

# 电站锅炉燃气脉冲除灰过程研究

樊未军<sup>1</sup>, 孙文超<sup>2</sup>, 吴承康<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 动力系, 北京 100083; 2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

**摘 要:** 中国电站锅炉燃用大量的未经洗选的劣质煤, 导致严重的锅炉积灰。积灰不仅使锅炉热效率下降, 而且堵塞烟气通道, 影响了锅炉的正常运行。燃气脉冲除灰技术是中国科学院力学研究所燃烧实验室开发的, 并在 30 多台大型电站锅炉应用, 取得了很好的效果。本文工作研究了该项技术中燃烧室结构和燃料对火焰传播和压力脉冲的影响; 用压力传感器测量燃气脉冲在出口外流场中的压力分布, 观察燃气脉冲的作用强度和作用范围; 用振动传感器测量积灰板的振动, 以及在不同空间位置振动加速度的变化情况, 由此推论了除灰作用的机理。

**关 键 词:** 燃气脉冲; 爆燃; 除灰器

中图分类号: TM621.2 文献标识码: A

## 1 前言

中国电站锅炉普遍存在着积灰问题。对此问题国内外研制出了各种除灰器, 但是都难以从根本上解决积灰问题。有的还因为自身的缺陷使设备腐蚀加剧。用爆燃的方法产生冲击波及高速气流作用于锅炉受热面以达到除灰的目的, 是国内外发展起来的新一代除灰技术。

它利用可燃气体, 如煤气、天然气、液化石油气、乙炔气等常用气体燃料, 在特殊设计的燃烧室中燃烧, 并从输出管的喷口处发射燃气脉冲使积灰脱落。燃气脉冲除灰技术在国内火力发电厂已得到了应用, 到目前为止已有 125 ~ 600 MW 的 30 多台电站锅炉(包括燃油和燃煤锅炉)安装了燃气脉冲除灰装置, 并取得了良好的效果<sup>[1~2]</sup>。它以除灰能力强、安全可靠、运行费用

低而得到了电厂的好评。

在燃气脉冲作用下积灰脱落的过程是比较复杂的。当只有高速气流作用时, 如高压蒸汽吹灰或压缩空气吹灰, 高速气流通过卷吸、夹带、冲击等作用克服积灰与表面的粘接力, 使灰尘脱离积灰表面; 当只有声波作用时, 一方面可使气体分子和灰尘粒子发生振动, 使灰尘粒子不能在换热表面沉积, 另一方面可使换热表面发生机械振动, 灰尘粒子由于惯性力或者变形剪切力作用而脱离结灰表面。燃气脉冲除灰技术中气流和振动这两种因素对清除积灰都有较强的作用。燃气脉冲的压力值愈高, 脉冲时间愈短, 对积灰面的作用也愈强。燃气脉冲的强度主要取决于燃料种类、阻塞比、出口截面比和火焰速度。在一定燃气脉冲强度下, 结灰面离燃气脉冲出口愈远, 除灰能力愈弱。因此本文主要研究了燃气脉冲的产生和燃气脉冲的衰减过程。

## 2 实验装置

实验装置布置如图 1。燃料气分别为乙炔、液

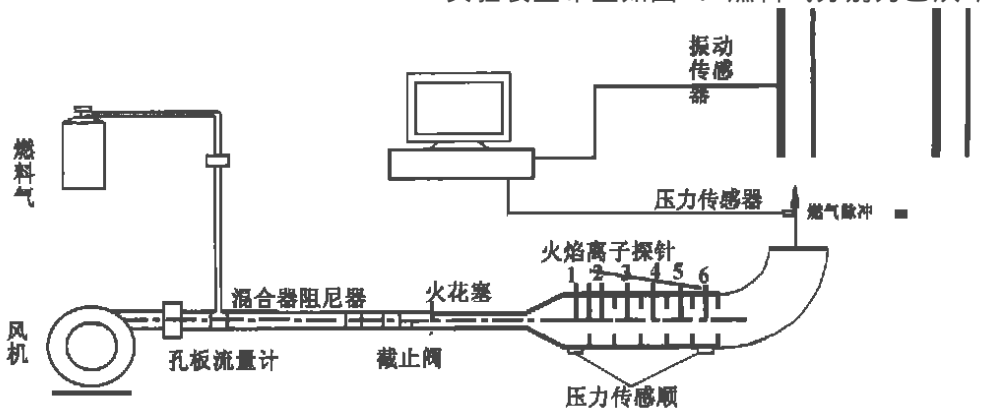


图 1 实验装置图

化石油气、甲烷和水煤气, 经孔板流量计与空气预混后注入燃烧室。火焰探针置于燃烧室的轴心线上, 火焰面达到探针 1 的时间设定为火焰传播曲线的起

始点, 6 个火焰探针测量火焰速度。在 1、6 点所在的截面上安装两个 0~2 MPa 应变式的压力传感器, 用来测量燃烧室首末两端的压力波形。用压力传感器测量出口外压力分布。用加速度传感器测量不同厚度板的振动大小。点火器前装有截止阀, 用来控制点火前混合气的流态。测试中使用的是 DH5932 数据采集系统和北京大学生产的振动加速度测量系统。

表 1 测点布置尺寸

测点编号	1	2	3	4	5	6
探头位置/mm	0	130	290	450	610	770

定义: 燃料浓度  $\Phi = \text{实际燃料空气比} / \text{当量比条件下的燃料空气比}$

$R_B = 1 - (d/D)^2$ —阻塞比,  $d$ —阻塞孔板内孔直径,  $D$ —燃烧管内径,  $A_e/A_0$ —出口截面比,  $A_e$ —出口截面面积,  $A_0$ —燃烧管截面面积,  $L/D$ —长径比,  $L$ —燃烧管长度,  $D$ —燃烧管直径

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 一定阻塞比下火焰速度随燃料浓度 $\Phi$ 的变化

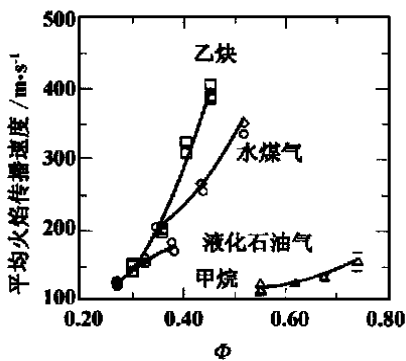


图 2 四种燃料火焰速度随  $\Phi$  的变化曲线  $R_B = 0.28$ ,  $L/D = 7.9$ ,  $A_e/A_0 = 0.72$

从图中可以看出, 乙炔在  $\Phi = 0.4$  时平均火焰速度已经达到 300 m/s, 水煤气次之为 250 m/s, 液化石油气为 170 m/s, 甲烷最低约为 100 m/s(外推)。另外还可看出在低  $\Phi$  的情况下, 乙炔、液化石油气、甲烷等碳氢燃料的火焰速度越来越接近, 而水煤气的火焰速度则略高于它们, 这可能与水煤气里氢的含量高有关。乙炔是随燃料浓度变化最为强烈的一种气体, 这不仅与其化学反应的活性有关, 而且与它的发热量大也有关系。

#### 3.2 不同阻塞比对火焰速度的影响

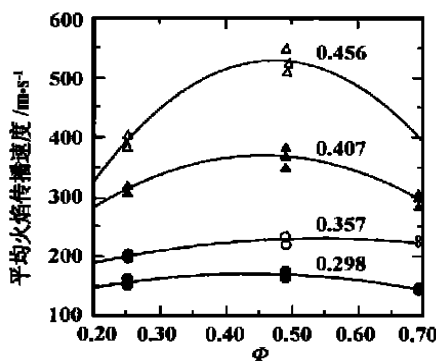


图 3 乙炔平均火焰速度随  $R_B$  的变化曲线

图 3 乙炔—空气火焰速度随阻塞比的变化情况。从图中可看出, 在同一个燃料浓度  $\Phi$  之下, 当  $R_B$  小于 0.49 时燃烧速度随阻塞比的增加而不断增加, 这主要由于阻塞比的增加提高了孔板对未燃气体的扰动, 气流湍流度的增加必然导致燃烧速度的快速提高。燃烧速度愈快, 压力脉冲波形愈陡, 除灰能力也就愈强。

当  $R_B$  大于 0.49 以后, 阻塞比的增加反而使火焰速度有所降低, 随着阻塞比的增加火焰传播曲线有一个最大值。阻塞比增加, 一方面使未燃气流的湍流度增加, 火焰速度有增加的趋势; 另一方面燃烧波前气流速度因受到阻塞的增加而快速减小, 火焰速度因此也减小。但由于阻塞比的增加使燃烧速度增加的幅度小于波前气流减少的幅度, 所以火焰速度随阻塞比的增加而减少。

#### 3.3 燃烧室结构参数对压力提升的影响

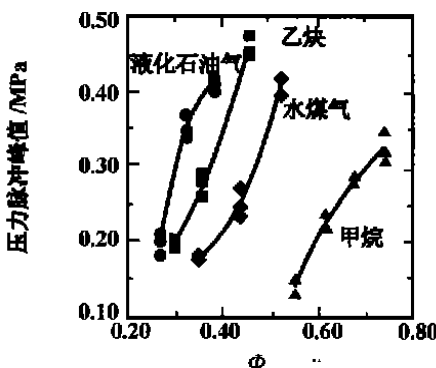


图 4 几种燃料压力峰值随浓度 ( $\Phi$ ) 的变化  $R_B = 0.28$

从图 4 中可看出在  $\Phi$  的一定变化范围内, 乙炔燃烧时压力提升的幅度最大, 液化石油气和水煤气次之。由于乙炔的火焰速度比较快, 在一端开口的燃烧室中燃烧, 形成的压力峰值较高。另外乙炔气的放热量也较大, 绝热火焰温度也较高, 这也是乙炔燃烧后形成压力峰值较高的一个原因。液化石油气的火焰速度虽然较乙炔的低, 但是它的单位体积的放热量较乙炔的高, 最终其压力峰值的变化趋势与

乙炔气的较为接近。水煤气的氢含量接近 60% (体积含量), 火焰速度比较快, 正因为这个原因造成其压力峰值比较高。甲烷与液化石油气的火焰速度比较接近, 但是甲烷的放热量较小, 因此其压力峰值也比液化石油气的要低一些。

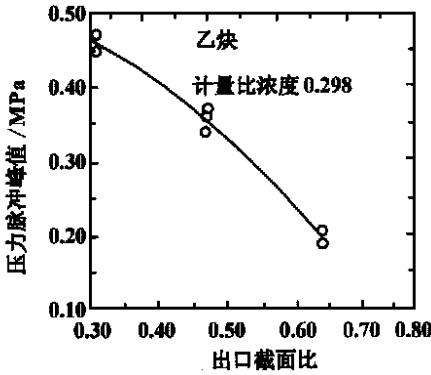


图 5 压力峰值随  $A_e/A_0$  的变化  
 $R_B = 0.28, l/D = 7.9$

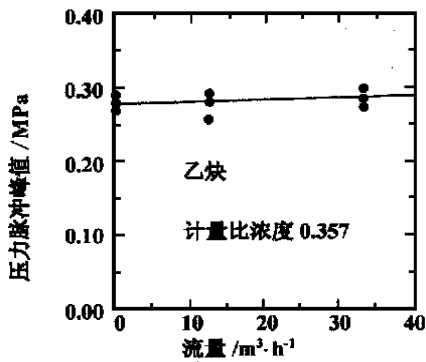


图 6 压力峰值随进气流量的变化

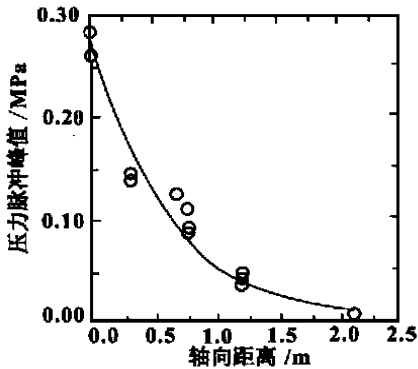


图 7 轴向的压力衰减

那么气流全部滞留在燃烧室内, 爆炸压力达到极限值即定容爆炸压力。出口截面比是影响爆炸压力峰值最明显的一个参数。

图 6 是在  $\Phi = 0.357, R_B = 0.287, l/D = 7.9$  和  $A_e/A_0 = 0.72$  时, 爆炸压力峰值随燃烧室进气流量

图 5 说明了在乙炔—空气燃烧的情况下, 出口截面比减小时, 压力峰值的变化趋势几乎成直线提高。出口截面的变化可以影响流出气体的质量的多少, 特别是在出口处出现临界流动时, 由于出口截面的阻塞作用使燃烧室内气体更多地滞留在燃烧室中, 从而使燃烧室内压力增加。出口截面比减少 1/5, 则压力峰值提高 2.4 倍, 由此可见出口截面比对爆炸压力峰值影响的程度。如果出口截面比为 0, 那么气流全部滞留在燃烧室内, 爆炸压力达到极限值即定容爆炸压力。出口截面比是影响爆炸压力峰值最明显的一个参数。

的变化曲线。由于进气流量比较小, 而且可燃气已充满容器, 从图中可看出在燃料浓度不变的情况下, 进气流量的增加对压力峰值的影响就很小。

### 3.4 燃气脉冲出口外压力的分布

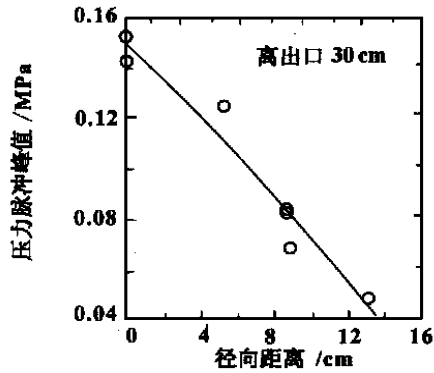


图 8 径向的压力衰减

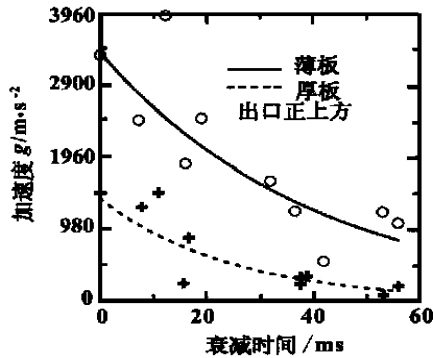


图 9 不同时刻加速度峰值的拟合曲线

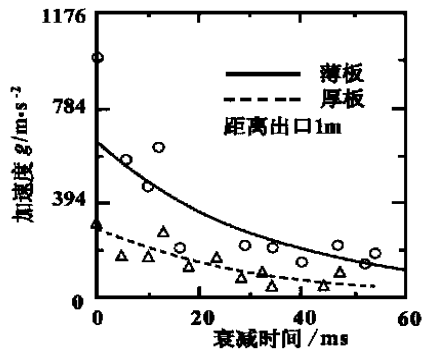


图 10 不同时刻加速度峰值的拟合曲线

实验用乙炔为燃料, 实验条件:  $\Phi = 0.298, R_B = 0.49, l/D = 7.9$ 。图 7 表示压力峰值随轴向距离的衰减关系。压力峰值的大小随距离的变化是较为剧烈的。图 8 是压力峰值随径向距离的变化曲线。

燃气脉冲对积灰表面作用力的大小随着离燃气脉冲发生器出口的距离而发生变化, 离燃气脉冲出口愈近, 燃气脉冲的作用愈强。燃气脉冲出口后压力的衰减直接影响燃气脉冲对积灰的作用大小。在燃气脉冲装置的出口外布置压力传感器, 压力传感器的感应面与出口截面平行。首先测量位于出口截面几何中心线上不同位置的压力峰值, 然后测量水平面上的不同位置的压力峰值 (表压)。实验

### 3.5 同一燃气脉冲作用下厚板和薄板的振动加速度对比实验

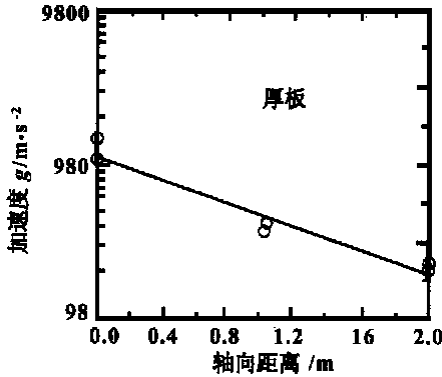


图 11 厚板的加速度峰值随距离变化

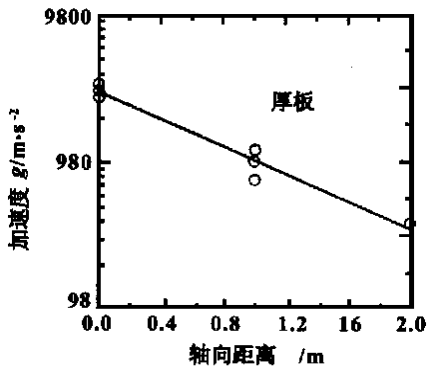


图 12 薄板的加速度峰值随距离变化

不同位置下的加速度值是用实验的方法得到的。用加速度传感器测量振动加速度值。乙炔为燃料, 实验条件是:  $\Phi = 0.298$ ,  $R_B = 0.28$ ,  $A_e/A_0 = 0.72$ ,  $l/D = 7.9$ , 在保持这些参数不变时, 测量了不同空间位置下的加速度值。根据文献 [3] 介绍, 加速度时域曲线的包络线满足  $e^{-t}$ 。图 9 是积

灰板在燃气脉冲出口正上方的加速度峰值的拟合曲线。图 10 是离出口处水平距离 1 m 时的拟合曲线。不论在那一位置, 薄板的振动加速度值明显大于厚板, 但加速度随时间的衰减趋势则大体相似。图 11 为厚板距离燃气脉冲出口位置不同时加速度峰值的衰减曲线。曲线的拟合方程为:  $\alpha = 1\ 100 \cdot e^{-0.98x}$  m/s,  $x$  的单位是 m。图 12 是离燃气脉冲出口不同水平距离时, 薄板上某一点的加速度峰值曲线。此曲线近似为指数曲线, 拟合的曲线方程为:  $\alpha = 3\ 000 \cdot e^{-1.07x}$  m/s。从这两个方程可看出, 薄板与厚板的衰减规律相似, 都是指数规律衰减。所不同的是指数函数前面的常数, 薄板的常数是厚板的 2.7 倍, 也就是说在同一燃气脉冲强度作用下, 薄板的振动加速度峰值是厚板的 2.7 倍, 这个比例在各个位置上都是相同的。实验中使用的薄板的厚度是厚板的 1/5。

### 4 气流对固体壁面的摩擦剪力估算

气流流过一固体壁面, 由于边界上的摩擦剪切阻滞了气流的流动, 在固体壁面附近形成了所谓的边界层区域。边界层内流体在固体壁面上的剪切力的大小是  $Re$  数的函数。求边界层阻力系数的经验公式很多。文献 [4] 中介绍了苏哈泥 (Schoenherr) 运用总表面阻力的测量结果, 推导出从固体壁面前沿起即为紊流边界层的广泛使用的阻力系数公式:

$$1/\sqrt{c_f} = 4.13 \log(Re_{c_f}), Re_{c_f} = Ul/\nu$$

沿宽度为  $b$  长度为  $l$  的平板的平均切应力系数定义为:  $c_f = \frac{\text{总表面阻力}}{blU^2/2}$

根据数值计算的结果可以设已燃气体的温度为 1 300 K, 已燃气体的声速 722 m/s, 如果取出口气流速度等于已燃气体的声速(用这个假设计算出的结果应该比实际过程的数值小些), 那么出口外射流速度假设为  $U = 700$  m/s,  $l = 0.5$  m, 由空气的粘性系数经验公式计算粘度 [4]:  $\nu = \nu_0 \frac{273+c}{T+c} \left(\frac{T}{273}\right)^{3/2}$ ,  $\nu_0 = 1.32 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s,  $c = 111$ , 那么 1 300 K 时空气的粘度为  $\nu = 3.74 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s,  $Re_l = 9.37 \times 10^6$ 。由于平板的典型临界雷诺数  $Re_c = 5 \times 10^5$ , 因此层流部分可被忽略, 边界层的计算可以认为紊流起始于平板前沿。把雷诺数  $Re_l = 9.37 \times 10^6$  代入上述方程可得:  $c_f = 3.2 \times 10^{-3}$

那么单位面积的剪切力为:

$$\tau_0 = c_f \cdot \frac{\rho U^2}{2} = 3.2 \times 10^{-3} \times \frac{0.5 \times 700^2}{2} = 392 \text{ Pa}$$

通过计算可知: 气流流速愈大, 气流对积灰板的剪切力愈强, 即气流对积灰板的冲刷愈强, 灰尘脱落的可能性也愈大。文献 [5] 给出了使用蒸汽吹灰器清除不同积灰所需的剪切强度的参考值: 表面浮灰 200~500 Pa, 已结块积灰 400~800 Pa, 熔渣或焦渣大于 700~1 500 Pa。上面的计算结果仅仅处于表面浮灰所需的剪切强度的范围内, 因此可清楚的看到气脉冲中气流对积灰表面的冲刷作用仅仅能清除浮灰, 不能除去块状结灰或粘结灰。

### 5 结束语

燃气脉冲除灰是一个较为复杂的过程, 它受到许多因素的影响。本文工作研究了不同燃烧室结构、不同燃料对燃烧速度和压力脉冲的影响; 得到了压力在空间的衰减情况; 测量了同一燃气脉冲条件

(下转第 277 页)

回路,在图2中位于 $B_1$ 处。仿真试验结果表明,此时系统的极限环频率和幅值与油动机滑阀中存在摩擦阻力时的结果相同。从描述函数分析系统稳定性的角度来看,这是必然的。因为 $B_1$ 处的摩擦与间隙等效于 $B$ 处的影响;但从时域的过程曲线来看,两者是不同的。

图4(a)、(b)分别为油动机反馈滑阀(反馈回路)和传递机构(前向回路)存在摩擦与间隙时的仿真曲线,当量摩擦阻力 $\Delta f = 0.02$  负荷扰动 $L_1 = 0.05$ 。

从仿真结果可见,前向回路和反馈回路中存在摩擦与间隙时,在扰动作用之下,系统也要产生极限环振荡。对于所研究的系统来说,摩擦与间隙处于不同的位置时,极限环的周期与频率是不同的,如表1所示。非线性位于前向回路、内回路和反馈回路时,极限环的振荡周期依次减小,而频率增加。图5所示的信号频谱清楚地反映了这种关系(图中纵坐标是相对于频谱的最大幅值进行标么后的幅值谱)。这是由于摩擦与间隙非线性位于前向回路时,信号将经过系统的所有环节,具有相当长时间的延时,使得系统的极限环周期延长。当摩擦与间隙非线性位于反馈回路时,油动机与滑阀形成一个闭环,非线性输出即刻影响滑阀与油动机的运动,信号的延时时间最短,因此其振荡周期最小,频率最高。而摩擦与间隙非线性位于内回路时,非线性输出既经过了系统前向通路的所有环节,又经过反馈滑阀反馈到错油门滑阀的输入端,影响错油门滑阀和油动机的输出,两者共同作用的结果,使得系统极限环的振荡周期介于非线性位于前向回路和反馈回路时的振荡周期之间。

当非线性位于前向通路的其它位置时,如图2中

$A_1$ 、 $A_2$ 处时,仿真试验的结果表明系统也要产生极限环振荡,且极限环的频率和周期与非线性位于前向回路位置 $A$ (油动机输出)时的结果相同。摩擦与间隙的大小变化时,极限环的周期和频率不变,但幅值增大,和摩擦与间隙位于内回路时的结果相同。

表1 非线性位于不同位置时极限环的特征

回 路	外回路	内回路	反馈回路
周期/s	13.70	5.85	2.86
频率/Hz	0.073	0.171	0.35
角频率/rad·s <sup>-1</sup>	0.459	1.074	2.197

## 4 结论

系统中存在摩擦与间隙时,在扰动作用下系统将发生极限环振荡。当摩擦与间隙位于前向回路、内回路和反馈回路时,极限环的振荡频率依次增大;当摩擦与间隙的位置不变,而摩擦阻力增大或间隙增大时,极限环的频率不变,而幅值增加。因此扰动作用后所形成的极限环的频率和幅值的变化可以作为摩擦与间隙故障的特征参数,用于系统的状态监测与故障诊断。

## 参考文献:

- [1] 绪方胜彦. 现代控制工程[M]. 卢伯英译. 北京: 科学技术出版社, 1981.
- [2] 戴义平, 张镇一. 非线性因素与中间再热透平调节系统的稳定性[J]. 汽轮机技术, 1991, 33(1): 8-14.

(渠源 编辑)

(上接第258页)

下两种厚薄不同板的振动加速度值及其随时间和空间的衰减情况。初步搞清了除灰过程中燃气脉冲产生、衰减以及对结灰面作用的规律。主要结论有:

(1) 火焰速度愈快, 出口截面愈小, 那么燃烧管内压力愈高。

(2) 出口外压力随距离衰减较快, 而加速度的衰减符合指数规律。

(3) 初步认为振动是粘结灰脱落的主要因素。

## 参考文献:

- [1] 孙文超, 詹焕青, 陈丽芳. 燃烧气脉冲—新一代除灰技术[J]. 中国

电力, 1997, 30(7): 46-48.

- [2] 孙文超, 詹焕青, 陈丽芳, 等. 燃烧气脉冲除灰技术的试验研究[J]. 燃烧科学与技术, 1999, 5(1): 8-13.
- [3] 李德葆, 沈观林, 冯仁贤. 振动测试与应变电测基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.
- [4] 戴莱 J W, 哈里曼 D R F. 流体动力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1983.
- [5] 岑可法, 樊建人. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算[M]. 北京: 科学出版社, 1995.

(何静芳 编辑)

avoidance of abrupt rise in wall temperature, thus contributing to a relatively high operation safety. **Key words:** segregation type heat pipe, small-diameter spiral tube, average heat exchange factor, critical heat flux density

石灰浆液雾化喷嘴及其特性研究= **The Study of a Lime Slurry Atomization Nozzle and Its Characteristics** [刊, 汉] / WANG Nai-hua, GAO Xiang, LUO Zhong-yang, et al (Thermal Energy Engineering Research Institute under the Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang Province, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 247 ~ 249, 254

An experimental study was conducted of the atomization characteristics of a Y-shaped twin-fluid nozzle used for lime slurry atomization. An analysis was performed of the various factors liable to influence the atomization angle and the distribution of Sauter mean diameter (SMD) of the atomized spray drop. An empiric formula for predicting spray-drop average diameter has also been obtained. The results of the study indicate that the nozzle under investigation features low power consumption and high atomization effectiveness, making it especially suitable for flue gas desulfurization based on a semi-dry method. **Key words:** nozzle, atomization characteristics

可调式煤粉分配器冷态模化试验及理论分析= **Cold Modeling Test and Theoretical Analysis of an Adjustable Pulverized-coal Distribution Device** [刊, 汉] / ZHOU Yun-long, GAO Shui-qiang (Power Engineering Department, Northeast Electric Power Institute, Jilin, Jilin Province, China, Post Code: 132012), SHI Hong-qi (Jilin Research Institute of Electric Power Science, Changchun, Jilin Province, China, Post Code: 130024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 250 ~ 254

Proposed in this paper is a new type of adjustable pulverized-coal distribution device. Based on a theoretical analysis of the pulverized-coal distribution device the authors have conducted an in-depth experimental investigation. The investigation results have confirmed the feasibility of this new type of pulverized-coal distribution device, which regulates the combustion process of a boiler through a blade angle change of the distribution device. **Key words:** pulverized coal distribution device, experimental study

电站锅炉燃气脉冲除灰过程研究= **A Study of Gas Pulsation-based Ash Removal Process in Utility Boilers** [刊, 汉] / FAN Wei-jun, SUN Wen-chao, WU Cheng-kang (Beijing Astronautics and Aeronautics University, Beijing, China, Post Code: 100083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 255 ~ 258, 277

The burning of huge amount of inferior-quality unwashed coals in Chinese utility boilers has led to serious boiler ash-deposit and related fouling problems. The latter can result in a reduction of boiler thermal efficiency and cause the clogging of the boiler rear flue pass, thus affecting the normal operation of the boiler. The gas pulsation-based ash removal technology was developed by the combustion lab of a Mechanics Research Institute under the Chinese Academy of Sciences. Its use on 30-plus large-sized utility boilers has proved to be very effective. In the present paper the study results of the above-cited technology are reported. They cover a variety of aspects. These include the influence of furnace configuration and fuel on the flame propagation and pressure pulses, the measurement by the use of pressure sensors of the gas pulse pressure distribution at the outlet flow field, and the observation of gas pulse intensity and its action range. In addition, also touched upon were the vibration measurement of ash deposit plate with the help of a vibration sensor and the variation of vibration accelerations at various spatial locations. From the above one can readily gain a better understanding of the mechanism of the gas pulsation-based ash removal action. **Key words:** gas pulsation, explosive burning, soot blower

煤焦再燃过程中催化剂对 NO 还原的影响= **The Effect of Catalysts on NO Reduction during the Reburning of Coal Chars** [刊, 汉] / ZHONG Bei-jing, SHI Wei-wei, FU Wei-biao (Engineering Mechanics Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 259 ~ 262, 274

With three kinds of coal char made from Xianglongtan lignite, Fulaerki lignite and Datong bituminous coal serving as re-burning coals a study was conducted of the effect of these coal chars on the process of NO reduction in the reburning zone. Also analyzed was the effect of metallic oxides in the coal ash on the NO reduction. To study the catalytic action of