

# 高分子溶液壁湍流减阻机理的 TRPIV 测量研究<sup>1)</sup>

姜楠<sup>\*,†,\*\*,2)</sup>, 管新蕾<sup>\*</sup>, 成璐<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> (天津大学机械工程学院力学系, 天津 300072)    <sup>\*\*</sup> (天津现代工程力学重点实验室, 天津 300072)

<sup>†</sup> (中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)    <sup>#</sup> (南开大学天津大学刘徽应用数学中心, 天津 300072)

**摘要:** 利用 TRPIV 技术, 实验研究了高聚物溶液对水槽中充分发展的壁湍流的影响。在相同雷诺数下, 分别测量了减阻溶液和清水的流向-法向和流向-展向瞬时湍流流场。对于流向-法向流场, 比较了两者雷诺应力的法向分布, 发现加入高聚物溶液后雷诺应力在近壁区明显减小, 湍流运动受到了抑制。在受抑制最显著的位置, 对减阻溶液和清水进行湍流波谱分析。与清水相比, 溶液中小尺度脉动所占的能量减弱。并运用  $\lambda_2$  准则检测流场中的涡结构, 结果表明在减阻溶液中抑制了涡的产生, 涡的强度也有所减小。对于流向-展向流场, 对比两者的速度条纹间距, 发现减阻溶液中低速条纹间距较大, 说明高聚物溶液的加入减少了湍流的小尺度结构, 从而破坏了湍流动量运输的过程。

**关键词:** 高分子溶液, 壁湍流, 减阻机理, TRPIV

## 引言

减阻问题在近代流体工程中日益处于重要地位, Toms<sup>[1]</sup>于 1948 年首次发现极低浓度的高分子聚合物溶液能显著减少湍流流动的阻力, 这一独特的减阻现象之后引起了广泛关注。在输油管道中, 只需加入几十 p.p.m 的高分子聚合物溶液, 就能大幅降低输送泵的功率, 提高输油量, 从而使流体减阻在原油和成品油输送等工业领域具有广阔的应用前景。因此, 研究添加剂减阻对管道输油具有重要的意义。虽然此类现象被认识至今已逾半个多世纪, 有关高聚合物的减阻机理仍未得到系统地阐述。

Toms 发现聚合物减阻效应时认为高分子溶液减阻是因为加入高分子聚合物后溶液剪切稀化, 即壁面附近剪切速率增大, 表观粘度降低, 这也是最早的高聚物减阻机理——“伪塑说”, 但随着研究的深入, 这个理论已经被否定。Virk 等<sup>[2]</sup>在实验中提出最大减阻曲线, 即高分子溶液的减阻率随浓度的增大而增大, 但并不是不是无限增大的, 存在极限值, 当达到最大减阻率时, 浓度增大, 减阻率不在增加。此最大减阻曲线方程只和雷诺数有关, 与加入的高分子聚合物的种类、分子量、管径等无关。Virk<sup>[3]</sup>之后提出高分子溶液在极限减阻状态时的平均速度剖面, 将高分子溶液的平均速度剖面分为粘性底层、弹性底层和湍流核心, 通过实验证实高分子溶液的平均速度分布与纯水的相同, 但弹性层的速度梯度增大, 湍流核心的速度分布上移, 即“有效滑移假说”。该假说成功地解释了最大减阻现象和管径效应, 但仍存在该假说无法解释的现象。Lumley<sup>[4]</sup>在研究高聚物的减阻作用时提出高聚物分子在湍流边界层中拉伸, 使得流体的粘度增大, 他认为这是高分子减阻的主要原因。但 den Toonder<sup>[8]</sup>用直接数值模拟的方法验证此观点时发现高分子溶液减阻并非全部来自拉伸粘度的增加, 间接否定了这一观点。De Gennes<sup>[5]</sup>、Joseph<sup>[6]</sup>观察到加入高聚物后溶液具有粘弹性, 提出高聚物溶液减阻就是由于粘弹性与湍流中漩涡相互作用, 影响了能量的耗散, 即“涡能量耗散受抑制说”。Rabin 和 Zielinska<sup>[7]</sup>提出高聚物减阻的原因是由于小尺度涡耗散的能量被拉伸的聚合物分子储存起来, 变形恢复时, 高聚物分子又将储存的能量传递给流体。荷兰代尔夫特科技大学的 den Toonder<sup>[8]</sup>提出“应力各向异性说”, 即加入高分子聚合物后溶液减阻是由于湍流边界层中的聚合物分子受到拉伸。并且分别采用直接数值模拟方法和实验测量验证了这一观点。

本文从湍流动量运输的角度详细地阐述了高聚物溶液对壁湍流的影响, 进一步探索其减阻的机理。利用 TRPIV 测量同雷诺数的减阻溶液和清水的流向-法向瞬时湍流流场。比较了减阻溶液和清水雷诺应力的法向分布, 并对减阻溶液和清水进行湍流波谱分析。而后运用  $\lambda_2$  准则检测流场中的涡结构, 探索高聚物溶液对湍流涡结构的影响。另外, 测量了这两流场的流向-展向平面, 对比两者的速度条纹间距。

## 1 实验装置与测量方法

实验在 SZ-2 型开口式循环水槽中进行。实验段长 1200 mm，宽 140 mm，深 150 mm。平板水平放置在水槽底部，边界层在平板上表面发展，平板前缘按 4:1 的半椭圆修形，其尺寸为 1050 mm 长，138 mm 宽，10 mm 厚。为确保观测处的湍流已充分发展，在平板前缘下游安置了拌线。

二维 TRPIV 系统由 Nd: YAG 激光器和一个高速相机组成。示踪粒子的直径 10  $\mu\text{m}$ ，密度 1.03  $\text{g}/\text{mm}^3$ ，均匀布散于流场中。二维 TRPIV 的测量区位于前缘下游 0.9 m 处，在流向法向平面 (x-y 平面) 上。自由来流速度为 0.18m/s，减阻溶液和清水测点当地的边界层厚度分别为 23.83mm 和 22.70mm，基于边界层名义厚度的雷诺数分别为 4047 和 4062。激光片光源从上方沿流向照亮流场，厚度为 0.8 mm，光平面处于水槽中心。高速相机 (1280 $\times$ 1024 像素) 从侧面记录粒子图像，如现用的采样频率为 600 Hz，减阻溶液和清水各记录 6400 张图像。而后在距平板前缘相同的距离处，激光片光源从水槽侧面照亮流场，高速相机从顶部记录粒子图像，测量减阻溶液和清水的流向-展向流场，法向位置距壁面均为 0.3mm。减阻溶液和清水各记录 5000 张图像。对原始粒子图像进行互相关处理时所选用的查询窗口为 32 $\times$ 32 像素，迭代窗口为 75%，最后进行平均过滤处理。测量体面积大约是 90.71 $\times$ 72.55  $\text{mm}^2$  (流向 $\times$ 法向)，包括 157 $\times$ 125 个速度信息。

本实验所用的高聚物为分析纯聚丙烯酰胺 (PAM)，分子量为 500 万。在常用的高聚物减阻剂中，聚丙烯酰胺具有良好的抗剪切性能，经机械剪切 (例如水泵的叶片旋转) 作用后降解率较低。配制溶液时，先将固体高聚物粉末溶解在水中，并不断搅拌，配制成质量分数为 16600 p.p.m 的母液。浓缩的母液水化数小时后被稀释成 190 p.p.m 的减阻溶液。采用美国 Brookfield 公司 LVDV-II + Pro 型粘度计测量减阻溶液和清水的粘度。将 ULA 超低浓度适配器的转速调至 50 转每分钟，采集样本时间为 1 min，间隔为 2 s。测得的纯水的粘度为 1.01  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，高聚物溶液的为 1.06  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

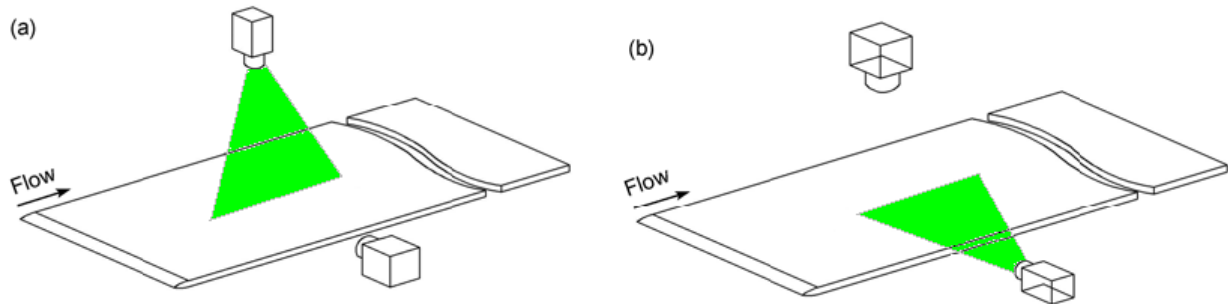


图 1 实验装置示意图: (a)

Fig.1 Schematic diagram of the experimental set-up: (a) side view; (b) top view.

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 流向-法向结果

图 2 为同雷诺数下的减阻溶液和清水的速度剖面对比图。对数律区的分布为  $u^+ = A \ln y^+ + B$ ，上标 + 表示变量已被摩擦速度和运动粘度内尺度无量纲化。利用牛顿迭代法和最速下降法<sup>[9]</sup>可求出  $A$ 、 $B$  以及摩擦速度  $u^*$ <sup>[10]</sup>。与清水相比，减阻溶液的摩擦速度减小，湍流边界层增厚，由摩擦速度算得减阻率为 16.58%。

图 1 中所测得的速度剖面，无论是减阻溶液还是清水，都对数律剖面符合的很好。两者对数律区剖面的斜率相同，与 Warholic 等<sup>[11]</sup>的结论一致。他们认为当减阻率小于 35% 时，剖面斜率不变。由于添加了高聚物分子，减阻溶液的  $B$  大于清水的。这一差别表明了在高分子的作用下，缓冲层增厚，由此导致对数层上移，具有一般壁面减阻的特征<sup>[12]</sup>。

图 3 比较了减阻溶液和清水的雷诺应力法向分布，图中雷诺应力用来流速度的平方作无量纲化。在清水湍流中，雷诺应力在近壁区有一峰值，此处的摩擦阻力也达到最大值。添加高分子聚合物后，雷诺应力的峰值大幅减小，并远离壁面。雷诺应力表征湍流动量运输强弱，其幅值的减小说明了湍流动量交换减弱，

湍流脉动受到抑制。这些都是由于加入的高聚物分子具有粘弹性，长链分子能在湍流中任意伸缩盘旋，抑制了近壁区与外区的动量交换，使得湍流的无序性有所减弱。然而，在远离壁面的区域，清水中的雷诺应力与减阻溶液中的接近。这说明了高分子聚合物溶液对湍流的抑制作用主要是通过减弱近壁湍流相干结构的猝发实现的，同时也从另一个侧面证实了相干结构的猝发是壁湍流维持、演化、发展的主要机制。

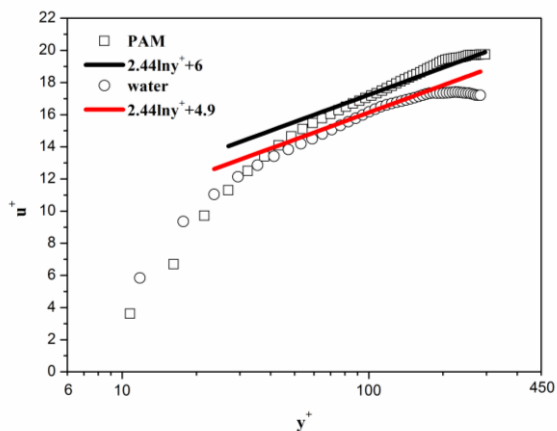


图2 平板湍流边界层平均流速剖面

Fig.2 Mean velocity profile of turbulent boundary layer

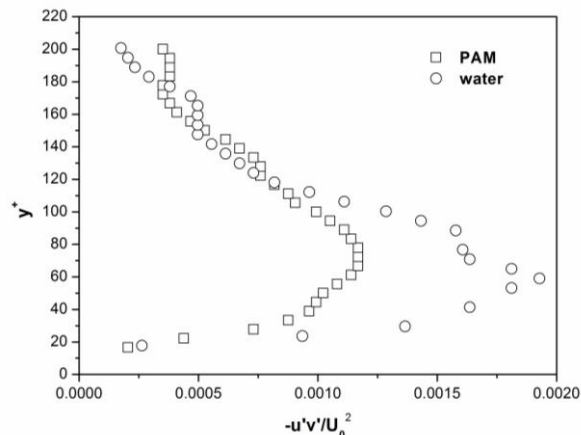


图3 雷诺应力的法向分布

Fig.3 Distribution of Reynolds stress in wall-normal direction

图4是由各自摩擦速度无量纲的减阻溶液和清水的前乘波谱图，图(a)为流向速度波谱  $k_x E_{uu}$ ，图(b)为法向速度波谱  $k_x E_{vv}$ 。由图3可知，在  $y^+$  约60处，清水的雷诺应力达到最大值。而由于高聚物的作用，此处溶液的雷诺应力下降幅度最大，湍流流体运动被抑制的最为明显，因而选取减阻溶液和清水的法向位置分别为61.1和59.8。加入高聚物后，图(a)中流向速度波谱的峰值位置由  $8.27 \text{ cm}^{-1}$  降至  $1.74 \text{ cm}^{-1}$ ，说明小尺度的速度脉动占有的能量比例急剧下降。而溶液中各尺度速度脉动所含有的能量也基本小于水中各尺度速度脉动所含有的能量。图(b)法向速度波谱最大的特征是，与清水相比高聚物溶液的湍流脉动含有的能量锐减，这表明具有粘弹性的高聚物如弹簧般储存了部分湍流原有的能量。能谱的峰值位置也略有下降，从  $12.21 \text{ cm}^{-1}$  降至  $8.72 \text{ cm}^{-1}$ 。由此可以看出，高聚物储存了原本由小尺度涡耗散掉的能量。对于流向速度波谱，高聚物主要是降低了小尺度脉动的含能率；对于法向速度波谱，高聚物则主要是大幅度削弱了湍流速度脉动的含能量。

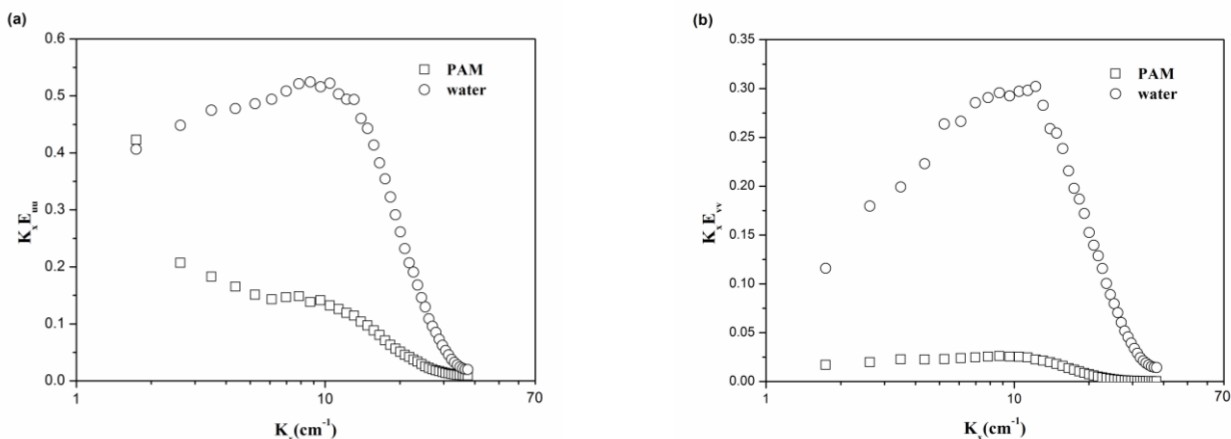


图4 减阻溶液  $y^+=61.1$  和清水  $y^+=59.8$  处的前乘波谱图：(a) 流向速度波谱；(b) 法向速度波谱

Fig.4 Pre-multiplied spectra at  $y^+=61.1$  (PAM) and  $y^+=59.8$  (water): (a)  $u$ -spectra; (b)  $v$ -spectra

图5分别为用  $\lambda_2$  准则检测的某一时刻减阻溶液和清水中的涡结构。图中箭头矢量由瞬时速度与迁移速

度相减而得，矢量长度设定为一致。从云图中可以看出，与清水相比溶液中辨别出的涡的数量与区域均减小了，说明高聚物分子抑制了湍流涡结构的产生，近壁区尤为明显。从速度矢量来看，高聚物加入后，近壁区速度矢量规整，法向运动受到限制，涡的强度衰减，整个流场的无序性减弱。

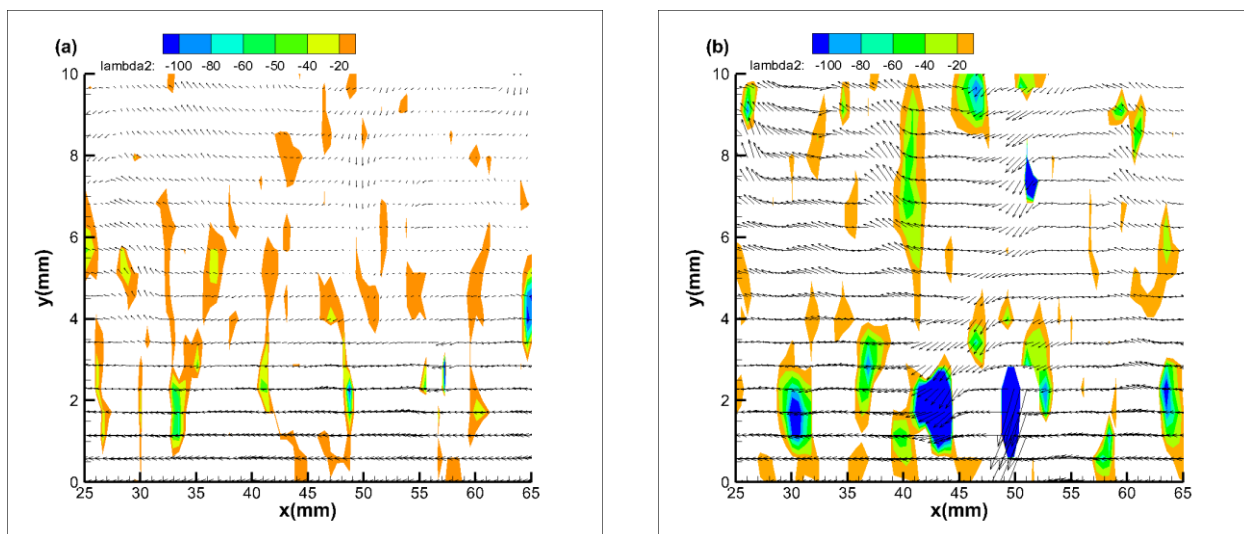


图 5 x-y 平面内  $\lambda_2$  涡结构：(a) 减阻溶液；(b) 清水

Fig.5 Vortex structures detected by  $\lambda_2$  criterion in the x-y plane: (a) PAM; (b) water

## 2.2 流向-展向结果

图 6 (a) (b) 分别为某时刻 x-z 平面内减阻溶液和清水的流向瞬时速度云图。图中物理量量级调为一致，蓝色是低速流体，两图均用椭圆圈出图中的低速条带。发现在同样大小的区域内，减阻溶液中明显只有两条低速条带，条带间距大约为 26 mm，而清水中却存在三条低速条带，条带间距大约为 14 mm。由此可见减阻溶液中低速条纹间距较大，准流向涡尺度有所增加。

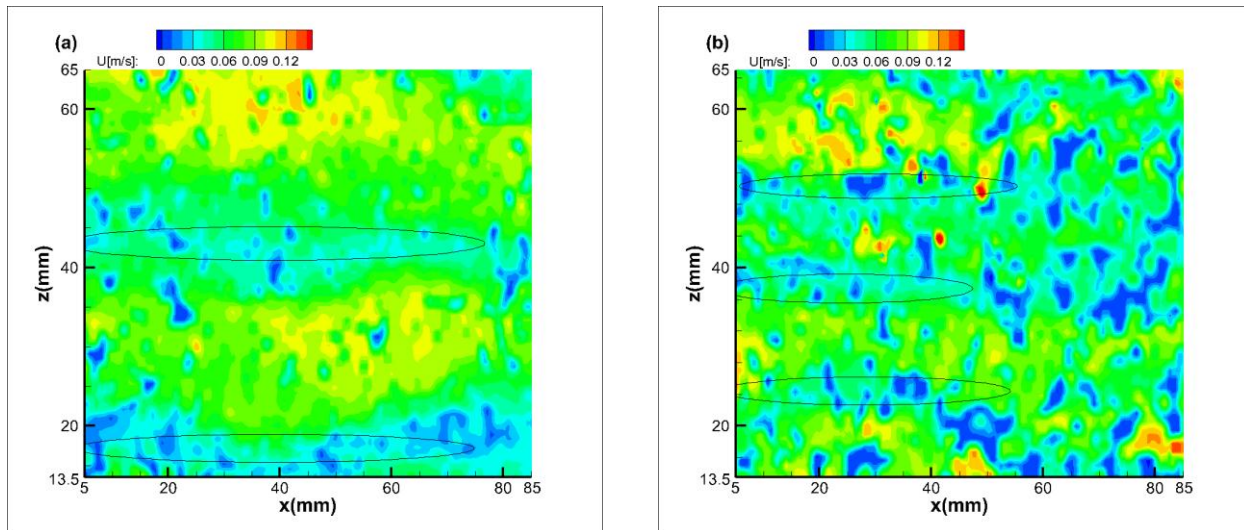


图 6 x-z 平面内某时刻流向瞬时速度云图：(a) 减阻溶液；(b) 清水

Fig.6 Contour map of streamwise fluctuating velocity at a certain time in the x-y plane: (a) PAM; (b) water

## 3 结论

通过对水槽中同雷诺数下的 PAM 减阻溶液及清水平板湍流边界层流场进行 TRPIV 测量研究。由流向-法向速度场可得：与清水相比，减阻溶液的对数律剖面具有同样的斜率，但其缓冲层增厚，对数律上移，具有减阻的特征。加入高聚物溶液后雷诺应力在近壁区明显减小，抑制了近壁区与外区的动量交换，湍流运动受到了抑制。在湍流运动受抑制最显著的区域，对减阻溶液和清水进行湍流波谱分析。发现高聚物主要降低了流向小尺度脉动的含能率并大幅度削弱了法向湍流速度脉动的含能量。因而高波数所占的能量减弱，证明了高聚物溶液的加入导致了小尺度结构的减少。运用  $\lambda_2$  准则检测流场中的涡结构，结果表明在减

阻溶液中小尺度涡得到抑制，而且涡的强度也有所减小，壁湍流的无序性减弱。另外，对于流向-展向流场，对比了两者的速度条纹间距，发现减阻溶液中低速条纹间距较大，准流向涡尺度有所增加。由于小尺度涡被抑制，原本由小尺度涡耗散掉的能量被受到拉伸的聚合物分子储存起来，在拉伸速率较小的区域，松弛恢复到原来形态，储存的能量被传输给低波数速度脉动。因而加入的高聚物溶液破坏了湍流动量运输的过程，达到减阻的效果。

### 参考文献

- 1 Toms BA. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers. In: Proc 1st International Congress on Rheology, North Holland, 1948. 135-141
- 2 Virk PS, Mickley HS, Smith KA. The ultimate asymptote and mean flow structure in Toms' phenomenon. Journal of Applied Mechanics, 1970, 37: 480-493
- 3 Virk PS. Drag reduction fundamentals, AIChE J., 1975, 21: 625
- 4 Lumley JL. Drag reduction in turbulent flow by polymer additives. J. Polymer Sci., 1973, 7, 263-290
- 5 De Gennes PG. Introduction to polymer dynamics. UK: Cambridge University Press, 1990
- 6 Joseph DD. Fluid dynamics of viscoelastic liquids. USA: Springer, 1990
- 7 Rabin Y, Zielinska BJA. Scale-dependent enhancement and damping of vorticity disturbances by polymers in elongational flow. Phys. Rev. Lett., 1989, 63, 512-515
- 8 Den Toonder JMJ, Hulsen MA, Kuiken GDC. Nieuwstadt FTM. Drag reduction by polymer additives in a turbulent pipe flow: numerical and laboratory experiments. J. Fluid Mech., 1997, 337, 193-231
- 9 Meza J C. Steepest descent. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2010, 2, 719-722
- 10 Fan X, Jiang N. Skin friction measurement in turbulent boundary layer by mean velocity profile method. Mechanics in Engineering, 2005, 27 (1), 28-30
- 11 Warholic MD, Massah H, Hanratty TJ. Influence of drag-reducing polymers on turbulence: effects of Reynolds number, concentration and mixing. Experiments in Fluids, 1999, 27, 461-472
- 12 Wei T, Willmarth, WW. Modifying turbulent structure with drag-reducing polymer additives in turbulent channel flows. J. Fluid Mech., 1992, 245: 619-641

# TRPIV MEASUREMENT STUDY OF DRAG-REDUCTION MECHANISM IN WALL TURBULENCE WITH POLYMER ADDITIVES<sup>1)</sup>

Jiang Nan<sup>\*,\*\*,+,#,2)</sup>, Guan Xinlei<sup>\*</sup>, Cheng Lu<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> (Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

<sup>\*\*</sup> (Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin 300072, China)

<sup>+</sup> (State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>#</sup> (Nankai University-Tianjin University Center for LiuHui Applied Mathematics Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** An experimental measurement was performed using TRPIV (time-resolved particle image velocimetry) to investigate the effect of polymer solution on the fully developed near-wall turbulent flow in a water channel. The turbulent flow fields with and without polymer additives solution at the same Reynolds number were measured in the x-y plane and x-z plane. For the x-y plane, the comparison of Reynolds stress' distribution confirms that near the wall it decreases significantly and the turbulent motion is also suppressed. At the place where it is suppressed most dramatically, the pre-multiplied spectra of the solution and water have been analyzed. Compared with the water case, small-scale fluctuations occupy less energy for the solution. The vortices in the flow field were detected by  $\lambda_2$  criterion. The results indicate that the vortices are inhibited by polymer additives and the intensity of the vortex also declines. For the x-z plane, the separations of low-speed streaks with and without polymer solution were compared. The separation in the solution appears much larger, which indicates that the number of the small-scale turbulent structures is reduced due to the polymers, and the process of turbulent momentum transport is undermined.

**Key words:** polymer additives, wall-bounded turbulence, drag reduction mechanism, TRPIV

---

1) The project was jointly supported by the National Natural Science Foundation of China (NO.11272233), National key basic research and development program (plan 973) (NO. 2012CB720101) and 2012 opening subjects of the State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics (LNM), Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences.

2) E-mail: nanj@tju.edu.cn.