

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.01.007

# 水平管降膜蒸发器管外膜状流流动特征研究

吕彤, 李庆生

(南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏南京 211816)

**摘要:**为了探究水平管降膜蒸发器管外液膜分布的优劣对其传热性能的影响,课题组建立了水平管三维模型对管外膜状流流动进行数值模拟,得到液膜沿水平管轴向和周向的分布规律,并对膜厚波动幅度 $\Delta$ 进行研究;分析了流量、布液高度及管外径对管外液膜厚度的影响。结果表明:当周向角度一定时,液膜厚度沿水平管轴向小幅波动;膜厚波动幅度 $\Delta$ 在 $\theta$ 为 $10^\circ \sim 20^\circ$ 时逐渐减小,其最大值为0.168 62;在 $\theta$ 为 $150^\circ \sim 170^\circ$ 时逐渐增大,其最大值为0.362 91;当 $\theta$ 为 $20^\circ \sim 150^\circ$ 时,膜厚波动幅度 $\Delta < 0.075 00$ ,液膜流动呈现平稳发展的趋势。研究表明液膜沿水平管周向流动可划分为3个区域: $\theta$ 为 $10^\circ \sim 20^\circ$ 时为冲击区, $\theta$ 为 $20^\circ \sim 150^\circ$ 时为稳定区, $\theta$ 为 $150^\circ \sim 170^\circ$ 时为尾流区。液膜厚度随流量的增大而增大,随布液高度和管外径的增大而减小。

**关键词:**水平管降膜蒸发器;膜状流;液膜厚度;布液高度

中图分类号:TK172

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2020)01-0035-06

## Study of Sheet-Flow Characteristics Outside Tube of Horizontal Tube Falling Film Evaporator

LÜ Tong, LI Qingsheng

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Technology University, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of outer liquid film distribution of the horizontal tube falling film evaporator on its heat transfer performance, a three-dimensional model was established to numerically simulate the sheet-flow outside the tube of horizontal tube falling film evaporator. The distribution law of liquid film along the horizontal tube in axial and circumferential directions was obtained, and the fluctuation amplitude of film thickness was studied. The effects of flow rate, distribution height and outer diameter of tube on the film thickness outside the horizontal tube were analyzed. The results show that when the circumferential angle is constant, the liquid film thickness slightly fluctuates along the axial direction of the horizontal tube. The fluctuation amplitude of film thickness decreased gradually at  $\theta = 10^\circ \sim 20^\circ$  and increased at  $\theta = 150^\circ \sim 170^\circ$ , with the maximum value of 0.168 62 and 0.362 91 respectively. When  $\theta = 20^\circ \sim 150^\circ$ , the fluctuation amplitude of film thickness is less than 0.075 00, and the liquid film flow showed a steady development trend. The circumferential flow of the liquid film along the horizontal tube can be divided into three zones: the impact zone at  $\theta = 10^\circ \sim 20^\circ$ , the stable zone at  $\theta = 20^\circ \sim 150^\circ$  and the wake zone at  $\theta = 150^\circ \sim 170^\circ$ . The liquid film thickness increases with the increase of flow rate and decreases with the increase of distribution height and outer diameter.

**Keywords:** horizontal tube falling film evaporator; sheet-flow; liquid film thickness; liquid film distribution height

水平管降膜蒸发技术自1888年出现以来,广泛应用于海水淡化、制冷等领域<sup>[1-2]</sup>。水平管蒸发器工作时,管外工质流经换热管,液膜过薄会出现断流现象,液膜过厚则会导致传热效果恶化。研究管外液膜分布

对提高蒸发器性能具有重要意义。

Nusselt<sup>[3-4]</sup>通过理论推导,得到液膜厚度沿周向分布的经典理论公式。罗林聪<sup>[5]</sup>通过二维数值模拟研究了不同形态的蛋形管的管外降膜流动过程,并与圆

收稿日期:2019-07-25;修回日期:2019-10-15

第一作者简介:吕彤(1995),男,辽宁盖县人,硕士研究生,主要研究方向为高效传热传质设备。通信作者:李庆生(1969),男,江苏盐城人,硕士,副教授,主要从事过程设备结构强度及高效传热传质性能研究。E-mail:lqsh@njtech.edu.cn

管比较分析,发现蛋形管管外液膜较圆管更薄。Ji等<sup>[6]</sup>建立了二维模型,以溴化锂为工质模拟了不同喷淋密度和表面湿润程度下水平管外降膜流动,发现液体速度随壁面接触角增大而减小,液膜厚度受壁面接触角的影响较小;但二维模拟只能得到液膜沿周向的分布,无法研究液膜轴向的分布,三维数值模拟则克服这一缺点。陈敬东<sup>[7]</sup>以水和溴化锂为工质,采用三维数值模拟方法对降膜流动过程进行模拟,得到多种管间流动形态,并与实验结果对比,发现二者吻合良好。Qiu等<sup>[8]</sup>以水和乙二醇为工质,以三维模拟的方式得到顺排和叉排2种柱状流流型,并研究了2种柱状流型下液膜厚度的分布特征。朱晓静等<sup>[9]</sup>将模拟结果与实验进行对比,发现水平管外液膜的不对称性,且管底部可能出现干斑。孟垂举<sup>[10]</sup>研究了顺排和叉排柱状流下,液膜的铺展及液膜厚度和速度的关系。宋小曼等<sup>[11]</sup>采用旋转三角布管方式,对管外液膜的成膜效果进行模拟研究,发现较小的流量有助于减小液膜厚度但不利于成膜;管间距对液膜厚度影响较小但不利于成膜。张睿航等<sup>[12]</sup>以溴化锂溶液为工质,实验观测到了不同的管间流型并研究了改变参数对流型的影响,结果表明:略微改变管间距会使当前管间流型向上一级过渡。陈学<sup>[13]</sup>采用高速摄像机拍摄了水平管外降膜流动过程,观察到多种不同管间流型,并以纯水和海水为工质进行液膜厚度测量实验,发现液膜厚度随雷诺数的增大而增大,随管间距的减小而减小,在相邻2液柱之间达到最大。何茂刚等<sup>[14]</sup>采用荧光诱导法测量了液膜厚度,发现换热管上半周的液膜厚度要大于换热管下半周的液膜厚度,且在 $90^\circ \sim 120^\circ$ 范围内出现最小值。Zheng等<sup>[15]</sup>以不同亲水的换热管进行降膜流动实验,发现亲水性的对管间流型的影响小。Hou等<sup>[16]</sup>使用位移测微仪测量了水平管外液膜厚度,结果表明管径对液膜厚度的影响较小,管间距和周向角度对液膜厚度的影响较大。

当前学者对水平管降膜蒸发器的研究多集中于柱状流流型,而对膜状流流型研究较少,课题组建立了水平管三维物理模型,对水平管降膜蒸发器管外膜状流流动进行数值模拟,分析流量、布液高度及管外径对水平管外液膜厚度的影响,为水平管降膜蒸发器管外液膜优化分布提供参考。

## 1 数值模拟方法

### 1.1 物理模型

图1所示为水平管外膜状流降膜流动示意图。如图示,水平管垂直布液器下方,布液器底部开

设 $50\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的长方孔,工质由长方孔中流出,在重力的作用下自由下落接触到水平管管顶,沿管外壁铺展并在管外形成液膜,为简化模型,选取水平管轴向长度 $Z=0 \sim 10\text{ mm}$ 的区域作为研究区域,研究区域包括长方孔及水平管。其中 $Q$ 为流量; $V_0$ 为工质进口速度; $D$ 为水平管外径; $H$ 为布液高度。模拟参数如表1所示。

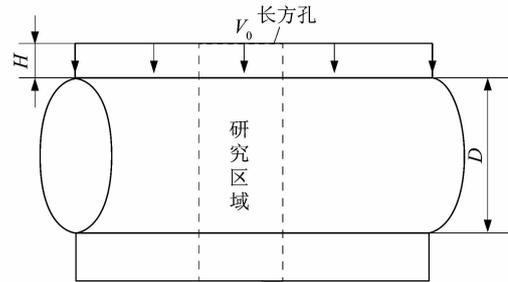


图1 水平管外膜状流降膜流动示意图

Figure 1 Flow diagram of sheet-flow outside horizontal tube

表1 模拟参数

Table 1 Simulation parameters

流量 $Q/(L \cdot h^{-1})$	布液高度 $H/\text{mm}$	管外径 $D/\text{mm}$
240	10	19
270	15	25
300	20	32
360		

### 1.2 基本假设及工质物性

模拟中工质选择饱和水及饱和水蒸气,流动时压力为饱和蒸气压,假设初始状态速度入口充满水,其余区域充满水蒸气,不考虑相变及传热,流动过程中水的物理性质不变,考虑到水平管降膜蒸发器液膜在热态下流动,选取 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 水为工质,工质物性参数由文献[17]查得,如表2所示。

表2 工质物性参数

Table 2 Physical parameters of working fluid

工质	温度 $T/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	动力黏度 $\mu \times 10^{-5}/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	表面张力 $\sigma/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
饱和水	60	983.100 0	46.990 0	0.066 22
饱和水蒸气	60	0.130 2	1.042 4	

### 1.3 网格划分及边界条件

采用ICEM软件建立物理模型,对计算区域进行网格划分,为获得高质量网格对近壁面区域采用O型剖分。为减少网格数量的同时保证计算结果的准确

性,对工质流经区域进行加密处理。计算区域边界条件设置如下:①长方孔设置为 velocity-inlet;②顶部和侧面设为 pressure-inlet;③底部设为 pressure-outlet;④换热管外壁设为 stationary Wall,并设置壁面接触角为  $0^\circ$ ;⑤其余边界设置为 symmetry。三维网格模型如图 2 所示。

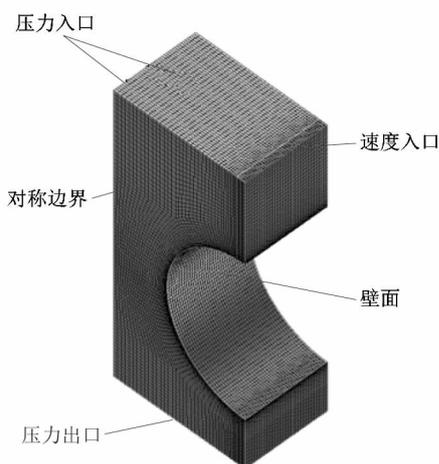


图 2 三维网格模型

Figure 2 Three-dimensional grid model

#### 1.4 算法设置

选择 FLUENT 软件中 3D 瞬态求解器进行计算,采用 VOF 算法捕捉气液相界面,计算过程中考虑重力影响,并选用计算精度较高的几何重构法 (Geo-Reconstruct) 进行计算;动量离散选择二阶迎风格式求解;压力-速度耦合选择 PISO 算法;压力离散选择 PRESTO! 格式;选择 CSF 模型为表面张力模型。

### 2 模型验证

#### 2.1 数值计算方法验证

根据表 3 中的相关参数建立模型进行数值模拟<sup>[18]72</sup>,得到液膜厚度并将本文模拟值与文献[18]实验值进行验证,如图 3 所示。

表 3 文献参数

Table 3 Literature parameters

温度/ $^\circ\text{C}$	管径 $\varnothing$ /mm	管间距/mm	流量/( $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ )	工质
25	25.4	25.0	250	水-空气

图 3 给出了模拟值与文献实验值的验证结果,本文模拟值与文献实验值最大误差为 6.91%,平均误差为 5.33%,考虑研究区域简化、物性参数假设及边界条件设置与文献实验工况存在差异,故认为二者吻合较好,课题组采用的数值模拟方法可靠。

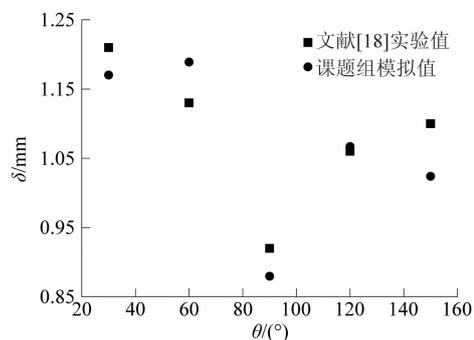


图 3 液膜厚度验证

Figure 3 Liquid film thickness verification

#### 2.2 网格独立性验证

为验证网格独立性,取水平管管外径  $D = 25 \text{ mm}$ 、布液高度  $H = 10 \text{ mm}$  建立物理模型,采用不同的单元尺寸对模型进行划分,得到 4 组网格数,分别为 114 179, 223 691, 407 962 和 516 364。当水的流量  $Q = 240 \text{ L/h}$  时,4 种模型网格数对液膜厚度的影响如图 4 所示。

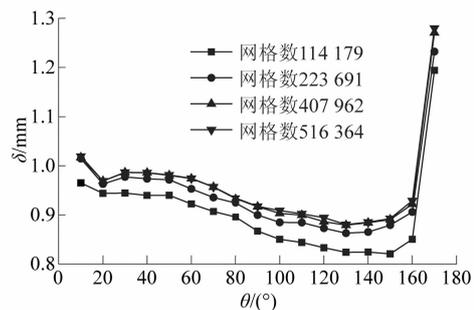


图 4 网格数对液膜厚度的影响

Figure 4 Effect of grid number on liquid film thickness

由图 4 可知,网格数为 114 179 和 223 691 的模型计算结果与另外 2 组模型相差较大,考虑缩短计算时间同时保证精度,选择网格数为 407 962 模型的网格尺寸进行划分,总体网格尺寸设置为  $0.3 \text{ mm}$ ,近壁面处进行加密处理,添加 15 层网格,其中第 1 层高度为  $0.01 \text{ mm}$ ,增长比率设置为 1.2,网格跨度较大位置做渐变处理。

### 3 数值模拟结果及分析

#### 3.1 液膜流动及液膜分布

以  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  水为工质,选取  $Q = 240 \text{ L/h}$ ,  $D = 25 \text{ mm}$ ,  $H = 10 \text{ mm}$  进行模拟,得到液膜沿轴向和周向铺展的液膜厚度分布,水平管外膜状流流动过程如图 5 所示,液膜厚度轴向及周向分布如图 6 及图 7 所示。

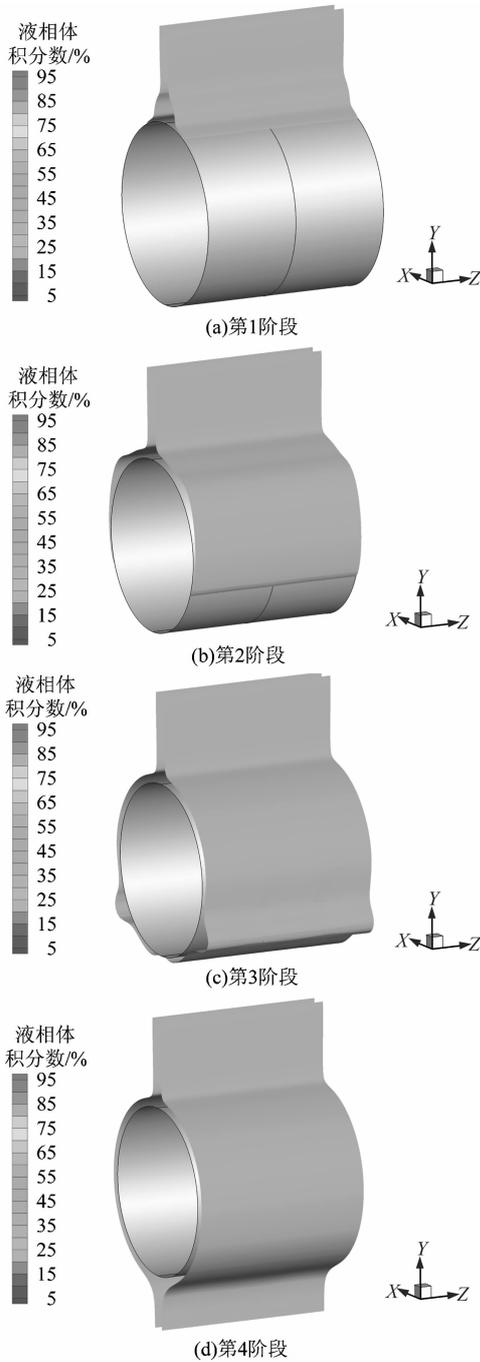


图5 水平管外膜状流流动过程  
Figure 5 Flow process of sheet-flow outside horizontal tube

图5所示为水平管外膜状流流动过程。管外液膜的流动形态随时间的推移不断变化,分为4个阶段:第1阶段水以膜状从长方孔中流出,受重力作用做自由落体运动直至接触水平管管顶,之后在重力和表面张力的作用下沿管外壁铺展;第2阶段液膜继续沿管外壁铺展,膜状流体的冲击作用将管顶堆积的液体不断冲下,管顶附近区域液膜出现明显的“褶皱”;第3阶

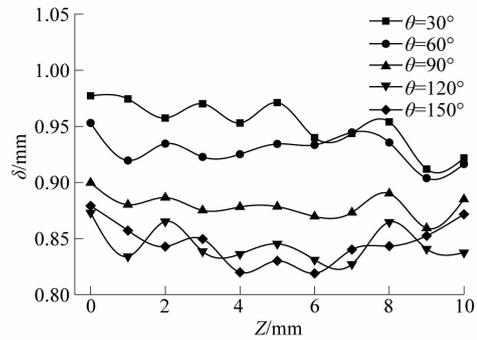


图6 轴向液膜厚度分布  
Figure 6 Axial liquid film thickness distribution

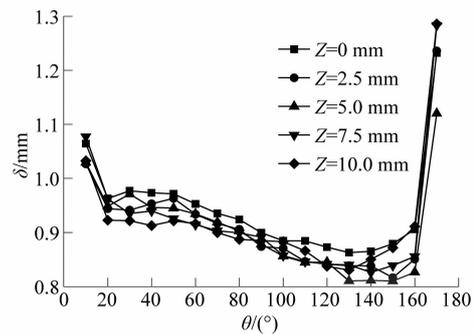


图7 周向液膜厚度分布  
Figure 7 Circumferential liquid film thickness distribution

段液膜已完成沿管外壁的铺展并在管底发生汇聚,管底附近区域液膜波动剧烈;第4阶段液膜在管底汇聚完成,形成流动稳定的液膜。

图6所示为管外为膜状流,周向角度 $\theta$ 为 $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ 和 $150^\circ$ 时液膜厚度沿水平管轴向分布规律。由图可知,当周向角度一定时,液膜厚度沿水平管轴向 $Z$ 在 $0 \sim 10$  mm范围小幅波动。

图7所示为管外为膜状流时,液膜厚度沿水平管周向分布规律,由图可知,液膜厚度在 $\theta = 10^\circ \sim 20^\circ$ 时快速减小,在 $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$ 时略有上升,在 $\theta = 30^\circ \sim 140^\circ$ 时缓慢减小,在 $\theta > 140^\circ$ 后显著增大。其中当周向角度 $\theta$ 为 $10^\circ$ 和 $170^\circ$ 时的液膜厚度明显大于其它周向角度下的液膜厚度。这是因为管外液膜冲击管顶时,速度骤降引起液体堆积导致液膜厚度增大,而管底区域液膜有脱落管壁的倾向,故液膜厚度再次增大。

由于液膜厚度沿轴向和周向分布存在波动,为了研究液膜的波动幅度,引入无量纲膜厚波动幅度

$$\Delta = \left| \frac{\delta - \bar{\delta}}{\bar{\delta}} \right|。$$

式中: $\delta$ 为液膜厚度,mm; $\bar{\delta}$ 为平均液膜厚度,mm。

图8所示为周向膜厚波动幅度分布规律,由图可知,膜厚波动幅度在 $\theta = 10^\circ \sim 20^\circ$ 时减小,最大波动幅度 $\Delta = 0.16862$ ;在 $\theta = 150^\circ \sim 170^\circ$ 时增大,最大波动幅度为 $0.36291$ ;在 $\theta = 20^\circ \sim 150^\circ$ 时的波动幅度 $\Delta < 0.07500$ ,呈现平稳发展的趋势。综上所述将液膜沿周向的铺展划分为3个区域: $\theta = 10^\circ \sim 20^\circ$ 为冲击区, $\theta = 20^\circ \sim 150^\circ$ 为稳定区, $\theta = 150^\circ \sim 170^\circ$ 为尾流区。

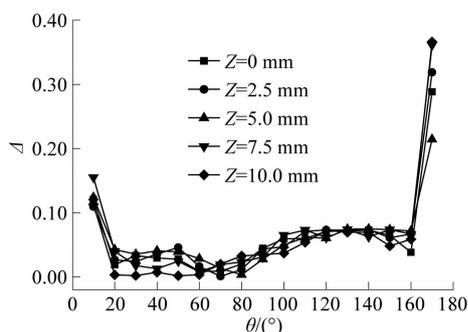


图8 周向膜厚波动幅度分布

Figure 8 Film thickness fluctuation distribution along circumferential direction

为了进一步研究膜状流型下液膜的流动特征,选取 $Z = 0$  mm截面对液膜的速度进行分析。图9所示为 $Z = 0$  mm截面上,周向角度变化时,液膜厚度与液膜速度曲线图。考虑到管外液膜对管顶区域的撞击和管底区域液膜的脱落对流动的影响,取周向角度变化范围为 $20^\circ \sim 150^\circ$ 。由图9可知,液膜厚度和速度二者呈现相反的趋势,液膜厚度随周向角度的增大先增大后减小,而后趋于平稳;液膜速度随周向角度的增大先减小后增大,而后趋于平稳。分析后认为液膜携带一定初速度冲击管顶导致速度降低,在重力分力的作用下液膜沿管壁铺展,同时液膜铺展过程中各阻力作用造成能量损耗增大,故液膜速度趋于平稳甚至略有下降。

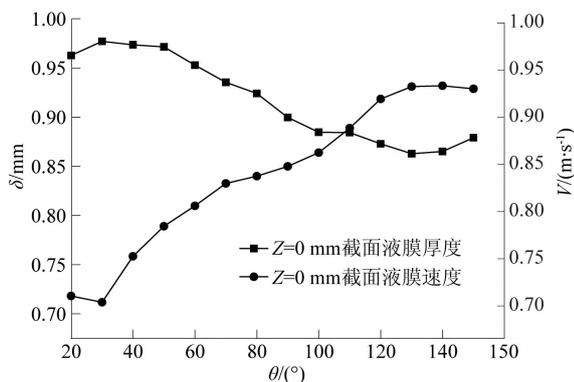


图9 液膜厚度与液膜速度曲线

Figure 9 Curve of liquid film thickness and velocity

### 3.2 流量对液膜厚度的影响

以 $60^\circ\text{C}$ 水为工质,分别取 $Q = 240, 270$ 和 $300$  L/h, $D = 25$  mm, $H = 10$  mm,分析流量对液膜厚度的影响。

图10所示为流量对液膜厚度的影响。由图可知,液膜厚度随流量的增大而增大。分析后认为流量直接关联液体的喷淋初速度 $V_0$ ,当流量增大时,喷淋初速度 $V_0$ 也随之增大,单位时间内会有更多的液体喷淋在水平管表面,导致液膜厚度增大。

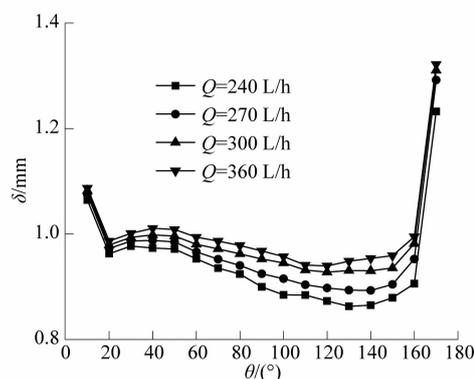


图10 流量对液膜厚度的影响

Figure 10 Effect of flow rate on liquid film thickness

### 3.3 布液高度对液膜厚度的影响

以 $60^\circ\text{C}$ 水为工质,分别取 $Q = 240$  L/h, $D = 25$  mm, $H = 10, 15$ 和 $20$  mm,分析布液高度对液膜厚度的影响。

图11所示为布液高度对液膜厚度的影响。由图可知,液膜厚度随着布液高度的增大而减小。分析后认为,不同布液高度下液体到达水平管管顶的速度不同,布液高度越大,液体到达水平管管顶的速度越大,从而产生的冲击作用就越强。这种冲击作用加快了液膜的流动,导致液膜厚度减小。此外发现,当 $H = 20$  mm时在周向铺展区内管外液膜厚度的分布更加均匀,这也是冲击作用增强的体现。

### 3.4 管外径对液膜厚度的影响

以 $60^\circ\text{C}$ 水为工质,分别取 $Q = 240$  L/h, $D = 19, 25$ 和 $32$  mm, $H = 10$  mm,分析管外径对液膜厚度的影响。

图12所示为管外径对液膜厚度的影响。由图可知,液膜厚度随管外径的增大而减小。分析后认为,管外径的增大导致任意周向截面周长增加,液膜需要沿周向铺展更长的距离,故阻力作用的时间更长;同时管外径增大也导致液膜铺展面积的增大,而流量并未改变,所以液膜厚度随管外径的增大而减小。

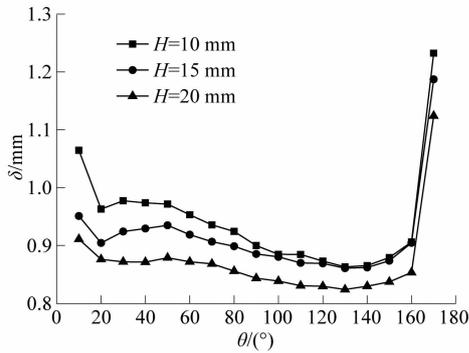


图 11 布液高度对液膜厚度的影响  
Figure 11 Effect of distribution height on liquid film thickness

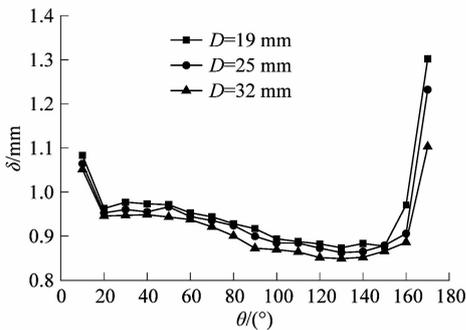


图 12 管外径对液膜厚度的影响  
Figure 12 Effect of outer diameter on liquid film thickness

#### 4 结论

课题组建立水平管三维模型,采用 FLUENT 软件模拟了管外膜状流下水平管降膜流动过程,分析了轴向和周向的液膜厚度分布及流量、布液高度、管外径对液膜厚度的影响,得到以下结论:

1) 周向角度一定时,液膜厚度沿水平管轴向不断波动。液膜厚度在  $\theta = 10^\circ \sim 20^\circ$  时快速减小,后在  $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$  略有上升,在  $\theta = 20^\circ \sim 140^\circ$  时持续减小,在  $\theta \geq 140^\circ$  后增大。其中周向角度  $\theta$  为  $10^\circ$  和  $170^\circ$  时的液膜厚度明显大于其它周向角度下液膜厚度。

2) 膜厚波动幅度在  $\theta = 10^\circ \sim 20^\circ$  时减小,其最大值为 0.168 62;在  $\theta = 150^\circ \sim 170^\circ$  时增大,其最大值为 0.362 91;在  $\theta = 20^\circ \sim 150^\circ$  时的波动幅度  $\Delta < 0.075 00$ ,呈现平稳发展的趋势。液膜沿管周向的铺展可划分为:冲击区、稳定区、尾流区 3 个区域。

3) 在  $Z = 0$  mm 截面上, $\theta = 20^\circ \sim 150^\circ$  时,液膜厚度随周向角度的增大先增大后减小,而后趋于平稳;液膜速度随周向角度的增大先减小后增大,而后趋于平稳。

4) 液膜厚度随流量的增大而增大,随着布液高度的增大而减小。 $H = 20$  mm 时,在周向铺展区内,水平管外液膜厚度分布相对于其他管间距下管外液膜厚度的分布要更加均匀;液膜厚度随管外径的增大而减小。

#### 参考文献:

[1] RIBATSKI G, JACOBI A M. Falling-film evaporation on horizontal tubes: a critical review [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(5): 635 - 653.

[2] MOHAMED A M I. Flow behavior of liquid falling film on a horizontal rotating tube [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, 31(4): 325 - 332.

[3] NUSSELT W. Die oberflächenkondensation des wasserdampfes [J]. Zeitschr Ver Deut Ing, 1916, 60(4): 569 - 575.

[4] NUSSELT W. Die heat exchange in the falling film cooler [J]. Zeitschr Ver Deut Ing, 1923, 67(4): 206 - 210.

[5] 罗林聪. 水平异形管降膜蒸发流动与传热强化机理及实验研究 [D]. 济南: 山东大学, 2014: 64.

[6] JI Ge, WU Jiafeng, CHEN Yaping, et al. Asymmetric distribution of falling film solution flowing on hydrophilic horizontal round tube [J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 78: 83 - 92.

[7] 陈敬东. 水平管降膜流动形态的数值模拟 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2014: 57.

[8] QIU Qinggang, ZHANG Xiaocui, QUAN Shenglin, et al. 3D numerical study of the liquid film distribution on the surface of a horizontal-tube falling-film evaporator [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 124: 943 - 952.

[9] 朱晓静, 邱庆刚, 权生林, 等. 水平管降膜蒸发器液膜厚度周向分布研究 [J]. 太阳能学报, 2016, 37(12): 3208 - 3213.

[10] 孟垂举. 水平管外降膜蒸发传热与流动特征的三维数值研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018: 43.

[11] 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.

[12] 张睿航, 陈敬东, 牛润萍. 影响水平降膜管间流态因素的实验研究 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(6): 43 - 47.

[13] 陈学. 水平管外海水降膜流动与蒸发传热过程研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015: 28.

[14] 何茂刚, 范华亮, 王小飞, 等. 水平管外降膜流动的膜厚测量和数值模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(9): 1 - 5.

[15] ZHENG Yi, MA Xuehu, LI Yun, et al. Experimental study of falling film evaporation heat transfer on superhydrophilic horizontal-tubes at low spray density [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111: 1548 - 1556.

[16] HOU Hao, BI Qincheng, MA Hong, et al. Distribution characteristics of falling film thickness around a horizontal tube Author links open overlay panel [J]. Desalination, 2012, 285: 393 - 398.

[17] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 563.

[18] 郭斌, 李会雄, 郭笃鹏. 水平管外液膜厚度测量及分析 [J]. 工程热物理学报, 2011, 32(1): 71 - 74.