第 34 卷 第 3 期　　力 学 学 报　　Vol. 34, No. 3
2002 年 5 月　　ACTA MECHANICA SINICA　　May, 2002

水 - 气界面下低速流体条带的喷射行为[1)]

王双峰　贾　复
(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 对剪切水 - 气界面下湍流低速条带的喷射现象进行了细致的观测. 喷射过程中, 条带的一部分迅速离开水面近区下侵, 与深层高速流动发生激烈的相互作用. 这意味着条带喷射对水面剪切层中的湍流输运有重要影响. 根据流动显示的图像资料获得的定量结果揭示出喷射行为的基本特征, 包括喷射频率、喷射流体的轨迹和速度分布等. 文中将这些特征与固壁湍流边界层中的对应情形作了比较. 实验观察和喷射、猝发事件的时间分布特点表明, 低速条带喷射是猝发过程的组成部分, 喷射的时间间隔一般显著小于猝发, 两种现象的出现都具有很强的随机性. 将喷射与湍动能产生率的空间分布作比较, 它们的形状极为相似, 反映出喷射过程可能是水面附近湍流的主要贡献者.

关键词 剪切水 - 气界面, 低速条带, 喷射, 猝发, 流动显示

引　言

高速 / 低速流体条带和间歇性的猝发现象, 是湍流边界层近壁流区内两个基本的相干特征 [1,2]. 猝发过程的出现是低速条带动力学演化的结果, 而条带结构 (或者说是形成条带的动力学机制) 又可能通过猝发事件得以维持、再生或增强 [3,4]. 这一密切联系反映了壁面湍流产生、自我维持及边界层不同区域相互作用的物理机制.

液体 - 气体交界面是流体运动的另一类重要边界, 这里的湍流结构是化学工程、海洋学乃至海军技术研究中十分感兴趣的课题. 同时, 作为明显不同于刚性固壁的边界, 液气两相交界面附近湍流特性的研究将提供一个新的视角来考察湍流的结构特征. 1990 年, Rashidi 和 Banerjee[5] 观测了受气流剪切但无波动的水 - 气界面下的湍流结构, 发现当界面上的剪切率足够大时, 类似固壁湍流那样, 在水面附近存在流体条带和猝发等结构. 但是, 因为水流深度较小 (最大为 3.25 cm), Rashidi 和 Banerjee 实验中的水面湍流结构难免受到底部壁面上湍流边界层的影响. 最近, Wang 等 [6] 在水深足够大, 排除了固壁湍流影响的条件下, 首次观察了独立产生于剪切水 - 气界面的湍流结构. 结果表明, 剪切是控制水面附近湍流结构的关键因素, 界面剪切达到一定强度时, 流动中相继出现湍流条带和猝发过程. Wang 和 Jia[7] 进一步确定条带结构出现的临界剪切条件, 用水流一侧的水面摩擦速度表示为 $u_\tau \approx 0.19\,\mathrm{cm/s}$; 条带在空间和时间上呈随机分布, 低速条带展向间距的统计分布则很好地符合对数正态性; 由于低速条带的合并和猝发, 条带平均间距随着水深的增加而增大, 无量纲化平均值 $\overline{\lambda^+}$ 相对 y^+ 的变化规律与界面剪切强度无关, 但是 $\overline{\lambda^+}$ 明显小于固壁湍流的相应结果.

2000-11-07 收到第一稿, 2001-08-29 收到修改稿.
1) 国家自然科学基金 (19672070) 资助项目.

本文是对剪切水 - 气界面附近湍流结构进行的系列研究的组成部分，目的在于详细观察低速流体条带离开水面近区向下喷射的行为，考察该现象的基本特征，分析条带喷射与猝发、喷射与湍动能之间产生的关系.

1 实验设备和方法

对实验装置的详细描述参见文献 [6]. 它的主体由循环式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，用变频调速器调节风机的输出功率，从而控制气流速度. 实验段长 (气流吹程)3.5 m，断面尺寸为宽 0.4 m，高 0.85 m，其中水深约 0.38 m，气流通道高约 0.47 m. 实验观察和测量断面距离气流进口 2.0 m.

实验在固定的水流来流条件下进行，均匀流速 U_∞ 为 6.0 cm/s. 气流方向与水流相反，均匀流速度 $V_\infty = 1.70 \sim 3.53$ m/s. 在这样的风速范围内，水面上没有明显的表面波产生. 在实验观测、记录前，留有充分长的时间使气流和水流达到稳定. 为了确定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) 精确测量了气流速度剖面，然后根据其对数分布特性和界面处两相剪应力相等的边界条件，求得水面上下两侧的摩擦速度 v_τ 和 u_τ. 具体的实验条件列在表 1 中.

表 1 实验参数

Table 1 Summary of the experimental conditions

U_∞ (cm/s)	V_∞ (m/s)	v_τ (cm/s)	u_τ (cm/s)	ν (cm^2/s) $\times 10^3$
6.0	1.74	5.80	0.20	8.63
6.0	2.09	7.57	0.26	9.05
6.0	2.72	10.7	0.37	9.38
6.0	3.12	12.6	0.43	9.17

采用氢气泡显示技术实现流动结构的可视化. 直径为 30 μm，长约 8.0 cm 的铂丝被绷紧固定在一个特别设计的支架上，保持和水面平行并垂直于流动方向. 它作为电解过程中的阴极，在脉冲直流电压的作用下，将产生氢气泡时间线. 通过与铂丝支架上端相接的座标架，可以把氢泡发生线置于水面下任意深度处，定位精度为 0.1 mm. 普通片光 (厚约 3.0 cm) 从水洞下方沿主流方向照亮氢气泡图案的中间部分，以增强流动显示的效果. 对氢泡时间线显示的低速流体条带，直接进行侧视观察，同时用 CCD 摄像机 (25 帧 /s) 记录. 获得的图像资料可供进一步回放分析，也可以输入计算机中，作更细致的定量处理.

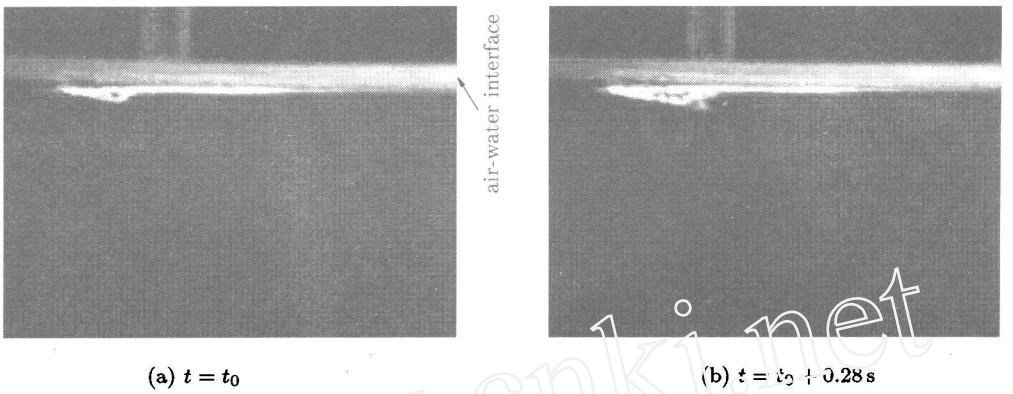
实验中，用两台单通道风速仪 (KANOMAX 1010) 和 X 型热膜探头 (TSI 1241-20W) 测量了水流中的二维瞬时速度. 本文的结果讨论中涉及了有关的部分结果，测量的细节和主要内容将另文介绍.

2 实验结果和讨论

2.1 低速流体条带的喷射现象

反复而仔细的观察表明，低速条带出现后，大部分时间里，平稳地顺流向下游延展，同时非常缓慢地离开水 - 气界面下侵. 在此阶段，条带作为一个整体保持相对的平静. 当随机发生

的猝发过程出现时，低速条带的某一部分突然向下抬起，“引领”条带沿清晰可辨的轨迹向水流深处快速迁移. 同时部分条带剧烈地扭曲、拉伸，破碎成无序的小尺度运动. 图 1 是氢气泡显示的一个喷射过程的初期形态，原本平直、安静的条带正迅速离开水面流区下侵. 由于低速条带的拉伸、变形和流动的强烈脉动，随着喷射的发展，示踪显示在静止的、数量有限的图片上将变得含糊不清. 根据实验和录像观察，图 2 描绘了典型的条带喷射过程，箭头所指为喷射条带的前锋.



(a) $t = t_0$　　(b) $t = t_0 + 0.28\,\mathrm{s}$

图 1 氢气泡显示的低速条带喷射的初期形态. 水流方向从左向右

Fig.1 Initial stage of a streak-ejection as visualized with hydrogen bubbles. The water flow is from left to right of the pictures.

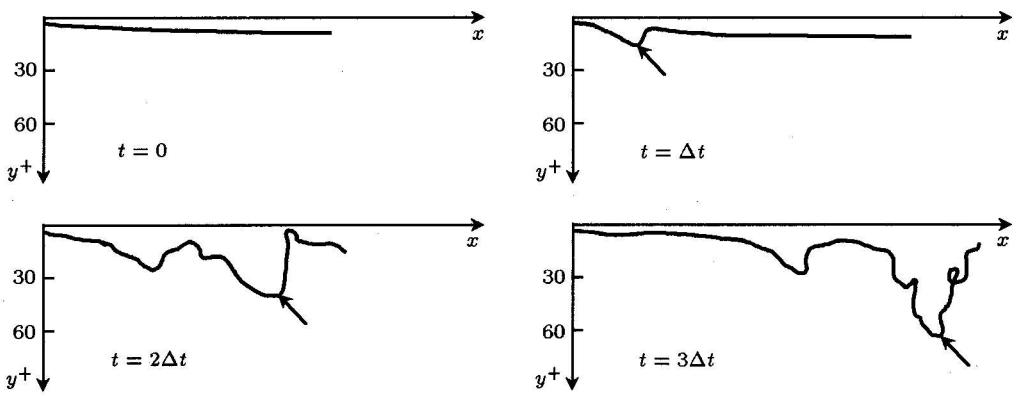


图 2 条带喷射过程略图

Fig.2 Schematic illustration of a typical ejection process

2.2 喷射流体的轨迹和速度

从流动显示图像的记录中，以 0.16 s(4 帧) 的间隔选取条带喷射过程的资料，并输入计算机，用于确定喷射流体前锋的轨迹和速度.

不同喷射的起始位置和达到的深度有显著差别，喷射轨迹之间的变化相当大. 但是，如果考虑足够大的样本，却可以得到稳定的平均喷射轨迹. 图 3 是 50 个喷射事件的平均和最可几轨迹. 从中可以看到，平均轨迹基本为直线，与水面成 1:4.2 的斜率，平均轨迹与最可几轨迹的位置非常接近. 在湍流边界层中， Kline 等 [1] 得到的喷射“涡”的平均轨迹可用直线表示，它

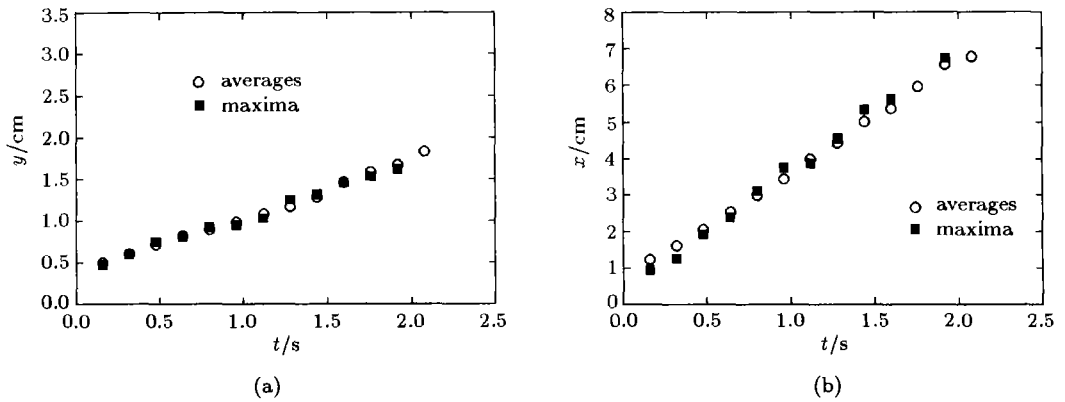


图 3 喷射流体的平均和最可几轨迹

Fig.3 Average and most-probable trajectories of ejected fluid

相对壁面的斜率约为 1:12.5，显然小于本文研究的剪切水 - 气界面的情况. 这就是说，水 - 气界面下的喷射发生时，低速流体离开边界向外区流动迁移的趋势更强烈.

在向水面剪切层外边缘运动过程中，喷射流体的平均速度如图 4 所示. 开始阶段，垂向速度 V_e 不断增大. 在 $y^+ \approx 35$ 的位置达到最大值 $V_e = 3.38u_\tau$ 之后逐渐减小. 这种变化表征了喷射的过程：在靠近水面的区域条带喷射处于发展时期，引起喷射行为的动力学机制发挥着控制作用；在稍远的地方，喷射机制减弱，甚至消失，喷射流体因周围环境的阻滞而减缓了下侵速度.

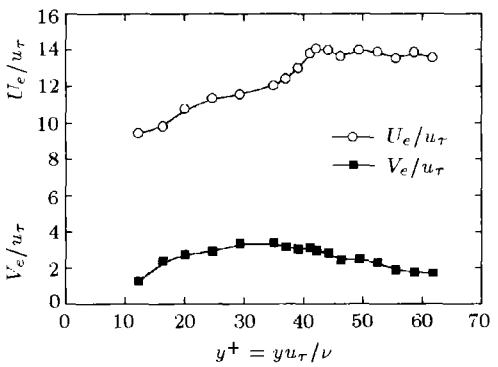


图 4 喷射流体的平均速度

Fig.4 Mean velocities of ejected fluid

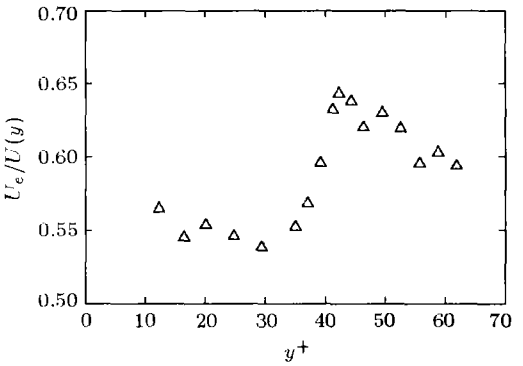


图 5 喷射速度和平均流速的比值

Fig.5 Ratios of ejection velocity to local average velocity

流向速度 U_e 在喷射初期也随着 y^+ 增大. 对此最为直接的解释是，离开水 - 气界面的低速流体在向深处迁移的过程中，受到速度越来越高的周围流体的挟带，动量持续增加. 不过，从图 4 的结果可以清楚地看到，在 $y^+ \geq 42$ 的区域 U_e 几乎保持常值， $U_e/u_\tau \approx 13.8$. 图 5 给出了 U_e 与当地平均流速的比值. 在所考察的流场范围内，喷射体的运动速度始终小于平均流速， $U_e/U(y)$ 的最大值发生在 $y^+ = 42$, 约为 0.65. 这些结果表明，起源于水面近区的喷射流体将在相当长的距离上保持其低速特点，与主流的完全掺混是一个比较缓慢的过程. 据 Kline 等 [1] 的观测，在固壁湍流边界层的条带猝发现象中，喷射流体在对数区 ($y_w^+ > 40$) 的速度基本

不变，约为 $13.8u_{\tau,w}$. 这与上面得到的剪切水 - 气界面附近的结果极为接近. 但是如果以平均流速为参考，会发现在水面剪切层的远区喷射速度大约为平均流速的 60% (注意，在 $y^+ \geq 55$ 的区域，$U(y)$ 趋近均匀分布)，而边界层中喷射体的外区速度约等于 80% 的平均流速，明显大于前者.

2.3 喷射发生频率

利用录像资料，可以确定在一定时间段内喷射事件的起始、终止时刻和数量. 对每一种实验条件，独立地进行三次这样的统计，得到了重复性很好的结果. 实验中，只有那些处于片光范围内的低速条带才是可见的，因而，由此方法确定的频率 F 应该理解成单位展向宽度上条带喷射发生的频率. 图 6 表示了 F 相对界面剪切强度的变化情况，就目前有限的数据来看，随着 u_τ 的增大，F 呈现幂次增长规律，大致有 $F \sim u_\tau^{1.81}$. 喷射事件的时间间隔具有强烈的随机性，以 $u_\tau = 0.26\,\mathrm{cm/s}$ 时的统计结果为例，平均值 $\overline{T}_e = 1.47\,\mathrm{s}$，而标准差 σ 高达 1.62 s.

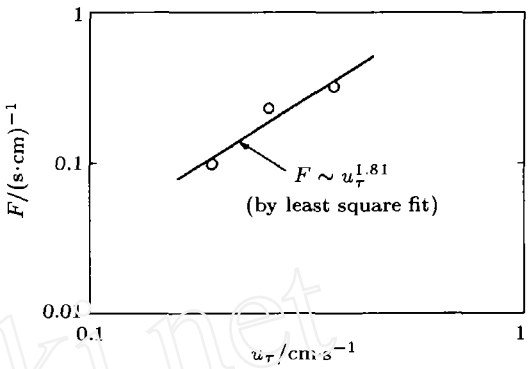


图 6　条带喷射频率随水面摩擦速度的变化

Fig.6　Ejection frequency as a function of friction velocity

2.4 喷射与猝发

在 2.1 中，把条带“喷射”描述为低速条带的某一部分突然抬起，向剪切层外区快速迁移的行为. 而对条带的行为特征，人们更熟悉的概念是所谓的“猝发”. 习惯上，这系指一个流体条带间歇性地离开其最初形成的边界流区，与外流发生相互作用，最终破碎而失去原有的相干特征的整个过程. 因此，猝发和喷射既有明显区别，又紧密联系. 明确这两个概念对观察物理现象很重要，进一步了解它们的时间分布特点也是应用条件采样技术从单点测量的湍流信号中检测猝发事件的需要 [8].

为了辨别喷射和猝发，实验中对条带结构进行观察记录的位置低于水平面，视线方向与水面约成 30° 夹角. 这样就可以同时看到低速条带和它们的喷射，区别同一条带的多次喷射和不同条带的喷射.

实验中观察到，虽然水 - 气界面下的猝发过程有可能仅仅包含一次喷射，更常见的情况是它们由多个离散的喷射构成，这些喷射事件彼此密切关联、相继发生，时间间隔一般比猝发周期短得多. 图 7 是 $u_\tau = 0.26\,\mathrm{cm/s}$ 时，在 155 s 的统计时段里喷射事件的发生情况. 图中数据点的横坐标给出了喷射的起始时刻，纵坐标表示与相邻前一事件的间隔 T_e，而实心符号表示是一个条带的第 1 次喷射，旁边所注数字为条带消失前所经历的喷射数量. 很显然，与来自不同条带的喷射相比，同一条带的多次喷射间隔一般较短，猝发过程包含若干个这样的事件.

图 8(a) 是 T_e 的分布直方图. 它明显向较小值偏斜，意味着存在内部紧密相连的喷射组. 将图 8(a) 中那些属于不同猝发过程的喷射事件之间的间隔 (即图 7 中实心符号对应的数据) 除外，图 8(b) 给出了猝发过程中的喷射间隔分布，它的范围大大减小，所有的 T_e 值均小于 4 s.

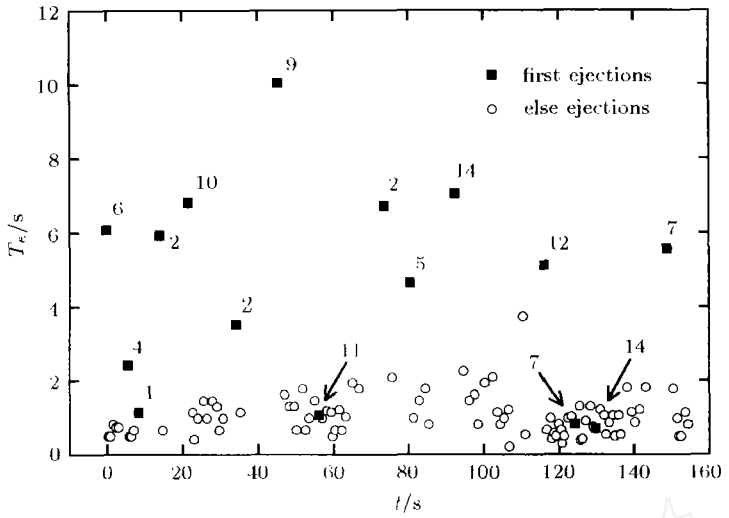
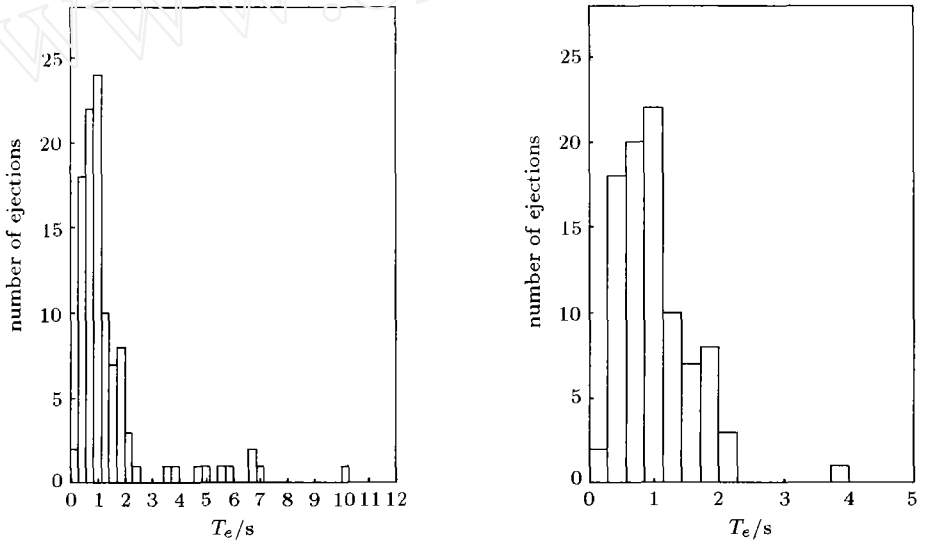


图 7 条带喷射的发生情况, $u_\tau = 0.26\,\mathrm{cm/s}$, 统计时间 155 s, 喷射次数 106

Fig.7 Occurrence of streak ejections. $u_\tau = 0.26\,\mathrm{cm/s}$, sample time is 155 s, number of ejections is 106



(a) 所有喷射事件, 平均间隔 $\overline{T}_e = 1.47\,\mathrm{s}$, 标准差 $\sigma = 1.62\,\mathrm{s}$

(a) For all the ejections, $\overline{T}_e = 1.47\,\mathrm{s}$, $\sigma = 1.62\,\mathrm{s}$

(b) 来自相同条带的喷射, $\overline{T}_e = 1.02\,\mathrm{s}$, $\sigma = 0.55\,\mathrm{s}$

(b) For ejections from the same streak, $\overline{T}_e = 1.02\,\mathrm{s}$, $\sigma = 0.55\,\mathrm{s}$

图 8 喷射时间间隔的分布直方图

Fig.8 Histograms of time interval between ejections

图 9 是更长统计时段内猝发时间间隔 T_b 的分布. 可以看出, 猝发发生的随机性很强, T_b 的最大值达到 24 s, 最小仅为 2.5 s, 标准差 $\sigma = 5.54\,\mathrm{s}$. 另外也注意到, 平均值 $\overline{T}_b = 10.3\,\mathrm{s}$, 比喷射的平均周期大得多; 除一次喷射特例外, T_b 的最小值甚至比图 8(b) 中 T_e 的最大值还要大.

关于固壁附近湍流中的猝发频率，有比较多的研究者如 Blackwelder 和 Haritonidis[9], Willmarth 和 Sharma[10], Luchik 和 Tiederman[11], 舒玮和唐宁 [12] 倾向于用内部参数 (壁面摩擦速度 $u_{\tau,w}$ 和流体运动黏性系数 ν) 无量纲化，得到的平均猝发周期 $\overline{T_{b,w}^+}(=\overline{T_{b,w}}u_{\tau,w}^2/\nu) = 85 \sim 95$. 如果也采用当地的界面摩擦速度和 ν 作为控制参数，$u_\tau = 0.26\,\mathrm{cm/s}$ 时水 - 气界面处的猝发周期 $\overline{T_b^+} = 80$，与固壁情形接近. Wang 和 Jia[7] 证明，在剪切水面的邻近区域，低速条带的平均间距 $\overline{\lambda^+} \approx 65$, 显著小于固壁湍流的结果 $\overline{\lambda_w^+} \approx 100$. 由此不难推断，剪切水 - 气界面附近条带的平均生存期 $(\sim \overline{T_b^+}/\overline{\lambda^+})$ 要比固壁情况长.

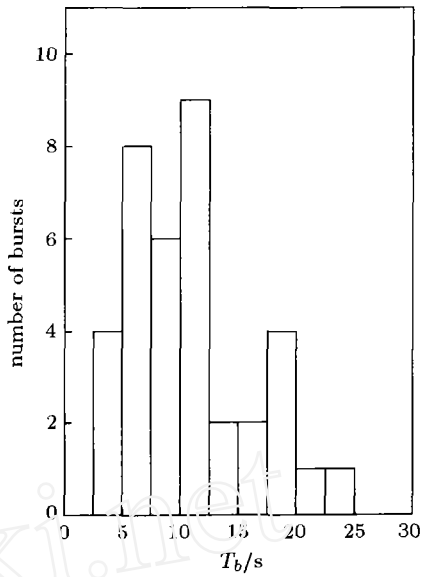


图 9 猝发间隔的分布直方图. 统计时间 380 s, $\overline{T}_b = 10.3\,\mathrm{s}$, $\sigma = 5.54\,\mathrm{s}$

Fig.9 Histogram of time interval between bursts. Sample time is 380 s, $\overline{T}_b = 10.3\,\mathrm{s}$, $\sigma = 5.54\,\mathrm{s}$

2.5 喷射与湍流产生

从 2.2 中结果可知，低速条带喷射出的流体团所经过的空间区域，流向速度出现亏损，脉动速度 u 为负，而垂向脉动速度 v 为正 (坐标轴方向向下)，所以 Reynolds 剪切应力 $-uv$ 和湍动能产生率 $P(t) = -u(t)v(t)\partial U/\partial y$ 均是正的，喷射对水面湍流产生正的贡献. 从统计的角度看，如果条带喷射行为是湍流的主要源泉，湍动能平均产生率 $\overline{P} = -\overline{uv}\partial U/\partial y$ 和喷射频率之间应当有相似的空间分布，喷射体频繁到达的地方 $\overline{P}$ 值较大，反之，湍动能产生率低的地方喷射出现机会也应该小. 图 10 给出了无量纲湍动能产生率分布 $\hat{P}(y^+) = \nu/u_\tau^4\overline{P}$ 与喷射体位置直方图的一个比较. 直方图是根据流动显示图

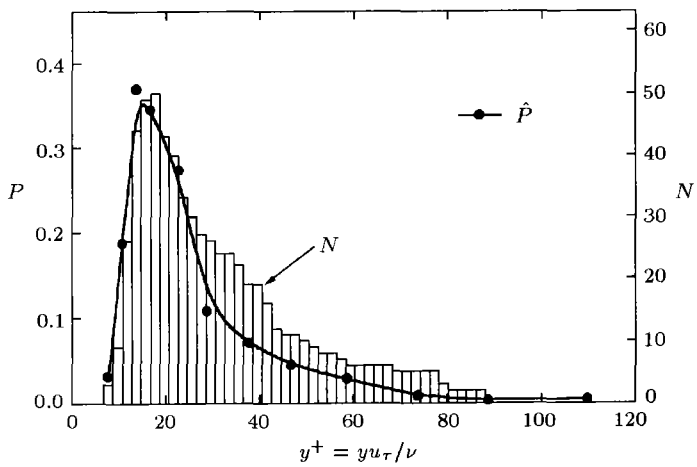


图 10 无量纲湍动能产生率曲线 $\hat{P}(y^+)$ 与喷射体位置直方图 $N(y^+)$ 的形状对比

Fig.10 Shape of the non-dimensional turbulence production rate, $\hat{P}(y^+)$, compared to the shape of the histogram of ejected fluid $N(y^+)$

像统计 55 个喷射事件得到的, 表示了在 $\Delta y^+ \approx 2$ 的每个深度单元内喷射流体出现的次数 $N(y^+)$. 两种分布图的形状惊人地相似, 在邻近水 - 气界面的流动区域 ($y^+ \leq 25$), 它们几乎完全一致. 应该说, $\hat{P}$ 曲线的形式是相当特殊的, 喷射位置直方图能与其吻合不是偶然的, 反映了条带喷射现象和湍流产生之间客观存在的密切联系.

3 总 结

应用氢气泡技术仔细观测剪切水 - 气界面下低速流体条带的行为特征, 得到以下几点认识:

1) 条带的某一部分间歇性地离开表面流区, 快速侵入深层流动并发生强烈破碎, 是该结构的一个特征行为. 喷射现象随机出现, 但是喷射频率随着水面剪切强度的增加而增加, 与摩擦速度有幂函数关系.

2) 喷射流体的空间轨迹千差万别, 大量事件的平均轨迹却是稳定的直线, 且与最可几情况相近. 喷射过程的初期, 喷射体加速向水面剪切层外缘迁移, 在 $y^+ > 35$ 的区域, 周围流体的阻碍使得垂向平均速度逐渐减小. 喷射流体的流向平均速度约在 $y^+ = 42$ 增长至最大值, 而后基本不变, $U_e \approx 13.8u_\tau$, 与固壁湍流的结果一致. 在观测的流场范围内, 喷射流体保持自身的低速特征, 和主流 "融合" 比较缓慢.

3) 条带喷射将水面附近的低速流体抛射到外区高速流动中, 这意味着此现象对水流表层与深层之间的物质、动量和能量传输起着重要作用.

4) 低速条带喷射是猝发过程的组成部分, 一个条带在完全破碎之前往往要经历多次喷射, 这些喷射事件紧密组合在一起, 时间间隔一般显著小于猝发. 无论是猝发还是喷射, 出现的随机性都很强.

5) 湍动能产生率曲线 $\hat{P}(y^+)$ 与喷射体分布直方图 $N(y^+)$ 的形状十分相似. 这表明喷射事件和水面湍流的产生有密切关系, 更具体地说, 低速条带的喷射过程可能是湍能的主要贡献者.

致谢 感谢北京大学湍流研究国家重点实验室对本文实验工作的支持.

参 考 文 献

1 Kline SJ, Reynolds WC, Schraub FA, Runstadler PW. The structure of turbulent boundary layers. *J Fluid Mech*, 1967, 30: 741~773

2 Kline SJ, Robinson SK. Quasi-coherent structures in the turbulent boundary layer: Part I. Status report on a community-wide summary of the data. In: Kline SJ, Afgan NH, eds. Near-Wall Turbulence, Proc. Zoran Zaric Meml. Conf., 1988, New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1989. 200~217

3 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

4 Smith CR, Walker JDA, Haidari AH, Sobrun U. On the dynamics of near-wall turbulence. *Phil Trans R Soc Lond A*, 1991, 336: 131~175

5 Rashidi M, Banerjee S. The effect of boundary conditions and shear rate on streak formation and breakdown in turbulent channel flows. *Phys Fluids*, 1990, 2(10): 1827~1838

6 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

7 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

8 Bogard DG, Tiederman WG. Burst detection with single-point velocity measurements. *J Fluid Mech*, 1986, 162: 389~413

9 Blackwelder RF, Haritonidis J H. Scaling of the bursting frequency in turbulent boundary layers. *J Fluid Mech*, 1983, 132: 87~103

10 Willmarth WW, Sharma LK. Study of turbulent structure with hot wires smaller than the viscous length. *J Fluid Mech*, 1984, 142: 121~149

11 Luchik TS, Tiederman WG. Timescale and structure of ejections and bursts in turbulent channel flows. *J Fluid Mech*, 1987, 174: 529~552

12 舒玮, 唐宁. 湍流边界层的猝发频率. 力学学报, 1989, 21(4): 391~395 (Shu Wei, Tang Ning. Bursting frequency in turbulent boundary layers. *Acta Mechanica Sinica*, 1989, 21(4): 391~395 (in Chinese))

STREAK-EJECTIONS UNDER SHEARED AIR-WATER INTERFACE [1)]

Wang Shuangfeng　Jia Fu

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080, *China*)

Abstract Described in this paper are careful visual and quantitative studies on ejection phenomena of low-speed streaks under sheared air-water interface. During an ejection process, a portion of low-speed streaks rapidly migrates away from the water surface, and subsequently breaks down in a violent interaction with faster flow, demonstrating that such processes play an important role in the turbulent transport between the interface and deeper layers. Quantitative data derived from flow-visualization pictures reveals fundamental features in ejection events, including frequency, trajectories and velocities of ejected fluid. Comparisons of these findings with the corresponding features of near-wall streak-ejections are also made. Temporal distributions of ejection and bursting events, together with the visual observations, indicateo that a burst may involve either a single ejection or multiple ejections closely grouped together, and the time interval between ejection events is generally much less than that between bursts. Furthermore, the occurrence of both ejections and bursts exhibits intense randomness. The comparison of a turbulence production profile with the corresponding frequency distribution of ejections is presented. The remarkable agreement in the shape of two curves strongly suggests that ejection processes is the chief contributor of turbulent kinetic energy.

Key words sheared air-water interface, low-speed streak, ejection, burst, flow visualization

Received 11 July 2000, revised 29 August 2001.

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