

Numerical Simulation of Liquid Distributor for Falling Film Evaporator in Horizontal Tube

Feilong Zhan, Wei Zhao*, Hua Zhang

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai
Email: 1154900774@qq.com, *zw_chery@163.com

Received: Jul. 27th, 2020; accepted: Aug. 7th, 2020; published: Aug. 14th, 2020

Abstract

The liquid distributor is one of the most important equipment in the falling film evaporator of the horizontal tube, which evenly distributes the refrigerant flowing into the heat exchanger. By the simulation software FLUENT, the liquid distributor in a falling film evaporator was numerically simulated, and analyzed the influence of the bottom angle. By analysis, it was found that there was the sudden decrease of mass flow at the inlet of the liquid distributor, but changing the bottom angle could effectively improve this situation. In addition, using small distance between the small hole and the side, the uniformity of liquid distribution would also be improved; increasing the diameter of the inlet can also effectively reduce the sudden decrease of the flow rate at the inlet. At the same time, a large bottom angle, a small distance between the small hole and the side and a large diameter inlet can improve liquid distribution and also obtain a small pressure drop.

Keywords

Falling Film Evaporator, Liquid Distributor, Flow Uniformity, Pressure Drop, Numerical Simulation

横管降膜蒸发器用布液器的数值模拟研究

詹飞龙, 赵巍*, 张华

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海
Email: 1154900774@qq.com, *zw_chery@163.com

收稿日期: 2020年7月27日; 录用日期: 2020年8月7日; 发布日期: 2020年8月14日

*通讯作者。

摘要

布液器是横管降膜式蒸发器中最重要的设备之一,对流入换热器中的制冷剂进行均匀分配。通过仿真软件FLUENT对某款降膜式蒸发器中的布液器第一层均液结构进行数值模拟,分析了底角、小孔距侧边距离和入口直径变化对布液器布液均匀性的影响。通过分析,发现在布液器入口处存在严重的流量突减,改变底角可以有效改善这种状况;此外,采用较小的侧边距离,布液器的布液均匀性也会得到提升;增大入口直径,入口处的流量突减现象也可以得到有效改善;同时大的底角、较小的小孔距侧边距离和大直径的进液口在提升均液性的同时也可以获得较小的压降。

关键词

降膜式蒸发器,布液器,布液均匀性,压降,数值模拟

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

换热器的发展已有近百年的历史,在食品、石油化工、冶金、制药、空调、轻工等众多领域广泛应用,占有举足轻重的地位。然而随着能源消耗的逐渐加大,一次能源正在逐渐枯竭,提高能源利用率成为目前急需解决的课题之一。横管降膜式蒸发器[1][2]具有较高的传热系数,以及制冷剂低充注量的特点,在当前国家节能减排战略目标下具有显著优势,布液器[3][4]作为降膜式蒸发器的主要设备之一,直接影响液膜传热,因此对布液器布液均匀性进行仿真研究,具有重要意义。

目前,对于降膜蒸发器的研究主要集中于管外蒸发传热性能的研究,对布液器的布液性能研究较少。Xingsen Mu [5]等对喷淋式的液体分布器进行了实验探究,研究了喷淋高度、喷嘴角度、喷嘴间距等因素对于蒸发性能的影响,发现横管降膜蒸发器的换热性能主要与喷嘴形式和换热管的排布方式有关。Rautenbach 等[6]研究了塔式多效水平管降膜蒸发器液体分布器设计中喷淋孔径对润湿长度的影响。结果表明,当开孔直径在 2~4 mm 内变化时,液体的润湿长度随液体温度、压差的升高而增大,且小孔径更利于在给定流量下进行优化设计;史晓平[7]详细介绍了用于降膜蒸发的溢流式分布器、插头型分布器、多层淋降式分布器各自的特点;赵斌[8]通过一系列实验研究认为,用于横管降膜蒸发器的筛板型布液器中最小液面高度在 15 mm~20 mm 之间,低于此范围,会对布液均匀性产生不利影响;何茂刚[9]提出一种新的带有导流装置和二次布液装置的水平管降膜蒸发器,指出该种布液器具有液体分布均匀、流动稳定的优良性能;欧阳新萍[10]通过分析研究,设计了一种新型滴淋装置,经过验证认为可以提高布液均匀性,避免换热管外干涸现象的发生。

本文以某款降膜式蒸发器为研究对象,对其中的布液器进行建模仿真研究,通过数值模拟分析不同结构参数对该布液器布液均匀性的影响,这对于横管降膜蒸发器布液器的设计研究具有积极意义。

2. 布液器模型的创建

2.1. 几何模型

筛板型布液器结构复杂,流体通过进液口流入布液器中在第一层均液槽中实现轴向均液,然后通过

设置多层筛板进行径向均液，以达到对流入流体进行均液的目地。其中第一层均液槽的轴向均液能力对布液器的整体均液性能影响很大。

考虑到如果对整个布液器模型进行实体建模，布液孔较多且许多结构不能简化，会导致最终的网格数量、计算成本和时间成本较高，而第一层均液槽的均液能力对布液器的整体均匀性影响较大，最终以某款横管降膜式蒸发器中布液器的第一层均液槽为研究对象，采用三维建模软件 CREO 建立几何模型，同时利用布液器具有对称结构的特点对其进行建模，采用 FLUENT 中的对称边界条件进行处理，在保证数值模拟准确性的同时，又减少了研究成本。模型如图 1 所示。

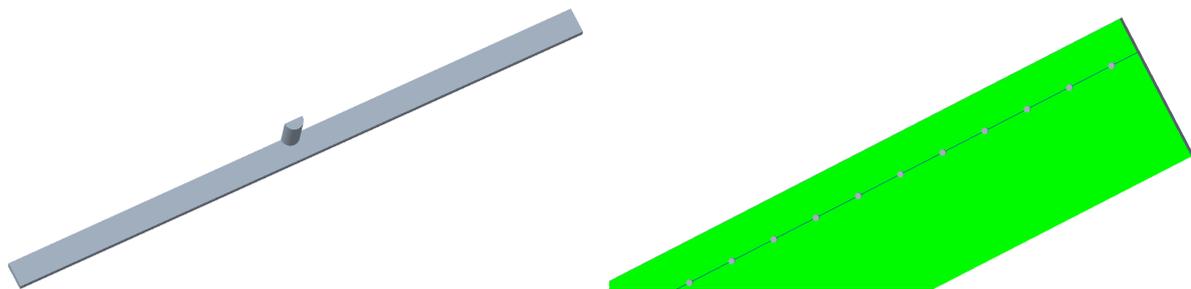


Figure 1. Liquid distributor overall and local model

图 1. 布液器整体与局部模型

2.2. 网格划分

采用 ICEM 软件对布液器模型进行网格划分，网格采用非结构化四面体网格，整体网格尺寸为 5 mm，由于布液口尺寸较小，对该区域网格进行加密处理，网格尺寸为 0.3 mm，网格总体数量约为 223 万。布液器整体网格图与局部网格图如图 2 所示。

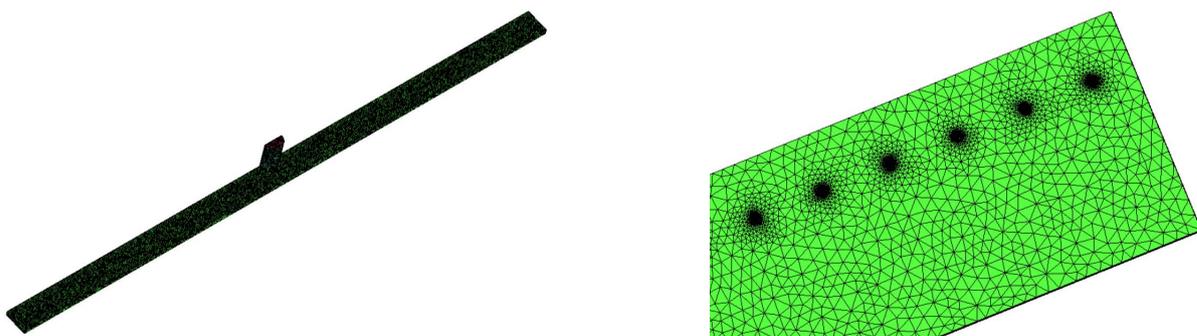


Figure 2. Liquid distributor overall and local grid

图 2. 布液器整体与局部网格图

2.3. 数学模型

布液器数学模型基于以下假设：1) 流体为不可压缩的牛顿流体；2) 模拟过程考虑重力作用但忽略浮升力的影响；3) 流动过程为定常流动；4) 流体的粘性耗散作用忽略不计。

对于单相不可压缩流体，满足连续性方程、动量方程[11][12][13]。

连续性方程如式(1)所示。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

其中, ρ 为流体密度, 单位 kg/m^3 ; t 为时间, 单位 s ; u 、 v 、 w 分别指物体在 x 、 y 、 w 方向上的速度分量, 单位 m/s 。

动量方程如式(2)~式(4)。

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \text{div}(\rho u u) = \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \text{div}(\rho v u) = \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + \text{div}(\rho w u) = \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (4)$$

其中, p 为控制体上的压力, 单位 Pa ; \mathbf{u} 为速度矢量; τ_{xx} 、 τ_{yy} 、 τ_{zz} 等分别为作用在控制体表面的粘性应力的分量, 单位 $\text{Pa}\cdot\text{s}$; F 为作用在控制体上的外力, 单位 N 。

2.4. 边界条件

对于该布液器模型的边界条件设置, 布液器进口采用质量流量入口, 出口采用压力出口, 对称面设置为 *symmetry*, 其余壁面设为绝热壁面。采用压力基的分离式求解器隐式求解, 压力与速度耦合使用 SIMPLE 算法, 并使用二阶精度的迎风模式进行离散化处理[14]。

3. 仿真模拟结果及分析

3.1. 原始尺寸布液器仿真分析

针对布液器第一层均液结构进行仿真建模处理, 使用三维建模软件 CREO 创建仿真模型, 具体参数如表 1 所示。

Table 1. Main geometric parameters of liquid distributor

表 1. 布液器主要几何参数

入口直径(mm)	底角角度($^{\circ}$)	小孔距侧边距离(mm)
64	176	20

布液器为中间流入, 流入均液槽后向四周扩散, 这种结构会对压力场和分液均匀性产生很大影响。从图 3 的布液器压力场图可以看出, 在布液器入口处压强较大, 这是由于垂直流入的流体, 流入均液槽中遇到底板, 速度突降, 同时流体流动方向发生改变, 导致横向压力梯度产生, 流体被迫向四周扩散; 在布液器侧壁面附近, 由于液体流动受阻, 速度降低, 压力抬升; 对于分液口, 流体出流口径较小, 存在节流效应, 流速增加, 流动阻力增大, 压降变大。

布液器的布液均匀性可以通过各个布液孔的出口流量反映出来, 各个孔的出口流量如图 4 所示。位置 1~80 为按照从布液器一端开始编号, 且所有变形结构模型均采用相同编号方法。整体的流量趋势是布液器进口附近的孔出口流量存在突减现象, 而两端的孔出口流量具有一定的对称性且均匀性更好, 这是由于制冷剂垂直流入时遇布液器底面受阻, 产生横向压力梯度, 流体向四周快速扩散, 而布液器较窄, 流动过程中又遇到布液器侧壁的阻力, 使得入口附近流动情况复杂, 导致入口周围小孔的出口流量变化较大, 迫使流体快速沿着布液器轴向进行扩散, 布液器轴向方向长度相对较大, 使得流体有较大的流动空间, 流体沿流动方向流动情况逐渐趋于稳定, 因此, 相较于入口附近的小孔, 两侧的小孔流动均匀性更好。

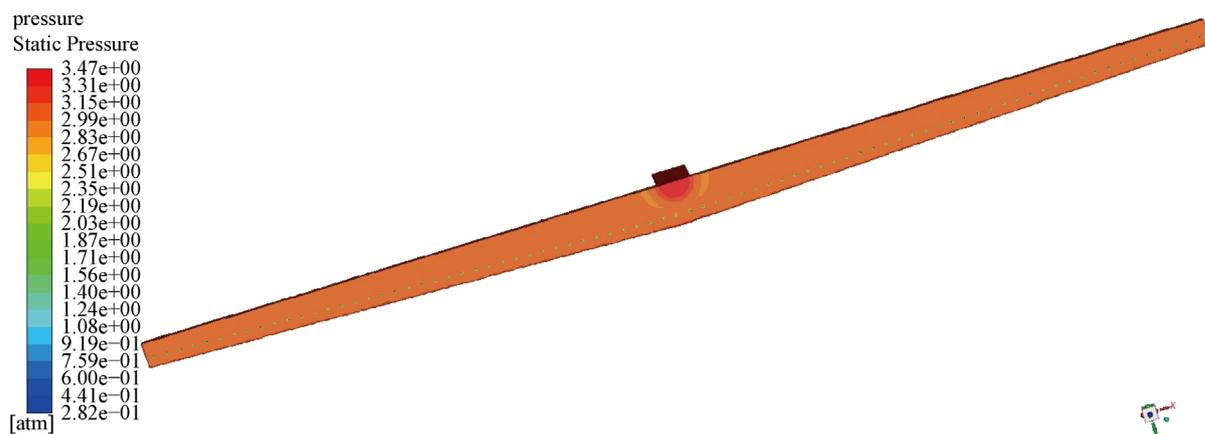


Figure 3. The pressure field with distributor
图 3. 布液器压力场

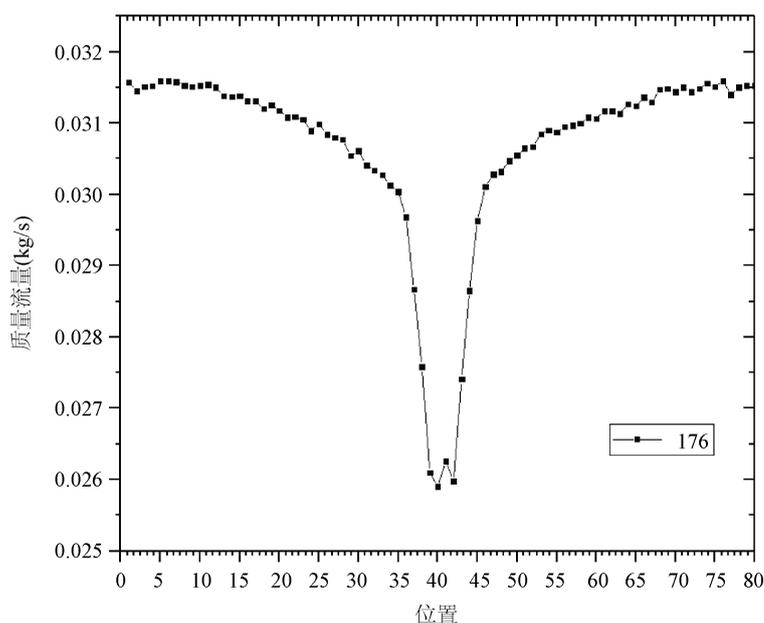


Figure 4. Mass flow
图 4. 质量流量

3.2. 变布液器底角

由图 4 可以知道, 在入口处存在严重的流量分配不均匀现象, 因此在保证布液器其他结构参数不变的情况下, 通过 CREO 创建底角为 174 度、176 度和 180 度的布液器模型, 并采用相同的网格尺寸和边界条件设置, 得到的仿真结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 当布液器采用不同底角时, 在流体入口附近的布液孔均会出现质量流量明显降低的现象, 但不同角度的底角对这种现象产生的影响程度又不尽相同, 底角为 174 度时, 这种质量流量降低的情况最为严重, 当底角逐渐加大, 入口附近的流量突减现象逐渐减弱, 当直径为 180 度时, 入口附近的流量突减情况改善明显, 整条流量曲线的程度相对更缓, 整体的布液均匀性更好; 随着底角角度的增大, 布液器整体压降也逐渐减小。

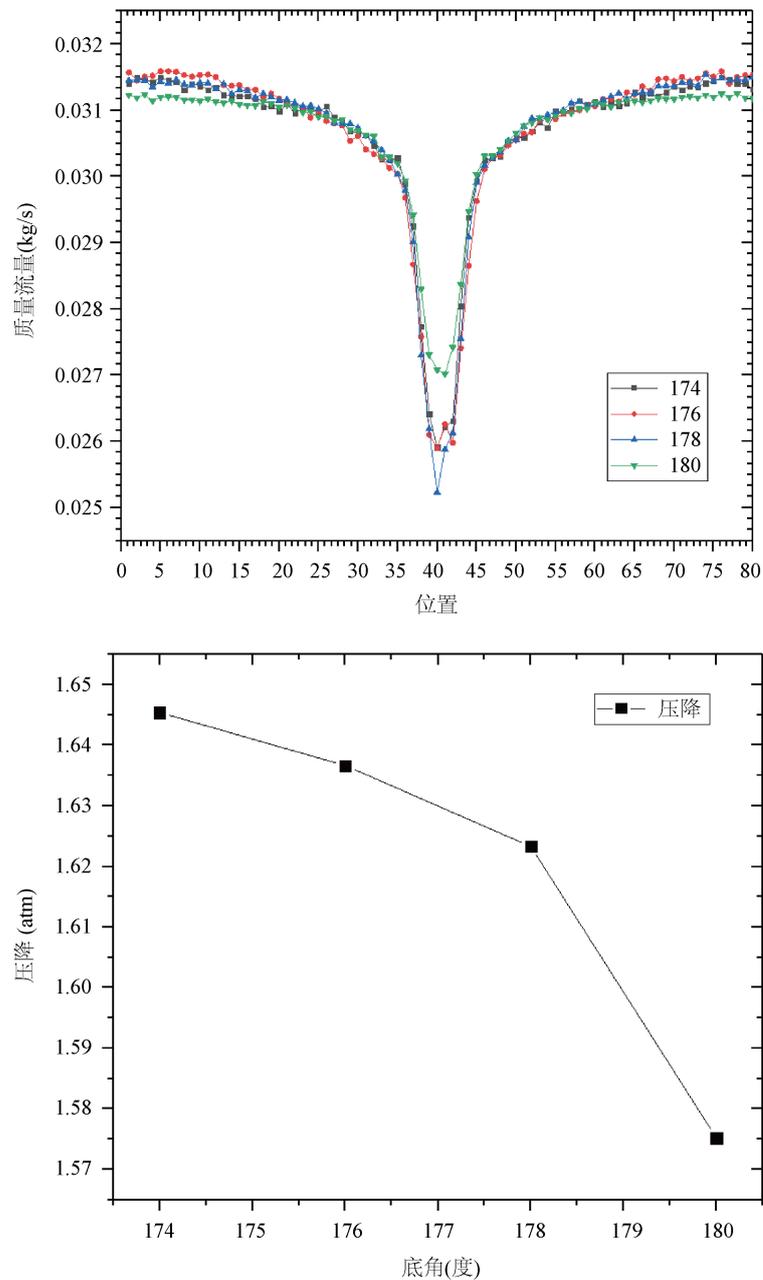


Figure 5. Mass flow and pressure drop at different bottom angle
图 5. 不同底角时的质量流量和压降

3.3. 变小孔距侧边距离

原布液器小孔距侧边的距离为 25 mm，在保证其他结构参数不变的情况下，通过 CREO 建立小孔距侧边距离为 15 mm、20 mm、25 mm、30 mm 和 35 mm 的布液器，采用相同的网格尺寸和边界条件设置，最后得到的仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出小孔距侧边距离为 35 mm 时，入口附近的流量分配不均匀现象最为严重，逐渐减小小孔距侧边距离，可以看出进口附近小孔的流量突减现象逐渐减弱，与 35 mm 相比，小孔距侧边距离为 15 mm 时，沿着布液器轴向流动方向，质量流量曲线更加平缓，布液也会更加均匀，且随着小孔距侧边

距离的不断减小, 阻力损失减小, 压降逐渐减小, 这是由于流体流向侧壁时, 受到侧壁的阻挡, 速度降低, 使得侧壁附近区域的流动情况更加缓和, 从而小孔距侧壁距离越近均液情况越好。

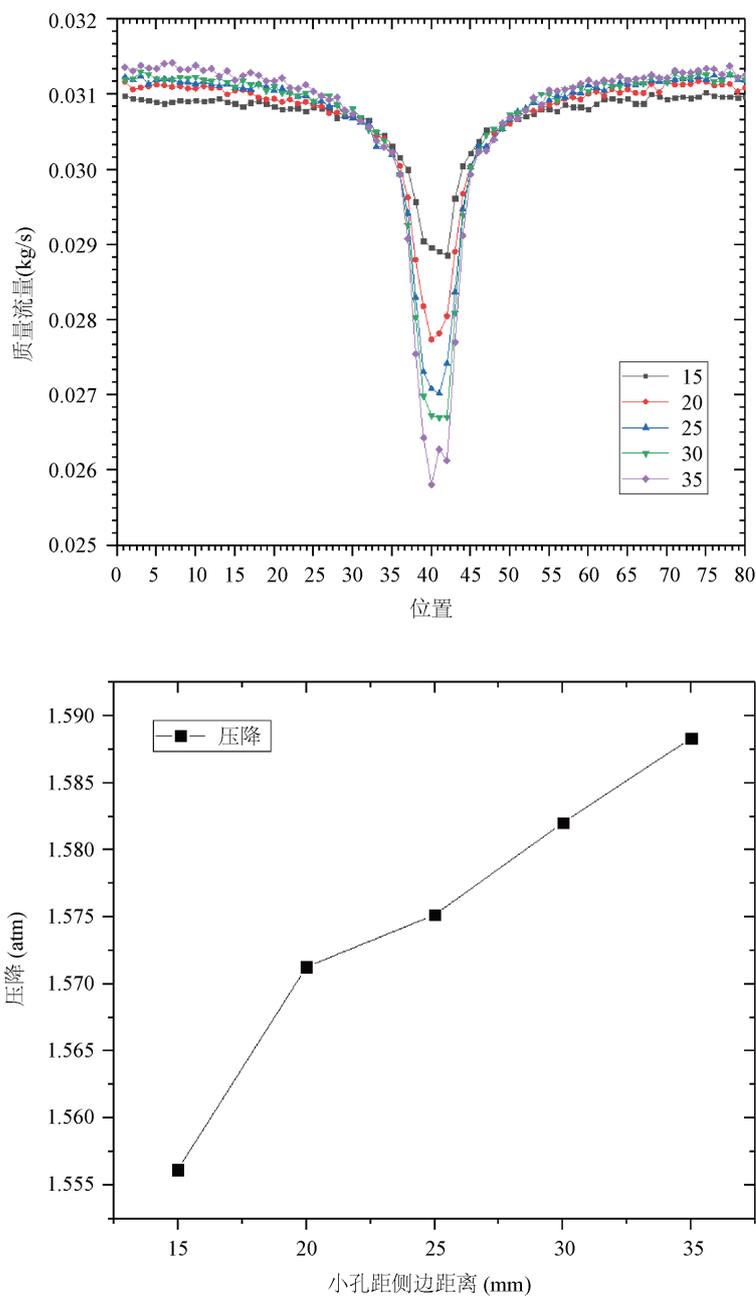


Figure 6. Mass flow and Pressure drop at different distance between the small hole and the side

图 6. 不同小孔距侧边距离时的质量流量和压降

3.4. 变入口直径

在已有入口直径为 64 mm 的基础上, 通过 CREO 创建直径为 47 mm、77 mm 和 90 mm 的布液器模型, 其他参数保持一致, 并采用相同的边界条件, 得到的仿真结果如图 7 所示。

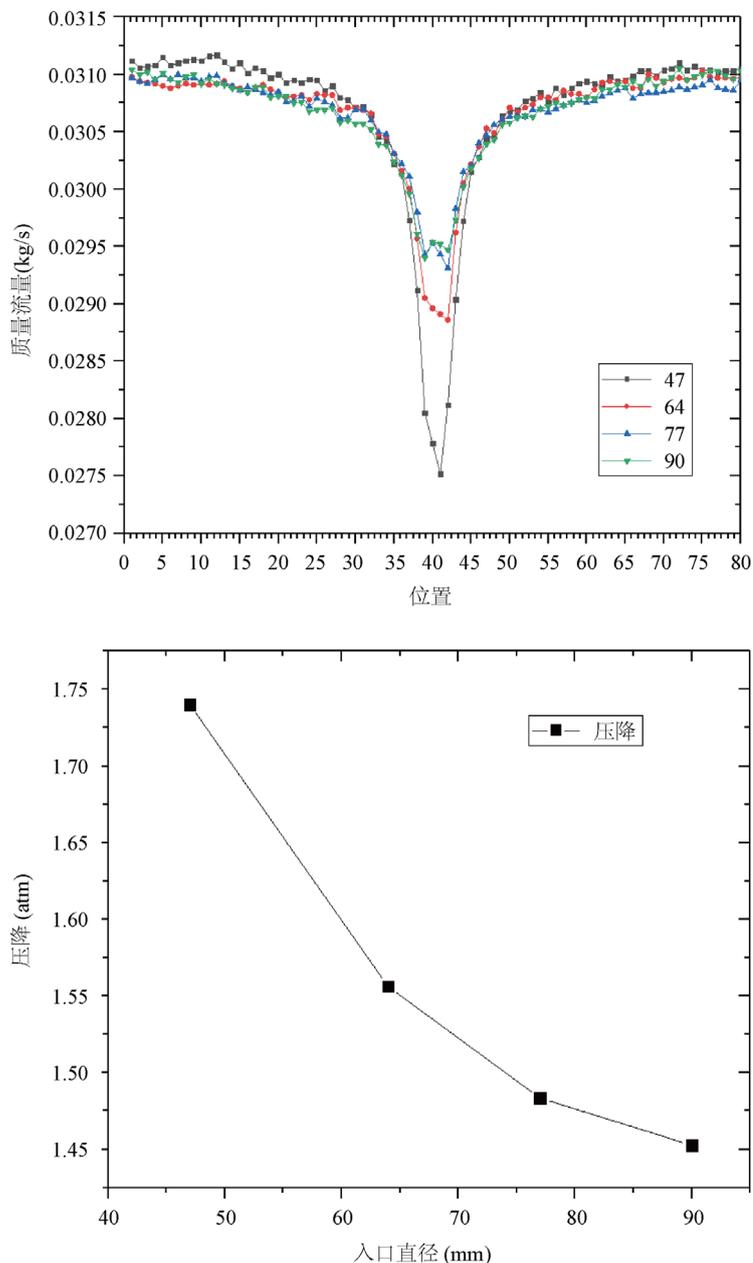


Figure 7. Mass flow and Pressure drop at different inlet diameters

图 7. 不同入口直径时的质量流量和压降

在进口质量流量不变的情况下，进口直径越大，进口速度越小，流动越缓慢，相对于小的进口直径，采用较大直径的进液口可以减小入口处的速度梯度和压力梯度的变化，改善进口附近紊乱的流动情况。由图 7 可以看出，随着入口直径的增大，布液器的布液均匀性得到很大提升，大的进口直径可以有效改善进口处的流量突减，进而提升整体的布液均匀性，同时能够有效降低布液器的阻力损失，减小压降。

4. 结论

通过对某款横管降膜蒸发器用的布液器进行建模仿真分析，研究不同结构参数对中间进液的布液器布液均匀性的影响，得到结论如下：

- 1) 布液器入口附近存在流量突然减小的现象, 沿着布液器流动方向, 两侧的流量曲线具有对称特征。
- 2) 不同的底角会对布液器的整体布液均匀性产生很大影响, 采用较大的底角可以增加布液器的整体布液均匀性, 同时获得相对较小的压降。
- 3) 布液器的布液均匀性会随着小孔距侧边距离的减小得到很大程度改善, 小的侧边距离也有助于压降的减少。
- 4) 增大入口直径可以改善中间进液布液器进口处的流量突减现象, 同时得到较小的阻力损失, 获得较小的布液器压降。

参考文献

- [1] 王学会, 袁晓蓉, 等. 制冷用水平降膜式蒸发器研究进展[J]. 制冷学报, 2014, 35(2): 19-29.
- [2] 郭磊, 李敏霞, 等. 制冷系统用新型水平管降膜蒸发[J]. 化工学报, 2013, 64(11): 3895-3901.
- [3] 李伟, 朱曼丽, 等. 水平管降膜蒸发器的液体分布器设计及传热性能研究进展[J]. 现代化工, 2017, 37(7): 54-59.
- [4] 孙会朋. 水平管降膜蒸发器液体分布装置与蒸发传热性能的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2007.
- [5] Mu, X., Shen, S., Yang, Y. and Liu, X. (2012) Experimental Study of Falling Film Evaporation Heat Transfer Coefficient on Horizontal Tube. *Desalination and Water Treatment*, **50**, 1-3, 310-316.
<https://doi.org/10.1080/19443994.2012.719734>
- [6] Rautenbach, R. and Arzt, B. (1981) Large Scale Diesel Driven Vapor Compression Units. *Desalination*, **38**, 75-84.
[https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)86050-6](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)86050-6)
- [7] 史晓平. 竖管降膜蒸发器的布料装置[J]. 化学工程, 1990, 30(4): 14-18.
- [8] 赵斌, 张及瑞, 赵景利. 降膜蒸发器筛板式液体分布装置的实验研究[J]. 海湖盐与化工(现《盐业与化工》), 2005, 34(4): 12-14.
- [9] 何茂刚, 王小飞, 张颖. 制冷用水平管降膜蒸发器的研究进展及新技术[J]. 化工学报, 2008, 59(S3): 23-28.
- [10] 包琳琳, 欧阳新萍. 制冷用水平管降膜蒸发研究进展及一种新型布液器[J]. 能源研究与信息, 2015, 31(2): 63-68.
- [11] 刘家瑞, 赵巍. 板壳式换热器板程流量分布特性的模拟与优化[J]. 热能动力工程, 2016, 31(5): 7-15.
- [12] 李珍. 换热器设备的建模与仿真[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2013.
- [13] 何嘉. 多分支并联管路流量分配机理及算法的数值研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
- [14] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学社, 2004: 113-126.