

横流中圆孔湍射流的旋涡结构

李 炜¹, 姜国强², 张晓元¹

(1. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072; 2. 天津大学机械工程学院, 天津 300072)

摘要:应用 PIV 流场测试系统, 研究不同流速比的横流中圆孔湍射流的旋涡结构。发现主要有 4 类旋涡, 即射流主体周缘剪切层的类开尔文涡列、横流绕流分离旋涡、射流喷口前缘的马蹄涡系和尾迹涡。分析了这些旋涡的形成机理及其拓扑性质, 射流近区有两条分离线, 一条是横流绕流分离线, 另一条是使射流两侧剪切层旋涡进入分离旋涡区的分离线。证实绕流分离旋涡最终在射流的顺流贯穿段进入射流主体, 混合形成射流主体内的主反向旋转涡对。

关键词:射流; 横流; 旋涡结构; 湍流

中图分类号: O351.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2003)05-576-07

横流与圆孔湍射流相互作用形成复杂的旋涡结构, 它直接影响到射流主体的发展, 因而揭示其旋涡形成机理及规律, 对控制射流向所需要的方向发展是非常重要的。例如污水排放近区稀释度的控制, 提高飞行器垂直升降气动性能和燃油发动机冷却气幕保护壁面措施等。国内外对其研究成果报导很少。黄真理等^[1]、Smith 和 Munga^[2]利用激光诱导荧光技术, 试验研究了水槽底部排放的单孔和多孔射流, 观测到低流速比时射流出现分叉现象和尾涡, 并给出了马蹄涡结构沿水深的变化过程。Fric 和 Roshko^[3]试验研究了横流中圆孔射流的剪切涡层、尾涡及肾形涡结构。Kelso 和 Lim^[4]研究了不同雷诺数和流速比, 横流边界层中涡的卷起机理。

本文主要采用试验方法, 发现横流中圆孔湍射流的旋涡结构, 由横流与射流的剪切层中的类开尔文涡列、迎流面底部的马蹄涡系、横流绕流分离旋涡及尾迹组成, 分析了其形成的机理和规律, 探讨了其拓扑性质。

1 实验装置及测试技术

试验是在一宽 100 cm、深 50 cm 和长 1300 cm 的玻璃水槽内进行, 其首部为一直角三角形量水堰, 测量通过水槽的横流流量; 其退水段设有尾门控制水深。沿中线在距水槽进口 700 cm 的底板以下设一均直的圆管与底板垂直, 其出口与底板齐平, 形成垂直射入横流的圆孔射流(图 1)。圆管足够长保证喷口充分发展的紊流, 圆管上游设浮子流量计, 测量通过圆管的流量。对 $D = 1.0$ cm、 1.4 cm 和 2.5 cm 三种圆孔孔径以及射流与横流

表 1 试验条件及基本参数

Table 1 Experiment conditions and basic parameters

射流流速 U_j / (cm s ⁻¹)	流速比 R_v	射流雷诺数 $Re_j = U_j D / \nu$ ($D = 2.5$ cm)	横流流速 U_0 / (cm s ⁻¹)	横流雷诺数 $Re_0 = U_0 D / \nu$ ($D = 2.5$ cm)
20.06, 40.12, 60.18	2.0, 4.0, 6.0	2504, 5010, 10016, 15024	10.03	2504

流速比 $R = U_j / U_0 = 2.0, 4.0$ 和 6.0 三种流速比进行了试验, 横流流速 U_0 为 0.1003 m/s。试验中控制水深为 40 cm, 保证在各流速比下射流均处于充分淹没状态。试验条件见表 1。

流场测试采用美国 TS 公司的产品 ULTRA- 型 PIV 测速系统, 含有两台脉冲铷-钕石榴石激光器, 能产生脉冲持续期为 10 ns, 波长为 532 nm, 单脉冲能量为 50 ~ 400 mJ, 重复率为 10 ~ 50 Hz 的连续脉冲激光。两台激光器由同步仪分别触发, 然后由一组反射镜将两路脉冲激光合并为一束, 再由特制涂层的光学组件形成片光, 经光导臂

收稿日期: 2002-07-15; 修订日期: 2002-09-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59979022)

作者简介: 李 炜(1934-), 男, 山东阳谷人, 武汉大学教授, 博士生导师, 主要从事环境水力学、计算水力学、高速两相流及流动信息学研究。E-mail: liwei@wuhee.edu.cn

照射所需的测试区。测试区粒子图像通过 CCD (固态充电耦合装置) 视频相机记录在感光板上, 以获得流场中双曝光单幅粒子图像或两个以上多幅图像。PIV 成像系统和图像记录系统提供了在已知时间内流场中粒子群的位移信息, 数据的处理采用互相关算法, 互相关分析需对所得粒子图像进行 3 次二维快速傅立叶变换来得到粒子图像中的位移信息。

试验中通过将流场的粒子浓度控制为 0.35 g/L 和选取询问小区的尺寸为 $3.35 \text{ mm} \times 3.35 \text{ mm}$ (即 $32 \text{ Pixel} \times 32 \text{ Pixel}$), 使得 PIV 的测试为高粒子浓度模式, 小区中粒子对数目平均为 11 对, 保证了图像采集过程极少出现随机亮斑和粒子脱落现象。笔者对试验水样进行了颗粒分析, 得出粒径的大小在 $0.05 \sim 0.005 \text{ mm}$ 之间的达到 97%, 颗粒的密度为 1.071 g/cm^3 , 表明水中基本上为粒径在几个微米到几十个微米之间的粘土微粒。由粒子跟随性得出粒子微粒速度与流体微团速度的相对误差小于 7.4×10^{-5} , 特征时间为 $2.2 \times 10^{-4} \text{ s}$, 表明颗粒具有良好的跟随性和对速度变化具有良好的灵敏性^[5]。

试验采用的是水中的天然泥沙颗粒, 对光的散射性较一些标准粒子如 TiO_2 粉末 (粒径约为 $6 \mu\text{m}$) 差。因此

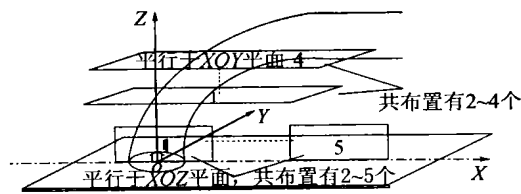


图 2 测试断面布置示意图
Fig. 2 Arrangement of test sections

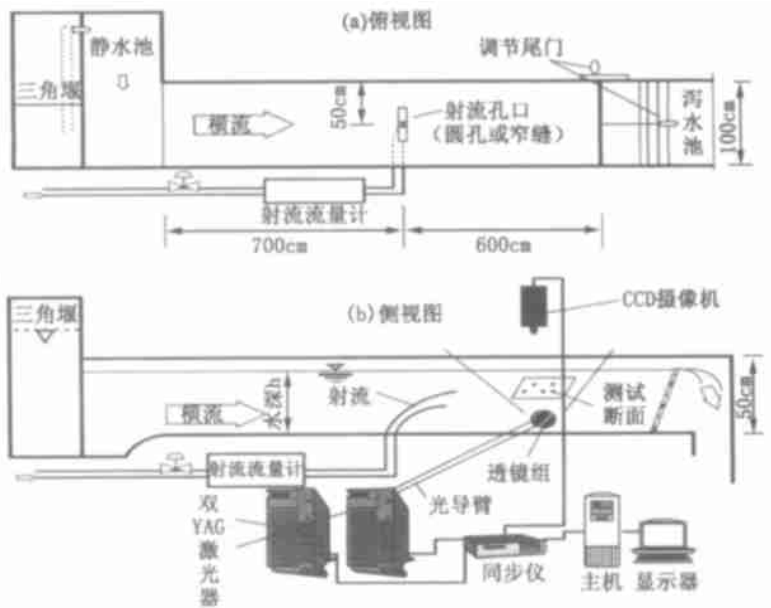


图 1 实验装置及 PIV 流速测量系统
Fig. 1 Schematic diagram of the experiment apparatus and PIV system

试验中选用了较强的激光强度 135 mJ , 保证了片光能够均匀的照亮流场。在试验中采用 $400 \sim 500 \mu\text{s}$ 的曝光时间间隔。

根据横流中湍流的流动特点, 对于圆孔射流在射流对称面上沿流向布置了 2~5 个测试断面, 其中第 1 个断面形心位于孔口中心线附近, 之后每个断面依次距离前一断面 $5 \sim 15 \text{ cm}$ 不等。沿垂向布置了 2~4 个水平测试断面, 第 1 个断面距离喷嘴 2 cm , 之后每个断面依次距离前一断面 $2 \sim 10 \text{ cm}$ 不等。片光测试断面的典型大小约为长 $21 \text{ cm} \times$ 宽 18 cm 。图 2 为测试断面布置示意图。

2 横流中射流的旋涡结构

以往的研究表明: 射流以大于横流平均流速的速度垂直射入横流中, 相邻的横流流体被射流卷吸进入射流主体, 主体的流速沿程减少, 而其断面逐渐扩大, 断面形状也由圆形逐渐变为肾形, 在肾形断面内有一对反向旋转涡对。同时射流对横流的阻抗和横流的绕流作用, 形成射流迎流面压力大于背流面压力。在此压力差作用下射流主体沿流向逐渐弯曲, 最终其流向与横流流向一致, 其流速大小也逐渐与横流当地流速相同。由于射流主体的这一发展特性, 为便于分析, 一般将射流主体沿程分为起始段、最大弯曲段和顺流贯穿段。

由于射流和横流的流速在方向和大小上都有差异, 在射流主体边缘就存在剪切层, 形成剪切型旋涡。流速的差异在射流主体发展的各段上也不同, 相应的剪切型旋涡的发展也将不同。射流的阻抗, 使横流形成绕流分离旋涡, 它存在于射流下缘与底板间的空间, 将这一空间称为逆流区。由于流向沿射流主体各段不同, 分离旋涡的发展也不同。在逆流区的下游, 存在一尾迹区。横流近壁区的剪切流动遇到射流的阻抗, 在射流喷嘴附近

形成马蹄涡。根据试验的结果，对这几类涡旋形成和发展的机理加以分析。在分析中所选取的流场坐标是：笛卡尔右手坐标， X 轴沿流向， Y 轴为展向； Z 轴为垂向；坐标原点取在喷口中心。

2.1 剪切层旋涡

图3和图4(以流速比 = 6.0 为例)是沿流向射流对称面上瞬时和时均展向涡量等值线图(瞬时的含义是在曝光时间为 233 ns 所得瞬时流场, 时均的含义是由 35 幅瞬时流场平均所得平均流场)。可清楚地看出, 在射流的迎流面和背流面的剪切层中, 由于剪切层失稳而形成的剪切涡, 进而沿射流主体由于射流对横流的卷吸, 使剪切层增厚, 局部雷诺数增大, 引起类开尔文-海姆霍兹失稳, 随之卷起形成类开尔文涡列。由于逆流区存在着绕流分离旋涡, 流速分布较迎流面复杂, 致使背流面展向涡列的排列比迎流面的排列更不规则。

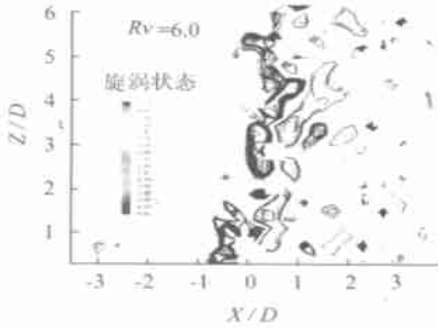


图3 瞬时刻展向涡量等值线图

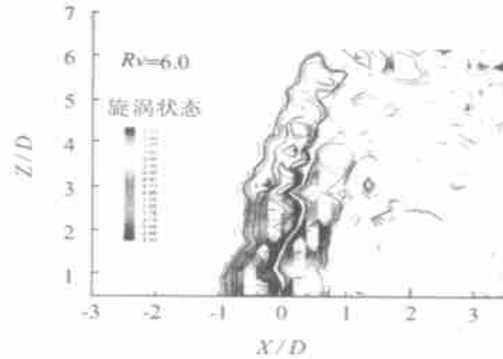


图4 由展向涡量分量表现的射流剪切涡层(时均涡量)

Fig. 3 Instantaneous contours of the expand-wise vorticity Fig. 4 Shear-layer vortex structure visualized by the expand-wise vorticity component

由相应的射流主体附近的瞬时流线(图5)可看出: 剪切层旋涡的卷起发生在喷口上方 $0.5D$ 处, 并延续到 $5.5D$ 的位置, 在这一区段上类开尔文涡列特别明显。卷起的旋涡缠绕在射流主体周缘, 有些旋涡在横流作用下进入主体。有些卷起旋涡存在着旋涡的配对现象, 如图6所示。由时均涡量等值线图(图3)看出, 涡列厚度没有明显增厚的区段, 表明旋涡的配对位置是随机的。

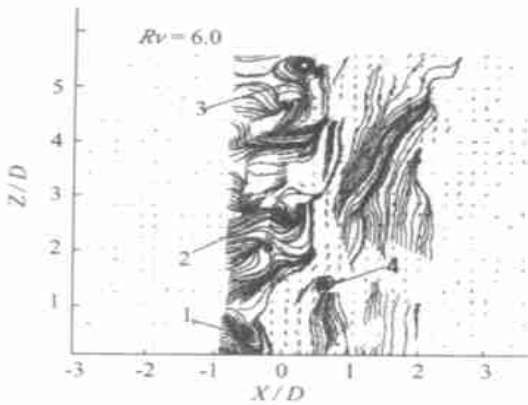


图5 射流主体附近的瞬时流线

Fig. 5 Instantaneous streamline nearby the jet body

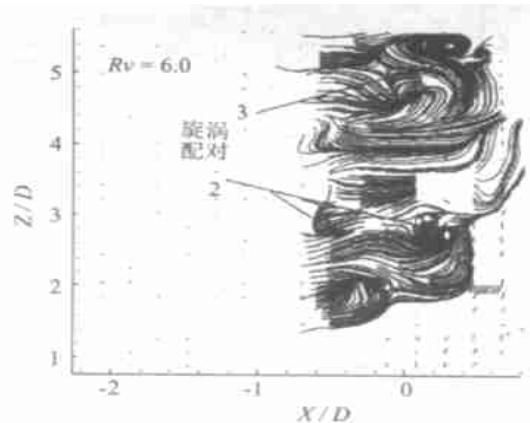


图6 旋涡配对区域的局部特写

Fig. 6 Local close-up in the vortex pairing region

由于剪切层旋涡的卷起和涡列的形成, 而产生的沿流向和展向的交变力作用, 使射流主体产生准周期性摆动和主体周缘呈不规则的波状。图7为不同瞬时的射流及其周围的流速场, 可清楚地看出这一现象。

在两个展向旋涡之间存在着沿流向流速梯度较大的强对流区(图8), 出现二次失稳形成垂向涡, 将其称为次反向旋转涡对(图9中两个反向箭头所示)。

根据上述对试验成果的分析, 可将射流迎流面剪切层旋涡的形成和发展绘成示意图(图10)。

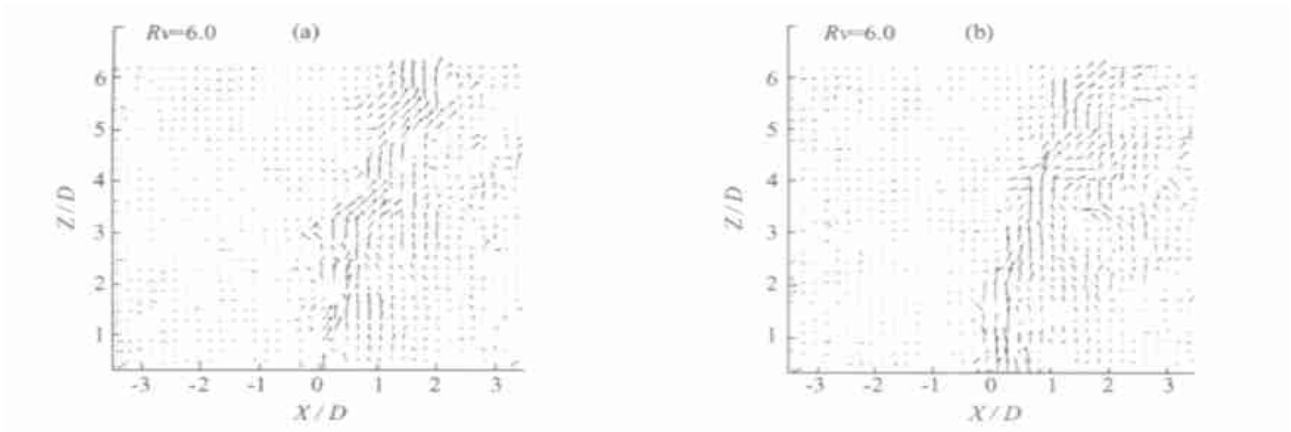


图 7 不同瞬时射流主体的波状摆动

Fig. 7 Wave oscillating of jet body at two different random times

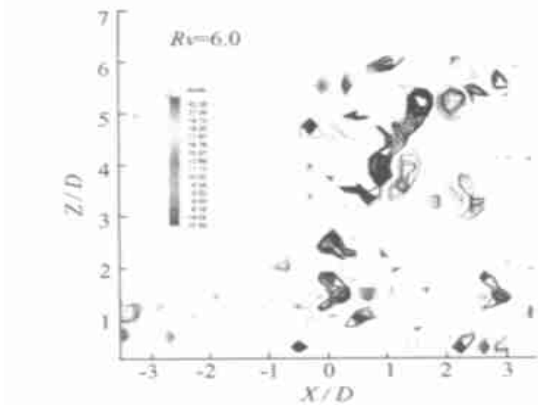


图 8 展向涡列之间的强对流区

Fig. 8 Strong convective region among expand-wise vortex lists

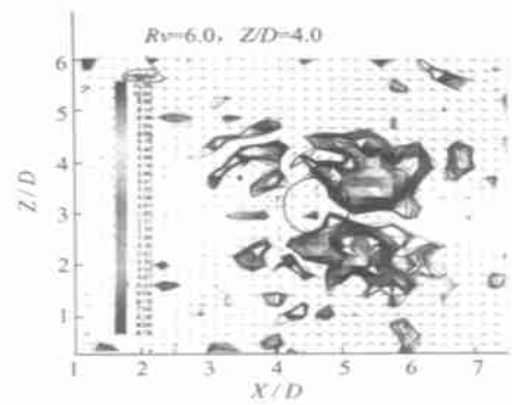


图 9 位于射流主体上方的次反向旋转涡对

Fig. 9 Counter-rotating vortex pairing up the jet body

2.2 横流绕流分离涡对

在射流主体的起始段和弯曲段对横流有较强的阻抗作用和存在较大的逆流向压力梯度，致使横流在射流主体两侧产生分离，形成绕流分离旋涡，两侧剪切层旋涡也包容其中。图 11 为试验得出的 $Z/D = 2.0$ 水平面上的流线图，可看出这类分离旋涡对的尺度是与射流主体同一量级，并附着于背流面，交会于逆流区。由于射流主体背流面和弯曲段下缘的卷吸作用，使分离旋涡具有很强的三维性，在逆流区就存在着流向背流面和弯曲段下缘的流速分量。图 12 是射流流向对称面上的流速矢量图，由于存在这类流动，似乎在逆流区存在一质量源，称其为虚质量源。

绕流分离涡对是一个较为稳定的结构，由试验得出的瞬时流线图发现这一结构仅仅围绕一固定位置摆动，而未发现明显的周期性脱落。由于逆流区内存在的前述的射流卷吸作用，分离旋涡沿垂向呈螺旋状运动，并且其涡轴沿弯曲段逐步转向，最终在顺流贯穿段转为顺流向。图 13 为沿其涡心区域由计算^[5]得出的流面，可清楚地看出这一发展过程。图 14 为顺流贯穿段 $X/D = 32$ 断面上，由计算得出的 (u, v, w) 合速度等值线和 (v, w) 流线，由合速度等值线可看出射流主体断面已呈肾形，而分离旋涡通过转向后，

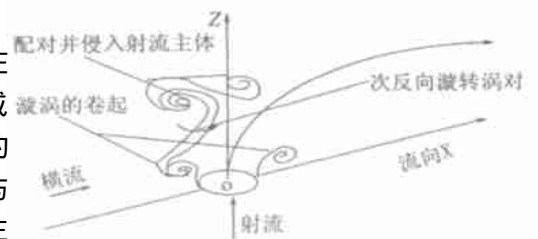


图 10 射流迎、背流面剪切层旋涡发展过程示意图

Fig. 10 Evolution schematic of the leading edge and leeward edge shear layer vortex

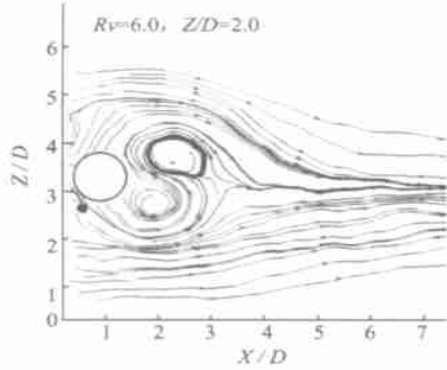


图 11 射流孔口及下游区域的相应流线
Fig. 11 Streamline in the nozzle of jet and the downstream region

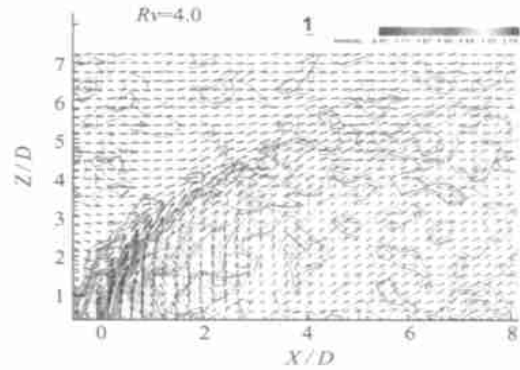


图 12 射流对称面上时均流速矢量和展向涡量等值线
Fig. 12 Time-average velocity vector and vorticity contours in the plane of symmetry

在此断面上其涡心已落在肾形断面内。这表明分离旋涡在转向过程中，进入了射流主体并与之混合，构成肾形断面内的主反向旋涡对。这也明确了一个长期存在的疑问，即肾形断面内主反向旋转涡对是怎样形成的。图 15 是计算给出的射流主体各断面上，流向涡量等值线图，它反映了主反向旋涡对的沿程变化及发展。

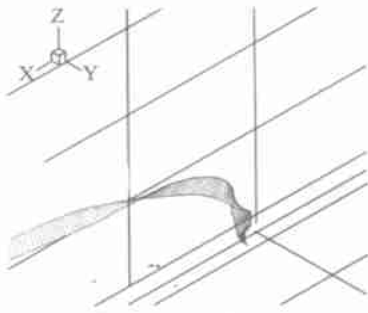


图 13 绕流分离旋涡的垂向卷起
Fig. 13 Roll up of vortex of cross-flow detour

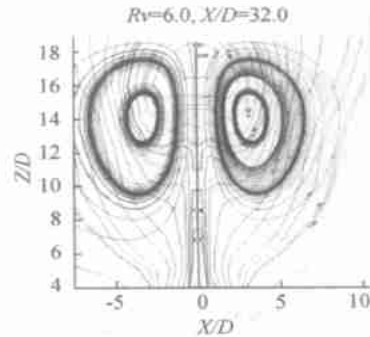


图 14 主反向旋涡转对与射流主体的相互关系
Fig. 14 Position relation between counter rotating vortex pair and jet body

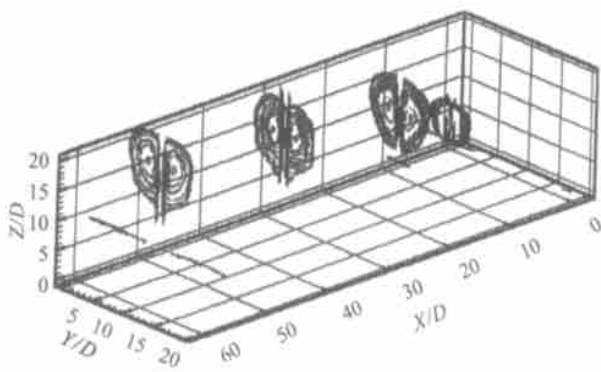


图 15 由流向涡量等值线表示的主反向旋转涡对发展过程
Fig. 15 Evolution counter-rotating vortex pair visualized by contours of stream-wise vorticity

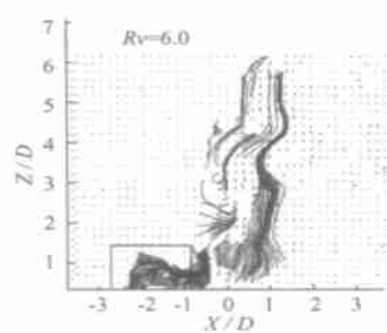


图 16 马蹄涡系
Fig. 16 Horseshoe vortex system

2.3 马蹄涡系

图 16 是试验得出的射流迎流面流向对称面上，近壁区附近的瞬时流线图。可看出，横流近壁剪切层受射流阻抗，在喷口附近卷起而形成的展向涡。它沿喷口边缘呈螺旋状旋转（在沿流向右侧为顺时针旋转，左侧为逆时针旋转）流向逆流区，成为马蹄涡系。马蹄涡具有较强的稳定性，它只是在射流剪切层旋涡卷起的作用下，发生一些摆动。稳定的马蹄涡还会诱导形成几个尺度和强度较小的涡，共同构成喷口附近的马蹄涡系。通过对多幅瞬时流线图的分析，可得出喷口附近马蹄涡系结构的示意图，图 17 中 $N1$ 、 $N2$ 和 $S1$ 分别为由局部流线特性分析而得出的流场奇点：结点和鞍点。

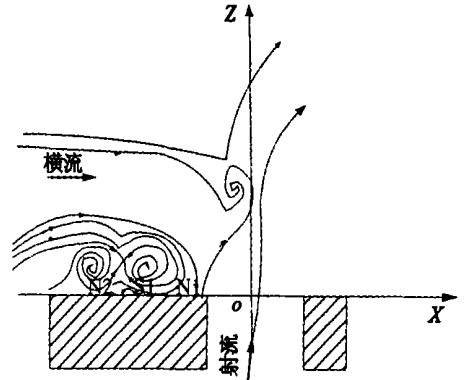


图 17 马蹄涡系结构示意图

Fig. 17 Schematic of horseshoe vortex

2.4 尾迹

圆柱绕流的尾迹是排列有序的卡曼涡街，而横流绕过射流形成的尾迹则是在稳定的分离旋涡下游，一组拟序排列的立轴旋涡（图 18）。它可能是由于分离旋涡外侧的剪切层，因射流主体的涡致摆动而卷起形成的，或者是由于射流主体顺流贯穿段外缘剪切层失稳而形成的，这些尚待进一步研究。

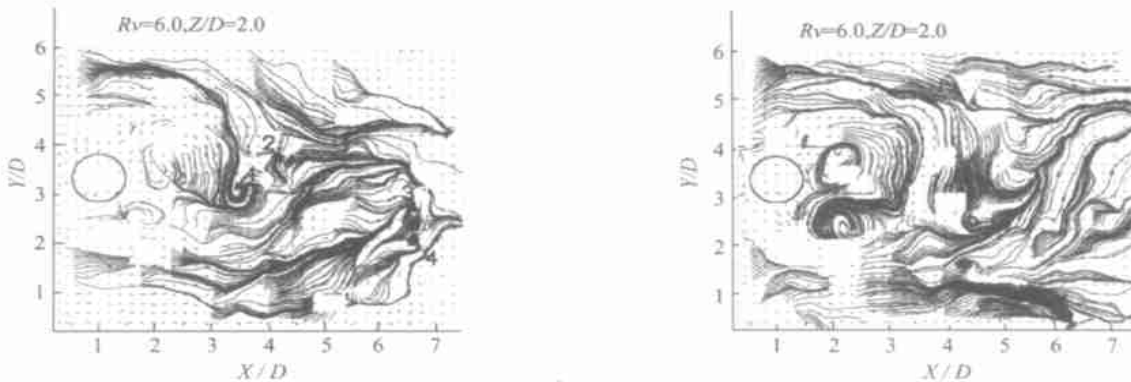


图 18 水平断面 $Z/D=2.0$ 的不同瞬时流场及流线

Fig. 18 Different instantaneous flow field and streamline at horizontal plane $Z/D=2.0$

2.5 旋涡结构的拓扑分析

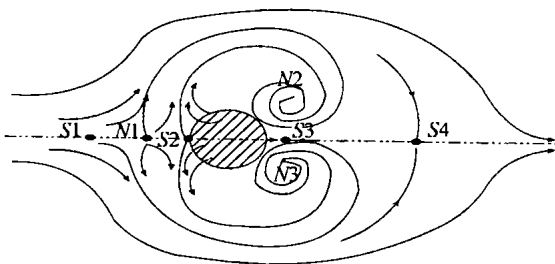


图 19 圆孔射流近区的拓扑性质及流动分离形式

Fig. 19 Topological characteristic and flow bifurcation form in near field of round jet

根据流场拓扑分析的原则，在物面分离线上结点与鞍点是交替出现的，总的结点数与鞍点数最多相差一个；以及在三维流动中，物面与流截面上的奇点应满足一定的空间对应关系，如物面上的鞍点对应流截面上的结点，反之物面上的结点对应流截面上的鞍点。对不同形式的奇点进行连接，可得出流动结构中的流谱曲线，如表征流动分离的分离线。奇点的连接应遵循以下的规律：奇点间的连接，其流线指向必须符合每个奇点的特征；由某一奇点出发的流线，必须在另一奇点处终止；通常鞍点与鞍点之间不能连接，否则会形成高次奇点，其状态是不稳定的。由前述对横流中射流旋涡结构的分析，可得出射流近区的拓扑图（图 19），它有两

条分离线：第 1 条分离线由鞍点 $S1$ 分别连接两个螺旋结点 $N2$ 和 $N3$ 构成，它是横流中射流的主分离线，使射流迎流面上游的横流形成绕流分离旋涡；第 2 条分离线由鞍点 $S2$ 分别连接两个螺旋结点 $N2$ 和 $N3$ 构成，使射

流主体两侧的剪切层旋涡进入绕流分离旋涡中。水槽底面与相应流截面上奇点对应关系是：鞍点 S_1 和 S_2 分别对应马蹄结构中的结点 N_2 和 N_1 ；结点 N_1 对应马蹄涡结构中的鞍点 S_1 ； S_4 为虚质量源点。

3 结 论

对于垂直射入横流中的单圆孔湍射流，通过试验分析得出其旋涡结构具有以下特点：

(1) 横流中射流的旋涡结构主要由四类旋涡组成，即射流主体周缘剪切层的类开尔文涡列、横流绕流分离旋涡、射流喷口前缘的马蹄涡系和尾迹涡。

(2) 剪切层旋涡的卷起存在着旋涡的配对现象，配对发生的位置是随机的；射流主体呈准周期性摆动，主体周缘呈波状。

(3) 横流绕流分离旋涡交会于射流逆流区，并形成一虚质量源；分离旋涡对是稳定的，未发生周期性脱落；分离旋涡对沿流逐渐转向，最终进入射流主体，与之混合形成主体内的主反向旋涡对。

(4) 马蹄涡是较稳定的，它可诱导形成几个尺度较小、强度较低的涡，共同构成马蹄涡系。

(5) 尾迹是一组拟序排列的立轴旋涡，其成因尚须进一步研究。

(6) 横流绕射流的分离存在两条分离线，一条是横流绕流分离线，另一条是使射流两侧剪切层旋涡进入分离旋涡区的分离线。

参考文献：

- [1] 黄真理, 李玉梁, 余常昭. 平面激光诱导荧光技术测量横流中射流浓度场的研究[J]. 水利学报, 1994(11): 1 - 7.
- [2] Smith M G, Munga. Mixing in the Jet in Crossflow[J]. J Fluid Mech, 1998, 357: 83 - 122.
- [3] Fric T F, Roshko A. Vortical Structure in the Wake of a Transverse Jet[J]. J Fluid Mech, 1994, 279: 1 - 47.
- [4] Kelso R M, Lim T T. An Experiment of Round Jets in Crossflow[J]. J Fluid Mech, 1996, 306: 111 - 144.
- [5] 姜国强, 李 炜, 张晓云. 横流中湍射流流场的试验和数值模拟方法[A]. 中国环境水力学论文集[C]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. 133 - 140.

Vortex structures of round turbulent jets in cross-flow^{*}

LI Wei¹, JIANG Guo-qiang², ZHANG Xiao-yuan¹

(1. Institute of Hydraulic and Water Resource, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The vortex structures of round turbulent jets in cross-flow with different velocity-ratio were investigated by using the PIV in this paper. It is found that the vortex structures include the Kelvin-like vortexes in shear-layer of jet, the cross-flow separation vortex pair, the horseshoe vortex system in upstream bottom region of jet and the wake vortexes. Through analysis of evolution mechanism of vortex structure and topology, the two separation lines in the nearfield of the jets are obtained: one of them is the separation line of the cross-flow and another is the line of shear vortexes around the jet to enter cross-flow separation vortexes. Ultimately, the separation vortex pair enter and mix with the jet at far field to form the counter-rotating vortex pair in the jet body.

Key words: jets; cross-flow; vortex structures; turbulent flow

^{*} The project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 59979022).