

文章编号: 1674-2869(2018)04-0451-04

# 竖直管降膜蒸发器冷膜成形及流动特性数值模拟

杨红<sup>1,2</sup>, 陈鑫<sup>1</sup>, 李鹏飞<sup>1</sup>, 杨颂<sup>1</sup>, 何焱<sup>3</sup>

1. 武汉工程大学机电工程学院, 武汉 430205;

2. 化工装备强化与本质安全湖北省重点实验室(武汉工程大学), 武汉 430205;

3. 深圳市纯水一号水处理科技有限公司, 深圳 518105

**摘要:**对单层布液盘和锥形插件组合作用下的多管管束的流动特性和成膜过程进行了CFD数值模拟。采用VOF多相流模型和RNG  $k-\varepsilon$ 湍流模型, 三维双精度求解, 以空气和水作为工质, 边界条件设置为速度入口和压力出口。通过管内液膜形成、出口截面液相分布、降膜管进出口流量变化等方面研究表明, 带插件的布液器能很好的改善布膜的均匀性和稳定性。基于液相体积分数, 计算分析了管内液膜平均厚度及平均流速, 在流量达到一定值时, 液膜厚度趋于定值1.28 mm左右, 继续增大流量, 流速会成比例增加, 不利于连续液膜的稳定, 也不利于介质在降膜管内的充分蒸发。

**关键词:**降膜蒸发器; 布液装置; 冷膜; 流动特性; 数值模拟

中图分类号: TK172.4 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2018.04.020

## Numerical Simulation of Cold Film Forming and Flow Characteristics in Vertical Tube Falling Film Evaporator

YANG Hong<sup>1,2</sup>, CHEN Xin<sup>1</sup>, LI Pengfei<sup>1</sup>, YANG Song<sup>1</sup>, HE Yao<sup>3</sup>

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. Hubei Key Laboratory of Chemical Equipment Intensification and Intrinsic Safety (Wuhan Institute of Technology),  
Wuhan 430205, China;

3. Shenzhen Pure Water No. 1 Water Treatment Technology Co. LTD, Shenzhen 518105, China

**Abstract:** The computational fluid dynamics numerical simulation was performed on the cold film flow characteristics and film formation process of multi-tube bundle under the combination of single layer liquid distributed disk and conical plug-in unit. The volume of fluid multi-phase flow model and Re-normalization group  $k-\varepsilon$  turbulent flow model were used to solve the three-dimensional double-precision method. Air and water were used as working medium and the boundary conditions were set as the velocity inlet and the pressure outlet. The liquid film formation, the liquid phase distribution at the outlet section, and the flow rate at the outlet of the falling film tube were fully investigated in this paper. The results showed that the liquid distributor with plug-in significantly improved the uniformity and stability of the film. The average thickness and velocity of the liquid film in the tube were calculated based on the liquid volume fraction, which demonstrated that the thickness of the liquid film tended to be a constant value about 1.28 mm when the flow rate reached a certain value. The current speed increased with increasing the flow rate, which was not conducive to the stability of continuous liquid film, and the sufficient evaporation of medium in the falling film tube.

**Keywords:** falling film evaporator; liquid distributor; cold film; flow characteristics; numerical simulation

收稿日期: 2018-03-20

基金项目: 深圳市技术创新计划重点项目(20160610); 武汉工程大学研究生教育创新基金(CX2016027)

作者简介: 杨红, 博士, 教授。E-mail: 15717195242@163.com

引文格式: 杨红, 陈鑫, 李鹏飞, 等. 竖直管降膜蒸发器冷膜成形及流动特性数值模拟[J]. 武汉工程大学学报, 2018, 40(4): 451-454, 472.

降膜蒸发器有节能高效、物料滞留时间短、传热温差小等特点,非常适合热敏性物料的蒸发浓缩,在工业上应用广泛<sup>[1-4]</sup>。布液装置是降膜蒸发器的核心部件,它与蒸发器的传热性能与操作稳定直接相关<sup>[5-6]</sup>。在布液装置流体流动特性与管内流体成膜机理的研究中,计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)数值模拟技术是一种有效的手段<sup>[7-8]</sup>。马学虎等<sup>[9]</sup>运用数值模拟方法探寻了液膜随进口扰动频率、Re等要素变化而波动的演变过程。Boss等<sup>[10]</sup>将液体小波幅被迫扰动施加于进口边界,结合数值模拟技术研究了液体黏度与其表面张力对液膜流动与波行为的影响。许松林等<sup>[11]</sup>对竖直降膜管内气相并流操作条件下的液膜流动状态进行了模拟仿真,分析了液膜流动与气液两相雷诺数之间的关系<sup>[11]</sup>。北京化工大学的李凯等<sup>[12]</sup>就液位高度、进液方式对溢流型布液装置的布膜效果进行了数值模拟与实验研究,分析了液位高度与进液方式对布膜效果的影响。王为术等对有机工质在降膜管内的流动特性与传热情况进行了系统研究,分析了喷淋密度、管径大小、工质温度等要素对布膜效果的影响<sup>[13]</sup>。李铁、吕昌尧利用数值模拟技术分析降膜管内气体对液膜流速与液膜厚度的影响规律<sup>[14]</sup>。但上述研究工作往往着眼于单根降膜管的液膜分布,而影响布液装置流体流动与成膜效果的因素众多,单管模拟并不能准确地体现多管系统的液体分配与成膜情况。

本文基于Fluent软件,将单层布液盘和锥形插件组合作用下的多管管束的流动特性和成膜过程进行了数值模拟,从管内液膜的形成、出口截面液相分布、降膜管进出口流量变化等方面,对比分析了有、无插件状态下的布液模型的流动状态和成膜效果,并重点研究了液膜平均厚度与平均流量之间的关系,探讨了流量变化对成膜效果的影响。

## 1 降膜装置 CFD 模型建立

### 1.1 结构模型

布液装置主体结构示意如图1所示,降膜管规格为 $\phi 38 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ ,正三角形排列,7根管组成最小管束,管中心距为48 mm,管长 $L$ 为1 000 mm。布液板高度 $H$ 可调,调节范围为10 mm~100 mm,筒体内径 $D$ 为150 mm。

采用锥形插件,插件下端外圆与降膜管内壁间隙为1 mm。基于Solidworks建立流体流动区域三维模型,适当简化模型,忽略布液板上层流动区域,设置速度入口为边界条件,入口速度与液位高度相关。布液装置内部结构如图2所示。

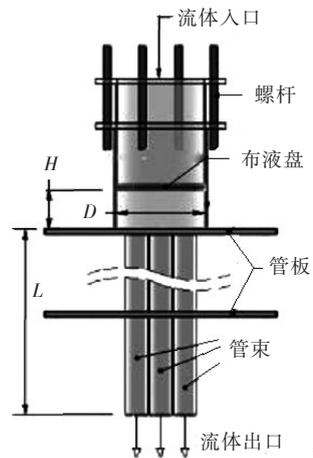


图1 布液装置主体结构示意图

Fig. 1 Structure of liquid distribution device

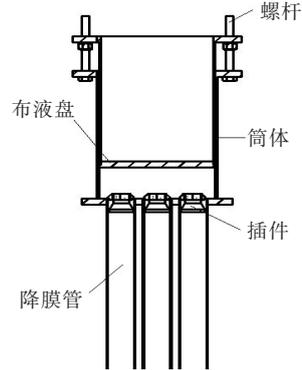


图2 布液装置内部结构示意图

Fig. 2 Internal structure of liquid distribution device

### 1.2 网格划分

在Workbench中进行网格划分。管内壁流体流动状态是本研究的重点,故近壁面网格采用边界层网格,管内流动区域采用高效率的六面体结构网格。图3为流动区域整体网格示意图,图4为降膜管横截面网格示意图。

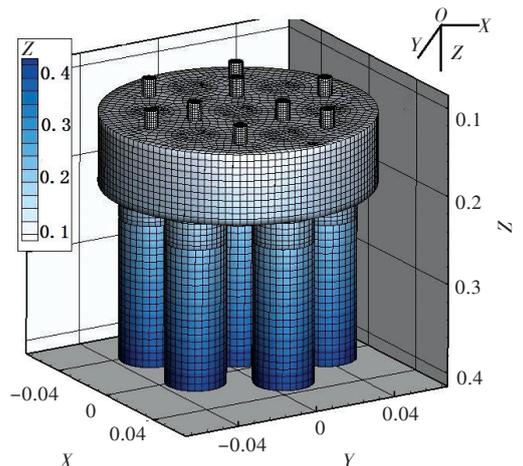


图3 流动区域整体网格示意图

Fig. 3 Overall grid schematic diagram of flow area

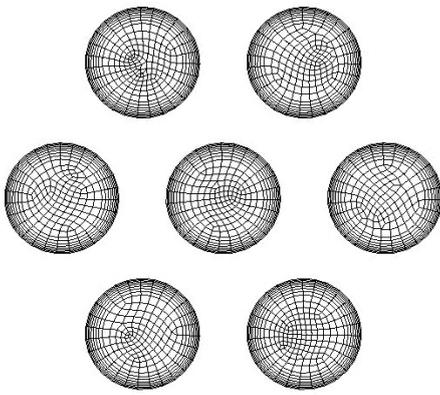


图4 降膜管横截面网格示意图

Fig. 4 Grid schematic diagram of cross section of falling film tubes

### 1.3 初始条件和边界条件

降膜布液过程本质是一种气液两相分层流动过程,流体体积分数模型(The Volume of Fluid multi-phase flow model,VOF)被广泛应用于求解此类问题<sup>[15-16]</sup>。本文采用VOF界面追踪技术,跟踪气液两相运动界面位置,研究降膜布液过程中气液两相流体动力学特性。本模拟采用有限元差分法,选用流体体积分数多相流模型和重整化

(Re-normalization group, RNG)湍流模型,采用三维双精度求解器,以空气和水为工质,选择速度入口和压力出口为边界条件,操作压强设置为标准大气压,计算过程为瞬态过程。入口流体与出口流体温度均设置为300 K,固液面接触无滑移。

## 2 结果与讨论

### 2.1 降膜管内液膜的形成

液膜稳定后降膜管壁面气液相分布图如图5所示。在两相流气液体积比云图中,液体体积分数大的部分可视为液相区,液体体积分数小的地方可视为气相区。对比可见,无插件时水从管板流动到降膜管呈倾泻状态,不能形成均匀连续的液膜,而有插件时布膜均匀,液膜能基本覆盖整个布膜管。

### 2.2 出口截面液相分布

液膜稳定后降膜管出口截面气液相分布如图6所示。对比可见,有插件时出口截面液体分布均匀,无插件时管壁液体周向分布极不均匀,不能形成均匀液膜。

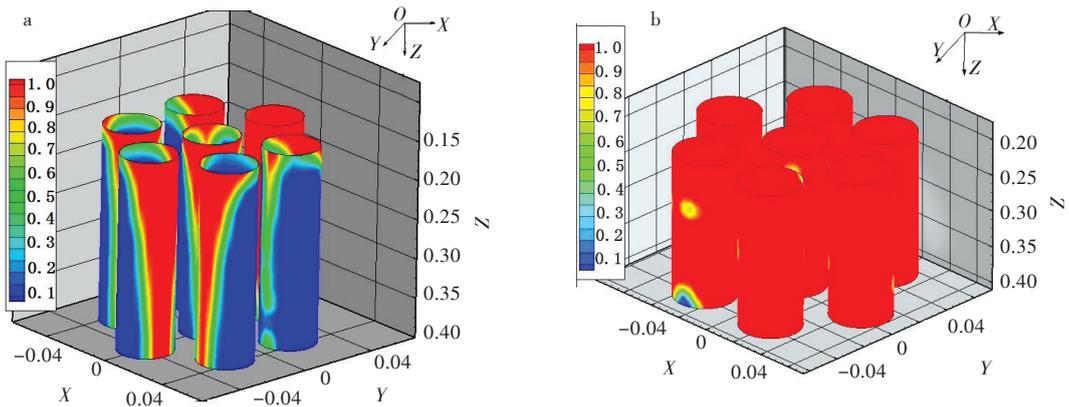


图5 管内壁气液相分布云图:(a)无插件模型,(b)带插件模型

Fig. 5 Gas and liquid phase distribution cloud maps on inner wall of tube: (a) without plug-in, (b) with plug-in

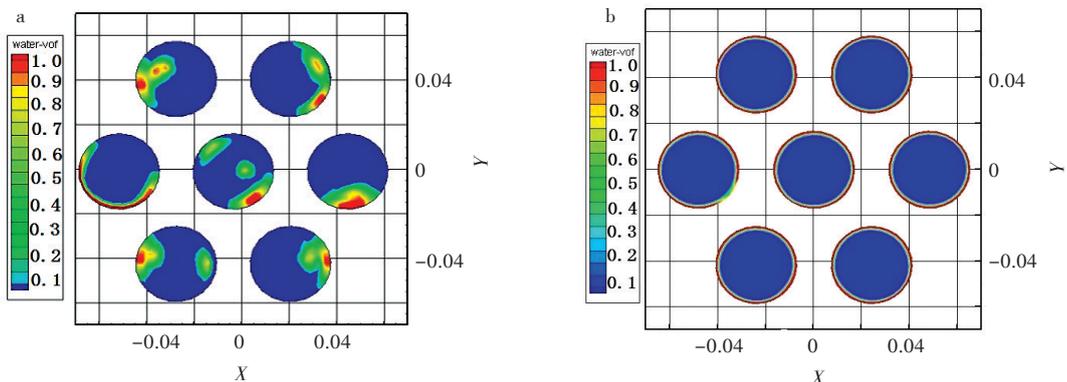


图6 出口截面气液相分布云图:(a)无插件模型,(b)带插件模型

Fig. 6 Gas and liquid phase distribution cloud maps of the tube outlet section: (a) without plug-in, (b) with plug-in

### 2.3 降膜管进出口流量变化对比

图7为液膜稳定后两种布液装置的进出口流量随时间变化曲线,可以看出,带插件布液装置的出口流量波动幅度明显低于无插件布液装置,前者布膜稳定性好。这里需要着重强调,进出口流量的正负值是相对于流动区域而言的,进入到流动区域的为正值,流出流动区域的为负值。

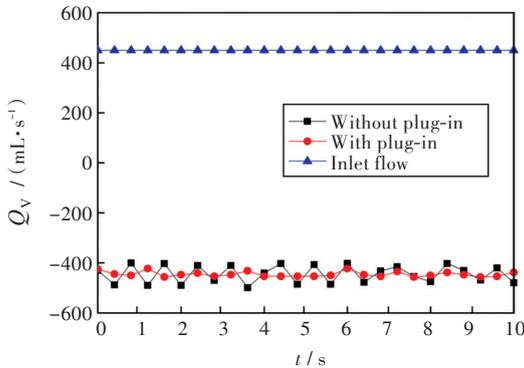


图7 进出口流量随时间变化图

Fig. 7 Flowchart of inlet and outlet with time

### 2.4 液膜平均厚度以及平均流速

Fluent软件可输出降膜管区域液相的体积分数以 $\phi_B$ 表示,据此可计算出液膜的平均厚度 $\bar{\delta}$ 和平均流速 $\bar{v}$ 。

$$\bar{\delta} = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4}(1 - \phi_B)} \quad (1)$$

$$\bar{v} = \frac{4Q_V}{\pi D^2 \phi_B} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中, $D$ 为管内径, $Q_V$ 为体积流量。

计算得到的液膜平均厚度 $\delta$ 随流量 $Q_V$ 的变化曲线如图8所示。

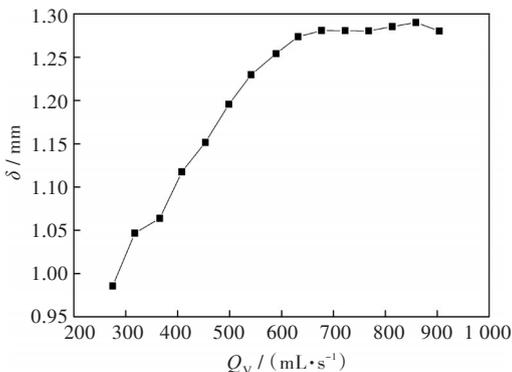


图8 平均液膜厚度随流量变化图

Fig. 8 Change of average film thickness with flow rate

当流量处于较小值时,平均液膜厚度也处于较小值,此时不能形成稳定液膜。在流量处于一定范围内,液膜厚度与其成线性关系。当流量增大到600 mL/s左右时,平均液膜厚度趋于定值

1.28 mm,继续增大流量,液膜厚度不再有显著变化。根据图8数据,可推测继续增大流量,液膜厚度不会明显变化,但流速会成比例增大,当液体流速达到某一定值时,将无法形成连续稳定的液膜。

## 3 结 语

针对单层布液盘和锥形插件组合作用下的多管管束布膜装置模型,就管束的流动特性和成膜过程进行了CFD数值模拟,得到如下结论:

1)有、无插件的布液装置均能在降膜管内壁形成液膜,但是无插件时成膜情况不理想。锥形插件能显著改善布膜效果,使分液均匀,液膜连续稳定,只要合理控制流量,不会出现“干壁”现象。

2)基于本文数据,带锥形插件的布膜装置在流体流量为620 mL/s时液膜厚度趋于稳定,膜厚约1.28 mm,继续增加流量,液膜厚度无显著变化,但流速相应增加,不利于连续液膜的稳定,也不利于介质在降膜管内的充分蒸发。

### 参考文献:

- [1] 王宇楠,安路阳,孙呈祥,等.多效蒸发油田污水脱盐设备设计与实验研究[J].化工管理,2018(7):168-169.
- [2] 王军义. MVR的技术原理及应用[J].河南化工,2018,35(1):37-39.
- [3] 陈忠法. 浅谈蒸发器的运行维护[J].中国有色冶金,2017,46(6):37-38,43.
- [4] 陈世昌,马建平,张先明,等. 垂直降液膜流动在反应工程中的应用[J].化工进展,2014,33(10):2528-2534.
- [5] 吴波. 试论填料塔气液分布器的优化设计[J].低碳世界,2017(35):326-327.
- [6] 万智华,苏长满,黄晓晓,等. 液体分布器研究进展及新技术[J].天津化工,2017,31(5):5-7.
- [7] 宋小曼,杨丽,王伟洁. 水平管降膜蒸发器管外液体流动数值模拟[J].煤气与热力,2018,38(2):10-15.
- [8] 石玉琦. 降膜吸收传热传质理论与实验研究[D].杭州:浙江大学,2018.
- [9] 马学虎,薄守石,兰忠,等. 降液膜波动的影响因素分析[J].高校化学工程学报,2010,24(1):10-15.
- [10] BOSS, MA X H, LAN Z, et al. Numerical simulation on wave behavior and flow dynamics of lam-inar-wavy falling films: effect of surface tension and viscosity[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2012, 90(1):61-68.
- [11] 许松林,鲁文华. 两种不同形状旋转带对气液两相流场影响的计算流体力学模拟[J].天津大学学报,(下转第472页)

- 资源调度算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2014, 26(5):706-711.
- [10] 王福成, 齐平, 李龙澍. 一种基于局部最优云服务选择模型的云资源调度算法[J]. 小型微型计算机系统, 2014, 35(12):2697-2701.
- [11] 袁正午, 李君琪. 基于改进粒子群算法的云资源调度[J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(2):401-404.
- [12] 张恒巍, 韩继红, 卫波, 等. 基于 Map-Reduce 模型的云资源调度方法研究[J]. 计算机科学, 2015, 42(8):118-123.
- [13] 张群慧, 李仁发. 膜计算改进粒子群优化算法的云资源调度[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(20):40-44.
- [14] 边根庆, 张文敬, 邵必林, 等. 基于帕累托最优的云资源调度研究[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(19):70-73.
- [15] 邢乃若, 惠晓滨. 改进的云资源调度自相关匹配数据融合算法[J]. 科技通报, 2014(12): 217-219.
- [16] 黎明, 吴跃, 陈佳. 基于语义搜索引擎的云资源调度[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(12):3735-3737.
- [17] 金瑾, 何嘉. 基于遗传蚁群算法的云资源调度问题研究[J]. 成都信息工程学院学报, 2013(2): 109-113.

本文编辑:陈小平



(上接第454页)

- 2007(8):892-897.
- [12] 李凯, 王庆锋, 郝帅, 等. 垂直管降膜蒸发器溢流孔式布膜器 CFD 模拟研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2017, 44(1):57-62.
- [13] 王为术, 王涛, 彭岩, 等. 竖管内 R113 降膜流动特性的结构影响研究[J]. 矿山机械, 2017, 45(2):65-71.
- [14] 李轶, 吕昌尧, 宋济洋. 降膜随气体同时穿越液池过程数值模拟研究[J]. 东北电力大学学报, 2017, 37(1):80-86.
- [15] 战洪仁, 吴众, 慧晓, 等. 基于 VOF 模型的倾角对重力热管性能影响数值研究[J]. 热力发电, 2017, 46(6):40-45.
- [16] 谭思超, 赵富龙, 李少丹, 等. VOF 模型界面传质与体积传质的转换方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(3):317-321.

本文编辑:陈小平