

文章编号: 1007-3124(2004)02-0086-05

剪切水气界面下湍流特性的实验测量

王双峰¹, 贾 复², 王晋军¹

(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:通过实验研究了受气流剪切但无明显波动的水气界面下的湍流特性。当界面剪切较强 ($u = 0.20\text{cm/s}$) 时, 水面边界层中平均流速、速度脉动强度和 Reynolds 切应力的分布形状与固壁湍流相似, 预示剪切水气界面和固壁附近的湍流相干结构是相类似的。另一方面, 水面湍流也表现出不同于固壁湍流的细节特征。与自由面湍流不同的是, 在靠近剪切水气界面的流场中流向和垂向速度脉动同时受到抑制。

关键词:水气界面; 表面剪切; 湍流

* 中图分类号: O357.5 文献标识码: A

Experimental measurements of the turbulence characteristics under sheared air-water interfaces

WANG Shuang-feng¹, JIA Fu², WANG Jin-jun¹

(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: Measurements of mean velocity and turbulent quantities have been carried out under sheared air-water interfaces. Surface shear was imposed by an airflow over the water flow which was kept free from surface waves. Results indicate that, when the shearing airflow is relatively strong (interface friction velocity on water side $u = 0.20\text{cm/s}$), distributions of mean velocity, turbulence intensities and Reynolds shear stress near the water surface are similar to those observed in near-wall turbulence, suggesting the similarity of turbulent coherent structures in the two flows. On the other hand, the present data also show some characteristics peculiar to sheared air-water interfaces. In the flow field close to sheared air-water interfaces, velocity fluctuations both in streamwise and in vertical directions are damped. This is a notable feature that distinguishes turbulence near sheared air-water interface and free-surface turbulence.

Key words: air-water interface; surface shear; turbulence

0 引言

液体-气体界面是流体运动的基本边界形式之一。在过去的几十年里, 由于来自化学工程、环境工程、海洋学以及海军技术等不同领域的社会实践需求, 液气界面附近的湍流问题受到了人们持续不断的、同时又是愈来愈广泛的关注^[1~3]。

与固壁边界不同, 液体-气体交界面的两侧均为连续的流体介质。在分析液相运动时, 如果可以假设液气界面的动力学和物理化学性质不受气相影响, 问题会得到相对的简化。这时的液相表面称为自由表面 (free surface)。从数学处理的角度看, 自由表面的概念意味着气相的密度和粘性为零, 在液相上方不存在连续介质; 在实际应用中, 自由面是对许多流动情

* 收稿日期: 2003-08-05; 修订日期: 2003-12-15

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, 河南荥阳人, 博士后研究人员, 研究方向: 湍流结构, 实验流体力学。

况很好的近似,指气相动力学行为对下面的液体运动的影响可以忽略。研究自由面湍流实质上是考察流场中其它区域产生的湍流在自由表面附近的行为特性,或者说是湍流与零剪切液气界面的相互作用。有关研究工作已取得丰富的成果,从中人们掌握了自由面湍流的一些重要特性^[1,2]。

在自然环境和工程技术中更为常见的情况是,液气两相的流动通过交界面紧密耦合,互相影响。其中气相流动施加在界面上的剪切应力起着控制作用。它在液面下产生剪切层(液面边界层),推动表面波出现,不仅是气流动量向液相传递的重要媒介,也是界面附近湍流产生的基本机制之一。如果没有表面波的破碎和浮力驱动流动,剪切是液气界面湍流能量的主要根源。但是,对剪切液气界面附近湍流的研究起步较晚,无论与固壁湍流还是自由面湍流相比,目前所获得的信息非常有限,甚至缺乏对流场基本特征的认识。为此,笔者对气流剪切作用下水面边界层的平均流场进行了较为细致的实验测量,并与固壁湍流的相应结果比较,分析了剪切水气界面附近湍流的特性。实验中,通过采用较大水深、限制水气两相的速度差,把固壁和水面波动的影响排除在外。

1 实验设备和方法

实验是在北京大学湍流与复杂系统研究国家重点实验室完成的。实验装置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;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 3.5m,断面尺寸为宽 0.4m,高 0.85m,其中水深 0.38m,气流通道高 0.47m。实验测量断面距离气流进口 2.0m。对实验装置的详细描述参见文献[3,4]。

实验水流速度 $U = 6.0\text{cm/s}$,气流方向与水流相反,均匀流速 U_a , 不超过 3.53m/s 。在这样的风速范围内,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)测量了气流平均速度剖面。水面上方的气流速度分布符合对数律^[5,6]

$$\frac{\bar{u}_{a,r}}{u_*} = 2.5 \ln \left[- \frac{y u_*}{a} \right] + C \quad (1)$$

其中 $\bar{u}_{a,r} = (\bar{u}_a - U_s)$ 是气流相对水面的速度(U_s 表示水面平均流速,根据水气界面附近的水流速度分布

确定,具体方法将在后文中讨论), $u_* = \sqrt{\tau/a}$ 是气流边界层的摩擦速度(τ 为水面剪切应力, a 是空气密度), C 是与界面粗糙度有关的常数, y 坐标的原点为水气交界面,正方向垂直向下。将测量的风速剖面用(1)式拟合,求得 u_* 后,由交界面处水气两相剪切应力相等的边界条件,可得到水流一侧的摩擦速度 $u = \sqrt{\tau/\rho}$ (ρ 是水的密度)。

使用 X 型热膜探头(TSI 1241-20W)测量水流中的二维瞬时速度,即流向速度 u 和垂向速度 v ,探头安装在一个可沿垂向移动的坐标架上,定位精度为 0.1mm;它的两根热膜分别由一台单通道风速仪(KANOMAX 1010)控制,每个通道的采样频率为 1000Hz,采样时间为 60s,电压输出经过 A/D 同步转换输入计算机,处理后获得平均流速 \bar{u} 、速度脉动强度 $(u'^2)^{1/2}$ 和 $(v'^2)^{1/2}$ 以及 Reynolds 剪切应力 $-\overline{uv}$ 。

2 结果和讨论

零剪切“自由”水面下的流速分布如图 1 所示。尽管在紧邻界面处存在很微弱的速度亏损层,此时水面附近的流动具有显而易见的二维性,水气界面近似于自由表面。

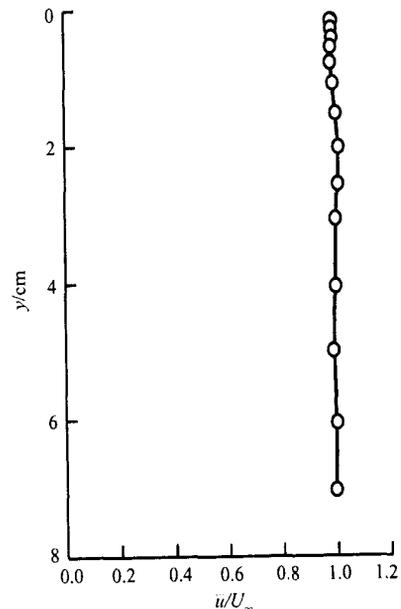


图 1 零剪切水气界面附近的水流平均速度分布

Fig. 1 Mean velocity distribution near the air-water interface with no shear

当水流表面受到反向气流的剪切时,几种风速条件下水面附近平均流速的分布情况如图 2。定义水面边界层的厚度 δ 为平均流速等于 $0.99U$ 处到水

面的距离,可以看出随着界面剪切强度显著增加。因为水面波动的幅度十分微小,流速测量能够进行到比较靠近水气界面的位置。看起来,水面近区的速度随水深 y 呈线性分布;虽然该区域内流速分布的确切形式很难测定,这里关心此问题的目的主要是通过线性拟合水面近区的测量结果,并外延至水气界面,求得水面的平均运动速度 U_s ,水面薄层内的流速略微偏离线性分布不会给 U_s 值带来大的误差。若把 U_s 看成是零风速时水面速度与气流引起的 Euler 表面漂流(surface drift)的叠加,可得到漂流速度 U_{drift} ,它们与气流摩擦速度 u^* 的比值在图 3 中给出。

U_{drift}/u^* 和风速(摩擦速度)之间没有明显的相互依赖关系,其经验表达式 $U_{drift}/u^* = 0.51$ 。这与 Phillips & Banner^[7]和 Wu^[8]在风浪槽中测量的结果非常接近,他们分别得到 $U_{drift}/u^* = 0.55$ 和 0.53。

用 u 和水的运动粘性系数作为无量纲参数,将 $u = 0.37\text{cm/s}$ 时的流速剖面绘制在图 4 的“壁面律”坐标中,其中的水流平均速度是水流相对于运动水面的速度, $u^+ = (\bar{u} - U_s)/u^*$, $y^+ = yu^*/\nu$ 。约在 $y^+ > 20$ 的区域内,流速服从对数分布规律,对数公式

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \quad (2)$$

中的常数 $\kappa = 0.34$ 与固壁湍流边界层 ($\kappa = 0.4$) 相

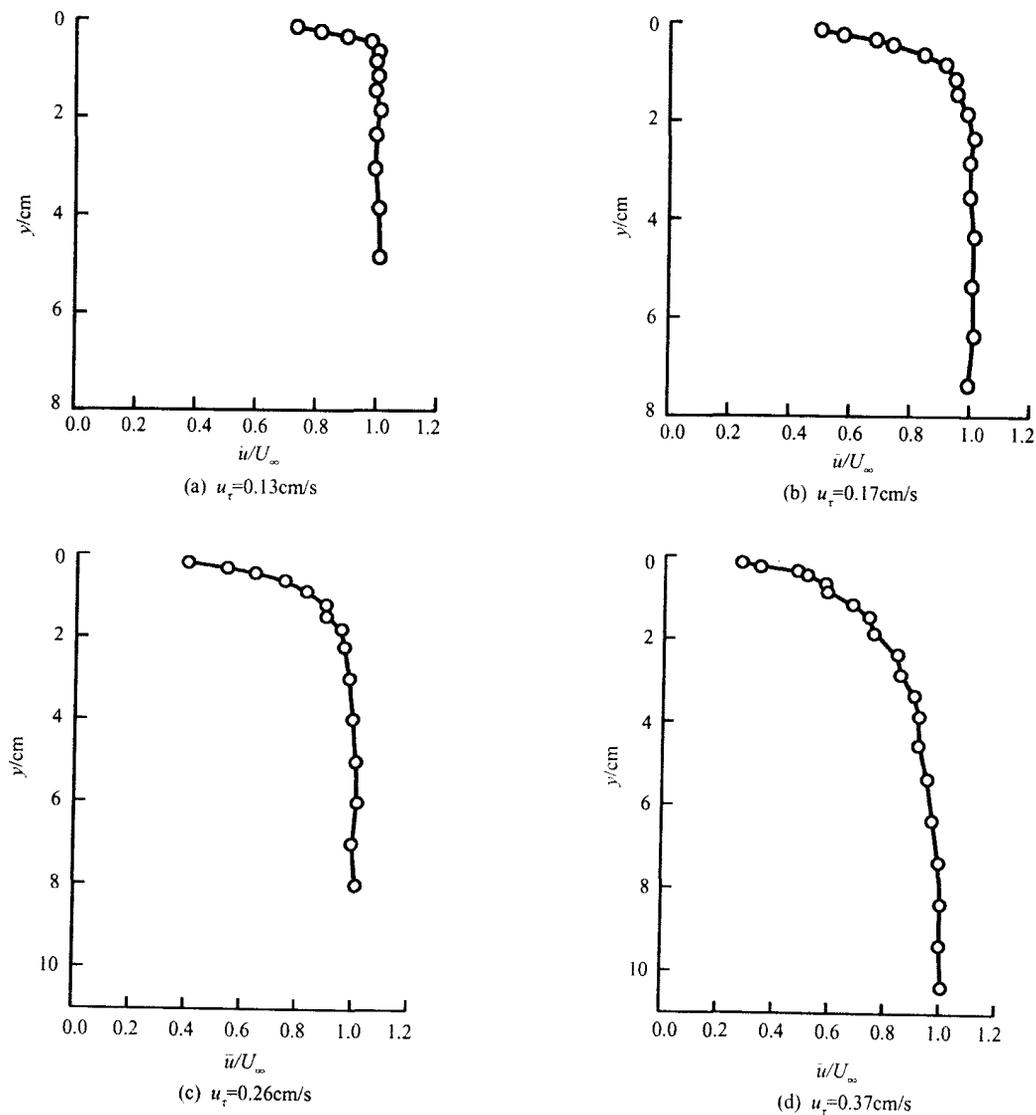


图 2 剪切水气界面下边界层的平均流速剖面

Fig.2 Mean velocity profiles for boundary layers under sheared air-water interfaces

比发生了明显的变化。在这里,还不能准确地给出水面附近对数流速律中 B 和 B' 的取值,但是可以了解到,至少对于界面剪切强度较大的情况,水面边界层的平均速度剖面与固壁湍流定性地相似。

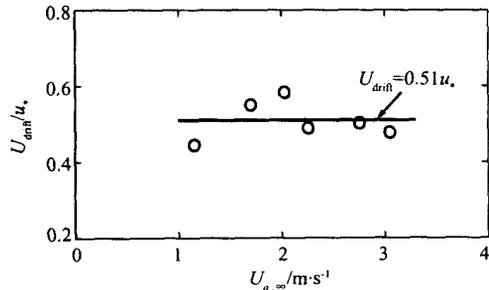


图 3 不同风速时的水面漂流速度

Fig. 3 Surface drift currents for various wind velocities

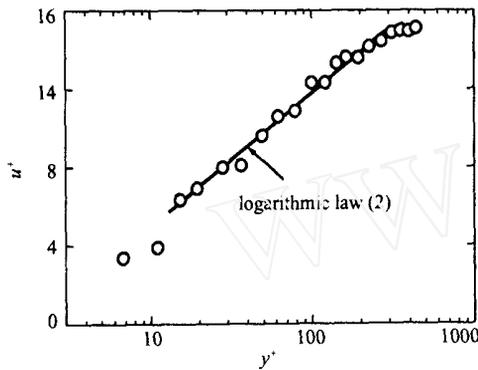


图 4 $u = 0.37\text{cm/s}$ 时平均流速剖面在“壁面律”坐标中的形式

Fig. 4 Mean velocity profile in “law-of-the-wall” coordinates for $u = 0.37\text{cm/s}$

流向和垂向脉动速度的均方根 $(\overline{u^2})^{1/2}$ 、 $(\overline{v^2})^{1/2}$ 的分布以无量纲形式分别给出在图 5 和图 6 中,为了看清楚水面近区的情况,横坐标采用对数形式。界面剪切强度不同, u_{rms} 的剖面表现出截然不同的特点,这种转变的完成大约发生在 $u = 0.20\text{cm/s}$; 当 $u = 0.20\text{cm/s}$ 时,除了紧邻水流表面的区域外,用 u 和无量纲化的测量数据集中于一条窄带上, u_{rms} 随 y 的变化可表示为

$$u_{rms}/u = 1.57(y/\delta)^{-0.21} \quad (y/\delta < 0.4)$$

$$u_{rms}/u = 0.36(y/\delta)^{-2.72} \quad (y/\delta > 0.7) \quad (3)$$

多少有些意外的是,在靠近剪切水气界面的流场中, u_{rms} 有所减小,边界对流向速度脉动产生抑制;而在自由表面附近,湍流行为最显著的特征是垂直自由面的湍流脉动受到抑制,但平行脉动分量相反得到加强,湍动能发生再分配^[9, 10]。这说明,由于受到外加剪切应力,水面的变形(部分)失去“自由”,剪切水气

边界对邻近的水流运动有强制作用。图中同时给出了 Klebanoff^[11]对零压力梯度平板湍流边界层的测量结果。界面剪切较强时,水面附近 u_{rms} 的变化趋势和这些参考数据一致,但是一般比它们大。所有剪切条件下,垂向速度脉动强度小于流向分量,表现出水面边界层流动的的各向异性;在靠近水面的地方, v 受到较强抑制, v_{rms} 迅速减小; $u = 0.20\text{cm/s}$ 时, v_{rms} 的分布形状也和固壁湍流参考曲线相似,而数值较大,在离开界面较远的区域, v_{rms} 的剖面可由如下关系式近似

$$v_{rms}/u = (y/\delta)^{-0.13} \quad (y/\delta < 0.4)$$

$$v_{rms}/u = 0.31(y/\delta)^{-2.62} \quad (y/\delta > 0.7) \quad (4)$$

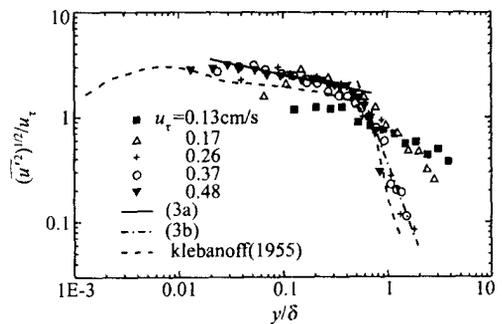


图 5 流向脉动速度均方根值的分布

Fig. 5 Distributions of root-mean-square streamwise velocity fluctuation

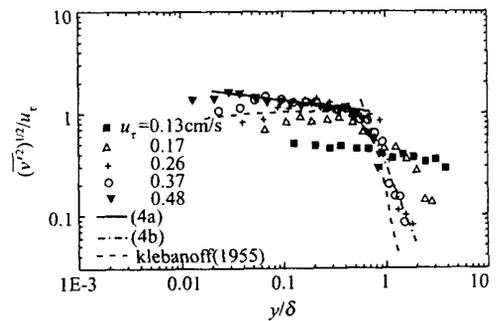


图 6 垂向脉动速度均方根值的分布

Fig. 6 Distributions of root-mean-square vertical velocity fluctuation

图 7 是 Reynolds 剪切应力 $-\overline{uv}/u^2$ 随无量纲水深 y/δ 的分布情况。如同速度脉动强度一样,水面剪切比较强时,Reynolds 切应力有近乎不变的分布形状,并和 Klebanoff^[11]的固壁湍流结果相似。但是,二者的细节差别明显,如 $-\overline{uv}/u^2$ 的最大值及其发生位置等。实际上,因为湍流的平均速度剖面是由 Reynolds 应力(包括切应力和正应力)分布决定的,不

难预测:强剪切时,剪切水气界面与固壁附近平均流速剖面的相似性理应在 Reynolds 切应力、脉动速度的均方根 $(u^2)^{1/2}$ 和 $(v^2)^{1/2}$ (其平方即为 Reynolds 正应力)的分布剖面中得到延续。进一步地,既然在固壁湍流中,大尺度相干结构贯穿于湍流产生、耗散和自我维持的整个过程,控制着 Reynolds 应力的产生和输运,类似的流动结构很有可能也出现在剪切水气界面附近,并且发挥重要作用。最近,王双峰等^[3, 4, 12, 13]通过系统的实验观测和分析,对此给予了肯定的回答。他们发现,剪切是影响水气界面附近湍流结构的本质因素,当水面摩擦速度 $u = 0.19\text{cm/s}$ 时,在水面下会出现沿展向排列的高速/低速流体条带、间歇性的湍流猝发和各种涡结构等相干运动形式;剪切水面附近的湍流相干结构表现出诸多与固壁情形相同或相似的特征,边界条件(固壁或水气界面)会改变附近湍流结构的某些特征,但其影响是第二位的。

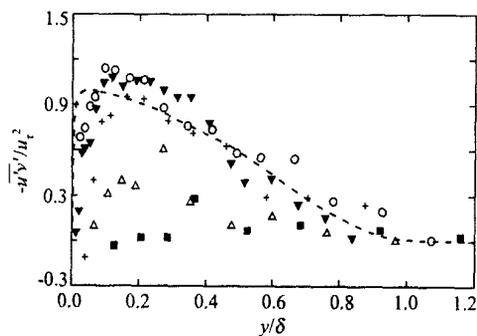


图7 Reynolds 切应力的分布,图中符号含义同图5

Fig. 7 Distributions of Reynolds shear stress. Symbols same as in Fig. 5

3 结论

通过测量气流剪切作用下水面边界层中的平均流速 \overline{u} 、脉动速度均方根 $(u^2)^{1/2}$ 和 $(v^2)^{1/2}$ 以及 Reynolds 切应力 $-\overline{uv}$ 的分布,考察了剪切水气界面下湍流场的特性。当界面剪切较强 ($u = 0.20\text{cm/s}$) 时,与固壁附近湍流中的情况相似,水面边界层的平均流速剖面上存在一个对数律区,速度脉动强度和 Reynolds 切应力的分布形状也与固壁湍流边界层相似。这预示剪切水气界面和固壁附近的湍流相干结构是相类似的。不过,水面湍流也有着不同于固壁湍流的细节特征,包括平均流速分布对数律中的常数、湍流强度和 Reynolds 切应力的大小等。另外,与自由面湍流不同,在靠近剪切水气界面的流场中流向和垂向速度脉动同时受到抑制。

参考文献:

- [1] SARPKA YA T. Vorticity, free surface, and surfactants [J]. Annu. Rev. Fluid Mech., 1996, 28: 83~128.
- [2] 吴锤结,马晖扬. 旋涡、湍流与自由面的相互作用 [J]. 力学进展, 1997, 27(3): 342~357.
- [3] 王双峰. 剪切水-气界面下的湍流相干结构研究 [D]. [博士学位论文]. 北京:中国科学院力学研究所, 2001.
- [4] WANG S F, JIA F, NIU Z N, et al. An experimental study on turbulent coherent structures near a sheared air-water interface [J]. Acta Mechanica Sinica (English Series), 1999, 15(4): 289~298.
- [5] WU J. Laboratory studies of wind-wave interactions [J]. J. Fluid Mech., 1968, 34: 91~111.
- [6] HOWE B M, CHAMBERS A J, KLOTZ S P, et al. Comparison of profiles and fluxes of heat and momentum above and below an air-water interface [J]. ASME J. Heat Transfer, 1982, 104: 34~39.
- [7] PHILLIPS O M, BANNER M L. Wave breaking in the presence of wind drift and swell [J]. J. Fluid Mech., 1974, 66: 625~640.
- [8] WU J. Wind-induced drift currents [J]. J. Fluid Mech., 1975, 68: 49~70.
- [9] KOMORI S, UEDA H, OGINO F, et al. Turbulence structure and transport mechanism at the free surface in an open channel flow [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1982, 25(4): 513~521.
- [10] DICKEY T D, MARTINAU B, MAMMOUD D, et al. A laboratory technique for investigating the relationship between gas transfer and fluid turbulence [J]. 1984, 93~100.
- [11] KLEBANOFF P S. Characteristics of turbulence in a boundary layer with zero pressure gradient [R]. NACA Rep. 1247, 1955.
- [12] WANG S F, JIA F. Some characteristics of low speed streaks under sheared air-water interfaces [J]. Acta Mechanica Sinica (English Series), 2001, 17(2): 115~124.
- [13] 王双峰,贾复. 水-气界面下低速流体条带的喷射行为 [J]. 力学学报, 2002, 34(3): 305~313.