

# 矩形槽道内表面活性剂减阻流体流场特性<sup>1)</sup>

顾卫国\* 王德忠<sup>\*,2)</sup> 川口靖夫<sup>†</sup> 张红霞<sup>\*\*</sup>

\* (上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

<sup>†</sup> (东京理科大学工学部机械工学科, 日本东京)

<sup>\*\*</sup> (太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024)

**摘要** 采用粒子图像测速仪对矩形槽道内表面活性剂减阻流体在流动方向 ( $x$  方向) 与壁面垂直方向 ( $y$  方向) 所在平面的流场进行了测量, 分析了速度、涡量、速度脉动相关量在流场内的瞬态分布, 以及对 500 幅相同工况的流场进行了统计平均. 结果显示: 与牛顿流体相比, 表面活性剂减阻流体接近于层流流动, 横向速度脉动被大幅减弱, 导致湍流输运减弱, 雷诺应力远远小于水. 减阻流体流向速度脉动呈条带特征, 沿流动方向发展, 反映了减阻流体不同于水的湍流输运特征.

**关键词** 表面活性剂, 减阻流体, 粒子图像测速仪, 胶束

中图分类号: O357.5 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2010)02-0312-07

## 引 言

在水中加入少量的高分子聚合物或表面活性剂分子, 湍流流动的沿程阻力最大能被减少 80%, 该现象最早是 Toms<sup>[1]</sup> 在进行聚合物管流试验时发现的, 被称为 Toms 效应.

流动阻力的减少能够降低流体输运系统中泵的功耗, 节约电能, 具有重要的节能价值. 聚合物减阻已在美国阿拉斯加州原油管道输送中得到应用<sup>[2]</sup>. 表面活性剂减阻流体由于能够抗机械降解, 适合应用在闭式水循环系统中, 如中央空调的冷却水循环系统<sup>[3,4]</sup>. 日本产业技术综合研究所等自 2006 年起就在日本札幌市政府办公楼中央空调系统中应用该减阻技术, 进行工程试验. 在国内, 目前该应用技术的研究处于起步阶段.

添加聚合物或表面活性剂引起减阻的机理在日前还未能完全得到解释. 这种稀溶液在具有较强减阻性能的同时, 其流变特性同溶剂水相比发生了明显的变化, 这种变化被认为同添加剂大分子或形成的胶束结构有关<sup>[5,6]</sup>. Zakin 等<sup>[7]</sup> 利用低温电镜 (Cryo-TEM) 方法观察到表面活性剂溶液中存在类似蚯蚓状、网状的胶束微观结构, 证实了胶束的存在. 对于表面活性剂减阻流体, 胶束同流体之间的作用规律

成为了解释减阻机理的主要研究内容. 然而, Cryo-TEM 方法目前还存在许多问题, 包括流体快速冻结与高速拍摄、重影、枝节辨别问题等<sup>[8,9]</sup>, 也无法实现对胶束的动态测量, 这使得直观地研究胶束与流场的作用过程还存在很大的困难.

采用激光多普勒测速仪、粒子图像测速仪 (particle image velocimetry, PIV) 测量减阻流体速度场, 可以获得减阻流体的流场特征, 有助于揭示减阻机理. Kawaguchi<sup>[10]</sup> 利用 PIV 对表面活性剂流体流场进行了研究, 发现减阻流体湍流脉动被抑制、雷诺应力降低; 李凤臣<sup>[11~14]</sup> 发现减阻流体湍流猝发频率降低、猝发倾角减小, 并且传热性能降低; 王德忠<sup>[15]</sup> 研究了减阻流体最佳配比以及温度对流场的影响. 这些研究表明, 减阻现象的产生同减阻流体内部湍流微观结构、流动状态的改变有着必然的联系.

添加剂形成的胶束结构在剪切变形时受到拉伸, 由松散结构形成有序结构, 称为剪切诱导结构 (shear induced structure, SIS), 该结构对抑制湍流脉动有着重要作用. 表面活性剂溶液, 包括稀溶液有着复杂的流变特性, 如“剪切稀化 (shear-thinning)”与“剪切稠化 (shear-thickening)”现象<sup>[16]</sup>. 同时, 剪切率是影响胶束结构的重要因素, 在整个流场内, 从壁面高剪切率到流道中心的零剪切率的变化使得

2008-07-17 收到第 1 稿, 2009-05-19 收到修改稿.

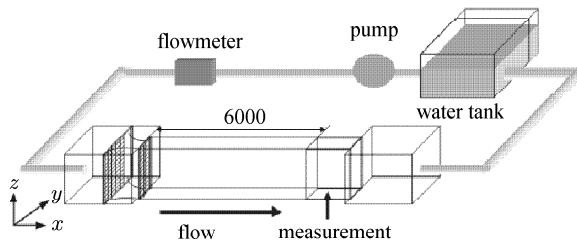
1) 国家自然科学基金资助项目 (50476016), 国家自然科学基金 / 日本学术振兴会合作研究项目 (50611140359) 资助.

2) E-mail: dzwang@sjtu.edu.cn

胶束具有多种结构状态，胶束与流场之间的作用过程也将更为复杂。因此，更为细致地研究减阻流体的流场分布、湍流输运过程，对研究胶束结构、表面活性剂溶液在槽道内的流变特性、减阻流体强化传热及应用等都具有重要意义。本文将采用 PIV 测量表面活性剂减阻流体的速度场，结合瞬时速度场与统计结果，对减阻流体的流场特征进行分析，这有助于进一步揭示减阻机理。

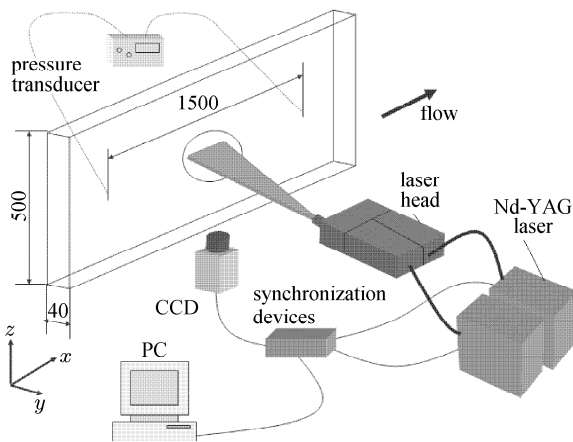
### 1 试验系统

试验系统采用开式水循环系统，如图 1，包括水箱、水泵、电磁流量计、矩形槽道。槽道总长约 10 m，截面高为 0.5 m，宽为 0.04 m，流场测量部位在离矩形槽道入口约 6 m 处。电磁流量计精度为  $\pm 0.01 \text{ m}^3/\text{min}$ 。在 PIV 测试部位，同时测量流体上下游压力差，两压力测量端相距 1.5 m，测量精度为  $\pm 0.1 \text{ Pa}$ 。在水泵入口处由热电阻测量入口水温，精度为  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ，水箱中有电加热器与冷水换热装置，根据入口水温控制并保持系统水温恒定。



(a) 水循环装置

(a) Water circulation facilities



(b) PIV 测试系统光学布置

(b) Optical configurations for PIV measurements

图 1 试验系统示意图

Fig.1 Experimental system schematic diagram

PIV 采用 Dantec 系统，包括双脉冲 Nd-YAG 激光器，片光源光学镜头、CCD 数码相机 (CCD)(2048×2048 像素)、同步装置、以及计算机与相关处理软件。激光片光源从流道侧壁中部垂直打入，CCD 在流道底部，透过光学玻璃窗聚焦于片光源照射区域。粒子图像的采集频率为 4 Hz。粒子图像判读区域大小设定为 64×64 像素，75% 重叠，因此，流道内有效速度矢量个数在流动方向为 127 个，在壁面垂直方向约为 90 个，速度矢量的间距约为 0.45 mm。示踪粒子采用微量的白色水性合成树脂涂料，溶于溶液后粒子粒径小于  $1 \mu\text{m}$ ，所拍摄的粒子图像显示，示踪粒子分布比较均匀。

试验中采用的试剂为十六烷基三甲基氯化铵 (cetyltrimethyl ammonium chloride, CTAC)，同时按质量比 1:1 的配比加入水杨酸钠 (Sodium Salicylate, NaSal)。在试验中，表面活性剂浓度选取为 25 ppm~100 ppm，溶液入口温度为  $25^\circ\text{C}$ 。

雷诺数定义为  $Re = U_b \omega / \nu$ ，其中  $U_b$  为流向平均速度， $\omega$  为流道宽度， $\nu$  为溶液的运动黏度。试验中雷诺数取 10 000~40 000。

### 2 试验结果与分析

#### 2.1 阻力系数与减阻率

在采用 PIV 进行速度场测量的同时，对壁面压强进行了测量。图 2 和图 3 是不同浓度溶液壁面摩擦系数、减阻率随雷诺数的变化。

减阻率定义为

$$DR = (C_{f,w} - C_{f,s}) / C_{f,w} \times 100\%$$

其中， $C_{f,w}$  为水的壁面摩擦系数， $C_{f,s}$  为减阻溶液的壁面摩擦系数。

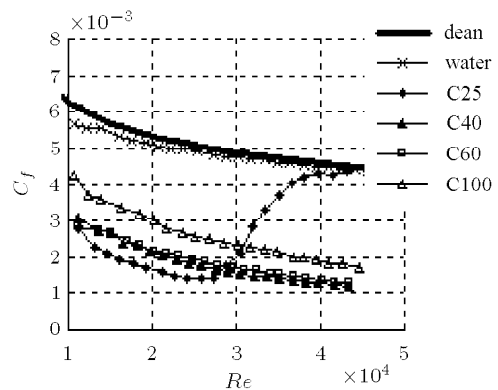


图 2 阻力系数随雷诺数的变化

Fig.2 Profiles of drag coefficients under Reynolds numbers

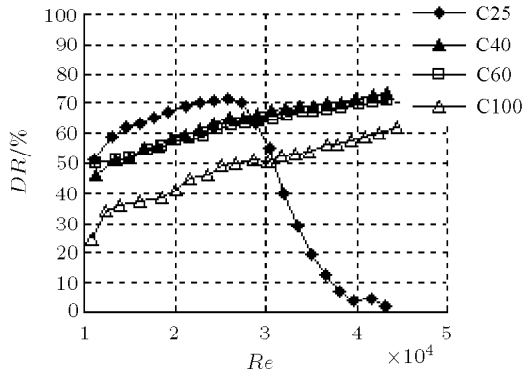


图 3 减阻率随雷诺数的变化

Fig.3 Profiles of drag reduction under Reynolds numbers

由图 2 和图 3 可知, 溶液从浓度为 25 ppm 开始就表现出很高的减阻效果, 减阻率最高达到 70% 以上; 但是 25 ppm 的减阻溶液, 在雷诺数为 27 000 时开始丧失减阻效果, 最终接近于水. 在相同雷诺数下, 浓度较高的溶液减阻性能略有降低; 其中, 40 ppm 溶液具有较高且比较稳定的减阻性能, 因此后面的流场分析中, 选取该浓度的溶液同水进行比较.

### 2.2 速度与涡量分布

本文主要研究流动方向 ( $x$  方向) 与壁面垂直方向 ( $y$  方向) 所在的水平二维平面内的速度分布. 测量位置位于流道在竖直方向的中心, 流体的雷诺数约为 43 000, 流向平均速度约为 0.9 m/s. 40 ppm CTAC 溶液在此雷诺数下的减阻率约为 73%.

图 4 与图 5 分别为水与减阻流体流向速度在水平平面上的分布. 对于水, 由于湍流流动时包含各种不同尺度的涡结构, 涡旋的存在导致速度脉动剧烈、流场紊乱, 速度分布曲面凹凸不平, 如图 4. 减阻流体流向速度分布曲面相对平滑, 流线层次分明, 从壁面处接近于零开始逐渐增大, 整体上看接近于层流流动; 同水这种存在大量不规则凹凸面特征不同的是, 减阻流体只是在流场分布曲面各距壁面  $1/4$

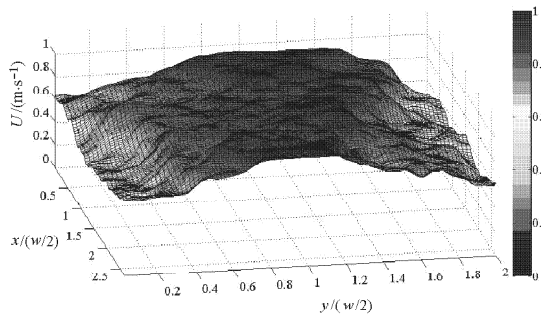


图 4 水的流向速度场瞬时分布

Fig.4 Instantaneous distribution of the streamwise velocity in water flow

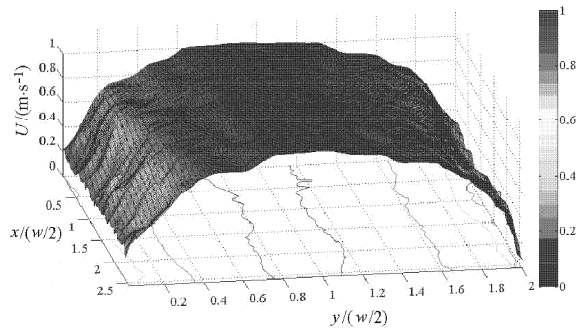


图 5 减阻流体的流向速度场瞬时分布

Fig.5 Instantaneous distribution of the streamwise velocity in drag reducing flow

壁宽处, 存在两处规则的凹面, 沿流向呈条带状分布, 如图 5.

在  $x-y$  所在平面上, 流场涡量为

$$Vor = dv/dx - du/dy$$

由于壁面剪切湍流中, 横向速度  $v$  在流向的变化率  $dv/dx$  较流向速度  $u$  在横向的变化率  $du/dy$  小很多, 因此该涡量主要反映流向速度在横向的变化率, 即速度梯度. 总体上讲, 靠近壁面处流向速度梯度值较大, 在流道中心处较小. 对于水, 由于湍流流动, 因此涡量场比较紊乱, 如图 6. 对于减阻流体, 涡量分布则相对清晰, 变化相对有序, 在流动方向上分布比较均匀. 由于流场中存在慢速条带, 因此该处剪切率较高, 图中出现比较清晰的高涡量条带; 并且, 该条带是从近壁区开始, 逐渐向流体内发展, 并在流动方向延续相当长的距离, 如图 7.

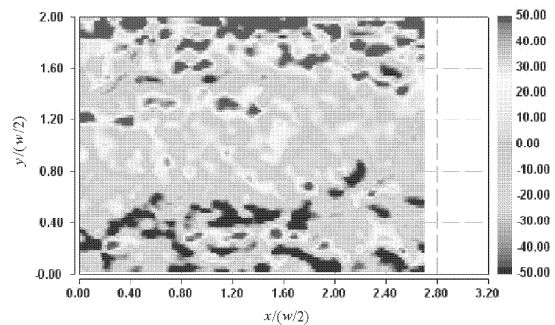


图 6 水的涡量场瞬时分布

Fig.6 Instantaneous distribution of the vorticity in water flow

### 2.3 速度脉动相关量

将流场内当地速度减去统计后当地平均速度可以获得速度脉动. 速度脉动的自相关量可以反映当地速度脉动的强度. 图 8 和图 9 分别是关于水和减

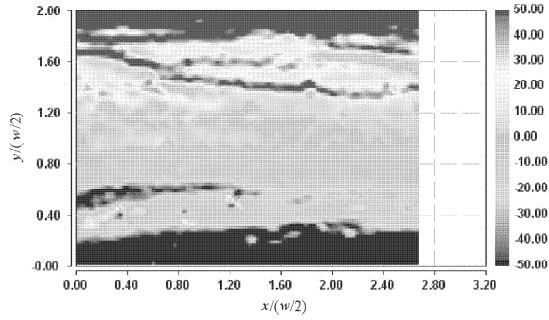


图 7 减阻流体的涡量场瞬时分布

Fig.7 Instantaneous distribution of the vorticity in drag reducing flow

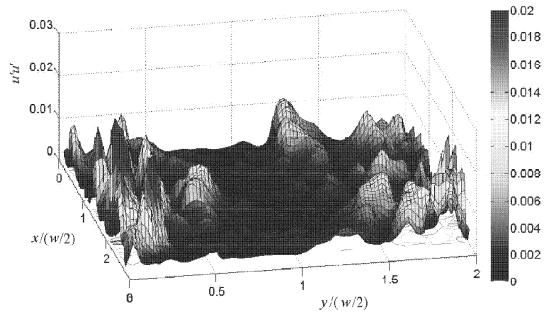


图 8 水的速度脉动自相关量 ( $u'u'$ ) 分布

Fig.8 Autocorrelation distribution of streamwise velocity fluctuations ( $u'u'$ ) in water flow

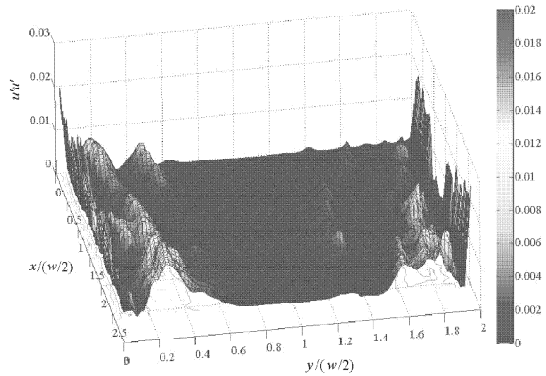


图 9 减阻流体的速度脉动自相关量 ( $u'u'$ ) 分布

Fig.9 Autocorrelation distribution of streamwise velocity fluctuations ( $u'u'$ ) in drag reducing flow

阻流体流向速度脉动自相关量的分布曲面图。壁面剪切湍流是从壁面猝发后逐渐向流场内发展的，因此近壁区速度脉动较强，流道中心处脉动减弱。如图 8，水的流向速度自相关量分布，呈现大量不规则凸峰特征。与水相比，减阻流体湍流脉动明显减弱，在流道中心相当宽的范围内  $u'u'$  分布平坦，其值接

近于零；对于速度脉动较高的区域，在其分布曲面上呈若干道流向发展的连续凸峰特征，如图 9。

图 10 和图 11 分别是水和减阻流体的速度脉动互相关量  $u'v'$  的分布图。在流体密度变化忽略不计时， $u'v'$  平均值反映雷诺切应力。从整体上看，减阻流体的雷诺切应力大约低于水 1 个数量级。由于雷诺切应力是维持湍流的重要因素，雷诺切应力的降低会使得湍流输运减弱。减阻流体除了在靠近壁面处，其它区域雷诺切应力相当微弱，对应的是该区域速度脉动强度非常小。

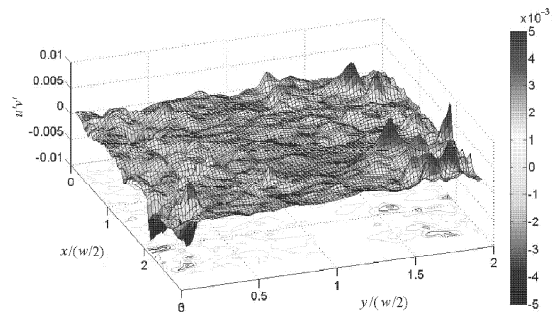


图 10 水的速度脉动相关量 ( $u'v'$ ) 分布

Fig.10 Correlation distribution of velocity fluctuations ( $u'v'$ ) in water flow

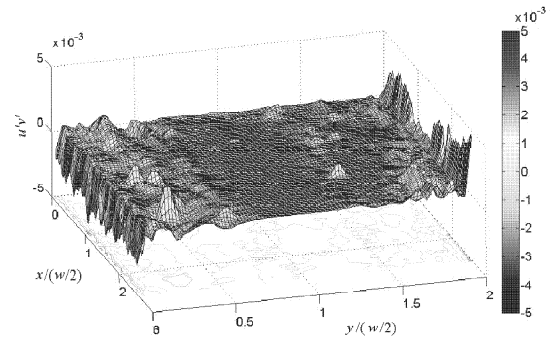


图 11 减阻流体的速度脉动相关量 ( $u'v'$ ) 分布

Fig.11 Correlation distribution of velocity fluctuations ( $u'v'$ ) in drag reducing flow

### 2.4 统计量分析

上述是对瞬时流场进行分析，对同一工况 500 幅流场进行统计平均，可得出各统计量在壁面垂直方向 ( $y$  方向) 上的分布，如图 12~ 图 17。

图 12 为流向平均相对速度 (同整个流场的平均速度  $U_b$  相比) 在  $y$  方向上的分布曲线。对于层流二维泊肃叶流动，其速度对于流道中心呈二次曲线对称分布。减阻流体相对速度分布曲线介于层流与湍流 (水) 中间，靠近壁面处速度小于水，流体中心区

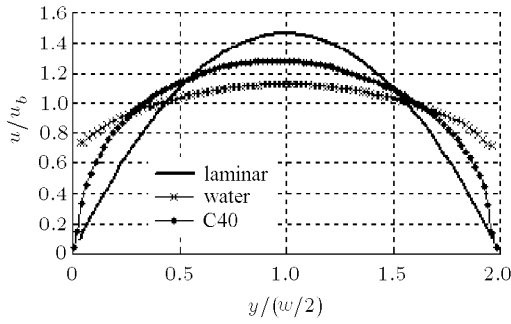


图 12 主流平均速度在  $y$  方向上的分布

Fig.12 Distribution profiles of mean velocity in  $y$  direction

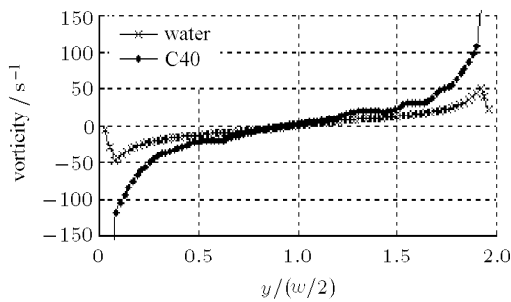


图 13 平均涡量在  $y$  方向上的分布

Fig.13 Distribution profiles of mean vorticity in  $y$  direction

速度大于水. 对于涡量, 如图 13, 靠近壁面处减阻流体的平均涡量绝对值大于相同位置的水.

速度脉动均方根 (root mean square, RMS) 在流场统计分析中用来研究湍流强度. 减阻流体流向速度脉动与横向速度脉动都被不同程度地抑制, 尤其是横向速度脉动, 远远低于水, 如图 15. 对于减阻流体主流方向速度脉动, 其均方根分布曲线并不光滑, 如图 14, 出现若干连续的凸峰, 于流道中心对称分布.

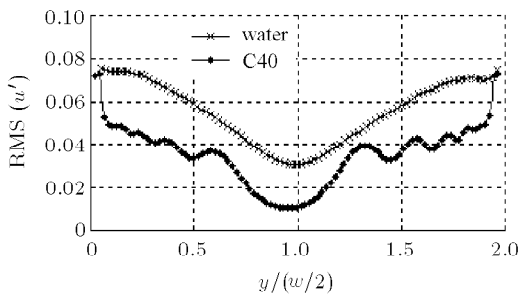


图 14 主流速度脉动均方根在  $y$  方向上的分布

Fig.14 RMS distribution of streamwise velocity fluctuation ( $u'$ ) in  $y$  direction

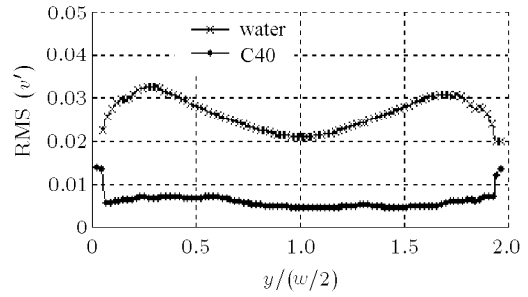


图 15 横向速度脉动均方根在  $y$  方向上的分布

Fig.15 RMS distribution of wall-normal velocity fluctuation ( $v'$ ) in  $y$  direction

40ppm 的 CTAC 减阻流体的雷诺应力远小于水, 除壁面附近, 其他位置该项的值接近于零, 如图 16. 然而, 减阻流体的雷诺应力分布曲线也并非光滑, 而是呈现了波浪式脉动, 并且波峰位置基本同图 14 曲线上的凸峰位置相当, 如图 17.

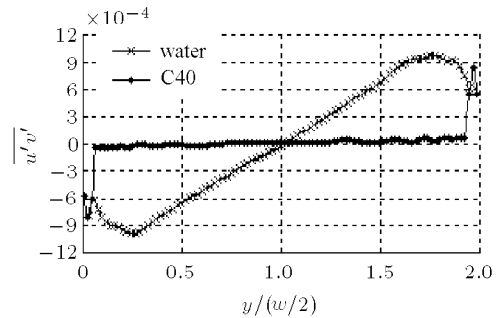


图 16 水与 40 ppm CTAC 溶液的  $\overline{u'v'}$  在  $y$  方向上的分布

Fig.16 Distribution profiles of  $\overline{u'v'}$  in  $y$  direction of water and 40 ppm CTAC solution flow

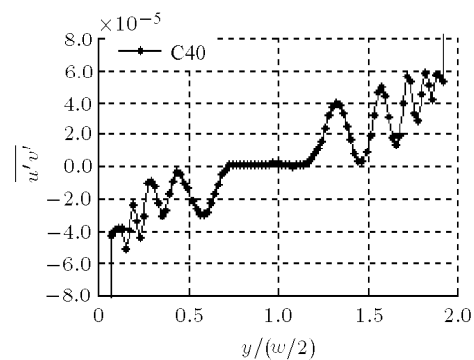


图 17 40ppm CTAC 溶液  $\overline{u'v'}$  在  $y$  方向上的分布

Fig.17 Distribution profile of  $\overline{u'v'}$  in  $y$  direction in 40 ppm CTAC solution flow

### 3 讨 论

对于减阻流体, 其瞬时流场、以及 500 幅流场的统计结果显示, 其湍流脉动被抑制, 尤其是垂直方

向上的速度脉动  $v'$ 。减阻添加剂形成的胶束结构在一定剪切率下形成剪切诱导结构，这被认为是抑制湍流脉动的主要原因。由于横向速度脉动被抑制，导致湍流输运减弱，雷诺应力大幅降低，这使得减阻流体的流动状态近似于层流流动。

然而，减阻流体并非真正的层流流动，在其流向速度场内出现了慢速条带，这可能反映了减阻流体湍流输运的特征。对于壁面剪切湍流，当湍流在近壁处猝发后，会形成“发夹”特征的涡旋向流场内迁移。由于本试验测量的是与竖直壁面垂直的水平平面内的流场，根据“发夹”涡位置的不同，该平面会捕捉到不同于平均速度的慢速或快速条带。这些条带能清楚地显示在流体速度场、涡量场的分布图中。同水相比，减阻流体的这些条带具有明显不同的特征，条带规则细长，同壁面平行，因此使得减阻流体速度脉动的均方根、雷诺应力的分布曲线出现凸峰。

另外从湍动能输运上看，牛顿流体的湍动能由雷诺剪切应力做功产生，并最终被黏性耗散，两者处于平衡状态。但是对于减阻流体，雷诺应力大幅降低，湍流生成项被大幅削弱，因此在应力亏损的同时出现湍动能亏损<sup>[17]</sup>。此时，弹性应力做功转化为湍动能，这是弥补湍动能亏损的关键。然而，弹性应力做功同表面活性剂溶液的流变特性有关，而流变特性依赖于剪切率；因此速度脉动流向条带分布特征的出现也有可能是减阻流体复杂的流变特性产生的。

总之，表面活性剂溶液胶束结构对湍流脉动的抑制导致湍流输运减弱，并改变湍流的微观结构与湍动能输运，使之呈现出不同于牛顿流体的流场特征。

#### 4 结 论

(1) 低浓度表面活性剂阳离子水溶液能产生巨大的减阻效果，浓度为 40 ppm, 60 ppm 的 CTAC 溶液在雷诺数等于 40 000 时具有较高且稳定的减阻性能。

(2) 减阻流体湍流微观结构发生改变，湍流脉动，尤其是横向速度脉动被显著抑制，雷诺应力远小于水，流动状态接近于层流流动。

(3) 减阻流体湍流输运减弱，流场内的涡旋主要沿主流方向发展，在水平平面内呈现狭长的条带特征。

#### 参 考 文 献

- 1 Toms BA. Some observations on the flow of linear polymer solutions straight tubes at large Reynolds numbers. In: Proc 1st Congress on Rheology, North Holland, Amsterdam, 1948. 135~141
- 2 Burger ED, Munk WR, Wahl HA. Flow increase in the Trans-Alaska pipeline through use of a polymeric drag-reduction additive. *J Pet Tech*, 1982: 377~386
- 3 Gasljevic K, Matthys EF. Field test of drag-reducing surfactant additives in a hydraulic cooling system. *ASME FED*, 1996, 237: 249~260
- 4 Pollert J, Zakin JL, Myska J, et al. Use of friction reducing additives in district heating system field test at Kladno-Krocehlavy Czech Republic. In: Proc 85th Int District Heating Cooling Assoc Seattle, USA, 1994. 141~156
- 5 Clausen M, Vinsan PK, Minter JR. Viscoelastic micellar solutions: microscopy and rheology. *J Phys Chem*, 1993, 96: 474~484
- 6 Pilpel N. The relationship between rheologic characteristic and microscopy structure—study of surfactant additive. *Trans Faraday Soc*, 1996, 62: 29~41
- 7 Zakin JL, Qi Yunying. Some recent developments in Surfactant drag reduction. In: Proceedings of the 2nd Symposium on Smart Control of Turbulence, 2001, Tokyo, Japan. 43~58
- 8 Zheng Y, Lin Z, Zakin JL, et al. Cryo-TEM imaging the flow-induced transition from vesicles to threadlike micelles. *J Phys Chem B*, 2000, 104: 63~71
- 9 Yamaira I, Gonzalez Eric W. Cryo-TEM studies of worm-like micellar solutions. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2005, 10: 256~260
- 10 Kawaguchi Yasuo, Segawa Takehiko, Feng Ziping, et al. Experimental study on drag-reducing channel flow with surfactant additives—spatial structure of turbulence investigated by PIV system. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2002, 23: 700~709
- 11 Li FC, Kawaguchi Y, Segawa T. Reynolds-number dependence of turbulence structures in a drag-reducing surfactant solution channel flow investigated by particle image velocimetry. *Physics of Fluids*, 2005, 17: 75~104
- 12 Li FC, Kawaguchi Yasuo, Yu Bo, et al. Experimental study for drag-reduction mechanism for a dilute surfactant solution flow. *International Journal of Heat and Mass transfer*, 2008, 51: 835~843
- 13 Li Fengchen, Kawaguchi Yasuo, Hishida Koichi. Structural analysis of turbulent transport in a heated drag-reducing channel flow with surfactant additives. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48: 965~973
- 14 Li FC, Kawaguchi Y. Investigation on the characteristics of turbulence transport for momentum and heat in a drag-reducing surfactant solution flow. *Physics of Fluid*, September 2004, 16: 281~294
- 15 王德忠, 胡友情, 王松平等. 低浓度表面活性剂减阻流体的性能. 上海交通大学学报, 2005, 39: 225~229 (Wang Dezhong,

- Hu Youqing, Wang Songping, et al. The mechanism research of the drag reducing fluid of low concentration surfactant. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2005, 39: 225~229 (in Chinese)
- 16 Hu YT, Boltenhagen P, Pine DJ. Shear thickening in low-concentration solutions of wormlike micelles. I. Direct visualization of transient behavior and phase transitions. *J Rheol*, September/October 1998, 42: 1185~1208
- 17 Zhang Hongxia, Wang Dezhong, Chen Hanping, et al. Development characteristics of velocity transports in an isothermal heated drag-reducing surfactant solution flow. *AIP Conf Proc*, 2007, 914. 566~573

(责任编辑: 何漫丽)

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF CTAC SOLUTION FLOW IN THE RECTANGULAR CHANNEL<sup>1)</sup>

Gu Weiguo\* Wang Dezhong<sup>\*,2)</sup> Kawaguchi Y.<sup>†</sup> Zhang Hongxia\*\*

<sup>\*</sup>(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

<sup>†</sup>(Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science, Tokyo, Japan)

<sup>\*\*</sup>(College of Water Conservancy Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract** In the dilute surfactant drag-reducing flow, the slight viscoelasticity of solution affects the energy dissipation process of the flow, and this flow exhibits special fashion different from laminar flow or turbulent one in Newtonian fluid. The study on the modification of turbulent structures by the viscoelasticity of the solution is important to clarify the drag reduction mechanism of surfactant solution flow. In this paper, drag reducing flow of dilute surfactant solution in the two dimensional rectangle channel has been investigated experimentally. To grasp the instantaneous velocity  $u-v$  in  $x-y$  plane, particle image velocimetry (PIV) is employed. The experiments pay attention to Reynolds number ranging from 10 000 to 40 000 and concentration of additive CTAC (a kind of cationic surfactants) from 25 to 100 ppm on the flow.

As for the additive CTAC concentration of 25, 40, 60 and 100 ppm, the fanning friction factor decreases and drag reduction (DR) increases with the increase of mass concentration below the critical Reynolds number. The surfactant solution with 40 ppm at  $Re = 40\,000$ , compared with water flow, shows DR of more than 70%.

The instantaneous distribution of velocity, vorticity, and correlation of velocity fluctuation is analyzed. Statistics calculation is carried out based on 500 velocity fields which are measured by PIV. The results exhibit that the drag-reducing flow shows the approximate characteristics of the laminar flow. The wall-normal velocity fluctuation of drag-reducing flow is damped, which causes the decrease of turbulence transportation and Reynolds shear stress comparing with the turbulent water flow. The streamwise velocity fluctuation of drag-reducing flow shows the streamwise developed band-like distribution. This pattern indicates the new characteristic of turbulence transportation in drag-reducing flow.

**Key words** surfactant, drag-reducing flow, PIV, micelles

Received 17 July 2008, revised 19 May 2009.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (50476016), NSFC-JSPS Scientific Cooperation Program (50611140359).

2) E-mail: dzwang@sjtu.edu.cn