

# 基于声学测温的电站锅炉水冷壁局部灰污监测研究

张世平 沈国清 安连锁 牛玉广

(华北电力大学 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室 北京 102206)

**摘 要:** 针对锅炉水冷壁局部灰污监测这一难点问题, 引入了新的清洁因子, 将此问题转化为声学测温问题。开发研制了水冷壁局部灰污在线监测系统, 并在国内某 300 MW 锅炉上进行了试验研究, 取得了水冷壁贴壁声线上的烟气温度, 重建了锅炉炉膛截面温度场。研究表明: 新的清洁因子可以用来监测水冷壁局部灰污状况; 由于声波弯曲效应, 测得的贴壁声线的平均烟气温度比水冷壁向火测温度高 130 °C 左右, 贴壁烟温的变化可以用其来代表水冷壁壁温的变化; 重建的温度场可以实时准确地观测火焰中心在炉内的移动; 为锅炉灰污监测和智能吹灰提供重要的参考。

**关 键 词:** 水冷壁; 清洁因子; 灰污监测; 声学测温; 火焰中心

中图分类号: TK224.9

文献标识码: A

## 引 言

电站锅炉在运行过程中, 经常会出现受热面的积灰、结渣等现象。炉膛结渣会影响锅炉的正常运行, 使排烟温度升高, 危及锅炉的安全和经济运行, 甚至导致重大的人身和设备事故<sup>[1]</sup>。电站锅炉以往的吹灰模式多是根据设计煤种和负荷情况进行定期吹灰, 这种吹灰方式存在自身的缺陷, 吹灰不足, 将会导致受热面换热效率低, 影响锅炉的效率; 但是吹灰如果过于频繁, 将会消耗大量的能量, 还会由于腐蚀和热应力对锅炉受热面造成损害, 频繁的吹灰还使得装置的维修费用增加<sup>[2]</sup>。因此, 研究和开发在线结渣积灰状况监测诊断技术, 防止发生严重结渣积灰, 指导吹灰是十分必要的。声学技术以其自身的优势越来越受到国内外的重视, 本研究将声学技术引入炉膛灰污监测中, 开发了局部水冷壁灰污监测系统, 实现实时的灰污监测, 为将来按需吹灰提供了重要参考。

收稿日期: 2012 - 11 - 28; 修订日期: 2013 - 03 - 06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目: 热力发电系统节能与优化控制基础研究(51036002); 科技支撑计划课题: 大型电站燃煤锅炉燃烧在线优化节能减排技术(2011BAA04B01)

作者简介: 张世平(1983 -), 男, 北京人, 华北电力大学博士后。

## 1 基于声学测温的水冷壁局部灰污监测法

针对水冷壁, 目前应用的灰污监测方法主要有:

(1) 炉膛出口烟温诊断(炉膛出口烟温是由锅炉热平衡推断而来); (2) 采用热流计作为诊断传感器<sup>[3]</sup>; (3) 采用照相或摄像和图像处理技术直接诊断观察。

声波在烟气中传播, 根据平面波的运动方程、波动方程以及气体状态方程可以推导出声波传播速度与温度的关系式<sup>[4]</sup>:

$$c = \frac{L}{\tau} = \sqrt{\frac{\gamma R}{m}(t + 273.15)} \\ = Z \sqrt{(t + 273.15)} \quad (1)$$

式中:  $\tau$ —声波飞渡时间, s;  $L$ —测点距离, m;  $c$ —介质中声波的传播速度, m/s;  $R$ —理想气体普适常数, J/(mol · K);  $t$ —气体温度, °C;  $\gamma$ —气体的绝热指数(定压比热容与定容比热容之比);  $m$ —气体摩尔质量, g/mol。

对于炉膛烟气,  $Z = \sqrt{\gamma R/m}$  为一常数, 由式(1)得出路径温度计算式:

$$t = (L/\tau Z)^2 - 273.15 \quad (2)$$

在每侧炉壁上安装 2 个声波收发器, 这 8 个声波收发器形成 24 条声波测量路径。按设定的程序, 在一个检测周期内, 顺序启闭各个声波收发器, 通过测量声波沿每一条声波路径的飞渡时间, 得到若干组声波飞渡时间值, 通过重建算法就可以建立这个平面上的二维温度分布图, 算出整个平面的温度。

在声学测温研究的基础上, 引入清洁因子 & 概念, 令:

$$\& = (T - T'_p) / (T - T_p) = (1 - T'_p/T) / (1 -$$

$$T_p/T \tag{3}$$

式中:  $T_p$ —水冷壁局部积灰或结渣后声学监测的贴壁声线上烟气平均温度, K;  $T$ —声学监测的整个平面平均温度, K;  $T_p$ —水冷壁洁净时声学监测的贴壁声线上烟气平均温度, K。水冷壁受热面清洁时,  $\alpha$  趋近于 1, 当出现灰污时, 管壁温度升高, 贴壁烟气平均温度接近甚至超过炉膛平均烟温, 分子变小, 结渣严重时,  $\alpha$  越接近于零或者为负。可见, 实现基于声学水冷壁灰污在线监测实质上就是实现水冷壁贴壁的烟气温度监测和截面温度场重建。

### 2 系统开发

水冷壁局部灰污监测系统包括硬件系统和软件系统。硬件系统主要包括: 声波导管、特制驻极体式传声器、特质陶瓷可插入式 K 型热电偶、扬声器、信号调理器、功率放大器、数据采集卡、若干端子板、主机、显示器以及电缆若干。软件系统利用“模块化”的编程思想, 分为参数设置模块、数据采集模块、示波模块、声波发射控制模块、滤波模块、声波飞渡时间计算模块、温度场可视化模块、灰污实时监测模块、热电偶标定控制模块、历史数据显示及存取模块。主机中软件系统发出数字声波信号, 经过声卡转换为模拟信号后, 通过功率放大器放大输出至扬声器, 经过声波导管发出。声波信号发出后, 被传声器接收, 传声器将到达的声波信号转换为电压信号, 经过信号调理器放大后, 被主机中的数据采集卡采集, 所采数据被主机上的监测系统软件调用。

### 3 试验研究

试验锅炉型号为 DG1028/18.2 - II6 亚临界参数自然循环汽包炉, 单炉膛  $\pi$  型布置, 四角切圆燃烧方式。燃用烟煤, 一次中间再热, 平衡通风、固态排渣, 全钢架、全悬吊结构, 运转层(标高 12.6 m) 以下全封闭, 炉顶带金属防雨罩。34.5 m 锅炉平台上布置测点, 如图 1 所示。测点从左墙开始, 按顺时针方向进行编号, 分别为  $S_1 \sim S_8$ 。定义对应的数据采集通道为通道 1 ~ 通道 8。每次只有一个扬声器发射声波信号, 当  $S_1$  号扬声器发射声波信号时, 用 1 号位的传声器接收的信号与其它 7 个编号的传声器采集的数据进行飞渡时间测量, 对应得到了左墙  $S_1$  到

$S_2$  之间水冷壁贴壁单路径和其它 6 条路径的烟气温度,  $S_1 \sim S_8$  扬声器依次发射声波信号, 组成一个测量周期, 这样就得到了重建温度场所需的整个炉内 24 条路径温度及壁面传声器之间 4 条贴壁烟气温度, 通过重建算法得到整个平面温度分布。

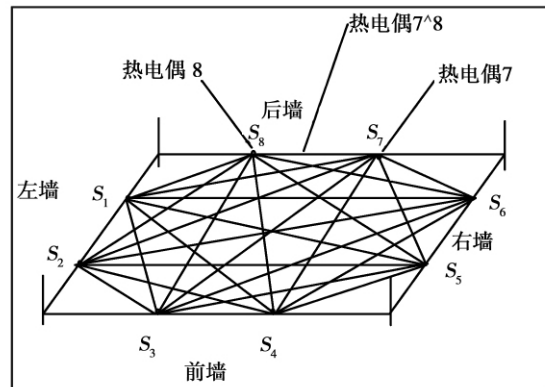


图 1 声学测点布置

Fig. 1 Arrangement of the acoustic measuring points

表 1 给出了冷态标定炉内 24 条路径长度。系统引入清洁因子, 进行水冷壁灰污监测, 通过重建的二维温度场来判定火焰中心是否偏移。为了避免误报, 每个测点及同一壁面两测点中间装有自制可插入式陶瓷 K 型热电偶, 积灰报警时自动插入, 对水冷壁向火测温度进行标定。

表 1 冷态标定路径长度 (m)

Tab. 1 Cold-state calibration path length (m)

路径	长度	路径	长度
$S_1 - S_3$	11.231	$S_3 - S_5$	12.501
$S_1 - S_4$	16.037	$S_3 - S_6$	16.111
$S_1 - S_5$	16.886	$S_3 - S_7$	16.670
$S_1 - S_6$	15.251	$S_3 - S_8$	14.251
$S_1 - S_7$	12.404	$S_4 - S_5$	4.845
$S_1 - S_8$	4.776	$S_4 - S_6$	11.261
$S_2 - S_3$	4.776	$S_4 - S_7$	14.251
$S_2 - S_4$	12.404	$S_4 - S_8$	16.671
$S_2 - S_5$	15.250	$S_5 - S_7$	11.261
$S_2 - S_6$	16.886	$S_5 - S_8$	16.111
$S_2 - S_7$	16.037	$S_6 - S_7$	4.845
$S_2 - S_8$	11.231	$S_6 - S_8$	12.501

#### 3.1 炉膛背景噪声分析

锅炉热态运行时的背景噪声主要由炉膛内的燃

烧噪声、燃烧器的射流噪声、烟气横掠管束的风吹声以及其它机械噪声组成。不同容量、不同负荷、不同时刻下运行的锅炉都可能使得背景噪声发生变化。利用安装在锅炉炉膛上的声学测点,对不同时刻、不同负荷炉膛噪声的频率特性、概率分布等方面进行了研究。设定采样频率为 102 400 Hz,图 2(a)给出了 230 MW 负荷下通道 4 采集到背景噪声的功率谱密度图。可以明显看出,炉膛背景噪声中心频率在 500 Hz 以下的低频段,对其它时刻的噪声进行分析,也具有这一特点,总声压级范围在 110 ~ 120 dB 之间。通过 MATLAB 软件平台对燃烧噪声的概率分布特性进行分析,噪声的概率分布近似于高斯分布,其概率密度分布如图 2(b) 所示。

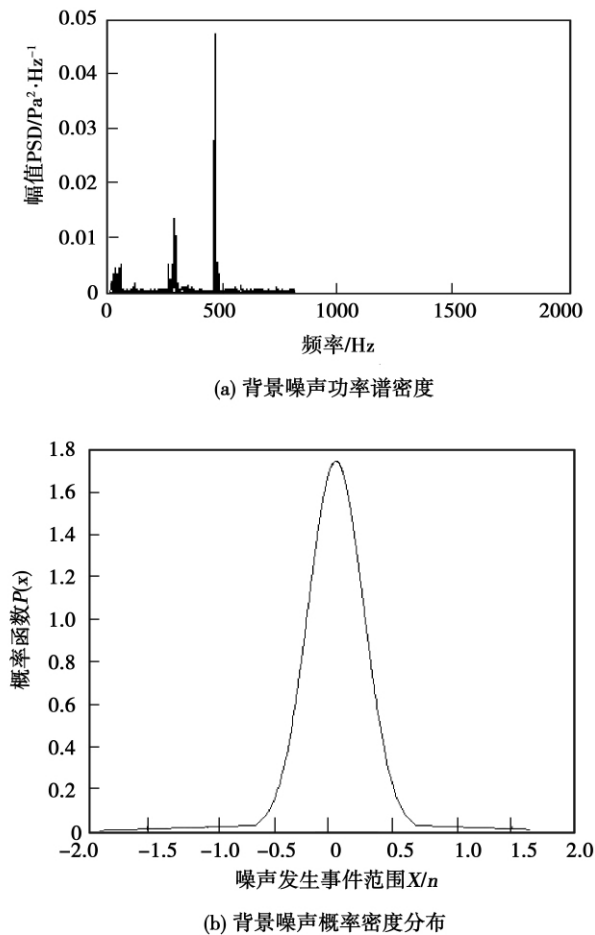


图 2 炉膛热态背景噪声

Fig. 2 Hot-state background noise in the furnace

### 3.2 声源信号选择及声波飞渡时间的测量

燃烧噪声的特性直接决定了声波信号的处理方法的采用,而声波信号的处理方法直接决定了声波

信号的发生形式。伪随机序列信号可以作为声波测温的声源信号<sup>[5]</sup>,伪随机序列是一种周期序列,具有均衡性、游离分布性以及随机性,还具有双值自相关函数特性。对采用伪随机序列中采用最多的  $m$  序列进行研究,由线性反馈移位寄存器生成。伪随机序列信号的频带过于宽大,信号处理的方法可采用傅里叶变换将时域信号转换到频率域,去除不再所需的频率成份,然后进行傅里叶逆变换。通过大量试验验证,最终采用的伪随机信号频带范围为 500 ~ 3 000 Hz。

声波飞渡时间的精确测量是实现炉膛温度场重建的关键,其测量精度将直接影响到温度场重建的准确性,采用广义互相关时延估计法。

两通道的信号模型为<sup>[6]</sup>:

$$x_1(n) = s(n) + n_1(n) \quad (4)$$

$$x_2(n) = As(n - D) + n_2(n) \quad (5)$$

式中:  $s(n)$  —信号函数;  $n_1(n)$  和  $n_2(n)$  —噪声函数;  $D$  —两通道间的时间延迟;  $s$ ;  $A$  —衰减系数。

间接法互相关函数为:

$$R_{12}(\tau) = F^{-1}[\psi_{12}F(x_1)^*F(x_2)] \quad (6)$$

式中:  $\psi_{12}$  —频域处理的加权函数;  $F$  —傅立叶变换;  $F^{-1}$  —傅立叶逆变换;  $*$  —共轭。

采用间接法求互相关函数,引入系数  $\beta$  加权函数为:

$$\psi(f) = 1/|G_{x_1x_2}(f)|^\beta \quad (7)$$

加权后的互相关函数为:

$$R_{12}(\tau) = F^{-1}\left[\frac{1}{|F(x_1)^*F(x_2)|^\beta}F(x_1)^*F(x_2)\right] \quad (8)$$

前置滤波采用小波滤波法,由于篇幅有限,基于小波变换的广义互相关时延估计法将在其它文献里论述。

### 3.3 水冷壁贴壁声线上烟气温度监测

以后墙 7 点和 8 点为例,测量水冷壁贴壁声线上的烟气平均温度。标定测点 7 和 8 之间距离为 9.577 m,7 点所在扬声器发出声波信号后,布置在 7 点和 8 点的传声器接收。由于壁面附近温度梯度的存在,声线会朝着炉膛中心方向呈弓形弯曲<sup>[7]</sup>,通过仿真得知,相对于炉膛巨大空间来说,其弯曲程度相对较小,得到的温度变化基本上可以反应水冷壁向火测壁温的变化。

图 3 给出了互相关图,横轴为互相关点数,纵轴



果火焰中心未偏移,系统自动从数据库调入相同负荷下清洁时烟温数据,判断其清洁因子大小。为了避免误报,当水冷壁出现积灰结焦时,测点处的热电偶会自动深入至水冷壁向火测进行验证,实现水冷壁灰污在线监测。

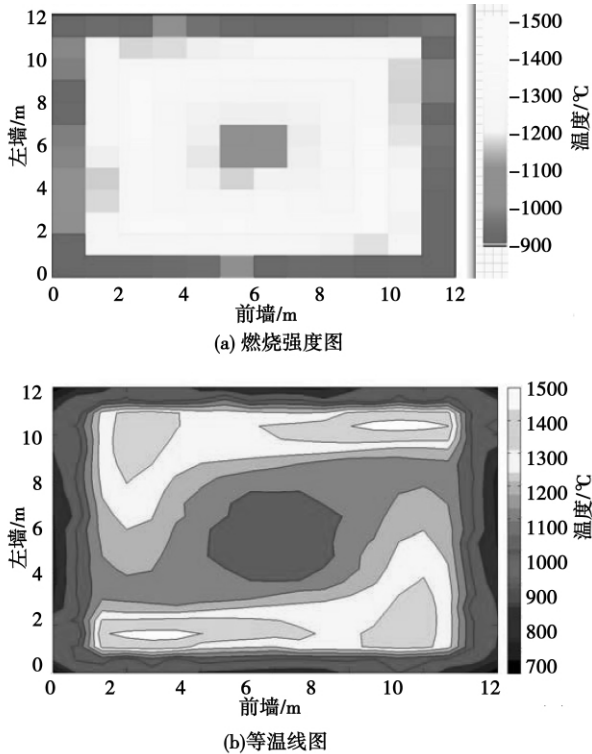


图 4 二维温度场重建

Fig. 4 Reconstruction of the 2 - dimensional temperature field

表 2 烟气温度值(℃)

Tab. 2 Flue gas temperature values (℃)

	测量次数				
	1	2	3	4	5
左墙 S <sub>1</sub> - S <sub>2</sub> 贴壁烟温	689.35	705.46	719.23	698.47	687.39
前墙 S <sub>3</sub> - S <sub>4</sub> 贴壁烟温	701.54	701.54	708.57	673.48	699.56
右墙 S <sub>5</sub> - S <sub>6</sub> 贴壁烟温	699.47	707.37	717.57	699.58	701.98
后墙 S <sub>7</sub> - S <sub>8</sub> 贴壁烟温	706.58	708.78	715.76	687.89	709.58
截面平均烟温	1 201.47	1 217.56	1 236.87	1 198.97	1 203.58
	测量次数				
	6	7	8	9	10
左墙 S <sub>1</sub> - S <sub>2</sub> 贴壁烟温	687.57	698.99	704.5	689.27	699.53
前墙 S <sub>3</sub> - S <sub>4</sub> 贴壁烟温	678.48	701.23	714.87	679.05	699.98
右墙 S <sub>5</sub> - S <sub>6</sub> 贴壁烟温	698.45	701.56	718.99	699.03	699.99
后墙 S <sub>7</sub> - S <sub>8</sub> 贴壁烟温	701.51	708.79	713.56	701.12	708.53
截面平均烟温	1 199.78	1 203.45	1 217.98	1 199.57	1 201.56

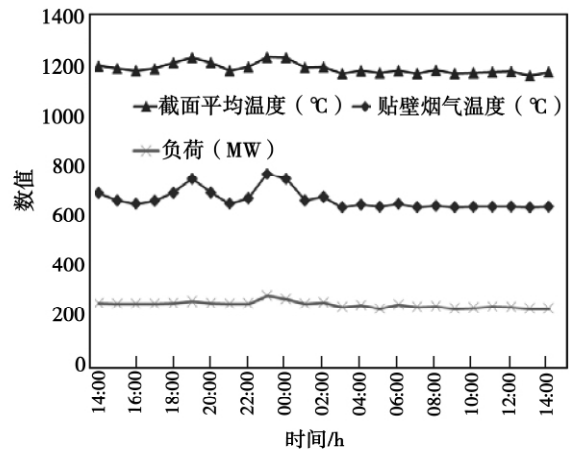


图 5 截面平均温度、贴壁烟气温度和锅炉负荷曲线图

Fig. 5 Curves of the cross section average temperature ,wall surface flue gas temperature and boiler loads

## 4 结 论

(1) 将声学测温运用到炉膛水冷壁局部灰污监测之上,定义新的清洁因子,实现局部在线监测,无需从传统的尾部烟温进行复杂的逆烟气流计算,不受锅炉负荷、燃烧器摆角、炉膛过量空气系数等参数变动的影晌;

(2) 成功取得水冷壁贴壁声线上的平均温度,但是锅炉热态运行时,水冷壁附近存在温度梯度,此时声线将朝炉内发生弓形弯曲,使得声学测量水冷壁壁面温度比热电偶测得温度高出 130℃左右,其温度变化与锅炉负荷变化曲线相吻合,可以用来反映水冷壁向火测壁温的变化情况;

(3) 采用基于平面像素分割加入正则化的重建算法,成功重建四角切圆锅炉炉膛截面温度场,实时准确的观测到火焰中心在炉内的移动,判断火焰中心是否偏移,预防了由于不平衡燃烧造成的局部高温引起的结焦;

(4) 建议在锅炉设计时增加测点,可以实现多位置的在线监测,也可以增加重建算法精度。

## 参考文献:

[1] 阎维平,梁秀俊,周健,等. 300 MW 燃煤电厂锅炉积灰结渣计算机在线监测与优化吹灰[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 84 - 87.  
YAN Wei-ping, LIANG Xiu-jun, ZHOU Jian, et al. Computer-based on-line monitoring and soot blowing optimization of the ash

accumulation and slagging in a 300 MW coal-fired utility boiler [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2000 , 20(9) : 84 - 87.

[2] 张志正, 孙保民, 郭永红, 等. 超(超)临界压力锅炉膜式水冷壁危险点壁温在线监测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3) : 103 - 134.  
ZHANG Zhi-zheng, SUN Bao-min, GUO Yong-hong, et al. Research of the method for on-line monitoring the wall surface temperature at dangerous points of the membrane type water walls of an ultra-supercritical pressure boiler [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2005 25(3) : 103 - 134.

[3] 兰泽全, 曹欣玉, 赵显桥, 等. 一种灰污热流探针的研制及应用[J]. 中国电机工程学报 2004 24(5) : 216 - 219.  
LAN Ze-quan, CAO Xin-yu, ZHAO Xian-qiao, et al. Development and application of a ash and foul heat flux probe [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2004, 24 ( 5 ) : 216 - 219.

[4] 张晓东, 高波, 宋之平. 互相关函数法在声学测温技术中的应用研究[J]. 中国电机工程学报 2003 23(4) : 185 - 188.  
ZHANG Xiao-dong, GAO Bo, SONG Zhi-ping. Research of applications of the correlation function method in the acoustic temperature measurement technology [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2003 23(4) : 185 - 188.

[5] 罗振. 炉膛燃烧噪声环境下声波飞行时间测量方法研究[D]. 沈阳: 沈阳航空工业学院, 2006.

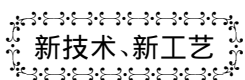
LUO Zhen. Study of the method for measuring the sound wave flight time duration in the environment of the combustion noise in a furnace [D]. Shenyang: Shenyang College of Aeronautics 2006.

[6] 沈国清, 安连锁, 姜根山, 等. 电站锅炉声学测温中时间延迟估计的仿真研究[J]. 中国电机工程学报 2007 27(11) : 57 - 61.  
SHEN Guo-qing, AN Lian-suo, JIANG Gen-shan, et al. Study of the simulation of the time delay estimation in the acoustic pyrometry in a utility boiler[J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2007 27(11) : 57 - 61.

[7] 姜根山, 安连锁, 杨昆. 温度梯度场中声线传播路径数值研究[J]. 中国电机工程学报 2004 24(10) : 210 - 214.  
JIANG Gen-shan, AN Lian-suo, YANG Kun. Numerical study of the propagation paths of the sound ray in a temperature gradient field [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2004 24(10) : 210 - 214.

[8] 田丰, 孙小平, 邵富群, 等. 基于高斯函数与正则化法的复杂温度场图像重建算法研究[J]. 中国电机工程学报 2004 24(5) : 212 - 220.  
TIAN Feng, SUN Xiao-ping, SHAO Fu-qun, et al. Study of the algorithm for rebuilding the images of a complex temperature field based on Gaussian function and the normalization method[J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2004 24(5) : 212 - 215.

( 陈 滨 编辑)



### 燃气轮机简单循环技术规范

《Gas Turbine World》2013 年 1 - 2 月刊发布了 2013 年度的燃气轮机简单循环技术规范。

介绍了世界各国各燃机制造公司的各型燃气轮机产品, 叙述了各型燃气轮机的设计性能规范, 包括首台可供应用年份、ISO 条件下基本负荷额定功率、热耗率、效率、压气机压比、流量、涡轮转速、排气温度、以及燃气轮机的重量和尺寸。

在注解一栏中还对这些燃机是否使用双燃料燃烧器、干式低排放、喷水、标准燃烧室、NO<sub>x</sub> 排放、蒸汽因注、燃料和双燃料、回热器等情况作了补充说明。

2011 年推出的新机组包括功率 5 100 kW 和效率 31.0% 的 UGT5000、功率 7 900 kW 和效率 31.0% 的 CX300、功率 12 900 kW 和效率 34.8% 的 CX400、功率 18 100 kW 和效率 34.4% 的 LM1800e、功率 51 504 kW 和效率 42.1% 的 Trent 60 DLE、功率 64 000 kW 和效率 41.2% 的 Trent 60 WLE ISI、功率 230 700 kW 和效率 40.0% 的 GT24、功率 326 000 kW 和效率 40.3% 的 GT26、功率 327 000 kW 和效率 41.0% 的 M501J 以及 339 366 kW 和效率 39.9% 的 9F7-series。

( 吉桂明 摘译)

to simulate the discharging process of powder in a bunker and in the meanwhile ,the quartz sand discharging flow pattern observed from the test rig set up independently was utilized to verify the correctness of the simulation. The model was also utilized to study the law governing the influence of the cone angle ,discharging diameter and height of the bunker on the discharging time and flow pattern ,therefore ,the foregoing can offer certain guidance for design of bunkers in practical production. **Key words:** super concentrated powder ,bunker ,flow characteristics ,numerical simulation

基于声学测温的电站锅炉水冷壁局部灰污监测研究 = **Study of the Monitoring of the Local Ash Fouling on the Water Walls of a Utility Boiler Based on the Acoustic Pyrometry** [刊 ,汉]ZHANG Shi-ping ,SHEN Guo-qing ,AN Lian-suo ,NIU Yu-guang( Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring ,North China University of Electric Power ,Beijing ,China ,Post Code: 102206) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28(4) . - 409 ~ 414

To solve the difficulty in monitoring the ash fouling on water walls of a boiler ,introduced was a cleaning factor to transform it into an acoustic pyrometric problem. On this basis ,an on-line system for monitoring the ash fouling on water walls of a boiler was developed and an experimental study was performed on a domestic 300 MW boiler. As a result ,the flue gas temperatures along the acoustic line close to the water walls were obtained and the temperature fields in the sections of the furnace in the boiler were rebuilt. The research results show that the new cleaning factor can be used to monitor the local ash fouling conditions of the water walls. Due to the curvature effect of the sound wave ,the average flue gas temperature measured along the acoustic line is about 130 °C higher than that on the surface of the water walls facing the flame. Any change in the temperature of flue gases close to the water walls can be used to represent that in the water wall temperature. The temperature field thus rebuilt can be used to real-time and accurately observe the movement of the flame center in the furnace ,thus the foregoing can offer important reference for monitoring ash fouling and intelligent soot blowing in boilers. **Key words:** water wall ,cleaning factor ,ash fouling monitoring ,acoustic pyrometry ,flame center

镁渣脱硫剂的水合及添加剂改性研究 = **Study of the Denaturing of the Agent for Desulfurizing Magnesium**