

沟槽面湍流边界层减阻的 TRPIV 测量¹⁾

李山* 杨绍琼* 姜楠^{*,**,\dagger,2)}

^{*}(天津大学力学系, 天津 300072)

^{**}(天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300072)

^{\dagger}(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)

摘要 采用高时间分辨率粒子图像测速技术对沟槽壁面平板湍流边界层速度矢量场的时间序列及其统计量进行了实验测量, 讨论了在同一来流速度下沟槽壁面对平均速度剖面、雷诺切应力及湍流强度的影响. 用流向速度分量的多尺度空间局部平均结构函数辨识壁湍流多尺度相干结构, 用条件采样和相位平均技术提取壁湍流多尺度相干结构喷射和扫掠事件的脉动速度、展向涡量的二维空间拓扑形态. 结果表明, 与同材料光滑壁面对比, 沟槽壁面实现了 10.73% 的摩阻减小量; 沟槽壁面湍流边界层湍流强度及雷诺切应力皆比光滑平板湍流边界层对应统计量小, 说明沟槽壁面有效降低了湍流边界层内流体的脉动. 通过比较壁湍流相干结构猝发事件各脉动速度分量与展向涡量的空间分布特征, 肯定了沟槽壁面的减阻效果, 发现沟槽壁面通过抑制相干结构猝发事件实现减阻.

关键词 湍流边界层, 沟槽壁面, 减阻, 相干结构, 多尺度空间局部平均结构函数, 高时间分辨率粒子图像测速

中图分类号: O357.5 文献标识码: A DOI: 10.6052/0459-1879-12-262

引言

20 世纪 60 年代 NASA 兰利研究中心的 Walsh 等通过实验发现, 顺流向的 V 形横截面沟槽壁面能够有效降低表面摩阻, 突破了表面越光滑壁面摩阻越小的传统思维模式, 引起了极大关注. 随后他们对应用于湍流减阻中不同横截面的沟槽结构 (包括三角形、矩形、V 形、半圆形等) 做了大量实验^[1-4], 发现三角形截面的沟槽具有最佳减阻特性, 当其高度 h 和间距 s 的无量纲尺寸 $h^+ \leq 25$ 和 $s^+ \leq 30$ 时具有减阻效果, 减阻效果最佳时沟槽的尺寸为 $h^+ = s^+ = 15$, 这时可减阻 8% 左右.

国外如美国、欧洲乃至邻国印度近些年陆续开展沟槽壁面减阻研究, 已经取得了较大的进展. Bacher 等^[5]通过对平均速度剖面的测量, 利用边界层动量积分公式得到了 25% 的净减阻率. 采用同样方法, Gallagher 等^[6]的研究结果表明只在沟槽板的后半部阻力有所减小, 但总的阻力几乎不变. Park 等^[7]用热线风速仪详细测量了沟槽内的流向速度场, 通过对沟槽壁面切应力的积分, 得到了大约 4% 的减阻. 20 世纪 90 年代, Bechert 等^[8]对高度可调

的细薄肋形沟槽壁面进行研究并获得 9.9% 的减阻效果. 国内从 20 世纪 80 年代后期开始关注沟槽减阻技术的研究, 其工程应用正处于起步阶段. 如胡海豹等^[9]在回转体模型上直接加工沟槽, 水洞实验数据显示具有减阻效果的 s^+ 范围在 10~60, 最大减阻量超过 10%; 王晋军等^[10]的沟槽壁面水槽实验也表明局部阻力减少高达 13%~26%. 董守平等^[11], 宫武旗等^[12], 李育斌等^[13]和潘家正等^[14]均进行了深入的研究工作.

迄今为止, 沟槽壁面湍流减阻技术的应用范围归纳起来主要有 3 方面: 飞行器、流体驱动设备、管道输运系统. 早期见诸报道的是 20 世纪 80 年代德国飞机制造商利用带沟槽的飞机机身蒙皮能使飞机节省燃料 8%; 空中客车公司在 A320 试验机表面面积的 70% 贴上沟槽薄膜, 达到了节油 1%~2% 的效果^[15]; 李育斌等^[13]在 1:12 的运七模型具有湍流流动的区域顺流向粘贴沟槽薄膜后, 实验表明可减少阻力 5%~8%; KSB 公司把多级泵的叶片表面加工成一定形状的沟槽后综合效率提高了 1.5%. 在管道输运中, Nitschke^[16]通过测量具有流向沟槽衬里管道

2012-09-28 收到第 1 稿, 2012-11-22 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (11272233), 国家重点基础研究发展计划 (2012CB720101) 和中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室开放基金资助项目.

2) 姜楠, 教授, 主要研究方向: 湍流、流动稳定性、实验流体力学. E-mail: nanj@tju.edu.cn

的两端压差获得了一定的减阻效果. 由此可见沟槽减阻技术具有广阔的应用前景.

大多数研究者发现, 减阻沟槽壁面湍流边界层的黏性底层要比光滑壁面有所增厚, Tang 等^[17], Wang 等^[18], Choi 等^[19], Hooshmand 等^[20] 都发现减阻沟槽壁面的对数区明显上抬. 通过考察湍流边界层二阶相关量, 发现沟槽表面流向和法向湍流脉动强度及雷诺切应力较光滑面减小, Debisschop 等^[21] 发现流向速度脉动强度只在近壁区才受到沟槽的影响. 沟槽壁面减阻机理近年来主要有 2 种观点: 一是针对湍流产生机理及近壁区湍流相关结构模型提出的“第二涡群”论; 另一是从黏性理论出发的“突出高度”论. 近年来, 许多学者从不同角度对减阻机理进行探讨, Walsh 等^[3] 认为狭窄的 V 型沟槽的沟谷保留有低摩擦的低速安静流体, 降低了总的阻力. Bacher 等^[5] 归结为反向旋转的流向涡与沟槽尖端形成的小二次涡减弱了与低速条带相联系的流向涡, 并在沟槽内保留低速流体. Gallagher 等^[6] 认为是由黏性底层厚度的增加造成的. 流向涡和沟槽表面尖峰的相互干扰这一点被 Park 等^[7] 对沟槽侧面摩擦的精细测量所证实. Choi^[19] 认为主要是沟槽限制了流向涡的展向运动, 引起猝发减弱和摩擦减少.

本文利用 TRPIV 测量技术, 突破了以往湍流空间单点测量的局限性, 能在同一时刻记录整个测量平面的瞬时流场信息. 利用流向速度分量的空间多尺度局部平均结构函数和条件采样、相位平均技术提取壁湍流多尺度相干结构喷射和扫掠事件的速度分量和展向涡量的二维空间拓扑形态; 研究沟槽壁面对湍流边界层的平均速度剖面、湍流度及雷诺应力的影响, 并将统计量同湍流边界层相干结构猝发事件的运动规律结合起来, 分析了沟槽壁面对相干结构猝发的影响, 从壁湍流相干结构控制的角度研究沟槽壁面的减阻机理.

1 实验模型及装置

实验在 SZ-2 型开口式低速循环水槽中进行. 实验段长 130 cm, 宽 14 cm, 深 15 cm, 其流速在 0 ~ 0.4 m/s 范围内连续可调, 水槽中心的背景湍流度小于 3.5%, 流场均匀度为 0.6%. 平板尺寸为 1200 mm × 138 mm (长 × 宽 × 厚), 平板前缘按 8:1 的半椭圆修行, 一块平板表面光滑, 另一块板表面为沿流向的三角形截面沟槽结构 (见图 1, h 表示沟槽深度), 平板水平放置于水槽底部. 为得到充分发展的湍流



图 1 沟槽模型横截面示意图

Fig. 1 Cross-section schematic diagram of the riblets plate

边界层, 距板前缘 7.5 cm 处加绊线, 边界层在平板上表面发展. 为防止壁面激光反射形成噪声信号, 在试验段的底部粘贴黑色不透光纸.

实验时激光片光源、高速相机和平板相对位置示意图见图 2. 拍摄过程中, 激光片光源平面与平板垂直, 与水槽两侧壁平行, 片光源位于水槽展向中心线处, 在此次实验中, 激光片光源中心打在沟槽最凹处的正上方. CCD 相机镜头与片光保持平行, 保证了拍摄时的对焦的准确性.

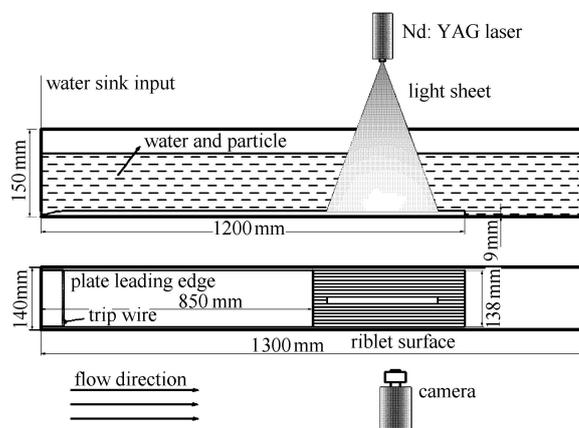


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental configuration

实验时水槽自由来流速度控制在 0.19 m/s, 高速相机采样频率为 250 Hz, 脉冲时间间隔为 4000 μ s, 单帧曝光时间为 3500 μ s, 每次记录图像 6001 张, 持续时间为 24.004 s. 记录的粒子图像分辨率为 1280 pixels × 1024 pixels, 图像视野范围约为 11 cm × 9 cm (流向 × 法向). 对原始粒子图像进行处理时选择查询窗口为 32 pixels × 32 pixels, 窗口重叠率为 75%, 最终在 x - z 平面内共得到 157 × 125 (流向 × 法向) 个二维瞬时速度矢量场信息.

2 湍流边界层低阶统计量分析

2.1 平均速度分布

图 3 为拍摄区域内不同平板表面同一位置处无量纲平均速度沿法向位置的分布剖面曲线. 横轴 $y^+ = yu_* / \nu$, 纵轴 $u^+ = u / u_*$, u_* , ν 分别为对应壁面摩

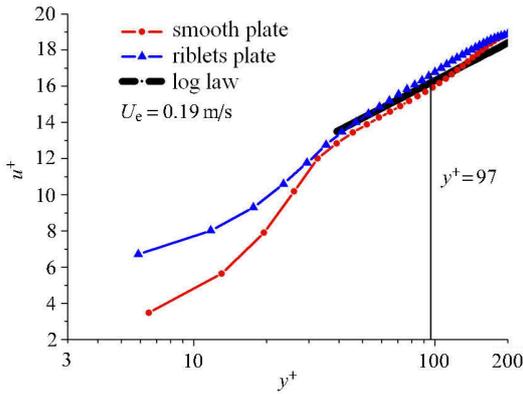


图 3 光滑面及沟槽面平板流向平均速度分布
Fig. 3 Mean velocity profile of the TBL over the smooth and riblets plate

擦速度和流体运动黏度。

从图 3 中可以很直观地看出: 沟槽壁面湍流边界层与光滑平板湍流边界层一样, 流速沿法向的分布不仅具有分区特性, 而且线性分布公式和对数分布公式仍然适用, 在近壁区域 $y^+ < 35$, 相同 y^+ 位置处, 沟槽的无量纲速度 u^+ 要明显大于光滑壁面平板上的无量纲速度, 说明沟槽的存在使得边界层近壁区缓冲层增厚, 平均速度剖面的对数律层外移。Choi^[19] 及 Zhao 等^[22] 均得出减阻沟槽面上黏性底层增厚的结论。将高度 h 、间距 s 的 2 个沟槽几何模型参数无量纲化, 对于高速自由来流工况下的沟槽壁面, 得到 $h^+ = 10.641$, $s^+ = 21.282$ 。

表 1 列出流速为 0.19 m/s 工况下沟槽壁面及光滑壁面平板湍流边界层的主要参数。表中使用壁面摩擦阻力系数计算沟槽平板的减阻率 $\eta = (1 - C_{fr}/C_{fp}) \times 100\%$, 雷诺数 Re_x 为以沟槽表面起点距平板前缘距离 $x = 850$ mm 作为特征长度的雷诺数。从表中可以看出沟槽平板的平均壁面摩擦速度 u_* 、平均壁面摩擦阻力 τ_w 以及平均壁面摩擦阻力系数 C_f

表 1 来流速度 0.19 m/s 工况下湍流边界层的减阻参数

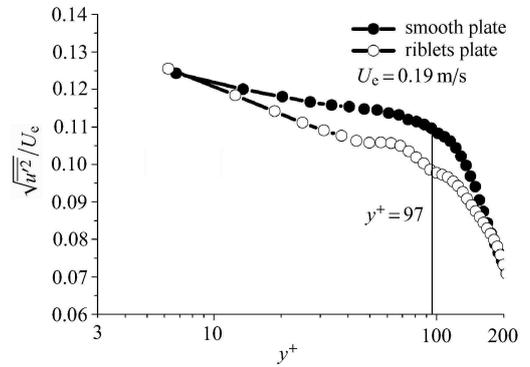
Table 1 Drag reduction parameters of the TBL at the free-stream velocity 0.19 m/s over the smooth and riblets plate

	Riblets plate	Smooth plate
$U_e/(m \cdot s^{-1})$	0.19	0.19
Re_x	161 932	161 932
$u_*/(m \cdot s^{-1})$	0.009 178	0.009 868
$\tau_w/(kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2})$	0.084 085	0.097 194
C_f	0.005 273	0.005 907
$\eta/\%$	10.73	

均小于光滑平板的相应参数。

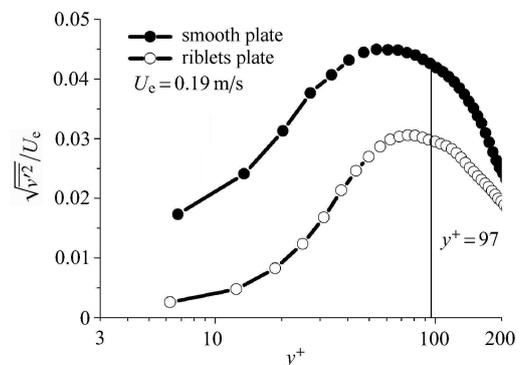
2.2 湍流脉动强度及雷诺应力

图 4(a) 和图 4(b) 给出了 2 种壁面湍流边界层中湍流度各分量的分布曲线。与光滑面相比, 图中沟槽面上的速度脉动强度各分量随壁面不同法向位置发生了一定变化, 但变化趋势相同: 在对数区, $\sqrt{u'^2}/U_e$ 分量随着 y^+ 的增大逐渐降低, 可见沟槽壁面引起了内区流向湍流度的减小; 而在外区, 流向速度脉动强度与光滑面趋于一致。但法向 $\sqrt{v'^2}/U_e$ 分量在湍流边界层的内区和外区都有明显减小, 由于法向脉动速度分量与湍动能的传输密切相关, 这说明沟槽的存在使得湍流边界层中流体的法向脉动减弱, 湍流传输的强度也被减弱, 即沟槽面湍流边界层内流体变得更加“安静”。



(a) 流向湍流度分量 $\sqrt{u'^2}/U_e$ 分布曲线

(a) Distribution of the streamwise turbulent intensity

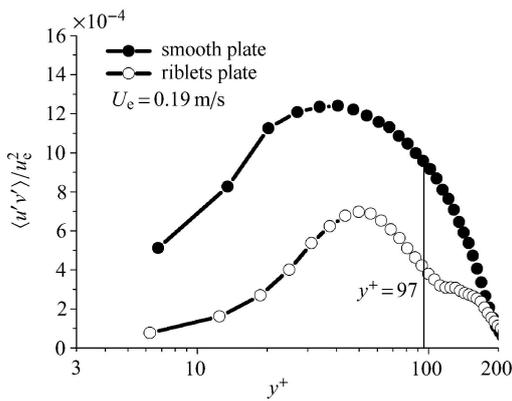


(b) 法向湍流度分量 $\sqrt{v'^2}/U_e$ 分布曲线

(b) Distribution of the wall-normal turbulent intensity

图 4 湍流度各分量及雷诺切应力沿湍流边界层法向位置 y^+ 的分布

Fig. 4 Turbulent intensity and Reynolds shear stress distributions in wall-normal direction of the TBL



(c) 雷诺切应力 $\langle u'v' \rangle$ 分布曲线

(c) Distribution of the Reynolds shear stress $\langle u'v' \rangle$

图 4 湍流度各分量及雷诺切应力沿湍流边界层法向位置 y^+ 的分布 (续)

Fig. 4 Turbulent intensity and Reynolds shear stress distributions in wall-normal direction of the TBL (continued)

雷诺应力表征了由于湍流速度脉动引起质点间的动量交换而产生的附加应力. 在湍流运动中, 雷诺应力往往远大于分子黏性应力. 本次实验考察了流向雷诺正应力 $\langle u'u' \rangle$ 、法向雷诺正应力 $\langle v'v' \rangle$ 以及雷诺切应力 $\langle u'v' \rangle$ 3 个分量, 并使用来流速度 U_c 做无量纲化, 图 4(c) 以雷诺切应力 $\langle u'v' \rangle$ 沿壁面法向分布为代表来分析减阻效果. 本实验沟槽壁面雷诺切应力最大值较光滑壁面平板降低了 30%. 沟槽面流向雷诺切应力分量在湍流边界层缓冲层区域及对数律区均有明显降低, 约在 $y^+ = 160$ 处趋于一致, 说明沟槽壁面限制了近壁区与低速条带相联系的流向相干涡的脉动, 削弱了脉动速度和雷诺应力分量.

3 湍流多尺度相干结构猝发事件检测

本文使用流向速度分量沿流向空间的分布进行多尺度分析^[23], 基于新象限分裂法^[24]检测多尺度相干结构的猝发事件, 采用新条件采样和相位平均技术^[25]分别提取了光滑壁面及沟槽壁面湍流边界层多尺度相干结构喷射和扫掠事件中的脉动速度、脉动涡量的二维空间拓扑形态, 通过对比研究, 分析沟槽壁面的减阻机理.

流向脉动速度沿流向空间的局部平均结构函数定义如下

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

其中, $u(x, y)$ 代表流向脉动速度在 (x, y) 平面的分

布, $\overline{u(x, y)_{x \in [b, b+l]}} = \frac{1}{l} \int_b^{b+l} u(x, y) dx$ 表示 $u(x, y)$ 沿流向在 $[b, b+l]$ 范围内的局部平均, b 为所检测的空间流向位置, l 为空间流向尺度, 本文约为 10.9 mm, 对应于 98 个黏性尺度单位. 式 (1) 表示尺度为 l 的前一半 (下游) 结构 $x \in [b, b+l]$ 与尺度为 l 的后一半 (上游) 结构 $x \in [b-l, b]$ 的平均迁移速度之差, 即湍流结构在以 $x = b$ 为中心尺度为 $2l$ 的局部范围内的拉伸或者压缩, 如果 $\delta u_x(l, b) > 0$, 则表示前一半 (下游) 结构的平均迁移速度快于后一半 (上游) 结构的平均迁移速度, 该流体结构正在进行拉伸. 如果 $\delta u_x(l, b) < 0$, 则表示前一半 (下游) 结构的平均迁移速度慢于后一半 (上游) 结构的平均迁移速度, 该流体结构正在进行压缩.

在相干结构猝发过程中低速流体从近壁区向外喷射的阶段, 当地的流向脉动速度 u' 达到局部极小值, 其低通滤波的一阶导数从负的方向向正的方向变化并经过零点, 同时低速流体抬升远离壁面, 法向脉动速度 $v' > 0$. 因此, 可以用 $u' < 0, \delta u_x(l, b)$ 从负的方向向正的方向变化并经过零点; 而且 $v' > 0, \delta v_y(l, b)$ 从正的方向向负的反向变化并经过零点来检测喷射事件.

而对于外区高速流体冲向壁面的扫掠事件, 当地的流向脉动速度 u' 达到局部极大值, 其低通滤波的一阶导数从正的方向向负的方向变化并经过零点, 同时高速流体向下冲向壁面, 法向脉动速度 $v' < 0$. 因此, 可以用 $u' > 0, \delta u_x(l, b)$ 从正的方向向负的方向变化并经过零点; 而且 $v' < 0, \delta v_y(l, b)$ 从负的方向向正的反向变化并经过零点来检测扫掠事件.

因此, 检测壁湍流相干结构喷射和扫掠事件新的象限分裂法^[24]的检测函数定义如下

$$D(b, l; y) = \begin{cases} 1 \text{ (喷射), 如果} & \begin{cases} u' < 0, \delta u_x(l, b)^- < 0, \delta u_x(l, b)^+ > 0, \\ v' > 0, \delta v_y(l, b)^- > 0, \delta v_y(l, b)^+ < 0 \end{cases} \\ -1 \text{ (扫掠), 否则} & \begin{cases} u' > 0, \delta u_x(l, b)^- > 0, \delta u_x(l, b)^+ < 0, \\ v' < 0, \delta v_y(l, b)^- < 0, \delta v_y(l, b)^+ > 0 \end{cases} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

一旦相干结构发生喷射和扫掠的中心位置被检测到, 脉动速度、展向涡量等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

$$\left. \begin{aligned} \langle f(x, y) \rangle_e &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f(b(k) + x, y_0(k) + y), \\ x &\in [-l_x, l_x], y \in [-l_y, l_y], \\ \text{当 } D(b(k), l_x; y_0(k)) &= 1 \\ \langle f(x, y) \rangle_s &= \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M f(b(k) + x, y_0(k) + y), \\ x &\in [-l_x, l_x], y \in [-l_y, l_y], \\ \text{当 } D(b(k), l_x; y_0(k)) &= -1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, $(b(k), y_0(k))$ 是第 k 次喷射或者扫掠发生的空间位置. l_x 和 l_y 分别是流向、法向尺度, 经过多次经验尝试, l_x 和 l_y 分别取 77 和 29 个黏性尺度单位时所得拓扑结构形态最好. N 和 M 分别为检测出的喷射

和扫掠事件个数, 图 5 给出了不同位置不同尺度 N 和 M 值.

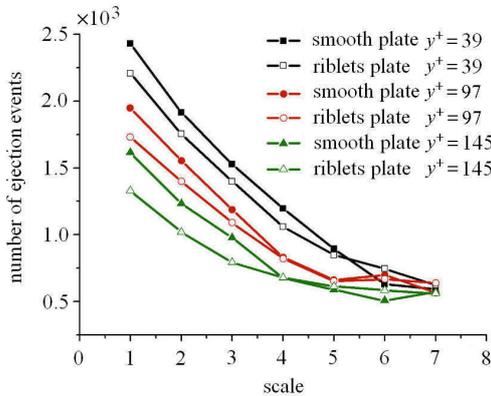
从图 5 中可以看出, 在尺度小于 5(对应于 196 个黏性尺度单位) 时, 沟槽壁面喷射和扫掠事件的发生次数较平板都有降低, 而在第 6 和第 7 尺度(分别对应于 392 和 784 个黏性尺度单位) 时, 两统计值趋于一致, 甚至较光滑平板有些许增加. 在 $y^+ < 100$ 内区, N 和 M 值都有一定的减少, 尤其是 M 值, 降低幅度较大, 而在外区, 沟槽壁面扫掠事件发生频率反而高于光滑平板, 说明沟槽影响的是近壁区小尺度结构的流动, 且以影响扫掠事件的发生为主.

3.1 喷射事件

基于前文所述检测准则, 使用新条件采样平均方法提取得到的光滑壁面和沟槽壁面湍流边界层的湍流相干结构喷射事件二维相关物理量空间拓扑形态, 本文主要以位置在对数律 $y^+ = 97$ 处为检测中心来分析讨论, 见图 6. 缓冲层及其他法向位置为检测中心的结果在他文中重点分析. 其中, 相干结构喷射事件流向脉动速度的分量如图 6(a) 所示. 从图中可以看出, 检测结果很好地检测到了不同壁面湍流相干结构的喷射事件: 即上游的低速流体流向下游时使得下游的流体减速并相对地向上游喷射. 通过对比光滑壁面和沟槽壁面喷射事件的流向脉动速度, 发现两图中幅值较高处沟槽相对于光滑壁面有所降低, 与图 4 中湍流度流向分量分布相吻合, 且沟槽壁面使低速流体的影响范围有明显减小, 低速流体周围的高速流体范围有所扩大, 推动了流体向下游流动.

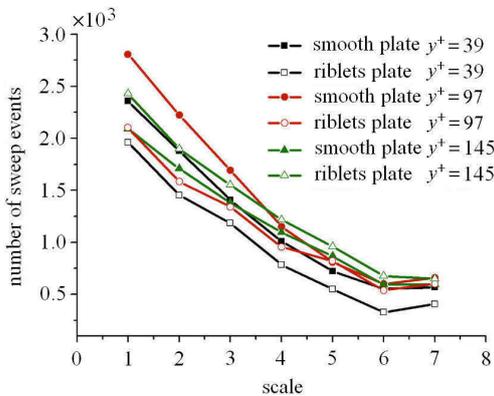
相干结构喷射事件法向脉动速度分量云图如图 6(b) 所示: 喷射事件中沟槽壁面的法向脉动速度明显小于光滑壁面对应速度, 表明沟槽壁面有效抑制了流体法向的脉动, 减弱了湍流传输的强度, 使得流体尽量沿平行于平板的方向流动.

另外, 从相干结构喷射事件展向涡量的云图(图 6(c)) 可以看出, 沟槽壁面湍流边界层内部喷射事件的展向涡量相比于光滑壁面有一定程度的减弱, 涡量正负幅值较高的范围略有减小, 说明沟槽壁面抑制喷射事件展向涡旋运动, 削弱了“反向旋转涡对”的强度, 进而抑制了低速条带的形成和发展, 从而降低了湍流猝发强度, 实现湍流减阻, 从侧面验证了“第二涡群”论.



(a) 喷射事件的统计

(a) Statistic of ejection events

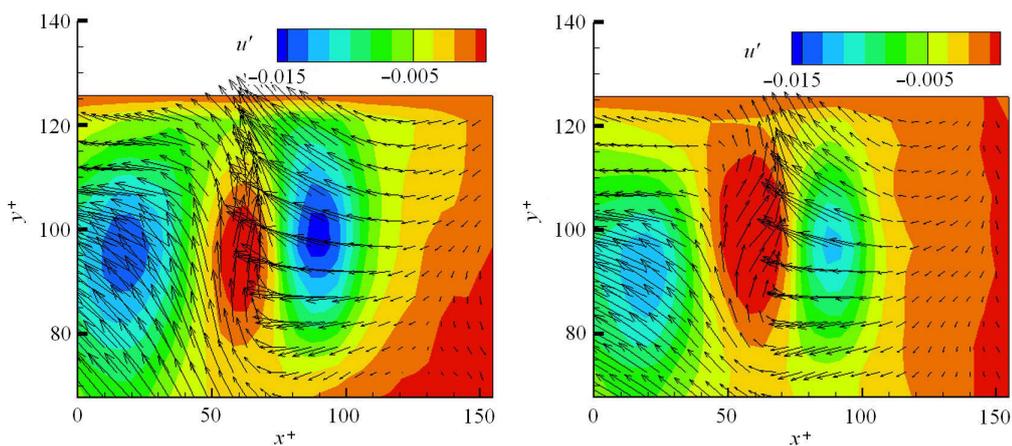


(b) 扫掠事件的统计

(b) Statistic of sweep events

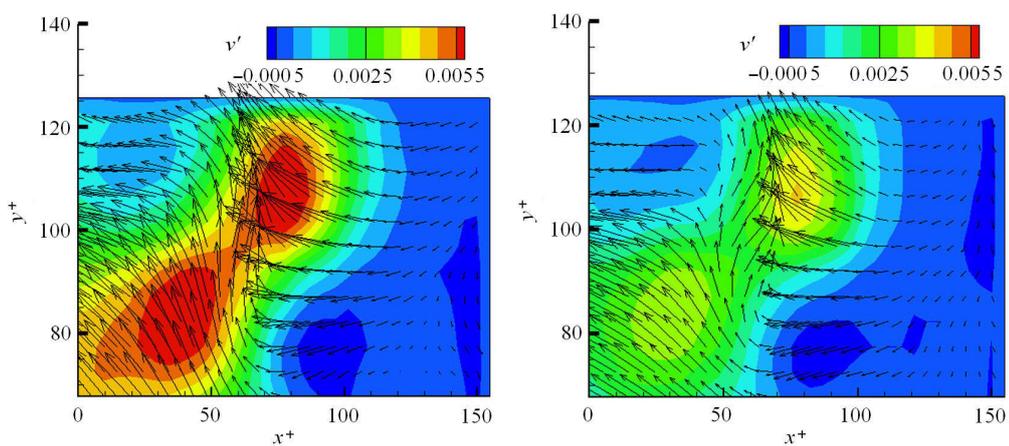
图 5 不同尺度不同位置喷射扫掠事件个数的统计

Fig.5 Statistics of ejection and sweep events at different positions for different scales



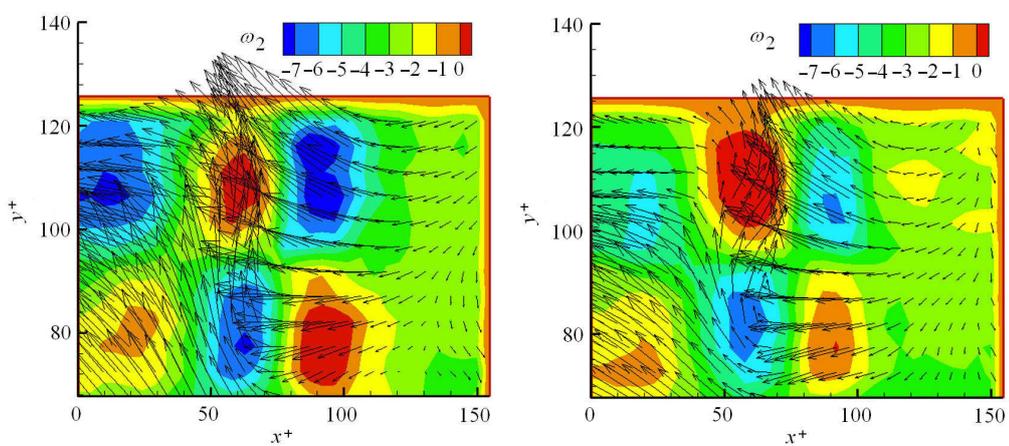
(a) 相干结构喷射事件流向脉动速度分布云图 (左: 光滑壁面; 右: 沟槽壁面)

(a) Contours of the streamwise fluctuating velocity during ejection events (left: smooth plate; right: riblets plate)



(b) 相干结构喷射事件法向脉动速度分布云图 (左: 光滑壁面; 右: 沟槽壁面)

(b) Contours of the wall-normal fluctuating velocity during ejection events (left: smooth plate; right: riblets plate)



(c) 相干结构喷射事件展向涡量分布云图 (左: 光滑壁面; 右: 沟槽壁面)

(c) Contours of the spanwise fluctuating vorticity during ejection events (left: smooth plate; right: riblets plate)

图 6 相干结构喷射事件物理量分布图

Fig. 6 Contours of physical quantities during ejection events

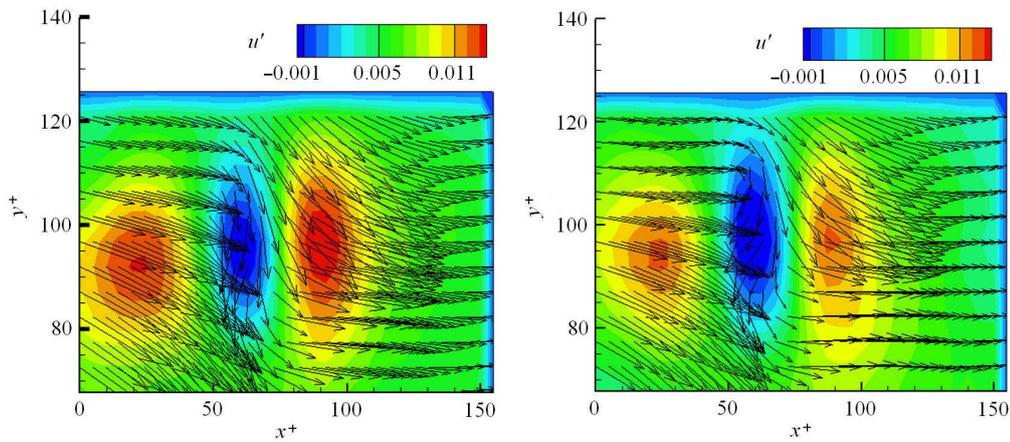
3.2 扫掠事件

用相同方法分别提取出以对数律区 $y^+ = 97$ 为检测中心处光滑壁面和沟槽壁面湍流边界层相干结构扫掠事件二维相关物理量空间拓扑形态如图 7 所示. 其中, 从相干结构扫掠事件流向脉动速度云图 (图 7(a)) 可以看出, 检测结果很好地检测到了平板湍流边界层内部相干结构的扫掠事件, 即上游高速流体下扫, 使得下游的流体加速. 沟槽壁面的扫掠事件流向脉动速度相比于光滑壁面高速流体区域减少, 低速流体区域有所增加, 流向脉动速度幅值较高的范围明显降低, 说明沟槽壁面使下扫的高速流体与周围流体之间的速度差异减小, 削弱了近壁区湍流相干结构的猝发过程.

从相干结构扫掠事件的法向脉动速度云图 (图

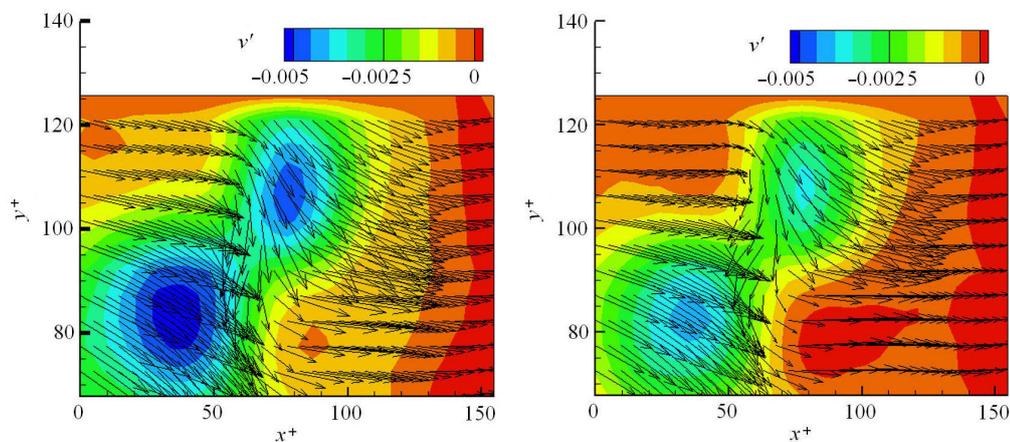
7(b)) 也可以看出, 沟槽壁面的法向脉动速度明显小于光滑壁面, 表明沟槽壁面有效降低了湍流边界层中流体法向的脉动程度, 使得高速流体尽量沿壁面平行流动, 抑制了法向间的动量和能量交换.

另外, 从相干结构扫掠事件的展向涡量云图 (图 7(c)) 也可以看出, 负展向涡和正展向涡基本上是交替出现的. 沟槽壁面湍流边界层内部扫掠事件的展向涡量相比于光滑壁面有一定程度的减弱, 且负的展向涡量及涡量负幅值较高的范围明显减小, 0 值范围增大. 说明该法向位置处展向涡的发展受到了抑制, 涡强减弱, 其诱导外区高速流体扫向壁面的能力减弱, 从而减小了流体的法向速度脉动, 流体间能量、动量交换趋缓, 进而降低了湍流摩擦阻力.



(a) 相干结构扫掠事件流向脉动速度分布云图 (左: 光滑壁面; 右: 沟槽壁面)

(a) Contours of the streamwise fluctuation velocity during sweep events (left: smooth plate; right: riblets plate)

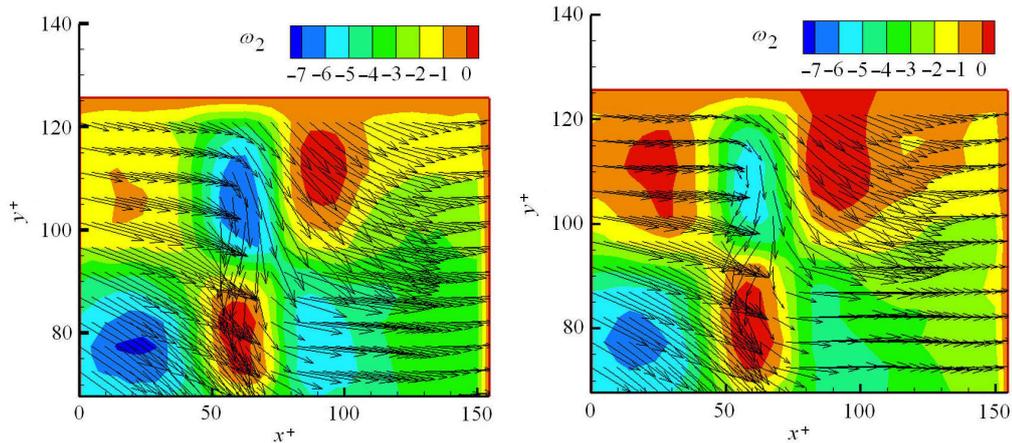


(b) 相干结构扫掠事件法向脉动速度分布云图 (左: 光滑壁面; 右: 沟槽壁面)

(b) Contours of the wall-normal fluctuation velocity during sweep events (left: smooth plate; right: riblets plate)

图 7 相干结构扫掠事件物理量分布图

Fig. 7 Contours of physical quantities during sweep events



(c) 相干结构扫掠事件展向涡量分布云图 (左: 光滑壁面; 右: 沟槽壁面)

(c) Contours of the spanwise fluctuation vorticity during sweep events (left: smooth plate; right: riblets plate)

图 7 相干结构扫掠事件物理量分布图 (续)

Fig. 7 Contours of physical quantities during sweep events (continued)

4 结 论

本文考察了三角形横截面的顺流向沟槽壁面对 0 压力梯度湍流边界层时均速度、湍流脉动强度、雷诺应力等统计量的影响. 通过对比光滑壁面与沟槽壁面的平均流速、湍流脉动强度、雷诺应力的分布差异, 得到如下结论: 沟槽壁面增加了湍流边界层缓冲层的厚度, 沟槽壁面基于壁面摩擦速度的无量纲时均速度在缓冲层明显大于相同流场条件下光滑壁面对应位置的时均速度. 沟槽壁面湍流边界层湍流强度及雷诺应力各分量皆比同条件下平板湍流边界层相应统计量要小, 说明沟槽壁面降低了湍流边界层内流体的脉动, 减弱了流体运动过程中的动量、动能的交换.

通过比较光滑壁面与沟槽壁面平板湍流边界层近壁区相干结构猝发事件, 即喷射事件与扫掠事件的流向脉动速度、法向脉动速度以及展向涡量云图, 可以发现: 沟槽壁面的存在对猝发事件产生了一定的影响. 沟槽的存在使得 2 种猝发事件的法向脉动速度均得以明显减小, 说明沟槽的减阻作用主要体现在抑制流体法向脉动上. 沟槽结构使得涡对的强度逐渐减弱, 从而抑制了发卡涡对诱导低速流体的能力. 这一方面意味着湍流猝发的减少, 另一方面意味着近壁区内流动不稳定性的减弱 (流动的不稳定性是近壁区低速条带向外层猝发的根源). 由此可见, 在沟槽附近, 低速条带的猝发不会像光滑表面那么剧烈, 这种强度较弱的湍流猝发, 导致湍流边

界层发展和边界层内动量交换的相应减弱. 喷射和扫掠过程也是雷诺应力的主要贡献者, 也是近壁区湍流的主要产生机制, 直接形成壁面阻力. 沟槽结构对这 2 个过程的抑制破坏了湍流的自维持机制, 从而实现了壁面减阻.

参 考 文 献

- Walsh MJ. Riblets as a viscous drag reduction technique. *AIAA Journal*, 1983, 21(4): 485-486
- Walsh MJ. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets. AIAA-82-0169, 1982
- Walsh MJ, Lindemann AM. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction. AIAA-84-0347, 1984
- Brian D, Bharat B. 湍流流动中鲨鱼皮表面流体减阻研究进展. 力学进展, 2012, 42(6): 821-836 (Brian Dean, Bharat Bhushan. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: A review. *Advances in Mechanics*, 2012, 42(6): 821-836 (in Chinese))
- Bacher EV, Smith CR. A combined visualization anemometry study of the turbulent drag reducing mechanisms of triangular micro-groove surface modification. AIAA 85-0548, 1985
- Gallagher JA, Thomas ASW. Turbulent boundary layer characteristics over streamwise grooves. AIAA 84-2185, 1984
- Park SR, Wallace JM. Flow alteration and drag reduction by riblets in a turbulent boundary layer. *AIAA Journal*, 1994, 32(1): 31-38
- Bechert DW, Bruse M, Hage W, et al. Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry. *Journal of Fluid Mechanics*, 1997, 338: 59-87
- 胡海豹, 宋保维, 潘光等. 回转体表面条纹沟槽减阻水洞实验研究. 力学季刊, 2006, 27(002): 267-272 (Hu Haibao, Song Baowei, Pan Guang, et al. Water tunnel experimental investigation on drag reduction in gyroidal objects with riblets surface. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2006, 27(002): 267-272 (in Chinese))

- 10 王晋军, 兰世隆. 沟槽面湍流边界层减阻特性研究. 中国造船, 2001, 42(4): 1-5 (Wang Jinjun, Lan Shilong. Drag reduction characteristics of turbulent boundary layer flow over riblets surfaces. *Shipbuilding of China*, 2001, 42(4): 1-5 (in Chinese))
- 11 李新华, 董守平, 赵志勇. 平板及减阻沟槽表面雷诺切应力的实验研究. 实验流体力学, 2006, 20(1): 40-44 (Li Xinhua, Dong Shouping, Zhao Zhiyong. Experimental study on Reynolds shear stress in turbulent boundary layers over smooth and drag reduction grooved surface. *Journal of Experiment in Fluid Mechanics*, 2006, 20(1): 40-44 (in Chinese))
- 12 宫武旗, 李新宏, 黄淑娟. 沟槽壁面减阻机理实验研究. 工程热物理学报, 2002, 23(5): 579-582 (Gong Wuqi, Li Xinhong, Huang Shujuan. Experiment study on the mechanism of riblets drag reduction. *Journal of Engineering Thermo Physics*, 2002, 23(5): 579-582 (in Chinese))
- 13 李育斌, 乔志德, 王志岐. 运七飞机外表面沟纹膜减阻的实验研究. 气动实验与测量控制, 1995, 9(3): 21-26 (Li Yubin, Qiao Zhide, Wang Zhiqi. An experimental research of drag reduction using riblets for the Y-7 airplane. *Aerodynamic Experiment and Measurement & Control*, 1995, 9(3): 21-26 (in Chinese))
- 14 潘家正. 湍流减阻新概念的实验检索. 空气动力学学报, 1996, 14(3): 305-310 (Pan Jiazheng. The experimental approach to drag reduction of the transverse ribbons on turbulent flow. *Acta Aerodynamica Sinica*, 1996, 14(3): 305-310 (in Chinese))
- 15 王晋军. 沟槽面湍流边界层减阻研究综述. 北京航空航天大学学报 1998, 24(1): 31-34 (Wang Jinjun. Reviews and prospects in turbulent drag reduction over riblets surface. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1998, 24(1): 31-34 (in Chinese))
- 16 Nitschke P. Experimental investigation of turbulent flow in smooth and longitudinal grooved tubes. NASA TM, 1984: 77480
- 17 Tang YP, Clark DG. On near-wall turbulence-generating events in a turbulent boundary layer on a riblet surface. *Applied Scientific Research*, 1993, 50: 215-232
- 18 Wang JJ, Lan SL, Chen G. Experimental study on the turbulent boundary layer flow over riblets surface. *Fluid Dynamics Research*, 2000, 27: 217-229
- 19 Choi KS. Near-wall structure of a turbulent boundary layer with riblets. *Journal of Fluid Mechanics*, 1989, 208: 417-458
- 20 Hooshmand D, Youngs RA, Wallace JM, et al. An experimental study of changes in the structure of a turbulent boundary layer due to surface geometry changes. AIAA 83-0230, 1983
- 21 Debisschop JR, Nieuwstadt FTM. Turbulent boundary layer in an adverse pressure gradient: effectiveness of riblets. *AIAA Journal*, 1996, 34: 932-937
- 22 Zhao ZY, Dong SP, Du YN. An experimental study of the turbulent boundary layer characteristic over streamwise riblets. *Journal of Hydrodynamics*, 2004, 16(3): 350-355
- 23 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. 力学学报, 2012, 44(2): 1037-1042 (Jiang Nan, Guan Xinlei, Yu Peining. Tomographic TRPIV measurement of anisotropic eddy-viscosity model for coherent structure Reynolds Stress. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2012, 44(2): 1037-1042 (in Chinese))
- 24 Yang SQ, Jiang N. Tomographic TR-PIV measurement of coherent structure spatial topology utilizing an improved quadrant splitting method. *Sci China-Phy Mech Astron*, 2012, 55: 1863-1872
- 25 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. 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. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(5): 1113-1121 (in Chinese))

(责任编辑: 刘希国)

TRPIV MEASUREMENT OF DRAG-REDUCTION IN THE TURBULENT BOUNDARY LAYER OVER RIBBLETS PLATE¹⁾

Li Shan* Yang Shaoqiong* Jiang Nan^{*,**,†,2)}

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

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

† (State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China)

Abstract Time series of velocity vector field and statistics in the turbulent boundary layer(TBL) over the riblets surface and smooth one were measured utilizing the time-resolved particle image velocimetry (TRPIV) ; Several characteristic parameters in the TBL, such as the mean velocity profile, the Reynolds shear stress and the turbulent intensity, etc. were compared at the same free-stream velocity(0.19m/s) for the different surface plates. We firstly detected the coherent structures using multi-scale spatial locally-averaged structure function of the streamwise velocity component at different scales. Then, we utilized the conditional sampling and phase-average method to extract the spatial topologies of physical quantities, such as the velocity fluctuation and the spanwise vorticity, etc. based on the ejection or sweep events of coherent structures in the TBL. Results reveal that a drag-reduction of nearly 10.73 percent was acquired over the riblets surface when we compared the skin friction coefficient of such two Acrylic Plexiglas plates at the same free-stream velocity. In addition, that the streamwise turbulent intensity and the Reynolds shear stress of the TBL over riblets surface are both smaller than the ones over smooth surface at the same wall-normal position indicates riblets surface weaken the flow turbulence reducing the momentum exchange and energy loss in the flow. Lastly, we compared several statistic characteristics, mentioned above, based on the ejection and sweep events of coherent structures to clarify the effect of the drag-reduction over the riblets surface with triangle cross-section. More importantly, we find that the drag-reduction achieved by means of riblets surface suppressing the bursting events of coherent structures.

Key words turbulent boundary layer, riblets plate, drag reduction, coherent structure, multi-scale spatial locally-averaged structure function, TRPIV

Received 28 September 2012, revised 22 November 2012.

1) The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (11272233), the National Fundamental Research Program of China (2012CB720101) and Opening Fund of the State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics (LNM), Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences.

2) Jiang Nan, professor, research interests: turbulence, flow stability, experimental fluid mechanics. E-mail: nanj@tju.edu.cn