

文章编号: 1000-8055(2008)05-0788-08

沟槽壁湍流多尺度相干结构实验研究

常跃峰^{1,3}, 姜楠^{1,2}

- (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. 山东工商学院, 烟台 264005)

摘 要: 应用热线测速技术, 对沟槽壁面平板湍流边界层的减阻机理进行了实验研究. 测量了风洞中并排放置的沟槽壁面平板及光滑壁面平板湍流边界层在不同雷诺数下不同法向位置的瞬时流向、法向速度分量的时间序列信号. 运用流向速度分量信号的多尺度子波系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了壁湍流多尺度相干结构喷射和扫掠时流向速度分量、法向速度分量和雷诺应力分量的相位平均波形. 分析了沟槽壁面平板及光滑壁面平板湍流边界层中多尺度相干结构的持续时间、条件相位平均波形等特征. 对沟槽壁面平板及光滑壁面平板湍流边界层多尺度相干结构的多种统计平均特征进行了比较, 从壁湍流多尺度相干结构控制的角度研究了沟槽壁面平板湍流边界层的减阻机理.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 壁湍流; 多尺度相干结构; 子波变换; 沟槽壁面; 减阻

中图分类号: O357

文献标识码: A

Experimental study on coherent structure passive control and drag reduction in turbulent boundary layer with grooved surface

CHANG Yue-feng^{1,3}, JIANG Nan^{1,2}

- (1. Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
- 2 Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin 300072, China;
- 3 Shandong Institute of Business and Technology, Yantai 264005, China)

Abstract: The measurement technique of constant temperature anemometry was used to study experimentally the mechanism of drag reduction in turbulent boundary layer with riblet surface. Time sequence signals of longitudinal velocity component and normal velocity component across turbulent boundary layer in the wind tunnel over riblet surface and smooth surface have been finely measured by IFA300 constant temperature anemometer with resolution higher than Kolmogorov scale, together with single hot-wire sensor probe and double hot-wire sensor probe. The ejection and sweep process of coherent structure burst event were identified by wavelet coefficients of longitudinal fluctuating velocity component. Phased average waveforms of longitudinal and normal fluctuation velocity, as well as Reynolds stress component of coherent structures burst in turbulent boundary layer were extracted by the conditional sampling technique. The statistic characteristics of coherent structure, such as burst period, phased average waveforms over riblets surface and smooth surface turbulent boundary layer were compared to clarify the effect of drag reduction over V-grooved

收稿日期: 2007-05-10; 修订日期: 2007-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(10472081), 教育部高等学校新世纪优秀人才支持计划, 天津市科技发展计划(06TXXJJ13800)

作者简介: 常跃峰(1965-), 男, 山东阿县人, 博士生, 主要从事湍流及其控制的实验研究.

riblets surface. The mechanism of drag reduction in turbulent boundary layer over V-grooved riblets surface was studied from the view of multi-scale coherent structure passive control.

Key words: aerospace propulsion system; wall turbulence, multi-scale coherent structure, wavelet transform, riblet surface, drag reduction

湍流边界层是自然界和工程技术中典型的湍流流动形态之一,工程技术中大量的湍流问题与湍流边界层密切相关.相对于层流边界层,湍流边界层使壁面摩擦阻力大幅度增加,壁面烧蚀严重,能耗和壁面振颤加剧,机械效率下降,从而对系统和结构物的安全和可靠性构成严重威胁.因此,从机理上分析湍流边界层中的流动结构及其形成原因,进而提出控制湍流边界层的有效方法成为湍流控制的前沿课题,而控制湍流边界层的主要目的之一就是减小壁面摩擦阻力,降低能耗,所以研究湍流边界层减阻意义重大.

有关减阻的研究可追溯到20世纪30年代,但直到60年代中期,研究工作主要是减小表面粗糙度,隐含的假设是光滑表面的阻力最小. NASA 兰利研究中心的研究人员发现顺流向的微小沟槽表面能有效地降低壁面摩擦阻力,突破了表面越光滑阻力越小的传统思维方式. NASA 兰利研究中心的 Walsh 及其合作者最先开展了沟槽平板湍流减阻的研究^[1-3], Bacher 和 Smith^[4]通过对流速分布的测量,利用边界层动量积分公式得到了25%的静减阻.采用同样的方法, Gallagher 和 Thomas^[5]的研究结果表明只在沟槽板的后半部分阻力有所减小,但总的阻力几乎不变. Coustols^[6]得到了10%~15%的减阻,且当沟槽的偏航角 $\beta \leq 20^\circ$ 时仍有较好的减阻效果. Park 和 Wallace^[7]用热线风速仪详细测量了沟槽内的流向速度场,通过对沟槽壁面摩擦切应力的积分,得到了大约4%的减阻.20世纪90年代, Bechert D W^[8]对高度可调的细薄肋形沟槽面进行研究并获得9.9%的减阻效果,从而认为具有适当高横比的细薄肋形沟槽面才是最佳减阻几何形状.然而,由于制造工艺相对复杂,大部分针对沟槽面减阻技术的研究仍然集中在传统的对称V型沟槽表面上.早期人们一般利用测力天平等设备直接测量壁面阻力评价沟槽壁面的减阻效果.

几年来,为了有效地设计减阻表面,人们的注意力集中到沟槽面湍流减阻机理的研究.许多学者从不同角度对减阻机理进行探讨, Gallagher 和 Thomas 认为是由粘性底层厚度的增加造成的, Bacher 和 Smith 归结为反向旋转的流向涡与

沟槽尖顶形成的小的二次涡的相互作用,认为二次涡减弱了与低速带条相联系的流向涡,并在沟槽内保留低速流体.流动显示结果表明,注入的染色液的展向扩散限于沟槽内,相邻沟槽间的相互作用较弱. Choi^[9]认为主要是沟槽限制了流向涡的展向运动,引起壁面猝发变弱,导致了壁面摩擦阻力的减少. Walsh 认为狭窄的V型沟槽的沟谷具有低摩擦的低速安静流体,因而降低了总的阻力.图1流向涡和沟槽表面尖峰的相互干扰这一点被 Park 和 Wallace 对沟槽侧面摩擦阻力的精细测量所证实,他们得到侧壁上1/4部分的摩擦与光滑面大致相等,其余3/4部分比光滑面小,从而导致了总摩擦阻力的降低. Vukoslavcevic^[10]等通过测量沟槽尖顶和低谷垂线上的流速分布得到在尖顶处摩擦阻增加85%,而在低谷摩擦阻降低很多.

迄今为止,沟槽面湍流减阻技术的应用范围归纳起来主要有三方面:飞行器、流体驱动设备、管道运输系统.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能使飞机节省燃料8%.而空中客车公司在A320试验机面积的70%贴上沟槽薄膜,达到了节油1%~2%的效果.泳衣业制造商澳大利亚 Speedo 公司研制开发的“FAST-SKIN”系列泳衣,可以减少3%水的阻力,这在百分之一秒决胜负的游泳比赛中意义非凡.在国外,如美国、欧洲乃至我们的邻居印度近些年陆续开展的飞行器沟槽面减阻的实验研究,已经取得了较大的进展.国内对其在飞行器上的应用研究正处于起步阶段.如北京航空航天大学的王晋军^[11],石油大学的董守平、赵志勇、李新华等^[12],西安交通大学的宫武旗、黄淑娟^[13],西北工业大学李育斌^[14],南京航空航天大学的潘家正^[15]等均作了一定的工作; KSB 公司在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,1984年, Nitschke^[16]通过测量具有流向沟槽面衬里管道的两端压差获得了一定的减阻效果. DLR Berlin 的研究机构及日本的研究人员各自对内衬沟槽面的输油或输水管道进行了减阻实验研究均发现管输量有不同程度的提高.由上可见沟槽减阻技术具有广阔的应用前景和发展空间.

本文从流向 V 型沟槽对壁湍流场中的多尺度相干结构进行被动控制的角度, 分析了沟槽壁面及光滑平板壁面湍流边界层中的流动结构, 利用热线测速技术, 在不同来流速度条件下对风洞中壁湍流相干结构进行了实验研究, 分析了沟槽壁面平板湍流边界层的减阻机理.

1 实验设备和技术

实验在天津大学流体力学实验室三元回流式低湍流度风洞中完成, 风洞为木质结构的回流式闭口低速风洞, 主要用于湍流的实验研究. 风洞截面形状除风扇段为圆形外, 其它均为八角形. 实验段: 截面尺寸: 高 0.60 m, 宽 0.80 m, 四角各切去一个 100 mm × 100 mm 的切角. 实验段尺寸: 长 1 500 mm, 宽 800 mm, 高 600 mm, 风洞的收缩比为 6.75, 实验段气流速度 40 m/s 以下连续可调, 原始湍流度 $\varepsilon < 0.2\%$, 流速稳定性 $\frac{|U - \bar{U}|_{\max}}{\bar{U}} < 0.2\%$, 流速场的均匀性 $\frac{\sigma}{\bar{U}} < 0.25\%$; 风洞采用无极变频器调速, 电机功率 22 kW.

实验用光滑壁面平板及沟槽壁面平板并排水平放置在风洞实验段内. 如图 1 所示, 正对来流方向的平板前缘为楔形, 平板前缘固定拌线并贴有砂纸, 以加速边界层转捩, 以保证在探针测量位置形成充分发展的湍流, 沟槽壁面平板沟槽尺寸如图 2 所示. 槽的宽度 $s = 1.4\text{ mm}$, 槽的深度 $h = 1.4\text{ mm}$, $s^+ = su^*/v$, $h^+ = hu^*/v$, $u^* = \sqrt{\tau_w/\rho}$, τ_w 为壁面摩擦切应力, u^* 为壁面摩擦速度. 其中沟槽用粘性内尺度无量纲尺寸: 雷诺数 $Re_s = 93\,579.3$, $s^+ = h^+ = 886$; 雷诺数 $Re_h = 123\,809.5$, $s^+ = h^+ = 11.54$; 雷诺数 $Re_x = 173\,877.4$, $s^+ = h^+ = 16$.

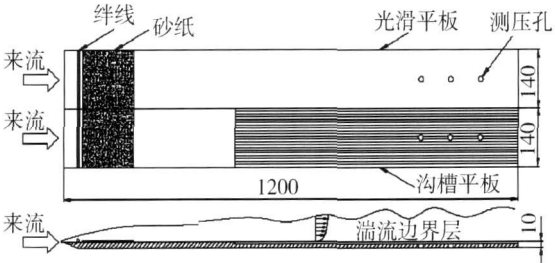


图 1 光滑平板和沟槽平板示意图
Fig. 1 Schematic of flat plate with smooth surface and riblets surface

光滑平板及沟槽平板沿流向轴线各有 5 个测压孔与多管压力计相连, 用以监测两板上流向的

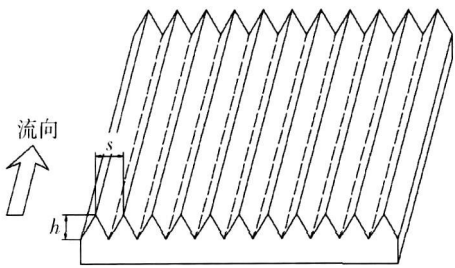


图 2 沟槽壁面平板尺寸
Fig. 2 Schematic of flat plate with riblets surface

压力梯度变化, 保证流向压力梯度为零. 在距离平板前端 $X = 800\text{ mm}$ 处, 用美国 TSI 公司 IFA300 型恒温热线风速仪及 TSF1210-T1.5 型单丝热线探针、TSF1244-T1.5 双丝热线探针进行测量, 热线敏感材料为直径 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的钨丝. 为了获得恒温热线风速仪最佳频率响应和真实的输出电压 $E(t)$ 和流动速度 $U(t)$ 之间的响应关系, 每一个探针在每次测量前都单独进行标定. 沟槽壁面平板实验模型和光滑壁面平板实验模型在风洞中同时并排用 6 个自由来流速度吹风. 用单丝边界层热线探针从距离壁面 $y = 0.1\text{ mm}$ 的位置开始沿平板湍流边界层的法向精细测量了不同壁面平板湍流边界层平均速度剖面, 利用壁湍流对数律平均速度剖面与壁面摩擦速度、流体粘性系数等内尺度物理量的关系以及壁面摩擦速度与壁面摩擦切应力的关系, 通过非线性迭代拟合其中的壁面摩擦速度 u^* , 用平均速度剖面法测量壁湍流的壁面摩擦阻力和壁面摩擦系数, 对沟槽壁面减阻特性进行了比较, 为进一步认识沟槽壁面减阻机理提供实验依据. 由 TSF1210T1.5 型热线探针测量湍流边界层近壁区域平均速度剖面. 用 X 形二分量边界层热线探针测量了不同雷诺数下不同法向位置的瞬时流向、法向速度分量的时间序列信号, 采样频率 50 kHz, 每个空间点采样时间 21 s, 样本数据量 1 048 576.

2 实验测量结果

根据实验测量所得的数据绘制不同雷诺数下沟槽壁面平板及光滑壁面平板湍流边界层用粘性内尺度无量纲化平均速度 $\bar{U}^+ = \bar{U}/u^*$ 和无量纲化法向位置坐标 $y^+ = yu^*/v$ 之间关系的曲线. 平均速度剖面 $\bar{U}^+ \sim y^+$ 的变化情况如图 3 所示. 从图中可以看出, 在近壁区域 $y^+ < 30$, 相同 y^+ 位置处, 槽上和棱上的无量纲平均速度 $\bar{U}^+$ 要明显大于光滑壁面平板上的无量纲速度. 这从一个方面说明沟槽壁面在湍流边界层近壁区具有减阻作用.

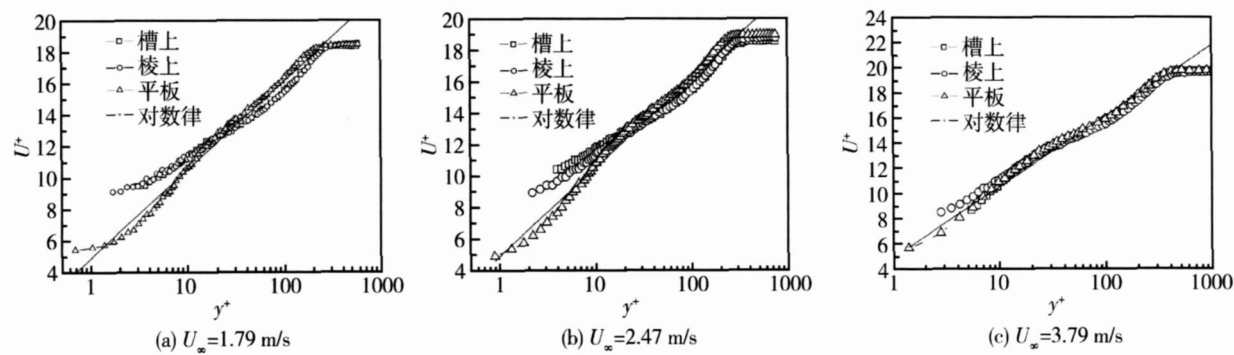


图 3 不同自由来流速度沟槽壁面及光滑壁面平板流向平均速度剖面

Fig. 3 Mean velocity profile of turbulent boundary layer over smooth and riblets surface with different free stream coming velocities

不同雷诺数下沟槽壁面平板及光滑壁面平板湍流边界层平均速度统计数据如表 1~ 表 3. 表中 Re_x 为以距离平板前缘 $X = 800\text{mm}$ 处为特征长度的雷诺数. 从表中可以看出, 在三个不同雷诺数

下, 平均壁面摩擦速度 u^* , 壁面摩擦切应力 τ_w , 平均壁面摩擦系数 C_f 三个特征量在沟槽壁面平板槽上和棱上均小于光滑壁面平板. 可以说明与光滑壁面平板相比, 沟槽壁面具有减阻效果.

表 1 自由来流速度 1.79/(m/s) 平板及沟槽壁面摩擦速度 u^* 、壁面摩擦切应力 τ_w 、壁面摩擦系数 C_f

Table 1 Skin friction velocity u^* , skin friction shear stress τ_w and skin friction coefficient C_f over smooth and riletts surface

	槽上	棱上	平板
自由来流速度 $U_\infty/(m/s)$	1.79	1.79	1.79
雷诺数 Re_x	93 579.3	93 579.3	93 579.3
平均壁面摩擦速度 $u^*/(m/s)$	0.100 387	0.100 652	0.103 622
平均摩擦切应力 $\tau_w/(kg/ms^2)$	0.011 542	0.011 603	0.012 298
平均壁面摩擦系数 $C_f/10^{-2}$	0.566 8	0.574 2	0.609 5
减阻率/%	7.01	5.79	

表 2 自由来流速度 2.47/(m/s) 平板及沟槽上的壁面摩擦速度 u^* 、壁面摩擦切应力 τ_w 、壁面摩擦系数 C_f

Table 2 Skin friction velocity u^* , skin friction shear stress τ_w and skin friction coefficient C_f over smooth and riletts surface

	槽上	棱上	平板
自由来流速度 $U_\infty/(m/s)$	2.47	2.47	2.47
雷诺数 Re_x	123 809.5	123 809.5	123 809.5
平均壁面摩擦速度 $u^*/(m/s)$	0.130 827	0.130 786	0.133 067
平均摩擦切应力 $\tau_w/(kg/ms^2)$	0.019 640	0.019 628	0.020 319
平均壁面摩擦系数 $C_f/10^{-2}$	0.549 7	0.550 5	0.576 9
减阻率/%	4.72	4.58	

表 3 自由来流速度 3.79/(m/s) 平板及沟槽上的壁面摩擦速度 u^* 、壁面摩擦切应力 τ_w 、壁面摩擦系数 C_f

Table 3 Skin friction velocity u^* , skin friction shear stress τ_w and skin friction coefficient C_f over smooth and riletts surface

	槽上	棱上	平板
自由来流速度 $U_\infty/(m/s)$	3.79	3.79	3.79
雷诺数 Re_x	173 877.4	173 877.4	173 877.4
平均壁面摩擦速度 $u^*/(m/s)$	0.181 367	0.182 116	0.183 518
平均摩擦切应力 $\tau_w/(kg/ms^2)$	0.037 696	0.038 008	0.038 595
平均壁面摩擦系数 $C_f/10^{-2}$	0.532 6	0.536 9	0.547 7
减阻率/%	2.76	1.97	

图 4~ 图 6 分别给出了沟槽板及平板湍流边界层近壁面法向位置第 1 测点 ($y^+ = 5.18$) 第 9

尺度相干结构在喷射和扫掠过程流向脉动速度、法向脉动速度、雷诺应力分量的条件相位平均波形。与光滑平板相比, 不论喷射过程还是扫掠过程, 沟槽面槽上和棱上流向脉动速度、法向脉动速度、雷诺应力幅值均明显降低, 而且在时间尺度上也较平板不同程度缩短。这说明沟槽面有效抑制了壁湍流中相干结构的脉动, 并使相干结构喷射和扫掠过程的持续时间缩短。

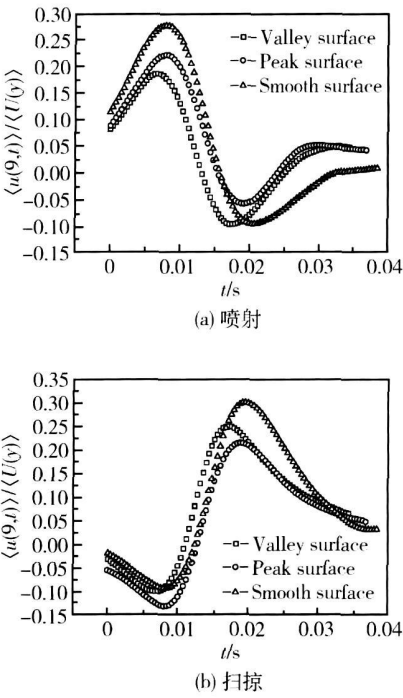


图 4 $y^+ = 5.18$ 相干结构喷射和扫掠过程流向脉动速度分量的条件相位平均波形

Fig.4 Conditional phase averaged waveforms of longitudinal velocity during eject and sweep

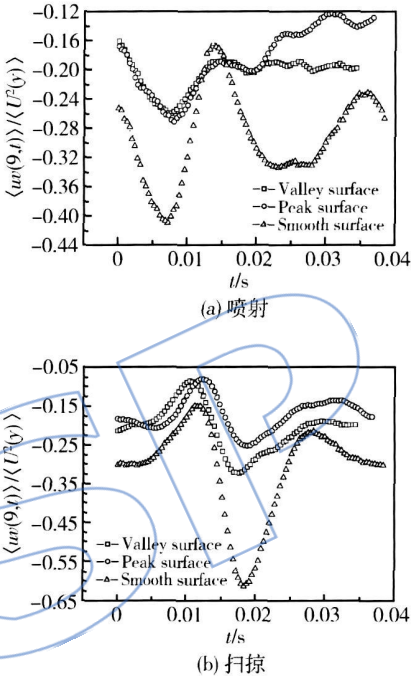


图 6 $y^+ = 5.18$ 相干结构喷射和扫掠过程雷诺应力分量 $\langle uw(9,t) \rangle$ 的条件相位平均波形

Fig.6 Conditional phase averaged waveforms of Reynolds stress $\langle uw(9,t) \rangle$ during eject and sweep at $y^+ = 5.18$

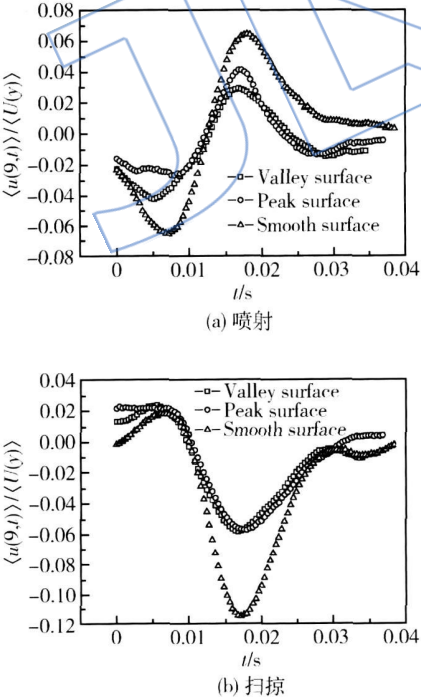


图 5 $y^+ = 5.18$ 相干结构喷射和扫掠过程法向脉动速度分量的条件相位平均波形

Fig.5 Conditional phase averaged waveforms of transverse velocity during eject and sweep

图 7~ 图 9 分别给出了沟槽板及平板湍流边界层近壁面法向位置第 45 测点 ($y^+ = 30.00$) 第 9 尺度相干结构在喷射和扫掠过程流向脉动速度、法向脉动速度、雷诺应力分量的条件相位平均波形。从图中可以看出, 在该测点沟槽面槽上、棱上相对于光滑平板条件相位平均波形已基本重合, 说明沟槽壁面对该位置处的相干结构已不起作用, 也就是说, 沟槽壁面只能控制缓冲层以内近壁湍流的相干结构, 而对对数律区及其以外区域的相干结构没有控制作用, 沟槽壁面的减阻效果是通过抑制缓冲层以内近壁湍流相干结构的脉动实现的。图 10 给出沟槽壁面槽上、棱上及光滑平板湍流边界层近壁区第 9 尺度相干结构的在喷射和扫掠过程中占有湍流脉动动能随法向无量纲距离的变化情况。从图中可以看出, 在缓冲层以内的近壁区域 ($y^+ < 30.00$), 槽上和棱上喷射和扫掠过

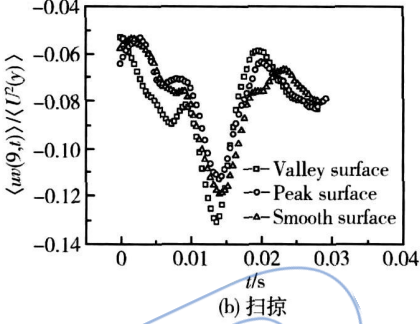
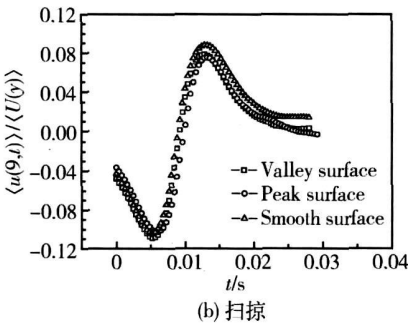
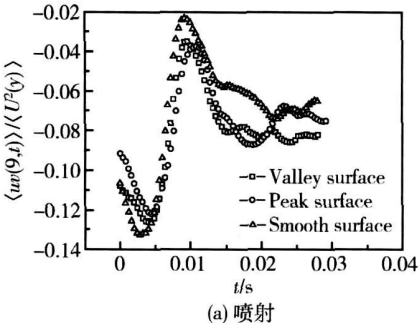
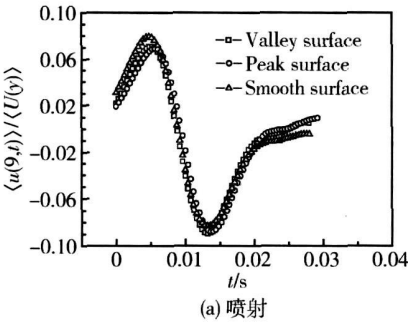


图 7 $y^+ = 30.00$ 相干结构喷射和扫掠过程流向脉动速度分量条件相位平均波形

Fig. 7 Conditional phase-averaged waveforms of longitudinal velocity during eject and sweep

图 9 $y^+ = 30.00$ 相干结构喷射和扫掠过程雷诺应力分量 $\langle uv(9,t) \rangle$ 条件相位平均波形

Fig. 9 Conditional phase-averaged waveforms of Reynolds stress $\langle uv(9,t) \rangle$ during eject and sweep at $y^+ = 30.00$

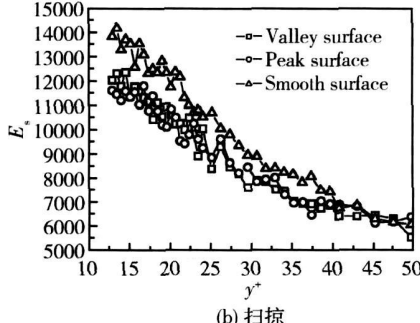
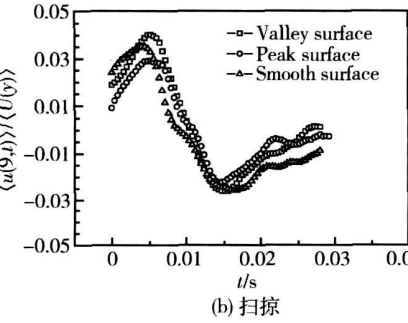
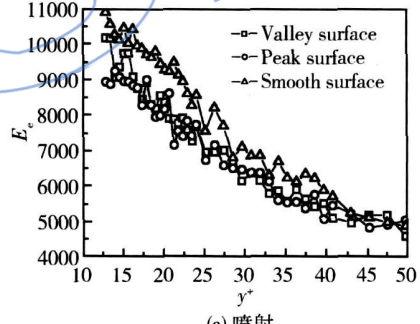
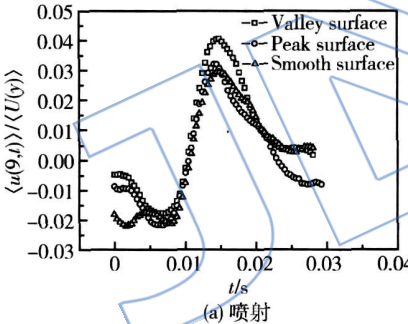


图 8 $y^+ = 30.00$ 相干结构喷射和扫掠过程法向脉动速度分量条件相位平均波形

Fig. 8 Conditional phase-averaged waveforms of transverse velocity during eject and sweep

图 10 喷射和扫掠过程相干机构占有的湍动能随法向无量纲距离的变化

Fig. 10 Turbulent fluctuating kinetic energy obtained by coherent structure in the course of eject and sweep across the near wall region of turbulent boundary layer

程中, 相干结构占有湍流脉动动能均明显低于光滑平板, 进入对数层以后 ($y^+ > 30.00$), 沟槽壁面

与光滑平板相干结构的在喷射和扫掠过程中占有湍流脉动动能趋于一致. 同样也说明沟槽壁面只能控制缓冲层以内近壁湍流的相干结构, 而对对数层及其以外区域的相干结构没有控制作用, 沟槽壁面的减阻效果是通过抑制缓冲层以内近壁湍流相干结构的脉动强度实现的.

雷诺数 $Re_x = 173\,877.4$ 下, 第 9 尺度沟槽板槽上、棱上及光滑平板上相干结构猝发的实际物理时间长度如表 4 所示. 可以看出, 在靠近壁面处, 槽上和棱上喷射和扫掠持续时间长度均小于光滑平板上的时间长度, 说明沟槽面上相干结构喷射和扫掠过程能量降低的同时, 其时间发展历程也变短, 沟槽壁面减阻效果明显. 随着法向位置 y^+ 的增加至 $y^+ = 30.00$ 时, 沟槽壁面与光滑壁面上相干结构猝发的实际物理时间尺度基本相等, 沟槽壁面抑制相干结构喷射和扫掠的效果逐渐消失.

表 4 $\alpha = 9$ 尺度沟槽壁面及光滑壁面平板壁湍流相干结构猝发的时间长度

Table 4 Burst period of coherent structure over smooth and riblets surface			
法向位置 坐标 y^+	槽上时间 长度 $t/$ ($2 \cdot 10^{-5}$ s)	棱上时间 长度 $t/$ ($2 \cdot 10^{-5}$ s)	平板上时间 长度 $t/$ ($2 \cdot 10^{-5}$ s)
5.18	608	576	640
6.41	608	576	608
7.95	576	576	608
9.50	544	576	608
13.82	576	576	576
20.00	576	576	576

3 结 论

本文对风洞中 V 型沟槽壁面平板湍流边界层抑制湍流多尺度相干结构及壁面减阻的机理进行了实验研究. 用 IFA300 热线风速仪和 X 形二分量边界层热线探针精细测量了沟槽壁面及光滑壁面湍流平板边界层不同法向位置的瞬时流向、法向速度分量的时间序列信号. 将湍流多尺度相干结构的观点引入沟槽面湍流边界层减阻机理的研究. 以流向速度子波系数作为特征量检测湍流边界层多尺度相干结构, 提取了沟槽壁面平板及光滑壁面平板湍流边界层中的多尺度相干结构流

向速度分量、法向速度分量和瞬时雷诺应力分量的条件相位平均波形, 研究了多尺度相干结构猝发时流向速度分量、法向速度分量和瞬时雷诺应力分量的动力学发展、演化过程. 通过比较沟槽壁面平板及光滑壁面平板湍流边界层中平均速度剖面、多尺度相干结构的强度、持续时间和条件相位平均波形等统计特征, 研究沟槽壁面的减阻机理, 主要结论如下:

- 1) 通过测量平板湍流边界层平均速度剖面, 对沟槽壁面峰上、谷上及光滑壁面不同雷诺数的平均速度剖面进行分析, 发现相对于光滑壁面, 沟槽壁面峰上、谷上壁面摩擦速度、壁面摩擦切应力、壁面摩擦系数均有不同程度减小, 说明沟槽壁面在一定雷诺数的范围内具有减阻的效果;
- 2) 沟槽壁面峰上、谷上相对于光滑壁面相同尺度下流向脉动速度、法向脉动速度、雷诺应力相位平均波形在喷射和扫掠过程均表现出幅值减弱, 猝发过程趋缓, 说明沟槽壁面有效抑制了相干结构的猝发过程;
- 3) 沟槽壁面在抑制近壁湍流相干结构喷射和扫掠过程脉动动能的同时, 同时也缩短了相干结构喷射和扫掠过程的时间尺度;
- 4) 沟槽壁面只能控制缓冲层以内近壁湍流的相干结构, 而对对数层及其以外区域的相干结构没有控制作用, 沟槽壁面的减阻效果是通过抑制缓冲层以内近壁湍流相干结构喷射和扫掠过程的脉动实现的.

参考文献:

[1] Walsh M J. Riblets as a viscous drag reduction technique [J]. AIAA Journal, 1983, 21(4): 485-486.

[2] Walsh M J. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets [R]. AIAA - 82-0169, 1982.

[3] Walsh M J, Lindemann A M. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction [R]. AIAA - 84-0347, 1984.

[4] Bacher E V, Smith C R. A combined visualization and anemometry study of the turbulent drag reducing mechanisms of triangular microgroove surface modifications [R]. AIAA - 85-0548, 1985.

[5] Gallagher J A, Thomas A S W. Turbulent boundary layer characteristics over streamwise grooves [R]. AIAA - 84-2185, 1984.

[6] Coustols E. Behavior of internal manipulators: “riblet” models in subsonic and transonic flows [R]. AIAA - 89-0963, 1989.

[7] Park S R, Wallace J M. Flow alteration and drag reduction by riblets in a turbulent boundary layer [J]. AIAA Jour-

nal, 1994, 32(1) : 31-38.

[8] Berchert D W, Bruse M , Hage W , et al. Experiments on drag reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 338: 59-87.

[9] Choi H, Moin P, Kim J. On the effect of riblets in fully developed laminar channel flows[J]. Phys Fluids A, 3, 1991: 1892-1896.

[10] Vukoslavcevic P, Wallace J M, Balian J L. Viscous drag reduction using streamwise aligned riblets[J]. AIAA J. 1992, 30: 1119-1122.

[11] WANG Jinjun, LAN Shilong, MIAO Fuyou. Drag reduction characteristics of turbulent boundary layer flow over riblets surfaces [J]. Shipbuilding of China, 2001, 42(4) : 1-5.

[12] 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[J]. 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 [J]. J. of Exp. in Fluid Mechanics, 2006, 20(1) : 40-44.

[13] 宫武旗、李新宏、黄淑娟. 沟槽壁面减阻机理实验研究[J]. 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 [J]. J. of Engineering Thermophysics, 2002, 23(5) : 579-582.

[14] LI Yubin, QIAO Zhide, WANG Zhiqi. An experimental research of drag reduction using riblets for the Y-7 airplane [J]. Aerodynamic Experiment and Measurement & Control, 1995: 9(3) : 21-26.

[15] PAN Jiazheng. The experimental approach to drag reduction of the transverse ribbons on turbulent flow [J]. Acta Aeronautica Sinica, 1996, 14(3) : 305-310.

[16] Nitschke P. Experimental investigation of turbulent flow in smooth and longitudinal grooved tubes [R]. NASA TM 1984: 77480.