

机械与过程控制

柔性电子卷到卷制造中导向辊牵引特性的研究进展

马利娥，杨斌，郭毅，刘善慧，李妮，雷永辉
(西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院，西安 710048)

摘要：目的 探索柔性电子卷到卷制造过程中薄膜经过导向辊时发生皱褶、划伤和滑移等问题的原因，以期提高柔性电子薄膜的制造精度和效率。**方法** 总结近年来导向辊与薄膜之间夹带气体流场特性和薄膜对导向辊牵引特性的研究进展，提出进一步需要研究的要点。**结果** 薄膜与导向辊之间夹带气体的流场特性和薄膜对导向辊的牵引特性是柔性电子薄膜稳定传输的主要影响因素，其对提高柔性电子产品加工精度具有重要作用。**结论** 有效控制导向辊与薄膜之间的夹带气体流场特性和薄膜对导向辊的牵引特性有助于提高薄膜传输的精度，从而保障卷到卷制造柔性电子产品的生产质量。

关键词：卷到卷制造；导向辊；夹带气体；牵引特性；雷诺方程

中图分类号：TS803.6 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2019)17-0144-09

DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.17.021

Research Progress of the Traction Characteristics of Guide Roller in Flexible Electronic Roll-to-Roll Manufacturing

MA Li-e, YANG Bin, GUO Yi, LIU Shan-hui, LI Ni, LEI Yong-hui

(Xi'an University of Technology, Faculty of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology, Xi'an 710048, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the causes of wrinkles, scratches and slippage of the web when it passes through the guide roller in the roll-to-roll manufacturing process of flexible electronic web, in order to improve the manufacturing precision and efficiency of flexible electronic web. The research progress of the flow field characteristics of the air entrainment between the guide roller and web and traction characteristics of the web on guide roller in recent years were summarized, and the key points for further study were presented. The flow field characteristics of the air entrainment between the web and the guide roller and the traction characteristics of the web on the guide roller were the main factors affecting the stable transmission of flexible electronic web, which played an important role in improving the machining precision of flexible electronic products. The effective control of the flow field characteristics of the air entrainment and the traction characteristics of the web on the guide roller are helpful to improve the precision of the web transmission, so as to ensure the production quality of flexible electronic products manufactured by roll-to-roll process.

KEY WORDS: roll-to-roll manufacturing; guide roller; air entrainment; traction characteristics; reynolds equation

随着新材料和新技术的发展，柔性电子技术已经引起了全世界的广泛关注，并得到迅速发展。柔性电子又称为打印电子或有机电子，是将有机/无机电子器件沉积在柔性基材上形成电路的技术^[1]。柔性电子

在日常生活、医疗、能源、计算机和通讯等行业具有广泛的应用前景，如柔性显示器^[2-3]、薄膜太阳能电池^[4]和可穿戴柔性电子^[5-6]等。卷到卷制造是一种将柔性基材经过放卷、功能制造、收卷 3 个主要工序进

收稿日期：2019-04-26

基金项目：国家自然科学基金（51305341, 51505376）

作者简介：马利娥（1973—），女，博士，西安理工大学副教授，主要研究方向为机械动力学和柔性电子制备。

行加工的技术,已被广泛应用于造纸、印刷和涂布等行业^[7—10],是高效率、低成本、大规模生产柔性电子产品的理想方案^[11—12]。

卷到卷制造是一种连续加工的方式,需要许多导向辊支撑薄膜和改变薄膜运动方向。导向辊是一种被动辊,依靠与薄膜之间的摩擦力转动,摩擦力就是薄膜对导向辊的牵引力。连续运动薄膜在经过导向辊时,将空气带入薄膜与旋转的导向辊之间,称为薄膜和导向辊间的空气夹带现象。夹带气体会使薄膜与导向辊之间的接触面积减少,造成导向辊的牵引力不足,进而会使薄膜与导向辊间产生速差,引起薄膜滑移、划伤和皱褶等加工缺陷^[13—17]。综上,文中阐述导向辊与薄膜之间夹带气体流场特性的建模、求解和仿真方法,总结薄膜对表面特征不同的导向辊牵引特性研究现状,分析夹带气体流场特性和薄膜对导向辊牵引特性的影响因素。根据目前需要解决卷到卷制造过程中的薄膜滑移、皱褶、划伤问题,提出进一步研究要点。

1 夹带气体流场特性的研究

薄膜与导向辊之间的夹带气体见图 1,其中 θ 为包角区域,左侧为入口区域,右侧为出口区域。国内外学者对薄膜和导向辊包角区域流场特性的研究主要涉及气体压力、气膜厚度以及入口、出口区域的流场速度。

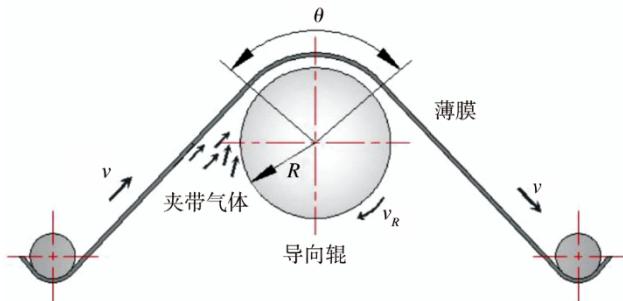


图 1 薄膜与导向辊之间的夹带气体

Fig.1 Air entrainment between web and guide roller

1.1 夹带气体流场建模及求解

采用流体力学相关理论,建立夹带气体的雷诺方程,同时采用力学理论对薄膜进行受力分析,建立薄膜平衡方程或薄膜变形方程,在此基础上耦合求解得出包角区域夹带气体的压力分布和气膜厚度。Hashimoto 等^[18—19]基于以下假设建立了薄膜平衡方程(1)

1) 由于薄膜厚度与其宽度和长度相比非常小,因此薄膜刚度对薄膜变形的影响很小。

2) 薄膜在轴向的变形是恒定的。

3) 薄膜与导向辊之间的接触压力很小,忽略其

对薄膜变形的影响。采用可压缩气体雷诺方程(2)与薄膜平衡方程(1)耦合求解气膜厚度和压力。计算结果表明,在包角区域气膜厚度和压力分布基本恒定不变,在出口区域附近压力降低。

$$\frac{T}{R} - T \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{1}{b} \int_{-L/2}^{L/2} (p - p_a) dz \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\delta^3 p \frac{\partial p}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (\delta^3 p \frac{\partial p}{\partial z}) = 6\eta v_1 \frac{\partial (p\delta)}{\partial x} \quad (2)$$

式中: b 为薄膜宽度; p_a 为大气压强; R 为导向辊半径; T 为薄膜张力; p 为夹带气体压力; η 为空气粘度; δ 为气膜厚度; v_1 为薄膜传输速度与导向辊线速度之和。

实际生产中,涂布纸和新闻纸等薄膜基材的通透性不同也会影响夹带气体的流场特性。Muftu 等^[20]将多孔薄膜视为运动的圆柱弯曲梁,采用微观力学模型将薄膜孔隙度表示为薄膜纤维体积分数的函数。采用达西定律研究通过薄膜厚度方向的空气流量和压降,推导了多孔薄膜与导向辊之间夹带气体的雷诺方程,并结合薄膜挠度方程求解给出了薄膜通透性、粗糙接触对导向辊的牵引特性。薄膜通透性越好,牵引特性越好;薄膜与导向辊之间粗糙接触作用越大,牵引特性越好。

卷到卷制造系统中,常采用表面螺旋刻线导向辊和凸形导向辊来排除夹带气体和展平运动薄膜,对其与薄膜之间的流场特性进行分析,有助于进一步优化导向辊结构。Tran 等^[21]对螺旋刻线导向辊与薄膜之间的流场特性进行了分析,根据壳体弯曲理论建立了薄膜变形方程(3),利用数值求解算法对式(2)与式(3)进行耦合求解。由于螺旋刻线导向辊与薄膜间的接触状态是时刻变化的,沿着导向辊周向找出 5 个代表性的接触点,其位置见图 2 中的 $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$ 和 90° ,这 5 个接触点的计算域示意见图 3,接触位置为 0° 时薄膜变形分布见图 4。对接触位置在 0° 时的薄膜变形和气体压力进行计算,由图 4 可知,薄膜在入口附近变形量大,在出口附近变形小,在包角区域基本保持不变。接触位置为 0° 时的气体压力分布见图 5,可以看出入口区域夹带气体压力高于包角区域,出口出现负压。Puttha 等^[22]采用改进的雷诺方程和薄膜挠度方程数值求解气膜厚度和压力,结果表明,导向辊为凸形时,凸形导向辊的参数影响最小气膜厚度的位置。

$$D\nabla^4 w - (T_0 - mv^2) \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} + \psi(w - w_0) = F(s, y) - p_{amb} + F_c(s, y) - F_T(s, y) \quad (3)$$

式中: m 为单位面积的质量; T_0 为薄膜张力; D 为薄膜的抗弯刚度; v 为薄膜的传输速度; w 为薄膜在 s 方向上的位移; p_{amb} 为大气压力; $F_c(s, y)$ 为导向辊与薄膜的接触压力; $F_T(s, y)$ 为薄膜张力对导向辊的压力; $\psi(w - w_0)$ 为壳体刚度。

由于夹带气体求解方程由耦合的非线性偏微分方程组成，需要采用数值计算的方法对方程进行求解。目前求解夹带气体方程的数值方法有有限元法、有限体积法和有限差分法。有限元法假定结构的变形和应力都是简单的，求解小区域内的变形和应力，进而可以获得整个结构的变形和应力。文献[23—24]用有限元方法求解了一维箔片轴承问题。有限体积法将计算区域划分为一系列不重复的控制体积，并使每个网格点周围有一个控制体积；将待解的微分方程对每一个控制体积积分，便得出一组离散方程。文献[25]采用有限体积法求解流固耦合问题。有限差分法将求解域划分为差分网格，用有限个网格节点代替连续的求解域。把控制方程中的导数用网格节点上的函数值的差商代替进行离散，从而建立以网格节点上的值为未知数的代数方程组。文献[20—22,26]采用有限差分法同时求解雷诺方程和薄膜平衡方程来确定夹带气体参数。

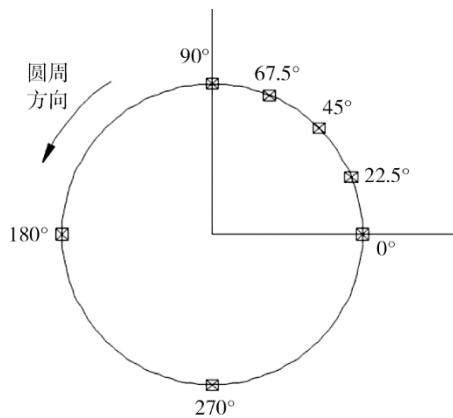


图2 导向辊与薄膜在圆周方向的接触位置
Fig.2 Contact position between the guide roller and the web along the circumference

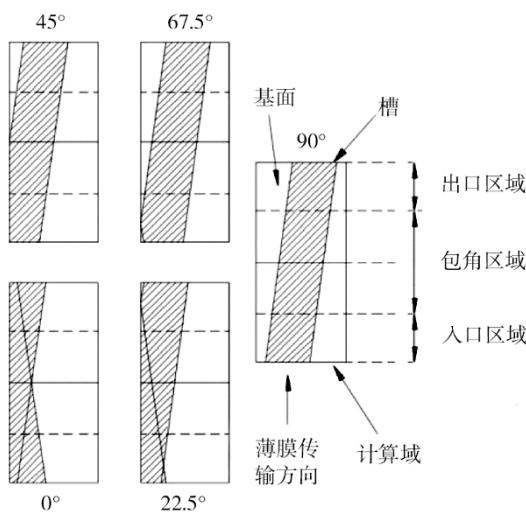


图3 接触位置在0°, 22.5°, 45°, 67.5°和90°时计算域
Fig.3 Computational domain for contact positions of 0°, 22.5°, 45°, 67.5° and 90°

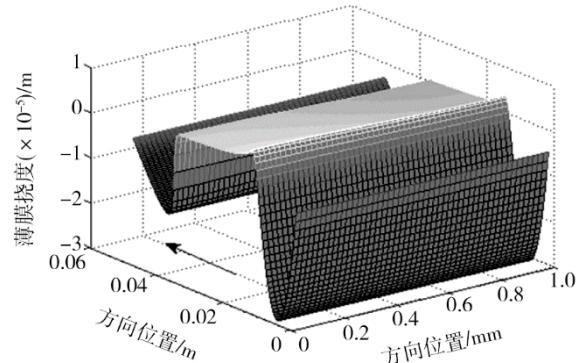


图4 接触位置为0°时薄膜变形分布
Fig.4 Web deformation distribution at a contact position of 0°

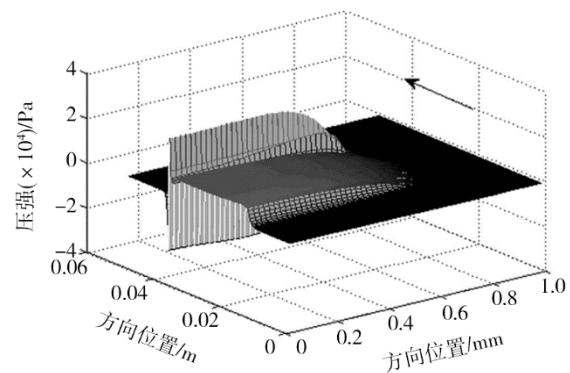


图5 接触位置为0°时的气体压力分布
Fig.5 Air pressure distribution at a contact position of 0°

1.2 流场特性可视化仿真分析

国内外学者利用流体仿真软件对夹带气体流场进行了数值模拟，分析了流场的流速、压力分布等特征。Nurmi^[27]建立了导向辊与薄膜之间夹带气体流场的二维仿真模型，采用CFD对包角区域夹带气体的静压力进行了分析，随着导向辊和薄膜速度增加，导向辊与薄膜之间夹带气体的静压力增大，同时最大静压力的位置会发生变化。马利娥等^[28—29]建立了导向辊与薄膜二维仿真模型，在气膜厚度确定的情况下，采用Fluent软件对运动薄膜与导向辊之间入口、出口区域夹带气体的速度和气体量进行了分析，仿真结果见图6。

研究发现薄膜运动速度越大，空气夹带量越多；在夹带空气的入口处，只有一小部分空气被带入薄膜和导辊之间的接触区域，大部分空气回流，产生局部涡流；在出口处，速度场非常稳定。AOKI等^[30]采用粒子图像测速仪(PIV)对薄膜与导向辊间入口和出口区域的夹带气体进行了流动可视化分析，研究了薄膜张力、速度对夹带气体气膜厚度和压力的影响。研究结果表明，随着薄膜传输速度的增加，气膜厚度和压力都增大；薄膜张力减小，气膜厚度和压力都增大。

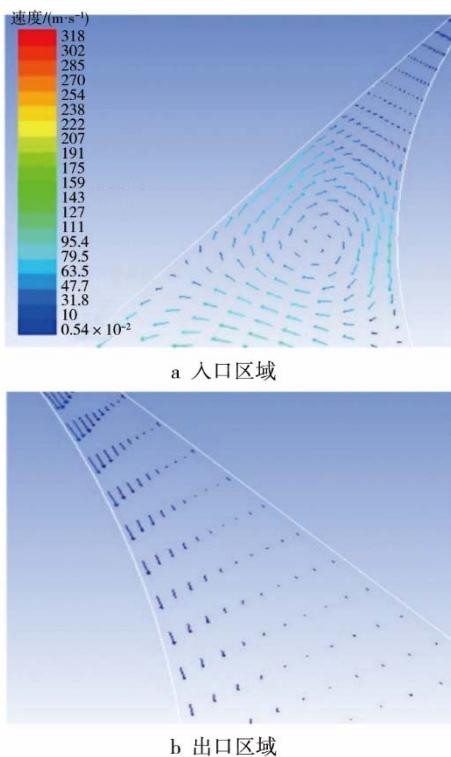


图 6 入口、出口区域流速矢量放大图
Fig.6 Flow velocity vector amplification of inlet and outlet

$$\mu_l = \begin{cases} \mu_c & \\ \mu_c \frac{E_1 \sigma_w R}{2\delta_w T} \exp(-\frac{\delta}{\sigma_w}) + \mu_f \left\{ 1 - \frac{E_1 \sigma_w R}{2\delta_w T} \exp(-\frac{\delta}{\sigma_w}) \right\} & \\ \mu_f & \end{cases}$$

式中： μ_f 为气膜流动引起的摩擦因数，由式(5)确定； μ_c 为粗糙接触引起的摩擦因数，由式(6—7)确定； δ_{cr} 为临界气膜厚度，由式(8)确定； E_1 为薄膜厚度方向的弹性模量； σ_w 为薄膜表面粗糙度； δ 为气膜厚度； T 为薄膜张力； δ_w 为薄膜厚度； R 为导向辊半径。

$$\mu_f = \frac{\eta R v_1}{\delta T} \quad (5)$$

式中： v_1 为薄膜与导向辊速度之和； η 为空气动力粘度。

导向辊与薄膜有速差时：

$$\mu_c = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \mu_{\text{experiment}} \arctan(\frac{v_1}{k}) & \delta < \delta_{cr} \\ \mu_{\text{experiment}} & \delta_{cr} \leq \delta \leq 3\sigma_w \end{cases} \quad (6)$$

导向辊与薄膜无速差时：

$$\mu_c = \mu_s \quad \delta \leq 3\sigma_w \quad (7)$$

式中： $\mu_{\text{experiment}}$ ， k 为试验常数； μ_s 为静摩擦因数，当导向辊粗糙度与薄膜粗糙度相比不能忽略时，则 σ 代替 σ_w 。

$$\delta_{cr} = \sigma_w \ln\left(\frac{E_1 \sigma_w}{2\delta_w p}\right) = \sigma_w \ln\left(\frac{E_1 \sigma_w R}{2\delta_w T}\right) \quad (8)$$

2 薄膜对导向辊的牵引特性研究

薄膜对导向辊的牵引特性在薄膜传输过程中起着重要作用。薄膜对导向辊的牵引力不足会使薄膜和导向辊产生速度差，进而引起薄膜滑移、皱褶、划伤等问题。薄膜对导向辊的牵引特性研究就是对导向辊的牵引力和牵引系数进行建模，分析其影响因素。

2.1 光面导向辊的牵引特性研究

夹带气体使薄膜与导向辊间的接触变得复杂，国内外学者采用流体力学、润滑理论、接触力学等相关理论对导向辊牵引特性进行了分析。Muftu 等^[31]通过同时求解薄膜的面内、面外平衡方程及可压缩雷诺润滑方程来计算薄膜的张力差，张力差越大，牵引系数越大；通过计算得出薄膜越厚，牵引系数越高。薄膜对导向辊的压力、薄膜与导向辊的粗糙接触力对牵引系数有显著影响。

Hashimoto 等^[32]将薄膜厚度方向的粗糙结构假设为线性弹簧模型，且薄膜粗糙度服从高斯分布，计算了导向辊与薄膜间的接触压力，推导了薄膜和导向辊间的摩擦因数模型，式(4)为局部有效摩擦因数模型。

$$\begin{aligned} \delta &< \delta_{cr} \\ \delta_{cr} \leq \delta &\leq 3\sigma_w \\ \delta &> 3\sigma_w \end{aligned} \quad (4)$$

包角区域的有效摩擦因数为：

$$\mu = \frac{1}{R\theta} \int_{-R\theta/2}^{R\theta/2} \mu_l dx \quad (9)$$

Raeymakers 等^[33]对传统的磁带驱动方程进行了修正，研究了磁带滑移速度、磁带张力、磁带表面粗糙度、材料属性和导向辊的半径对磁带与导向辊间摩擦因数的影响。研究表明，导向辊半径越大，磁带与导向辊间摩擦因数越小；磁带张力越大，磁带与导向辊间摩擦因数越大；薄膜在低张力、高速度传输条件下，摩擦因数下降比较明显。马利娥等^[34]在不考虑夹带气体的情况下，根据力学理论建立了光面导向辊与薄膜之间的牵引力模型，分析了摩擦因数、包角和薄膜张力对导向辊与薄膜间速差的影响，见图 7—8。由图 7—8 可知，包角(θ)、摩擦因数、张力对速差的影响比较明显，包角与速差虽呈现指数形式增长关系，但增速小；薄膜张力越大，速差越大；摩擦因数越大，引起的速差越大。根据以上分析，在实际生产中选择合适的导向辊和薄膜运行参数可以有效控制速差。

夹带气体对薄膜与导向辊间的润滑作用会减少薄膜对导向辊的牵引力，因此在研究薄膜对导向辊牵引特性的影响时必须考虑夹带气体的影响。Shao

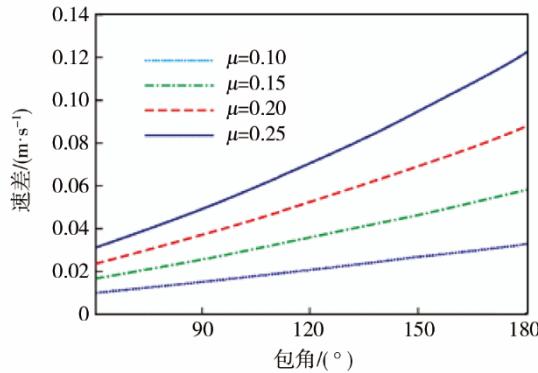


图 7 速差和包角及摩擦因数的关系

Fig.7 Relationship between speed difference and wrap angle and friction coefficient

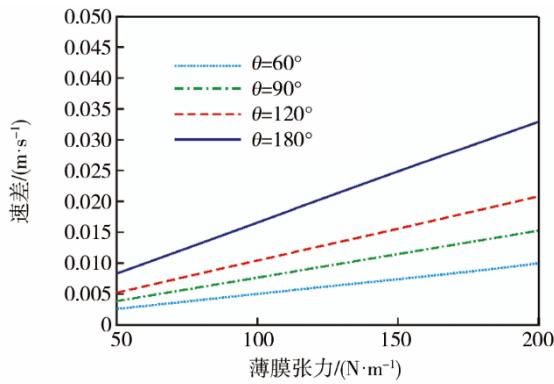


图 8 速差和张力的关系

Fig.8 Relationship between speed difference and tension

等^[35]运用流体润滑理论和力学理论,建立了考虑夹带气体的导向辊牵引力计算公式(10)。分析了包角、导向辊直径、薄膜张力、等效粗糙度等因素的影响。结果表明,牵引力随导向辊直径的增大而减小,随着等效粗糙度、包角和薄膜张力的增大而增大。在实际应用中,需选择合适的导向辊来保障薄膜传输稳定。

$$f_{i-1} = \left[T_{i-1} - 3.094\eta(v_r + v) \left(\frac{R}{\sqrt{\alpha_r^2 + \alpha_w^2}} \right)^{3/2} \right] (e^{\mu\theta_{i-1}} - 1) \quad (10)$$

式中: T_{i-1} 为薄膜张力; θ_{i-1} 为薄膜与导向辊的包角; η 空气动力粘度; v_r 为导向辊线速度; v 薄膜传输速度; α_r 为导向辊表面粗糙度; α_w 为薄膜表面粗糙度; R 为导向辊半径; μ 为导向辊与薄膜间的摩擦因数。

除了理论研究外,许多学者实验研究了薄膜对导向辊的牵引特性。Sunami 等^[36]研究了薄膜厚度和张力变化对静摩擦和动摩擦因数的影响,发现薄膜厚度越小,静摩擦因数越大,动摩擦因数越小。Ducotey 等^[37]研究发现薄膜与导向辊间的牵引系数与气膜厚度、导向辊的表面粗糙度、薄膜与导向辊间的静摩擦因数有关;当气膜厚度大于薄膜和导向辊的等效粗糙度时,牵引系数明显减小;导向辊表面粗糙度越大,牵引系数越大。Hashimoto 等^[38]采用皮带轮法

测量了不同厚度的薄膜在改变张力和环境空气相对湿度下的静摩擦因数,发现薄膜厚度减小和空气相对湿度增加都会使得静摩擦因数增大;另外采用图 9 所示方法对薄膜表面的静电电压进行测量,研究了静电对摩擦因数的影响。静摩擦因数与薄膜表面电压的关系见图 10^[38],可知薄膜表面产生的电压范围为-1.5~0 kV,静摩擦因数受表面电位的影响较为轻微;薄膜厚度越大,静摩擦因数越小。

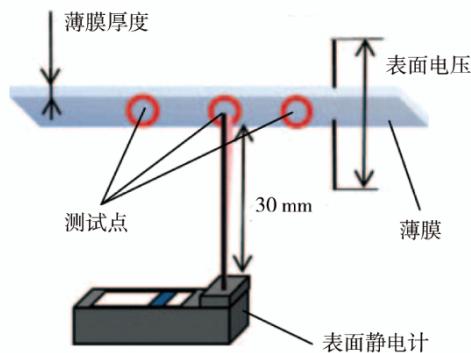


图 9 薄膜表面测量电压的方法
Fig.9 Method of measuring voltage on the web surface

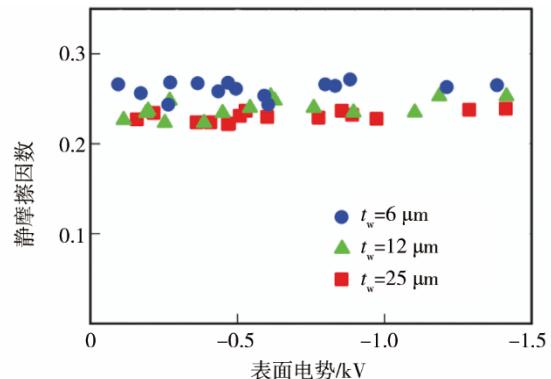


图 10 静摩擦因数与薄膜表面电压的关系
Fig.10 Relationship between static friction coefficient and web surface voltage

2.2 表面刻线导向辊的牵引特性研究

为了减小夹带气体对导向辊牵引特性的影响,文献[39]通过提高导向辊表面粗糙度有效减少了夹带气体对导向辊牵引力的影响。文献[40—42]提出表面具有不同刻线形状的导向辊可保障薄膜对导向辊的牵引力充足。为了克服薄膜在传输过程中皱褶、滑移行为,文献[43]提出使用八字展平线导向辊排除夹带气体以及展平薄膜。文献[44]建立了槽辊与薄膜间滑移、皱褶的预测模型,有效控制了薄膜的滑移和皱褶行为。

对导向辊表面结构进行处理已经成为提高牵引特性的主要方式,通过分析导向辊与薄膜间的摩擦特性,有助于优化导向辊表面刻线参数,为导向辊的选用和加工提供参考。Ducotey 等^[44]基于经典板壳理论

建立了薄膜变形方程、气垫导向辊或者透气性薄膜的雷诺方程,采用变网格有限差分法对控制方程进行迭代求解,再采用粗糙接触理论建立了周向槽导向辊的牵引系数仿真模型,分析槽距、槽深、导向辊表面粗糙度、气垫导向辊或者薄膜透气性对牵引系数的影响。单位宽度槽的个数越多,牵引系数就越大;当槽的深度在 0.03~0.1 mm 时,槽深度越大牵引系数就越大,当槽的深度超过 0.1 mm 时,牵引系数不再变化。Hashimoto 等^[45—46]基于表面粗糙度为高斯分布的假设,建立了薄膜与导向辊表面间摩擦因数的关系式,提出开槽导向辊与薄膜之间的等效间距 d_{eq} (见图 11),采用式(11)求出了气膜厚度,根据式(13)确定了摩擦因数。

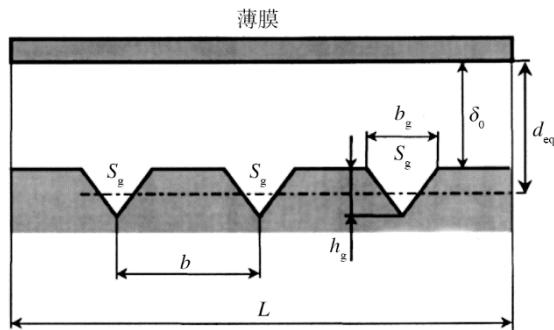


图 11 圆周槽导向辊与薄膜之间的等效间距

Fig.11 Equivalent spacing between circumferentially grooved guide roller and web

$$\delta_0 = d_{eq} - \frac{nS_g}{L} \quad (11)$$

$$S_g = h_g b_g / 2 \quad (12)$$

式中: d_{eq} 为等效间距; δ_0 为气膜厚度; h_g 为槽深; b_g 为槽宽。

$$\begin{cases} f \equiv f_1 & d_0 < \sigma \\ f \equiv f_1(1.5 - \frac{d_0}{2\sigma}) & \sigma \leq d_0 \leq 3\sigma \\ f \equiv 0 & d_0 > 3\sigma \end{cases} \quad (13)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_w^2 + \sigma_g^2}$$

式中: f_1 为静摩擦因数; σ_w 为薄膜表面粗糙度; σ_g 为导向辊表面粗糙度。

Rice 等^[47]建立了夹带气体的气膜压力、薄膜挠度和粗糙接触的耦合有效摩擦因数模型,见式(14),该模型可用于预测任意包角处薄膜对周向刻线导向辊的牵引系数,并通过实验进行了验证。Tran 等^[21]分析了圆周刻线导向辊与螺旋刻线导向辊的牵引系数,结果见图 12,可知同等条件下圆周刻线导向辊的牵引系数比螺旋刻线大,圆周刻线截面形状为矩形的导向辊牵引系数比三角形大。在实际应用中,需根据具体要求来选择导向辊刻线参数。

$$f_e = \frac{1}{\theta} \ln \left[\frac{T_{high0}}{T_{high0} - \left[(T_{high} - P_a R) \frac{(e^{f\theta_{eff}} - 1)}{(e^{f\theta_{eff}})} \right]} \right] \quad (14)$$

式中: θ 为薄膜与导向辊包角; T_{high0} 为上游薄膜张力; θ_{eff} 为有效包角; P_a 为气膜压力; R 为导向辊半径; T_{high} 为实际薄膜张力,由式(14)确定。

$$T_{high} = T_{high0} - t_w \rho v^2 \quad (15)$$

式中: t_w 为薄膜厚度; ρ 为薄膜密度; v 为薄膜速度。

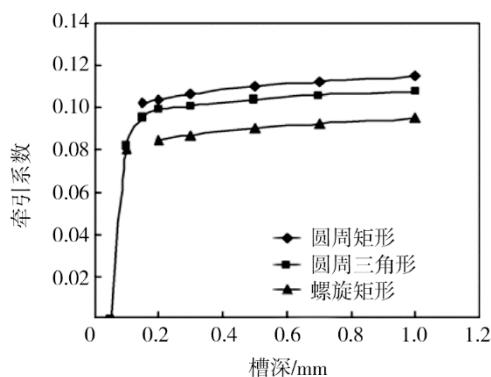


图 12 槽深和槽形对牵引系数的影响

Fig.12 Effects of groove depth and shape on traction coefficient

Mongkolwongrojn 等^[48]建立了一阶边界滑移和渗透率修正的雷诺方程,并对其进行了数值求解,得到了聚丙烯薄膜与表面凹槽导向辊之间的牵引特性;对梯形槽表面与半椭圆槽的摩擦因数进行了仿真比较,得出梯形槽表面摩擦因数比半椭圆槽小。Yang 等^[49]将磁带视为粘弹性张紧梁,建立了磁带横向摩擦动力学模型,对薄膜滑移、粘滞行为进行了分析。Kasikci 等^[50—52]分析了磁带与周向槽辊之间的接触状态,指出接触状态与槽间距、磁带压力及槽宽度有关;采用壳体理论、空气润滑理论和接触力学理论建立了夹带气体作用下磁带挠度方程和磁带与导向辊的接触力学模型,并通过实验验证了模型的准确性;计算得出槽宽越小,导向辊牵引力损失越严重。实际生产中需根据具体应用选择槽宽。

3 结语

卷到卷制造过程中,导向辊与薄膜间夹带气体的流场特性和薄膜对导向辊的牵引特性都会影响薄膜的动力学特性,导致薄膜出现皱褶、划伤及滑移,进而影响柔性电子薄膜产品的质量。文中阐释了导向辊与薄膜之间夹带气体流场特性的建模、求解和仿真方法,综述了薄膜对不同表面特征导向辊牵引性的研究现状,并对夹带气体流场特性和薄膜对导向辊牵引

特性的影响因素进行了分析。由分析可知,解决卷到卷制造中薄膜经过导向辊处的划伤、滑移和皱褶问题需要进一步对夹带气体流场特性进行研究,对气膜厚度和压力进行控制;通过优化导向辊表面结构,可提高薄膜对导向辊的牵引特性。

由于薄膜与导向辊之间的气膜厚度很小,属于微流体研究范畴,因此需要建立夹带气体微流体模型来研究流场特性。目前关于入口、出口区域夹带气体对薄膜传输影响的研究鲜有报道,因此研究入口、出口区域夹带气体和导向辊随动性对薄膜动力学特性的影响,有助于提高卷到卷制造中薄膜传输的稳定性。研究导向辊表面刻线结构对流场特性和牵引特性的影响,并进一步优化导向辊结构,可提高卷到卷制造柔性电子产品的精度。

参考文献:

- [1] 张乃柏, 郭秋泉, 杨军. 数字打印柔性电子器件的研究进展[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2016, 46(4): 75—90.
ZHANG Nai-bo, GUO Qiu-quan, YANG Jun. The Development of Digital Printing Technologies for Flexible Electronics Devices[J]. Scientia Sinica Physica: Mechanica & Astronomica, 2016, 46(4): 75—90.
- [2] 兰丽霞, 许军. 柔性显示用纸质基板的研究进展[J]. 液晶与显示, 2018, 33(5): 365—374.
GUAN Li-xia, XU Jun. Research Progress of Paper Substrate in Flexible Display[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2018, 33(5): 365—374.
- [3] 兰中旭, 韦嘉, 俞燕蕾. 柔性显示基板材料研究进展[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2017, 49(1): 9—16.
LAN Zhong-xu, WEI Jia, YU Yan-lei. Research Progress on Materials for Flexible Display Substrate[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2017, 49(1): 9—16.
- [4] KREBS F C. Fabrication and Processing of Polymer Solar Cells: a Review of Printing and Coating Techniques[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2009, 93: 394—412.
- [5] 蔡依晨, 黄维, 董晓臣. 可穿戴式柔性电子应变传感器[J]. 科学通报, 2017, 62(7): 635—649.
CAI Yi-chen, HUANG Wei, DONG Xiao-chen. Wearable and Flexible Electronic Strain Sensor[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(7): 635—649.
- [6] YOGESWARAN N, DANG W, NAVARAJ W T, et al. New Materials and Advances in Making Electronic Skin for Interactive Robots[J]. Advanced Robotics, 2015, 29(21): 1359—1373.
- [7] ABBEL R, GALAGAN Y, GROEN P. Roll-to-roll Fabrication of Solution Processed Electronics[J]. Advance Engineering Materials, 2018, 20: 1701190.
- [8] 陈建魁, 金一威, 尹周平. 柔性电子卷到卷制造收卷内应力研究综述[J]. 科学通报, 2019, 64(5/6): 555—565.
CHEN Jian-kui, JIN Yi-wei, YIN Zhou-ping. Review of Wound Roll Stress in Roll-to-roll Manufacturing of Flexible Electronics[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(5/6): 555—565.
- [9] PARK J, SHIN K, LEE C. Optimized Design for Anti-reflection Coating Process in Roll-to-roll Slot-die Coating System[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2014, 30(5): 432—441.
- [10] 尹周平, 马亮, 陈建魁. 卷到卷制造中基板横向振动研究进展[J]. 振动. 测试与诊断, 2017, 37(5): 853—864.
YIN Zhou-ping, MA Liang, CHEN Jian-kui. Advance in Transverse Vibration of Axially Travelling Web in Roll-to-roll Manufacturing[J]. Journal of Vibration. Measurement& Diagnosis, 2017, 37(5): 853—864.
- [11] BAE S, KIM H, LEE Y, et al. Roll-to-roll Production of 30-inch Graphene Films for Transparent Electrodes[J]. Nature Nanotechnology, 2010, 5(8): 574—578.
- [12] ZHANG H, POLIKS M D, SAMMAKIA B. A Roll-to-roll Photolithography Process for Establishing Accurate Multilayer Registration on Large Area Flexible Films[J]. Journal of Display Technology, 2010, 6(11): 571—578.
- [13] DUCOTEY K S, GOOD J K. The Importance of Traction in Web Handling[J]. Journal of Tribology, 1995, 117(4): 679—684.
- [14] JABBAR K A, PAGILLA P R. Optimal Velocity Profile Design for Transport of Viscoelastic Webs in Roll-to-roll Manufacturing[C]// American Control Conference, 2016: 1729—1734.
- [15] CHEN G S, OU K S, LIAO Y M. On the Influence of Roller Misalignments on the Web Behavior during Roll-to-roll Processing[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2011, 34(1): 87—97.
- [16] YANG H K, ENGELEN J B C, PANTAZI A, et al. Mechanics of Lateral Positioning of a Translating Tape due to Tilted Rollers: Theory and Experiments[J]. International Journal of Solids and Structures, 2015, 66: 88—97.
- [17] TAN H, MA W J, BU B L. Study of Web Guide Slippage Phenomena in Roll-to-roll Embossing System[C]// IEEE 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), 2013: 1772—1777.
- [18] HASHIMOTO H. Air Film Thickness Estimation in Web Handling Processes[J]. Journal of Tribology, 1999, 121(1): 50—55.
- [19] HASHIMOTO H. Theoretical and Experimental

- Investigations into Spacing Characteristics between Roller and Three Types of Webs with Different Permeabilities[J]. *Journal of Tribology*, 2006, 128(2): 1065—1096.
- [20] MUFTU S, ALTAN M C. Mechanics of a Porous Web Moving over a Cylindrical Guide[J]. *Journal of Tribology*, 2000, 122(2): 418—426.
- [21] TRAN S B Q, YOO Y H, KO J H, et al. Experimental and Numerical Study of Air Entrainment between Web and Spirally Grooved Roller[J]. *Journal of Tribology*, 2009, 131(2): 021502.
- [22] PUTTHA J. A Numerical Study on Air-entrainment between a Web and a Convex Guide Roller in a Web Transportation Process[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 392: 110—115.
- [23] ARREGUI I, CENDAN J J, VAZQUEZ C. Numerical Simulation of Head-tape Magnetic Reading Devices by a New 2-D Model[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2007, 43(4): 311—320.
- [24] HEINRICH J, WADHWA, S. Analysis of Self-acting Foil Bearings: A Finite Element Approach[J]. *Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Systems*, 1986, 3: 152—159.
- [25] LOPEZ E, MUFTU S. The Fluid-structure Interaction between a Tensioned Elastica and a Flotation Guide[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2011, 27(4): 487—502.
- [26] GRANZOW G, LEBECK A. Improved One-dimensional Foil Bearing Solution[C]// ASLE Special Publication, 1984: 54—58.
- [27] NURMI S A. Computational and Experimental Investigation of the Grooved Roll in Paper Machine Environment[D]. Finland: Lappeenranta University of Technology, 2009.
- [28] MA L E, WU Z Y, WU J M, et al. Air Entrainment between Moving Membrane and the Guide Roller[C]// the 21st International Congress on Sound and Vibration (ICSV2014), 2014(6): 4597—4603.
- [29] 马利娥, 孔飞, 成刚虎, 等. 薄膜运动速度对夹带气体流场特性的影响[J]. 包装工程, 2017, 38(7): 21—24.
- MA Li-e, KONG Fei, CHENG Gang-hu, et al. The Influence of Web Moving Speed on Flow Field Characteristics of the Entrained Air[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(7): 21—24.
- [30] AOKI K, HASHIMOTO H. Characteristics of Air Film Thickness and Flow Visualization for Transporting Film[J]. *Journal of Fluid Science and Technology*, 2010, 5(3): 503—514.
- [31] MUFTU S, JAGODNIK J J. Traction between a Web and a Smooth Roller[J]. *Journal of Tribology*, 2004, 126(1): 177—184.
- [32] HASHIMOTO H. Friction Characteristics between Paper and Steel Roller under Mixed Lubrication[J]. *Journal of Engineering Tribology*, 2012, 226(12): 1127—1140.
- [33] RAEYMAEKERS B, ETSION I, TALKE F E. The Influence of Operating and Design Parameters on the Magnetic Tape/Guide Friction Coefficient[J]. *Tribology Letters*, 2007, 25(2): 161—171.
- [34] 马利娥, 邵明月, 武吉梅, 等. 薄膜传输系统导向辊牵引特性研究[J]. 西安理工大学学报, 2016, 32(4): 462—467.
- MA Li-e, SHAO Ming-yue, WU Ji-mei, et al. Research on Traction Characteristics of the Guide Roller in the Web Transfer System[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2016, 32(4): 462—467.
- [35] SHAO M Y, WU J M, MA L E, et al. Traction Characteristics of Guide Roller with the Air Entrainment[J]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2017, 417: 759—766.
- [36] SUNAMI Y, FUJIWARA Y, KOTOBUKI Y. Experimental Study on Friction Characteristics between Plastic Film and Steel Roller[C]// The Organizing Committee of the ICDES, 2014: 160—164.
- [37] DUCOTEY K S, GOOD J K. The Importance of Traction in Web Handling[J]. *Journal of Tribology*, 1995, 117(4): 679—684.
- [38] HASHIMOTO H, SUNAMI Y, FUJITA H. Effect of Static Electricity on Static Friction Force between Plastic Film and Steel Roller[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Engineering Tribology*, 2014, 228(9): 1008—1014.
- [39] KNOX K L, SWEENEY T L. Fluid Effects Associated with Web Handling[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1971, 10(2): 201—206.
- [40] POORMAN P W. Grooved Tape Guide: US, 6666805[P]. 2003-12-23.
- [41] COBURN P R. Tape Drive Transport Roller: US, 6994293[P]. 2006-02-07.
- [42] TANAKA A. Guide Roller and Magnetic Tape Drive: US, 7116520[P]. 2006-10-03.
- [43] 刘斌武, 张巍. 正确使用展平辊轻松解决走料打皱[J]. 印刷技术, 2013(18): 57—58.
- LIU Bin-wu, ZHANG Wei. The Correct Use of Flattening Roller Can Easily Solve the Feed Wrinkling[J]. *Printing Technology*, 2013(18): 57—58.
- [44] DUCOTEY K S, GOOD J K. A Numerical Algorithm for Determining the Traction between a Web and a Circumferentially Grooved Roller[J]. *Journal of Tribology*, 2000, 122(3): 578—584.
- [45] HIKITA S, HASHIMOTO H. Improvement of Slippage and Wrinkling of Transporting Webs Using Micro-

- grooved Rollers[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, 2011, 77(774): 556—567.
- [46] HASHIMOTO H, NAKAGAWA H. Improvement of Web Spacing and Friction Characteristics by Two Types of Stationary Guides[J]. Journal of Tribology, 2001, 123(3): 509—516.
- [47] RICE B S, GANS R F. Predictive Models of Web-to-roller Traction[J]. Journal of Tribology, 2005, 127: 180—189.
- [48] MONGKOLWONGROJN M, JEENKOUR P. Analysis of a Flexible Web on a Grooved Concave Surface under Soft EHL[J]. Tribology International, 2013, 61: 194—204.
- [49] YANG H K, ENGELEN J B C, HABERLE W, et al. Lateral Friction Behavior of a Thin, Tensioned Tape Wrapped over a Grooved Roller: Experiments and Theory[J]. Journal of Tribology, 2016, 139(2): 021605.
- [50] KASIKCI T, MUFTU S. Wrap Pressure between a Flexible Web and a Circumferentially Grooved Cylindrical Guide[J]. Journal of Tribology, 2016, 138(3): 031101.
- [51] KASIKCI T, YANG H K, KIM E K, et al. Mechanics of Tape Contact with Circumferentially Grooved Cylindrical Rollers: Experiments and Modeling[C]// Proceedings of the ASME 2016 Conference on Information Storage and Processing Systems, 2016: ISPS2016-9581.
- [52] KASIKCI T, WENG M C, NAYAK A, et al. Contact Mechanics of a Thin, Tensioned, Translating Tape with a Grooved Roller[J]. Journal of Tribology, 2018, 140(1): 011405.