

循环流化床内颗粒运动的 PIV 测试

王勤辉¹, 赵晓东¹, 石惠娴¹, 王灿星²

(1. 浙江大学能源清洁利用与环境工程教育部重点实验室; 2. 浙江大学力学系, 浙江 杭州 310027)

摘要: 作为一种瞬时全场测速技术, PIV 测试技术被尝试用于测量循环流化床(CFB)内颗粒运动, 以进一步了解循环流化床内复杂的气固两相流动特性。初步实验已在一个截面为 200 mm×200 mm 高为 4 m 的冷态循环流化床实验台上完成, 并运用二值化互相关图像处理算法, 获得了床内截面上的颗粒流动矢量图。初步测试结果较好地反映了循环流化床内颗粒流动的一些特性, 表明 PIV 技术在循环流化床气固两相流体特性研究中具有较好的应用前景。

关键词: 气固两相流; PIV(颗粒图像测速); 循环流化床
中图分类号: TP301.6 文献标识码: A

1 引言

循环流化床燃烧技术作为新一代的清洁燃烧技术已在世界范围内得到广泛应用, 但由于床内流体动力特性的复杂性和测试手段的局限, 对循环流化床颗粒速度的深入研究相对较少。循环流化床颗粒运动速度不仅直接反映了床内颗粒的运动状态, 而且与颗粒在床中的含率和停留时间密切相关, 同时它也是循环流化床、气力输送系统设计和优化操作基本的参量。目前常常采用的皮托管, 热线风速计和激光多普勒测速仪等测速方法存在着单点测速和对所测流场干扰大的问题^[1]。因此, 采用更加先进和精确的测试技术研究循环流化床床层截面平均颗粒的速度场及其变化规律是有必要的。

PIV 测试技术作为一种瞬时全场测速技术近年来得到广泛推广。它突破了空间单点测量技术的局限性, 对流场不产生干扰, 可在同一时刻记录下整个测量平面的有关信息, 非常适用于研究涡流和湍流等复杂流动, 已开始用来测试气固多相流^[1~4]。近年来有少数研究人员已经采用激光片光技术进行了流化床流场可视化研究^[3~4], 用摄像设备取得流化床悬浮段或循环流化床稀相区流场图像, 通过图

像分析获得颗粒流动信息。但从 PIV 应用于气固多相流动的研究现状中可以得出^[5], 已有的文献中还没有明确将 PIV 技术应用于循环流化床来测试气固两相流动特性的研究。因此在这方面进行探索性的尝试无疑是很有意义的。

利用 PIV 技术在冷态条件下测量了循环流化床粒子运动速度场, 运用二值化互相关图像处理算法, 得出了流场中粒子的轴向速度及水平方向速度分布图, 并分析了粒子运动的变化规律, 对 PIV 技术应用于测试循环流化床床内颗粒运动进行了初步尝试。

2 实验研究

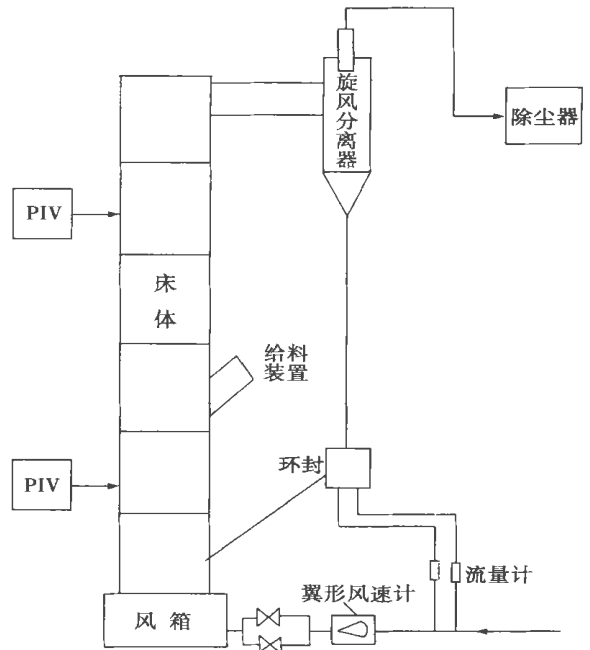


图 1 PIV 用于循环流化床内流场测试系统

收稿日期: 2002-10-20; 修订日期: 2002-12-15

基金项目: 国家重点基础发展规划基金资助项目(G1999022105)

作者简介: 王勤辉(1969-), 男, 浙江江山人, 浙江大学副教授。

实验在一台 4 m 高, 200 mm × 200 mm 矩形横截面循环流化床实验台上完成。实验装置如图 1 所示。该系统由主床、旋风分离器、立管和回料密封装置组成。空气经由布风板引入将颗粒流化后, 在分离器处气固分离, 气体经布袋除尘器、引风机和烟囱排入大气, 颗粒经立管送回主床形成循环。

实验所用床料为平均粒径 382 μm 的河沙, 其物理特性为: 真实密度为 3 020 kg/m³, 堆积密度为 1 580 kg/m³, 最小流化速度为 0.164 m/s。

粒子运动部分测试位置距地 1 663 mm, 分别距壁 1 cm、2 cm、4 cm 和 9.5 cm。由于 PIV 测试中激光光源与 CCD 相机布置需垂直, 所以将实验台相邻侧壁改造为玻璃(厚 5 mm)。在激光片光照射下, 所测侧面粒子图象由 CCD 摄像头记录。PIV 测试系统布置如图 2 所示。

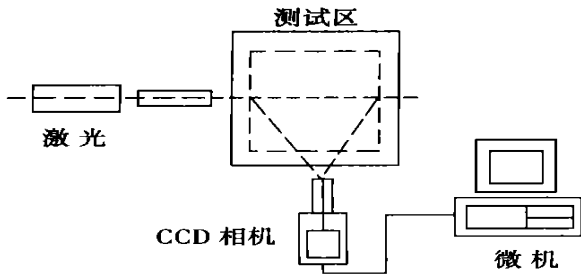


图 2 PIV 测试系统布置图

3 互相关图像处理数学模型

由于二维 PIV 技术图像与实际空间都为平面, 图像速度与实际速度之间只要利用长度样板就可定出两者之间的比例关系, 转换很方便。在确定粒子速度的过程中连续两幅图像中粒子的对应非常关键。下面就简单给出互相关图像粒子对判定的数学模型及确定颗粒速度的公式。更详细的推导过程参见文献 [7]。

在一个向量空间 \vec{X} 中定义两个函数 $f(\vec{X})$ 、 $g(\vec{X})$, 则两函数之间的相关系数为:

$$C_{fg} = \frac{\int_{\vec{X}} f(\vec{X})g(\vec{X})d\mu(\vec{X})}{\sqrt{\int_{\vec{X}} f^2(\vec{X})d\mu(\vec{X})} \sqrt{\int_{\vec{X}} g^2(\vec{X})d\mu(\vec{X})}} \quad (1)$$

其中参数 $\mu(\vec{X})$ 一维时为长度、二维时为面积、三维时为体积。

在 \vec{X} 空间中定义两个部分空间的集合 $\{E_i\} (i$

$= 1, 2, \dots, n)$ 和 $\{F_j\} (j = 1, 2, \dots, m)$, 在该集合中, 若 $f(\vec{X})$ 和 $g(\vec{X})$ 分别满足:

$$f(\vec{X}) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \chi_{E_i}(\vec{X}) \quad (2)$$

$$g(\vec{X}) = \sum_{j=1}^m \beta_j \chi_{F_j}(\vec{X}) \quad (3)$$

其中: α_i 和 β_j 为常数, $\chi_{E_i}(\vec{X})$ 和 $\chi_{F_j}(\vec{X})$ 分别为定义在空间 E_i 和 F_j 上的函数, 有:

$$\chi_{E_i}(\vec{X}) = \begin{cases} 1 & \vec{X} \in E_i \\ 0 & \vec{X} \notin E_i \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \chi_{E_{i1}}(\vec{X}) \times \chi_{E_{i2}}(\vec{X}) &= \chi_{E_{i1} \cap E_{i2}}(\vec{X}) \\ &= \begin{cases} \chi_{E_{i1}}(\vec{X}) & i1 = i2 \\ 0 & i1 \neq i2 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\int_{\vec{X}} \chi_{E_i}(\vec{X})d\mu(\vec{X}) = \mu(E_i) \quad (6)$$

则 $f(\vec{X})$ 和 $g(\vec{X})$ 成为阶段函数, 可得:

$$\int_{\vec{X}} f^2(\vec{X})d\mu(\vec{X}) = \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \mu(E_i) \quad (7)$$

$$\int_{\vec{X}} g^2(\vec{X})d\mu(\vec{X}) = \sum_{j=1}^m \beta_j^2 \mu(F_j) \quad (8)$$

$$\int_{\vec{X}} f(\vec{X})g(\vec{X})d\mu(\vec{X}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_i \beta_j \mu(E_i \cap F_j) \quad (9)$$

将式(7) ~ 式(9)代入式(1)得:

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_i \beta_j \mu(E_i \cap F_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \mu(E_i)} \sqrt{\sum_{j=1}^m \beta_j^2 \mu(F_j)}} \quad (10)$$

若 $\{E_i\} (i = 1, 2, \dots, n)$ 和 $\{F_j\} (j = 1, 2, \dots, m)$ 分别代表两个时刻粒子所占有的像素空间, n, m 分别代表两个时刻的粒子所占有的像素数, α_i, β_j 为图像的灰度值, 则式(10)即为连续两幅图像中粒子对应判定的数学模型。

如何判断所测连续时刻两幅图像中粒子为同一粒子, 即粒子之间的对应是确定粒子速度的关键, 如图 3 所示。首先在图 3 前部分图像中选择一个参考粒子及其周围区域, E_i 为参考粒子, E_i 为以 E_i 为中心、半径为 R 的搜索区域内的粒子。然后在图 3 后部分图像中选择候补粒子及其周围区域, F_j 为图 3 后部分图像的候补粒子, F_j 为以 F_j 为中心、半径为 R 的搜索区域内的粒子。再利用式(10)计算参考粒子和候补粒子所对应的两个研究区域的相关系数, 比较参考粒子和所有候补粒子的相关系数值, 最大值所

对应的候补粒子即为参考粒子的同一粒子。

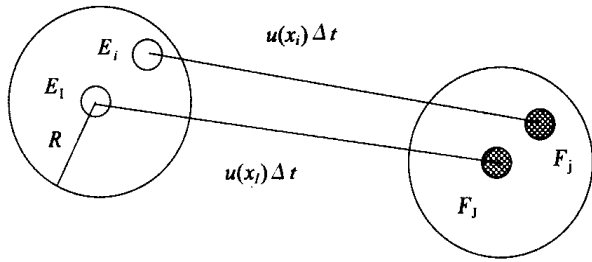


图 3 在 t 时刻和 $t + \Delta t$ 时刻图像粒子对应示意图

粒子对应完成后, 可以计算出粒子的移动距离, 粒子速度为:

$$u = \frac{\Delta s_x}{\Delta t}, \quad v = \frac{\Delta s_y}{\Delta t} \quad (11)$$

其中: u 和 v 为粒子速度分量, Δs_x 和 Δs_y 分别为粒子在 x 和 y 方向上的位移; Δt 为连续两幅图像时间间隔。

另外, 通过数字式图像记录仪所获得的粒子图像在不同的像素上具有不同灰度值分布, 在判定连续两幅图像粒子对之前要进行图像粒子的标定, 当像素的灰度值大于某个阈值时, 该像素为粒子的像素, 否则为背景像素, 粒子像素标定后, 连续的粒子像素就构成一个粒子。同时, 由于气固多相流动的复杂性, 可能出现粒子溢出所测截面, 在获得的图片中可能出现粒子图像重叠和存在图像背景噪声等情况, 连续两幅图像中可能出现粒子对误对应。因此在确定粒子速度之后还要进行误对应粒子速度的判断、消除及后处理, 这样才能得到信息充分正确的速度分布矢量图。由于篇幅所限, 关于这方面内容的数学原理参见文献[6]。

4 测试结果和分析

在标高 1 663 mm 处的实验段, 通过改变激光片光源的位置, 我们测试了近壁、流动中心区及介于两者之间的两个侧面。在不同的固粒浓度和风速下拍摄了实验段内流场, 提取有代表性的距壁 2 cm 处的工况。此时床出口压力为 -150 Pa, 风箱入口压力 3 kPa, 床内风速 3.3 m/s, 固粒循环率 0.06 kg/s。

运用互相关图像处理算法得到速度矢量图(如图 4 所示)。在图 4 中, 每一个箭头对应用相机看到的相应的粒子。由于相机不可能捕捉到每一个粒子, 导致图示右侧比左侧粒子少。实际上, 可认为粒子浓度沿床中心对称。在边壁区(约占所测流动截

面的 17.5%), 颗粒以不同角度从主流中逃逸出来撞击到壁面上。在边壁区和核心区之间, 由于受核心区主气流向上拽力和边壁区颗粒下落惯性力的作用, 颗粒返混剧烈, 粒子流动比较紊乱, 大部分粒子流动方向向下, 但有少数粒子流动方向向上, 形成局部旋流或脉动现象。

在上面的工况下, 获得了距侧壁不同位置及距地不同高度处的速度分布结果, 如图 5 和图 6 所示。由速度数据分析, 可得平均速度大小为 1.45 m/s, 速度大小范围为 0.124 ~ 3.96 m/s。从图 5 中可以看出, 颗粒向上和向下流动同时存在, 大多数颗粒向下流动。在近左壁(相对位置为 -1 ~ -0.85), 大多数颗粒向下流动。而且, 我们也可以看到近中心区颗粒的轴向速度比边壁区附近略高。PIV 的基本思想是追踪连续两幅图像中的颗粒, 这就需要对两幅图像中的同一颗粒进行判定。对于同样大小的颗粒判定为同一颗粒的几率将随着固粒容积浓度的增加而减少, 这必然使获得的结果产生误差。

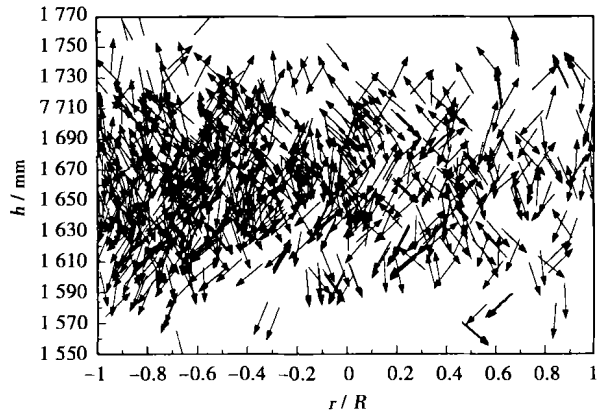


图 4 距壁 2 cm 测面速度矢量图

图中符号 r 表示从测试位置到床中心的距离, R 表示床中心到床壁面的距离, h 表示测试位置距地面的高度, v 表示粒子轴向速度, u 表示粒子水平方向速度。在图 6 中可以看到颗粒径向速度在床核心区略高, 并且在径向方向从中心区到边壁区速度逐渐减少。这表明近壁区颗粒径向速度较低, 颗粒主要是沿轴向方向运动。

结果显示在床中从核心区(大多数颗粒向上流动)到边壁区(大多数颗粒向下流动)存在一个过渡区, 从颗粒速度分布可以看出在该区域内流型复杂。在过渡区, 当一些颗粒向上流动时, 有很多颗粒向下流动, 同时有很多颗粒从核心区运动到边壁区, 并且有很多颗粒从边壁区运动到核心区。

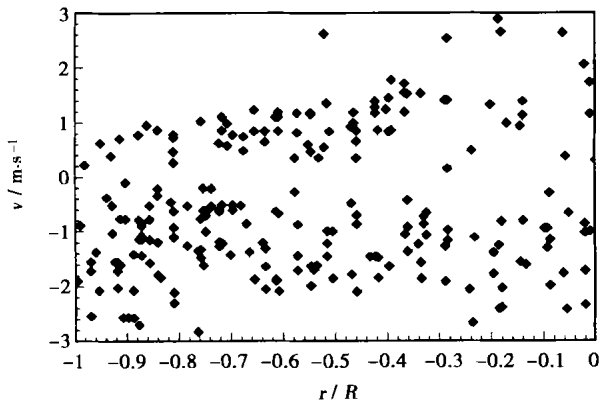


图5 粒子轴向速度沿水平方向分布

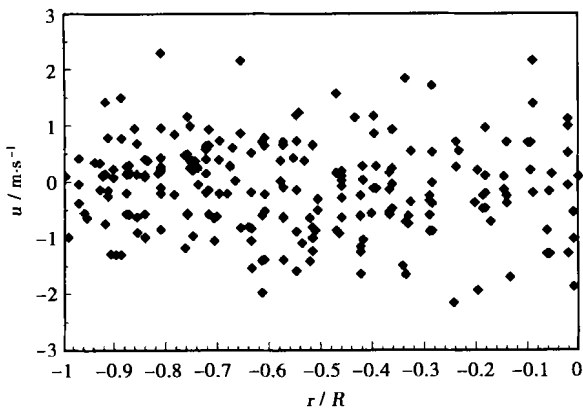


图6 粒子水平方向速度沿水平方向分布

5 误差分析

PIV 对于获取瞬时二维工况速度图像是非插入技术,实验的确定性影响数据分析。在整个PIV 试验过程中都存在速度矢量的测量误差。

首先由于 CCD 照相机对于粒子图像取样导致了绝对误差。其次,误差可能由照相机参数和帧捕捉器的校准引起。照相机参数可以很好地校准并且相应的误差可以忽略。但是依赖于操作器的开始位置的选择可能产生不确定性。粒子图像的大小随着起始位置的增加而减少,这种不确定性可以达到

$\pm 1/4$ 像素。这个误差对于测量轴向速度可能并不重要,但是对于测量径向速度时,这个误差是重要的。总的显示轴向速度的不准确性达 1.6%。PIV 基本上对于测量床内的粒子轴向速度是有效的。

同时由于本次试验采用河沙作为示踪粒子,其光学特性相对较差,也不可避免地对图像的效果产生影响,带来误差。在下一步的试验测试中,将采用对光敏感性好的透明玻璃珠作为试验床料,来提高测试精度,减少试验误差。

6 结论

利用 PIV 技术在冷态条件下初步测量了循环流化床高浓度粒子运动速度场,获得了床内截面上的颗粒流动矢量图。运用适合于高浓度的互相关图像处理算法,获得了流场中粒子的轴向速度及水平方向速度分布,结果分析反映了循环流化床床内颗粒流动的一些特性。

本文作者还有骆仲决和岑可法教授。

参考文献:

- [1] KAORU MIYAZAKI, GANG CHEN, FUJIO YAMAMOTO, *et al.* PIV measurement of particle motion in spiral gas-solid two-phase flow[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1999, 19(4): 194-203.
- [2] KADAMBI J R, MARTIN W T, AMIRTHAGANESH S, *et al.* Particle sizing using particle imaging velocimetry for two-phase flows[J]. *Powder technology*, 1998, 100(2/3): 251-259.
- [3] JOACHIM WERTHER. Measurement techniques in fluidized beds[J]. *Powder Technology*, 1999, 102(1): 15-36.
- [4] LACKERMEIER U, RUDNICK C, WERTHER J, *et al.* Visualization of flow structures inside a circulating fluidized bed by means of laser sheet and image processing[J]. *Powder Technology*, 2001, 114(1/3): 71-83.
- [5] 石惠娟,王勤辉,骆仲决,等. PIV 应用于气固多相流动的研究现状[J]. *动力工程*, 2002, 22(1): 1589-1593.
- [6] 王灿星. 粒子图像速度仪图像处理的理论研究及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.

(渠源 编辑)

words: marine gas turbine, primary surface recuperator, small channel, flow and heat transfer, design calculation

近零冲角下环型压气机叶栅的弯曲叶片表面静压的研究= **A Study of the Surface Static Pressure of Curved Blades in Annular Compressor Cascades at Near-zero Incidence** [刊, 汉] / WANG Dong (School of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030), SU Jie-xian, ZHONG Jing-jun, WANG Zhong-qi (School of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 369 ~ 371

On an annular diffusion-cascade experimental wind tunnel detailed measurements of traditional straight, positive leaned, positively curved and S-type blades of annular axial flow compressor cascades were carried out under an inlet flow field distortion at near-zero incidence. The impact of different curved blades on the distribution of surface static pressure is analyzed. The results of the analysis indicate that the use of the positive leaned, positive curved and S-type blades can lead to an increase in blade root static pressure and a reduction in the accumulation of low-energy fluid at the hub region. This will result in a considerable improvement of the flow field configuration and a lessening of gas flow separation and blockage at the hub region, thus enhancing diffusion capability and decreasing the end-wall loss at the hub region. **Key**

words: curved blade, annular diffusion cascade, blade surface static pressure

材料硬度值下降对汽轮机转子寿命消耗计算的影响= **The Impact of Material Hardness Values on the Service Life Calculation of Steam Turbine Rotors** [刊, 汉] / YANG Ji-min, LU Xu-shang (Power Engineering Department, Changsha Electric Power Institute, Changsha, China, Post Code: 410077), CHEN Yu-lin (Chentang Thermal Power Generation Co. Ltd., Tianjin, China, Post Code: 300221), YUAN Rui (Henan Electric Power Exploration Design Institute, Zhenzhou, China, Post Code: 450007) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 372 ~ 374

Through an investigation of the hardness values of high-temperature metallic materials it is found that the reduction in hardness values may have a relatively great impact on the low-cycle fatigue life and high-temperature creep life of steam turbine rotors. The consideration of this factor of hardness value variation will ensure a better evaluation of the service life of steam turbines. **Key words:** hardness value, service life consumption, low-cycle fatigue, high-temperature creep

600 MW 机组甩负荷试验分析= **Load-rejection Test Analysis of a Chinese-made Imported Technology-based 600MW Turbogenerator Set** [刊, 汉] / LI Sheng-quan (Harbin Power Plant Engineering Co. Ltd., Harbin, China Post Code: 150040), HUANG Run-ze (Liaoning Electric Power Science Academy, Shenyang, China, Post Code: 110006), ZUO Shi-chun, ZHANG Li (Harbin No. 3 Power Plant, Harbin, China, Post Code: 150025) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 375 ~ 377

The load-rejection test of a Chinese-made imported technology-based 600MW power plant is analyzed in conjunction with the logic control function of a digital electro-hydraulic system. The authors expound the major factors that affect both the speed control of the turbine governing system and the operation safety of the 600MW unit. The dynamic characteristics of the governing system have been proved to be excellent. **Key words:** 600MW power plant, load rejection, digital electro-hydraulic system

循环流化床内颗粒运动的PIV测试= **PIV (Particle Image Velocimetry) Measurements of Particle Movement in a Circulating Fluidized Bed** [刊, 汉] / WANG Qin-hui, ZHAO Xiao-dong, SHI Hui-xian (Education Ministry Key Laboratory on the Clean Utilization of Energy Sources and Environmental Engineering under the Zhejiang University,

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