

电站锅炉炉内三维温度场在线检测与分析

娄 春¹, 周怀春¹, 吕传新², 裴振林²

(1. 华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉钢电股份有限公司, 湖北 武汉 430082)

摘 要: 在 1 台 670 t/h 电站锅炉上安装了 1 套三维温度场可视化监测系统, 该系统由炉膛火焰图像探测器、视频分割器及工控机等组成。通过对炉膛火焰辐射图像的处理, 采用正则化方法实现了炉膛内三维温度场(沿锅炉高度方向划分为 12 层横截面)的在线监测。检测结果表明, 由于该锅炉掺烧高炉煤气, 在沿炉膛高度方向上形成了两个燃烧高温区; 炉内平均温度与机组负荷和主汽压力的相关性较好; 通过对一次锅炉灭火事件的分析, 表明该系统在燃烧诊断方面具有重要作用。

关 键 词: 电站锅炉; 火焰辐射图像; 三维温度场; 在线监测; 燃烧诊断

中图分类号: TK31 文献标识码: A

1 引 言

大型电站锅炉炉膛内的燃烧过程是发生在较大空间范围内的、不断脉动的、具有明显三维特征的物理和化学过程, 火焰温度分布是燃料在经过高温化学反应、流动以及传热传质等过程后的综合体现。已有研究人员运用火焰图像处理技术检测出炉膛内的二维燃烧温度^[1~2]。这里所说的二维燃烧温度是火焰三维温度场在二维平面上的叠加, 它不能反映炉膛空间中某点处的温度, 在燃烧监测与分析中存在较大的局限性。浙江大学王飞等开展了电站锅炉炉内断面温度场的试验研究^[3], 但该方法只是检测了炉膛中某一高度的横截面温度分布, 还没有实现对全炉膛三维温度场的检测。

作者所在的研究小组一直致力于大型电站锅炉三维温度场可视化研究^[4~9]。目前, 所研制的炉膛三维温度场可视化在线监测系统已成功的在武汉钢电股份有限公司 2 号炉安装调试完毕, 该系统能检测沿炉膛高度方向 12 层横截面的温度分布。本文通过对该炉燃烧状况的长期监测, 给出了炉膛内的

三维温度分布特征, 以及炉内平均温度与机组运行参数的相关性, 并通过三维温度场检测结果对一次锅炉灭火事件进行了分析诊断。

2 炉膛三维温度场的检测

炉膛三维温度场可视化的基本思想是利用 CCD (电荷耦合器件) 摄像机作为二维辐射能量分布传感器, 接收三维炉膛内的高温辐射能信号, 依据辐射成像新模型建立火焰二维温度图像和三维燃烧温度的关联方程, 采用正则化重建方法获得炉膛三维温度场可视化结果^[4~6]。

武汉钢电股份有限公司 2 号炉是武汉锅炉厂生产的 670 t/h 超高压机组的发电锅炉。该炉采用四角切圆燃烧方式, 以烧煤为主, 同时掺烧高炉煤气。在该炉上安装了 1 套三维温度场可视化在线监测系统, 系统由炉膛火焰探测器、视频分割器及工控机等设备组成。系统所监视的炉膛燃烧空间是冷灰斗以上到折焰角以下的区域, 结合该炉的实际情况, 确定在标高 14 m ~ 34 m 之间, 这部分区域的炉膛尺寸为 10.8 m × 11.92 m × 20.0 m, 如图 1 所示。

如图可见, 8 只炉膛火焰探测器分 4 层安装在炉膛角上, 每层两支, 对角布置, 相邻两层交错布置, 其视场角均为斜向下 45° 俯视炉膛空间。这样的布置方式可以尽可能多的接收来自全炉膛的火焰辐射信息, 利于三维温度场的重建^[5]。炉膛火焰探测器由光学潜望镜及 CCD 摄像机组成, 由于炉内温度很高, 摄像机不能直接装于炉内摄取火焰图像, 为此专门设计光学潜望镜插入炉膛内, 其前端的耐高温镜头对炉内火焰成像, 经过潜望镜传输到摄像机靶面上。长时间运行在高温环境下, 炉膛火焰探测器必须用冷却风对光学潜望镜进行冷却吹灰。视频分割

收稿日期: 2003-12-08; 修订日期: 2004-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50176056)

作者简介: 娄 春(1977-) 男, 重庆人, 华中科技大学博士研究生

器将来自 8 个 CCD 摄像机的八路视频信号合成一路视频信号, 经过图像采集卡送入到工控机中, 在工控机中完成三维温度场的计算并给出相关燃烧的信息。

方程, 文献[5] 具体描述了正则化方法, 并给出了算例。

3 检测结果及分析

本系统的软件运行界面如图 2 所示。软件系统给出了实时拍摄的火焰图像, 从火焰图像中可以看出, 燃烧器区域的火焰图像较亮, 安装在最上层的两个探头所拍摄的炉膛上部的火焰图像较暗。软件中, 用伪彩色云图表示温度分布, 通过鼠标可以选择显示任意横截面和纵截面的温度分布。图 2 中给出了炉膛三维温度场中第二层、第五层、第八层和第十一层(沿坐标 k 方向, 即炉膛高度自下而上的方向)的横截面温度分布。

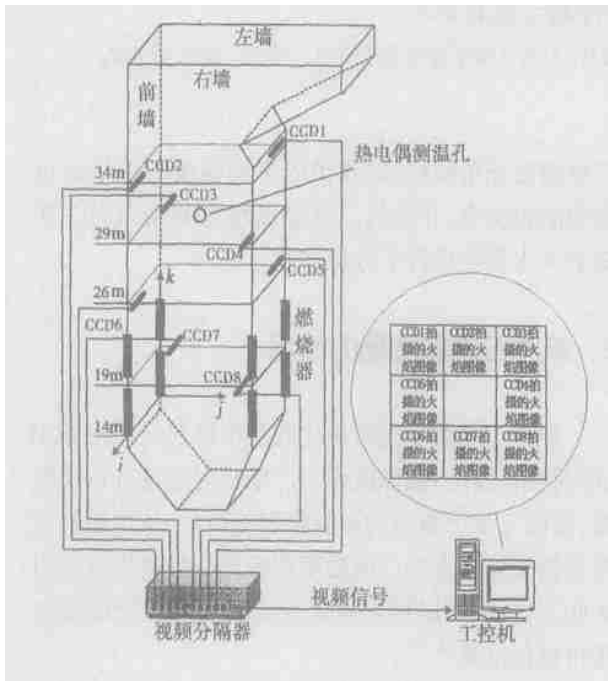


图 1 炉膛及系统结构示意图

三维炉膛空间可以视为 1 个由灰色固体壁面及所包围的灰色介质构成的灰色系统, 把炉膛内的空间区域沿 i (炉宽), j (炉深), k (炉高) 3 个坐标方向划分为 $10 \times 10 \times 12 = 1200$ 个网格, 系统要计算出这 1200 个网格的温度值; 用工业 CCD 摄像机获取炉膛内的辐射图像信息, 每个 CCD 靶面像素单元为 $30 \times 30 = 900$ 个, 8 个 CCD 共有 7200 个像素单元。根据文献[6], 辐射成像新模型建立了火焰二维温度图像 T_{CCD} (其分量为火焰温度图像的四次方) 和炉膛内三维温度分布 T (其分量为炉内火焰温度的四次方) 之间的定量关系, 有:

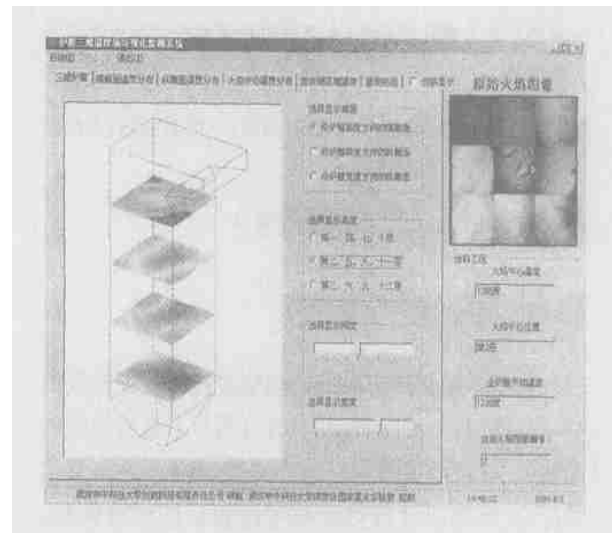


图 2 监视系统运行界面

得到了全炉膛三维温度分布后, 为了便于更好的分析炉内的燃烧状况, 定义了 3 个特征参数: 全炉膛平均温度; 燃烧器出口区域温度; 沿炉膛高度方向的火焰中心温度分布。

系统对炉内的三维温度分布进行了长时间的检测, 结果表明: 位于燃烧器中最下层高炉煤气燃烧器区域, 由于高炉煤气优先与氧气结合, 充分燃烧释放大量热量, 形成第一个高温区, 高温区呈单峰分布形状; 在炉膛中部最上层燃烧器之上, 由于燃烧器喷出的煤粉得到充分燃烧, 释放出大量热量, 形成了另一个高温区, 由于炉内燃烧状况和燃烧组织方式不是很好, 高温区并没有在炉膛横截面几何中心。图 3 给出了沿炉膛高度 12 层横截面的火焰中心的温度。其中第一到第五层均为燃烧器区域。从图中可以清

这里, 矩阵 A' 的元素 $\alpha'(i, j)$ 由第 i 个网格单元发出的辐射被第 j 个 CCD 像素单元接收到的份额所决定, 主要通过 READ 数计算而来, 详见文献[5]。

通过文献[6] 提出的火焰二维温度图像的计算方法从火焰辐射图像中计算出 T_{CCD} , 为了测量到准确的温度, 火焰温度图像的计算要经过黑体炉标定, 具体标定方法见文献[7]。式(1)是一个病态的线性方程组, 用正则化方法可以有效的求解这种类型的

楚的看到沿高度方向形成的两个高温区。一个高温区是位于炉膛中部的第六层和第七层; 另一个高温区是位于燃烧器区域的第一层和第二层。

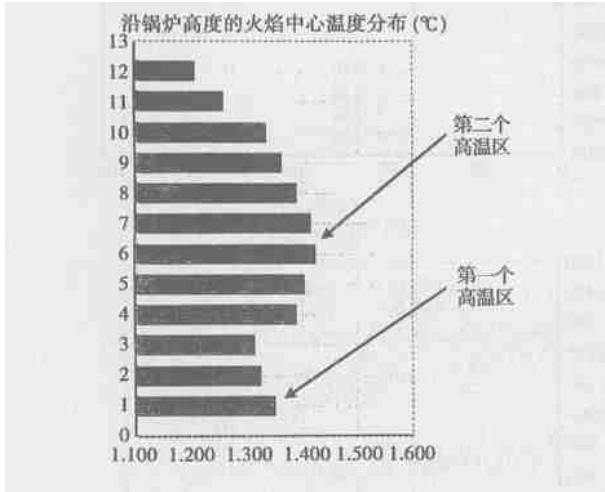


图 3 沿炉膛高度方向的火焰中心温度分布

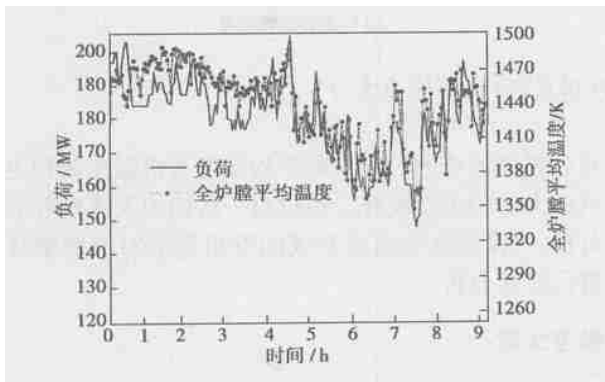


图 4 全炉膛平均温度与机组负荷

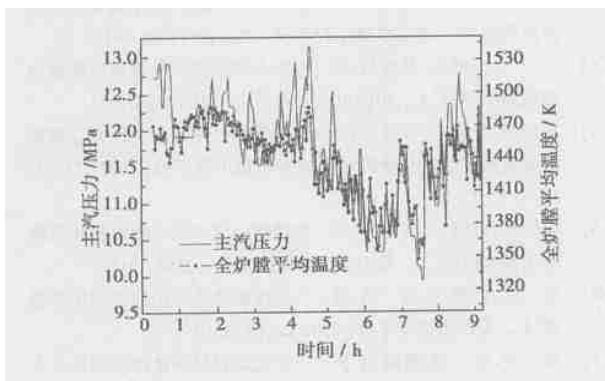


图 5 全炉膛平均温度与主汽压力

冷枪热电偶测温结果做了比较, 文献[8]给出了比较结果, 两者误差在 5% 之内, 满足工业应用的需要。三维温度场刷新时间保持在 5 s 之内, 满足在线测量的要求。

为了分析炉膛温度与机组参数的关系, 在机组 DCS 系统中对机组负荷、主汽压力和全炉膛平均温度进行了长时间的采集和记录。现从中选取燃料类型不变时, 机组正常运行 9 h 的历史数据, 如图 4 和图 5 所示。从图中可以看出, 火焰平均温度与机组负荷、主汽压力随时间变化的趋势是一致的。

4 锅炉灭火事件分析

锅炉的灭火事件对于机组的安全性及经济性有着极大的危害。本系统投入运行前, 2 号炉的运行人员对燃烧的监控仅根据锅炉 FSSS 系统、锅炉的氧量变化和炉膛的火焰电视等, 有时还要靠人工到现场的每个看火孔观察, 对于燃烧事故也是通过以上手段进行分析诊断, 由于所得到的燃烧信息不够全面, 得出的结论没有完全的说服力。

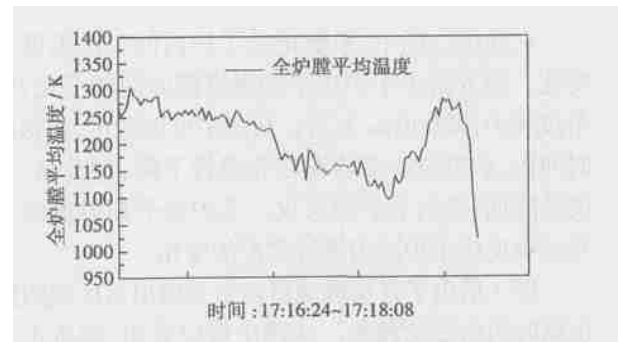


图 6 灭火阶段全炉膛平均温度(时间间隔 1 s)

三维温度场监测系统投入运行后, 其记录的历史数据可以帮助运行人员进行事故分析, 预防事故的发生。以一次锅炉灭火事件为例, 事件的直接原因是司炉工违规操作给粉机引起的。操作过程及 FSSS 系统记录的结果如下: 从 17:16:24~17:16:45 停 13 号、14 号、15 号和 16 号给粉机(第四层燃烧器的 4 台给粉机), 火检显示这 4 个燃烧器熄火; 随后炉膛氧量涨至 6.84%; 从 17:16:33~17:16:52 投 13 号、14 号和 15 号给粉机, 又投入 2 号角、3 号角油枪; 17:17:33 氧量降至 5.15%; 17:17:39 氧量迅速涨至 10.31%; 17:18:08 炉膛压力过高 MFT(主燃料跳闸), 期间锅炉 MFT 氧量未下降。

三维温度场检测方法经过国家标准计量设备——黑体炉标定后, 具有较高的测量精度, 为了检验三维温度场可视化结果, 我们把系统检测结果与水

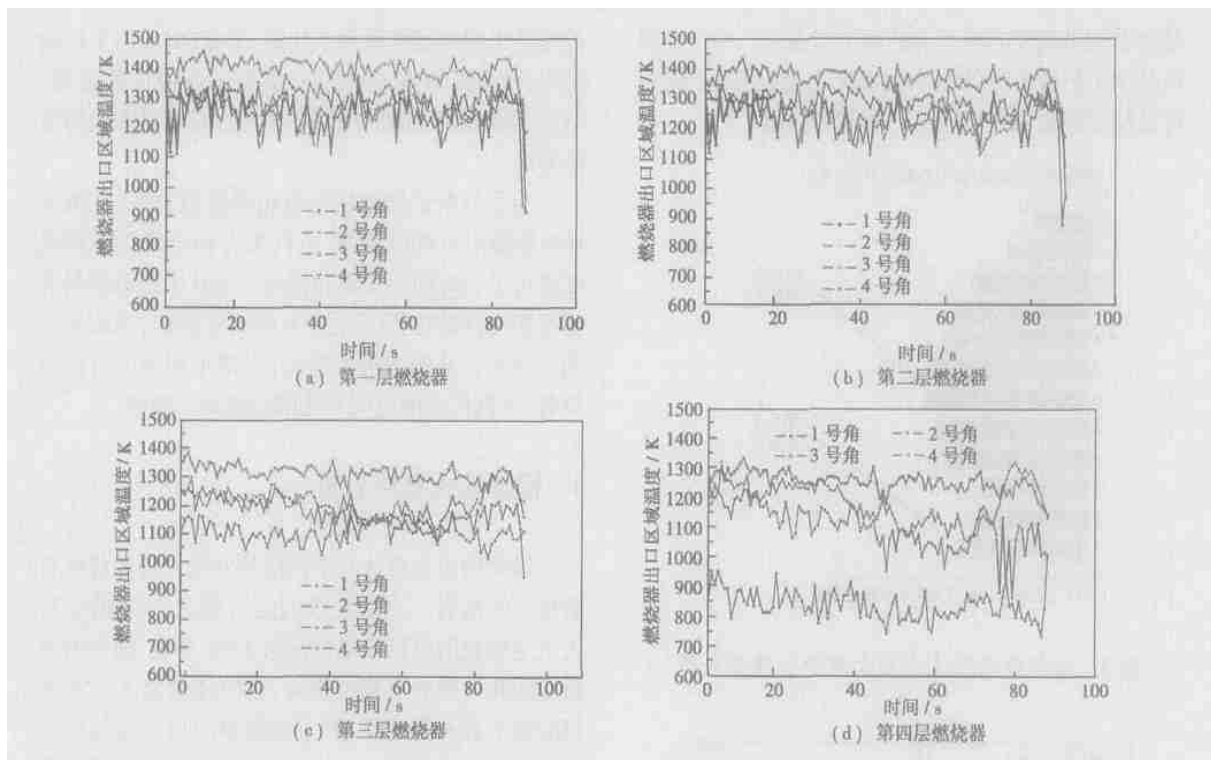


图 7 灭火前各层燃烧器出口温度(时间间隔为 5 s)

在这段过程中,系统记录了炉内的三维温度场变化。图 6 给出了炉内平均温度随时间的变化,整个过程为持续 104 s 左右。从图中可以看出,在这段时间内,炉膛内的平均温度先缓慢下降,再升高,再突然降低,直到全炉膛灭火。全炉膛平均温度的变化正确反应了炉膛内燃烧状况的变化。

图 7 给出了各层燃烧器四角火嘴出口区域的温度随时间的变化趋势。从图中可以看出,保持正常给粉配风的下组燃烧器(第一层、第二层燃烧器)的出口区域温度,一直处于较为稳定的状态。主要是第四层燃烧器出口区域的温度不稳定,尤其是 2 号角和 3 号角的火嘴。事后,经电厂人员检查,这两号角火嘴有故障,煤粉的着火性能不好,也是引起全炉膛灭火的原因之一。

5 结 论

在 1 台 670 t/h 锅炉上进行了炉膛三维温度场可视化监测及燃烧分析,检测结果表明:由于掺烧高炉煤气,沿炉膛高度方向形成两个燃烧高温区,一个位于第一层,由高炉煤气充分燃烧形成;另一个高温区位于燃烧器区域之上,在第七层和第八层,由煤粉

充分燃烧形成的。全炉膛平均温度与机组负荷和主汽压力的相关性较好。通过对一次锅炉灭火事件的分析,三维温度场监测系统能够很好的对燃烧事故进行诊断分析。

参 考 文 献:

- [1] 周怀春, 姜新生, 肖教芳, 等. 炉膛火焰温度场图像处理试验研究[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(5): 295-300.
- [2] 薛 飞, 李晓东, 倪明江, 等. 基于面阵 CCD 的火焰温度场测量方法研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(1): 39-41.
- [3] 王 飞, 卫成业, 马增益, 等. 根据火焰图像测量煤粉炉横截面温度场的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000(7): 40-43.
- [4] 周怀春, 姜新生, 邓元凯, 等. 基于图像处理的炉膛燃烧三维温度分布检测原理和分析[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(1): 1-4.
- [5] 周怀春, 韩曙东, 盛 峰, 等. 炉膛燃烧温度场三维可视化监测方法模拟研究[J]. 动力工程, 2003, 23(1): 2154-2159.
- [6] 姜 春, 韩曙东, 刘 浩, 等. 一种煤粉燃烧火焰辐射成像新模型[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(增刊): 93-96.
- [7] 贾 涛, 程 强, 韩曙东, 等. 一种火焰辐射图像探头的标定方法[J]. 热力发电, 2002, 29(5): 23-25.
- [8] 曾 佳, 姜 春, 程 强, 等. 大型电站锅炉炉内三维燃烧温度场可视化实验研究[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(3): 523-526.

law governing the influence of various parameters on the system performance. The above results can provide a theoretical basis for the optimized design and the selection of optimized operating conditions for a combined heat and electric power (cooling) system. **Key words:** finite-time thermodynamics, combined heat and electric power (cooling) system, parameter optimization, configuration optimization

300 MW 机组锅炉汽包寿命在线监测系统的研究 = **The Study of an On-line Monitoring System for the Service Life of the Steam-drum of a 300 MW Power Plant** [刊, 汉] / GUAN De-qing, MO Jiang-chun, LI Li, et al (College of Energy and Power Engineering under the Changsha University of Science & Technology, Changsha, China, Post Code: 410076) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(1). — 57 ~ 60

By using a three-dimensional finite element theory a finite element analysis was conducted of the stress field of a 300 MW power plant boiler-drum under the action of an internal pressure. The theoretical stress concentration factor thus obtained is greater than the recommended value of TRD 301 by 17.3%. The thermal stress of the boiler drum under a quasi-steady state was calculated by using the theory of thermal elasticity. On this basis a proposal was put forward to improve the TRD301-based method for calculating fatigue life and an on-line monitoring system for the service life of a 300 MW plant boiler-drum developed. By utilizing a computerized and intelligent data acquisition system and communications data conversion the management of temperature, pressure and service life was implemented for the whole process of the boiler drum operation. The use of the monitoring system on a 1021 t/h boiler at a power station has attested to the effectiveness of the system, which has attained the aim of on-line monitoring of boiler drum life and of properly guiding the boiler operation. **Key words:** boiler drum, fatigue life, on-line monitoring system

电站锅炉炉内三维温度场在线检测与分析 = **On-line Detection and Analysis of the Three-dimensional Temperature Field in a Utility Boiler** [刊, 汉] / LOU Chun, ZHOU Huai-chun (National Key Laboratory on Coal Combustion under Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074), LU Chuan-xin, PEI Zhen-lin (Wuhan Steel and Electric Power Co. Ltd., Wuhan, China, Post Code: 430082) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(1). — 61 ~ 64

A set of visual monitoring system for three-dimensional temperature fields was installed on a 670 t/h utility boiler. The system comprises several image detectors of furnace flame, a video-frequency slicer and an industrial control device, etc. Through the radiation image treatment of furnace flame and by adopting a regularization method an on-line monitoring was implemented for the in-furnace three-dimensional temperature field (12 layers of cross-section divided along the boiler height direction). The results of the detection indicate that due to the supplementary burning of blast-furnace gas two high-temperature combustion zones have been formed along the furnace height direction. In-furnace average temperature correlates relatively well with boiler load and main steam pressure. Through the analysis of a boiler flame-extinction incident it can be shown that the monitoring system plays an important role in combustion diagnosis. **Key words:** utility boiler, flame radiation image, three-dimensional temperature field, on-line monitoring, combustion diagnosis

MPS 磨煤机工作特性试验研究 = **Experimental Investigation of the Operating Characteristics of a MPS Coal Pulverizer** [刊, 汉] / YUE Jun-feng, HUANG Lei, CHEN Hua-gui (Technical Center of Jiangsu Provincial Electric Power Co., Nanjing, China, Post Code: 210036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(1). — 65 ~ 68

By using a zero-pressure pendulum sampler and an isokinetic sampling method the samples of pulverized coal were taken at the outlet piping of a MPS coal pulverizer. Through an analysis of the fineness, moisture content and mass of the pul-