

电站锅炉强化传热管沾污特性试验研究

景元琢¹, 董玉平², 董 磊¹, 强 宁¹

(1. 济南百川同创实业有限公司, 山东 济南 250101; 2. 山东大学 机械工程学院, 山东 济南 250061)

摘 要: 沾污特性是锅炉设计计算中的重要参数, 通过在电站燃煤锅炉烟道中搭建实验台, 进行了螺旋翅片管束沾污特性的热态试验, 得出了不同横、纵向相对节距的螺旋翅片管束的沾污系数及热有效系数与烟速的拟合关联式。试验结果表明, 螺旋翅片管束沾污系数值比《锅炉机组热力计算标准方法》中的取值小一数量级, 其结果可应用于锅炉的受热面设计及运行分析。

关 键 词: 锅炉设计; 沾污特性; 螺旋翅片管束; 沾污系数; 热有效系数

中图分类号: TK224. 9 文献标识码: A

引 言

螺旋翅片管与光管相比, 具有对流受热面结构紧凑, 金属耗量低, 抗磨损性能好以及良好的抗积灰性能等优点, 被广泛应用于电站锅炉的省煤器、空预器和过热器等^[1~2]。锅炉设计计算中, 一般采用沾污系数 ϵ 和热有效系数 Ψ 表示管束的沾污积灰特性^[3]。螺旋翅片管束对流传热系数的计算已相当精确, 沾污系数 ϵ 的取值则具有很大的不确定性。由于 ϵ 值的数值本身已与对流传热热阻处于同一数量级, 因此, 螺旋翅片管束沾污系数 ϵ 的取值至关重要。迄今为止, ϵ 的计算是螺旋翅片管束对流受热面热力计算中最不成熟、最无把握的部分, 也是计算结果的最大的误差根源。国内锅炉设计中多借用前苏联 1976 年版的《锅炉机组热力计算标准方法》中适用于螺旋肋片管束的曲线进行计算, 但该值与国内很多实炉热力试验所推得的数值相比偏高较多^[4~6]。另外, 国内多借用标准中适用于光管的数值, 目前尚无燃煤锅炉烟气冲刷下螺旋翅片管束热有效系数 Ψ 的数值计算的研究报道。而国内至今尚缺乏热态下沾污特性的试验研究。

本文在电站锅炉的尾部烟道中搭建试验台, 通过改变实炉烟气冲刷螺旋翅片管束的烟速, 测试并计算得到了热态下螺旋翅片管束的沾污特性计算方

法, 可应用于指导工程设计与运行分析。

1 试验原理

1.1 试验目标

对于结构一定的螺旋翅片管束, 影响其沾污特性的因素是: 螺旋翅片管束的横、纵向相对节距、布置方式以及横掠管束的烟气的流速, 而流速是影响沾污的最主要因素。本次试验主要研究错列布置螺旋翅片管束的沾污系数 ϵ 、热有效系数 Ψ 与烟速 w 变化的关系。同时根据试验结果, 对于管束的横、纵向相对节距的影响给出定性的分析。

1.2 沾污特性测定原理

对于燃用固体燃料的错列布置管束, 对流传热系数为:

$$K = \frac{1}{1/\alpha_1 + \epsilon + 1/\alpha_2} \quad (1)$$

管内介质水的放热系数 α_2 极大, 则可忽略水侧热阻 $1/\alpha_2$, 式(1)变为:

$$K = \frac{1}{1/\alpha_1 + \epsilon} \quad (2)$$

若记沾灰管子的传热系数为 K , $W/(m^2 \cdot K)$; 洁净管子的传热系数为 K_0 , 则从式(2)得到:

$$\epsilon = 1/K - 1/K_0 \quad (3)$$

热有效系数计算式为:

$$\Psi = K/K_0 \quad (4)$$

从试验中测出 K 和 K_0 值, 即可由式(3)和式(4)计算出 ϵ 和 Ψ 的值^[7]。

1.3 传热系数的计算

对于管外流通烟气、管内流通水的管束, 由水侧吸热量公式 $Q = c_{p水} G_{水} (t'' - t')$ 与管束总传热公式 $Q = KF\Delta t_n$ 得:

$$K = c_{p水} G_{水} (t'' - t') / F\Delta t_n$$

式中: $c_{p水}$ —水的定压比热, $kJ/(kg \cdot K)$; $G_{水}$ —单位时间内流经管束的水流量, kg/h ; t' 、 t'' —管束的进出口水温, $^{\circ}C$; F —传热面积, 取翅片管几何总表面积,

m^2 ; Δt_m —对数平均温差, $^{\circ}C$ 。

1.4 最小流通截面流速的计算

试验段进口截面烟速 w' (m/s)按下式计算:

$$w' = \sqrt{2\Delta p / \rho_{\text{烟}}}$$

式中: Δp —试验段进口截面上测得的动压, Pa; $\rho_{\text{烟}}$ —烟气在平均温度下的密度, kg/m^3 。

最小流通截面烟速 w (m/s)按下式计算:

$$w = (A_0/A) \times w'$$

式中: A_0 —试验段进口截面面积, m^2 ; A —最小流通截面面积, m^2 。

将在不同烟速下测得的沾灰翅片管束传热系数 K 与相应烟速下测得的未沾灰管束传热系数 K_0 代入沾污系数和热有效系数计算式, 将计算出的沾污系数和热有效系数与烟速进行拟合, 就可以得到沾污系数及热有效系数与烟速的关联式 $\epsilon = f(w)$ 和 $\Psi = g(w)$ 。

2 试验系统

试验台搭建于济南明湖热电厂的 75 t/h 循环流化床锅炉烟道上。两不同节距的试验管束沿炉宽分别安装于省煤器和空预器之间的烟道内, 其系统流程如图 1 所示。两种螺旋翅片管束的结构特性如表 1 和图 2 所示。

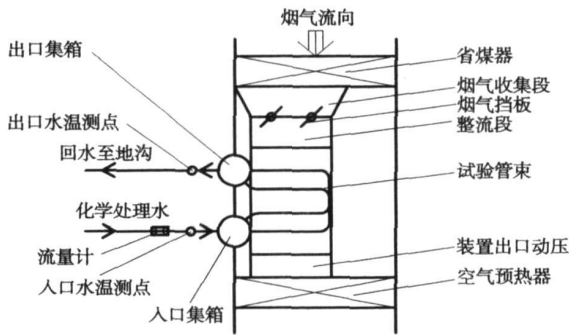


图 1 试验台 布置示意图

表 1 试验管束结构尺寸 (mm)

	管束 1	管束 2
肋片高度 h	12.7	12.7
肋片厚度 δ	1.5	1.5
肋片间距 S	10	10
横向节距 S_1	66	110
纵向节距 S_2	60	101
基管直径 d	$\phi 38 \times 3$	$\phi 38 \times 3$

注: 1. 横向相对节距 $\sigma_1 = S_1/d$; 2. 纵向相对节距 $\sigma_2 = S_2/d$ 。

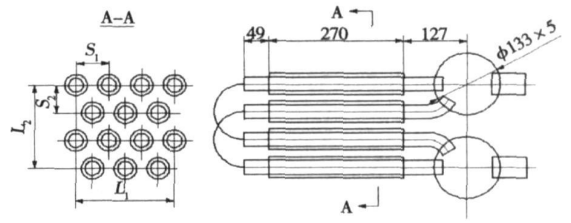


图 2 螺旋翅片管束的结构

试验系统包括烟气收集段、百叶窗式烟气挡板、烟气整流段、试验螺旋翅片管束和试验装置出口测温测压段及供回水管道等组成, 试验管束置于一个由上述试验段组成的小型烟道中。

本次试验希望能获得在较大烟速范围内及较高烟速下管束的沾污特性, 烟气收集段用于增大烟速范围。在试验中通过调整整流段入口处的多个百叶窗式烟气挡板的开度以改变烟速, 同时也将使烟气的扰动降至最低。试验系统设置了烟气整流段, 可有效地消除烟气入口效应, 确保烟气到达试验管束前分布均匀、流场稳定。流经试验管束的电厂化学处理水用来吸收烟气传过管束的热量。试验管束出口烟温及出口空截面动压采用等截面网格法进行测量; 装置入口烟温从锅炉集控室的控制系统进行记录, 该测点布置于省煤器出口与空气预热器入口间。

本试验中水流量测量精确到 $0.001 m^3$, 水温测量采用精密温度计, 可精确到 $0.1 ^{\circ}C$; 烟气动压采用电子微压计和毕托管进行测量, 精确到 1 Pa; 烟气温度采用热电偶进行测量, 精确到 $0.1 ^{\circ}C$ 。

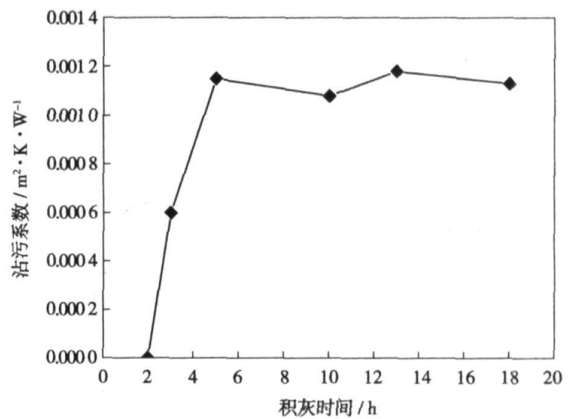


图 3 高负荷下积灰时间与沾污系数的关系

为满足式(2)中忽略管内介质传热热阻的条件, 必须使翅片管内的流动处于紊流状态, 保持管内足

够高的管内试验水流量, 根据工质紊流条件 ($Re \geq 2300$) 计算出管束内紊流临界流速为 0.0723 m/s , 试验中通过控制水流量的稳定, 精确控制水流速度为 0.0889 m/s 。

另外, 本试验中积灰稳定时间采用 5 h , 该积灰稳定时间范围是通过在东营胜利石油管理局胜利发电厂对新安装的采用该种类型螺旋翅片管的省煤器进行的实炉测试中得出的结果。新安装省煤器在较高负荷(烟速为 $9.24 \sim 10 \text{ m/s}$)条件下试验时间与沾污系数值的关系曲线如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 对于结构类似的新安装螺旋翅片管省煤器高负荷时其积灰增长主要集中在 $0 \sim 5 \text{ h}$ 之间, 当超过 5 h 以后积灰层则基本保持稳定, 对于低负荷(低烟速)以及运行中变烟速的管束积灰稳定时间相对更短, 试验中积灰稳定时间一般可采用 $5 \sim 6 \text{ h}$ 。

3 试验结果及分析

为准确测得螺旋翅片管束在未积灰状态下受烟气冲刷时的传热系数 K_0 , 在锅炉点火前将调节挡板严密关闭, 锅炉点火升负荷至满负荷并稳定后将其开启并进行实验。改变调节挡板的开度测得不同烟气流速下未积灰管束的传热系数 K_0 , 对其回归得洁净管束传热系数与烟速的传热关联式。

未沾灰条件下螺旋翅片管束 1 传热系数 K_0 与烟速 w 的拟合关系式为:

$$K_0 = 20.416 e^{0.0742w} R^2 = 0.9985$$

未沾灰条件下螺旋翅片管束 2 传热系数 K_0 与烟速 w 拟合关系式为:

$$K_0 = 29.587 e^{0.0656w} R^2 = 0.9656$$

在同一烟速下观察水温的变化, 在水温变化微小情况下读数。继续改变调节挡板的开度, 在积灰层稳定在 $5 \sim 6 \text{ h}$ 之后, 测量记录沾灰管束传热沾污特性, 根据测量值计算出传热系数 K 与烟速的关系。根据沾污系数定义式 (3) 和热有效系数定义式 (4), 求出不同烟速下的沾污系数 ϵ 和热有效系数 Ψ 的值。

管束 1 沾污系数和热有效系数的试验结果如图 4 和图 6 所示。管束 2 沾污系数和热有效系数的试验结果如图 5 和图 7 所示。

对上述试验数据进行一元指数回归, 得:

$$\text{管束 1: } \epsilon = 0.0226 e^{-0.2957w}$$

$$\Psi = 0.7638 e^{0.0226w}$$

$$\text{管束 2: } \epsilon = 0.0403 e^{-0.424w}$$

$$\Psi = 0.6381 e^{0.0481w}$$

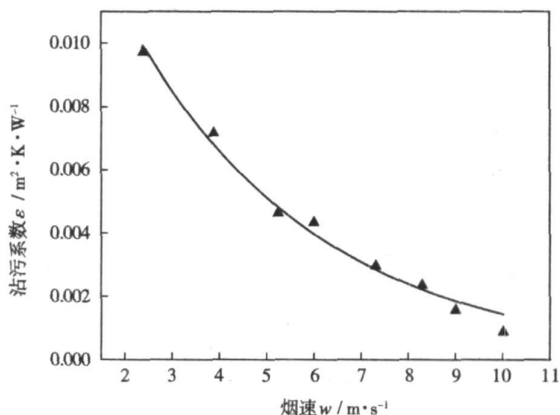


图 4 管束 1 沾污系数与烟速的关系曲线

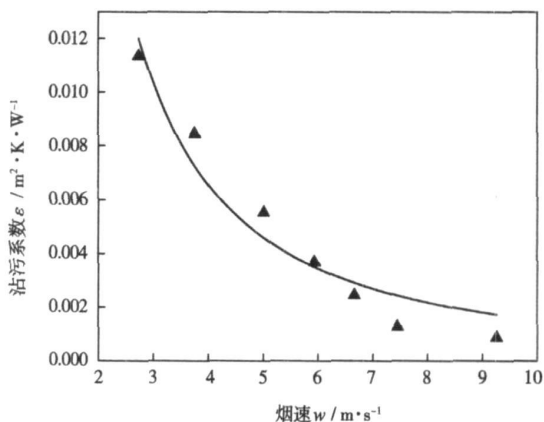


图 5 管束 2 沾污系数与烟速的关系曲线

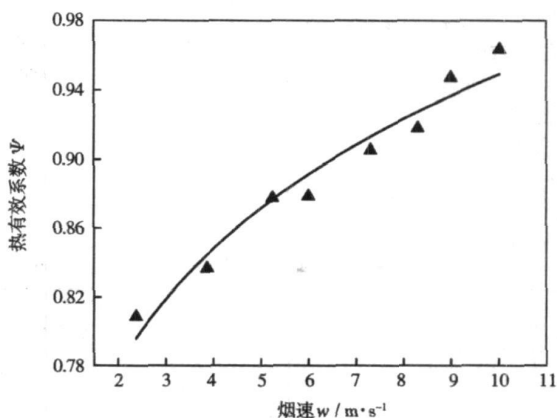


图 6 管束 1 热有效系数与烟速的关系曲线

上述回归方程的相关系数 R^2 均在 0.95 以上, 试验

数据的分散度很小, Ψ 与 w 的相关关系为高度显著。

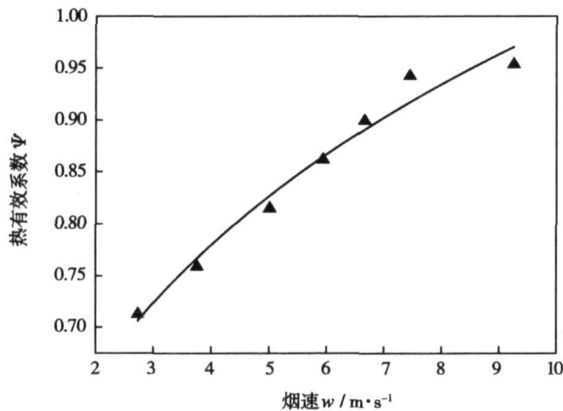


图 7 管束 2 热有效系数与烟速的关系曲线

由试验数据所得的曲线可以看出, 随着烟速的增加, 螺旋翅片管的沾污系数降低而热有效系数升高。这是因为翅片管束上的积灰为非粘结性积灰, 主要依靠机械力的聚合作用而沉积, 烟速增加一是增强了同迎风区发生惯性碰撞的飞灰量及其碰撞动量, 二是加大了飞灰颗粒对尾流区的冲刷作用。这两者的共同作用将导致螺旋翅片管束表面的沾灰的动态平衡过程向较薄灰层移动, 自吹灰能力的强化。当经过一定时间后, 将形成细灰沉积过程和积灰层被粗灰破坏的动平衡, 沾污系数和热有效系数重新稳定在一个新的水平。这个影响在烟速较低时尤其明显。但当烟速继续增加超过 9 m/s 以后, 沾污系数 ϵ 的降低与热有效系数 Ψ 的增加则趋缓。

从图 3 和图 4 可以看出, 当烟速处于 $3 \sim 10 \text{ m/s}$ 的流速范围内时, 两个管束的沾污系数均小于 $0.01 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, 这比《锅炉机组热力计算标准方法》中的数值小一个数量级(标准中当 $w = 4 \text{ m/s}$ 时, $\epsilon = 0.031 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$; 当 $w = 16 \text{ m/s}$ 时, $\epsilon = 0.0103 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 。

另外, 试验结果表明, 螺旋翅片管束的沾污系数小于同等管径的光管管束。这是因为螺旋翅片与光管管束相比可使烟气流旋转, 改善背风面尾流区气流的流动状况, 对自清灰有利。

从试验数据观察到管束的疏密程度对 ϵ 和 Ψ 的影响不大。在烟速较低时, 相对节距大的管束 2 (稀疏管束) 其沾污系数 ϵ 要比相对节距小的管束 1 (密集管束) 稍大些, 但当烟速增加到一定程度以后, 前者比后者又稍小些。而 Ψ 呈相反趋势, 但两者之间差值很小, 有可能是试验误差造成。

根据上述分析, 综合两螺旋翅片管束的沾污特

性整理出一定结构范围内螺旋翅片管束沾污系数 ϵ 和热有效系数 Ψ 的通用计算式:

$$\epsilon = 0.0316e^{-0.3678w}$$

$$\Psi = 0.7079e^{0.0345w}$$

上式适用范围为:

雷诺数: $Re = 2500 \sim 11000$

相对横节距: $\sigma_1 = 1.72 \sim 2.89$

相对纵向节距: $\sigma_2 = 1.57 \sim 2.66$

4 结 论

(1) 介绍了进行螺旋翅片管束半工业性试验的方法和系统以及沾污特性的确定方法与原则, 得出了沾污系数及热有效系数与烟速在一定节距范围内的函数关系式, 可以用于工程实际。

(2) 由试验数据和曲线可以看出, 沾污系数 ϵ 随着烟速的增加而降低, 而热有效系数 Ψ 随着烟速的增加而升高; 在低烟速条件下 ϵ 降低速度与 Ψ 升高速度均较快; 在高烟速条件下 ϵ 降低速度与 Ψ 的升高速度均趋缓; 在一定的节距范围内, 管束的疏密程度对 ϵ 和 Ψ 的数值影响不大。

(3) 研究表明: 目前我国通用的锅炉机组热力计算标准所列出的螺旋翅片管束沾污系数与热有效系数, 并不适用于螺旋翅片管束, 标准中的沾污系数数值与本试验结果相比偏高, 据此标准中的沾污系数 ϵ 与热有效系数 Ψ 在进行锅炉受热面设计计算时误差较大。

参考文献:

- [1] 黄新元, 孙奉仲, 李淑英. 螺旋肋片管再热器在 670 t/h 锅炉的应用[J]. 锅炉制造, 2000(2): 21-24.
- [2] 辛国华, 胡荫平, 陈晓珊. 螺旋翅片管省煤器在 670 t/h 锅炉中的应用[J]. 热力发电, 1995(1): 53-56.
- [3] 北京锅炉厂设计科, 译. 锅炉机组热力计算标准方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1976.
- [4] 黄伟, 熊蔚立, 陈跃华, 等. 螺旋肋片管在 400 t/h 锅炉低温再热器上应用的试验研究[J]. 华中电力, 2002(5): 13-15.
- [5] 卓宁, 李瑞阳, 孙家庆, 等. 整体型螺旋翅片管束沾污系数的试验研究[J]. 动力工程, 1997, 17(4): 54-60.
- [6] YEH RONG HUA. An analytical study of the optimum dimensions of rectangular fins and cylindrical pin fins[J]. Heat Mass Transfer, 1997, 40(15): 3607-3615.
- [7] 岑可法, 樊建人. 锅炉和换热器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算[M]. 北京: 科学出版社, 1994.

(编辑 滨)

concluded that the ratio of fouling thermal resistances of cooling water in the practical operation of a bare tube and spiral-grooved one will be linearly increased with an increase in the product of the area index and efficiency index. However, the linear function expressions in the two zones ($p/e > 5.0$ and $p/e < 5.0$) are different. The particulate fouling ratio assumes a linear ascending relationship with an increase of the efficiency index within only one zone during the experiment.

Key words: bare tube, spiral-grooved tube, fouling characteristics, cooling water, linear relationship

电站锅炉强化传热管沾污特性试验研究 = **Experimental Study of the Fouling Characteristics of Intensified Heat Transfer Tubes of a Utility Boiler** [刊, 汉] / JING Yuan-zhuo, DONG Lei, QIANG Ning (Jinan Baichuan Tongchuang Industrial Co. Ltd., Jinan, China, Post Code: 250101), DONG Yu-ping (College of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 170 ~ 173

Fouling characteristics pertain to important parameters in the design calculation of boilers. Through a test rig set up in the flue of a coal-fired utility boiler, a hot state test of the fouling characteristics of spiral-finned tube bundles has been performed. A fitting correlation formula for the fouling factor, effective thermal coefficient and flue gas speed of spiral-finned tube bundles at different relative pitch values in the different transversal and longitudinal directions has been obtained. The test results show that the value of the fouling factor of spiral-finned tube bundles is an order of magnitude lower than that obtained from “Standard method for thermodynamic calculation of boilers” and the results can be used for the design of boiler heating surfaces and the analysis of their operation. **Key words:** boiler design, fouling characteristics, spiral-finned tube bundle, fouling factor, effective thermal coefficient

电站锅炉参数数据分析 = **Data Analysis of Utility Boiler Parameters** [刊, 汉] / LIU Huan-zhang, LIU Ji-zhen, CHANG Tai-hua, et al (Automation Department, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 174 ~ 177

In the currently prevailing power-generation process, what attracts attention is no longer limited only to the cost-effectiveness and stability emphasized in the past. Environment protection also plays a decisive role. The authors have taken data analysis as the main method to identify the statistical law governing the relationship among the amount of fuel and air input, load of a turbo-generator unit and the content of various constituents in flue gases, thus realizing an indirect measurement of flue gas constituents through the measurement of fuel and air input as well as plant load. The foregoing can well provide valuable flue-gas reference values for a real-time check and inspection of emissions-compliance performance. **Key words:** utility boiler, flue gas constituent, load, data analysis, emissions performance

基于混沌理论的预测 PID 控制器参数优化研究 = **A Study of the Prediction of Parameter Optimization of a PID Controller Based on Chaotic Theory** [刊, 汉] / MING Xue-xing, WANG Jian-guo, LU Zhen-zhong, et al (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 178 ~ 182

Realistic industrial processes frequently suffer from an external interference, and tend to assume slow and time-variation features, making it difficult for a traditional PID (proportional-integral-differential) controller to timely track the changes of a system and overcome noise interference. The authors have studied the application of chaos-based optimization theory