

文章编号: 1000-6893(1999)05-0409-07

利用 PIV 技术对非光滑表面湍流边界层的实验研究

王光华, 刘宝杰, 刘涛, 高歌
(北京航空航天大学 404 教研室, 北京 100083)

PIV STUDY OF NON-PLANAR SURFACE TURBULENT BOUNDARY LAYERS

WANG Guang-hua, LIU Bao-jie, LIU Tao, GAO Ge
(Faculty 404, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 利用在线式 PIV 系统在低速风洞中对两种非光滑表面: 阵列涡发生器表面和波纹壁面的湍流边界层进行了实验测量。观察到了壁面几何形状的改变对非光滑表面湍流边界层拟序结构的产生和发展的影响: 阵列涡发生器表面 (10m/s) 湍流边界层内有明显的双剪切带状结构, 外剪切带状结构接近边界层的外边界, 小尺度的涡在内剪切带状结构的附近产生; 波纹壁面 (20m/s) 湍流边界层内涡的尺度比较小。并在相同的壁面几何形状条件下, 在不同的流动工况下, 研究了非光滑表面对湍流边界层拟序结构的影响。实验结果表明, 壁面几何形状的改变对外层的大尺度横向涡的产生和发展有明显的影响; 而这种影响效果在不同的流动工况下相差很大。

关键词: 湍流边界层; 剪切层; PIV

中图分类号: O 357. 4 **文献标识码:** A

Abstract Detailed 2D flow fields in low speed wind tunnels are measured with on-line PIV to study the flow structures in the zero-pressure gradient turbulent boundary layer of two non-planar surfaces: the vortex generator surface and the wavy surface. Some typical coherent structures are identified from instantaneous streamwise wall-normal velocity fields, from which vorticity and strain rate fields are also calculated. The influence of flow speed on flow structures in the turbulent boundary layer is investigated. Two distinct and regular shear layers are observed in the boundary layer for the vortex generator surface at 10m/s. The small-scale vortices are generated near the inner shear layer. The wavy surface (at 20m/s) will generate smaller scale vortex than the smooth plate. It is shown that wall surface geometrical structure can greatly influence the generation and development of large-scale transverse vortex. This effect varies significantly with different flow conditions.

Key words: turbulent boundary layer; shear layer; PIV

减阻是人们一直在积极从事研究的课题之一, 其应用范围极其广阔, 由于在工程上到处都存在着粘性流动, 减阻技术的应用将能够直接为节约能源、提高效率服务。壁面几何形状的不同将导致不同的边界层, 而不同的边界层又有着不同的流动机理和运动特征, 流场中的拟序结构也表现出多种特征, 这也决定了人们研究时的侧重点。对于以改变壁面形状为主的被动式减阻方法, 已经取得了比较成功的结果, 如流向沟槽 (Riblets) 等^[1]。如何改变壁面几何形状来控制 and 改变湍流边界层中的拟序结构以实现减阻, 也是近年来减阻研究领域的一个主要方向。

现有的研究表明, 在边界层中可以明显

地观测到各种相似过程的重复性^[2]。而且这些重复性在展向和流向都具有明显可辨识的平均间距。尽管对于这种拟序结构所提出的模型因人而异, 但都承认这种结构并非是完全随机的。拟序结构显然与流场湍动的产生和消失有关, 所以要真正弄清湍流边界层的机理, 就必须研究湍流边界层中的拟序结构。边界层拟序结构研究的核心内容应是对各种涡结构和流动结构的检测和刻划。

以微机械控制 (MEMS: Microelectromechanical-System) 为代表的新一代主动控制技术的出现, 为流动控制研究开辟了一个崭新的领域。Kim^[3]借助于 DNS (Direct Numerical Simulation) 模拟, 通过控制流向涡来改变低 Re 数管流中边界层的流动结构, 达到了减阻的目的。Chih-Ming^[4]在 MEMS 领域作了实际的应用研究。主动控制技术的关键问题之一是控制规律的

制定。控制边界层中的何种拟序结构,才能达到付出最小而获益最大,也是近年来边界层控制研究的一个重要方向。因此,无论是对湍流边界层的理论研究,还是对湍流边界层的流动控制和减阻研究,都需要对湍流边界层中的拟序结构有一个更加清楚的认识和理解。

PV 是在流动显示技术的基础上,利用图像处理技术发展起来的一种新的流动测量技术^[5]。PV 技术的主要特点就是突破了空间单点测量技术的局限性,可在同一时刻记录下整个测量平面的有关信息,从而可以获得流动的瞬时平面速度场、脉动速度场和涡量场等。因此 PV 非常适于研究涡流、湍流等复杂的流动结构。同时现在的 PV 系统还具备了与单点测量仪器(如多普勒激光测速仪 LDV 等)相当的空间分辨率。因此即使仅限于二维测量, PV 也是一种先进的研究复杂流动的定量工具。近年来利用 PV 技术对于湍流边界层的实验研究,在以往定性的流动观察的基础上,又有了一些新的认识,如 Meinhart 和 Adrian^[6]对于平板边界层的 PV 实验研究等。

本文利用在线式 PV 系统,在低速风洞中,对两种非光滑表面:阵列涡发生器表面和波纹壁面进行了实验研究。观察到了壁面几何形状的改变对非光滑表面湍流边界层拟序结构的产生和发展的影响,以及在相同的壁面几何形状条件下,流动工况的变化对非光滑表面湍流边界层的影响。

1 实验设备和实验方案

1.1 实验设备简介

实验设备主要由低速风洞、PV 系统和示踪粒子发生器等几部分组成^[7,8]。实验所用的直流式多功能低速风洞采用后部吸气方式,稳定风速范围为 10~80 m/s,风洞的矩形切角闭口式实验段尺寸为 0.56 m × 0.8 m × 1.5 m。以 HP3852S 数据采集/控制系统为核心,以计算机为监控器的风洞测控系统,通过专用的风洞控制采集和数据处理程序,来实现风洞控制、数据采集和数据处理的自

动化。

实验中所采用的在线式 PV 系统如图 1 所示。

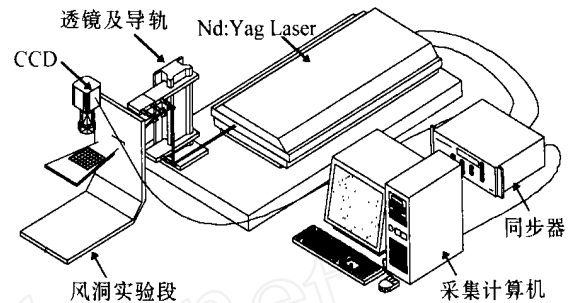


图 1 PV 系统示意图

示,以脉冲式双 Nd:Yag 激光器为光源,激光器的工作频率为 10 Hz,可见光波长 532 nm,每个脉冲能量 200 mJ,脉冲宽度 9 ns。采用 RS-170 式互/自相关 CCD 作为图像记录系统,其分辨率为 768 像素 × 484 像素,采集速度 30 帧/秒,每两帧图像之间的最小时间间隔约为 20 μs。采用同步器使激光器系统和 CCD 相匹配,在同步器上设置激光的工作方式(双脉冲式)、CCD 的工作方式、脉冲的延迟时间和双脉冲的时间间隔等。CCD、同步器和激光器的工作时钟匹配如图 2 所示。其中每帧的时间为 1/30 s,脉冲延迟为 83.27 ms,脉冲间隔为 30 μs(根据实验要求设置)。系统工作时,CCD 的帧同步信号是主同步信号,同步器通过捕捉 CCD 的脉冲信号,然后根据所设定的脉冲延迟时间和间隔时间来控制激光器发光。受激光器的工作频率(10 Hz)的限制,系统的最大图像采集率为 20 帧/秒。由于互相关需要两帧图像来进行图像分析,这样系统最大采样率为 10 个速度场/秒。实验采用一个由球面镜(FL: 1000 mm)和柱面镜(FL: 200 mm)组成的光学组件,将激光变为所需的片光。在 CCD 的采集区域内,片光的厚度小于 1.0 mm。在图像处理中采用了互相关分析方法, PV 系统的控制和分析软件为 TSI 公司 Windows NT 4.0 下的图像采集和后处理软件: Insight NT。

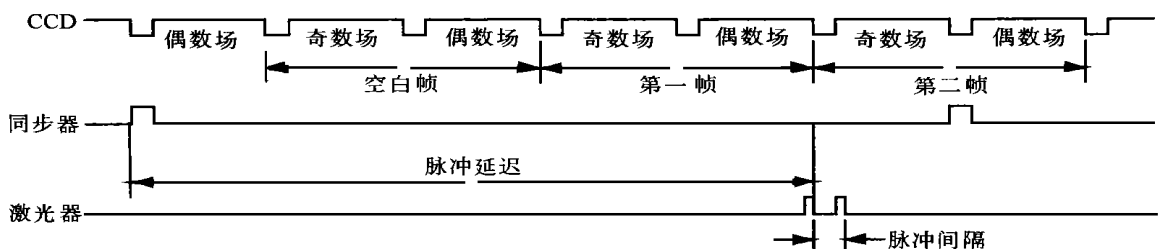


图 2 PV 系统工作时钟示意图

在运用 PIV 等激光系统进行流动测量时, 成功的示踪粒子产生与散播是获得理想测量结果的保障。本实验中所采用的 L Z L 型粒子发生器是针对 PIV 测量合作开发的, 其基本原理是通过物料的蒸发冷凝产生粒子, 生成粒子直径约为 $0.6 \sim 1.2 \mu\text{m}$, 可以满足实验测量的需要。同时生成粒子具有无危害、不污染设备和良好的经济性等优点。实验中示踪粒子从风洞的入口处加入, 既保证了粒子在测量域内的均匀散播, 同时又不干扰流场。

1.2 实验方案

实验平板长约 1000mm, 厚为 6mm, 在平板的前缘有半楔形的过渡段。实验风速为 10m/s 和 20m/s , PIV 采集域距前缘的距离约为 $x = 700\text{mm}$, 实验设置如图 3 所示, 实验编号如表 1 所示。

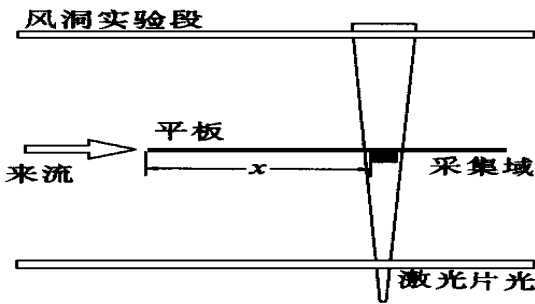


图 3 边界层实验示意图

表 1 边界层实验结果编号

编号	表面	$U / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Re_x
BL-1	光滑平板	10.0	5.693×10^5
BL-2	光滑平板	20.0	11.387×10^5
BL-3	阵列涡发生器表面	10.0	5.693×10^5
BL-4	阵列涡发生器表面	20.0	11.387×10^5
BL-5	波纹表面	10.0	5.693×10^5
BL-6	波纹表面	20.0	11.387×10^5

实验对两种不同表面: 阵列涡发生器表面和波纹壁面边界层进行了 PIV 测量。阵列涡发生器表面的几何参数为: 高 1.5mm, 长 2.5mm, 尾部宽度 1.0mm。涡发生器的排列方式: 展向间隔 5mm, 流向间隔 15mm, 相邻两排交错排列, 如图 4 所示。波纹表面, 如图 5 所示, 在加速流中具有减阻效果, 其流向的剖面曲线不对称, 使用时有正反之分^[9]。

实验中 CCD 像素分辨率 $3460 \mu\text{m}/\text{像素}$, 采集区域大小为 $22.14 \times 16.61 \text{mm}^2$ 。用于互相关分析的两帧图像的时间间隔为 $30 \mu\text{s}$ 。在图像分析时, 查问域为 $64 \text{像素} \times 64 \text{像素}$ 。

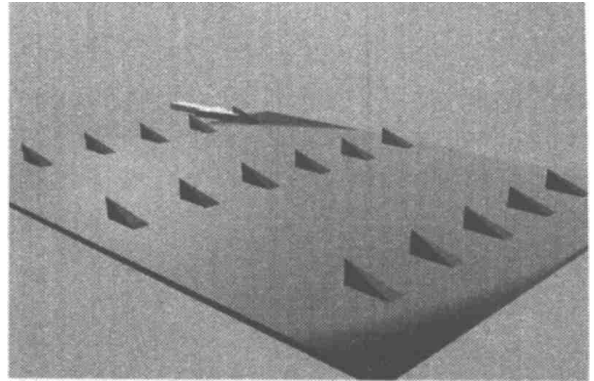


图 4 阵列涡发生器表面 VGS

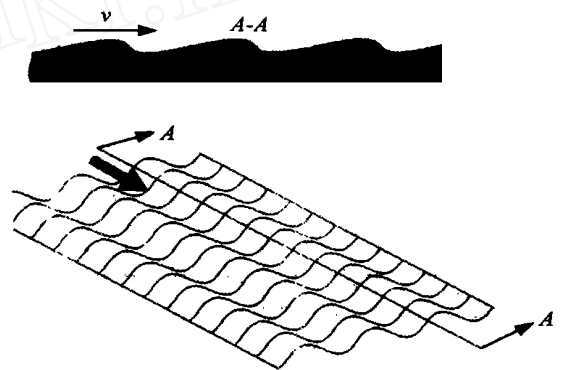


图 5 波纹表面 WS

2 实验结果分析和讨论

由于实验的 Reynolds 数比较高, 平板边界层在测量位置之前已经发展为湍流边界层。关于湍流边界层的拟序结构的特征、生成、发展和演化等研究, 目前还主要依靠实验手段。由于当前 PIV 系统的工作频率还比较低, 还不能进行湍流边界层内拟序结构的实时测量, 因此 PIV 所得到的测量结果实际上是所研究的实际流动现象的时间离散结果。一般在利用 PIV 技术研究复杂的流动现象时, 每一测量截面通常要采集几十帧甚至几百帧图像。本实验中对于每一工况采集了 150 帧图像 (75 个速度场), 由于篇幅所限, 在下面的分析过程中只给出了有代表性的实验结果, 详细的结果及分析见文献 [9]。在下面的图中, T_{xy} 代表剪切应变变化率。

2.1 实验数据的统计分析

湍流边界层的外层占整个边界层厚度的 80% ~ 90%。其主要的优点是: 粘性应力已经小到可以忽略, 几乎完全由 Reynolds 应力来维持当地的平均速度梯度。外层的速度亏损 $u-u_e$ 反映了那里有效的剪切速度。根据量纲分析外层的速度分布服从速度亏损率 (尾迹率), 类似尾迹流动的特

点。

对采样得到的多幅速度场进行平均,对比了光滑表面、阵列涡发生器表面和波纹表面在 20m/s 时的速度剖面,如图 6 所示。几种不同的表面,虽然壁面形状相差很大,但基本上都符合速度亏损率的速度剖面形状。这与以往的实验研究结果是一致的:对于平板流动,速度亏损率函数与壁面的粗糙度无关。

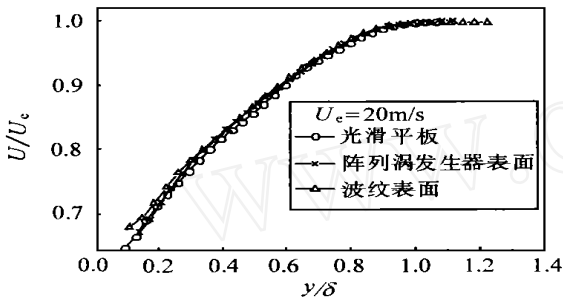


图 6 速度剖面对比

2.2 瞬时速度场结构分析

(1) 阵列涡发生器湍流边界层瞬时速度场分析 阵列涡发生器表面 10m/s 的几幅典型瞬态流场如图 8 所示,对比相同工况下的光滑平板的实验结果(如图 7),主要有如下的特点:在边界层

的外层中没有明显的大尺度横向涡,且明显存在两条剪切带状结构。这里所说的剪切带状结构,在流量和剪切应变变化率的等值图上表现为这些量值的条带状分布,内外剪切层的剪切应力数值比较接近,且均为正的大剪切应力。外剪切带状结构接近边界层的外缘,一般沿流向是倾斜的,并表现出流动不稳定性;而较小尺度的横向涡在内剪切带状结构附近形成,其分布一般平行于流向。

涡发生器可将底层的横向涡、较大尺度的流向涡结构破坏,而且涡发生器本身也将产生较小尺度的流向涡。在上述这些涡的作用下,将使边界层底部的低速流体与涡发生器上部较高速度的流体之间产生比较强的质量、动量和能量交换,以致使近壁与涡发生器尺度相当处的流体的速度降低,表现为图中的内剪切带状结构。

剪切层的存在,一般将导致新的流动不稳定性,促使新的涡产生。因此,在内剪切带状结构附近,产生了新的小尺度的横向涡。但是外剪切带状结构仅在与内剪切带状结构靠得比较近时,才有新的、比较大的横向涡产生。阵列涡发生器对边界层底层的干扰,应是 10m/s 的边界层外层没有比较明显的大尺度横向涡的直接原因。这也说明了边界层外层中的大尺度横向涡的产生与发展是与

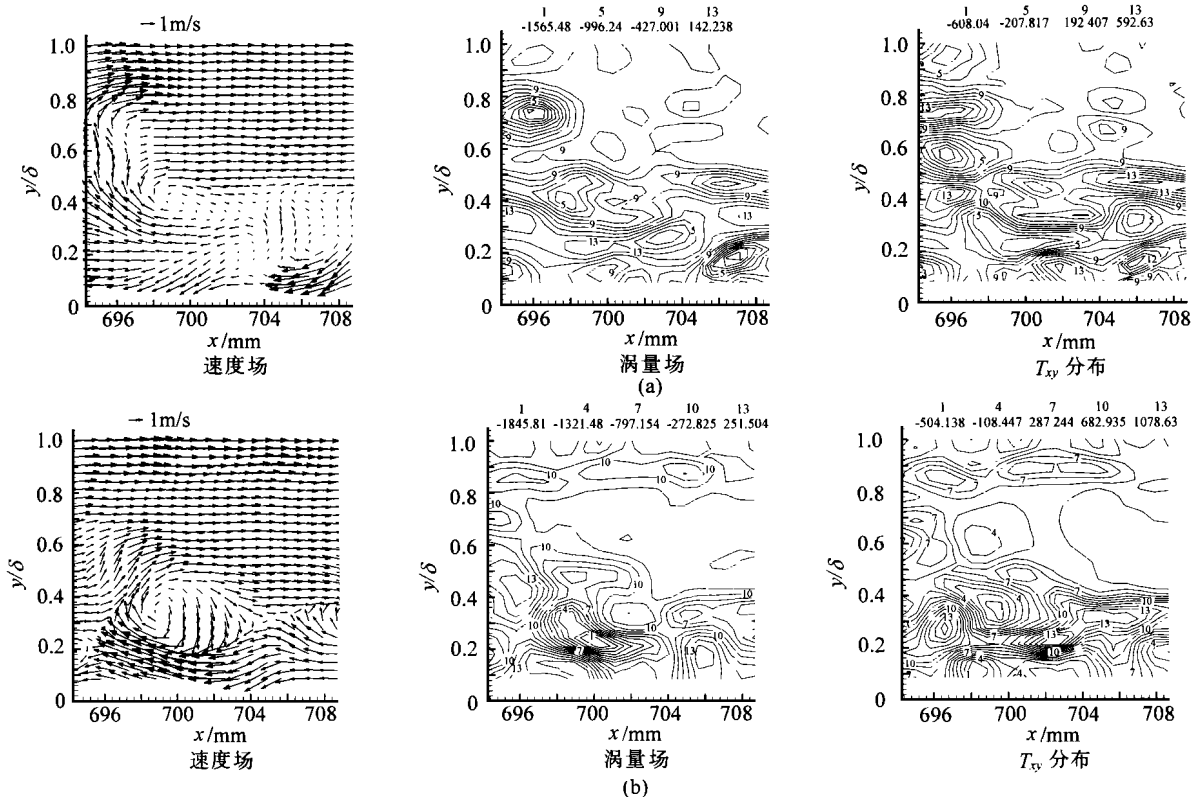


图 7 工况BL-1 瞬态流场图

(a) 瞬态 1; (b) 瞬态 2

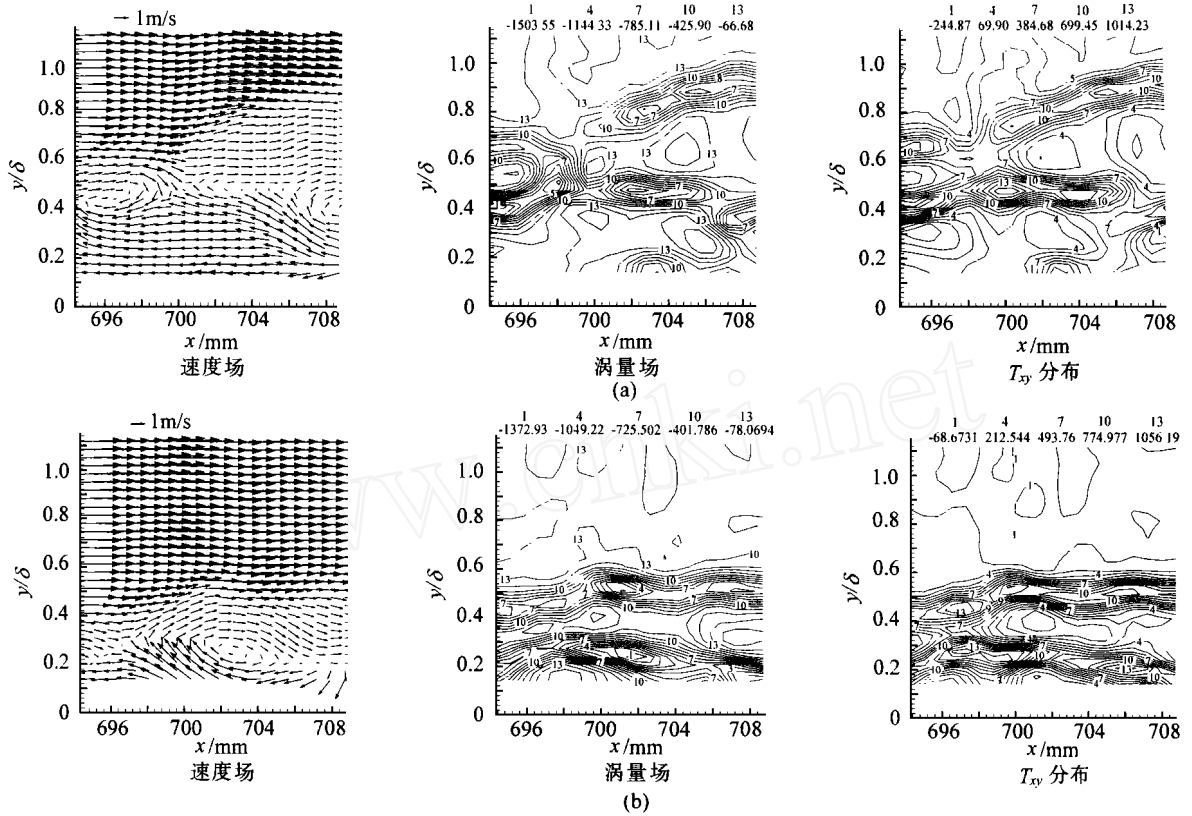


图 8 工况 BL-3 瞬态流场图
(a) 瞬态 1; (b) 瞬态 2

底层的流动结构密切相关, 改变壁面的几何形状可以影响这些大尺度横向涡的产生与发展。

在 20m/s 的情况下, 所测得的流场中无双剪切带状结构, 且流场结构比较混乱。导致上述现象的原因应是随流速的增加, 涡发生器的作用加强, 使横向大尺度的涡结构难以生成和发展, 因此边界层在总体上呈现出不规则的形态。

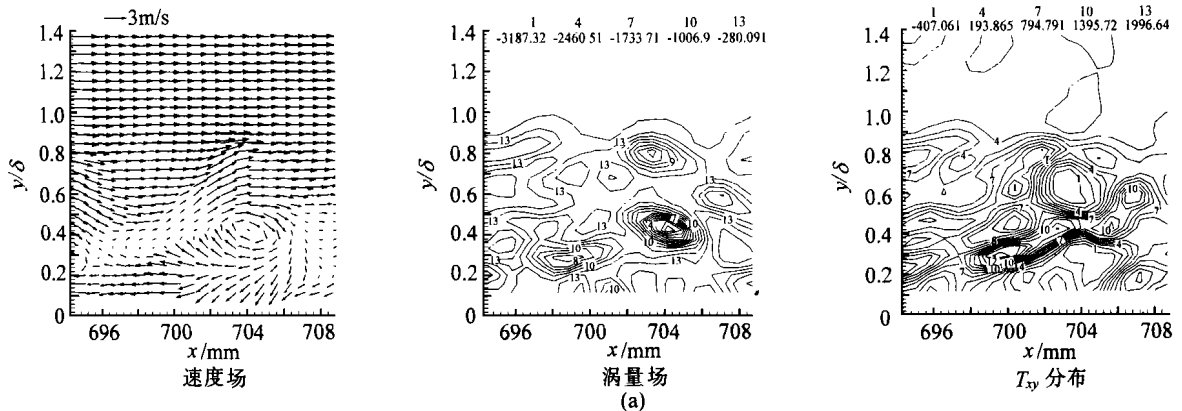
(2) 波纹表面湍流边界层瞬时速度场分析

10m/s 的波纹表面湍流边界层瞬时流动结构基本与平板湍流边界层的情况类似^[8]。

波纹表面 20m/s 的几幅典型瞬态流场如图 10 所示, 对比相同工况下的光滑平板的实验结果

(如图 9), 主要有如下的特点: 在边界层的外层中虽然也存在尺度比较大的横向涡, 但其尺度却比较小。在 0.4δ 处存在一薄剪切层, 以及小尺度的多涡结构。

由于 20m/s 时边界层的底层厚度比 10m/s 的情况小, 因此在相同的壁面特征参数条件下 20m/s 的边界层更易受到壁面几何形状改变的影响。这也表明, 不同的壁面形状参数(如波纹的特征尺度和形状等), 在不同的情况下(如 Re 数的不同等), 对边界层的影响是复杂的, 同时也表明了被动式的流动控制措施的适用条件是有限的。



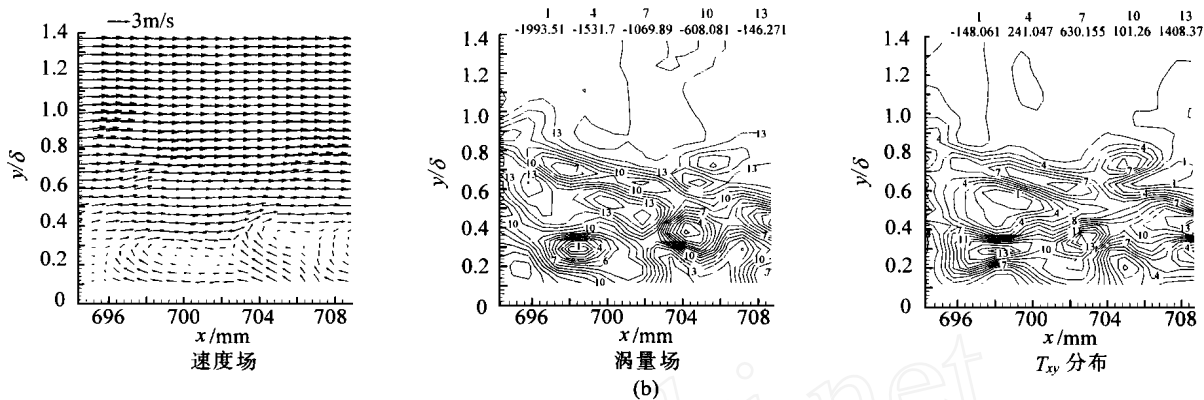


图9 工况BL-2瞬态流场图

(a)瞬态1; (b)瞬态2

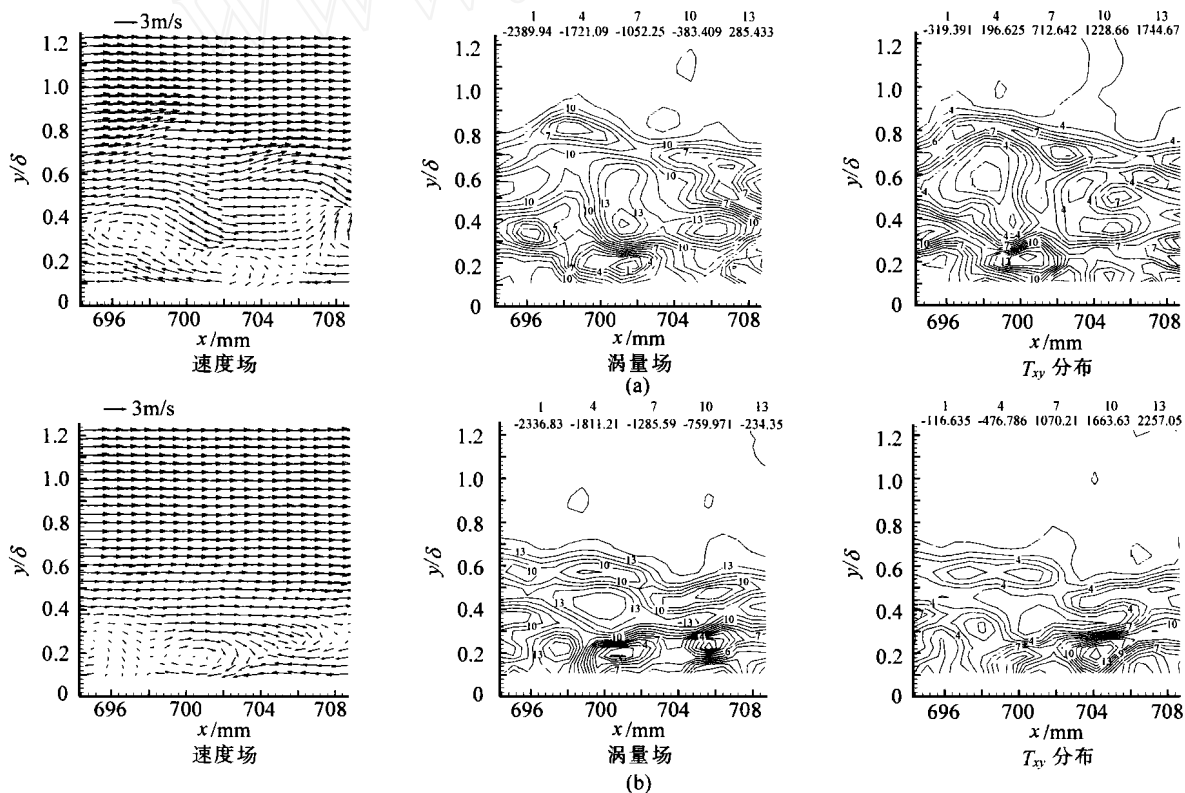


图10 工况BL-6瞬态流场图

(a)瞬态1; (b)瞬态2

3 结论

在低速风洞中利用在线式PV系统对较大Re数下的零压力梯度阵列涡发生器表面以及波纹表面的湍流边界层的流动结构进行了实验研究,这些结果表明:

在10m/s的阵列涡发生器表面的湍流边界层内有明显的双剪切带状结构。外剪切带状结构接近边界层的外边界,小尺度的涡在内剪切带状结构的附近产生。对于20m/s的波纹壁面,其边界层内涡的尺度比同等条件下光滑平板边界层涡

的尺度小。

壁面几何形状的改变,可以影响边界层外层的大尺度横向涡的产生和发展。相同壁面几何形状,在不同的工况下对湍流边界层的影响不同。

参 考 文 献

[1] Bushnell D M. Turbulent drag reduction for external flows [R]. AIAA-83-0027, Reno, NV: AIAA, 1983
 [2] Robinson S K. Coherent motions in the turbulent boundary layer[J]. Annu Rev Fluid Mech, 1991, 23: 601~ 639.
 [3] Kim J. Numerical experiments for flow control[A]. In: International workshop on new directions for fluid

- mechanics[C]. Beijing: 1997.
- [4] Chih-Ming H. Micron fluid dynamics [A]. In: International workshop on new directions for fluid mechanics[C]. Beijing: 1997.
- [5] Adrian R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics[J]. Annu Rev Fluid Mech, 1991, 23: 261 ~ 304.
- [6] Meinhart C D, Adrian R J. Measurement of the zero-pressure gradient turbulent boundary layer using particle image velocimetry [R]. AIAA-95-0789, Reno, NV: AIAA, 1995.
- [7] 刘宝杰, 王光华, 袁辉靖, 等. PIV在低速风洞中的应用[J]. 流体力学实验与测量, 1998, 12(2): 55~ 63.
- [8] 王光华. 湍流剪切流研究和子波分析应用[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1998.
- [9] Ge Gao, Chow W L. Drag reduction in accelerating Flow [J]. AIAA J, 1992, 30(8): 2155~ 2156.

作者简介:

王光华 26岁, 研究兴趣: 湍流剪切流的实验研究; 湍流边界层的减阻研究, 湍流剪切流的控制; 子波分析在实验流体力学信号处理中的应用研究; PIV技术在流体力学中的应用研究。

联系电话: 64561122-6537, 68154499-38278 (BP), Email: RP35@ameco.com.cn

www.cnki.net