

柔印网纹辊油墨转移特性研究

陈家祥, 唐正宁, 王莎莎, 缪斌鹰
(江南大学, 无锡 214122)

摘要: **目的** 研究网纹辊向印版进行油墨转移的特性。 **方法** 将网纹辊结构简化为轴对称的梯形槽, 使用有限元法对网纹辊油墨转移过程进行数值模拟, 即模拟油墨从网纹辊向印版进行转移, 并且加入网纹辊和印版滚筒的运动情况, 研究了接触角、梯形槽高宽比和角速度对油墨转移的影响。 **结果** 分析了油墨从网纹辊转移到印版的影响因素, 油墨转移率随着上板接触角的增加而减小, 随着梯形槽接触角的增大而增大, 梯形槽高宽比越小和角速度越大, 油墨转移率越高。 **结论** 通过对柔印网纹辊油墨转移情况进行数值模拟, 得到了接触角、梯形槽高宽比及角速度对油墨转移情况的影响规律, 为柔印生产实践提供了理论参考。

关键词: 柔印; 网纹辊; 有限元; 油墨转移

中图分类号: TS802.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)07-0134-04

Ink Transfer Characteristics in the Flexographic Printing Process

CHEN Jia-xiang, TANG Zheng-ning, WANG Sha-sha, MIAO Bin-ying
(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The aim of this work was to study the transfer properties of ink between the anilox roller and the plate during printing. The structure of the anilox roller was simplified into an axisymmetric trapezoidal groove, and the ink transfer process was numerically simulated using the finite element method, to simulate the ink transfer from the anilox roller to the plate. The influences of the contact angle, trapezoidal groove aspect ratio and the angular velocity on the ink transfer were studied considering the movement of the anilox roller and the plate cylinder. The influencing factors on ink transfer from the anilox roller to the plate were analyzed, and it was found that the ink transfer ratio decreased with the increasing upper plate contact angle and increased with the increasing dovetail groove contact angle; while the smaller the aspect ratio and the larger the angular velocity, the higher the ink transfer rate. The influencing rules of the contact angle, the aspect ratio and the angular velocity on the ink transfer were obtained by numerical simulation of the ink transfer in the flexographic printing process, which provided theoretical reference for the flexographic printing production.

KEY WORDS: flexographic printing; anilox roller; finite element method; ink transfer

随着柔性版印刷工艺的成熟^[1], 及其在绿色环保方面的优势, 使其成为全球范围内增长最快的印刷方式。柔印是将低黏度、高流动性的油墨^[2]填充到网纹辊细小的着墨孔中, 多余的油墨被刮刀刮除, 留在着墨孔中的油墨随后转移到柔性版的浮雕状图文上, 然后印版上的油墨区与承印物接触, 油墨转移到承印物上, 完成整个印刷过程^[3]。

柔性版印刷符合环保、绿色、安全和可持续发展要求, 发展前景广阔, 但是印品的质量制约着柔印的发展。在柔印中, 均匀准确地控制油墨转移量是控制印刷质量的关键环节^[4]。定量供墨系统的主要部件是网纹辊, 是最精密的部件。很多人把网纹辊比作柔性版印刷机的“心脏”, 它是决定和影响印刷质量的重要因素之一^[5]。

收稿日期: 2014-09-15

作者简介: 陈家祥(1990—), 男, 山东枣庄人, 江南大学硕士生, 主攻印刷控制与管理技术。

通讯作者: 唐正宁(1963—), 男, 江苏苏州人, 江南大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为包装与印刷工艺。

目前,已经可以使用柔印印刷 RFID 应答器中的细实线^[6]、LED 液晶显示屏及电路板等,柔印的发展对印刷电子技术^[7-8]的发展有推动作用。由于国内对柔性版印刷油墨转移规律^[9]的研究还比较落后,只能利用积累的经验控制柔性版印刷的传墨量,因此,研究柔印网纹辊油墨转移情况,对柔印整体的发展有重大意义。这里,将网纹辊的结构简化为轴对称的梯形槽,以研究油墨转移过程中辊的运动。通过求解 Stokes 方程,使用有限元方法建立了油墨转移过程的数值模拟模型,分析了上板接触角、梯形槽接触角、梯形槽高宽比和辊角速度对油墨转移的影响。

1 网纹辊油墨转移模型

1.1 网纹辊的运动

半径为 R 的网纹辊运动示意图见图 1,其中,点 O_1 在网纹辊的中间位置,点 O_2 在梯形槽的中心位置, i', j', k' 为单位向量。相对于 O_1 和 O_2 的坐标分别用 x', y', z' 和 x, y, z 表示。 M 表示梯形槽的点, N 是印版滚筒上的一点,因而 M 和 N 相对于点 O_1 的速度表达式为:

$$v'_N = \omega R(i' \sin \theta_2 - j' \cos \theta_2) \quad (1)$$

$$v'_M = \omega R(i' \sin \theta_1 - j' \cos \theta_1) \quad (2)$$

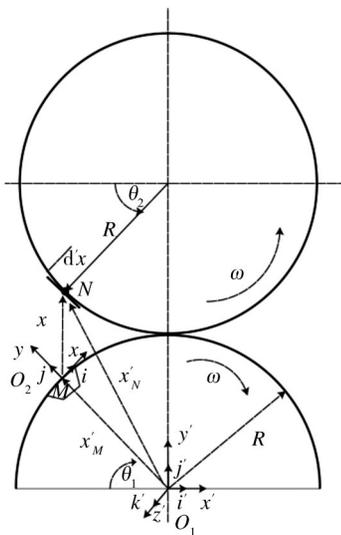


图1 网纹辊运动示意

Fig.1 Schematic of anilox roller movement

假设 M 和 N 位于辊间隙的中间垂直位置, $\theta_1 = \theta_2 = \theta_0 + \omega t$, $\theta_0 = \pi/2$ 。 M 和 N 的表面曲率忽略不计, N 附近的某点 W 相对于 O_1 的坐标为:

$$x'_W = x'_N + d'_x \quad (3)$$

相对于 O_1 的速度为:

$$v'_W = v'_N + \omega'_N d'_x \quad (4)$$

式中: ω'_N 为 d'_x 相对于点 N 旋转的角速度, $\omega'_N = \omega_r k'$ 。它相对于 O_2 的速度表达式为^[10]:

$$v_W = v' - v'_M - \omega'_M x \quad (5)$$

式中: v'_M, ω'_M 分别为 O_2 相对于 O_1 的移动速度和旋转速度。式(5)变为:

$$v_W = v'_N - v'_M + 2\omega'_N x - \omega'_N(x'_N - x'_M) \quad (6)$$

$$\omega'_M = -\omega_r k' = -\omega'_N \quad (7)$$

$$x = xi + yj \quad (8)$$

$$x' = x'_M + x \quad (9)$$

$$x'_M = -Ri' \cos \theta + Rj' \sin \theta \quad (10)$$

$$x'_N = -Ri' \cos \theta + (2R - R \sin \theta)j' \quad (11)$$

$$i' = i \sin \theta - j \cos \theta \quad (12)$$

$$j' = i \cos \theta + j \sin \theta \quad (13)$$

最终的速度表达式为:

$$v_W = [-2\omega R \cos^2 \theta - \omega_y + \omega_{ry}]i + [-2\omega R \sin \theta \cos \theta + 2\omega_{rx} - \omega_{rx_N}]j \quad (14)$$

$$x_N = |x'_N - x'_M| \cos \theta \quad (15)$$

$$y_N = |x'_N - x'_M| \sin \theta \quad (16)$$

$$|x'_N - x'_M| = 2R(1 - \sin \theta) \quad (17)$$

印版滚筒按照公式(14)运动,忽略网纹辊的剪切和旋转运动,表达式简化为^[11]:

$$v_W = -2\omega j R \cos \theta \quad (18)$$

1.2 动力学方程

把网纹辊网穴简化成梯形槽,平板相当于柔性版印版。在柔性版印刷中通常使用的油墨是牛顿流体,油墨的动态黏度为 μ , 表面张力为 σ , 空气的压力为 p_{air} 。 θ_c 和 θ_u 分别为梯形槽接触角和上板接触角,见图 2。模拟中忽略空气的密度和黏度,忽略重力和惯性效应。

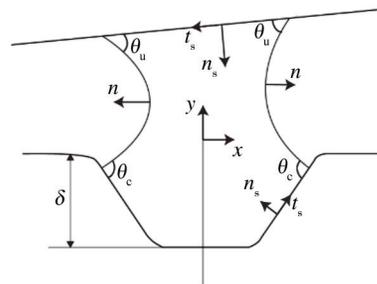


图2 油墨转移示意

Fig.2 Ink transfer

守恒方程为:

$$\left. \begin{aligned} \nabla T &= 0 \\ \nabla v &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\mathbf{T} = -p\mathbf{I} + (\nabla v + \nabla v^T) \quad (20)$$

式中： \mathbf{T} 为总的应力张量； \mathbf{I} 为单位张量。表面张力恒定，毛细管力的表达式：

$$n\mathbf{T} = -\frac{\kappa}{C_a}n \quad (21)$$

$$C_a = \frac{\mu v_E}{\sigma} \quad (22)$$

$$\kappa = -(\mathbf{I} - nm) \nabla n \quad (23)$$

式中： C_a 为毛细管数； κ 为自由表面的曲率； ∇ 为表面梯度算子。

上板和梯形槽壁使用Navier滑移边界条件^[12]：

$$\left. \begin{aligned} n_s v &= 0 && \text{梯形槽壁} \\ n_s (v - v_s) &= 0 && \text{移动平板} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

$$t_s(n_s T) = -\frac{1}{\beta} t_s(v - v_{surf}) \quad (25)$$

$$n \cdot n = \cos \theta \quad (26)$$

式中： β 为Navier滑移系数^[13]； v_{surf} 为固体表面速度。

2 讨论

2.1 液体转移情况

油墨转移示意图3。从图3可以看出，在油墨转移过程中的一段时间，接近梯形槽的油墨表面形状是向上凸起的^[14]。数值模拟中使用模型的基本参数为：上板接触角和梯形槽接触角均为 70° ，动态黏度 μ 为 $0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，表面张力 σ 为 0.05 N/m ，空气压力 p_{air} 为 $101\ 325 \text{ Pa}$ ，梯形槽深度 δ 为 $15 \text{ }\mu\text{m}$ ，网纹辊半径 R 为 75 mm ，上板移动速度 v 为 0.5 m/s ，模拟时上板移动速度 $v_{模}$ 为 $-1\cos(\pi/2+6.67t) \text{ (m/s)}$ 。定义 c 为梯形槽的宽高比， Ψ 为油墨转移率， $\Psi = \text{上板油墨量} / \text{梯形槽内初始油墨量}$ 。

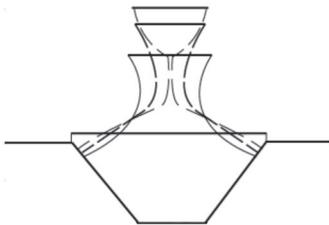


图3 油墨转移示意

Fig.3 Ink transfer

2.2 接触角对油墨转移的影响

梯形槽接触角为 70° ，在不同上板接触角条件

下($30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 90^\circ$)的油墨转移率示意图4。随着上板接触角的增加，油墨转移率随之减小。由于在不同的上板接触角情况下，梯形槽内的润湿区域面积是相同的，但是，随着接触角的减小，上板润湿面积增大。因此，随着平板接触角的增加，油墨转移率降低。

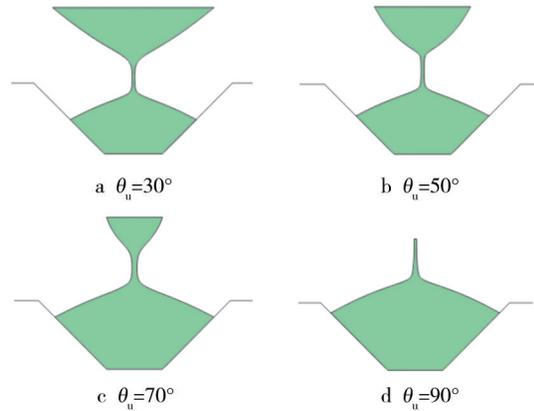


图4 不同上板接触角条件下的油墨转移率

Fig.4 Ink transfer ratios at different contact angles of the upper plate

在上板接触角为 70° ，梯形槽接触角为 $30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 90^\circ$ 情况下，油墨转移率示意图5。由图5可以看出，随着梯形槽接触角的增大，油墨转移率随之增大。

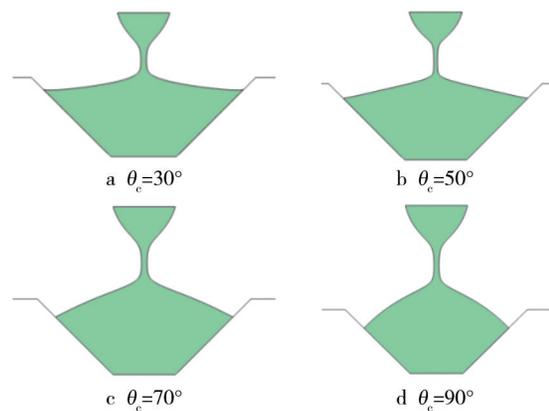


图5 不同梯形槽壁接触角条件下的油墨转移率

Fig.5 Ink transfer ratios at different contact angles of the trapezoidal groove

油墨受力情况见图6，油墨转移率可以由油墨转移过程所受到的力来近似表示^[15]：

转移率 = 上板所受的粘附力 / (上板所受粘附力 + 梯形槽所受粘附力) = $F_{A1} / (F_{A1} + F_{A2} + F_C) \approx$

$$\sigma_u \cos \theta_u / (\sigma_u \cos \theta_u + \sigma_c \cos \theta_c + F_C) \quad (27)$$

式中： F_C 为毛细管力。随着梯形槽接触角的增

加, $\cos \theta_c$ 减小, 其他不变, 因此, 由式(27)得出转移率随之增加。

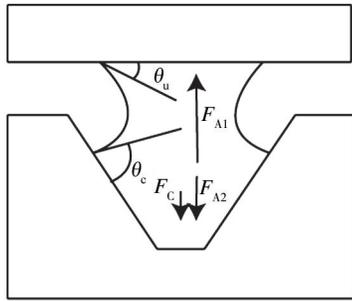


图6 油墨受力示意
Fig.6 Ink force

同样, 也可以用来解释上板接触角对转移率的影响, 由式(27)得到:

$$\text{转移率} = 1 - (F_{A2} + F_C) / (F_{A1} + F_{A2} + F_C) = 1 - (\sigma_c \cos \theta_c + F_C) / (\sigma_u \cos \theta_u + \sigma_c \cos \theta_c + F_C) \quad (28)$$

梯形槽接触角不变, 随着上板接触角增加, $\cos \theta_u$ 减小, 因此转移率随之减小。

2.3 梯形槽宽高比对油墨转移的影响

梯形槽深度不变, 改变梯形槽宽高比 c , 研究宽高比对油墨转移的影响。不同的梯形槽宽高比 c (0.28, 0.34, 0.37, 0.41) 对油墨转移的影响见图7, 可以看出, 随着 c 增加转移率变小, 即宽度大的梯形槽油墨转移率高。原因是油墨断裂所需时间取决于初始厚度, 较厚的油墨断裂需要更长的时间。梯形槽较宽时, 即高宽比较小, 横轴方向上油墨较厚, 断裂时间较长, 从梯形槽转移到上板的油墨就更多。

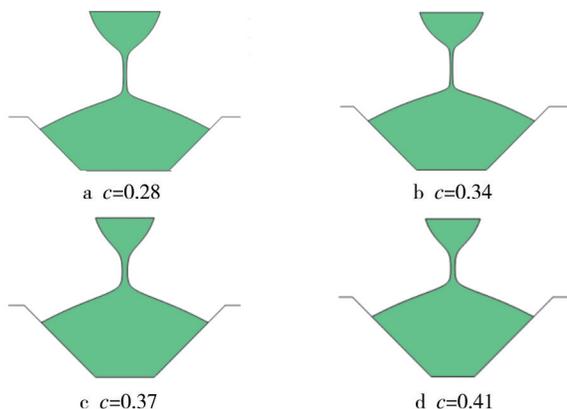


图7 不同梯形槽宽高比条件下的油墨转移率

Fig.7 Ink transfer ratios at different aspect ratios of the trapezoidal groove

油墨从网纹辊网穴中转移, 不仅受到上板和梯形槽的粘附力, 同时还受到阻碍油墨转移的毛细管力,

由于网纹辊网穴尺寸比较小, 毛细管力不可忽视^[15]。同时, 毛细管力与开口宽度成反比^[16], 因此, 开口宽度越大, 高宽比越小, 油墨所受的毛细管力越小, 油墨转移率就会越大。

高宽比在柔性版印刷中被定义为网穴开口度。实践证明, 网穴开口度控制在23%~33%之间可以得到良好的传墨性能, 最佳值为28%^[5]。实验和数值模拟结果相吻合。

2.4 角速度对油墨转移率的影响

梯形槽高宽比 c 为0.28, 不同角速度条件下 (0, 1.4, 2.4 rad/s) 油墨转移率见图8。从图8可以看出, 对于一个固定的梯形凹槽, 液体转移率随着角速度的增加而增加。角速度不等于0时, 上板的相对转动和横向运动会导致接触线的移动, 左边的接触线向梯形槽的外部移动, 右边接触线向梯形槽内部移动, 这样会导致更多的液体从梯形槽中被拉出来, 墨丝的断裂时间变长, 油墨转移率变大。

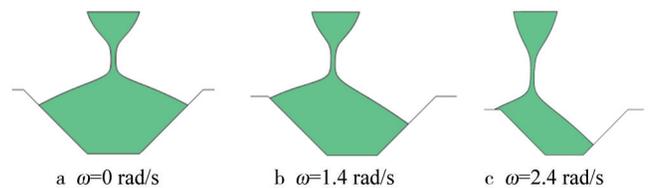


图8 不同角速度条件下的油墨转移率

Fig.8 Ink transfer ratios at different angular velocity

3 结语

对柔性版印刷过程油墨的转移情况, 使用有限元的两相流模型进行了数值模拟。将网纹辊简化为轴对称的梯形槽, 研究了柔印过程中辊的运动情况, 并加入到数值模拟中。研究表明, 油墨转移率随着上板接触角的增加而减小, 随着梯形槽接触角、梯形槽宽度及角速度的增加而增加。

参考文献:

- [1] 付尧建, 钱军浩. 基于柔性版最大印刷压力的数字模型研究[J]. 包装工程, 2013, 34(17): 28.
- FU Yao-jian, QIAN Jun-hao. Digital Model of Maximum Printing Pressure for Flexographic Plate[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(17): 28.
- [2] 秦承红, 宁元元, 白春燕, 等. 影响柔性版印刷水基油墨粘度的因素分析[J]. 包装工程. 2009, 30(2): 87—89.

- 响[J]. 湖南工业大学学报, 2007(3): 12—13.
- LYU Xin-guang, WANG Lei, ZHANG Yuan-biao, et al. The Effect of Ink Viscosity on Gravure Printing Properties[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2007(3): 12—13.
- [11] 白冰. 影响药品泡罩包装用铝箔印刷涂布质量的因素[J]. 包装工程, 1997, 18(2): 108—109.
- BAI Bing. Affect Pharmaceutical Blister Packaging Aluminum Foil Printing Factors on the Quality of the Coating[J]. Packaging Engineering, 1997, 18(2): 108—109.
- [12] ZHANG Yan, ZHOU Shi-sheng, CAO Cong-jun. Study of Spot-color-matching in Gravure[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 312: 564—571.
- [13] 周忠武, 张红军, 张军, 等. 在 PTP 铝箔印刷中应用水性油墨的探索[J]. 印刷杂志, 2013(11): 49—53.
- ZHOU Zhong-wu, ZHANG Hong-jun, ZHANG Jun, et al. The Exploration of Application of Water-based Ink in PTP Aluminum Foil Printing[J]. Printing Magazine, 2013(11): 49—53.
- [14] 夏琴香, 王甲子, 周思聪, 等. 激光凹印制版设备及其关键技术分析[J]. 包装工程, 2008, 29(7): 37—39.
- XIA Qin-xiang, WANG Jia-zi, ZHOU Si-cong, et al. The Laser Gravure Plate Making Machine and Its Key Technique Analysis[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(7): 37—39.
- [15] 维尔特. Hell Cellaxy 激光直接雕刻制版机凹印制版技术的新方向[J]. 印刷技术, 2013(9): 102.
- VILTER. New Direction of Hell Cellaxy Laser Direct Engraving Plate Making Press Gravure Plate Making Technique[J]. Printing Technique, 2013(9): 102.
- [16] HOANHDUC N, SHIN K H, LEE D. Effect of Process Parameters on Fidelity of Printed Line Width in High Resolution Roll-to-roll Gravure Printing[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2014, 53(3): 789—797.
- [17] GD/TC 64, 无轴传动高速凹印机[S].
- GD/TC 64, Shaftless Drive High-speed Gravure Press[S].
- [18] LIU Jiang-hao, MAO Tian-tian, LIU Qiao-liang. Research on Color Matching and Reproduction on Aluminum Foil Packaging Materials[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 469: 273—277.
-
- (上接第 137 页)
- QIN Cheng-hong, NING Yuan-yuan, BAI Chun-yan, et al. Analysis of Factors Influencing the Viscosity of Flexographic Water-based Ink[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(2): 87—89.
- [3] 冯瑞乾. 印刷原理与工艺[M]. 北京: 印刷工业出版社, 1999.
- FENG Rui-qian. Principle and Process of Printing[M]. Beijing: Graphic Communications Press, 1999.
- [4] 林金雷, 许文才, 王召霞. 柔性版印刷传墨特性的研究[J]. 中国印刷与包装研究, 2011(5): 53—56.
- LIN Jin-lei, XU Wen-cai, WANG Zhao-xia. Analyzing on Ink Transferring Performance of Flexographic Printing[J]. China Printing and Packaging Study, 2011(5): 53—56.
- [5] 陈文革. 柔性版印刷技术[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2010.
- CHEN Wen-ge. Flexographic Printing Technology[M]. Beijing: Graphic Communications Press, 2010.
- [6] MAKSUD M I, YUSOF M S, JAMIL A, et al. Study on Finite Element Analysis of Fine Solid Lines by Flexographic Printing in Printed Antennas for RFID Transponder[J]. International Journal of Integrated Engineering, 2013, 4(3): 35—39.
- [7] 王奇, 唐正宁, 刘孟才, 等. 凹版胶印中印刷夹角对油墨转移的影响[J]. 包装工程, 2012, 33(13): 14—17.
- WANG Qi, TANG Zheng-ning, LIU Meng-cai, et al. Influence of Printing Angle on Ink Transfer in Gravure-offset Printing[J]. Packaging Engineering, 2012, 30(13): 14—17.
- [8] 刘孟才, 唐正宁, 吴琰嘉. 凹版胶印油墨转移的数值模拟[J]. 包装工程, 2012, 33(17): 118—121.
- LIU Meng-cai, TANG Zheng-ning, WU Yan-jia. Numerical Simulation of Ink Transfer for Gravure Offset Printing[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(17): 118—121.
- [9] 王澜, 安君. 柔印印版松驰特性对油墨转移的影响分析[J]. 包装工程, 2009, 30(11): 83—85.
- WANG Lan, AN Jun. Analysis of the Effect of Relaxation Properties of Flexographic Plate on Ink Transfer[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(11): 83—85.
- [10] LAI W M, RUBIN D, KREML E. Introduction to Continuum Mechanics, 3rd edn[M]. Woburn Ma: Butterworth-Heinemann, 1999.
- [11] CAMPANA D M, CARVALHO M S. Numerical Simulation of Liquid Emptying of Micro-cavities as a Model of Gravure Printing Applications[A]. Book of 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013) [M]. Ribeiro Preto, Brazil, 2013: 10159—10170.
- [12] DODDS S, CARVALHO S, KUMAR S. Stretching and Slipping of Liquid Bridges Near Plates and Cavities[J]. Physics of Fluids(1994-present), 2009, 21(9): 092103.
- [13] LAMB S H. Hydrodynamics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [14] DODDS S. Stretching and Slipping Liquid Bridges: Liquid Transfer in Industrial Printing[D]. Minneapolis: University of Minnesota, 2011.
- [15] WECKENMANN A, HARTMANN W. Function-oriented Method for the Definition and Verification of Microstructured Surfaces[J]. Precision Engineering, 2013, 37(3): 684—693.
- [16] NIELSEN H S. New Concepts in Specifications, Operators and Uncertainties and Their Impact on Measurement and Instrumentation[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(3): 541.