

文章编号:0253-4339(2013)04-0064-05

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2013.04.064

湿工况下翅片表面冷凝水滴运动的数值模型

熊伟¹ 庄大伟¹ 胡海涛¹ 丁国良¹ 喜冠南²

(1 上海交通大学 制冷与低温工程研究所 上海 200240; 2 南通大学机械工程学院 南通 226019)

摘要 了解析湿过程中冷凝水对换热器翅片侧换热和压降的影响机制,需要首先建立湿工况下翅片表面冷凝水滴的运动模型。通过对翅片表面上冷凝水滴进行受力分析,得出了水滴运动的判断条件;建立了水滴接触角预测模型,并结合VOF界面追踪方法来描述气液相界面、计算表面张力,从而建立了预测冷凝水滴在竖直翅片表面运动过程的数值模型。通过水滴运动实验对模型的可靠性进行了验证:水滴与翅片表面接触角的模拟值与实验值的平均误差为2.11%,最大误差为2.51%;水滴运动速度的模拟值与实验值的平均误差为6.5%,最大误差为10%。结果表明:水滴运动模型能够准确的预测水滴在翅片表面的运动规律。

关键词 数值模型;冷凝水滴运动;接触角

中图分类号:TB657.5

文献标识码:A

Numerical Model of Condensate Water Droplet Motion on Fin Surface under Dehumidifying Conditions

Xiong Wei¹ Zhuang Dawei¹ Hu Haitao¹ Ding Guoliang¹ Xi Guannan²

(1. Institute of Refrigeration & Cryogenics Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China; 2. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong, 226019, China)

Abstract In order to understand the heat transfer and pressure drop mechanisms of fin and tube heat exchanger under dehumidifying conditions, a model of condensate water droplets moving on fin surface should be established firstly. Based on the force analysis of the condensate water droplet on fin surface, a critical condition of the water droplet motion is obtained. With the surface tension is taken into account, which is defined by the contact angle and VOF method, a numerical model of condensate water droplet moving on fin surface is developed. Then an experiment is carried out to verify the numerical model. The average deviation between simulation results and experimental data for the contact angle is 2.11% and the maximum deviation is 2.51%, and the average deviation for water droplet velocity is 6.5% and the maximum deviation is 10%, which show the accuracy of the model.

Keywords numerical model; condensate water droplet motion; contact angle

翅片管换热器被广泛的应用于空调、制冷以及化工领域。当翅片管换热器的表面温度低于通过换热器空气流的露点温度时,结露现象会在翅片表面发生。在析湿工况下,热量传递和质量传递在翅片表面同时发生。此时,通过换热器空气流的流型变得十分复杂,并导致换热及压降特性的改变。因此,深入了解翅片在湿工况下的传热传质和压降特性对优化换热器设计、提高换热器性能有重要作用。

析湿工况下,翅片表面会附着较多水滴,并且随着工况和翅片表面特性的变化,水滴的分布以及水滴的运动特性也会发生变化,从而对翅片侧的换热及压降特性造成很大的影响^[1-3]:水滴减小了翅片间距,增加了流动阻力,从而总是增大空气侧的压降;而冷凝水滴对翅片换热存在两方面的影响,一方面水滴起到

肋片的作用,增大了换热面积,并且增加了空气的扰流,对换热起到一定增强作用;另一方面水滴的存在也增加了传热热阻,对换热起到了恶化作用。要明确不同工况下水滴的存在对换热的影响是增强还是恶化,以及增强或恶化的程度,深入了解析湿过程的热质传递机理,需要首先明确湿工况下翅片表面冷凝水滴的运动过程,建立冷凝水滴运动模型。

水滴运动模型需要准确描述水滴的三维形状,并计算水滴运动过程中的受力(重力和表面张力),从而模拟水滴在竖直翅片表面的运动过程。一些学者采用随机模拟的方法对竖直壁面的水滴进行了二维模拟,获得了水滴脱落的临界尺寸^[4-5]。对竖直壁面三维水滴的模拟,目前均是采用稳态模拟的方法,得到竖直壁面上静止水滴的形状和接触角^[6-8]。但要

水滴运动过程进行动态建模,还需要进一步明确水滴运动过程中的接触角和受力作用(如表面张力和壁面粘附作用)。

通过对翅片表面上冷凝水滴进行受力分析,得出了水滴运动的判断条件;建立了水滴接触角预测模型,并结合VOF界面追踪方法来描述气液相界面、计算表面张力,从而建立预测冷凝水滴在竖直翅片表面运动过程的数值模型;最后通过水滴运动实验对模型进行验证。

1 翅片表面水滴运动的数值模型开发

1.1 翅片表面水滴运动的物理模型

冷凝水滴在翅片表面运动的物理模型如图1所示。由于研究的侧重点为单个冷凝水滴的运动行为,因此,所取的计算区域只包括图1(右)所示的区域。

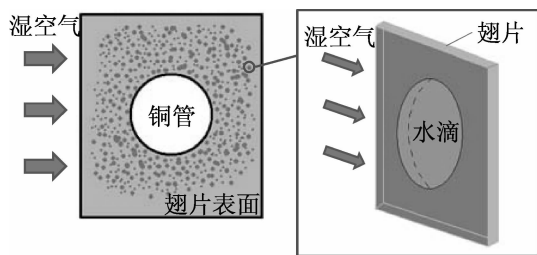


图1 翅片表面水滴运动的物理模型

Fig. 1 Physical model of water droplet moving on fin surface

1.2 力学分析及水滴运动的判定

在没有风速情况下,竖直平翅片表面的水滴只受重力和表面张力的作用,如图2所示。

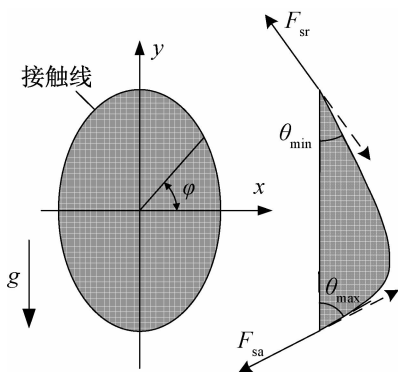


图2 竖直翅片表面水滴受力分析

Fig. 2 Force analysis of water droplet on vertical fin surface

由水滴受力平衡有:

$$G + \cos(\theta_{\min}) \cdot F_{sr} + \cos(\theta_{\max}) \cdot F_{sa} = 0 \quad (1)$$

解得 $\theta_{\min}$ 为:

$$\theta_{\min} = \arccos \left[\frac{G + \cos(\theta_{\max}) \cdot F_{sa}}{F_{sr}} \right] \quad (2)$$

式中: G 为重力; F_{sa} 、 F_{sr} 分别为水滴底端和顶端

的表面张力;对于竖直翅片, $\theta_{\max}$ 可近似认为等于水滴的前进接触角 θ_A ^[9],即:

$$\theta_{\max} \approx \theta_A \quad (3)$$

基于以上的力学分析,得出水滴在翅片表面是否运动的判断标准:

- 1) 当 $\theta_A > \theta_{\min} > \theta_R$ 时,水滴静止在翅片表面;
- 2) 当 $\theta_A > \theta_R \geq \theta_{\min}$ 时,水滴开始从翅片表面落下。

其中, θ_R 为后退接触角,且 θ_R 总是比前进接触角 θ_A 小^[10]。

1.3 接触角预测模型

在竖直翅片表面,水滴的形状近似为椭圆^[11],如图2所示,接触线上任意一点的接触角 θ 是方位角 φ ,最大接触角 $\theta_{\max}$ 及最小接触角 $\theta_{\min}$ 的函数^[12]:

$$\cos\theta = 2 \frac{\cos\theta_{\max} - \cos\theta_{\min}}{\pi^3} \varphi^3 - 3 \frac{\cos\theta_{\max} - \cos\theta_{\min}}{\pi^2} \varphi^2 + \cos\theta_{\max} \quad (4)$$

当水滴静止在翅片表面时, $\theta_{\max}$ 由公式(3)得出, $\theta_{\min}$ 由下式给出:

$$\theta_{\min} = (0.01 \cdot Bo^2 - 0.155 \cdot Bo + 0.97) \cdot \theta_{\max} \quad (5)$$

式中: Bo 为邦德数, $Bo = \rho_w g D^2 \sin\gamma / \sigma$, ρ_w 为水的密度, D 为水滴的当量直径, γ 为翅片倾斜角度,对于竖直翅片 $\sin\gamma = 1$ 。

当水滴处于运动状态时,接触线的运动引起液体对翅片表面的粘性切应力,必然使得接触线上的力学平衡被破坏,此时,公式(3)和(5)不再适用。水滴运动过程中,上半部分为退湿过程,下半部分为润湿过程。通过退湿过程和润湿过程的受力分析,从而求得最大接触角和最小接触角^[13]:

$$\cos\theta_{\max} = \cos\theta_A + \frac{4Ca}{\lambda} \cdot \frac{\sin 2\theta_{\max}}{\sin(2\theta_{\max}) - 2\theta_{\max}} \quad (6)$$

$$\cos\theta_{\min} = \cos\theta_R - \frac{4Ca}{\lambda} \cdot \frac{\sin 2\theta_{\min}}{\sin(2\theta_{\min}) - 2\theta_{\min}} \quad (7)$$

式中: Ca 为毛细数, $Ca = \mu U / \sigma$, μ 为水的动力粘度, U 为接触线运动速度, σ 为表面张力系数。 λ 为接触线特征参数,反映了固体材料特性和表面特性对动态湿润过程的影响。

1.4 控制方程

体积分方程:

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \alpha_i = 0 \quad (8)$$

式中: α_i 为第 i 相的体积分; $\vec{u}$ 为第 i 相速度, m/s; n 为相的数目,由于研究对象为两相流系统,因

此, $n = 2$ 。

质量方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \tag{9}$$

动量方程:

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \mu \cdot \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{g} + \vec{f}_\sigma \tag{10}$$

其中, $\vec{f}_\sigma$ 为表面张力和壁面粘附导致的源项, 由式(12)得出:

$$\vec{f}_\sigma = \sigma_{ij} \frac{\rho k_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \tag{12}$$

其中, σ_{ij} 为气液相界面的表面张力, N/m; 界面曲率 k_i 是根据水滴表面单位法向量定义。

$$k_i = \nabla \cdot \hat{n} \tag{13}$$

水滴单位法向量 $\hat{n}$ 在只有水滴和空气接触的表
面, 其计算方法由液相的体积分数 α_w 的梯度得出:

$$\hat{n} = \frac{\nabla \alpha_w}{|\nabla \alpha_w|} \tag{14}$$

在气液固三相接触的部分, 于壁面粘附的作用, 表面曲率将发生变化, 式(14)不再适用。在 VOF 模型中, 用流体与壁面产生的接触角来调整壁面附近单元表面的法向。接触角为 θ 时, 壁面附近实际单元的表面法向为:

$$\hat{n} = \hat{n}_w \cos \theta + \hat{t}_w \sin \theta \tag{15}$$

其中, $\hat{n}_w$ 和 $\hat{t}_w$ 分别是壁面的单位法向量和切向量, θ 由公式(4)计算得出。

1.5 边界条件

采用 Geo-Reconstruct 气液界面追踪格式, 水滴运动判断条件和接触角计算采用自定义函数 UDF 嵌入 CFD, 计算区域如图 3 所示。水滴的大小作为初始值给定, 入口空气速度、湿度、温度均设为定值:

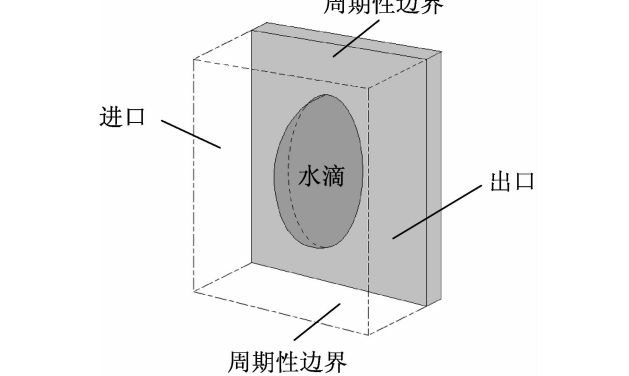


图 3 计算区域
Fig. 3 Calculation region

$$u_x = const. \quad u_y = 0 \quad u_z = 0 \tag{16}$$

$$T_{inlet} = const. \quad w_{inlet} = const. \tag{17}$$

对于翅片表面上的边界条件可以写为:

$$u_x = u_y = u_z = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \tag{18}$$

2 模拟结果及其实验验证

2.1 实验装置及工作原理

模型实验验证的主要内容包括水滴运动判定条件中的最小接触角和水滴运动中的速度, 因此, 搭建了如图 4 所示的实验台。

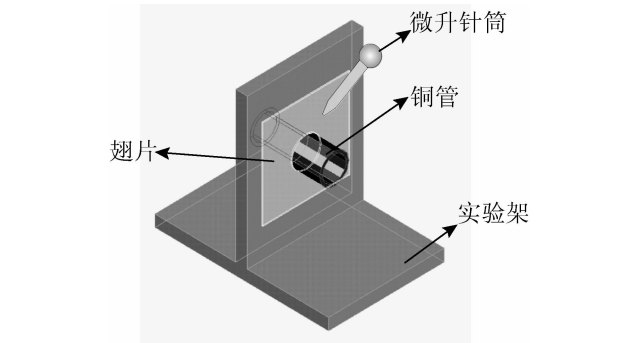


图 4 单水滴运动实验装置图
Fig. 4 Experimental apparatus of single water droplet

实验中, 采用微升针筒在翅片表面滴水滴, 从侧面(沿着翅片方向)对水滴的形状和运动进行拍摄, 从而测量出水滴最小接触角以及运动速度。水滴质量由毫升针筒上的刻度进行控制。

在测量最小接触角时, 水滴质量分别取 10mg、15mg、20mg、25mg 和 30mg, 并将不同质量水滴的最小接触角的实验值和模拟值进行对比验证; 在测量水滴运动速度时, 水滴质量取 30mg, 测量不同时刻 ($t = 0s, 0.2s, 0.4s, 0.6s, 0.8s$) 水滴位置, 从而得出不同时刻水滴的运动速度, 并与水滴运动速度的模拟值进行对比验证。

2.2 水滴最小接触角模拟结果及其实验验证

水滴质量分别为 10mg、15mg、20mg、25mg 和 30mg 时水滴最小接触角的模拟结果如图 5 所示, 从图中可以看出, 随着水滴质量的增大, 水滴最小接触角不断减小。

最小接触角的实验值和模拟值的比较如图 6 所示。从图 7 中可以看出, 最小接触角的平均误差为 2.11%, 最大误差为 2.51%。结果表明, 水滴运动时最小接触角计算结果与实验值吻合很好。

2.3 水滴速度模拟结果及其实验验证

如图 7 所示, 为水滴质量为 30mg 时, 不同时刻的模拟结果。从图 7 可以看出, 水滴中心坐标不断下

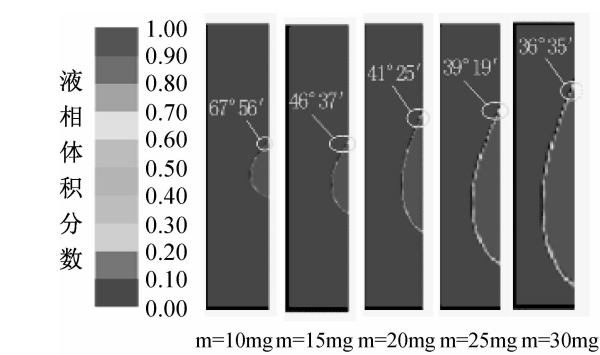


图 5 不同质量水滴最小接触角

Fig. 5 Minimum contact angle of different water droplet

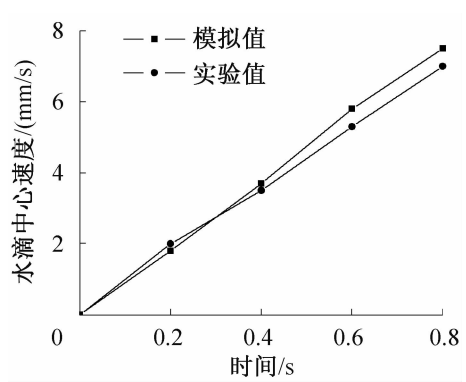


图 8 不同时刻水滴速度的实验值和模拟值

Fig. 8 Comparison of velocity between experimental results and simulation results at different time

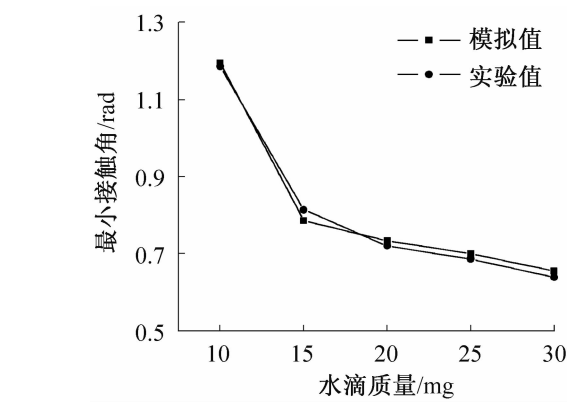


图 6 不同质量水滴最小接触角的实验值和模拟值

Fig. 6 Comparison of minimum contact angle between experimental results and simulation results

降,根据不同时刻水滴的中心坐标,可以得出水滴在不同时刻的运动速度。

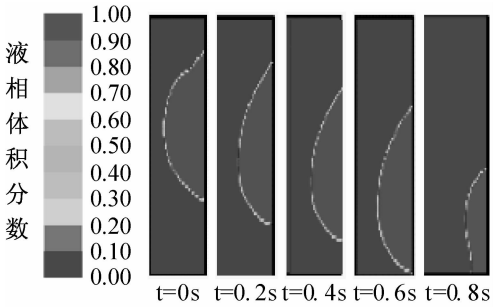


图 7 不同时刻水滴 (30mg) 位置

Fig. 7 Droplet (30mg) position at different time

如图 8 所示,为 30mg 水滴在不同时刻运动速度实验值与模拟值的对比。各时刻平均误差为 6.5%,最大误差为 10%。对比结果表明,该模型能准确的描述水滴的运动。

3 结论

1)通过建立的水滴运动的接触角预测模型,结合 VOF 界面追踪方法,可以描述表面张力和重力对水滴形状以及运动过程的影响,从而能够模拟竖直壁

面冷凝水滴的形状及运动过程。

2)水滴与翅片表面最小接触角的模拟值与实验值的平均误差为 1.71%,最大误差为 2.51%;水滴运动速度的模拟值与实验值的平均误差为 6.5%,最大误差为 10%;说明所建立的模型可以准确预测竖直壁面水滴的形状及运动过程。

参考文献

[1] 许为全. 热质交换过程与设备[M]. 北京:清华大学出版社, 1999:66-95.

[2] 李妩, 李惠珍, 康海军, 等. 倾斜布置去湿翅片热交换器传热性能研究[J]. 西安交通大学学报, 1995, 29 (10):55-60. (Li Wu, Li Huizhen, Kang Haijun, et al. Experimental study on heat transfer characteristics for dehumidifying fin-and-tube heat exchanger inclined to coming flow [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1995, 29 (10):55-60.)

[3] Wang C C, Hsieh Y C, Lin Y T. Performance of plate finned tube heat exchangers under dehumidifying conditions [J]. Journal of Heat Transfer, 1997,119(1): 109-117.

[4] H Merte, S Son. Further considerations of two-dimensional condensation drop profiles and departure sizes[J]. Warme Stoffubertrag, 1987,21(2/3):163-168.

[5] S S Manna, H J Herrmann, D P Landau. A stochastic method to determine the shape of a drop on a wall [J]. Journal Statistical Physics, 1992,66(3/4):1155-1163.

[6] R A Brown, F M Orr Jr, L E Scriven. Static drop on an inclined plate: analysis by the finite element method[J]. Journal Colloid Interface Science, 1980,73(1):76-87.

[7] S D Iliev. Static drops on an inclined plane: equilibrium modeling and numerical analysis [J]. Journal Colloid Interface Science, 1997,194(2):287-300.

[8] F Milinazzo, M Shinbrot. A numerical study of a drop on a vertical wall[J]. Journal Colloid Interface Science, 1988, 121(1):254-264.

- [9] A I ElSherbini, A M Jacobi. A model for condensate retention on plain-fin heat exchangers [J]. *Journal Heat Transfer*, 2006, 128(5): 427-433.
- [10] A I ElSherbini, A M Jacobi. Retention forces and contact angles for critical liquid drops on non-horizontal surfaces [J]. *Journal Colloid Interface Science*, 2006, 299(2): 841-849.
- [11] A I ElSherbini, A M Jacobi. Liquid drops on vertical and inclined surfaces: I. An experimental study of drop geometry [J]. *Journal Colloid Interface Science*, 2004, 273(2): 556-565.
- [12] A I ElSherbini, A M Jacobi. Liquid drops on vertical and inclined surfaces: II. A method for approximating drop shapes [J]. *Journal Colloid Interface Science*, 2004, 273(2): 566-575.
- [13] 王晓东, 彭晓峰. 动态接触角的初步分析[J]. *工程热*

物理学报, 2003, 24(3): 472-474. (Wang Xiaodong, Peng Xiaofeng. Analysis of the dynamic contact angle[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2003, 24(3): 472-474.)

作者简介

丁国良,男(1966-),教授,博导,上海交通大学机械与动力工程学院制冷所,(021) 34206378,E-mail:glding@sjtu.edu.cn。研究方向:制冷空调装置的仿真、优化与新工质应用。

About the author

Ding Guoliang(1966-), male, Ph. D./Professor, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, (021) 34203278,E-mail:glding@sjtu.edu.cn. Research fields: Simulation and optimization research for room air conditioner and utilization of new refrigerant.