

下降液膜受热流动与换热的实验研究

(东南大学) 师晋生 施明恒

[摘要] 对竖壁下降液膜受热时的流动换热特性进行了实验研究,观察了液膜的破裂,由实验结果得到了破裂及换热的拟合关联式。

关键词 降膜 破裂 换热

中图分类号 TK124

1 引言

下降液膜在能源、动力、化工、制冷等工业领域有广泛应用。多年来,研究人员对液膜流动与换热都已充分发展的定型流进行了很多研究^[1~3],但对包含较长发展段的降膜的研究则相对较少,而对降膜的破裂,因为影响因素很多,破裂机制十分复杂,人们的认识更加有限,至今还没有统一公认的判别标准。

本文对总长 300 mm 的竖直壁面上的下降液膜受到加热时的破裂和换热特性作了实验观测,得到了液膜破裂和换热的实验关联式,所用工质为水,实验的雷诺数为 1500~4200,最大加热功率为 5×10^4 W/m²。

2 实验系统及步骤

实验系统示于图 1,试验元件为一块长、宽、厚分别为 300 mm×60 mm×1.5 mm 的紫铜板,在其背面沿流动方向的中心线上钻有 5 个小孔,埋入热电偶测量壁温。在一块云母板上绕电阻带,通电对紫铜板试件加热,加热电阻带与试件之间用云母片绝缘,在加热器后面用定型海泡石压紧绝热。

工作介质为纯净蒸馏水,通过一个缝隙式布液器流到紫铜板试件上,布液器是在一段两端封死的紫铜管上铣出一道槽,插入两块间距均匀的薄平板,在其出口设置均匀迭叠的细丝网使液体流出后能均匀分布在试件表面上。

试件置于一个玻璃筒内,玻璃筒外面用玻璃棉包覆绝热,在正对试件的实验表面处裸露一块以供观察,上下用法兰密封,上法兰上开有一个小孔与外界相通,实验压力为环境大气压。在工作液体进入布液器前的管段上插入三副热电偶测量液体进口温

度,工作液体流过实验元件后在玻璃筒下方汇集,然后流出,在其出口处也布置有三副热电偶测量液体出口

温度,所用热电偶均为经过标定的镍铬-镍硅热电偶。流量由一转子流量计测量,系统循环及对液体预热由一恒温水浴提供。

实验前,试件表面打磨光滑平整,擦洗干净,开启恒温水浴电动泵,将流量调至最大维持循环一段时间,使试件表面充分湿润,之后将流量和加热功率调至某设定值,待各测量值不再变化时,即达到稳态,记录各测量数据,然后调节流量和加热功率进行下一个工况。实验参数范围,单位板宽流量 Γ : 0.234~0.698 kg/(m²·s),进口水温 T_{in} : 42.5°C~45°C,雷诺数 Re : 1500~4200,最大加热功率为 5×10^4 W/m²,普朗特数 Pr : 3.14~4.12。

3 实验结果和讨论

3.1 液膜的破裂

液膜从布液器流出后均匀分布在试件的整个板宽范围内,其表面均匀平滑,随着向下流动,表面开始出现有规律的波动,加热功率增加时,这种波动也增大,且在板宽方向也出现变形。一定的流量对应着一定的加热功率,在某一流量下,当加热功率超过该流量所对应的加热功率时,液膜就出现破裂,在试件表面出现裸露区。在本次实验中,破裂首先出现在试件下端二侧边缘,而后向上向中间扩展,液膜在稳定破裂前,先出现暂时性很短暂的破裂,然后很快又消失,这种过程十分短暂。之后加热功率再稍微增加或流量稍微减少,液膜就发生稳定破裂。本次实验出现的暂时破裂和稳定破裂很接近,由实验数据可得稳

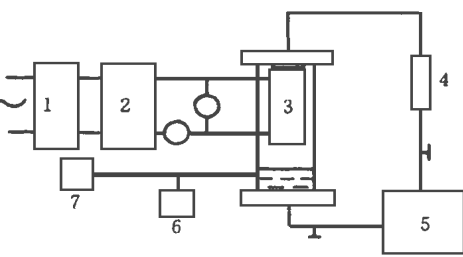


图 1 实验装置简图

1-稳压器 2-调压器 3-试件 4-转子流量计
5-恒温水浴 6-水瓶 7-电位差计

定破裂时流量与加热功率之间的关系式

$$\Gamma_{\min} = 0.6403q^{0.6636} \quad (1)$$

二者的变化关系示于图 2

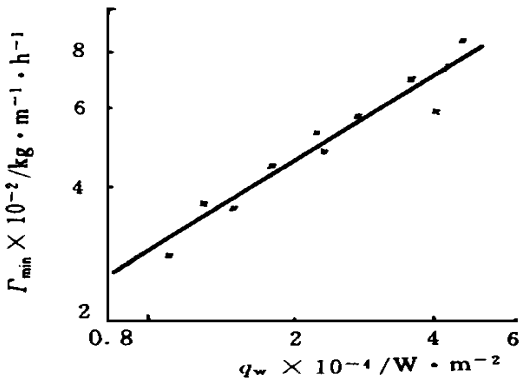


图 2 最小润湿流量与热流密度关系

3.2 换热特性

图 3 示出了 q_w 为 $3 \times 10^4 \text{ W/m}^2$, Re 分别为 2600 和 3800 时试件实验表面沿流动方向的温度分布, 由图可见在同样的热流密度下壁面温度随 Re 增大而减小, 在同一个工况时壁面温度沿流动方向逐渐增高, 在试件下端液膜出口处又有所下降, 这是因为下端边缘散热较多之故

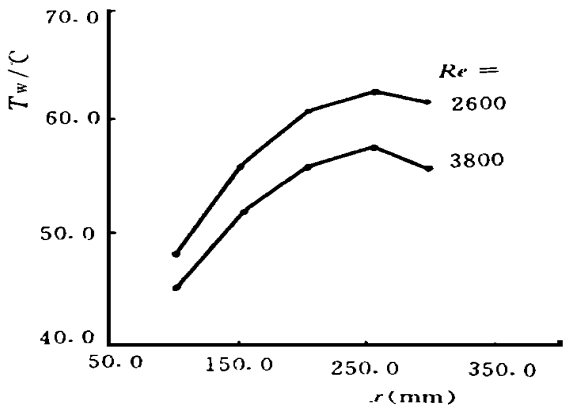


图 3 壁温沿流动方向的分布
($q_w = 3 \times 10^4 \text{ W/m}^2$)

液膜在正常流动时的平均换热系数 \bar{h} 由下式计算

$$\bar{h} = q_w / (\bar{T}_w - \bar{T}_f) \quad (2)$$

q_w 按蒸馏水进出口焓差计算, 并用电功率校验, 本次实验二者相差在 1% 以内, \bar{T}_w 和 \bar{T}_f 分别为壁面和蒸馏水的平均温度, 由上式算得平均换热系数后按

$$\text{下式计算其无量纲平均换热系数 } \bar{h}^* = \frac{\bar{h}}{k} \left(\frac{g}{g} \right)^{1/3} \quad (3)$$

将实验数据整理, 拟合得下面无量纲平均换热系数关联式

$$\bar{h}^* = 0.053Re^{0.158}Pr^{0.422} \quad (4)$$

在实验范围内, 实验数据与该式的分散度为 $\pm 18\%$ 。Wilke^[1]和蒋章焰^[3]等人也曾由实验提出了各自的实验关联式, 本次实验的 Pr 范围为 3.14 ~ 4.12, 将式 (4) 和文献 [1][3] 的关联式中的 Pr 取作 3.5, 按 \bar{h}^* 与 Re 的变化关系示于图 4, 可以看出, 文献 [1] 的结果随 Re 而增大的速度最快, 文献 [3] 与本文随 Re 增大的趋势较小, 二者都比较平坦, 本文的结果较文献 [3] 的大, 较文献 [1] 的小, 本次实验中, 流动长度较短, 发展段对换热的影响较大, 因而整体换热强度较大, 但由于紊流发展得不充分, 紊动对换热的增强作用不大, 所以换热强度随 Re 增大的趋势较小

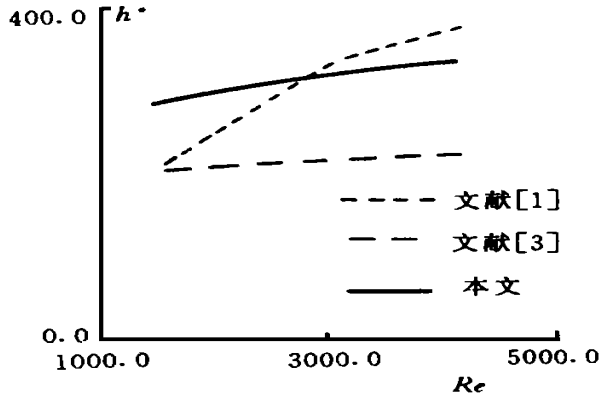


图 4 换热特性

4 结论

(1) 液膜的破裂从试件下端两侧边缘开始, 保持液膜不至破裂的最小润湿流量随加热功率增大而增大。

(2) 在本文实验范围内, 无量纲平均换热系数随 Re 增大的趋势较小。

(3) 液膜破裂及液膜正常流态时的换热特性可分别用式 (1) 及式 (4) 表达。

参考文献

- 1 Wilke W. Wärmeübergang an rieselfilme. Forsch Hft Ver Dt Ing, 1962, 490 28.
- 2 Fujita T, Ueda T. Heat transfer to falling liquid films and film breakdown. Int J Heat Mass Transfer, 1978, 21(2): 97~ 108.
- 3 蒋章焰, 马同泽, 赵嘉琪, 霍秀和. 垂直管外降落液膜的流动和传热特性. 工程热物理学报, 1988, 9(1): 70~ 74.

(渠源 编辑)

circular combustor. A basically same pulsation mechanism is involved in both cases. An acoustic analysis and test has shown that one-dimensional plane waves are propagated. Key words pulsating combustion, square-shaped model Rijke ZT pulsating combustor, square-shaped model Rijke ZT pulsating combustor, test

内循环流化床锅炉稀相区中试性实验研究 = The Pilot-plant Test Study of an Internal Circulation Fluidized Bed Boiler Rarefied-phase Region [刊, 中] /Wang Huaibin, Quan Wentao, Du Jun (Harbin Institute of Technology) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 336~339

A pilot-plant test study is conducted of a 1.4 MW internal circulating fluidized bed. Presented are the effect of a secondary air feeding rate on particle concentration and also a heat transfer experimental correlation. **Key words** fluidized bed, internal circulation, secondary air feeding rate, particle concentration, heat transfer factor

回流区分级着火旋流煤粉燃烧器的试验研究 = An Experimental Study of Recirculation Zone Staged-ignition Swirl-flow Pulverized Coal Burners [刊, 中] /Chen Changdong, Jin Shiping, Ai Yuanfang, et al //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 340~342

A cold-state model experimental study is conducted on the basis of an analysis of the working principle of recirculation zone staged-ignition swirl-flow pulverized coal burners. A modification of swirl-flow pulverized coal burners of No. 5 boiler installed at Huangshi Power Plant was undertaken based on the study results. The operational test results show that these novel burners exhibit relatively good stabilized combustion characteristics when burning low-volatile coals. **Key words** swirl-flow pulverized coal burner, recirculation zone staged-ignition, test, development

下降液膜受热流动与换热的实验研究 = An Experimental Study of Falling Liquid Film Heated Flow and Heat Exchange [刊, 中] /Shi Jinsheng, Shi Mingheng (Southeastern University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 343~344

An experimental study is conducted of flow and heat exchange characteristics of the film of a liquid falling from a vertical wall when the liquid film is being heated. The phenomenon of the film break-up was brought under observation. A fitting correlation for film break-up and heat exchange was obtained from the experimental results. **Key words** falling liquid film, break-up, heat exchange

一种新的热力循环性能的估算方法和 HAT 循环的性能估算方式 = A Method for the Evaluation of a New Thermodynamic Cycle Performance and a Formula for HAT Cycle Performance Evaluation [刊, 中] /Wang Yongqing, Yan Jialu (Harbin Institute of Technology), Wen Xueyou (Harbin No. 703 Research Institute) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 345~347

Based on the fundamental principles of thermodynamics, the authors have come up with a new method for evaluating complicated thermodynamic cycle performance, i. e. a factor correction method. Furthermore, on this basis recommended is a formula for evaluating the performance of a humid air gas turbine cycle. **Key words** thermodynamic cycle, factor correction method, humid air gas turbine, HAT cycle, performance evaluation formula