

# 流动环境中二维铅垂纯射流的试验研究

槐文信, 李爱华, 那宇彤, 杨中华, 童汉毅, 黄纪忠

(武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 对均匀流动环境中的铅直二维射流进行了试验研究, 得到了流动转变的条件。采用超声多普勒流速仪(ADV)对射流流场进行了测量, 得到了流速矢量图和流线图, 发现在射流的迎流面存在流线跌落现象。探讨了流速比对射流背流面涡心和分离点位置的影响。给出低流速比为8的射流流场的实测结果, 以供数值模拟对比使用。

关键词: 流动环境; 平面射流; 试验研究

中图分类号: TV 133.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2003)03-300-05

流动环境中的二维铅垂射流是环境工程、土木工程和环境水力学界十分关注的课题。例如河口地区利用水幕帘或气幕帘阻止异重流的形成, 河道底部的污水排放等等, 都可概化为这类流动, 同时这类流动也是环境水力学中的典型流态, 受到水力学和计算流体力学工作者的重视。对于半无限域中横流中的单孔射流, 国内外研究得较多, 在试验研究方面: 主要代表作有 Kamotari 和 Greber<sup>[1]</sup>对射流比  $R$  ( $R$  为射流的出口流速和横流流速之比) 较大范围内的紊动射流宏观特性进行了测量, 后来, Subramanya 等<sup>[2]</sup>、Pratte 等<sup>[3]</sup>和 Andreopoulos 等<sup>[4]</sup>对射流的轨迹线和紊动等特性进行了试验研究。就横流中单孔射流的数值模拟方面, 主要有: Sykes 等<sup>[5]</sup>、Demuren<sup>[6]</sup>和槐文信等<sup>[7]</sup>所做的工作。但对于横流中铅直向上的纯二维射流的研究较少, 本试验研究旨在探讨这类流动的特性, 其一加深对流动规律性的认识; 其二为进一步数值计算奠定对比基础。

## 1 试验装置与测量系统

试验采用恒定水流系统, 水槽长 21 m, 宽 30 cm, 深 50 cm。射流喷口距离下游尾门的距离为 10 m, 喷口宽 3 mm, 长与水槽等宽(图 1)。环境来流流量和射流喷口的流量分别使用 SA100AS 型电磁流量计和 LZB 50 转子流量计来测定。流速场的量测采用美国 Sontek 公司生产的超声测速仪(Micro ADV)来完成。

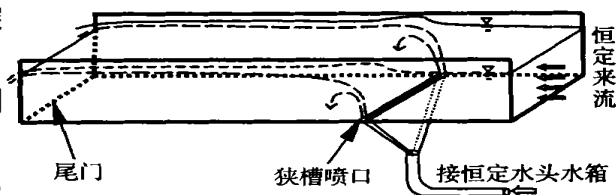


图 1 流动环境中的二维纯射流

Fig. 1 2-D turbulent jet in flowing ambient

## 2 流动转变条件的确定

### 2.1 理论分析

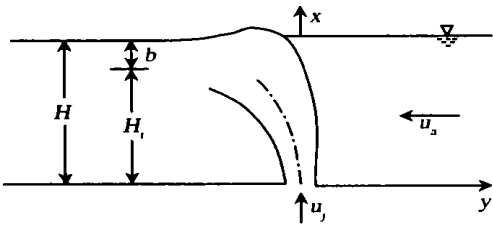
对于二维平面射流(图 2), 当射流上升到高度  $H_t$ , 其垂向动量小于水平动量时, 射流偏向下游形成回流, 而上

收稿日期: 2002-03-11; 修订日期: 2002-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59878019); 教育部骨干教师资助项目

作者简介: 槐文信(1963-), 男, 陕西乾县人, 武汉大学教授, 博士生导师, 博士, 主要从事环境水力学方面的研究。

E-mail: wxhuai@wuhee.edu.cn



游回流消失, 即转变条件为

$$\frac{H_i \text{ 处射流的垂向动量}}{\text{横流动量}} \leq 1 \quad (1)$$

而  $H_i$  处的垂向动量和横流动量依次正比于射流的出口动量和环境来流的动量, 则

$$\frac{\rho B u_j^2}{\rho H u_a^2} \leq \alpha_1 \quad (2)$$

式中  $u_j$  为喷口速度;  $u_a$  为横流平均速度;  $\rho$  为水的密度;  $B$  为射流的出口宽度;  $H$  为水深。式(2)也可写为

$$\left(\frac{B}{H}\right)^{1/2} \frac{u_j}{u_a} \leq \alpha \quad (3)$$

式(3)即本文推导的流动转变条件, 其系数  $\alpha$  由试验来确定。

### 2.2 $\alpha$ 的确定

针对上述的理论分析, 其系数采用试验来确定。表 1 为试验测得临界状态的参数表, 按式(3)来整理有

$$(B/H)^{1/2} (u_j/u_a) \leq 2.71 \quad (4)$$

由此可见对二维纯射流流动污染物不向上游入侵的判据为式(4)。

表 1 临界状态水流参数

Table 1 Parameters of critical flow

序号	$Q_j$ /( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	$Q_a$ /( $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$H$ /m	$u_j$ /( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$u_a$ /( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$R = \frac{u_j}{u_a}$	$H/B$	$(B/H)^{1/2}(u_j/u_a)$
1	2.45	1.5	0.116	0.756	0.043	17.54	38.667	2.821
2	2.95	1.9	0.118	0.910	0.054	16.96	39.333	2.705
3	3.70	2.3	0.120	1.142	0.064	17.87	40.000	2.826
4	2.50	1.9	0.163	0.772	0.039	19.88	54.400	2.696
5	3.50	2.7	0.168	1.080	0.054	20.14	55.933	2.693
6	1.15	1.1	0.205	0.355	0.018	19.84	68.333	2.401
7	1.65	1.5	0.209	0.509	0.024	21.29	69.667	2.550
8	2.10	1.9	0.210	0.648	0.030	21.49	70.000	2.569
9	2.60	2.3	0.213	0.802	0.036	22.30	71.000	2.646
10	3.05	2.7	0.216	0.941	0.042	22.59	72.000	2.663
11	1.70	1.5	0.255	0.525	0.020	26.76	85.000	2.902
12	2.10	1.9	0.258	0.648	0.025	26.40	86.000	2.847
13	2.55	2.3	0.262	0.787	0.029	26.90	87.333	2.878
14	3.00	2.7	0.264	0.926	0.034	27.12	87.867	2.893

## 3 临界流的流场特性

图 3 给出  $H/B$  和射流比  $R$  为参数的流型判别标准。那么在临界状态的水流现象如何? 我们选表 1 中序号为 No. 5 的工况对流场使用超声多普勒流速仪 (ADV) 进行了测量, 基于流速场的资料, 采用 tecplot 7.5 绘制了流速矢量图和流线图, 其结果分别列于图 4(a) 和图 4(b) 中。可清楚看出: 在临界流时, 射流在水面的垂直动量作用为零, 即不存在隆起高度。

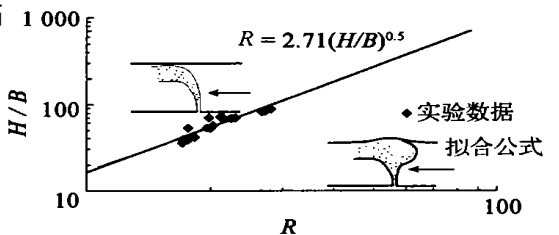


图 3 流型判别图

Fig. 3 Two kind flow type of jet in crossflow

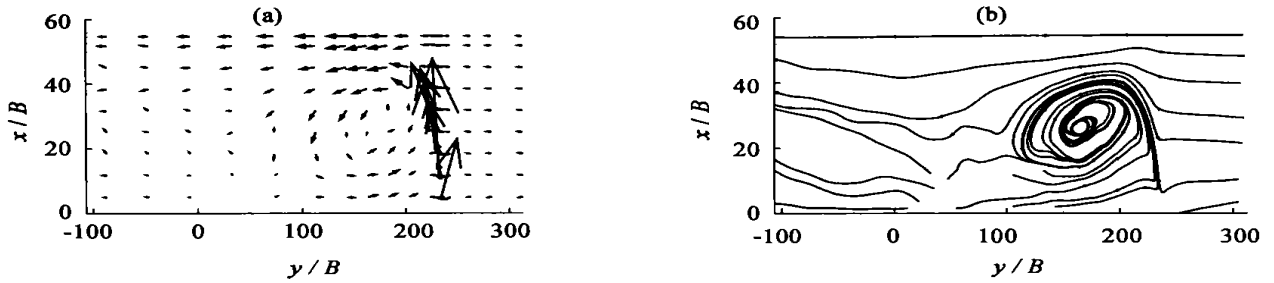


图4 临界流时流场信息

Fig. 4 Velocity vector and streamline for critical flow

## 4 大流速比时的流场特性

### 4.1 射流出口处垂线流速的变化

为了对大流速比的射流流场有一清晰的认识, 首先沿射流出口的垂线(即射流中心线)对表2中的4种流动工况采用ADV进行了测量, 图5给出了其相对流速沿程的变化规律, 发现所有相对流速都落在同一曲线上, 此种工况对应的水深在16cm左右。其 $(B/H)^{1/2}(u_j/u_a)$ 在6.4左右, 由此可见 $(B/H)^{1/2}(u_j/u_a)$ 是控制流动状态的特征参数。

表2 大流速比下实测中线流速的水流条件

Table 2 Parameters for jet with large velocity ratio

$Q_j$ /( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	$Q_a$ /( $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$H$ /m	$u_j$ /( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$u_a$ /( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$(B/H)^{1/2}(u_j/u_a)$
3.80	1.20	0.161	1.173	0.025	6.444
2.80	0.90	0.159	0.864	0.019	6.291
2.20	0.70	0.155	0.679	0.015	6.275
1.64	0.50	0.152	0.506	0.011	6.485

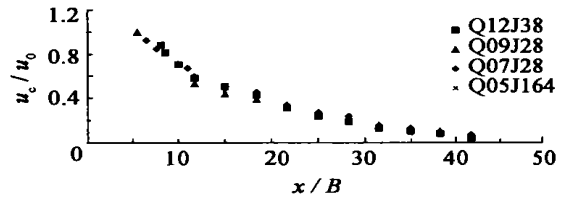


图5 大流速比时射流中心线流速分布

Fig. 5 Centerline velocity distribution for jet with large velocity ratio

### 4.2 大流速比时的全流场

取横流流量 $Q_a = 0.9 \text{ L/s}$ , 射流流量 $Q_j = 2.8 \text{ m}^3/\text{h}$ , 即射流比为45.6的临界工况进行了全流场测量, 此时水深为 $H = 15.85 \text{ cm}$ 。图6为实测的流场矢量图和流线图。

从图6中速度矢量和流线可看出: 在大流速比时射流的迎流面出现流线的跌落现象, 这是因为射流的卷吸作用所致。一般而言, 射流的速度愈大, 卷吸能力愈大。而在靠近出口的区域, 射流卷吸环境流体要多, 这样就产生上层流体的下移。

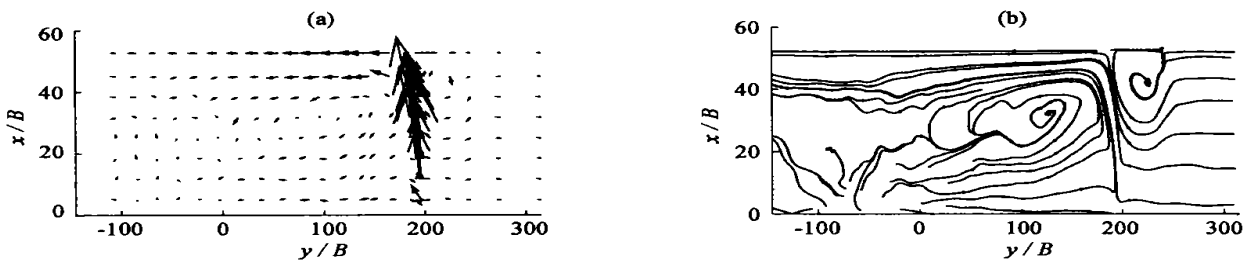


图6 大流速比时流场的信息

Fig. 6 Velocity vector and streamline for jet with large velocity ratio

## 5 低流速比下的流场结构

本次研究选用横流流量  $Q_a = 2.0 \text{ L/s}$ , 射流流量  $Q_j = 1.08 \text{ m}^3/\text{h}$ , 射流比  $R = 8$ , 水深  $H = 16.04 \text{ cm}$  的工况来研究, 图 7 给出了实测的流场矢量图和流线图。可看出在射流的背流面存在着回流, 其回流的涡心和分离点清晰可见, 在射流的迎流面, 流线同样出现了跌落现象, 这一成果是数学模型验证的理想资料。

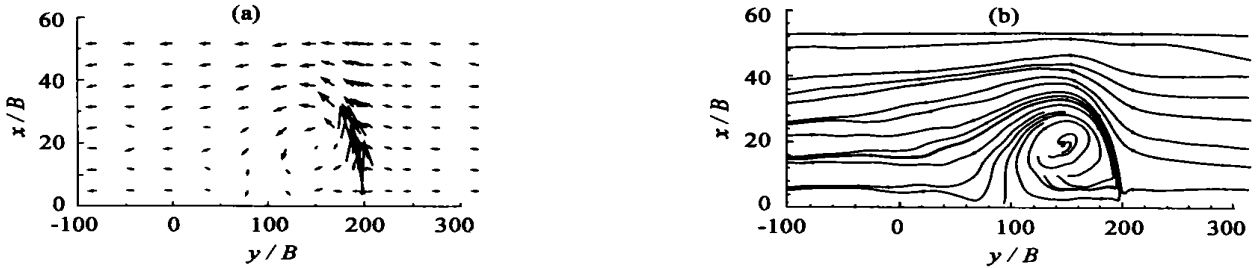


图 7 低流速比  $R = 8$  时流场的信息

Fig. 7 Velocity vector and streamline for jet with low velocity ratio,  $R = 8$

## 6 射流比对射流背流面涡心和分离点的影响

图 8 为射流背流面涡心和分离点的示意图, 图 9 给出了水深  $H = 16 \text{ cm}$  工况下, 不同射流比下实测的涡心纵横坐标和分离点坐标的变化情况。该结果表明: 当  $R$  小于相应的临界射流比时, 射流比的变化对  $x_{\text{vor}}$ ,  $y_{\text{vor}}$  和  $y_{\text{sep}}$  有显著的影响, 当  $R$  大于相应的临界射流比时, 这 3 个坐标值的变化甚微, 且逐渐趋于定值。图中的结果的拟合公式依次为

$$X_{\text{vor}} = x_{\text{vor}}/B = 2.7818 \ln(R) + 0.1076 \quad (5)$$

$$Y_{\text{vor}} = y_{\text{vor}}/B = 5.1537 \ln(R) + 3.3624 \quad (6)$$

$$Y_{\text{sep}} = y_{\text{sep}}/B = 23.054 \ln(R) - 9.3598 \quad (7)$$

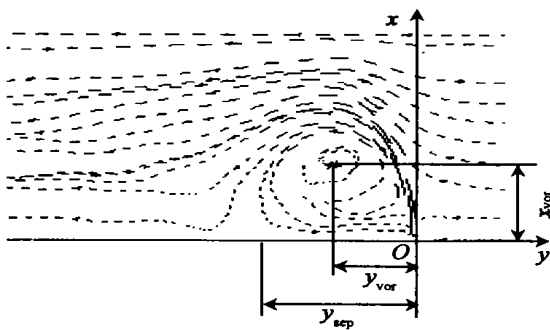


图 8 涡心和分离点示意图

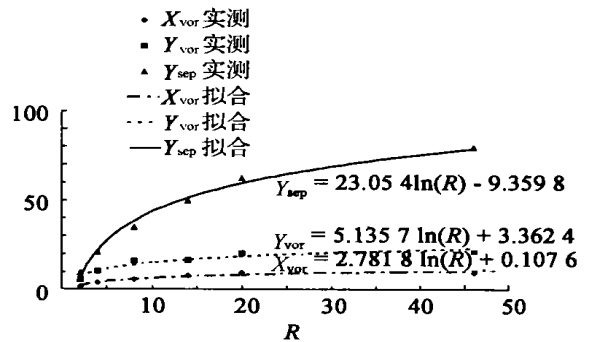


图 9 流速比对涡心和分离点的影响

Fig. 8 Sketch map of vortex center and separate point

Fig. 9 Effect of velocity ratio  $R$  on the position of vortex and separate point

## 7 结 论

(1) 流动转变的条件可用式(4)来表示;

(2) 流动参数  $(B/H)^{1/2}(u_j/u_a)$  是控制流动的重要参数, 反映流动的状态。对该值为 6.5 的 4 种流动进行中线流速测量结果表明: 对一定的水深, 相对流速落在同一曲线上;

(3) 对大流速比的射流, 在射流的迎流面存在流线跌落现象;

(4) 对小流速比的射流在射流的背流面存在着回流, 其回流的中心和分离点清晰可见, 在射流的迎流面, 流线同样出现了跌落现象;

(5) 当  $R$  小于相应的临界射流比时, 射流比的变化对  $x_{\text{vor}}$ 、 $y_{\text{vor}}$  和  $y_{\text{sep}}$  有显著的影响, 当  $R$  大于相应的临界射流比时, 这三个坐标值的变化甚微, 且逐渐趋于定值。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Kamorani Y, Greber I. Experiments on a turbulent jet in a cross wind[ J ]. J Fluid Mech, 1972, 15: 481– 496.
- [ 2 ] Subramanya K, Porey P D. Trajectory of a turbulent cross jet[ J ]. J of Hydraulic Research, 1984, 22: 343– 354.
- [ 3 ] Pratte B D, Baines W D. Profiles of the round turbulent jet in cross flow[ J ]. J of the Hydraulics Div, ASCE, 1967, 93: 53– 64.
- [ 4 ] Andreopolous J. Heat transfer measurements in a heated, jet pipe flow issuing into a cold crosstream[ J ]. Phys Fluids, 1983, 26: 3201– 3210.
- [ 5 ] Skyes R I, *et al.* On the vorticity dynamics of a turbulent jet in a cross flow[ J ]. J Fluid Mech, 1986, 168: 393– 413.
- [ 6 ] Demuren A O. Characteristics of three dimensional turbulent jets in cross flow[ J ]. Int J Engng Sci, 1993, 31: 899– 913.
- [ 7 ] 槐文信, 等. 横流中单圆孔紊动射流计算与特性分析[ J ]. 水利学报, 1998, ( 4 ): 7– 14.

## An experimental study of 2-D vertical turbulent jets in flowing water<sup>\*</sup>

HUAI Weixin, LI Aihua, NA Yirong, YANG Zhonghua, TONG Harryi, HUANG Jirong

(*Dpt. of River Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

**Abstract:** This paper presents an experimental study of 2-D turbulent jets discharged vertically through a rectangle submerged pipe into flowing non stratified water of finite depth. The experiments were carried out in laboratory facilities of a closed system capable of maintaining steady-state conditions, and the condition for the transform of flow type is presented. The relationship between the velocity ratio and the position of vortex located in the near of the jets and the separated point is given also. The velocity vector in the center plane and the rate of centerline velocity are obtained by the Micro ADV system for 3 kinds typical jets. Based on the data of velocity, the streamline contours in center plane for the jets are obtained by the software of Tecplot7.5. There is a fall off of the upstream streamline near the jets. The vector of jets with velocity ratio, 8 is showed for comparing with the numerical simulation.

**Key words:** flowing ambient; plane jets; experimental study

\* The project is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 59878019).