

布液方式对水平蒸发管管间流型转换的影响

张颖, 吕凯, 王小飞, 何茂刚

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了探究液体分布装置布液方式对水平管管间液体流动流型转换的影响规律,采用可视化方法对3种工质、两种布液高度、8种液体分布装置开孔规格下的水平管管间液体流动流型转换进行了实验测量.通过高速摄像机拍摄,得到了流量由大到小($76 \sim 4.5 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$)调节时管间液体流动的5种流动形态和4种流动流型转换;对比膜雷诺数和伽利略数显示,测量结果与文献数据符合很好,转换雷诺数的最大偏差小于15%.实验结果表明:孔径不变,转换雷诺数随着孔间距增大而增大,孔间距不变,转换雷诺数随着开孔孔径增大而减小;直接布液方式的转换边界大于间接布液方式的转换边界.随着无量纲特征参数的逐渐增大,两种布液高度下的转换边界的差异逐渐减小.当无量纲特征参数大于40时,布液高度对管间液体的流动流型转换几乎无影响.

关键词: 换热性能;流型转换;开孔规格;布液高度;转换边界

中图分类号: TK172 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)01-0019-05

Effects of Liquid Distribution Method on Falling-Film Mode Transitions Between Horizontal Tubes

ZHANG Ying, LÜ Kai, WANG Xiaofei, HE Maogang

(MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The inter-tube flow mode transitions of three working fluids under the conditions of two distribution heights, eight different orifice configurations were measured with the visualization method, and the effect of liquid distribution on falling-film flow transitions was discussed. Five flow modes and four flow transitions were obtained by a high-speed camera. The measurement results agree well with literature data from reduced film Reynolds number and non-dimensional Galileo number, and the maximum relative deviation of transition Reynolds number is less than 15%. The experiment results show that the orifice configuration has a significant influence on inter-tube flow mode transition. The transition Reynolds number decreases with an increase in the hole diameter at a fixed adjacent hole distance while it increases with an increase in adjacent hole distance at a fixed hole diameter. The direct distribution causes larger transition boundary than the indirect one, and the difference between the transition boundaries under direct distribution and indirect distribution decreases with the increase in the non-dimensional characteristic parameter. The influence of the distribution height on flow mode transitions may be ignored when the non-dimensional characteristic parameter is greater than 40.

Keywords: heat transfer performance; flow mode transitions; orifice configurations; distribution height; transition boundary

在水平管降膜蒸发器中,工质经液体分布装置分配后下落到水平管束,在管外部绕流成膜并在周向、轴向上进行再分配,同时从流经水平管内的热流体中吸热,在液固(对流或核态沸腾)、液气(蒸发)界面产生蒸气,完成换热,未蒸发工质流向下一水平管.液体在两管之间的自由空间内加速,然后冲击下一水平管.在雷诺数小于 1 000 的层流范围内,受工质热物性、管束布置、管子形状及表面结构、操作参数的影响^[1-3],液体在管间呈现不同的流态.前人研究已经给出了 3 种基本流型的具体描述(如图 1 所示)^[4-7],此外还有中间混合流态及各种补充流型. Hu 等通过实验研究提出了各个流型对应的换热模型,并得出管间液体流型影响管外换热的结论^[8].

管间流型对于换热、传质、维持换热面充分润湿、避免蒸气携带液滴等都有重要作用,因此流型转换的深入探究对于降膜蒸发器的设计和运行至关重要. Ribatski 等^[9-10]的相关综述性报道详尽地总结了流型转换的研究现状、存在问题,并指出了下一步的研究方向.综合来讲,前人研究大都忽略了液体分布装置结构参数对流动流型转换的影响,只有 Fujita 等^[11]的研究表明,在没有导流管的情况下液体分布装置的开孔参数对液体流动流型转换有重要的影响,但导流管会减弱这种影响.然而,该研究涉及的开孔参数数目较少,无法详尽阐述开孔参数对管间液体流动流型转换的影响规律.

针对上述问题,本文对 3 种工质在两种温度、两种布液高度、8 种液体分布装置开孔规格下的水平管管间液体流动流型转换进行了实验测量,重点探究了液体分布装置布液方式对水平管管间液体流动流型转换的影响规律.

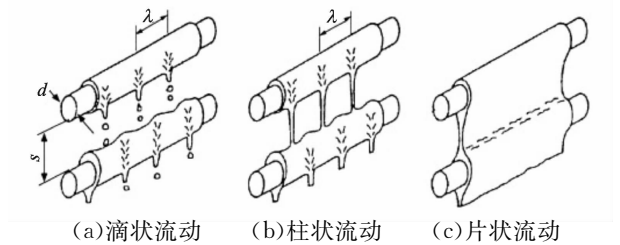


图 1 理想情况下水平管管间流动流型

1 实验系统

水平管外降膜流动实验系统如图 2 所示,其主要由主循环回路、测量回路和光路系统组成.下集液箱、稳压循环泵、过滤器、上集液箱和若干调节阀构成主循环回路,其作用主要是为测量回路提供持续定压的循环工质,确保降膜流动的持续稳定.测量回

路包括涡轮流量计、液体分布装置、水平蒸发管.光路系统主要由高速摄像机和计算机组成,液体流动形态由高速摄像机拍摄并将图像传输至计算机进行存储分析.为了确保实验测量的准确性及良好的复现性,本文对每个流型转换均测量 3 次,且对应每个流型转换拍摄 300~500 张照片,以便于进一步分析.表 1 给出了本文的实验工况.

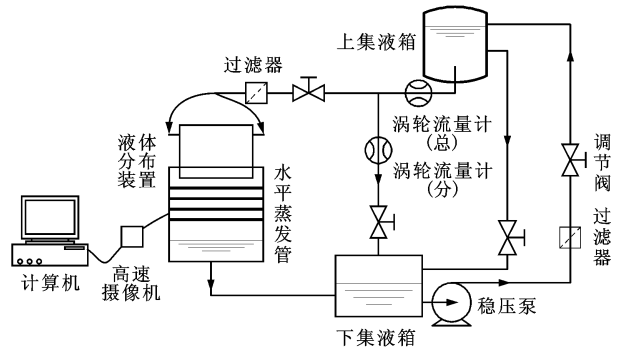


图 2 管间流型转换实验系统示意图

表 1 实验工况

布液高度 H/mm	1.6 (直接布液), 20 (间接布液)
开孔孔径 $d_0\times$ 孔间距 $l_0/\text{mm}\times\text{mm}$	1.0 $\times$ 1.5, 1.0 $\times$ 2.0, 1.5 $\times$ 2.0, 1.5 $\times$ 3.0, 2.0 $\times$ 3.0, 2.5 $\times$ 3.0, 2.5 $\times$ 4.0, 2.5 $\times$ 5.0
工质	水, 乙二醇, 体积比为 1:1 的水/乙二醇混合溶液
管型	光管, Turbo-CII 型强化管, Turbo-B 型强化管
管外径/mm	19.01
管间距/mm	12

2 结果和讨论

管间液体流动的流型转换主要与流量、液体物性,以及液体分布装置的结构有关.流量由膜雷诺数 Re 来表示,液体的物性由修正的伽利略数 Ga 来表示

$$Re = \Gamma/L \tag{1}$$

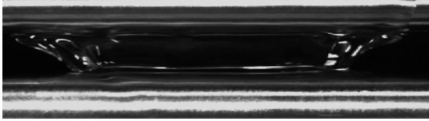
$$Ga = \sigma^3 \rho / (\mu^4 g) \tag{2}$$

式中: Γ 为水平管外单位长度质量流速; μ 为工质的动力黏度; σ 为工质的表面张力; ρ 为工质的密度; g 为当地重力加速度.

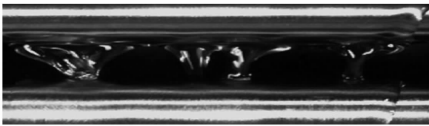
2.1 管间流动流型描述

在足够大的流量下,液体在水平管之间连成一片,如图 3a 所示,此为片状流.减小流量,该液片在轴向上从两端往中间收缩,流量降低到一定程度后,液片撕裂成小的液片和粗的液柱,且呈不可逆性,在 x 方向上部分间断部分连续分布,这种至少出现一根液柱的流型称为片状-柱状共存流型的上限(至少

出现一块片状流的流型称为片状-柱状共存流型的下限),此时认定发生了片状-片/柱状流型转换,如图 3b 所示.继续减小流量,小的片也会断裂成柱,在 x 方向上完全间断,即为柱状流(称为片/柱状-柱状流型转换),如图 3c~3e 所示.随着流量进一步减小,液柱发生轴向摆动且逐渐变细,到一定程度时部分液柱会发生断裂,在 y 方向上出现间断,即为柱状-滴状共存流型,此时发生了柱状-柱/滴状流型转



(a)片状流($Q_l=76\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$)



(b)片/柱混合流($Q_l=59\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$)



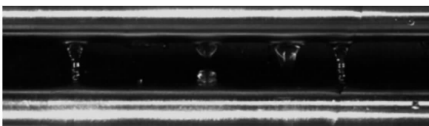
(c)柱状流($Q_l=41\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$)



(d)柱状流($Q_l=35\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$)



(e)柱状流($Q_l=28\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$)



(f)柱/滴混合流($Q_l=15\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$)



(g)滴状流($Q_l=4.5\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$)

常压静止环境;温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $d_0\times l_0$ 为 $2.0\text{ mm}\times 3.0\text{ mm}$;光滑管($d=190.1\text{ mm}$);无导流管($H=20\text{ mm}$)

图 3 乙二醇的管间流动流型

换,如图 3f 所示.当流量小到一定值之后,所有的液柱在 y 方向上发生断裂,呈完全间断分布,即为滴状流,此为柱/滴状-滴状流型转换,如图 3g 所示.

2.2 与已有文献的对比

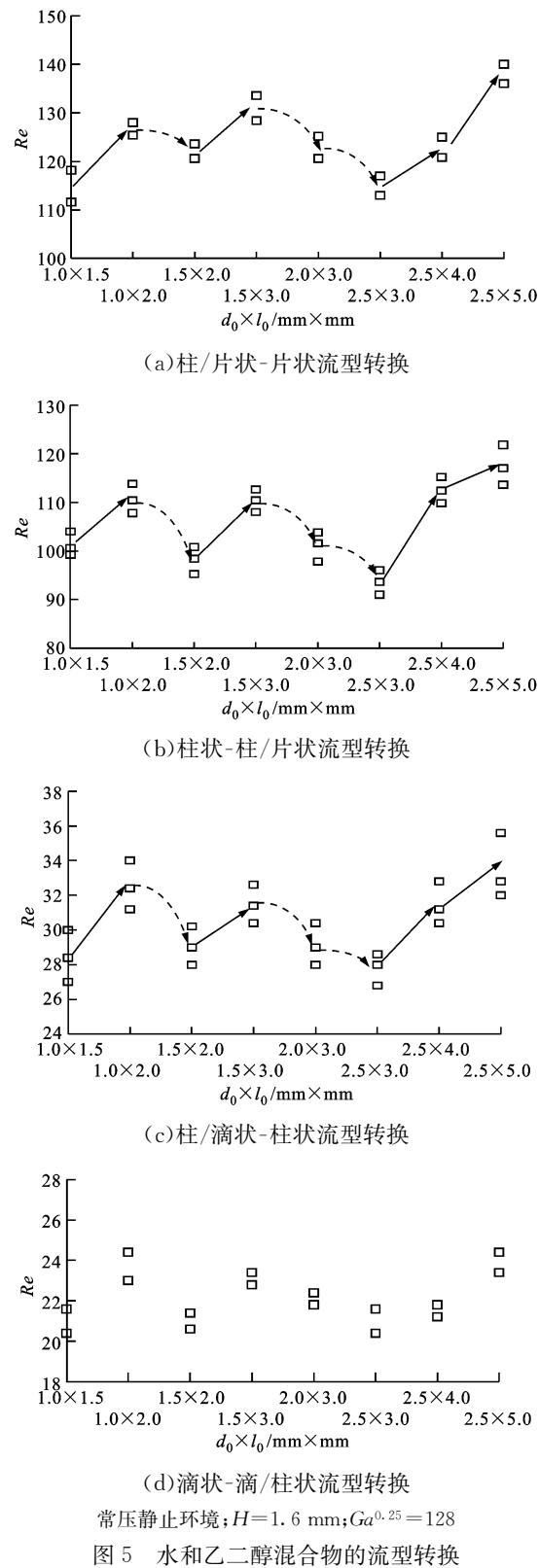
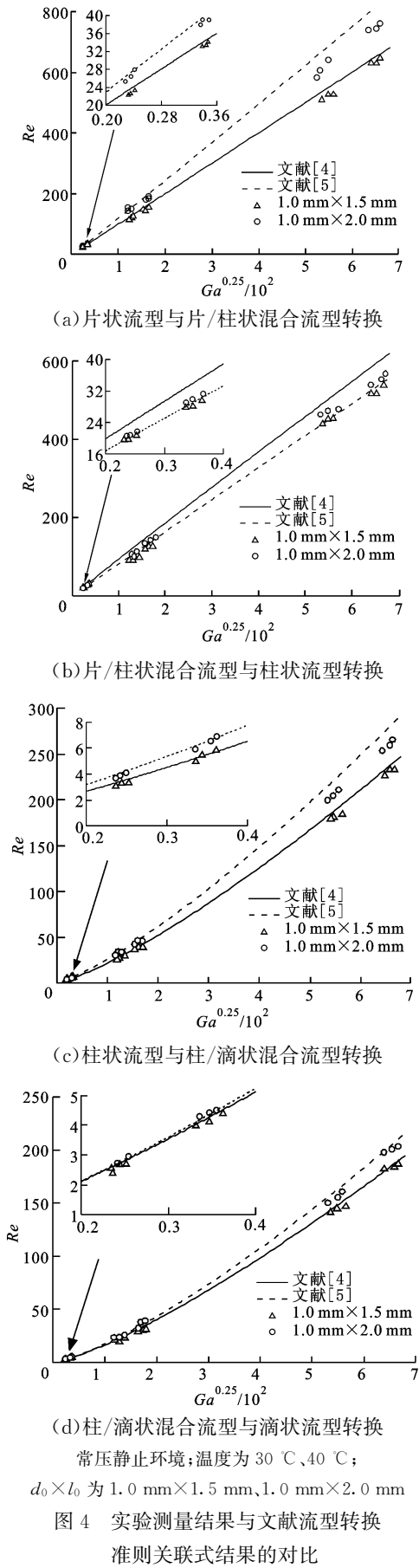
本文实验条件与文献[4-5]相当; H 为 1.6 mm , $d_0\times l_0$ 分别为 $1.0\text{ mm}\times 1.5\text{ mm}$ 、 $1.0\text{ mm}\times 2.0\text{ mm}$.将这两种开孔规格的实验数据与文献拟合关联式的结果进行对比,得到 4 种转换边界对比(如图 4 所示).本文实验测量结果与文献结果符合良好,转换 Re 的最大偏差小于 15% .对于同样的流型转换, $d_0\times l_0$ 为 $1.0\text{ mm}\times 2.0\text{ mm}$ 的转换 Re 始终较大,这种趋势在片状-片/柱状流型转换中表现得最为明显.除了片/柱状-柱状流型转换(图 4b)以外, $d_0\times l_0$ 为 $1.0\text{ mm}\times 2.0\text{ mm}$ 的转换 Re 均大于文献[4]准则关联式的,且小于文献[5]的; $d_0\times l_0$ 为 $1.0\text{ mm}\times 1.5\text{ mm}$ 的转换 Re 小于文献[5]准则关联式的,且与文献[4]的大体一致.开孔规格之间的结构差异对各个流型转换产生了稳定的影响,本文实验及文献[4-5]的结果都很好说明了这一现象.实验结果与文献的对比表明了本文实验测量结果是稳定可信的,同时说明了液体分布装置的开孔规格对管间流型转换有着重要的影响.

2.3 液体分布装置开孔规格对管间流型转换的影响

图 5 给出了混合物管间流动流型转换的测量结果.图中实线连接的为相同孔径不同孔间距的转换,箭头指向孔间距增大的方向,虚线连接的为相同孔间距不同孔径的转变,箭头指向孔径增大的方向.可以看出,对于所有的流型转换,开孔孔径不变,转换 Re 随孔间距的增大而增大;孔间距不变,转换 Re 随开孔孔径的增大而减小.在相同的开孔孔径下,随着孔间距的逐步增大,相邻液柱、液柱与液片之间的交错、扰动变得越来越困难,从而需要更大的流量来抵消这种效应,因而转换边界增大.同样在相同的孔间距下,随着开孔孔径的增大,相邻液柱、液柱与液片之间的交错、扰动变得相对容易,从而在相对较小的流量下,就可以实现柱片之间的流型转换.

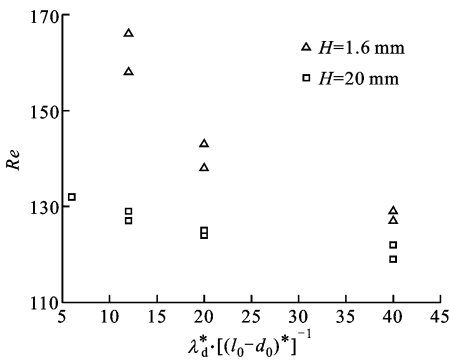
2.4 布液高度对管间流型转换的影响

本文借助两个特征参数 $(l_0-d_0)^*$ 和 λ_d^* 就布液高度对管间流型转换的影响进行了探究. $(l_0-d_0)^*=(l_0-d_0)/\xi$, $\xi=(\sigma/\rho g)^{1/2}$ 为毛细常数; $\lambda_d^*=\lambda_d/\xi$, λ_d 为扰动增长最快的波长,其值反映了工质热物性、扰动液膜表面几何特征和液膜厚度之间的关系.前者表示忽略工质热物性的前提下液体分布装置的结构参数,表征了液体分布装置的布液均匀性,

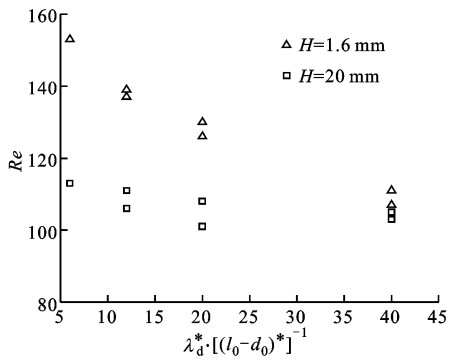


对于一定的开孔孔径,若 $(l_0-d_0)^*$ 很大,开孔间距相对较大,布液均匀性差;若 $(l_0-d_0)^*$ 很小,开孔间距相对较小,布液相对均匀。后者表征滴状流与柱状流的某些尺度特性,如相邻液柱(滴)的分离间距。

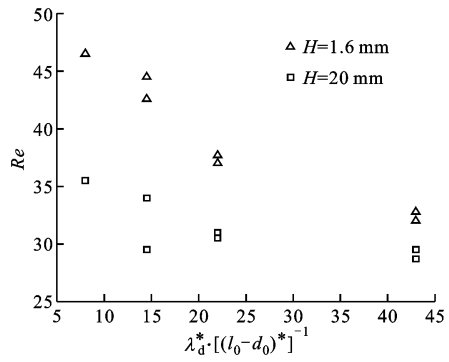
图 6 给出了两种布液高度下的管间流型转换。



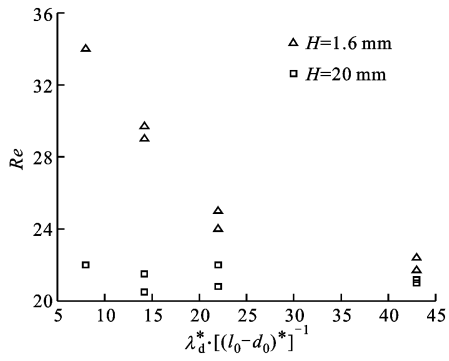
(a) 片状-片/柱状流型转换



(b) 片/柱状-柱状流型转换



(c) 柱状-柱/滴状流型转换



(d) 柱/滴状-滴状流型转换

常压静止环境; $Ga^{0.25} = 128$

图 6 水/乙二醇混合溶液的流型转换

对于所有的流型转换,直接布液下的流型转换边界均大于间接布液. 随着 $\lambda_d^* / (l_0 - d_0)^*$ 的逐渐增大,

两种布液高度的转换边界的差异逐渐减小,这表明若液体分布装置的布液均匀稳定,从而液体绕管流动分布和管间液体流动流型转换受布液高度的影响就可以忽略不计. 在 $\lambda_d^* / (l_0 - d_0)^*$ 较小的情况下,转换 Re 受布液高度的影响很大. 从图中可以看出,在 $\lambda_d^* / (l_0 - d_0)^* > 40$ 的情况下,布液高度对管间液体的流动流型转换几乎无影响. 从上述结果分析可以看出,反映液体分布装置开孔规格的参数 $(l_0 - d_0)^*$ 体现了该装置布液的均匀性,而反映液体在水平蒸发管外绕流成膜流动的波动特性的参数 λ_d^* ,则体现了液膜绕管流动的稳定性.

3 结 论

本文采用可视化方法对 3 种工质在两种温度、两种布液高度、8 种液体分布装置开孔规格下的水平管管间液体流动流型转换进行了实验测量,重点探究了液体分布装置布液方式对水平管管间液体流动流型转换的影响规律. 结果表明,布液方式影响管间流动流型转换. 本文主要结论如下.

- (1) 给出了管间液体流动的 5 种流动形态和 4 种流动流型转换,实验测量结果与已有文献符合很好,转换雷诺数的最大偏差小于 15%,表明本文实验测量结果是稳定可信的.
- (2) 对于所有的流型转换,开孔孔径不变,转换雷诺数随着孔间距增大而增大;孔间距不变,随着开孔孔径增大,转换雷诺数随之减小.
- (3) 布液高度影响流型转换边界,随着 $\lambda_d^* / (l_0 - d_0)^*$ 的逐渐增大,两种布液高度下的转换边界的差异逐渐减小. 在 $\lambda_d^* / (l_0 - d_0)^* > 40$ 的情况下,布液高度对管间液体的流动流型转换几乎无影响.

参考文献:

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

[2] ROGERS J T. Laminar falling film flow and heat transfer characteristics on horizontal tubes [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1981, 59 (2): 213-222.

[3] FUJITA T, UEDA T. Heat transfer to falling liquid films and film breakdown; I Subcooled liquid films [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1976, 21(2): 97-108.

[4] HU X, JACOBI A M. The intertube falling film; Part 1 Flow characteristics, mode transitions, and hys-

- teresis [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1996, 118(3): 16-625.
- [5] ROQUES J F, DUPONT V, THOME J R. Falling film transitions on plain and enhanced tubes [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2002, 124(3): 491-499.
- [6] ARMBRUSTER R, MITROVIC J. Patterns of falling film flow over horizontal smooth tubes[C]//Proceedings of the 10th International Heat Transfer Conference. Brighton, UK; Institution of Chemical Engineering, 1994: 275-280.
- [7] 何茂刚, 范华亮, 王小飞. 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, 9(2): 1-5.
- HE Maogang, FAN Hualiang, WANG Xiaofei. Experimental study and numerical simulation of film thickness on a horizontal tube[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 9(2): 1-5.
- [8] HU X, JACOBI A M. The intertube falling film; Part 2 Mode effects on sensible heat transfer to a falling liquid film [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1996, 118(3): 626-633.
- [9] RIBATSKI G, JACOBI A M. Falling-film evaporation on horizontal tubes a-critical review [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(5): 635-653.
- [10] MITROVIC J. Flow structures of a liquid film falling on horizontal tubes [J]. Chemical Engineering & Technology, 2005, 28(6): 684-694.
- [11] 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 Engineering, 1994: 175-180.

(编辑 荆树蓉)