

波纹板表面流体流动特性的数值模拟

孙凤丹

(天津大学化工学院, 天津 300072)

摘要:利用计算流体动力学 CFD 商业软件 FLUENT, 以多相流模型中的 VOF 模拟为基础, 建立了波纹板式的计算模型, 考察了液体流速、板面结构、液体物性对液膜流动的影响。模拟结果表明, 在一定范围内, 随着流速的增加, 液膜的厚度和流动时间都减小; 波纹板结构直接影响液膜流动, 凹槽较浅的波纹板有利于连续液膜的产生, 波谷滞留液内发生液体回流形成漩涡; 液体的表面张力直接影响连续液膜的产生和断裂, 表面张力、黏度、流量共同决定了液膜的厚度和相位差。

关键词:波纹板; 液膜; VOF 模型; 数值模拟

中图分类号: TB61 + 1; O359 + 1

文献标识码: A

文章编号: 0253 - 4320(2012)01 - 0090 - 04

Numerical simulation on liquid flow characteristics of the wavy plate

SUN Feng-dan

(School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The computational model based on the volume of fluid (VOF) method of corrugated-plate was established for predicting the effect of liquid flow rate, the structures of wavy plate and physical properties of fluids on the liquid film flow. This numerical simulation shows that both the thickness of liquid film and the flow time decrease with the increase of flow rate in a limited range. The structures of wavy plate pay an important role on the liquid film flow. The continuous film is easier to form with lower-flute wavy plate. The fluid at wave trough appears the recirculation zone due to the appearance of vortex. Surface tension may directly affect the process of formation and breakage of continuous film. Surface tension, viscosity and flow rate bring about some influence on the film thickness and phase difference.

Key words: wavy plate; liquid film; VOF method; numerical simulation

板式蒸发冷凝器是将薄膜传热传质理论和蒸发冷凝换热理论相结合研发出来的一种高效节能节水冷却设备, 主要利用水的蒸发潜热带走工艺流体热量, 完成对工艺流体的冷凝冷却过程。目前, 国内外主要集中研究换热盘管的管型设计、改进及管表面的处理^[1-3], 而关于换热器核心采用波纹板式结构的研究和报道较少。波纹板式蒸发冷凝器是从管式蒸发冷凝器改进而来的, 其最大特点就是在换热面上形成一层连续的薄层水膜, 使湿润率较管式有所提高; 且空气阻力较管式小得多, 相同体积可以布置更多的换热面积, 结构紧凑, 金属消耗小。

波纹板式蒸发冷凝器中传热的发生与液体的流动是同时进行的, 它们之间存在着相互影响、相互耦合的关系。因此, 要研究波纹板蒸发冷凝器的传热效率, 液膜的流动特点是不可回避的问题, 关于下降水膜与空气流动的理论研究已有不少文献进行了报道^[4-6], 采用数值模拟的方式研究报道较少。本文着重分析了波纹板结构、喷淋水量和流体的物性对液膜流动的影响, 为波纹板式蒸发冷凝器结构的优化设计、开发和强化传热的机理研究提供重要的理

论依据和数据支持^[7]。

1 物理模型及控制方程

1.1 结构

波纹板式蒸发冷凝器的结构如图 1 所示。

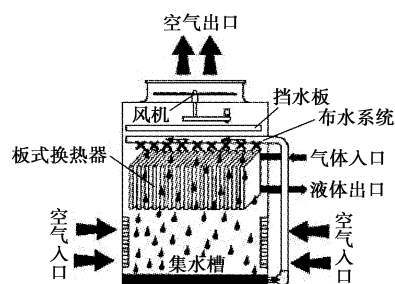


图 1 板式蒸发式冷凝器示意图

1.2 物理模型

根据波纹板式蒸发冷凝器板面结构和液体流动的特点, 在合理简化物理模型的基础上建立了二维计算模型图(见图 2), 其模型结构参数如表 1 所示。在划分网格时, 采用了四边形结构化网格并对波纹板附近进行了加密处理便于观察液膜流动的情况^[8]。

收稿日期: 2011 - 09 - 06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(200976118)

作者简介: 孙凤丹(1986 -), 女, 硕士生, 主要研究方向为液膜在表面上的流动特性, sunfengdan109@163.com。

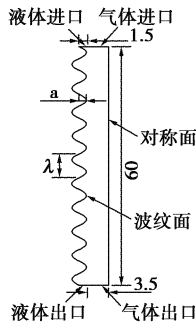


图2 计算物理模型及其边界条件

表1 不同波纹板结构参数

结构	结构参数			网格数目
	a/mm	λ/mm	a/λ	
平板				10000
波纹板 a	0.3	3	0.1	12621
波纹板 b	0.6	6	0.1	13095
波纹板 c	0.6	3	0.2	13713
波纹板 d	1.2	6	0.2	14091

1.3 控制方程

对于波纹板式蒸发冷凝器液体的流动过程,选用二维非稳态 Navie-Stokes 方程和 VOF 界面追踪技术^[9]进行模拟计算。

(1) 连续性方程和动量方程

$$\begin{aligned} \partial\rho/\partial t + \nabla \cdot (\rho\vec{v}) &= 0 \\ \partial(\rho\vec{v})/\partial t + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) &= \\ -\nabla p + \rho\vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot [\mu(\nabla\vec{v} + \vec{v}^T)] \end{aligned}$$

(2) 体积分率连续方程

VOF 法追踪相界面分布方程:

$$\partial\alpha_q/\partial t + \vec{v} \cdot \nabla\alpha_q = 0$$

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1$$

控制方程中的物理性质由系统所有相共同确定,如气液两相流中:

$$\begin{aligned} \rho &= \alpha_L\rho_L + (1 - \alpha_L)\rho_G \\ \mu &= \alpha_L\mu_L + (1 - \alpha_L)\mu_G \end{aligned}$$

2 数值方法及边界条件

2.1 数值格式

计算求解器选用 FLUENT 流体力学软件包。计算采用可实现湍流模型;离散时时间项采用隐格式;对流项采用一阶迎风格式;压力项采用 PRESTO 算法;压力-速度耦合方程的求解采用 PISO 方法;时间 t 步长为 0.0001 s;气液界面的追踪方法选用精度较高的 GRO-Reconstruct 格式。

2.2 初始条件和边界条件

初始条件: t = 0 时, α_G = 1, α_L = 0;

边界条件如下: 壁面 $\vec{u} = 1$, 对称边界 $\partial u_i/\partial x = 0$ (i = x, y), $\partial p/\partial x = 0$;

液相进口: $\vec{u} = \vec{u}_{L,in}$, α_L = 1;

气相进口: $\vec{u} = 0$, α_L = 0;

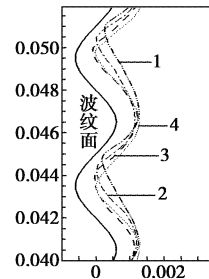
气相出口: p = p₀;

液相出口: $\partial u_i/\partial x = 0$ (i = x, y)。

3 数值模拟结果及分析

3.1 喷淋水量对液膜流动的影响

不同水流量对液膜自由界面和流动时间分布的影响分别如图 3 和图 4 所示。



流速/m·s⁻¹: 1—0.6; 2—0.8; 3—1.2; 4—1.5

图3 不同流速下水膜的流动分布

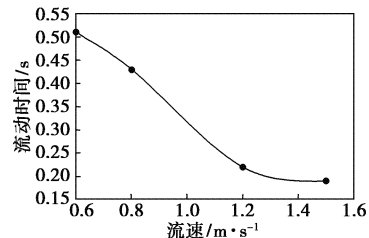


图4 不同流速下水膜的流动时间分布

从图 3 可知,水膜随着板面结构变化而呈现周期性的变化。在流速比较小的时候,液膜的厚度相对较大,相位差也较大;随着流速的增加,液膜厚度稍微降低,相位差减小;超过一定流速时,液膜厚度随着流速的增大而增加,并且水膜形状和壁面的形状基本相同。

从图 4 可看出,随着流速的增加,在板面上的流动时间降低,超过一定范围流动时间变化不明显。流动时间越小,对于波纹板式蒸发冷凝器的液膜更新速度比较快,能够保持壁面和液膜之间较高的温度差别,有利于传热的进行;液膜厚度较大时,不利于传热的进行,因此,可以通过模拟获得最佳工艺条件,使得液膜厚度和流动时间都有利于传热的进行。

3.2 波纹板结构对液膜流动的影响

为了探究波纹板的不同壁面结构(如表 1)对液膜流动的影响,利用 FLUENT 模拟了相同流速不同板面结构上液膜的流动情况,如图 3。初始条件相同,液相为水溶液,流速为 0.056 m/s,气相进口速度为 0 m/s。

由图 5 可以看出,在波纹板表面进行降膜时,液膜流动受波纹结构的影响而呈现不同的流动形式。液膜在凹槽较浅的波纹板 a 和 b 容易形成连续液膜,可能是由于凹槽较浅降低了重力在液膜中法向分量的波动程度,从而降低了液膜内部压力场的波动程度,有利于连续液膜的形成;液膜在凹槽较深的波纹板面 c 和 d,不仅没有形成连续的液膜,而且在波谷处出现积液现象,这是因为凹槽较深时,波谷中的液体很难被主流液体带走,从而在波谷处形成了滞留液^[7]。

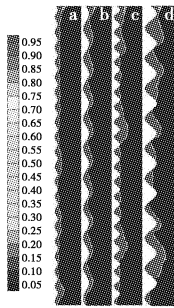


图 5 不同波纹板上液膜分布

图 6 表示了直管和波纹板近壁面处迹线图。在直管表面,没有滞留液体和滞留液体内部的回流;波纹板表面波谷处,滞留液体发生回流形成漩涡,增加了边界层的扰动,产生了涡流扩散传递,提高了传热效率。此外,波纹板的波长大小和凹槽的深浅并不能阻止漩涡的产生,但是影响了漩涡的扰动的程度和涉及的范围。

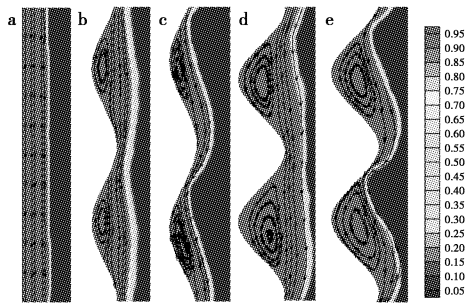


图 6 不同波纹板上流体流动的迹线图

3.3 液体的物性对液膜流动的影响

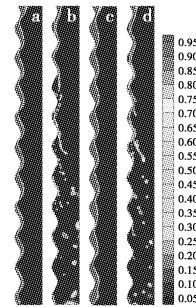
本文重点考察了液体黏度和表面张力对液膜流动的影响。由表 2 可知,水溶液和乙醇溶液的黏度

基本相同,而表面张力相差较大;水溶液和甘油水溶液(质量比 1:1)表面张力差别较小,而黏度不同。因此,文中分别模拟了水溶液、乙醇溶液、甘油水溶液的液膜流动情况。

表 2 不同流体的物性

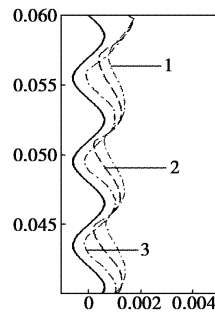
流体	水	乙醇	甘油-水(1:1)
密度/kg·m ⁻³	998.2	790	1139
黏度/Pa·s	0.001003	0.0012	0.0068
表面张力/N·m ⁻¹	0.0722	0.0214	0.0696

图 7 是水溶液和甘油水溶液在有无表面张力的情况下液膜流动。显然,当不考虑表面张力时,液体在重力的作用下流动,撞击到波纹管的表面而容易发生液体的喷溅,因而不能形成均匀连续的液膜,甚至导致液膜的破裂形成干斑,严重降低了传热效率;当考虑表面张力时,液膜沿波纹管的壁面流动,虽然自由表面和壁面之间有一定的相位差,但仍然形成了连续液膜,增加了固体壁面与液膜的接触面积,有利于传热的进行^[10]。



a—水无表面张力;b—水有表面张力;
c—甘油水溶液有表面张力;d—甘油水溶液无表面张力

图 7 表面张力对液膜流动的影响



1—甘油水;2—水;3—乙醇

图 8 溶液的物性对自由界面的影响

图 8 显示了在进口速度为 0.065 m/s 时,水溶液、乙醇溶液、甘油水溶液的自由界面。水溶液和乙醇溶液比较,表面张力较大的液膜厚度较大,液膜自由表面与固体壁面之间的相位差逐渐增大;水溶液

和甘油水溶液比较,相位差几乎没有变化,黏度越大液膜厚度越大,可能是由于黏度较大的液体在壁面的滞留时间较长。因此在实际应用中可以通过改变溶液的物理性质来影响液膜的流动和液膜的厚度,进而提高波纹板式蒸发冷凝器的传热系数。

4 模拟可靠性验证

为了验证 CFD 模拟的准确性和模拟方案的可行性,按文献[11]在半圆形凹槽表面对甘油水的混合物(质量比甘油:水=2:1)(见表3)液膜流动进行模拟计算。将模拟的液膜流线与文献[12]模拟结果进行对比,发现在左半圆的壁面附近都形成了循环流动,两者吻合性较好,且在文献[11]的实验中也发现了相似的流型。因此,用模拟方法来研究液膜流动具有可行性。

表3 甘油水混合物(2:1)的物性

流体	密度/kg·m ⁻³	黏度/Pa·s	表面张力/N·m ⁻¹
甘油水(2:1)	1227	0.0195	0.0671

CFD 与文献模拟结果对比见图9。

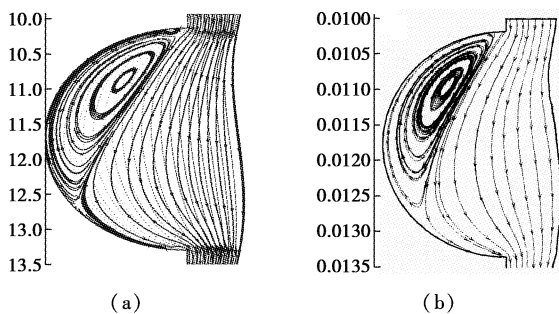


图9 CFD 与文献模拟结果对比

5 结语

模拟结果表明:

(1)液膜厚度随着流速的增加而降低,超过一定限度时,液膜厚度反而逐渐增加;流动时间开始先

随着流速的增加而减小,后变化不明显。

(2)波纹板面的凹槽越浅越有利于连续液膜的产生,且在波谷处容易积聚液体;相对于直板,波纹板波谷处的滞留液有二次回流的产生。

(3)有无表面张力对连续液膜的形成起到重要作用,实际应用中不可忽略;表面张力、黏度、流速对液膜厚度、流动时间、相位差都有影响。

参考文献

- [1] Kachhwaha S S, Dha P L, Kale S R. Experimental studies and numerical simulation of evaporative cooling of air with water spray [J]. International Journal Heat Mass Transfer, 1998, 41(2): 447 - 474.
- [2] Jiang Xiang, Zhu Dong-sheng. Heat transfer enhancement in evaporative condenser [C]. Proceedings of the 3rd International Symposium on Heat Transfer and Energy Conservation. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2004: 1025 - 1031.
- [3] 蒋翔, 朱东生, 唐广栋. 蒸发式冷凝器管外水膜与空气传热性能及机理的研究 [J]. 流体机械, 2006, 34(8): 59 - 62.
- [4] 叶学民. 壁面薄膜流的传质传递和稳定性研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2002.
- [5] 宋焱臻, 吕金虎, 卓献荣. 空气与水直接接触热质交换顺流和逆流过程特性比较 [J]. 化工进展, 2005, 24(7): 783 - 787.
- [6] 周孝清, 陈沛霖. 竖直平板上的水膜流动特征 [J]. 同济大学学报, 1995, 23(6): 621 - 626.
- [7] 吴治将, 朱冬生, 张景卫, 等. 板式蒸发式冷凝器气-液两相流流动的数值模拟 [J]. 2008, 29(6): 971 - 974.
- [8] Fang Gu, Chunjiang Liu, Xigang Yuan, et al. CFD simulation of liquid film flow on inclined plates [J]. Chemical engineering & Technology, 2004, 27(10): 1099 - 1104.
- [9] Hirt C W, Nichols B D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries [J]. J Comp Phys, 1981, 39(1): 201 - 225.
- [10] 王安琪. 壁面结构对降膜蒸发器内流动和传热性能的影响 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [11] Zhao L, Cerro R. Experimental characterization of viscous films flows over complex surface [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1992, 18(14): 495 - 516.
- [12] Malamataris N A, Bontozoglou V. Computer aided analysis of viscous film flow along and inclined wavy wall [J]. Journal of Computational Physics, 1999, 154(2): 372 - 592. ■

赢创收购 SurModics 制药业务

赢创工业集团已与总部位于美国明尼苏达州伊甸普雷里的 SurModics 公司达成协议, 收购其制药业务。协议于 2011 年 11 月 1 日签署, 收购将于不久后完成。自 2011 年 3 月收购勃林格殷格翰 (Boehringer Ingelheim) 旗下 RESOMER® 的业务后,

赢创致力于巩固药物制剂的配方服务业务。本次收购有助于赢创进一步发展其医药健康业务。“作为战略合作伙伴, 赢创是世界领先的制药行业解决方案供应商。通过

收购 SurModics 的聚合物及配方服务业务, 我们将不断增强公司在这个重要市场中的地位。”赢创工业集团董事长英凯师博士说。

SurModics 集团的子公司 SurModics 制药公司是注射给药系统领域的龙头企业。新的业务包含两套用于开发和生产聚合物及给药系统的世界顶级设施。公司坐落在美国亚拉巴马州伯明翰, 拥有近 80 名制药行业的专家。2010 年, 公司总收入超过 1 500 万美元。(刘硕)