

# 基于小波变换的气化燃烧状态诊断试验研究

梁钦锋, 于广锁, 牛苗任, 于遵宏

(华东理工大学 洁净煤技术研究所, 上海 200237)

**摘 要:** 提出了一种通过压力信号分析气流床气化炉火焰气化燃烧状态的有效方法, 该方法运用尺度分解法分析炉膛压力时域信号。研究结果发现: 在点火前冷态, 没有特征频率存在; 在点火和灭火状态下, 压力信号有一阶跃变化, 信号在 0 Hz 处有一较大的冲击; 火焰剧烈波动时, 存在 2 Hz 左右的特征频率; 火焰稳定燃烧时, 存在着一个 40 Hz 左右的特征频率。这个现象表明, 压力信号在一定频段内的分布与气化炉内火焰燃烧的状态密切相关, 随着火焰燃烧稳定性加强, 压力信号向高频方向移动。

**关 键 词:** 小波变换; 气流床气化炉; 火焰; 燃烧诊断

中图分类号: TK16 文献标识码: A

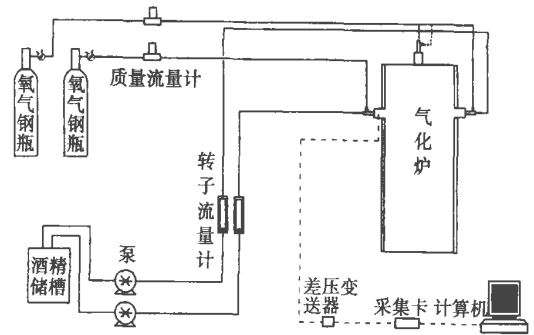


图 1 试验流程图

## 1 引 言

煤炭气化是对煤炭进行化学加工的重要方法。高压、大容量气流床气化技术, 显示了良好的经济和社会效益, 代表着发展趋势, 是现在最清洁的煤利用技术之一。气流床气化具有较大的煤种与粒度适应性和更优良的技术性能, 是煤基大容量、高效洁净的燃气与合成气制备的首选技术<sup>[1]</sup>。目前, 国内已投入使用或将要投入使用的气流床气化技术有 Texaco 水煤浆气化技术、Shell 粉煤气化技术以及新型(多喷嘴对置)水煤浆气化技术。气化炉是煤气化技术中的关键设备。若气化炉内火焰燃烧稳定性下降, 会出现燃烧噪音增加、气化效率降低及熄火等现象, 对安全性和经济性产生严重的影响。

目前, 炉膛压力探测是锅炉燃烧诊断的主要手段之一, 通过建立锅炉内压力与燃烧之间的对应关系来对燃烧状态进行判断<sup>[2]</sup>。但用气化炉压力信号来表征气化炉内火焰燃烧状况的研究还未见报导, 本文旨在通过试验建立气流床气化炉内的压力与火焰燃烧状态之间的关系, 从而为气流床气化炉工业中的正常运行提供一种表征手段。

## 2 试验系统

采用工业酒精为气化介质, 氧气为气化剂。气流床气化炉是由石英玻璃制成, 简单试验流程见图 1。试验在常压下进行。采用单喷嘴顶喷和双喷嘴对喷两种气化燃烧方式。炉内压力信号采用半无限管方式获取, 结构见图 2。在这种结构下, 管内只有行波存在, 不会产生驻波, 没有谐振效应, 因此测量感

头具有平坦的频率响应特性<sup>[3]</sup>。

根据采样定理的要求<sup>[4]</sup>: 采样频率  $f_s$  应该大于或者等于信号频谱最高频率  $f_c$  的两倍, 即  $f_s \geq 2f_c$ 。通过查阅相关文献获知一般燃烧炉内的气压波动幅值较小, 而且频率较低(0~30 Hz)。本文采用 180 Hz

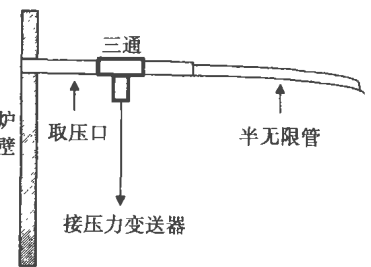


图 2 半无限管安装方式

收稿日期: 2004-12-09; 修订日期: 2005-07-14

基金项目: 上海市启明星计划基金资助项目(03QF14013); 国家高技术研究发展计划基金资助项目(2003AA521020)

作者简介: 梁钦锋(1978-), 男, 广西柳州人, 华东理工大学助教。

采样频率。

### 3 试验研究方法和研究主要结果

#### 3.1 小波变换

由于炉膛压力在稳定与非稳定气化燃烧下有不同的表现, 所以要求选用的小波函数应该具有较好的“变焦”特性, 这样才能同时满足平稳信号和非平稳信号分析的要求。鉴于时-频局部化特性与小波函数的紧支性密切相关, 本文采用 Daubechies 小波对炉膛压力信号进行了尺度的分解, 并且对每一分解尺度都进行了信号的频谱分析。

1988 年, 小波理论的奠基者之一 Daubechies 根据多分辨率分析框架构造出紧支撑的正交小波。它在数字信号的小波分解中提供了更实际、更有效的数字滤波器。由文献[5]可得:

$$\begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} \varphi\left(\frac{t}{2}\right) = \sum_k h_k \varphi(t-k) & k \in Z \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \Psi\left(\frac{t}{2}\right) = \sum_k g_k \Psi(t-k) & k \in Z \end{cases} \quad (1)$$

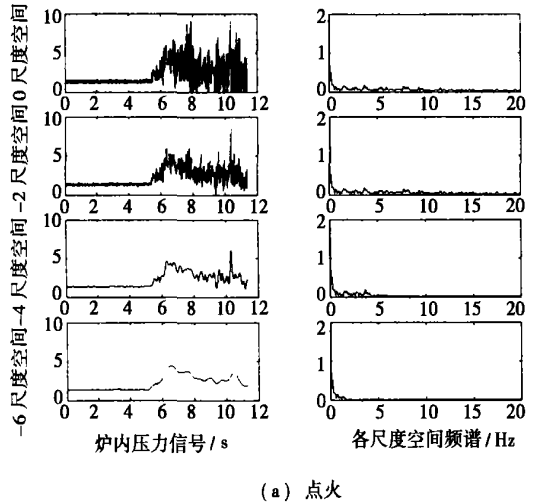
式中:  $\varphi(t)$ —尺度函数;  $\Psi(t)$ —小波函数;  $h_k$ —低通滤波器冲击响应;  $g_k$ —高通滤波器冲击响应。Daubechies 小波是由低通滤波器  $h$  的冲击响应  $h_n (n=0, 1, \dots, 2n-1)$  给出的, 本文采用 Daubechies8 小波。

和-6 分别表示经过小波变换取出高频信号之后在尺度 2、4 和 6 上的炉膛压力变化趋势。

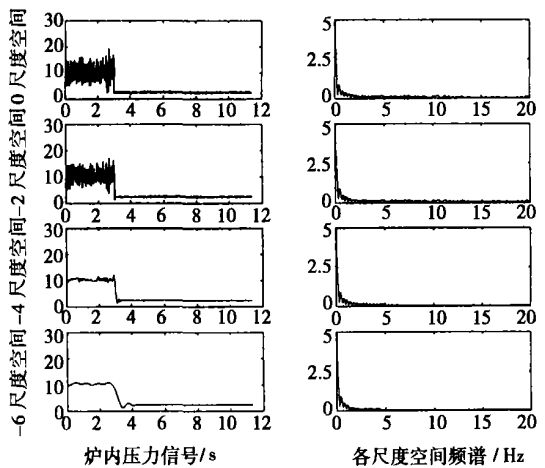
#### 3.2.1 炉膛压力波动状态

炉内压力波动可分为两种情况。一种是燃烧剧烈波动; 另一种为燃烧极端不稳定工况, 如点火、灭火。

炉内火焰燃烧不稳定会造成炉膛压力剧烈波动, 图 3 表示的就是利用酒精进行单喷嘴顶喷来实现气化燃烧剧烈波动对炉膛压力的影响。



(a) 点火



(b) 灭火

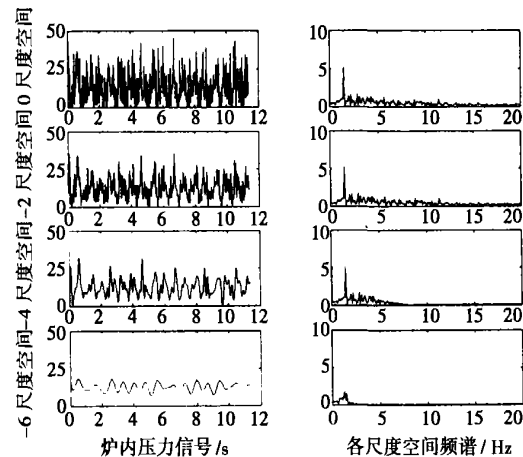


图 3 燃烧剧烈波动状态下炉内压力分析

图 4 点火、灭火状态炉内压力分析结果

#### 3.2 研究主要结果

火焰燃烧情况直接地反映在炉膛压力变化上, 根据试验中气化火焰燃烧的情况, 将其分为炉膛压力波动状态和炉膛压力稳定状态两种情况来描述。

通过石英玻璃炉体可以看到炉内的火焰存在着一个熄灭→重新点燃→熄灭的周期过程, 这个过程的周期为 0.7 s 左右。从大尺度时域下炉膛压力信号来看, 炉内压力类似于正弦函数上下进行波动, 这种趋势与火焰燃烧情况相互对应; 从频域上看, 在这

分析结果中 0 尺度表示原始压力信号, -2、-4

种火焰燃烧不稳定情况对应存在着一个约为 2 Hz 的燃烧特征频率。

从图 4(a)中可以看到, 点火时在时域上存在一个压力的阶跃。炉膛压力从点火前冷态下波动较小, 当火焰点燃时, 炉内压力突然升高, 存在一个向上凸进的波峰, 而后有一些下降, 但波动较为剧烈; 频域在 0 Hz 附近有一冲击现象, 这与燃烧剧烈波动时在 2 Hz 处出现特征频率有明显的区别。在图 4(b)中也发现灭火时频域在 0 Hz 附近也有一冲击现象, 时域上存在一个明显的向下凹进的波谷。在点火频谱与灭火频谱极为相似的情况下, 这个在时域上存在的凹凸方向不同的波, 可以作为点火与灭火的判断依据。

点火和灭火过程是火焰燃烧极端不稳定状态, 炉膛压力信号与燃烧剧烈波动相比有明显的不同。

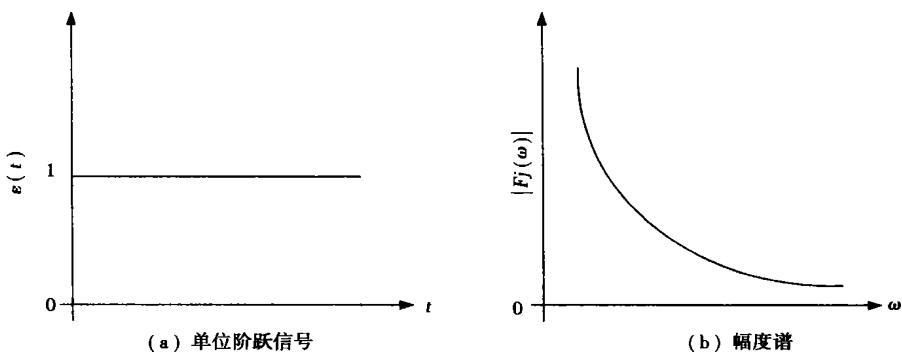


图 5 单位阶跃信号及其幅度谱

由于点火和灭火过程必然会导致炉膛压力在短时间内的迅速上升或下降, 而这种阶跃式变化即造成了压力谱中低频冲击的产生。文献[6]用阶跃信号代替压力的阶跃式变化, 通过分析阶跃信号的频谱特性来解释气化炉内点火和灭火过程的频谱特性。通过对单位阶跃信号的  $\epsilon(t)$  Fourier 变换有:

$$\epsilon(t) \leftrightarrow \pi \delta(\omega) + \frac{1}{\omega} e^{-j\frac{\pi}{2}} \tag{2}$$

单位阶跃信号及其 Fourier 变换如图 5 所示。

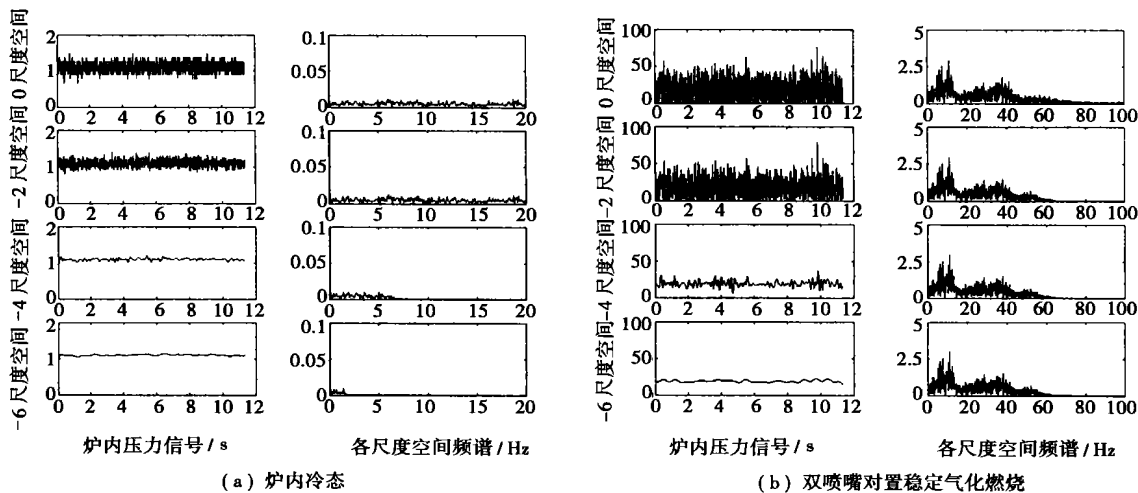


图 6 压力稳定状态下炉内压力分析结果

### 3.2.2 炉膛压力稳定状态

从图 6 中可以看到, 处于压力稳定状态并不代表炉内压力没有任何的波动, 从不同的分解尺度下可以更清楚地了解炉内压力信号变化情况。在低尺度下, 可以看到炉膛压力波动频率较高, 呈现出一种杂乱无章的趋势; 在大尺度下, 去除了原始信号的高频部分, 压力变化平缓。

在冷态工况下, 气化炉内还没有火焰, 炉膛温度为常温, 炉膛压力能量不高, 因此其谱值也较低。在频域内没有明显的特征峰, 整个能量在频率内均匀地分布。而在稳定燃烧情况下, 炉膛压力较点火前冷态压力要高, 存在一个约 40 Hz 左右的特征频率。

(下转第 516 页)

粉提供了更多的由外在矿物质直接转化形成的细粒子,一方面互相凝并,另一方面成为蒸汽凝结的核粒子,所以产生了较多的  $0.87 \sim 1.4 \mu\text{m}$  之间的 PM。图 5 中 g、h 的 PM 与图 4 中的情况相似。

### 3.3 实验结果对工程应用的意义

$R_{90}$  是工程应用中用以衡量煤粉粗细程度的一个指标。 $R_{90}$  越小,表明煤粉越细; $R_{90}$  越大,煤粉越粗。煤粉细,燃烧速度加快,燃烧完全,机械不完全燃烧热损失比较小。但是,煤粉磨得越细,消耗的电能越多,磨煤机的出力越大,制粉系统的磨损也增大。也就是说,细煤粉的燃烧性能好,但经济性能差;相反粗煤粉经济性能好,但燃烧性能稍差。所以煤粉存在一个经济细度。

已有的研究表明,除尘设备对  $1 \mu\text{m}$  以下的细颗粒的捕集效率是很低的,而这部分粒子的来源主要是由煤燃烧中无机组分的气化和凝结形成的,而其中大部分是重金属元素。实验也证明,有毒元素易于凝结到亚微米颗粒的表面。因此,逃逸出除尘设备的颗粒物恰恰是富集有大量有毒元素的细颗粒。通过上述对实验结果的分析,我们已得出结论:细煤粉比粗煤粉产生更多的细颗粒物,并且包括有大量的  $1 \mu\text{m}$  以下的亚微米颗粒。而粗煤粉产生的亚微米颗粒量甚少。换言之,细煤粉燃烧比粗煤粉燃烧对大气环境造成的影响更恶劣。从可持续发展的角度来看,在工程应用的煤粉制备时,除了考虑煤粉的经济细度,还应当考虑煤粉的环保细度。

## 4 结 论

(上接第 508 页)

## 4 结 论

炉膛压力信号包含着丰富的燃烧状况信息,通过对压力信号的处理确实可以有效地反映气化炉内的燃烧工况。

炉膛压力在频域上的分布与火焰燃烧状况有密切的关系。点火前冷态下,没有明显的特征频率;在点火、灭火等极端不稳定燃烧工况时,压力信号在 0 Hz 处存在一个冲击现象,这个冲击现象可以用单位阶跃信号来解释,可以利用压力波的凹凸方向不同来判断是点燃还是停车;燃烧剧烈波动的特征频率介于稳定燃烧与点火(灭火)之间,约为 2 Hz;当火焰燃烧稳定时,

(1)从形成的一次颗粒物的量上来说,细煤粉燃烧比粗煤粉燃烧产生更多的细颗粒,尤其是产生了大量的亚微米颗粒。而粗煤粉燃烧形成的亚微米颗粒甚少。

(2)从形成一次颗粒物的本质上来说,细煤粉中的矿物质更多的以外部矿物质的形式存在,在燃烧过程中直接转化形成 PM。同时也有更多的小粒径的煤粉在燃烧中破碎,形成细的灰颗粒物,使得细煤粉燃烧后较小粒径的 PM 的相对含量较大。另外,煤粉粒径的减小降低了金属元素在煤粉内部的传质阻力,蒸发量增大,形成了大量的  $1 \mu\text{m}$  以下的亚微米颗粒。

(3)从形成的一次颗粒物的外观形貌来看,两者有很大的不同。主要是由二者形成的途径各异造成的。粗煤粉产生的颗粒物是由外部矿物质直接转化或破碎形成的。而细煤粉生成的颗粒,包含了蒸汽的表面凝结以及细颗粒的凝并和聚结等过程。

(4)细煤粉燃烧比粗煤粉燃烧对大气环境造成的影响更恶劣。工程应用的煤粉制备中,应考虑煤粉的环保细度。

### 参考文献:

- [1] SHEMWEIL BROOKE E, LEVENDIS YIANNIS A. Particulates generated from combustion of polymers(plastics)[J]. *Air & Waste Manage Assoc* 2000 50: 94-102.
- [2] FLAGAN R G, FRIENLANDER S K. Particle formation in pulverized coal combustion a review [A]. *In Recent developments in Aerosol Science* [C]. D T Shaw Ed. New York: Wiley, 1978. 25-59.
- [3] SENIOR CONSTANCE L, HELBLE JOSEPH J, SAROFIM ADEL F. Emissions of mercury, trace elements, and fine particles from stationary combustion sources [J]. *Fuel Processing Technology*, 2000 65/66: 262-288.

炉膛压力信号在 40 Hz 出现一个特征频率。

### 参考文献:

- [1] 于广锁,牛苗任,王亦飞,等.气流床煤气化的技术现状和发展趋势[J]. *现代化工*, 2004, 24(5): 23-26.
- [2] 高翔,骆仲决,陈亚非,等.应用微压探测诊断燃烧状况的试验研究[J]. *动力工程*, 1998, 18(4): 27-31.
- [3] 程显辰.脉动燃烧[M].北京:中国铁道出版社,1994.
- [4] 应怀樵.波形和频谱分析与随机数据处理[M].北京:中国铁路出版社,1993.
- [5] DAUBECHIES I. Ten lectures on wavelet [M]. Pennsylvania: SIAM Philadelphia, 1992.
- [6] 王一清.基于谱分析和小波交换的燃烧稳定性监测与诊断方法的研究[D].南京:东南大学,2001.

composite fluidization mode, which can adapt to boiler load variation. Moreover, a PDA (Phase Doppler Anemometer) measurement system was employed to test the gas-solid two-phase flow field under this kind of fluidization mode. As a result, the gas-solid tangential speed and concentration distribution were obtained under the condition of a change in swirl airflow and an imaginary tangential radius in the circulating fluidized bed. Test results indicate that the tangential velocity in the composite-fluidization circulating fluidized bed will increase with an increase in radius and the gas-solid tangential slip speed is higher than that of the straight flow fluidization. There will also be an increase in concentration in the desulfurizer and a higher intensity in internal circulation, resulting in a corresponding increase in desulfurization efficiency.

**Key words:** circulating fluidized bed, composite fluidization, tangential velocity, internal circulation

旋涡式低温煤粉燃烧器的实验及其数值研究 = **Experimental and Numerical Study of a Swirl-type Low-temperature Pulverized-coal Burner** [刊, 汉] / ZHU Bo, WANG Xiao-han, YAN Chang-feng, et al (Guangzhou Institute of Energy Conversion under the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, China, Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(5). — 501 ~ 505

Based on the principle and flow field organization of air staged combustion aimed at reducing  $\text{NO}_x$  emissions the authors have designed a swirl-type low-temperature pulverized-coal burner featuring low  $\text{NO}_x$  emissions. By employing an experimental and numerical method a study was conducted of its flow field characteristics. The results of the study indicate that there is at the lower portion of the burner an intensive swirl flow zone, which can contribute to the formation of a reduction and burn-out zone required by the grading of air. As regards the primary and secondary air feeding location and mode there exists for the flow field organization an optimized proportioning option. The numerical simulation of a two-phase flow motion in the burner based on a RNG  $k-\epsilon$  model has reproduced the experimental results of the flow field, reflecting the motion law of particulates of various sizes in a zoned gas-flow field. **Key words:** swirl-type burner, coal combustion, air staged combustion, low  $\text{NO}_x$  emissions

基于小波变换的气化燃烧状态诊断试验研究 = **Experimental Investigation of the Diagnosis of Gasified Combustion Status of a Wavelet-based Transformation** [刊, 汉] / LIANG Qin-feng, YU Guang-suo, NIU Miao-ren, et al (Research Institute of Clean Coal Technology under the East China University of Science & Technology, Shanghai, Post Code: 200237) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(5). — 506 ~ 508, 516

An effective method is proposed for analyzing through pressure signals the flame gasified combustion condition of an entrained flow gasifier. Under this method a scalar decomposition approach has been utilized to analyze furnace pressure time-domain signals. A study has revealed that in a cold state prior to ignition there exists no characteristics frequency. Under the condition of ignition and flame-extinction the pressure signals experience a step change with the signals at 0 Hz being subjected to a relatively great shock. In time of flame intensive fluctuations there exists a characteristic frequency of about 2 Hz. With the flame in a stable combustion state there will be a characteristic frequency of about 40 Hz. The above phenomenon indicates that within a certain range of frequencies the pressure signal distribution is closely related to the flame combustion condition in the gasified furnace. With the strengthening of flame combustion stability the pressure signals will shift in the direction of higher frequencies. **Key words:** wavelet transformation, entrained flow gasifier, flame, combustion diagnosis

中温下热解对半焦燃烧反应性的影响 = **The Impact of Medium-level Temperature Pyrolysis on Semicoke Combustion Reactivity** [刊, 汉] / LIU Yan-xia, LU Jun-fu, LI Yong, et al (Department of Thermal Energy Engineering under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(5). — 509 ~ 512

By employing the method of thermogravimetric analysis and powder X-ray diffraction measured respectively were the combustion reactivity and structural changes of the semicoke of two low-rank bituminous coals and one type of anthracite during the process of pyrolysis at 400 ~ 1400 °C. The cause of the variation in reactivity of the low-rank coals was also dis-