

# 表面活性剂减阻流体湍流空间结构试验研究

王德忠, 胡友情, 王松平, 周荣生

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030)

**摘 要:** 本文应用 PIV (Particle Image Velocimetry) 和 PDA (Phase Doppler Anemometry) 在二维流道内对 CTAC (Cetyltrimethyl Ammonium Chloride) 减阻流体湍流流场进行试验研究, 得到减阻流体湍流速度分布。研究表明: 在完全减阻区内, 减阻流体的减阻性能随雷诺数的增大而增大, 在过渡减阻区内, 减阻流体的摩擦系数则随着雷诺数的增大而逐渐回升, 最终回到与溶剂相当的水平上; 减阻流体的速度分布曲线在近壁面处与牛顿流体层状速度曲线趋近, 但二者并不完全重合; 在流道近壁面处, 水湍流流动时所能观测到的强烈的旋涡波动在减阻流体中基本消失, 与此同时, 在此区域内减阻流体的速度轮廓线与流道几乎平行, 且该平行轮廓线部分所占比例较牛顿流体湍流流动时相应部分要大很多, 减阻流体的湍流强度受到了极大的抑制。

**关 键 词:** 减阻流体; 湍流结构; 表面活性剂溶液; PDA; PIV

中图分类号: O357.5 文献标识码: A

## 1 引 言

由于在水中添加少量的高分子聚合物或阳离子表面活性剂, 可以降低湍流阻力, 经测试发现, 最高可以有 80% 的湍流流动阻力被抑制<sup>[1-2]</sup>, 所以这一技术在远距离流体输送、区域供热供冷等领域内具有良好的应用前景<sup>[3-5]</sup>。

添加表面活性剂后的减阻流体在流动过程中表现出了极为复杂的非牛顿流体的流动特性<sup>[6]</sup>, 传统的直接接触式测量法对测量它的湍流流动结构存在较大的难度, 难以满足研究的需要。

近年来出现的激光流场测试技术则为研究减阻流体等这类复杂的非牛顿流体的流动结构提供了有力的手段。PDA 系统可以得到流场内各点在不同时刻的速度场信息, 从流动的角度揭示减阻流体的减阻机理; 而 PIV 系统可在同一时刻记录下整个流场的有关信息。两者结合不仅可以获得流场内各点在

不同时刻的速度场信息, 而且还可以得到整个流场在同一时刻流动中小尺度结构的图像, 即流动空间结构, 从而进一步揭示出减阻流体的减阻机理。

针对 CTAC 减阻流体的雷诺应力分布、速度脉动特征及其减阻的极限性和优选性, 我们已经进行了一些试验研究<sup>[7-8]</sup>。在此基础上, 进一步应用 PDA 和 PIV 激光测量系统针对减阻流体湍流空间结构在时间和空间上的分布以及表面活性剂对流体摩擦系数的影响等进行试验研究, 以期得出减阻流体在流动过程中动量和能量传递的规律, 从而揭示出减阻流体的减阻机理。

## 2 试验系统

### 2.1 二维流道

试验台采用开放式闭路循环系统, 贮水箱的液面完全对环境敞开。试验系统详细描述见文献[7]。

由于对流动的稳定性要求较高, 整个循环系统的驱动装置为一台 IS80-65-160 离心水泵, 并由变频器进行流量控制。试验中压差信号采用 CECC-530 型差压变送器测量, 两个取压孔间距 2.98 m。采用 LWGY-80A 型涡轮流量传感器进行流量测量, 将其安装在系统回水管的中间位置。

### 2.2 表面活性剂溶液

表面活性剂的种类很多, 它是否具有减低湍流阻力的能力, 要看表面活性剂分子在溶液中溶解以后能否聚集形成一种纤维状的聚合结构, 它易变形、有弹性、可使整个溶液具有粘弹性从而为非牛顿流体。本研究选用的表面活性剂为十六烷基三甲基氯化铵 (Cetyltrimethyl Ammonium Chloride 简称 CTAC), 其水溶液呈碱性。为了使纤维状的聚合结构变得更加稳定, 溶液中一般要加入适当浓度的酸性物质。

收稿日期: 2003-09-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59976021); 教育部重点项目(0298); 2002 年度教育部“优秀青年教师资助计划”项目(2065); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20030248032)

作者简介: 王德忠(1962-) 男, 山东益都人, 上海交通大学教授, 博导。

验中使用的酸性物质为水杨酸钠(Sodium Salicylate 简称 Nasal), 它是通常被采用的适合于碱性表面活性剂溶液的一种中和物。实验使用的水是当地的自来水。

### 2.3 PIV 测量系统

研究采用的 PIV (Particle Image Velocimetry, 简称 PIV) 测量系统为 DANTEC 公司产品, 其型号为 PIV2100。流道和 PIV 系统的布置如图 1 所示。图像覆盖了流道的整个高度。试验中, PIV 系统在拍摄图像时, 前后两帧图像的拍摄时间间隔会随着流体速度的不同而有所变化, 以获得满意的测量结果。示踪粒子选用氧化镁粒子, 平均直径为  $5 \mu\text{m}$ 。适当控制它的浓度可以获得清晰的 PIV 图像。

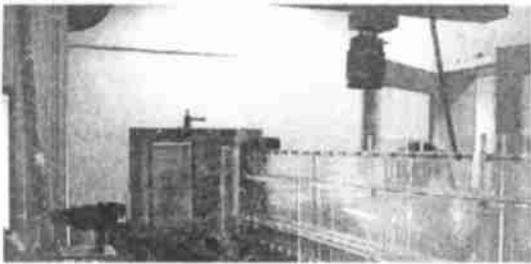


图 1 PIV 系统布置示意图

### 2.4 PDA 测量系统

试验中使用的 PDA (Phase Doppler Anemometry, 简称 PDA) 测量系统为 DANTEC 公司产品, 型号为 58N81。其光学探头固定在坐标架上(如图 2 示), 坐标架可以在 3 个方向上运动, 定位精度达  $0.01 \text{ mm}$ 。X、Y 和 Z 方向速度分别由  $488 \text{ nm}$ 、 $514.5 \text{ nm}$  和  $476.5 \text{ nm}$  的光束进行测量。在每个测量点, 分别采集了 10,000 个单独的速度数据, 以计算平均速度, 从而使随机误差低于  $0.5\%$ 。

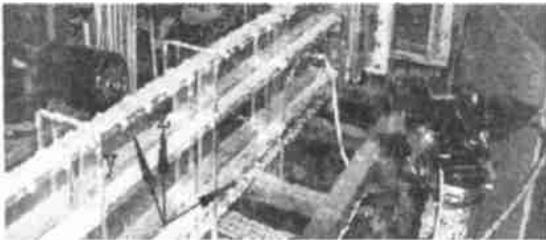


图 2 PDA 测量系统

## 3 试验原理及试验结果分析

### 3.1 表面活性剂对流体摩擦系数的影响

图 3 是典型的  $C_f - Re$  曲线。范宁摩擦系数  $C_f$  可以通过下式计算得到:

$$\tau_w = \frac{\Delta P H W}{2L(H+W)}$$

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho U_b^2}$$

式中,  $\tau_w$  为壁面剪切应力;  $\Delta P$  为试验测得的静差压;  $H$  是流道高度;  $W$  是流道宽度;  $L$  是两个取压孔之间的距离;  $C_f$  为摩擦阻力系数;  $\rho$  为溶剂的密度;  $U_b$  为流体断面平均流速。雷诺数的计算式为:

$$Re = \frac{U_b d}{\nu}$$

其中,  $d$  为矩形管道截面特征尺寸, 此处为当量直径;  $\nu$  为溶剂运动粘性系数。由于溶液的浓度较低, 溶液与纯溶剂的粘度相差不大, 试验中使用溶剂的粘度替代溶液的粘度是可行的<sup>[10]</sup>。

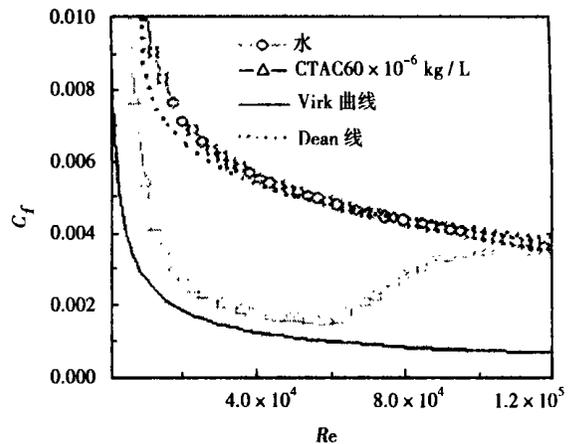


图 3  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  时液体摩擦系数  $C_f$  与雷诺数  $Re$  的变化关系

对不加任何添加剂的水而言, 其摩擦系数曲线随着雷诺数的增大而平稳地呈递减变化, 且与描述牛顿流体湍流流动的 Dean 曲线<sup>[11]</sup> 基本吻合。相比之下, 表面活性剂减阻流体的摩擦系数曲线的变化则有所不同。临界雷诺数  $Re_c$  将减阻流体的流动分为两个不同的区域: 完全减阻区和过渡减阻区。在完全减阻区内, 减阻流体的减阻性能随雷诺数的增大而增大, 最后试验点接近 Virk<sup>[12]</sup> 最大减阻曲线, 达到最大减阻。在过渡减阻区域内, 随着雷诺数的增大, 摩擦系数则逐渐回升, 最终回到与溶剂相当的水平上。在此区域内, 减阻流体的流动情况表现极为复杂, 可看作减阻流动和常规湍流流动的混合。

### 3.2 表面活性剂对流场内各点平均速度的影响

流场内某一测量点的流体平均速度  $U$  通过 PDA 系统先测量出流场的瞬时速度分布, 再通过相

应的公式计算而得到的。其计算式为:

$$U = (\sum_{i=1}^N U_i) / N, i = 1, 2, 3 \dots N$$

表示系统检测到的第  $i$  个粒子。图 4 所示为通过 PDA 逐点测得的水和减阻流体流场的平均速度分布图。为了便于比较, 本文采用了相对速度的形式。流体的断面平均速度  $U_b$  作为比较的标准。研究表明, 在近壁面处, 减阻流体的速度梯度比相应情况下水湍流流动时的速度梯度要小, 但与牛顿流体的层流流动情况又不完全吻合, 这是由于表面活性剂的加入, 在近壁面处流体表观粘度增大, 使得流动趋向于层流流动, 但它受到湍流核心区涡旋的影响, 在流动时有速度脉动, 在流动时显示出不同于牛顿流体的层流流动; 而在流道中心区域, 减阻流体的速度分布曲线则呈现出相反的趋势, 即其速度曲线的梯度要比相应情况下水湍流流动时速度分布曲线的梯度大。

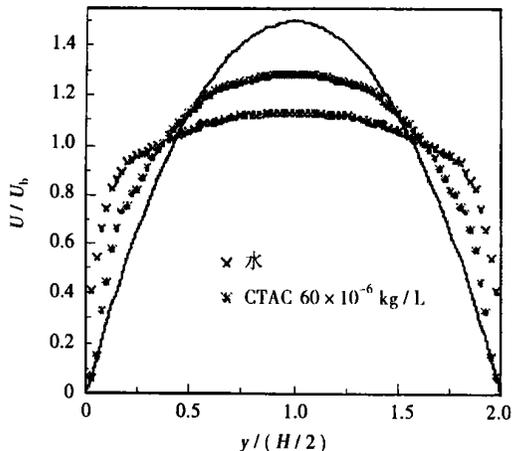


图 4  $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Re = 41\ 589$  时, 通过 PDA 系统测得流场内各点平均速度分布图(光滑线表示牛顿流体层流流动场内各点的平均速度分布)

### 3.3 表面活性剂对瞬时速度空间分布的影响

通过 PIV 技术先测得流体在某一雷诺数时流场内各点的瞬时速度矢量, 然后再根据这些速度矢量的大小生成相应的速度轮廓线图, 从而得到流场流动中小尺度结构的逼真图像, 即流动空间结构。

图 5 所示为  $25\text{ }^\circ\text{C}$  时水的瞬时速度空间分布轮廓线图。在此图中, 流体的主流速度方向为从左向右, 图中  $x-y$  平面为沿流道中心线方向, 囊括了流道整个  $y$  方向, 图中上下边界分别表示流道的两个内壁面。图中用灰度级表示速度矢量的大小。

由图 5 看出, 在流道的中心区域, 随机分布着极为复杂的脊、谷和峰值。这意味着在此区域内, 时间

和空间上存在着较大的速度波动。由于水湍流流动时在近壁面处速度梯度较大, 所以在流道的近壁面区域(从壁面到  $y/H=0.1$  区域)能明显看出其速度轮廓线分布非常密集。在湍流核心区和近壁面区之间的过渡层, 可以明显观测到涡旋的存在, 这些涡旋的中心位置以及尺寸大小都不是固定的。研究还发现, 在水的速度轮廓线图近壁面区域, 随机存在着不规则的加速面和减速面。由于流体由低速流动区域向高速流动区域突破是湍流能量传递和湍流混合的重要现象<sup>[13]</sup>, 所以这种加速面和减速面的存在与牛顿流体湍流流动在近壁面区域的流动特征是相符的。

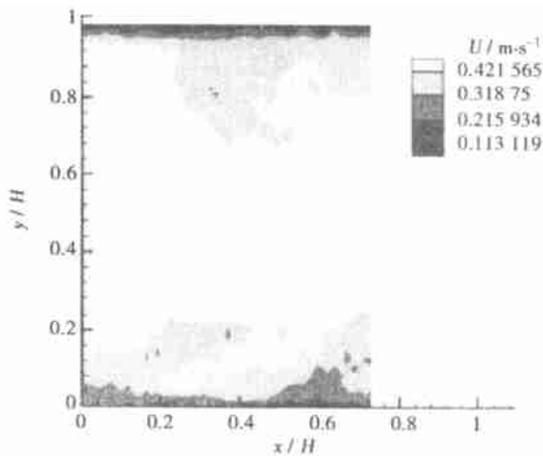


图 5 通过 PIV 系统获得的水的瞬时速度空间分布轮廓线图( $Re=41\ 589$ ,  $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ )

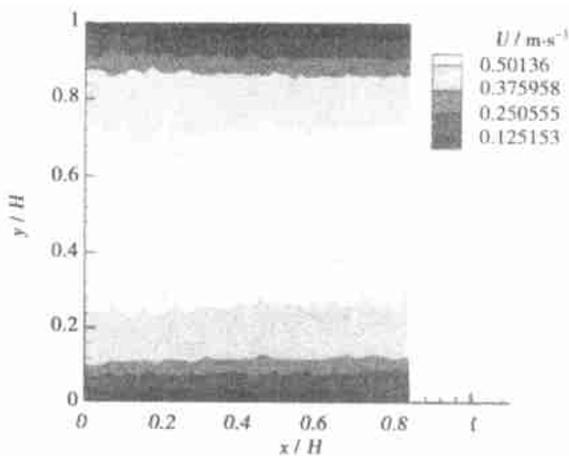


图 6 通过 PIV 系统获得的  $60 \times 10^{-6}\text{ kg/L}$  CTAC 减阻流体瞬时速度空间分布轮廓线图( $Re=41\ 589$ ,  $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ )

图 6 所示浓度为  $60 \times 10^{-6}\text{ kg/L}$  时表面活性剂

减阻流体的速度矢量轮廓线图。其流动工况、流体流动方向及速度轮廓线图的生成过程与图 5 完全相同。

在近壁面区及过渡层, 减阻流体速度轮廓线的分布与流道的壁面几乎平行。而且该平行轮廓线部分所占的空间比图 5 中相应的部分明显要宽很多。由此推断, 这种变化应该是由表面活性剂单个分子或离子吸附壁面, 在近壁面区表现粘度增大, 速度梯度减小<sup>[14]</sup>, 在过渡层形成了由剪切诱导结构所致的棒状胶束, 使得过渡层明显增厚, 同时抑制漩涡的产生。

研究还发现, 在过渡区的界面存在有类似正弦的小波形。这是因为湍流核心区的流动阻力所致能量散失沿过渡层向外传递, 过渡层“接收”了能量而发生能量的积聚, 这种积聚是缓慢而连续的。当过渡层内部积聚到一定程度是发生能量的释放, 这种释放是猝然的。由此可认为: 过渡区能量释放是发生在波动的波峰, 各个小波峰是能量积聚的结果。由于湍流核心区的流体质点运动的不规则性, 所以过渡层的波具有近似的周期性, 又具有随机性。孙寿家等学者在针对流体层流附面层粘性减阻进行研究时, 也得到了类似结果。

## 4 结 论

通过应用 PIV 和 PDA 系统在二维流道内对 CTAC 减阻流体湍流流动结构的试验研究, 得出以下结论:

(1) 在完全减阻区内, 减阻流体的减阻性能随雷诺数的增大而增大。在过渡减阻区内, 随着雷诺数的增加, 则摩擦系数逐渐回升, 最终回到与溶剂相当的水平上。

(2) 在流道中心处, 减阻流体的速度梯度较水湍流流动时大, 而在近壁面处则恰恰相反。并且在近壁面处, 减阻流体的速度分布曲线趋近于牛顿流体层流流动时的速度分布曲线, 但并不重合于此曲线。

(3) 减阻流体速度轮廓线图在近壁面处与流道几乎平行, 且该平行轮廓线部分所占的比例较水湍流流动时相应部分要宽很多。而且, 在近壁面处减阻流体的涡流随机运动幅度与水湍流流动时相比明显大大减小。由此表明, 这些变化应该都是由于过渡层(弹性层)的变厚和近壁面处即粘性底层速度梯度的减小而导致的。

致谢: 本试验得到上海交通大学机械与动力工程学院教育部重点实验室的大力协助和支持; 同时感谢金浩工程师在试验中给予的指导和帮助。

## 参考文献:

- [1] GYR A, BEWERSDORFF H W. Drag reduction of turbulent flows by additives[M]. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [2] CHAFFEY C E, PORTER G S. Steady shear flow of solutions of rod-like macromolecules [J]. *Journal of Rheology*, 1984, 28(2): 249—272.
- [3] KAWAGUCHI Y, TAWARAYA Y, YABE A, et al. Turbulent transport mechanism in a drag reducing flow with surfactant additive investigated by two component LDV [A]. *Proc 8th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics* [C]. Lisbon, 1996. 7—8.
- [4] KAWAGUCHI Y, TAWARAYA Y, YABE A, et al. Active control of turbulent drag reduction in surfactant solution by wall heating [A]. *Fluids Engineering Division Conference, Vol. 2* [C]. United States: ASME, 1996.
- [5] LI P W, DAISAKA H, KAWAGUCHI Y, et al. Turbulence structure of drag reduction surfactant solution in two dimensional channel with additional enhancement method [A]. *ASME Proceedings of the 5th ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference* [C]. San Diego, 1999. 15—19.
- [6] OHLENDORF D. Surfactant system for drag reduction physico-chemical properties and rheological behaviour [J]. *Rheological Acta*, 1986, 25: 468—486.
- [7] 许 鹏, 王德忠. 低浓度 CTAC 减阻流体流动性能试验研究, 热能动力工程, 2002, 17(6): 585—588.
- [8] 官 锋, 许 鹏, 王德忠, 等. 氯化十六烷基三甲基季铵盐减阻流体试验 [J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(2): 193—197.
- [9] POLLERT J, ZAKIN J L, MYSKA J, et al. Use of friction reducing additives in district heating system field test at Kladno—Krocehlav [A]. *Proc Int District Heating and Cooling 1994 conference* [C]. Czech Republic, 1994. 141—156.
- [10] BEWERSDORFF H W, OHLENDORF D. The behavior of Drag-reducing anionic surfactant solutions [J]. *Colloid and Polymer Sci*, 1988, 266(10): 941—953.
- [11] DEAN R B. Reynolds number Dependence of Skin Friction and Other Bulk Flow Variables in Two-dimensional Rectangular Duct Flow [J]. *Fluids Eng*, 1978, 100: 215—223.
- [12] VIRK P S. Drag Reduction Fundamentals [J]. *AIChE J*, 1975, 21(4): 625—656.
- [13] BARK, FRITZ H. On the wave structure of the wall region of a turbulent boundary layer [J]. *Fluid Mech*, 1975, 70(2): 229—250.
- [14] 赵国玺. 表面活性剂物理化学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1991.
- [15] 孙寿家, 王 军, 毛 莹. 层流附面层粘性减阻作用分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1994, 26(1): 53—58.

(渠 源 编辑)

was accomplished by the use of a gas-solid drag force. By way of simulations a transformation process was obtained of the generation, movement and explosion/cracking of gas bubbles, which has been found to be in full agreement with experimental results. By using different drag force models a simulation was performed of the fluidized bed dense two-phase flows. A comparison with Kuipers experimental results shows that the use of a Gidaspow drag force model can result in a more accurate description of the dense two-phase flows in the fluidized bed. **Key words:** Eulerian model, gas-solid two-phase flow, gas bubble, fluidized bed

环栅式动力除尘器的两相流数值模拟 = **Numerical Simulation of Two-phase Flows of a Cascade-ring Type of Aerodynamic Dust Collector** [刊, 汉] / LIN Feng, LIN Long (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), HU Qi-di (Shenzhen Meishi Electric Power Industrial Co. Ltd., Shenzhen, China, Post Code: 518000), ZHANG Shi-lei (Thermal Power Plant of Jilin Petroleum Group Co. Ltd., Jilin, China, Post Code: 138000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 134 ~ 136, 190

A numerical simulation of two-dimensional two-phase flows was conducted of a cascade-ring aerodynamic dust collector in an effort to enhance its performance through an improved design. During the simulation a particle trajectory model has been employed with a  $k-\epsilon$  model being used to simulate gas-phase turbulent flows and a Stochastic model used to describe the turbulent diffusion of a particle phase. The flow conditions of ash particles and gas, and the characteristics of the dust collector were studied and analyzed. **Key words:** two-phase flow, numerical simulation, dust removal, air purification

二阶全展开 ETG 有限元方法在方腔自然对流模拟中的应用 = **The Application of a Second-order and Full-extension ETG Finite Element Method for the Simulation of Natural Convection in a Square Cavity** [刊, 汉] / WEI Ying-jie (Astronautics Engineering and mechanics Department & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150090), HE Zhong-yi (School of Municipal & Environmental Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150090) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 137 ~ 139

A second-order and full-extension ETG finite element method was employed to carry out a discrete solution for a N-S equation and an energy equation. With a square-cavity natural convection problem of zero initial value serving as an example a numerical simulation was conducted. The flow and temperature fields of natural convection in a square cavity at different Rayleigh numbers were calculated. The steady-state results being finally attained are in very good agreement with those of a standard numerical solution. Moreover, the time evolution process depicting the flow and temperature fields has been reflected quite well. Especially worth mentioning here is the capture of the change of vortex structure in the flow field before and after bifurcation. All the above shows that the second-order and full-extension ETG finite element method features a relatively fair stability and precision, and has its definite merits when used to evaluate the time evolution process of temperature and flow fields. **Key words:** second-order and full-extension ETG finite element, square cavity, natural convection

表面活性剂减阻流体湍流空间结构试验研究 = **Experimental Research on the Turbulent Spatial Structure of a Drag Reducing Fluid with a Surfactant being Added** [刊, 汉] / WANG De-zhong, HU You-qing, WANG Song-ping, ZHOU Rong-sheng (Institute of Mechanical and Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 140 ~ 143

An experimental study was conducted of the turbulent flow field of a CTAC drag reducing fluid in a two-dimensional flow

channel with the use of PIV (particle image velocimetry) and PDA (Phase Doppler Anemometry). As a result, the turbulent-flow speed distribution of the drag-reducing fluid was obtained. The results of the study indicate that in a fully drag-reducing zone the drag-reducing performance of the drag-reducing fluid will increase with an increase in Reynolds number. In a transitional drag-reducing zone the friction factor of the drag-reducing fluid will gradually ascend with an increase in Reynolds number, and finally return to a level comparable to that of a solvent. The speed distribution curves of the drag-reducing fluid at the near-wall surface will tend to approximate to the laminar speed curves of a Newtonian fluid, but there lacks a total congruence of these two curves. At the near-wall surface of the flow channel the intensive vortex fluctuations observable at the time of water turbulent flows will basically disappear in the drag-reducing fluid. In the meantime the speed contour line of the drag-reducing fluid in the above zone will be nearly parallel to the flow channel. In addition, the portion occupied by the parallel contour line is much greater than the corresponding portion taken up during the turbulent flow of the Newtonian fluid, thus drastically suppressing the turbulent flow intensity of the drag-reducing fluid. **Key words:** drag-reducing fluid, turbulence structure, surfactant solution, particle image velocimetry, phase Doppler anemometry

**多股射流瓦斯燃烧器湍流扩散火焰尺度的实验研究 = Experimental Study of the Turbulent/diffusion Flame Dimensions of a Multi-jet Gas Burner** [刊, 汉] / DUAN Xi-li, WANG Zong-ming, WANG Li-juan, CHOU Xing-qi (College of Mechanical and Electrical Engineering under the Petroleum University, Dongying, China, Post Code: 257061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 144 ~ 147, 156

With the help of a flame-image analytical method an experimental investigation was conducted of the turbulent/diffusion flame dimension of a multi-jet gas burner, fueled by a hydrogen-rich gas. The impact of burner structural and operating parameters on the length and length/width ratio of the flame has been studied. The results of the study indicate that the length of the flame will increase with an increase in burner-jet orifice total area and gas flow rate, and decrease with an increase in combustion-assisting excess air factor. The flame length and length/width ratio will decrease with an increase in the position angle of an upper layer sprayer-orifice. Meanwhile, it was detected that the gas hydrogen content would have a relatively great influence on the flame dimension. With an increase in the hydrogen content the flame length and length-width ratio will significantly decrease. **Key words:** multiple jets, gas, turbulent-diffusion flame, dimension

**加压气固喷射器内静压分布特性的试验研究 = Experimental Research on Static Pressure Distribution Characteristics in a Pressurized Gas-solid Injector** [刊, 汉] / XIONG Yuan-quan, ZHANG Ming-yao (Education Ministry Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combustion Technology and Research Institute of Thermal Energy Engineering under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 148 ~ 152

On the test facility of a supercharged pneumatic conveying system an in-depth investigation was performed of the key factors, which have an impact on the static-pressure distribution characteristics in a convergent type of gas-solid injectors. The results of the investigation show that a drastic rise in static pressure occurs at the inlet of the convergent section of the gas-solid injector. The static pressure in the gas-solid injector will decrease with an increase in the gas nozzle distance  $S$  and increase with an increase in convergent angle  $\alpha$ . It is found that with an increase in the gas nozzle outlet speed the maximum static pressure in the gas-solid injector will shift from near the inlet of the injector convergent section to a location near the outlet of the injector convergent section. In addition, the impact of the gas nozzle location, the convergent angle of the convergent section and the conveying air on the static pressure distribution in the convergent type gas-solid