

## 自由表面摩擦和蒸发对过冷下降液膜传热的影响

师晋生, 陈玉宙

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

**摘要:** 从理论上对下降液膜在自由表面上存在反向剪切力和蒸发散热情况下的换热特性进行了分析, 得到了膜厚, 换热系数的无量纲关系式, 讨论了剪切力、液膜雷诺数、壁面热流、蒸发率对流动和传热的影响。

**关键词:** 下降液膜; 逆向流动; 传热

中图分类号: TK124 文献标识码: A

## 1 引言

由于下降液膜的传热理论在动力、化工、轻工、食品等传统工业和高新技术中(如航空航天, 电子工业及新型太阳能集热器等)长期以来的应用<sup>[1~2]</sup>, 下降液膜的传热包括冷态液膜的受热, 饱和液膜的蒸发已得到了大量研究<sup>[3]</sup>。但这些研究多集中在液膜流动壁面较短的场合, 且大多不计液膜自由表面的气流剪切作用, 因而对于冷态液膜, 大都略去其在自由表面处的散热, 对饱和液膜才考虑自由表面的蒸发。尽管如此, 由于液膜自由表面的存在, 气流摩擦剪切和散热时, 其传热的确定就更加困难。近年来随着对新一代核电站安全性要求的进一步提高, 以水为工质的下降液膜的冷却传热在安全壳内层外壁上也得到了应用<sup>[4]</sup>。在这种情况下液膜自由表面上存在不容忽略的空气与水蒸气的混合气的逆向流动, 液膜受到气流的逆向剪切作用并向气流散发水蒸气, 将热量带走, 这个剪切力和蒸发散热使液膜的流动与传热更加复杂。要确定这类液膜设备的传热能力, 必须对存在剪切作用和蒸发散热情况下的液膜的传热进行深入研究。

在已有的研究中, 当液膜处于过冷状态, 且自由表面没有气流流过时, 液膜从壁面吸热, 而向其自由表面外空气的对流传热和蒸发都很小而可以忽略, 液膜主要通过其温度的上升将壁面热流带走。但当其自由表面处有气流流过时, 对流传质使水蒸气的散发增强, 从而使过冷液膜在自由表面的散热增大, 因而提高了过冷液膜对所流过壁面的冷却能力, 但此时液膜本身吸收的热量相对减少, 其换热特性也

因此发生了改变。由于汽液逆向流动传热的研究非常复杂, 要对这类设备的总体传热能力有比较好的了解, 必须对其传热的各个环节作深入的了解。作为这种研究的一个组成部分, 作者首先以液膜为研究对象, 考察气流施加的剪切力和其向气流的蒸发散热对过冷下降液膜传热特性的影响。

## 2 分析方法

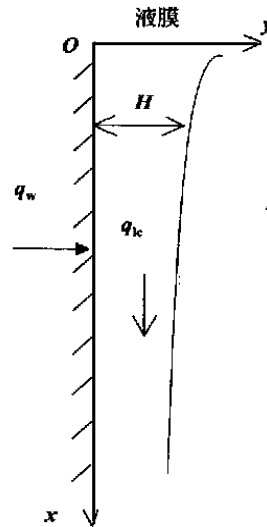


图 1 下降液膜与逆向气流

本次分析先对层流进行, 假设流态已稳定, 并略去波动的影响。为进行分析, 将实际过程简化为图 1 所示的物理模型。过冷液膜从一竖直固壁上流下, 在液膜外边有空气和水蒸气的混合气逆向流过。固壁热流为  $q_w$ , 液膜因温度上升而吸收热量  $q_{fc}$ , 在自由表面因有气液逆向对流而发生传热传质, 热质传递的强度取决于气液的相对流速、温差、湿度等, 液膜由此两种

方式向外界散失热量  $q_1$ 。一般而言, 水蒸气的蒸发带走的热量远比对流传热带走的热量。为简单计, 可当作完全是由水蒸气蒸发而引起。液膜厚度为  $H$ , 因蒸发而沿流向减小, 但因其失去的质量相对于总量很小, 因而膜厚沿流向的减小也较小, 使得可以忽略膜厚变化对流态稳定的假设, 沿流动方向为  $x$  坐标, 垂直于膜厚的方向为  $y$  坐标。

## 2.1 流动

由前述假定, 液膜处于稳态流动, 其所受到的力有向下的重力  $\rho g H$ , 壁面的摩擦力  $\tau_w$  和自由表面处

的摩擦力  $\tau_i$ , 这两个力向上, 与重力平衡,  $\rho, g$  分别为液体的密度和重力加速度, 以  $\mu$  表示液体粘性, 于是, 在膜内  $y$  处, 剪切力为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \rho g(H - y) - \tau_i \quad (1)$$

在壁面上为

$$\tau_w = \rho gH - \tau_i$$

以  $s$  表示自由表面剪切力的相对大小

$$s = \tau_i / \tau_w = \tau_i / (\rho gH - \tau_i) \quad (2)$$

则有

$$\tau_i = \frac{s}{1+s} \rho gH$$

引入无量纲变量对速度和垂直于膜厚方向的坐标进行变换

$$u^+ = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \left( \frac{v g H^+}{1+s} \right)^{1/3}$$

$$(u^+, y^+) = \left( \frac{u}{u^+}, \frac{y u^+}{v} \right) \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)可得

$$\frac{du^+}{dy^+} = 1 - \frac{1+s}{H^+} y^+ \quad (4)$$

在壁面上有  $u^+ = 0$ , 于是得膜内速度分布

$$u^+ = y^+ - \frac{1}{2} \frac{1+s}{H^+} y^{+2} \quad (5)$$

沿膜厚方向的平均速度为

$$u_m^+ = \frac{1}{6} H^+ (2-s) \quad (6)$$

由雷诺数

$$Re = 4\rho u_m H / \mu = 4u_m^+ H^+ = \frac{2}{3} H^{+2} (2-s)$$

得

$$H^+ = \sqrt{\frac{3}{2}} \left( \frac{Re}{2-s} \right)^{0.5} \quad (7)$$

此式表明, 雷诺数增大, 流量增大, 使膜厚相应增大。而  $s$  增大时, 液膜自由表面摩擦剪切力相对增大, 阻碍了液膜的流动, 因而膜厚增大。

## 2.2 传热

液膜从壁面吸热  $q_w$ , 在自由表面因水蒸气蒸发而失去热量  $q_i$ , 由其温度上升带走的热量为  $q_{1e}$ 。其能量方程为

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (8)$$

在所考虑情况下, 有

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T_m}{\partial x} = \frac{q_w - q_i}{\rho c_p \mu_m H}$$

对温度进行无量纲变换, 并以  $s_t$  表示自由表面蒸发散热的相对强度

$$T^+ = \frac{T - T_w}{(q_w - q_i) / \rho c_p u^+}$$

$$s_t = \frac{q_i}{q_w - q_i}$$

由此得能量方程的无量纲形式

$$\frac{\partial^2 T^+}{\partial y^{+2}} = \frac{Pr}{u_m^+ H^+} u^+ \quad (9)$$

边界条件为

$$y^+ = 0, \frac{\partial T^+}{\partial y^+} = -(1 + s_t) Pr$$

$$y^+ = H^+, \frac{\partial T^+}{\partial y^+} = -s_t Pr$$

由此得膜内温度分布及沿膜厚的平均温度为

$$T^+ = -Pr(1 + s_t) + \frac{Pr}{u_m^+ H^+} \left[ \frac{1}{6} y^{+3} - \frac{1}{24} \frac{1+s}{H^+} y^{+4} \right] \quad (10)$$

$$T_m^+ = \frac{\rho c_p u^+ (T_m - T_w)}{q_w - q_i} = 6Pr(1 + s_t) H^+ \cdot \frac{s/8 - 5/24}{2-s} + \frac{36PrH^+}{(2-s)^2} \left[ \frac{1}{30} - \frac{1+s}{48} + \frac{(1+s)^2}{336} \right] \quad (11)$$

于是由液膜本身带走热量所产生的换热系数为

$$\alpha = \frac{q_w - q_i}{T_w - T_m} = \frac{\rho c_p u^+}{T_m^+}$$

无量纲形式为

$$\alpha^+ = \frac{\alpha}{k} \left( \frac{v}{g} \right)^{1/3} = Pr \left( \frac{H^+}{1+s} \right)^{1/3} \frac{1}{T_m^+} \quad (12)$$

液膜在下降过程中, 流量因蒸发而减小, 失去的质量为  $q_i x / r$ ,  $r$  为液膜的蒸发潜热, 分别以  $\Gamma_{in}$  和  $Re_{in}$  代表液膜的起始流量和雷诺数, 则在流过距离  $x$  后, 雷诺数为

$$Re = 4 \left[ \Gamma_{in} - \frac{q_i x}{r} \right] / \mu = Re_{in} - \frac{s_t}{1+s_t} \frac{4q_w}{r\mu} x$$

令  $x^+ = \frac{4q_w}{r\mu} x$  (13)

代表沿流动方向的无量纲坐标, 反映壁面热流, 流动距离和汽化潜热的综合作用。代入式(7)得

$$H^+ = \sqrt{\frac{3}{2}} \left[ \frac{Re_{in} - \frac{s_t}{1+s_t} x^+}{2-s} \right]^{0.5} \quad (14)$$

此式以无量纲形式表达了液膜初始流量、壁面热流、自由表面剪切力、蒸发散热量对膜厚的综合作用。

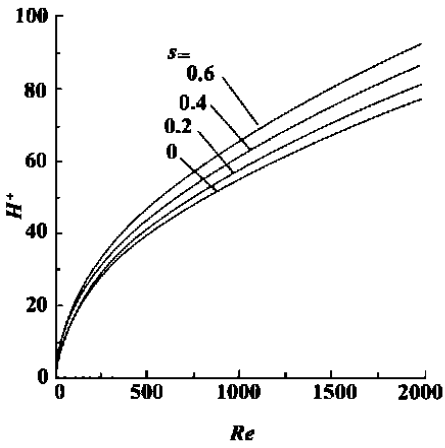


图 2 膜厚随雷诺数的变化

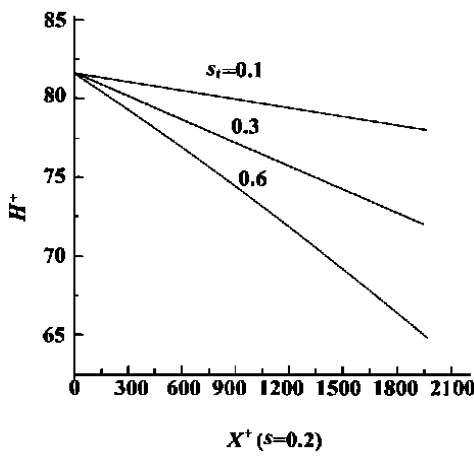


图 3 膜厚沿流向的变化 (Re = 2 000)

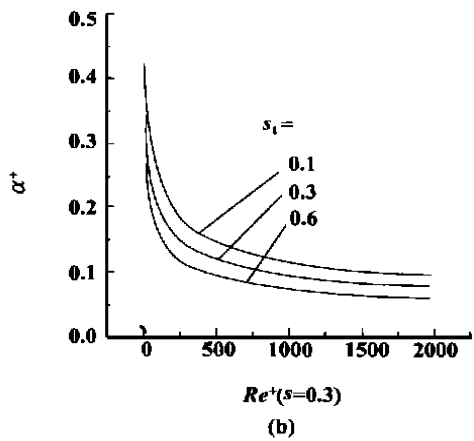
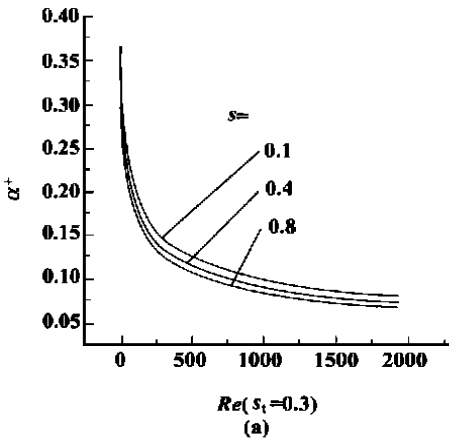


图 4 换热系数随雷诺数的变化

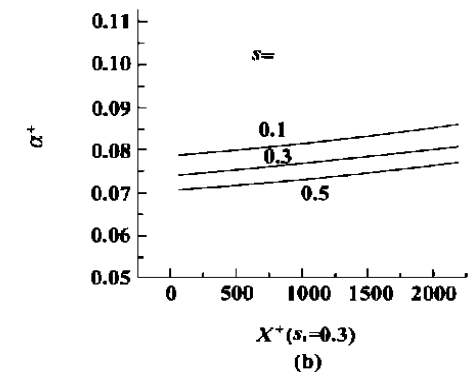
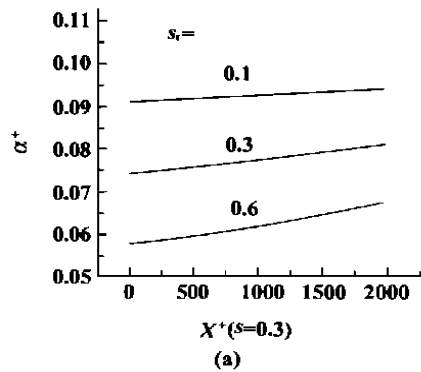


图 5 换热系数沿流向的变化

### 3 结果与讨论

图 2 示出了剪切力对膜厚随雷诺数变化的影响, 雷诺数大, 则流量大, 所以膜厚随雷诺数增大而增大。当剪切力增大时, 流动受阻, 膜厚相应增大, 因而随  $s$  从 0 增大到 0.6, 膜厚曲线逐渐上移。图 3 则示

出了当剪切力和雷诺数一定时蒸发散热对膜厚沿流向变化的影响,  $s$  为 0.2, 雷诺数取为 2 000,  $s_t$  分别为 0.1、0.3、0.6。在此,  $x^+$  是流动距离, 壁面热流, 蒸发潜热和粘性组成的无量纲量,  $x^+$  增大, 表示或是液膜流过的距离增长, 或是壁面热流增大, 或是液体的汽化潜热及粘性减小, 液膜失去的质量增大, 使膜厚沿无量纲横坐标而减小, 在同等条件下,  $s_t$  增大, 则蒸发散热增大, 因而膜厚沿流向的减小加快, 膜厚曲线下移。

图 4(a) 和图 4(b) 分别示出了无量纲换热系数在不同剪切力和不同蒸发率情况下随雷诺数的变化, 在不计波动的层流假设情况下, 雷诺数的增大使膜厚增大换热系数减小, 因而在这两个图中, 换热系数都随雷诺数增大而下降。此两图表明, 剪切力及散热率的增大都使液膜的换热系数下降, 而散热率的影响比剪切力大。剪切力增大, 流动受阻, 膜厚增大, 使换热性能下降。而蒸发率增大时, 表明液膜平均温度升高, 则由其内能增大带走的热量减少, 换热主要

要依赖蒸发, 所以其换热系数也下降。图 5(a) 和图 5(b) 则分别示出了无量纲换热系数在不同剪切力和不同散热率情况下沿无量纲流动坐标的变化, 在图 5(a) 中, 剪切力固定为  $s = 0.3$ ,  $s_t$  分别取为 0.1、0.3、0.6, 因沿流动方向膜厚减小, 换热系数因而增大, 故换热系数都沿横坐标方向增大, 当  $s_t$  增大时,

(下转第 392 页)

主要是因为6号低加的偏差因子较大。在不同工况下,一次喷水都有一定的运行值,并且总会使机组煤耗增大。在正常运行工况下,二次喷水并不一定投入,其常作为事故喷水对再热汽温加以微调。一旦二次喷水投入使用,其对机组经济性的影响是不能忽视的。从表上可以看出,单位二次喷水量对机组煤耗的影响远大于单位一次喷水量变化对机组煤耗的影响。由于高加旁路泄漏率较小,其对机组煤耗变化的影响并不大。

## 7 结语

基于火电厂实时信息系统和电厂一次采集数据开发的机组运行经济性在线数学模型,具有如下主要特点:

(1) 提出了一种只需要输入燃料的工业分析成分和锅炉主要监测参数就可以在线计算锅炉效率的新的计算模型。它不仅可以在线计算锅炉效率,还可以对锅炉主要的运行参数及煤质变化进行诊断分析。

(2) 在传统热力学方法和单因素偏差分析方法

的基础上,开发了在变工况下,计算汽轮机主要运行参数偏差因子的方法,为汽轮机经济性诊断提供了快捷、正确的算法,从而使单元机组运行性能诊断系统直接反映运行经济性指标和诊断实时数值,以指导经济组织电厂运行。

(3) 利用等效焓降理论,提出了计算热力系统主要监测参数偏差因子的方法,开发了实用的热力系统主要参数在线能损数学模型。

## 参考文献:

[1] ASME PTC4. 1, 1973, 锅炉机组性能试验规程[S].  
 [2] 林万超. 火电厂热系统节能理论[M]. 西安: 西安交通大学出版社 1994.  
 [3] 王乃宁. 汽轮机热力设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.  
 [4] 任浩仁, 李蔚, 盛德任, 等. 火电厂变工况下运行指标应达值的分析[J]. 中国电机工程学报, 1999(9): 50-56.  
 [5] 张小桃, 王培红. 一种新的锅炉效率计算模型[J]. 电站系统工程 1999, 15(4): 16-24.  
 [6] 张小桃, 王培红. 锅炉运行经济指标的热偏差分析[J]. 电站系统工程, 1999, 15(6): 7-9.

(何静芳 编辑)

(上接第 385 页)

蒸发散热增大,液膜本身带走的热量减少,其换热强度下降。换热系数随  $s_t$  增大而下移,但当  $s_t$  增大时膜厚减小加快,换热系数的增大也加快,所以换热系数曲线增长的斜率增大。在图 6 中,示出了  $s_t$  不变时,换热系数随剪切力的变化,在这种情况下,换热系数仍沿流向增大,但增大的速率差别不明显,这时因为当  $s_t$  不变时蒸发率不变,而  $s$  增大,表明流动受阻,膜厚增大,故换热系数向下平移。

## 4 结论

作者分别以  $s$  和  $s_t$  代表液膜在自由表面上的剪切力和蒸发散热的强度,对自由表面上剪切力和蒸发散热对过冷液膜传热的影响从理论上进行了分析,分析表明,表面剪切力阻碍了流动,因而降低了

传热性能,而表面上的蒸发减少了液膜本身带走的热量,从而也使液膜的传热性能下降,但由于蒸发使膜厚沿流向减小,使液膜的传热性能沿流向增大。

## 参考文献:

[1] SACK M. Falling film shell-and-tube heat exchangers[J]. **Chem Eng** 1967, 63: 55-61.  
 [2] HENDRICKS R C, SIMONEAU R J, DUNNING J W Jr. Heat transfer in space power and propulsion systems[J]. **Mech Eng** 1986, 41-52.  
 [3] YIH S M. Handbook of Heat and Mass Transfer[M]. Texas: Gulf Publishing Corp, 1986.  
 [4] AMBROSINI W, MANFREDINI F, ORIOLO F, et al. Heat transfer from a plate cooled by a water film with countercurrent air flow[J]. **Nuclear Technology**, 1995, 112: 227-236.

(何静芳 编辑)

# 国家科学基金项目稿件优先发表

自由表面摩擦和蒸发对过冷下降液膜传热的影响 = **The effect of Free Surface Friction and Evaporation on the Heat Transfer of Sub-cooled Falling Liquid Film** [刊, 汉] / SHI Jin-sheng, CHEN Yu-zhou (China National Atomic Energy Research Academy, Beijing, China, Post Code: 102413) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 383 ~ 385, 392

A theoretical analysis was conducted of the heat exchange characteristics of a falling liquid film under the condition of evaporative heat dissipation and of the presence on the free surface of a reverse shearing force. As a result, obtained was a non-dimensional relation of the film thickness and heat exchange factor. Also discussed was the influence of shearing force, liquid film Reynolds number, wall surface heat flux and evaporation rate on the flow and heat transfer. **Key words:** falling liquid film, reverse flow, heat transfer

均衡燃烧控制系统总体设计及关键技术问题研究 = **A Study of the Integrated Design of a Harmonious Combustion Control System and Its Related Technical Issues** [刊, 汉] / LI Yi-guo, SHEN Joing, LU Zhen-zhong (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 386 ~ 388

In light of the problems currently existing in the boiler combustion process of a 200 MW power plant in China the authors have designed a harmonious combustion control system. On the basis of the functional requirements of the system and the specific control mode of an inverter proposed is an integrated design scheme of the combustion control system. The communication control of the inverter represents a key issue in implementing the above design scheme. Briefly discussed is a method of the inverter output control realized through the use of a master-slave type of multi-machine communication mode. **Key words:** harmonious combustion, inverter, communication

单元机组运行经济性在线数学模型研究 = **Research on an On-line Mathematical Model for the Evaluation of the Cost-effectiveness of a Monoblock Unit Operation** [刊, 汉] / ZHANG Xiao-tao, WANG Ai-jun (Power Engineering Department, North China Institute of Water Resources and Hydropower, Zhengzhou, Henan Province, China, Post Code: 450045), WANG Pei-hong (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 389 ~ 392

On the basis of the real-time information system of a power plant developed is an on-line practical-for-use mathematical model for evaluating the operation cost-effectiveness of a monoblock unit. The model can not only conduct an on-line monitoring of the major economic indexes of the monoblock unit, but also diagnose and analyze its operating cost-effectiveness. Its use at a power plant has been proved to be quite fruitful. **Key words:** on-line monitoring, performance diagnosis, cost-effectiveness, mathematical model

锅筒式锅炉差压式水位计的温度补偿研究 = **Temperature Compensation Study of the Differential-pressure Water Gage Used for a Drum Boiler** [刊, 汉] / YANG Fei, CHEN Guang-hua (Power Engineering Department, Northern Jiaotong University, Beijing, China, Post Code: 100044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 393 ~ 394

Due to its location in an atmospheric air environment the reference water column of a differential-pressure water gage is inevitably subjected to the influence of the change in environmental conditions. In the design of the present-day differential-pressure water gage either no temperature compensation or a temperature compensation of only 50 °C fixed value has been set for the reference water column. Through a numerical calculation analyzed was the influence of the ambient temperature the reference water column temperature of the differential-pressure water gage of a sub-critical drum boiler is being subjected to. Moreover, a simple calculation formula is given to facilitate the achievement of a higher level of precision for the differential-pressure water gage. **Key words:** drum boiler, water gage, temperature compensation

循环流化床锅炉密相区内颗粒的横向扩散研究 = **A Study of the Transverse Dispersion of Solid Particles in the Dense-phase Zone of a Circulating Fluidized Bed Boiler** [刊, 汉] / YANG Hai-rui, LU Jun-fu, LIU Qing, et al (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 395 ~ 398

With hot particles serving as tracer ones the radial variation of the latter was measured by the use of thermocouples. A study of the particle transverse dispersion has been conducted in the dense-phase zone of a circulating fluidized bed,