

薄膜运动速度对夹带气体流场特性的影响

马利娥¹, 孔飞¹, 成刚虎¹, 孙静², 武吉梅¹, 刘善慧¹

(1.西安理工大学, 西安 710048; 2.西北工业大学, 西安 710072)

摘要: **目的** 研究不同运动速度下薄膜和导向辊之间夹带气体的流场特性。**方法** 分析薄膜和导向辊的运动特点及它们之间夹带气体的形成机理, 完成夹带气体流场的理论建模。对运动薄膜和导向辊之间夹带气体的流场进行数值模拟, 结合工程实际情况分析讨论流场特性随薄膜运动速度的变化规律。**结果** 随着薄膜运动速度的增加, 空气夹带量随之增加, 楔形入口区域内流体的流动速度分布范围变大, 在包角出口区域流体流出的速度增加, 流程变大。**结论** 薄膜运动速度是影响夹带气体流场特性的主要因素, 夹带气体在入口区域形成局部涡流, 涡流会导致流体运动状态不稳定, 进而引起薄膜产生振动。

关键词: 薄膜; 导向辊; 夹带气体; 流场特性

中图分类号: TS803.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)07-0021-04

The Influence of Web Moving Speed on Flow Field Characteristics of the Entrained Air

MA Li-e¹, KONG Fei¹, CHENG Gang-hu¹, SUN Jing², WU Ji-mei¹, LIU Shan-hui¹

(1.Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2.Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT: The work aims to study the flow field characteristics of entrained air between web and guide roller at different moving speeds. The motion characteristics of web and guide roller and the forming mechanism of entrained air between them were analyzed to complete the modeling of flow field of entrained air. Numerical simulation of the flow field of entrained air between the moving web and the guide roller was carried out. In combination with the actual circumstances of the engineering, the law of flow field characteristics changing with the web moving speed was analyzed and discussed. With the increase of the web moving speed, the volume of entrained air increased accordingly and the flow speed distribution range in the wedge-shaped entrance area was enlarged. In the wrap angle exit area, the outflow speed and the flow path were increased. Web moving speed is the main factor influencing the flow field characteristics of entrained air. The entrained air forms local vortexes in the entrance area. Vortex can cause unsteady flowing state and will thus cause web flutter.

KEY WORDS: web; guide roller; entrained air; flow field characteristics

随着新材料和电子技术的发展, 近几年印刷柔性电子等新型薄膜也得到了快速发展^[1-3]。薄膜产品在加工中, 由于空气具有黏性, 薄膜的平动及导向辊的旋转运动会带动空气流动, 形成夹带气体, 夹带气体的流场特性对薄膜的加工质量有着重要的影响^[4-5]。

Ducotey^[6-7]等预测了薄膜对导向辊的摩擦牵引特性与夹带气体膜高度、辊和薄膜的表面粗糙度、薄膜与辊之间的关系。当气体膜厚度大于薄膜和辊子粗糙度的等效均方根时, 牵引系数明显下降, 基本与静

摩擦系数无关。Hashimoto^[8]研究分析了不同包裹角度、薄膜张力和薄膜传输速度下, 夹带气体的气膜厚度变化。Rice^[9]研究了运动薄膜对其包裹着的旋转圆柱的周向槽辊之间的牵引。通过建立修正的绞盘方程, 研究了未雕刻槽和圆周槽导向辊对气体夹带的影响。Hashimoto^[10]对纸带与导向辊之间夹带气体的流场进行了分析和实验研究。Tran 等^[11]给出了薄膜和表面带螺旋刻线的导向辊之间夹带气体的数值准静态仿真结果, 结果表明, 在导向辊旋转时, 导向辊与

收稿日期: 2017-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(51305341, 11272253); 陕西省自然科学基金(2016JM5023, 2016JQ5038)

作者简介: 马利娥(1973—), 女, 博士, 西安理工大学副教授, 主要研究方向为印刷包装设备动力学。

薄膜的牵引系数随着接触区域的改变而改变,带圆周刻线导向辊的牵引系数比带螺旋刻线导向辊的高。说明带螺旋刻线的导向辊能释放更多的夹带气体。Banichuk^[12]和 Molki^[13]对在周围的轴向运动流体中和在真空中匀速运动的薄膜的动力学特性进行了对比研究,指出空气的作用是不可忽略的。Aoki^[14]等利用粒子图像测速仪对薄膜与导向辊的入口和出口处进行了流量可视化,认为在入口和出口处夹带气体的流场会产生很大的变化。

文中以陕西西北人 FR-300 凹版印刷机的导向辊、运动薄膜和它们之间的夹带气体为研究对象,利用计算流体力学方法(CFD)对运动薄膜和导向辊之间夹带气体的流场特性进行分析和研究,主要研究薄膜运动速度对夹带气体流场的影响。

1 薄膜和导向辊间夹带气体流场模型的建立

1.1 CFD 模型建立

文中在研究薄膜和导向辊之间夹带空气时,以陕西西北人 FR-300 凹版印刷机的导向辊、运动薄膜和它们之间夹带的气体为研究对象,研究薄膜在张力为 200 N/m,薄膜与导向辊包角 θ 为 90° 时的流场特性,薄膜幅面宽度 b 为 1100 mm,导向辊的直径和长度分别为 120, 1100 mm。

在笛卡尔坐标系下建立夹带气体流场仿真物理模型,该模型中 x 坐标轴的取值范围是 $(-142, 142)$, y 坐标轴取值范围是 $(-60, 60.1)$,文中建立模型时令薄膜和导向辊之间形成的包角区域间隙值为 0.1 mm,故 y 的取值范围最大值为 60.1。夹带空气流场数值模拟计算区域见图 1,左侧楔形区域为空气入口区域,右侧楔形区域为空气出口区域。

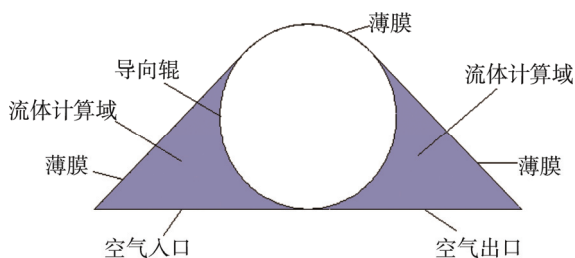


图1 夹带空气流场模型

Fig.1 Air entrainment flow diagram model

空气由流场模型左侧空气入口进入,流经左侧楔形入口区域、薄膜与导向辊接触形成的包角区域及右侧楔形出口区域,最后从右侧空气出口流出。楔形入口区域、包角区域和楔形出口区域三者相互连通,组成的流体域即为夹带空气流体计算区域。

1.2 网格划分

采用 Fluent 的前处理软件 Gambit 来进行网格划

分,使用四边形结构型网格,共计有 2460 个网格单元、5176 个面单元及 2716 个节点。薄膜和导向辊之间夹带气体计算流场网格的总体划分情况见图 2。

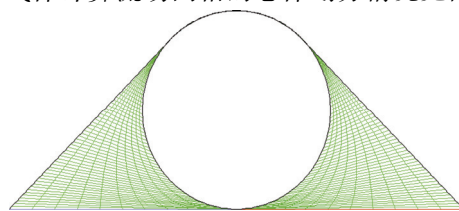


图2 四边形结构网格

Fig.2 Sketch map of quadrilateral structure mesh

1.3 边界条件的设置

初始条件与边界条件是控制方程有精确解的前提,控制方程与相应的初始条件、边界条件的组合构成一个物理过程的完整数学描述。实际中薄膜是以一定速度连续运动的,因此薄膜壁面属于运动型边界;同时在薄膜和导向辊之间的摩擦力作用下导向辊发生旋转运动,表面具有周向转动速度,故导向辊壁面也属于运动型边界。根据工程实际设置空气入口的边界条件为压力入口;空气出口的边界条件为压力出口;壁面的边界条件为薄膜壁面、导向辊壁面,薄膜壁面和导向辊壁面均属于运动型壁面边界。

1.4 求解控制参数设置

文中所采用的流体材料为空气,密度 $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$,运动粘度 $\mu=17.894 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。在对外部边界施加运动速度时需要分段进行,见图 3。在设置边界运动参数时需要分别对入口区域壁面边界和出口区域壁面边界施加平动运动速度初值,对包角区域壁面边界和导向辊壁面边界施加旋转角速度初值。

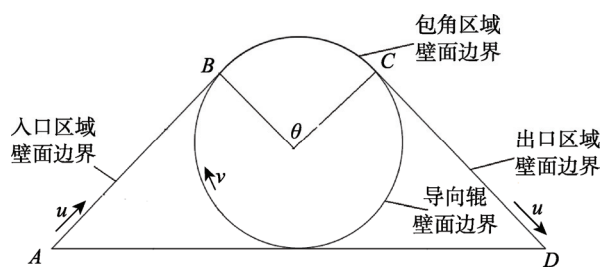


图3 边界条件的施加情况

Fig.3 Schematic diagram of boundary condition

以水平方向为 x 轴,竖直方向为 y 轴建立直角坐标系。 u_{web} 为薄膜壁面的运动速度,若包角大小为 θ ,则薄膜壁面与水平方向夹角大小为 $\theta/2$,可得到薄膜壁面边界速度在 x 方向和 y 方向的分量为:

$$u_x = u_{\text{web}} \cdot \cos(\theta/2)$$

$$u_y = u_{\text{web}} \cdot \sin(\theta/2)$$

在实际中导向辊的旋转线速度与薄膜的运行速度保持一致,根据线速度表达式 $v=\omega R$ 可知,若薄膜运行速度一定,则可知导向辊的旋转角速度 ω ,即

可获得包角和导向辊壁面边界的运动初始条件。

2 薄膜和导向辊之间夹带气体流场特性

应用 CFD 方法对流场做仿真模拟时需要充分结合工程实际情况, 对实验条件做出合理假设, 这样才能保证实验结果的准确性和有效性。文中在研究运动薄膜和导向辊之间夹带气体流场特性时的基本假设为: 气体为牛顿流体; 气体不可压缩, 气体的密度及粘度不发生变化; 温度不发生变化, 气体的粘度不会因为温度变化而发生变化; 流体的流速与运动件表面速度一致; 不考虑惯性力及重力的影响; 薄膜为非通透性薄膜, 不考虑夹带气体的渗漏。

2.1 速度场分析

流场速度等值线分布云图是 Fluent 中反映流场特性的一个重要形式。等值线图是指在所指定的表面上若干个点的连线, 这些线上的变量(如压力、速度)相等。用户可以确定要显示的某个变量的等值线, 以及显示面上的值, 还可以指定要显示的等值线图的取值范围^[15]。

2.1.1 流场速度云图

流场速度整体分布反映了流体在流场中各处流动速度的大小, 薄膜在不同运行速度下流场的速度场分布见图 4。由图 4 可知, 在楔形入口和出口区域内, 薄膜运动带动薄膜周围空气流动形成空气流场, 流场速度的分布主要集中在运动薄膜周围区域, 靠近薄膜壁面的流体运行速度与薄膜运行速度相同, 随着距薄膜法向距离的增加速度逐渐减小至 0。入口处薄膜壁面周围流体沿着薄膜运行方向流向包角区域, 出口处薄膜壁面周围流体沿着薄膜壁面从出口流出, 在包角区域流体运行速度出现最大值。依据牛顿黏性定律及黏性流体流动边界层理论可知, 运动平板带动空气流动, 流体的黏性使流动流体内部各处的速度不相等, 层与层之间存在速度差。由于流体分子间存在着吸引力, 速度较快的流体层会拖着慢层向前运动, 这种传递一层一层进行。实验结果表明, 紧靠运动壁面的流体与平板运动方向相同、大小相等, 均为 u , 而中间各流层的速度则从上到下按递减规律, 形成一个线性速度分布, 远场边界的流体层速度为 0。

在左侧楔形入口区域内, 随着薄膜运行速度的增加, 薄膜运动带动更多的空气流动, 流体的流动范围逐渐变大, 流场中流体的速度呈现逐渐增加的趋势; 同时随着薄膜运行速度的增加, 流场的速度分布向入口边界区域移动, 造成该现象的原因是包角区域的部分空气回流。在右侧楔形出口区域内, 随着薄膜运行速度的增加, 包角出口区域内流体速度增加, 压力减小, 为了维持压力稳定, 空气产生回流, 故该区域内的可流动范围逐渐

减小, 并逐渐向包角出口区域附近移动。

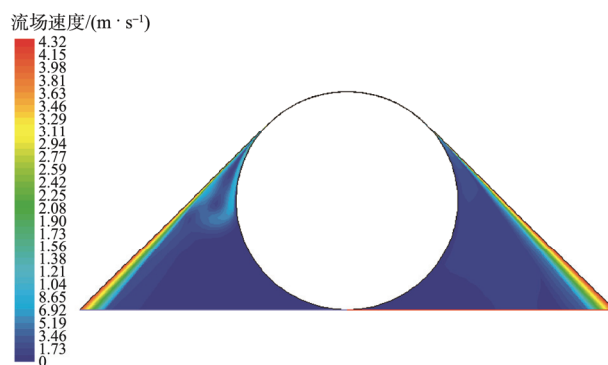


图 4 流场速度云图

Fig.4 Flow velocity distribution

2.1.2 流场速度流线图

流线是在同一瞬时流场中连续的不同位置质点的流动方向线, 即某时刻在流场中所画的一条曲线, 在这条曲线上的任一点的切线方向就是该点上流体质点的速度方向。在流线分布比较密集的地方流体流动速度快, 流线分布稀疏的地方流体流动速度慢, 因此流线分布的疏密程度表示了流体运动的快慢程度, 流线的指向表示了流体流动的方向。

薄膜在不同运行速度条件下夹带气体流场流线见图 5, 可以发现, 薄膜壁面周围流体的流线方向与薄膜运行方向相同, 与图 5 流场速度矢量分布结果吻合, 表明薄膜运动带动了周围空气沿其运动方向的流动。靠近薄膜壁面处的流线更加密集, 表明流体速度快。在图 5 左侧楔形入口区域内产生涡流现象, 且随着薄膜运行速度的增加, 气体流动速度加快, 从入口处挤压出来的空气以更大的运动速度流向楔形入口区域, 且回流流程更远, 从而会使得旋涡流的强度增加, 且涡流位置向空气入口方向移动。在右侧楔形出口区域内, 靠近薄膜壁面处流体跟随薄膜运动流出。远离薄膜壁面处流场流线指向楔形入口内部方向, 表明有外界空气流入, 这是由于外界空气压力作用产生的空气回流现象。运动薄膜带动空气流动, 在入口位置, 靠近薄膜壁面边界流体速度与薄膜运行速度相同, 随着距薄膜壁面法向距离的增加, 流体流动速度减小; 在出口位置, 靠近薄膜壁面边界的流体运动速

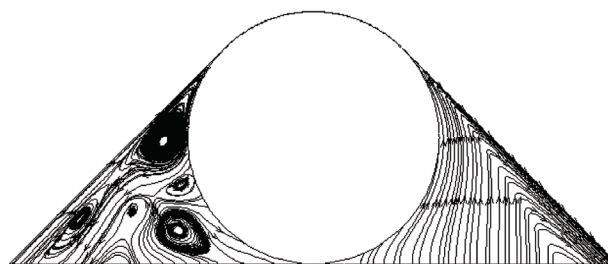


图 5 夹带气体流场流线

Fig.5 Flow line of entrained air flow

度与薄膜运行速度相同,并跟随薄膜从出口处流出,随着距薄膜壁面法向距离的增加,速度减小,同时在外界空气压力作用下,产生空气回流现象。

2.2 流场流量分析

在夹带气体仿真物理模型中,分别在空气入口和空气出口处设置空气流量监测,在经稳态计算求解后的空气流量具体数值见表 1。在 Fluent 中,出口处流量以负值的形式表示。由表 1 可以看到,随着薄膜运行速度的增加,空气入口流量增加。观察空气出口流量可以发现出口流量小于空气入口流量,两者之间存在差值。表明空气在从出口区域流出时不是所有流入空气全部流出,还有部分空气又回流到楔形出口区域,与流场速度矢量分布和流场流线表示的结果相吻合,可知在楔形出口区域内部分气体回流进入包角区域内。

表 1 出入口空气流量
Tab.1 Air flow of entrance and exit mg/s

速度/(m·s ⁻¹)	入口流量	出口流量
4.3	211.116	-276.361
5.0	318.05	-266.884
5.8	438.188	-367.45
6.7	771.6235	-470.847

假设空气在流动过程中不发生泄露或损耗,则在一定时间内从入口流入的空气会全部进入薄膜和导向辊之间形成夹带空气,因此以入口处流体流量作为薄膜和导向辊之间夹带空气量的衡量标准。研究表明,随着薄膜运行速度的增加,入口处空气流量基本呈线性关系增长。表明薄膜运行速度的增加会带动更多的空气流动,使空气夹带量增加,两者之间呈正相关变化关系。

3 结语

在空气黏性作用下,薄膜运动带动空气流动形成夹带气体流场,随着运行速度的增加,夹带气体流场的流动范围呈增加趋势;空气夹带量随薄膜运行速度的增加而增加;出口处因内部压力降低,发生空气回流现象;楔形入口区域内出现涡流现象,表明流体运动状态复杂,为夹带气体流场理论研究提供参考。在包角入口区域,由于入口是收敛的几何形状,只有少量气体进入包角区域内,大部分气体流回楔形入口区域内,并在局部形成漩涡流,随着薄膜运行速度的增加,漩涡流位置向下游方向移动,涡流强度增加;在包角出口区域,由于出口处发散的几何形状,空气压力降低,部分气体回流到包角区域内。

参考文献:

[1] WONG W S, SALLEO A. Flexible Electronics: Materials

- and Applications[J]. Vol of the Book, 2009(7): 57—60.
- [2] MOHAMMED M G, KRAMER R. All-Printed Flexible and Stretchable Electronics[J]. Advanced Materials, 2017(1): 24—28.
- [3] GRIERSON D S, FLACK F S, LAGALLY M G, et al. Rolling-based Direct-transfer Printing: A Process for Large-area Transfer of Micro and Nanostructures onto Flexible Substrates[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 120(9): 31—33.
- [4] SHINJI H, HIROMU H. Improvement of Slippage and Wrinkling of Transporting Webs Using Micro-grooved Rollers[J]. Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing, 2010, 4(1): 226—237.
- [5] MASASHI S, KAZUKIYO K, KOSHI T. Traction Force between Rotating Rolls and Moving Web Considering the Effect of Air-entrainment[J]. Microsystem Technologies-Micro-and Nanosystems-Information Storage and Processing Systems, 2007, 13(8): 1161—1167.
- [6] DUCOTEY K S, GOOD J K. The Importance of Traction in Web Handling[J]. Journal of Tribology: Transactions of the ASME, 1995, 117(4): 679—684.
- [7] DUCOTEY K S, GOOD J K. Predicting Traction in Web Handling[J]. Journal of Tribology, 1999, 121(3): 618—624.
- [8] HASHIMOTO H. Air Film Thickness Estimation in Web Handling Processes[J]. Journal of Tribology: Transactions of the ASME, 1999, 121(1): 50—55.
- [9] RICE B S, COLE K A, MUTU S. A Model for Determining the Asperity Engagement Height in Relation to Web Traction over Non-Vented Rollers[J]. Journal of Tribology: Transactions of the ASME, 2002, 124(3): 584—594.
- [10] HASHIMOTO H. Prediction Model of Paper: Web Wrinkling and Some Numerical Calculation Examples with Experimental Verifications[J]. Journal of Microsystem Technology, 2007(13): 933—941.
- [11] TRAN S B Q, YOO Y H, KO J H. Experimental and Numerical Study of Air Entrainment Between Web and Spirally Grooved Roller[J]. Journal of Tribology: Transactions of the ASME, 2009, 131(2): 502—509.
- [12] BANICHUK N, JERONEN J, NEITTAANMÄKI P, et al. Static Instability Analysis for Travelling Membranes and Plates Interacting with Axially Moving Ideal Fluid[J]. Journal of Fluids and Structures, 2010, 26(10): 274—291.
- [13] MOLKI M, BREUER K. Oscillatory Motions of a Prestrained Compliant Membrane Caused by Fluid-Membrane Interaction[J]. Journal of Fluids and Structures, 2010, 26(10): 339—358.
- [14] 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.
- [15] 朱红钧, 林元华. Fluent 12 流体分析及工程仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- ZHU Hong-jun, LIN Yuan-hua. Fluent 12 Flow Analyze and Engineering Simulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.