

研究简报

方管横向射流流动特性的 DPIV 实验研究

吴海玲 陈听宽 罗毓珊

(西安交通大学动力工程多相流
国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

官武旗

(西安交通大学能源与
动力工程学院, 陕西 西安 710049)

关键词 方管横向射流 数字粒子图像测速 涡系结构

中图分类号 O 358

文献标识码 A

文章编号 0438-1157 (2003) 02-0250-05

DPIV EXPERIMENTAL STUDY OF SQUARE JET INTO CROSSFLOW

WU Hailing, CHEN Tingkuan and LUO Yushan

(State Key laboratory of Multiphase Flow in
Power Engineering, Xi'an Jiaotong University,
Xi'an 710049, Shaanxi, China)

GONG Wuqi

(School of Energy and Power Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an
710049, Shaanxi, China)

Abstract Digital particle imaging velocimetry (DPIV) was used to measure the transient and time-averaged flow field in the mixing region and the wake of a square jet into crossflow at jet-to-crossflow velocity ratio (VR) of 0.5 and 2. The phenomenon of vortex instantaneously shedding from the jet hole was investigated, and the flow turbulence intensity was estimated. The complex vortical structures encountered at VR of 2 were analyzed. Compulsively oppressed by the main flow, the jet attached to the wall at VR of 0.5, and lifted off the wall to develop into the main flow at VR of 2. The twisted vortices in the leeward of jet contributed to the transportation of the crossflow boundary-layer fluid into the near wake, causing intensive turbulence. Strong vortices formed near the jet hole soon broke down and dissipated, yet the weak counter-vortex pair still held in the far wake.

Keywords square jet-to-crossflow, digital particle imaging velocimetry, vortical structures

引 言

横向射流现象广泛存在于各种工程领域, 如自然河道中工业生活废水排放口处污染物扩散过程, 燃气轮机叶片及燃烧室气膜冷却过程等。早期的实验研究以 Kamotani 等^[1]为代表, 主要致力于射流轨迹及影响范围等宏观特性的研究。自 20 世纪 80 年代以来, 不少研究者利用热线/热膜流速计, 测量了横向射流的平均流动及湍流统计特性, 典型的如 Andreopoulos 等^[2]、Fric 等^[3]和 Sherif 等^[4]。20 世纪 90 年代以后, 粒子图像测速 (PIV) 技术^[5,6]的产生为复杂湍流研究提供了瞬态流场的定

量测试手段, Haven 等^[7]利用 PIV 技术及激光诱导荧光 (LIF) 流动可视化技术, 研究了横向射流出射孔形状对出射孔处流动的影响, 主要报道了瞬态流场结果。

尽管对横向射流已有大量的实验和理论研究, 然而有关瞬态流场特性的研究仍然很少, 对其复杂涡系的形成与发展机理尚未达成共识, 而且绝大多数为圆形出射孔形式, 对于出射孔为方形的情形少有报道。由于该形式在很多工业场合中都有应用, 典型的如锅炉炉膛燃烧器风口、气膜冷却中证明有助于提高冷却效率的方形出射孔、化工过程中的汇流方形三通管道及环境工程中的排污扩散器^[8]等,

2001-10-12 收到初稿, 2002-03-05 收到修改稿。

联系人及第一作者: 吴海玲, 女, 28 岁, 博士, 现在清华大学热能系工作。

Received date: 2001-10-12.

Corresponding author: WU Hailing. E-mail: helen@te.tsinghua.edu.cn.

因此, 对其流动和混合特性进行机理性实验研究具有重要的理论和实际意义. 本文利用数字 PIV (DPIV) 技术, 测量和分析了支管为方管时横向射流混合区及尾流区的瞬态和时均流场.

1 实验系统及方法

1.1 实验装置

实验在以水为工质的闭式循环回路中完成, 实验装置示意图如图 1 所示, 主要包括主路给水系统、支路给水系统、实验段和水箱. 在水箱中加入粒径 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 的陶瓷粉末 (Ca_2C) 示踪粒子. 实验段采用透明亚克力有机玻璃材料, 主管和支管流通截面尺寸分别为 $0.04 \times 0.04 \text{ m}^2$ 及 $0.01 \times 0.01 \text{ m}^2$. 主管长 1.8 m , 在其入口装有均流滤网, 射流在滤网下游 1.2 m 处从下往上垂直射入主流, 在出射孔下游 0.6 m 处将混合流体从主管两侧导出. 在主管末端开设平面观察窗口, 以便测量横截面流场.

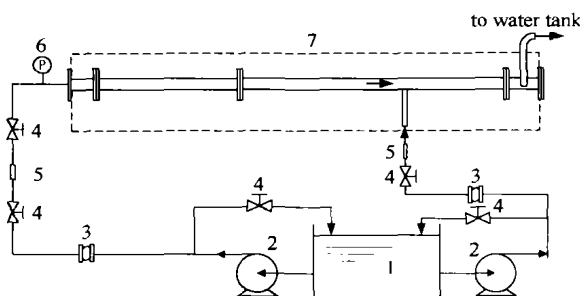


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

1—water tank; 2—pump; 3—electromagnetic flow meter;
4—valve; 5—filter; 6—pressure gauge; 7—test section

以出射孔中心为原点、主流方向为正 x 轴方向建立坐标系, 以 u 、 v 、 w 表示顺流方向、展向和垂向速度. DPIV 测量平面包括对称面 ($y=0$) 及 6 个主管横截面 ($x/D_j = -0.5, 0, 0.5, 1, 1.5, 2.5$; D_j 为支管水力直径). 照像机放大倍数为 1 倍, 拍摄视场约为 $0.044 \times 0.04 \text{ m}^2$, 对称面上的流场测量分成 4 个视场完成. 图像用于流场数据处理的有效像素约为 950×870 像素, 对应的尺度因子为 $46 \mu\text{m}/\text{pixel}$.

主流和射流流量采用 2 台电磁流量计测量, 通过 IMP 3595 分散式数据采集板与计算机相联进行数据监测和存储. 表 1 列出了实验工况参数, 表中 Re_0 与 Re_j 分别以主管与支管水力直径为特征尺寸.

Table 1 Experimental parameters

Case No.	VR	$U_j/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Re_j	$U_0/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Re_0
1	0.5	1	12448	2	99580
2	2.0	2	24895	1	49790

1.2 DPIV 测量系统

采用 TSI 公司商用 DPIV 系统, 主要包括双路 Nd: Yag 激光器 (Dual continuum surelite PIV-Lite 300 Nd: Yag Laser)、片光源光学元件、照像机 (Model 630046 PIVCAM 10-30) 等组件, 采用 “Insight” TM 软件进行图像分析. 其基本工作原理是: 以脉冲相干激光片光照亮流场平面; 利用可 “跨帧” 互相关数码摄像机记录粒子图像; 将获得的 2 帧单次曝光的粒子图像按相同网格划分成小的查问区, 对各查问区内的粒子图像进行互相关分析, 获得该区速度矢量, 进而得到流场平面的速度矢量图.

DPIV 系统在正确测量条件下, 采用 2 帧-互相关分析测量粒子图像位移的精度约为 0.1 像素^[9]. 图像分析时采用 64×64 像素的查问区尺寸, 相邻查问区之间的重叠率约为 50%, 可得到网格分布为 30×30 的速度矢量图, 其空间分辨率约为 0.0014 m . 如果测量时保证粒子位移小于查问区边长的 $1/4$, 则测量的相对误差约为 $0.1/16$ (0.6%).

对被测流场平面的一组 N 个时刻的瞬时采样数据进行统计平均处理, 可以得到时均速度. 样本中的粗大误差采用最大最小阈值及狄克逊 (Dixon) 准则^[10]剔除. 以对称面为例进行误差分析和湍流速度估算如下. 时均速度 $\bar{u}$ 和 $\bar{w}$ 的标准偏差分别为

$$S_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [u - \bar{u}]^2}{N-1}} \quad S_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [w - \bar{w}]^2}{N-1}} \quad (1)$$

其相对标准偏差分别定义为

$$\bar{S}_u = S_u / U_0 \quad \bar{S}_w = S_w / U_j \quad (2)$$

平面内速度大小的相对标准偏差 $\bar{S}$ 由 $\bar{S}_u$ 及 $\bar{S}_w$ 合成, 并集合了统计随机误差和系统误差对测量的影响

$$\bar{S} = \sqrt{\bar{S}_u^2 + \bar{S}_w^2} = \sqrt{\sigma_D^2 + \sigma_{T1}^2 + \sigma_{Lag}^2 + \sigma_{Syn}^2} \quad (3)$$

式中 σ_{T1} 为湍动度; 统计随机误差包括粒子图像位移测量误差 σ_D ; 系统误差包括粒子滞后误差 σ_{Lag} 、图像同步误差 σ_{Syn} , 一般认为系统误差不会影响测量精度. 由于 σ_D 约为 0.6% , 因此可以将 $\sqrt{\bar{S}^2 - \sigma_D^2}$ 作为湍流度 σ_{T1} 的近似估算值.

2 实验结果分析

2.1 对称面上瞬时与时均流场分布

图 2 (a) 及图 2 (b) 分别为 $VR=0.5$ 及 2 时

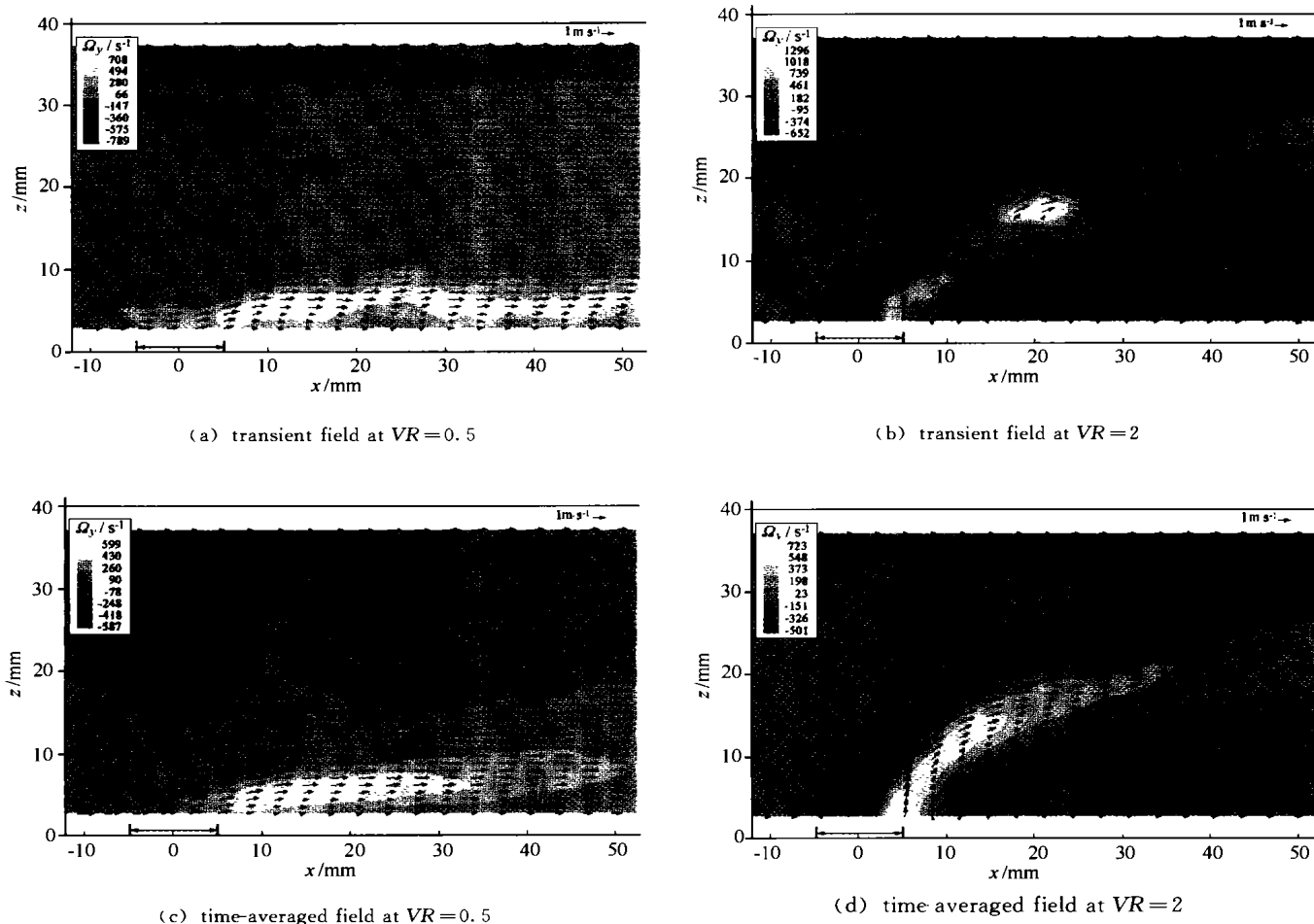


Fig. 2 Velocity vectors and spanwise vorticity contours at centre-plane

主管对称面上某一时刻的速度矢量图, 并采用灰度等值线表示展向涡量 Ω_y , $\Omega_y = \partial u / \partial z - \partial w / \partial x$, 图中双箭头线表示出射孔位置. 图 2 (c) 及图 2 (d) 分别为相应的时均速度矢量和展向涡量分布, 该结果包含了一次采样 200 帧图像得到的 100 个瞬时流场信息. 与瞬时场相比, 时均场更为光滑, 涡量范围也相对更小.

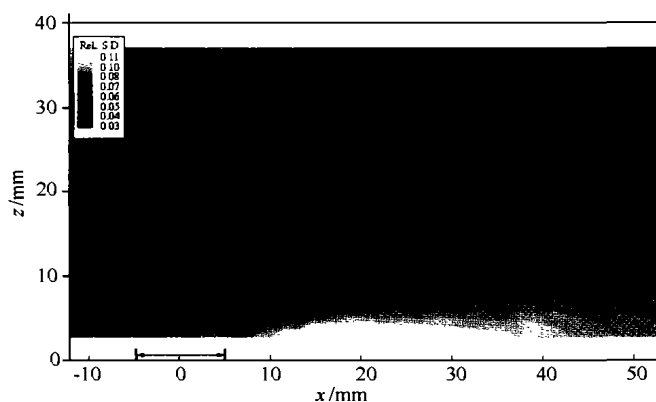
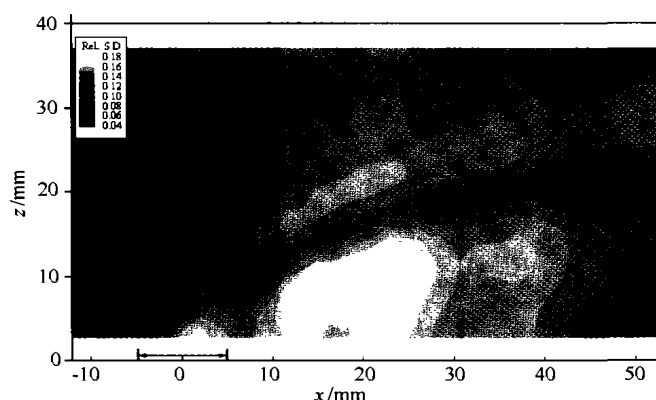
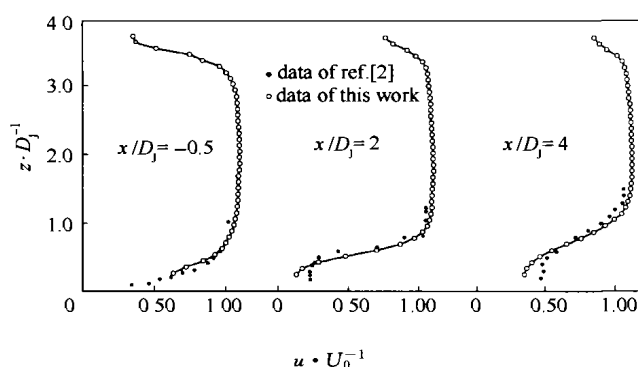
比较 2 种 VR 发现, VR=0.5 时, 射流受主流强烈压迫, 大部分从出射孔后部流出并贴附底部壁面流动, 其尾流区速度很低. VR=2 时, 射流出射速度仍不太均匀, 射流从壁面离升向主流发展, 在射流背风侧有少量主流流体受其携带.

考察瞬时流场发现, 2 种工况下均存在支管内壁剪切层涡呈准周期性脱落的现象. 从迎流侧脱落的涡在射流迎流边界面形成一系列运动旋涡, 沿程不断卷吸主流, 并受主流的法向和切向作用而逐渐转向顺流方向. 从背流侧脱落的涡比迎流侧的更

强, 但由于尾流近区流体湍动剧烈, 加之图像采集频率的限制, 涡的尺度和脱落频率不易辨识.

根据图 2 的瞬时和时均速度值可以计算时均速度大小的相对标准偏差 $\bar{S}$, 如图 3 (a)、(b) 所示. 当 VR 为 0.5 及 2 时, 混合区上游主流来流的 σ_{TI} 分别约为 2.5% 及 5.1%; 对称面上 σ_{TI} 最大值分别位于射流下游近壁区及射流背流区, 后者达到 18.0%. 此外, VR=0.5 时, 射流外的主流区沿顺流方向出现间隔性的弱湍动区, 这可能与射流边界面上及尾流区内的拟序结构有关.

图 4 为 VR=0.5 时对称面上不同位置的量纲 1 顺流速度沿 z 方向的分布, 并比较了 Andreopoulos 等^[2]测得的相同 VR 下支管为圆管的横向射流实验数据. 观察发现, 方管情形下尾流区速度亏损更大. 另外, 由图 2(b) 还可看到, 在方形出射孔近下游存在逆流, 而圆管横向射流时^[2]没有出现逆流现象, 表明方管横向射流对主流的阻挡作用更强.

(a) $VR=0.5$ (b) $VR=2$ Fig. 3 Relative standard deviation $\bar{S}$ of time-averaged velocity shown in Fig. 2Fig. 4 Time-averaged normalized streamwise velocity profile in centre-plane at 3 locations at $VR=0.5$

2.2 涡系结构分析

横向射流是一种典型的复杂切变流动, 以 $VR=2$ 为例对其复杂涡系结构进行分析如下. 图 5 给出了沿主管顺流方向横截面 1~6 上的时均速度矢量图, 并以灰度等值线表示顺流方向涡量 Ω_x , $\Omega_x = (\partial w / \partial y) - (\partial v / \partial z)$, 该结果包含了 100 个瞬时

流场信息. 由图可见, 时均流动左右基本对称.

在横截面 1 处, 主流流体因受射流阻挡而向两侧分流, 在底部壁面处流体略向下流动. 在横截面 2 处, 出射孔两侧出现一对反向强涡, 它来源于支管内的侧边缘剪切层涡. 当主流流体从射流两侧绕流时, 该涡在主流剪切作用下扭曲并沿侧边缘脱落, 受射流携带作用在其背流区形成倾斜向上发展的“麻绳”涡. 在横截面 3 处, 涡强增大, 旋涡中心的距离略有减小, 并逐渐远离壁面.

主流边界层流体在麻绳涡作用下, 向尾流近区输运, 部分流体从对称面附近卷入旋涡中心. 到横截面 4 处时, 出射孔附近形成的强涡迅速破碎和耗散, 涡强大大减弱. 在横截面 5 处, 射流逐渐转向顺流方向, 麻绳涡发展为一对弱涡, 在有关横向射流的文献中, 通常称之为“反向涡对”, 它在横截面 6 及尾流远区 ($x/D_j=15$) 仍未消失.

3 结 论

测量了射流与主流流速比 $VR=0.5$ 、2 时, 方管横向射流混合区及尾流区的瞬态和时均流场, 并对湍流度进行了估计. 发现 $VR=0.5$ 时射流贴附壁面流动, $VR=2$ 时射流从壁面离升进入主流; 支管内壁剪切层涡呈现准周期性脱落的现象, 射流尾流近区流体湍动剧烈. 以 $VR=2$ 为例分析了横向射流的复杂涡系结构, 指出支管内的侧边缘剪切层涡扭曲并受射流携带, 在射流背流区形成“麻绳”涡, 出射孔附近形成的强涡迅速破碎和耗散, 麻绳涡在尾流远区发展为弱而持久的“反向涡对”.

符 号 说 明

D_0, D_j ——主管及支管水力直径, m

N ——单次测量的瞬时采样数目

Re_0, Re_j ——主流及射流 Reynolds 数

S_u, S_w ——时均速度分量的标准偏差

$\bar{S}$ ——时均速度大小的相对标准偏差

$\bar{S}_u, \bar{S}_w$ ——时均速度分量的相对标准偏差

U_0, U_j ——主流及射流来流平均速度, $m \cdot s^{-1}$

u, v, w ——分别为 x, y, z 方向的速度分量, $m \cdot s^{-1}$

$\bar{u}, \bar{w}$ ——时均速度分量, $m \cdot s^{-1}$

VR ——射流与主流的流速比, $VR=U_j/U_0$

x, y, z ——坐标, m

Ω_x, Ω_y ——分别为顺流方向涡量及展向涡量, $m \cdot s^{-2}$

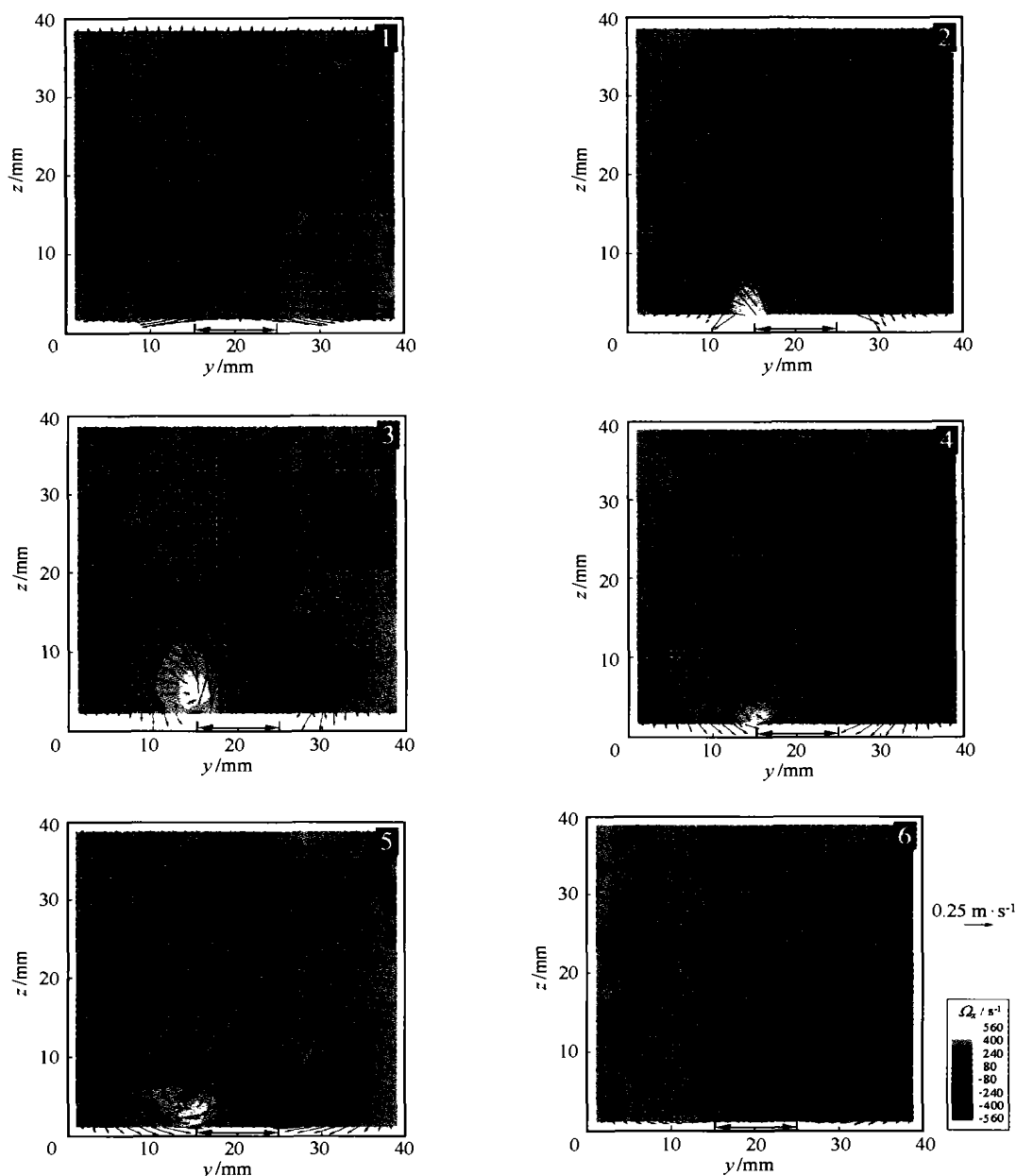


Fig. 5 Time-averaged velocity vectors and streamwise vorticity contours at 6 cross-sections

References

- 1 Kamotani Y, Greber I. Experiments on a Turbulent Jet in a Cross Flow. *AIAA J.*, 1972, **10** (11): 1425—470
- 2 Andreopoulos J, Rodi W. Experimental Investigation of Jets in a Crossflow. *J. Fluid Mech.*, 1984, **138** (1): 93—127
- 3 Fric T F, Roshko A. Vortical Structure in the Wake of a Transverse Jet. *J. Fluid Mech.*, 1994, **279** (1): 1—47
- 4 Sherif S A, Pletcher R H. Measurements of the Flow and Turbulence Characteristics of Round Jets in Crossflow. *J. Fluids Engng.*, 1989, **111** (2): 165—171
- 5 Adrian R J. Multi-point Optical Measurements of Simultaneous Vectors in Unsteady Flow—a Review. *Int. J. Heat & Fluid Flow*, 1986, **7** (2): 127—145
- 6 Grant I. Particle Imaging Velocimetry; a Review. *Proc. Instn Mech. Engrs. (Part C)*, 1997, **211** (1): 55—76
- 7 Haven B A, Kurosaka M. Kidney and Anti-kidney Vortices in Crossflow Jets. *J. Fluid Mech.*, 1997, **352** (10): 27—64
- 8 Wang Chao (王超). Study on Flow Phenomenon of Tee Multiport Diffuser Discharger. *Advances in Water Science (水科学进展)*, 1995, **6** (3): 176—181
- 9 Westerweel J. Fundamentals of Digital Particle Image Velocimetry. *Meas. Sci. Technol.*, 1997, **8** (12): 1379—1392
- 10 Dixon W J, Massey F J. Introduction to Statistical Analysis. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1983