

沟槽面湍流边界层结构实验研究

王晋军 兰世隆 陈 光

(北京航空航天大学流体力学研究所, 北京 100083)

摘要 应用激光测速技术和氢气泡流动显示技术对沟槽面湍流边界层特性及近壁区拟序结构特征进行了精细的测量和观察. 实验结果表明: 与光滑面湍流边界层相比, 沟槽面湍流边界层的黏性底层厚度、过渡层厚度及流速分布对数公式中的积分常数 C 均有所增大, 说明采用的沟槽面具有减阻特性. 此外, 无量纲低速带条间距明显减小, 最多减小 20%, 说明无量纲低速带条平均间距的缩短与湍流减阻密切联系.

关键词 沟槽面, 湍流边界层, LDV 测量, 流动显示, 低速带条结构

前 言

沟槽面湍流减阻是近二十年来流体力学工作者研究的热点之一^[1~4], 已有成果表明, 最佳的减阻表面设计是一种对称的 V 型沟槽, 其最大减阻为 8%. Coustols^[5] 总结了沟槽宽度、高度和偏航角等的影响, 并分别用翼型和旋成体进行实验, 结果减阻 7%~8%, Neumann^[6] 在旋成体表面沿流向布置 V 型沟槽, 得到了 9% 的净减阻, Gaudet^[7] 在 $Ma = 1.2$ 的湍流边界层中的测量结果表明, 最大减阻可达 7%. 但是, 由于缺乏对沟槽面湍流减阻机理的深入了解, 减阻表面的设计还没有上升到理论指导实践的水平. 另外, 最大减阻 8%~9% 是否为极限等仍有待进一步探讨.

本项研究将应用激光测速技术和氢气泡流动显示技术对沟槽面湍流边界层特性及近壁区拟序结构特征进行探讨, 以期对沟槽面湍流减阻机理提出一些新的见解和看法.

1 实验仪器、设备及实验条件

实验是在清华大学水力学实验室钢架玻璃水槽中进行的. 实验段长 300 cm, 宽 18 cm, 高 22.5 cm. 水槽首部设稳水箱, 水历经稳流栅、整流网进入槽中. 实验中所用平板为有机玻璃板, 平板长 240 cm, 宽 18 cm, 厚 1 cm. 平板的一个表面为光滑平面, 另一个表面为 Spaced-V 型沟槽面 (图 1). 沟槽间距为 s , 高度为 h , 凸台宽为 w . 本实验中 $h = w = 1.0$ mm, $s = 2$ mm. 为了保证

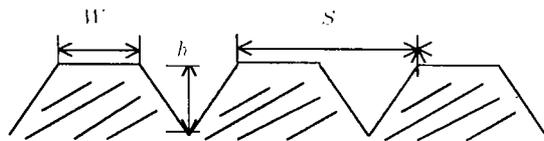


图 1 沟槽面截面形状及尺寸

Fig.1 Cross section of the riblet surface plate

沟槽面尺寸具有较高精度, 该沟槽面由铣床加工而成. 平板高出水槽底部 5 cm, 从板面起到自由水面平均水深为 5 cm. 沟槽板和光滑平板衔接时, 沟槽凸台台面与光滑平板在同一水平面上, 沟槽面长度分别为 20 cm 和 50 cm, 实验模型的布置如图 2 所示.

1998-09-28 收到第一稿, 1999-04-07 收到修改稿.

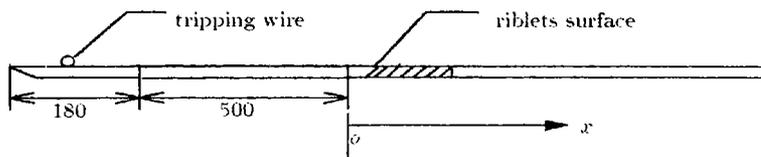


图 2 实验模型布置图 (单位: mm)

Fig.2 Arrangement of the experimental model(unit: mm)

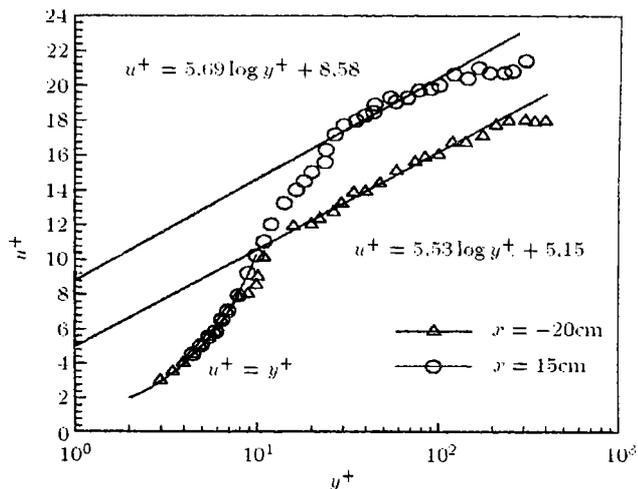
流场的测量采用了清华大学水力学实验室的一维激光测速系统 (LDV), 激光测量体体积为 $l_{mx} \times l_{my} \times l_{mz} = 0.07245 \text{ mm} \times 0.07245 \text{ mm} \times 1.2733 \text{ mm}$, 可见其空间分辨率较高, 在测量边界层时能给出黏性底层的流速分布^[8,9]. 流场的坐标为: x 轴沿平板中心线, 以顺流方向为正; y 轴以垂直向上为正; z 轴则以激光束传播方向为正; 坐标原点设于沟槽面前端中心处. 光路系统置于三维坐标架上, x, y, z 方向坐标精度分别为 1 mm, 0.01 mm, 0.1 mm, 坐标架三个方向均可手动, y 方向也可电动. 实验来流速度为 $U_\infty = 17.5 \text{ cm/s}$, 在 $x = 10 \text{ cm}$ 处放置一支铅笔作为绊线, 铅笔截面为正六边形, 其外切圆直径为 0.70 cm, 使流动提前转捩. 实验时沿板中心线进行测量.

2 实验结果及分析

2.1 速度分布

2.1.1 黏性底层

此层内流速为线性分布, 据此可得到壁面摩擦速度 u_* . 黏性底层实际厚度 δ_v^+ 为黏性底层与过渡层的交点到零点的无量纲距离. 实验中过渡层内的测点较少, 过渡层内的速度分布不能精确计算出来, 故从时均流速图 (图 3) 来确定 δ_v^+ , 方法是: 从时均流速分布图中找出符合 $u^+ = y^+$ 分布的上限点, 其 y^+ 值取为 δ_v^+ . 实测结果表明, 沟槽板上黏性底层厚度 δ_v^+ 值比沟槽板光滑平板增加了 10% 左右. Bechert 和 Hoppe^[10] 认为沟槽的作用是使底层流向涡与壁面有了一定

图 3 时均流速分布图 ($L = 50 \text{ cm}$)Fig.3 Distributions of mean velocities for $L = 50 \text{ cm}$

的距离, 槽底的部分流体类似于润滑剂, 这等价于增加了黏性底层的厚度, 从而减少了摩擦; Choi^[11] 也得出沟槽使黏性底层厚度增加的结果; 笔者认为黏性底层厚度增加使过渡层及对数层向上移动, 这样同一位置处的流速比黏性底层未增加的情况要大, 这显然是阻力减小的结果. 因此, 本实验所采用的沟槽面具有减阻特性, 与文献 [1, 2] 相比, 本实验采用的 Spaced-V 型沟槽面易于加工.

2.1.2 过渡层

尽管过渡层内测点较少, 但从时均流速图 (图 3) 来看, 此层内速度分布也可以用对数公式来表示, 由于数据不足, 本文未能作详细分析. 对于光滑平板, Dong 和 Ding^[8] 得到过渡层中流速分布为 $u^+ = 12.8 \log y^+ - 3.42$. 过渡层的范围是从黏性底层上限点 (即 δ_v^+) 起至对数律层下限点 (y_l^+) 为止, 设过渡层厚度为 $\Delta y^+ = y_l^+ - \delta_v^+$. 本实验得到过渡层厚度 $\Delta y^+ = 3 \sim 9.5$. 由于过渡层厚度本身很薄, 因而计算该值的误差较大, 但两块沟槽板上过渡层厚度比沟槽板上、下游光滑平板值均有增加.

2.1.3 对数区

本文中用试算法确定湍流区的界限, 使回归计算得到最大的相关系数. 采用这种方法可以保证计算得到的 A, C 值的准确性, 否则难以求出准确值. 本文中所有相关系数 r 的值均在 0.95 以上, 说明此区域流速分布仍然满足对数律, 即 $u^+ = A \log y^+ + C$. 对沟槽面及光滑面流速分布对数公式中的常数 A, C 分别取平均后得到如表 1 所示的结果. 沟槽板上 C 的数值较大, 是由于该处摩擦速度 u_* 较小造成的. 壁面摩擦速度小说明表面摩擦小, 对应于流速分布具有较大的 C 值. 从图 3 可以很清楚地看到, 沟槽板上对数区流速分布曲线比光滑平板情形上移一段距离, 这与 Choi^[11], Tang 和 Clark^[12] 等的结果是一致的.

表 1 A, C 数值表

Table 1 The value of A and C

	$l = 20 \text{ cm}$		$l = 50 \text{ cm}$	
	Smooth surface	Riblets surface	Smooth surface	Riblets surface
A	5.74	5.84	5.68	5.79
C	5.36	5.77	5.25	5.75

2.2 低速带条结构特征

已有研究表明, 对于光滑面湍流边界层, 近壁区的低速带条结构遵循对数正态分布^[10,13], 即

$$P(\lambda^+) = B \exp \left\{ -\frac{1}{2} [B \ln(\lambda^+/A)]^2 \right\} / (2\pi)^{0.5} \lambda^+$$

$$S = \left[\sum_{i=1}^n (\lambda_i^+ - \bar{\lambda}^+) / n - 1 \right]^{0.5}$$

$$s = S / \bar{\lambda}^+$$

$$A = \bar{\lambda}^+ / (1 + s^2)^{0.5}$$

$$B = \ln(1 + s^2)^{-0.5}$$

式中 λ^+ 为无量纲间距 ($\lambda^+ = \lambda u_* / \nu$), $\bar{\lambda}^+$ 是 λ^+ 的平均值, S 是标准差, s 是标准差系数, n

是样本总数. $P(\lambda^+)$ 最大时对应的 λ^+ 值称为最大可能值, 用 λ_m^+ 表示, 此时

$$\frac{dP(\lambda^+)}{d\lambda^+} = 0, \quad \lambda_m^+ = \lambda^+(1 + s^2)^{-1.5}$$

通过对流动显示照片进行仔细阅读和统计分析, 首次发现沟槽面湍流边界层近壁区低速带条无量纲间距符合对数正态分布 (图 4). 本文所得 λ_m^+ 与相应的 $\bar{\lambda}^+$ 相比约小 20%, 这与 Smith 和 Metzler^[13], Kline 等^[14] 所得光滑面结果相一致.

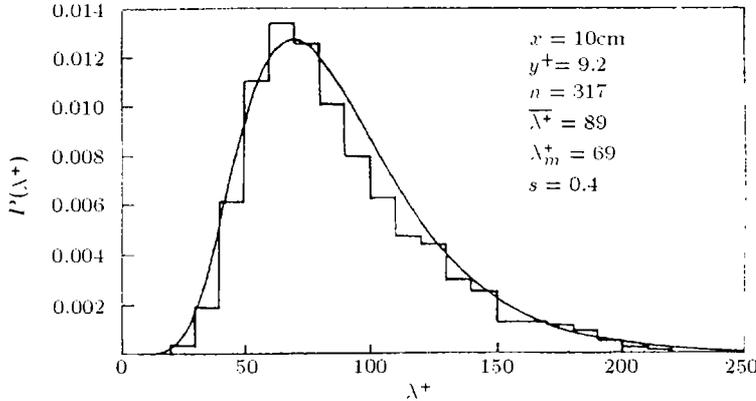


图 4 低速带条对数正态分布图 ($L = 20\text{ cm}$)
Fig.4 Distribution of low-speed streaks

图 5 给出了沟槽面长度为 20cm 时, $\bar{\lambda}^+$ 随 x 的发展变化, 从中可以看出, $\bar{\lambda}^+$ 在沟槽处明显减小, 最多减小约 20%. 与激光测量结果相比较可以得到如下结论, 减阻与低速带条间距 $\bar{\lambda}^+$ 的减小联系在一起. 另外, 在 $x = 25\text{ cm}$ 处 $\bar{\lambda}^+ = 106$, 相对于 $x = -5\text{ cm}$ 处的 $\bar{\lambda}^+ = 112$ 及 $x = 40\text{ cm}$ 处的 $\bar{\lambda}^+ = 124$ 都较小, 而相对于沟槽面的 $\bar{\lambda}^+$ 又较大, 这表明沟槽面对近下游区壁面流动仍有影响.

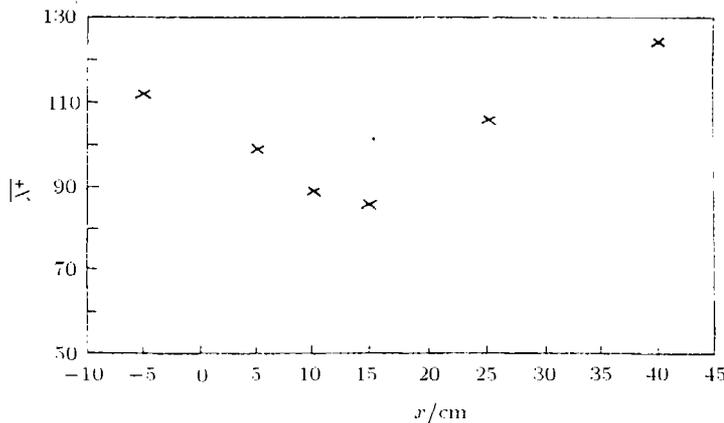


图 5 无量纲低速带条平均间距分布 ($L = 20\text{ cm}$)
Fig.5 Distribution of mean spacing for non-dimensional low-speed streaks

3 结 论

沟槽面上黏性底层厚度、过渡层范围、对数公式中的积分常数 C 等均比光滑面值有所增加, 这些都表明本实验所用的沟槽面具有减阻特性. 由流动显示结果可知, 沟槽面湍流边界层低速带条间距遵循对数正态分布, 低速带条无量纲平均间距的减小与减阻联系在一起.

参 考 文 献

- 1 Hefner JN, Bushnell DM, Walsh MJ. Research on non-planar wall geometries for turbulence control and skin-friction reduction. In: 8th U.S.—FRG DEA—Meeting. Viscous and Interacting Flow Field Effects. Göttingen: 1983. 25~26
- 2 Walsh MJ. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets. AIAA Paper 82-0169, 1982
- 3 Walsh MJ. Riblets as a viscous drag reduction technique. *AIAA Journal*, 1983, 21(4): 485~486
- 4 Walsh MJ, Lindemann AM. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction. AIAA Paper 84-0347, 1984
- 5 Coustols E. Behavior of internal manipulators: “Riblets” models in subsonic and transonic flows. AIAA Paper 89-0963, 1989
- 6 Neumann D, Dinkelacker A. Drag measurements on V-grooved surfaces on a body of revolution in axial flow. *Applied Scientific Research*, 1991, 48: 105~114
- 7 Gaudet L. Properties of riblets at supersonic speed. *Applied Scientific Research*, 1989, 46(3):245~254
- 8 Dong ZN, Ding Y. Turbulence characteristics in smooth open-channel flow. *Science in China (Series A)*, 1990, 33(2): 244~256
- 9 董曾南, 孙厚钧, 宋传琳, 陶晓峰. 明流光滑平板边界层特性. *力学学报*, 1982, 14(6): 528~537 (Dong Zengnan, Sun Houjun, Song Chuanlin, Tao Xiaofeng. Characteristics of boundary layer on a smooth flat plate in open channel flow. *Acta Mechanica Sinica*, 1982, 14(6): 528~537 (in Chinese))
- 10 Bechert DW, Hoppe G. On the drag reduction of the shark skin. AIAA Paper 85-0546, 1985
- 11 Choi KS. Near-wall structure of a turbulent boundary layer with riblets. *J Fluid Mech*, 1989, 208: 417~458
- 12 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
- 13 Smith CR, Metzler SP. The characteristics of low-speed streaks in the near-wall region of a turbulent boundary layer. *J Fluid Mech*, 1983, 129: 27~54
- 14 Kline SJ, Reynold WC, Schraub FA, Runstadler PW. The structure of turbulent boundary layers. *J Fluid Mech*, 1967, 30: 741~773

EXPERIMENTAL STUDY ON THE TURBULENT BOUNDARY LAYER FLOW OVER RIBLETS SURFACE

Wang Jinjun Lan Shilong Chen Guang

(*Institute of Fluid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China*)

Abstract It is always a challenge for human beings to save energy resources. As we know, one of the main approaches is to reduce the surface friction in the design of the transportation tools. The study on drag reduction started in 1930s, and it was found that the micro-grooves along the streamwise direction may efficiently reduce the surface friction as reported by NASA Langley center in 1970's. In order to design the drag reduction surface efficiently, researchers have made efforts to understand the characteristics of turbulent boundary layer flow over riblets surface and drag reduction mechanism. In this paper, the Laser Doppler Velocimeter (LDV) and Hydrogen Bubble flow visualization techniques have been used to measure the characteristics of turbulent boundary layer flow over riblets surface and observe its coherent structure in the near wall region. The experiment was conducted in a glass-walled steel water channel with cross-section $18\text{ cm} \times 22.5\text{ cm}$. The riblets plate of $L = 20\text{ cm}$ and $L = 50\text{ cm}$ long was located at 68 cm away from the leading edge of the test plate respectively. An ordinary pencil used as tripping wire was attached on the smooth plate surface at 10 cm away from the leading edge of the test plate, so that the turbulent boundary layer can be achieved in front of the riblets plate. The incoming flow velocity was kept constant 17.5 cm/s in the whole experiment, and one-dimensional LDV with high spacial resolution made by Hydraulic Laboratory, Tsinghua University ensures the specious measurement. The experimental results indicate that, in comparison with the turbulent boundary layer flow over smooth surface, greater values are obtained for the thickness of viscous sublayer, the thickness of buffer region and the integral constant C in the log-law. Moreover, the non-dimensional distance of low-speed streak spacing also obeys the log-normal distribution, and its average value is reduced by 20%, implying that the turbulent drag reduction is connected with the reduction of the average value of non-dimensional low-speed streak spacing.

Key words riblets surface, turbulent boundary layer flow, LDV measurement, flow visualization, low-speed streak structures

Received 28 September 1998, revised 7 April 1999.