

# 直吹式制粉系统与空气预热器的 质量能量平衡关系分析

邢德山<sup>1</sup>, 阎维平<sup>1</sup>, 支国军<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学能源与动力工程学院 教育部电站设备状态监测与控制重点实验室, 河北保定 071003;

2. 山西大学工程学院, 山西太原 030013)

**摘 要:** 针对火力发电厂燃煤锅炉变煤种后导致制粉系统冷风份额增大和锅炉排烟温度升高的问题, 以华北某大型火力发电厂 330 MW 燃煤机组正压直吹式制粉系统和三分仓回转式空气预热器为研究对象, 基于制粉系统和三分仓回转式空气预热器的热力计算, 得出了制粉系统和空气预热器风量—风温特性曲线; 基于制粉系统和空气预热器空气质量平衡和热量平衡关系确定制粉系统和空气预热器的工作点。分析计算结果与现场运行状况相符合。根据计算结果, 对降低锅炉排烟温度、减少冷风份额的措施进行了分析评价, 降低空气预热器进口烟气温度可以有效地降低排烟温度, 而减小空气预热器一次风冲刷转子的份额以降低排烟温度的效果不明显。

**关 键 词:** 电站锅炉; 直吹式制粉系统; 空气预热器; 质量平衡; 热量平衡

中图分类号: TK223.7 文献标识码: A

## 1 前 言

在现代煤粉锅炉中, 制粉系统是锅炉设备最重要的辅助系统之一。直吹式制粉系统与锅炉设备的联系尤为密切, 直吹式制粉系统的运行条件不但影响进入锅炉炉膛的热量大小和燃料进入炉膛的着火燃烧条件, 而且还会影响流经空气预热器的空气量和出口热空气温度, 导致空气预热器在尾部烟道的吸热量和锅炉排烟温度也相应变化。因此, 直吹式制粉系统的工作条件会对锅炉的经济性产生很大的影响<sup>[1~3]</sup>。

近几年, 为适应煤炭供应市场的变化, 许多燃煤火力发电厂从来煤渠道、煤炭价格等多方面考虑, 锅炉设备改烧非设计煤种成为一种较为普遍的现象。锅炉设备实际燃用煤种与设计煤种的性质相差较大时, 既可能由于燃料燃烧、传热特性的变化给锅炉设备的安全经济运行带来影响, 也可能由于燃料性质变化导致制粉系统的工作条件变化进而影响锅炉运

行状况<sup>[1~3]</sup>。本文将结合实例, 从直吹式制粉系统和三分仓回转式空气预热器的空气质量平衡和热量平衡的角度出发, 分析煤种变化对直吹式制粉系统和空气预热器的工作条件的影响。

我国华北某大型燃煤发电厂安装的意大利 FRANCO TOSI 锅炉厂制造的 TOSI—CE1110 型锅炉为亚临界控制循环锅炉, 锅炉的最大连续蒸发量为 1 110 t/h, 配 330 MW 汽轮发电机组, 锅炉配备两台受热面回转式空气预热器。锅炉原设计煤种为山西晋中贫煤, 2001 年后改烧大同烟煤。制粉系统也由原设计的双进双出钢球磨煤机半直吹式制粉系统改为直吹式制粉系统。根据制粉系统有关规程的要求, 磨煤机出口温度由原设计的 130 °C 降至 75 °C。燃煤种类的变化和制粉系统运行条件的变化, 导致制粉系统掺冷风量增大(冷风份额可达 60% 左右)、锅炉排烟温度升高(由原设计 125 °C 升高到 150 °C 左右)等。

## 2 正压直吹式制粉系统热风—风温特性

根据现烧燃料特性和制粉系统设计运行参数进行制粉系统热力计算<sup>[6~7]</sup>, 可以计算出制粉系统入口热空气温度与干燥剂热风份额的关系。为便于分析制粉系统和空气预热器的质量和能量平衡关系, 进一步按照“制粉系统入口热空气温度加 10 °C 等于空气预热器一次风出口温度”的关系将其换算到空气预热器一次风出口温度(热风温度)与制粉系统热风份额的关系<sup>[9]</sup>。本文将这一关系称为制粉系统的热风量—风温特性。

通过逐步改变部分计算条件所进行的计算<sup>[6]</sup>, 可以得到一系列反映制粉系统运行特性的空气预热器一次风出口温度与制粉系统热风份额的关系的数据, 根据这些数据绘出的一组热风—风温特性曲线, 如图 1 所示。

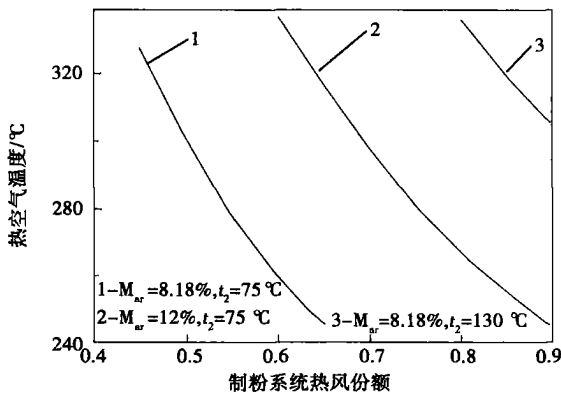


图 1 制粉系统热风量—风温特性曲线

燃料性质(燃料水分, 其次是可磨性系数)和制粉系统出口温度是影响制粉系统干燥剂温度的主要因素。由图 1 可见, 燃料水分, 尤其是制粉系统出口温度对制粉系统特性曲线影响很大。随着制粉系统出口温度的升高, 制粉系统干燥剂温度相应升高, 从而使得对应于同一热空气温度下制粉系统的热风份额有较大的增加。

### 3 三分仓回转式空气预热器风量—风温特性

利用空气预热器中烟气、空气的热平衡关系, 结合进行三分仓回转式空气预热器的传热计算可以得到空气预热器一次风出口温度与流经空气预热器一次风通道的风量之间的关系<sup>[8-9]</sup>。同样也可以将这一风量折合为制粉系统的热风份额, 并称空气预热器一次风通道的出口风温与风量(已折算到制粉系统热风份额)的关系为空气预热器风量—风温特性。

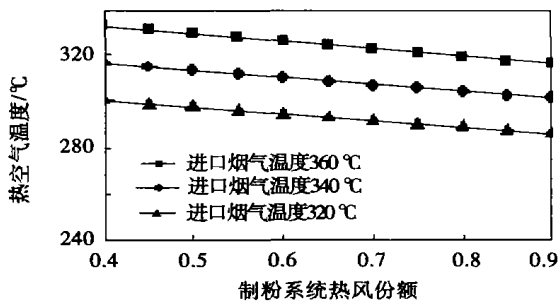


图 2 空气预热器风量—风温特性曲线

图 2 是根据不同的空气预热器进口烟气温度的计算结果所绘制的热风份额与空气预热器出口空气温度(热风温度)之间的关系曲线——空气预热器风量—风温特性曲线。从图中看出, 当空气预热器进

口烟温下降时, 空气预热器出口热空气温度随之下降; 在空气预热器进口烟温不变的情况下, 随着一次风通道通过的空气量的增大(热风份额增大), 空气预热器出口热空气温度下降。

### 4 制粉系统与空气预热器工作点的确定

当制粉系统与空气预热器的空气管路连接方式确定之后, 制粉系统与空气预热器的空气质量、能量平衡关系也随之确定。因此, 燃料种类确定之后, 在一定的负荷下, 当制粉系统出口温度确定之后, 制粉系统的热风份额不但取决于制粉系统和空气预热器各自的特性, 而且还要受到制粉系统和空气预热器质量和能量平衡关系的制约。

式(1)~式(4)表示制粉系统与空气预热器的质量平衡关系:

$$V'_{KI} = \frac{g_1 B_m r_{ha} Z_m}{1.285 B_j} \quad (1)$$

$$V'_{KII} = \frac{G_t - G_1}{1.285 B_j} \quad (2)$$

$$V_r = V'_{KI} \quad (3)$$

$$V_1 = \frac{(g_1 + \Delta M) Z_m B_m + Q_s Z_m}{1.285 B_j} \quad (4)$$

式(1)~式(4)中:  $V'_{KI}$ 、 $V'_{KII}$ 、 $V_r$ 、 $V_1$ —为空气预热器出口处的一、二次风量、进入制粉系统的干燥热风量和制粉系统出口的一次风量,  $m^3/kg$ ;  $g_1$ —制粉系统干燥剂量,  $kg/kg$ ;  $r_{ha}$ —制粉系统热风份额;  $Z_m$ —同时运行的磨煤机台数;  $B_m$ 、 $B_j$ —磨煤机磨煤出力、计算燃料消耗量,  $kg/s$ ;  $G_t$ 、 $G_1$ —进入炉膛的总风量和一次风量,  $kg/s$ ;  $Q_s$ —单台磨煤机密封风量,  $kg/s$ ;  $\Delta M$ —每千克燃料在制粉系统中失去的水分,  $kg/kg$ 。

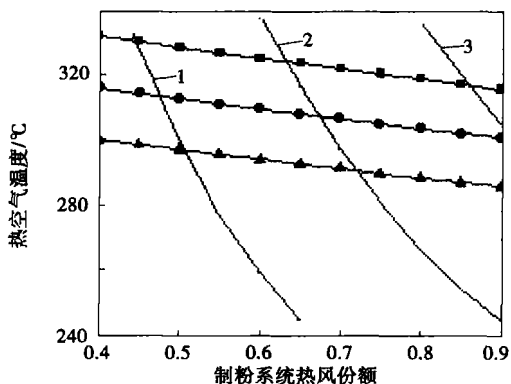
考虑制粉系统、空气预热器特性和它们之间的质量能量平衡关系, 将图 1 所反映的制粉系统热风量—风温关系与图 2 所反映的空气预热器风量—风温关系结合起来绘制到同一张图上如图 3 所示。

图 3 表明, 由于受到制粉系统和空气预热器质量能量平衡关系的制约, 实际工作中, 空气预热器一次风出口温度和制粉系统干燥剂热风份额的关系应是制粉系统风量—风温特性曲线和空气预热器风量—风温特性曲线的交点, 即实际工作点。因为只有在这个交点上能同时满足制粉系统、空气预热器各自的风量—风温特性以及它们之间的质量能量平衡关系。

### 5 降低排烟温度、减少冷风份额的探讨

#### 5.1 降低空预器进口烟气温度

由图 3 可知, 当空气预热器进口烟气温度的降低时, 工作点的热风份额增大。这说明降低空气预热器进口烟温时, 由空气预热器的特性和热风份额增大两方面的因素都会使锅炉排烟温度有较大幅度的降低。例如, 当燃料收到基水分  $M_w = 8.18\%$  和制粉系统出口温度  $t_2 = 75^\circ\text{C}$  时, 对应空气预热器进口烟温分别为  $360^\circ\text{C}$ 、 $340^\circ\text{C}$ 、 $320^\circ\text{C}$  下的热风份额分别为 0.45、0.48 和 0.51, 锅炉排烟温度分别为  $152^\circ\text{C}$ 、 $144^\circ\text{C}$  和  $136^\circ\text{C}$ 。



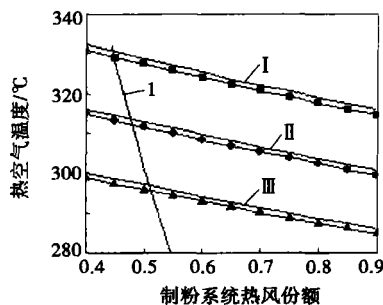
1- $M_w = 8.18\%$ ,  $t_2 = 75^\circ\text{C}$ ; 2- $M_w = 12\%$ ,  $t_2 = 75^\circ\text{C}$ ; 3- $M_w = 8.18\%$ ,  $t_2 = 130^\circ\text{C}$ ;  
 —●— 进口烟气温度的  $360^\circ\text{C}$ ; —●— 进口烟气温度的  $340^\circ\text{C}$ ;  
 —▲— 进口烟气温度的  $320^\circ\text{C}$

图 3 制粉系统与空气预热器工作点的确定

### 5.2 改变一次风和二次风冲刷转子份额

为了比较一次风和二次风冲刷转子份额的变化对制粉系统热风份额和锅炉排烟温度的影响, 对空气预热器一/二次风冲刷转子的份额由目前的  $50^\circ/130^\circ$  改变为  $35^\circ/145^\circ$  进行了计算。并根据空气预热器进口烟温分别为  $360^\circ\text{C}$ 、 $340^\circ\text{C}$ 、 $320^\circ\text{C}$  下的计算结果绘制成曲线如图 4 所示。

从图 4 中可以看出, 当空气预热器一次风冲刷转子的份额有所减少时, 空气预热器出口的一次风温度随风量的增大而降低的趋势与未改变一、二次风冲刷转子份额时相似。但风量相同时, 出口空气温度降低约  $1\sim 2^\circ\text{C}$ 。考虑制粉系统和空气预热器的质量能量平衡关系可以看出, 制粉系统的热风份额与空气预热器一次风冲刷转子的份额改变前相比虽有所增大, 但增幅甚小(热风份额增加约 0.01 左右); 同时, 改变一次风冲刷转子的份额对锅炉排烟温度的影响甚小, 改变前后工作点锅炉排烟温度基本不变。总之, 改变空气预热器一次风冲刷转子的份额对增加热风份额和降低锅炉排烟温度均无明显效果。



1- $M_w = 8.18\%$ ,  $t_2 = 75^\circ\text{C}$  时的制粉系统热风-风温特性曲线; I、II、III-进口烟温为  $360^\circ\text{C}$ 、 $340^\circ\text{C}$  和  $320^\circ\text{C}$ , 且一次风道份额为  $50^\circ$  时的空气预热器风量-风温特性曲线; —●—、—○—、—▲— 分别为进口烟温为  $360^\circ\text{C}$ 、 $340^\circ\text{C}$  和  $320^\circ\text{C}$ , 且一次风道份额为  $35^\circ$  时的空气预热器风量-风温特性曲线

图 4 一次风冲刷转子份额改变后制粉系统与空气预热器空气量平衡图

## 6 结 论

(1) 直吹式制粉系统的出口温度  $t_2$  代表制粉系统送入锅炉的热量(燃料的化学能除外)大小。 $t_2$  较高时, 制粉系统入口干燥剂温度也往往较高, 要求空气预热器在尾部烟道吸收较多的热量, 使得制粉系统的热风份额增大, 锅炉排烟温度降低。反之锅炉排烟温度升高。由于  $t_2$  主要按照燃料种类确定, 如烟煤  $t_2$  在  $70\sim 75^\circ\text{C}$  之间, 贫煤在  $130^\circ\text{C}$  左右。因此, 设计烧贫煤的锅炉改烧烟煤时  $t_2$  降低, 会出现制粉系统冷风份额增大、锅炉排烟温度升高等现象。

(2) 制粉系统和空气预热器在运行过程中都有各自的风量-风温特性, 同时需要满足空气质量和能量的平衡。运行中, 由二者风量-风温特性曲线的交点可确定制粉系统和空气预热器的实际工作点。偏离交点的工作状态都是不稳定态。建立新的稳定的工作状态其实质就是改变制粉系统或空气预热器至少二者之一的风量-风温特性, 使其交点位置有所改变。

(3) 由于燃用煤种由贫煤改为烟煤而导致制粉系统冷风份额增大、锅炉排烟温度升高, 降低空气预热器入口处的烟气温度的对增大制粉系统的热风份额、降低锅炉排烟温度有比较明显的效果。本炉当空气预热器烟气入口温度由  $360^\circ\text{C}$  降低到  $340^\circ\text{C}$  时, 制粉系统热风份额由 0.45 增大为 0.48, 排烟温度由  $152^\circ\text{C}$  降低到  $144^\circ\text{C}$ 。烟气入口温度进一步降低到  $320^\circ\text{C}$  时, 制粉系统的热风份额可增大到 0.51, 排烟温度可降低到  $136^\circ\text{C}$ 。

(下转第 589 页)

DL/567.6-95 规定的方法 B 的测量值更小些,而且更接近样品的真实可燃碳含量。当然本文定义的 TGA 方法也带来了一个新的系统误差:含碳有机质高温裂解,这一类似脱挥发份的反应所造成的系统误差。在煤的脱挥发份反应中,加热速率越大、终温越高,所产生的挥发份越多。由于循环流化床锅炉飞灰碳在床内都经历了晶格有序化过程,所以飞灰碳活性较低,挥发份含量很少;并且 TGA 的加热过程属于慢加热速率的升温过程,终温为 725 °C,低于电力行业标准 DL/567.6-95 中的 815 °C,所产生的挥发份会进一步降低。FTIR 的数据结果显示:无论是终温为 815 °C,还是终温为 725 °C 的 TGA 试验,未通入空气时排放的 CO 的物质总量都不到通入空气时排放的 CO<sub>2</sub> 物质总量的 1/1000。这说明含碳有机质高温裂解产生的系统误差是可以忽略的。

#### 4 结 论

对比中华人民共和国电力行业标准 DL/567.6-95 飞灰和炉渣可燃物测定方法 A 和方法 B 以及本文所作 TGA-FTIR 试验结果可以得到如下结论:

(1) 我国电力行业标准 DL/567.6-95 飞灰和炉渣可燃物测定方法 A 测量循环流化床锅炉的飞灰可燃物含量时,会具有很大的误差,该误差包括飞灰颗粒之间,颗粒内部吸附的水分的释放,硫酸盐分解,碳酸盐分解,矿物组分结晶水,化合水的分解释放。该方法即使作为日常锅炉运行状况的监测仍然具有很大的不可靠性。

(2) 电力行业标准 DL/567.6-95 方法 B 测量循环流化床锅炉的飞灰可燃物含量时,也具有一定的误差,该误差包括硫酸盐分解和矿物组分结晶水,

(上接第 584 页)

(4) 减少一次风空气冲刷转子份额的计算表明:在实际工作点,制粉系统的热风份额与空气预热器一次风冲刷转子的份额改变前相比有所增大(例如在空气预热器进口烟温为 340 °C 时,改变前的热风份额为 0.48,改变后降低到 0.49);改变一次风冲刷转子的份额对锅炉排烟温度的影响甚小(例如在空气预热器进口烟温为 340 °C 时,改变前后的锅炉排烟温度分别为 144 °C、145 °C)。减少一次风冲刷转子的份额对增加热风份额和降低锅炉排烟温度无明显效果。

#### 参考文献:

[1] 樊泉桂,阎维平. 锅炉原理[M]. 北京:中国电力出版社, 2004.

化合水的分解释放。对于采用石灰石脱硫的循环流化床锅炉由于飞灰中没有反应的 CaO 含量高,更容易吸附烟气中的水分,同时硫酸盐含量高,在吸附烟气中水分造成系统误差的同时,其自身的分解也会造成系统误差。所以用中华人民共和国电力行业标准 DL/567.6-95 飞灰和炉渣可燃物测定方法 B 考核循环流化床锅炉机组性能和效率的时候,更应该考虑这些因素的影响。

(3) 在 TGA-FTIR 试验的基础上,提出了 TGA 测量循环流化床锅炉飞灰碳含量的方法。该方法避免了飞灰样品中飞灰颗粒之间,颗粒内部吸附的水分的释放,硫酸盐分解,碳酸盐分解,矿物组分结晶水,化合水的分解释放所造成的系统误差,同时新产生的含碳有机质高温裂解所致的系统误差是可以忽略的,其结果更接近循环流化床锅炉飞灰碳的真实含量。

#### 参考文献:

- [1] 王福元,吴正严. 粉煤灰利用手册[M]. 北京:中国电力出版社, 1997.
- [2] JOHN P BALTRUS, RODNEY DIEHL J, YEE SOONG, et al. Triboelectrostatic separation of fly ash and charge reversal[J]. *Fuel*, 2002, 87: 757-762.
- [3] 汤达帆, COLIN HARVERY. 燃煤电厂飞灰含物质成份筛分磁选实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2000(5): 468-470.
- [4] 吕太,张墨,毕春丽,等. 循环流化床锅炉飞灰含炭量的测定方法探讨[J]. 粉煤灰综合利用, 2004(1): 17-19.
- [5] ROBERT C BROWN, JEFF DYKSTRA. Systematic errors in the use of loss-on-ignition to measure unburned carbon in fly ash[J]. *fuel*, 1995, 74: 570-574.
- [6] 刘泽常,高洪阁,王力,等. 高温条件下钙基固硫剂脱硫特性研究[J]. 煤炭转化, 1999, 22(4): 54-56.
- [7] CHIU KIN. Thermal reaction of aromatics hydrocarbon and m-cresol over calcium oxide[J]. Cambridge: Dept of Chem Eng MIT, 1986.

( 辉 编辑)

- [2] 范正傍. 采用双进双出球磨机配正压直吹式制粉系统的可行性[J]. 四川电力技术, 2003(2): 24-25, 53.
- [3] 于云忠,王继承. 670 t/h 锅炉制粉系统单耗剧增的原因及技改措施[J]. 热能动力工程, 2001, 16(6): 666-668.
- [4] 束继伟,孟繁兵,黄启龙,等. 燃用褐煤锅炉改烧烟煤时干燥剂的计算及选取[J]. 热能动力工程, 2001, 16(4): 453-456.
- [5] 赵渝渝,张学洪,范耀国,等. 420 t/h 锅炉尾部受热面磨损和汽温综合治理[J]. 热能动力工程, 2000, 15(6): 699-702.
- [6] DL/T5145-2002, 火力发电厂制粉系统设计计算技术规定[S].
- [7] DL/T466-2004 电站磨煤机及制粉系统选型导则[S].
- [8] 胡华进,徐治皋. 三分仓空气预热器传热特性的算法研究[J]. 动力工程, 1998, 18(1): 54-57, 53.
- [9] 周俊虎,杨卫娟,靳彦涛,等. 三分仓空气预热器热力计算的研究[J]. 动力工程, 2003, 23(6): 2810-2813.

( 辉 编辑)

灰色软测量在球磨机料位检测中的应用 = **A Study of the Use of Grey Soft Measurement in the Detection of Fill-up Level of Ball Mills** [刊, 汉] / SU Zhi-gang, YU Xiang-jun, LU Zhen-zhong, et al (Power Department, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2006, 21(6). — 578 ~ 581

A ball mill is one of the main equipment items in the boiler milling systems of a thermal power plant. Its good working condition will decide to a certain extent the operating efficiency of a whole power plant. A nonlinear PLS regression method is combined with grey consistency correlation theory, which is then used for performing the soft measurement of the fill-up level of ball mills. Through the monitoring of the fill-up level inside a ball mill cylinder, the rotating speed of coal feeders can be controlled so as to make the ball mills operate in their optimum condition, thereby achieving a minimal unit power consumption in the coal pulverizing process. The results of engineering applications show that the soft measurement method has a relatively high assessment accuracy and can meet relevant practical requirements. As a result, it can solve the ball mill low efficiency problem related to its long-term low-load operations made necessary by a safe and conservative working mode. **Key words:** ball mill, fill-up level, grey soft measurement, consistent correlation degree, non-linear PLS

直吹式制粉系统与空气预热器的质量能量平衡关系分析 = **An Analysis of the Mass-and-Energy Balance Relationship Between a Direct-fired System and Air Preheater** [刊, 汉] / XING De-shan, YAN Wei-ping (Education Ministry Key Laboratory on Condition Monitoring and Control of Power Plant Equipment under the Energy and Power Engineering College of North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003), ZHI Guo-jun (Engineering College under the Shanxi University, Taiyuan, China, Post Code: 030013) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2006, 21(6). — 582 ~ 584, 589

To solve the problems of an increase in cold-air share in a milling system and a rise in boiler exhaust gas temperature which are caused by a change in coal types for coal-fired boilers at a thermal power plant, the air quantity-temperature characteristic curves of the milling system and air preheater have been identified based on a thermodynamic calculation of the milling system and the three-chamber rotary air preheater. This has been realized with the positive-pressure direct-fired system and three chamber rotary air preheater of a 330 MW coal fired boiler unit at a North China large thermal power plant serving as an object of study. On the basis of the air mass balance and heat quantity balance of the milling system and air preheater, their operational points can be determined. The analysis and calculation results are in good agreement with the on-site operation conditions. Proceeding from the calculation results, an analysis and evaluation of the measures to reduce the exhaust gas temperature and cold air share has also been conducted. A reduction of flue gas temperature at the air preheater inlet can effectively lower the exhaust gas temperature but a reduction of the share of primary air sweeping across the air preheater rotor has little effect in reducing the exhaust gas temperature. **Key words:** utility boiler, direct-fired system, air preheater, mass balance, heat quantity balance

烧失量法测量循环流化床锅炉飞灰碳的系统误差 = **System Error Present When Measuring the Carbon Content of the Fly-ash of a Circulating Fluidized Bed Boiler by Using a Loss-on-ignition Method** [刊, 汉] / WANG Qi-min, WANG Yu-zhao, LU Jun-fu, et al (Thermal Energy Engineering Department of Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2006, 21(6). — 585 ~ 589

To measure the carbon content of the fly ash of a CFB boiler one still continues to adopt the loss-on-ignition method traditionally used for measuring carbon content of the fly ash of pulverized coal-fired boilers. As the mineral constituent of the fly ash of a CFB boiler is different from that of a pulverized coal-fired one, the use of the loss-on-ignition method for measuring carbon content of the fly ash of a CFB boiler may produce a certain system error. The authors have adopted the loss-on-ignition method combined with a TGA-FTIR (thermogravimetric analyzer-Fourier infrared spectrum) method to measure the carbon content of the fly ash of the CFB boiler and analyzed the system error involved in the measurement by using the loss-on-ignition method. The results of the measurements show that in case of using China National Electric Power Industry Standard DL/L567.6-95 Method B for measuring combustible matter in fly ash and slag of a CFB boiler