

# 基于相空间重构的锅炉炉膛火焰信号分析

马少华<sup>1</sup>, 华莹<sup>1</sup>, 李小白<sup>2</sup>

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110023; 2 国家消防电子产品质量监督检验中心, 辽宁 沈阳 110031)

**摘 要:**采用混沌和分形理论对实测锅炉炉膛火焰信号进行了定性分析和定量计算, 通过相空间重构得到了稳定燃烧和不稳定燃烧两种工况下燃烧火焰时间序列的相平面图和关联维。分析计算结果表明: 在稳定燃烧状态下, 火焰信号的二维相平面图比较宽, 关联维在 6.585 5~6.841 5 之间; 在非稳定燃烧状态下, 火焰信号的二维相平面图比较窄, 关联维在 5.884 3~6.090 7 之间。两种工况下, 火焰时间序列的相平面图和关联维有明显的差异, 稳定燃烧时的关联维总比不稳定燃烧时的关联维大得多, 因此, 采用关联维作为火焰燃烧状态识别的特征参数。文中所提出的燃烧诊断方法为发展新型光学式火焰检测器提供了一种行之有效的解决方案。

**关键词:**炉膛火焰; 燃烧诊断; 状态识别; 相空间重构; 关联维数; 混沌; 分形学

中图分类号: TK224.1 文献标识码: A

## 引 言

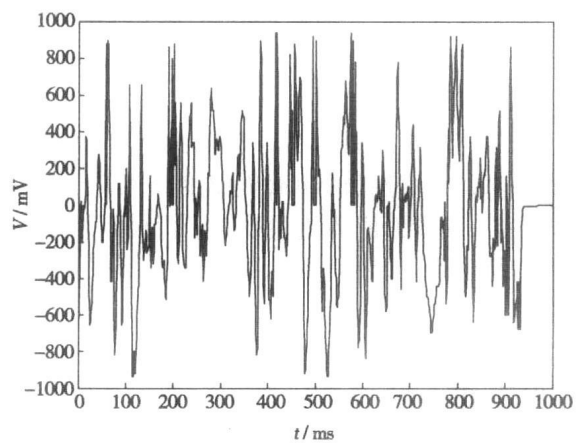
目前光学式火焰检测器应用较广, 其原理是利用光电传感器检测燃烧火焰辐射的红外线或可见光或紫外线, 根据其强度和闪烁频率来判别火焰的燃烧状态。强度反映火焰的亮度, 当火焰信号的强度高于阈值时, 判定火焰存在; 频率反映火焰的闪动, 当火焰信号的闪动频率在某一范围内时, 判定火焰稳定燃烧<sup>[1]</sup>。

采用混沌和分形理论对实测锅炉炉膛火焰信号进行了分析和处理, 得到了稳定燃烧和不稳定燃烧两种工况下火焰时间序列信号的相空间图和关联维。分析和计算结果表明: 在稳定燃烧和不稳定燃烧两种工况下, 锅炉炉膛火焰时间序列信号的二维相平面图和关联维明显不同。为此, 本文提出采用关联维作为锅炉炉膛火焰燃烧状态识别的特征参数。

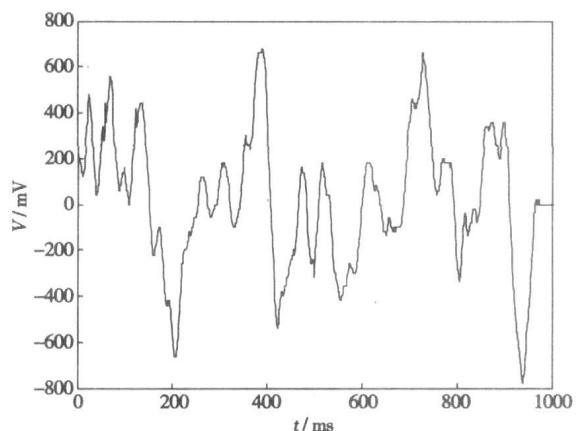
## 1 锅炉炉膛火焰时间序列信号

为分析锅炉炉膛火焰的燃烧状态, 采用对比试

验法在电厂采集了稳定燃烧和不稳定燃烧两种工况下的火焰信号。火检探头被安装在油燃烧器上方的二次风口内, 燃料为煤油。启动点火油枪, 当油火焰建立后, 记录稳定燃烧时火焰信号的变化特性。然后, 关闭油路, 当油火焰消失后, 记录不稳定燃烧时火焰信号的变化特性, 共采集了 51 组数据。



(a) 稳定燃烧



(b) 不稳定燃烧

图 1 不同燃烧工况下的火焰信号时间序列

采样频率为 1 kHz, 采样点数为 1 024, A/D 转换

收稿日期: 2006-09-18; 修订日期: 2006-12-11

作者简介: 马少华(1963-), 女(回族), 辽宁沈阳人, 沈阳工业大学教授。

器的分辨率为 10 bit, 图 1 为其中 1 组样本的时间序列图。由图 1 可以看出, 锅炉炉膛火焰信号属于非平稳瞬时信号, 不具有周期性, 火焰信号无明显变化规律, 类似噪声。由于火焰信号的强度和闪动频率一直处于波动之中, 通常采用傅立叶变换或功率谱分析提取火焰燃烧状态识别的特征参数。

## 2 炉膛火焰信号的相空间图

混沌运动是自然界中普遍存在的一种运动行为, 混沌系统的典型特征之一是对初值敏感<sup>[2]</sup>, 锅炉炉膛火焰信号显然具有这一特征。为此, 采用混沌理论的相空间重构法对火焰时间序列信号进行分析。相空间重构是分析系统(混沌系统)动力行为的常用方法, 其原理是对观测到的时间序列信号进行处理, 将其在某些固定的时间延迟点(如 1 s、2 s 前等)上的测量作为新维处理, 将延迟值看成是新的坐标<sup>[3]</sup>。重复这一过程并测量相对于不同时间的各个延迟量, 以产生出许多这样的时间延迟点。Takens 定理证明: 相空间重构可以将动力系统吸引子的许多性质提取出来, 包括确定该系统的真实相空间的维数<sup>[4]</sup>。

如果采集到的锅炉炉膛火焰信号时间序列数据长度为  $N$ , 采样间隔为  $\Delta t$ , 其时间序列表示为:

$$(x(t), x(t + \Delta t), \dots, x(t + (N-1)\Delta t)) \quad (1)$$

用时间延迟生成的状态矢量在某种意义上与原始动力系统是等价性的, Parkard 等人用原始系统的某一个变量的延迟坐标来重构相空间<sup>[5]</sup>, 构造出  $m$  维的状态矢量  $(X(1), X(2), X(3), \dots, X(t), \dots, X(m))$ , 其中  $X(t)$  为:

$$X(t) = (x(t), x(t + \tau), \dots, x(t + (m-1)\tau)) \quad (2)$$

式中:  $\tau$ —重构采样间隔, 与信号的采样时间间隔  $\Delta t$  不同, 通常  $\tau$  往往是采样时间间隔  $\Delta t$  的整数倍;  $m$ —嵌入维数。在相空间重构中, 必须合理地选择重构采样间隔  $\tau$  和嵌入维数  $m$ 。因为所能观察到的最多只能是三维空间, 为不失一般性, 对图 1 所示的火焰信号进行了嵌入维数  $m=2$  的相空间重构, 重构采样间隔与采样时间间隔相等。图 2 为二维相平面图。从图 2 可以看出, 在不同的燃烧状态下, 火焰时间序列的相空间重构图明显地不同: 稳定燃烧时相对较宽; 不稳定燃烧时相对较窄, 51 组实测数据相平面图基本一致。可见, 根据相空间重构图能够定性地辨识出锅炉炉膛火焰信号的燃烧状态。

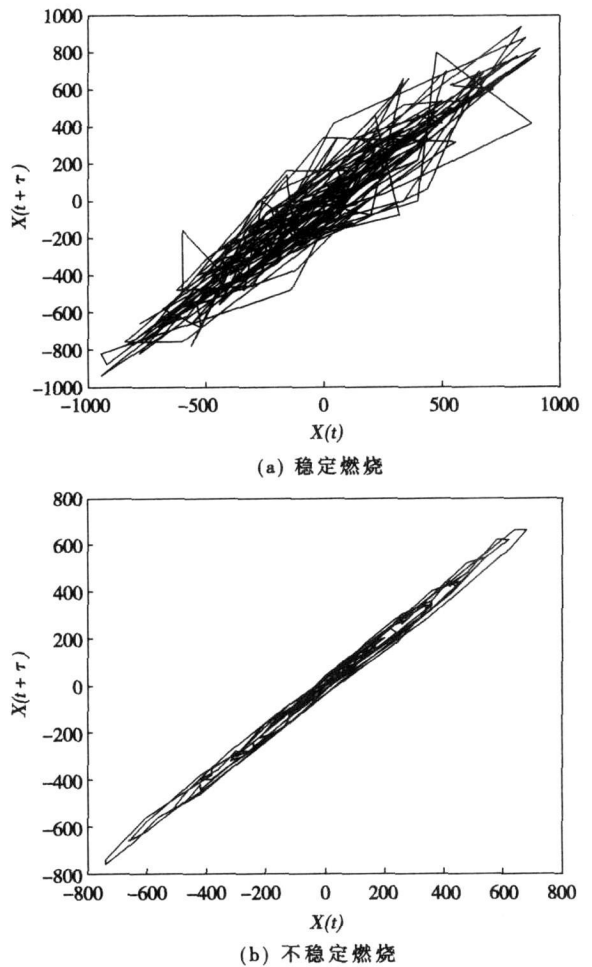


图 2 火焰信号二维相空间重构图

## 3 炉膛火焰信号的关联维

为定量地描述火焰信号相平面图几何特征, 采用分形理论进一步计算其关联维。

首先选择一定的测度  $r$ , 然后将相空间上的每一个点  $X_i$  作为参考点, 计算参考点与其余所有点之间的欧氏距离  $r_{ij} = ||X_i - X_j||$ , 把距离小于  $r$  的点数在全体点数中所占的比例称为关联密度, 即:

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \theta(r - r_{ij}) \quad (3)$$

式中:  $\theta$ —Heaviside 函数, 当  $r > r_{ij}$  时,  $\theta = 1$ , 当  $r \leq r_{ij}$  时,  $\theta = 0$ ;  $r$ — $n$  维空间超球的半径, 取值为较小的正数;  $N$ —时间序列的长度。对于某一延迟  $\tau$  和某一嵌入维数  $m$ , 其关联维为:

$$D(m) = \lim_{r \rightarrow 0} \left| \frac{\ln C(r)}{\ln r} \right| \quad (4)$$

为计算关联维  $D(m)$  的估计值, 一般取  $\alpha$  个  $r$  值, 计算出与其相对应的  $\alpha$  个  $C(r)$  值, 作出  $\ln C - \ln r$  特性曲线, 其直线部分的斜率就是  $D(m)$ 。除了  $\tau$  的取值要大小适宜外, 还要不断地提高嵌入维数

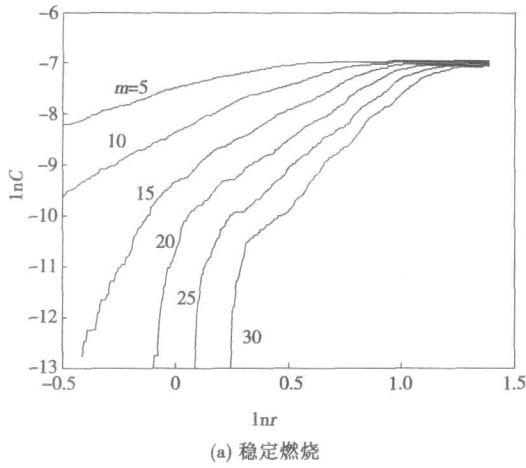
$m$ , 反复计算  $C(r)$  和  $D(m)$ , 直到当  $m$  增大到某一值  $m_c$  时, 对应的  $D(m)$  不再随  $m$  的增大而发生较大的变化为止, 这在  $\ln C-\ln r$  特性曲线中表现为一些曲线的直线段的斜率不再随  $m$  增大而变化, 即:

$$D(m_c) = D(m_c + 1) = D(m_c + 2) = \dots \quad (5)$$

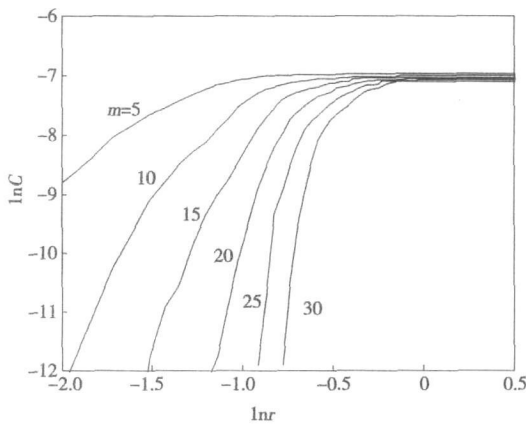
记  $D = D(m_c)$ ,  $D$  即为关联维。

此外, 是否存在  $m_c$  也是判别系统运动行为的特征参数之一, 如果随着  $D$  值增大,  $m$  趋于无穷大, 即不存在  $m_c$ , 这意味着不存在吸引子, 系统属于随机系统; 如果当  $m$  增大到  $m_c$  后,  $D(m)$  达到饱和值, 这表示存在吸引子, 系统属于混沌系统。

图 3 为  $m$  分别等于 5、10、15、20、25、30 时,  $\ln C$  随  $\ln r$  的变化特性曲线。由图 3 可以看出, 当  $m$  较小时,  $\ln C-\ln r$  特性曲线起始部分的斜率不一致, 曲线之间的距离较大, 且互不平行; 随着  $m$  增加,  $\ln C-\ln r$  特性曲线起始部分的斜率越来越接近, 曲线之间的距离急剧减小; 当  $m$  大于 20 后,  $\ln C-\ln r$  特性曲线起始部分的斜率几乎相等,  $\ln C-\ln r$  特性曲线密集且相互平行, 说明该系统存在  $m_c$ , 属于混沌系统。



(a) 稳定燃烧



(b) 不稳定燃烧

图 3 不同燃烧状态下火焰信号的  $\ln C-\ln r$  特性曲线

经计算, 得到了  $r=0.3$  时 51 组样本数据在稳定燃烧和不稳定燃烧两种工况下的关联维, 分别在 6.585 5~6.841 5 和 5.884 3~6.090 7 之间。图 4 为关联维  $D$  与样本序号  $n$  间的变化特性。

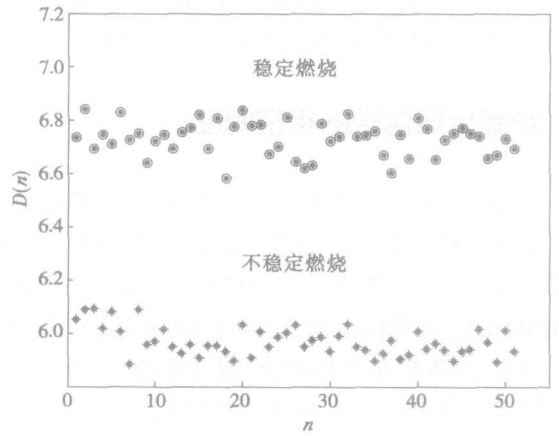


图 4 不同燃烧状态下火焰信号的关联维数

#### 4 算法的可靠性和实时性

假设关联维  $D$  服从正态分布, 图 5 为其概率密度函数曲线, 表 1 为其特征参数的估计值。当火焰稳定燃烧时, 关联维的均值为 6.731 0, 方差为 0.003 9; 当火焰不稳定燃烧时, 关联维的均值为 5.969 7, 方差为 0.002 9。两种状态下, 关联维的概率密度曲线互不交叉, 误判概率微乎其微。所以利用关联维可以准确地鉴别出火焰的燃烧状态, 有效地提高了燃烧诊断的可靠性。

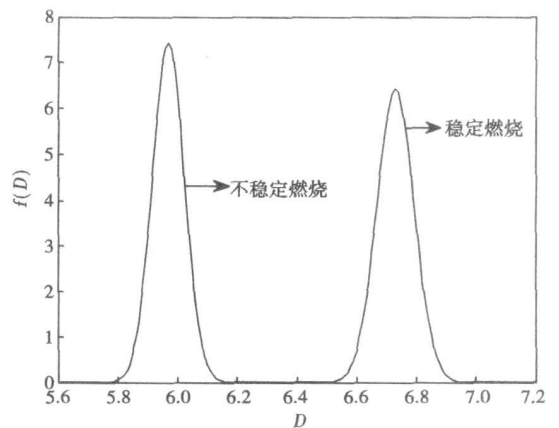


图 5 关联维  $D$  为正态分布时的概率密度函数曲线

(下转第 456 页)

的厚度约占催化剂半壁厚的 52%，其余部分均为死区。随着反应温度的升高、催化剂壁面反应物浓度的减少，发生反应的催化剂壁面区域的薄层厚度就越小。因此，在满足机械强度条件下可以适当减少催化剂壁面的厚度，以节省催化剂原料的使用。

(2) 通过计算蜂窝状催化剂通道内气体浓度分布，得到各断面上 NH<sub>3</sub> 的浓度的下降比 NO 来得快，主要是由于 NH<sub>3</sub> 在高温下被氧化而导致的结果。最佳的 NH<sub>3</sub>/NO 比即为 NH<sub>3</sub> 的给入量能够使 NH<sub>3</sub> 和 NO 的反应进行到催化剂通道的末端，而催化剂出口处的浓度又要求不超过可接受的氨泄漏量 (3.795 mg/m<sup>3</sup>)。

(3) 通过对国内某电厂 SCR 反应器的数值计算，得到在一定的 NO 进气浓度、温度和气流速率下最佳的 NH<sub>3</sub>/NO 比值。从计算结果可以看出最合适的 NH<sub>3</sub> 流量与 NO 不是等摩尔，其最主要的原因是存在 NH<sub>3</sub> 氧化的副反应。另外，通过分析得到影响最佳 NH<sub>3</sub>/NO 比主要因素有以下几个：催化剂的形状(最主要的是催化剂的长度)；温度；气流速率；实际应用中还与 NH<sub>3</sub> 和 NO 的混合是否均匀有关(即与喷氨系统有关)。

参考文献:

[ 1 ] ENRICO TRONCONI, ALESSANDRA BERETTA. The role of inter-and intra-phase mass transfer in the SCR-DeNO<sub>x</sub> reaction over catalysts of different shapes[ J ] .Catalysis Today, 1999, 52: 249- 258.

[ 2 ] ANA BAHAMONDE, ALESSANDRA BERETTA, PEDRO AVILA et al. An experimental and theoretical investigation of the behavior of a monolithic Ti-V-W-sepiolite catalyst in the reduction of NO<sub>x</sub> with NH<sub>3</sub> [ J ] .Ind Eng Chem Res, 1996, 35: 2516- 2521.

[ 3 ] 吴忠标. 大气污染控制工程[ M ] .北京: 科学出版社, 2002.

[ 4 ] 范红梅, 仲兆平, 金保升, 等. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 催化剂氨法 SCR 脱硝反应动力学研究[ J ] .燃料化学学报, 2006, 34(3): 377- 380.

[ 5 ] SCHAUB G, UNRUH D, WANG J, et al. Kinetic analysis of selective catalytic NO<sub>x</sub> reduction(SCR) in a catalytic filter[ J ] . Chemical Engineering and Processing, 2003, 42: 365- 371.

[ 6 ] 李绍芬. 化学与催化反应工程[ M ] .北京: 化学工业出版社, 1986.

[ 7 ] 陶文铨. 数值计算传热学[ M ] .西安: 西安交通大学出版社, 1988.

[ 8 ] 帕坦卡. 传热与流体流动的数值计算[ M ] .张政, 译.北京: 科技出版社, 1984.

[ 9 ] HAN L S. Hydrodynamic entrance Length for incompressible laminar flow in rectangular ducts[ J ] . J Apple Mech, 1960, 27: 403.

[ 10 ] KOEBEL M, ELSENER M. Selective catalytic reduction of NO over commercial de NO<sub>x</sub>-catalysts; experimental determination of kinetic and thermodynamic parameters[ J ] . Chemical Engineering Science, 1998, 53(4): 657- 669.

(编辑 渠 源)

(上接第 442 页)

表 1 不同燃烧状态关联维的均值和方差

	均值	方差
稳定燃烧	6.731 0	0.003 9
不稳定燃烧	5.969 7	0.002 9

样本信号的采样频率仅为 1 kHz，对应的采样周期为 1 ms；采样数据点的个数为 1 024，采样时间窗口的总长度为 1.024 s。因此，响应时间稍稍大于 1 s，算法有较高的实时性。

5 结 论

采用相空间重构理论对实测火焰时间序列信号进行了定性分析和定量计算，结果表明：在稳定燃烧状态下，火焰信号的二维相平面图比较宽，关联维在 6.585 5 ~ 6.841 5 之间；在非稳定燃烧状态下，火焰信号的二维相平面图比较窄，关联维在 5.884 3 ~ 6.090 7 之间。两种工况下，火焰时间序列信号的相空间图和关联维明显不同，稳定燃烧时的关联维总

比不稳定燃烧时的关联维大得多，因此，提出采用关联维作为锅炉炉膛火焰燃烧状态识别的特征参数。

采用关联维判别火焰的燃烧状态，采样频率仅需 1 kHz，数据存储容量为 1024×10 bit，A/D 转换器的有效位数为 10，对嵌入式微处理器的硬件配置要求不高，便于实施。文中所提出的燃烧诊断方法为发展新型光学式火焰检测器提供了参考依据。

参考文献:

[ 1 ] 华彦平, 邹 煜, 吕震中. 现代燃煤电站锅炉火焰检测综述[ J ] .热能动力工程, 2004, 16(1): 1- 4.

[ 2 ] 陈 颢. 分形与混沌在地球科学中的应用[ M ] .北京: 学术期刊出版社, 1989.

[ 3 ] 王东生. 混沌分形及其应用[ M ] .北京: 中国科学技术出版社, 1995.

[ 4 ] RAND D, YOUNG L S. Dynamical system and turbulence lecture notes in mathematics[ M ] . Berlin: Springer-verlag Inc, 1982.

[ 5 ] 吴振升, 王 玮, 黄 梅, 等. 基于相空间重构的高压断路器振动信号特征分析[ J ] .现代电力, 2006, 23(1): 10- 14.

(编辑 渠 源)

基于相空间重构的锅炉炉膛火焰信号分析 = **An Analysis of Flame Signals in a Boiler Furnace Based on a Phase Space Reconstruction** [刊, 汉] / MA Shao-hua, HUA Ying (College of Electrical Engineering under the Shenyang Polytechnical University, Shenyang, China, Post Code: 110023), LI Xiao-bai (China National Fire-fighting Electronic Product Quality Supervision and Inspection Center, Shenyang, China, Post Code: 110031) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 440 ~ 442, 456

By employing chaotic and fractal theory, a qualitative analysis and quantitative calculation have been conducted of the flame signals measured from a boiler furnace. Through a restructuring of phase spaces, obtained were the time-sequence phase-plane map and correlation dimensions of burning flames under both stable and unstable combustion conditions. The analysis and calculation results indicate that under a stable combustion state, the two-dimensional phase-plane map of the flame signals is relatively wide and their correlation dimensions range from 5.5855 to 6.8415. Under an unstable combustion condition, the two-dimensional phase-plane map of the flame signals is relatively narrow and their correlation dimensions range from 5.8843 to 6.0907. Under both working conditions there exists a conspicuous difference between the flame time-sequence phase-plane map and correlation dimensions. However, the correlation dimensions during stable combustion are always considerably greater than those during unstable combustion. Hence the correlation dimensions can be used as a characteristic parameter to identify the state of flame combustion. The combustion diagnosis method proposed by the authors can provide an effective approach for developing innovative optical-type flame detectors. **Key words:** furnace flame, combustion diagnosis, status discrimination, restructuring of phase spaces, number of correlation dimensions, chaos, fractal science

CO 余热锅炉增设旁通烟道及省煤器技术改造 = **Technical Modification of a CO Heat Recovery Boiler with the Addition of a Bypass Flue Duct and an Economizer** [刊, 汉] / YAN bin (China Petroleum Corporation Harbin Petrochemical Subcompany, Harbin, China, Post Code: 150056) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 443 ~ 445, 449

Enumerated were the problems existing in a 1.2 Mt/a RFCCU incineration-type CO heat recovery boiler of Harbin Petrochemical Sub-company affiliated to China Petroleum Corporation. Following a thermal and flue duct resistance calculation, a variety of improvement measures, such as additional provision of a bypass flue duct and an economizer as well as the use of a XD-2000 type gas impulse soot blower, were implemented. They have enhanced the steam output, flue-gas energy recovery capacity and thermal efficiency of the CO heat recovery boiler, thus meeting the demand of a plant exhausting at high loads all the flue gas into the heat recovery boiler. If the current 15% of regenerative flue gas is exhausted through a bypass, i. e. the flue gas discharge quantity being assessed at 20 000 m<sup>3</sup>/h (420 °C and CO content 6%), the thermal energy recovered shall be 21.06 × 10<sup>6</sup> kJ/h. The energy consumption of a cracking plant can be decreased by 29.3 × 10<sup>4</sup> kJ/t, equivalent to newly accrued economic benefits of about RMB 8 million yuan per year. This represents a significant energy-saving effectiveness. **Key words:** catalytic cracking plant, CO heat recovery boiler, bypass flue duct, bypass economizer

直接碳燃料电池(DCFC)实验研究 = **An Experimental Study of Direct Carbon Fuel Cells (DCFC)** [刊, 汉] / CHEN Hong-wei, WANG Jin-quan, GAO Jian-qiang, et al (College of Energy Source and Power Engineering under the North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 446 ~ 449

Direct carbon fuel cells (DCFC) represent an effective and clean fuel-cell technology, which is based on the theory of producing electric energy directly through an electrochemical reaction of carbon and oxygen with no need for gasification and reforming. Its efficiency can be as high as 80% and fuel utilization rate can reach about 100%. A single-body cell of DCFC was assembled with its working temperature ranging from 500 to 700 °C. The cell uses fusible hydroxide to serve as an electrolyte with a certain amount of catalyst being added. Graphite is used to serve as a positive pole and stainless steel as a negative one with moistened oxygen being added to serve as an oxidation agent. An experimental study has been performed of the output performance of DCFC by using different electrolytes and at different oxygen flow rates. The results of the study show that KOH has a better conductivity than NaOH and the cell made from KOH can operate more stably and is more favorable for cell output. When the oxygen flow rate is 70 ml/min, the cell has an optimum output performance with its maximal current and power density being 105 mA/cm<sup>2</sup> and 0.041 W/cm<sup>2</sup> respectively. The open-circuit voltage