

基于信息融合技术的风煤比优化控制研究

左为恒, 刘 统, 左陪新

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 火电厂燃烧控制系统大延迟, 大时间常数的特性, 传统协调控制很难快速准确的实现主蒸汽压力的稳定。采用辐射能与热量信号进行信息融合, 并设计风煤比优化算法搜索最佳风煤比, 可以实现快速响应燃烧率的变化。实验表明, 信息融合算法提高了动态响应的快速性, 在线调节风煤比优化算法使稳态过程烟气含氧量平均下降了 1.09%, 燃料比优化前燃烧更充分, 给煤量减少了 3% ~ 5%, 燃烧经济性提高。

关 键 词: 火电机组; 燃烧控制系统; 信息融合; 风煤比; 辐射能

中图分类号: TK232; TP23 文献标识码: A

符号说明

- P_s —— 主蒸汽压力给定值 / MPa
- K_{sh} —— 过热器阻力系数 (0 ~ 1)
- μ_t —— 汽轮机进气阀开度 (0 ~ 1)
- μ_B —— 燃烧率指令 (0 ~ 1)
- $G_1(s)$ —— 燃料至辐射能通道传递函数
- S_f —— 汽轮机第一级压力 / MPa
- $G_2(s)$ —— 燃料至主蒸汽压力传递函数
- P_1 —— 主蒸汽压力测量值 / MPa
- C_B —— 汽包蓄热系数
- PQ —— 热量信号 / MW
- P_d —— 汽包压力 / MPa
- E_T —— 辐射能信号 / MW
- n_E —— 辐射能信号低频扰动 / MW
- P_1 —— 汽轮机第一级压力 / MPa

引 言

目前, 国内大型电站多采用比值控制风煤比, 虽然工程上简单易实现, 但最佳风煤比和负荷的关系是一个复杂的非线性关系, 比值控制不能保证锅炉在任何工况下达到最佳燃烧状态^[1]。在传统的燃烧控制系统中, 采用热量信号做前馈, 可精确反应燃烧率的变化, 但燃料量到蒸汽压力传递通道这个纯滞后、大延迟的特性仍未得到克服。有人提出了用炉膛辐射能代替热量信号作为中间被调量建立数学模型, 可有效地克服燃料侧内扰对蒸汽压力的影

响, 并通过现场试验, 证明了辐射能信号代替热量信号的优越性^[2~3]。但用一个确定的传递函数来表示燃料量 - 炉膛辐射能通道的模型过于理想化。有文献对辐射能和热量信号进行频域分析提出了一种基于信息融合技术的控制策略, 将炉膛辐射能信号和热量信号进行信息融合, 构造互补 FRF(频率响应函数)对, 将辐射能信号响应燃烧率变化快, 中频段特性准确的优点, 与热量信号易于测量且低频段稳态精度高的优点相结合, 并在仿真研究中改善了控制精度^[4], 但对于优化稳态过程燃烧控制的贡献有限。

本研究提出一种基于辐射能 - 热量信号的融合信号做前馈, 以最大辐射能为依据在线搜索最佳风煤比的思想。在动态过程中充分利用辐射能信号的快速性和热量信号的准确性实现快速调节, 在稳态过程中利用炉膛辐射能快速响应燃烧率的变化, 在线搜索最佳风煤比。

1 辐射能 - 热量信号信息融合的研究

在火电厂燃烧系统工艺流程中, 燃料进入炉膛燃烧放热产生辐射能, 以辐射的形式向水冷壁传热, 水冷壁内的工质吸收热量生成蒸汽, 产生热量信号。从工艺流程可以看出炉膛辐射能 E 和热量信号 PQ 是锅炉能量供应在不同阶段的测量值。热量信号 PQ 包括两部分: 汽包蓄热能和推动汽轮机做功的部分, 即:

$$PQ = P_1 + C_B \frac{dP_d}{dt} \quad (1)$$

在传统的直接能量平衡控制法(DEB) 中, 采用能量平衡信号 BD 来平衡热量信号 PQ , 其表达式为:

$$BD = P_s \frac{P_1}{P_1} \quad (2)$$

图 1 是某 600 MW 燃煤锅炉采用信息融合的

收稿日期: 2011 - 10 - 10; 修订日期: 2011 - 12 - 21

作者简介: 左为恒(1961 -), 男, 重庆人, 重庆大学副教授。

DEB 协调控制系统图, 图中的 $G_1(s)$, $G_2(s)$ 均采用一阶惯性环节加纯滞后环节组成, 具有形式^[5]: $G(s) = \frac{k}{T \cdot s + 1} e^{-\tau s}$ 。

$$G(s) = \frac{k}{T \cdot s + 1} e^{-\tau s}$$

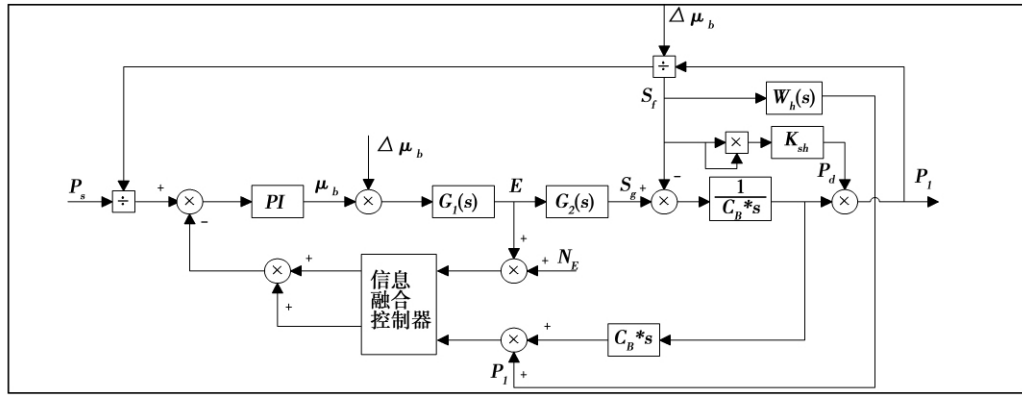


图 1 基于信息融合的 DEB 协调控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of a DEB coordination and control system based on the information fusion

从图中可以知 辐射能信号有燃烧率信号 μ_B 和低频扰动 n_E 组成 则:

$$E_T(s) = \frac{k_1}{T_1 \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_1 s} (\mu_B + n_E) \quad (3)$$

$$E_T(t) = k_1 \times (\mu_B + n_E) \quad (4)$$

热量信号 PQ 为:

$$PQ(s) = \frac{k_2}{T_2 \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_2 s} \cdot E_T(s) = \frac{k_2 \cdot k_1}{T_f \cdot s + 1} \times e^{-\tau_2 s} \cdot \mu_B = k_2 \cdot k_1 \cdot e^{-\tau_2 s} \cdot (\mu_B + \mu'_B) = k \cdot e^{-\tau_2 s} \cdot (\mu_B + \mu'_B) \quad (5)$$

其中 $k = k_1 \cdot k_2$ $\mu'_B = \mu_B (\frac{1}{T_2 \cdot s + 1} - 1)$ 是热量信号在高频段的偏差量, 当不考虑热量信号相对于热量信号相对于辐射能的滞后, 即 $\tau_2 = 0$ 时:

$$PQ(s) = k \cdot (\mu_B + \mu'_B) \quad (6)$$

系统的频域特性中, 根据前面分析, 需要剔除辐射能信号 E_T 中的低频 n_E 和热量信号 PQ 中的高频 μ'_B , 再通过构造互补 FRF 对, 将两种信号融合。将 E_T 和 PQ 通过线性互补的系统 $L_1(s)$, $L_2(s)$, 对应频率响应函数为 $H_1(\omega)$, $H_2(\omega)$, 即:

$$L_1(s) + L_2(s) = 1 \quad (7)$$

$$L_1(E_T) + L_2(PQ) = L_1(k_1(\mu_B + n_E)) + L_2(k(\mu_B + \mu'_B)) = k_1(L_1(\mu_B) + L_1(n_E)) + k(L_2(\mu_B) + L_2(\mu'_B)) = F(L_1(\mu_B), L_2(\mu_B)) + \Delta\mu_B \quad (8)$$

式中: $F(L_1(\mu_B), L_2(\mu_B)) = k_1(L_1(\mu_B) + k_2 \times L_2(\mu_B))$, $\Delta\mu_B = k_1 \times L_1(n_E) + k_1 k_2 \times L_2(\mu'_B)$ 。若 $L_1(s)$, $L_2(s)$ 的选取可使 $\Delta\mu_B \rightarrow 0$, 则说明融合之后的信号接近实际的燃烧率信号。

2 动态过程仿真研究

采用给出的辐射能 - 热量信号信息融合的协调控制策略, 在 matlab 中搭建仿真模型, 针对主蒸汽压力进行仿真研究。

锅炉燃烧控制系统的参数:

利用最小二乘法辨识燃烧率 - 辐射通道的传递函数为 $G_1(s) : 2.088e^{-4.13s} / (1 + 28.22s)$;

辐射能 - 热量信号通道传递函数 $G_2(s) : 4.028e^{-7s} / (1 + 45.43s)$;

燃烧率 - 热量信号通道传递函数 $G(s) : 8.411e^{-11.13s} / (1 + 160s)$;

锅炉蓄热系数 $C_B : 176s$;

过热器阻力系数 $K_{sh} : 0.07$;

主蒸汽阀门阻力传递函数 $W_h(s) : 1 / (0.1s + 1)$;

锅炉主蒸汽压力调节器 $PI = k(1 + 1/Ts) : k = 2, T = 8.333$;

主蒸汽压力给定值 $P_s : 16.17 \text{ MPa}$ 。

在仿真研究中, 为了方便工程实现互补的 FRF 对, IFC (Information Fusion Controller) 采用 $1 / (Ts + 1)$, $Ts / (Ts + 1)$ 的一阶线性滤波器, 将采用辐射能 - 热量信号融合技术的协调控制策略与传统的 DEB 协调控制进行仿真比较如图 2 所示。

通过仿真可以看出, 采用辐射能 - 热量信号融合的控制策略比传统的 DEB 协调控制策略在动态响应的快速性和进入稳定状态的时间都有显著减少, 在调节过程中, 主蒸汽的压力最大波动幅度小于

5% 提高了系统的响应速度。

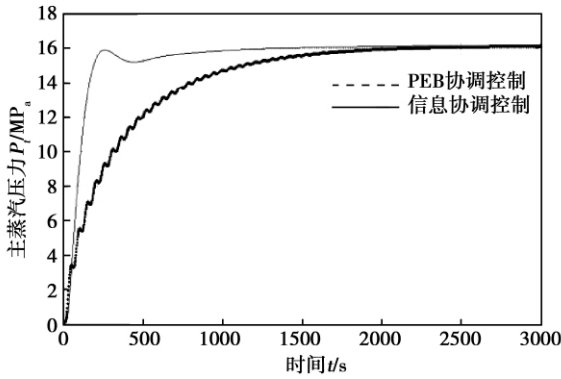


图2 主蒸汽压力阶跃响应曲线

Fig. 2 Curves showing the step response to the main steam pressure

3 在线搜索最佳风煤比的算法研究

文献 [1] 在研究了风煤比与燃烧率的关系后, 提出了一种在线调节风煤比, 优化燃烧的控制策略, 提高了稳态过程中燃烧系统的经济性。本研究通过设计优化算法, 对稳态过程燃烧系统进行优化。前面已经分析, 炉膛辐射 E_T 能对燃烧率 η_c 的变化响应迅速, 风煤比 β 的改变将影响燃烧率 η_c 的变化, 进而影响辐射能 E_T 的变化。存在一个最佳风煤比 β_{opt} 使得在负荷和给煤量不变的情况下, 使辐射能 E_T 达到最高。

系统工作原理: 主蒸汽压力偏离给定值较大时, 开关控制器选择位置 1, 不加入送风扰动, 采用辐射能 - 热量信号融合控制策略, 使主蒸汽压力保持稳定。当主蒸汽压力稳定后, 开关控制器选择位置 2, 加入送风扰动, 并观察辐射能的变化趋势, 当送风扰动方向使辐射能增大则说明风煤比向最佳方向靠拢, 否则, 修正送风扰动方向, 直到辐射能的变化率小于某一常数 σ 则说明此时为近似最佳风煤比, 并修改风煤比设定器的参数, 记录该风煤比下的燃烧工况。在搜索最佳风煤比过程中, 设置停步环节, 判断是否满足优化条件。其控制系统图和流程图分别如图 3 和图 4 所示。具体步骤为:

(1) 初始化风煤比寻优的各参数 σ 、 ϵ 、 i 、 m 和步长。 m 为风煤比允许变动的最大界限, i 表示送风扰动的方向 $i=1$ 表示和上次送风方向相反 $i=2$ 表示步长 (Step) 选取不合适, 导致没有搜索到最佳风煤比, 需要重置 Step。步长的修正采用 Fibonacci

法 (分数法), 它是一种变步长寻优方法, 每次步长的修改由 Fibonacci 数确定, 而且可以预先确定迭代次数。

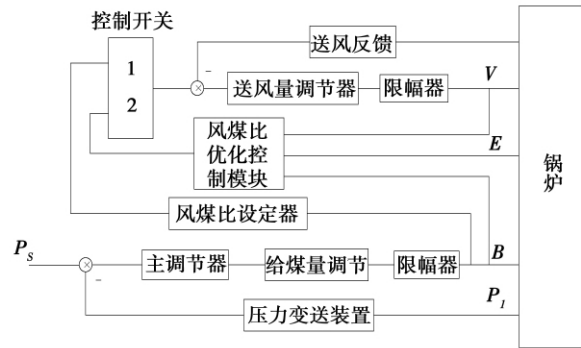


图3 在线整定风煤比系统图

Fig. 3 Systematic diagram for on-line setting the air/coal ratio

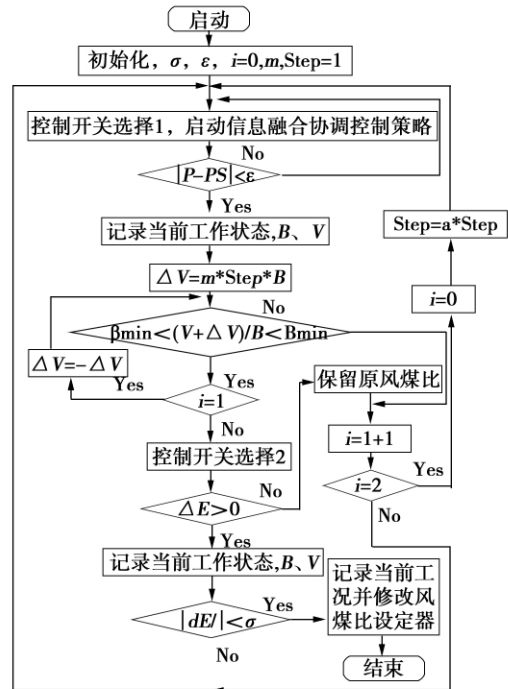


图4 风煤比在线整定流程图

Fig. 4 Diagram showing the flow path for on-line setting the air/coal ratio

(2) 选择开关位于 1, 启动信息融合协调控制策略, 调节主蒸汽压力到稳定值, 并记录当前的给煤量 B 和送风量 V 。

(3) 加入送风扰动, 并判断风煤比是否越限, 若 $i=1$ 则表明送风与上次反向, 且上次未能获得有效的风煤比。当满足优化条件后, 选择开关位于 2, 启

动优化程序。

(4) 将新的风煤比送入燃烧系统后,若辐射能的增量 $\Delta E > 0$,且辐射能的增量满足收敛条件,则搜索到最佳风煤比,否则再次判断优化条件,进行动态循环优化。

(5) 若辐射能的增量 $\Delta E < 0$,则表明送风量反向或步长过大。当 $i = 1$ 时,返回步骤(2),当 $i = 2$ 时,修改步长,并返回步骤(2)。由于最佳风煤比的单值性,故该算法是收敛的。

在某 600 MW 燃煤锅炉上现场运行结果如图 5、图 6 所示。在负荷从 190 MW 上升的过程中,烟气含氧量总体逐渐减小,与燃烧理论相符合,在负荷稳定在 310 MW 时,通过优化控制程序,使烟气的含氧量下降并趋于平稳,与历史情况相比,给煤量减小了 3% ~ 5%,而负荷响应的速度有了显著的提高,达到了设计的要求。

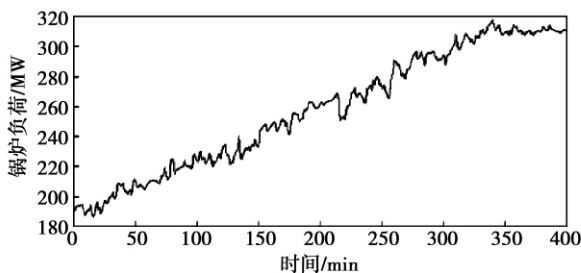


图 5 负荷记录曲线

Fig. 5 Curves showing the load record

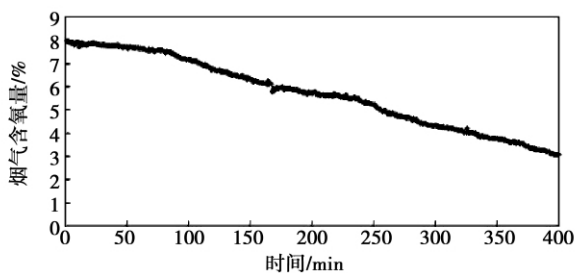


图 6 烟气含氧量记录曲线

Fig. 6 Curves showing the record of the oxygen content of the flue gas

4 结 论

通过在某 600 MW 机组试运行,取得了良好的控制效果。在动态过程中,采用辐射能-热量信号融合的控制策略与传统的 DEB 协调控制相比,响应的快速性明显提高:在 285 s 时,主蒸汽压力达到稳态

值 16.17 MPa 的 90%,在 1136 s 时,主蒸汽控制系统进入 2% 误差带,调节时间 t_s 显著缩短。在稳态过程中,通过在线搜索最佳风煤比以实现燃烧经济性。在某 600 MW 机组运行过程中(负荷从 190 MW 上升至 310 MW),通过测量和记录数据与历史数据相比较:在负荷上升过程中,烟气含氧量总体呈下降趋势,这与燃烧理论相符合,烟气含氧量平均下降了 1.09%,燃料比优化前燃烧更充分,给煤量减小了 3% ~ 5%,燃烧经济性得到提高。

运行结果表明,对于模型和参数不确定的大延迟、纯滞后的燃烧控制系统,采用信息融合协调控制策略使主蒸汽压力的动态响应得到改善,优于传统的 DEB 协调控制;通过最佳风煤比的在线寻优,提高了燃烧系统的经济性。

参考文献:

- [1] 王耀青,刘 微.在线调节风/煤比 实现经济燃烧控制[J].中国电力,1997,2(30):14-19.
WANG Yao-qing,LIU Wei. On-line regulation of the air-coal ratio to realize the economic combustion and control[J]. China Electric Power,1997,2(30):14-19.
- [2] 周怀春,娄新生,尹鹤岭,等.采用辐射能信号的电站锅炉燃料调节对象建模及仿真研究[J].中国电机工程学报,1996,16(4):226-229.
ZHOU Huai-chun,LOU Xin-sheng,YIN He-ling et al. Study of the modeling and simulation of the fuel regulation object of a utility boiler using radiative energy signals[J]. Journal of China Electric Machinery Engineering,1996,16(4):226-229.
- [3] 张师帅,周怀春,彭 敏,等.基于炉膛辐射能信号的电站燃煤机组燃烧控制研究[J].中国电机工程学报,2002,22(11):156-160.
ZHANG Shi-shuai,ZHOU Huai-chun,PENG Min,et al. Study of the combustion control of a coal-fired unit in a power plant based on the furnace radiative energy signals[J]. Journal of China Electric Machinery Engineering,2002,22(11):156-160.
- [4] 于达仁,范 轶,徐志强.炉膛辐射能信号和热量信号的信息融合方法[J].中国电机工程学报,2003,23(4):158-161,171.
YU Da-ren,FAN Yi,XU Zhi-qiang. Method for fusion of the furnace radiative energy signals and heat quantity ones[J]. Journal of China Electric Machinery Engineering,2003,23(4):158-161,171.
- [5] 翁一武,于达仁,徐基豫.锅炉跟随控制的构成——兼论直接能量平衡控制的动态特性[J].动力工程,2001,21(1):1050-1053,1009.
WENG Yi-wu,YU Da-ren,XU Ji-yu. Composition of the follow-up control of a boiler-concurrent investigation of the dynamic characteristics of the direct energy equilibrium control[J]. Power Engineering,2001,21(1):1050-1053,1009.

(陈 滨 编辑)

teristics was performed by burning coal mixed and diluted with petroleum coke in various proportions. The influence of the furnace temperature, excess air ratio and calcium/sulfur molar ratio on the sulfur dioxide emission characteristics was studied during the combustion of the blended fuel in various proportions. It has been found that to increase the excess air ratio and calcium/sulfur molar ratio can reduce the sulfur dioxide emissions concentration. There exists an optimum desulfurization temperature at which the sulfur dioxide emissions concentration will be the lowest. For a variety of blended fuels, the optimum desulfurization temperature falls in a range from 830°C to 850°C. **Key words:** circulating fluidized bed, mixing-dilution combustion, petroleum coke, sulfur dioxide

220 t/h 锅炉再燃改造的数值模拟 = **Numerical Simulation of the Reburning Modification of a 220 t/h Boiler**
[刊, 汉] LI De-bo (Guangdong Electric Grid Company, Academy of Electric Power Science, Guangzhou, China, Post Code: 510600), ZHANG Rui (National Key Laboratory on the Clean Utilization of Energy Resources, Thermal Energy Engineering Research Institute, Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(4). - 459 ~ 463

To perform a reburning modification of a boiler, with the help of a Fluent 6.3 software platform and by adopting a numerical simulation method, studied were the in-furnace gas flow field, temperature field and pollutant emissions characteristics before and after a reburning modification of a 220 t/h tangentially-fired boiler. Furthermore, the influence of the excess air ratio in the reburning zone on the reburning modification effectiveness was also investigated. The realizable $k-\varepsilon$ and LES model were used as the turbulent flow model respectively and a comparison of the simulation results was conducted. A contrast and verification of the simulation results obtained by using the LES model with the on-the-spot test data were conducted, including the temperature field, component field and NO_x . It has been found that the numerical simulation results obtained by using the LES model are in relatively good agreement with the test results. The calculated results show that after the reburning modification, the temperature distribution in the furnace is more uniform and a reduction atmosphere is formed around the reburning spout, leading to a drop of the NO_x concentration. When the excess air ratio in the reburning zone is 0.90, the reburning effectiveness is deemed as the best one and in such a case, the NO_x concentration at the outlet of the furnace will decrease by 33.87%. The simulation results obtained by using the LES model are more precise than those obtained by using the realizable $k-\varepsilon$ model. **Key words:** tangentially-fired boiler, reburning modification, excess air ratio, NO_x , numerical simulation

基于信息融合技术的风煤比优化控制研究 = **Study of the Optimized Control of Air/coal Ratio Based on the**

Information Fusion Technology [刊, 汉] ZUO Wei-heng, LIU Tong, ZUO Pei-xin (National Key Laboratory on Power Transmission and Distribution Equipment Items, System Safety and New Technologies, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(4). - 464 ~ 467

Due to a long delay and a big time constant of the combustion control system of a power plant, it is very difficult for a traditional coordination and control system to quickly and precisely realize a stabilization of the main steam pressure. The radiant energy and heat quantity signal were used to perform an information fusion and an algorithm for optimizing the air/coal ratio was designed, making it possible to realize a quick response to a change of the combustion rate. The test results show that the information fusion-based algorithm can quicken the dynamic response and the on-line regulation air/coal ratio optimization algorithm can result in a reduction of the oxygen content of the flue gas by 1.09% averagely during a stable state process, make it possible for the fuel to burn more sufficiently compared with the combustion before the optimization and reduce the coal feed by 3% - 5%, thus leading to an enhancement of the combustion cost-effectiveness. **Key words:** thermal power plant unit, combustion control system, information fusion, air/coal ratio, radiant energy

层燃垃圾焚烧炉的冷态试验研究 = Cold-state Experimental Study of a Laminar Combustion Waste Incinerator [刊, 汉] LIU Xiao-zhou (College of Material and Energy Source, Guangdong University of Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510006) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(4). - 468 ~ 471

A cold-state test and analysis were conducted of a laminar combustion waste incinerator under 8 operating conditions, of which the ratio between the front arch height and the length of the grate was 0.333, the ratio between the rear arch height and the length of the grate was 0.12 and the inclination angle of the front arch was 45 degrees. The test results show that it is comparatively appropriate for the ratio of momentum flow rate between the front and rear arch falling in a range from 1:2.1 to 1:5.4. In the space above the surface of the waste layer, the distribution of the vorticity along the direction of the grate length tends to be small in both front and rear portion of the furnace, changing in a range from 3.5% to 6%. **Key words:** laminar combustion waste incinerator, aerodynamics, cold-state test

大容量锅炉炉内喷钙辅助脱硫系统可行性研究 = Feasibility Study of an In-furnace Calcium Spraying Desulfurization Auxiliary System for a Large-capacity Boiler [刊, 汉] LIU Dan-yao, ZHANG Cheng, XIA Ji, CHEN