

水平管外降膜流动的膜厚测量和数值模拟

何茂刚, 范华亮, 王小飞, 吕凯

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 采用激光诱导荧光法结合数字图像处理技术对水平管外降膜流动的液膜厚度进行了测量, 得到了常温常压下水在水平光滑管和 Turbo-CII 强化管外降膜流动的过程中, 液膜厚度随流量、管周角度和液体分布装置布液高度变化的规律. 采用 Fluent 软件对单根水平管外的流动情况进行了二维数值模拟, 并把计算结果和实验结果进行了对比. 实验和模拟结果表明: 上半周的液膜厚度比下半周的大, 且在水平管上半周沿顺时针方向随着角度的增大而变小, 而在水平管下半周变化不大, 液膜最薄点出现在水平管下半周靠近 90° 附近的位置; 液膜厚度随着流量的增大而变大, 随着布液高度的增大而变小; 管外液膜流动有波动, 上半周的液膜波动比较大, Turbo-CII 强化管外液膜表面的波动要比光滑管的小.

关键词: 水平管; 膜厚测量; 激光诱导荧光法; 数值模拟

中图分类号: TK172 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)09-0001-05

Experimental Study and Numerical Simulation on Falling Film Thickness Outside a Horizontal Tube

HE Maogang, FAN Hualiang, WANG Xiaofei, LÜ Kai

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The measurement of the falling film thickness outside a horizontal tube of a falling film evaporator was performed with the laser induced fluorescence method and the image processing technique. The influences of feeder height, flow rate, and surface geometry configuration on the falling film thickness were explored during the subcooled liquid flowing outside a horizontal plain tube and a Turbo-CII tube at the ambient temperature and pressure. The two-dimension simulation on the water film flow around a plain tube was conducted with the Fluent, and the calculation results were compared with the experimental data. The results show that the film thickness at the upper semi-circular is greater than that at the lower semi-circular. Moreover, it decreases with the increase in the angle in the clockwise direction at the upper semi-circular, and changes slightly at the lower semi-circular. Further, the smallest value of the film thickness is near the 90° location at the lower semi-circular, and the film thickness increases with the increase in Re value and decreases with the increase in the feeder height. In addition, the film wave is stronger at the upper semi-circular, and the wave on the Turbo-CII tube is weaker than that on the plain tube.

Keywords: horizontal tube; film thickness measurement; laser induced fluorescence method; numerical simulation

水平管外降膜流动具有流量小、温差小、传热系数高等优点, 已作为一项高效传热传质技术应用于

大型制冷、海水淡化、石油裂解等领域. 在水平管外降膜流动充分发展的层流区域中, 液膜和管壁的热

传递实际上是以导热为主的对流换热,液膜的厚度与表面传热系数成反比关系^[1].研究液膜厚度是研究水平管外降膜流动特性和换热机理的关键. Nusselt^[2]基于流型为片状流等一系列假设,并忽略动量作用,得到了经典的膜厚表达式

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

Bourouni 等^[3]把水平管外周向上的液膜分布从顶端开始分为4个区域,分别为滞止区、冲击区、自由绕流发展区和完全自由绕流发展区. Fujita 等^[4]通过研究在发展区和充分发展区之间增加了一个转变区.在实验方面, Rogers^[5]采用探针对沿圆周 45°、90°和 135°的水膜厚度进行了测量,在 90°附近的水膜厚度比上半区稍大,与理论预测结果不符,实验结果平均比理论预测结果大 30%,这可能是忽略了界面波或者接触式测量手段会有一定的影响.非接触的学法是近年来众多学者采用较多的一种膜厚测量方法^[6-9].

本文主要研究常温常压下液体在水平管外降膜流动的特性,采用激光诱导荧光法和图像处理技术对水平光滑管和 Turbo-CII 强化管外的液膜厚度进行了实验测量,同时用 Fluent 软件模拟了液膜厚度在水平管周向的分布,并与实验结果进行了对比.

1 实验原理及实验系统

图 1 为光滑管和强化管的气固界面与气液界面位置图像对比.在被测液体中加入少量的荧光物质,用一束通过水平管中轴线的片光源照射管外液体,由于荧光物质的作用,被激光照射处将发射一定波长的荧光带,形成一个垂直于水平管的激发荧光带,利用高速摄像机在切线方向上捕捉激发荧光带,则可以清晰地捕捉到该角度位置的液膜和空气的分界面.这样通过与事先捕捉的无液体绕流的干管的分解面的位置进行对比,然后通过图像处理技术进行数据读取.图像处理过程为:采用 Matlab 程序将一定数量的真彩色图像转换为灰度图像,由于荧光带内部灰度差异很小,荧光带周围内部的灰度差异也很小,而荧光带与其周围的灰度存在很大差值,根据这一原理,可以确定出气液界面和气固界面的位置,通过两者的位置差就可以确定液膜厚度的像素点数目,将各个图片的像素点数目取平均值,乘以像素即可确定出液膜厚度.图 2 为液膜厚度测量原理示意图,图中 β 为测量角度,圆管 0°角的起始位置为竖直方向.

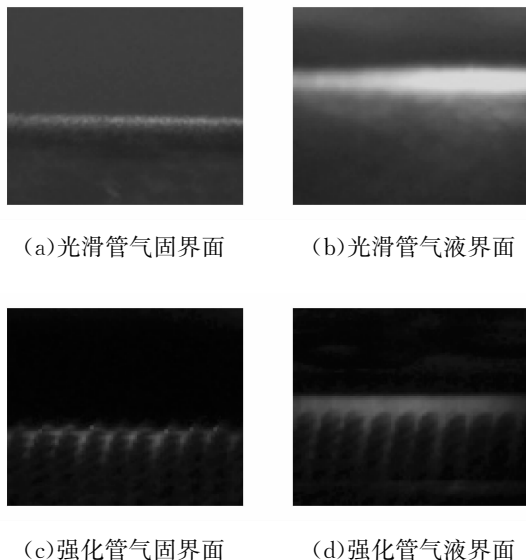


图 1 气固界面与气液界面位置图像对比

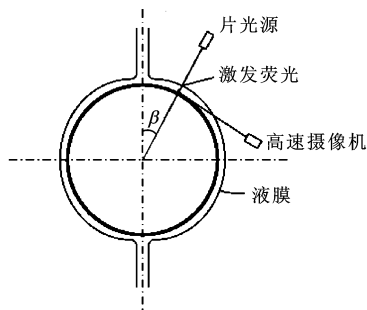


图 2 液膜厚度测量原理示意图

水平管外降膜流动实验系统如图 3 所示.实验系统主要由测试段、光路系统、水循环系统组成.测试段包括液体分布装置和水平管固定装置.液体分布装置保证液体在流动过程中沿管周和管长方向均匀分布,以提供稳定的降膜流动过程.测试管是直径为 19 mm 的光滑管和强化管,强化表面为 Turbo-CII.光路系统主要包括片光源、位置调节系统和高速摄像机.水循环系统的主要作用是给测试段提供持续的定压定温循环水,以确保降膜流动过程持续稳定.水循环系统包括储水槽、循环泵、过滤器、流量计以及调节阀若干.本研究采用的流量计为 LWY-6B 型智能现场显示涡轮流量计,精度为 0.01 L/h.

液膜厚度 δ 的测量过程如图 4 所示.实验前首先调整液体分布装置和水平管束的位置,使其严格水平,防止因测试管的倾斜造成对液膜厚度分布的影响.调节出适当光强的片光,并且根据需调整片光的长度和宽度,通过片光调节器和同轴调节器的配合,使片光能水平通过待测管的中轴线.调整位置调节器,使入射片光以待测角度入射水平管并固定

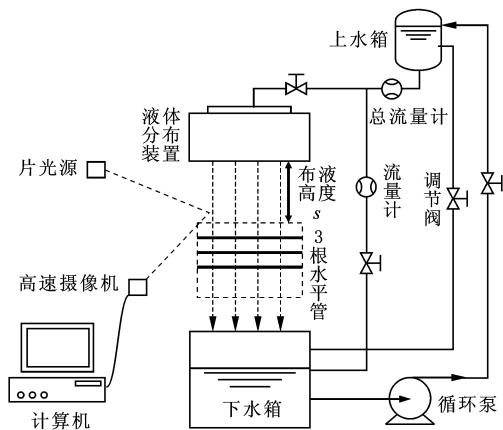


图3 水平管外降膜流动系统示意图

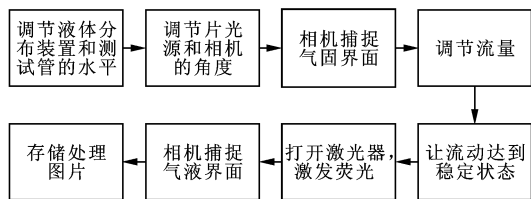


图4 实验步骤流程图

该位置调节器. 调整摄像机位置, 使摄像机与入射片光垂直, 并固定该位置调节器; 拍摄干管位置, 记录管外表面边缘线. 打开液体循环系统, 调整流量使流型维持在稳定待测流型下, 并且让系统运行足够长的时间以保证水平管外壁充分润湿; 拍摄液体流过的水平管位置, 记录气液界面. 通过图像处理取得液膜厚度值^[10].

2 数值模拟

气液两相共存使得管外降膜流动变得非常复杂, 同时实验存在盲区, 因此为了更好地探究水平管外降膜流动特性, 本文进行了数值模拟. 采用 VOF 模型模拟水平管外降膜流动; 采用由 Gambit 程序生成的四边形网格对液相区域和气液交界面的两相区域进行局部加密; 采用非稳态模型, 时间步长为 0.2 ms, 模拟水在常温常压的空气中绕光滑管流动. 网格划分及边界条件见图 5.

3 结果和讨论

实验工质为常温(27°)常压(约 98 kPa)下罗丹明 B 的水溶液, 质量浓度为 0.2 g · L⁻¹. 布液高度 s 分别为 3、6、9、12 和 19 mm. 测试管为光滑管和 Turbo-CII 强化管. 液膜雷诺数定义式如下

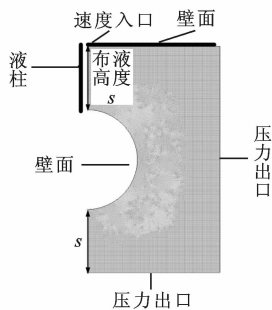


图5 网格划分及边界条件

$$Re = \frac{4\Gamma}{\eta_L} = \frac{\rho Q_v}{L\eta_L} \quad (2)$$

式中: Γ 为水平管单侧的质量流速; η_L 为工质动力黏度; Q_v 为工质体积流量; ρ 为密度; L 为沿管长方向的润湿长度. 经过计算, 本文中实验的 Re 都在 200 ~ 600 之间, 而湍流转换发生在 $Re=1\ 600 \sim 1\ 800$ 时^[11], 因此本文的实验测量都是在稳定层流下进行的, 其流型为柱状流动.

3.1 与文献值的比较

在 Re 为 574、布液高度为 6 mm 的条件下, 本文对光滑管外膜厚的实验测量值、数值模拟结果与 Nusselt^[2] 的理论值、Gotoehl^[9] 的实验结果进行了对比, 如图 6 所示. 可以看出, 本文实验测量结果在 $\beta < 84^\circ$ 时与 Nusselt 的理论值接近, 但是在 $\beta > 96^\circ$ 时比 Nusselt 的理论值要小, 膜厚的变化趋势与 Gotoehl 的测量结果一致, 测量的膜厚值也基本吻合. 本文数值模拟的目的是预测水平管外液膜沿管周向的分布规律, 模拟结果较准确地预测了液膜在周向的总体分布规律, 即液膜在水平管上半周顺时针方向随着角度的增大而变薄, 在水平管下半周液膜厚度变化不大, 液膜最薄点出现在水平管下半周靠近 90° 附近的位置. 但是, 数值模拟的结果比实验测量结果总体偏大, 说明数值模拟方法在预测某一角度的液膜厚度时还存在着较大的偏差. 其原因可能有两点: 一是模型忽略了水平管长度方向上液膜之间的相互影响; 二是所用模型是二维的, 与实际过程存在偏差. 下一步的工作就是进一步改进模拟模型, 以期更好地预测液膜厚度在水平管的分布.

综合可以看出, 液膜厚度并非关于管周 90° 对称分布, 液膜在水平管的上半周较厚, 且变化较大, 而在下半周变化较小, 管周液膜最薄点出现在 90° 附近.

3.2 两种管表面膜厚随时间变化的特性

图 7 给出了两种管的膜厚随时间变化的趋势,

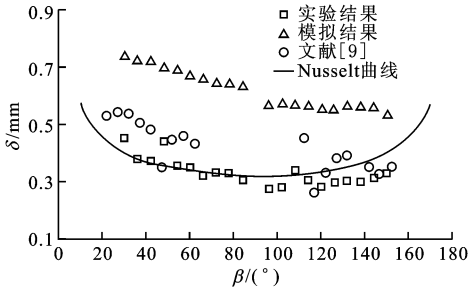


图6 实验、模拟结果与文献值的比较

时间间隔为 0.05 s、测点角度 β 为 48° 、 Re 为 225、布液高度为 12 mm. 测量点的膜厚值是 0.05 s 内所有采样点的平均值. 定义 ϵ 为数据偏差值, 表示测量值与平均值的差值的绝对值和平均值的比率. 经过计算, 光管的 ϵ 为 6.2%, 强化管的 ϵ 为 2.8%, 表明测量数据都是稳定可信的. 从图中可以看出: 光滑管与 Turbo-CII 管外液膜厚度都随时间做随机变化, 但 Turbo-CII 管外液膜厚度随时间变化的幅度要比光滑管小, 且 Turbo-CII 管外液膜厚度随时间变化出现的最大值与最小值之差在 0.02 mm 以内, 而光滑管的在 0.07 mm 之内, 分别为平均膜厚的 6% 和 15%; 另外, Turbo-CII 管外液膜厚度始终小于光滑管. 这在一定程度上说明了强化表面具有稳定管外液体流动的作用. 对于水平管外液膜的层流流动, 底部为黏性层流, 在液体表面会存在非常小的界面波. 强化管外表面由于存在肋结构, 液膜厚度相对变薄, 表面波也会随之变得很小.

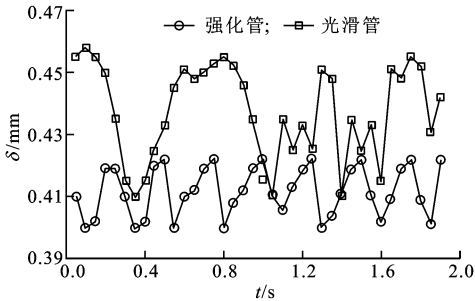


图7 膜厚随时间变化的趋势

通常在某种流动条件下由于某种原因, 膜厚的变薄会引起管外壁液膜破裂, 发生局部干涸现象. 根据本文的实验结论, 可以推测出易于发生局部干涸的区域. 考虑到管外换热过程、发生相变及局部产生气泡等因素, 下半管周向 β 为 $95^\circ \sim 120^\circ$ 的范围内膜厚最薄点更易于发生局部干涸现象. 与光滑管相比, 强化管的肋结构有利于存储少量液体, 从而可以起到稳定流动的作用, 因而强化管可以提供更好的液体分布均匀性.

3.3 流量及布液高度对液膜的影响规律

图 8 和图 9 分别给出了光滑管和 Turbo-CII 强化管周向 β 为 48° 时膜厚随流量和布液高度变化的实验结果. 从图中可以看出, 无论是光滑管还是强化管, 管外膜厚值均随布液高度的增大有减小的趋势. 因为布液高度越大, 液体到达管上的速度越大, 在水平管顶端不易形成滞止堆积, 故在管外成膜的厚度相对变小. 但是, 对于光滑管间距为 3 mm 的情况例外. 在相同布液高度下, 膜厚随着流量的变化比较缓慢, 但总体上膜厚随流量的增大呈增大的趋势.

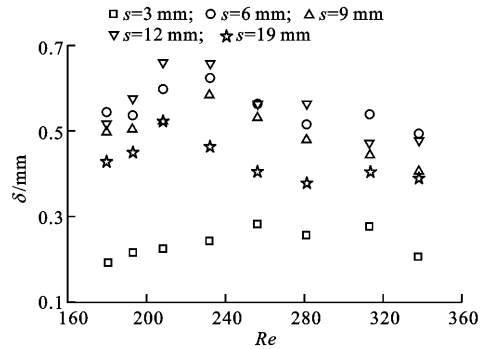


图8 光滑管外膜厚随布液高度及流量变化的曲线

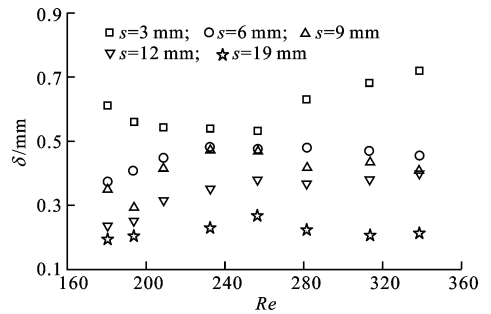


图9 强化管外膜厚随布液高度及流量变化的曲线

为了弥补实验测量的盲点, 数值模拟了光滑管外膜厚随布液高度和液体流量的变化. 图 10 是 Re 为 448 时不同布液高度下膜厚沿管周的分布. 从图中可以看出: 对于上半周, 膜厚受布液高度的影响比较明显, 随着布液高度的增加, 液膜厚度变小; 对于下半周, 膜厚受布液高度影响不明显. 从计算数值可看出: 随着布液高度增加, 膜厚将稍有减小; 对于小的布液高度, 膜厚在上半周和下半周的分布差异很明显, 且随着布液高度的增大, 这种差异逐渐减小. 这与水平管顶部液体滞止区在管周上的分布相关, 对于小的布液高度, 液体滞止区相对较大, 滞止区膜厚也相对较大. 图 11 是布液高度为 12 mm 时不同流量下液膜厚度沿管周的分布. 随着流量的增加, 膜厚增大, 这与实验的整体趋势一致.

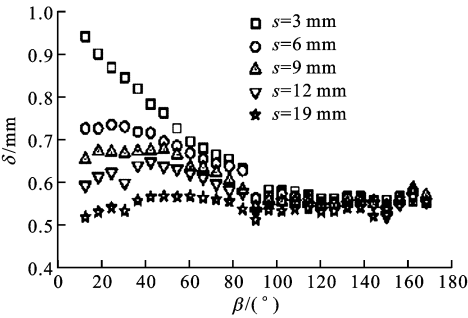


图 10 膜厚模拟值随布液高度的变化规律

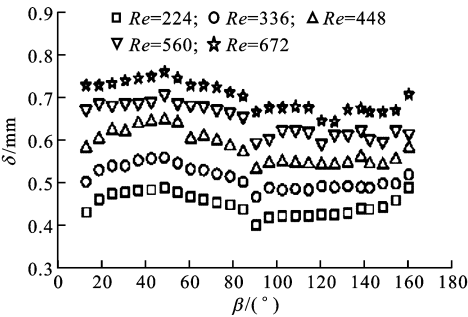


图 11 膜厚模拟值随流量的变化规律

4 结 论

采用激光诱导荧光法结合数字图像处理技术对水平管外降膜流动的液膜厚度进行了测量,得到了常温常压下水在水平光滑管和 Turbo-CII 管外降膜流动的过程中,液膜厚度随流量、布液高度的变化规律. 液膜在水平管上半周的平均厚度要比下半周大,液膜最薄点出现在下半周靠近 β 为 90° 的一边. 相对于水平光滑管,强化管外液膜表面波动更小. 采用 Fluent 对单根水平管外的流动情况进行了二维数值模拟,发现液膜厚度在水平管周向上并非上下对称分布,模拟结果与 Nusselt 层流理论在管周上半侧的变化规律符合,在管周下半侧 Nusselt 层流理论由于忽略了流体动量对流动的影响,误差较大. 对数值模拟结果和实验结果进行了对比,所得各个影响因素对液膜在管周上分布规律的影响基本吻合. 本文工作为水平管降膜蒸发器在制冷领域中的应用提供了一些理论参考.

参考文献:

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

[2] NUSSELT W. The condition of stream on cooling surface [J]. Chem Engineering Funds, 1982,1(2):6-19.

[3] BOWOUNIA K, CHAIBIB M T, TADRIST L. Analytical analysis of heat transfer in liquid film dripping around a horizontal tube [J]. Desalination, 2001,141(1):7-13.

[4] FUJITA Y, TSUTSUI M. Experimental and analytical study of evaporation heat transfer in falling films on horizontal tubes [C]//Proceedings of the 10th International Heat Transfer Conference. Brighton, UK: Institution of Chemical Engineers, 1994:175-180.

[5] ROGERS J T, GOINDP S S. Experimental laminar falling film heat transfer coefficients on large diameter horizontal tubes [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1989,67(4):560-568.

[6] SHEDD T A, NEWELL T A. Automated optical liquid film thickness measurement method [J]. Review of Scientific Instruments, 1998,69(12):4205-4213.

[7] ZHANG J T, WANG B X, PENG X F. Falling liquid fin thickness measurement by an optical-electronic method [J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(4):1883-1886.

[8] DESEVAUX P, HOMESCU D, PANDAY P K, et al. Interface measurement technique for liquid film flowing inside small grooves by laser induced fluorescence[J]. Applied Thermal Engineering, 2002,22(5): 521-534.

[9] 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.

[10] WANG Xiaofei, HE Maogang, FAN Hualiang, et al. Measurement of falling film thickness around a horizontal tube using laser-induced fluorescence technique [J]. Journal of Physics, 2009,147(1):175-180.

[11] THOME J R. Engineering databook: III [M]. Lausanne, Switzerland: Wolverine Tube, Inc., 2004: 244-248.

(编辑 荆树蓉)