

引用格式:蒋斌,杨立. 箭型排布的矩形微槽平板上液膜流动特性[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2019, 46(1): 37 - 41.

JIANG Bin, YANG Li. Characteristics of liquid film flow on plates with an arrow-shaped arrangement of rectangular groove [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2019, 46(1): 37 - 41.

箭型排布的矩形微槽平板上液膜流动特性

蒋斌 杨立

(西南科技大学 土木工程与建筑学院, 绵阳 621010)

摘要:光滑平板降膜受表面张力和接触角的影响易收缩成溪流,导致传热表面出现干斑,为解决这一问题,提出箭型排布的矩形微槽平板。通过可靠的 computational fluid dynamics (CFD) 计算模拟两相流理论,建立三维非稳态平板降膜数学模型,研究了箭型排布的矩形微槽平板上的液膜流动特性,并探究了微槽宽度、深度及箭型夹角对液膜在平板上铺展效果的影响。结果表明:箭型排布的矩形微槽可有效增大液膜在平板横向的铺展面积,使液膜润湿面积增大,减少平板表面干斑;在 120°箭型结构下,矩形微槽最优参数为宽 0.5 mm,深 0.3 mm,此时可将比湿面积由光板表面的 62% ~ 89% 提高到 84% ~ 94%;低雷诺数时,120°箭型结构对液膜横向铺展引导效果显著,雷诺数增大时,90°箭型结构引导效果更好。

关键词:微结构;两相流;数值模拟;液膜

中图分类号: TK172; TK124 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2019.01.006

引言

液膜流动有着流量小、换热高的优点,广泛应用于海水淡化^[1]、食品加工和核电站安全壳液膜冷却^[2]等工业场所,已有许多学者对降膜流动行为进行了研究^[3-4]。在降膜流动中,学者们发现液膜受表面张力和固液接触角等因素的影响,当液体流量小时,液膜将收缩成溪流,换热表面出现干斑现象,而干斑会恶化传热^[5-6]。为解决此问题,研究人员对波纹板上溪流状态的液膜进行了三维分析,指出适当增加表面横向纹路的倾角可以有效改善沟流,提高填料润湿面积^[7];或者在光滑平板表面布置不同形状的微结构,并通过实验研究发现竖向条纹、菱形条纹(条纹方向大致与流动方向相同)较凹凸点、横向细条纹成膜性更好,可以使成膜率从 45% ~ 58% 提高到 74% ~ 80%^[8];或者用不同目数的砂粒对铝板表面进行砂磨,发现无论砂粒目数的大小,砂

磨过后成膜性均改善非常明显,但随着时间推移成膜性会变差,分析认为可能是铝板表面氧化导致^[9]。本文根据已有的研究成果,提出在光滑平板上构造箭型排布的矩形微槽,通过箭型结构的扩张角抑制液膜收缩;探究了箭型排布的矩形微槽平板上液膜流动的特性,为板式蒸发冷凝器的研发提供数据参考。

1 模拟与计算

1.1 物理模型

为探究箭型微槽平板上液膜流动及换热特性,本文对平板及箭型微槽平板上的液膜流动分别进行模拟,其物理模型如图 1 所示。

1.2 数学模型

本文作如下假设:①流体为连续不可压缩牛顿流体,层流流动;②流体物性参数恒定为常数。

1.2.1 体积分数方程

在 volume of fluid (VOF) 模型中,各相流体共享一个方程组,每一相的体积分数在整个计算区域内被追踪。该方法能准确地计算存在自由液面的多相流动,其控制方程为

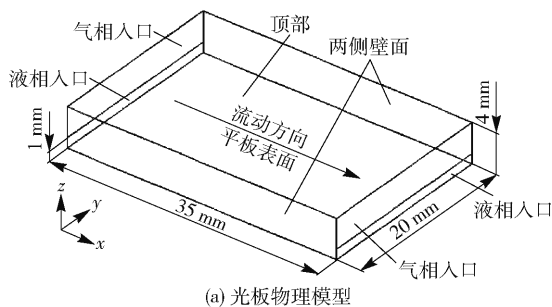
$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla \alpha_i = 0 \quad (1)$$

收稿日期: 2018-07-06

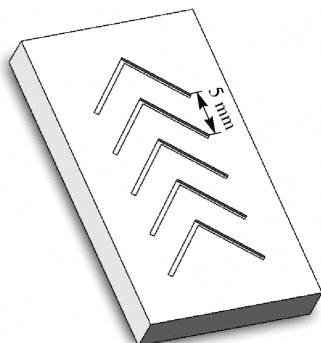
基金项目: 国家自然科学基金(51606159); 四川省教育厅项目(17zd1109)

第一作者: 男, 1981 年生, 副教授

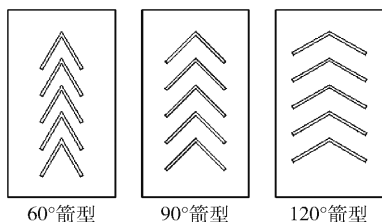
E-mail: jiangbinustc@163.com



(a) 光板物理模型



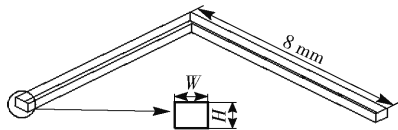
(b) 箭型微槽平板模型



60°箭型

90°箭型

120°箭型



(c) 箭型角度

图1 物理模型

Fig. 1 Physical model

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (2)$$

式中, α_i 为第 i 相的体积分数; \mathbf{u} 为第 i 相的速度, m/s 。

本文只包含气液两相, 取 $n=2$ 。控制方程中的密度、黏度由每个相共同决定, 因此, 气液两相系统中密度 ρ 和黏度 μ 分别表示为

$$\rho = \alpha_L \rho_L + (1 - \alpha_L) \rho_G \quad (3)$$

$$\mu = \alpha_L \mu_L + (1 - \alpha_L) \mu_G \quad (4)$$

1.2.2 质量守恒方程

质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (5)$$

式中 ρ 由式(3)计算得到。

1.2.3 动量方程

在整个区域内求解单一动量方程, 所得到的速

度场被所有相共用。动量方程通过物性参数 ρ 和 \mathbf{u} 与体积分数相联系

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (6)$$

式中, \mathbf{g} 为重力加速度, m/s^2 。

对于存在自由液面的流动, 表面张力对流动的影响非常重要, 不可忽略。本文采用 Brackbill 等^[10]提出的 continue surface force (CSF) 模型计算表面张力源项, 在动量方程中表面张力源项为

$$\mathbf{F} = \sigma_{ij} \frac{\rho k_i \nabla \alpha_i}{(\rho_i + \rho_j)/2} \quad (7)$$

式中, σ_{ij} 为气液界面张力系数, N/m ; k 为界面曲率, 由界面处单位法向量 \mathbf{n} 表示

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

$$\mathbf{n} = \nabla \alpha_i \quad (9)$$

1.2.4 雷诺数定义

雷诺数定义为

$$Re = \frac{4\Gamma}{\mu_1} \quad (10)$$

式中, Γ 为单位宽度质量流量, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; μ_1 为流体动力黏度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。

1.2.5 能量方程

能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot [\mathbf{u} (\rho E + p)] = \nabla \cdot (K_{\text{eff}} \nabla T) + S_e \quad (11)$$

式中, K_{eff} 为有效热传导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; S_e 为能量方程源项, W/m^2 。

1.2.6 比湿面积

根据液膜在倾斜板上的铺展效果, 定义无量纲参数一比湿面积 a_p , 比湿面积体现了板的润湿程度。

$$a_p = \frac{A_{\text{wetted}}}{A_{\text{plate}}} \times 100\% \quad (12)$$

式中, A_{wetted} 为被润湿的板的面积, m^2 ; A_{plate} 为整个板的面积, m^2 。

1.3 计算方法与边界条件

选择 VOF 模型, 压力项采用 body force weighted 算法, 压力-速度耦合方程的求解采用 pressure implicit with splitting of operators (PISO) 方法, 动量项采用二阶迎风格式, 体积分项采用 geo-reconstruct 格式, 时间步长取 10^{-5} s , 平板倾斜角度为 45° ; 计算

所用液相介质为饱和水,气相为空气,固液接触角设置为 20° ,表面张力 0.072 N/m 。

数值计算的边界设置如下:液相的进出口为速度入口和压力出口,气相的进出口为压力进口和压力出口,气相侧(top)为对称边界条件,平板表面和两侧壁面设置为无滑移壁面条件。

计算参数如表 1 所示。

表 1 计算参数
Table 1 Simulation parameters

Case	H/mm	W/mm	$\theta/(^{\circ})$
1	0.3	0.5	60
2	0.3	0.5	90
3	0.3	0.5	120
4	0.2	0.5	90
5	0.4	0.5	90
6	0.5	0.5	90
7	0.3	0.3	90
8	0.3	0.4	90
9	0.3	0.6	90
10	0.3	0.7	90

1.4 可行性验证

为验证模型的正确性与可靠性,对文献[11]中所给出的实验条件进行计算。文献中的实验条件为:壁面热流密度 2000 W/m^2 ,入口单位宽度流量 $0.02\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,温度 303 K ,气相进口速度 2 m/s ,温度 303 K ,气液顺流。图 2 为沿流动方向平板壁面温度 T_w ,从图中可以看出,模拟数值与实验数据吻合良好。

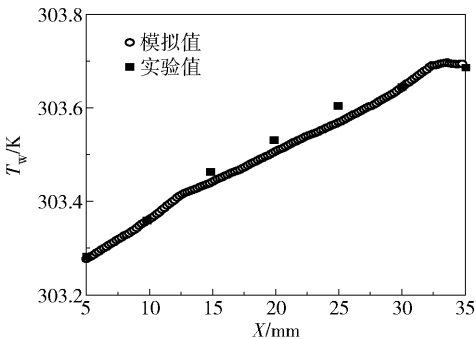


图 2 沿流动方向壁面温度
Fig.2 Wall temperature along the flow direction

1.5 网格无关性验证

为验证计算结果对网格的无关性,对光板模型近壁面 1 mm 高度上划分不同密度的加密网格。图 3 是不同网格数量下液体在 $X=10\text{ mm}$ 处的液膜厚度,以液相体积分数等于 0.5 为气液相界面^[12]。从图中可以看出,当网格数量为 56×10^4 (即入口 1 mm 高度上划分 16 个网格)时,其液膜厚度与网格数量

为 70×10^4 (入口 1 mm 高度划分 20 个网格)时基本吻合。充分考虑计算精度和迭代时间,所有模型均在流体区域上采用数量为 56×10^4 的网格密度进行加密处理。

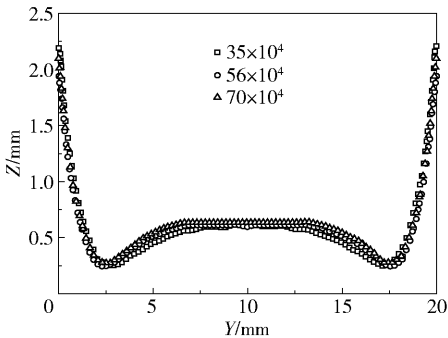


图 3 $X=10\text{ mm}$ 处不同网格密度下的液膜厚度
(不包含微槽)

Fig.3 Film thickness for different grid densities at $X=10\text{ mm}$ (without a rectangular groove)

2 结果与分析

要充分发挥液膜流动强化传热传质的优势,就需要使之润湿传热表面,防止传热表面出现干斑,致使传热恶化。比湿面积 a_p 很直观地表现了液膜对板面的润湿程度。

2.1 箭型角度 θ 对比湿面积的影响

以液相体积分数等于 0.5 为气液相界面^[12], case1、case 2、case 3 及光板为研究对象,图 4 展示了不同角度的箭型微槽平板和光板在不同雷诺数时,平板表面液膜覆盖的比湿面积。可以看出,液膜在平板上的铺展面积随着雷诺数的增加而增加;带有箭型微槽构型平板上的液膜铺展面积均大于光板表面的液膜面积;在本文研究的雷诺数范围内, 60° 箭型微槽结构将液膜比湿面积由光板的 $62\% \sim 89\%$ 提高到 $68\% \sim 94\%$, 90° 箭型微槽结构平板表面上比湿面积为 $76\% \sim 97\%$,在 120° 箭型微槽结构平板上,比湿面积为 $84\% \sim 94\%$ 。从图中还可以看出, 60° 箭型结构和 90° 箭型结构的比湿面积与雷诺数呈线性关系, 120° 结构与光板表面的比湿面积则随着雷诺数增加先增大后趋于平缓。从图 5 可以看出箭型排布的矩形微槽对液膜的铺展有着明显的横向引导效果,从而使得平板表面的比湿面积增大。

2.2 微槽宽度 W 对比湿面积的影响

图 6 展示了 case 7、case 8、case 9、case 2 和光板在不同雷诺数下的比湿面积。在研究范围内,当雷诺数大于 318 时,所有宽度条件下的微槽平板均比

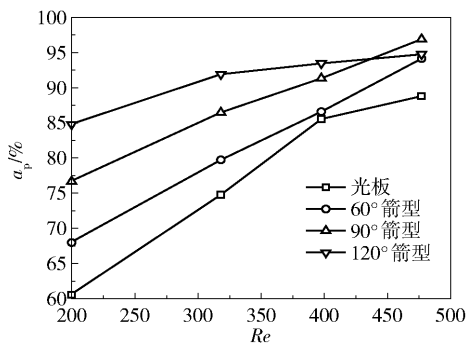


图4 不同雷诺数下各模型平板上比湿面积

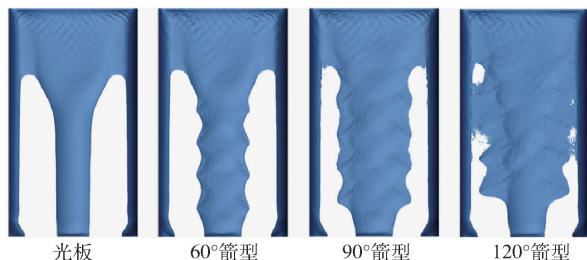
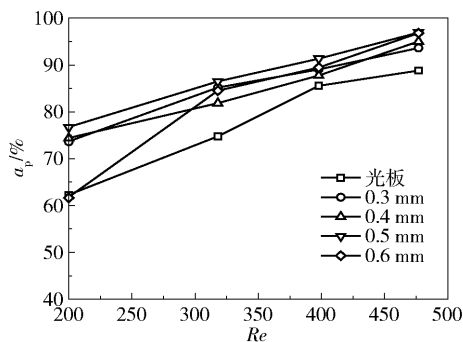
Fig.4 Film distribution ratios for different Re numbers图5 $Re = 199$ 时各板表面的液膜Fig.5 Film distribution for different arrow angles at $Re = 199$ 

图6 不同微槽宽度下各模型平板上比湿面积

Fig.6 Film distribution ratios for different rectangular groove widths

光板有着更大的比湿面积,证明了箭型排布的矩形微槽对降膜流动有着良好的引导作用;同时,当宽度范围在 0.3 ~ 0.5 mm 之间时,平板表面液膜的比湿面积与雷诺数呈线性关系,而当微槽宽度大于 0.6 mm 时,随着雷诺数的增大,比湿面积先迅速增大后趋于平缓,且当雷诺数足够小(研究中为 $Re = 199$)时,其比湿面积较光板模型小。这是因为,当液相流量足够小时,液体从平板自上而下流过微槽,液体没有足够的速度使其越过较宽的微槽。鉴于上述分析,在研究范围内最优的微槽宽度约为 0.5 mm,在该宽度下,液膜的比湿面积从光板的 62% ~ 89% 提高到

76% ~ 97%。

2.3 微槽深度 H 对比湿面积的影响

以 case 4、case 5、case 6、case 2 及光板为研究对象,探究了箭型排布的矩形微槽深度对流动在平板表面上液膜的铺展的影响。从图 7 可以看出,与微槽宽度对液膜的影响类似,在雷诺数大于 318 时,case 4、case 5、case 6、case 2 液膜的比湿面积均大于光板表面液膜;且在雷诺数足够小(研究中为 $Re = 199$)时,微槽深度大于 0.4 mm 的情况下含矩形微槽的平板上的比湿面积小于光板。探究其原因,作者认为类似于微槽宽度对比湿面积的影响,当雷诺数很小时,液体没有足够的速度使其越过较深的矩形微槽。同样的,微槽深度为 0.2 mm 和 0.3 mm 时,比湿面积与雷诺数呈现线性关系;微槽深度为 0.4 mm 和 0.5 mm 时,比湿面积随着雷诺数的增大先迅速增大而后趋于平缓。综上所述,在研究范围内最优的微槽深度约为 0.3 mm。

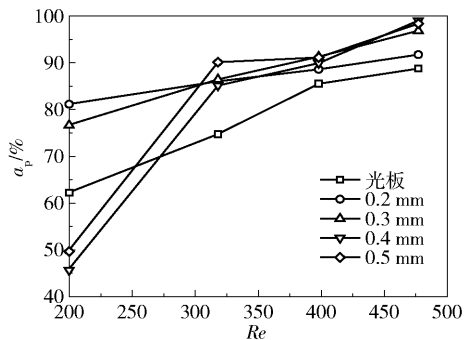


图7 不同微槽深度下各模型平板上比湿面积

Fig.7 Film distribution ratios for different rectangular groove depths

3 结论

平板上箭尾排布的矩形微槽可以引导液膜向外扩展,抑制因表面张力引起的液膜收缩效应。矩形微槽对于液膜流动换热可以起到有益的促进作用,具体表现为以下两个方面:(1)增加了平板上液膜的比湿面积,可以推测,较小的液膜干斑有助于阻止局部换热恶化;(2)增加了液膜与固体的接触面积,相对于平板,凹凸不平的微槽有助于强化对液膜内部流场的扰动,是一种有效的强化换热措施。

尽管本文的研究结果表明箭尾排布的矩形微槽对液膜流动与换热特性是一种有益的促进,但这并不意味着在实际的工业应用过程中应该极力追求最小的液膜流量。在实际工业换热器中,因壁面的污垢及流体物性的影响,过小的液膜流量更容易引起

液膜的随机收缩。因此,本文只是为高换热性能工业换热器的研发提供一种技术方案与基础数据支撑,在研发箭尾排布矩形微槽的降膜换热器过程中,仍需要进行大量的实验测试。

参考文献:

- [1] WUNDER F, ENDERS S, SEMIAT R. Numerical simulation of heat transfer in a horizontal falling film evaporator of multiple-effect distillation[J]. *Desalination*, 2017, 401: 206–229.
- [2] HUANG X G, YANG Y H, HU P. Experimental study of falling film evaporation in large scale rectangular channel [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 76: 237–242.
- [3] ISHIKAWA H, OOKAWARA S, YOSHIKAWA S. A study of wavy falling film flow on micro-baffled plate[J]. *Chemical Engineering Science*, 2016, 149: 104–116.
- [4] QUAN X Y, GENG Y, YUAN P F, et al. Experiment and simulation of the shrinkage of falling film upon direct contact with vapor[J]. *Chemical Engineering Science*, 2015, 135: 52–60.
- [5] FUJITA T, UEDA T. Heat transfer to falling liquid films and film breakdown—I: sub-cooled liquid films[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1978, 21 (2): 97–108.
- [6] GANIC E N, ROPPO M N. An experimental study of falling liquid film breakdown on a horizontal cylinder during heat transfer[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1980, 102(2): 342–346.

- [7] 谷芳. 规整填料局部流动与传质的计算流体力学研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- GU F. CFD simulations of the local-flow and mass-transfer in the structured packing[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese)
- [8] 罗德勤. 规整填料表面润湿改进及液膜流动特性研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2010.
- LUO D Q. Study on wetting improvement and behavior of liquid film on structured packing surface[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [9] 李迎春. 表面改性规整填料塔性能 [D]. 上海: 华东理工大学, 2010.
- LI Y C. The performance of surface modified structured packing[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [10] BRACKBILL J U, KOTHE D B, ZEMACH C. A continuum method for modeling surface tension[J]. *Journal of Computational Physics*, 1992, 100: 335–354.
- [11] TSAY Y L, LIN T F. Evaporation of a heated falling liquid film into a laminar gas stream [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1995, 11(1): 61–71.
- [12] NAGAYOSHI T, MINATO A, MISAWA M, et al. Simulation of multi-dimensional heterogeneous and intermittent two-phase flow by using an extended two-fluid model[J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2003, 40 (10): 827–833.

Characteristics of liquid film flow on plates with an arrow-shaped arrangement of rectangular groove

JIANG Bin YANG Li

(College of Architecture & Civil Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: As a result of the effects of surface tension and contact angle, the liquid film which on a general smooth flat plate tends to form a stream, with dry spots on a heat transfer surface. A set of plates having an arrow-shaped arrangement of rectangular grooves has been proposed in order to solve this problem. By means of reliable computational fluid dynamics (CFD) simulations and two-phase flow theory, a mathematical model of a three-dimensional unsteady falling film on a flat plate has been established. The characteristics of liquid film flow on the plates with an arrow-shaped arrangement of rectangular groove were studied by CFD simulation, and the influence of the micro groove width and depth, and the arrow angle on the film spreading on the plate were investigated. Our study found that the arrow-shaped arrangement of rectangular grooves effectively guides the film spreading on the plate transverse section, so that the liquid film wetting area increases, reducing the surface dry spots. Within the scope of the study, the optimal parameters were found to be a rectangular micro groove width of 0.5 mm and a depth of 0.3 mm; under these conditions, the wetting area increased from 62% to 89% on the smooth surface and from 84% to 94% on the surface within the groove. The 120° arrow structure has a significant effect on the horizontal spreading of the liquid film at low *Re* number, and the guidance effect of the 90° arrow structure improves with increasing *Re* number.

Key words: microstructure; two-phase flow; numerical simulation; liquid film

(责任编辑:吴万玲)