

径向分层旋流燃烧器燃烧可视化研究

何磊, 范卫东, 章明川, 吴江

(上海交通大学能源工程系, 上海 200240)

摘要: 通过所开发的图像采集与处理系统, 对一台径向分层旋流燃烧器的煤气火焰进行了可视化研究, 并应用分形理论对所提取的火焰锋面进行了定量分析。试验结果表明, 利用分形维数可以很好地描述火焰锋面的波折程度, 为深入研究火焰形状结构对燃料与空气混合的影响提供了一个有力的手段。

关键词: 旋流燃烧器; 图像处理; 分形; 可视化

中图分类号: O643.2⁺1; TP317.4 文献标识码: A

1 引言

在环境问题日益严峻的今天, 发展高效低污染的燃烧技术是当今燃烧科学技术研究的特点, 开发低 NO_x 排放的旋流燃烧器是其热点之一。降低 NO_x 生成的主要措施是分级燃烧, 由此发展了各种不同的分级燃烧型旋流燃烧器。这些燃烧器的共同特征是: 在燃烧器出口附近的点火区形成一个富燃料区域, 推迟二次风的混入过程, 使挥发分在富燃料贫氧的还原性气氛中燃烧, 以降低 NO_x 的生成^[1]。

Damkohler 早在 1942 年就提出火焰结构与湍流燃烧速度的内在联系, 引导人们将注意力转向火焰形状结构的研究上。湍流燃烧时由于脉动造成的复杂火焰表面已经不能用传统的 Euclidean 几何加以描述, 而分形理论可以用细微尺度规划几何结构。分形理论提出了解决欧氏空间中难以用一般线、面维数描述其复杂表面外形结构的几何规律性, 采用一系列细微尺度来衡量物体的结构, 得出了动力系统发展过程中大尺度范围规划下的结构具有自相似性的规律^[2]。早在 20 世纪 70 年代中期, Mandelbrot 就把分形理论应用到湍流火焰结构特性的研究中, 对单一性质表面内湍流的分数维特性进行了研究, 由于当时测量条件的限制, 仅仅提出湍流火焰具有分数维特性, 且维数在 2.2~2.5 之间。这项开创性的工作, 把分形理论与湍流这样一个随机脉动的非

线性动力系统联系起来。随后的研究人员利用经典的步进尺度规划方法多次验证了湍流火焰的分维特性^[3]。计算机图像处理技术的兴起为深入研究湍流火焰结构创造了条件。东南大学将计算机图像处理和分形理论综合应用于对湍流预混火焰的时间和空间分形特性的研究中, 计算了火焰锋面的周长和火焰锋面所包围的面积, 利用基于测度分形的方法计算火焰的形状维数, 认为湍流火焰的空间几何结构具有分数维特性, 并且随着湍动程度的加剧, 分形维数将增大^[2~3]。西安交通大学也将图像处理和分形理论应用于对容弹内的预混湍流火焰的研究中, 采用多尺度规划的方法对火焰的分形特性进行了分析, 得到类似的结论^[4]。

本文的工作是超低 NO_x 旋流燃烧器分层机理研究中的一部分, 目的在于发展测量的新方法, 为理论研究提供直观的数据。作为可视化旋流燃烧器流场的一项尝试, 文中选用煤气作为燃料, 以简化试验要求。

2 试验系统简介

由于湍流的瞬时脉动、燃烧时的恶劣环境(对仪器而言)和接触式测量对流场的干扰, 测量湍流火焰的表面及内在结构十分困难, 因此难以用传统的试验方法加以研究。而轻便小巧的 CCD 摄像机不仅可在局促的空间里发挥作用, 还配合图像采集卡, 可实时将图像数字化, 便于计算机的后处理。这是一个高速、无干涉的燃烧测量手段。

2.1 图像采集系统

CCD 摄像机与图像采集卡配合, 可有 30 帧每秒的采集速度。获得的图像是分辨率为 352×288 的真彩色图像。由于 CCD 摄像机固有的传输噪音以及炉膛背景噪音的影响, 在提取火焰形状结构特征

收稿日期: 2001-10-18; 修订日期: 2001-12-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59876019); 国家重点基础研究发展规划基金资助项目(G1999022209)

作者简介: 何磊(1977-)男, 贵州清镇人, 上海交通大学硕士研究生。

参数之前, 还必须对获得的火焰数字图像进行预处理, 如图像滤波, 以消除噪音, 突出火焰主体结构。

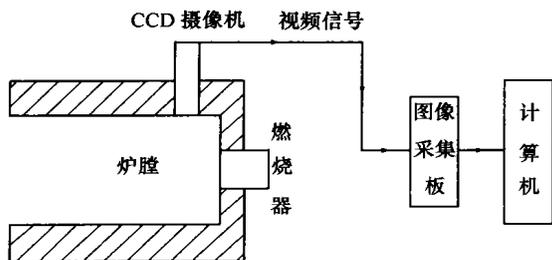


图 1 图像采集及试验系统示意图

2.2 径向分层旋流燃烧器

该燃烧器设计为气体燃烧器。燃料气体(煤气)沿燃烧器轴线方向进入; 一次风、二次风分别有轴向和切向两种进风方式, 其中切向进风用于使流动起旋。轴向进风和切向进风的风量和为各次风的总风量(即一次风的轴向风量和切向风量之和等于一次风量, 二次风同理), 于是通过调节轴向风和切向风的比例可实现对旋流强度的控制。如图 2 中, 堵头左边附近的管壁有两排小孔(即图中所示的煤气出口), 煤气从这些小孔沿径向喷出, 与一次风(此时一次风的轴向和切向分量已混合)混合, 所以在图中所示的一次风出口处可看作是预混风。

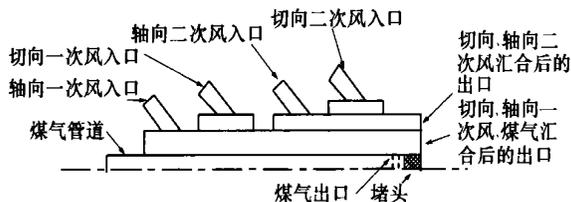


图 2 燃烧器投影的 1/2(示意图)

对某一类工况, 即给定理论空气量、过量空气系数和一次风率, 可有两种方式调节旋流强度: 调节一次风中轴向与切向风量之比和调节二次风中轴向与切向风量之比。

3 图像的处理

图像采集系统所获得的图像为真彩色图像, 难于直接对其进行处理, 这里先将其转换为灰度(256级)图以待处理。由于试验环境较恶劣, 且 CCD 摄像机自身的噪音, 在进一步的图像处理之前需要去除噪音。噪音可大致分为三种: 背景噪音, 按统计规

律分布的噪音和孤立的噪音。按统计规律分布的噪音可用相应的算法消除(如传输噪音一般满足高斯分布); 孤立噪音用中值滤波可有效消除; 而背景噪音与具体的实验环境有关, 没有一个通用的方法去消除, 单纯依靠计算去识别比较困难。为达到最理想的效果, 本文中采用了人机交互的方法。

4 试验结果

由于燃烧器的设计, 可以很方便地在较大的范围内分别无级调节一、二次风的旋流强度, 从而细致的考察一、二次风在不同旋流强度下的混合情况, 以及相应的燃烧情况。试验工况较多, 本文仅就总过量空气系数为 1.2, 一次风率为 0.25, 轴向一次风率分别为 0%和 100%时的 12 个工况为代表作分析, 如表 1 所示。

表 1

轴向一次风率/ %		轴向二次风率/ %					
0	100	80	60	40	20	0	
100	100	80	60	40	20	0	
工况代号		a	b	c	d	e	f

注: 风率指风量与对应总风量的比值, 轴向风率为 0 对应于最大旋流强度, 轴向风率为 100%对应于最小旋流强度。

4.1 图像增强和火焰锋面的提取

图 3 是图像增强后的火焰图像, 显示前进行了反色处理, 所以最暗的地方实际上是原图中最亮的地方; 图中左边的浅色半圆是燃烧器出口。图 4 和图 5 是提取出来的火焰锋面, 横纵坐标的单位都是一个像素, 在本次试验中对应实际长度为 0.5 mm, 所以横纵坐标也反映了火焰锋面的空间位置。提取出来的火焰锋面可以直观地分为上、中、下三段。中段由于受残留的燃烧器出口影像的干扰, 变得非常复杂; 上段和下段没有受到什么干扰, 是本文中的研究对象。

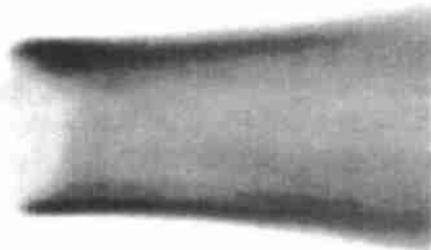


图 3 CCD 拍摄到的火焰

4.2 分形维数测定理论与方法

在本文中, 分形维数根据测度关系测定, 设长度

为 L , 面积为 S , 体积为 V 时, 则有下列关系式^[3]。

$$L \propto S^{1/2} \propto V^{1/3} \tag{1}$$

式(1)的意义是, 若把 L 扩大到 k 倍, 那么 $S^{1/2}$ 和 $V^{1/3}$ 也都扩大到 k 倍。若把具有 D 维测度的量假定为 X , 则可把式(1)变成一般化的公式

$$L \propto S^{1/2} \propto V^{1/3} \propto X^{1/D} \tag{2}$$

根据测度关系求分形维数时, 可预先将观察尺度选得尽可能小, 文中将这个尺度定为一个像素。由于实际物体的自相似都是在一定的尺度范围内才成立的, 所以可选的最小观察尺度应在这个范围内。在所获得的火焰图像中, 最小的观察尺度是像素, 而本次试验中一个像素代表实际物体长度约为 0.5 mm, 可以认为符合范围要求。

在试验过程中, 由于受 CCD 摄像机视角的限制, 不能获得整个火焰图像, 即不能得到完整的火焰锋面, 也就不能得到火焰锋面所包围的面积, 所以在计算火焰锋面的分形维数时不能采用常用的“面积—周长”法。这里采用的是基于测度关系的另一种方法: 研究火焰锋面长度和其两端的直线距离的关系。具体做法就是, 先在火焰锋面上布置两个点, 得到两点间的火焰锋面长度 X_1 和两点间的直线距离 L_1 , 然后移动这两个点, 获得 X_2 和 L_2 , 以此类推得到 X_n 和 L_n 。如果在 L 和 X 之间有下列关系式^[3]:

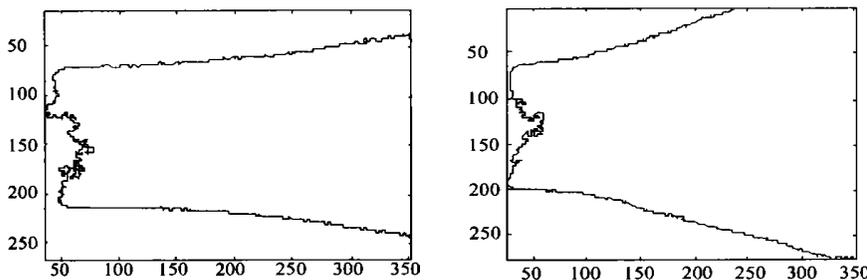
$$L \propto X^{1/D} \tag{3}$$

则 D 就是该火焰锋面的分形维数。根据式(3)可得:

$$D = \ln X / \ln L \tag{4}$$

4.3 火焰锋面的定量分析

为了对火焰锋面作定量上的分析, 这里对每一个工况随机抽取了 15 幅图进行处理。对每一幅图, 取锋面的一部分, 这部分在图 4、图 5 中就是横坐标介于 50~350, 纵坐标介于 200~280 的锋面。将这

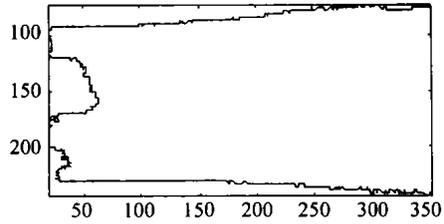


(a) 轴向一次风率为 0%, 切向二次风率为 0%

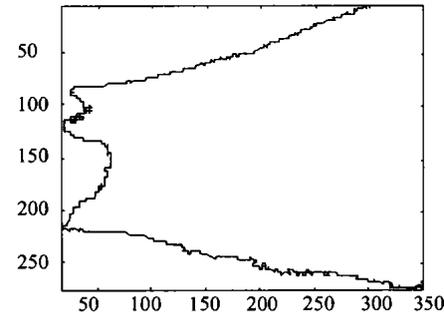
(b) 轴向一次风率为 0%, 切向二次风率为 80%

图 4

部分锋面按点数等分布 20 等份(图像处理提取出来的锋面实际上是很多点的连线); 对每一等份编号, 并计算其分形维数; 序号可以代表该等份在锋面中的位置, 而分形维数可以显示该等份锋面的复杂程度。以等份的序号为横坐标, 等份的分形维数为纵坐标, 将 15 幅图的结果画在同一幅图中, 就是图 6 或图 7 中的一幅子图。



(a) 轴向一次风率为 100%, 切向二次风率为 0%



(b) 轴向一次风率为 100%, 切向二次风率为 80%

图 5

图 6 和图 7 对应的分别是轴向一次风率 0% 和 100% 下的所有工况。图 6 和图 7 中, 从左到右, 从上到下, 6 幅子图对应的分别是轴向二次风率从 100% 到 0% (即切向二次风率从 0% 到 100%, 参见表 1)。每一幅子图中有 300 个点, 因为这是 15 幅

图处理结果的叠和。

火焰锋面由平滑变得曲折是因为不同参数的流体相互扩散的结果, 而湍流脉动是导致扩散的原因, 因此, 表征锋面复杂程度的分形维数的大小实际上也反映了湍流脉动的强度。

由图 6 和图 7 可以看出, 在燃烧器出口处分形维数较小, 且分布很集中; 随着到燃烧器出口距离的增大, 分形维数有增大的趋势, 并且分布越来越分散。分形维数表现出的这种趋势是在意料之中的, 因为观察提取出的火焰锋面可以看到锋面的后部的确比前部要曲折。至于为什

么会有越来越多的分散的点,可以这样理解:对每一个工况,图像采集系统是以 30 帧每秒的速度连续采集的,所以图像帧的序列实际上代表了离散的时间序列。如上所述,我们在每个工况中采集的所有图像中随机的抽取了 15 幅图,所以这是一个随机的时间序列,它们的分形维数也代表了当时的火焰锋面的状态。对比所有提取出来的火焰锋面,可以发现

在燃烧时,火焰锋面无论是形状还是空间位置都是随着时间不断变化着的;但在同一工况下稳定燃烧时,不同时间的火焰锋面的空间位置的变化是局限在一个很小的范围内。由此可以假定:在同一工况下,不同时间的火焰锋面的各等份经过空间中一系列定点,某一等份的分形维数可以反映对应空间点及其临近空间的混合情况。在这个假定的基础上,

有关图 5 和图 6 的解释如下:

(1) 对于某一等份的所有点,分形维数大小的变化反映了对应空间位置的湍流脉动在对应时刻的强度。

(2) 燃烧器出口处流体的层流化现象占主导地位,脉动不明显,混合的过程较弱;离燃烧器出口越远,脉动越强烈,流体的层流化现象逐渐消失,混合越来越强烈。

(3) 由于脉动的随机性,分形维数的分布开始扩散。脉动强度越大,锋面越曲折,分形维数越大;反之则分形维数越小。

在获得这样的认识之后,就可以利用分形维数考察各个时刻的脉动情况,深入了解旋转射流流场的特点。

图 6 和图 7 的 12 幅子图中的每一幅都有两条拟合的曲线,其目的是显示出分形维数的发展趋势。曲线拟合所需要的数据由下式计算得到:

$$Y_i = \text{mean}(X_i) + k \times \text{std}(X_i)$$

$$i = 1, 2, \dots, 20 \quad (5)$$

(下转第 374 页)

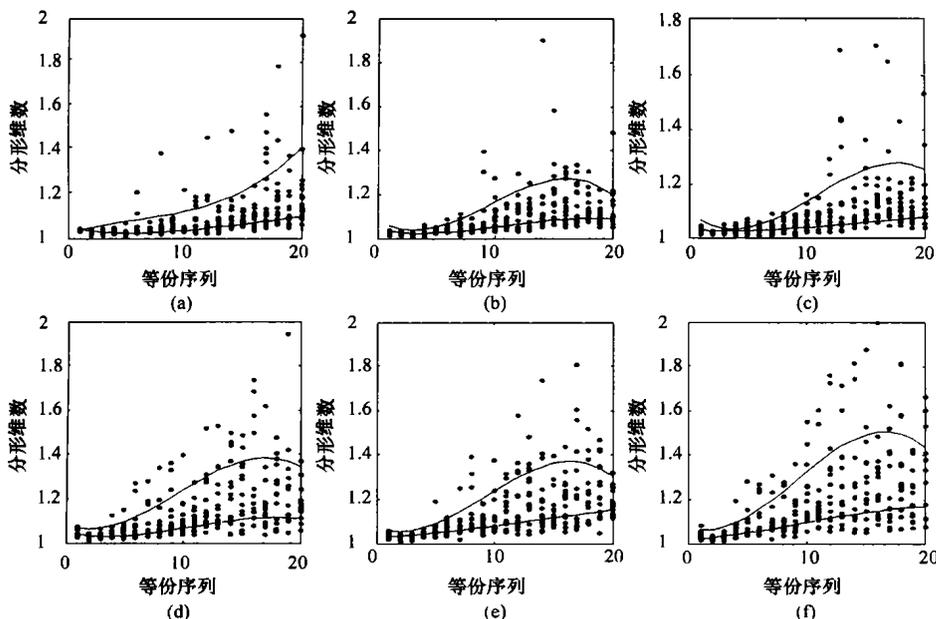


图 6 轴向一次风率为 0% 的各工况下的火焰锋面分形维数

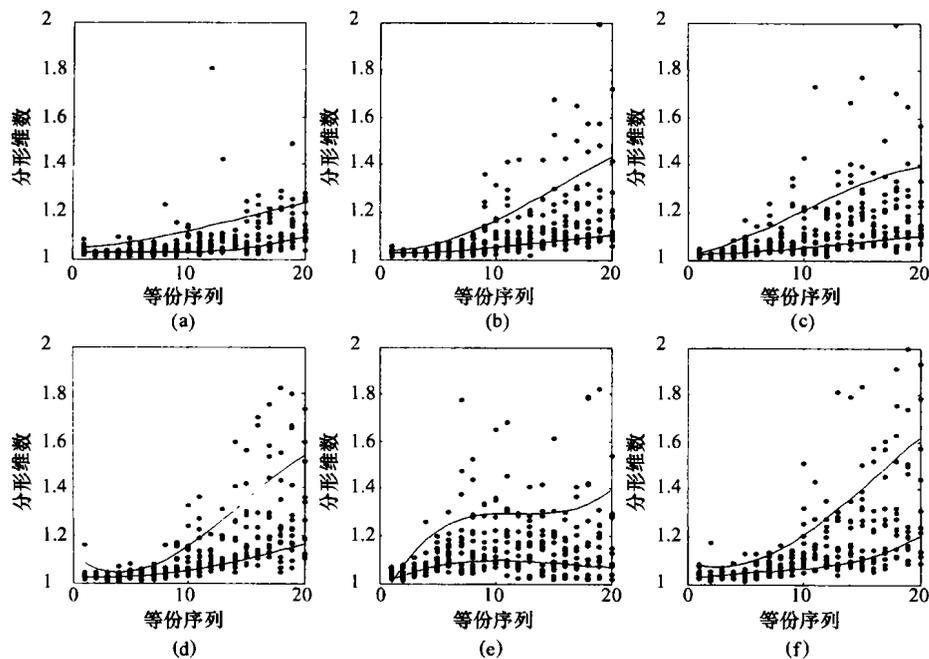


图 7 轴向一次风率为 100% 的各工况下的火焰锋面分形维数

- [3] 井手英夫, 松村博久, 田中英二, 等. 长方形断面在有における垂直狭小流路内に気液两相流の流动式および摩擦压力損失 [J]. 日本機械学会論文集(B), 1997, 63(606): 96-103
- [4] 深野徹, 伊藤昭彦, 小田原博史. 水平长方形流路内における薄液膜の研究 [J]. 日本機械学会論文集(B), 1985, 51(462): 492-502
- [5] SCHICHTING H. Boundary Layer Theory[M]. New York: McGraw-Hill, 1960
- [6] HEISRONI G, ROZENBLIT R. Thermal pattern on heated wall in

vertical air-water flow [J]. *Int J Multiphase Flow*, 2000, 26(2): 147-167

- [7] TESTUYA KITAGAWA, KAHORU TORII, KOICHI NISHINO. Heat transfer of air-water dispersed flow in a vertical pipe [J]. *Heat Transfer-Asian Research*, 1998, 27(4): 255-270.
- [8] 刘振华. 细小传热管内过冷水和空气高速两相流的换热特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(6): 80-84.

(渠 源 编 辑)

(上接第 362 页)

式中: Y_i —曲线拟合所需的数据; X_i —向量, 包含第 i 等份的全部 15 个分形维数; $\text{mean}(X_i)$ —求 X_i 中全部 15 个分形维数的算术平均值; $\text{std}(X_i)$ —求 X_i 的标准方差; k —系数, 大于零则 Y_i 为每幅图上面的曲线, 小于零则 Y_i 为每幅图下面的曲线; i —等份序号。

在本文中, 对所有 12 幅子图, k 取 0.9 和 -0.9. 将计算结果以 3 次多项式拟合, 得到图中的曲线。观察拟合得到的曲线, 可以发现各等份分形维数的时均值随二次风旋流强度的增大而增大。另外, 二次风的旋流强度加大后, 上部的曲线有一个峰值, 表明混合强度并不是随着距离的增大而单调增大。至于一次风旋流强度的作用, 从拟合的曲线来看, 应该是体现在影响曲线峰值出现的早晚: 一次风旋流强度大 (对应图 5), 峰值出现得早; 反之则晚 (对应图 6)。换言之, 如果一次风旋流强度大, 则混合最强烈的点较早出现; 反之则出现得较晚。如果注意每幅图中两条曲线间距离的变化, 可以看到, 在燃烧器出口处, 两条曲线很接近, 随着二次风旋流强度的增大, 两条曲线间的距离在这个地方并没有明显变化; 而离开燃烧器出口后, 两条曲线间的距离不仅与旋流强度有关, 也与等份的序号有关。从曲线拟合的公式可以知道, 曲线间距离的中点就是分形维数的时均值, 距离的大小是分形维数的范围。这样, 我们就知道了分形维数时均值的变化情况以及各个时刻的分形维数较多地落在哪个范围, 也就意味着了解了脉动时均值的变化情况以及各个时刻的脉动强度大致分布。从图中显示出的趋势是符合理论的: 旋流强度增大, 脉动时均值增大, 脉动强度的

范围增大。

5 结论

本文在径向分层旋流燃烧器上, 对湍流预混火焰作了可视化的工作, 并在可视化的结果上对预混火焰的结构特性尝试了定量分析, 得到了如下结论:

(1) 火焰锋面是火焰灰度图像中灰度相同的点的连线, 分形维数可以表示锋面的复杂程度。

(2) 火焰锋面由平滑变得曲折是因为不同参数的流体相互扩散的结果, 而湍流脉动是导致扩散的原因, 因此, 分形维数的大小反映了湍流脉动的强度。

(3) 根据分形维数的发展趋势所拟合的曲线可以显示燃烧混合最强烈的位置, 脉动时均值的变化情况, 脉动强度的变化范围。

参考文献:

- [1] 陈启峰. 同轴旋转射流的分层流机理研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2001
- [2] 杨宏. 湍流预混火焰结构的测度分形研究 [J]. 燃烧科学与技术, 1998, 4(1): 75-80
- [3] 杨宏. 湍流预混火焰的时间和空间分形特性研究 [J]. 工程热物理学报, 1998, 19(2): 261-264.
- [4] 蒋德明. 预混湍流火焰结构的分形特征 [J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(2): 22-24.
- [5] 张济忠. 分形 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.

(渠 源 编 辑)

action mechanism of wet calcium base sorbent. The test results indicate that as compared with traditional single-level water spray the multi-level water spray can result in a more uniform temperature distribution in the fluidized bed, a relatively large reduction of the approach saturation temperature ΔT , a marked increase in desulfurization efficiency and a more stable and reliable operation of the system. A mass spectrographic analysis and an electronic microscope analysis have shown that after the reaction of SO_2 with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a reaction product layer was formed on the surface of the desulfurizing agent, which alleviates the further reaction between SO_2 and the desulfurizing agent. **Key words:** circulating fluidized bed, flue gas desulfurization, multi-level water spray, approach saturation temperature ΔT , desulfurization efficiency, electronic microscope analysis

大型电站锅炉煤种适应性分析实例 = **Analysis of the Adaptability of Large-sized Power Plant Boilers to Various Kinds of Coals** [刊, 汉] / SUN Lu-shi, LU Ji-dong, ZENG Li, et al (State Key Laboratory for Coal Burning Research under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(4): 353 ~ 355

Combustion characteristics of 12 kinds of coal, intended for an existing 670 t/h boiler, have been analyzed. A correlation of these characteristics with the boiler construction features was conducted to evaluate the adaptability of these coals to the above-mentioned boiler. This evaluation aims at providing a basis for deciding on and exploring new sources of coal in order to ensure the safe and economical operation of the boiler. **Key words:** combustion characteristics, boiler constants, adaptability of various kinds of coal to boilers

垃圾焚烧灰渣的成分分析及其熔融特性 = **Component Analysis of Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) Ash and Its Melting Characteristics** [刊, 汉] / YAN Chang-feng, LIN Bo-chuan, CHEN En-jian, CHEN Yong (Thermo-fluid Process Lab of Guangzhou Energy Conversion Research Institute under the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, China, Post Code: 510070) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(4): 356 ~ 358, 369

For a municipal solid-waste incineration (MSWI) boiler the ash melting characteristics of municipal solid waste (MSW) are one of the most important factors, which have a decisive influence on the harmful effect of ash deposited on heating surfaces. Through the measurement and determination of MSW ash components and the ash melting point a systematic analysis was performed of the relation between the MSW ash melting characteristics and ash components. Furthermore, the difference between MSW ash and coal ash of low-melting point in respect of melting characteristics and components is also identified. On the above basis some proposals are put forward to improve MSW combustion in general. **Key words:** municipal solid waste, ash burning, component analysis, melting characteristics

径向分层旋流燃烧器燃烧可视化研究 = **Visualization Study of Coal Combustion in a Radially Stratified Swirl-type Burner** [刊, 汉] / HE Lei, FAN Wei-dong, ZHANG Ming-chuan, WU Jiang, et al (Department of Energy Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(4): 359 ~ 362, 374

With the help of an image acquisition and processing system a visualization study was conducted of the coal gas flame of a radially stratified swirl-type burner. The quantitative analysis of a separated flame front was then performed through the use of a fractal theory. The results of analysis indicate that it is possible to truthfully describe the spatial and geometric characteristics of the flame front by using a fractal dimension, thus providing an effective means for an in-depth study of the effect of flame structural shape on the mixing of fuel and air. **Key words:** image processing, swirl-type burner, fractal dimension, visualization

不同热天平煤粉燃烧特性试验差异的原因分析 = **An Analysis of the Factors Causing Differences in the Test Results of Pulverized coal Combustion Obtained from Using Different Thermobalances** [刊, 汉] / ZHU Qun-yi, QIN Yu-kun, WU Shao-hua (School of energy Science & Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), XU Yan (Heilongjiang Provincial Electric Power School, Harbin, China, Post Code: 150020) //