

溢流式布膜铝板液膜厚度和润湿特性实验研究

万智华^{1,2}, 厉彦忠¹, 苏长满²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 江苏建筑职业技术学院建筑智能学院, 221116, 江苏徐州)

摘要: 为了探索高雷诺数($Re > 700$)时平板降膜厚度规律和溢流式布膜方式下的润湿特性, 设计并搭建了垂直铝板降膜实验台, 采用电容测厚技术测量了 Re 为 660~1 390 时冷态水膜瞬时厚度的变化情况。利用文献数据着重分析了流动长度和 Re 对平均液膜厚度的影响, 并通过图像处理法计算了加湿过程的润湿面积。实验结果表明: 在研究工况范围内, 随着 Re 的增大, 液膜厚度的最大值、最小值、平均值、标准偏差、波动振幅均存在上升趋势; 不同流动长度处液膜厚度存在较大差异, 拟合出流动长度 L 为 0.43 m 处的平均液膜厚度的经验关联式, 计算值和实验值的相对误差控制在 $\pm 6\%$ 范围内; 层流向紊流转换的临界 Re 约为 500, 临界 Re 之后的平均液膜厚度随 Re 的增长速率要高于之前的; 在 Re 为 15~200 时, 润湿比随着 Re 增加呈现波动增大的趋势, 预测平板最小润湿流量约为 0.27。

关键词: 降膜; 竖直平板; 液膜厚度; 润湿; 溢流式; 分布器

中图分类号: TB657.5; TK124; TQ051.6 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202004005 **文章编号:** 0253-987X(2020)04-0035-09



OSID 码

Experimental Study on Thickness and Wetting Characteristics of Liquid Film on Aluminium Plate with Overflow Type Distributor

WAN Zhihua^{1,2}, LI Yanzhong¹, SU Changman²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Institute of Building Intelligence, Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: A test rig based on falling film on the vertical aluminium plate is designed and built to obtain the film thickness characteristics under high Reynolds number ($Re > 700$) on the plate and the wetting properties with overflow type distributor. The instantaneous film thickness of cold water without heating is measured by the capacitance probe technology under Re ranging from 660 to 1 390. Effects of flow length and Re on the average film thickness are emphatically analyzed by comparing with literature data. The wetted area in wetting process is measured by the image processing technology. Experimental results show that the maximum value, minimum value, mean value, standard deviation and fluctuation amplitude of liquid film thickness all show an upward trend with the increase of Re within the studied Re conditions. The thickness of liquid film varies greatly at different flow lengths. An empirical correlation of average liquid film thickness at flow length 0.43 m is obtained by fitting, and the relative errors between the calculation formula and the experimental data are controlled within $\pm 6\%$. Moreover, the critical

收稿日期: 2019-09-04。 作者简介: 万智华(1990—),男,博士生;厉彦忠(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 江苏省住房和城乡建设厅科技计划资助项目(2016ZD56)。

网络出版时间: 2020-01-09

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200109.1049.004.html>

Re under which the flow patterns transform from laminar flow to turbulent flow is about 500. After the critical Re , the average liquid film thickness increases with the increase of Re at a higher rate than those before the critical Re . When Re is in the range from 15 to 200, the wetting ratio fluctuates and increases with the increase of Re . The minimum wetting rate of the aluminium plate is predicted about 0.27.

Keywords: falling film; vertical plate; film thickness; wetting; overflow; distributor

竖直平板降膜蒸发作为一种高效的强化传热技术,由于传热温差小、换热效率高,已经被广泛应用于核电站反应堆冷却、物料处理、空调制冷等领域。液膜厚度是对流传热的一个重要影响因素,因此,研究液膜厚度特性成为研究降膜流动和换热机理的基础。1916年,Nusselt最早开始了光滑层流液膜的理论研究,忽略了界面波动和相界面切应力的作用,得到了经典的光滑层流液膜厚度计算关系式^[1]。随后,许多学者在此基础上开展了平板降膜厚度的研究。在垂直壁面或者倾斜壁面上,降膜流动状态根据液膜雷诺数 Re 的不同,可以粗略地划分为3种状态:①在 $Re < 5 \sim 7.5$ 时,为表面光滑的层流,此时液膜厚度不随时间变化;②在 $50 < Re < 250 \sim 500$ 时,为过渡状态的波动层流;③当 $Re > 250 \sim 500$ 时,为液膜表面呈现剧烈波动的紊流^[2]。此外,Lu等将水在竖直平板上详细划分为层流($Re < 7$)、正弦波状流($7 < Re < 12$)、稳定波状层流($12 < Re < 385$)、过渡紊流($385 < Re < 869$)、紊流($Re > 869$)5种状态^[3];袁猛等研究了水在 $Re = 30 \sim 200$ 时的两种不同微结构铝板液膜厚度分布规律^[4];暴凯等实验研究了 $Re < 250$ 不同倾斜角对水膜厚度的影响^[5];于意奇等研究了两种不同结构尺寸的不锈钢板上水膜厚度规律,并归纳了已有平板液膜厚度研究的文献^[6-8]。上述研究得到了一些瞬时、最大、最小、平均液膜厚度和液膜流速等流动特性规律,但大多数研究工况集中在层流至过渡紊流之间($Re < 700$),对于紊流区间的平板降膜厚度规律的研究不足。

另外一方面,如果降膜换热器壁面未完全润湿,壁面的传热性能将会急剧恶化,甚至造成换热器的破坏,因此降膜换热器壁面上的润湿特性也是学者们的重点研究对象。最小润湿流量 R_{MW} 是指当壁面被完全润湿的临界单位湿周流量。测量最小润湿流量有两种方法:一种是加湿过程,即液膜流量逐渐增大到壁面全部润湿时的临界流量;另一种是减湿过程,即开始壁面被全部润湿,逐渐减小液膜流量,当液膜出现破断时的临界流量。研究发现,加湿过

程的最小润湿流量要大于减湿过程的,该现象称为滞后现象^[3]。Hartley 和 Murgatoroyed 于 1964 年最早采用力平衡模型理论研究最小润湿流量,指出润湿过程发生在当液膜波动产生的动压超过表面张力产生的牵制力时,并得到了最小润湿流量的关联式^[9]

$$R_{MW} = 1.69(1 - \cos\theta)^{0.6} Ka^{-0.2} \mu \tag{1}$$

式中: θ 为接触角; $Ka = gu^4/(\rho\sigma^3)$ 为 Kapitza 数。由上述最小润湿流量经验关联式可知,降膜的润湿特性主要受到液体物性(如溶液浓度、温度、黏度等)和接触角(如壁面粗糙度、壁面涂层、润湿情况等)的影响。目前,在已有的公开文献中,大多为不锈钢板上的润湿特性研究。水在不锈钢表面的静态接触角为 70° ^[10]、 88° ^[11]、 78.5° ^[3],而水在铝板接触角为 92.5° ^[12]。接触角的差异会导致铝板上的润湿性能与不锈钢的存在差异。文献[12]通过实验方法研究了打孔式布膜方式下竖直铝板的降膜润湿特性,而对于铝板采用溢流式布膜方式的润湿特性研究尚存在空白。

本文主要研究了常温常压下的水在溢流式布膜铝板上的降膜厚度和润湿特性,运用高精度的电容测微仪测量了液膜的厚度,同时采用拍摄和图像处理技术计算了液膜的润湿面积情况,并将实验结果和文献中的实验结果进行了对比分析。

1 实验系统和测量方法

1.1 实验装置

图 1 为实验回路示意图。实验采用的工质为自

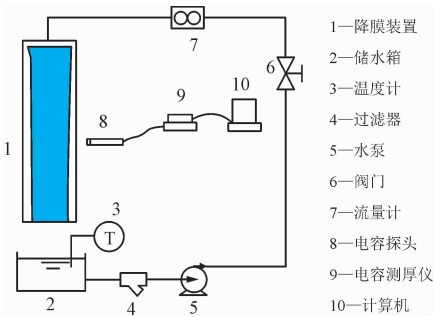
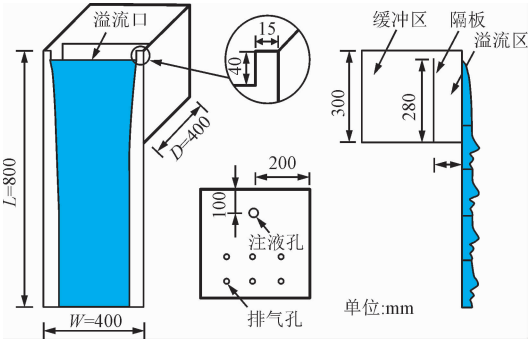


图 1 实验回路示意图

来水,水从下方的储水箱通过水泵的驱动,经过流量计的测量,进入降膜装置(如图 2 所示)。水从降膜装置溢流而出,最终重新流入储水箱当中。考虑到流量测量范围的不同,采用了一台质量流量计和一台涡轮流量计。进行液膜厚度测量时,采用的是涡轮流量计,型号为 BS-LWGY-C20L,测量范围为 $0 \sim 8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,测量精度为 $\pm 0.5\%$;进行润湿实验时,采用的是科式质量流量计,型号为 DL-010 FLC-CIASE,测量范围 $0 \sim 0.5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$,测量精度为 $0.1\% \sim 0.2\%$ 。



(a) 正视图 (b) 盖板俯视图 (c) 侧视图
图 2 降膜装置示意图

如图 2 所示,降膜装置为铝板焊接而成,由上方的水箱和竖直平板两部分组成。水箱的中间设置隔板,当液体水通过注液孔注入到水箱缓冲区后,液面表面会产生波动,该隔板起到了一定缓冲作用。通过溢流口的开口设置见图 2a,实际液膜流动区域面积仅为 $760 \text{ mm} \times 370 \text{ mm}$ 。

1.2 电容测厚技术

实验采用了电容测厚技术测量液膜厚度,测量仪器为天津大学生产的 JDC-2009 型精密电容测微仪。电容测微仪的原理是根据电容传感器输出的电压信号 V 与液膜厚度 δ 成比例,计算公式为

$$V = - (C_s V_s / \epsilon_0 S) \delta \tag{2}$$

式中: ϵ_0 为介电常数; S 为探头面积; C_s 和 V_s 为已知常数。图 3 为标定台和仪器实物图。为了确保测

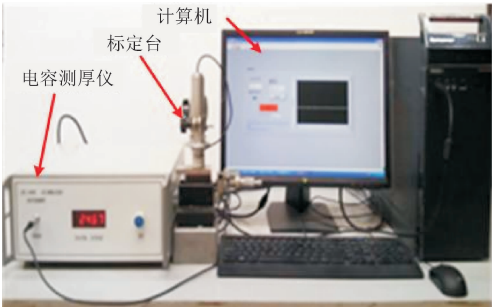


图 3 电容测微仪和标定台

厚的准确性,需要对电容测微仪进行标定。标定原理是在静止工况下,通过调整电容探头与被测物之间的间距,以模拟液膜的厚度。通过计算,标定曲线得到的测量距离与提升距离之间的关系如图 4 所示,在 1.2 mm 的厚度范围内,测量值与实际值偏差小于 $\pm 2\%$ 。说明电容测微仪具有较高的精度。

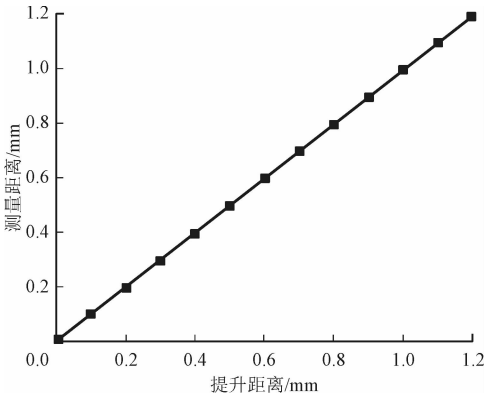


图 4 电容测微仪标定曲线

接触角是一个影响液膜润湿的重要参数。图 5 为德国 OCA50 型号的接触角测量仪,测量精度为 $\pm 0.1^\circ$ 。接触角不仅仅与液体物性和壁面材质有关,还与壁面的清洁程度有关。因此,进行接触角测量时,需要保证壁面的清洁。本文采用静态测量的方法,测量的结果如图 6 所示,测量水在铝板上的接触角 θ 约为 92.9° ,这与文献[12]的 92.5° 结果接近。

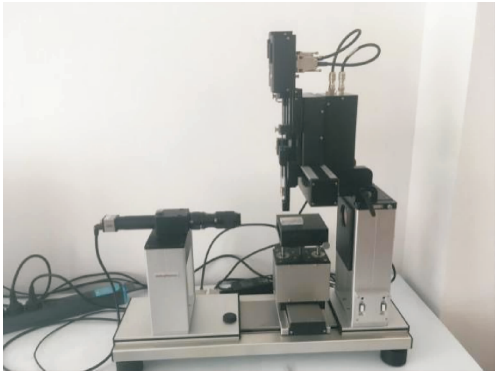


图 5 德国 OCA50 型号的接触角测量仪

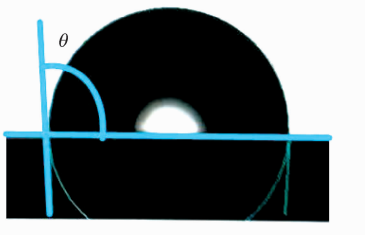


图 6 水在铝板上接触角测量结果

1.3 图像处理技术

为了便于观察和处理润湿面积,本实验在水中

加入了红墨水,由于红墨水的加入量非常小(体积分数为0.6%),因此可以忽略其对水的物性影响。采用相机(分辨率为 $1\,575 \times 2\,100$ 像素)记录液膜在平板上的分布情况。图7为 $Re=78$ 和 $Re=191$ 时拍摄的液膜分布情况,通过Image-Pro Plus 6.0图像二值化处理得到了黑白两色图。其中,黑色代表液膜,白色代表尚未润湿的壁面。通过计算黑色部分和整个区域的像素点,采用两个像素点之比即可得到润湿比 a 。

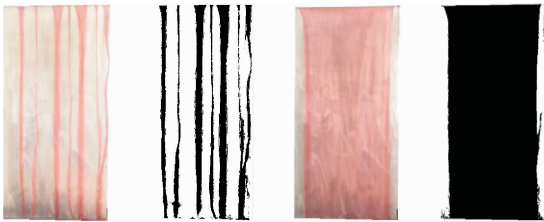
(a) $Re=78$ (b) $Re=191$

图7 液膜分布及黑白处理图

2 实验工况和评价参数

液膜流动的雷诺数定义式如下

$$Re = \Gamma / \mu \quad (3)$$

式中: μ 为水的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; Γ 为液膜的单位湿周流量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,定义如下

$$\Gamma = \dot{m} / W \quad (4)$$

式中: $\dot{m}$ 为质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; W 为润湿宽度(即湿周), m 。在本文中, Re 均采用入口湿周进行计算。

本实验在室温和大气压力条件下进行的,水温范围为 $20 \pm 2^\circ\text{C}$,水的密度为 $998.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,动力黏度为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}$,表面张力为 $72 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。厚度测量实验的 Re 范围为 $660 \sim 1\,390$,对于厚度测量实验,电容探头位于距离液膜入口长度(或称流动长度) $L=0.43 \text{ m}$ 的平板中间位置。润湿实验只研究了加湿的过程, Re 范围为 $15 \sim 200$ 。本文的润湿实验只研究了在干壁上的润湿过程,因此在每次润湿实验前,都需用干抹布擦干表面。当测量的瞬时流量随着时间围绕着平均值上下波动,且观察到液膜在壁面上的铺展情况不随时间变化时,即可进行工况数据的采集记录。

考虑到下降液膜厚度的随机性和波动性,因此需要采用统计的方法来描述液膜流动特性。常用的描述参数如下。

(1)平均液膜厚度 $\bar{\delta}$

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (5)$$

式中:电容测微仪的厚度输出频率为 10 Hz ,每组工况测量的时间为 60 s ,因此 $n=600$ 。

(2)液膜厚度的标准偏差 D_{ST}

$$D_{ST} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2}{n-1}} \quad (6)$$

(3)液膜厚度的概率分布函数 $p(\delta)$ 和概率密度函数 $p_{PD}^{[7]}$ 的表达式为

$$p(\delta) = \frac{N(\delta_i < \delta)}{n} \quad (7)$$

$$p_{PD} = \frac{dp(\delta)}{d\delta} \quad (8)$$

式中: $N(\delta_i < \delta)$ 代表液膜厚度小于 δ 的工况数量, $i=1,2,\dots,n$ 。

(4)润湿比

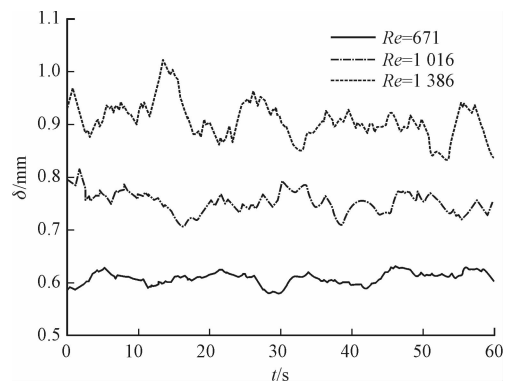
$$a = A_w / A \quad (9)$$

式中: A_w 为被润湿的面积; A 为整个平板的面积。

3 结果与讨论

3.1 瞬时液膜厚度

图8为 $Re=671, 1\,016, 1\,386$ 时随时间变化的瞬时液膜厚度,可以看出,液膜厚度是随时间波动的,且波形并不规则。定义液膜波动振幅 $h=\delta_{\max}-\delta_{\min}$, $\delta_{\max}$ 和 $\delta_{\min}$ 分别为最大和最小液膜厚度。 Re 为 $671, 1\,016, 1\,386$ 时的液膜波动振幅 h 分别为 $52.8, 108.2, 190.2 \mu\text{m}$,由此可知随着流量的增大,振幅逐渐增大,这个结果和文献[13]中的平板降膜结果刚好相反。这与研究的 Re 范围不同有关。文献[14]指出,当 $Re < 1\,000$ 时, $L < 500 \text{ mm}$ 内的液膜尚未产生大波,而当 $Re > 1\,000$ 时,即使在 $L=100 \text{ mm}$ 处的液膜也产生了大波,这种大波具有较高的振幅。文献[13]研究发现, $Re=32 \sim 706, L=233.5 \text{ mm}$ 时液膜表面波仍处于发展阶段。小流量时液膜具有足够的时间合并形成具有较大振幅的孤立波,

图8 3种不同 Re 下的瞬时液膜厚度

导致振幅较大,而当流量增大时,液膜还来不及充分发展,因此波动振幅会减小。在本文实验中, Re 为 1 016和1 386工况时,液膜表面开始出现了大波,导致液膜的波动振幅出现增大趋势。

图 9 给出了上述 3 种 Re 工况下的液膜厚度概率密度 F_{PD} 分布。由图 9 可见:概率密度分布呈现“山峰状”的对称分布;随着 Re 的增大,分布形状从“瘦窄型”逐渐变为“宽胖型”。曲线的底端宽度越大,反映了波动振幅越大^[15],进一步说明了波动振幅随 Re 增大而增大。

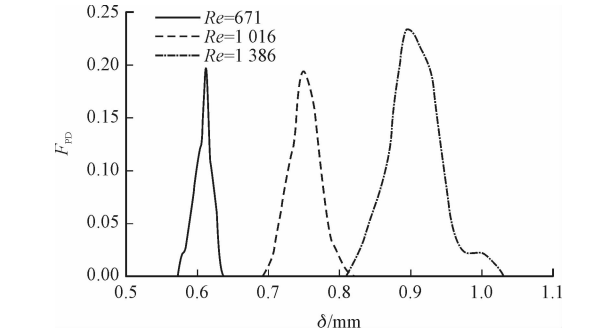


图 9 3 种不同 Re 下的液膜概率密度分布

表 1 为本文对比的有关文献液膜厚度测试的工况条件,表中的 Re 均为液膜入口雷诺数。文献[16]分别提出了 $\delta_{\max}$ 和 $\delta_{\min}$ 经验关联式

$$\delta_{\max} = 1.78 \times 10^{-5} Re^{0.68} + 4.54(g/\nu^2)^{-1/3} \quad (10)$$

$$\delta_{\min} = 4.54(g/\nu^2)^{-1/3} \quad (11)$$

式中: ν 为液相运动黏度, $m^2 \cdot s^{-1}$ 。

表 1 本文对比的文献中的测试工况

文献	结构	Re	流动长度 L/mm
文献[17]	平板	35~875	1 700
文献[16]	平板	25~500	1 600
文献[18]	管内	80~2 700	216~2 700
文献[14]	管外	150~2 000	100~1 700

图 10 和图 11 给出了采用本文方法与文献[16-

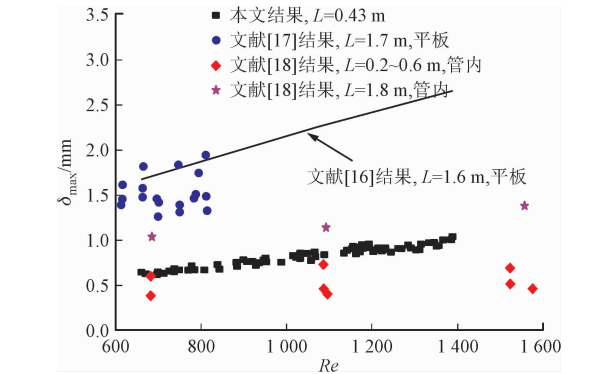


图 10 本文方法与文献方法的最大液膜厚度对比

18]方法的 最大液膜厚度和最小液膜厚度实验结果对比。文献[16-17]研究的是平板降膜,而文献[18]中研究的是管内降膜。本文的最大液膜厚度 $\delta_{\max}$ 要小于文献[16-17]中的结果,而最小液膜厚度 $\delta_{\min}$ 却相反。这与不同流动长度有关。本文流动长度 $L=0.43\text{ m}$,均小于文献[17]($L=1.7\text{ m}$)和文献[16]($L=1.6\text{ m}$)的流动长度。

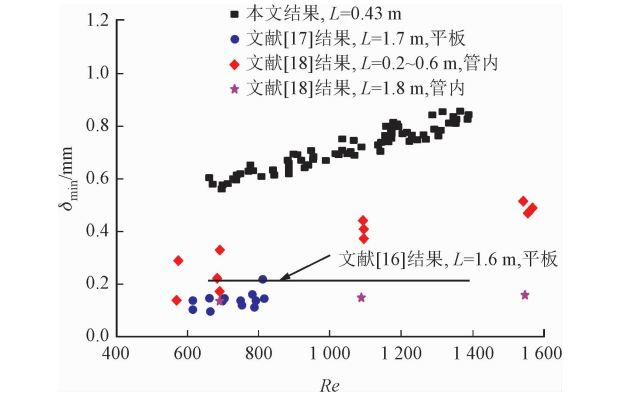


图 11 本文方法与文献方法的最小液膜厚度对比

对文献[18] $L=0.2\sim0.6\text{ m}$ 和 $L=1.8\text{ m}$ 处 $\delta_{\max}$ 、 $\delta_{\min}$ 的实验结果表明,随着 L 的增加, $\delta_{\max}$ 会增大,而 $\delta_{\min}$ 会减小。综上,与文献[16-17]平板降膜厚度结果对比发现,平板上 $\delta_{\max}$ 和 $\delta_{\min}$ 随着 L 的变化趋势与管内降膜的结果相类似。

图 12 为液膜厚度标准偏差 D_{ST} 和液膜的波动振幅 h 随 Re 的变化,由图 12 可见, D_{ST} 随着 Re 的变化呈现逐渐增大的趋势,可以间接反映波动振幅随 Re 增大而增大。这从波动振幅 h 变化趋势可以得到验证。文献[4,19]指出,在 $L=0.3\sim0.4\text{ cm}$ 位置处,液膜的 D_{ST} 随着 Re ($Re<400$) 的增大,出现先增大而后保持不变的趋势,与本文趋势不太一致,这主要是两者研究的 Re 范围不同,导致液膜所处的状态也不同。

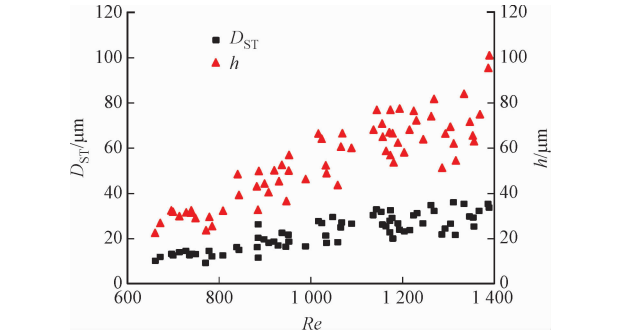


图 12 不同 Re 下的液膜厚度标准偏差和液膜波动振幅

3.2 平均液膜厚度

表 2 是文献[2]汇总文献提出的平均液膜厚度

$\bar{\delta}$ 的经验关联式。图 13 为本文与 6 种文献的 $\bar{\delta}$ 与 Re 的关联曲线。由实验结果可见,实验测出的液膜厚度是波动的,这是由液膜的波动特性决定的。平均液膜厚度整体趋势是随着 Re 的增大而增大,而且要大于文献[1]的,这与其他文献结果是一致的。这是由于文献[1]的经验关联式是针对光滑层流降膜提出的,并没有考虑到表面波的影响。根据已有大多数平均液膜厚度经验关联式的形式,通过最小二乘法进行非线性拟合,得到经验关联式如下

$$\bar{\delta}=0.318 Re^{0.568}\left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{1/3}$$

(12)

可得 $R^2=0.938$ 。另外,可以看出,拟合的 $\bar{\delta}$ 经验关联式(12)介于文献[7]方法和文献[2]方法 1 之间。图 13 还给出了拟合值的 $\pm 6\%$ 偏差曲线,可见实验值全部落入在两条曲线之间,说明拟合公式具有较高的准确度。

表 2 文献[2]中归纳的实验方法的平均液膜厚度经验关联式^[2]

实验方法	平均液膜厚度经验关联式
文献[1]	$\bar{\delta}=\left(\frac{3Re\nu^2}{g}\right)^{1/3}$
文献[2]方法 1	$\bar{\delta}=0.436\left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{1/3}Re^{0.526}$
文献[2]方法 2	$\bar{\delta}=\left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{1/3}\left[8.92Re^{5/2}+4.04\times10^{-5}Re^{9/2}\right]^{2/15}$
文献[2]方法 3	$\bar{\delta}=0.305\left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{1/3}Re^{0.583}$
文献[14]	$\bar{\delta}=0.473\left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{1/3}Re^{0.526}$
文献[7]	$\bar{\delta}=0.829Re^{0.422}\left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{1/3}$

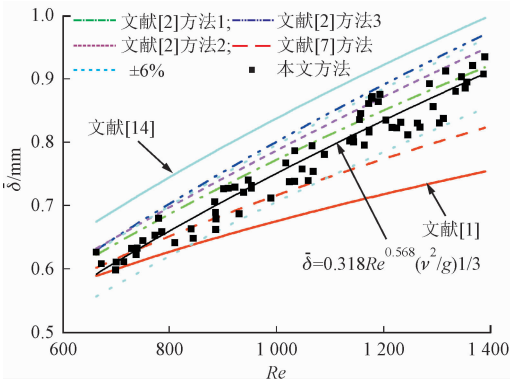


图 13 不同 Re 数下的 $\bar{\delta}$ 与经验关联式对比

为了更好地对比不同物质的平均液膜厚度,采用文献[20]提出的无量纲化方法,计算方法如下

$$\delta^+=\frac{\delta}{\nu}\sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}}$$

(13)

$$\tau_c=\frac{2}{3}\tau_w+\frac{1}{3}\tau_i$$

(14)

式中: δ^+ 为无量纲液膜厚度; τ_c 为特征切应力,Pa; τ_w 为壁面切应力,Pa; τ_i 为界面切应力,Pa。对于自由降膜流动, $\tau_i=0$ 。根据力平衡, $\tau_w=\rho g\delta$ 。

本文与文献[14,17-18]的无量纲液膜厚度实验结果对比如图 14 所示。由图 14 可见,随着 Re 增大,文献[17]的 δ^+ 结果与文献[14]提出的经验关联式变化趋势比较一致,但是均大于本文的数据。上述现象与流动长度不同有关。文献[14]指出,液膜表面波不仅与 Re 有关,而且与流动长度 L 有关。随着液膜在重力的作用下不断发展,液膜速度将会持续增大,液膜沿着流动方向逐渐从光滑层流向着有规律的二维波、孤立波转化,最终转化为不规则的三维波,并容易发生液膜表面波的合并,从而导致液膜厚度的增加^[21]。文献[14]指出,当 $Re>749$ 时, $L>0.6\text{ m}$ 处的平均液膜厚度要大于 $L<0.6\text{ m}$ 处的。本文厚度测试的 Re 范围为 $660\sim1\,390$,测量位置在 $L=0.43\text{ m}$,大多小于文献[14,17]的测量位置,导致 δ^+ 要小于文献[14,17]的结果。

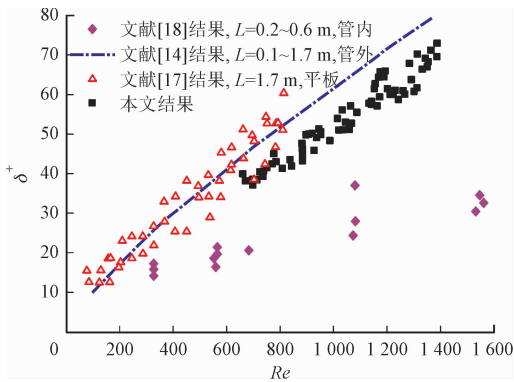


图 14 本文与文献[14,17-18]的无量纲液膜厚度实验结果对比

文献[18]圆管降膜的测量位置与本文接近,但是 δ^+ 要小于本文的数据。结构不同可能是影响因素,另外一个原因是和平板上存在的收缩现象有关。在本文实验中,由于平板直接与大气直接接触,平板的温度受到室内气温的影响。通过实验测量发现,大气温度一般比水的温度高 $2\sim4\text{ }^{\circ}\text{C}$,使得壁面温度比液膜温度高一些,马兰戈尼效应会导致收缩现象的发生^[22]。由表 2 中的平均液膜厚度经验关联式可知,对于相同工质,平均液膜厚度与 Re 存在正相关的关系。收缩现象导致局部单位湿周流量和局部

Re 增大,进而使得局部平均液膜厚度增大^[21]。

从上面的分析可以看出,不同流动长度和壁面结构均会对液膜厚度产生一定影响。为了排除上述影响,更好地比较不同 Re 对液膜厚度的作用,选取了文献[13] $L=0.37\text{ m}$ 处 $Re<708$ 平板降膜厚度数据,将本文数据与之对比结果如图 15 所示,通过观察发现两者 δ^+ 随 Re 的上升斜率并不相同。文献[13]结果的上升斜率和文献[1](Nusselt 经验关联式,适用于层流)的结果比较接近,而本文结果的上升斜率与文献[2]方法 1 中 Brauer 经验关联式(适用于紊流)的结果比较接近。这可以从经验关联式的 Re 指数看出,本文的指数为 0.568(见式(12)),Brauer 关联式的指数为 0.526,而 Nusselt 关联式的指数为 $1/3$ 。文献[14]定义层流和紊流的转折点为临界 Re 。通过计算 Nusselt 和 Brauer 关联式的交点($Re\approx 500$),即临界 Re 在 500 左右,这与文献[14]的管外降膜在相同 L 的结果(临界 $Re\approx 800$)存在差异,这说明不同壁面结构的临界 Re 会有所不同。当 Re 较小时($Re<500$),液膜为层流或过渡层流状态,液膜仍在发展,液膜厚度随 Re 增长较为缓慢。而当 Re 较大时($Re>500$),液膜进入到紊流,液膜出现了许多不规则的三维波和表面波合并,液膜发展比较充分,导致液膜厚度上升速率较快[2, 21]。由于临界点的存在,有必要研究 $Re>700$ 范围下的液膜厚度规律。

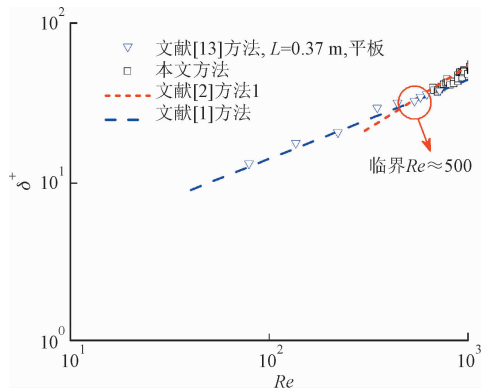


图 15 本文与文献的无量纲液膜厚度实验结果的对比

文献[17]中还研究了不同倾斜角下 $L=1.7\text{ m}$ 处的平均液膜厚度。为了更好地分析倾角的影响,借鉴文献[17]的数据处理方法,提出了一个无量纲变量 $F(F=Re/(\sigma^3/(\rho^3 g \sin\varphi^4)))^{1/11}$,其中 φ 为壁面与水平面的倾斜角度, σ 为表面张力系数。 F 与平板的倾斜角和液体的物性有关。无量纲液膜厚度 δ^+ 随着 F 的变化如图 16 所示,可见本文的 δ^+ 斜率小于文献[17]的,这是与流动长度不同有关。对于

相同流动长度处的数据,文献[17]在倾斜角 45° 和 90° 下 δ^+ 随 F 变化斜率比较一致。因此,只有在相同流动长度处,采用无关性变量 F 处理不同倾斜角下的平均液膜厚度数据,才可以得到比较一致的结果。

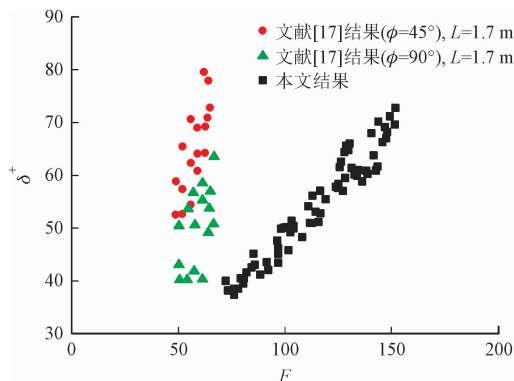


图 16 δ^+ 随 F 的变化

3.3 液膜润湿比

图 17 为润湿比 a 随 Re 的变化图。在壁面完全润湿之前,润湿比随着 Re 的增大呈现着增大趋势,但是存在较大的波动性和随机性,与文献[3, 11, 23]结果相类似,这与平板结构表面的不均匀性和液膜波动特性有关。同时,与文献[6, 21]结果相类似,本文实验也发现降膜存在收缩现象,导致润湿比无法达到 1。文献[3]的润湿比数据比本文的实验数据大。分析原因是本文测量水在铝板上的接触角为 92.9° ,而文献[3]测量水在不锈钢表面的接触角为 78.35° 。接触角越大,平板的润湿性能越差。为了便于预测最小润湿流量 R_{MW} ,对润湿比进行拟合,得到经验关联式 $a=7.12\times 10^{-3} Re^{0.884}$, $R^2=0.815$ 。

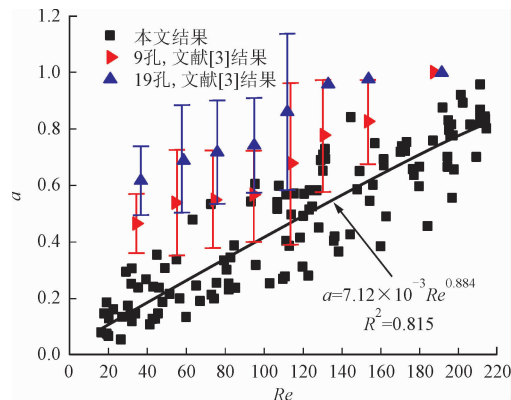


图 17 润湿比 a 随 Re 的变化

通过计算, Re 需要达到 269 时润湿比为 1。根据 20°C 水的动力黏度,可计算出最小润湿流量 R_{MW} 为 $0.27\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 时壁面才能被全部润湿。在不同的文献中,提出了不同的最小润湿流量:对于圆

管降膜,有 $0.065 \sim 0.124 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1[23]}$ 、 $0.16 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1[24]}$ 、 $0.104 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1[11]}$;对于平板,有 $0.17 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1[3]}$ 、 $0.222 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1[25]}$ 、 $0.343 \sim 0.349 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1[26]}$ 。可以看出,平板的最小润湿流量一般要大于圆管的,这与平板容易出现收缩现象有一定关系。

文献[10,27-28]给出了倾斜角为 60° 的平板上水降膜的润湿比实验数据。同样为了便于比较,作出了如图 18 所示的润湿比随无量纲变量 F 变化图。由图 18 可见,文献[10,27-28]的润湿比 α 随 F 变化趋势与本文比较一致,而文献[12]的铝板上润湿比 α 增大斜率要明显低于本实验结果。这与平板尺寸和液体分布器结构不同有一定的关系。文献[12]采用平板宽度小于本文宽度,边界效应影响较大。另外文献[12]采用的是均匀打孔式布膜方式,而本文的布膜装置采用的是溢流式布膜方式。文献[3]指出,由于打孔式分布器的布膜孔之间还存在一定间距,在各孔出流液膜合并之前,孔下方会出现一些尚未润湿的区域。

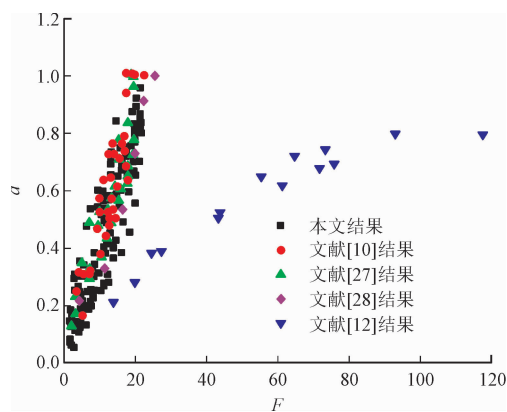


图 18 不同文献中润湿比的对比

4 结 论

本文采用电容测微技术测量了竖直铝板上降膜流动的液膜厚度,并采用图像处理技术对液膜增湿过程的润湿特性进行了测试,主要结论如下。

(1)在 $Re=660 \sim 1\,390$ 时,瞬时液膜厚度随时间是波动的。最大、最小液膜厚度,波动振幅,标准偏差均随着 Re 增大呈现增大趋势。液膜厚度的概率密度函数逐渐从“瘦窄型”向“宽胖型”转变。不同流动位置的液膜厚度规律不同。最大和最小液膜厚度会随着流动长度的增加分别出现增大和减小的趋势。

(2) Re 越大,平均液膜厚度越大。在流动长度 $L=0.43 \text{ m}$ 处的位置,平均液膜厚度要大于 Nusselt

经验关联式的计算厚度。拟合得到了适用于 $Re=660 \sim 1\,390$ 时平均液膜厚度的经验关联式,计算值和实验值的相对误差可以控制在 $\pm 6\%$ 之间。存在层流向紊流转换的临界 $Re=500$,即平均液膜厚度的随着 Re 增加的上升速率出现两个分段,临界 Re 之后的上升速率要大于临界 Re 之前的。

(3)在 $Re=15 \sim 200$ 范围内,随着雷诺数的增大,液膜润湿比出现了逐渐增大的趋势,且波动程度较为明显。通过拟合得到了润湿比的经验关联式,本文铝板最小润湿流量为 0.27 。通过与文献比较,发现不同结构布膜器对布膜性能影响较大。

参考文献:

- [1] NUSSELT W. Die oberflächen kondensation des wasser-dampfes [J]. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 1916, 60(5): 69-75.
- [2] 阎维平,叶学民,李洪涛. 液体薄膜流的流动和传热特性 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2005, 32(1): 59-65.
- YAN Weiping, YE Xuemin, LI Hongtao. Hydrodynamics and heat transfer of liquid thin film [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2005, 32(1): 59-65.
- [3] LU Y, STEHMANN F, YUAN S, et al. Falling film on a vertical flat plate: influence of liquid distribution and fluid properties on wetting behavior [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 123: 1386-1395.
- [4] 袁猛,胡剑光,陈剑佩,等. 微结构壁面降膜波动的统计特性 [J]. 华东理工大学学报, 2012, 38(3): 293-300.
- YUAN Meng, HU Jianguang, CHEN Jianpei, et al. Statistical characteristics of falling film fluctuation on the wall of [J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2012, 38(3): 293-300.
- [5] 暴凯,胡珀,黄兴冠. 可变角度大平板降膜流动特性的实验研究 [J]. 核科学与工程, 2015, 35(2): 379-384.
- BAO Kai, HU Po, HUANG Xingguan. Experimental study of water film flow characteristics on the rotatable large flat plate [J]. Nuclear Science and Engineering, 2015, 35(2): 379-384.
- [6] YU Y Q, WEI S J, YANG Y H, et al. Experimental study of water film falling and spreading on a large vertical plate [J]. Progress in Nuclear Energy, 2012, 54(1): 22-28.
- [7] YU Y Q, CHENG X. Experimental study of water film flow on large vertical and inclined flat plate [J].

- Progress in Nuclear Energy, 2014, 77(77): 176-186.
- [8] 于意奇. 大尺度平板水膜流动行为的数值模拟和试验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012: 41-42.
- [9] HARTLEY D E, MURGATROYD W. Criteria for the break-up of thin liquid layers flowing isothermally over solid surfaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1964, 7(9): 1003-1015.
- [10] HOFFMANN A, AUSNER I, REPKE J U, et al. Fluid dynamics in multiphase distillation processes in packed towers [J]. Computers & Chemical Engineering, 2005, 29(6): 1433-1437.
- [11] MORISON K R, WORTH Q A G, O'DEA N P. Minimum wetting and distribution rates in falling film evaporators [J]. Food and Bioproducts Processing, 2006, 84(4): 302-310.
- [12] GIANNETTI N, TRINURUK P, YAMAGUCHI S, et al. Film rupture and partial wetting over flat surfaces with variable distributor width [J]. Science and Technology for the Built Environment, 2019, 25(10): 1313-1324.
- [13] TAKAMASA T, HAZUKU T. Measuring interfacial waves on film flowing down a vertical plate wall in the entry region using laser focus displacement meters [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(15): 2807-2819.
- [14] TAKAHAMA H, KATO S. Longitudinal flow characteristics of vertically falling liquid films without concurrent gas flow [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1980, 6(3): 203-215.
- [15] LUO Y, WANG M, YANG H, et al. Experimental study of the film thickness in the dehumidifier of a liquid desiccant air conditioning system [J]. Energy, 2015, 84: 239-246.
- [16] ITO A, SASAKI M. Breakdown and formation of a liquid film flowing down an inclined plane: 1st report Measurement of contact angle and mechanism of film formation [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, 1986, 52(475): 1261-1265.
- [17] AMBROSINI W, FORGIONE N, ORIOLO F. Statistical characteristics of a water film falling down a flat plate at different inclinations and temperatures [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2002, 28(9): 1521-1540.
- [18] TAKAMASA T, KOBAYASHI K. Measuring interfacial waves on film flowing down tube inner wall using laser focus displacement meter [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2000, 26(9): 1493-1507.
- [19] DROSOS E I P, PARAS S V, KARABELAS A J. Characteristics of developing free falling films at intermediate Reynolds and high Kapitza numbers [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2004, 30(7): 853-876.
- [20] HENSTOCK W H, HANRATTY T J. The interfacial drag and the height of the wall layer in annular flows [J]. AIChE Journal, 1976, 22(6): 990-1000.
- [21] LUO Y, CHEN Y, ZHONG D, et al. Experimental study of the flow characteristics in a falling film liquid desiccant dehumidifier [J]. Science and Technology for the Built Environment, 2017, 23(1): 157-165.
- [22] 张锋, 赵贤广, 耿皎, 等. Marangoni 效应与降膜传递过程 [J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2006, 28(1): 93-99.
- ZHANG Feng, ZHAO Xianguang, GENG Jiao, et al. Marangoni effects on the transfer process of the falling film liquid film [J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2006, 28(1): 93-99.
- [23] MIYASHITA T M K W K. Minimum wetting rate on wetted-wall column [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1975, 8(6): 440-444.
- [24] MORISON K R, TANDON G. Minimum wetting rates for falling films on stainless steel [J]. Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing, 2006, 14(1/2): 153-162.
- [25] PARAMALINGAM S, WINCHESTER J, MARSH C. On the fouling of falling film evaporators due to film break-up [J]. Food & Bioproducts Processing, 2000, 78(2): 79-84.
- [26] SIEBENECK K, POPOV W, STEFANAK T, et al. Pillow plate heat exchangers; investigation of flow characteristics and wetting behavior at single-flow conditions [J]. Chemie Ingenieur Technik, 2015, 87(3): 235-243.
- [27] HOFFMANN A, AUSNER I, REPKE J U, et al. Detailed investigation of multiphase (gas-liquid and gas-liquid-liquid) flow behaviour on inclined plates [J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 2006, 84(2): 147-154.
- [28] ISO Y, JIAN H, KATO M, et al. Numerical and experimental study on liquid film flows on packing elements in absorbers for post-combustion CO₂ capture [J]. Energy Procedia, 2013, 37(3): 860-868.

(编辑 刘杨 亢列梅)