

# 中小煤粉炉运行优化新方法研究

王鑫鑫, 徐向东

(清华大学热能工程系, 北京 100084)

**摘要:** 针对目前中小型煤粉炉计算机控制系统在送风控制回路上, 没有合适的经济性指标来衡量锅炉运行效率, 提出了中小煤粉炉优化控制新方法。该方法从锅炉热效率的反平衡计算和炉膛能量平衡出发, 并结合锅炉实际运行数据, 舍弃了一些次要因素, 并通过详细的推导, 得到了在送风量改变时锅炉热效率变化的趋势——热效率判据。以该判据为依据, 不断对送风控制回路的目标——烟气含氧量进行优化, 从而调节风煤比, 达到优化燃烧的目的。

**关键词:** 煤粉炉; 运行优化; 热效率判据

中图分类号: TK229.6<sup>+</sup>3 文献标识码: A

## 1 前言

锅炉在能源工业中具有重要的地位, 它承担着为其它行业、工业及民用采暖等供汽的任务, 每年消耗大量的煤。这其中, 数量相当多的中小型锅炉运行效率比较低, 每年耗煤约4亿吨以上, 是全国原煤产量的三分之一, 并且这些锅炉在短时间内不能被淘汰掉。在这些锅炉身上有相当的节能潜力可以挖掘。常用的手段有以下几种: 改善风机的效率、特性, 用变频调节代替节流调节; 对锅炉本体进行改造, 改进保温隔热层材料及设计, 减少散热损失; 应用计算机自动控制技术, 提高控制水平等。

这些措施中, 只有应用计算机自动控制技术, 提高控制水平, 可以快捷地应用于目前正在运行的锅炉, 并且在此基础上, 通过应用新的优化控制技术和手段, 可以得到相当好的节能效果, 并且可以提高系统的安全性和运行的稳定性。

但是, 目前的中小型煤粉炉计算机控制系统存在着这样的问题: 要维护锅炉燃烧处于最佳状态, 就必须维持合适的风煤比, 也就是说, 让送风控制系统与给煤控制系统互相协调。但是燃烧的经济性指标是难以直接测量的, 一般的做法是用烟气含氧量来代表。但是, 烟气含氧量的最佳范围随煤种、负荷的变化而变化, 而在中小型煤粉炉中, 这两个因素恰恰是很多变的。

对上述问题有如下的解决方法: 锅炉燃烧诊断技术; 锅炉热效率在线测试技术; 锅炉燃烧在线自寻优技术。这些方法的共同点是绕开烟气含氧量, 而用其它的经济性指标。但是, 对于中小型锅炉来说, 这些方法或者造价太高, 或者只处于实验室研究阶段, 不能实际应用。所以, 本文要找到一种性能价格比较高的、适于在中小型煤粉炉上应用的优化控制方法, 以维持锅炉在较高状态下运行。具体思路是: 在锅炉运行比较稳定的时候, 人为地将施加送风量摄动, 看锅炉热效率是如何变化的。其核心就是: 推导在送风量改变时, 锅炉热效率变化的趋势, 从而得到热效率提高与否的判据。

## 2 推导热效率提高与否的判据

在进行推导之前, 需要作适当的简化, 从而抓住影响锅炉热效率的主要因素, 具体过程如下:

按《电站锅炉性能试验规程 GB10184-88》, 固态排渣煤粉炉的反平衡效率计算可以作以下简化:

(1) 煤种的低位发热量作为输入热量;

(2) 并取: 干烟气比热  $C_{p_{gy}} = 1.38 \text{ kJ}/(\text{m}^3\text{K})$ , 水蒸气比热  $C_{p_{H_2O}} = 1.51 \text{ kJ}/(\text{m}^3\text{K})$ ;

(3) 过量空气系数计算公式采用  $\alpha_{py} = 21/(21 - O_2)$ ;

(4) 忽略输入物理热及雾化蒸汽带入的热量; 忽略气体未完全燃烧损失; 忽略磨煤机排出石子煤的热损失; 忽略灰渣物理显热损失。

现在要考虑总送风量及其布局的变化对锅炉热效率的影响, 而这个影响主要体现在排烟损失(用  $Q_2$  表示)和固体未完全燃烧损失(用  $Q_4$  表示)上, 不考虑散热损失。将这两项损失的公式合在一起, 求全微分, 再结合某 130 t/h 煤粉炉的实际运行数据进行数量级分析, 忽略掉一些次要因素, 最后得到:

$$d(Q_2 + Q_4) = (V_{gk}^0)^c C_{p_{gy}} (\theta_{py} - t_0) d\alpha_{py} +$$

$$\frac{Q_2}{\theta_{py} - t_0} d\theta_{py} + 33\ 727 \frac{A^y}{100} dC \quad (1)$$

这样就得到了实际考虑的各项损失与排烟过量空气系数、排烟温度和  $C$  之间的关系。其中,  $C$  是灰渣中平均碳量与燃煤灰量之比(%)。在式(1)中, 含有  $dC$  这个难以在线测量的量。

然后考虑炉膛出口烟气温度的各个影响因素; 总送风量及其布局的改变对炉膛出口烟气温度的影响可以分为两个方面: (1) 燃烧状态发生变化(炉膛辐射热和燃烧效率的变化), 使炉膛火焰平均有效辐射温度发生变化, 进而炉膛出口烟气温度发生变化; (2) 燃烧状态未发生变化, 仅仅由于进出炉膛的物理焓的变化, 引起炉膛出口烟气温度的变化。经公式推导得到:

$$\frac{\partial T_g}{\partial Q_f} dQ_f = dT_g + \frac{C_{ga}T_g - C_aT_a}{(\alpha_{py} - 1)C_{ga} + (1/VG_0 + 1)C_g} d\alpha_{py} \quad (2)$$

这里得到了炉膛出口烟气温度与炉膛辐射热以及排烟过量空系数之间的关系。但是, 炉膛辐射热的提高并不代表整个锅炉热效率的提高, 因为从正平衡的角度来看, 得到的有效热量为炉膛辐射热加上对流受热面积(包括过热器、经济器、空气预热器)所得到的热量。所以单纯炉膛辐射热的提高并不能说明问题。

针对  $dC$  这个难以在线测量的量, 结合以上中间过程的推导结论, 并对时间求导, 进行数量级分析, 得到:

$$\frac{dC}{dA} = \frac{C_{ga}T_g - C_aT_a + \Psi \frac{dT_g}{dA}}{-B * 337.27A^y} \quad (3)$$

综合以上, 结合 130 t/h 锅炉实际运行数据, 并且应用了数量级分析和简化, 最终得到了如下的热效率判据, 该判据可以实时在线得到。这就是: 当送风量或其布局改变后, 炉膛出口烟气温度的变化必须大于某个值, 来判定锅炉热效率是否提高。

$$dT_g > \left[ \frac{(V_{gk}^0)^c C_{pgs} (\theta_{py} - t_0)}{1.346\ 96 Q_d^y + \Theta} - \frac{(C_{ga}T_g - C_aT_a)}{\Theta} \right] d\alpha_{py} + \frac{Q_2}{(\theta_{py} - t_0)(1.346\ 96 Q_d^y + \Theta)} d\theta_{py} \quad (4)$$

### 3 热效率判据的应用

推导得到了热效率判据之后, 送风量控制回路

采用如图 1 的控制方案。其控制方案仍然采用烟气含氧量作为一个经济性指标。送风控制回路实际上

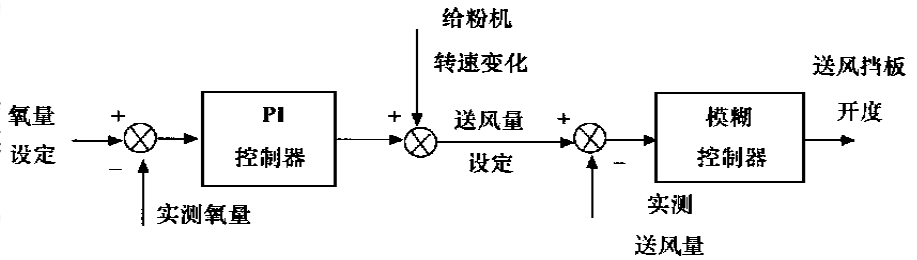


图 1 送风量控制回路

是一个串级控制器, 其外环采用 PI 调节器, 根据氧量和给粉机转速前馈计算出送风量的设定值, 内环采用模糊控制器, 根据送风量的实测值与设定值的偏差计算出送风门开度。

最佳烟气含氧量根据锅炉热负荷的变化情况利用最佳烟气含氧量自学习系统和利用以上推导的热效率判据对烟气含氧量进行在线寻优给出。具体结构如图 2 所示。

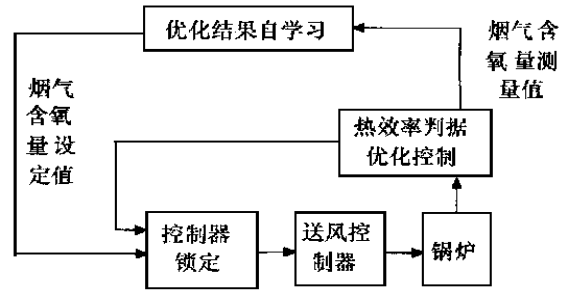


图 2 烟气含氧量寻优结构图

传统的优化算法在应用到煤粉炉这种数学模型非常复杂的系统中, 有很大的困难, 因为不可能知道搜索空间内几乎所有点的函数值, 而且求解时间比较长, 不能得到实际应用。所以, 在进行最佳烟气含氧量在线寻优时, 采用类似司炉工手动试探的试探寻优方法。这种方法虽看似简单, 但却非常实用。具体过程如下:

- (1) 首先要判断当前状态是否稳定, 判断项目包括主蒸汽压力、一次风箱风压、送风压力是否稳定以及是否在正常范围之内(不能接近超限)。
- (2) 若否, 则优化就不能继续进行; 若是, 则将燃烧控制系统锁定输出(炉膛负压控制回路除外)。
- (3) 将送风门施加一个小扰动量, 等待 2 分钟。
- (4) 在等待过程中要不断地判断是否发生大的外扰, 若有大的外扰, 则马上将控制系统解锁, 本次

优化终止, 若没有大的外扰, 则可以进行热效率判据算法。

(5) 若效率提高了, 则记录下当前的烟气含氧量。按试探寻优算法, 回到步骤 3, 改变步长的大小或方向, 如此循环下去, 直至控制系统解锁或者优化结束。

### 4 实际优化过程举例

定义锅炉负荷如下:

$$N = D_{gq}(h_{gq} - h_{gs}) \quad (5)$$

式中:  $D_{gq}$  —— 主蒸汽流量, kg/s;

$h_{gq}$  —— 主蒸汽焓, kJ/kg;

$h_{gs}$  —— 经济器入口给水焓, kJ/kg;

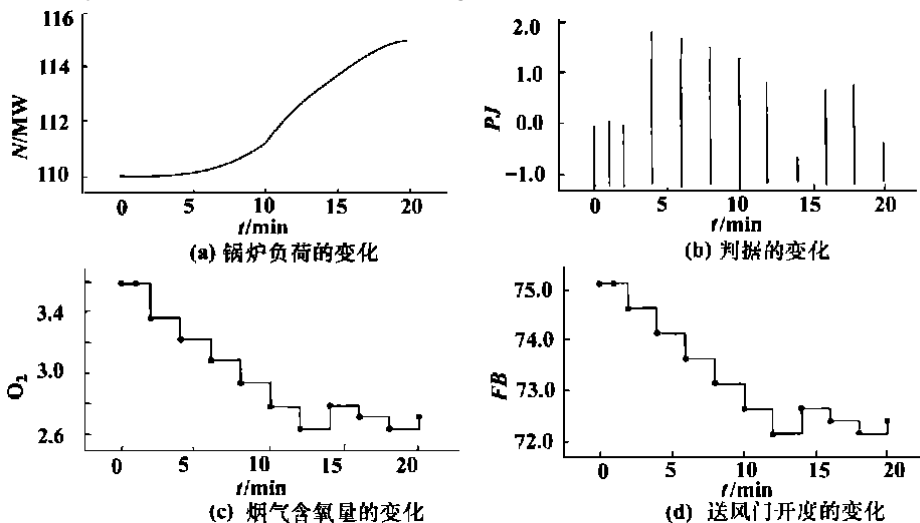


图3 实际优化过程

定义:  $PJ$ (判据) = 热效率判据算式左端 - 热效率判据算式右端

下面从实际运行数据中摘出一段优化的过程, 用曲线形式来表示, 如图 3 所示。

初始状态: 煤种低位发热量  $Q_{df} = 13.8 \text{ MJ/kg}$ , 锅炉负荷  $N = 110 \text{ MW}$ , 主蒸汽压力  $P_{ms} = 3.38 \text{ MPa}$ , 主蒸汽温度  $T_{ms} = 432.31 \text{ }^\circ\text{C}$ , 主蒸汽流量  $D = 126.33 \text{ t/h}$ , 给水压力  $P_{gs} = 4.5 \text{ MPa}$ , 给水温度  $T_{gs} = 143.22 \text{ }^\circ\text{C}$ , 烟气含氧量 3.58%, 送风门开度  $FB = 70.1\%$ 。

初始步长为  $-0.5\%$ (送风门开度), 从第 2 min 开始寻优。等待 2 min, 即到第 4 min, 可以看到效果:  $PJ > 0$ , 所以该时刻步长仍为  $-0.5\%$ , 即送风门继续关小。一直这样走下去, 最后得到较优的送风门开度 72.35%, 对应烟气含氧量为 2.7。注意, 第 14 ~

16 min, 是恢复原状态的时间, 因为前一刻即第 12 min 的方向是不好的。

### 5 优化结果的学习

为了将以前的优化结果学习下来, 以备将来锅炉运行工况发生变化时, 能够迅速地将对应工况的最佳烟气含氧量找出来, 作为当前工况的烟气含氧量设定值, 因此设计了自学习算法。根据现场调查, 发现锅炉负荷、煤种发热量的变化是影响运行工况的主要因素, 所以就选取这两个因素作为自学习后的输入变量, 输出变量是最佳烟气含氧量, 学习的结果相当于得到一张二维的模糊表。

具体说来, 就是将锅炉负荷从 96 ~ 116 MW 分

为 10 段, 每段 2 MW。将煤种低位发热量从 13 ~ 21 MJ/kg 分为 4 段, 每段 2 MJ/kg, 这相当于模糊控制中的模糊化。这张模糊表在初始化时均将各种情况下的最佳烟气含氧量初始值设定为 3.5%。然后在某次优化完成后, 得到当时的最佳烟气含氧量  $O_{2_{new}}$ , 再按照当时的工况到模糊表对应的位置上查找到原来的最佳烟气含氧量  $O_{2_{old}}$ , 然后按  $O_{2_{old}} = (O_{2_{old}} + O_{2_{new}})/2$  进行计算, 将  $O_{2_{old}}$  存到相应的位置上。表 1 是经过八个月自学习的最佳烟气含氧量模糊表, 表中数据为最佳烟气含氧量。

表 1 学习八个月后的最佳烟气含氧量模糊表

锅炉负荷 N/MW	煤种低位发热量 $Q_{df}^0/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$			
	13~15	15~17	17~19	19~21
96~98	4.30	3.79	3.53	3.35
98~100	4.16	3.65	3.43	3.24
100~102	4.06	3.55	3.27	3.15
102~104	3.94	3.43	3.16	3.01
104~106	3.80	3.25	3.05	2.94
106~108	3.60	3.17	2.97	2.82
108~110	3.48	3.05	2.80	2.72
110~112	3.33	2.89	2.70	2.62
112~114	3.18	2.81	2.61	2.46
114~116	3.07	2.65	2.49	2.35

(下转第 382 页)

$$x|_{w_{\max}} = \frac{1}{r} \arcsin [u_0 \sin(rL) / \sqrt{u_0^2 + 2u_0 u_L \cos(rL) + u_L^2}] \quad (17)$$

当  $u_L = -u_0$ , 即双侧等速进风时, 化简上式, 得:

$$x|_{w_{\max}} = L/2$$

### 6.2.2 双侧进风与单侧进风方式流量偏差的比较

设两种方式下风室内总进风量相同。对双侧进风, 仅讨论  $u_0 = -u_L$ 。

#### ① 单侧送风

以  $u_L = 0, 2u_0$  代替  $u_0, x = L$ , 代入式(16)

得:  $\eta_{Q_{\max}}^f = \eta_Q^f |_{x=L} = rL / \sin(rL) \quad (18)$

#### ② 双侧送风

以  $u_L = -u_0, x = L/2$  代入式(16)

得:  $\eta_{Q_{\max}}^b = \eta_Q^b |_{x=L/2} = (rL/2) / \sin(rL/2) \quad (19)$

所以,  $\eta_{Q_{\max}}^a / \eta_{Q_{\max}}^b = 1 / \cos(rL/2) > 1$

即在输送相同风量情况下, 单侧送风是双侧送风最大流量偏差的  $1 / \cos(rL/2)$  倍。

### 6.2.3 风室结构和床层结构对流量偏差的影响

由最大流量偏差表达式(18)、(19)可以推知, 当  $rL$  增大时, 最大流量偏差值随之增大。由于  $r$  与  $B/F$  成正比, 与  $\sqrt{\xi}$  成反比。而  $B/F$  为风室高度的倒数,  $\xi$  与煤层厚度和炉排通风截面比的大小。因此, 增加风室的高度  $H$ 、采用双侧进风方式、适当减小炉排的通风截面比、增加煤层厚度都有利于减小风室内横向流量分配偏差。此与经验是相符的。

## 7 结论

(上接第 408 页)

## 6 应用效果及结论

该方法和热效率判据的推导过程虽然是结合特定煤粉炉的运行数据得到的, 但其分析过程对其它一些中小型煤粉炉同样适用; 在“青岛碱厂热车间 130 t/h 煤粉炉优化运行”这一横向项目中, 已经成功应用了这一新方法。经山东电力科学研究所的热效率测试证明: 应用了该方法后, 锅炉的热效率提高了近 3%, 证明了该方法适合于在中小型煤粉炉上

火床炉床面局部的配风量主要与两个因素有关, 床层上下的压差及床层的阻力特性。本文的讨论限于火床平整, 床面阻力系数均匀一致的条件下, 仅由风室内分流造成沿风室宽度静压变化引起的床面流量偏差问题。实例计算表明, 由此造成的流量偏差一般不大(约 1% ~ 2%)。实际燃烧的火床在强燃区和燃尽区流量偏差则比较显著。其原因在于, 风室内静压变化和床层阻力特性变化的联合作用。并且, 一般总是先由风室内静压分布的不均匀引起床面配风量稍有不均, 随后, 通过燃烧的不均而迅速改变床层阻力特性, 进而造成床面流量偏差增大, 并在经历其后的风室时不断扩大。显然, 若无风室内静压分布的不均匀这一“先天”因素的作用, 前期均匀平整的床面到燃烧中后期就不会出现沿炉宽规律性的流量分配偏差和燃烧偏差。因而, 解决沿炉宽火床燃烧不均匀的问题应首先研究风室内静压变化引起流量分配偏差的机制。本文的理论分析所获结论意义在此。

### 参考文献:

- [1] 缪正清, 王恩禄, 田子平. 电站锅炉分配集箱系统单相流体流动特性的研究[J]. 动力工程, 1998, 18(1): 43-47.
- [2] 缪正清. Z型集箱连接系统单相流体的流动特性[J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(7): 81-85.
- [3] 缪正清. 电站锅炉集箱端部轴向引入引出的并联管组系统单相流体流动特性解的统一表达式[J]. 动力工程, 1998, 18(6): 32-38.
- [4] 巴苏 P, 弗雷泽 S A. 循环流化床锅炉的设计与运行[M]. 岑可法 倪明江, 骆仲决, 等译. 北京: 科学出版社, 1994.

(复 编辑)

### 推广应用。

### 参考文献:

- [1] 冯俊凯, 沈幼庭. 锅炉原理与计算[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [2] 徐春晖. 中小煤粉炉燃烧控制的主导因素法[M]. 北京: 清华大学, 1999.
- [3] 金以慧. 过程控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [4] 邵裕森. 过程控制系统及仪表[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [5] 孙增圻. 智能控制理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.

(何静芳 编辑)

which has the following dimensions: length 900 mm, width 100 mm and height 5200 mm. The particle transverse dispersion in the above-cited zone can be described with the help of a one-dimensional dispersion model. The model calculation results are in very good agreement with experimental data. Through the experimental data fitting one can obtain the particle transverse dispersion factor  $D_{sr}$ . The tests show that with the increase in fluidizing air speed and stationary bed height there will be an increase in the transverse dispersion factor. The transverse dispersion factor will decrease with the increase in particle diameter. Finally, an empiric formula was given for the transverse dispersion factor with the fluidizing air speed, stationary bed height and particle diameter serving as influencing factors. **Key words:** circulating fluidized bed, transverse dispersion factor, hot tracer particle

**大容量锅炉锅筒两侧水位测量偏差问题的研究 = An Investigation of the Deviation in Water Level Indication at the Two Ends of the Boiler Drum of a Large-sized Boiler** [刊, 汉] / LIU Fu-guo (Thermal Energy Institute under the Shandong Provincial Electric Power Research Academy, Jinan, China, Post Code: 250002), MOU Chun-hua (Shandong Rizhao Power Plant, Rizhao, Shandong Province, China, Post Code: 276826), TAN Zhe-ling (Shandong No. 3 Electric Power Construction Co., Rizhao, Shandong Province, China, Post Code: 276826) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 399 ~ 402

A recurrent problem in recent years is the measurement discrepancy in water level indication at the two ends of the drum of a large-sized boiler. This can affect the safe operation of a power plant. After an analysis of the root cause of this deviation the authors present their successful experience in employing uniform-pressure tubes for coping with the issue and recommend some effective measures both in design and operation aimed at reducing the discrepancy of water level measurement. **Key words:** boiler, boiler drum water level, liquid level measurement, correction of calculation

**适用于无烟煤燃烧的新型涡流拱特性的研究 = A Study of the Features of a Novel Vortex Arch Suited for the Combustion of Anthracite Coal** [刊, 汉] / ZHUANG Zheng-ning, ZHU Chang-xin, TANG Gui-hua (Energy Engineering Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 403 ~ 405, 430

Presented is a kind of new technology incorporating a vortex arch suited for the burning of anthracite coal in a traveling-grate boiler. Through modeling tests an experimental investigation was conducted of the features of the vortex arch along with an analysis of its working mechanism. As a result, identified are the key conditions to be met for achieving the optimum structural dimensions of a vortex arch. The results of study indicate that the vortex arch can effectively increase the suction and transport quantity of gas flow from a rear arch to a front one, contributing to an increase in the front arch temperature. During its practical use for the first time it has been found that the vortex arch is conducive to the timely ignition of a furnace firing flaxseed coal of category III accompanied by an intensified combustion. **Key words:** stoker boiler, anthracite coal, vortex arch, intensified combustion

**中小煤粉炉运行优化新方法研究 = An Investigation of New Methods for Attaining an Optimized Operation of Small and Medium-sized Pulverized Coal-fired Boilers** [刊, 汉] / WANG Xin-xin, XU Xiang-dong (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 406 ~ 408, 382

On the air feed control loop of a computer-based control system for present-day small and medium-sized pulverized coal-fired boilers there usually lack suitable economic indexes to evaluate the boiler operating efficiency. In this regard some new methods are proposed to optimize the control of the above-cited boilers. Based on the counterbalance calculating method of boiler thermal efficiency and the energy balance of boiler furnace the authors have come up with a set of discriminating criteria through a detailed deductive process. The above-mentioned criteria can be employed to evaluate the boiler thermal efficiency and reflect the variation trend of the latter in case of a change in air feed rate. All the above has been accomplished by taking into account the practical operating data of boilers and neglecting some secondary unimportant factors. With the above discriminating criteria serving as a basis a continuous optimization was conducted with respect to the target of the air feed control loop, i. e. the oxygen content in flue gas, thereby achieving the aim of an optimized combustion process through the proper adjustment of air-coal ratio. **Key words:** pulverized coal-fired boiler, optimized operation, discriminating criteria for evaluation of thermal efficiency