

纵向涡对近壁湍流结构的影响¹⁾

王家禄 张兆顺 曾 兴
(清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘要 在封闭水槽中用氢气泡方法观察了纵向涡对近壁湍流结构的影响. 涡的下洗侧出现了展向距离较宽、流动较稳定的快斑区, 流向速度快; 涡的上洗侧出现了含有慢斑的区域, 流动结构复杂, 流向速度慢. 纵向涡使下洗侧速度较快的流体流向壁面, 使上洗侧速度较慢的流体远离壁面.

关键词 纵向涡, 湍流结构, 流动显示

前 言

纵向涡与切变湍流相互作用在实际工程中许多应用, 如在机翼上安装涡发生器可以推迟分离, 滞后失速. 在物面上布置涡发生器产生纵向涡改变湍流边界层的流动结构, 从而减阻、或提高换热效率等. 因此, 许多学者对此作了研究. Shabaka 等^[1]和 Mehta 等^[2]用热线和压力探针对纵向涡与无压力梯度湍流边界层的相互作用进行了细致的测量, 获得时均速度型、雷诺应力、相关等数据, 观察到边界层内的湍流结构发生了变化. Eibeck 等^[3]和 Pauly 等^[4]研究了纵向涡对湍流边界层及换热效率的影响, 由于纵向涡的影响换热效率提高了许多. 固定点测定流速不易获得瞬态空间流动结构, 故关于纵向涡对近壁湍流结构影响的文献较少. 用流动显示方法可以显示出瞬时流动, 得到拟序结构的直观图像. 本实验是在封闭水槽的壁面上安装半三角机翼产生纵向涡(单涡、上洗双涡、下洗双涡), 用氢气泡法细致地观察由于纵向涡的作用近壁湍流结构的变化情况.

1 实验设备与实验方法

实验是在一个封闭的直水槽中进行的, 水槽长 9m, 截面为 $0.4 \times 0.03\text{m}^2$ ^[5]. 用氢气泡法显示湍流结构图像, 选用直径 $25\mu\text{m}$ 的铂丝作为氢气泡发生丝置于水中观察处. 电源的电压和频率可调, 电压为 50 至 130V, 频率为 20 至 25Hz. 用 1kW 聚光灯照明. 采用每秒 16 幅照片的航空相枪拍照. 实验用的来流平均速度 $U = 12\text{cm/s}$, 对应的雷诺数 $Re_h (Re_h = Uh/\nu, U$ 为来流的平均速度, h 为半个槽宽, ν 为水的运动粘度) 为 1800.

通过在实验段安置半三角机翼产生纵向涡, 机翼高 2cm, 后掠角为 $\alpha = 70^\circ$. 机翼是安置在水槽一个壁面上, 如示意图 1 所示. (a) 机翼与来流迎角 $\alpha = 12^\circ$, 产生一个从来流方向看为一个顺时针旋转的纵向涡; (b) 二个半三角机翼与来流方向迎

¹⁾ 自然科学基金和博士后基金资助项目.

1993-10-02 收到第一稿, 1993-12-07 收到修改稿.

角 $\alpha = \pm 12^\circ$, 机翼后缘相距 4.5cm, 产生一转向相反的纵向涡对, 二涡之间的流动速度是远离壁面; (c) 二个机翼迎角 $\alpha = \mp 12^\circ$, 机翼后缘相距 3.0cm, 产生一转向相反的纵向涡对, 二涡之间的流动速度是指向壁面.

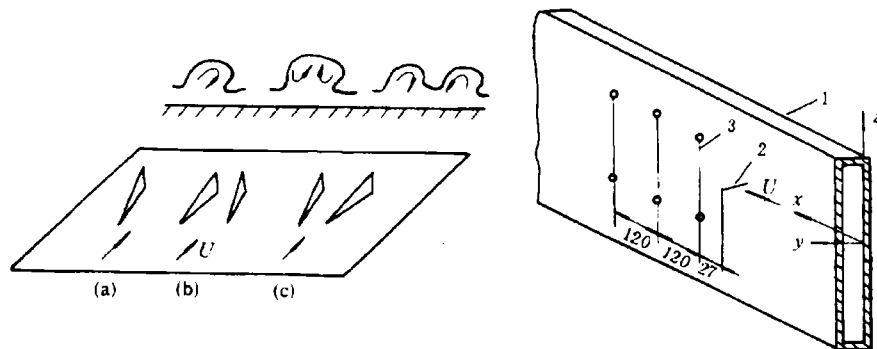


图 1 半三角机翼布置示意图

图 2 铂丝布置示意图

Fig.1 Sketch of the half-delta wings installation

Fig.2 Sketch of the platinum wire installation
1. water channel, 2. wing, 3. platinum wire

将铂丝布置在距机翼后缘下游三个不同的地方, 如图 2 所示 (图中 z 为流向方向, y 为离开壁面方向, x 为展向方向). 铂丝与壁面距离可调. 使铂丝平行水槽壁面而垂直来流, 产生的氢气泡线平行于壁面, 可以观察近壁湍流结构, 如快斑、慢斑和条带等图像.

2 实验结果与讨论

为了比较, 先观察没有涡发生器时的水槽近壁湍流拟序结构 (如图 3). 图中显示了快斑 (氢气泡线稀疏的区域)、慢斑 (氢气泡线密集的区域) 和条带 (在慢斑下游形成的白色长条) 等主要结构图像. 快斑区域内的氢气泡线条分布是相对均匀, 条纹的间距沿 z 方向的变化缓和, 表示斑块内部流速均匀. 慢斑内流速比快斑内流速低, 并且宽度也比快斑窄得多, 所以慢斑形状是一些沿着流向的窄条, 在下游形成浓密的白色条带, 条带间的平均间距约 $z^+ = 98$. 这些结果与 Kline 等^[6]、Smith 等^[7]、连淇祥^[8]、张兆顺^[5]等在无压力梯度平板湍流边界层内所观察的拟序结构相似.

2.1 单涡对近壁湍流结构的影响

当在壁面上布置一个半三角机翼时, 产生一个从流向方向看是顺时针方向旋转的纵向涡 (图 1a), 该涡对近壁湍流结构的影响如图 4 所示, 铂丝置于离机翼后缘 $x = 147\text{mm}$ 处. 在涡下洗侧 (照片中白色箭头右侧, 二次流速度指向壁面) 出现一展向距离较宽的快斑区, 该区域内氢气泡线条边缘清晰, 曲线平滑, 没有紊乱现象, 而且每根氢气泡线都能流向下流较远的地方才消失, 因而流动较稳定; 氢气泡线之间流向距离宽, 流速快, 由于涡的二次流速度指向壁面, 使下洗侧壁面附近的剪切层变薄, 因而 $\partial u / \partial y$ 变大. 在涡的上洗侧 (照片中白色箭头左侧, 二次流速度远离壁面) 是流动结构比较紊乱的区域, 在该区域有几个窄的慢斑, 在下游变成了显得很乱白色条带; 也有两个较窄的快斑, 斑内的氢气泡线条不光滑, 扭曲变形, 流动紊乱; 上洗侧内的流向速度 U_L 明显地小于下洗侧的流向速度 U_H ($U_H/U_L = 1.45$), 由于

纵向涡的诱导使上洗侧内壁面附近的流体减速并上升，离开壁面流向自由区，壁面附近的剪切层变厚， $\partial u/\partial y$ 变小。纵向涡使上洗侧的低速流体离开壁面，而使下洗侧的高速流体流向壁面，这与边界层湍流湍发过程中出现的现象^[6]相似。涡下洗侧快斑区域右边(照片的右端)也出现了流动紊乱的图像，在与快斑区交界处有一氢气气泡线条密集的斑块，流速低，在下游形成了条带，纵向涡对该区域流动影响不大。

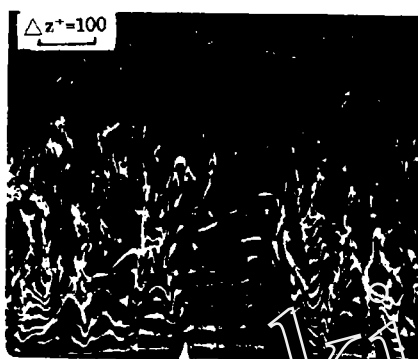
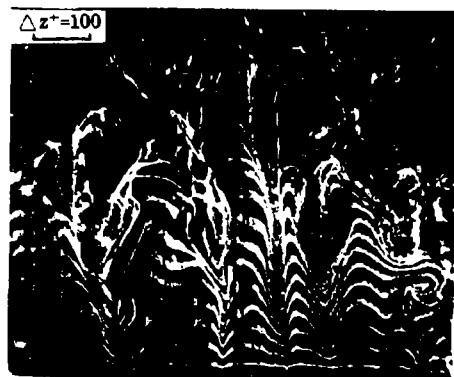


图 3 无涡直槽道近壁湍流结构 ($y^+ = 10$)

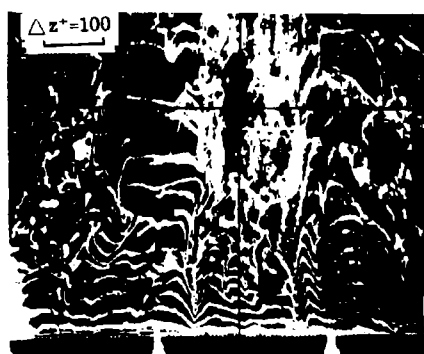
图 4 单涡对近壁湍流结构的影响 ($y^+ = 10$), $x=147\text{mm}$

Fig.3 Plan view of coherent structure of turbulence in near-wall region ($y^+ = 10$) without vortex

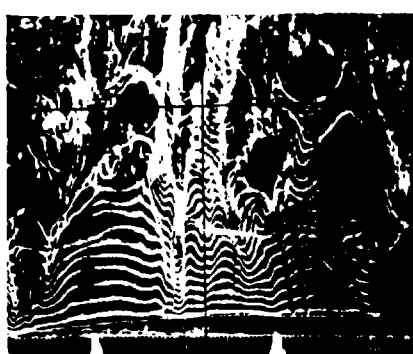
(图中白色箭头是机翼后缘展向位置)
Fig.4 Effect of a single vortex on the turbulent structure in near-wall region ($y^+ = 10$), the platinum wire at $x=147\text{mm}$

2.2 上洗双涡对近壁湍流结构的影响

上洗双涡(涡之间的二次流速度是远离壁面的,图 1b)对近壁湍流结构的影响如图 5a 所示,铂丝位于 $x=147\text{mm}$ 处(图 2)。在二涡的两个下洗侧(即照片的左右两端)流动结构为比较稳定的快斑区,斑内的氢气气泡线条边缘清晰、曲线光滑,氢气气泡线之间的间隔较远,流速快;而且每根氢气气泡线都能伸展到下游较远的地方才出现紊乱并消失,与单涡影响一样在二涡的下洗侧 $\partial u/\partial y$ 较大。在二涡上洗侧(即照片的中间部分)流动结构复杂,在铂丝附近的两根氢气气泡线比较光滑,第三根氢气气泡线就出现了较大的变形,开始扭在一起,离铂丝下游不远的地方,氢气气泡线完全紊乱,



(a) $x=147\text{ mm}$



(b) $x=257\text{ mm}$

图 5 上洗双涡对近壁湍流结构的影响 ($y^+ = 10$)

Fig.5 Effect of an upwash vortex pair on the turbulent structure in near-wall region ($y^+ = 10$)

出现了氢气泡堆集的整块白斑;在铂丝附近的几根氢气泡线密,流速低,上洗侧的流向速度 U_L 比下洗侧的流向速度 U_H 慢 ($U_H/U_L = 1.7-2.0$);由于双涡作用,使涡之间的流体远离壁面,近壁附近的剪切层变厚, $\partial u/\partial y$ 变得更小. 有两窄慢斑条带(照片中两白色箭头之间)将两下洗侧的稳定流动与中间较紊乱的流动分隔开来,通过慢斑条带从中间低速流动急剧过渡到下洗侧的高速流动,因而跨越条带的速度梯度较大,这两条带是二纵向涡诱导出来的、在近壁附近形成的两个转向相反的二次流向涡.

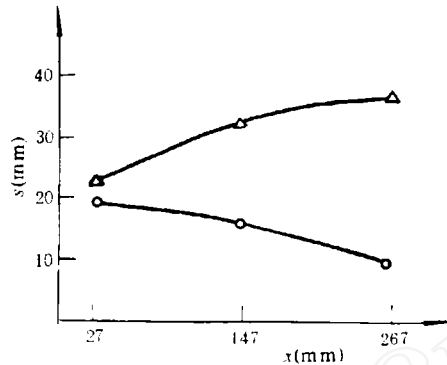


图 6 慢斑条带之间展向距离变化

-o-o-o- 上洗双涡, -Δ-Δ- 下洗双涡

Fig.6 Variation of spanwise spacing between two long-streaks

-o-o-o- upwash vortex pair, -Δ-Δ- downwash vortex pair

铂丝在距机翼后缘 $x=267\text{mm}$ 的湍流结构 ($y^+=10$) 如图 5b 所示, 两下洗侧的氢气泡线光滑, 流动稳定, 流速较高. 两涡之间上洗侧内的氢气泡线也变得曲线光滑, 没有紊乱, 伸展到下游较远的地方, 氢气泡线间距密集, 流速低. 照片中两慢斑条带之间的展向距离 s 沿着流向方向是变窄的(图 6), 流向下游时, 两慢斑条带将上洗区内的氢气泡线合并到一起, 变成一较宽的白色条带. 这可能是由于两纵向涡相互诱导流向下游时逐渐靠拢, 在某位置合并为一个涡引起的湍流结构变化 (Mehta 等^[2]、Pauley 等^[4] 由截面二次流平均速度分布观察到上洗双涡在下游时远离壁面, 逐渐合并成一个涡).

2.3 下洗双涡对近壁湍流结构的影响

图 7a 给出的是下洗双涡(涡之间的二次流速度指向壁面, 图 1c)对近壁湍流结构影响, 铂丝为于 $x=147\text{mm}$ 处. 在二涡的上洗侧(照片的左右两边)内氢气泡线在铂丝附近有快斑、慢斑、短的条带, 但很快在下游紊乱, 氢气泡线消失, 流速低. 二涡的下洗侧(照片中部)是一展向距离较宽的快斑区, 斑内氢气泡线的边缘清晰、曲线光滑, 氢气泡线伸展到下游较远的地方都能清晰可见, 而且流动比较稳定; 氢气泡线间距宽, 流速快, 双涡之间的二次流速度指向壁面, 剪切层变薄, $\partial u/\partial y$ 较大. 有两窄慢斑条带将中间下洗侧的高速流动与两上洗侧的低速流动分开. 这两条带也是纵向涡诱导出来的一转向相反的二次流向涡(类似于 Pauley 等^[4]所述的“二次涡”). 两条带之间的展向距离在下游逐渐变宽, 呈“喇叭”型, 向两侧扩展.

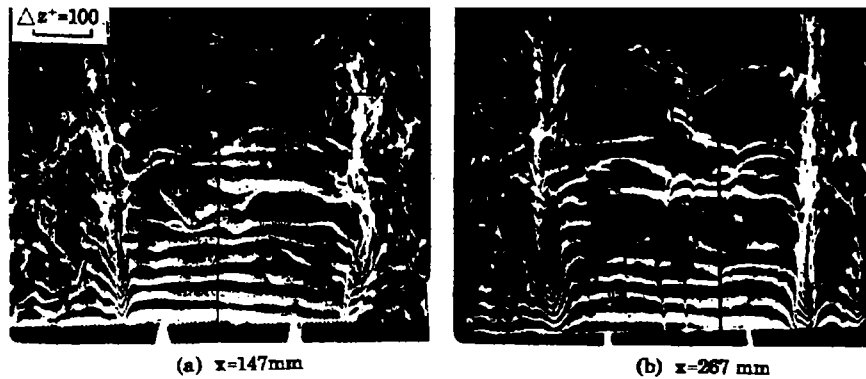


图 7 下洗双涡对近壁湍流结构的影响 ($y^+ = 10$)

Fig.7 Effect of a downwash vortex pair on the turbulent structure in near-wall region ($y^+ = 10$)

铂丝在距机翼后缘 $x=267\text{mm}$ 的湍流结构 ($y^+=10$) 如图 7b 所示. 两条带之间的展向距离 s 变得更宽了, 沿着流向方向是增加的 (图 6), 并向两侧扩展. 也就是二纵向涡向两侧移动, 涡之间的展向距离在变大.

参 考 文 献

- [1] Shabaka IMMA, Mehta RD and Bradshaw P. Longitudinal vortices imbedded in turbulent boundary layers, part 1 single vortex. *Journal of Fluid Mechanics*, 1985, 155: 37-57
- [2] Mehta RD and Bradshaw P. Longitudinal vortices imbedded in turbulent boundary layers, part 2 vortex pair with 'common flow' upwards. *Journal of Fluid Mechanics*, 1988, 188: 529-546
- [3] Eibeck PA and Eaton JK. The effects of longitudinal vortices embedded in a turbulent boundary layer on momentum and thermal transport. Proceedings of the 8th International Heat Transfer Conference, San Francisco, 1986, 3: 1115-1120
- [4] Pauley WR and Eaton JK. The effect of embedded longitudinal vortex pairs on turbulent boundary layer heat transfer. In: Hirata M ed. *Transport Phenomena in Turbulent Flows*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1988: 487-500
- [5] Zhang Zhaoshun and Wang Xilin. Visualization and analysis of longitudinal vortices at curved walls of 2D laminar and turbulent channel flows. *ACTA Mechanica Sinica*, 2(1): 1-7
- [6] Kline SJ, Reynolds WC, Schraub FA and Runstadler PW. The structure of turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 1967, 30: 741-773
- [7] Smith CR and Metzler SP. The characteristics of low-speed streaks in the near-wall region of a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 1983, 129: 27-54
- [8] 连洪祥. 对逆压区湍流边界层拟序结构的观测. *力学学报*, 1983, (4): 414-417

EFFECT OF LONGITUDINAL VORTICES ON THE TURBULENT STRUCTURE IN NEAR-WALL REGION

Wang Jialu Zhang Zhaoshun Zeng Xing

(*Dept. of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract The effect of longitudinal vortices on the turbulent structure of near-wall region was investigated with hydrogen bubble technique in a rectangular duct. A wider high-speed streak appears in the downwash region of vortex (where secondary flow is directed towards the wall), the flow is stable and the streamwise velocity is higher inside the streak; a region including low-speed streaks is shown in the upwash part of vortex (where the secondary flow is directed away from the wall), the flow structure is complicated and the streamwise velocity is lower. Due to the action of longitudinal vortices, the flow with higher velocity in the downwash region moves towards the wall, while the flow with lower velocity in the upwash region moves away from the wall.

Key words longitudinal vortices, turbulent structure, flow visualization