

剪切水-气界面下的湍流特征

王双峰¹, 贾 复², 赵建福²

(1. 北京航空航天大学流体力学研究所, 北京 100083; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 利用氢气泡技术测量了剪切水-气界面下二维瞬时流速的分布, 根据从流动显示图像获得的流速剖面样本, 考察水面附近湍流场的平均特性, 重点分析猝发事件的信号特征。氢气泡方法较为准确地测定了水流中平均流速、湍流脉动强度以及 Reynolds 切应力的分布, 更重要的是, 它能将流动显示图像中观察到猝发事件与定量的信号特征直接联系起来。在猝发过程中, 水面近区的流向和垂向瞬时速度以及 Reynolds 切应力出现较大幅度的脉动, 它们与低速流体条带的喷射行为对应; 大幅度脉动在时间和空间垂直方向上表现出高度的相干性, 这是猝发事件的一个显著特征。

关 键 词: 剪切水-气界面, 猝发, 氢气泡技术

中图分类号: O357.5

The turbulence characteristics under a sheared air-water interface

WANG Shuang-feng¹, JIA Fu², ZHAO Jian-fu²

(1. Institute of Fluid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Based upon samples of instantaneous velocity profiles determined by the hydrogen bubble technique, the turbulence characteristics under a sheared air-water interface are analyzed. The use of hydrogen bubble technique to measure time-averaged turbulence properties is rather accurate, and more significantly it provides a mechanism for correlating bursting events observed in flow visualization pictures with the corresponding quantitative data. During a bursting process, the instantaneous velocities and Reynolds shear stress near the air-water interface fluctuate in relatively large amplitude, which appear to be associated with the ejection phenomena of low-speed streaks. Their high degree of coherence in time and in the vertical direction is the most notable characteristic of bursting events.

Key words: sheared air-water interface; burst; hydrogen bubble technique

0 引 言

液体-气体交界面附近的湍流运动是化学工程、环境工程、海洋学乃至海军技术研究中十分感兴趣的课题。同时, 液-气界面是流体运动的一种基本边界形式, 深入研究液-气界面湍

基金项目: 国家自然科学基金(19672070)资助项目

作者简介: 王双峰(1972-), 男, 河南荥阳县人, 北京航空航天大学流体力学研究所博士后研究人员。

流的特性将提供一个新的视角(相对于固体壁面附近的湍流), 来考察湍流结构的普遍特征。Wang 等^[1, 2]通过流动显示实验观察了受气流剪切但无波动的水-气界面下的湍流结构, 发现剪切是决定水面附近湍流结构的本质因素——当水面摩擦速度 $u_r \geq 0.19 \text{ cm/s}$ 时, 与固壁湍流中的情形类似, 在水面下会出现沿展向排列的高速/低速流体条带和间歇性的湍流猝发等相干结构。进一步的观测表明^[3], “喷射”是剪切水-气界面下低速条带的主要特征行为, 在喷射过程中, 低速条带的某一部分迅速离开水面近区, 侵入深层高速流动中并发生强烈破碎; 一个猝发过程往往包含多个离散的喷射事件。

本文利用氢气泡技术对剪切水-气界面下的湍流特征进行更细致的考察。氢气泡方法能够显示流动的结构形态、同时提供流场内瞬时速度分布的定量信息, 对于湍流相干结构的研究而言, 这种综合观测能力不仅有着显而易见的价值, 而且几乎是必需的。因此, 从上个世纪六十年代以来, 它一直受到人们的重视, 在固壁湍流相干结构的研究中成功地得到应用^[4~7]。在本文中, 用氢气泡技术实现了两个重要的观测目标: (1)测量剪切水-气界面附近湍流场的平均特性; (2)获得在流动显示图像中观察到的猝发事件的信号特征。

1 实验方法

1.1 实验系统

对实验装置的详细描述可参见文献[1]。它的主体由低湍流水洞和安装在水洞有机玻璃开口段上方的小型直流风洞组成。位于风洞出口的轴流风扇抽吸空气, 在水流上方形成剪切气流。实验段长 3.5 m, 断面尺寸为宽 0.4 m, 高 0.85 m, 其中水深 0.38 m, 气流通道高 0.47 m。实验观察和测量断面距离气流进口 2.0 m。

实验中, 水流和气流的方向相反, 均匀流速分别为 6.0 cm/s 和 2.72 m/s。因为两相速度差很小, 水面上没有明显的表面波产生。为了确定水-气界面上的剪切条件, 用恒温式热线风速仪(KANOMAX 1010)和单丝热线探头(KANOMAX 1026)测量了气流的平均速度剖面, 然后根据其对数分布特性^[8, 9]和交界面处两相剪切应力相等的边界条件, 得到水面上下两侧的摩

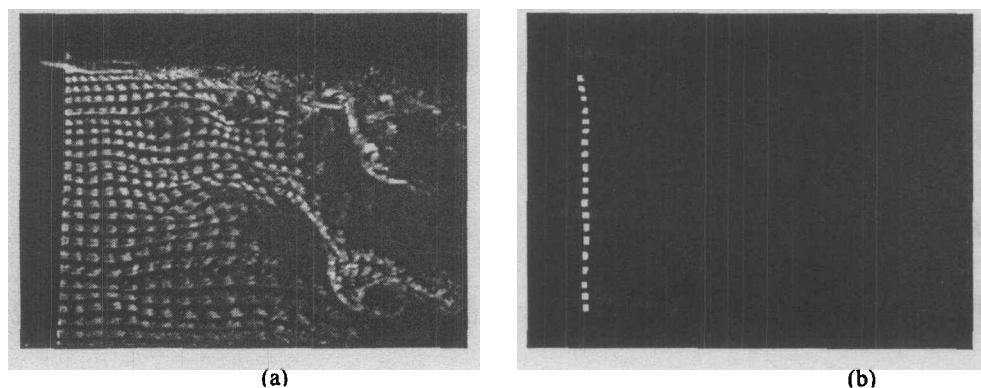


图 1 氢气泡时间线-脉线组合示踪体 流动方向从左向右: (a)原始图像;

(b)计算机处理后氢泡发生线下游第一列示踪体的二值图像

Fig.1 Combined-time-streak markers of hydrogen bubbles. The flow is from left to right of the pictures:

擦速度分别为 10.7 cm/s 和 $u_r = 0.37 \text{ cm/s}$ 。另外, 用两台单通道风速仪(KANOMAX 1010)和 X 型热膜探头(TSI 1241-20W)测量了水流中的二维(流向和垂向)瞬时速度, 在本文的结果讨论中涉及到有关的部分结果。

采用氢气泡显示技术实现流动结构的可视化。将直径为 $30\ \mu\text{m}$, 长约 $13\ \text{cm}$ 的铂丝垂直水面布置, 并以较小间隔分段绝缘; 它作为电解过程中的阴极, 在脉冲直流电压作用下, 在流场中产生氢气泡“方块”, 被称为“时间线-脉线组合示踪体(combined-time-streak markers)”, 如图 1(a)的示例。用普通片光(厚约 $2.0\ \text{cm}$)从水洞下方沿主流方向照亮氢气泡, 并尽量减少环境杂光进入视场, 以增强流动显示的效果。对垂向平面内的氢泡显示图案, 直接进行侧视观察, 同时用 CCD 摄像机($25\ \text{帧}/\text{s}$)记录, 供进一步分析和处理。

1.2 瞬时流速分布的测量

利用氢气泡时间线-脉线组合示踪体可以实现水流中二维瞬时速度的测量。Schraub 等^[10]对该方法给出了相当完整的描述, 下面仅就应用中的具体技术细节作说明。值得指出的是, 本文在用氢气泡法测量流速的过程中, 充分发挥了 Photoshop 和 Matlab 5.2 这两个图像分析软件的作用, 特别借助于 Matlab 的定量处理功能。

用流动显示图像测定流速的原理很容易理解, 它基于速度的基本公式 $\bar{u} = d\bar{x} / dt$ 。只要能够准确测量“示踪粒子”——氢气泡的位移矢量 $\Delta\bar{x}$ 和相应的时间间隔 Δt , 在适当的 Δt 值条件下, 就可以得到瞬时 Euler 速度的近似

$$\bar{u} \cong \Delta\bar{x} / \Delta t \quad (1)$$

这里采用“多帧(frame-to-frame)”或称“迹线(pathline)”法确定 $\Delta\bar{x}$, 即通过比较前后两幅图像获得氢气泡“方块”的位移, 而 Δt 由图像的帧间隔直接可知。氢气泡流动显示结果的量化主要经过以下步骤:

1. 首先通过图像采集板将 CCD 摄像机记录下来的模拟图像转换为数字图像, 存储到微型计算机中; 数字图像的空间分辨率为 352×288 像素, 具有 256 个灰度等级。
2. 利用 Photoshop 和 Matlab 软件的图像增强功能, 对数字图像进行平滑(去除噪音)、加大对比度等操作, 改善图像质量, 突出有用的信息以便于识别。
3. 选取要作定量化处理的氢泡示踪体, 用适当的阈值将灰度图像二值化; 为了消除细小(单像素宽或高)的噪声物体、平滑较大物体的边界, 对二值图像作开运算(open operation)。图 1(b)给出了图 1(a)中氢气泡发生线下游第一列示踪体经过上述处理后的结果。
4. 利用 Matlab 强大的图像量化功能, 确定 (x, y) 平面上氢气泡示踪体的形心坐标; 比较相隔 Δt 的两帧图像中氢泡的坐标 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) , 求得位移 Δx 、 Δy 和速度 u 、 v , 它们是空间点 $((x_1 + x_2)/2, (y_1 + y_2)/2)$ 处的两个流速分量。

在实验中, 氢泡时间线的发生周期 $\Delta T = 0.1\ \text{s}$ ($\Delta T^+ = \Delta T u_r^2 / \nu = 1.59$, ν 为水的运动粘性系数), 即流速测量的采样频率为 $10\ \text{Hz}$; 氢泡“方块”的高度约为 $\Delta h_1 = 2\ \text{mm}$ ($\Delta h_1^+ = \Delta h_1 u_r / \nu = 8.57$), 在离水面较近的区域, 铂丝绝缘段的高度约为 $\Delta h_2 = 2\ \text{mm}$ ($\Delta h_2^+ = \Delta h_2 u_r / \nu = 8.57$), 在较远的区域 $\Delta h_2 = 3\ \text{mm}$ ($\Delta h_2^+ = 12.9$)。根据 Schraub 等^[10]的分析方法, 使测量误差最小的时间间隔约等于 $0.08\ \text{s}$, 所以取前后两幅图像相隔一帧; 同样是为了减小误差, 考虑到氢泡线后尾迹中的速度亏损, 位移的测量从下游 $40d$ (d 为铂丝直径) 处开始; 总的测速误差约为 $\pm 4\%$ 。

2 结果和讨论

2.1 流场平均特性

用氢气泡方法总计测量了 369 个瞬时速度剖面，时间跨度 $t = 36.8 \text{ s}$ ($t^+ = 584$)，由此得到的水面附近平均流速 $\bar{u}(y^+)$ 、脉动速度均方根 $(\bar{u}'^2)^{1/2}(y^+)$ 和 $(\bar{v}'^2)^{1/2}(y^+)$ 以及 Reynolds 切应力

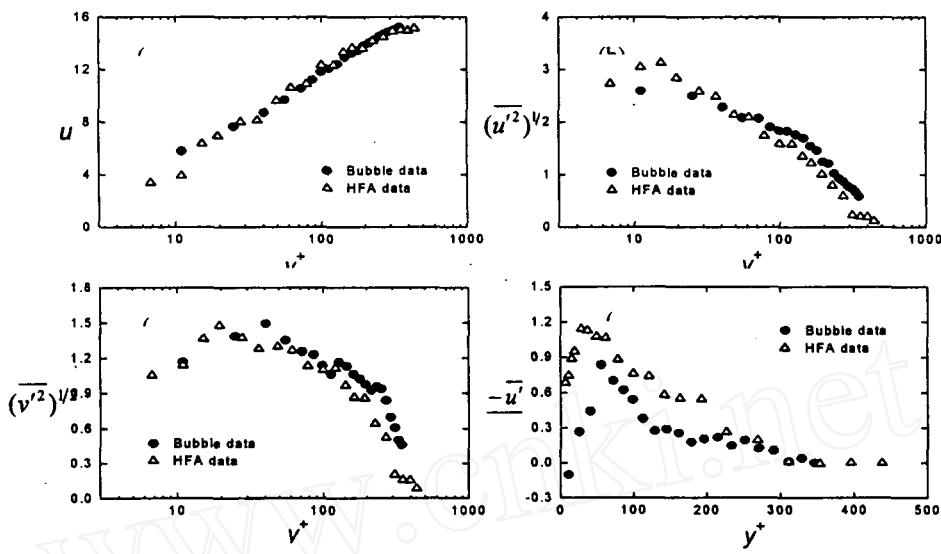


图 2 氢气泡方法测得的湍流统计量分布剖面与热膜数据比较：(a) 平均速度；(b) 流向脉动速度的均方根；
(c) 垂向脉动速度的均方根；(d) Reynolds 切应力

Fig.2 Comparison of turbulence statistic profiles determined by hydrogen bubble technique and hot-film

$-\bar{u}'v'(y^+)$ 的分布以无量纲形式给出在图 2 中。图中也给出了相同实验条件下的热膜测量数据，以便进行比较。两种方法测得的平均速度剖面极为一致，并且在 $y^+ > 20$ 的大部分区域，流速呈现对数分布。在 $y^+ \approx 50$ 的左右两侧，氢气泡法测量的湍流脉动强度 u'_{rms} 分别比热膜结果偏小和偏大，而 v'_{rms} 除了在 $y^+ < 30$ 的区域外总是高于热膜数据；不过总的看来，这些量值上的差别幅度较小，湍流强度的符合程度是令人满意的。在 $y^+ > 250$ 的位置，用氢气泡测量的 Reynolds 切应力与热膜数据吻合，而在较为接近水面的区域（这里也是 Reynolds 应力较大的区域），其数值显著偏小，但变化趋势仍然符合得很好。在最贴近水面的测量点上，Reynolds 应力为负值。除了氢气泡方法的测量误差，这主要是因为此处的湍流脉动往往十分强烈，氢气泡示踪体很快破碎而无法跟踪，致使速度测量样本较小。

2.2 烂发现象的信号特征

图3是水面边界层中不同深度位置处的瞬时流向速度时间序列。在该图中用箭头标出了一个时间段，它是根据流动显示图像确定的猝发期。可以看出，猝发现象发生时，在水面近区 u 出现较大幅度的负脉动，但是猝发的速度涨落并不一定要比背景湍流强很多，它最重要的特征是在时间和空间垂直方向上的高度相干性，即猝发是一种有组织、大尺度的拟序流动结构。猝发事件的相干特征也体现在垂向流速的时间序列上，如图4所示。

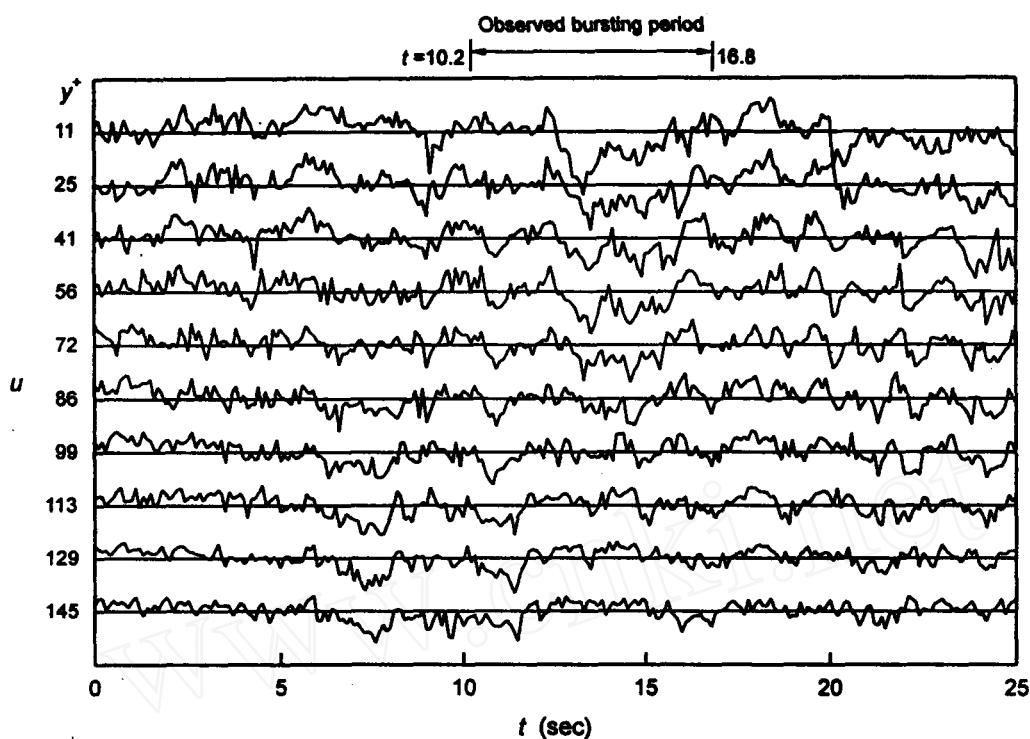


图3 水-气界面下不同深度处的瞬时流向速度

Fig.3 Instantaneous streamwise velocities at different depths under the air-water interface

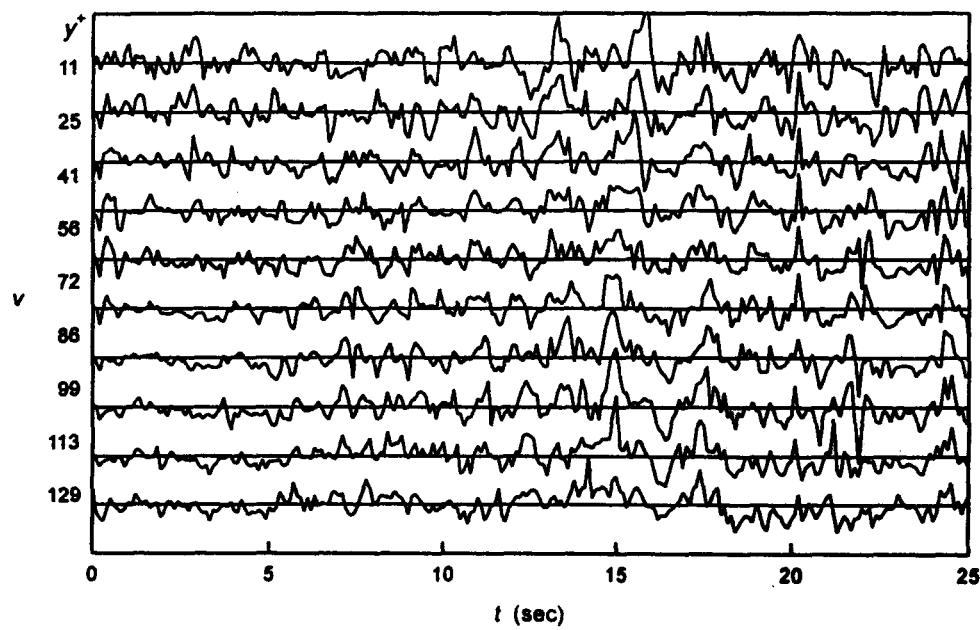


图4 水-气界面下不同深度处的瞬时垂向速度

Fig.4 Instantaneous vertical velocities at different depths under the air-water interface

另外, 猛发过程中水面附近 u 的亏损常常和 v 快速增长同时出现, 负的 u 尖峰对应正的 v 尖峰, 所以流向速度较低的流体离开水面向深层抛射。这与王双峰 & 贾复^[3]对低速流体条带喷射行为的观察结果相一致。

为进一步看清楚水面附近湍流速度脉动的活跃区域, 引进 Blackwelder & Kaplan^[11]的可变时间间隔平均(variable-interval time-averaging, 通常简称为 VITA)技术计算了图 3 中流向速度的短时间间隔方差 $Var(t, T)$ 。在某一空间位置, 流速信号 $u(t)$ 的可变时间间隔平均定义为

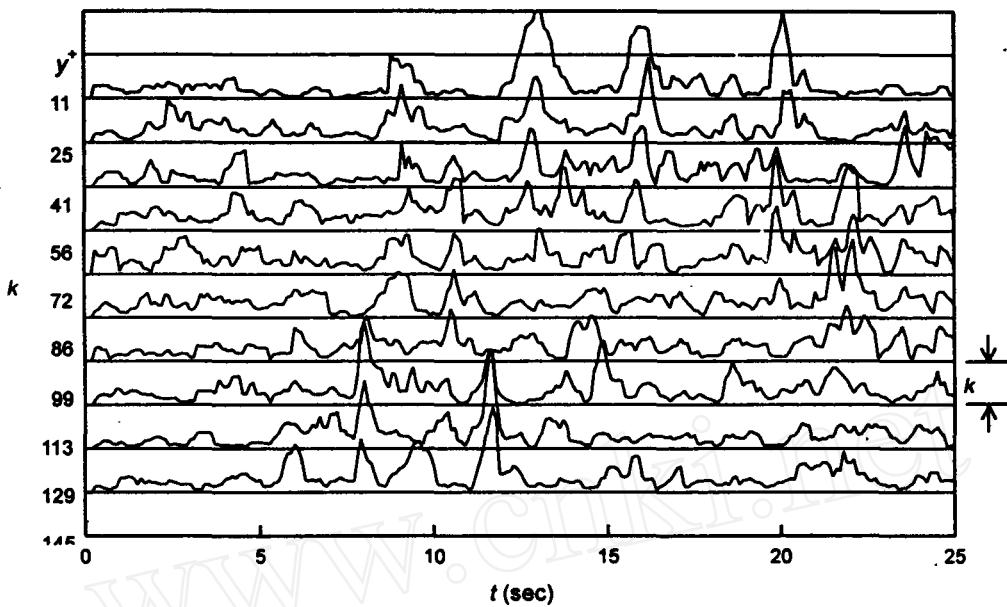


图 5 瞬时流向速度(图 3 中所示)的短时间间隔方差, $k = Var(t, T)/u'_{rms}^2$
Fig.5 Short-time variance of velocity signals shown in Fig.3. $k = Var(t, T)/u'_{rms}^2$

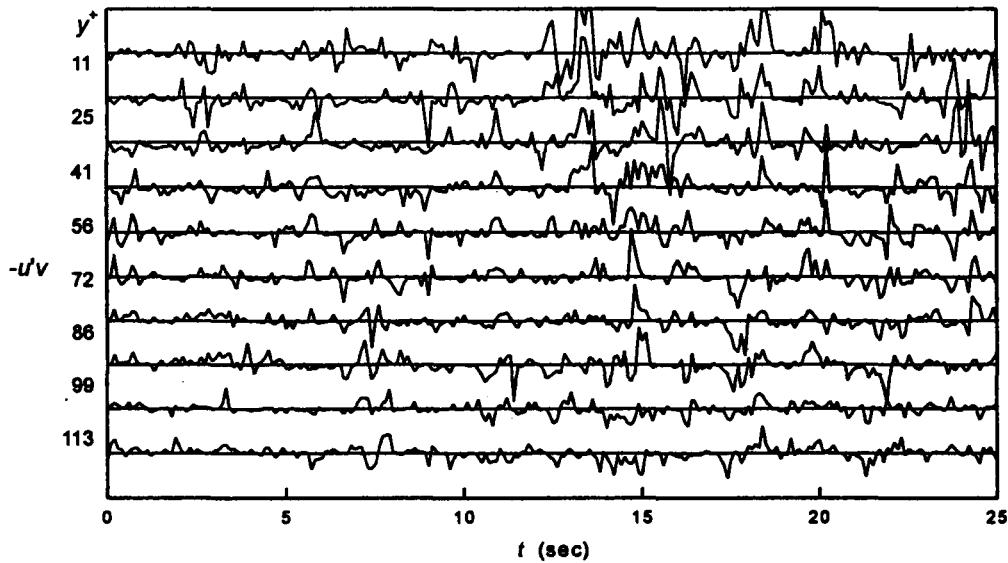


图 6 水-气界面下不同深度处的瞬时 Reynolds 应力
Fig.6 Instantaneous Reynolds stresses at different depths under the air-water interface

$$\hat{u}(t, T) = \frac{1}{T} \int_{t-\frac{1}{2}T}^{t+\frac{1}{2}T} u(\tau) d\tau \quad (2)$$

其中 T 是平均时间段, 取 $T^+ = 10.8$ 。一个局部化的湍流脉动强度参数就是 VITA 方差

$$Var(t, T) = \hat{u}^2(t, T) - [\hat{u}(t, T)]^2 \quad (3)$$

图 5 是用脉动流速的均方根值 u'_{rms} 无量纲化后的计算结果, $k = Var(t, T) / u'^2_{rms}$ 。在猝发过程中, VITA 方差在水面附近出现较大的峰值, 峰值不局限于小区域, 沿垂直方向在一定范围内以准相干的形式发生。离水面较远(比如说 $y^+ > 100$)的流场中, 也会出现有组织的方差峰值, 它们反映了边界层外区的某种相干结构。

与图 3 和图 4 相对应, Reynolds 切应力随时间的变化绘出在图 6 中。猝发过程中, Reynolds 应力的数值明显大于其余时期, $-u'v'$ 峰值一般与 u 的负脉动峰值和 v 的正脉动峰值相联系。由此推断, 间歇性的低速条带猝发(喷射)事件对水面边界层中 Reynolds 应力和湍动能的产生(瞬时湍动能产生率 $P(t) = -u'v'\partial\bar{u}/\partial y$)有较大的贡献。

3 结 论

用氢气泡技术测量剪切水-气界面附近的瞬时流速分布是可行的, 具有较高精度。该方法不仅确定了湍流场的平均特性, 其优势更体现在能够将流动显示图象与定量的信号特征直接联系起来, 为探讨相干结构的动力学意义提供依据。在水-气界面下的猝发过程中, 水面近区的瞬时流速和 Reynolds 切应力出现较大幅度的脉动, 它们在时间和空间垂直方向上表现出高度的相干性, 这是猝发事件的一个显著特征; 流向和垂向瞬时速度以及 Reynolds 应力大幅脉动之间的对应关系说明, 它们是由低速流体条带的喷射现象引起的。

致 谢: 感谢北京大学湍流研究国家重点实验室对实验工作的支持。

参考文献:

- [1] Wang SF, Jia F, Niu ZN, Wu ZZ. An experimental study on turbulent coherent structures near a sheared air-water interface. *Acta Mechanica Sinica (English Series)*, 1999, 15(4): 289~298
- [2] Wang SF, Jia F. Some characteristics of low-speed streaks under sheared air-water interfaces. *Acta Mechanica Sinica (English Series)*, 2001, 17(2): 115~124
- [3] 王双峰, 贾复. 水-气界面下低速流体条带的喷射行为. 力学学报, 2002, 34(3): 305~313
- [4] Kline SJ, Reynolds WC, Schraub FA, Runstadler PW. The structure of turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.*, 1967, 30: 741~773
- [5] Kim HT, Kline SJ, Reynolds WC. The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech.*, 1971, 50: 133~160
- [6] Lu LJ, Smith CR. Image processing of hydrogen bubble flow visualization for determination of turbulence statistics and bursting characteristics. *Exp. Fluids*, 1985, 3: 349~356
- [7] Grass AJ, Stuart RJ, Mansour-Tehrani M. Vortical structures and coherent motion in turbulent flow over smooth and rough boundaries. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 1991, 336: 35~65
- [8] Howe BM, Chambers AJ, Klotz SP, Cheung TK, Street RL. Comparison of profiles and fluxes of heat and momentum above and below an air-water interface. *ASME J. Heat Transfer*, 1982, 104: 34~39
- [9] Wu J. Laboratory studies of wind-wave interactions. *J. Fluid Mech.*, 1968, 34: 91~111
- [10] Schraub FA, Kline SJ, Henry J, Runstadler PW, Littell, A. Use of hydrogen bubbles for quantitative determination of time-dependent velocity fields in low-speed water flows. *ASME J. Basic Eng.*, 1965, 87: 429~444
- [11] Blackwelder RF, Kaplan RE. On the wall structure of the turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech.*, 1976, 76: 89~112