

脉动气流对竖直平板降膜蒸发影响的数值模拟研究*

钟音^{1,2}, 凌长明^{1,2}, 谢公南³

- (1. 广东海洋大学 深圳研究院, 广东 深圳 518108;
2. 广东海洋大学 机械与动力工程学院, 广东 湛江 524088;
3. 西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

(本刊编委谢公南来稿)

摘要: 建立了竖直平板降膜蒸发的二维物理与数学模型,采用数值模拟方法研究了脉动气流对降膜蒸发过程的影响,分析了在不同气流平均速度、振幅和频率下 Sherwood 数 Sh 的变化规律.结果表明:在脉动相对振幅为 $5/6$ 时,竖直平板降膜蒸发传质效果提高了 6.6% ; Womersley 数 Wo 大于 26 时,传质效果提高了 8.3% .相对匀速气流,脉动气流可有效增强降膜蒸发的对流传质效果.

关键词: 竖直平板; 降膜蒸发; 脉动气流; 数值模拟

中图分类号: TK121

文献标志码: A

DOI: 10.21656/1000-0887.400386

引 言

降膜蒸发技术具有传热温差小和换热效率高等优点,目前在石油化工、制冷及海水淡化等领域有着广泛应用^[1].为了提高降膜蒸发的效率,许多学者采用实验或数值模拟方法,对降膜蒸发过程的传热与传质进行了深入研究^[2-3].Li^[4]考察了匀速气流条件下,蒸发温度对竖直管内降膜蒸发效果的影响,结果表明蒸发温度的提高有利于液膜传质的增强.Cherif 等^[5]通过实验和数值计算研究了竖直矩形管内的降膜蒸发特性,结果表明气流速度的增加会使蒸发效果更佳.Radhia 等^[6]通过数值模拟研究了竖直同心圆管内降膜蒸发换热特性,发现给水质量流量和热流密度的增加会使蒸发效果得到改善.袁浩爽等^[7]通过实验研究了在匀速气流条件下,热流密度和液膜进口温度对降膜蒸发传热效率的影响,实验结果表明热流密度和液膜进口温度的增加有助于提高液膜对流传热系数.目前,对降膜蒸发技术的研究主要集中在匀速气流工况条件下,而非匀速气流在降膜蒸发技术上的应用研究鲜有报道.

近年来,对非匀速气流中脉动气流的应用引起了研究者广泛的关注.娄晓博等^[8]采用数值

* 收稿日期: 2019-12-30; 修订日期: 2020-01-05

基金项目: 深圳市科技计划项目(JCYJ20170306162116012; JCYJ20170818111558146); 大鹏新区产业发展专项资金项目(KY20180113); 广东省科技计划项目(2017A050506054)

作者简介: 钟音(1994—),女,硕士生(E-mail: zyzhongy@163.com);

凌长明(1960—),男,教授,博士(通讯作者. E-mail: ling-cm@163.com).

引用格式: 钟音,凌长明,谢公南.脉动气流对竖直平板降膜蒸发影响的数值模拟研究[J].应用数学和力学,2020,41(5):491-498.

方法研究了脉动气流对水分蒸发的影响,发现脉动气流可以促进水分蒸发提高传质效率.杨卫卫等^[9]对脉动流动的换热特性进行了研究,发现脉动在加热段上游可提高壁面换热.谢公南等^[10]考察了脉动参数对波纹通道内传热强化的影响,结果表明传热的强化效果随振幅的增大而增强.翟明等^[11]利用标准 $k-\varepsilon$ 模型结合脉动燃烧器尾管进行脉动流动与换热的数值研究,发现脉动可以强化壁面对流换热.李国能等^[12]进行了脉动气流对等热通量平面传热的数值研究,发现脉动气流强化了等热通量平面的换热性能.可见,脉动气流在强化换热上已经得到了深入研究,但脉动气流对降膜蒸发过程的传质方面的研究成果报道还较少.

本文通过建立竖直平板降膜蒸发的二维物理与数学模型,采用数值模拟方法针对脉动气流在竖直平板降膜蒸发过程中对气液传质特性的影响进行了研究,分析了不同气流平均速度、振幅和频率下 Sh 的变化规律,为脉动气流在降膜蒸发过程中的应用提供理论指导.

1 物理与数学模型

1.1 物理模型

图 1 所示为竖直平板降膜蒸发的二维物理模型.在两个竖直平板的内壁上,水沿着平板壁面由上至下流动,形成一层均匀的薄液膜,从上方空气入口通入脉动气流,与液膜进行对流传热与传质.物理模型中的几何参数分别为:平板长度 $L = 0.5 \text{ m}$, 竖直平板通道宽度 $d = 0.01 \text{ m}$, 液膜初始厚度 $\delta = 0.002 \text{ m}$.

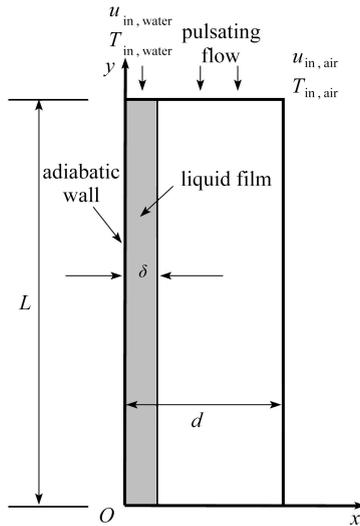


图 1 物理模型

Fig. 1 Physical model

1.2 控制方程

采用商业软件 ANSYS FLUENT 14.5 求解二维非稳态不可压缩湍流流动问题,采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型^[13]求解湍流流动问题,采用 VOF (volume of fluid) 方法^[14]对两相界面进行追踪,采用有限容积法求解此物理问题.压力-速度的耦合采用 PISO 算法,扩散项的离散采用中心差分格式,对流项的离散采用二阶迎风格式,压力梯度项的离散采用 PRESTO! 插值方法,非稳态项采用一阶隐式离散,采用 geo-reconstruct 格式实现两相界面的几何重构.

蒸发冷凝方程:

$$m_g = -m_l = r\alpha_l\rho_l \frac{T - T_s}{T_s}, \quad T > T_s, \quad (1)$$

$$m_l = -m_g = r\alpha_g\rho_g \frac{T_s - T}{T_s}, \quad T < T_s, \quad (2)$$

式中, m_g 和 m_l 分别为水蒸气与液态水的相变速率, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$; r 为蒸发冷凝系数, $r = 0.1$; α_g 和 α_l 分别为水蒸气与液态水的体积分数; ρ_g 和 ρ_l 分别为水蒸气与液态水的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; T 为系统温度, K; T_s 为临界温度, $T_s = 373.15 \text{ K}$.

控制单元中的物性参数由流体体积分数加权平均计算, 即

$$\rho = \alpha_l\rho_l + (1 - \alpha_l)\rho_g, \quad (3)$$

$$\eta = \alpha_l\eta_l + (1 - \alpha_l)\eta_g, \quad (4)$$

式中, η 为运动黏度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$.

1.3 边界条件和初始条件

气液膜入口边界均为速度入口边界条件, 脉动气流速度为

$$u_{\text{in,air}} = \begin{cases} \frac{4A_0}{t_0}t - (4n+1)A_0 + u_0, & nt_0 \leq t \leq (2n+1)\frac{t_0}{2}, \\ -\frac{4A_0}{t_0}t + (4n-1)A_0 + u_0, & (2n+1)\frac{t_0}{2} < t \leq (n+1)t_0, \end{cases} \quad (5)$$

式中, $u_{\text{in,air}}$ 为脉动气流的入口速度, u_0 为脉动气流的平均速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; A_0 为脉动气流振幅, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; t 为蒸发时间, s; t_0 为脉动周期, s; n 为非负整数. 该脉动气流三角函数是通过凌长明等^[15]相关实验的研究数据拟合得出, 符合实验实际工况, 具有合理性.

液膜入口速度 $u_{\text{in,water}} = 0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 液膜入口温度和气流入口温度均为常数, 分别为 $T_{\text{in,air}} = 373.15 \text{ K}$ 和 $T_{\text{in,water}} = 500 \text{ K}$. 气液出口边界均为压力出口边界条件, 左右两侧壁面均为无滑移固体壁面, 壁面的热流密度均为 0.

1.4 参数定义

Sherwood 数 Sh :

$$Sh = \frac{h_m d}{D}, \quad (6)$$

其中, D 为水蒸气在空气中的质扩散系数, 其值为

$$D = D_0 \left(\frac{T_{\text{in,air}}}{T_0} \right)^{1.5} \frac{p_0}{p}, \quad (7)$$

式中 $D_0 = 2.55 \times 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, $T_0 = 298 \text{ K}$.

h_m 为水蒸气在空气中的传质系数, 由下式计算:

$$h_m = \frac{m}{\rho_v(1 - c_1)}, \quad (8)$$

式中, m 为传质通量, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; c_1 为出口相对湿度.

平均 Sherwood 数 Sh_{pj} :

$$Sh_{\text{pj}} = \int \frac{Sh}{\tau} d\tau. \quad (9)$$

Womersley 数 Wo 为频率的无量纲数, 定义为 $Wo = d\sqrt{2\pi f/\eta}$, 式中 f 为脉动频率, Hz. 脉动

相对振幅为 $A = A_0/u_0$, 无量纲时间 $\tau = t/t_0$.

2 数值计算方法

采用结构化网格,对模型中气-液边界局部网格进行加密.通过 6 套网格方案对网格独立性进行考核,结果如图 2 所示.在网格数大于 25 220 时, Sh_{pj} 差距小于 0.19%,得到网格独立性解.采用了 5 种时间步长,分别为 0.000 5, 0.001, 0.005, 0.01, 0.05 s.对时间步长进行无关性考核,当时间步长为 0.001 s 时,其与前后时间步长的 Sh_{pj} 差距小于 0.05%,采用该时间步长进行计算较宜.

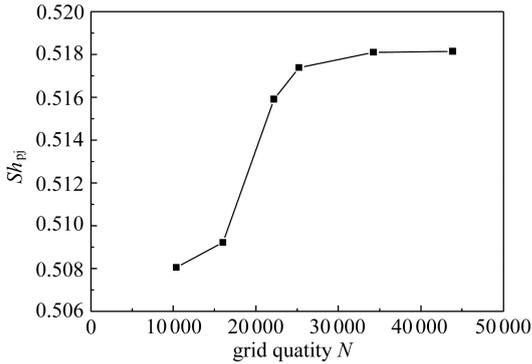


图 2 网格独立性考核

Fig. 2 The grid independence test

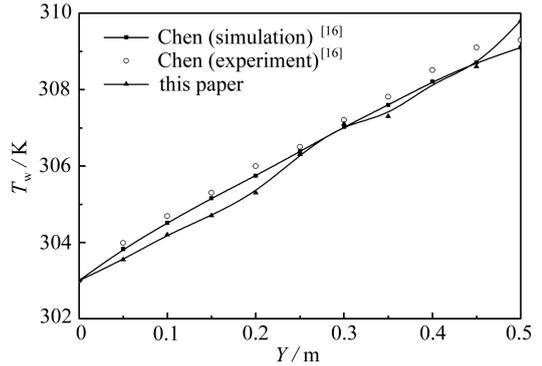


图 3 模型可靠性验证

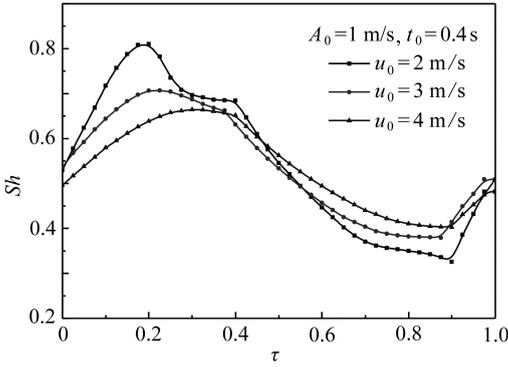
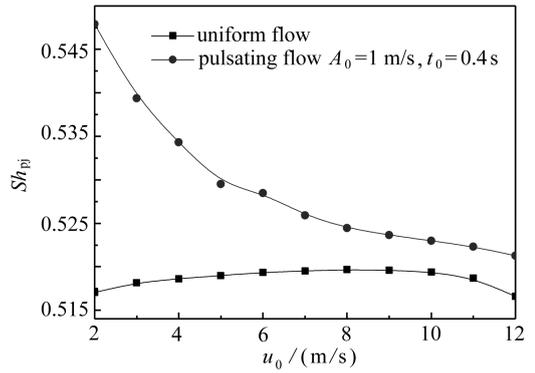
Fig. 3 The model reliability verification

为验证数值模型及计算方法的可靠性,采用本文模拟计算方法对文献[16]中的物性参数进行数值计算,并将计算结果与该文献中实验与数值结果进行比较,结果如图 3 所示.从图中可以观察到,本文模拟值与文献[16]的实验和模拟值吻合情况良好,其最大误差为 0.23%,平均误差为 0.15%,证明本文所采用的数值模型及计算方法是可靠的.

3 结果分析与讨论

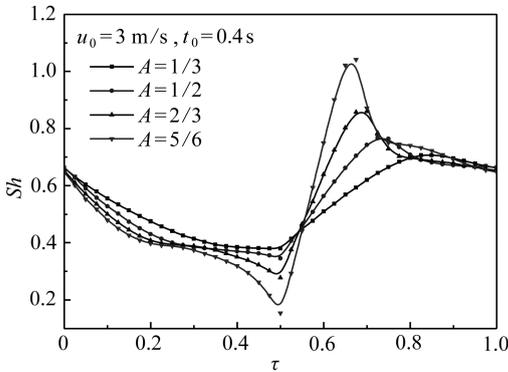
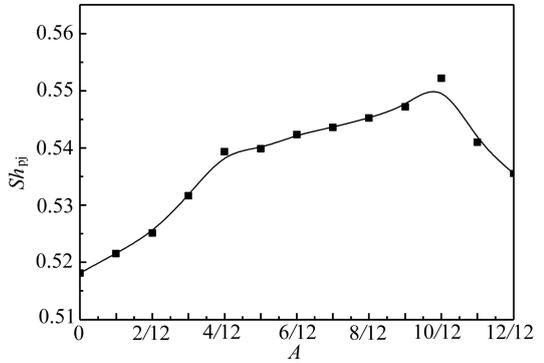
3.1 脉动气流速度对液膜蒸发的影响

采取不同平均速度的脉动气流 ($u_0 = 2, 3, 4$ m/s, $A_0 = 1$ m/s, $t_0 = 0.4$ s) 进行一个周期内脉动气流速度对竖直平板降膜蒸发过程中传质的影响研究,结果如图 4 所示.从图 4 可看出, Sh 与脉动气流在一个周期内随时间变化的趋势一致,即在脉动周期内,脉动气流速度增加, Sh 增大,脉动气流速度减小, Sh 减小.图 5 为在脉动气流周期内和匀速气流的 Sh_{pj} 随平均气流速度变化谱图.由图 5 可知,在匀速气流作用下,随着气流速度的增大, Sh_{pj} 先增加后减小.这是因为在降膜蒸发过程中,初始阶段,随着气流速度的增大,液膜表面水蒸气被气流带走的速度加快,传质效果增强;随后气流速度增大到一定值,将带动液膜加速流动,液膜厚度减小,水蒸气生成率下降,传质效果减弱.而脉动气流曲线表现为随着脉动气流平均速度的增大, Sh_{pj} 逐渐减少.这是因为随着相对振幅的减小,扰动液膜水蒸气边界层能力减弱,降低了传质效果.从图 5 中可观察到,脉动气流的 Sh_{pj} 均大于匀速气流的 Sh_{pj} ,且在较低的气流平均速度下,脉动气流的 Sh_{pj} 与匀速气流的 Sh_{pj} 差值更大.由此可得,相比于匀速气流,脉动气流更有助于液体降膜蒸发的传质,且脉动气流平均速度越小,越有利于降膜蒸发的传质.

图4 不同 u_0 下 Sh 随 τ 的变化Fig. 4 Dependence of Sh on relative time τ at different u_0 values图5 Sh_{pj} 随平均速度 u_0 的变化Fig. 5 Dependence of Sh_{pj} on average velocity u_0

3.2 气流脉动相对振幅对液膜蒸发的影响

图6所示为一个周期内不同相对振幅下脉动气流 ($u_0 = 3 \text{ m/s}$, $t_0 = 0.4 \text{ s}$) Sh 的变化规律。由图6可见,随着脉动气流相对振幅 A 的增大, Sh 的振幅也增大。图7所示为 $u_0 = 3 \text{ m/s}$ 时,不同相对振幅 A 下 Sh_{pj} 的变化规律。由图7可见,随着相对振幅 A 的增加, Sh_{pj} 呈现先增长后减小的变化趋势,当相对振幅 $A = 5/6$ 时, Sh_{pj} 出现最大值,脉动气流传质效果相对匀速气流传质效果提高了 6.6%。这是因为,随着相对振幅的增加,气流速度变化幅度变大,对液膜表面边界层的扰动增强,从而强化了传质过程。当相对振幅达到一定值时,脉动气流带动液膜加速流动,使得液膜厚度有所减小,水蒸气蒸发速率下降,因此传质效果减弱。

图6 不同相对振幅 A 下 Sh 随 τ 的变化Fig. 6 Dependence of Sh on relative time τ at different relative amplitude A values图7 Sh_{pj} 随相对振幅 A 的变化Fig. 7 Dependence of Sh_{pj} on relative amplitude A

3.3 气流脉动频率对液膜蒸发的影响

图8所示为不同脉动气流 ($u_0 = 3 \text{ m/s}$, $A_0 = 1 \text{ m/s}$) 在一个相对时间内,不同 Wo 下 Sh 随时间的变化规律。由图8可见,在一个周期内, Sh 呈现先增加后减小再增加的趋势,与脉动气流速度变化规律相同。图9所示为不同 Wo 下 Sh_{pj} 的变化规律。从图9中可以看出当 Wo 小于 26 时,随着 Wo 的增加, Sh_{pj} 迅速增大,其传质效果相对匀速气流 ($Wo = 0$ 时) 提高了 8.3%。这是因为在单位时间内,脉动气流的周期变化次数增多,液膜表面水蒸气边界层被破坏的次数也增加了,当水蒸气边界层被破坏后,液膜表面附近水蒸气浓度梯度增大,水蒸气向浓度较小的气流方向扩散,对流传质能力增强。当 Wo 大于 26 时,随着 Wo 的增加, Sh_{pj} 的变化较为平稳,这是因

为气流脉动频率上升到一定值后,脉动气流周期接近,脉动气流速度变化趋势一致,使得脉动气流对液膜边界层的扰动能力接近,传质效果趋于平缓。

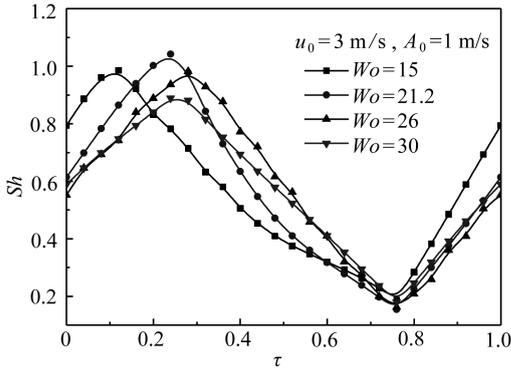


图 8 不同 Wo 下 Sh 随 τ 的变化

Fig. 8 Dependence of Sh on relative time τ at different Wo values

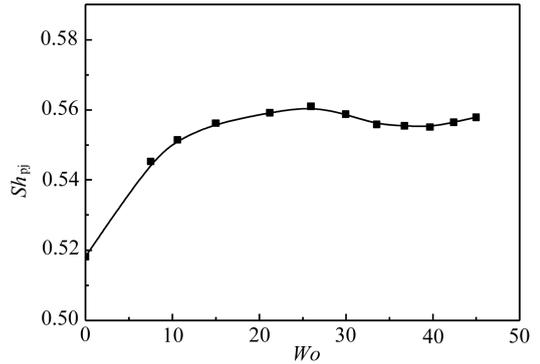


图 9 Sh_{pj} 随 Wo 的变化

Fig. 9 Dependence of Sh_{pj} on Wo

4 结 论

本文建立了竖直平板降膜蒸发的二维物理与数学模型,研究了脉动气流对降膜蒸发的影响,分析了脉动气流不同的平均流速、振幅和频率情况下,降膜蒸发过程的对流传质变化规律,得出如下结论:

1) 脉动气流对降膜蒸发过程中的传质效果在一个周期内的变化趋势与脉动气流速度变化趋势一致。

2) 相较于匀速气流,脉动气流能够增强竖直平板降膜蒸发的对流传质效果。

3) 在一定范围内,增大脉动相对振幅对竖直平板降膜蒸发有促进作用,且存在最佳振幅使传质效果提高 6.6%。

4) 当 $0 \leq Wo < 26$ 时,随着脉动气流 Wo 的增加,传质效果逐渐提高;当 $Wo \geq 26$ 时,其传质效果相对匀速气流时 ($Wo = 0$) 提高 8.3%。

参考文献 (References):

- [1] 毛巨正, 郑宏飞, 杨军伟, 等. 多效竖管降膜蒸发太阳能海水淡化装置性能研究[J]. 太阳能学报, 2017, **38**(10): 2743-2748. (MAO Juzheng, ZHENG Hongfei, YANG Junwei, et al. Performance investigation of solar desalination device with multi-effect vertical tube falling film evaporation[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2017, **38**(10): 2743-2748. (in Chinese))
- [2] 颜雪娟. 降膜蒸发器液膜流动对传热性能的影响[J]. 机械设计与研究, 2015, **31**(6): 20-23, 27. (YAN Xuejuan. Experimental study on the influence of the liquid film flow on heat transfer performance in falling film evaporators[J]. *Machine Design and Research*, 2015, **31**(6): 20-23, 27. (in Chinese))
- [3] 闫鸿志, 胡斌, 王如竹. 水-水降膜蒸发器的模拟仿真和优化[J]. 化工学报, 2018, **69**(S2): 68-75. (YAN Hongzhi, HU Bin, WANG Ruzhu. Modeling and optimization of water-to-water falling film evaporator[J]. *CIESC Journal*, 2018, **69**(S2): 68-75. (in Chinese))
- [4] LI C. Characteristics of the high-temperature water film evaporation with countercurrent turbulent air flow in the duct[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2019, **130**: 1-7.

- [5] CHERIF A S, KASSIM M A, BANHAMOU B, et al. Experimental and numerical study of mixed convection heat and mass transfer in a vertical channel with film evaporation[J]. *International of Journal of Thermal Sciences*, 2011, **50**(6): 942-953.
- [6] RADHIA R B, CORRIOU J P, HARMAND S, et al. Numerical study of evaporation in a vertical annulus heated at the inner wall[J]. *International of Journal of Thermal Sciences*, 2011, **50**(10): 1996-2005.
- [7] 袁浩爽, 师诚承, 张琳, 等. 机械蒸汽再压缩降膜蒸发器的沸腾传热特性[J]. 化学工程, 2018, **46**(11): 16-20.(YUAN Haoshuang, SHI Chengcheng, ZHANG Lin, et al. Boiling heat transfer characteristics on falling film evaporator of mechanical vapor recompression[J]. *Chemical Engineering (China)*, 2018, **46**(11): 16-20.(in Chinese))
- [8] 娄晓博, 凌长明, 李儒松, 等. 脉动气流对沸腾表面水分蒸发影响的数值模拟[J]. 广东海洋大学学报, 2018, **38**(1): 73-79.(LOU Xiaobo, LING Changming, LI Rusong, et al. Numerical simulation of the effect of pulsating airflow on water evaporation of boiling surface[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2018, **38**(1): 73-79.(in Chinese))
- [9] 杨卫卫, 何雅玲, 徐超, 等. 平直通道中层流脉动流动的数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2004, **38**(9): 925-928.(YANG Weiwei, HE Yaling, XU Chao, et al. Numerical study of laminar pulsating flow in a channel[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2004, **38**(9): 925-928.(in Chinese))
- [10] 谢公南, 王秋旺, 曾敏, 等. 脉动参数对波纹通道内传热强化的影响[J]. 计算物理, 2006, **23**(6): 673-678.(XIE Gongnan, WANG Qiuwang, ZENG Min, et al. Enhanced heat transfer of pulsating flows in a wavy channel[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2006, **23**(6): 673-678.(in Chinese))
- [11] 翟明, 董芑, 王希影, 等. 圆管湍流脉动流动与换热的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2009, **29**(20): 85-91.(ZHAI Ming, DONG Peng, WANG Xiyong, et al. Numerical simulation of turbulent pulsating flow and heat transfer in tubes[J]. *Proceedings of CSEE*, 2009, **29**(20): 85-91.(in Chinese))
- [12] 李国能, 项忠晓, 郑友取, 等. 层流中脉动气流横掠平板强化传热[J]. 化工学报, 2012, **63**(6): 1717-1722.(LI Guoneng, XIANG Zhongxiao, ZHENG Youqu, et al. Heat transfer enhancement with a flat plane in laminar pulsating flow[J]. *CIESC Journal*, 2012, **63**(6): 1717-1722.(in Chinese))
- [13] 魏进家, 胡春波, 姜培正, 等. 密相液固两相湍流 $k-\varepsilon-T$ 模型及其在管道两相流中的应用[J]. 应用数学和力学, 2000, **21**(5): 468-476.(WEI Jinjia, HU Chunbo, JIANG Peizheng, et al. $k-\varepsilon-T$ model of dense liquid-solid two-phase turbulent flow and its application to the pipe flow[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2000, **21**(5): 468-476.(in Chinese))
- [14] 刘儒勋, 刘晓平, 张磊, 等. 运动界面的追踪和重构方法[J]. 应用数学和力学, 2004, **25**(3): 279-290.(LIU Ruxun, LIU Xiaoping, ZHANG Lei, et al. Tracking and reconstruction methods for moving-interfaces[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2004, **25**(3): 279-290.(in Chinese))
- [15] 凌长明, 李儒松, 徐青, 等. 反渗透海水淡化中脉动能的利用方法及特性研究[J]. 液压气动与密封, 2019, **39**(3): 30-33.(LING Changming, LI Rusong, XU Qing, et al. Study on utilization method and the properties of fluctuation energy in integrated technology of seawater desalination and salt making[J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2019, **39**(3): 30-33.(in Chinese))
- [16] 陈昊阳. 板式换热器降膜蒸发传热过程的数值模拟研究[D]. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2013.(CHEN Haoyang. Numerical simulation research on falling film evaporation heat

transfer process in evaporative plate heat exchanger[D]. Master Thesis. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.(in Chinese)

Numerical Simulation Research of Effects of Pulsating Air Flow on Liquid Film Evaporation Over Vertical Plates

ZHONG Yin^{1,2}, LING Changming^{1,2}, XIE Gongnan³

(1. *Shenzhen Institute of Guangdong Ocean University, Shenzhen, Guangdong 518108, P.R.China;*

2. *School of Mechanical and Power Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524088, P.R.China;*

3. *School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P.R.China)*

(Contributed by XIE Gongnan, M. AMM Editorial Board)

Abstract: A 2D physical and mathematical model for vertical plate falling film evaporation was established. The effects of pulsating airflow on the falling film evaporation process were studied through numerical simulation. The change rule of the Sherwood number under different average air velocities, amplitudes and frequencies was analyzed. The results show that, when the relative amplitude of pulsation is 5/6, the mass transfer efficiency of the vertical falling film will increase by 6.6%; when the Womersley number is greater than 26, the mass transfer efficiency will increase by 8.3%. Compared with uniform airflow, the pulsating airflow can effectively enhance the convective mass transfer of falling film evaporation.

Key words: vertical plate; falling water film evaporation; pulsating airflow; numerical simulation