

同轴旋转射流燃烧器空气动力场的可视化研究

吴 江, 章明川, 田凤国, 王 雷

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 对同轴旋转射流燃烧器空气动力场进行了可视化实验研究。通过图象处理得到可视区边界, 即一、二次风之间的界面。运用分形理论对其分形维数进行了研究, 发现在不同的二次风旋流强度与不同的一次风率下, 分形维数变化呈现一定的分布, 据此确定了分层工况。

关 键 词: 低 NO_x 燃烧器; 空气动力场; 可视化实验; 分形维数

中图分类号: O357 文献标识码: A

1 引 言

分级燃烧是降低 NO_x 生成的一种重要方法^[1], 国内外许多研究者研究了多种分级燃烧型旋流燃烧器。本文研究的同轴旋转分层流燃烧器是一种全新的, 通过一、二次风旋流强度的适当配置, 利用离心力分层原理来控制一、二次风混合速度, 以实现分级燃烧降低 NO_x 排放的旋流燃烧器。

对于同轴旋转分层流燃烧器, 在何种条件下能够实现一、二次风在燃烧初期分层, 后期加强混合, 发挥分级燃烧的作用, 其分层机理的研究显得十分必要。分形维数可以反映界面的复杂程度, 本文旨在通过可视化实验与图形处理得到不同操作参数下, 一、二次风界面的分形维数, 从而反映其混合程度, 为实现分级燃烧, 降低 NO_x 生成提供理论依据。

2 实验研究

2.1 对象与系统

同轴旋转分层流燃烧器如图 1 所示, 中心管为点火油枪模型, 无中心冷却风。通过轴向可动叶轮型旋流器使气流产生旋转, 叶轮在不同的轴向位置, 直流风与旋转风的比例不同, 形成不同的旋流强度。通过改变一、二次风叶轮叶片角度和调节叶轮轴向位置获得不同的旋流强度, 控制一、二次风的流量来

调节一次风率。

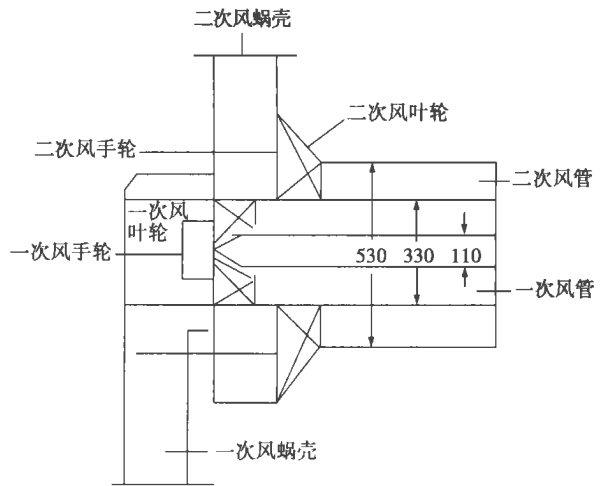


图 1 同轴旋转分层流低 NO_x 燃烧器的模型图

运用纯乙二醇作为示踪剂使流场可视化, 其密度 $1.111 \sim 1.115 \text{ g/mL}$, 沸点 $196 \sim 198 \text{ }^\circ\text{C}$, 由烟雾发生器加热喷入一次风管, 随一次风流出。烟雾发生器是 Antari Lighting and Effects 公司生产的 Antari F-120, 功率 0.7 kW , 带有远程遥控器。通过拍摄烟雾示踪剂的流动状况获得流场信息, 动态图片经由图象采集卡输入计算机进行显示、存储与图象处理。

实验系统如图 2 所示。取像元件采用 Minton 公司生产的 6310PD 型 CCD 彩色摄像机, 分辨率为 352×288 , 镜头为 SE1616 型。图象采集板为 VideoKING9971AV 型。为减少图像噪音, 提高拍摄效果, 实验在多云天气进行, 对所拍摄流场区域采用碘钨灯光进行均匀光照, 用黑木板作为背景, 增强流场与背景的对比度。

2.2 实验工况

燃烧器一、二次风出口参数主要有流量和旋流强度, 以一、二次风旋流强度和一次风率作为调节参数, 研究其对燃烧器出口空气动力场的影响。

收稿日期: 2002-06-08; 修订日期: 2002-07-10

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: 吴江(1974-)男, 江苏建湖人, 上海交通大学博士生

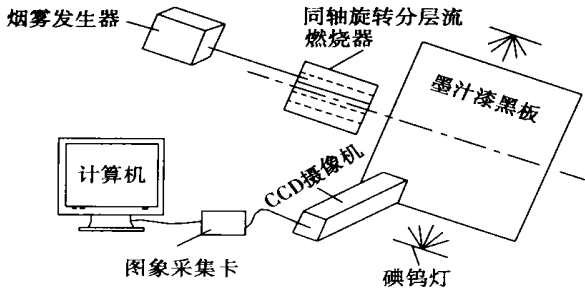


图 2 可视化实验系统示意图

一、二次风的旋流数定义为:

$$S_1 = \frac{\int_0^{R_1} \omega r^2 dr}{R_1 \int_0^{R_1} u^2 r dr} \quad (1)$$

$$S_2 = \frac{\int_{R_1}^{R_2} \omega r^2 dr}{R_2 \int_{R_1}^{R_2} u^2 r dr} \quad (2)$$

其中: R_1 和 R_2 分别为一、二次风管出口半径; u 和 ω 分别为燃烧器出口轴向速度和切向速度, 采用 Dantec 热线风速仪测量。

一次风率 $\zeta_1 = Q_1 / (Q_1 + Q_2)$, 其中 Q_1 和 Q_2 分别为一、二次风风量。 ζ_1 的变化为 16% ~ 37.5%。一、二次风旋流数 S_1 和 S_2 的变化范围分别为 0 ~ 0.75 和 0.80 ~ 1.85。

3 可视化图像处理与分形维数测量

为减少图像噪音, 对原始图像进行增强, 增强曲线如图 3 所示。原图中灰度值在 0 ~ S_1 和 $S_2 \sim L-1$ 的较大动态范围减小到 0 ~ t_1 和 t_2

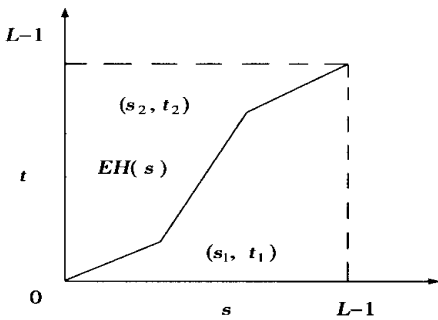


图 3 图像增强曲线

~ $L-1$; 原图中灰度值在 $S_1 \sim S_2$ 的较小动态范围增加到 $t_1 \sim t_2$, 从而对比度增强。增强前后的可视化图片分别如图 4 和图 5 所示。图像增强减少了图像噪

音, 使边界提取更为准确。运用一阶微分期望值亚像素边界检测法^[3]进行图像的边缘检测, 得到的边界如图 6 所示。

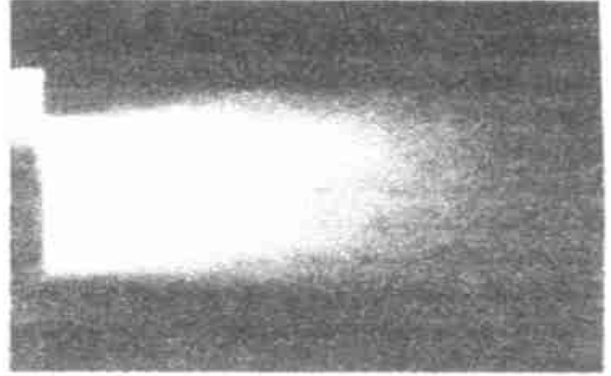


图 4 典型工况可视化原始图片

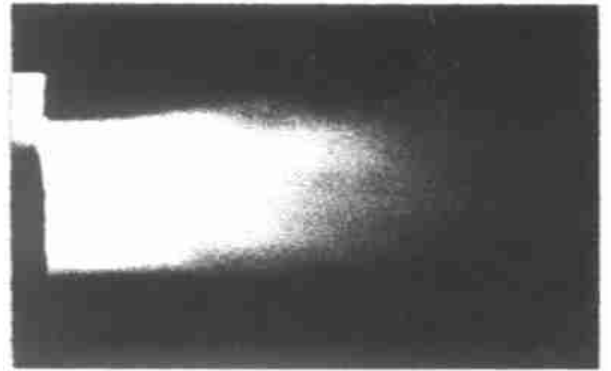


图 5 典型工况可视化图片的增强图片



图 6 典型工况可视化图片的边界轮廓

从可视化图片边界轮廓曲线可以发现其中存在许多卷褶, 这其中包含着大量的湍流和一、二次风混合的信息。运用分形理论研究其分形维数 (Fractal Dimension, FD) 可以得到其复杂程度, 从而反映混合情况。FD 在数学上比较严格的定义是: 假定 $D > 0$, 用直径为 ϵ , 个数为 $N(\epsilon)$ 的球覆盖集合 S , 则 D 维测度 M_D 表示为^[4]:

$$M_D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \gamma(D) N(\epsilon) \epsilon^D \quad (3)$$

式中: $\gamma(D)$ 为几何因子, 对直线、正方形和立方体有 $\gamma(D) = 1$; 对圆盘、球体分别为 $\gamma(D) = \pi/4$ 和 $\gamma(D) = \pi/6$, D 为 Hausdorff-Besicovitch 维数。从定义可以发现, 对于同一欧氏空间中的分形体, FD 越高, 其复杂程度越高, 如平面中的曲线, FD 越高, 其卷褶越多, 边界越复杂。

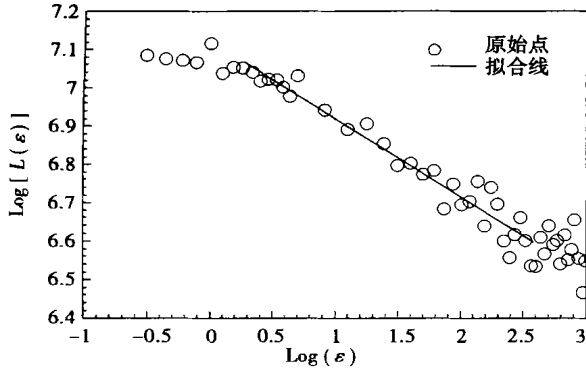


图 7 边界轮廓长度与测量尺度的关系曲线

对于不同的研究对象, FD 的测量方法很多^[3]。根据同轴旋转分层流燃烧器出口空气动力场可视化图片边界曲线的特点, 采用盒子记数法, 用不同尺寸正方形网格分割可视化图片的边界曲线, 进行空间量子化; 然后计算出其中含有此尺寸正方形的网格数 $N(\epsilon)$, 利用由 FD 定义得到的关系式 $N(\epsilon) \propto \epsilon^{-D}$ 求出分维。

根据 $L(\epsilon) = N(\epsilon) \cdot \epsilon \propto \epsilon^{1-D}$, 列出等式关系, 绘制双对数曲线, 如图 7 所示, 通过拟合曲线的斜率可以得到 FD 的大小。从图 7 中可以发现, 在以空间量子化的正方形边长小到一定程度或大到一定程度时, 分形曲线长度不再变化, 这是因为可视化图片轮廓曲线是有限分形体, 当测度小到一定程度, 其成为折线, 不再具有分形特点, 长度与尺度大小没有关系; 当尺度大到一定程度, 测量的长度实际与边界曲线本身复杂程度已没有关系。

4 结果与分析

在一、二次风不同的旋流强度与不同的一次风率下, 得到流场的一系列可视化图片, 分别对其进行图像增强、边界提取和 FD 的测量。图 8(a) ~ (d) 分别是一次风率在 37.5%, 29%, 26% 和 16% 时 FD 随一、二次风旋流强度的变化情况。从这些图中可以看出, 同轴旋转分层流燃烧器空气动力场可视化图片

边界的 FD 变化范围在 1.10 ~ 1.40, 并呈现一定的分布。

随着一次风率的减小, FD 呈现减小趋势。这可能是由于二次风旋流沿燃烧器中心轴径向扩展, 靠近燃烧器轴线位置形成一定范围的空腔; 在一次风率较高时, 空腔大小比起弱旋的一次风来说不是足够大, 这时一、二次风混合与动量交换剧烈, 一、二次风界面脉动较强, 一次风边界复杂, FD 较高; 随着一次风率的减小, 二次风旋流形成的内部空腔可以使弱旋的一次风在混合之前可以直流一段距离, 一、二次风界面复杂度有所下降, 分形维数减小。

在相同一次风率的情况下, 从图 8(a) ~ (d) 可以看出, FD 随着一、二次风旋流强度的变化比较复杂。总体上, 在二次风旋流强度固定的情况下, 随着一次风旋流强度的增大, 一次风边界 FD 有减小的趋势; 在一次风旋流强度固定并数值较小时, FD 较高, 几乎不受二次风旋流强度的影响; 一次风旋流强度固定并数值较大时, FD 随着二次风旋流强度增大有所下降趋势。这可能是因为二次风强旋, 当一次风旋流强度较低时, 一、二次风切向速度相差较大, 动量交换较强, 混合剧烈, 边界复杂, FD 较高; 当一次风旋流强度较高时, 在适当的一次风率下, 一、二次风之间动量交换较弱, 混合不强, FD 较低。

实际燃烧器必须在有中心回流区时燃烧才能稳定, 因此, 在有中心回流区的前提下进行 FD 的分析, 找到分层工况, 对燃烧器的开发与应用更具有指导意义。通过热线风速仪的测量发现, 一次风旋流数在 0.30 ~ 0.75 之间, 二次风旋流数在 1.20 ~ 1.85 之间变化, 一次风率为 16% ~ 29% 时, 形成有利于稳定着火与燃烧的中心回流区。

FD 较小的流动可视区边界复杂度较低, 可以认为是分层流动状态, 根据分形维数分布特点, 确定 FD 在 1.10 ~ 1.20 的工况为分层工况, FD 在 1.25 ~ 1.40 时为混合工况。从图 8 中可以发现在二次风旋流数在 1.50 ~ 1.85, 一次风旋流数在 0.50 ~ 0.75, 一次风率为 16% ~ 26% 时, 形成有利于稳定着火的中心回流区, 同时一、二次风呈现层流化趋势。层流化使燃料和氧气的混合推迟, 造就了一个富燃料贫氧的还原性气氛, 从而降低了氮氧化物的生成量。

目前一般只能测得二维平面湍流图像的 FD , 欲获得真正三维湍流图像的 FD 需要用到余维相加性定律^[6], 即如果分形体 F 被平面切割, 一、二、三维湍流图像的 FD 分别记为 D_1 、 D_2 和 D_3 , 则有 $D_3 = D_2 + 1 = D_1 + 2$, 其前提是截面在不同方向都具有相同的

FD. Sreenivasan 等人^[7] 利用二维湍流图像中抽取一维截线检验了余维相加性定律, 二维测量的结果与一维成果相近, 说明余维相加性定律在湍流测量中是有效的。

利用 PLIF 技术可以获得真正意义上的湍流三维空间的有关信息, 但事实上, 由于存在片光厚度 δ 它们实际上也是在截面厚度 δ 内的叠加结果。所以, 总是希望将片光做得越薄越好。Prasad 和 Sreenivasan 研究了截面厚度 δ 对分维 D_2 的影响^[8], 得到 D_2 沿截面厚度 δ/η (η 为 Kolmogorov 尺度) 呈高斯型分布:

$$D_2 = 1.22 + 0.147 \exp[-0.01075(\frac{\delta}{\eta})^2] \quad (4)$$

本文采用 CCD 摄像直接得到的图像实际上并不是二维的, 而是投影图像, 即多层“云”的叠加结

果, 可以认为投影图像的 δ/η 很大, 即测量得到的 FD 是式(4) 中指数项消失时的值; 在理想情况, 即 δ/η 极小(接近于零)时得到的才是真正的二维湍流图的 FD, 此时指数项部分的数值为 0.147, 因此所求得的 1.10 ~ 1.40 应加上 0.147 才是可视区边界曲线的 FD。再根据分维测量的不确定分析^[9], 加上 ± 0.04 , 可以得到可视化图片边界曲线的 FD 变化范围: (1.247 ~ 1.547) ± 0.04 。一、二次风界面所在空间比可视区边界曲线所在平面高一维, 根据余维相加性定律, 一、二次风界面的 FD 为 (2.247 ~ 2.547) ± 0.04 。式(4) 是在 Reynolds 数为 4000 的射流和尾流中, 采用最小二乘法得到的回归方程, 是否在所有 Reynolds 数的流动中都符合这个关系, 需进一步研究。

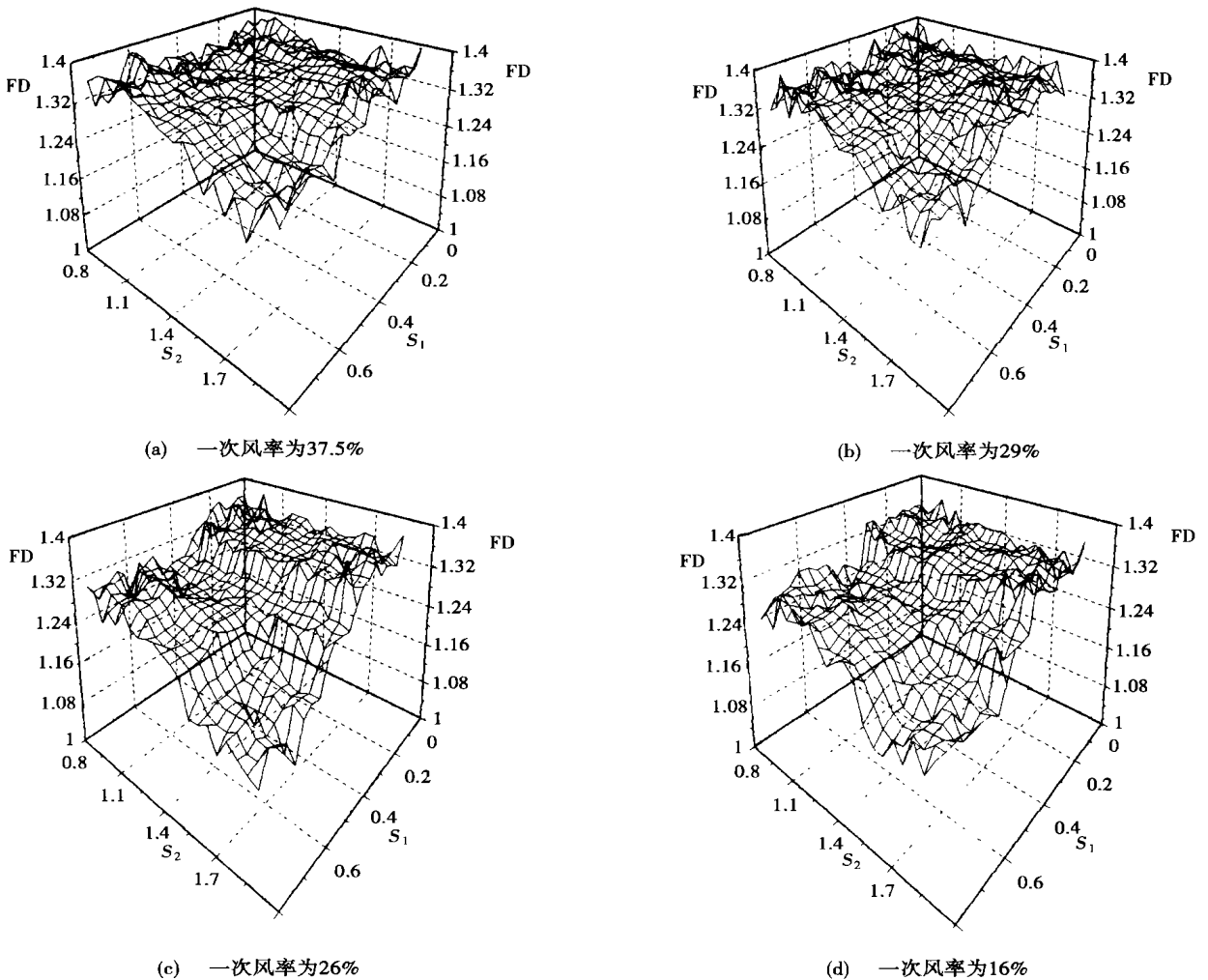


图 8 不同一次风率下, 分形维数随一、二次风旋流强度的变化

5 结 论

(1) 对同轴旋转分层流燃烧器一次风进行烟雾示踪,应用 CCD 摄像机加图像处理的方法对一、二次风混合边界轮廓线进行了分维数计算,得到了确定一、二次风混合特性及分层流动的可靠方法;

(2) 在实验条件下,一次风率为 16%~26%、二次风旋流数为 1.50~1.85、一次风旋流数为 0.50~0.75 时,可以得到带中心回流的分层流动。此时,足够大的中心回流区可保证煤粉气流的稳定着火;分层流动可避免二次风过早混入,保证了分级燃烧降低 NO_x 的功能。

参考文献:

[1] 毛健雄,毛健全,赵树民. 煤的清洁燃烧[M]. 北京: 科学出版

社, 1998.

[2] BARTA L E, LEWIS P F, JANOS M BEER. Low NO_x combustion of pulverized coal using the radially stratified flame core burner[J]. FACT, ASME, 1999, 23: 165-178.

[3] 章毓晋. 图像处理与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

[4] FEDER J. Fractals[M]. New York: Plenum Press, 1988.

[5] 高安秀树. 分数维[M]. 沈步明, 常子文译. 北京: 地震出版社, 1989.

[6] MANDELBROT B B. The fractal geometry of nature[M]. New York: Freeman, 1982.

[7] FALCONER K J. 分形几何—数学基础及其应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1991.

[8] PRASAD R R, SREENIVASAN K R. The measurement and interpretation of fractal dimension of the scalar interface in turbulent flows[J]. Phys Fluids, 1990, 2(5): 792-807.

[9] 杨国伟. 用 $P(\epsilon) = P_0 \epsilon^{1-D}$ 计算实际分形体维数的不确定性[J]. 科学通报, 1992, 10: 953-956.

(渠 源 编 辑)

升级改进大型气垫登陆艇(LCAC)的燃气轮机

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2002 年 3 月号报道,美国乔治亚州阿尔法利塔市的 Vericor 动力系统公司已展开一项大规模计划,将 400 多台 TF40B 燃气轮机升级改进后用于驱动美国海军的 LCAC(大型气垫登陆艇)。目前正在开始一项延长 LCAC 寿命的计划。

LCAC 可以搭载 60 t 有效载荷,它长 26.4 m,船身最大宽 14.3 m,是输送武器、装备和人员的艇,全负载下航速为 40 节,在 40 节航速下的续航力为 370 km。每艘 LCAC 装有最大输出功率为 3 538 kW×4 台的 TF40B 燃气轮机,通过集成的驱动轮系提供推进和垫升。

根据海军对 LCAC 的延寿计划,正在重新建造燃气轮机,TF40B 将升级改进到 ETF40B 技术规格。ETF40B 改型方案将使功率增加 15%,降低耗油率并减少维护工作。

Vericor 称,改进将导致重新设计压气机和涡轮。重新设计压气机以便达到更高的流量和压比,同时优化涡轮以便匹配这些改进;并在压气机叶片上采用防腐蚀涂层、增强压气机轮盘,及改进轴承和密封,进一步减少寿命周期费用。

升级改进的另一个关键部分是采用全面管理的发动机数字控制系统,从而能够方便维护、增强诊断能力并降低寿命周期费用。发动机数字控制系统将与艇升级改进的控制和预警监测系统连接。

LCAC 延寿计划使主要结构的改进和升级改进相结合,预期可使 LCAC 的使用寿命延长 10 年。

(吉桂明 供稿)

Hangzhou, China, Post Code: 310027), WANG Can-xing (Mechanics Department, Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 378 ~ 381

As a kind of momentary all-field measuring technique PIV (particle image velocimetry) measurement and test technology has been tentatively employed to measure particle movement in a circulating fluidized bed (CFB) in order to gain a better understanding of the complicated gas-solid two-phase flow characteristics in the CFB. Preliminary tests have been completed on a 200mm × 200mm (cross-section) × 4m (height) cold-state CFB test rig. In addition, with the use of a binary cross-correlation image processing algorithm obtained was a particle-movement vector diagram on an in-bed section. The preliminary test results have fairly well reflected some characteristics of the particle movement in the CFB, presaging the bright prospects of the application of PIV technique for studying gas-solid dual-phase fluid characteristics in the CFB.

Key words: gas-solid dual-phase flow, particle image velocimetry, circulating fluidized bed

同轴旋转射流燃烧器空气动力场的可视化研究 = **Visualization Research on the Aerodynamic Field of a Co-axial Swirl-jet Burner** [刊, 汉] / WU Jiang, ZHANG Ming-chuan, TIAN Feng-guo, et al (School of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 382 ~ 386

A visualization experimental study has been conducted of the aerodynamic field of a co-axial swirl-jet burner. The boundary of a visual zone, namely, the interface between primary air and secondary air, was obtained through the use of image processing. Moreover, with the use of a fractal theory the fractal dimension of the above interface was also studied. It is found that under different swirling flow intensities of the primary and secondary air and different primary-air feeding rates the fractal dimension variation assumes a definite distribution pattern. On the basis of the above the stratified flow conditions were determined. **Key words:** low NO_x burner, aerodynamic field, visualization experiment, fractal dimension

竖直 U 型管地热换热器的准三维传热模型 = **A Quasi Three-dimensional Heat Transfer Model for Vertical U-Tube Geothermal Heat Exchangers** [刊, 汉] / DIAO Nai-ren, ZENG He-yi, FANG Zhao-hong (Ground-source Heat Pump Research Unit under the Shandong Architectural Engineering Institute, Jinan, China, Post Code: 250014) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 387 ~ 390

In pursuit of a more advanced study of ground-source heat exchangers the temperature distribution of fluid working media along borehole depth direction was investigated. By analyzing the heat transfer process in the borehole of a vertical embedded-tube geothermal heat exchanger derived was an analytical expression of the efficiency of the said exchanger. Thus, it is possible to abandon the irrational assumptions contained in former simplified models and provide a more accurate and rational theoretical basis as well as a calculation method for the design and simulation of geothermal heat exchangers. **Key words:** ground-source heat pump, geothermal heat exchanger, thermal resistance, efficiency

余热锅炉管口区传热的数值分析 = **Numerical Analysis of Heat Transfer at the Tube Inlet Zone of a Heat Recovery Boiler** [刊, 汉] / SONG Chang-hua (Power Engineering Department, Chongqing College of Electric Power, Chongqing, China, Post Code: 400053), LI Long-jian (Power Engineering Institute under the Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 391 ~ 394

On the basis of a heat transfer analysis system for a high-temperature heat exchange equipment inlet tube a physical and mathematical model was set up for investigating the heat transfer at the inlet zone of a heat recovery boiler installed at a Natural Gas Chemical Works. Pertinent numerical analyses are conducted. The results of the analyses indicate that the use of an innovative dual porcelain tube-based protective structure can improve the heat transfer performance and also reduce the temperature of tube material at the tube inlet zone of the heat recovery boiler. This is conducive to alleviating the