

超疏水壁面湍流边界层减阻机理的 TRPIV实验

王二丹¹, 田海平¹, 张静娴³, 姚朝辉³, 姜楠^{1,2}

- (1. 天津大学 机械工程学院 力学系, 天津 300072;
2. 天津大学 天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300072;
3. 清华大学 航天航空学院 工程力学系, 北京 100084)

摘 要: 利用高时间分辨率粒子图像测速(TRPIV)技术,开展超疏水壁面材料湍流边界层减阻机理的实验研究.在循环水槽中,对超疏水壁面和亲水壁面湍流边界层瞬时速度矢量场的时间序列进行了实验测量.得到了同一流速度(0.17 m/s)下超疏水壁面和亲水壁面湍流边界层的平均速度、湍流度及雷诺切应力沿法向的分布规律.提出了空间多尺度局部平均涡量的概念,并以此为特征量检测壁湍流发卡涡展向涡头的中心位置.用条件采样及空间相位平均技术提取了不同法向位置发卡涡展向涡头周围流向脉动速度和流线的空间拓扑,对发卡涡展向涡头的俯仰角进行了对比,并从鞍点-焦点动力系统的角度分析了发卡涡展向涡头附近的流线拓扑特征.研究表明:雷诺数约为13500时,相比亲水壁面,超疏水壁面实现了10.1%的减阻.超疏水壁面平均速度明显增大,雷诺切应力减小,流向湍流度减弱,发卡涡展向涡头俯仰角较小,近壁区相干结构的发展受到抑制.

关 键 词: 湍流减阻; 超疏水壁面; 湍流边界层; 高时间分辨率粒子图像测速 (TRPIV); 鞍点-焦点动力系统; 空间多尺度局部平均涡量

中图分类号: V231; O357.5

文献标志码: A

TRPIV experimental investigation of drag-reduction mechanism in turbulent boundary layer over superhydrophobic surfaces

WANG Er-dan¹, TIAN Hai-ping¹, ZHANG Jing-xian³,
YAO Zhao-hui³, JIANG Nan^{1,2}

- (1. Department of Mechanics, School of Mechanical Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics,
Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. Department of Engineering Mechanics, School of Aerospace Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Drag-reduction in turbulent boundary layer (TBL) over superhydrophobic surfaces was investigated by the time-resolved particle image velocimetry (TRPIV). Time series of velocity vector fields in TBL over superhydrophobic surfaces and hydrophilic surfaces were measured in a cyclical water channel. The distributions of mean velocity profile, Reynolds shear stress and turbulence intensity along wall-normal direction were acquired at the same free-stream velocity (0.17 m/s). The center of the head of hairpin vortex in wall

收稿日期:2015-03-28

基金项目:国家自然科学基金(11272233,11332006,11411130150);国家重点基础研究发展计划(2012CB720101,2012CB720103)

作者简介:王二丹(1991-),女,山西晋城人,硕士生,主要研究超疏水表面湍流减阻方向.

turbulence was detected with the multi-scale spatial locally-averaged vorticity. Conditional sampling and phase average methods were utilized to extract the spatial topologies of spanwise vortices at different normal positions. Streamwise fluctuation velocity and the pitching angle of spanwise vortex in both cases were compared. The features of streamline topologies around spanwise vortex were analyzed from the saddle-focus dynamical system. Results revealed that a drag reduction of 10.1% is acquired if Reynolds numbers are about 13500. For superhydrophobic surfaces, the average velocity seems to be increased, Reynolds shear stress is decreased, streamwise turbulence intensity is weakened, the pitching angle of spanwise vortex is smaller, and the development of coherent structure near wall region is suppressed.

Key words: turbulent drag-reduction; superhydrophobic surfaces;
turbulent boundary layer (TBL);
time-resolved particle image velocimetry (TRPIV);
saddle-focus dynamical system;
multi-scale spatial locally-averaged vorticity

超疏水表面,一般是由疏水性化学物和微纳结构组成的表面,其上液滴的静态接触角大于 150° ,滚动角小于 10° ,具有疏水和自清洁的特性^[1].近 10 年来,超疏水表面因其疏水性而具有的减阻性质,引起了科研工作者的极大热情.疏水材料常被用于微槽道、微管道、水中运输工具及水下潜艇^[2]的表面,以实现减小阻力、提高航速、节约能源、增加续航能力等目的.

相比层流,湍流边界层的壁面摩擦阻力更大^[3],而在很多运输工具的表面大部分区域,流动是湍流状态^[4].因此,研究超疏水表面在湍流减阻上的应用具有重要意义.

在湍流减阻方面,国内卢思等^[5]在微槽道超疏水湍流减阻的实验中得到了 53.3% 的最大减阻率.国外 Gogte 等^[6]对水翼船表面包裹了超疏水改性砂纸,在水洞实验中取得了 10% 以上的减阻率. Daniello 等^[7]在具有顺流向微结构超疏水表面的槽道中进行湍流减阻压降实验,取得了最大 50% 的减阻率,并指出黏性底层厚度与超疏水微结构的尺度量级相当时,才会出现减阻效果. Henoch 等^[8]设计出纳米结构的超疏水表面,研究表明减阻效果随来流速度变化而变化,当速度超过一定限度,反而增阻.而 Min, Fukagata 等^[9-10]对超疏水表面湍流减阻的直接数值模拟结果表明:超疏水表面产生的流向滑移有益于减阻、展向滑移不利于减阻,而超疏水表面的减阻特性是流向滑移和展向滑移共同决定的.

在超疏水表面制备和微纳结构优化方面,人们逐渐认识到疏水表面和超疏水表面的区别主要是表面的微观结构而不是表面的化学物质. Bhar-

at 等^[11]认为拥有微纳二级结构的疏水表面,阻止液滴浸润表面的性能更优越,拥有更大的接触角,更小的滚动角.而且与单一尺度结构表面相比,多重疏水结构表面不仅具有更优异的疏水性能,更使得液体与表面的接触由 Cassie-Baxter 模型^[12]到 Wenzel 模型^[13]的转换更为困难,这有益于微纳多重结构在复杂湍流系统中维持疏水特性.

前人对超疏水表面减阻的研究多是通过测力、压降、数值模拟等方法,实验对象也多是微槽道、圆管或包覆超疏水表面的模型,对宏观尺度的湍流减阻机理的研究还很少.本文把具有微纳二重结构超疏水表面的平板用作实验壁面(为简化,后文将该实验壁面称作“超疏水壁面”),利用高时间分辨率粒子图像测速技术,研究超疏水壁面附近湍流场的统计特性以及发卡涡周围流场的拓扑特性,从大尺度湍流相干结构被动控制的角度研究超疏水壁面的湍流减阻机理.

1 实验模型及装置

本实验在低速循环式水槽中进行,实验装置如图 1 所示.水槽试验段长为 530 cm,宽为 25 cm,深为 38 cm.大平板长度为 240 cm,宽为 38 cm,厚为 1.5 cm,前缘按 8:1 半椭圆修形,与水槽底面垂直放置并固定.为获得充分发展的湍流边界层,在距平板前缘 8 cm 位置加拌线.在实验中,采用两块可替换小平板,分别为亲水壁面和超疏水壁面,尺寸均为 28 cm × 28 cm × 1.5 cm (长 × 宽 × 厚),可以镶嵌到距离大平板前缘 190 cm 的方框中.实验中用到的微纳二重结构的超疏水壁面静态接触角为 161° ,滚动角度为 0.9° ,由清华大学

姚朝晖课题组^[14]提供. 亲水壁面为普通有机玻璃平板, 具有亲水性表面, 用于对比研究.

通过设置水泵工作参数, 设定水槽的自由来流速度为 0.17 m/s. 高速相机采样频率为 500 Hz, 脉冲时间间隔为 2 000 μ s, 单帧曝光时间为 1 500 μ s. 相机内存为 4 GB, 每组记录图像设定为 6 547 张, 相机分辨率为 1 280 pixel $\times$ 1 024 pixel, 图像视野实际大小 56.6 mm $\times$ 45.1 mm (流向 $\times$ 法向). 利用 DANTEC 商业软件对原始图像处理, 采用互相关算法, 查询窗口为 32 pixel $\times$ 32 pixel, 重叠率为 75%, 瞬时二维速度矢量场具有 157 $\times$ 125 (流向 $\times$ 法向) 个速度矢量, 流向及法向上相邻矢量之间的空间间隔均为 0.36 mm.

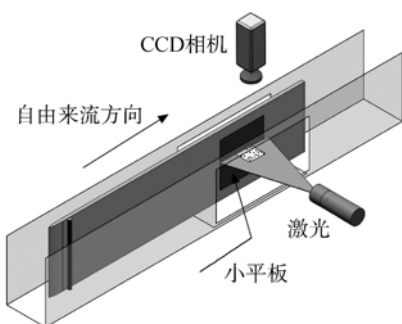


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental facility

2 湍流统计量分析

2.1 平均速度分布

本实验水槽设定的来流速度为 0.17 m/s, 测量了亲水壁面和超疏水壁面上湍流边界层的瞬时速度矢量场. 图2为内尺度无量纲化的平均速度沿法向的分布剖面. 平均速度的对数律表达式为 $u^+ = A \ln y^+ + B$, 横轴 $y^+ = y u_\tau / \nu$, 纵轴 $u^+ = u / u_\tau$, u_τ 和 ν 分别为对应壁面摩擦速度和流体运动黏度.

由图2可以看出, 与亲水壁面相比, 超疏水壁面平均速度剖面的黏性壁层 (包括黏性底层和缓冲层) 增厚, 对数律层外移. 同一法向位置处, 超疏水壁面的无量纲化平均速度明显大于亲水壁面的无量纲化平均速度, 说明超疏水壁面呈现明显的减阻特征.

表1列出了水槽来流速度 $u=0.17$ m/s 时超疏水壁面及亲水壁面湍流边界层的实验参数, 其中雷诺数 Re_δ 采用湍流边界层厚度计算, 减阻率由壁面摩擦阻力系数计算 $\eta = (1 - C_{fs}/C_{fh}) \times$

100%. 从表中可以看出超疏水壁面的壁面摩擦速度 u_τ , 壁面摩擦阻力 τ_w 以及摩擦阻力系数 C_f 均小于亲水壁面的相应参数 (下标 s, h 分别指代超疏水壁面和亲水壁面).

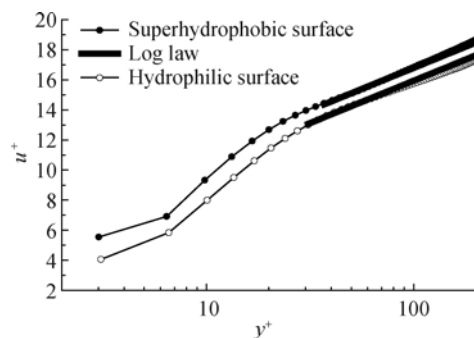


图2 平均速度分布剖面

Fig. 2 Distribution of mean velocity

表1 来流速度为 0.17 m/s 工况湍流边界层的减阻参数

Table 1 Drag reduction parameters of the TBL at the free-stream velocity 0.17 m/s

参数	超疏水壁面	亲水壁面
$u/(m/s)$	0.175	0.170
Re_δ	13 888	13 027
$u_\tau/(m/s)$	0.008 039	0.008 236
$\tau_w/(kg \cdot (m/s^2))$	0.064 387	0.067 579
C_f	0.004 215	0.004 690
$\eta/\%$	10.1	

2.2 湍流度及雷诺切应力

图3为两种壁面边界层湍流度流向和法向分量的分布. 湍流度是一个代表湍性强弱的量. 在本文中, 湍流度流向和法向的分量用 $\sqrt{u'^2}/\bar{u}$ 和 $\sqrt{v'^2}/\bar{u}$ 表示, 其中 $\bar{u}$ 为当地平均速度. 在内区同一法向位置处, 超疏水壁面流向湍流度小于亲水壁面, 而在外区, 两者逐渐趋于一致; 超疏水壁面法向湍流度整体上小于亲水壁面, 但在 $y^+=20 \sim 60$ 之间超疏水壁面的反而略大, 这与 Min 和 Kim^[9] 的结果一致; 超疏水壁面展向滑移导致壁面附近准流向涡转动加强, 使得法向脉动有所增加. 可见, 相比亲水壁面, 超疏水壁面总体上降低了湍流强度.

图4为雷诺切应力 $-\overline{u'v'}/\bar{u}^2$ 沿壁面法向的分布. 从图中可以明显看出, 同一法向位置处, 超疏水壁面的雷诺切应力小于对应亲水壁面, 并且超疏水壁面的雷诺切应力峰值更加远离壁

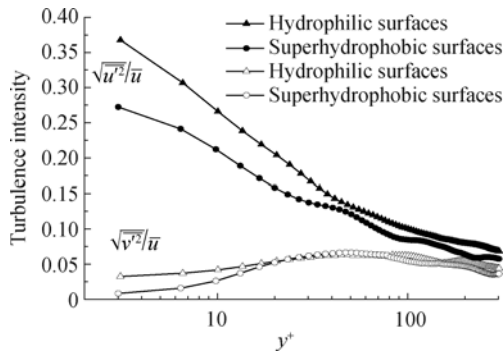


图 3 湍流度流、法向分量分布曲线

Fig. 3 Distributions of the streamwise and normal turbulence intensity

面,这也从另一个角度说明超疏水壁面使得黏性壁层(包括黏性底层和缓冲层)增厚,湍流强度减弱。

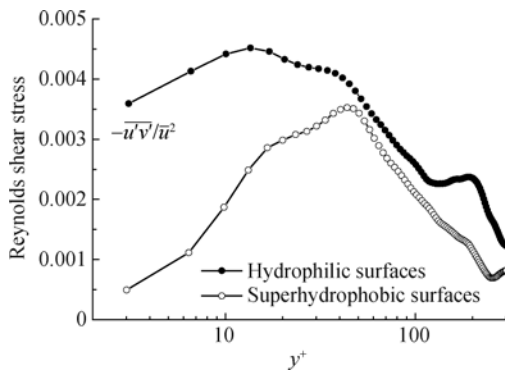


图 4 雷诺切应力分布曲线

Fig. 4 Distribution of the Reynolds shear stress

3 湍流边界层不同法向位置发卡涡展向涡头结构的检测特征

本文基于多尺度空间局部平均速度结构函数^[15],提出空间多尺度局部平均涡量的概念,分别对超疏水壁面以及亲水壁面瞬时速度矢量场进行沿空间流向和法向的多尺度局部平均应变分析,然后计算流向、法向尺度下的湍流局部平均旋转.使用条件采样方法检测所有时刻瞬时速度场每一层壁湍流发卡涡展向涡头的中心,并用空间相位平均技术^[16]提取两种壁面的发卡涡展向涡头附近的流向脉动速度和流线的空间拓扑.通过对比近壁区流向脉动速度、发卡涡展向涡头的俯仰角大小来探究超疏水壁面的湍流减阻机理.文中主要针对统计特征进行讨论,是对所有时刻瞬时速度场以检测事件为中心进行叠加平均的结果。

本文所采用的分层指的是沿法向的分层,每一个法向位置为一层,亲水壁面和超疏水壁面实验数据两个相邻法向位置的间距分别为 3.4 和 3.3 个黏性尺度单位。

流向脉动速度沿法向的局部平均速度结构函数定义如下:

$$\delta u_y(x_0, y_0, l_y) = \overline{u(x_0, y)}_{y \in [y_0, y_0 + l_y]} - \overline{u(x_0, y)}_{y \in [y_0 - l_y, y_0]} \quad (1)$$

式中 $\overline{u(x_0, y)}_{y \in [y_0, y_0 + l_y]}$ 为流向脉动速度 u 在法向范围 $[y_0, y_0 + l_y]$ 内的局部平均值,表示中心在 $(x_0, y_0 + l_y/2)$ 处法向尺度为 l_y 的湍流的流向平均迁移速度. $\overline{u(x_0, y)}_{y \in [y_0 - l_y, y_0]}$ 为流向脉动速度 u 在法向范围 $[y_0 - l_y, y_0]$ 内的局部平均值,表示中心在 $(x_0, y_0 - l_y/2)$ 处,法向尺度为 l_y 的湍流的流向平均迁移速度. $\delta u_y(x_0, y_0, l_y)$ 为不同法向位置相邻的湍流由于流向迁移速度的差异而引起的湍流剪切变形和旋转.本文选取湍流法向尺度 l_y 为 8 倍法向网格尺寸,对应于 27.2(亲水壁面)或 26.4(超疏水壁面)倍黏性尺度。

法向脉动速度沿流向的局部平均速度结构函数定义如下:

$$\delta v_x(x_0, y_0, l_x) = \overline{v(x, y_0)}_{x \in [x_0, x_0 + l_x]} - \overline{v(x, y_0)}_{x \in [x_0 - l_x, x_0]} \quad (2)$$

式中 $\overline{v(x, y_0)}_{x \in [x_0, x_0 + l_x]}$ 为法向脉动速度 v 在流向范围 $[x_0, x_0 + l_x]$ 内的局部平均值,表示中心在 $(x_0 + l_x/2, y_0)$ 处,流向尺度为 l_x 的湍流的法向平均迁移速度. $\overline{v(x, y_0)}_{x \in [x_0 - l_x, x_0]}$ 为法向脉动速度 v 在流向范围 $[x_0 - l_x, x_0]$ 内的局部平均值,表示中心在 $(x_0 - l_x/2, y_0)$ 处,流向尺度为 l_x 的湍流的法向平均迁移速度. $\delta v_x(x_0, y_0, l_x)$ 表示不同流向位置相邻的湍流由于法向迁移速度的差异而引起的湍流剪切变形和旋转.本文选取湍流流向尺度 l_x 为 16 倍流向网格尺寸,对应于 54.4(亲水壁面)或 52.8(超疏水壁面)倍黏性尺度。

流场中一点的涡量用该点的旋度来定义,展向涡量 $\omega = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$. 本文考虑了湍流尺度 l_x, l_y 的大小,作了如下定义:

$$\overline{\omega(x_0, y_0; l_x, l_y)} = \delta v_x(x_0, y_0, l_x) - \delta u_y(x_0, y_0, l_y) \quad (3)$$

式中 $\overline{\omega(x_0, y_0; l_x, l_y)}$ 为在 (x_0, y_0) 位置流向尺度 l_x , 法向尺度 l_y 的湍流的局部平均旋转. 与流场旋度 $\omega = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$ 相比, $\overline{\omega(x_0, y_0; l_x, l_y)}$ 为

$\partial v / \partial x$ 在 l_x 范围内的局部平均减去 $\partial u / \partial y$ 在 l_y 范围内的局部平均, 突出了涡流的流向法向不同尺度特征和涡流的整体旋转(不是空间单点旋转)特征, 更加符合涡流的概念。

在近壁区湍流边界层中, 普遍存在着发卡涡展向涡头, 本文检测了流场中发卡涡展向涡头的中心, 也就是 $\overline{\omega(x_0, y_0; l_x, l_y)}$ 负的极值点。

因此, 检测函数定义为

$$D(x, y) = \begin{cases} \overline{\omega(x, y)} < 0 \\ 1, \begin{cases} \overline{\omega(x-1, y)} > \overline{\omega(x, y)} \& \overline{\omega(x+1, y)} > \overline{\omega(x, y)} \\ \overline{\omega(x, y-1)} > \overline{\omega(x, y)} \& \overline{\omega(x, y+1)} > \overline{\omega(x, y)} \end{cases} \\ 0, \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

一旦发卡涡展向涡头的中心位置被检测到, 各物理量在一定尺度范围内的空间相位平均拓扑计算公式如下:

$$f(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f[x^*(k) + x, y], \\ x \in \left[-\frac{L_x}{2}, \frac{L_x}{2}\right], y \in [y_0, L_y - y_0], \quad (5)$$

当 $D[x^*(k), y^*(k)] = 1$

式中 $[x^*(k), y^*(k)]$ 为第 k 次检测到展向涡头中心的空间位置。 y_0 为检测的第 1 层的法向位置, 对应超疏水壁面 $y_0^+ = 6.3$, 亲水壁面 $y_0^+ = 6.5$ 。 L_x, L_y 分别为拓扑结构空间的流向、法向尺度, 分别取 64 和 32 倍法向网格尺寸, 相当于 217.6 和 108.8(亲水壁面)、211.2 和 105.6(超疏水壁面) 倍黏性尺度。 N 为检测出的涡的个数。

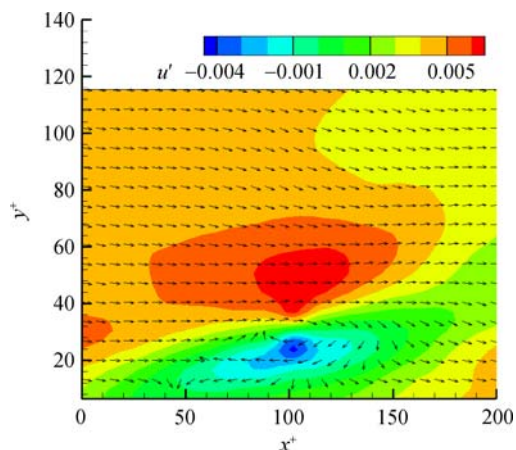
3.1 流向脉动强度

近壁区的流向速度场为许多高速-低速流体相互交替所构成的区域, 低速流体间歇地、局部地和猛烈地向外向上喷射, 而上方的高速流体则间歇地和迅速地向下扫掠, 这一过程称为湍流猝发, 猝发过程对雷诺应力有着很大的贡献。 本文选取了 3 个不同位置处的检测结果来进行对比分析。

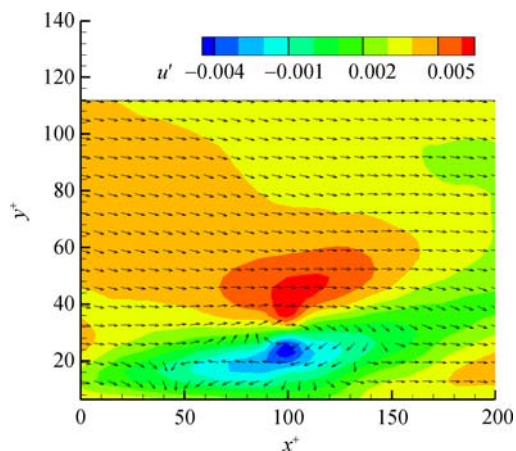
图 5 为亲水壁面与超疏水壁面上发卡涡展向涡头周围流向脉动速度空间平均拓扑分布。 云图的横纵坐标均已无量纲化, 且纵坐标与法向位置对应一致, 并标出了发卡涡展向涡头中心的法向位置。 云图很好地展现了展向涡周围流场的分布特征: 在每一层的检测中心都存在一个展向涡, 展向涡的下方分布着低速流体 ($u' < 0$, 冷色区域), 上方分布着高速流体 ($u' > 0$, 暖色区域)。 低速流

体远离壁面, 向外向上喷射, 而上方的高速流体则向下扫掠, 可以看出发卡涡展向涡头周围出现很明显的猝发现象。

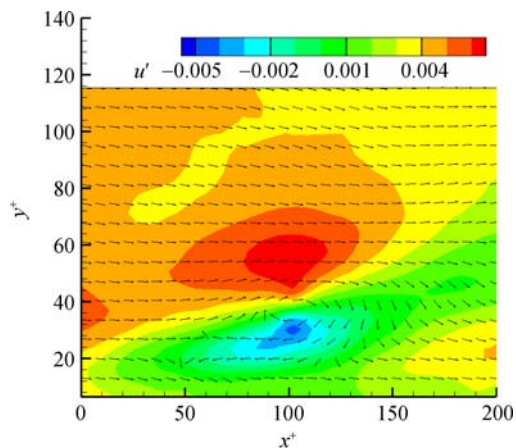
云图也对比了同一层亲水壁面与超疏水壁面的流向脉动速度大小, 发现每一层超疏水壁面的流向脉动速度均小于对应亲水壁面, 这与图 4 中流向湍流度分布相吻合, 这说明超疏水壁面的湍流猝发强度小于亲水壁面。



(a) $y^+ = 30.0$, 亲水壁面



(b) $y^+ = 29.4$, 超疏水壁面



(c) $y^+ = 37.1$, 亲水壁面

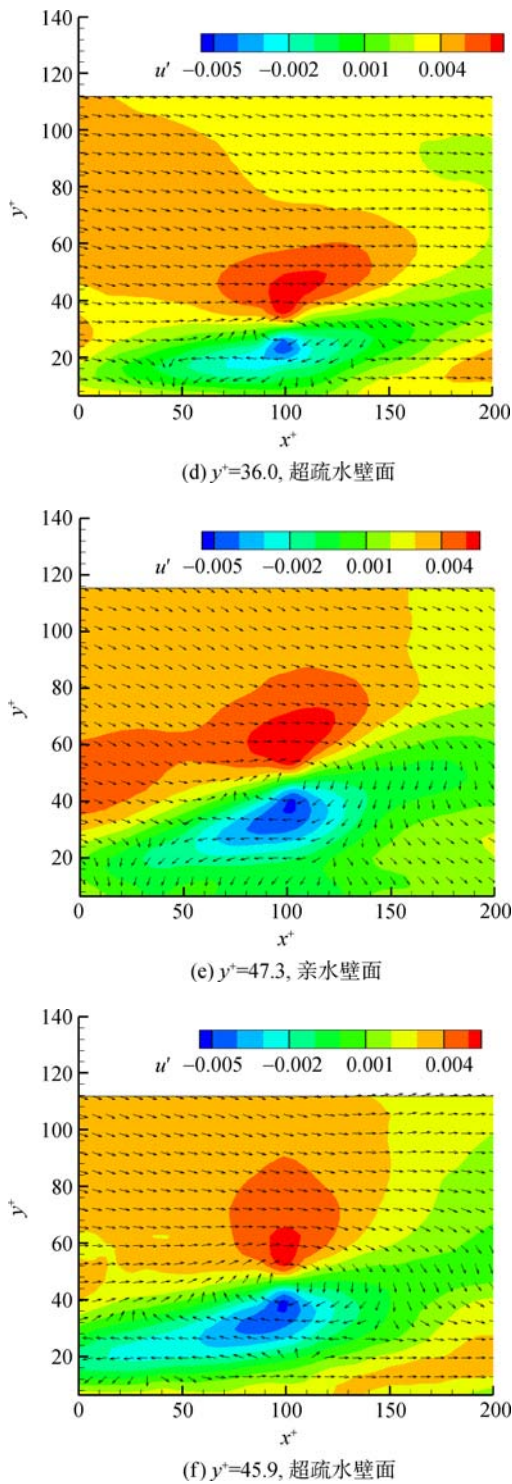


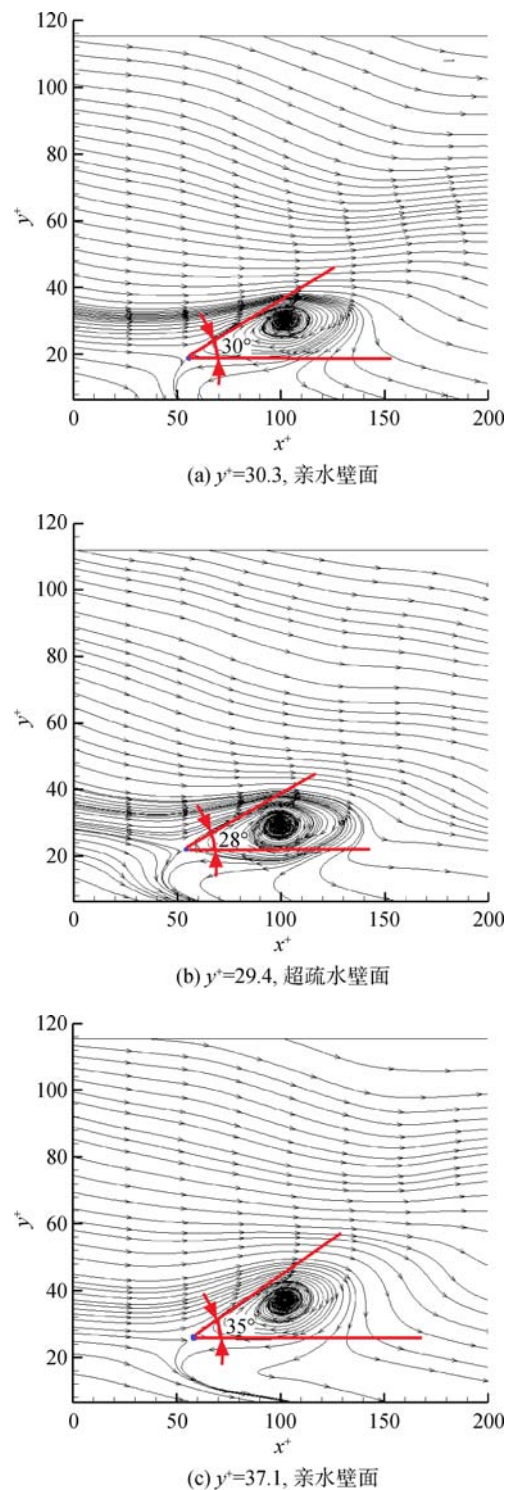
图 5 不同检测中心法向位置展向涡周围流向脉动速度分布云图

Fig. 5 Contours of the streamwise fluctuating velocity around spanwise vortex at different normal positions of testing center

3.2 发卡涡展向涡头俯仰角对比

展向涡表示发卡涡在 x - y 平面切出的一个展向的涡头结构,它包含有几个特征:低速流体区域,滞止点,倾斜的剪切层^[17].

图 6 为不同层亲水壁面与超疏水壁面发卡涡展向涡头周围流线空间平均拓扑分布. 流线图的纵横坐标均已无量纲化,且纵坐标与法向位置对应一致,并标出了发卡涡展向涡头中心的法向位置. 从流线图也可以看出来展向涡头下方存在着 Q2 事件($u' < 0, v' > 0$),而上方则存在着与 Q2 相对的 Q4 事件($u' > 0, v' < 0$),并形成了滞止点(蓝色圆点)以及倾斜的剪切层(倾斜的红线). 从鞍



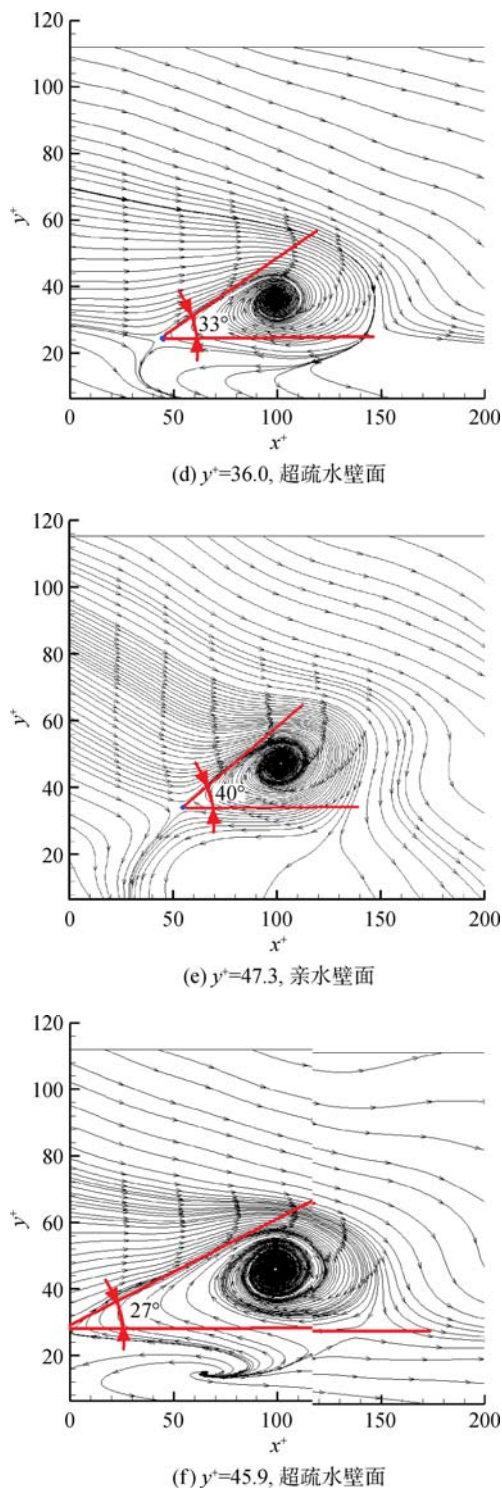


图6 流法向平面不同检测中心法向位置展向涡周围流线分布图

Fig. 6 Distributions of streamline around spanwise vortex at different normal positions of testing center in x - y plane

点-焦点动力系统来看,速度滞止点在流线场中呈现鞍点结构,鞍点在展向涡头上游剪切层上,是Q2事件到Q4事件转变的中心,鞍点处流法向速度分量均为零,鞍点前后流法向速度分量均改变

符号,而涡核表现为不稳定焦点,流线从焦点不断向外旋转.这里,用过鞍点的剪切线与水平方向的夹角(红色角度)表示发卡涡展向涡头的俯仰角.

图6(a)~图6(c)纵向对比了同一壁面不同层的流线图,可以看到:随着壁面法向距离的增加,展向涡头由椭圆形涡逐渐发展为圆形涡,展向涡头发展得更为完整,展向涡头的法向尺度更大,这与Elsinga和Marusic^[18]的观点一致.而图6(a)~图6(c)分别对比同一层超疏水壁面与亲水壁面展向涡头的俯仰角,发现超疏水壁面的展向涡头俯仰角均小于对应亲水壁面,说明了超疏水壁面流动相对平缓,湍流猝发的强度比较弱,发卡涡的发展受到抑制.

4 结 论

本文利用高时间分辨率粒子图像测速技术,对超疏水壁面湍流边界层减阻机理进行了实验研究.通过对比亲水壁面与超疏水壁面的平均速度、湍流度、雷诺切应力统计量剖面差异以及展向涡头俯仰角大小,利用发卡涡展向涡头附近流向脉动速度云图以及流线图分析发卡涡展向涡头的拓扑特征,得到以下结论:

1) 基于湍流边界层厚度的雷诺数约为13500时,超疏水壁面摩擦阻力减小10.1%.超疏水壁面平均速度明显大于相同流动条件下亲水壁面对应位置的平均速度.

2) 在内区同一法向位置,超疏水壁面流向湍流度及雷诺切应力小于亲水壁面的情况,并且雷诺切应力峰值更加远离壁面.表明超疏水壁面使得湍流边界层缓冲层增厚,降低了湍流边界层内流体脉动强度,湍流猝发强度降低,减弱了湍流运动过程中的动量、动能的交换.

3) 展向涡头周围流线场表现为不稳定的焦点和鞍点组成的动力系统,鞍点是Q2事件到Q4事件转变的中心.随着壁面法向距离增大,同一平板展向涡头法向尺度变得更大.而相比亲水壁面,超疏水壁面流向脉动速度大小以及展向涡头俯仰角均较小,说明超疏水壁面减弱了相干结构的发展,使得发卡涡的发展受到抑制,从而实现减阻.

参考文献:

- [1] Barthlott W, Neinhuis C. Purity of the sacred lotus or escape from contamination in biological surfaces[J]. *Planta*, 1997, 202(1): 1-8.
- [2] Jiang C G, Xin S C, Wu C W. Drag reduction of a miniature boat with superhydrophobic grille bottom[J]. *AIP Ad-*

- vances, 2011, 1(3): 032148. 1-032148. 8.
- [3] 常跃峰, 姜楠. 沟槽壁湍流多尺度相干结构实验研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(5): 788-795.
CHANG Yuefeng, JIANG Nan. Experimental study on coherent structure passive control and drag reduction in turbulent boundary layer with grooved surface[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(5): 788-795. (in Chinese)
- [4] 胡海豹, 宋保维, 刘占一, 等. 基于湍流边界层时均速度分布的脊状表面减阻规律研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(5): 1040-1047.
HU Haibao, SONG Baowei, LIU Zhanyi, et al. Research about the characteristic of drag reduction over riblets surface based on average velocity profile in the turbulent boundary layer[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(5): 1040-1047. (in Chinese)
- [5] 卢思, 姚朝晖, 郝鹏飞, 等. 具有微纳结构超疏水表面的槽道减阻特性研究[J]. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2010, 40(7): 916-924.
LU Si, YAO Zhaohui, HAO Pengfei, et al. Investigation of drag reduction over superhydrophobic surfaces with micro-nano structures in a channel[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica and Astronomica, 2010, 40(7): 916-924. (in Chinese)
- [6] Gogte S, Vorobieff P, Truesdell R, et al. Effective slip on textured superhydrophobic surfaces[J]. Physics of Fluids, 2005, 17(5): 1441-1457.
- [7] Daniello R J, Waterhouse N E, Rothstein J P. Drag reduction in turbulent flows over superhydrophobic surfaces [J]. Physics of Fluids, 2009, 21(8): 085103. 1-085103. 9.
- [8] Henoch C, Krupenkin T, Kolodner P, et al. Turbulent drag reduction using superhydrophobic surfaces [R]. AIAA-2006-3192, 2006.
- [9] Min T, Kim J. Effects of hydrophobic surface on skin-friction drag[J]. Physics of Fluids, 2004, 16(7): L55-L58.
- [10] Fukagata K, Kasagi N, Koumoutsakos P. A theoretical prediction of friction drag reduction in turbulent flow by superhydrophobic surfaces[J]. Physics of Fluids, 2006, 18(5): 051703. 1-051 703. 4.
- [11] Bharat B, Yong C J, Kerstin K. Micro-, nano- and hierarchical structures for superhydrophobicity, self-cleaning and low adhesion[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2009, 367(1894): 1631-1672.
- [12] Cassie A B D, Baxter S. Wettability of porous surfaces[J]. Transactions of the Faraday Society, 1944, 40: 546-551.
- [13] Wenzel R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1936, 28(8): 988-994.
- [14] 郝鹏飞, 汪幸愉, 姚朝晖, 等. 疏水微槽道内层流减阻的实验研究[J]. 实验流体力学, 2009, 23(3): 7-11.
HAO Pengfei, WANG Xingyu, YAO Chaozhui, et al. Experimental study on laminar drag reduction in micro-channels with superhydrophobic surfaces[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2009, 23(3): 7-11. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 姜楠, 于培宁, 管新蕾. 湍流边界层相干结构空间拓扑形态的层析 TRPIV 测量[J]. 航空动力学报, 2012, 27(5): 1113-1121.
JIANG Nan, YU Peining, GUAN Xinlei. Tomo-TRPIV measurement of coherent structure spatial topology in turbulent boundary layer[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(5): 1113-1121. (in Chinese)
- [17] Adrian R J, Meinhart C D, Tomkins C D. Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 422(1): 1-54.
- [18] Elsinga G E, Marusic I. Evolution and lifetimes of flow topology in a turbulent boundary layer[J]. Physics of Fluids, 2010, 22(1): 015102. 1-015102. 8.

(编辑: 叶 青)