856	0.096	1.644	0.084
7	2.0	4.5	120	1.00	2.616	0.168	1.68	0.132
8	4.0	4.5	120	1.00	2.784	0.132	1.692	0.048
9	2.0	2.5	80	1.20	3.12	0.132	1.524	0.072
10	4.0	2.5	80	1.20	3.18	0.324	1.524	0.024
11	2.0	4.5	80	1.20	3.048	0.132	1.488	0.084
12	4.0	4.5	80	1.20	3.18	0.132	1.548	0.06
13	2.0	2.5	120	1.20	3.024	0.216	1.608	0.06
14	4.0	2.5	120	1.20	2.916	0.18	1.56	0.036
15	2.0	4.5	120	1.20	2.784	0.168	1.536	0.036
16	4.0	4.5	120	1.20	2.784	0.192	1.596	0.048

采用回归模型建立数学模型,选择前面提到的 4 个独立变量进行 24 全因子设计,获得独立变量和依赖产出可能组合的矩阵。则图案厚度和表面粗糙度可用多项式 (1) 进行表示。

$$Y = \alpha_0 + \sum_{1 \leq i \leq 4} \alpha_i A_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 4} \alpha_{ij} A_i A_j + \sum_{1 \leq i < j < k \leq 4} \alpha_{ijk} A_i A_j A_k + \alpha_{1234} A_1 A_2 A_3 A_4 \quad (1)$$

式中: α_0 为平均响应值; $\alpha_i, \alpha_{ij}, \alpha_{ijk}, \alpha_{1234}$ 为决于主效应和相互作用效应的系数。

2 试验结果与分析

所有 16 次试验测量的厚度和粗糙度的平均值见图 3, 包括基于标准偏差的误差带。基于表 2 中 16 次试验的测量结果可知, 印刷图案的表面粗糙度较高, 最大和最小值分别为 $1.812 \mu\text{m}$ 和 $1.524 \mu\text{m}$ 。通常, 油墨在多孔基板纸上印刷时会被吸收, 相反, 油墨无法渗透到光滑的非吸收性 PET 基材中, 因此, PET 基材上的油墨设置主要取决于油墨表面张力以及基材的表面能和粘度。结合图 2 可知, 印刷图案大致为单元形。由于单元密度可能很大, 各印刷点形成相当粗糙的表面。通过增加单元密度可以降低粗糙度。当压力较高时, 油墨在 PET 基板上的可印性较大。对于纸基板, 其压力应足够低, 以防止纸张破裂。由于 PET 基材具有比纸基材更高的尺寸稳定性, 可以施加高压区压力以消除缺失的点。这主要是由于 PET 基片在接触区发生变形, 导致接触面积增加, 从而增加油墨的传递。当压片压力过高时, 印刷图案将在 PET 基板上渗出。

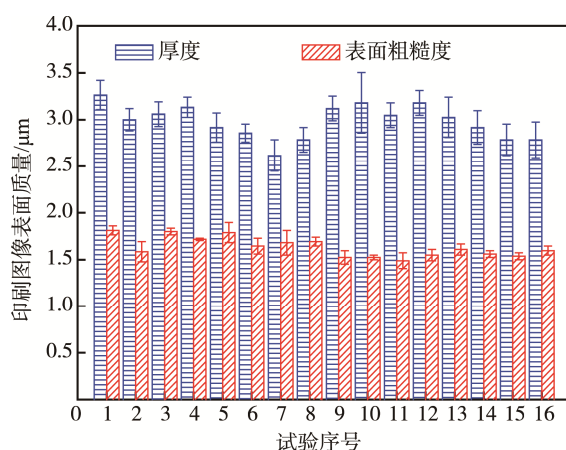


图 3 印刷图案厚度和表面粗糙度试验结果

Fig.3 Test results for thickness and surface roughness of printed patterns

为进一步研究各因素对印刷质量影响的显著性, 使用标准化的帕累托图分析不同参数及其相互作用的影响, 见图 4。图 4 中, 虚线为参考线, 任何超过红色参考线的因素都具有重要影响。最重要的因素首

先列在帕累托图中。

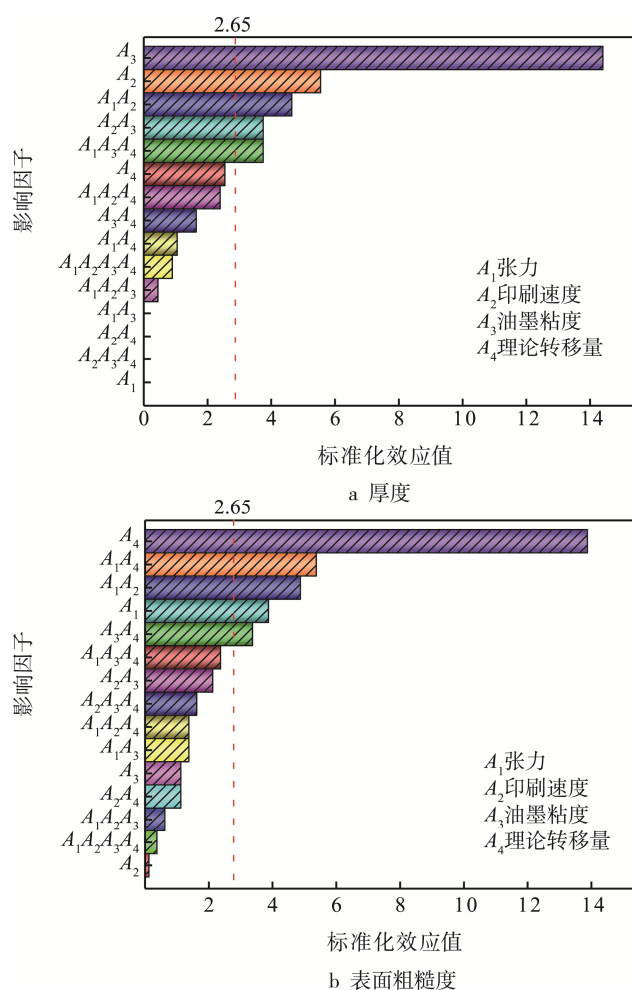


图 4 印刷图案厚度和表面粗糙度的帕累托图

Fig.4 Pareto pattern of thickness and surface roughness of printing patterns

由图 4 可知, 油墨粘度 (A_3)、速度 (A_2)、张力*速度 (A_1A_2)、速度*粘度 (A_2A_3)、张力*粘度*理论转移量 ($A_1A_3A_4$) 为厚度变化的主要影响因素, 油墨粘度是决定图像厚度的主要决定因素; 理论转移量 (A_4)、张力*理论转移量 (A_1A_4)、张力*速度 (A_1A_2)、张力 (A_1)、粘度*理论转移量 (A_3A_4) 为表面粗糙度变化的主要影响因素, 理论转移量是决定表面粗糙度的最重要因素。

为标准化效应的正态概率见图 5。可忽略的影响通常呈现正态分布, 其均值为 0、方差为 σ^2 。蓝线左右两侧的因素分别为负/正效应。图 5a 表明粘度 (A_3)、速度 (A_2)、速度*粘度 (A_2A_3)、张力*粘度*理论传输体积 ($A_1A_3A_4$) 与厚度变化呈负相关, 而张力*速度 (A_1A_2) 与厚度变化呈正相关。图 5b 表明了张力 (A_1)、理论转移量 (A_4)、粘度*理论转移量 (A_3A_4) 与表面粗糙度呈负相关, 张力*速度 (A_1A_2)、张力*理论转移量 (A_1A_4) 与表面粗糙度呈正相关。

基于上述分析, 忽略不重要影响因素, 简化式

(1), 可获得凹版印刷图像厚度和表面粗糙度的数学模型见式 (2) 和 (3)。

$$\begin{aligned} \text{厚度} = & \alpha_0 + \alpha_2 A_2 + \alpha_3 A_3 + \alpha_{12} A_1 A_2 + \alpha_{23} A_2 A_3 + \\ & \alpha_{134} A_1 A_3 A_4 = 10.89 - 1.104 A_2 - 0.050 64 A_3 + \\ & 0.3736 A_1 A_2 - 0.004 695 A_2 A_3 - 0.011 88 A_1 A_3 A_4 \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{粗糙度} = & \alpha_0 + \alpha_1 A_1 + \alpha_4 A_4 + \alpha_{12} A_1 A_2 + \alpha_{14} A_1 A_4 + \\ & \alpha_{34} A_3 A_4 = 3.925 - 0.9327 A_1 - 2.194 A_4 + \\ & 0.099 58 A_1 A_2 + 0.7333 A_1 A_4 - 0.008 424 A_3 A_4 \quad (3) \end{aligned}$$

方程 (2—3) 拟合结果的可信度通过决定系数 R^2 进行评价。厚度和表面粗糙度模型的决定系数分别为 76.32% 和 82.25%。表明, 油墨粘度、速度、张力和理论转移量对厚度和表面粗糙度具有决定性影响, 所建立

的预测模型可有效表征印刷图像厚度和表面粗糙度的变化。此外, 在试验过程中, 厚度和表面粗糙度还受到刮刀载荷、刮刀角度和夹层压力等其他因素的影响。当这些变量被添加到数学模型中时, 即使其对输出响应没有影响, 决定系数 R^2 的值同样会逐渐增大。由于刮刀载荷、刮刀角度和夹层压力等其他因素对厚度和表面粗糙度的影响较小, 在模型中加入这些因素很大程度上提高了模型的复杂性, 且其对决定系数 R^2 的增大作用影响有限, 故可忽略这些因素的作用。

为了确定各参数对厚度和表面粗糙度影响的主要因素, 采用 Yates 算法对其进行研究, 获得各变量对厚度和表面粗糙度的主效应图, 见图 6。可知, 油

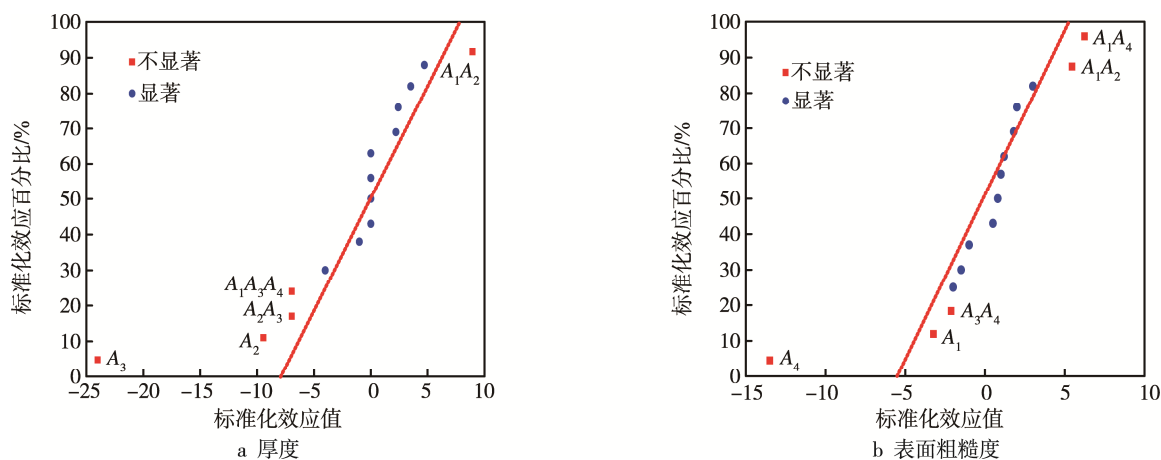


图 5 印刷图案厚度和表面粗糙度的标准化效应正态概率
Fig.5 Normalized effect normal probability of thickness and surface roughness of printing patterns

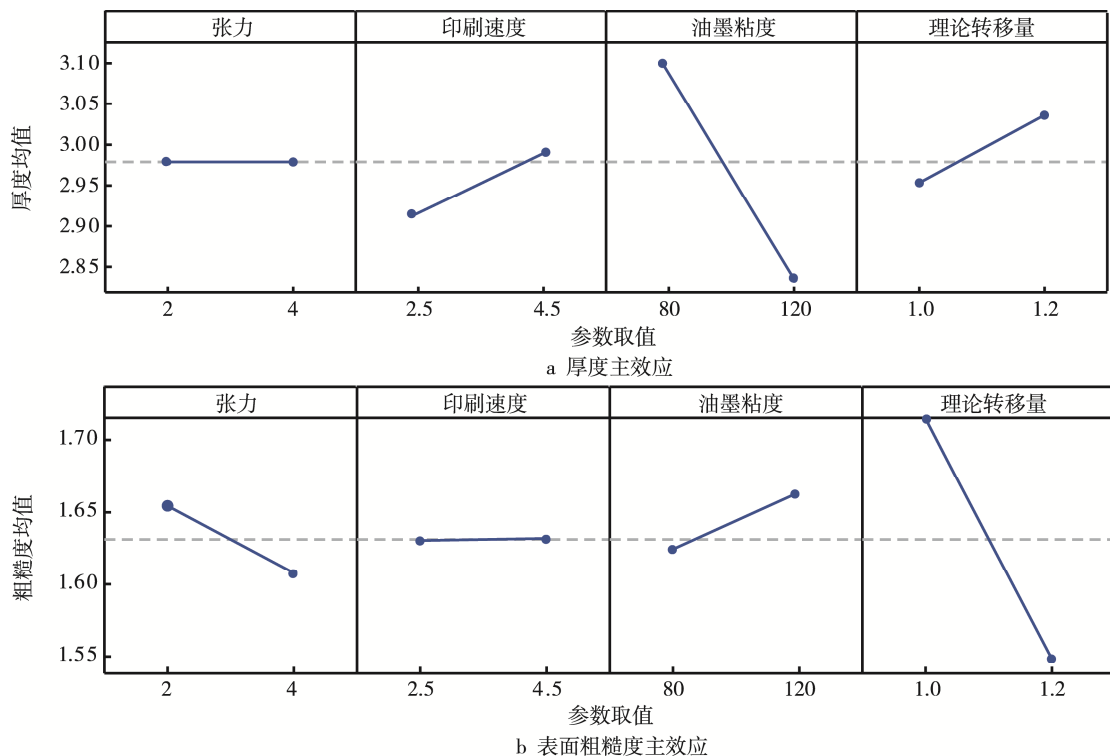


图 6 各变量对厚度和表面粗糙度的主效应
Fig.6 Main effect of variables on thickness and surface roughness

墨粘度变化对图像厚度变化影响最大。虽然油墨粘度的增大增加了油墨密度,但高粘度油墨更易印刷较薄的图案,这是由于高粘度油墨比低粘度油墨具有更强的抗剪切能力和更高的单元堵塞倾向。理论转移量的变化对图像厚度同样具有显著影响,随着理论转移量的增加,图案厚度增加。这是因为理论转移量的增加增大了油墨体积,从而使更多油墨转印到基材上,引起图案厚度增大,因此,为获得较厚的图案,最佳参数设置:低粘度为 $80 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、高印刷速度为 4.5 m/min 、高理论转移量为 $1.2 \text{ cm}^3/\text{m}^2$ 。根据爱因斯坦方程,由稀释溶剂量控制的粘度与固体含量成正比,因此,在低粘度条件下添加更多的溶剂比高粘度的溶剂可以减少用于试验的原始油墨的用量,因此,使用低粘度油墨可以降低印刷电子产品的成本。

此外,张力和理论转移量对表面粗糙度的影响大于粘度和速度,这表现在张力和理论转移量图相对于粘度和速度图的斜率较高。张力和理论转移量的增加降低了表面粗糙度。在张力一定的情况下,实验结果与李^[17]的研究结果是一致的。一般认为,较厚的图案倾向于具有更均匀的表面粗糙度,因为它允许更多时间用于毛细管流动,产生更光滑的顶层。结果表明,在较高的理论传递体积和张力下,表面粗糙度更均匀。

3 结语

文中基于试验设计方法建立了预测表面粗糙度和图案厚度的数学模型,该模型能够有效地预测自变量及其相互作用对输出的影响。通过考虑其他参数,例如刮刀和压区压力,可以提高决定系数(R^2)。该研究发现,在高张力(4.0 N)的操作条件下,理论转移体积($1.2 \text{ cm}^3/\text{m}^2$)的表面粗糙度更均匀。使用低粘度墨水会使得厚度更大。使用低粘度墨水($80 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 低固含量)也可降低制造成本。在今后的工作中,通过利用试验设计方法,考虑到区域压力、刮刀类型和压力等因素影响,可以对凹版印刷过程进行优化。

参考文献:

- [1] 崇岚, 潘军辉, 熊鹏文. 智能包装技术的应用现状和发展前景[J]. 包装工程, 2017, 38(15): 149—154.
CHONG Lan, PAN Jun-hui, XIONG Peng-wen. Development and Applications of Intelligent Packaging Technology[J]. Packaging Engineering, 2017, 33(3): 310—315.
- [2] 李光, 韩芮. “工业 4.0” 视阈下智能包装装备发展趋势[J]. 包装学报, 2018, 10(1): 34—41.
LI Guang, HAN Rui. Development Trend of Intelligent Packaging Equipment Under The Perspective of "Industry 4.0"[J]. Packaging Journal, 2017, 33(3): 310—315.
- [3] 贾海亮, 赵军, 李钰甫, 等. 凹版印刷工业的绿色节能技术[J]. 包装学报, 2015, 7(2): 53—58.
JIA Hai-liang, ZHAO Jun, LI Yu-pu, et al. Green Energy-Saving Technology in Gravure Press[J]. Packaging Journal, 2015, 7(2): 53—58.
- [4] 马金涛. 凹版印刷在我国的发展与应用[J]. 中国印刷, 2016(2): 61—62.
MA Jin-tao. Development and Application of Gravure Printing in China[J]. China Print, 2016(2): 61—62.
- [5] 舒心, 张磊, 曹亚涛, 等. 凹版印刷 VOCs 治理的新技术及回收溶剂的综合利用[J]. 塑料包装, 2017, 27(5): 59—62.
SHU Xin, ZHANG Lei, CAO Ya-tao, et al. New Technology of VOCs Treatment in Gravure Printing and Comprehensive Utilization of Recovery Solvent[J]. Journal of Plastic Packing, 2017, 27(5): 59—62.
- [6] 王云马, 何邦贵, 陈磊, 等. 初探新型纸基复合材料的凹印生产工艺[J]. 价值工程, 2017, 36(7): 157—159.
WANG Yun-ma, HE Bang-gui, CHEN Lei, et al. Study on Gravure Printing Process of New Paper-based Composites[J]. Value Engineering, 2017, 36(7): 157—159.
- [7] 邵明月, 武吉梅, 刘善慧, 等. 凹版印刷机收卷张力系统稳定性控制研究[J]. 西安理工大学学报, 2017, 33(3): 310—315.
SHAO Ming-yue, WU Ji-mei, LIU Shan-hui, et al. Stability Control of Winding Tension System of Gravure Printing Machine[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(3): 310—315.
- [8] SECOR E, LIM S, ZHANG H, et al. Gravure Printing of Graphene for Large-area Flexible Electronics[J]. Advanced Materials, 2014, 26(26): 4533—4538.
- [9] KLEMENTINA M, KLEMEN M, SABINA B. Non-invasive Methods for Characterisation of Printed Cultural Heritage[J]. Journal of Cultural Heritage, 2013, 14(1): 8—15.
- [10] 黄灵阁, 王雪, 陈惠兰, 等. 凹版印刷中刀线和套印不准的分析[J]. 包装工程, 2010, 31(19): 77—79.
HUANG Ling-ge, WANG Xue, CHEN Hui-lan, et al. Analysis of Knife Line and Register Difference in the Intaglio Printing[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19): 77—79.
- [11] SUN G D, DE LA FUENTE VORNBROCK A, SUBRAMANIAN V. Scaling and Optimization of Gravure-printed Silver Nanoparticle Lines for Printed Electronics[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2010, 33(1): 105—114.

- [12] NOH J, YEOM D, LIM C, et al. Scalability of Roll-to-roll Gravure-printed Rlectrodes on Plastic Foils[J]. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2010, 33(4): 275—283.
- [13] MICHELS J J, DE WINTER S H P M, SYMONDS L H G. Process Optimization of Gravure Printed Light-emitting Polymer Layers by A Neural Network Approach[J]. Organic Electronics, 2009, 10(8): 1495—1504.
- [14] 李庆. 凹版印刷产品质量控制的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
LI Qing. Study on Quality Control of Gravure Printing Products[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [15] BOELEN S A M P, DE PABLO J J, LIM S, et al. Visualization and Simulation of The Transfer Process of Index-matched Silica Microparticle Inks for Gravure Printing[J]. AIChE Journal, 2017, 63(4): 1419—1429.
- [16] 邵明月, 武吉梅, 刘善慧, 等. 凹版印刷机收卷张力系统稳定性控制研究[J]. 西安理工大学学报, 2017, 33(3): 310—315.
SHAO Ming-yue, WU Ji-mei, LIU Shan-hui, et al. Stability Control of Winding Tension System of Gravure Printing Machine[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(3): 310—315.
- [17] LEE C W, KANG H, KIM C, et al. Method to Guarantee the Specified Thickness and Surface Roughness of The Roll-to-roll Printed Patterns Using The Tension of A Moving Substrate[J]. Journal of Micro-electromechanical Systems, 2010, 19: 1243—1253.