

切向炉内小分隔屏后涡量分布的实验研究

何伯述¹, 刁永发², 许晋源², 陈昌和¹

(1. 清华大学 煤的清洁燃烧技术国家重点实验室, 北京 100084; 2. 西安交通大学 能源动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:首次使用六线涡量探针在切向炉 HG-2008-YM2 的冷模上测量了其小分隔屏后的速度及涡量分布, 得到了湍流特征的参数(如湍流强度、倾斜因子及平坦因子等)。小分隔屏的存在对其后的速度场及涡量场有明显的影响。实验结果表明, 由于翼型效应, 右侧屏后似乎出现了分离涡。

关键词:切向炉; 分隔屏; 涡量; 倾斜因子; 平坦因子
中图分类号: O357.1; V211.71 文献标识码: A

1 引言

切向炉由于具有火焰充满度好, 有利于煤粉颗粒的着火及燃尽等优点, 在我国电站锅炉中占有很大的比例。但随着机组的大型化, 此类锅炉水平烟道入口普遍存在热偏差现象。迄今为止, 对热偏差现象的成因有多种解释, 如残余旋转等^[1], 也研究出了一些消除残余旋转的技术并取得了一定的效果。

李文健等^[2]主张在分隔屏结构上改大屏为多组小屏以减小同屏各管间的流量偏差。类似的小屏也出现在国产 200 MW 机组上。这种小分隔屏结构对屏区流动影响很大, 我们特地做了冷模试验。

在研究中深感旋转就意味着出现了很大的涡量场, 因此涡量强度测量是弄清机理的有效手段。其次, 旋转气流绕流过小分隔屏(简称小屏或屏)后会产生尾涡, 一如飞机起飞时机翼后产生分离涡那样。本文在 HG-2008-YM2 型锅炉的 M1:40 冷模上, 拆除分隔屏后段, 保留分隔屏前段。它起到了小屏的作用。在此模型上, 使用六线涡量探针测量了小屏后的流场。

2 六线涡量探针

试验中使用了六线涡量探针, 其标定十分重要。本文采用静态标定方法, 在标准标定风洞上对六线涡量探针进行标定, 考虑到实际测试对象, 选择 2 号喷嘴在 0~30 m/s 的速度范围内对六线涡量探针进行标定。Marasli 指出^[3], 桥电压与热线感应到的线

性速度的关系可用四次多项式表示, 文献[4]给出了对六线涡量探针进行标定后的结果。

3 涡量强度测量方法

对涡量强度的测量是高成本的, 探针技术和信号处理技术都比较复杂。涡量强度是状态函数, 与流体质点无关, 只跟空间点有关。此空间点是探头所在空间的重心, 理论上被看作无穷小单元(因为热线的空间分辨率是有限的), 在此点可得到涡量。平面单元的参数由探针的几何形状决定。

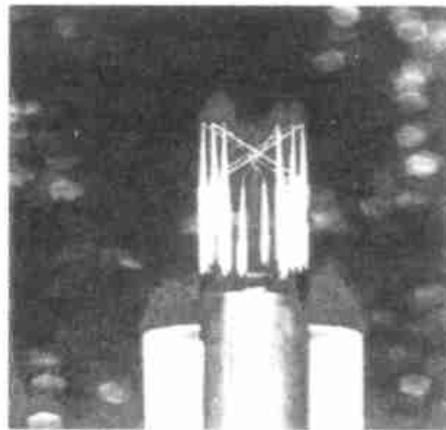


图1 实验中使用的六线涡量探针

涡量强度是矢量, 每个分量由两个速度梯度组成。根据探针实时采样得到的线性速度, 本文对探针横向速度梯度采用解析方法获得; 而轴向速度梯度则

用 Taylor 假设近似求取^[5]。该方法已经用于测量切向炉内炉膛及燃烧器区域的涡量强度分布, 结果是令人满意的^[6]。

4 实验对象

图2为模型及测点布置示意图。为了探索烟气偏差形成的原因, 本文在等温冷态模型中使用六线涡量探针对切向炉内屏后的速度场及涡量场进行了测量。作为对比, 也对炉膛区域的速度场及涡量场

收稿日期: 2000-12-04; 修订日期: 2001-01-15

基金项目: 机械工业技术发展基金资助项目(95JB1101)。

作者简介: 何伯述(1964-)男, 四川新都人, 清华大学博士后。

进行了测量。

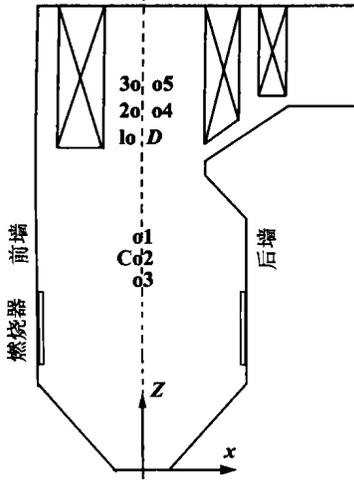


图 2 测点布置示意图

摘除后屏过热
器以后, 在分隔屏
过热器和屏式再热
器的区域内布置了
五个测孔 $D1 \sim$
 $D5$, 以测量分隔屏
后右侧墙至左侧墙
区域内气流绕流分
隔屏后的湍流流
场, 每个 D 测孔都
在右侧墙和左侧墙
至炉膛对称线范围
内分别布置了 10 个
等距测点 (间距为

20 mm); 为了对屏区右侧气流绕流分隔屏后的湍流
流场做重点研究, 在右侧墙上布置了三个测孔
($DD1, DD2$ 和 $DD5$, 即在测孔 D 的位置加密测点
数), 每个 DD 测孔都在右侧墙至炉膛中心截范围内
布置了 20 个等距测点 (间距为 10 mm); 还在前后墙
间中心截面 (C 截面) 上布置了三个测孔 (间距为 58
mm), 每个测孔布置了 20 个测点 (间距为 20 mm), 以
便与屏区的测量结果对比。在每个测点, 都测量了速
度 (u, v 和 w) 和涡量强度 (ω_x, ω_y 和 ω_z)。

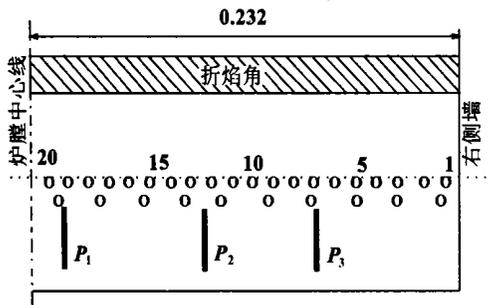


图 3 测点与屏片的相对位置

实验中, 在上炉膛区域内布置了 6 片小分隔屏,
该结构与实炉一致, 其中有 3 片 ($P_1 \sim P_3$) 位于炉膛
中心和右侧墙之间。对 DD 测孔而言, P_1 对应着第 7
个测点, P_2 介于测点 12 和 13 之间, 但偏向测点 12;
 P_3 对应着测点 19。对 D 测孔而言, P_1 介于测点 3 和
4 之间偏向测点 4; P_2 介于测点 6 和 7 之间; P_3 介于
测点 9 和 10 之间偏向测点 10。图 3 表示了测点与小
分隔屏屏片的相对位置。

5 实验结果及分析

湍流密度定义为: $Tu = \left(\frac{\overline{u^2}}{U} \right)^{1/2}$

倾斜因子定义为: $S = \overline{x^3} / \sigma_x^3$, 这是一个表征湍
流流场偏离高斯场 ($S = 0$) 程度的量。

平坦因子定义为: $F = \overline{x^4} / \sigma_x^4$, 这是一个表征概
率密度函数的曲线平坦程度的量, 对高斯场 $F = 3$,
而湍流流场中 $F > 3$ 。该值越大, 说明流场中的间歇
因子越小^[7]。

倾斜因子实际上就是用标准差 (σ_x) 无量纲化
后的三阶矩, 平坦因子是用标准差无量纲化后的四
阶矩。

为了使屏区测量结果有一个对照依据, 在炉膛
区域进行了较为详细的测量^[9]。对屏区进行测量的
目的是考察屏片对流场的作用及影响, 即气流绕流
小分隔屏以后的行为。所有测量结果图示中, a 为右
侧墙所在位置, b 为左侧墙所在位置, c 为炉膛中心
所在位置。

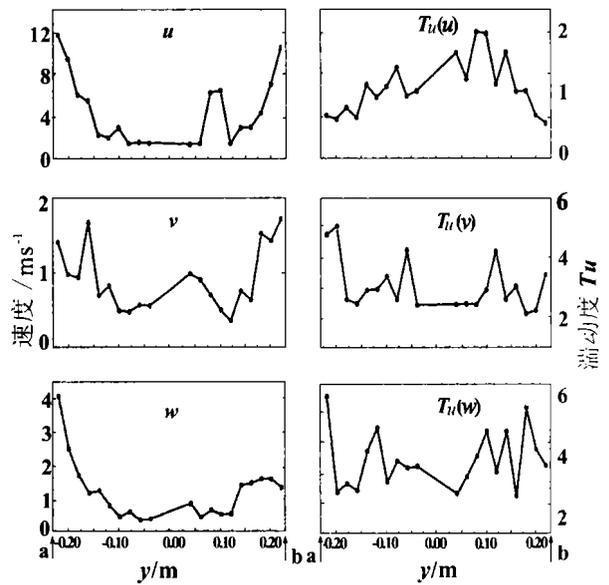


图 4 速度及其湍动度沿炉宽方向的分布 (测孔 $D2$)

5.1 速度及湍动度分布

在屏区 $D2$ 测孔测得的速度及其湍动度的分布
绘于图 4 中。从图中可以看到, 屏区的速度 u 和 w
都呈现为右侧高而左侧低的分布; 但 v 的分布却是左
侧高于右侧, 但其值低于 u 的值, 说明屏区右侧总体
速度高于左侧, 这是导致热偏差的一个直接因素。飘
带显示, 屏区左侧总体速度指向炉前, 右侧总体速度
指向炉后, 这可以理解为在屏区存在残余旋转, 或者

屏区左侧有回流区。

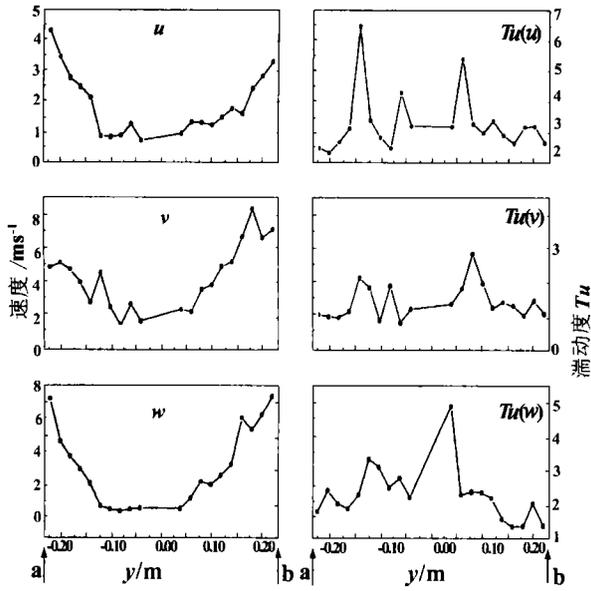


图5 速度及其湍动度沿炉宽方向的分布(测孔C1)

如果把屏区的速度分布图与炉膛区域的速度分布图(图5)对比,可以发现右侧屏区对速度场是有显著影响的:与屏片间通道内的速度相比,屏片后方的速度 u 明显地升高了;与速度场会受到屏片的影响类似,湍动度也受到屏片的直接影响,也就是屏片后方的湍动度也增强了。

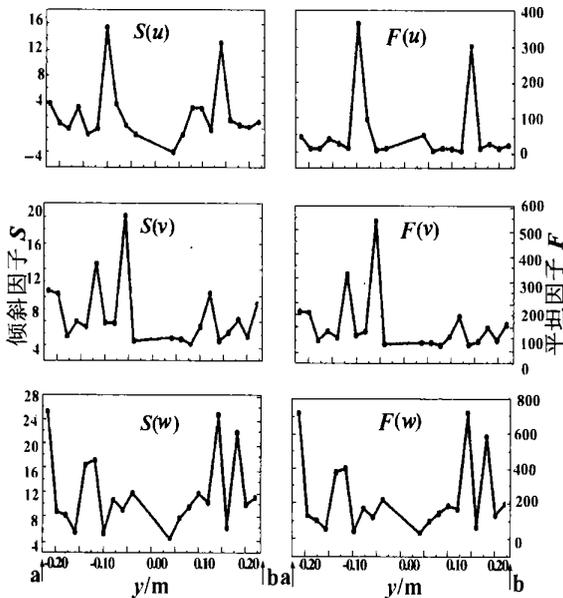


图6 速度的倾斜/平坦因子沿炉宽的分布(测孔D2)

图显示此处仍为贴壁流动,炉膛中心存在低速区,且中部的湍动度高于两侧。说明中心区域的流动为强烈的湍流流动。

5.2 速度的倾斜因子及平坦因子分布

图6和图7为在屏区(D2/DD2)测得的速度速度的倾斜因子及平坦因子分布图。

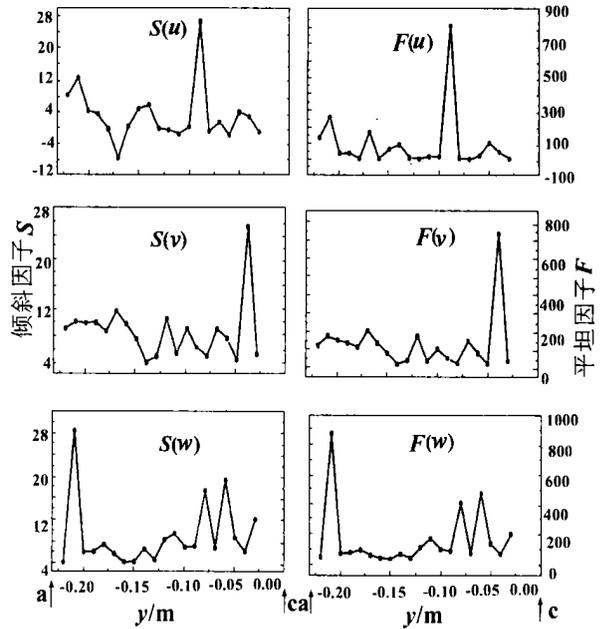


图7 速度的倾斜/平坦因子沿炉宽的分布(测孔DD2)

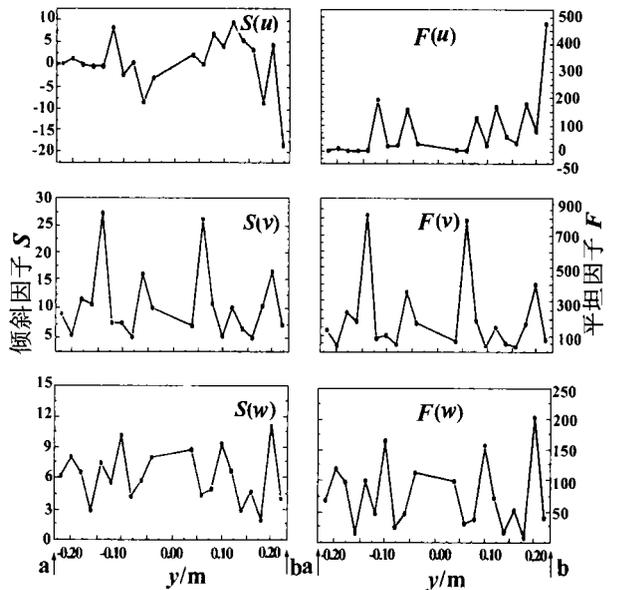


图8 速度的倾斜因子和平坦因子(测孔C1)

从图中可以看到,速度的倾斜因子及平坦因子也同样受到屏片的影响而有所升高,图中也有峰值

图5为在测孔C1处测得的速度及其湍动度。该

区域出现, 右侧受到的影响大于左侧。把在测孔 D2(图 6) 和测孔 C1(图 8) 测得的结果进行比较, 发现 D2 处的测量值大于 C1 处的测量值, 这说明屏区的湍流特性强于炉膛区域。毫无疑问, 这是受到了分隔屏的影响所致。

5.3 涡量强度分布

图 9 为在屏区测量得到的涡量强度的分布。该涡量强度分布具有如下特征:

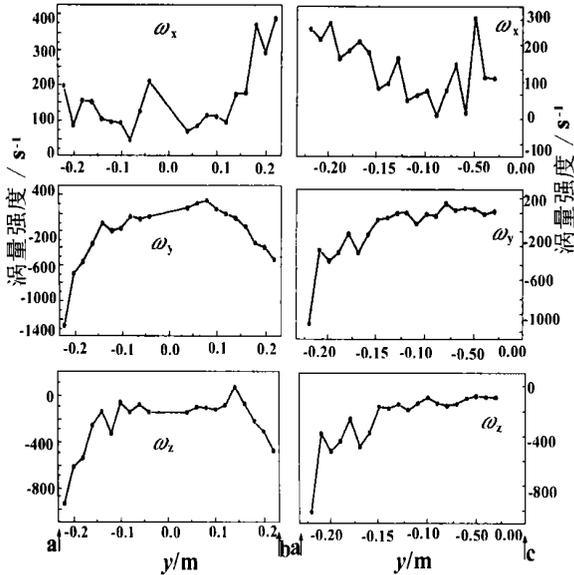


图 9 涡量强度沿炉宽方向的分布(测孔 D2/ DD2)

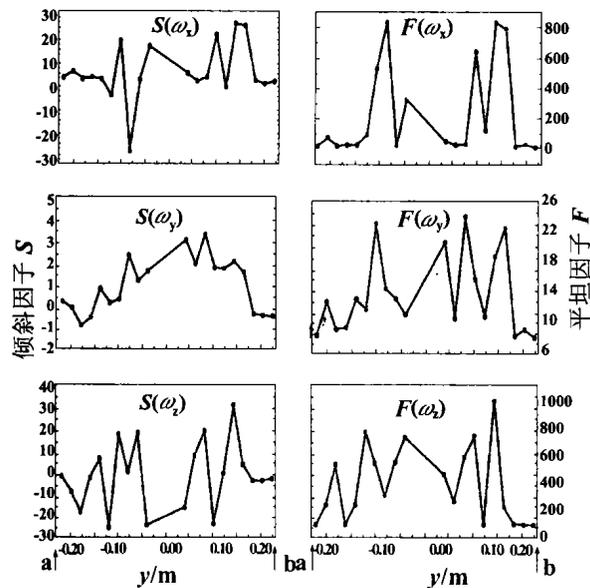


图 10 涡量的倾斜/平坦因子沿炉宽的分布(测孔 D2)

器区的分布平滑;

- (2) 涡量强度为负值的测点增多;
- (3) 屏片后方也有峰值。

涡量强度分布的这些特征表明, 多组小屏屏片的存在确实对屏区涡量的分布有较强的影响。结合该区域的速度分布特征, 发现正是由于流场中多组小屏的存在, 屏片后方才出现了一些异常现象, 这些现象很可能是出现了分离涡的表现(正如气流绕流翼型将出现分离涡一样)。

5.4 涡量强度的倾斜因子及平坦因子分布

图 10 ~ 图 11 表示在屏区测量得到的涡量强度的倾斜因子和平坦因子沿炉宽方向的分布。从图中看到, 该区域倾斜因子 $S(\omega_x)$ 及平坦因子 $F(\omega_x)$ 的分布不再象在炉膛及燃烧器区域的分布那样, 峰值出现在炉膛中部两边比较平坦, 而是具有多峰值的特征。多峰值的出现显然是受到了该区域屏片的影响, 使屏片后的湍流流动得以加强, 并向右侧扩散, 如图 11 中的 $S(\omega_y)$ 和 $F(\omega_y)$ 的峰值不再在中部而是偏向右侧墙。

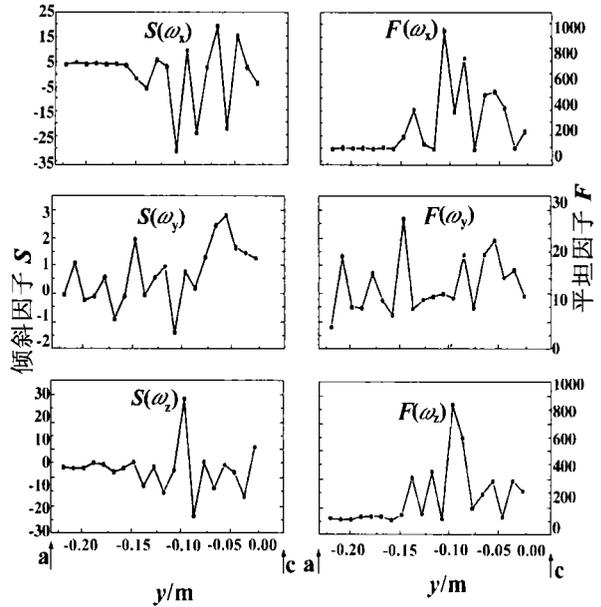


图 11 涡量的倾斜/平坦因子沿炉宽的分布(测孔 DD2)

6 讨论及结论

本文作者的研究工作只是六线涡量探针在三维流场中的初步应用。由于是首次在三维流场测量中使用六线涡量探针, 对其在流场中的定位不够精确, 对其标定方法也研究得还不够深入, 只在标定时考

(1) 屏区涡量强度的分布曲线不如炉膛及燃烧

虑了探针感受到的速度大小,而未考虑其感受到的速度的方向。这个简化对速度测量的影响不会很大,但是对涡量强度各分量的测量可能会产生较大的影响,这是因为涡量是速度梯度之差。这有待于以后的深入研究,以完善六线涡量探针的应用。

对多组小屏屏片后方可出现的分离涡、以及其对燃料燃尽和在抑制污染物生成方面的作用,应作更进一步的研究。

综上所述,得到下列结论:

(1) 六线涡量探针可以同时测量速度场和涡量场。证实了实际湍流流场是一个各态历经的非高斯随机场;

(2) 在分隔屏区域,速度场和涡量场的分布仍具有贴壁特征;

(3) 测出了分隔屏区的涡结构(存在相干结构),这对研究燃料燃尽和在抑制污染物生成方面有帮助;为热偏差的成因及对策研究提供了思路。

参考文献:

- [1] 张文宏. HG-2008-YM2 锅炉炉膛残余旋转与其影响的研究及涡量修正法数据模拟[D]. 西安:西安交通大学,1997.
- [2] 李文健,华洪渊. 600 MW 亚临界锅炉过热器和再热器系统的改进[A]. 300 MW、600 MW 火电机组引进技术总结文集[C]. 北京:机械工业部重大装备司,1996. 89-93.
- [3] MARASLI B, NGUYEN P, WALLACE J M. A calibration technique for multiple sensor probes and its application to vorticity measurements in the wake of a circular cylinder[J]. **Exp Fluids**, 1993, 35(2): 209-218.
- [4] 何伯述. 600 MW 切向炉旋转气流演变及其对屏绕流尾涡的研究[D]. 西安:西安交通大学,1999.
- [5] PIOMELLI U, BALINT J L, WALLACE J M. On the validity of Taylor's hypothesis for wall-bounded flows[J]. **Phys Fluids A**, 1989, 1(3): 609-611.
- [6] 何伯述,刁永发,许晋源,等. 切向炉内炉膛及燃烧器区涡量分布的实验研究[J]. **热能动力工程**, 2001, 16(3): 239-242.
- [7] 是勋刚. 湍流[M]. 天津:天津大学出版社,1994.

(渠 源 编 辑)

GE LM6000 的里程碑时间表

据《Modern Power Systems》1998 年 9 月号 and 《Gas Turbine World》2000 年 7-8 月号报道,LM6000 是迄今为止简单循环效率最高(高达 42%)的一型燃气轮机,近十多年来从研制到投入商业运行,LM6000 燃气轮机装置的性能不断得到改进。其里程碑时间表如下:

1990 年 6 月 GE 推出 LM6000 航改型燃气轮机;发动机有 90%零件与其 CF6-80C2 航空涡轮风扇发动机原型通用。

1992 年 12 月 第一台 LM6000 在加拿大渥太华健康科学中心开始商业运行。此后不久,第二台 LM6000 也在加拿大开始联合生产服务。

1993 年 5 月 GE 推出用于其航改型燃气轮机生产线的 DLE(干式低排放)燃烧系统。该系统目标是使 NO_x 排放比原来的航改型发动机燃烧系统减少 90%,并保持低的 CO 和 UHC 排放。鉴于 LM6000 是具有最高燃烧温度的航改型机组,第一个 DLE 系统被设计成用于 LM6000 发动机。因此,用于 LM6000 的 DLE 系统可被推广到其它的 LM 产品线。

1995 年 5 月 第一台装有 GE 的 DLE 燃烧系统的 LM6000 在比利时根特市开始商业运行。实际的 NO_x、CO 和 UHC 排放分别为 16 mL/m³、6 mL/m³ 和 1 mL/m³。

1995 年 12 月 GE 推出改进的 LM6000,它将提供增加的性能、增强的排放控制和双燃料 DLE 能力。功率加大的型号被称为 LM6000 PC(标准燃烧室)和 LM6000 PD(DLE 燃烧系统)。

1997 年 11 月 第一台功率加大型 LM6000 在比利时吉尔市以联合生产装置形式开始商业运行。烧天然气的 LM6000 在现场达到超过 46 MW 的功率。第一台由石脑油驱动的 LM6000 在印度开始运行。

1998 年 5 月 GE 推出被设计成增强 LM6000 PC 性能的 Sprint 水雾中间冷却系统,至少可以使简单循环和联合循环寿命周期费用减少 9%。第一台 Sprint 机组在英国南方电力公司开始商业运行。

1999 年 12 月 GE 推出在 LM6000 PC 低压压气机入口和高压压气机入口均喷入水雾进行冷却的增强的 Sprint 方案,可显著增加热天时的输出功率并降低热耗率。第一台顺序低压/高压水雾冷却的 LM6000 PC 已在美国乔治亚州投入商业运行。

(思 娟 供 稿)

content rate of an incident flow cross-section, the shape and characteristic dimensions of a vortex-street generating entity, the direction of incident flow, etc. By utilizing the above-mentioned relation and on the basis of the measured two-phase vortex street frequency it is possible to use the vortex-street generating entity as a measuring element for the measurement of two-phase flow rates and components. **Key words:** gas-liquid mixture, Kaman vortex, Strouhal number, cylinder

切向炉内小分隔屏后涡量分布的实验研究= **Experimental Investigation of the Vorticity Distribution Behind the Small Partition Panel of a Tangentially Fired Furnace** [刊, 汉] / HE Bo-shu, CHEN Chang-he (State Key Lab of Coal Clean Combustion under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), DIAO Yong-fa, XU Jin-yuan (Energy Source and Power Engineering Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 154 ~ 158

A 6-wire vorticity probe was used for the first time to measure the velocity and vorticity distribution behind the partition panel of the cold model of a HG-2008-YM2 tangentially fired furnace. Parameters depicting the characteristics of turbulent flow have been obtained, which include turbulent flow intensity, skewness factor and flatness factor, etc. The presence of a partition panel has a significant effect on the velocity and vorticity field behind it. The test results indicate that a separation vortex has emerged behind the right half panel due to airfoil effects. **Key words:** tangentially fired furnace, partition panel, vorticity, skewness factor, flatness factor

柴油、渣油和沥青的脉动燃烧对比试验研究= **Contrast Experimental Research on the Pulsating Combustion of Diesel Oil, Residual Oil and Asphalt** [刊, 汉] / TU Jian-hua, CHEN Fu-lian, WANG Qin-yong (Energy Source and Power Engineering Research Institute under the Zhejiang Polytechnical University, Hangzhou, China, Post Code: 310014) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 159 ~ 160, 165

Contrast tests of pulsating combustion of diesel oil, residual oil and asphalt were conducted in a shape-changing Rijke pipe. It is discovered that easy-to-burn fuels can excite pulsation easily. By contrast, difficult-to-burn fuels are hard to excite pulsation owing to the delayed ignition of such fuels and it is necessary to lengthen the tail pipe in order to achieve a good pulsation. When the ratio of air feed area and combustion chamber cross-section area is reduced to a certain degree, the pulsation characteristics of such difficult-to-burn fuels (such as residual oils, etc.) will transit to those of 1/4 wave-length pipe. On the other hand, there is no change in pulsation characteristics for easy-to-burn fuels, such as diesel oils, etc. The tests indicate that valve-absent pulsation combustion technology makes it possible to realize clean and highly effective burning of such difficult-to-burn fuels as residual oils and asphalt, etc. This is of great significance for the utilization of difficult-to-burn fuels, such as residual oils, etc. **Key words:** pulsation combustion, residual oil, Rijke pipe

利用面阵 CCD 进行火焰温度分布测量(II)——三维截面温度场的测量= **Measurement of Flame Temperature Distribution Using Array CCD (II) — Three-dimensional Cross-section Temperature Field Measurement** [刊, 汉] / WEI Chen-ye, YAN Jian-hua, SHANG Min-er, CEN Ke-fa (Thermal Power Engineering Institute under the Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 161 ~ 165

A practical model is set up with the help of a simplified measurement/test system designed for measuring flame cross-section temperature distribution using array charge-coupled device. After the slight improvement of a genetic algorithm the latter is employed to solve the above model in order to reestablish the flame cross-section temperature distribution to be measured. Then, the numerical character of the genetic algorithm is analyzed and a test conducted on an oil/coal mixed