



真空环境中黏性流体沿凹型壁面降膜流动行为的数值模拟

林文博, 高 祥, 陈世昌, 陈文兴

(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)

摘 要: 物料在设备内的流动行为对材料加工结果具有重要影响, 提出采用计算流体力学数值模拟技术探究黏性流体沿凹型壁面降膜的流动行为。在考察不同流场环境压力对流体降膜流动行为影响的基础上, 探究了真空环境中变换流体物性参数和操作参数时降膜流动的自由面、特征位置的膜厚和速度场等成膜流动特性。结果表明: 提高降膜流场环境的真空度, 液膜的成膜厚度变小, 有利于提高脱挥设备内的物料传质速率; 特征面速度随着角度的增大而逐渐增大, 在 45° 时达到最大; 当黏度为 $130.00 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的流体进行降膜流动时, 其成膜效率最高可达 $12000 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$, 表现出较好的成膜性能。该研究结果可为降膜脱挥器的设计与开发提供一定参考。

关键词: 降膜流动; 脱挥; 数值模拟; 环境压力; 成膜性能

中图分类号: TQ31

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2022) 11-0864-09

Numerical simulation of the falling film flow behaviors of viscous fluid along concave walls in vacuum environment

LIN Wenbo, GAO Xiang, CHEN Shichang, CHEN Wenxing

(National Engineering Lab for Textile Fiber Material and Processing Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The flow behaviors of materials inside the equipment have an important effect on the processing results of materials. In this paper, numerical simulation technique for hydromechanics was used to explore the falling film flow behaviors of viscous fluid along concave walls. Based on a clear understanding for the influence of different flow field ambient pressures on the falling film flow behaviors of fluid, we explored the film-forming flow properties, such as the free surface of the falling film flow, the film thickness at characteristic positions and the velocity field when the physical and operating parameters of the fluid were changed in the vacuum environment. The results indicated that when the vacuum degree of the falling film flow field environment was improved, the liquid film became thinner, which can help improve the mass transfer efficiency in the devolatilization equipment. The velocity of characteristic surface rose with the increase of angle, and reached its maximum at 45° . When the fluid with a viscosity of $130 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ had falling film flow, the film-forming efficiency reached $12000 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$, and the film-forming properties were good. This result can provide a certain reference for design and development of falling film devolatilizers.

Key words: falling film flow; devolatilization; numerical simulation; environment pressure; film-forming properties

收稿日期: 2022-01-24 网络出版日期: 2022-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(52173047, 51803187); 浙江省重点研发计划项目(2021C01020)

作者简介: 林文博(1996—), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事聚合反应工程方面的研究。

通信作者: 陈世昌, E-mail: scchen@zstu.edu.cn

0 引 言

在聚合物生产加工中大多数反应为可逆反应,在生成主产物的同时也会生成副产物。工业聚酯生产中体系会产生乙二醇、乙醛、水等挥发性小分子副产物。这些副产物严重影响正反应效率及最终产品的质量,需要通过脱挥工序将其排出体系^[1]。然而,随着缩聚反应的进行,物料黏度越来越高,小分子脱挥越来越困难,必须采用可提供大传质比表面积高黏流体的专用脱挥设备。对于理想的高效脱挥设备,需满足过程中的物料流动行为与设备内构件及工艺条件相匹配^[2],因而物料在脱挥设备内的流动行为成为聚合物脱挥领域的重要研究方向。

降膜流动是液体在重力驱动下以薄膜形式沿着支撑壁面向下流动的一种特殊受迫运动,具有温差小、高传热传质系数、结构简单且动力消耗小等特点,作为一种高效热质传递单元技术可广泛应用于材料化工、热能工程、能源、海水淡化等工业领域^[3-5]。目前被广泛报道的是以水和溴化锂溶液^[6-8]等一些极低黏流体为流动介质来观察降膜流动特性,但是在聚合物加工和溶液浓缩等工业生产过程中使用的物料大多属于高黏流体,高黏物料在加工设备内的流动特性对产物质具有重要影响作用,因而黏性流体在降膜流动过程中的成膜流动特性是其中的研究重点。

降膜流动过程具有多样的流体动力学行为特点,其中自由面波动特性、成膜流动特性和速度场演化是表征流体动力学的行为特点的重要特征^[9]。降膜流动特性不仅与流体属性和工况有关,液膜流动支撑壁面结构对其影响也非常显著,其中被重点研究的降膜流动支撑壁面结构有平板、圆管、丝线等^[10]。Park^[11]研究了沟槽管道内外表面有液膜流动时的流动特性,认为凹型壁面的降膜流动热质传递效果更高。王飞等^[12]通过高黏流体沿竖直管外降膜流动数值模拟研究,发现改变降膜管的支撑壁面结构可以强化热质传递性能。

王灵萍等^[13]通过研究洗涤冷却管内垂直降膜流动特性,发现增大气体流速有利于气液两相进行

充分的热质交换。Drosos 等^[14]通过对垂直矩形通道内逆流气流的液膜厚度特性的实验研究,发现气体流速过大会出现降膜溢出现象。尽管气液降膜两相流动研究表明气体流速对降膜流动特性的液膜分布及传热特性有所影响,但并未考虑降膜流场环境的气相压力的影响,特别是如脱挥过程中的低压工况。

本文借助计算流体力学(Computational fluid dynamics,CFD)数值模拟技术,在课题组前期研究^[4-5,12]和张群等^[15]的基础上,对真空环境下黏性流体沿凹型壁面结构降膜流动行为进行数值模拟,考察流场环境压力、流体黏度和流量等对聚合物降膜流动特性的影响,为降膜脱挥器的开发及工况设计提供参考。

1 数值模型与方法

1.1 降膜模型的建立及网格模型的划分

聚合物降膜脱挥过程示意图如图 1 所示。物料进入降膜脱挥器后,以条状或薄膜状沿着脱挥器降膜支撑壁面向下流动的过程中,物料内部的小分子等一些副产物以气泡等形式逸出至液相表面后挥发,完成脱挥后的聚合物流体进入下一个生产环节。

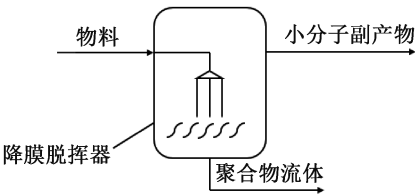


图 1 聚合物降膜脱挥过程示意图

本文假定流体以一定的流量从狭缝型液相入口进入,在重力作用下沿着凹形壁面做降膜运动。在液膜达到稳定后观察液膜膜厚、液膜流速等一些参数随着黏度、流量以及压力产生变化的过程。本文中凹型结构的物理模型及网格划分如图 2 所示。计算区域高度为 500 mm,凹型结构两侧壁面的长度(L)、液相入口区域宽度(D_1)和为提高数值模拟气液界面精度的网格加密区域宽度(D_2)设定值与流体黏度相关,计算中使用的流体物性参数和计算区域参数设置如表 1。

表 1 降膜流动模拟流体物性参数及网格模型尺寸

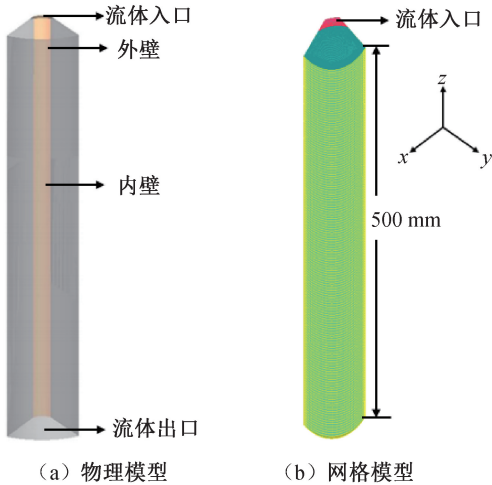
流体编号	黏度/(Pa·s)	密度/(kg·m ⁻³)	表面张力/(N·m ⁻¹)	入口宽度/mm	加密宽度/mm	壁面长度/mm
流体 a	0.92	970	0.0212	2	2	17
流体 b	130.00	980	0.0214	10	10	41

1.2 数值求解方法

本文所选取的研究对象为高黏流体在竖直降膜

管下的流动。由于流体的黏性大,液膜流速极小,在流动过程中属于气液两相分层流动,因此会产生气

液交界面。流体体积 (Volume of fluid, VOF) 法^[16-17]可以用来追踪自由面的信息,故而选取 VOF 法来追踪自由面的信息。为便于考察设定条件下的黏性流体降膜流动行为,对计算模型进行了如下的假设和简化:



- a) 由于降膜过程中剪切速率较小,假设流体处于牛顿平台区,且沿凹型壁面做稳态层流运动;
- b) 计算域降膜高度足够高,能够确保液膜能够充分稳定的发展;
- c) 降膜过程中温度不发生变化,不涉及能量的转化。

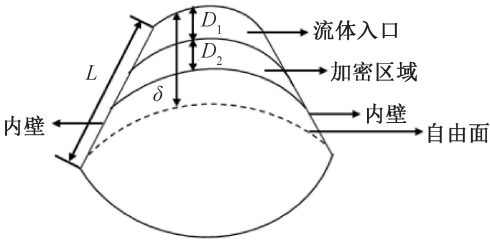


图 2 降膜管物理模型及网格划分示意

1.3 边界条件及离散方法

通过模拟计算软件 Fluent 对网格模型进行稳态计算;多相流模型选用 VOF 模型;液相入口边界条件为质量流量入口;出口条件为压力出口;其中壁面条件采用无滑移壁面^[18];对流项采用二阶迎风格式进行离散;压力项选用压力插值算法^[19] (Pressure staggering option, PRESTO);压力-速度耦合方程的求解方法采用 SIMPLE-Consistent (SIMPLEC) 方法,压力通过 Patch 法进行设定,计算收敛通过残

差精度及出口流量监测来判断。

1.4 控制方程

本文讨论的是不可压缩流体且沿壁面降膜是三维对称的绝热层流流动,不涉及能量交换。

连续性方程如下:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

动量方程如下:

$$\rho \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + F_{\alpha x} \tag{2}$$

$$\rho \left(v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + F_{\alpha y} \tag{3}$$

$$\rho \left(v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + F_{\alpha z} + \rho g \tag{4}$$

其中: ρ 为流体的密度, kg/m^3 ; v_x 、 v_y 、 v_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的速度分量, m/s ; P 为压力, N ; μ 为两项的加权平均黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; $F_{\alpha x}$ 、 $F_{\alpha y}$ 、 $F_{\alpha z}$ 分别为 x 、 y 、 z 方向上的表面张力源项。

采用 VOF 法跟踪气液界面的运动。在本文中,气液两项共同决定控制方程中的物性参数,取其加权平均值,加权平均黏度和平均密度如下计算:

$$\mu = \alpha_l \mu_l + \alpha_g \mu_g \tag{5}$$

$$\rho = \alpha_l \rho_l + \alpha_g \rho_g \tag{6}$$

其中: μ_l 、 μ_g 分别为液相和气相的黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; ρ_l 、 ρ_g

分别为液相和气相的密度, kg/m^3 ; α_l 、 α_g 分别为液相和气相的体积分数,范围为 $0\sim 1$ 。

表面张力虽然相比于其他力可能对结果的影响较小,但是表面张力是一个重要的参数,它不仅会影响液膜的扩散过程和膜的波动,也会影响气液界面。Brackbill 等^[20]开发了连续体表面力模型,其中表面张力被认为是靠近界面的薄层的质量力。因此,可以将它的表面张力源项 F_σ 表示为:

$$F_\sigma = \sigma \frac{2\rho\kappa_1 \nabla \alpha_1}{(\rho_l + \rho_g)} \tag{7}$$

$$\kappa_l = \frac{1}{|n|} \left[\left(\frac{n}{|n|} \cdot \nabla \right) |n| - (\nabla \cdot n) \right] \quad (8)$$

其中: κ_l 表示界面曲率。

1.5 网格无关性验证

为了验证网格无关性以及确保网格质量便于后续计算,通过 ICEM 网格软件对网格模型进行了结构化网格划分。由于流体 a 降膜流动过程中其成膜厚度远小于流体 b 在降膜流动过程中的成膜厚度,故通过对流体 a 的网格模型进行网格无关性验证,并将最佳网格尺寸应用到流体 b 的网格模型当中去。通过在入口段设置不同的加密方式,得到了网格数量分别为 158742、354046、630675、1281420 个和 1438668 个的五个模型。流体的黏度设置为 0.92 Pa·s,入口流量设置为 5 kg/h,然后分别对不同网格数量的五个网格模型进行了数值模拟然后取液膜膜厚来进行对比,从而最终确定最优的网格模型。

表 2 为不同网格数下自由面液膜膜厚的对比情况。当网格数量为 630675 时,随着网格数的增加,液膜膜厚的变化甚小,表明结果受网格的影响较小。因此,为了保证计算精度和计算时间,最终选择了网格数量为 630675 个的网格模型进行计算及结果分析。

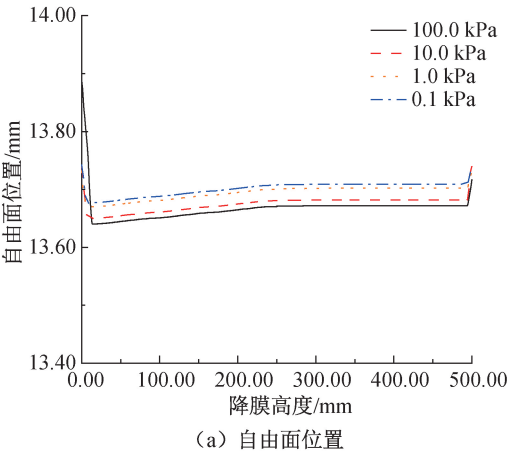


表 2 不同网格数下自由面液膜膜厚及误差		
网格数/个	膜厚/mm	误差/%
158742	1.5237	-2.296
354046	1.5511	-0.538
630675	1.5595	0.000
1281420	1.5598	0.019
1438668	1.5602	0.045

2 结果与讨论

2.1 环境压力对成膜流动性能的影响

脱挥器内部的压力在整个脱挥体系当中是一个至关重要的影响因素。高黏聚合物的生产加工中通常要求装置内的环境压力达到 100 Pa 甚至更低,因为较高的真空度有利于推动气液两相平衡,使小分子等一些副产物从反应体系中脱除,使反应的正向进行速度加快,从而使产品质量提高。图 3 为降膜流体黏度 0.92 Pa·s 在进口流量 15 kg/h 不同压力下的自由面位置和自由面速度曲线。从图 3 中可以看到,随着压力的减小,自由面在入口段的收缩现象有所减弱,自由面能够更快的达到一个稳定状态。这是因为随着压力的减小,液膜内外压差变大,液膜受到外部更大的挤压力,导致膜厚方向速度减小,降膜速度方向速度增大,从而使得液膜能够充分快速地发展。

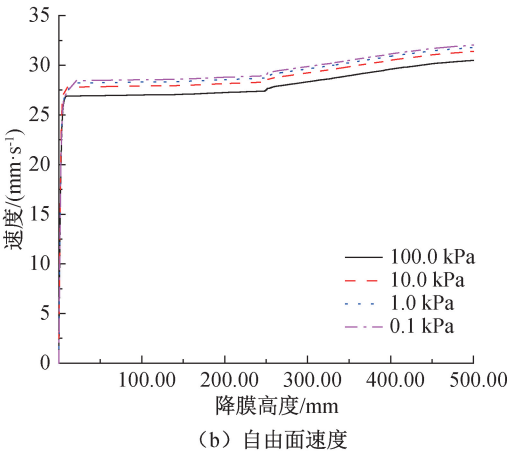


图 3 不同压力下自由面位置和自由面速度变化曲线

图 4 为不同环境压力下的成膜厚度变化曲线。从图 4 中可以看到,随着环境压力的降低成膜厚度逐渐减小,在 0.1 kPa 时其成膜厚度最小。这是因为随着真空度的提高,自由面的流速加快,液膜沿着降膜方向快速发展,从而导致液膜成膜膜厚较小。较小的成膜厚度有利于液膜内部小分子的脱离,从而使得物料传质速率明显提高。因此,选取压力为 100 Pa 的工况进行后续的模拟计算。

2.2 流体黏度和流量对降膜自由面和膜厚的影响

图 5 为黏性流体在降膜流动过程中的自由面位置随黏度和流量的变化曲线。从图 5(a)中可以看到,在低黏体系中,液膜沿着壁面往下流的过程中,在入口段会发生液膜塌陷的状况。这是因为低黏流体中流体单元之间的黏性力较小,受到壁面的剪切作用较明显。随着液膜的不断向下流动,液膜的自由面速度不断变大,液膜的惯性力成为主导,受

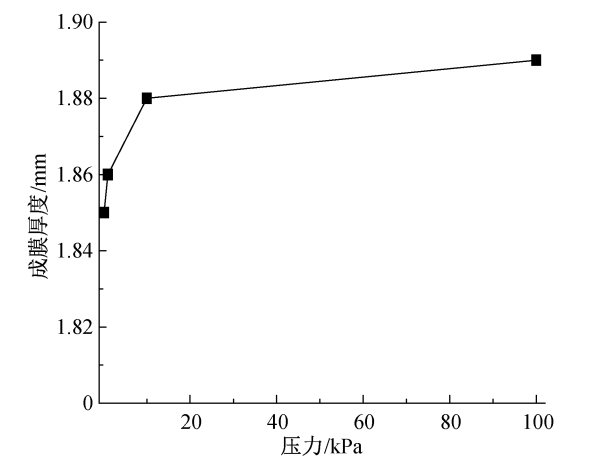
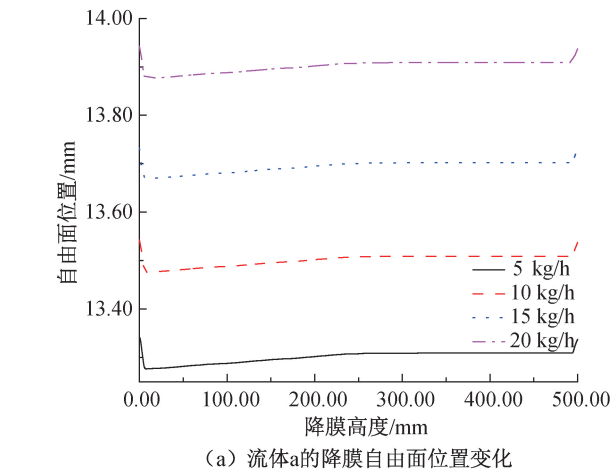
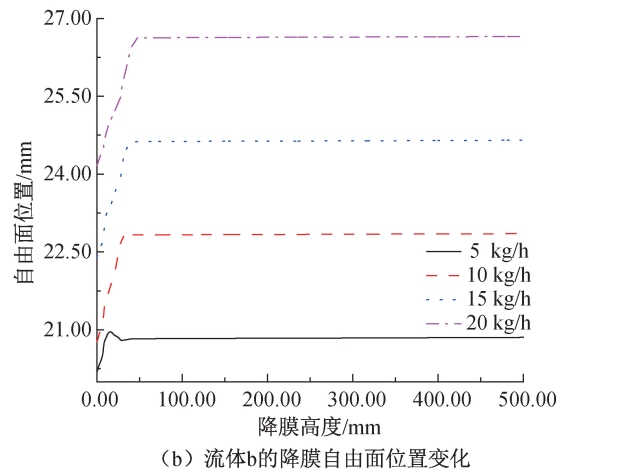


图4 不同环境压力下的成膜厚度



(a) 流体a的降膜自由面位置变化

到壁面的剪切作用影响较小,经过入口段之后液膜的自由面位置波动较小,恢复稳定,到出口段液膜又会发生短暂的堆积。从图 5(a)中也可以看到,随着流量的增大,液膜沿着膜厚方向的距离增大,在高黏体系当中同样如此。这是因为流量的增大导致惯性力的增大,使得液膜受到壁面剪切力和流体单元之间约束力的影响相对较小,液膜扩张效果显著。相对于低黏体系,从图 5(b)中可以看到高黏体系在入口段会出现液膜堆积现象。这是因为高黏流体降液膜过程中由于黏性阻力过大,在入口段流速较小导致液膜来不及充分发展,故而导致液膜发生堆积现象。



(b) 流体b的降膜自由面位置变化

图5 降膜流动过程中的自由面位置随黏度和流量的变化曲线

本模型中的内凹型壁面结构使黏性流体降膜流动中受到三侧支撑面的限位作用,而另一面暴露在特殊的气氛当中被称为自由面。流体在自由面处到壁面的距离具有显著的位置特征,因而根据本模型特点定义了沿两侧限位壁不同角度的特征面。特征面示意图如图 6 所示。从图 6 中可以看到,模型具有良好的对称性,关于 45°角成对称,因此只需探究 0°、15°、30°和 45°这四个特征面的流场信息。

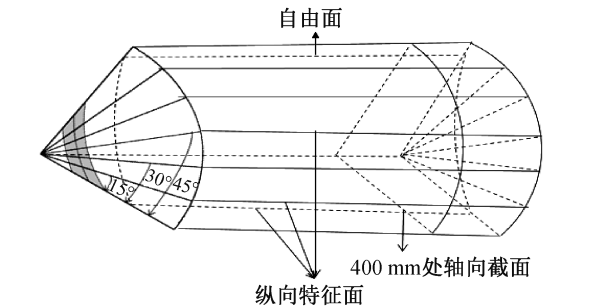


图6 特征面示意

成膜厚度反映降膜单元中小分子脱挥路径的长短,较小的成膜厚度有利于实现高效的热质传递^[21-22]。流体降膜成膜厚度随特征面和流量的变化

曲线如图 7 所示。从图 7 中可以看到,四个特征面的成膜厚度变化呈现了高度一致,均随着流量和黏度的增大而变大。但是在低黏体系黏度为 0.92 Pa·s 中,液膜的成膜厚度随着流量的增大变化较小,从流量 5 kg/h 到 20 kg/h,液膜的成膜厚度仅仅增长了 0.4 mm 左右。但当黏度增大到 130.00 Pa·s 时,液膜的成膜厚度增长了约 3 mm。这是因为在高黏体系当中,在液膜的降膜流动过程中,由于黏性力的急剧增大,流体单元在径向方向迅速堆积,从而导致高黏体系中的液膜膜厚变大。

2.3 降膜流动过程中的速度场分析

图 8 为降膜流动过程中的自由面速度随黏度和流量的变化曲线。从图中可以看到,在同一黏度下,随着流量的增加,液膜的自由面速度逐渐增加,惯性力的增大导致自由面速度越来越大。在同一流量下,黏度越大,液膜的自由面速度越小。相对于低黏体系,高黏流体的液膜自由面流速在流量为 5 kg/h 时最高下降了近 7 倍。这是因为高黏流体带来的流体单元之间的黏性力急剧增大,而重力和剪切力相

对较小,黏性力对流体降膜过程中的阻碍效果显著。从图中还可以看到,除了入口段速度会随着降膜的

发展而变大,而当液膜充分发展之后,液膜之间的力处于平衡状态,自由面的流速基本保持不变。

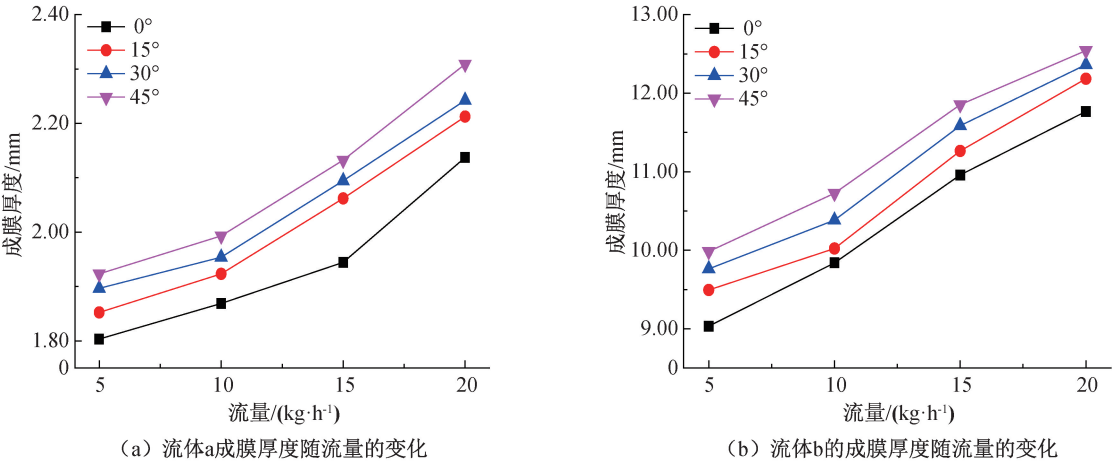


图 7 流体降膜成膜厚度随特征面和流量的变化曲线

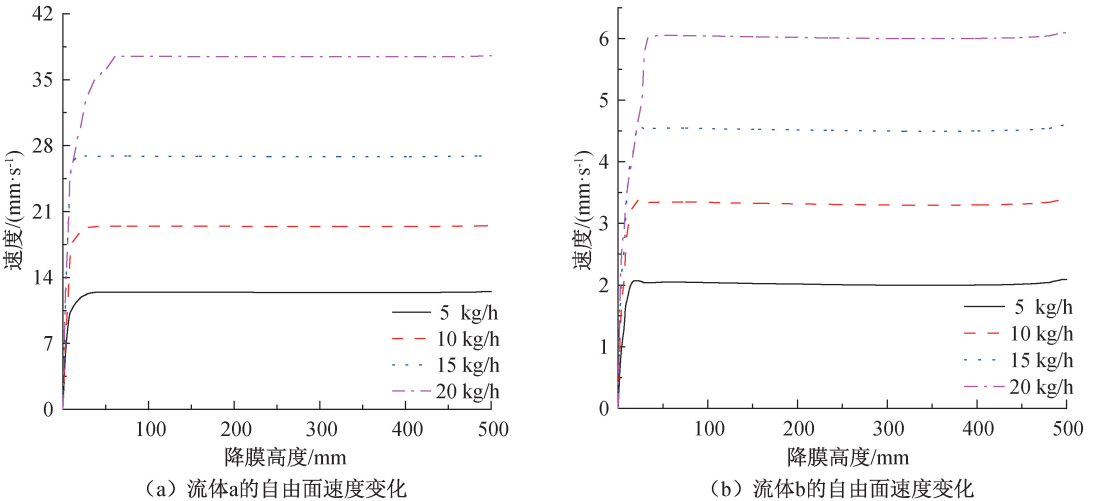


图 8 降膜流动过程中的自由面速度随黏度和流量的变化曲线

图 9 为降膜流动过程中的特征面速度随黏度和角度的变化曲线。在降膜流动过程中,由于流体依附于凹型外壁面向下流动,因此会受到壁面对流体的剪切作用,由于流体内部单元所受的剪切力并不相同,所以存在一定的速度梯度。从以上自由面位置曲线图可以看到,液膜大约在 100 mm 处就基本保持稳定。故取降膜稳定区域(如图 6 所示)处一截面,分析该截面不同角度下的液膜流速。从图 9 中可以看到,不管是低黏体系还是高黏体系当中,液膜的流速均随着角度的增大而增大,在 45°时液膜流速达到最大。这是因为在角度较小时,液膜靠近壁面,流体单元所受到的流体剪切力较大。随着角度的增大,液膜离壁面越来越远,流体单元所受的剪切力作用越来越小,从而导致液膜的速度越来越快。相对于低黏体系,当黏度为 130.00 Pa·s 时,此时由于黏性力的急剧增大,流体单元之间的牵制力急剧增大,导致液膜速度大幅下降。

由于降膜流动过程中由于液膜各个位置所受的力的大小不一,从而导致各个位置的液膜流体单元的速度具有较大的区别,从壁面到液膜的自由面,液膜速度存在明显的速度分布。Nusselt 针对高黏流体降膜流动过程中的稳态层流行为,提出了稳态层流下竖直壁面的降膜流动速度分布为:

$$\frac{v}{v_{\max}} = \frac{2\delta}{\delta_{\max}} - \left(\frac{\delta}{\delta_{\max}}\right)^2 \tag{9}$$

其中: v 为液膜内某个流体单元的速度, m/s; v_{\max} 表示液膜自由面上的流体单元速度, m/s; δ 为膜厚方向上某一点到壁面的距离, mm; δ_{\max} 为整个液膜的厚度, mm。

为了验证模型的准确性,将模拟所得的数据与 Nusselt 理论进行对比。取 400 mm 处一截面不同位置的膜厚与最大膜厚的比值作为横坐标,相对应的速度的比值作为纵坐标,观察所得到的膜厚方向的速度分布与 Nusselt 理论速度分布的吻合程度。

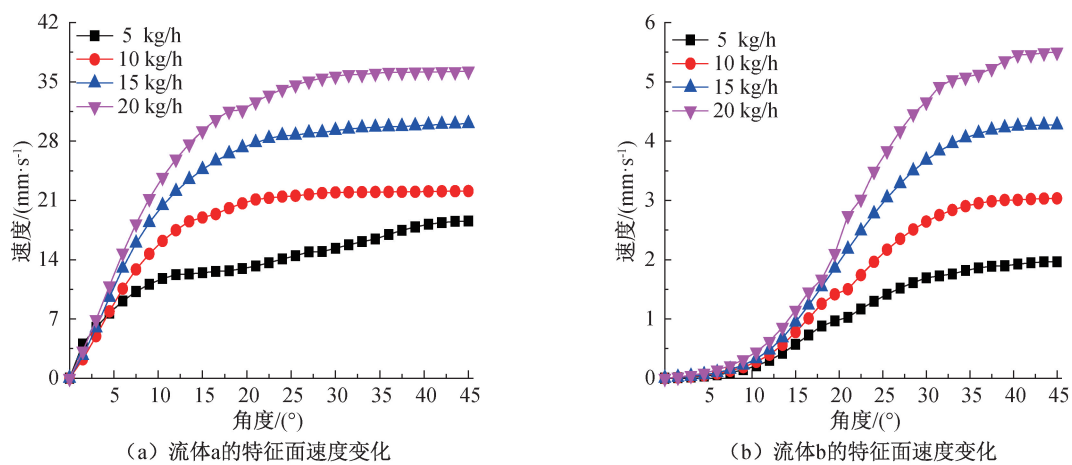


图9 降膜流动过程中的特征面速度随黏度和角度的变化曲线

图10为同一黏度不同流量下的液膜膜厚方向上的速度分布曲线。从图10中可以看到,四种流量下的膜厚速度分布均与Nusselt理论速度分布类似。在靠近壁面处即膜厚较小时,膜向速度均比理论值大。随着沿膜厚方向的距离增大,它的膜向速度与理论速度值逐渐接近。这是因为理论假设的初始速度为零,而实际上靠近壁面处是有一定的速度的,在理论曲线中越靠近自由面处它的速度越大,所以它的速度分布吻合较好。另外从图中也可以看到,高流量的速度分布曲线与理论曲线的吻合度相对于低流量下更好。这是因为流量的增加使得流体的惯性力增大。惯性力的急剧增大可以基本忽略掉黏性阻力带来的对速度的影响,从而使得最终的速度分布与Nusselt理论速度分布较为接近。

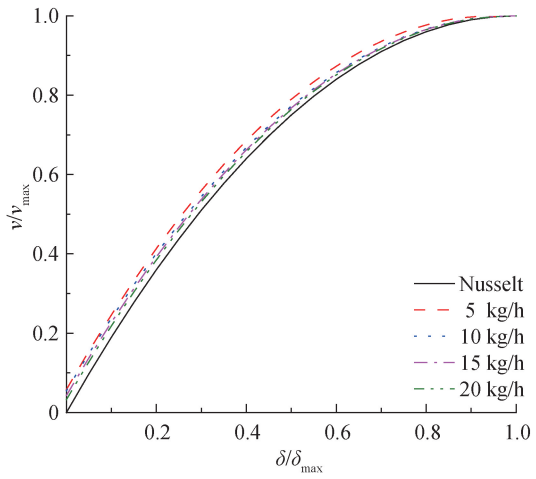


图10 同一黏度流体不同流量降膜流动在膜厚方向上的速度分布曲线

图11为同一流量不同黏度下的速度分布与Nusselt理论速度分布曲线对比图。从图11中可以看到,两者的速度分布情况都与Nusselt理论速度分布较为接近,但是在黏度为130.00 Pa·s的高黏

体系当中它的吻合度更高。这是因为黏度的增加使得黏性力急剧增大,使得流体单元之间的约束越发紧密,液膜在膜厚方向上堆积,波动较小,从而使得该黏度下的速度分布曲线与Nusselt理论速度分布曲线吻合度更高。

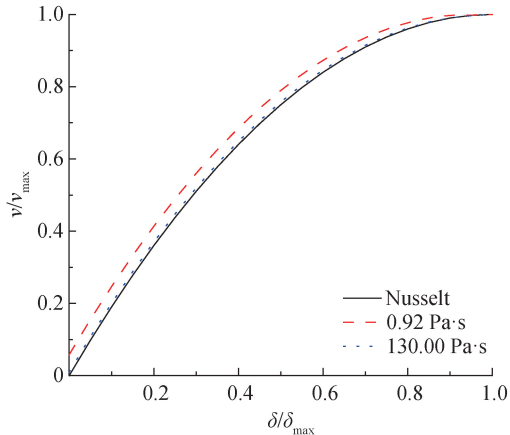


图11 同一流量不同黏度流体降膜流动在膜厚方向上的速度分布曲线

2.4 黏性流体降膜流动的成膜面积与成膜效率

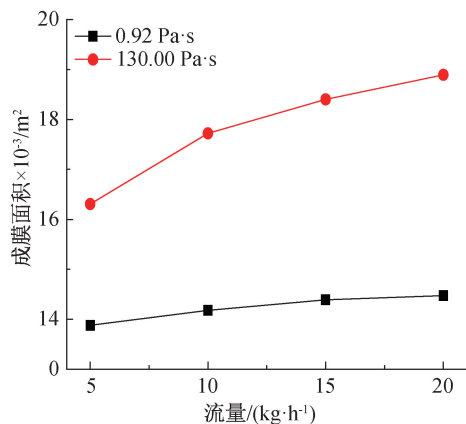
成膜面积反映其小分子扩散面积的大小,成膜面积越大,其传质扩散的面积就越大。其传质效果就越好。成膜效率是单位流体流量所呈现的液膜表面积,比起成膜面积,它更能反映成膜性能的好坏。它的计算公式如下:

ξ = S / Q (10)

其中: ξ表示成膜效率, m²/(m³/s); S表示成膜面积, m²; Q表示流体流量, kg/h。

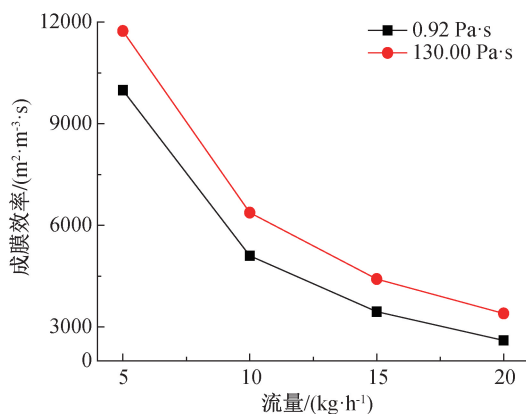
图12所示为降膜流动过程中成膜面积和成膜效率随流量和黏度的变化曲线。从图中可以看到,在同一黏度下,随着流量的增大,成膜面积就越大。同一流量下,黏度越大,成膜面积越大。这是因为在

同一黏度下,随着流量的增大,物料堆积现象明显,从而导致成膜面积变大。而同一流量下黏度越大成膜面积越大是因为黏度的增大导致流体单元之间的黏性力急剧增大,液膜自由面速度变慢,从而导致液膜在膜厚方向上堆积,使得液膜液膜成膜面积变大。在同一黏度下,随着流量的增大,成膜效率就越小。同一流量下,黏度越大,成膜效率越大。这是因为成



(a) 成膜面积

膜效率与成膜面积成正比关系,但成膜效率与流体流量成反比关系。流量越大,成膜效率越低。黏度越大,成膜面积越大,成膜效率也就越高。黏度 130.00 Pa·s 的高黏流体在流量为 5 kg/h 时,其成膜效率高达 12000 m²/(m³/s)。即使在黏度为 0.92 Pa·s 的低黏流体,其降膜成膜效率最低也可达到 3000 m²/(m³/s)。



(b) 成膜效率

图 12 降膜流动过程中成膜面积和成膜效率随流量和黏度的变化曲线

3 结 论

本文对真空环境中黏性流体沿凹型壁面降膜流动行为进行了数值模拟研究,考察了不同流场环境压力、流体黏度及流量对降膜流动特性的影响,并将数值模拟结果与 Nusselt 理论结果进行了比较,验证了模拟结果的可靠性,得出了以下主要结论:

a)随着流场环境真空度的提高,自由面在入口段的收缩现象有所减弱,自由面能够更快的达到一个稳定状态。随着压力的减小,液膜内外压差变大,液膜受到外部更大的挤压力,导致膜厚方向速度减小,降膜速度方向速度增大,其成膜厚度变小,从而有利于提高降膜脱挥器的物料传质速率。

b)低黏流体降膜流动过程中在入口段会出现液膜塌陷的情况,而高黏流体降膜流动过程中在入口段会出现液膜堆积现象。相对于低黏体系,高黏流体的液膜自由面流速最高下降了近 7 倍。在黏性流体降膜过程中特征面速度随着角度的增大而增大,受壁面剪切作用因素的影响,在 45°时流速达到最大。

c)提高流量,黏性流体降膜流动的成膜面积增大,但成膜效率降低。而降膜流体黏度越大,成膜面积和成膜效率均上升,其成膜效率最高可达 12000 m²/(m³/s),表明采用高黏流体在较小流量下可获得优异的流动成膜性能。

参考文献:

- [1] 邓立伟. 聚甲醛生产中的挥发分脱除[J]. 合成树脂及塑料, 2017, 34(1): 52-56.
- [2] 奚桢浩, 仇泉逸, 赵玲. 聚合物高效脱挥技术进展[J]. 化工进展, 2019, 38(1): 80-90.
- [3] 刘国兵, 惠宇, 王玉璋. 气液降膜流动传热传质研究的综述[J]. 燃气轮机技术, 2011, 24(3): 13-17.
- [4] 周宸, 林文博, 王勇军, 等. 黏性流体中气泡上升运动行为的实验研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2021, 45(6): 780-785.
- [5] Chen S C, Zhang L H, Wang Y J, et al. Residence time distribution of high viscosity fluids falling film flow down outside of industrial-scale vertical wavy wall: Experimental investigation and CFD prediction [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019, 27(7): 1586-1594.
- [6] 杨红, 陈鑫, 李鹏飞, 等. 竖直管降膜蒸发器冷膜成形及流动特性数值模拟[J]. 武汉工程大学学报, 2018, 40(4): 451-454.
- [7] 薄守石, 马学虎, 兰忠, 等. 溴化锂溶液垂直降膜过程中流动与传热的数值模拟[J]. 化学反应工程与工艺, 2011, 27(2): 114-120.
- [8] Li Q S, Shen Y Z, Lai S W. Experimental study of heat transfer performance of horizontal-tube falling film evaporator [J]. Desalination and Water Treatment, 2021, 218: 87-96.
- [9] 陈世昌, 马建平, 张先明, 等. 竖直降液膜流动在反应

- 工程中的应用[J]. 化工进展, 2014, 33(10): 2528-2534.
- [10] 王伟洁, 杨丽, 王宗伟. 水平异型管降膜蒸发器管外液膜流动数值模拟[J]. 煤气与热力, 2020, 40(1): 22-28.
- [11] Park I S. Numerical analysis for flow, heat and mass transfer in film flow along a vertical fluted tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(1-3): 309-319.
- [12] 王飞, 陈世昌, 马建平, 等. 高黏流体竖直管外降膜流动的三维数值模拟[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2017, 37(4): 512-517.
- [13] 王灵萍, 王亦飞, 郭强强, 等. 洗涤冷却管内垂直降膜流动特性[J]. 化工学报, 2013, 64(6): 1959-1968.
- [14] Drosos E I P, Paras S V, Karabelas A J. Counter-current gas-liquid flow in a vertical narrow channel-liquid film characteristics and flooding phenomena[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2006, 32(1): 51-81.
- [15] 张群, 童一俊, 任海刚, 等. 竖壁降膜流动特性与稳定性的数值研究[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(5): 733-736.
- [16] Islam M T, Ganesan P, Sahu J N, et al. Numerical study of co-axial bubble coalescence characteristics[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2015, 10(5): 670-680.
- [17] 谢行, 任慧龙, 邓宝利, 等. 基于 VOF 的非对称剖面自由入水数值模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 127-132.
- [18] 刘升, 郝英立. 竖直管内降膜流动气液两相运动数值模拟[J]. 热科学与技术, 2008, 7(1): 5-10.
- [19] 谷芳, 刘春江, 余黎明, 等. 气-液两相降膜流动及传质过程的 CFD 研究[J]. 高校化学工程学报, 2005, 19(4): 438-444.
- [20] Brackbill J U, Kothe D B, Zemach C. A continuum method for modeling surface tension[J]. Journal of Computational Physics, 1992, 100(2): 335-354.
- [21] 蔡振, 周一卉, 毕明树, 等. 水平管外降膜厚度分布规律的数值模拟研究[J]. 热能动力工程, 2016, 31(5): 22-28.
- [22] Jablonka K, Glovnea R, Bongaerts J. Quantitative measurements of film thickness in a radially loaded deep-groove ball bearing[J]. Tribology International, 2018, 119: 239-249.

(责任编辑:刘国金)