

# 撞击气化火焰边缘的分形特性

梁钦锋, 牛苗任, 于广锁, 王辅臣

(华东理工大学洁净煤技术研究所, 上海 200237)

**摘 要:** 气化炉是 IGCC 发电系统的关键设备, 在试验中采用火焰摄像系统拍摄了多喷嘴对置气化炉内撞击气化火焰图像, 用像素点覆盖法计算了撞击气化火焰边缘的分形维数, 提供了一种有效判断撞击气化火焰燃烧状态的方法。试验结果表明, 撞击气化火焰边缘曲线具有分形特征。撞击火焰的边缘分形维数在点火阶段逐渐降低; 从两喷嘴撞击向四喷嘴撞击过渡时火焰边缘曲线分形维数逐渐增大; 随着操作负荷的增大, 分形维数增大, 但两喷嘴和四喷嘴撞击火焰之间的分形维数相差逐渐减小。

**关 键 词:** IGCC; 撞击; 气化; 火焰; 分形特征

中图分类号: TK611.3 文献标识码: A

## 引 言

整体煤气化联合循环(Integrated Coal Gasification Combined Cycle, 简称 IGCC)是把高效的联合循环总能系统和洁净的燃煤技术结合起来的先进发电系统。该技术自 20 世纪 70 年代开始研发, 有些技术已完成了大型商业化的示范阶段, 充分证明了该技术是用煤发电方法中环保效果最好的技术之一, 并具有进一步提高效率的潜力, 还可为将来降低 CO<sub>2</sub> 排放创造先决条件以及为发展多联产项目奠定较好的基础<sup>[1~2]</sup>。

煤气化装置是 IGCC 发电系统的关键设备, 它直接影响发电效率、系统的可靠性及可用率、投资和发电成本等。高压、大容量气流床气化技术是现在最先进的煤气化技术之一, 目前, 国内已投入使用的有 Texaco 水煤浆气化技术、Shell 粉煤气化技术以及由华东理工大学等单位研发、具有自主知识产权的新型(多喷嘴对置)水煤浆气化技术。多喷嘴对置气化炉是新型水煤浆气化技术中的关键设备, 炉内火焰是表征气化燃烧状态稳定与否最直接的反映, 对撞气化火焰稳定性下降, 会导致耐火砖的烧蚀、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。

近几年来, 随着计算机技术的不断发展, 国内外的研究者越来越多地把眼光投向了可视的燃烧检测控制系统上。通过对火焰图像的分形处理来诊断火焰燃烧状态及数字图像处理, 可以对火焰燃烧锋面以及内部结构特征进行量化的分析, 并依据分形维数等量化的参数来识别火焰燃烧的状态<sup>[3~6]</sup>, 但对撞击气化火焰的研究仍然很少, 有必要找到一种定量表征其气化燃烧状态的方法。

## 1 试验系统

为研究撞击气化火焰情况, 搭建了以不锈钢为材质的热态模试平台。该平台用氧气作为氧化剂, 柴油作为气化介质。气化喷嘴为双通道, 氧气由氧气钢瓶提供, 并经气体质量流量计控制计量后进入喷嘴外通道; 柴油经齿轮泵输送入喷嘴中心通道; 炉顶部垂直安装有 CCD 摄像机拍摄对撞气化火焰的情况, CCD 摄像系统包括水冷装置和气体吹扫装置两种保护系统, 信号经视频分配器分配后一路进入现场显示器, 另一路进入电脑显示并存储(见图 1)。

## 2 试验研究方法和研究主要结果

### 2.1 图像分割<sup>[7~9]</sup>

图像分割是指根据灰度、彩色、空间纹理、几何形状等特征把图像划分成若干个互不相交的区域, 使得这些特征在同一区域内, 表现出一致性或相似性, 而在不同区域间表现出明显的不同。本文通过对火焰主体的提取来获得对撞气化燃烧火焰边缘。

图像阈值化分割是一种最常用, 同时也是最简单的图像分割方法, 它通过设置一个分割阈值  $T$ , 凡图像灰度值  $f(x, y)$  大于等于阈值  $T$  的归为一类, 剩下的为另一类, 其公式表示为:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1; f(x, y) \geq T \\ 0; f(x, y) < T \end{cases} \quad (1)$$

阈值分割是数字图像处理的关键, 直接影响后面的分析结果, 常见的方法有最大方差自动取阈法、

模糊阈值图像分割、最优阈值分割和直方图选取阈值分割等。本文采用最大方差自动取阈法和直方图选取阈值分割相结合。

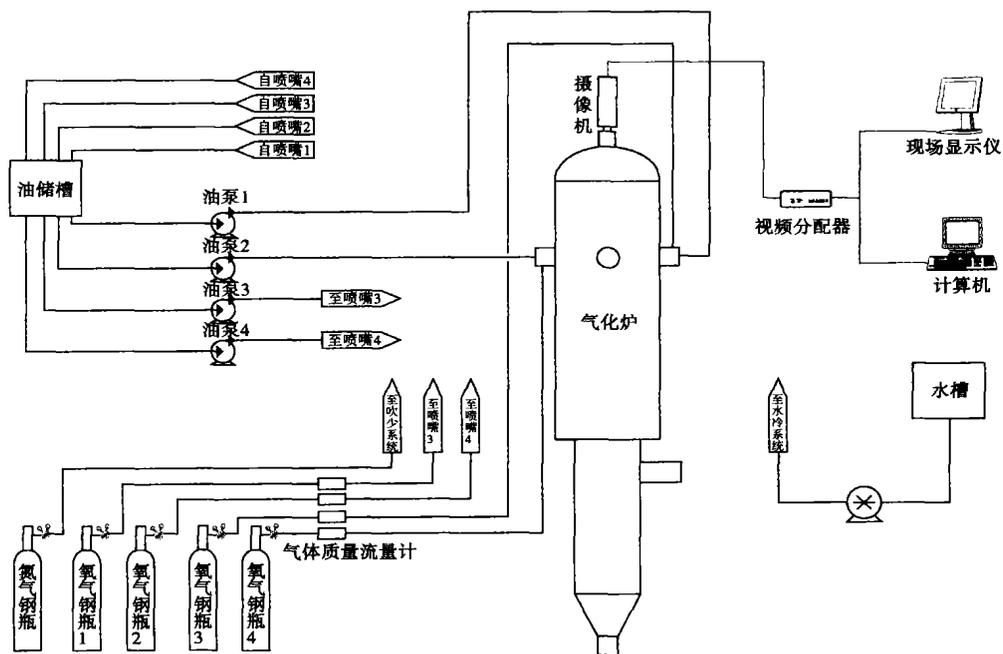


图1 试验简图

最大方差自动取阈法是设定一灰度阈值  $T$ , 图像被该阈值分为区域 1 与区域 2, 同一区域常常具有灰度相似特性, 而当这两个区域间灰度差较大时, 两个区域的平均灰度与整幅图像平均灰度之差也较大, 区域间的方差是描述这种差异的有效参数。其计算区域间方差表达式为:

$$\sigma^2 = \theta_1(t)\theta_2(t)[\bar{f}_1(t) - \bar{f}_2(t)]^2 \quad (2)$$

其中:  $\theta_1(t)$ 、 $\theta_2(t)$ —阈值为  $t$  时各自区域与整幅图像的面积比;  $\bar{f}_1(t)$ 、 $\bar{f}_2(t)$ —阈值为  $t$  时各自区域的平均灰度值。当被分割的两区域间方差达最大时, 被认为是两区域的最佳分离状态。由此确定分割阈值  $t$ , 即:

$$t = \max[\sigma^2(t)] \quad (3)$$

直方图选取阈值分割是根据图像由目标主体和背景构成, 在目标主体或背景内部的相邻像素之间是高度相关的, 且目标和背景交界处的像素在灰度级上有明显的突变位置, 可以根据其来选取分割阈值  $t$ 。

采用最大方差自动取阈法有时会把摄像机拍摄时产生的光晕及碳黑辐射产生的光也作为火焰的主体, 而火焰的灰度直方图有明显的低谷。因此两种方法的结合可以很好地分割火焰图像, 能充分地反

映出火焰图像的几何特征。

### 2.2 分形维数

分形理论是由 Mandelbrot 在 20 世纪 70 年代首先提出来的。分形理论是研究自然界非线性系统中出现的不光滑和不规则的几何形体, 认为它们虽然没有一定特征长度, 但都具有自相似的结构。自然界里的分形, 其自相似性并不是严格的, 而是统计意义下的自相似性, 这种分形称为无规分形。炉膛火焰就属于这一类。而其中用来描述物体分形特征的分形维数则可以很好地反映物体表面的不规则程度, 表面结构越复杂分形维数越大<sup>[10]</sup>。

求取图像分形维数的方法有很多, 最为常用的方法有 Peleg 法、Pentland 分数布朗随机场模型法 (FBR)、“盒子”维法等<sup>[11-13]</sup>。本文采用“盒子”维法中的像素点覆盖法计算火焰边缘分形维数。该方法把获得的火焰边缘图像数据文件依次划分为若干块, 使得每一块的行数与列数均为  $k$ , 把所有那些包含零的块的个数记作  $N_k$ , 通常取  $k=1, 2, 3, \dots, n$ , 即以 1 个、2 个、 $\dots$ 、 $m$  个像素点的尺寸为边长作块的划分, 这样就可以得到盒子数  $N_1, N_2, N_4, \dots, N_m$ , 在坐标平面

内, 以最小二乘法用直线拟合数据点 ( $-\log \hat{Q}$ ,  $\log N_k$ ), 所得到的直线的斜率  $D$  就是该图像的物理计盒维数。根据分形维数定义, 块的尺寸越小, 计算图像的维度越精确。因此, 可以取一个像素点的尺寸作为尺度下限, 但是为了避免奇异情况发生, 在计算分形维数的过程中, 要求有适当的测试点, 至于尺度上限可根据具体情况和具体要求进行确定。

2.3 研究主要结果

图 2 为某一工况下的多喷嘴对置撞击火焰灰度分布曲线, 图示曲线从内到外按照灰度分层而得到。图像灰度的分布与火焰的辐射强度是一一对应的, 从而可以将这些曲线看成是一种当量温度等值线, 它们描述了射流火焰的核心区及边界区的变化过程。从图中还可以发现, 射流的整体结构被包罗在边界内部, 因此可以认为灰度等值线内部的区域面积反映了某一温度范围内的火焰结构, 直观上看, 火焰的边界是非常复杂的, 但它们都形成了一个完整、封闭的几何投影面。提取撞击气化火焰边缘曲线 (见图 3), 可以看到撞击火焰边缘曲折, 必须找到一种定量判断撞击火焰边缘曲折程度参数, 分形维数就恰恰满足了这个要求。

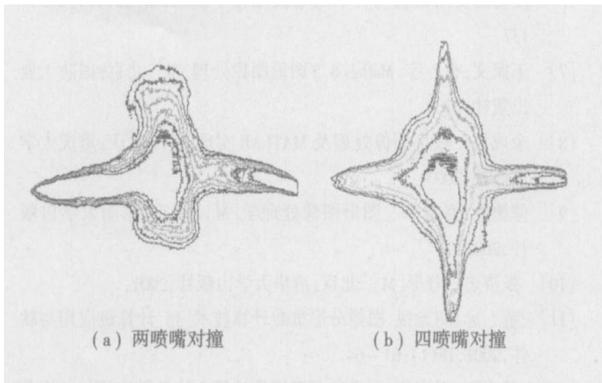


图 2 撞击火焰灰度图像

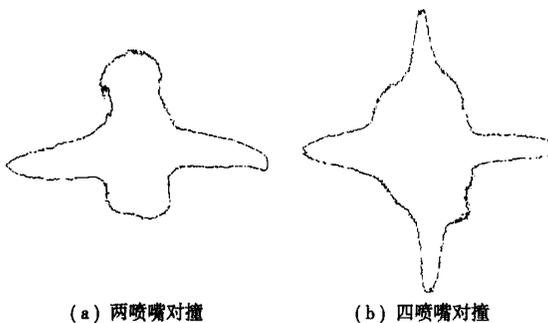


图 3 撞击火焰边缘曲线

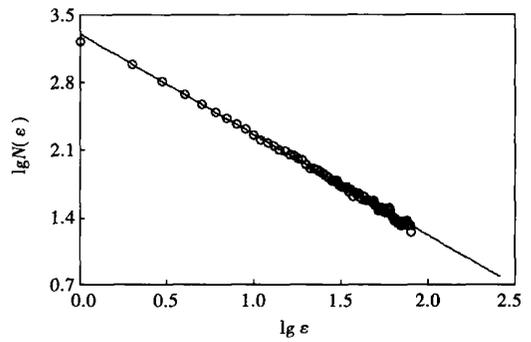


图 4 火焰边缘曲线分维数

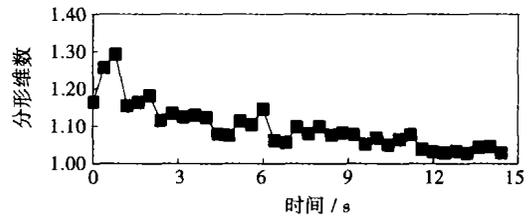


图 5 点火阶段分形维数

通过计算图 4 中拟合直线斜率, 可得撞击气化火焰边缘分形维数。从图 5 中可以看到, 刚点火时火焰边缘曲线分形维数较大, 达到 1.20 以上, 随着撞击气化火焰达到稳定状态, 分形维数相应地降低到 1.10 以下。两喷嘴转变为四喷嘴时, 从图 6 中可以看到, 随着撞击剧烈程度提高, 撞击火焰边缘分形维数从 1.02 增大为 1.04。当进行稳定的两喷嘴和四喷嘴撞击气化燃烧时, 分形维数变化趋势分别见图 7、图 8 和表 1。从图 7 和图 8 中可知, 随着负荷增加, 撞击火焰边缘分形维数增大, 这是因为随着负荷的增加, 喷嘴的出口速度增大, 在喷嘴平面处火焰的撞击加剧, 表现为火焰边缘更为曲折。表 1 所示随着负荷的增加, 两喷嘴和四喷嘴撞击火焰边缘平均分形维数相差减小, 由于两喷嘴撞击火焰的自由度较四喷嘴撞击火焰大, 在较大负荷时, 两喷嘴撞击和四喷嘴撞击火焰边缘的曲折程度相似。

表 1 撞击火焰平均分形维数

火焰形式	负荷 1	负荷 2	负荷 3
两喷嘴撞击	1.014	1.042	1.064
四喷嘴撞击	1.038	1.049	1.066
差值	0.024	0.007	0.002

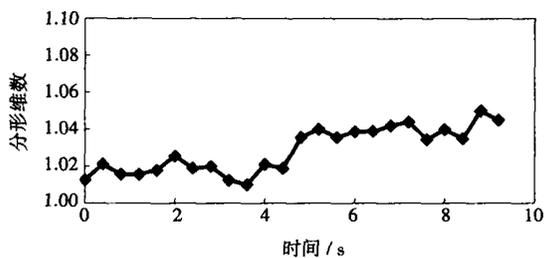


图 6 两喷嘴转换为四喷嘴阶段分形维数

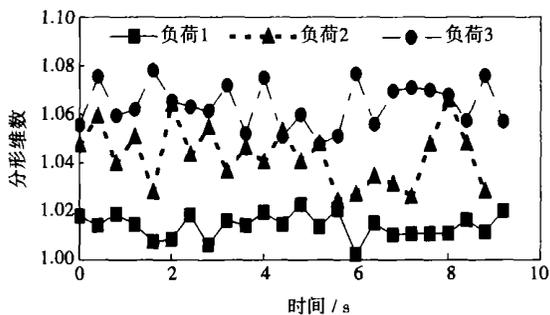


图 7 两喷嘴气化燃烧不同负荷下的分形维数

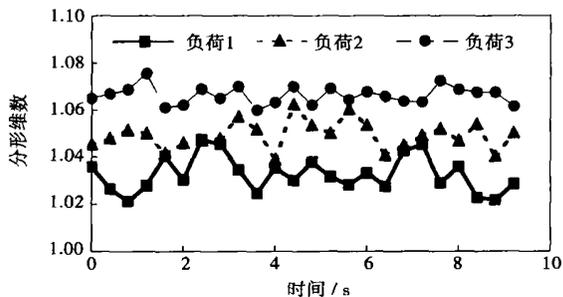


图 8 四喷嘴气化燃烧不同负荷下的分形维数

### 3 结 论

(上接第 45 页)

分和灰分与低位发热量之间的关系, 由此提出两种煤质发热量在线校正的方法, 以此优化风煤配比, 为燃烧优化提供了思路。

#### 参考文献:

[1] 李海青, 黄志尧. 软测量技术原理及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.

[2] 陈坚红, 李 蔚, 盛德仁, 等. 一种火电机组在线性能计算中的数据融合方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 152-156

[3] 凌林本, 陈超英. 多传感器数据融合时权的最优分配原则[J].

通过对撞击气化火焰边缘曲线的分析, 发现其具有分形特征。撞击火焰的边缘分形维数在点火阶段呈现逐渐降低的趋势; 从两喷嘴撞击向四喷嘴撞击过渡时, 由于撞击程度加剧, 火焰边缘曲线分形维数逐渐增大; 随着操作负荷的增大, 分形维数增大, 但两喷嘴和四喷嘴撞击火焰之间的分形维数相差逐渐减小, 这为定量判断撞击气化火焰燃烧状态提供了一种有效的方法。

#### 参考文献:

[1] 吴 枫, 闫文艳, 阎承信. 关于开发 IGCC 煤气化装置的探讨[J]. 燃气轮机技术, 2005, 18(2): 13-17.

[2] 柴伟东, 韩万金, 林公舒. IGCC 整体煤气化联合循环[J]. 汽轮机技术, 2003, 45(4): 196-197.

[3] 杨宏, 杨 勇, 刘 勇, 等. 湍流预混火焰的时间和空间分形特性[J]. 工程热物理学报, 1998, 19(2): 261-264.

[4] WU JIANG, ZHANG MING CHUAN, FAN HAO JIE, et al. A study on fractal characteristics of aerodynamic field in low-NO<sub>x</sub> coaxial swirling burner[J]. Chemical Engineering Sciences, 2004, 59: 1473-1479.

[5] 张师帅, 周怀春, 彭 敏, 等. 基于炉膛辐射信号的电站燃煤机组燃烧控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 156-160.

[6] 姜 凡, 刘 石, 卢 钢, 等. 双色火焰检测技术用于火焰温度场的实测试验[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 133-137.

[7] 王家文, 曹 宇. Matlab 6.5 图形图像处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

[8] 余成波. 数字图像处理及 MATLAB 实现[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003.

[9] 傅德胜, 寿益禾. 图形图像处理学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2001.

[10] 张济忠. 分形[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

[11] 董 远, 胡光锐. 图像分形维数计算技术[J]. 计算机应用与软件, 2001, 18(1): 61-64.

[12] 冯志刚, 周宏伟. 图像的分形维数计算方法及其应用[J]. 江苏理工大学学报(自然科学版), 2001, 22(6): 92-95.

(何静芳 编辑)

[4] 赵 征, 曾德良, 田 亮, 等. 基于数据融合的氧量软测量研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 7-12.

[5] 邢德山, 阎维平, 陈吟颖. 煤质变化对钢球磨煤机贮仓热风送风制粉系统的影响[J]. 动力工程, 2006, 26(3): 407-411.

[6] 刘福国, 郝卫东, 韩小岗, 等. 基于烟气成分分析的电站锅炉入炉煤质监测模型[J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8(5): 441-445.

[7] 曾德良, 赵 征, 陈彦桥, 等. 500 MW 机组锅炉模型及实验分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 149-152.

(渠 源 编辑)

which flaky particles predominate. The description of particles by using fractal dimensions will show different fractal dimensions for large particles and small ones. The boundary dividing point of big and small particles is about 3.17 mm for raw coal and about 3.06 mm for cold cinder. **Key words:** fluidized bed, bed materials, coal particle, particle morphological appearance, flaky shape

循环流化床锅炉飞灰残碳的生成及其处理 = **Formation of Fly-ash Carbon Residue in a Circulating Fluidized Bed Boiler and Its Disposal** [刊, 汉] / LI Shao-hua, WANG Qi-min, XIAO Xian-bin, et al (Thermal Energy Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 52 ~ 56

Circulating fluidized bed combustion techniques have been widely used in China due to its numerous merits. However, a universal problem in operation is that the carbon content of fly-ash is much higher than generally expected. The major factors influencing the carbon content of fly ash are: coal index, coal structure and coke reaction activity, feed-coal particle diameter and structure of the circulating fluidized bed as well as other operational parameters etc. At present, the methods for reducing fly-ash carbon content mainly include: fly ash recirculation, secondary air strength enhancement and pressure-drop adjustment for a circulating fluidized bed etc. The experiments performed by the authors indicate that under the condition of a low air speed, the carbon residue in fly ash can be fully burnt up. In addition, high voltage electrostatic separation and fly-ash water activated agglomeration can also provide a new approach for utilizing carbon residue in fly ash. **Key words:** circulating fluidized bed boiler, carbon content of fly ash, low speed circulating fluidized bed, electrostatic separation, fly-ash water activated agglomeration

撞击气化火焰边缘的分形特性 = **Fractal Characteristics of an Impinging Gasification-flame Edge** [刊, 汉] / LIANG Qin-feng, NIU Miao-ren, YU Guang-suo, et al (Clean Coal Technology Research Institute under the East China University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200237) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 57 ~ 60

A gasification furnace is a key equipment item in an IGCC (integrated gasification combined cycle) power generation system. During tests, the authors have by using a flame camera system taken the pictures of impinging gasification-flames in a multi-nozzle and opposed gasification furnace. The fractal dimension of the impinging gasification-flame edge was calculated by using a pixel-covering method, providing an effective method for judging the combustion condition of the impinging gasification-flame. The test results show that the curves of the above-mentioned flame edge assume fractal characteristics. The fractal dimensions of the flame edge curve will gradually decrease during the ignition stage but increase during the process of transition from a two-nozzle impinging to a four-nozzle one. With an increase in the operational load, the fractal dimension will also increase. However, the difference between the fractal dimension of a two-nozzle and four-nozzle impinging flames will gradually diminish. **Key words:** IGCC, impingement, gasification, flame, fractal characteristics

含盐有机废液焚烧煤灰熔融特性试验研究 = **Experimental Study of Coal-ash Fusion Characteristics Obtained from the Incineration of Salty Organic Waste Liquid** [刊, 汉] / CHEN Hui-chao, ZHAO Chang-sui, CHEN Xiaoping, et al (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology under the Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 61 ~ 64, 72

Studied are the ash fusion characteristics obtained from the mixed incineration of 1. three types of coal (Yuanbaoshan-origin lignite, Cuijiagou-origin bituminous coal and Xuzhou bituminous coal, hereinafter referred to as Coal Y, Coal C and Coal X for short respectively), which have different ash fusion characteristics, and 2. chemical waste-liquid red water with different salt contents (the content of alkali metal sodium salt  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaNO}_3$  and  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  etc. in red water, hereinafter generally referred to as the salt content). The study results show that if no limestone is added, the ash fusion tem-