

剪切水 - 气界面下湍流猝发特征的实验研究¹⁾

王双峰^{*,2)} 贾 复^{*} 王晋军[†]

^{*}(中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080)

[†](北京航空航天大学流体力学研究所, 北京 100083)

摘要 利用氢气泡时间线 - 脉线组合示踪技术定量地考察剪切水 - 气界面下的湍流猝发现象, 分析猝发事件的信号特征, 重点探讨猝发与湍能产生之间的联系. 在猝发过程中, 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. 在猝发期, 猝发事件涉及的空间区域内 Reynolds 切应力和湍流脉动强度明显比平均值和非猝发期的情况大. 其结果表明: 在所考察的实验条件下, 猝发是剪切水 - 气界面附近湍流产生的主要过程.

关键词 剪切水 - 气界面, 猝发, 湍动能产生率, 氢气泡时间线 - 脉线组合示踪

中图分类号: O357.5 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2005)02-0129-06

引 言

液体 - 气体交界面是自然界和工程实际中流体运动的基本边界形式之一. 液 - 气界面和固体壁面附近的湍流都是流动在特定边界条件下的特例, 不过后者在湍流研究历史上得到关注的机会要多得多. 最近, 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中的结构特征的本质因素——当水面摩擦速度 $u_\tau \geq 0.19 \text{ cm/s}$ 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.

在剪切水 - 气界面和固壁附近, 条带结构外表及运动学形态有诸多相似之处^[1~3], 这很自然地使人猜想: 在水面边界层中, 低速条带猝发是湍流动能的重要产生过程, 就如同固壁湍流中猝发和湍能产生之间存在的因果关系. 王双峰和贾复曾将水 - 气界面附近的湍动能产生率曲线与低速条带喷射流体的分布直方图作比较 (文献 [3] 中图 10), 发现它们

的形状符合得相当好. 这初步反映出条带喷射现象和水面湍流的产生有密切关系, 更具体地说, 低速条带的喷射 (或猝发) 可能是湍能的主要贡献者. 为了进一步检验此观点, 可以从两个方面着手: (1) 把瞬时湍动能产生率 $P(t) = -u'(t)v'(t)\partial\bar{u}/\partial y$ 同具体的喷射事件相联系, 考察喷射中湍动能产生的特点和量值; (2) 比较湍动能平均产生率 $\bar{P} = -\overline{u'v'}\partial\bar{u}/\partial y$, 猝发过程中的平均产生率和平静期 (非猝发期, 或称为猝发间歇期) 的平均产生率, 考察它们的相对大小. 因为 $\partial\bar{u}/\partial y$ 是时间平均量, 在流场中确定的空间点上有不变的取值, 所以湍动能产生率等于相应的 Reynolds 切应力 (瞬时值或不同的平均值) 乘以一个常数, 对它们的分析可通过 Reynolds 应力进行.

显然, 要对水 - 气界面下的湍流猝发事件开展上述定量化的实验研究, 讨论猝发现象在水面边界层中的动力学意义, 定性的流动显示或者单点流速测量的方法都不能胜任, 我们需要的是能够揭示流动的结构形态、同时提供流场内瞬时速度分布信息的观测手段. 在本文中, 应用氢气泡时间线 - 脉线组合示踪方法^[4~7]观察剪切水 - 气界面下的湍流结构, 并实现对瞬时流速 u, v 垂向分布剖面的测量, 根据从流动显示图像获得的流速剖面样本, 分析猝发和低速流体条带喷射现象的相干特性, 重点考察猝发对于水面边界层中湍流产生的重要性.

2003-01-30 收到第 1 稿, 2004-12-02 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目 (19672070).

2) E-mail: sfwang@imech.ac.cn

1 实验方法

1.1 实验设备和流动显示

在文献 [1] 中对实验装置作了详细描述. 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 0.06 m/s 和 2.72 m/s. 因为两相速度差不大, 水面上没有明显的表面波产生. 为了确定水-气交界面上的剪切条件, 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擦速度分别为 10.7 cm/s 和 $u_\tau = 0.37$ 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瞬时速度, 每个通道的采样频率为 1000 Hz, 采样时间为 60 s, 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 μm , 长约 13 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)”. 用普通光源 (厚约 2.0 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. 对垂直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 帧/s) 记录, 供进一步分析和处理.

1.2 用流动显示图像测量瞬时流速分布

利用氢气泡时间线-脉线组合示踪体可以测量水流中的二维瞬时速度, 该方法已在固壁湍流相干结构的研究中得到成功应用^[5~7]. Schraub 等^[4]对方法本身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, 将模拟图像转换为数字图像, 输入计算机中, 充分发挥现有图像分析处理软件的作用, 特别借助于 Matlab 5.2 的定量处理功能, 实现了图像分析、数据读取等操作的部分自动化.

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 $u = dx/dt$. 只要能够准确测量“示踪粒子”——氢气泡的位移矢量 Δx 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

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

这里采用“多帧 (frame-to-frame)”或称“迹线 (path-line)”法确定 Δx , 即通过比较前后两幅图像, 获得氢泡发生线下游第 1 列示踪体形心的位移, 而 Δt 由图像的帧间隔直接可知.

在实验中, 氢泡时间线的发生周期 $\Delta T = 0.1$ s ($\Delta T^+ = \Delta T u_\tau^2 / \nu = 1.59$, ν 为水的运动黏性系数), 即流速测量的采样频率为 10 Hz; 氢泡“方块”的高度约为 $\Delta h_1 = 2$ mm ($\Delta h_1^+ = \Delta h_1 u_\tau / \nu = 8.57$), 在离水面较近的区域, 铂丝绝缘段的高度约为 $\Delta h_2 = 2$ mm ($\Delta h_2^+ = 8.57$), 在较远的区域 $\Delta h_2 = 3$ mm ($\Delta h_2^+ = 12.9$). 根据 Schraub 等^[4]的分析方法, 使测量误差最小的时间间隔约等于 0.08 s, 所以取前后两幅图像相隔一帧.

2 结果和讨论

2.1 流场平均特性和瞬时流速剖面样本的验证

用氢气泡方法总计测量了 369 个时刻瞬时流速的分布, 时间跨度 $t = 36.8$ s ($t^+ = 584$). 根据这些测量结果, 在垂向一系列空间点上非线性插值, 可获得这些固定位置点上流速的时间序列. 进一步得到的水面附近平均流速 $\bar{u}(y^+)$, 脉动速度均方根 $(\overline{u'^2})^{1/2}(y^+)$ 和 $(\overline{v'^2})^{1/2}(y^+)$ 以及 Reynolds 切应力 $-\overline{u'v'}(y^+)$ 的分布剖面以无量纲形式给出在图 1 中. 图中也绘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一致 (图 1(a)), 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, 氢泡法测量的湍流脉动强度 $u'_{\text{rms}} (= (\overline{u'^2})^{1/2} / u_\tau)$ 分别比热膜结果偏小和偏大 (图 1(b)), 而 $v'_{\text{rms}} (= (\overline{v'^2})^{1/2} / u_\tau)$ 除了在 $y^+ < 30$ 的区域外总是高于热膜数据 (图 1(c)); 不过总的来看, 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 (图 1(d)), 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

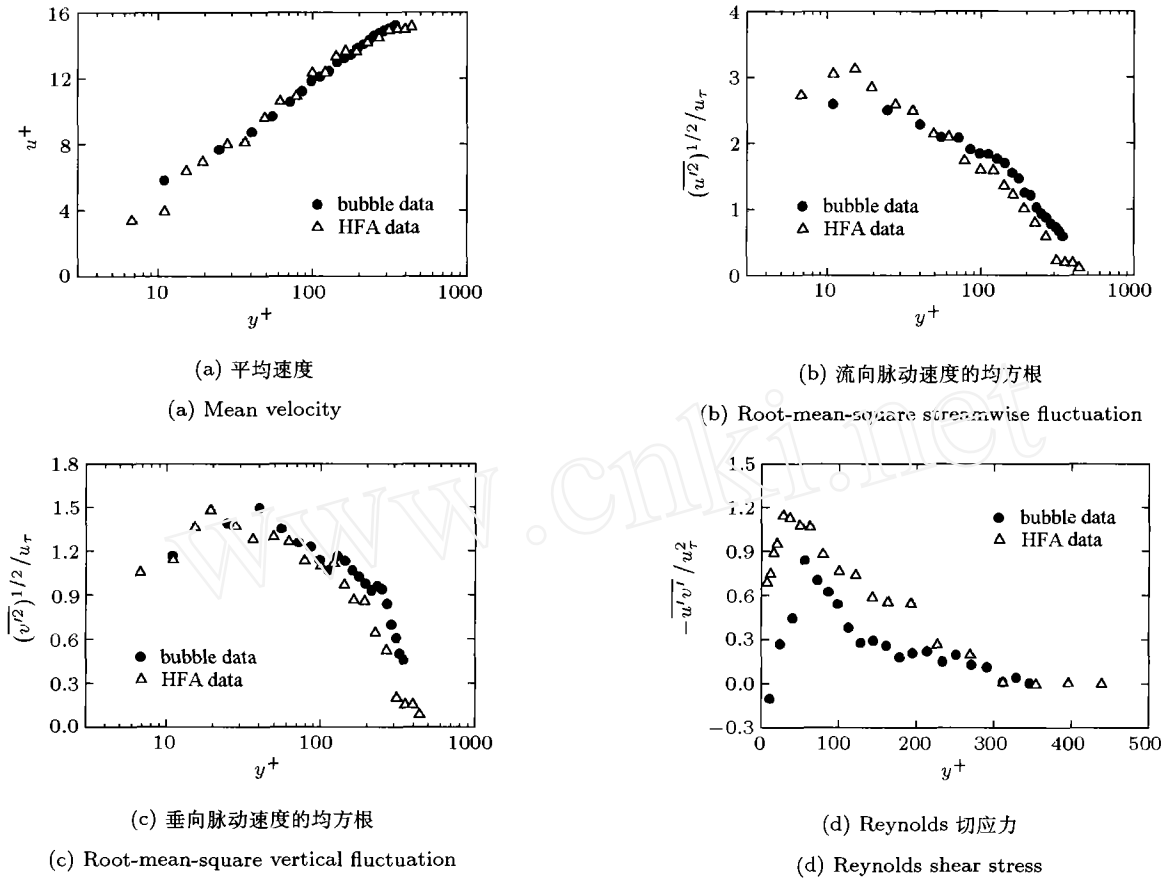


图 1 氢气泡方法测得的湍流统计量分布剖面与热膜数据比较

Fig.1 Comparison of turbulence statistic profiles determined by hydrogen bubble technique and hot-film anemometry

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.

一般认为, 如果一定数量的瞬时流速剖面的系综平均能够给出正确的平均速度剖面 (与探头测量结果比较), 它们就提供了一个良好的样本, 可用于湍流场的定量分析. 然而也应该注意到, 水面湍流边界层中的流动具有强烈的间歇性, 猝发事件的时间间隔和持续时间变化很大 [3], 36.8s 的采样时间里不会包含足够多的猝发过程; 如果一个物理量的大小主要与猝发或猝发间歇期的流动现象相联系, 不能期望从上述瞬时流速剖面样本产生的平均结果具有十分高的精度. 图 1 中用氢泡法得到的湍流强度和 Reynolds 切应力与热膜测量结果有所不同, 尤其 Reynolds 应力的数值差异较大; 幸运的是, 这并不会影响下文的讨论和主要结论, 因为那里更关心各物理量的相对大小.

2.2 猝发现象的信号特征

图 2 是水面边界层中不同深度位置处同一时间

段内的瞬时流向速度时间序列 (氢气泡方法的测量结果). 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,

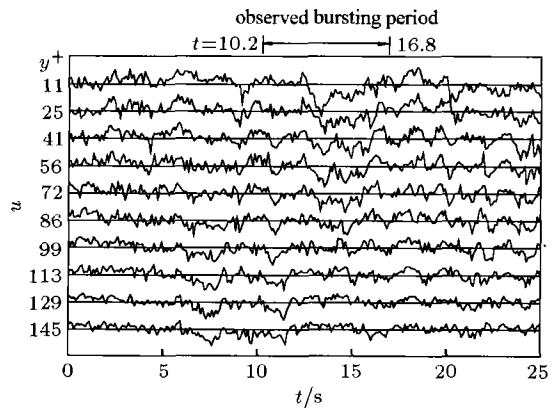


图 2 水 - 气界面下不同深度处的瞬时流向速度

Fig.2 Instantaneous streamwise velocities at different depths under the air-water interface

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。猝发事件的相关特征也体现在垂向流速的时间序列上，如图 3 所示。另外，猝发过程中水面附近 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。这与王双峰和贾复^[3]对低速流体条带喷射行为的观察结果相一致。

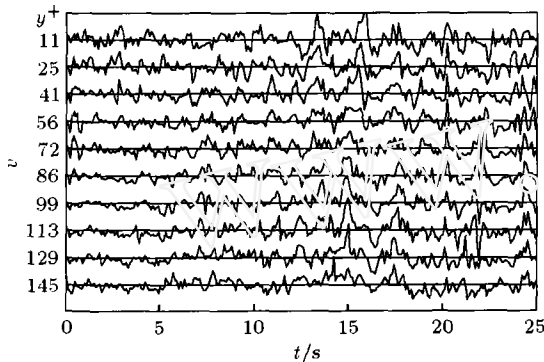


图 3 水 - 气界面下不同深度处的瞬时垂向速度

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

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 和 Kaplan^[10]的可变时间间隔平均 (variable-interval time-averaging, VITA) 技术计算了图 2 中流向速度的短时间间隔方差 $\text{Var}(t, T)$ 。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

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

其中 T 是平均时间段，取 $T^+ = 11.1$ 。一个局部化的湍流脉动强度参数就是 VITA 方差

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

图 4 是用脉动流速的均方根值 u'_{rms} 无量纲化后的计算结果， $k = \text{Var}(t, T)/u'^2_{\text{rms}}$ 。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。

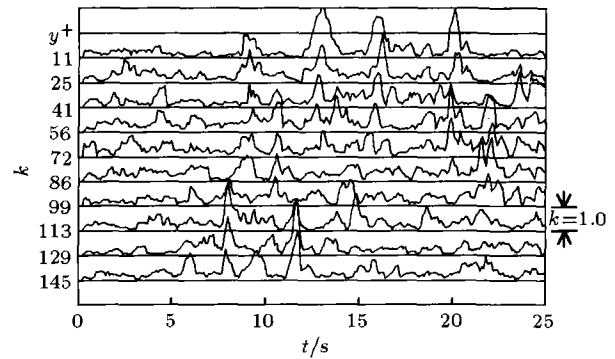


图 4 瞬时流向速度 (图 2 中所示) 的短时间间隔方差

$$k = \text{Var}(t, T)/u'^2_{\text{rms}}$$

Fig.4 Short-time variance of velocity signals shown in Fig.2.

$$k = \text{Var}(t, T)/u'^2_{\text{rms}}$$

与图 2 和图 3 相对应，Reynolds 切应力随时间的变化绘出在图 5 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有较大的贡献。

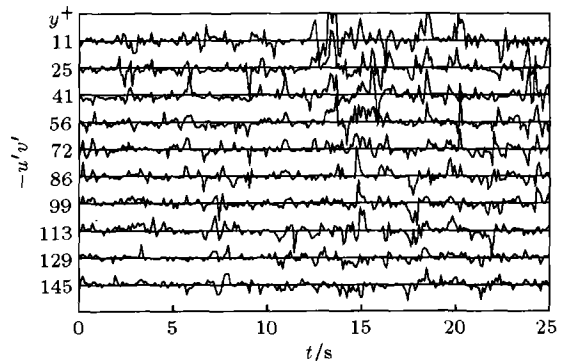


图 5 水 - 气界面下不同深度处的瞬时 Reynolds 切应力

Fig.5 Instantaneous Reynolds shear stresses at different depths under the air-water interface

2.3 猝发与水面湍流产生

在图 6 中，将平均 Reynolds 切应力的分布曲线与两个典型猝发过程和一个猝发间歇期的情况进行比较。猝发 B_1 即图 2 中所标注者，出现的空间范围为 $y^+ = 15 \sim 50$ ，第 2 个猝发 B_2 分别涉及 $y^+ = 20 \sim 30$ 和 $y^+ = 65 \sim 150$ 的区域。在猝发间歇期，氢气泡显示的垂直平面内的流动保持相对平静，但不能完全排除该平面外猝发事件 (没有被氢气泡显示) 带来的干扰，因而得到的 Reynolds 应力值可能是偏大的。图中结果表明，猝发期内，Reynolds

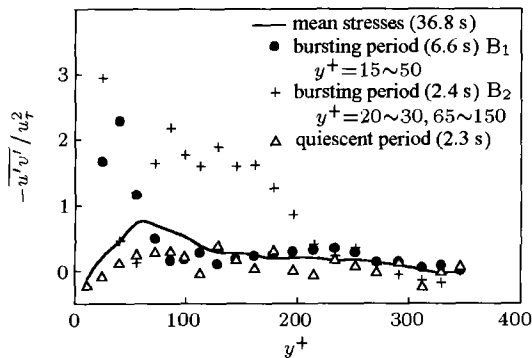
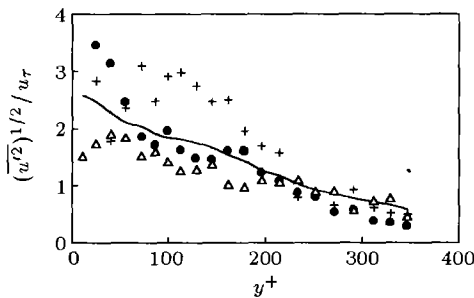
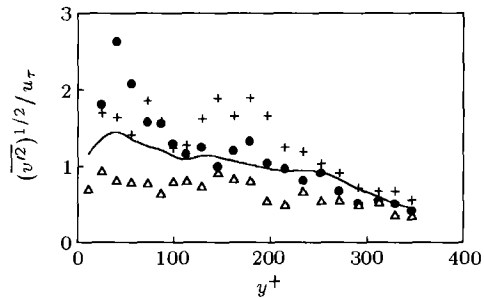


图 6 平均 Reynolds 切应力分布与典型猝发期和平静期数据的比较
Fig.6 Comparison of mean values of non-dimensional Reynolds shear stress with typical values for bursting and quiescent periods

应力在猝发事件所涉及的空间区域显著增大，超出平均值和非猝发期平均值若干倍，而在其它位置则没有发生显著的变化；非猝发期内，Reynolds 应力



(a) 流向脉动
(a) Streamwise direction



(b) 垂向脉动
(b) Vertical direction

图 7 脉动流速均方根值分布与典型猝发期和平静期数据的比较，图中符号含义同图 6
Fig.7 Comparison of root-mean-square fluctuation values with typical values for bursting and quiescent periods.

Symbols same as in Fig.6

3 结论

利用氢气泡时间线 - 脉线组合示踪技术，能够同时获得剪切水 - 气界面附近湍流运动的整体空间流态和瞬时流速剖面信息，将在流动显示图像中观察到的猝发事件与定量的速度信号特征直接联系起来，为分析其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。在猝发期，猝发事件涉及的空间区域内 Reynolds 切应力和湍流脉动强度明显比平均值和非猝发期的情况大。文中数据表明：在所考

的量值要比猝发期小得多，也小于平均值。图中负 Reynolds 应力的出现并不一定是测量误差带来的，如果在给定的 y^+ 位置，低速流体向边界运动 ($u' < 0, v' < 0$)，或者高速流体向边界层外缘运动 ($u' > 0, v' > 0$)，都能产生这种效应。在固壁湍流中，与上述两种情况相对应的流动现象均已经被观测到^[6,11,12]。但是，对于剪切水 - 气界面下的湍流边界层，当前的实验观察和测量数据还不能对此问题给予确定的回答。图 7 是湍流脉动强度与猝发期和猝发间歇期数据的对比。同样地， u'_{rms} 和 v'_{rms} 在猝发影响区有大幅度的增加，而间歇期的湍流脉动较弱。总结来自本文和引言中提到的文献^[3]的不同证据，可以看到，剪切水 - 气界面附近湍动能的产生和猝发事件（或低速流体条带喷射）有着密切联系，猝发是湍流速度脉动的活跃期，猝发现象固有的相干特性使其成为水面湍流产生的主要过程。

察的实验条件下，猝发是剪切水 - 气界面附近湍流产生的主要过程。

致谢 本文实验工作得到了北京大学湍流与复杂系统研究国家重点实验室的支持，在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Wang SF, Jia F, Niu ZN, et al. An experimental study on turbulent coherent structures near a sheared air-water interface. *Acta Mechanica Sinica*, 1999, 15(4): 289~298
- 2 Wang SF, Jia F. Some characteristics of low-speed streaks under sheared air-water interfaces. *Acta Mechanica Sinica*, 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 (Wang Shuangfeng, Jia Fu. Streak-ejections under sheared air-water interface. *Acta Mechanica Sinica*, 2002, 34(3): 305~313 (in Chinese))

- 4 Schraub FA, Kline SJ, Henry J, et al. 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
- 5 Kline SJ, Reynolds WC, Schraub FA, et al. The structure of turbulent boundary layers. *J Fluid Mech*, 1967, 30: 741~773
- 6 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
- 7 Grass AJ. Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries. *J Fluid Mech*, 1971, 50: 233~255
- 8 Wu J. Laboratory studies of wind-wave interactions. *J Fluid Mech*, 1968, 34: 91~111
- 9 Howe BM, Chambers AJ, Klotz SP, et al. Comparison of profiles and fluxes of heat and momentum above and below an air-water interface. *ASME J Heat Transfer*, 1982, 104: 34~39
- 10 Blackwelder RF, Kaplan RE. On the wall structure of the turbulent boundary layer. *J Fluid Mech*, 1976, 76: 89~112
- 11 Corino ER, Brodkey, RS. A visual investigation of the wall region in turbulent flow. *J Fluid Mech*, 1969, 37: 1~30
- 12 Wallace JM, Eckelmann H, Brodkey RS. The wall region in turbulent shear flow. *J Fluid Mech*, 1972, 54: 39~48

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE BURSTING CHARACTERISTICS UNDER SHEARED AIR-WATER INTERFACE¹⁾

Wang Shuangfeng^{*,2)} Jia Fu^{*} Wang Jinjun[†]

^{*}(National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

[†](Institute of Fluid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract The bursting phenomenon under a sheared air-water interface is quantitatively examined using combined-time-streak markers of hydrogen bubbles. Based upon samples of instantaneous velocity profiles derived from flow visualization pictures, the signal characteristics of bursting event are analyzed, and particular emphasis is placed on the relation between bursting processes and the production of turbulence near air-water interface. During a bursting, the instantaneous velocities and Reynolds shear stress near air-water interface fluctuate in relatively large amplitude, which appear to be associated with the ejection phenomena of low-speed streak. Their high degree of coherence in time and in the vertical direction is the most notable characteristic of bursting event. In bursting times, the values of Reynolds shear stress and turbulence intensity rise considerably in the region where bursting phenomenon is observed, and become much higher than the mean value and that in non-bursting period. The present data establish, for the case studied, that bursting processes is the main contributor of turbulent kinetic energy near sheared air-water interface.

Key words sheared air-water interface, bursting, turbulence production rate, combined-time-streak markers of hydrogen bubbles

Received 30 January 2003, revised 2 December 2004.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (19672070).

2) E-mail: sfwang@imech.ac.cn