

燃气轮机余热锅炉过渡烟道的优化设计

王永堂¹, 陈 明², 王艳滨², 吴少华¹

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

2. 中国船舶重工集团公司第七 03 研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘 要: 针对余热锅炉过渡烟道内烟气流速截面的形式, 给出了改变烟道上面板仰角和在烟道内加装导流板两种优化方案, 并且通过对优化方案的模拟计算, 得出了烟气速度在烟道出口截面上的分布情况。在对模拟结果的分析讨论后, 得出两个优化方案的最佳选择。计算结果表明, 加装导流板能够明显改善烟道出口截面的烟气速度分布, 平均速度由 11.13 m/s 增加到 11.51 m/s, 速度的均方差由 12.33 m/s 降为 4.02 m/s。将所得结论应用于实际工程中, 取得了良好效果。

关 键 词: 余热锅炉; 过渡烟道; 导流板; 烟气速度分布;

中图分类号: TK29.92 文献标识码: A

引 言

余热锅炉是蒸汽—燃气联合循环系统中重要环节的关键设备。该设备的设计制造技术虽渐近成熟, 但仍存在某些不足。由于燃气轮机出口与余热锅炉受热面的衔接尺寸差距大往往需用过渡烟道相连, 此外安装时又受到场地与投资的限制, 这就决定了过渡烟道的长度不可能太长。同时, 烟道过长还造成余热锅炉各受热面内烟气流动不均匀, 使管束换热不好, 达不到设计指标, 甚至产生振动, 这对余热锅炉的性能及寿命都产生巨大的影响^[1~4]。如何保证余热锅炉受热面内的烟气流动均匀是一个重要的研究课题, 本研究以余热锅炉为对象, 展开对现行烟道的结构形式的优化分析和数值计算, 并结合工程实例完成了理论与实践的检验研究。

1 余热锅炉烟道的模型

余热锅炉是利用燃气轮机排放的废烟气加热余热锅炉的受热面使之产生一定参数的蒸汽, 用以发电。过渡烟道是指连接燃气轮机出口及余热锅炉入口的烟道, 如图 1 所示。烟道的上下两面有一定的倾斜角, 左右两面对称, 没有倾斜角或角度很小。根

据其结构特点, 选取过渡烟道上下两面的中心线且垂直烟道上下两面的截面为计算对象。

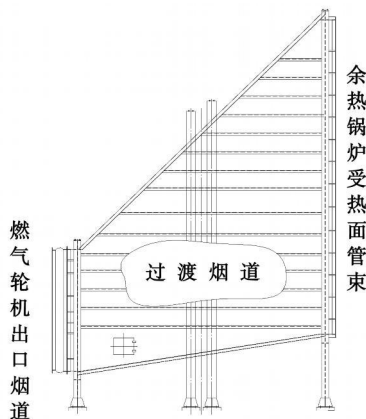


图 1 过渡烟道示意图

2 控制方程

计算中采用二维稳态湍流模型, 采用标准 $k-\epsilon$ 双方程模型, 壁面用壁面函数法进行处理, 忽略粘性耗散的影响。在二维直角坐标系中计算所用的 $k-\epsilon$ 双方程模型的控制方程通用形式为:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S$$

对 $\phi=1$ 时, $\Gamma=S=0$

对 $\mu, \nu, k, \epsilon, \Gamma$ 广义扩散系数 Γ 为:

$$\mu, \nu: \Gamma = \eta_{eff} = \eta + \eta_t$$

$$k: \Gamma = \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k}, \epsilon: \Gamma = \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\epsilon}$$

$$\Gamma: \Gamma = \frac{\eta}{Pr} + \frac{\eta_t}{\sigma_T}$$

对 $\mu, \nu, k, \epsilon, \Gamma$ 的源项 S 为:

$$S_k = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_{eff} \frac{\partial \mu}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta_{eff} \frac{\partial \nu}{\partial y} \right)$$

$$S_\epsilon = \rho G_\epsilon - \rho \epsilon$$

收稿日期: 2009-02-16 修订日期: 2009-11-16

作者简介: 王永堂 (1979-), 男, 黑龙江汤原人, 哈尔滨工业大学博士研究生, 现工作在中国船舶重工集团公司第七〇三研究所。

$$S = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_{eff} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta_{eff} \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$S_z = \frac{\epsilon}{k} (\zeta \rho G_k - \zeta \rho \epsilon) \quad S_z = 0$$

式中:

$$G_k = \frac{\eta_f}{\rho} \left\{ \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\}$$

$$\eta_{eff} = \eta + \eta_t$$

3 过渡烟道优化设计计算

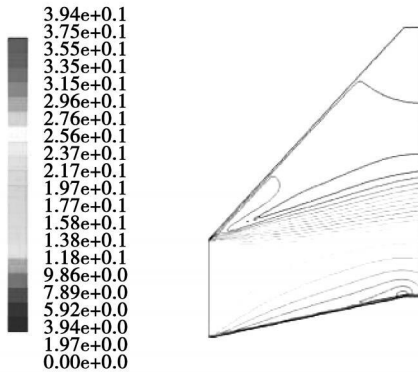


图 2 过渡烟道速度等势图

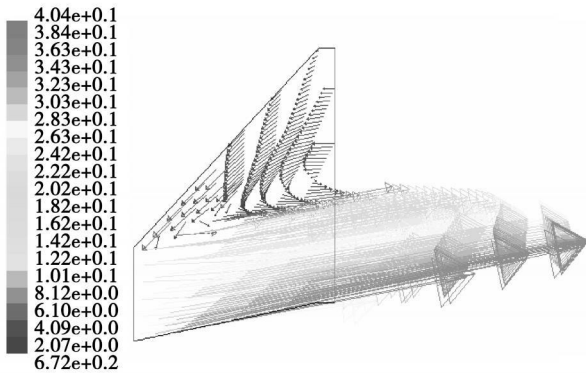


图 3 过渡烟道速度矢量图

对原过渡烟道的简化模型进行计算所得速度等势图如图 2 所示; 速度矢量图如图 3 所示; 过渡烟道出口沿高度方向的速度值如图 4 所示。燃气轮机排烟进入过渡烟道后, 随着烟道流通截面积的迅速扩大, 主流流向外侧扩张。由于主流速度快, 而烟道流动长度相对较短, 气流并不能充分扩张到整个烟道就已到达烟道的出口。此外, 从图中还可看出烟道底部气流速度快, 顶部速度慢, 速度梯度很大, 产生了很强的卷吸气流, 并在顶部附近形成较大的旋涡, 从而形成回流区。由于回流区的存在, 烟道出口处的速度值由下至上先减小而后有少量的回升, 最后

再减小。值得注意的是, 此处回升的烟速是由于烟气回流造成的, 不利于换热。由图可知, 在烟道的出口处沿高度方向烟气速度分布极不均匀, 底部最高速度可以达到 40 m/s 而烟道出口的上半部分的速度都在 3 m/s 以下。

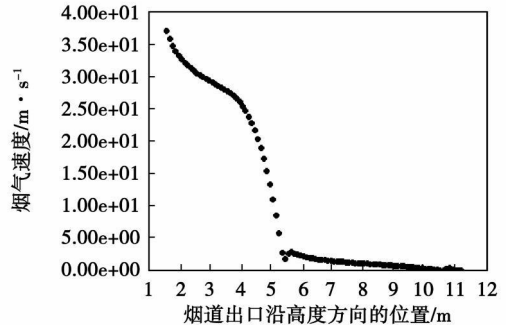


图 4 烟道出口沿高度方向的烟气速度

为了更好地对过渡烟道出口截面的烟气速度进行定量分析比较, 本研究采用面积加权的方式进行分析, 出口截面的计算结果是 (原烟道): 最大速度 37.8 m/s; 最小速度为 0; 平均速度 11.13 m/s; 速度均方差 12.33 m/s。面积加权平均烟气速度的计算式为:

$$V = \frac{1}{A} \int v dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n V_i |A_i|$$

式中: V —平均烟速; A —面积。

出口截面平均烟速的均方差计算式为:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V - V_i)^2 / n}$$

式中: S —烟速的均方差。

为了有效地提高烟道出口处烟气速度分布的均匀性, 采用两种方式对过渡烟道进行优化, 第一种方式是在烟道的上面板布置一个拐点来调整烟道上面板的仰角; 第二种方式是在烟道内布置若干片导流板。

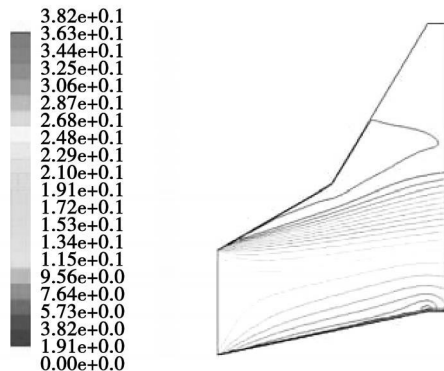


图 5 30°仰角过渡烟道的速度等势图

调整烟道上面板仰角是指以烟道上面板的中心位置为基点, 把上面板分为 30°和 50°仰角的两部分。而本研究是以离烟道入口近的那片面板相对于水平面的夹角作为烟道的仰角, 计算了 30°仰角的过渡烟道。计算结果如图 5~图 7 所示。

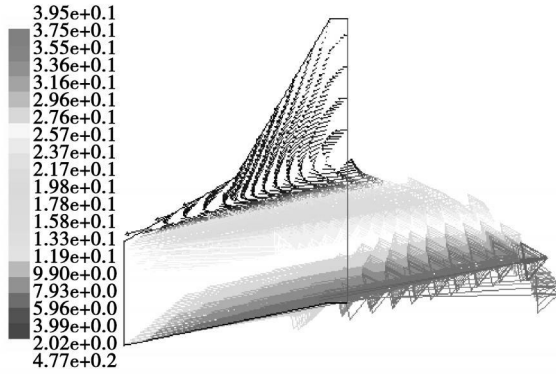


图 6 30°仰角过渡烟道速度矢量图

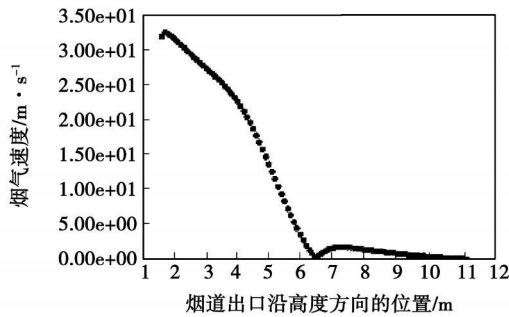


图 7 30°仰角过渡烟道出口沿高度方向速度

由图 5~图 7 可知, 燃气轮机排烟经过调整上面板仰角后的过渡烟道时, 仍然只形成一股流经烟道内的主气流, 其主气流的均匀性没有明显改善, 只是由于上面板角度的调整, 使得贴近烟道上表面的回流区面积减小。从图 6 中还可看出, 烟道出口处的烟气速度由下至上先减小而后略有回升再减小, 相对于没有经过优化的过渡烟道, 上面板角度的调整可以减少回流烟气速度的回升。由于主气流所经过的区域有限而导致过渡烟道的上半部分的烟速过小, 不利于换热。

对调整 30°仰角的过渡烟道出口截面的变量采用面积加权平均进行定量分析, 计算结果是 (原烟道), 最大速度 32.6 m/s; 最小速度为 0; 平均速度 10.39 m/s; 速度均方差 11.88 m/s。

在过渡烟道内加装 3 片导流板的计算结果如图 8~图 10 所示。

由图 8 和图 9 可知, 燃气轮机排出的烟气经过

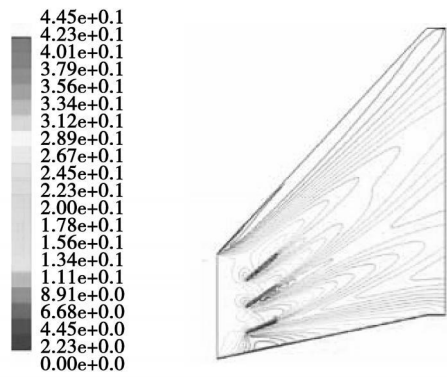


图 8 加装导流板后过渡烟道的速度等势图

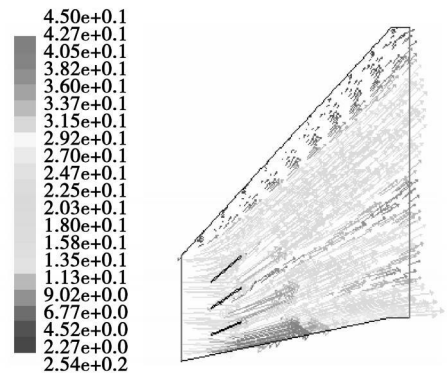


图 9 加装导流板后过渡烟道速度矢量图

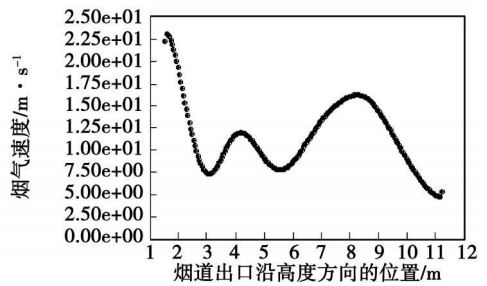


图 10 加装导流板烟道出口沿高度方向速度

3 片导流板后, 受到导流板的影响形成 a b c 3 股主要的气流。第一股气流 a 位于导板 3 与过渡烟道下面板之间; 第二股气流 b 位于导板 2 与导板 3 之间。第三股气流 c 位于烟道上面板与导流板 2 之间, 由流经导板 1 的两股气流汇合而成。这样, 通过导流板的强迫流动, 使烟气在烟道内烟气流动的均匀性增加。可以看出, 加装烟道导流板后烟道上部的回流区消失, 烟道出口处的烟气速度也呈现先减小, 而后经过两个波峰再减小的现象。烟气的流速先减小是由于最下面第一股主气流 a 与第二股主气流 b 所辖区域内气流速度小形成的; 第一个波峰是由于第

二股主气流 b 速度大形成的,第二个波峰是由于第三股主气流 c 速度大形成的。而由图 9 可知,通过烟道导流板的调整,在烟道出口处的烟气流速最大为 23 m/s ,存在于烟道的最下部,最小烟气流速约为 5 m/s ,存在于烟道的最上部,整个烟道出口截面的烟气均匀性大大增加。

对加装导流板的过渡烟道出口截面的变量采用面积加权平均进行定量分析,计算结果是(原烟道):最大速度 23 m/s ;最小速度 5 m/s ;平均速度 11.51 m/s ;速度均方差 4.02 m/s 。

4 分析及讨论

通过对原过渡烟道加装导流板和调整烟道上面板的角度两种优化方式的模拟计算,可以看出,调整过渡烟道上面板的角度可以使出口截面的速度的最大值有所下降,回流区的面积有所减小,但它并没有使烟道内的主气流发生本质的改善,没有改变烟道出口截面上半部分的气流速度过小的状况,所以出口截面速度方差没有明显的下降,其速度均匀性没有明显的改善。而在烟道内加装导流板却使过渡烟道内的主气流发生了本质的改善,使原来的一股紧贴烟道下表面的主气流分成 3 股气流布满整个烟道的出口截面,这使出口截面的最大速度由 37.8 m/s 降低到 23 m/s ;最小值由 0 m/s 增加到 5 m/s ;平均速度也有所提高,速度的均方差由 12.33 m/s 降为 4.02 m/s ;这表示出口截面的速度有了本质的改善。

5 结 论

(1) 建立了余热锅炉过渡烟道的数值模型,应用 CFD 技术对过渡烟道进行数值求解,得到了过渡烟道流场的计算结果,并针对过渡烟道的速度场进行了定量分析。

(2) 对余热锅炉过渡烟道提出两种优化方式,并对这两种优化方式进行了定量的计算分析比较,可以看出在过渡烟道内布置导流板的方式为优化过渡烟道的最佳方式。

(3) 根据对 3 台已加装导流板的余热锅炉所进行的测试结果看,过渡烟道出口的烟气均匀性得到了改善。这说明应用数值模拟的方法指导加装导流板对余热锅炉的过渡烟道结构进行优化是工程实践中行之有效的方法。

参考文献:

- [1] 张 哲, 厉彦忠. 板翅式换热器导流片结构的数值模拟[J]. 化工学报, 2002, 53(12): 1311-1314.
- [2] 凌长明. 楔形通道换热三维数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(3): 455-459.
- [3] 杨卫宏. 锅炉烟气走廊三维流动特性数值模拟[J]. 锅炉技术, 1995(5): 11-15.
- [4] 高 翔. 锅炉炉内含尘气流冲刷管束换热器的流动和传热特性研究[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(1): 76-80.

(本文责任编辑 陈 滨)

新技术、新工艺

Siemens 国际财团获得 3.5 亿欧元电力生产 海水淡化项目

据《Gas Turbine World》2009 年 3-4 月号报道, Siemens Energy 和合作伙伴 Doosan Heavy Industries 与 Samsung Engineering & Construction 已获得一份合同, 建造 Shuweihat 联合循环电站和海水淡化装置, 场址位于阿布扎比(阿拉伯联合酋长国首都)以西 200 km 处。

Siemens 的供货范围为电站主要的动力部件, 包括 4 台 SGT5-4000F 燃气轮机、2 台 SST5-6000 汽轮机、6 台发电机和集成的 SPPA-T3000 仪表和控制全套设备。两个 2×1 联合循环动力岛被预定用于该电站; 在 ISO 条件下每套装置的额定输出功率为 848 MW, 热效率为 58.5%。

Doosan 重工将建造基于 MSF(多级闪蒸脱盐法)技术的海水淡化装置, Samsung 重工将负责土木工程建设。

Shuweihat 将于 2011 年 9 月投入生产, 该工厂将生产 1500 MW 电力(净值), 并且每天生产 455 000 m^3 饮用水。

(吉桂明 摘译)

of the primary air flow of the front and rear arch will exercise a notable influence on NO production. An increase of the primary air speed will lead to a reduction of the NO_x emissions concentration. Key words: flame boiler, air distribution, numerical simulation, NO_x emission

涉外锅炉钢结构的风荷载计算及分析 = Wind Load Calculation and Analysis of a Foreign-related Boiler Steel Structure [刊, 汉] / CHENG Dongmei, QU Changhua (Electromechanical Engineering College, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), CHEN Ming (CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), QIAO Hongbin (Huadian Energy Source Shareholding Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150050) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(1), —61~64

In a boiler steel structure design, the basic wind speed or pressure is deemed as a basic condition for determining the design wind pressure. If the basic wind speed or pressure is chosen incorrectly, an unsafe or uneconomic design structure may result. How to convert the wind speed based on different national standards and how to choose the design wind pressure has currently become a key issue for calculating the wind load in a foreign-related project. With Trinidad and Tobago waste heat recovery boiler project serving as an example, after a comparison of the meaning of the basic wind speed and the design wind pressure expression of the American UBC97 standard with that of the Chinese load carrying standard, the calculation process of the wind speed conversion and design wind pressure was given under both load standards. The results show that the basic wind pressure calculated by using UBC97 standard is 1.44² times of that calculated by using the Chinese one while the design wind pressure is 1.5² times of that calculated by using the Chinese standard. Key words: UBC97, basic wind speed, wind load, boiler steel structure, basic wind pressure, standard comparison, structural calculation

燃气轮机余热锅炉过渡烟道的优化设计 = Optimized Design of the Transition Flue Duct of a Gas Turbine-based Waste Heat Recovery Boiler [刊, 汉] / WANG Yongtang, WU Shaohua (College of Energy Source, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), CHEN Ming, WANG Yanbin (CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(1), —65~68

In the light of the flow section shape of a transition flue duct of a waste heat recovery boiler, presented were two optimized design schemes, namely 1. change the elevation angle of the top face plate of the flue duct and 2. install guide plates in the flue duct. Moreover, through a simulation calculation of the optimized design schemes, the flue gas velocity distribution on the cross section of the flue duct outlet was obtained. After an analysis and discussion of the simulated results, the best choice of the two optimized design schemes was determined. The calculation results show that to install guide plates can obviously improve the flue gas velocity distribution on the cross section of the flue duct outlet with the averaged velocity increasing from 11.13 m/s to 11.51 m/s, and the mean square deviation of the velocity decreasing from 12.33 m/s to 4.02 m/s. The application of the conclusions in the practical engineering projects has resulted in gaining satisfactory effectiveness. Key words: gas turbine waste heat boiler, transition flue duct, guide plate, flue gas velocity distribution

宝钢 N₂ 炼钢煤气冷却高压水回流系统节能改造 = Energy-saving Modification of a High-Pressure Water Return Flow System Cooled by Baogang N₂ Steelmaking Coal Gas [刊, 汉] / YU Xiaoming, SHEN Wenjun (College of Energy Source and Power Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093), KONG Biaocong (Shanghai General Purpose Machine Technology Research Institute, Shanghai, China, Post Code: 200431) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(1), —69~71