

减阻沟槽边界层相干结构展向拓扑的分层可视化

李 山¹, 杨 绍 琼¹, 田海平¹, 王清毅¹, 姜 楠^{1, 2, 3}

(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)

(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系统(TR-PIV), 分别对沟槽壁面及光滑壁面平板湍流边界层速度矢量场的时间序列进行了精细测量, 并利用新象限分裂法及新条件采样与相位平均技术, 在李山等人^[15]对数区结果的基础上, 对光滑壁面和沟槽面湍流边界层近壁区及外区相干结构二维空间拓扑的形态进行了进一步地对比研究。结果表明: 在近壁区和对数区内, 与光滑壁面相比, 不论喷射事件还是扫掠事件, 减阻沟槽使得相干结构法向脉动强度降低最为明显, 即相干结构在法向上的动量和能量交换减弱, 削弱了其湍流产生的贡献; 而进入外区以后, 减阻沟槽对法向脉动速度分量和展向涡量在喷射和扫掠过程中影响比内区要小, 说明沟槽主要影响湍流边界层内区结构, 且以影响扫掠事件法向脉动为主。

关键词: 湍流边界层; 减阻沟槽; 新象限分裂法; TR-PIV; 相干结构

0 引 言

在 Kline^[1]等人及 Brown&Roshko^[2]发现了湍流剪切流中的相干结构后, 对湍流边界层的结构, 尤其是近壁区结构的理解已经提高到了了一定的程度, 识别了一些固有的特性并提出了一定的因果关系。壁面粗糙度对动量、热量和质量传输的影响是近期很多研究课题的核心。而在各种减阻技术中, 沟槽法减阻以其简单容易实现、方便节约成本、性能稳定等优势, 已经被应用到航天、航空、航海、管道运输以及体育竞技等很多方面。NASA 兰利研究中心的 Walsh^[3-6]首先开展了表面经过处理的被动减阻装置的实验研究, 定量地研究了几种不同类型的沟槽壁面, 发现若要获得净减阻量, 沟槽的尺寸应该

基本上与黏性底层厚度同量级。Walsh 使用三角形沟槽壁面获得了超过 8%的净减阻量。英国贝德福德皇家航空设施的 Sawyer^[7]实施了一个相似的实验, 证实了 NASA 的基本结果。Choi, Pearcey 和 Savill^[8]使用一个加工有沟槽的流线型三维体分别在拖曳水池和风洞中进行了实验, 成功地证明了无压力梯度双曲表面被动减阻装置的有效性。然而, 在大约 25 年的研究工作中, 关于沟槽如何起作用, 以及为何只减少 8~10%的阻力的完整解释仍然困惑着那些对减阻技术或湍流控制有兴趣的研究者。

关于沟槽的减阻机理, Bacher 和 Smith^[9]通过流动可视化技术观察到了沟槽表面形成的条带结构比光滑平板上形成的条带结构更宽, 他们推测沟槽

基金项目: 国家自然科学基金(11272233), 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB720101), 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联合资助项目

作者简介: 李山(1988-), 研究方向: 实验流体力学 E-mail: lishan@tju.edu.cn

尖峰诱导产生的二次涡削弱了流向涡并抑制了展向条带结构的形成,这限制了湍流展向上的动量交换。Choi^[10]从展向有效黏度的增加和黏性底层增厚的角度探讨了沟槽的减阻机理,这类似于与高分子溶液减阻的情况。接着 Choi^[11]基于对流动显示地扩展研究对湍流边界层近壁结构提出了一个新的观点。他认为沟槽对流向涡展向运动的限制占据了湍流减阻的一大部分。但哪种说法更为准确,现在还不得而知。

本文源于顺流向 V 型沟槽对壁湍流流场中的多尺度相干结构进行被动控制的思想,通过实验研究沟槽壁面及光滑壁面湍流边界层中的流动结构。利用低速回流式水槽、借助 TR-PIV 系统精细测量沟槽壁面及光滑壁面湍流边界层的流场速度信息,得到二维瞬时速度场空间分布的时间序列。并将湍流多尺度相干结构的概念引入到沟槽壁面减阻机理的研究过程中。以湍流边界层瞬时流向脉动速度子波系数作为特征量,对原始速度进行不同尺度的子波变换,结合新象限分裂法检测并提取了两种不同粗糙度壁面湍流边界层中不同位置处相干结构法向脉动速度分量、展向涡量的统计特征,从控制湍流多尺度相干结构动力学的角度研究沟槽壁面的减阻机理。

1 实验方案

实验在 SZ-2 型开口式低速循环水槽中进行。实验段长 130cm,宽 14cm,深 15cm,其流速在 0~0.4m/s 范围内连续可调,水槽中心的背景湍流速度小于 3.5%,流场均匀度为 0.6%。平板尺寸为 1200mm×138mm×9mm(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边界层,距板前缘 7.5cm 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。



图 1 沟槽模型横截面示意图

Fig 1 Cross-section schematic diagram of the riblets plate

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。

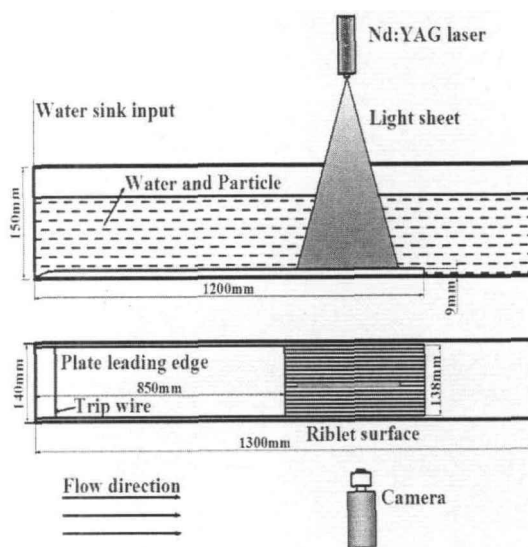


图 2 实验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the experimental configuration

实验时水槽自由来流速度控制在 0.19m/s,高速相机采样频率为 250Hz,每次记录图像 6001 张。图像视野范围约为 11cm×9cm(流向×法向)。对原始粒子图像进行后最终在 x-z 平面内共得到 157×125(流向×法向)个二维瞬时速度矢量场息。

2 实验结果及分析

天津大学流体力学实验室曾利用新象限分裂法及新条件采样和相位平均技术对光滑壁面和沟槽壁面湍流边界层对数区相干结构猝发事件的二维空间拓扑形态进行对比研究^[12-15], 本文将分别给出近壁区及外区的相干结构喷射和扫掠事件中的脉动速度、脉动涡量的二维拓扑形态, 并与对数区所得结论做对比, 分析沟槽结构的影响范围。

2.1 法向脉动速度

图3分别给出了沟槽壁面和光滑壁面湍流边界层分别在壁面法向位置 $y^+ = 25, 97, 145$ 处相干结构在喷射和扫掠过程中法向脉动速度分量的二维拓扑形态。从图中可以看出, 与光滑平板相比, 无论是喷射事件还是扫掠事件, 三个位置的法向脉动速度强度都有很大程度降低。这说明沟槽结构有效削弱了近壁湍流相干结构的法向脉动, 使相干结构喷射和扫掠的脉动强度显著降低。

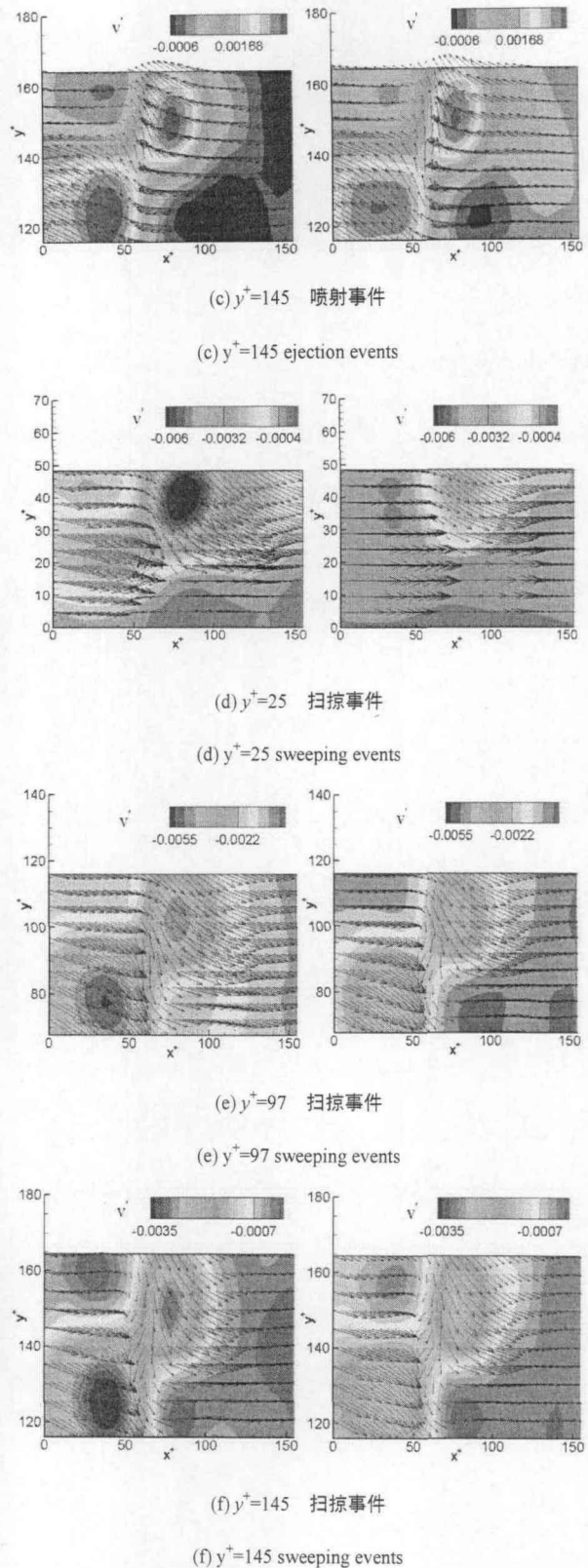
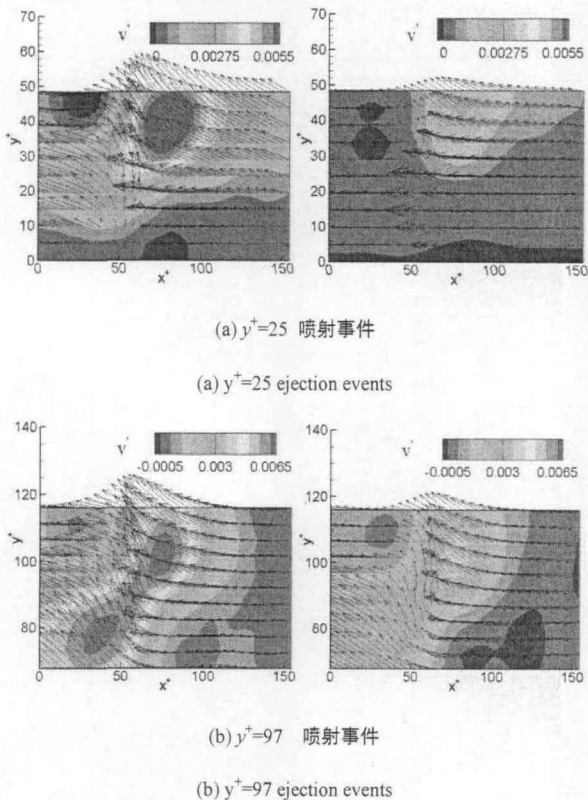


图3. 不同法向位置处喷射和扫掠事件法向脉动速度云图

(左: 光滑壁面; 右: 沟槽壁面)

Fig 3. Contours of the wall-normal fluctuating velocity during ejection and sweeping events at different positions (left: smooth plate; right: riblets plate)

图3(a)(b)(c)喷射事件的结果显示: 法向速度脉动明显减弱, 近壁区比 $y^+ = 145$ 外区效果明显。而对

扫掠事件的影响则延续到了外区。壁面粗糙度有效降低了湍流边界层中流体法向运动的震荡程度,使得流体趋于平缓。扫掠事件法向速度脉动强度的大幅度降低也说明沟槽主要抑制流体的法向脉动来实现减阻。

2.2 展向涡量

图 4 分别给出了沟槽壁面和光滑壁面湍流边界层分别在壁面法向位置 $y^+ = 25, 97, 145$ 处相干结构在喷射和扫掠过程中展向涡量的二维拓扑形态。

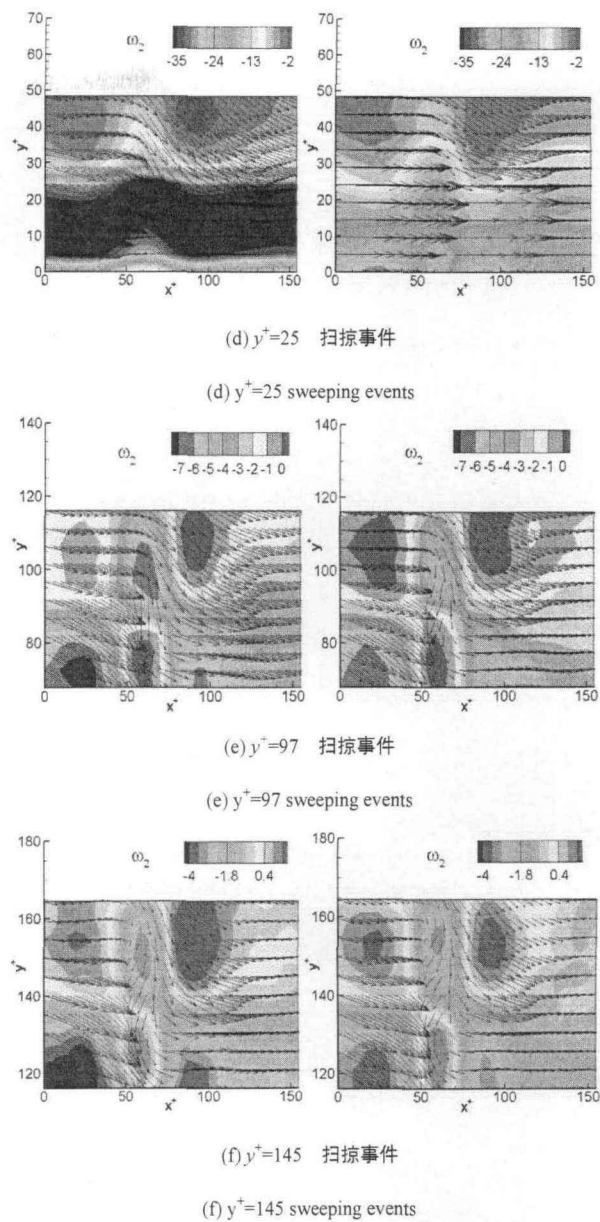
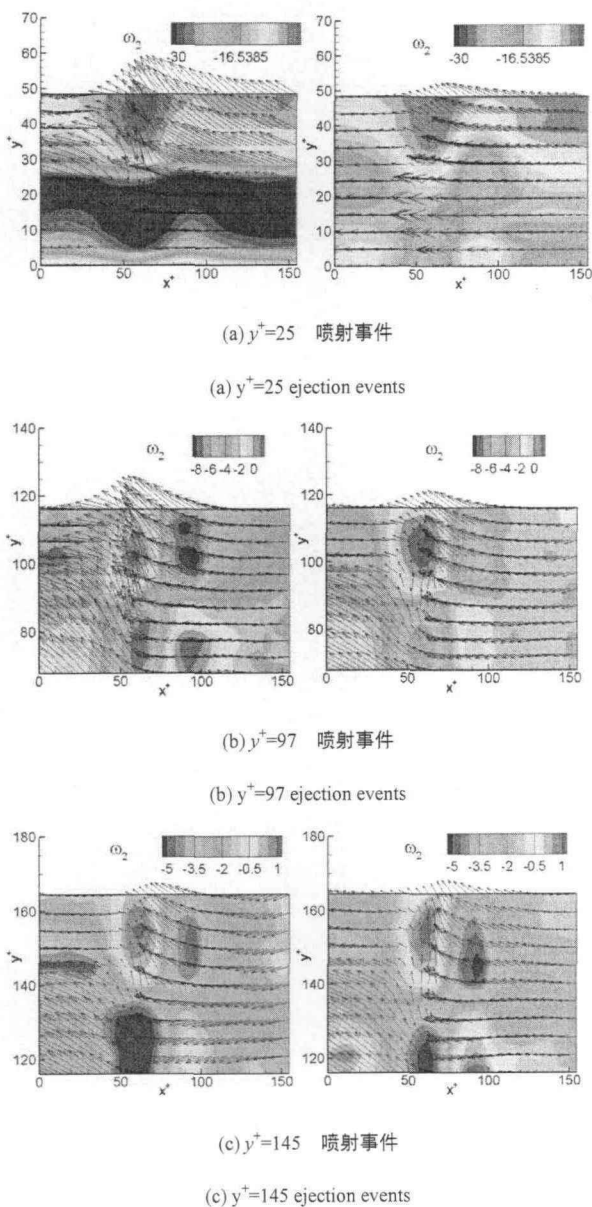


图 4. 不同法向位置处喷射和扫掠事件展向涡量云图

(左: 光滑壁面; 右: 沟槽壁面)

Fig 4. Contours of the spanwise vorticity during ejection and sweeping events at different positions (left: smooth plate; right: riblets plate)

从图中可以看出,与光滑平板相比,沟槽壁面上展向涡量正负极值都相对减弱,高速流体与低速流体速度差异减小,旋转强度降低。由图 4(c)可以看出近壁区和对数区降低最为明显,而到外区沟槽的影响减弱。

从相干结构猝发事件的展向涡量云图也可以看出,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猝发事件的展向涡量相比于

光滑壁面有一定程度的减弱。意味着近壁区内流动不稳定性的减弱，而流动的不稳定性是近壁区低速条带向外层猝发的根源。说明该法向位置处涡强减弱，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。

3. 结论

本文采用新象限分裂法检测，使用新条件采样和相位平均方法提取得到了沟槽及光滑壁面湍流边界层中多尺度相干结构法向脉动速度分量及展向涡量的二维拓扑形态。结果发现：与光滑壁面相比，不论喷射过程还是扫掠过程，减阻沟槽壁面各物理量的幅值均明显降低，强度减弱，其中法向脉动速度削弱效果最明显。这证实了沟槽壁面有效削弱了近壁区湍流相干结构在喷射和扫掠过程中的法向脉动强度，抑制了沿法向的动量和能量交换，使得高速流体尽量沿壁面平行流动。进入外区以后，减阻效果逐渐减弱，说明沟槽主要影响湍流边界层内区结构，且以影响其扫掠事件法向脉动为主。

参考文献:

[1] Kline, S. J. et al. The structure of turbulent boundary layers. *J Fluid Mech.* 1967, 30:741-773.

[2] Brown G L, Roshko A. On density effects and large structure in turbulent mixing layers. *J. Fluid Mech.* 1974, 64: 775-816.

[3] Walsh M J. Drag characteristics of V-groove and transverse curvature riblets. *Viscous Drag Reduction*, 1980, 168-184.

[4] Walsh M J. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets. *AIAA Paper* 82-0169.

[5] Walsh M J., Lindemann A M. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction. *AIAA Paper* 84-0347.

[6] Walsh M J, Weinstein L M. Drag and heat transfer with small longitudinal fins. *AIAA Paper* 78-1161.

[7] Sawyer W G, Winter K G. The effect of turbulent skin friction of surfaces with stream-wise grooves. *Proc. European Meeting on*

Turbulent Drag Reduction, Lausanne (see also Savill et al. 1988).

[8] Savill A M., Truong T V, Rhymining I L. Turbulent drag reduction by passive means : a review and report on the first European drag reduction meeting. *J. Mic.Theor. Appl.* 7,353.

[9] Bacher E V, Smith C R. Turbulent boundary-layer modification by surface riblets. *AIAA J.* 1986, 24:1382-1385.

[10] Choi, K.-S. A survey of the turbulent drag reduction using passive devices. *NMZRep. R-193.* NMI Ltd, Feltham, Middlesex, UK.

[11] Choi, K.-S. Near-wall turbulence structure on a riblet wall. *BMT Rep.* BMT Ltd, Feltham, Middlesex, UK.

[12] 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.

[13] Yang S Q, 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

[14] 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.

[15] 李山, 杨绍琼, 姜楠. 沟槽面湍流边界层减阻的 TRPIV 测量. *力学学报*, 2013, 45(2): 183-192.

Hierarchical visualization of spanwise coherent structures of turbulent boundary layer over a drag-reducing riblets surface

Li Shan¹, Yang Shaoqiong¹, Tian Haiping¹, Wang Qingyi¹, Jiang Nan^{1,2,3}

(1. *Department of Mechanics of Tianjin University, Tianjin 300072, China;*

2. *Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin 300072, China;*

3. *State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China*)

Abstract: The 2D-2C instantaneous time-series of the velocity field in turbulent boundary layer over V-grooved riblets surface and smooth surface was measured respectively by TR-PIV measurement system. Based on the former results of logarithmic region^[15], the two-dimensional topology of vertical fluctuating velocity and spanwise vorticity in the near-wall region and outer region was studied with the improved quadrant-splitting method. Results showed that: compared with the smooth plate, both for ejection and sweeping events, the vertical fluctuating velocity over drag-reducing riblets surface decreased obviously, namely the momentum and energy exchange along the wall-normal direction as well as its contribution to turbulence weakened consequently. In the outer region, however, the effects both on vertical fluctuating velocity and spanwise vorticity caused by drag-reducing riblets plate were smaller than inner region, indicating that the inner region of turbulent boundary layer was affected by riblets, especially the vertical fluctuating velocity during the process of sweeping events.

Key words: TBL, Drag-reducing riblets, Improved splitting method, TR-PIV, Coherent structure