

# 逆向气流条件下半椭圆管外水平降膜厚度分布研究

徐新帆<sup>1</sup>, 周亚素<sup>1</sup>, 刘刚<sup>1</sup>, 王树信<sup>2</sup>

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011)

**摘要:**为研究半椭圆管水平降膜厚度的分布规律, 搭建逆向气流条件下水平降膜实验平台, 并结合数字图像处理技术, 研究逆流风速(0~5 m/s)和喷淋流量(0.025~0.221 L/min)对液膜厚度的影响。研究表明: 逆向气流会对管外水膜产生影响, 并存在临界速度; 当逆流风速低于临界速度, 液膜厚度沿圆周方向先减小后增大, 与无空气流动时相似; 当逆流风速超过临界速度时, 液膜分布严重不均甚至被吹飞; 随着逆流风速增大, 平均液膜厚度先增大后减小; 随着喷淋流量增大, 平均液膜厚度持续增大; 当喷淋流量减小、逆流风速增大时, 平均液膜厚度减小。

**关键词:** 逆向气流; 喷淋流量; 半椭圆管; 水平降膜; 液膜厚度

中图分类号: TK124 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2021.08.015

[引用本文格式] 徐新帆, 周亚素, 刘刚, 等. 逆向气流条件下半椭圆管外水平降膜厚度的分布研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(8): 99-105. XU Xin-fan, ZHOU Ya-su, LIU Gang, et al. Research on the distribution of liquid film thickness on horizontal falling film outside the semi-elliptical tube under counter-current airflow[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(8): 99-105.

## Research on the Distribution of Liquid Film Thickness on Horizontal Falling Film outside the Semi-Elliptical Tube under Counter-current Airflow

XU Xin-fan<sup>1</sup>, ZHOU Ya-su<sup>1</sup>, LIU Gang<sup>1</sup>, WANG Shu-xin<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai, China, Post Code: 201620;  
2. Marine Design & Research Institute of China, Shanghai, China, Post Code: 200011)

**Abstract:** In order to study the distribution of the horizontal film thickness outside the semi-elliptical tube, an experimental platform for horizontal falling film was built under counter-current airflow. Combined with digital image processing technology, the influence of counter-current airflow speed (0~5 m/s) and spray flow rate (0.025~0.221 L/min) on the liquid film thickness were investigated. The results show that the counter-current airflow has an effect on the liquid film outside semi-elliptical tube, and the critical velocity exists. When the speed of counter-current airflow is lower than critical speed, liquid film thickness decreases first and then increases along circumferential angle, which is similar to that without airflow. When the counter-current airflow speed exceeds the critical speed, the distribution of liquid film is severely uneven or even blown away. The average liquid film thickness increases first and then decreases with the increase of counter-current airflow speed. With the increase of spray flow, the average liquid film thickness continues to increase. When spray flow decreases and the counter-current air speed increases, the average liquid film thickness decreases.

**Key words:** counter-current airflow, spray flow, semi-elliptical tube, horizontal falling film, liquid film thickness

## 引言

水平降膜蒸发技术拥有提高换热器的换热效率、减小换热器的设备尺寸、降低换热器工质消耗等诸多优点<sup>[1]</sup>,已广泛应用于海水淡化、制冷工程和废液处理等领域<sup>[2-4]</sup>。其中,液膜在水平管外铺展的均匀程度直接影响着换热效率,是传热传质研究的关键因素,也是国内外学者的研究热点。

通过实验与数值模拟发现,相比圆管及椭圆管,异型管尤其是半椭圆管,它的平均液膜厚度更小,换热系数更高,液膜铺展均匀性更好,有更高的应用价值<sup>[5-7]</sup>。不考虑气流干扰时,液膜厚度的分布及影响因素研究已较为成熟。通过电导法、电容法、激光诱导荧光法和摄像法等实验测量得出随着降膜管外圆周角的增大,液膜厚度先减小后增大,最薄点在 $90^\circ \sim 120^\circ$ 之间<sup>[8-10]</sup>,液膜厚度随着喷淋密度的增大而增大<sup>[11-13]</sup>。

实际换热管束往往处于逆向气流(简称逆流)条件进行工作,然而该条件下对液膜厚度的研究较少,且结论尚未统一。尹应德<sup>[14]</sup>通过数值模拟发现,顺流会使竖直平壁外液膜越来越薄,但影响不明显;逆流会加强液膜波动使液膜被吹散成液滴,甚至产生液泛现象,更利于蒸发传热。程嫚<sup>[15]</sup>对水平圆管进行研究,得出液膜厚度在管壁尾部会因逆流风速的增大而加厚,逆流风速过大时液膜会被吹飞。李乐等人<sup>[16]</sup>通过实验发现,逆流风速较低时平壁外水膜无明显变化;逆流风速为 $4.8 \sim 10.0 \text{ m/s}$ 时,水膜厚度明显减小。

逆流条件下水平降膜管外液膜厚度分布规律的研究仍存在分歧,且对异型管研究较少。因此,本文搭建逆流条件下单根半椭圆管水平降膜厚度实验台,并结合数字图像处理技术,研究了风速和喷淋流量对水平降膜厚度的影响。

## 1 逆流条件下水平降膜膜厚理论分析

Nusselt<sup>[17]</sup>研究了斜平板的液膜流动,在忽略了表面张力、惯性力与剪切应力后推导出了任意倾斜角的简化液膜膜厚关联式:

$$\delta = \left( \frac{3\mu_L \Gamma}{\rho_L (\rho_L - \rho_G) g \sin \alpha} \right)^{1/3} \quad (1)$$

式中: $\delta$ —液膜厚度, m;  $\Gamma$ —喷淋密度,  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ;

$\alpha$ —周向角, ( $^\circ$ );  $\mu_L$ —液体的动力粘度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\rho_L$ —液体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_G$ —气体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

Rogers<sup>[18]</sup>在 Nusselt 关联式基础上,不考虑液膜波动,通过积分法得出层流液膜厚度关联式:

$$\delta = \left( \frac{3\mu_L \Gamma}{\rho_L^2 g \sin \alpha} \right)^{1/3} \quad (2)$$

其后, Rogers 等人<sup>[19]</sup>又通过阿基米德数  $Ar$  建立了膜厚的无量纲关联式:

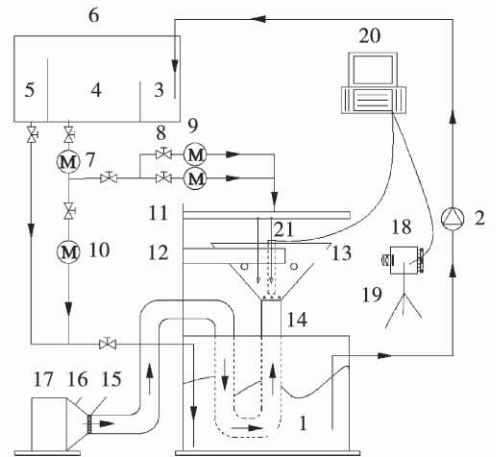
$$\delta/D = 0.909 Re^{1/3} Ar^{-1/3} (\sin \alpha)^{-1/3} \quad (3)$$

式中: $D$ —管径, m;  $Re$ —雷诺数;  $Ar$ —阿基米德数。

## 2 实验装置及测试方法

### 2.1 实验装置

图1是逆流条件下单根半椭圆管水平降膜实验系统示意图,主要包括降膜循环系统、逆流通风系统和数据采集系统3个循环系统。



1—低位水箱;2—循环泵;3—稳流仓;4—恒压仓;5—溢流仓;6—高位水箱;7—总进水量计;8—流量调节阀;9—喷淋流量计;10—回水量计;11—均匀布液器;12—降膜管;13—控风罩;14—通风软管;15—过滤网;16—变径管;17—变频风机;18—高速相机;19—相机三脚架;20—计算机;21—灯管

图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

降膜循环系统中,循环泵将水从低位水箱中抽出并加压送入到高位水箱,其中部分水经总进水量计、流量调节阀和喷淋流量计后,由均匀布液器喷淋至降膜管回到低位水箱,部分溢流到溢流仓后直接回到低位水箱。其中,水泵采用 LS-013 隔膜泵;布液器采用新型均匀布液器<sup>[20]</sup>;半椭圆管采用铝合金材料,外上半圆直径  $a = 16.4 \text{ mm}$ ,下半椭

圆直径  $b = 26.2 \text{ mm}$ , 上半圆顶端与下半椭圆底端间距  $34.4 \text{ mm}$ , 如图 2 所示。不同材料有不同的润湿作用, 通过固液接触角表征。研究表明, 铝合金与实际设备常用的紫铜等金属的接触角相差均在  $15^\circ$  以内<sup>[21]</sup>, 润湿性能相近, 都属于亲水材料。因此, 铝合金能提供较好的液膜铺展, 对液膜厚度的影响可忽略。

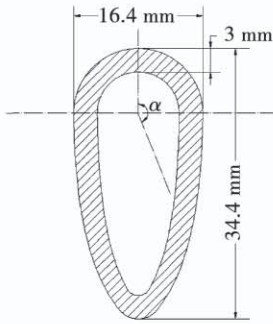


图 2 半椭圆管尺寸

Fig. 2 Dimensions of semi-elliptical tube

逆流通风系统中, 变频风机将气流依次送往变径管、通风软管和控风罩, 并沿逆流方向吹至降膜管。其中, 变频风机调节空气流速, 型号 SE - A50, 风量  $594 \text{ m}^3/\text{h}$ ; 控风罩用以保证气流的稳定性和均匀性, 结构如图 3 所示。控风罩中溢流孔排出实验水, 探测孔为风速仪提供探测孔位, 预留窗口为降膜管预留放置空间, 探视窗口为拍摄提供探视空间。

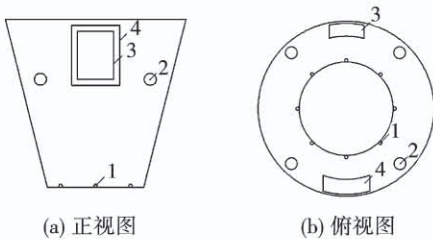


图 3 控风罩结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the wind control hood structure

## 2.2 测试方法

数据采集系统主要包括空气流速测量、喷淋流量测量和液膜厚度测量 3 部分。

空气流速测量采用 Testo405v1 热敏式风速测试仪, 测量精度为  $\pm (0.01 \text{ m/s} + 5\% \text{ 测量值})$ 。将风

速测试仪从控风罩中的探测口伸入, 在每个风速测速点测量 5 次, 再求均值。测量点位于降膜管正下方直径  $8.2 \text{ mm}$  的圆周上, 并划分为 6 等份, 如图 4 所示。

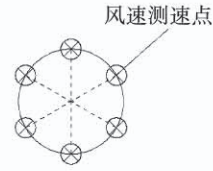


图 4 风口测点布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the arrangement of tuyere measuring points

喷淋流量较大时, 选用外螺纹接口的 K24 型齿轮式流量计, 测量精度为  $\pm 0.2\%$ ; 喷淋流量较小时, 选用 HZ06K 型涡轮流量计, 测量精度为  $\pm 5\%$ 。

液膜厚度测量装置由条形 LED、Sony A6300 单反相机、三脚架和计算机组成。数字图像处理技术参考文献[6]。实验拍摄同工况下 20 张图片, 舍弃误差较大图片后, 取膜厚平均值为最终数据。

## 3 实验结果与分析

通过控制变量法, 以  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  水为流体力质, 研究不同逆流风速和不同喷淋流量对单根半椭圆管外成膜情况的影响。实验中, 为防止换热管干烧等问题出现, 选取逆流风速  $v_a = 0 \sim 5 \text{ m/s}$ 、单孔喷淋流量  $Q = 0.025 \sim 0.221 \text{ L/min}$  的工况进行分析。

关于布液高度  $H$  的选择:  $H = 5 \text{ mm}$  时有严重的积液现象, 液膜厚度较大;  $H = 35 \text{ mm}$  时有液体飞溅且液柱流动不稳定。此外, 随着  $H$  增大, 平均液膜厚度  $\bar{\delta}$  逐渐减小, 当  $H = 15 \sim 25 \text{ mm}$  时  $\bar{\delta}$  变化不大, 液膜分布较为均匀、液柱稳定<sup>[6,21]</sup>。综合考虑, 选择  $H = 25 \text{ mm}$ 。

### 3.1 逆流条件下风速对液膜厚度的影响

图 5 为  $Q = 0.025 \text{ L/min}$ ,  $v_a$  为  $0 \sim 5.17 \text{ m/s}$  时液膜厚度  $\delta$  的分布情况。图 5 经处理后得到图 6、图 7。

图 6 显示, 当  $v_a = 0 \sim 2.35 \text{ m/s}$  时,  $\delta$  随  $\alpha$  的增大先减小后增大, 最小点在  $\alpha = 90^\circ$  附近。  $v_a = 0$  时, 相较文献[6]得到  $\delta$  随  $\alpha$  的分布曲线趋势一致, 但

液膜最薄点时的  $\alpha$  更小。这是由于其采用的布液器静压不稳定,导致分液不均且液柱出现偏移,从而影响了液膜的分布情况。此外,随  $v_a$  的增大,  $\delta$  在  $\alpha = 15^\circ \sim 90^\circ$  时基本不变,在  $\alpha = 90^\circ \sim 175^\circ$  时逐渐增大。

图7显示,当  $v_a$  从0增加到2.35 m/s时,  $\bar{\delta}$  随之增加了14.7%。这是因为在  $\alpha = 0 \sim 90^\circ$  时,流体受重力作用沿管壁向下流动,而逆向气流由于流道影响,几乎不对上半圆周产生影响。此时重力的径向分力与管壁对流体的支持力相等;重力的切向分力大于管壁的粘滞力,使流体向下流动。 $\alpha$  从  $0^\circ$  增大到  $90^\circ$  时,重力的切向分力从零增大到重力,切向速度也随之增大。液膜的分布与切向速度分布存在对应关系,切向速度小时液膜厚,切向速度大时液膜薄,因此  $\delta$  从  $0^\circ$  到  $90^\circ$  逐渐变薄。 $v_a = 0$  时,在  $\alpha = 90^\circ \sim 180^\circ$ ,重力的径向分力与管壁粘附力相等,重力的切向分力大于管壁粘滞力,使流体向下流动。随  $\alpha$  增大,重力的切向分力逐渐减小,切向速度也不断减小,使  $\delta$  从  $90^\circ$  到  $180^\circ$  逐渐变大。而当逆向气流从管壁下方进入时,其产生的剪切力沿管壁切向方向向上,阻碍了液膜向下流动,导致液膜切向向下的合力减小,切向流速减缓,液膜相对加厚。此时,  $v_a$  越大,其剪切力越大,  $\bar{\delta}$  也越大。

图6中,  $v_a = 2.52 \sim 5.17$  m/s 时,与低风速相比,  $\delta$  在尾部区域不断减小,  $\delta$  随  $\alpha$  的分布曲线波动剧烈,其峰值向  $\alpha$  减小的方向偏移。图7中  $v_a$  从2.52 m/s 增加到5.17 m/s,  $\bar{\delta}$  减少了42.7%。若  $v_a$  持续增加则管底部可能出现干斑。因为在  $\alpha = 90^\circ \sim 180^\circ$  时重力的切向分力随  $\alpha$  增大而减小,此时  $v_a$  较大,流体剪切力也较大,使得尾部液膜切向合力不断向下减小甚至反方向增加,导致液膜切向分速度减小到零后也反方向增加,从而液膜不断由尾部向上堆积,产生波动甚至被吹飞,  $\bar{\delta}$  也因此减小。此时,  $v_a$  越大,流体剪切力越大,液膜波动越剧烈,峰值向  $\alpha$  减小的方向偏移。

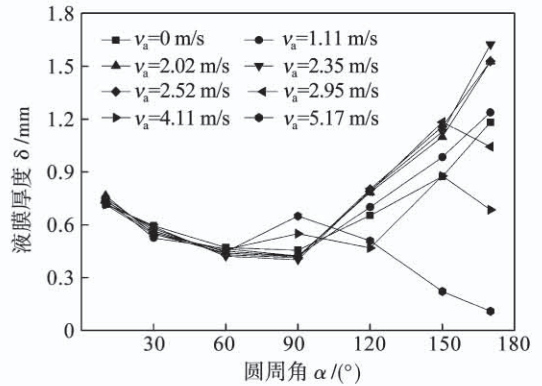


图6 不同逆流风速下液膜厚度沿周向角的变化  
Fig.6 The change of the liquid film thickness along the circumferential angle under different counter-current air speeds

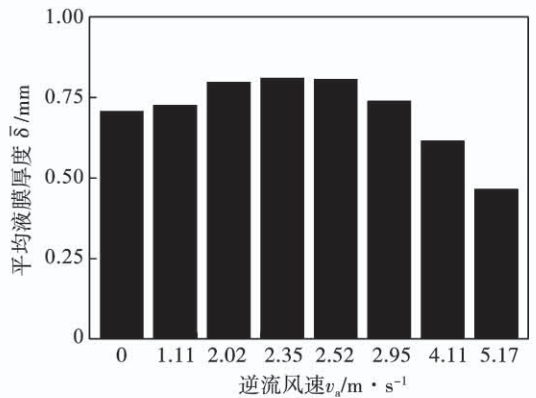


图7 不同逆流风速下的平均液膜厚度  
Fig.7 Average liquid film thickness under different counter-current air speeds

从上述分析可以得出,  $Q = 0.025$  L/min 时,在  $v_a = 2.35 \sim 2.52$  m/s 内存在临界逆流风速  $v_c$ 。当

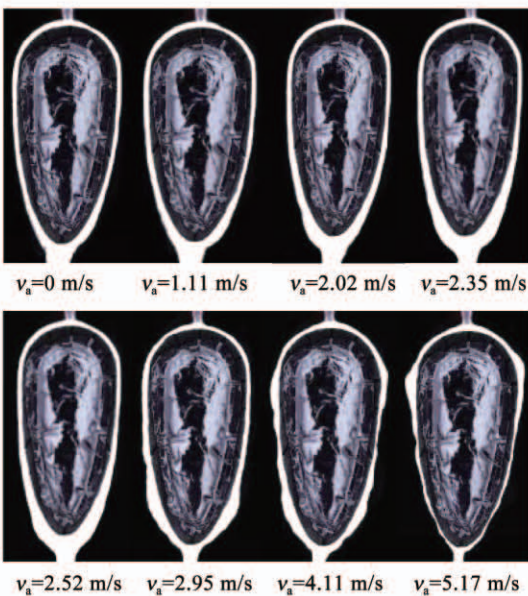


图5 不同逆流风速下液膜厚度分布  
Fig.5 Distribution of liquid film thickness under different counter-current air speeds

$v_a < v_e$  时,  $\delta$  随  $\alpha$  先减小后增大,  $\bar{\delta}$  随  $v_a$  的增大逐渐增大;  $v_a > v_e$  时,  $\delta$  随  $\alpha$  的分布曲线其峰值向  $\alpha$  更小的位置偏移, 液膜分布更加不均,  $\bar{\delta}$  随  $v_a$  的增大显著减小。由于  $v_a = 2.35$  与  $2.52$  m/s 时, 其  $\delta$  随  $\alpha$  的分布曲线几乎重叠,  $\bar{\delta}$  仅相差 0.6%。因此, 取其平均数, 认为 2.44 m/s 是  $Q = 0.025$  L/min 时对应的  $v_e$ 。同理, 在  $Q = 0.063, 0.092, 0.123$  和  $0.221$  L/min 时, 找到对应的  $v_e$ , 如图 8 所示,  $v_e$  随着  $Q$  的增大而增大。

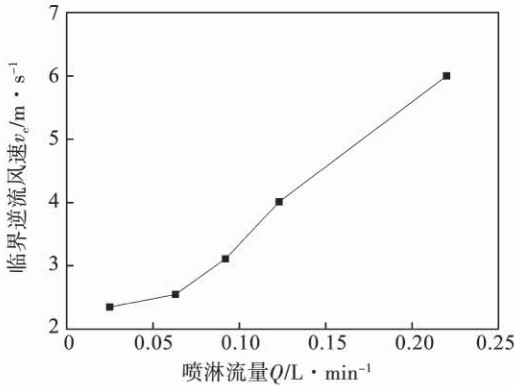


图 8 不同喷淋流量下的临界逆流风速  
Fig. 8 Critical counter-current airflow speeds under different spray flows

### 3.2 逆流条件下喷淋流量对液膜厚度的影响

$v_a = 0$  m/s,  $Q = 0.025, 0.063, 0.092, 0.123$  和  $0.221$  L/min 时,  $\delta$  的分布如图 9、图 10 所示。

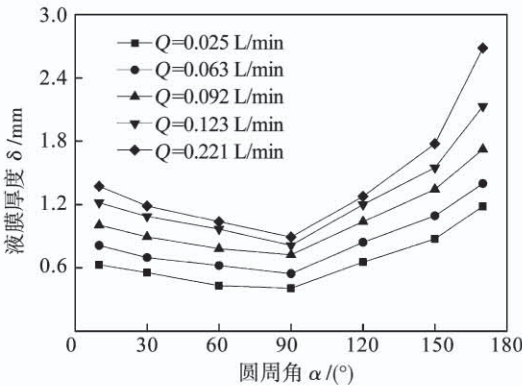


图 9 不同喷淋流量下液膜厚度沿周向角的变化  
Fig. 9 The change of the liquid film thickness along the circumferential angle under different spray flows

图 9 显示,  $\delta$  随  $\alpha$  的增加先减小后增大,  $\delta$  最小点在  $\alpha = 90^\circ$  附近。沿着圆周方向, 随  $Q$  的增加,  $\delta$

也逐渐增加, 与图 10 中  $\bar{\delta}$  随  $Q$  的增加而增加结论吻合。其中  $Q$  从  $0.025$  L/min 增加到  $0.221$  L/min,  $\bar{\delta}$  增加了约 2 倍。这是因为  $Q$  增加时, 单位时间内通过喷淋孔的流体体积增加, 导致整个圆周的  $\delta$  及  $\bar{\delta}$  都增加了。

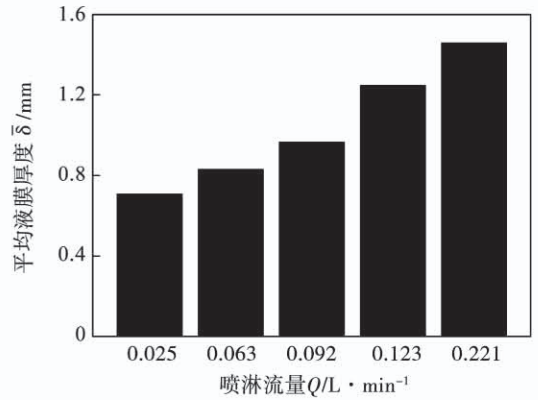


图 10 不同喷淋流量下的平均液膜厚度  
Fig. 10 Average liquid film thickness under different spray flows

由于不同  $Q$  对应存在不同  $v_e$ , 导致当  $v_a$  较大时, 不同工况下液膜会出现不同程度的波动及吹飞现象。因此, 不同  $Q$  下  $\delta$  随  $\alpha$  变化趋势的比较, 并不适合在有逆向气流下进行。

整理  $v_a = 0 \sim 5$  m/s,  $Q = 0.025 \sim 0.221$  L/min 时的实验数据, 如图 11 所示。发现  $\bar{\delta}$  始终随着  $Q$  的增加而增加,  $v_a$  仅影响着不同  $Q$  间  $\bar{\delta}$  的增量; 但  $\bar{\delta}$  随  $v_a$  的变化趋势会受  $Q$  影响而在不同位置出现峰值。且当  $Q$  越小  $v_a$  越大时,  $\bar{\delta}$  越小。

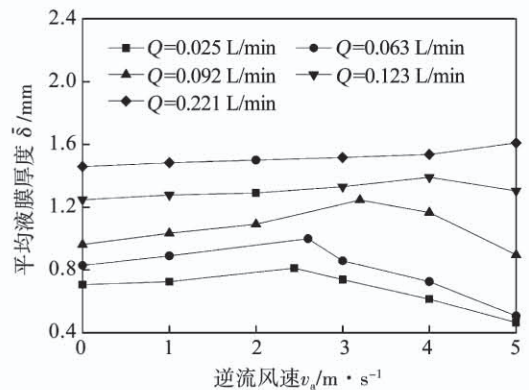


图 11 平均液膜厚度、逆流风速和喷淋流量的关系  
Fig. 11 The relationship between average liquid film thickness, counter-current air speed and spray flow

### 3.3 逆流条件下液膜厚度的半经验关联式

半椭圆管上下结构差异较大,因此定义  $\beta$  为:

$$\begin{cases} \sin\beta = \sin\alpha, 0 \leq \alpha \leq 90^\circ \\ \sin\beta = \sin(\arctan(-\frac{b}{a}\tan\alpha)), 90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \end{cases} \quad (4)$$

由于  $v_a$  对上半圆周基本无显著影响,因此结合 Rogers 等人<sup>[19]</sup>关联式结构并通过实验数据拟合,能得到半椭圆管在  $0 < \alpha \leq 90^\circ$  的经验关联式:

$$\delta/D = 2.89 Re^{1/3} Ar^{-1/3} (\sin\beta)^{-0.25} \quad (5)$$

其中,相关系数  $R^2 = 0.978$ ,适用  $Re = 47 \sim 409$ ,  $0 < \alpha \leq 90^\circ$ ,  $H = 25 \text{ mm}$ 。当  $90 < \alpha < 180^\circ$  时,通过实验数据拟合简化后,得到不考虑逆流风速时的半经验关联式:

$$\delta/D = 9.75 Re^{0.15} Ar^{-1/3} (\sin\beta)^{-0.58} \quad (6)$$

其中,相关系数  $R^2 = 0.21$ ,拟合值与实际偏差较大。由于理论推导以二维展开,但实际管底部会有液体轴向的流动、汇聚,导致液膜尾部区域有液体堆积,液膜加厚。轴向流动受管曲率影响较大,并且观察拟合值与实际值的差值,也发现随  $\beta$  的增大差值显著增加。因此,在式(6)的基础上引入弧度制  $\beta$  的多项式,发现  $\beta$  的一次项拟合效果最好,最终得到:

$$\delta/D = 7.95 Re^{0.11} \cdot Ar^{-1/3} \cdot \beta \cdot (\sin\beta)^{-0.18} \quad (7)$$

其中,相关系数  $R^2 = 0.983$ ,  $Re = 47 \sim 409$ ,  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ ,  $H = 25 \text{ mm}$ 。当考虑  $v_a$  的影响,参考弗劳德数  $Fr$  的形式,引入  $v_a$  的无量纲数  $v_a^*$ :

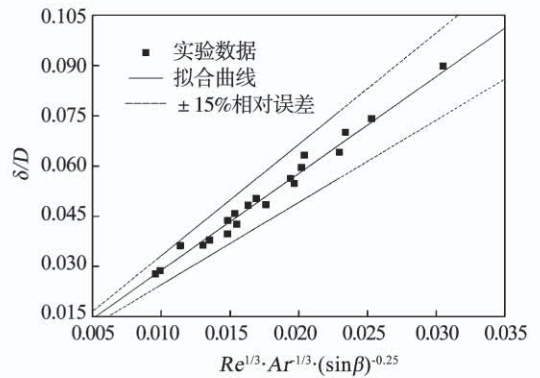
$$v_a^* = v_a / \sqrt{g\xi} = v_a \left( \frac{g\sigma}{\rho_l} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (8)$$

式中: $\xi$ —毛细管常数,  $m$ ;  $\sigma$ —液体表面张力,  $N/m$ 。

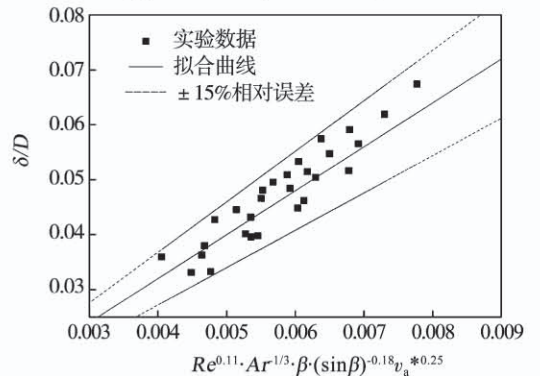
$$\delta/D = 7.95 Re^{0.11} \cdot Ar^{-1/3} \cdot \beta \cdot (\sin\beta)^{-0.18} v_a^{*0.25} \quad (9)$$

其中,相关系数  $R^2 = 0.952$ ,适用范围  $Re = 47 \sim 409$ ,  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ ,  $H = 25 \text{ mm}$ ,  $0 < v_a < v_e$ 。超过  $v_e$  时,液膜分布不均,波动过大,因此难以建立合适的关联式。

将关联式预测值与实验值进行比较,发现半椭圆管上下半周贴合度较高,相对误差均小于 15%,符合工程允许范围,预测准确性较好,如图 12 所示。



(a)  $Re=47\sim 409, 0 < \alpha \leq 90^\circ, H=25 \text{ mm}$



(b)  $Re=47\sim 409, 90^\circ < \alpha < 180^\circ, H=25 \text{ mm}, 0 < v_a < v_e$

图 12 关联式预测值与实验值的比较

Fig. 12 Comparison of predicted data and experimental data correlation formula

## 4 结 论

(1) 逆向气流会对管外水膜产生影响,并存在一个临界速度。当逆流风速小于临界速度时,液膜分布与无空气流动时相似,液膜厚度沿圆周方向先减小后增大。随逆流风速的增大,液膜厚度在管上半周基本不变,在下半圆周逐渐增大。当超过临界速度时,随逆流风速的增大,液膜厚度在管尾部区域显著减小,且沿着圆周角的分布曲线其峰值向圆周角更小的位置偏移,波动更为剧烈。若逆流风速过大,将导致液膜被吹飞,管外干斑出现。

(2) 半椭圆管的平均液膜厚度随逆流风速的增加先增加后减小,在等于临界风速时最大;平均液膜厚度随喷淋流量的增加而增加;当喷淋流量越小,逆流风速越大时,平均液膜厚度越小。

(3) 基于回归分析,得到逆流条件下单根半椭圆管液膜厚度的半经验关联式,适用雷诺数范围为  $47 \sim 409$ ,布液高度  $25 \text{ mm}$ ,逆流风速小于临界值。拟合值与实际数据误差不超过 15%,准确度较高。

## 参考文献:

- [1] 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(S2):23-28.  
HE Mao-gang, WANG Xiao-fei, ZHANG Ying. Review of prior research and new technology for horizontal-tube falling-film evaporator used in refrigeration [J]. CIESC Journal, 2008, 59 ( S2 ): 23 - 28.
- [2] JIGE D, MIYATA H, INOUE N. Falling film evaporation of R1234ze(E) and R245fa on a horizontal smooth tube[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2019, 105: 58-66.
- [3] LIU Xiao-hua, CHEN De-hong, SHAN Fu-ping, et al. Study on the performance of a scale inhibitor during horizontal-tube falling film evaporation of seawater[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 227(6):062018.
- [4] ALIMARDANI F, MOGHADDAM H A, SARMIAN A, et al. Pressure loss and performance assessment of horizontal spiral coil inserted pipes during forced convective evaporation of R-600a. [J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 107:20-30.
- [5] 罗林聪,潘继红,田茂诚,等. 管形对水平管降膜圆周膜厚和 Nusselt 数的影响[J]. 化工学报,2013,64(8):2760-2768.  
LUO Lin-cong, PAN Ji-hong, TIAN Mao-cheng, et al. Influence of tube shape on falling water film thickness and Nusselt number outside horizontal tube[J]. CIESC Journal, 2013, 64(8):2760-2768.
- [6] 彭泰铭,周亚素,胡昊,等. 半椭圆管水平降膜液膜厚度图像数字化处理研究[J]. 工程热物理学报,2018,39(9):2040-2047.  
PENG Tai-ming, ZHOU Ya-su, HU Hao, et al. Research on the thickness of falling liquid film outside horizontal semi-elliptical tubes with digital image processing [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(9): 2040 - 2047.
- [7] 王树信,周亚素,胡昊,等. 喷淋水膜对半椭圆管壁面温度分布影响[J]. 流体机械,2020,48(4):83-88,11.  
WANG Shu-xin, ZHOU Ya-su, HU Hao, et al. The influence of spray water film on outer-wall temperature distribution of semi-elliptical tube[J]. Fluid Machinery, 2020, 48(4):83-88, 11.
- [8] GSTOEHL D, ROQUES J F, CRISINEL P, et al. Measurement of falling film thickness around a horizontal tube using a laser measurement technique[J]. Heat Transfer Engineering, 2004, 25(8):28-34.
- [9] CHEN Xue, SHEN Sheng-qiang, WANG Yao-xuan, et al. Measurement on falling film thickness distribution around horizontal tube with laser-induced fluorescence technology[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 89: 707-713.
- [10] 段林林,高虹,杨晓宏,等. 水平管降膜流动液膜铺展的试验[J]. 流体机械,2017,45(2):62-65,5.  
DUAN Lin-lin, GAO Hong, YANG Xiao-hong, et al. Experimental film spreading on horizontal tube falling film flow[J]. Fluid Machinery, 2017, 45(2):62-65, 5.
- [11] SUN F, XU S, GAO Y. Numerical simulation of liquid falling film on horizontal circular tubes [J]. Frontiers of Chemical Science and Engineering, 2012, 6(3): 322-328.
- [12] 陈自刚,李庆生,李诗韵,等. 水平管蒸发器管外降膜流动数值分析[J]. 石油化工设备,2018,47(4):1-6.  
CHEN Zi-gang, LI Qing-sheng, LI Shi-yun, et al. Numerical analysis of falling film flow outside the tube of horizontal tube evaporator[J]. Petro-Chemical Equipment, 2018, 47(4): 1-6.
- [13] 蒋淳,陈振乾. 水平管外降膜蒸发流动和传热特性数值模拟[J]. 化工学报,2018,69(10):4224-4230.  
JIANG Chun, CHEN Zhen-qian. Numerical simulation of fluid flow and heat transfer characteristics of falling film evaporation outside horizontal tubes [J]. CIESC Journal, 2018, 69 ( 10 ): 4224 - 4230.
- [14] 尹应德. 蒸发式冷凝制冷系统的模拟、实验及节能应用研究[D]. 华南理工大学,2012.  
YIN Ying-de. Simulation and experiment and energy-conserved applied research of evaporative condensed refrigeration system [D]. South China University of Technology, 2012.
- [15] 程曼. 水平管外水风传热传质数值模拟[D]. 武汉:华中科技大学,2014.  
CHENG Man. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree for the master of engineering [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [16] 李乐,李成,张亚军. 逆流空气作用下水膜流动行为的试验研究[J]. 节能技术,2016,34(4):301-304.  
LI Le, LI Cheng, ZHANG Ya-jun. Experimental investigation on the water film behavior with counter-current air flow [J]. Energy Conservation Technology, 2016, 34(4):301-304.
- [17] NUSSELT W. Die oberflächen kondensation des wasser damfes [J]. Z Ver Dtsch Ing, 1916, 60: 541-546.
- [18] ROGERS J T. Laminar falling film flow and heat transfer characteristics on horizontal tubes [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1981, 2(59): 213-222.
- [19] ROGERS J T, GOINDI S S. Experimental laminar falling film heat transfer coefficients on a large diameter horizontal tube [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1989, 4 ( 67 ): 560 - 568.
- [20] 周亚素,王树信,胡昊. 一种水平降膜布液器 [P]. 中国:CN210674258U,2020-06-05.  
ZHOU Ya-su, WANG Shu-xin, HU Hao. A horizontal falling film dispenser [P]. CN210674258U, 2020 - 06 - 05.
- [21] 胡昊,周亚素,王树信. 半椭圆管水平降膜液膜厚度影响因素研究[J]. 化学工程,2020,48(8):18-23,35.  
HU Hao, ZHOU Ya-su, WANG Shu-xin. Research on interfering factors of thickness of falling liquid film outside horizontal semi-elliptical tube [J]. Chemical Engineering. 2020, 48 ( 8 ): 18 - 23, 35.