

同流多孔热水浮力射流排放特性实验研究

邵 磊, 王 颖, 薛晨亮, 孙玉贤

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 水环境污染问题是当今世界各国所普遍关注的重大问题. 城市污水、热电、核电厂的冷却水排放过程都与射流有关, 因此, 研究各种污水处理工程中排放口附近的流动特性具有重要的理论和实际意义. 利用声学多普勒流速仪 (ADV) 测速系统和数字温度计研究了同向三圆孔热水浮力射流的排放特性, 得到了流速和温度的分布、不同孔间距和流速比的射流轨迹线、射流中轴线上的速度和温度衰减, 探讨了相对孔间距和流速比对多孔浮力射流流动变化特性的影响, 实验和数值模拟反映的变化规律相一致, 射流轴线速度和温度衰减变化明显的区域主要集中在 80~90 倍的射流直径范围内; 射流温度相同时, 流速比越大, 中轴线上温度和速度衰减越快, 射流轨迹线向上抬升的趋势越小; 孔间距越小, 射流轨迹线向上抬升的趋势越明显.

关 键 词: 同流; 热水浮射流; 实验研究; 数值模拟

中图分类号: TV131

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)03-0048-06

多孔射流目前多应用在扩散器中, 它是一种用来增强污水与环境水体掺混稀释能力的工程措施. 热污(废)水直接进入环境流体之前, 以多孔口浮射流的形式释放污水并确保污水在排污口快速混合非常重要. 精确了解和预测多孔浮射流的特性与混合状况, 可为冷却水工程提供设计分析依据. 利用数值模拟仿真手段和精密测量仪器进行试验研究成为射流研究的重要技术手段, 有助于获得热水射流流场和温度衰减特性, 进一步认识射流的掺混机理. 近几年来, 许多新的测试技术应用于射流研究, 取得了大量的研究成果.

Papanicolaous 和 List^[1,2] 在分析了大量前人实验结果后分别确定了射流区和羽流区内速度和浓度高斯分布函数中的指数系数, 以及断面扩展半宽度等特征参数. 有学者研究了轴线上流速和浓度的沿程变化规律后, 认为浮射流的流动特征随着动量和浮力所起作用的变化而变化, 并具有明显的分区特性^[1-4]. Lee^[5] 提出了拉格朗日射流模型, 能较好预测浮射流的三维运动轨迹和平均稀释度; Wang H^[6] 根据新的实验数据发展了一个二阶积分模型, 并应用于紊动圆形断面浮射流研究. 槐文信^[7,8] 研究了静止环境和流动中倾斜浮射流流动特性, 还通过试验研究获得了利用积分守恒性导出的以任意倾角从喷口流入静止环境中浮射流的积分模型的有关参数. 华明, 唐洪武^[9,10] 利用 ADV 对圆射流流场紊动特性进行了实验. 姜国强等^[11] 应用 PIV 对横流中的湍射流进行了实验研究.

1 实 验 设 计

1.1 实 验 装 置

本实验流速测量装置采用美国 Sontek 公司的 ADV, 它是一种单点、高分辨率的声学多普勒流速仪. ADV 测速技术以声学多普勒效应原理为基础, 利用向水体中发射的声波被水体的固体微粒子或气泡散射时所产

收稿日期: 2008-09-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50679072)

作者简介: 邵 磊 (1981-), 男, 山东枣庄人, 博士研究生, 主要从事环境水力学和水污染控制方面研究.

E-mail: Shaolei.1981@163.com

生的频率差,并经 ADV 采样和由电子仪器来度量频率的变化,从而计算出采样体积中的三维水流速度,实现实时的三维流速分布测量。

温度的测量选用天津今明仪器公司的 JM624U 型数字温度计,测温范围 $-50 \sim 199.9^{\circ}\text{C}$,传感器为铂电阻 Pt1000,准确度 $\pm 0.1\%$,读数 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$,分辨力 0.1°C ,温度探头直径 2 mm ,长 30 cm ,测量时固定在专用支架上,可精确左右上下移动,每点测量采用多次测量求平均值。

实验在宽 80 cm 、高 60 cm 、长 30 m 的水槽中进行。水平射流管通过转子流量计与安装在高处的水箱相连,水箱进水管接恒温热水器,内设有溢流装置以保证水头恒定。射流管孔口直径为 10 mm ,在射流下游远离孔口处设可调节尾门,通过控制尾门顶部溢流高度以保证射流的淹没深度不变。在水槽上部装有可沿水槽轴向自由滚动的小车,将 ADV 流速计安装在小车上的测架上,利用滑动装置可以纵向移动,从而实现对不同断面上的测点进行测量(见图1)。

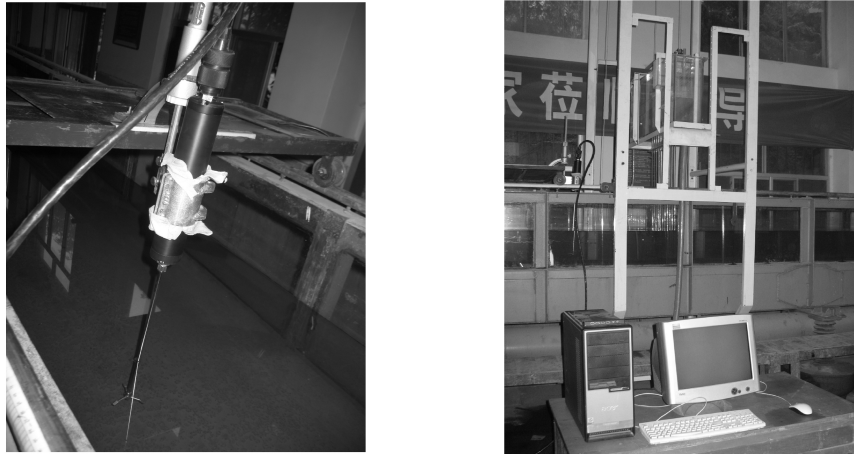


图1 实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus

1.2 计算工况

3个射流孔中,中间射流孔的孔中心就是坐标系的原点 $(0,0)$ (见图2),该点水深 0.15 m ; S 为相邻两个射流孔的孔中心间距, D 为射流孔直径, $D=10\text{ mm}$; S/D 为相对孔间距; R 为环境流速与射流流速的比值,分别取 $4, 6, 8$ 。分别计算了 $S/D=2, 3, 4, 5$ 的情况; $Y=0$ 时的 XZ 面为射流的对称面。 T_j 为射流的温度,分别取 $35, 40$ 和 45°C ; U_0 为环境流体的流速,取 0.1 m/s ; U_j 为射流流速; T_0 为环境流体的温度,取 20°C 。

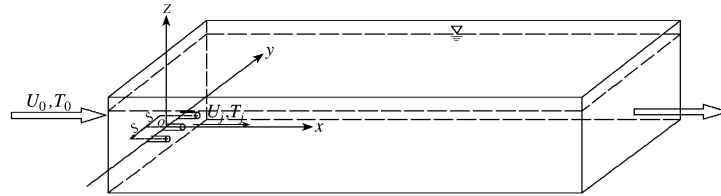


图2 同流环境中多圆孔热浮力射流示意图

Fig. 2 Diagram of horizontal three-round ports buoyant jet in co-flowing

为了比较实验结果,同时利用 Flunt 软件中的 RMS 模型进行数值模拟,计算工况相同,边界条件为:

进口边界: 当 $\sqrt{y^2 + z^2} \leq 5\text{ mm}$ 时, $U = u_j, T = T_j$; 当 $\sqrt{y^2 + z^2} \geq 5\text{ mm}$ 时, $U = u_0, T = T_0, V, W$ 均取为 0 , 同时取初始紊动能和初始耗散率^[12]分别为 $k_0 = 0.06u_j^2, \varepsilon_0 = 0.06 \frac{u_j^3}{D}$ 。

出口边界: $X=2.5 \text{ m}$, $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0$

固壁边界: $Y=\pm 0.25 \text{ m}$, $U=u_0, V, W$ 均为 0, $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0$

底部边界: $Z=-0.1 \text{ m}$, $W=0$, $\frac{\partial T}{\partial x} = 0, u, v, k, \varepsilon$ 采用标准壁面函数法

自由液面: 采用刚盖假定, 即 $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0, W=0$

热水紊动浮射流的雷诺应力模型包含的经验常数, 采用文献[13, 14]所建议的值, $c_1=2.2, c_2=c_3=0.55, c_{1\varphi}=3.0, c_{2\varphi}=c_{s\varphi}=0.5, c_s=0.24$.

2 实验结果分析

2.1 流速与温度分布

选取为 $T_j=45^\circ\text{C}$, $R=6$ 工况分析, X 轴方向上距射流孔口距离为 5 倍孔间距时, 孔间距对流速和温度稀释的影响分别见图 3 和图 4. 定义 $(T-T_0)/(T_j-T_0)$ 为温度稀释度, 数值模拟中由于自由液面和底部边界分别采用刚盖假定和壁面函数法, 边界处的流速和温度迅速衰减到零. 对比发现, 同一位置上数值模拟的速度和温度分布范围小于实验结果, 这是因为数值模拟并不能完全反映实际流动中的回流和水槽边壁对射流的影响.

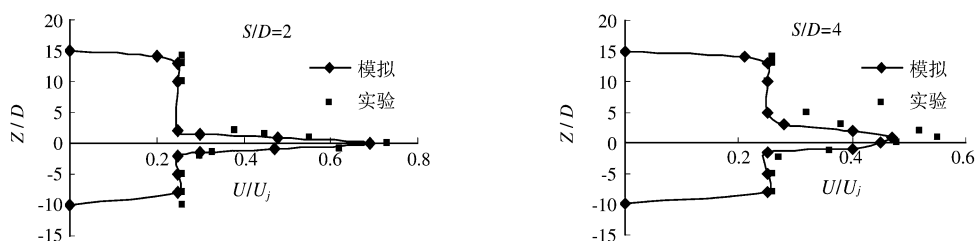


图 3 孔间距对流速分布的影响

Fig. 3 Influence of hole spacing on velocity profile

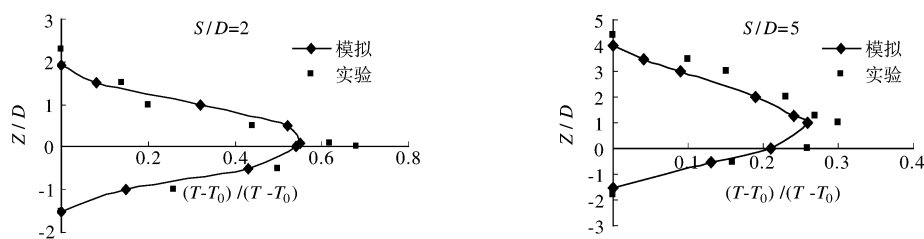


图 4 孔间距对温度稀释分布的影响

Fig. 4 Influence of hole spacing on temperature dilution

2.2 相对孔间距对多孔射流的影响

选取为 $T_j=40^\circ\text{C}$, $R=4$ 工况分析, 在实验水箱中加入高锰酸钾做为示踪剂, 在水槽的玻璃侧壁上用笔标出轨迹线的大体路线, 然后沿着一定间距进行逐点测量, 测量每个点时沿 Z 轴上下方向再加测几个点, 取其中速度最大的点.

由图 5 可以看出, 在射流喷口附近的射流起始段, 初始动量很大, 占主导地位, 浮力作用占次要地位, 起始段基本为一水平段, 其形态和纯射流相似, 随着射流向下游的发展, 初始动量的作用逐渐减弱, 浮力作用逐

渐占主导地位,可从图5看出射流的轴线明显向上抬升。

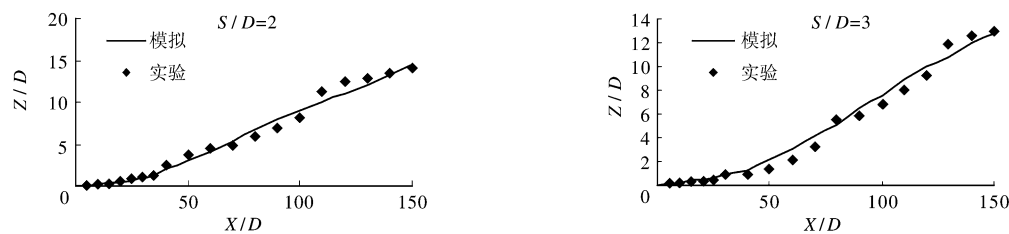


图5 不同孔间距时射流轨迹线实验结果与数值模拟比较

Fig. 5 Comparison of experimental and numerical simulation results in jet trajectory with different hole spacings

孔间距对射流轨迹线的影响比较(见图6)表明,实验和数值模拟反映的规律相同,即随着孔间距的增大,射流轨迹线向上抬升的趋势越不明显,热水浮射流上升到水面需要的水平距离越长,对下游影响的范围越大.这是因为孔间距越小,由于孔与孔之间的 Conada 效应,射流进入环境流体的过程中被卷吸的环境流体得不到及时补充,温度稀释慢,射流温度与环境水体温差大,温差产生的浮力作用越大,射流轨迹线上浮的趋势越大。

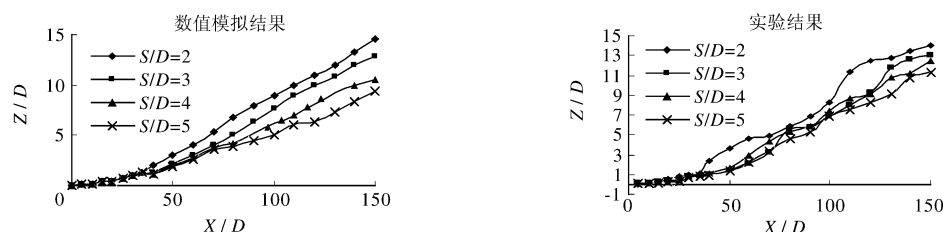


图6 孔间距对射流轨迹线影响

Fig. 6 Influence of hole spacing jet trajectory

2.3 流速比对射流轴线速度和温度衰减的影响

图7分别给出了 $R=4$ 工况下射流中轴线上速度和温度随水平距离的衰减规律的实验和数值模拟结果. 定义 $(U-U_0)/(U_j-U_0)$ 为速度衰减值,在喷口附近,速度衰减很快,这是由于喷口附近的湍动能较大,使现浮射流与环境水体紊动掺混作用加强,随着距喷口距离的增大,湍动能逐渐减小,掺混稀释作用减弱,速度和温度衰减趋缓. 衰减变化明显的区域主要集中在 $80 \sim 90$ 倍的射流直径范围内. 数值模拟较实验结果衰减更快,这是因为在实验过程中,实验循环水槽中的水流流动存在少许的回流现象以及水槽边壁的影响,使射流速度和温度扩散衰减减慢,而数值模拟很难准确模拟这些影响,导致数值模拟的温度和速度衰减比实验结果要快。

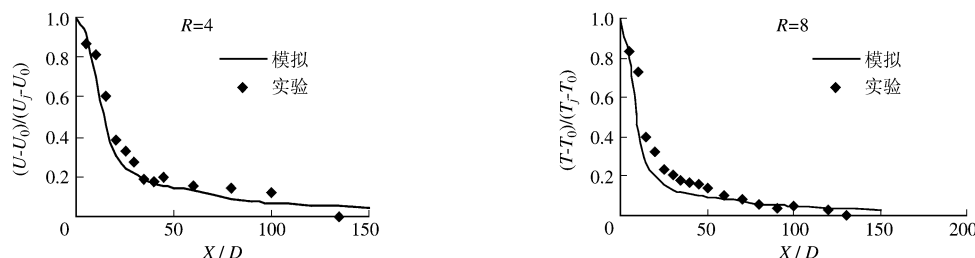


图7 射流中轴线上的速度和温度衰减实验结果与数值模拟比较

Fig. 7 Comparison of experimental and numerical simulation results in velocity and temperature attenuation

图8为 $T_j=40^\circ\text{C}$, $S/D=2$ 工况下射流中轴线上的速度和温度衰减,数值模拟和实验反映的规律相同,射流温度和相对孔间距相同、流速比不同的工况下,流速比越大,温度和速度沿水平距离的衰减越快. 图9表

明,随着流速比的增大,射流轨迹线的上升的趋势越小.这是因为流速比越大,射流流体和环境流体速度差就大,随之产生的掺混就越剧烈,速度和温度的损失就越大;温度越低,射流流体和环境流体的温差就越小,随之产生的浮力作用就越小,上浮就越慢.

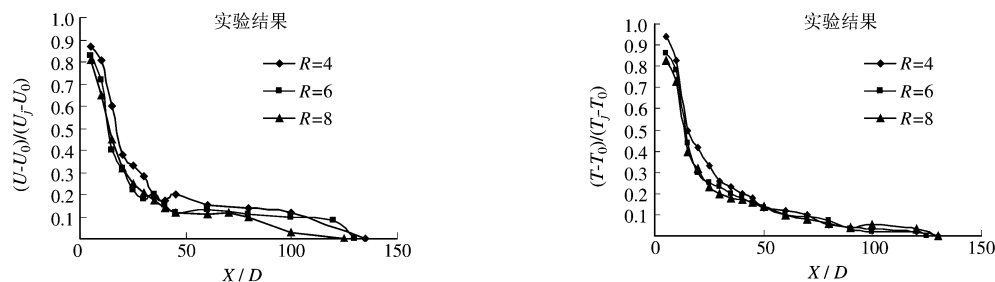


图 8 流速比对射流中轴线上速度和温度衰减的影响

Fig. 8 Influence of velocity ratios on temperature attenuation and velocity attenuation along the axis

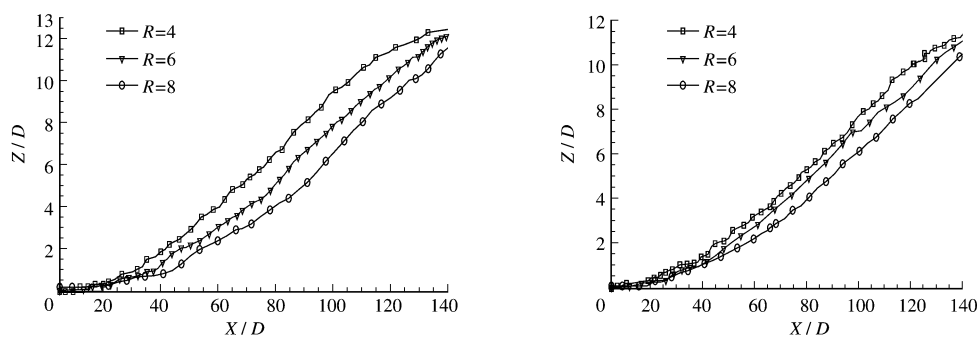


图 9 $S/D=2$ 和 $S/D=3$ 时不同流速比的射流轨迹线

Fig. 9 Jet trajectory of different velocity ratios under conditions of $S/D=2$ and $S/D=3$

3 结 语

(1) 同向流动环境下热水浮力射流轴线速度和温度衰减变化明显的区域主要集中在 80 ~ 90 倍的射流直径范围内;

(2) 在射流温度相同、流速比不同的工况下,流速比越大,射流中轴线上温度和速度沿水平距离的衰减越快,射流轨迹线向上抬升的趋势越小;

(3) 孔间距越小,射流轨迹线向上抬升的趋势越明显,热水射流上升到水面需要的水平距离越短.

参 考 文 献:

- [1] PAPANICOLAOS P N, LIST E J. Investigation of round vertical turbulent buoyant jets[J]. Fluid Mech, 1988, 195(1): 341-391.
- [2] PAPANICOLAOS P N, LIST E J. Statistical and spectral proper lies of tracer concentration in round buoyant jets[J]. Heat and Mass Transfer, 130(1): 2059-2071.
- [3] RODI W. Turbulent buoyant jet and plumes[M]. New York: Pergamon Press, 1982.
- [4] CHEN, RODI W. Vertical turbulent buoyant jets—A renewof experiment data[M]. New York: Pergamon Publisher, 1980.
- [5] LEE J H W, CHEUNG V. Generalized Lagrangian model for buoyant jets in current[J]. Journal of Environmental Engineering, 1990, 116(6): 1085-1106.

- [6] WANG H, LAW A W K. Second-order integral model for a round turbulent buoyant jet[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, 459: 397–428.
- [7] 曾玉红, 槐文信. 流动环境中三维圆形垂直浮力射流特性实验研究[J]. *实验流体力学*, 2005(9): 39–46. (ZENG Yu-hong, HUAI Wen-xin. Experiments on a round turbulent buoyant jet in a cross flow[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2005(9): 39–46. (in Chinese))
- [8] 槐文信, 李爱华, 那宇彤, 等. 流动环境中二维铅垂纯射流的试验研究[J]. *水科学进展*, 2003, 14(3): 300–304. (HUAI Wen-xin, LI Ai-hua, NA Yu-tong, *et al.* An experimental study of 2-D vertical turbulent jet in flowing water[J]. *Advances in Water Science*, 2003, 14(3): 300–304. (in Chinese))
- [9] 唐洪武, 肖洋. 声学多普勒流速仪自动测量控制系统[J]. *计算机测量与控制*, 2003(11): 651–654. (TANG Hong-wu, XIAO Yang. Acoustic-Doppler velocimeter automatic measuring and controlling system[J]. *Computer Measurement and Control*, 2003(11): 651–654. (in Chinese))
- [10] 华明, 唐洪武. ADV测速技术在紊动射流流场特性研究中的应用[J]. *水利水运工程学报*, 2000(3): 18–21. (HUA Ming, TANG Hong-wu. Investigation of turbulent characteristics of velocity field of a round jet using ADV measurement techniques[J]. *Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute*, 2000(3): 18–21. (in Chinese))
- [11] 姜国强, 张晓元, 李炜. PIV在横流中的湍射流实验研究中的应用[J]. *水科学进展*, 2002, 13(5): 588–593. (JIANG Guo-qiang, ZHANG Xiao-yuan, LI Wei. Study on round turbulent jet in a cross flow with PIV[J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(5): 588–593. (in Chinese))
- [12] MELTON L A, LIPP C W. Criteria for quantitative PLIF experiments using high-power lasers[J]. *Experiments in Fluids*, 2003, 35: 310–316.
- [13] ULRICH Lemmin, THIERRY Rolland. Acoustic-Doppler Velocimeter (ADV) for laboratory and field studies[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997: 1089–1098.
- [14] HABLI S, MAHJOUB Said N, MAHMOUD H. Influence of a coflowing ambient stream on a turbulent axisymmetric buoyant jet[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2008, 130: 1–15.

Investigation of characteristics of multi-ports thermal buoyant jet in co-flowing surroundings

SHAO Lei, WANG Ying, XUE Chen-liang, SUN Yu-xian

(*Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

Abstract: Water environmental pollution is a widely attended important problem. The discharge quantity of city sewage and power plant cooling water, etc. is increasing gradually. Because the discharge process is related with jet behavior, it is significant to study the flow behavior near the discharge outlet of the sewage treatments building in theoretical research and practical application. By using Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) technique and digital thermometer measurement techniques, the characteristics of multi-ports thermal buoyant jet in co-flowing surroundings are studied in this paper. By use of the special WinADV software, several characteristics are acquired, such as the profiles of velocity and temperature, the jet trajectory of different pipe spacings and velocity ratio, as well as temperature attenuation and velocity attenuation on the axis. Furthermore, the influence of relative pipe spacing and velocity ratio on flow characteristics are discussed. All the results are compared with the numerical simulation results.

Key words: co-flowing; thermal buoyant jet; experimental research; numerical simulation