

锥形分布器下竖直圆管降膜的数值模拟

张鹏其¹, 梁海峰¹, 蔡业彬²

(1. 太原理工大学 化工学院, 山西 太原 030024 ; 2. 广东石油化工学院 机电学院, 广东 茂名 525000)

摘要:通过建立竖直圆管内降膜蒸发的物理模型,对锥形分布器管内的气液两相逆流的换热特性进行二维 CFD 数值模拟,采用 VOF 方法捕捉两相流的流动界面,分析了管壁上液膜的膜态、膜厚、速度和温度分布。结果表明:液膜的膜态和温度分布与喷淋量紧密相关,随着喷淋量的增大液膜的稳定性逐渐增加,在喷淋量为 $1.48 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 时液膜的稳定性最好,液膜表面温度逐渐降低;液膜的降膜膜态分布分为上端的稳定段和下端的震荡段; $2\,000 < Re < 10\,000$ 时,管壁的平均传热系数呈现逐渐增大的趋势;膜厚的模拟值与 Nusselt 和 Brauer 的理论计算值吻合较好。

关键词:锥形分布器;数值模拟;圆管;膜态

中图分类号:TK124 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.02.022

[引用本文格式]张鹏其,梁海峰,蔡业彬.锥形分布器下竖直圆管的降膜数值模拟[J].热能动力工程,2020,35(2):161-167.
ZHANG Peng-qi, LIANG Hai-feng, CAI Ye-bin. Numerical simulation of falling film of vertical circular tube under conical distributor[J].
Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(2): 161-167.

Numerical Simulation of Falling Film of Vertical Circular Tube under Conical Distributor

ZHANG Peng-qi¹, LIANG Hai-feng¹, CAI Ye-bin²

(1. Chemical Engineering Institute, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, China, Post Code: 030024; 2. Mechanical and Electrical College, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maomin, China, Post Code: 525000)

Abstract: By establishing a physical model for falling evaporation in vertical circular tube of an annular conical distributor, two-dimensional CFD numerical simulation was conducted on heat transfer characteristics of the gas-liquid countercurrent falling film evaporation, and the falling interface of the two-phase flow was captured by VOF method. The film state, thickness, velocity and temperature distribution of the liquid film on the tube wall were analyzed. The results show that the film state and temperature distribution of liquid film are closely related to the spraying amount. With the increase of spraying amount, the stability of liquid film increases gradually. When the spraying amount is $1.48 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$, the stability of liquid film is the best and the surface temperature of liquid film decreases gradually. The falling film state distribution of liquid film can be divided into the stable section at the upper edge and the oscillating section at the lower edge. With $2\,000 < Re < 10\,000$, The average heat transfer coefficient of the tube wall increases gradually, and the simulated values of film thickness is in good agreement with the theoretical values given by Nusselt and Brauer.

Key words: conical distributor, CFD numerical simulation, circular tube, film state

收稿日期:2018-11-13; 修订日期:2019-01-21

基金项目:国家科技型中小企业创新基金项目(12C26214405347);广东省自然科学基金(9152500002000003);广东省教育厅科技创新项目(2012KJJC0076)

Fund-supported Project: National Science and Technology Innovation Fund for SMEs(12C26214405347), Natural Science Foundation of Guangdong Province(9152500002000003), Science and Technology Innovation Project of Guangdong Education Department(2012KJJC0076)

作者简介:张鹏其(1992-),女,山西大同人,太原理工大学硕士研究生。

通讯作者:梁海峰(1980-),男,山西长治人,太原理工大学副教授, E-mail: 1558600979.com.

引 言

竖直降膜蒸发冷凝器由于传热传质特性好、占地面积小、无积液等优点被广泛应用于石油化工、冶金、轻工、食品加工、医药、海水淡化以及污水处理等领域。降膜蒸发过程中膜厚的分布和液膜的湍动程度直接影响着传热的效率与效果,液膜太厚会增加管外侧的阻力系数,湍动程度加强则会使液膜分布不均匀、液体飞溅,极有可能出现“干壁”情况^[1]。

牟睿^[2]针对液相入流时布液不均匀、加工安装精度要求高等问题,设计了高竖管降膜无外源新型液体分布装置。宋健等人^[3]在 WABREC 实验台架上,对水膜雷诺数在 50~900 范围、水膜垂直流下平板的流动特性进行实验研究;刘玉峰等人^[4]对于高雷诺数竖壁降膜流场进行了数值模拟,研究了降水膜的速度分布、温度分布、波速及平均水膜厚度等特性参数的变化规律;王为术等人^[5]对 R113 在垂直管内的降膜流动蒸发传热特性进行了试验研究,研究了质量流量、热通量对传热系数和出口蒸汽流量的影响;于意奇等人^[6]采用电容探针和高速摄像机对沿大平板垂直下降液膜的表面波进行了实验测量,产生的二次涡流对等效膜厚有减薄作用;董俐言等人^[7]对蒸发式冷凝器进行了二维数值模拟,分析冷却水温度、空气温度和空气含湿量等参数的分布规律。张群等人^[8]采用数值模拟和实验分析了平均液膜厚度、基液膜厚度、波动振幅与波长等特性参数的变化规律;lel^[9]通过实验测定提出了两种不同的薄膜厚度测量方法,一种是共焦成像法,另一种是荧光强度技术法;谷芳等人^[10]利用 VOF 法建立了液膜在倾斜波纹板上的气-液两相流模型,发现了通过改变波纹板面微观结构以及降低液体的表面张力可以促进连续液膜的形成。

前人在降膜分布上取得了一定成就,但是降膜过程中流动和结构参数对降膜的影响不够明朗,液膜分布特征的复杂性以及不同操作条件下的非线性演化,导致很多学者很难总结出统一的规律来描述液膜的流动和分布特性。为使竖管降膜蒸发器安全高效运行,在 CFD 的基础上,模拟了锥形分布器下竖管降膜的流动和传热特性。

1 数值模拟

1.1 物理模型和网格划分

锥形分布器下降膜流动的物理模型如图 1 所示,分布器下端为圆锥体,且底面为凹面,能有效阻止流下的液体向分布器底面聚集。为模拟方便,分布器的底面做成水平面。液态水被迫沿着壁面从锥形分布器与管壁的环状缝隙处流下,空气则从下端逆向流过液面,由于研究气液界面处的传热传质过程,且设定一定的壁面温度。其中 X 、 Y 坐标分别表示垂直于壁面和平行于气液方向,选用长直圆管的直径为 $D=45\text{ mm}$,环隙处的宽度为 1.2 mm ,空气的入口直径为 36 mm ,直管长 0.5 m 。假设管壁的厚度为零,考虑重力。

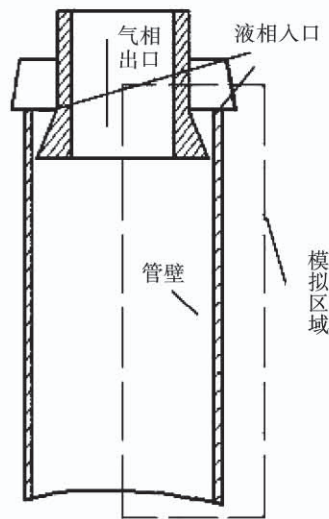


图 1 竖直降膜模型图

Fig. 1 Vertical falling film model diagram

圆管在周向的几何特征由于其特殊的对称特性而相同,于是选取二维的轴向剖切面的一半做模拟模型,如图 1 中的虚线框所示。图 2 中的网格模型采用四边形网格进行划分,为清晰捕捉汽液与液固交界面的流动,对管壁附近加密,比较了网格数为 54 649、103 681 和 192 743 的液膜厚度,如图 3 所示,膜厚值相差不大,可看做是稳定值。最终得到计算网格无关解,采用网格 103 681 进行模拟计算。

1.2 控制方程

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla[\mu(\nabla \vec{v} + \vec{\nabla})] + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{U} T) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T$$

式中: t —时间, s; ρ —水的密度, kg/m^3 ; μ —动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; g —重力加速度, m/s^2 ; T —温度, K; λ —水的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; U 、 V —速度矢量; S_T —能量源项; c_p —比热容; $\vec{F}$ —表面张力。

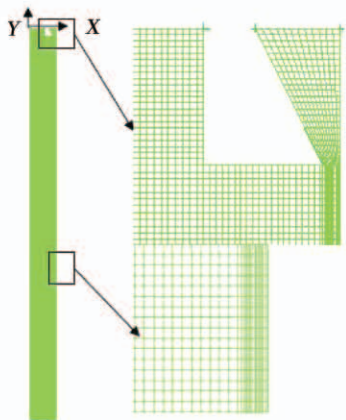


图2 模型网格划分
Fig. 2 Mesh division of model

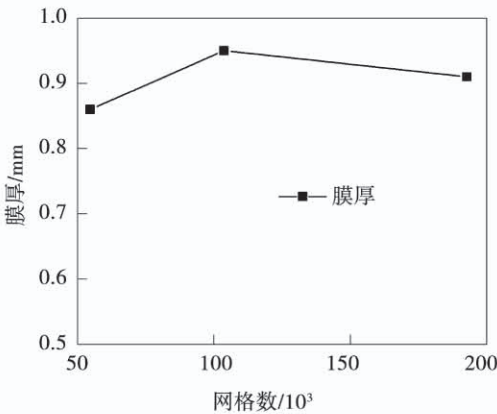


图3 不同网格数下的膜厚
Fig. 3 The thickness of the film under different number of grids

平均传热系数关联式:

$$\bar{h} = \frac{Re \mu c_p \Delta t}{4A \Delta T}$$

式中: $\bar{h}$ —壁面的平均对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A —换热面积, m^2 ; Re —雷诺数; Δt —流体的进出口温差, $^{\circ}\text{C}$; ΔT —流体温度与壁面的对数平均温差。

1.3 边界条件

液相入口为速度入口,气相入口为压力入口,液相和气相出口均设为压力出口,压力均为大气压,液相入口的体积分数为1,空气进口湿度为0,气相与液相的进口温度均设置为300 K,壁面作为交换热源的源头,温度设置为350 K。

1.4 计算方法

多相流模型选用 VOF 算法来计算两相的流动情况,进行了非稳态模拟。定义空气为主相,冷却水为第二相。湍流模型选用 RNG $k-\varepsilon$ 模型, RNG $k-\varepsilon$ 模型更适用于强旋流或带有弯曲壁面的流动。采用有限体积法(FVM)控制方程的离散,压力速度耦合算法选用适用于非稳态计算的 PISO 算法,压力离散方式选用 Presto 算法,动量方程与气-液面追踪方法均选用精确度很高的二阶离散格式。

2 降膜过程传热传质分析

2.1 膜态分布

图4为液相水入口喷淋量 $\Gamma = 0.74 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 下,降膜平稳时的液膜分布图。图5为 $\Gamma = 0.37$ 、 0.74 和 $1.48 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 时的膜厚分布。

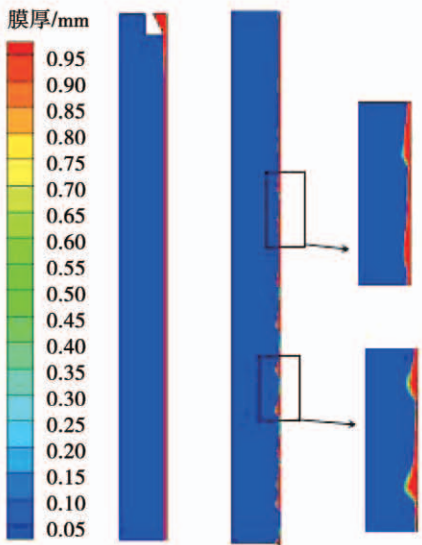


图4 管壁的膜厚分布
Fig. 4 Film thickness distribution of tube wall

上段降膜平稳,液膜均匀,但是下段出现了液膜的凸起, Park 等人^[11]通过实验研究了降膜流态的转折临界点,此时波峰处的液膜膜厚为波谷处的5倍以上,此处可看做是液膜稳定与波动的转折临界点。凸起的孤立波携带着液膜波动的主要能量,可以真

实反映液膜的波动特性,基层液膜厚度也逐渐减薄,甚至液膜接近断裂。这是因为初始液膜下落时,重力大于壁面的粘附力和表面张力,使流体做加速运动;下段随着流体流速的增加,导致阻力增加,流动加速度减小,从而使液膜堆积并产生各种形式的驼峰状表面波。表面波的形态与文献[12]中的描述极为一致。

图5中,随着喷淋量 Γ 的增加,水膜厚度逐渐增大,平均液膜厚度分别为0.62、0.83和1.21 mm。在 $\Gamma=0.37\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 时,下段液膜波动较大,最先产生液膜的回流区,形成了驼峰状孤立波。 $\Gamma=0.74\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 较 $0.37\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 时,液膜的波动程度减弱,但最小膜厚相同。 $\Gamma=1.48\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 时液膜平稳几乎无波动。由文献[13]可知,高雷诺数下,液膜的稳定性由惯性力所控制,雷诺数越大,惯性力越大,在一定的降膜管长上液膜分布稳定,不易产生液膜的堆积和飞溅。

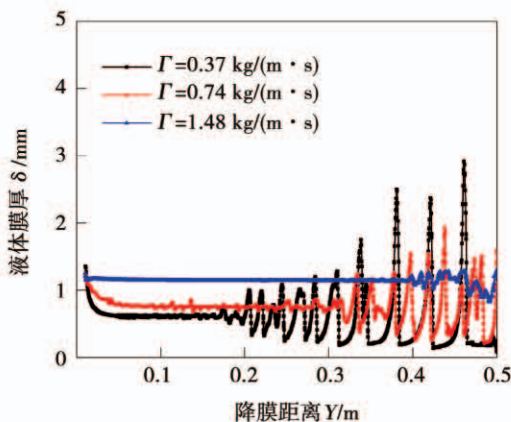


图5 液膜厚度
Fig.5 Film thickness

2.2 温度分布

2.2.1 气液混合相温度

从图6管内的温度分布可以看出,随着流体的流动,管壁的冷流体与空气被逐渐加热。下端空气入口处,混合汽液被加热的范围相比上半段要小,这是由汽液的逆向流动所导致的。气相出口处的温度达到了303~310 K,一方面热量从管壁热传导到液膜,进而液膜与空气发生热对流,最后被逆流的空气带走;同时,由于气液界面湿度差的存在,吸收潜热蒸发水蒸气进入到空气中,随着流动空气排出管外。液膜降膜是一个吸热的过程,液膜流动的距离越长,吸热越充分,温度越高,最高达到345 K。

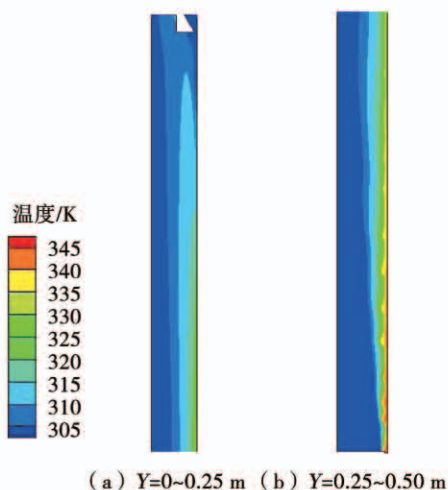


图6 气液两相的温度分布

Fig.6 Temperature distribution of gas-liquid two-phase

图7为不同管长处混合相沿径向的温度分布,与图6的温度分布相吻合。温度沿着径向呈上升的趋势,即越靠近管壁处温度越高。在 $Y=0.10\text{ m}$ 时,径向方向完全被加热。沿着管长方向,混合汽液吸收热量的范围变窄,在 $Y=0.49\text{ m}$ 处,混合相被加热的范围最小且为5.5 mm。越靠近空气出口处,空气温度越高,对流换热越强烈,换热效率越高。

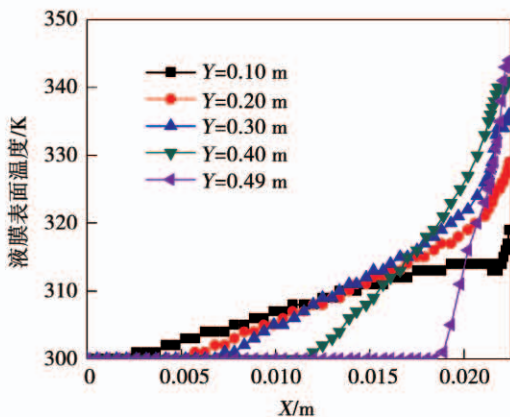


图7 管内混合相沿径向的温度分布

Fig.7 Temperature distribution of mixed phase in tube along radial direction

2.2.2 液膜表面温度

在降膜的过程中,同时存在显热传递的温差推动力和潜热传递的含湿量差推动力,提高气液之间的温差,既能提高显热推动力,又能增强液膜的蒸发能力,加速气液之间的传质过程。

图8为液膜的表面温度分布,液膜的表面温度

整体上随着降膜距离的增加而增大;随着降膜流量的增大,液膜表面温度增势变缓,且下端温度的增长斜率逐渐增大。 $\Gamma=0.37、0.74$ 和 $1.48\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 时,液膜的温度分别增长了 $49、41$ 和 31 K , $\Gamma=0.37\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 时液膜上端温度沿管长增加最快,每 0.1 m 管长增加 14 K ,这是因为小流量时液膜厚度较薄吸热较快。而 $\Gamma=1.48\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 时液膜整体温度较低且呈直线式的小斜率上升。

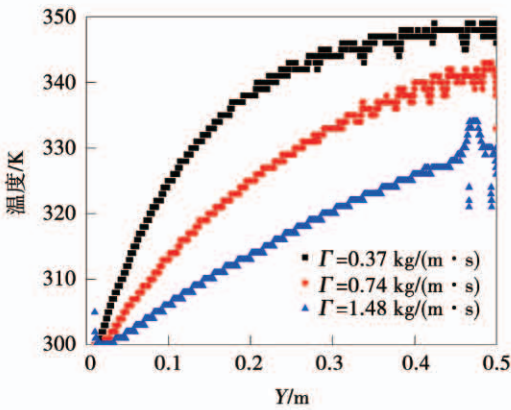


图 8 不同喷淋量 Γ 下液膜表面温度
Fig. 8 Surface temperature of liquid film under different sprayquantity Γ

2.3 速度分布

图 9 显示了液膜在下降的过程中合速度主要由 Y 轴分速度组成, X 轴分速度几乎为零。

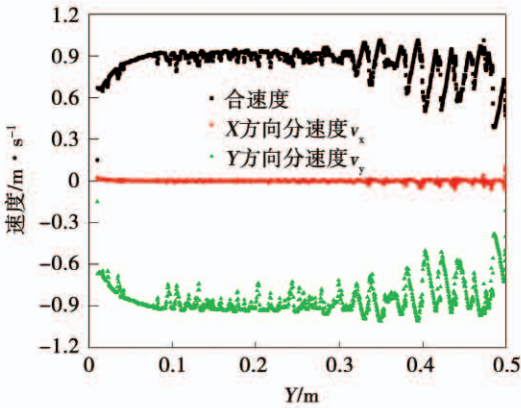


图 9 喷淋量 $\Gamma=0.74\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 下液膜的速度分布
Fig. 9 The velocity profile of liquid film under the sprayquantity of $\Gamma=0.74\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$

合速度从 0.7 m/s 在很短的距离内迅速增大到 0.9 m/s ,之后基本保持在 0.9 m/s ,但在降膜下半段出现较大程度的波动。在 X 轴分速度曲线上,后半

段出现了微小的周期性波动,正是这种波动的存在,造成了大量的液膜凸起,使得降膜冷凝变得极为不稳定。

图 10 显示了各个降膜段的 X 方向分速度 v_x 的变化规律。整体上, v_x 沿着径向和轴向均先增大而后减小。在 $X=0\sim0.015\text{ m}$ 之间 v_x 相对稳定。轴向方向上,在 $Y=0.10\text{ m}$ 处, v_x 几乎为 0 ,在 $Y=0.40\text{ m}$ 时, $X=0.02\text{ m}$ 时, v_x 达到最小值, -0.95 m/s 。当冷流体降膜到 $Y=0.30$ 和 0.49 m 处,在 $X=0.0225\text{ m}$ 附近即液膜覆盖区, v_x 为正值,这使得基层膜厚减薄。正是由于速度方向的变化,使液膜产生驼峰状波的波谷与波峰,从而易使液膜脱离管壁。在液相出口处附近,这种现象最为明显,这是因为在降膜的下端,液膜受到的流动阻力大于重力,从而使液膜产生了 X 轴反方向的速度,此时液膜在局部堆积,堆积的波峰越高,这个速度值越小,而堆积时对周围液膜产生的拉扯作用,使基层液膜减薄,减薄时液膜内部产生一个反方向的作用力,使得此处的液膜速度为正值。

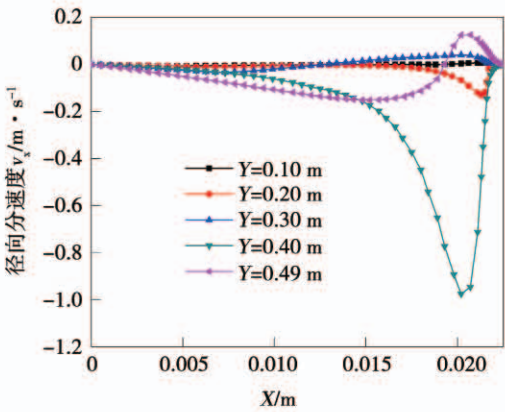


图 10 喷淋量 $\Gamma=0.74\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 时的径向分速度 v_x
Fig. 10 The radial split velocity v_x with the spray quantity of $\Gamma=0.74\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$

2.4 平均传热系数

图 11 为在高雷诺数范围 $2\,000 < Re < 10\,000$ 时,管壁的平均传热系数。管壁的平均传热系数随着喷淋流量的增大而增大。这是因为在一定的喷淋量下,传热系数主要是由壁面对液膜的热传导组成,膜厚增加而增大的热阻和波动程度增加所减小的热阻对传热系数影响很小。

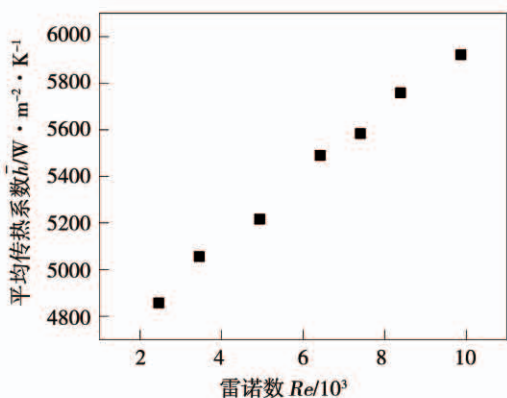


图 11 壁面的平均传热系数随 Re 的变化规律
Fig. 11 Variation of average heat transfer coefficient of wall with Re

2.5 模拟值的验证

各 Re 下管壁液膜厚度的平均值与前人的理论公式进行对比验证,如图 12 所示。Nussult^[14]理论计算式为:

$$\sigma = 0.909Re^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu^2}{\rho^2 g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

Brauer^[15]理论计算式:

$$\sigma = 0.208Re^{\frac{8}{15}} \left(\frac{\mu^2}{\rho^2 g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

从图中可以看出,在 $Re = 9\ 872.52$ 时模拟值与 Nussult 和 Brauer 理论值分别出现了最大与最小偏差,分别为 9.96% 和 0.589%。与前者相对偏差较大是因为 Nussult 的理论公式适用低雷诺数的计算。由此可知,在一定的 Re 内,膜厚值的相对偏差均在误差允许的范围内,可见本文的模拟值与前人的理论计算公式吻合较好。

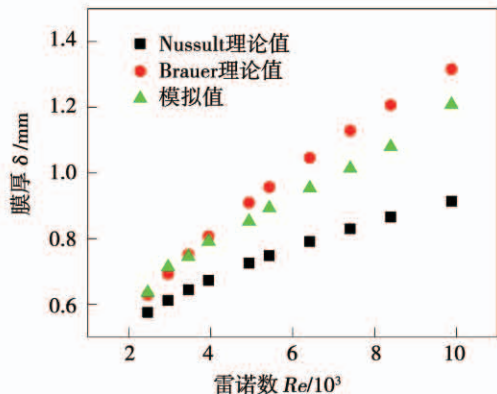


图 12 液膜厚度模拟值与理论计算值
Fig. 12 Simulation and theoretical calculation of liquid film thickness

3 结 论

(1) 在一定的喷淋流量下,锥形分布器的竖管降膜分为两段,稳定段和波动段。

(2) 在气液两相逆流的过程中,液膜表面温度和气相温度沿着流动距离的增加逐渐上升;但随着冷流体 Re 的增大,液膜表面温度降低且增加缓慢;降膜合速度主要由 Y 轴方向的分速度组成;在 $Y = 0.4\ m$ 时, v_x 存在最大值,此时的孤立波最不稳定。

(3) 在 $2\ 000 < Re < 10\ 000$ 时,管壁的平均传热系数随着喷淋量的增加而增大。液膜厚度的模拟值与前人的理论计算值吻合较好。

参考文献:

- [1] 张 猛,周幅彦,朱冬生.降膜蒸发器的研究进展[J].流体机械,2012,40(6):82-86.
ZHANG Meng, ZHOU Guo-yan, ZHU Dong-sheng. Research progress of falling film evaporator[J]. Fluid Machinery, 2012, 40(6): 82-86.
- [2] 牟 睿.竖管降膜新型液体分布器设计及性能研究[D].重庆:重庆大学,2016.
MOU Rui. Design and performance study of a new vertical falling film liquid distributor[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [3] 宋 健,于意奇,杨燕华.平板降膜流动统计规律的实验研究[J].核动力工程,2012,33(5):45-49.
SONG Jian, YU Yi-qi, YANG Yan-hua. Experimental study on statistical law of falling film flow on flat plate[J]. Nuclear Power Engineering, 2012, 33(5): 45-49.
- [4] 刘玉峰,童一峻,任海刚,等.高雷诺数竖壁降膜流动特性的数值研究[J].红外技术,2010,32(10):567-571.
LIU Yu-feng, TONG Yi-jun, REN Hai-gang, et al. Numerical study on the flow characteristics of vertical falling films with high Reynolds number[J]. Infrared Technology, 2010, 32(10): 567-571.
- [5] 王为术,马自强,朱晓静,等.垂直管内 R113 降膜蒸发传热试验研究[J].流体机械,2018,46(6):54-59.
WANG Wei-shu, MA Zi-qiang, ZHU Xiao-jing, et al. Experimental study on falling film evaporation heat transfer of R113 in vertical tube[J]. Fluid machinery, 2018, 46(6): 54-59.
- [6] 于意奇,杨燕华,程 旭.平板过冷流体降膜流动传热特性的数值研究[J].原子能科学技术,2013,47(1):48-53.
YU Yi-qi, YANG Yan-hua, CHENG Xu. Numerical study on the flow and heat transfer characteristics of falling films of subcooled fluids on a plate[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(1): 48-53.

- [7] 董俐言,王宝龙,石文星,等. 板式蒸发式冷凝器传热传质的数值模拟[J]. 制冷学报,2013,34(1):10-17.
- DONG Li-yan, WANG Bao-long, SHI Wen-xing, et al. Numerical simulation of heat and mass transfer in plate evaporative condenser [J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(1): 10-17.
- [8] 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.
- ZHANG Qun, TONG Yi-jun, REN Hai-gang, et al. Numerical study on flow characteristics and stability of falling films on vertical wall [J]. Journal of Northwest University of Technology, 2013, 31(5): 733-736.
- [9] V LEL V, AL-SIBAI F, LEEFKEN A, RENZ U. Local thickness and wave velocity measurement of wavy films with a chromatic confocal imaging method and a fluorescence intensity technique [J]. Experiments in Fluids, 2005, 39(5): 856-864.
- [10] 谷芳,刘春江,袁希钢,等. 倾斜波纹板上液膜流动的 CFD 研究[J]. 化工学报,2005(3):462-467.
- GU Fang, LIU Chun-jiang, YUAN Xi-gang, et al. CFD study on liquid film flow on inclined corrugated plates [J]. Journal of Chemical Engineering, 2005(3):462-467.
- [11] Nosoko T, Park C D. Three-dimensional wave dynamics on a falling film and associated mass transfer [J]. Aiche Journal, 2010, 49(11):2715-2727.
- [12] 于意奇,杨燕华,程旭. 平板降膜波动形态的数值研究[J]. 原子能科学技术,2012,46(11):1342-1347.
- YU Yi-qi, YANG Yan-hua, CHENG Xu. A numerical study of falling film wave morphology on a flat plate [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(11): 1342-1347.
- [13] 叶学民,阎维平. 沿倾斜壁面下降的蒸发/冷凝降膜二维表面波的线性稳定性[J]. 西安交通大学学报,2002(1):25-29,46.
- YE Xue-min, YAN Wei-ping. Linear stability of two-dimensional surface wave of evaporation/condensation falling film falling along inclined wall [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002(1): 25-29, 46.
- [14] NUSSELT W. Die Oberflächeneigenschaften des Wasserdampfes [J]. Zeitschrift Verein Deutscher Ingenieure, 1916; 60: 541-546, 569-575.
- [15] BRAUER H. Strömung und Wärmeübergang bei Rieselfilmen [J]. VDI Forschungsheft 457B, 1956, 22: 1-40.

(丛敏 编辑)

(上接第139页)

- [11] 李超. 富燃料区喷氨还原 NO_x 的实验研究及化学动力学模拟 [D]. 上海:上海交通大学,2009.
- LI Chao. Experimental study and chemical kinetics modeling of nitrogen oxides reduction by injecting NH_3 in fuel-rich zone [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [12] 曹庆喜. 气体添加剂对选择性非催化还原脱硝反应过程影响的研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- CAO Qing-xi. Effects of gaseous additives for selective non-catalytic reduction of NO_x [D]. Harbin: Heilongjiang; Harbin Institute of Technology.
- [13] 卢志民,周俊虎,岑可法,等. 不同 O_2 浓度下 NH_3 选择非催化还原 NO 的实验和模型研究 [J]. 中国电机工程学报,2008,28(29):78-82.
- LU Zhi-min, ZHOU Jun-hu, CEN Ke-fa, et al. Flow reactor experiments and kinetics modeling on selective non-catalytic removal of NO_x under different O_2 atmospheres [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(29): 78-82.
- [14] 胡善涛. 尿素热解耦合 SCR 烟气脱硝实验及数值模拟研究 [D]. 浙江:浙江大学,2013.
- HU Shan-tao. Experiments and simulation studies on urea pyrolysis coupled with SCR denitrification technology [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2013.
- [15] KASUYA F, GLARBORG P, JOHNSON J E, et al. The thermal de NO_x process: influence of partial pressures and temperature [J]. Chemical Engineering Science, 1995, 50(9):1455-1466.
- [16] TAKAHASHI S Y, KOUJI I K. Influence of initial concentration on de NO_x process by ammonia addition [J]. JSME International Journal, Series II: Fluids Engineering, Heat Transfer, Power, Combustion, Thermophysical Properties, 1990, 33(2):377-383.
- [17] CATON J A, XIA Z. The selective non-catalytic removal (SNCR) of nitric oxides from engine exhaust streams: comparison of three processes [J]. Transactions of the ASME, 2004, 126(2): 234-240.
- [18] FAN W, ZHU T, SUN Y, et al. Effects of gas compositions on NO_x reduction by selective non-catalytic reduction with ammonia in a simulated cement precalciner atmosphere [J]. Chemosphere, 2014, 113:182-187.

(金圣迪 编辑)