

## 浸渍涂覆过程中液膜流动的数值模拟

陈蒙蒙<sup>1</sup>,张先明<sup>1</sup>,陈文兴<sup>1</sup>,冯连芳<sup>2a,b</sup>

(1. 浙江理工大学纺织纤维材料与加工技术国家地方联合工程实验室,杭州 310018;2. 浙江大学,

a. 化学工程国家重点实验室;b. 化学工程与物工程学系,杭州 310027)

**摘要:** 结合有限元法和网格重划分法,在毛细数( $Ca$ ) $0.01 < Ca < 20$  范围内对硅油流体浸渍涂覆过程中的薄膜流动问题进行模拟,并将牛顿流体膜厚的模拟结果与其他文献中实验结果进行比较;通过对不同流体薄膜流动问题的分析,讨论了流体流变性能和加工参数对涂覆膜厚和自由面的影响规律。对流动过程中流场的分析表明:当流场稳定后,基板邻近的流体沿基板向上运动,而其他的流体流回槽中,在其内部形成一个漩涡,当流体黏度较小时,在自由面上形成一个驻点,而当黏度较大时驻点在内部形成;随提拉速度增大,几种流体的驻点均远离基板,同时非牛顿流体内部的漩涡逐渐减小。

**关键词:** 浸渍涂覆;液膜流动;数值模拟

**中图分类号:** O357.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-3851 (2016) 01-0047-05 **引用页码:** 010205

### 0 引言

浸渍涂覆过程是将洁净干燥的基材浸入到预先准备好的流体中,然后将其以一定的速度平稳地向上提拉,在黏性力、惯性力、表面张力和重力共同作用下,在基材表面附着一层均匀的液膜,经过干燥固化后得到均匀的膜产品的过程。浸渍膜通常用作装饰、保护膜和功能材料(如镀锌钢、磁信息储存材料和半导体组件)等<sup>[1]</sup>。

Landau等<sup>[2]</sup>首次从理论上研究了提拉速度 $V_0$ 很小时的浸渍涂覆过程,得出膜厚 $h$ 与流体性质(如表面张力 $\sigma$ 、黏度 $\eta_0$ 和密度 $\rho$ 等)和 $V_0$ 的理论关系式: $h = 0.945 \cdot l_c \cdot Ca^{2/3}$ ,其中毛细管长度 $l_c = \sqrt{\sigma/\rho g}$ , $g$ 为重力加速度, $Ca = \eta_0 V_0 / \sigma$ 。自从Landau等的开创性研究之后,许多实验和理论研究相继出现。Mayer等<sup>[3]</sup>在 $10^{-4} < Ca < 10^{-3}$ 范围内,以玻璃板为基板,十二烷基硫酸钠(SDS)水溶液为流体进行浸渍提拉实验研究,可视化流场显示自由面上的流体向基板运动,而内部流体一部分黏附在

基板上随之向上运动,另一部分则流回槽中,在其内部形成一个驻点,这与Landau等的研究结果不同。Krechetnikov等<sup>[4]</sup>实验研究了表面活性剂和基板粗糙度对膜的厚度和稳定性的影响,证明加入表面活性剂或表面粗糙均有利于膜的稳定,且可使膜厚大大增加,但这与Marangoni效应无关。Hurez等<sup>[5]</sup>运用有限元法(FEM)对宾汉流体浸渍涂覆过程中形成的自由面和流场进行分析,认为屈服应力有助于流体向上拖曳,使膜厚增加,但不影响驻点的位置。Filali等<sup>[6]</sup>利用软件Fluent结合有限体积法(finite volume method, FVM)和流体体积法(volume of fluid, VOF)探究了 $Ca$ 和雷诺数 $Re$ ( $Re = \rho V_0 l_c / \eta_0$ )对自由面的影响,分析了自由面凹陷和尖端形成的原因。

浸渍涂覆过程由于流体复杂黏弹特性、自由面演化和工艺参数影响,因此有着非常复杂的动力学行为。本文在 $0.01 < Ca < 20$ 范围内利用FEM-Remeshing法对牛顿流体和非牛顿流体的涂覆过程进行数值模拟,并将牛顿流体的膜厚计算结果与

收稿日期:2015-04-14

基金项目:国家973前期研究专项(2014CB660801)

作者简介:陈蒙蒙(1989-),女,河南商丘人,硕士研究生,主要从事浸渍涂覆数值模拟方面的研究。

通信作者:张先明,E-mail:zhangxm@zstu.edu.cn



## 1.4 边界条件

为了求解控制方程,必须对边界施加合理的边界条件:在固液交界面处,流体速率等于固体表面速率,所以假设流体粘在固体上,即无滑移条件;流动入口流率根据 Wilson<sup>[8]</sup>建立的公式求得;当存在表面张力时,求解自由面时需在其起始点指定初始条件;假设流动出口处的膜厚已经达到平衡状态,其速度分布根据 Hurez 等<sup>[5]</sup>建立的公式求得。

## 1.5 数值方法

由于非牛顿流体的流变行为复杂,且流动过程中自由面的形状和位置未知,因此不易进行数值计算。以 Polyflow 为求解器,利用 FEM-Remeshing 法来追踪自由面可克服这个问题。当存在表面张力效应时,采用二次坐标、二次速度的形函数插值方法以得到准确的结果,并采用 Picard 迭代法来提高计算的收敛性;时间步进算法采用隐式欧拉法;由于提拉过程中自由面网格变形比较复杂,所以在整个计算域选择 Thompson 转化法作为网格重划分方法。

## 2 结果与讨论

### 2.1 网格单元数量的选择

当基板从流体中以一定速度  $V_0$  垂直向上提拉时,自由面上的一部分网格会因自由面的变化而受到影响,所以需要重新划分网格,根据边界上节点位置的变化重新定义内部的节点。为了说明网格单元数量对模拟结果的影响,在不同提拉速度时用 4 种不同数量的网格单元  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  和  $M_4$  来分别计算牛顿流体 a 的自由面,如图 3(a)~(c)所示。图 3 可见,各自由面彼此重合,说明所选网格单元对计算结果影响较小。当  $V_0$  较小时,膜厚较小,基板附近的网格需进一步细化来描述该区域内流体单元的运动,同时考虑到增加网格密度会大大增加计算内存,降低计算速度,所以为了在准确描述流体单元运动的前提下尽量减小计算内存,本文中网格单元数量选择  $M_3$ 。

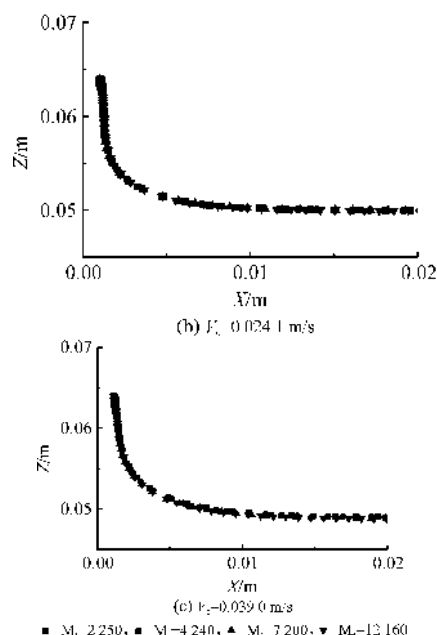
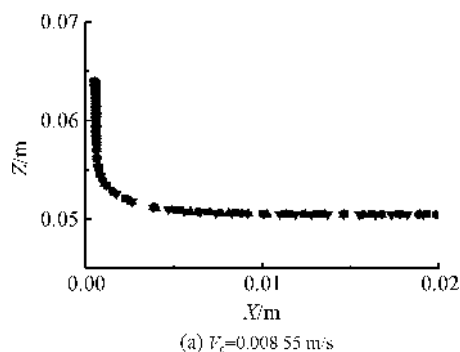


图3 不同提拉速度时,网格数量对牛顿流体 a 的自由面的影响

### 2.2 牛顿流体膜厚的模拟结果与实验结果的对比

Kizito 等<sup>[7]</sup>在较高的  $Ca$  和  $Re$  条件下对浸渍涂覆过程中的膜厚和自由面进行实验研究,结果为随  $Ca$  的增大,膜厚增加;随  $Re$  的增大,惯性效应明显,自由面凹陷并产生尖端。Kizito 等<sup>[7]</sup>实验和本研究模拟的无量纲膜厚  $T_0$  ( $T_0 = (\rho g h^2 / \mu V_0)^{1/2}$ ) 与  $Ca$  的关系如图 4 所示。图 4 显示:随着  $Ca$  的增大,实验结果和模拟结果分别趋近于恒定值 0.67 和 0.69,两者相差小于 20%,说明该模拟参数可以作为研究薄膜流动问题的理论依据。

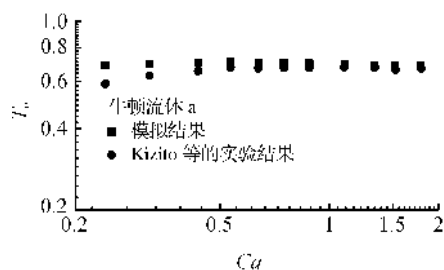


图4 Kizito 等<sup>[7]</sup>实验和本模拟的无量纲膜厚  $T_0$  与  $Ca$  的关系

### 2.3 提拉速度和黏度对自由面和膜厚的影响

高分子流体在流动时所受的剪切应力  $\sigma_{21}$  与剪切速率  $\dot{\gamma}$  的关系是,  $\sigma_{21} = \eta_a \dot{\gamma}$ , 其中  $\eta_a$  指表观黏度。牛顿流体 a 的自由面随  $V_0$  的变化如图 5(a)所示, 由于牛顿流体的黏度是恒定值,  $V_0$  增大使其所受的剪切应力增大,从而使沿运动基板向上拖曳的流体的量增加,因此动态弯月区(水平液面以上膜厚随高度而变化的区域)内自由面的曲率减小,膜厚增加。

而对于同一种非牛顿流体,其 $\sigma_{21}$ 与 $\dot{\gamma}$ 之间虽不呈线性关系,但 $\sigma_{21}$ 随 $\dot{\gamma}$ 的增大而增大,而在较小的 $\dot{\gamma}$ 条件下,该符合 Carreau 模型的非牛顿流体的黏度几乎不变,所以随 $V_0$ 增大,非牛顿流体自由面和膜厚的变化与牛顿流体一致(如图 5(b))。

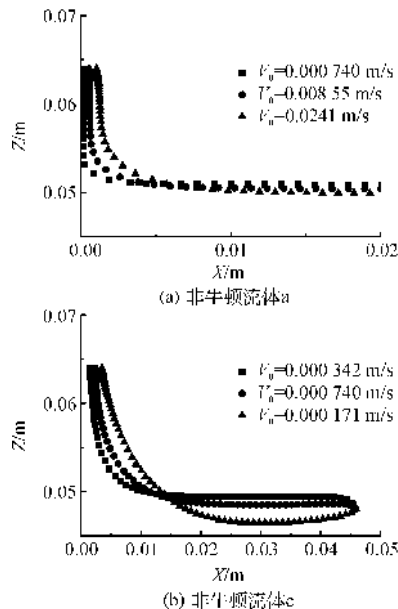


图 5 模拟流体的 $V_0$ 对其自由面的影响

图 6 是 $V_0 = 0.000 740$  m/s 时 4 种流体自由面的变化。由于同一提拉速度时,随流体黏度的增大,运动时相邻两层流体间的内摩擦剪切应力增大,使更多的流体沿运动基板向上运动,所以动态弯月区内自由面的曲率减小,而膜厚大大增加。

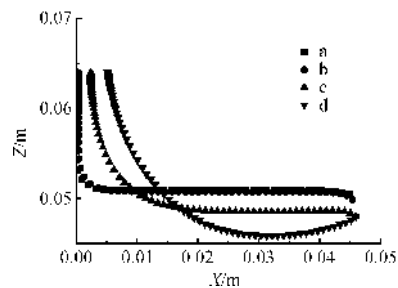


图 6  $V_0 = 0.000 740$  m/s 时,流体黏度对其自由面的影响

## 2.4 流场分布

图 7 中显示了牛顿流体 a 在不同提拉速度时流动过程的流线图。图 7 可见,整个流场明显分为两个区域:在流场的上部,基板邻近的流体沿基板向上运动,而下部的流体远离基板返回液槽中,并在流体内部形成一个漩涡,在自由面上形成一个驻点,且随 $V_0$ 的增大,驻点沿自由面逐渐远离基板运动,与 Landan 等<sup>[2]</sup>的实验研究结果一致。黏度较小的非牛顿流体 b 的流场有相似的变化。

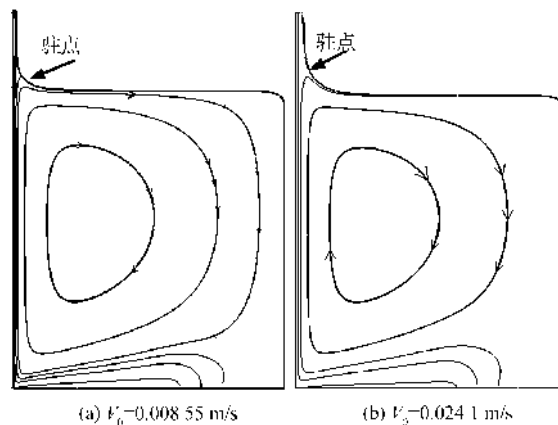


图 7 牛顿流体 a 的提拉速度对其流线图的影响

非牛顿流体 d 在不同提拉速度时的流线图如图 8 所示,当提拉速度 $V_0$ 较小时,驻点在流体内部而不是在自由面上形成,随着 $V_0$ 的增大,驻点逐渐远离基板,同时流体内部的漩涡逐渐减小。黏度较大的非牛顿流体 c 的流场有相似的变化。

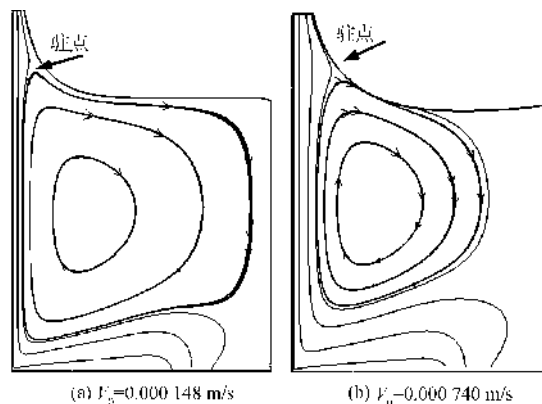


图 8 非牛顿流体 d 的提拉速度对其流线图的影响

## 3 结 论

本文在合适的条件下,利用 FEM-Remeshing 法成功地模拟了硅油流体在浸渍涂覆过程中自由面和膜厚的变化,随着提拉速度或黏度的增大,动态弯月区内自由面的曲率减小,而膜厚增加,并且牛顿流体膜厚的模拟结果与 Kizito 等的实验结果相小于 20%。对提拉过程中流场的分析结果表明:黏度较小的牛顿流体 a 和非牛顿流体 b 的流场稳定后,整个流场明显可分为两个区域:在流场的上部,基板邻近的流体沿着基板向上运动,而下部的流体远离基板流回槽中,在其内部形成一个漩涡,在自由面上形成一个驻点,且随 $V_0$ 的增大,驻点沿自由面远离基板运动。而黏度较大的非牛顿流体 c 和 d 的驻点首先在流体内部形成,随 $V_0$ 的增大,远离基板,同时流体内部的漩涡逐渐减小。

## 参考文献:

- [1] KISTLER S F, SCHWEIZER P M. Liquid Film Coating [M]. London: Chapman & Hall, 1997: 1-15.
- [2] LANDAU L D, LEVICH B V. Dragging of a liquid by a moving plate [J]. Acta Physicochim, USSR, 1942, 17: 42-54.
- [3] MAYER H C, KRECHETNIKOV R. Landau-Levich flow visualization: Revealing the flow topology responsible for the film thickening phenomena [J]. Physics of Fluids, 2012, 24(5): 1-33.
- [4] KRECHETNIKOV R, HOMSY G M. Experimental study of substrate roughness and surfactant effects on the Landau-Levich law [J]. Physics of Fluids, 2005, 17(10): 1-16.
- [5] HUREZ P, TANGUY P. Finite element analysis of dip coating with Bingham fluids [J]. Polymer Engineering and Science, 1990, 30(18): 1125-1132.
- [6] FILALI A, KHEZZAR L, MITSOULIS F. Some experiences with the numerical simulation of Newtonian and Bingham fluids in dip coating [J]. Physics of Fluids, 2013, 82: 110-121.
- [7] KIZITO J P, KAMOTANI Y, OSTRACH S. Experimental free coating flows at high capillary and Reynolds number [J]. Experiments in Fluids, 1999, 27(3): 235-243.
- [8] WILSON S D R. The drag-out problem in film coating theory [J]. Journal of Engineering Mathematics, 1982, 16(3): 209-221.

## Numerical Simulation of Liquid Film Flow in Dip Coating Process

CHEN Mengmeng<sup>1</sup>, ZHANG Xianming<sup>1</sup>, CHEN Wenxing<sup>1</sup>, FENG Lianfang<sup>2a,b</sup>

(1. National Engineering Laboratory for Textile Fiber Materials and Processing Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2a. Key Laboratory of Chemical Engineering; 2b. Department of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Finite element method (FEM) was combined with remeshing method to simulate the film flow problem in dip coating for silicone oil fluids in the range of capillary numbers  $0.01 < Ca < 20$ , and the simulation result of Newtonian fluid film thickness was compared with the experimental results in other articles. The film flow problems for different fluids were analyzed to illustrate the effects of the rheological properties and processing parameters on the film thickness and the free surface. The analysis of the flow field shows that the fluid near the substrate moves upward along the substrate when the low field is stable, while other fluids return into the groove and form a vortex; a stagnation point is formed on the free surface when the fluid viscosity is relatively small, while the stagnation point is formed in the flow field when the fluid viscosity is relatively large; and the stagnation points of several fluids move away from the substrate with the rise in withdrawal speed. Simultaneously, the vortex in non-Newtonian fluid decreases gradually with the rise in withdrawal speed.

**Key words:** dip coating; liquid film flow; numerical simulation

(责任编辑: 张祖尧)