

文章编号:1001-4888(2013)04-0422-09

高分子溶液壁湍流减阻机理的 TRPIV 实验研究*

蒋营营^{1,2}, 管新蕾^{1,2}, 姜楠^{1,2,3,4}

(1. 天津大学力学系, 天津 300072; 2. 天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300072;

3. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100090; 4. 南开大学天津大学刘徽应用数学中心, 天津 300072)

摘要: 利用高时间分辨率粒子图像测速技术(TRPIV)对回流式水槽中低浓度高分子溶液壁湍流的减阻机理进行实验研究。通过对比分析高分子溶液和纯水平板湍流边界层在相同来流速度下的平均速度剖面、湍流强度和雷诺应力,发现高分子溶液的壁面摩擦阻力减小了 21.77%,并且其缓冲层增厚,按对数律外移,雷诺应力减小;高分子聚合物主要在近壁区起到抑制湍流脉动的作用,而在主流区的作用不太明显。用流向局部平均多尺度速度结构函数和相干结构条件采样方法,检测并对比了高分子溶液和水的壁湍流相干结构“喷射”和“扫掠”事件中的脉动速度、展向涡量、雷诺应力等物理量的二维拓扑形态,发现高分子溶液近壁区相干结构在猝发时的脉动速度减小,涡量受到抑制,雷诺应力明显减小,说明高分子溶液湍流近壁区相干结构“喷射”和“扫掠”的强度变弱,猝发频率降低,动量和能量的输运减弱,揭示出高分子溶液减阻的重要机理。

关键词: 高分子溶液; 减阻; 高时间分辨率粒子图像测速; 壁湍流; 相干结构

中图分类号: O357.5+2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-12-175

0 引言

在水中加入极少量的高分子聚合物,即可导致湍流壁面摩擦阻力大幅度减小,这种现象已经被广泛应用于管道运输、供热/供冷系统、暖通空调水系统中,大大减小了能源消耗。例如日本川口靖夫研究小组在热水及冷冻水、冷却水输送系统加入高分子聚合物后发现循环水泵的耗电量可以减低一半以上^[1]。德国 Fernwärme-Verbund Saar 公司在区域供热系统中进行大规模的减阻实验,结果显示加入高分子聚合物后,系统水头损失降低 70%,局部速度增加 30%^[2]。因此高分子聚合物减阻技术减阻效果非常明显,有很大的理论意义和应用价值。

关于高分子聚合物的减阻机理自 Toms^[3]在 1948 年提出以后,国内外学者便开展了大量的研究工作,提出了许多有关高分子聚合物溶液减阻的观点。Virk^[4]等通过测量流向速度研究不同的减阻剂对减阻流动的影响时得到著名的 Virk 渐近线,并且提出层流底层和湍流核心之间存在弹性缓冲层,湍流核心部分的速度分布曲线上移,即流速增大。Lumley^[5]在研究高分子聚合物的减阻作用时提出高分子聚合物分子在湍流边界层中拉伸,使得流体的粘度增大,他认为这是高分子聚合物减阻的主要原因。De DeGennes^[6]、Joseph^[7]观察到加入高分子聚合物后溶液具有黏弹性,提出高分子溶液减阻就是由于黏弹性与湍流中旋涡相互作用,影响了能量的耗散,即“涡能量耗散受抑制说”。Rabin 和 Zilinska^[8]提

* 收稿日期: 2012-11-27; 修订日期: 2013-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11272233); 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(NO. 2012CB720101); 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室对外开放课题联合资助

通讯作者: 姜楠(1968-),男,博士,教授。主要研究领域:实验流体力学。E-mail: nanj@tju.edu.cn

出高分子聚合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,高分子分子又将储存的能量传递给流体。荷兰代夫特科技大学的 Den Toonder^[9]通过实验得到聚合物扩散引起的各项异性的粘性应力是导致减阻的主要因素。

近年来,流动测量技术和湍流理论的发展大大推动了高分子溶液壁湍流减阻机理的研究,而相干结构的提出为理解壁湍流高分子减阻机理提出新思路。壁湍流相干结构猝发是湍流产生脉动和雷诺应力的重要机制,主宰湍流的质量、动量、能量的输运,在纯水和高分子溶液的壁湍流中起到非常重要的作用,所以从壁湍流相干结构猝发的角度分析高分子溶液的减阻机理是行之有效的一种方法。例如 MeComb 和 Rabie^[10]利用激光测速和条件采样技术测量了圆管内水溶液的猝发过程,指出高分子溶液抑制猝发频率。Donohue、Tiederman 和 Reischman^[11]采用流动显示技术发现在靠近壁面的区域法向流体运动显著减弱,湍斑区增大,猝发频率明显减小。Kim 等^[12]用直接数值模拟的方法发现加入高分子聚合物后,湍流在近壁区的涡结构明显减弱并且数量减少。目前国内在此方面的研究还很缺乏。本文利用 TRPIV 技术测量了低速循环水槽中水和高分子溶液的壁湍流瞬时速度矢量场,着重从湍流相干结构猝发的角度分析高分子溶液的减阻机理。

1 实验系统

实验在 SZ-2 型开口式低速循环水槽中进行。水槽实验段长 130cm,宽 14cm,深 15cm,其流速在 0~0.4m/s 范围内连续可调,水槽中心湍流均匀度为 0.6%,实验时水深 13cm。平板尺寸为 120cm×13.8cm×0.9cm,前缘按 8:1 打磨为椭圆形,水平放置于水槽底部。由于高分子溶液只对湍流近壁区有效^[13],实验时在距平板前缘 8cm 处加两根绊线,使实验在充分发展的湍流工况下进行。

本实验采用 DANTEC 公司的二维 TRPIV 系统,激光片光源、高速相机和平板相对位置如图 1 所示,激光器位于平板展向中心处,其片光源平面与平板垂直,高速相机镜头与片光源保持平行。实验时在水槽底部激光片光源照亮部位粘贴黑色不透光纸,防止壁面激光反射形成噪音信号。示踪粒子采用 DANTEC 公司提供的 MV-H0105 空心玻璃微珠,直径 10 μ m。高速相机采样频率为 600Hz,连续曝光,每次记录 6399 张图像。记录的粒子图像的图像分辨率为 1280×1024,经 TRPIV 系统自带软件 DynamicStudio v2.30 的互相关计算,每张图片在 x - y (流向-法向)方向得到 125×157 个二维瞬时速度矢量场信息。

本实验高分子聚合物选用聚丙烯酰胺(PAM),其分子量平均为 5×10⁶。为分析加入高分子聚合物后对对流场的影响,实验先在纯水中进行,后加入提前配好的高浓度 PAM 溶液稀释为实验所需浓度。本实验高分子溶液浓度为 190ppm,实验时温度为 20℃。采用美国 BROOKFIELD 公司 DV-II+ Pro 粘度计,选用型号 LV(转子 ULA),转速 50rpm,时间间隔 2s,采集样本时间为 1min,测得纯水粘度为 1.01mPa·s,高分子溶液粘度为 1.06mPa·s。

2 实验结果及分析

2.1 实验参数

本实验测量了来流速度为 0.145m/s 时纯水和高分子溶液的平板湍流边界层的瞬时速度矢量场。表 1 列出水和高分子溶液的实验参数,其中雷诺数(Re_δ)采用湍流边界层厚度计算,溶液壁面摩擦阻力采用平均速度剖面法^[14]计算。加入高分子聚合物(PAM)后溶液的减阻率用湍流壁面摩擦阻力系数计算。

对比高分子溶液和纯水在相同的来流速度时平板湍流边界层的基本参数,由表 1 可以看出,高分子溶液的平均壁面摩擦速度、平均壁面摩擦阻力系数均小于纯水的相应参数。在相同的来流速度

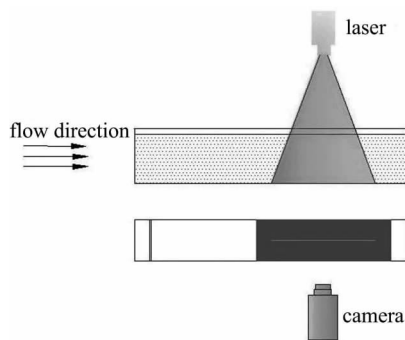


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental facility

0.145m/s时,加入高分子聚合物之后,壁面摩擦阻力减小 21.77%,所以在管道运输、供热/供冷系统中输送相同流量的溶液,加入相应的高分子聚合物,可以大大减少能源消耗,节约成本。

表 1 自来流速 $U_e = 0.145\text{m/s}$ 时高分子溶液壁湍流的减阻参数

Tab. 1 Drag reduction parameters of polymer solution in wall-bounded turbulence

	纯水	高分子溶液
自来流速(m/s)	1.45×10^{-1}	1.45×10^{-1}
浓度(ppm)	0	190
粘度(Pa·s)	1.01×10^{-3}	1.06×10^{-3}
边界层厚度(m)	2.11×10^{-2}	2.21×10^{-2}
雷诺数(Re_δ)	3029	3023
壁面摩擦速度(m/s)	8.51×10^{-3}	7.53×10^{-3}
壁面摩擦阻力系数	6.89×10^{-3}	5.39×10^{-3}
减阻率	0	21.77%

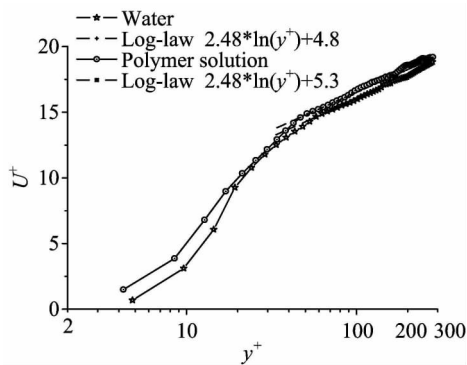


图 2 平均速度分布

Fig. 2 Mean velocity profiles

2.2 平均速度剖面

在来流速率为 0.145m/s 时,高分子溶液和纯水的平均速度剖面如图 2 所示,均已用壁面摩擦速度 u_* 与流体运动黏度 ν 无量纲化($U^+ = U/u_*$, $y^+ = yu_*/\nu$)。与纯水相比,高分子溶液的壁湍流平均速度剖面的缓冲层增厚,对数律上移,即在近壁区($y^+ < 200$)时,相同的法向位置 y^+ 处,高分子溶液的无量纲速度 U^+ 比纯水的无量纲速度大。拟合水和高分子溶液湍流边界层的对数律,高分子溶液湍流边界层的对数律仅上移,斜率与水保持一致。Harder 和 Tiederman^[15]、Masaaki 等^[16]、邵雪明等^[17]多位国内外专家学者都得到相似结论。

2.3 湍流统计量

图 3(a)、(b)给出高分子溶液和纯水的壁湍流脉动速度均方根沿法向位置 y^+ 的分布曲线,已用壁面摩擦速度无量纲化。与纯水相比,高分子溶液湍流脉动强度沿法向位置发生一定的变化,但变化趋势相同: $y^+ < 30$ 时,湍流脉动速度均方根沿 y^+ 逐渐增大,法向脉动速度均方根在 $y^+ = 30$ 左右达到最大值; $30 < y^+ < 200$ 时,湍流脉动速度均方根沿法向逐渐减小;而在壁湍流外区,湍流脉动速度均方根与纯水的相应量趋于一致。在相同的法向位置 y^+ 处,高分子溶

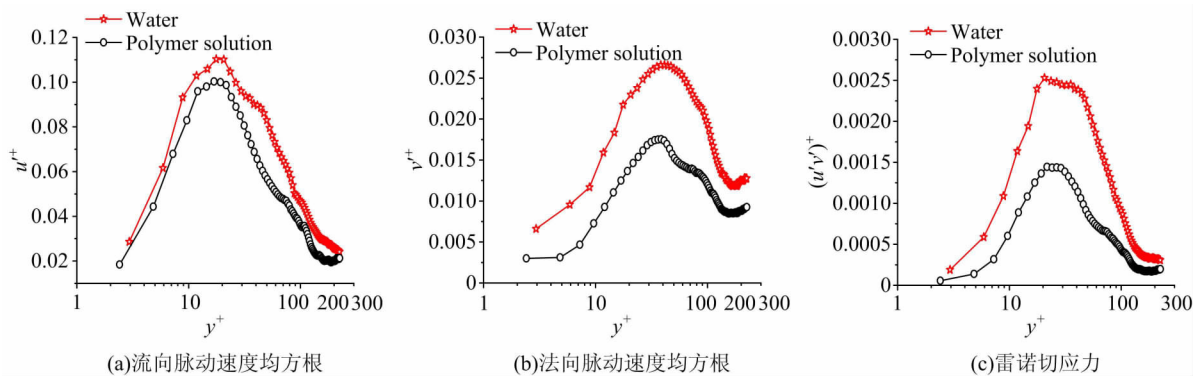


图 3 物理统计量沿法向位置 y^+ 的分布

Fig. 3 The distribution of the statistical physical quantity in wall-normal direction

液的流向和法向脉动速度均方根都比纯水相应物理量小。图 3(c) 为高分子溶液和纯水的雷诺应力沿法向位置 y^+ 的分布曲线, 图中也明显看出相同法向位置 y^+ 处, 高分子溶液的雷诺应力比纯水的小。由于近壁区是壁湍流猝发事件产生的主要区域, 而此处高分子溶液的脉动速度均方根和雷诺应力都大大减小, 因此高分子聚合物的加入抑制近壁区湍流的猝发, 湍流强度被削弱。

2.4 壁湍流相干结构

壁湍流相干结构是湍流产生的重要机制, 主宰湍流的动量和能量的输运, 在壁湍流中起到非常重要的作用, 所以本文分别提取了高分子溶液和纯水壁湍流多尺度相干结构喷射和扫掠事件的脉动速度、展向涡量、雷诺切应力等物理量的二维平均拓扑形态, 从壁湍流相干结构猝发的角度分析高分子溶液壁湍流的减阻机理。

姜楠等^[18]提出用时间局部平均速度结构函数的概念描述一定尺度的相干结构的流向变形和相对运动, 其流向脉动速度沿流向的局部平均结构函数为:

$$\delta u_x(x_0, l_x) = \overline{u(x, y)_{x \in [x_0, x_0 + l_x]}} - \overline{u(x, y)_{x \in [x_0 - l_x, x_0]}} \quad (1)$$

式中 $u(x, y)$ 表示流向脉动速度在 (x, y) 平面的分布, x_0 表示沿流向多尺度变形的中间位置, $[x_0, x_0 + l_x]$ 、 $[x_0 - l_x, x_0]$ 表示 $u(x, y)$ 沿流向局部平均的范围。

相干结构喷射事件是低速流体从近壁区向外喷射, 其物理特征为: 当地的流向脉动速度达到局部极小值, 流动结构中高速流体在下游拉伸, 低速流体在上游压缩, 流动结构抬升远离壁面, 法向脉动速度 $v(x, y) > 0$; 扫掠事件为高速流体从外区冲向壁面, 其物理特征为: 当地的流向脉动速度达到局部极大值, 此时高速流体在上游冲向壁面, 高速流体在上游拉伸, 低速流体在下游压缩, 法向脉动速度 $v(x, y) < 0$ 。因此, 壁湍流相干结构的检测函数——象限分裂法^[19]定义如下:

$$D(x_0, l_x) = \begin{cases} 1(\text{ejection}) & \begin{cases} u' < 0 \&\delta u_x(x_0 - \Delta x, l_x) < 0 \&\delta u_x(l_x, x_0 + \Delta x) > 0 \\ v' > 0 \&\delta u_y(x_0 - \Delta x, l_x) > 0 \&\delta u_y(l_x, x_0 + \Delta x) < 0 \end{cases} \\ -1(\text{sweep}) & \begin{cases} u' > 0 \&\delta u_x(x_0 - \Delta x, l_x) > 0 \&\delta u_x(l_x, x_0 + \Delta x) < 0 \\ v' < 0 \&\delta u_y(x_0 - \Delta x, l_x) < 0 \&\delta u_y(l_x, x_0 + \Delta x) > 0 \end{cases} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

高分子溶液和水的平板湍流边界层中检测到相干结构喷射和扫掠事件, 运用条件相位平均方法提取喷射和扫掠事件脉动速度分量、展向涡量、雷诺切应力等物理量的二维平均拓扑形态。条件相位平均技术^[20]计算方法为:

$$\begin{aligned} \langle f(x_1, l_1) \rangle_e &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f(x_1^*(k) + x_1), \quad x_1 \in \left[-\frac{l_1}{2}, \frac{l_1}{2}\right] \&\& D(x_1^*(k), l_1) = 1 \\ \langle f(x_1, l_1) \rangle_s &= \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M f(x_1^*(k) + x_1), \quad x_1 \in \left[-\frac{l_1}{2}, \frac{l_1}{2}\right] \&\& D(x_1^*(k), l_1) = -1 \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\langle f(x_1, l_1) \rangle_e$ 和 $\langle f(x_1, l_1) \rangle_s$ 分别代表喷射和扫掠事件中各物理量的相位平均波形。 $f(x_1, l_1)$ 代表脉动速度分量、展向涡量等物理量。 $x_1^*(k)$ 代表检测到第 k 次喷射和扫掠发生的流向位置, N 和 M 分别代表检测到喷射和扫掠发生的次数。

根据前文统计分析的结果, 高分子聚合物的加入对溶液的近壁区影响最大, 其中 $y^+ = 30$ 左右影响强度最大。本文以法向位置 $y^+ = 30$ 处为检测中心, 采用象限分裂法(2)和条件相位平均技术(3), 提取高分子溶液和水的壁湍流相干结构在喷射和扫掠阶段的物理量的二维平均拓扑形态, 并统计此处检测到的不同尺度的喷射和扫掠事件发生的次数, 如图 4 所示, 在相同时间内检测到高分子溶液喷射和扫掠事件发生的次数均小于纯水在相同工况下发生的次数, 即高分子溶液的湍流猝发频率降低, 并且加入高分子聚合物对溶液中扫掠事件的影响明显大于喷射事件。图 5、图 6 中, 左图为纯水, 右图为高分子溶液, 高分子溶液和纯水的相干结构喷射和扫掠事件的物理量在相同的图例下比较。

2.4.1 喷射事件

高分子溶液和纯水的壁湍流相干结构在喷射阶段的二维平均拓扑形态如图 5 所示。由图中可以看出, 本文采用的象限分裂法很好地检测到了喷射阶段的相干结构, 即流动结构远离壁面, 向上抬升。高

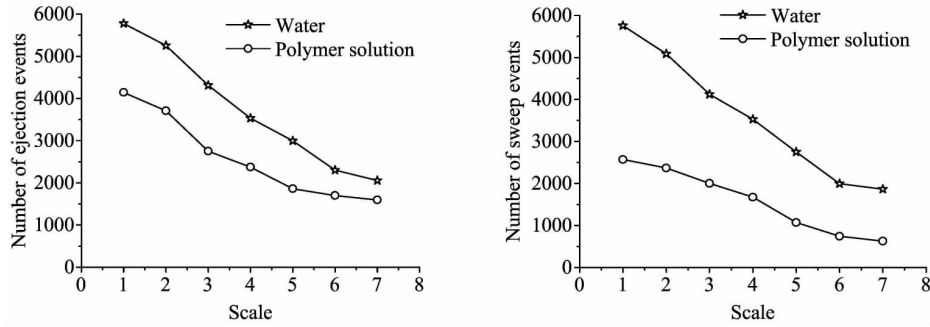


图4 不同尺度的喷射和扫掠事件在 $y^+ = 30$ 处发生的次数

Fig. 4 Different scales ejection and sweep events at the position of $y^+ = 30$

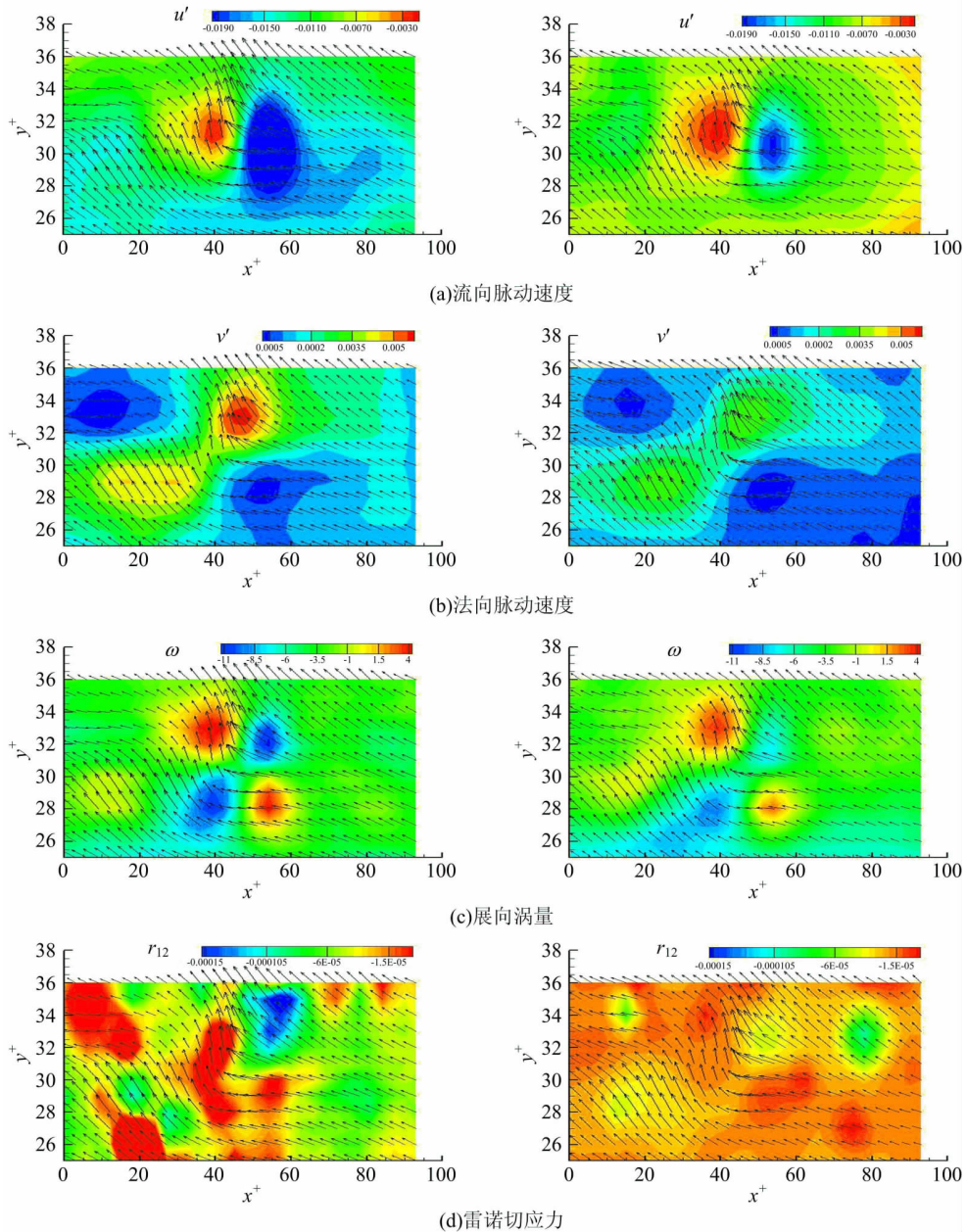


图5 相干结构在喷射阶段的物理量分布云图(左:纯水;右:高分子溶液)

Fig. 5 Contours of physical quantity during ejecting process of the coherent structure (left; water; right; polymer solution)

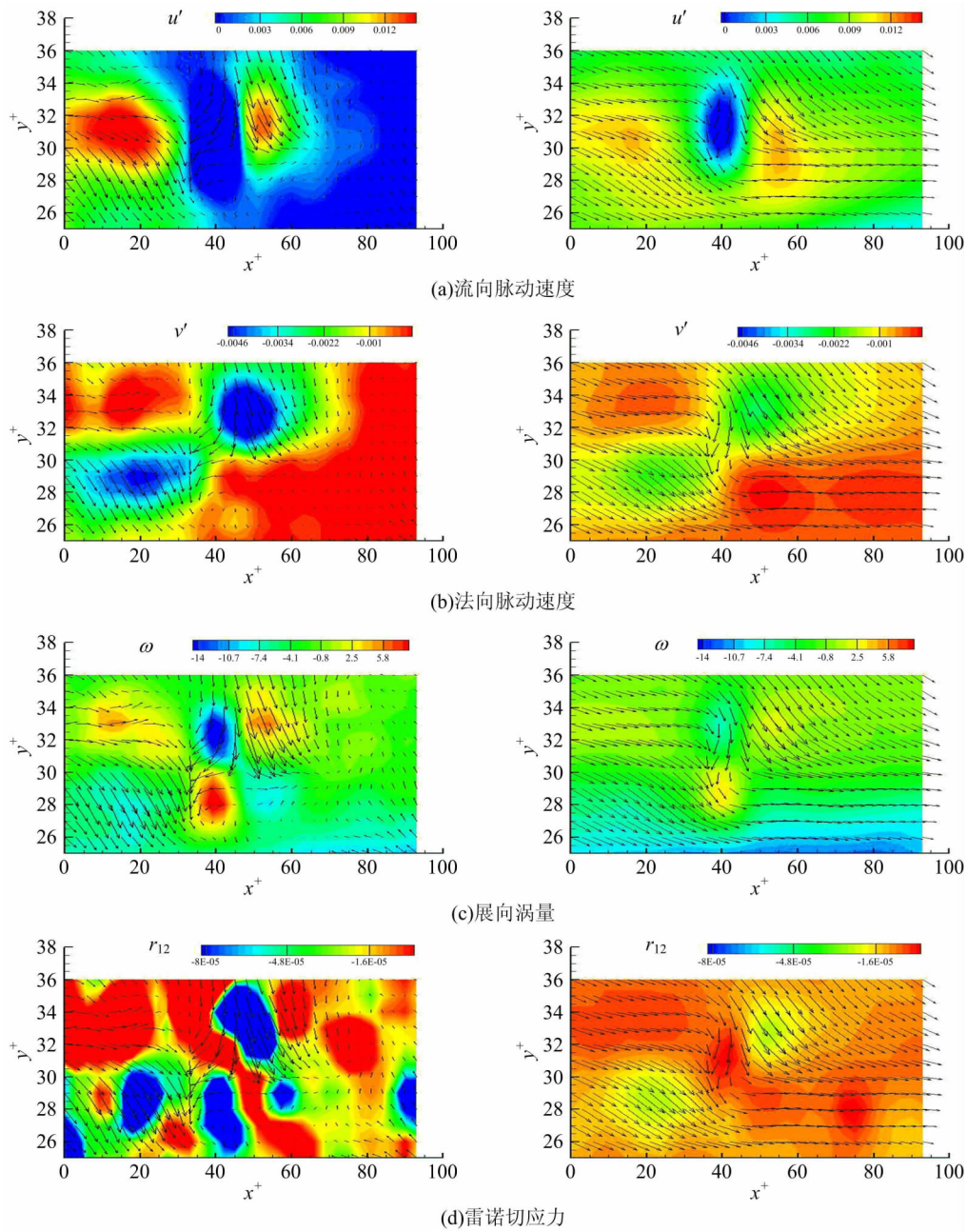


图 6 相干结构在扫掠阶段的物理量分布云图(左:纯水;右:高分子溶液)
 Fig. 6 Contours of physical quantity during sweeping process of the coherent structure
 (left; water; right; polymer solution)

分子溶液的壁湍流相干结构在喷射阶段的二维平均拓扑形态与水的相似,即流向脉动速度沿流向具有准周期性,高速流体和低速流体循环交替分布;法向脉动速度和展向涡量在流向和法向皆具有准周期性。相干结构表现出很强的拟序特性。

由检测公式(2)知道,壁湍流相干结构在喷射阶段的流向脉动速度为负值($u(x,y) < 0$),对比高分子溶液和纯水相干结构的流向脉动速度,图 5(a)中可明显看到高分子溶液流向脉动速度的幅值比纯水流向脉动速度的幅值减小,且高分子溶液流动的速度梯度减小,使流体猝发的机率减小。壁湍流相干结构在喷射阶段流动结构抬升远离壁面,法向脉动速度 $v(x,y) > 0$;对比高分子溶液和纯水的湍流相干结构喷射事件的法向脉动速度分布(如图 5(b)所示),高分子溶液的法向脉动速度受到抑制,其幅值远小于纯水的法向脉动速度。由图 5(c)可以明显看出,高分子溶液的壁湍流相干结构展向涡量的强度明显

小于纯水的展向涡量的强度。以壁湍流相干结构展向涡量的极大值点定量分析,高分子溶液相干结构展向涡量的极大值比纯水相应物理量的极大值下降 25%,所以高分子溶液的涡旋运动减弱。比较湍流相干结构雷诺切应力(τ_{12})的二维平均拓扑形态(如图 5(d)所示),高分子溶液的雷诺应力明显减小,这就会导致湍流输运减弱,以此达到溶液阻力减小的目的。

2.4.2 扫掠事件

高分子溶液和纯水的壁湍流相干结构,在扫掠阶段的物理量的二维平均拓扑形态如图 6 所示。由图中可以看出,本文很好地检测到壁湍流相干结构的扫掠事件,即高速流体在上游,低速流体在下游,高速流体向下扫掠迫使下游流体加速。与喷射阶段壁湍流相干结构相似,高分子溶液没有改变湍流相干结构在扫掠阶段的二维平均拓扑形态,表现出很强的拟序特性,高速流体和低速流体交替分布。

图 6(a)对比了高分子溶液和纯水壁湍流相干结构在扫掠阶段的流向脉动速度,由检测公式(2)可知,扫掠阶段流向脉动速度为正值($u(x,y) > 0$),高分子溶液壁湍流相干结构的流向脉动速度相比于纯水的流向脉动速度而言明显减小。与纯水相比,高分子溶液上游下扫的高速流体与周围流体之间速度梯度减小,近壁区动量输运能力减弱。对比高分子溶液和纯水的壁湍流相干结构的法向脉动速度分布(如图 6(b)所示),在近壁区时,加入高分子聚合物对溶液法向脉动速的影响与喷射时的影响相同,即与纯水的法向脉动速度相比,相同位置处高分子溶液的法向脉动速度减小,湍流输运的能力减弱。对比高分子溶液和纯水壁湍流拟序结构展向涡量的二维拓扑形态(如图 6(c)所示),高分子溶液的相干结构展向涡量的强度均明显小于纯水的展向涡量强度。以壁湍流相干结构展向涡量的极大值点定量分析发现,高分子溶液展向涡量的极大值比纯水相应物理量极值下降 70%。因此,高分子溶液减弱湍流相干结构的展向涡量强度,且在溶液壁湍流相干结构的扫掠阶段发挥的作用更大。对比雷诺切应力的二维平均拓扑形态(图 6(d))明显可以看出,高分子溶液在相干结构扫掠阶段的雷诺应力与喷射阶段相同,强度明显减小,结合图 4 分析可知,高分子聚合物的加入抑制壁湍流相干结构的强度,进而抑制低速条带的形成,降低湍流猝发频率,削弱近壁区湍流动量和能量的输运能力,从而揭示高分子溶液减阻的重要内在机制。

3 结论

本文利用 TRPIV 技术测量了高分子溶液和纯水在平均自由来流速度为 0.145m/s 时的壁湍流速度矢量场,首先统计分析加入高分子聚合物后对脉动速度均方根和雷诺应力等湍流统计量的影响,然后利用象限分裂法、条件相位平均技术分别提取了高分子溶液和纯水在相干结构喷射和扫掠阶段的脉动速度、展向涡量、雷诺应力等物理量的二维平均拓扑形态,分析高分子溶液的壁湍流相干结构猝发事件,从壁湍流相干结构猝发的角度分析高分子溶液的减阻机理。

(1) 在相同的来流速度 0.145m/s 时,高分子溶液的壁面摩擦阻力减小 21.77%。加入高分子聚合物后,溶液的壁湍流过渡层增厚,对数律上移,且对数律斜率与水保持一致。

(2) 在相同的法向位置 y^+ 处,高分子溶液的统计物理量(如脉动速度均方根、雷诺应力)均比纯水相应物理量小,说明高分子聚合物的加入使得溶液平板湍流边界层中流体的脉动减弱,湍流动量和能量的输运能力减弱。

(3) 高分子溶液和纯水一样,在近壁区存在湍流相干结构的猝发,其壁湍流相干结构喷射和扫掠事件的二维平均拓扑形态与纯水相似,喷射是流动结构的抬升远离壁面,扫掠是高速流体从外区冲向壁面。对比高分子溶液和纯水壁湍流相干结构的脉动速度、展向涡量、雷诺应力等物理量的二维平均拓扑形态,发现高分子溶液壁湍流相干结构的相应物理量的强度减小。高分子溶液减小了湍流猝发频率,削弱了近壁区湍流动量和能量的输运强度,从而揭示出壁湍流高分子溶液的减阻机理。

参考文献:

- [1] 罗兴, 刘靖, 张子平. 减阻技术在集中供热与空调水输配系统中的应用[J]. 节能, 2004, 12: 14—15 (LUO Xing, LIU Jing, ZHANG Ziping. A type of heat pipe vaporizer for remnant liquid of being developed[J]. Energy Conservation, 2004, 12: 14—15 (in Chinese))
- [2] 朱蒙生, 蔡伟华, 曹慧哲等. 添加剂黏性减阻在暖通空调系统中的应用[J]. 煤气与热力, 2008, 28: 24—26 (ZHU Mengsheng, CAI Weihua, CAO Huizhe, et al. Application of viscous drag reduction by additives in heating ventilation and air-conditioning system[J]. GAS & HEAT, 2008, 28: 24—26 (in Chinese))
- [3] Toms B A. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers[C]. Amsterdam: Proceeding of First International Congress on Rheology, 1948: 135—138.
- [4] Virk P S. Drag reduction fundamentals[J]. AIChE Journal, 1975, 21: 625—656.
- [5] Lumley J L. Drag reduction in turbulent flow by polymer additives[J]. J. Polymer Sci. Macromol. Rev., 1973, 7: 263—290.
- [6] Degennes P G. Introduction to Polymer Dynamics[M]. UK: Cambridge University Press, 1990.
- [7] Joseph D D. Fluid Dynamics of Viscoelastic Liquids[M]. USA: Springer, 1990.
- [8] Rabin Y, Zilinska B J A. Scale-development enhancement and damping of vorticity disturbance by polymers in elongational flow[J]. Phy. Rev. Lett, 1989, 63: 512—518.
- [9] Den Toonder J M J, Hulsken M A, Kuiken G D C, et al. Drag reduction by polymer additives in a turbulent pipe flow; numerical and laboratory experiments[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 337: 193—231.
- [10] McComb W D, Rabie L H. Laser-Doppler measurements of turbulent structure[J]. AIChE Journal, 1982, 28: 558—565.
- [11] Donohue G L, Tiederman W G, Reischman M M. Flow visualization of the near-wall region in a drag-reducing channel flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972, 56: 559—575.
- [12] Kim K, Li C, Sureshkumar R, Balachandar S, Adrian R J. Effects of polymer stresses on eddy structures in drag-reduced turbulent channel flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, 584: 281—299.
- [13] 田军, 徐锦芬, 薛群基. 粘性减阻技术及其应用[J]. 实验力学, 1997, 12(2): 198—203 (TIAN Jun, XU Jinfang, XUE Queji. The technique of viscosity drag reduction and its application[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1997, 12(2): 198—203 (in Chinese))
- [14] 樊星, 姜楠. 用平均速度剖面法测量壁湍流摩擦阻力[J]. 力学与实践, 2005, 27: 28—29 (FAN Xing, JIANG Nan. Skin friction measurement in turbulent boundary layer by mean velocity profile method[J]. Mechanics in Engineering, 2005, 27: 28—29 (in Chinese))
- [15] Harder K J, Tiederman W G. Drag reduction and turbulent structure in two-dimensional channel flows[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society, 1991, 336(A): 19—34.
- [16] Masaaki M, Shota I, Kaoru I, et al. Experimental investigation on turbulent structure of drag reducing channel flow with blowing polymer solution from the wall[J]. Flow Turbulence Combust, 2012, 88: 121—141.
- [17] 邵雪明, 林建忠, 余钊圣. 添加聚合物对混合层流场特性影响的实验研究[J]. 实验力学, 1998, 13(4): 520—525 (SHAO Xueming, LIN Jianzhong, YU Zhaosheng. Experimental research for the influence of polymer additives on the characteristics of mixing layer flow[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1998, 13(4): 520—525 (in Chinese))
- [18] Jia Yongxia, Tang Zhanqi, Jiang Nan. Experimental investigation of Reynolds stress complex eddy viscosity model for coherent structure dynamics[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2011, 54(7): 1319—1327.
- [19] Yang Shaoqiong, Jiang Nan. Tomographic TR-PIV measurement of coherent structure spatial topology utilizing an improved quadrant splitting method[J]. Sci China-Phy Mech Astron, 2012, 55: 1863—1872.
- [20] 姜楠, 管新蕾, 于培宁. 雷诺应力各向异性涡黏模型的层析 TRPIV 测量[J]. 力学学报, 2012, 44(2): 213—221 (Jiang Nan, Guan Xinlei, Yu Peining. Tomographic TRPIV measurement of anisotropic eddy-viscosity model for coherent structure Reynolds stress[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012, 44(2): 213—221 (in Chinese))

TRPIV Experimental Investigation on Drag-Reduction Mechanism of Polymer Solution Wall Turbulence

JIANG Ying-ying^{1,2}, GUAN Xin-lei^{1,2}, JIANG Nan^{1,2,3,4}

(1. Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 30072, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin 300072, China; 3. The State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100090, China; 4. Nankai University Tianjin University Center for Liu Hui Applied Mathematics, Tianjin 300072, China)

Abstract: Experimental study of drag reduction mechanism of low concentration polymer solution wall turbulence in a regurgitant water channel was carried out by using time-resolution particle image velocimetry (TRPIV). Through comparative analysis of the average velocity profile, the turbulence intensity and Reynolds stress for flat plate turbulent boundary layer flow of both polymer solution and pure water at the same incident flow velocity, it is found that the skin friction of polymer solution is decreased 21.77%, its buffer layer is thickened and relocated by logarithmic law, its Reynolds stress is decreased in polymer solution, respectively. PAM polymers restrain the turbulence fluctuation mostly in near-wall region, in the main stream region, its role is not significant. By using local average multi-scale flow velocity structure function along flow direction and coherent structures conditional sampling method, the two-dimensional topologies of the fluctuating velocity, the spanwise velocity, Reynolds stress and other physical quantities in wall turbulence burst coherent structure “jet” and “sweep” events for both polymer solution and water were detected and compared. Results show that the fluctuating velocity in near-wall region coherent structure decreases, the vorticity is suppressed, and Reynolds stress decreases obviously, which indicate that the turbulence intensity of “jet” and “sweep” in polymer solution near-wall region decreases, burst frequency reduces, momentum and energy transport weakens. Above results reveal the important drag reduction mechanism of polymer solution.

Keywords: polymer solution; drag-reduction; Time-Resolution Particle Image Velocimetry (TRPIV); wall turbulence; coherent structure