

高聚物减阻溶液对壁湍流输运过程的影响

管新蕾 王维 姜楠

Influence of polymer additives on the transport process in drag reducing turbulent flow

Guan Xin-Lei Wang Wei Jiang Nan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 094703 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.094703

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094703>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高超声速平板边界层流动显示的试验研究

[Experimental study on flow visualization of hypersonic flat plate boundary layer](#)

物理学报.2015, 64(1): 014704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.014704>

确定分布的展向 Lorentz 力调制下的槽道湍流涡结构

[Vortex structures in turbulent channel flow modulated by a steadily distributed spanwise Lorentz force](#)

物理学报.2014, 63(5): 054702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.054702>

微平行管道内 Jeffrey 流体的非定常电渗流动

[Transient electroosmotic flow of general Jeffrey fluid between two micro-parallel plates](#)

物理学报.2013, 62(14): 144702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144702>

一维短沟槽复合准晶结构减阻效应及模拟分析

[Mechanism analysis of one-dimensional short groove quasicrystal structure drag-reduction](#)

物理学报.2012, 61(19): 194702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.194702>

单毛细管中赫切尔-巴尔克莱流体的分形分析

[Fractal analysis of Herschel-Bulkley fluid flow in a capillary](#)

物理学报.2012, 61(16): 164701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.164701>

高聚物减阻溶液对壁湍流输运过程的影响*

管新蕾¹⁾ 王维¹⁾ 姜楠^{1)2)3)†}

1)(天津大学机械工程学院力学系, 天津 300072)

2)(天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300072)

3)(南开大学天津大学刘徽应用数学中心, 天津 300072)

(2014年10月19日收到; 2014年11月6日收到修改稿)

基于相同雷诺数下清水和高分子聚合物溶液壁湍流的高时间分辨率粒子图像测速技术 (time-resolved particle image velocimetry, TRPIV) 的对比实验, 从高聚物溶液对湍流边界层动量能量输运影响的角度分析其减阻的机理. 对比两者的雷诺应力发现高聚物的存在抑制了湍流输运过程. 这一影响与高聚物对壁湍流中占主导地位的涡旋运动和低速条带等相干结构的作用密切相关. 运用条件相位平均、相关函数和线性随机估计 (linear stochastic estimation, LSE) 等方法, 分析提取了高聚物溶液流场中的发卡涡和发卡涡包等典型相干结构的拓扑形态. 相比于清水, 高聚物溶液中相干结构的流向尺度增大, 涡旋运动的发展及低速流体喷射的强度受到削弱, 表明了添加的高聚物阻碍了湍流原有的能量传递和自维持的机理. 正是通过影响相干结构, 高聚物抑制了湍流边界层中近壁区与外区之间的动量和能量输运, 使得湍流的无序性降低, 从而减小了湍流流动的阻力.

关键词: 壁湍流, 减阻, 动量能量输运, 高聚物

PACS: 47.27.De, 47.27.nb, 47.27.Rc, 47.50.-d

DOI: 10.7498/aps.64.094703

1 引言

随着世界能源危机的加剧和能源价格的不断上涨, 湍流的减阻问题在工程技术中的地位日趋重要. Toms^[1] 于1948年首次发现极低浓度的高聚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. 然而高聚物和湍流组成了一个复杂的物理系统, 它们之间的动力学相互作用仍不明确, 高聚物湍流减阻的机理尚未得到阐述. 过去的半个多世纪里, 许多学者进行了大量关于高聚物湍流减阻机理的理论分析、数值模拟和实验观测的研究. Lumley^[2], Hinch^[3] 和 Ryskin^[4] 研究湍流中高分子动力学模型后认为, 近壁湍流的黏性底层外存在强烈的应变, 使高分子的长链结构舒展拉伸, 引起有效黏度的增加, 从而抑制了湍

流脉动, 增厚了缓冲层, 降低了速度梯度, 最终导致雷诺应力的减小, 产生减阻效应. 而 Tabor 和 de Gennes^[5] 和 Sreenivasan 和 White^[6] 通过尺度分析得出, 缓冲层中在大于 Kolmogorov 尺度的湍流长度尺度, 当部分被拉伸的高分子所储存的弹性能量积累到与流体动能同量级时, 高聚物溶液便具有了减阻的特性. 随着数值模拟的发展和实验测速技术的升级, 研究人员使用直接数值模拟方法 (direct numerical simulations, DNS) 和激光多普勒测速 (laser Doppler velocimetry, LDV) 或粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术对高聚物与湍流间的物理作用进行研究. Dimitropoulos 等^[7] 和 Angelis 等^[8] 运用直接数值模拟对高聚物壁湍流的能量平衡进行逐项研究, 发现随着高聚物黏弹性的增强, 湍流能量的产生项和耗散项单调递减. Chemloul^[9] 使用 LDV 技术实验研究管流中高聚物

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 11332006)、国家自然科学基金 (批准号: 11272233)、国家自然科学基金国际合作与交流项目 (批准号: 11411130150) 和国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (批准号: 2012CB720101, 2012CB720103) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: nanj@tju.edu.cn

对湍流能量平衡的影响,结果显示平均场的动能部分传递给了高聚物,而非全部传递给了湍流脉动场. Shao等^[10]用激光多普勒测速仪(laser Doppler anemometry, LDA)分别测量了从管道中轴线及管壁注入高聚物溶液后的湍流流场,实验结果表明前者的减阻效果稍优于后者,且在这两种情况下均发现高聚物溶液抑制了小尺度涡而增强了大尺度涡结构. Kim等^[11]基于DNS数据探讨了高聚物溶液对涡旋结构的作用,指出在高聚物溶液中,原始涡旋结构需要具有更高的湍动能才能产生二次涡结构. Motozawa等^[12]运用PIV技术对从壁面注入高聚物溶液的槽道湍流的研究发现在浓度较大的近壁区,瞬时场中相干结构猝发被抑制的同时湍动能的产生项也有所减小;而在浓度较小远离壁面的区域,高聚物对两者的作用均不明显.

本文基于TRPIV实验数据以高聚物溶液对湍流中经典相干结构的作用为切入点,从湍流动量能量运输的角度系统地阐述高聚物溶液对壁湍流的影响,进一步探索其减阻机理. 通过对水槽中相同雷诺数下的清水及高聚物溶液壁湍流流场进行TRPIV实验测量研究,比较了清水和高聚物溶液的平均速度和雷诺应力剖面. 运用条件平均、LSE及相关函数等方法,提取清水和高聚物溶液边界层中主导性的发卡涡、发卡涡包等各种形态的相干结构. 通过分析加入高聚物溶液后湍流相干结构的变化,研究高聚物溶液对壁湍流动量、能量运输的影响.

2 实验设备与技术

实验在天津大学流体力学实验室SZ-2型开口式循环水槽中进行,水槽实验段长1200 mm,宽140 mm,深150 mm. 流场的背景湍流度小于3.5%,均匀度为0.6%. 有机玻璃平板水平放置在水槽底部,1050 mm长,138 mm宽,10 mm厚. 平板前缘为4:1的半椭圆,在其下游7.5 cm处放置直径为3.5

mm的拌线,以确保湍流在测量处已发展充分.

利用Dantec公司的TRPIV系统,对清水与高聚物溶液湍流边界层分别进行实验测量. 测量系统由Nd:YLF高频双腔脉冲激光器和高速相机组成,以侧视和俯视两种方式采集两种条件下的瞬时速度图像. 激光片光源、高速相机和平板的相对位置如图1所示,图中的 x , y , z 分别指向流向、法向和展向. 均匀布散于流场中的示踪粒子为空心玻璃微珠,直径10 μm ,密度1.03 g/mm^3 . 自由来流速度为0.145 m/s ,实验测量区位于平板前缘下游0.9 m处. 拍摄流向-法向平面时,测速系统放置方式与Guan等^[13]的一致,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. 高速相机从侧面采集粒子图像,采样频率为600 Hz,曝光时间为800 μs ,拍摄清水和高聚物溶液各6400张瞬时粒子图像,图像分辨率为1280 \times 1024像素. 在两个不同的法向位置拍摄流向-展向平面,激光平面与平板平行,距平板约3 mm和7 mm. 高速相机从顶部分别拍摄清水和高聚物溶液的瞬时粒子图像各5000张. 处理粒子图像时,先对其进行背景光过滤处理,去除背景干扰;然后计算过滤后图像的互相关,根据相邻两帧图像中粒子的位移,选用32 \times 32像素的查询窗口,75%的迭代率;最后对所得矢量进行UV散点范围验证(UV scatter plot range validation)及平均过滤处理(average filter),大于来流速度或超过周围均值两倍的坏矢量将被替代,结果显示坏矢量率小于2%. 由此在所测的二维平面内得到157 \times 125(流向 \times 法向/展向)个速度矢量,其中流向-法向平面矢量间距约为0.57 mm,流向-展向平面矢量间距为0.53 mm左右.

本实验所用的高聚物为分析纯聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM),分子量为500万. 与其他常用的高聚物减阻剂相比,PAM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,减阻性能保持得较好^[14]. 配制溶液时,先将固体PAM颗粒溶解在水中,并不断搅拌,

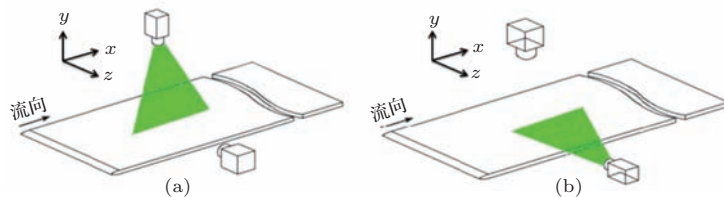


图1 (网刊彩色) 实验装置示意图 (a) 侧视; (b) 俯视

Fig. 1. (color online) Schematic diagram of experimental apparatus. (a) side view; (b) top view.

配制成质量分数为16600 ppm的母液. 浓缩的母液水化数小时后被稀释成190 ppm的PAM溶液. 采用美国Brookfield公司LVDV-II+Pro型黏度计分别测量清水和PAM溶液的动力黏度 μ . 测量时将ULA超低浓度适配器的转速调至50 r/min, 采集样本时间为1 min, 时间间隔为2 s. 测量结果可见表1.

表1中 δ 为边界层名义厚度, 雷诺数 Re_δ 以 δ 为特征长度, 自由来流速度 U_0 为特征速度. 溶液的

Re_δ 与清水相当, 但湍流边界层增厚, 壁面摩擦速度 u_* 减小. 表中, τ_w 和 c_f 分别表示壁面剪切力和摩擦系数, 定义如下:

$$\tau_w = \rho u_*^2; \quad c_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U_0^2} = 2 \frac{u_*^2}{U_0^2}, \quad (1)$$

式中 ρ 是流体密度. 实验中, 在同雷诺数下的减阻率(DR)定义为

$$DR = \frac{\tau_{w,water} - \tau_{w,solution}}{\tau_{w,water}} \times 100(\%). \quad (2)$$

表1 清水与PAM溶液的湍流流场详细参数

Table 1. Detailed data for turbulent flows with and without PAM solution.

	U_0 /(cm/s)	δ /mm	Re_δ	μ /(mPa·s)	u_* /(cm/s)	τ_w /(kg/(m·s ²))	c_f	DR/%
清水	14.5	25.23	3637	1.006	0.8808	0.07758	0.007379	—
溶液	14.5	26.65	3646	1.060	0.7863	0.06183	0.005881	20.31

3 实验结果分析

3.1 统计平均流场

图2给出了相同雷诺数下清水和PAM溶液的流向平均速度剖面. 图中直线为经典的湍流对数律平均速度剖面^[15], 显然清水的平均速度剖面与其相符合. 而PAM溶液湍流边界层的速度剖面也符合对数律^[16], 对数律的表达式为 $u^+ = A \ln y^+ + B$, 上标+表示变量已用摩擦速度和内尺度长度作无量纲化. 根据樊星和姜楠^[17]提出的利用平均速度剖面测量壁面摩擦速度的方法, 由牛顿迭代法和最速下降法可求出 A , B 以及 u_* . 从图中可看出, 对比于清水, 高聚物溶液中湍流速度剖面的截距 B 增大. 这一差别表明了在高聚物分子的作用下, 缓冲层增厚, 导致对数层上移, 具有一般壁面减阻的特征.

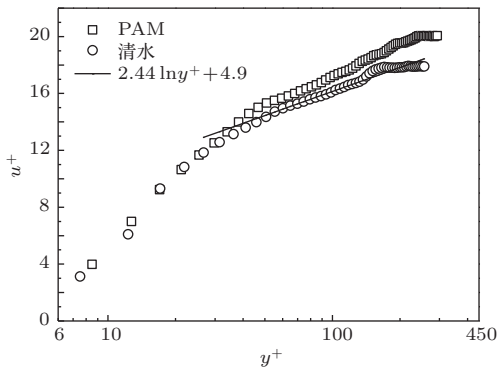


图2 平板湍流边界层平均流速剖面

Fig. 2. Mean velocity profile of turbulent boundary layer over a smooth flat plate.

雷诺应力是湍流边界层中另一重要物理量, 它是由于湍流速度脉动引起动量交换而产生的附加应力, 表征了湍流动量输运的强弱. 在充分发展湍流运动中, 雷诺应力往往远大于分子黏性应力, 对湍流动量输运起主导作用. 图3比较了清水和PAM溶液的雷诺应力 $-\langle u'v' \rangle$ 沿法向的分布, 图中 $-\langle u'v' \rangle$ 用 u_*^2 作无量纲化. 在清水湍流边界层中, 雷诺应力在 $y^+ \approx 41$ 处有一明显峰值. 而添加PAM后, 雷诺应力峰值的量级减小, 位置更远离壁面. 雷诺应力幅值的减小说明湍流动量交换减弱, 湍流脉动受到抑制. 然而, 在远离壁面的区域, 清水中雷诺应力的幅值与高聚物溶液中的接近. 这说明了高聚物溶液对湍流的抑制作用主要是通过减弱近壁的湍流输运实现的, 而这种输运过程往往与相干结构的猝发相关联.

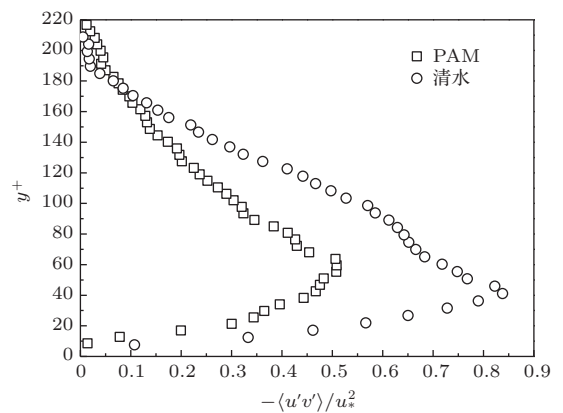


图3 雷诺应力的法向分布

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

3.2 相干结构检测

相干结构是壁湍流维持、演化、发展的主要机理,它在湍流动量和能量的输运过程中起着重要作用^[18].本文使用二阶脉动速度相关函数提取了平均相干结构.相关函数作为经典的统计分析工具,能够提供大量关于湍流场中的相干结构的时空演化信息. x - y 平面上流向脉动速度的空间相关函数定义如下:

$$R_{uu}(\Delta x, y, y_{\text{ref}}) = \frac{\overline{u(x, y_{\text{ref}}) u(x + \Delta x, y)}}{\sigma_u(y_{\text{ref}}) \sigma_u(y)}, \quad (3)$$

式中 Δx 为空间两点间的流向间距, y_{ref} 是参考截面的法向位置,而 σ_u 表示流向脉动速度的均方根.图4是清水和PAM溶液中得到的一点的相关函数云图,显示了湍流边界层中平均相干结构的形态.图中参考截面 $y_{\text{ref}}^+ \approx 31$.由云图可以看出,在清水湍流边界层中存在大尺度的相干结构,其上游靠近壁面,下游远离壁面,与壁面形成约 7° 的倾角.Sibilla和Beretta^[19]用 λ_2 方法研究DNS近壁相干结构时也曾得到相似的结果,相位平均后的相干结构与 x - z 平面的夹角为 9° .与清水相比,首先是PAM溶液中相干结构的流向尺度显著增长了.由于两点的相关是统计平均的结果,包含各尺度的相干结构,可以认为由于高聚物的存在,大尺度的相干结构愈发占据主导地位,小尺度结构的产生则受到了抑制.这暗示高聚物妨碍了能量从大尺度向小尺度的输运,导致湍流能量的级串过程在小尺度部分被改变.Cai等^[20,21]运用DNS的方法在各项同性湍流中也发现了高聚物对小尺度结构的抑制作用.其次,加入PAM溶液后平均相干结构与流向的夹角降低至 4° 左右,表明高聚物减弱了湍流与下游流体间的法向相关性,壁湍流的法向运动被削弱.分散于边界层中的高聚物由于本身特有的黏弹性,分子长链顺流向自然拉伸.因受到流体微元的法向作用力,高聚物分子发生扭曲、旋转变形,然而其分子间引力抵抗上述作用力反作用于流体微元,改变流体微元的作用方向和大小,使一部分法向作用力被转化为顺流向的力,从而阻碍了流体的法向运动,近壁区与外区的动量能量交换减弱.

涡旋结构作为一种典型的相干结构,曾被Küchemann^[22]喻为湍流的肌腱和肌肉,是壁湍流动力学模型的关键要素.为了识别流场中的涡旋结构,本文运用 λ_{ci} 准则对其进行辨识. λ_{ci} 准则

具有伽利略不变性,与其他准则相比,它不仅可以判别涡旋运动的区域,还通过数值反映出涡旋强度的大小,故 λ_{ci} 准则又被称作涡旋强度准则^[23].当速度梯度张量 ∇u 有一对共轭复特征根($\lambda_{cr} \pm i\lambda_{ci}$)时, λ_{ci} 准则就认为当地流场存在着局部的涡旋运动,其中 $2\pi/\lambda_{ci}$ 为涡旋的旋转周期, λ_{ci} 的量级表征了涡旋的旋转强度, λ_{ci} 值乘以当地展向涡量 ω_z 的符号函数便可区分涡旋运动的旋转方向.图5显示的是边界层中 $\lambda_{ci} \cdot \text{sgn}(\omega_z)$ 的概率密度函数(probability distribution function, PDF)沿法向的分布情况.从整体来看,相比于清水最显著的特征是PAM溶液中的PDF分布范围更窄,流场中的涡旋更加趋向于较小的旋转强度.相对而言,大强度的涡旋运动引发周围流体产生更高的应变率,高分子长链被显著拉伸;反过来高聚物对大强度涡旋结构的削弱作用也更为明显.根据Lumley时间准则^[2],只有高分子的弛豫时间大于湍流的时间尺度时才具有减阻特性.涡旋强度 λ_{ci} 的倒数对应于涡旋运动的时间尺度,即 $t_{\text{vortex}} \propto 2\pi/\lambda_{ci}$.涡旋的旋转强度越大,则其时间尺度越小,越容易受到高聚物的影响.因而高聚物溶液湍流边界层中较强的涡旋并没有清水中的那么多.法向上,清水近壁区流场的概率函数分布较宽,而近壁区正是湍流运动最活跃的区域.随着法向位置的升高,由于涡旋的黏性耗散,旋转强度逐渐向较小的 λ_{ci} 值集中.在PAM溶液中,可以看出较小 λ_{ci} 值的低强度涡旋分布得更靠近壁面,反映出高聚物对近壁面涡旋的演化有着较强烈的抑制作用.

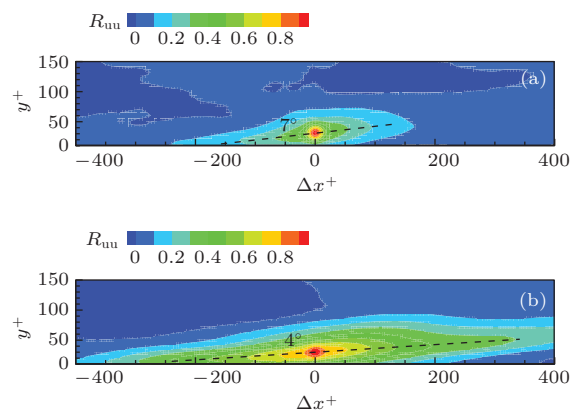


图4 (网刊彩色) 流向脉动速度在 x - y 平面内的两点相关性 (a) 清水; (b) PAM
Fig. 4. (color online) Two-point correlation of streamwise fluctuating velocities in the x - y plane. (a) Water; (b) PAM.

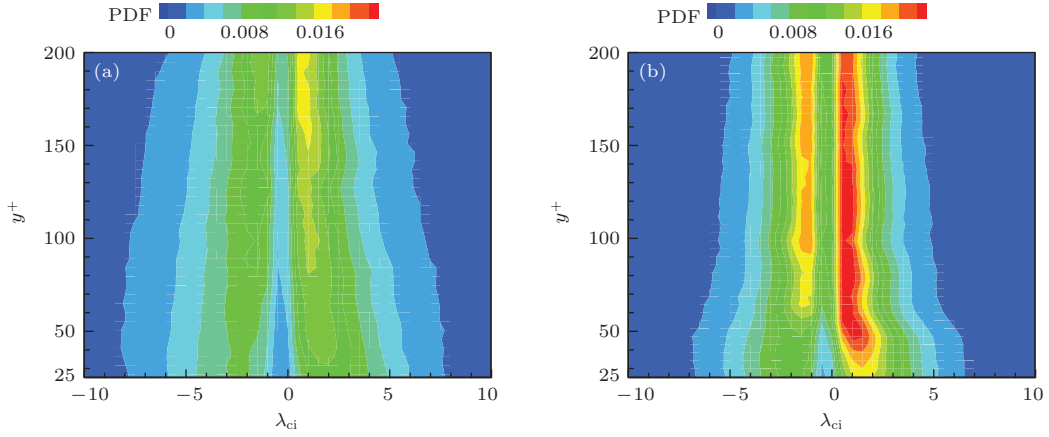

 图5 (网刊彩色) $\lambda_{ci} \cdot \text{sgn}(\omega_z)$ 概率密度函数的法向分布 (a) 清水; (b) PAM

 Fig. 5. (color online) PDF distribution of $\lambda_{ci} \cdot \text{sgn}(\omega_z)$ along the wall-normal direction. (a) Water; (b) PAM.

利用局部平均速度结构函数对PIV时空速度信号进行空间多尺度分解,来提取流场中不同空间尺度的相干结构.将局部平均速度结构函数的概念向二维空间推广,可得到 (x_0, y_0) 处不同速度分量在不同方向上的局部平均速度结构函数^[24]

$$\begin{aligned}
 & \delta u_x(x_0, a) \\
 &= \overline{u(x, y)_{x \in [x_0, x_0+a]}} - \overline{u(x, y)_{x \in [x_0-a, x_0]}}, \\
 & \delta u_y(y_0, b) \\
 &= \overline{u(x, y)_{y \in [y_0, y_0+b]}} - \overline{u(x, y)_{y \in [y_0-b, y_0]}}, \\
 & \delta v_x(x_0, a) \\
 &= \overline{v(x, y)_{x \in [x_0, x_0+a]}} - \overline{v(x, y)_{x \in [x_0-a, x_0]}}, \\
 & \delta v_y(y_0, b) \\
 &= \overline{v(x, y)_{y \in [y_0, y_0+b]}} - \overline{v(x, y)_{y \in [y_0-b, y_0]}}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

式中 a, b 分别为沿流向和法向的变形尺度范围.局部平均速度结构函数表示了一定尺度下湍流结构相邻部分局部平均的相对运动速度,因此可以用其代替速度梯度张量 ∇u .根据能量最大准则,本文就第四尺度进行分析,对应 2^4 个网格长度,空间长

度约为9.078 mm.

图6是 $y^+ \approx 65$ 处清水和PAM溶液壁湍流相干结构的条件平均结果.检测条件为 $\lambda_{ci, x_0} \cdot \text{sgn}(\omega_{z, x_0}) < -10 \langle \lambda_{ci} \rangle$,并且 λ_{ci, x_0} 是该法向位置处的局部极大值.其中 x_0 表示检测点的流向位置, $\langle \lambda_{ci} \rangle$ 为湍流边界层二维平面内 λ_{ci} 的系综平均值^[25].为了清晰地显示涡旋运动,图中速度矢量已减去涡旋中心的速度^[26],云图则显示的是涡旋的强度和方向.图6(a)清水湍流流场中,在检测事件的位置上存在着一个强烈的顺时针旋转的涡旋,其下方为涡旋诱导产生的向上喷射的低速流体.低速流体与涡旋上游向下扫掠的高速流体相遇后形成倾角为 44° 的剪切层.在剪切层内,高低速流体相互抵消,这种抵消作用使得流体在某一位置几乎停滞而形成驻点(stagnation point, SP),图中用红色字体指出.条件检测提取的相干结构符合发卡涡在二维 $x-y$ 平面内的结构特征^[27],说明检测条件主要提取的是湍流流场中的发卡涡,揭示出涡头在展向上的涡旋及其诱导的低速流体的喷射.在使用象限分裂法对壁湍流的研究中发现,相干结构Q2喷射

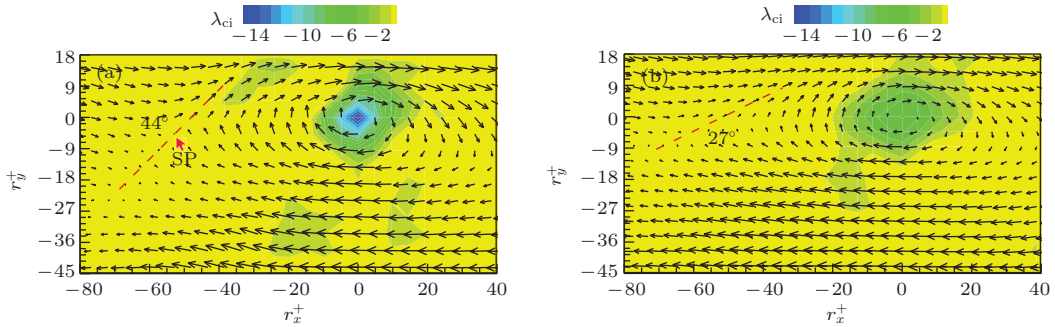


图6 (网刊彩色) 相干结构的条件平均结果 (a) 清水; (b) PAM

Fig. 6. (color online) Conditional averaged coherent structure. (a) Water; (b) PAM.

事件和Q4扫掠事件(两者合称猝发事件)对湍流的雷诺应力的贡献起到主导作用^[28]. 在湍流能量输运过程中, 平均流场将湍流能量传递给发卡涡, 后者诱导产生低速条纹. 低速条纹向上抬升, 在较外层的区域形成剪切层并发生振荡, 遇到上游高速流体而致条纹结构破碎产生新的涡旋. 这一循环过程为湍流的自维持机理^[29]. 因此喷射和扫掠事件对湍流能量的输运也起到了重要的作用. 图6(b)为在PAM溶液中的结果, 由云图 λ_{ci} 值可见展向涡旋的强度有所减弱, 其诱导的喷射事件的强度同样不如清水中的强烈, 尤其是法向方向的湍流运动. 这说明高聚物分子由于黏弹性吸收了部分本应传递给发卡涡的湍流能量, 结果减弱了涡旋和猝发事件的强度, 从而削弱了湍流自维持机理, 抑制了流场的湍流状态. 另外, 通过对比还发现在溶液中涡旋诱导的低速流体区域的流向范围比清水下更大, 暗示了在高聚物长链结构的作用下会使发卡涡的流向尺度增大. 最后, 代表了发卡涡倾角的剪切层在PAM溶液中减小到 27° , 意味着发卡涡在高聚物溶液中迁移时伴随的抬升现象受到抑制, 对此的解释

是高聚物长链分子的黏弹性在发卡涡的卷曲部位产生反展向扭矩^[30], 降低了涡旋的弯曲率和发卡涡的倾角.

图7给出了图6中所得发卡涡的湍动能产生项 $-u'^+v'^+(\frac{du^+}{dy^+})$ 的等值面图. 湍动能产生项表示的是雷诺应力通过平均运动的变形率从平均流场中获取的湍流能量^[31]. 无论是清水还是PAM溶液, 云图在发卡涡涡头部分均呈现出明显的反对称结构, 这种反对称的形态是湍流边界层中典型的相干结构拓扑形态, 普遍存在于湍流的产生、维持过程中^[32]. 发卡涡涡头周围从左上角按逆时针依次为Q1, Q2, Q3和Q4事件, 雷诺应力 $-u'^+v'^+$ 正负交替, 而流向速度沿法向的梯度 $\frac{du^+}{dy^+}$ 均为正值, 因而涡头位置形成了反对称的四极子结构. PAM溶液中的湍动能产生项比清水中的有所减小, 说明高聚物的加入影响了湍流能量的正常传输过程, 使得发卡涡因湍流运动而从平均场获取的能量减少, 涡旋强度减弱, 其诱导的低速流体喷射事件的强度也随之降低.

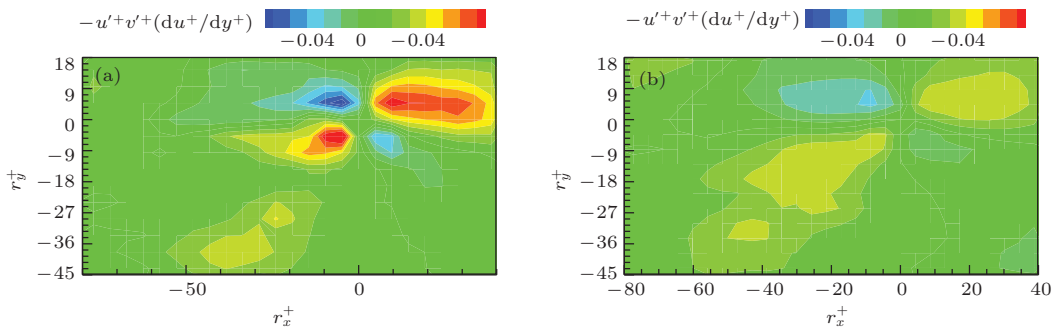


图7 (网刊彩色) 发卡涡湍动能产生项的等值面云图 (a) 清水; (b) PAM

Fig. 7. (color online) Contours of turbulent kinetic energy production in hairpin vortex. (a) Water; (b) PAM.

湍流边界层中达到一定强度的发卡涡在向下游时, 会与周围流体相互作用, 通过parent-offspring机理生成一系列新的发卡涡, 这些新发卡涡与老发卡涡的迁移速度基本保持一致, 最终形成了较大空间尺度的相干结构, 称为发卡涡包^[33,34]. 这里使用LSE方法对流场中的发卡涡包的结构进行分析. LSE是通过给定条件事件 $E(x)$ 对速度场进行条件平均 $\langle u'(x') | E(x) \rangle$. 通过优化条件平均和估计间的误差, 条件平均能够被表示成关于条件事件的线性函数^[35]

$$\langle u'(x') | E(x) \rangle \approx \frac{\langle E(x) u'_j(x') \rangle}{\langle E(x) E(x) \rangle} E(x). \quad (5)$$

文中以 $\lambda_{ci} \cdot \text{sgn}(\omega_z) < 0$ 为条件事件, 分别对清水

和PAM溶液中的速度场进行LSE分析, 得到的条件平均结果如图8所示, 条件事件的位置在图中用黑点标出. 清水中的速度场存在着四个呈现出旋转样式的矢量, 旋转中心用实心点标示出. 涡旋间的连线与流向坐标形成 15° 的夹角, 在涡旋连线下面存在着较大范围的低速流体区域, 这些都符合Tomkins和Adrian^[36]提出的发卡涡涡包模型的二维流场特征. Christensen和Adrian^[37]在壁湍流中也得到了相似的结果, 涡头连线与壁面的倾斜角为 14° . 涡包中的发卡涡沿流向排列, 在流场中的迁移速度保持同一范围内, 维持较稳定的流向间距, 居于其下方的流体受到持续的诱导作用而形成低速条纹结构. 相比之下在PAM溶液中的LSE结果

只检测到两个发卡涡涡头结构, 由于LSE方法是基于统计平均的, 因此说明溶液中涡包内发卡涡之间的间距增加, 发卡涡的数量减少, 证实了由于高聚物的存在发卡涡从平均场中所得的能量减少, 导致其生成新的发卡涡受到一定的阻碍. 涡头包络线与壁面的倾角减小到 7° , 结合前文对条件平均的分析, 说明高聚物的加入在减弱单个发卡涡法向抬升的同时, 也会使整个发卡涡包法向抬升减弱. Kim等^[11]通过动力学模拟研究不同减阻率下发卡涡的发展演化, 其中减阻率达到18%的时候涡头包络线与壁面倾角为 10° , 而减阻率为61%时已经不能构成涡包, 也就不存在涡头连线与壁面的倾角了. 另外LSE结果中的云图显示的是流向脉动速度, 对比

发现, 虽然两者脉动速度的量级基本一致, 但溶液中的脉动速度分布比清水中更加均匀, 意味着流向速度在法向的梯度减弱.

在湍流边界层内, 主导性的相干结构如准流向涡和发卡涡等对周围流体产生诱导作用, 这种诱导作用最突出的表现是沿展向周期性地产生了流向尺度较大的低速流体区域, 称为低速条带. 文中运用流向脉动速度的展向间距自相关函数表征条带结构展向间距的变化. 作为统计分析的工具, 自相关技术能客观地反映湍流脉动空间相关程度的统计规律性. 湍流理论中认为壁湍流流向脉动速度沿展向的自相关函数达到第二个峰值对应的空间尺度即为条带结构的展向平均间距.

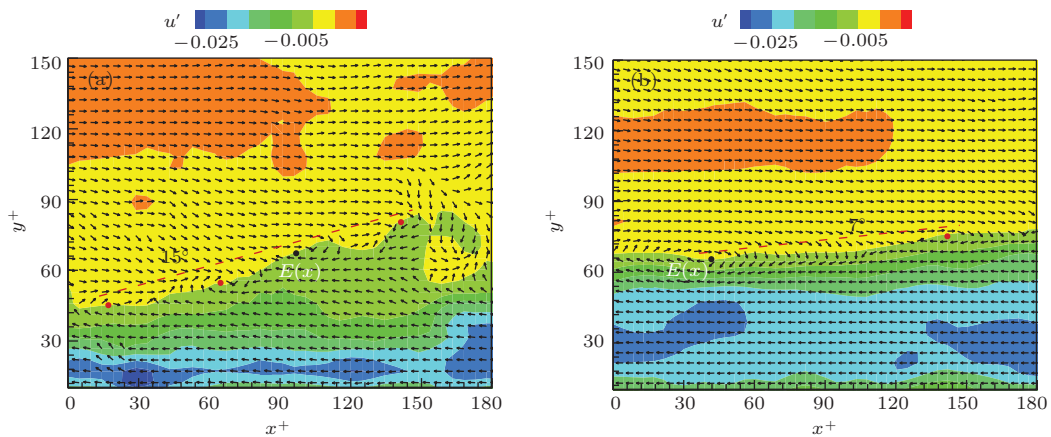


图8 (网刊彩色) $\langle u'(x')|E(x) \rangle$ 线性随机估计结果 (a) 清水; (b) PAM

Fig. 8. (color online) Linear stochastic estimation of $\langle u'(x')|E(x) \rangle$. (a) Water; (b) PAM.

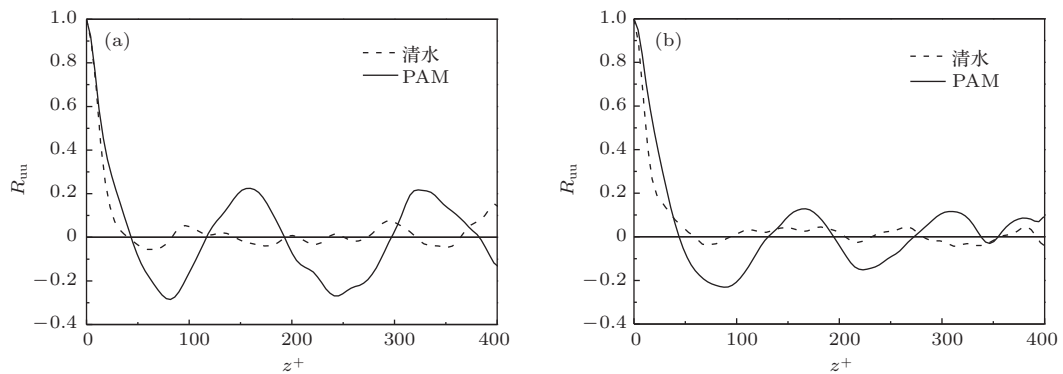


图9 (网刊彩色) 流向脉动速度沿展向的自相关函数 (a) $y^+ = 28$; (b) $y^+ = 65$

Fig. 9. (color online) Autocorrelation function of streamwise fluctuating velocities in the spanwise direction. (a) $y^+ = 28$; (b) $y^+ = 65$.

图9分别给出了 $y^+ = 28$ 和65处清水和PAM溶液中流向脉动速度的展向自相关函数曲线. 图9(a)清水中条带结构的展向间距为11.34 mm, 约为96壁面单位(wall unit, WU), 这与Kline小组曾得出的壁湍流中条带结构的平均展向间距大约

为100 WU的结果相近^[38]. 而在PAM溶液中, 展向间距增大为21.06 mm, 约为160 WU, 是清水中的1.67倍. 条带展向间距的增大暗示了流体的展向运动的减弱, 这种展向动量运输的减弱趋势与White等^[39]所得的展向湍流度的减小是一致的.

另外,对比发现清水的自相关曲线上有很多小周期性脉动存在,这代表着流场中的小尺度结构,而加入溶液后自相关曲线明显变得更光滑,说明加入PAM溶液后,低速条带的不稳定性受抑制,条带振荡破碎而产生涡旋的可能性降低,体现了高聚物溶液对湍流自维持过程的削弱作用.图9(b)清水和PAM溶液中条带结构的展向间距分别是13.14 mm, 22.08 mm,约合111 WU和167 WU,后者为前者的1.50倍左右.这一比率与法向位置 $y^+ = 28$ 处的相比有所减小,说明高聚物湍流减阻主要发生在近壁区,尤其是缓冲层内.这是由于随着法向位置远离壁面,相干结构的尺度逐渐增大,其时间尺度也相应增加.而由Lumley时间准则,时间尺度越小的相干结构越易高聚物影响.这也从侧面解释了高聚物对湍流中的小尺度运动的抑制作用.

4 结 论

本文利用TRPIV技术对水槽中同雷诺数下的清水和高聚物溶液平板湍流边界层流场进行侧视与俯视高时间分辨率测量,揭示了高聚物溶液对壁湍流动量和能量运输的影响.与清水相比,所配制的高聚物溶液的缓冲层增厚,对数律上移,具有明显减阻的特征.添加高聚物溶液后,雷诺应力大幅减小,近壁区与外区间的运输过程受到限制,高聚物溶液对流场的这一影响是通过作用于壁湍流中主导性的发卡涡、发卡涡包和低速条带等相干结构来实现的.一方面高聚物的加入使相干结构空间尺度有所增长,这是由于高聚物的黏弹性储存了本应传递给小尺度的湍流能量,改变了湍流能量从大尺度到小尺度的传递规律.另一方面,高聚物的存在抑制了涡旋结构的发展,降低了相干结构猝发的强度,阻碍了湍流自维持过程的完成.

参考文献

- [1] Toms B A 1948 *Proceedings of the 1st International Congress on Rheology* North Holland p135
- [2] Lumley J L 1969 *Annu. Rev. Fluid Mech.* **1** 367
- [3] Hinch E J 1977 *Phys. Fluids* **20** 22
- [4] Ryskin G 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 2059
- [5] Tabor M, de Gennes P G 1986 *Europhys. Lett.* **2** 519
- [6] Sreenivasan K R, White C M 2000 *J. Fluid Mech.* **409** 149
- [7] Dimitropoulos C D, Sureshkumar R, Beris A N, Handler R A 2001 *Phys. Fluids* **13** 1016
- [8] De Angelis E, Casciola C M, Piva R 2002 *Comput. Fluids* **31** 495
- [9] Chemloul N S 2014 *Energy* **64** 818
- [10] Shao X M, Lin J Z, Wu T Li Y L 2002 *Can. J. Chem. Eng.* **80** 293
- [11] Kim K, Adrian R J Balachandar S, Sureshkumar R 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 134504
- [12] Motozawa M, Ishitsuka S, Iwamoto K, Ando H, Senda T, Kawaguchi Y 2012 *Flow Turbul. Combust.* **88** 121
- [13] Guan X L, Yao S Y, Jiang N 2013 *Acta Mech. Sin.* **29** 485
- [14] Kenis P R 1971 *J. Appl. Polym. Sci.* **15** 607
- [15] Hinze J O (translated by Zhou G J et al.) 1987 *Turbulence* (Vol.2) (Beijing: Science Press) p298 (in Chinese) [Hinze J O 著 (周光炯等译) 1987 湍流 (下册) (北京: 科学出版社) 第298页]
- [16] Luchik T S, Tiederman W G 1988 *J. Fluid Mech.* **190** 241
- [17] Fan X, Jiang N 2005 *Mechanics in Engineering* **27** 28 (in Chinese) [樊星, 姜楠 2005 力学与实践 **27** 28]
- [18] Robinson S K 1991 *Annu. Rev. Fluid Mech.* **23** 601
- [19] Sibilla S, Beretta C P 2005 *Fluid Dyn. Res.* **37** 183
- [20] Cai W H, Li F C, Zhang H N 2011 *Chin. Phys. B* **20** 124702
- [21] Li F C, Cai W H, Zhang H N, Wang Y 2012 *Chin. Phys. B* **21** 114701
- [22] Küchemann D 1965 *J. Fluid Mech.* **21** 1
- [23] Zhou J, Adrian R J, Balachandar S, Kendall T M 1999 *J. Fluid Mech.* **387** 353
- [24] Jiang N, Guan X L, Yu P N 2012 *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics* **44** 213 (in Chinese) [姜楠, 管新蕾, 于培宁 2012 力学学报 **44** 213]
- [25] Wang W, Guan X L, Jiang N 2014 *Chin. Phys. B* **23** 104703
- [26] Adrian R J, Christensen K T, Liu Z C 2000 *Exp. Fluids* **29** 275
- [27] Adrian R J, Meinhart C D, Tomkins C D 2000 *J. Fluid Mech.* **422** 1
- [28] Willmarth W W, Lu S S 1972 *J. Fluid Mech.* **55** 65
- [29] Swearingen J D, Blackwelder R F 1987 *J. Fluid Mech.* **182** 255
- [30] Kim K, Li C F, Sureshkumar R, Balachandar S, Adrian R J 2007 *J. Fluid Mech.* **584** 281
- [31] Zhang Z S, Cui G X, Xu C X 2005 *Turbulence Theory and Simulation* (Beijing: Tsinghua University Press) p17 (in Chinese) [张兆顺, 崔桂香, 许春晓 2005 湍流理论与模拟 (北京: 清华大学出版社) 第17页]
- [32] Johansson A V, Alfredsson P H, Kim J 1991 *J. Fluid Mech.* **224** 579
- [33] Zhou J, Adrian R J Balachandar S 1996 *Phys. Fluids* **8** 288
- [34] Chen L, Tang D B, Liu C Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 094702 (in Chinese) [陈林, 唐登斌, 刘超群 2011 物理学报 **60** 094702]
- [35] Adrian R J 1994 *Appl. Sci. Res.* **53** 291
- [36] Tomkins C D, Adrian R J 2003 *J. Fluid Mech.* **490** 37
- [37] Christensen K T, Adrian R J 2001 *J. Fluid Mech.* **431** 433
- [38] Kline S J, Reynolds W C, Schraub F A, Runstadler P W 1967 *J. Fluid Mech.* **30** 741
- [39] White C M, Somandepalli V S R, Mungal M G 2004 *Exp. Fluids* **36** 62

Influence of polymer additives on the transport process in drag reducing turbulent flow*

Guan Xin-Lei¹⁾ Wang Wei¹⁾ Jiang Nan^{1)2)3)†}

1) (Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

2) (Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin 300072, China)

3) (Nankai University-Tianjin University Center for LiuHui Applied Mathematics, Tianjin 300072, China)

(Received 19 October 2014; revised manuscript received 6 November 2014)

Abstract

The spatial-temporal sequence of velocity fields in wall turbulence with and without polymer additives at the same Reynolds number are measured by time-resolved particle image velocimetry (TRPIV) from the side and top views. Based on this experimental database of a water channel, the mechanism of drag reduction by polymers is explored from the viewpoint of the influence of polymer solution on the transport of momentum and energy in a turbulent boundary layer. Comparison of Reynolds stress profiles confirms that due to the existence of polymer additives, the transport of turbulent momentum is significantly inhibited, as if caused by the decrease of Reynolds shear stress. Furthermore, it is noted that these changes are closely related to the effect of polymer additives on the classical coherent structures, such as vortices and low-speed streaks, which are the dominant structures in near-wall turbulence. The spatial topological mode of hairpin vortex extracted by conditional sampling method shows that the intensity of vortices and ejection event are greatly suppressed by the polymer solution. Not only does the decline of turbulent kinetic energy production indicate that the energy of hairpin vortices that comes from the ensemble average movement is attenuated in the solution, but all this implies that the polymer additives hinder the self-sustaining mechanism, the inherent character of wall turbulence. Then, the analysis of linear stochastic estimation (LSE) suggests that the development of hairpin vortices in the packet is impeded, which is mainly reflected in the reduction of the number of hairpin vortices and the suppression of uplift in the wall-normal direction. To investigate the change of low-speed streaks after the addition of polymers, the spanwise autocorrelation function of streamwise fluctuating velocities has been calculated. In the polymer solution the large-scale vortices are enhanced while the small-scale vortices are suppressed. This observation reveals that the polymers disrupt the energy transport from large to small scales. To summarize, it is through the action on coherent structures that the polymer additives can damp the transport of momentum and energy between the near-wall region and outer region of the boundary layer. In this way, the polymer solution makes turbulent flow less chaotic, leading to the reduction of friction drag.

Keywords: wall turbulence, drag reduction, transport of momentum and energy, polymer additives

PACS: 47.27.De, 47.27.nb, 47.27.Rc, 47.50.-d

DOI: 10.7498/aps.64.094703

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11332006), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11272233), the Funds for International Cooperation and Exchange of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11411130150), and the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2012CB720101, 2012CB720103).

† Corresponding author. E-mail: nanj@tju.edu.cn