

复式断面明渠中水平热水浮力射流近区稀释特性研究

槐文信, 肖庆华, 曾玉红, 杨中华, 钱忠东

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

(周哲玮推荐)

摘要: 采用考虑浮力效应的 RNG $k-\epsilon$ 双方程模型, 结合混合有限分析法对复式断面明渠流中水平圆孔热水浮力射流进行了数值模拟, 对其近区稀释特性及二次流结构进行数值分析。同时, 采用三维 ADV 测速仪及温度测量仪对其近区典型断面的: 1) 横断面主流速等值线分布; 2) 二次流; 3) 横断面温度等值线分布进行了试验测量。数值模拟结果与试验资料的对比表明, 考虑浮力效应的 RNG $k-\epsilon$ 模型能够较好模拟射流在环境来流、浮力效应、复式断面二次流等因素作用下, 所表现出的分叉现象、附壁效应(Conada 效应)和边滩二次流现象。

关键词: 紊流模型; 复式断面; 浮力射流; 混合有限分析法; 二次流

中图分类号: O358 **文献标识码:** A

引言

天然河道大多具有横向缓坡或一系列阶梯型的河漫滩, 这种典型河道被称之为复式断面河道。在洪水期间, 主槽水流流速较大, 边滩水流流速小从而阻碍主槽水流, 继而引起滩槽交界面处强烈的横向动量交换。同时, 这种速度的不均匀性产生的剪切层会对紊动(漩涡)结构产生影响, 并在河道纵向轴线形成漩涡。Shiono 和 Knight(1991)^[1], Tominaga 和 Nezu(1991)^[2], Naot 等(1993)^[3]对这一现象进行了观测, 发现二次流对动量传递和边界剪切层有着强烈的影响。

以往的对热水浮力射流的研究, 多以矩形断面明渠为对象, 如余常昭通过理论推导和实验研究, 得出了从侧面垂直射入横流的三维浮力射流的定性特性以及一些经验表达式^[4]; 张燕等对流动环境中高浓度射流扩散进行了试验研究^[5]; 槐文信等采用分析与试验结合的方法研究了浅水同流污水排放的流动特性^[6]; Johnston 和 Nguyen 等对横流环境中圆孔浮力射流进行了试验研究, 得到了喷口位于不同高度时污染物扩散的定性特性^[7-8]; Ramsey, Goldstein 等对横流中热射流的交换作用进行了研究^[9]; Kamotani, Greber 等试验研究了横流中的紊动射流^[10]; 曾玉红、槐文信等对横流中三维圆形垂直浮力射流特性进行了数值分析^[11]; 槐文信等采用数值

收稿日期: 2007-03-13; 修订日期: 2007-11-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50479038; 50679061); 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放基金资助项目(LP0601)

作者简介: 槐文信(1963), 男, 陕西乾县人, 教授, 博士, 博士生导师(联系人, Tel: + 86-27-68772206; E-mail: wxhuai@whu.edu.cn).

方法对横流中单圆孔紊动射流进行了数值计算与流动特性分析^[12]; 槐文信和梁爱国等用数值方法研究了浅水横流环境中圆孔浮力射流近区的初始稀释^[13-14]

复式断面明渠由于其影响因素复杂, 故对复式断面明渠中的传热传质的深入研究尚不多见。本文采用三维基于浮力效应的 RNG 方法的 $k-\epsilon$ 双方程模型, 模拟复式断面明渠横流中水平圆孔热水射流近区稀释特性及二次流特征, 为了检验本文数学模型的正确性, 对若干工况进行了试验研究, 采用三维 ADV 测速仪急温度采集仪对其近区进行试验测量, 从而为数值计算提供了对比基础

1 试验方法

首先在一个长 1 000 cm、宽 50 cm、深 50 cm 玻璃水槽内进行了试验研究。复式断面明渠的断面尺寸如图 1(单位为 cm)。一股温度为 T_j 、流速为 u_j 的热射流, 从直径为 D 的圆孔垂直流入平均速度为 u_a 、温度 T_a ($T_j > T_a$) 的均匀横流中

整个试验中水深不变, 为 22 cm, 射流喷口直径为 1 cm。射流温度和环境来流温度均保持不变, 分别为 54、13.5; 设喷口距离槽底为 h_1 , 对应喷口位置有两种工况, 一种是在距离槽底 3 cm, 另一种是在距离槽底 9 cm。射流流量控制在 509 L/h, 则射流流速为 180 cm/s。环境流量选择 3 组, 分别为 9.99 L/s、12.4 L/s、16.5 L/s, 对应的环境流速分别为 12 cm/s、15 cm/s、20 cm/s, 定义射流与环境水体的流速比 $R = u_j / u_a$, 则 3 个流速比分别为

$$R = u_j / u_a = 180 / 12 = 15,$$

$$R = u_j / u_a = 180 / 15 = 12,$$

$$R = u_j / u_a = 180 / 20 = 9,$$

而对于 5 种试验工况, 喷口密度佛汝德数均为 23.78, 具体试验工况见表 1, 试验中采用三维 ADV 测速仪测量复式断面三维流速场, 而温度场则采用温度测量仪来采集试验数据

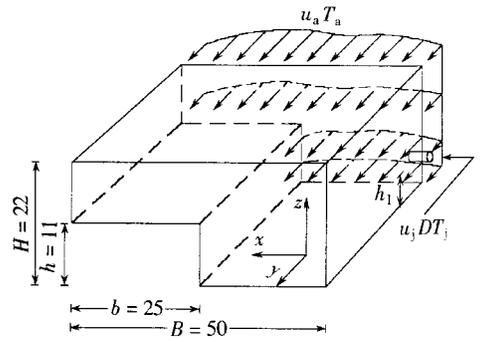


图 1 复式断面明渠中水平浮力射流示意图

表 1 试验工况

工况	Q_j / (L/h)	v_j / (cm/s)	T_j	u_a / (cm/s)	T_a	h_1/D	H/D
1	509	180	54	12	13.5	3	22
2	509	180	54	15	13.5	3	22
2	509	180	54	20	13.5	3	22
4	509	180	54	15	13.5	9	22
5	509	180	54	20	13.5	9	22

2 数学模型

基于布辛涅斯克(Boussinesq)假定, 并以喷口孔径 D 为特征长度, 喷口处相应的射流速度 u_j 为特征速度, 环境来流温度 T_a 为参考温度, 对考虑浮力效应的 RNG 的 $k-\epsilon$ 双方程模型进行无量纲化, 则三维恒定紊流的流动控制方程为:

连续性方程

$$\frac{u}{x} + \frac{v}{y} + \frac{w}{z} = 0 \quad (1)$$

x 方向动量方程

$$Re_t \left[u - 2 \frac{1}{x} \right] \frac{u}{x} + Re_t \left[v - \frac{1}{y} \right] \frac{u}{y} + Re_t \left[w - \frac{1}{z} \right] \frac{u}{z} = \left[\frac{2u}{x^2} + \frac{2u}{y^2} + \frac{2u}{z^2} \right] + Re_t \left[-\frac{p}{x} - \frac{2}{3} \frac{k}{x} + \frac{1}{y} \frac{v}{x} + \frac{1}{z} \frac{w}{x} \right] \quad (2)$$

y 方向动量方程

$$Re_t \left[u - \frac{1}{x} \right] \frac{v}{x} + Re_t \left[v - 2 \frac{1}{y} \right] \frac{v}{y} + Re_t \left[w - \frac{1}{z} \right] \frac{v}{z} = \left[\frac{2v}{x^2} + \frac{2v}{y^2} + \frac{2v}{z^2} \right] + Re_t \left[-\frac{p}{y} - \frac{2}{3} \frac{k}{y} + \frac{1}{x} \frac{u}{y} + \frac{1}{z} \frac{w}{y} \right] \quad (3)$$

z 方向动量方程

$$Re_t \left[u - \frac{1}{x} \right] \frac{w}{x} + Re_t \left[v - \frac{1}{y} \right] \frac{w}{y} + Re_t \left[w - 2 \frac{1}{z} \right] \frac{w}{z} = \left[\frac{2w}{x^2} + \frac{2w}{y^2} + \frac{2w}{z^2} \right] + Re_t \left[-\frac{p}{z} - \frac{2}{3} \frac{k}{z} + \frac{1}{x} \frac{u}{z} + \frac{1}{y} \frac{v}{z} + T \frac{T_a D}{u_j^2} \right] \quad (4)$$

能量方程

$$Re_T \left[u - \frac{1}{Pr_t} \frac{1}{x} \right] \frac{T}{x} + Re_T \left[v - \frac{1}{Pr_t} \frac{1}{y} \right] \frac{T}{y} + Re_T \left[w - \frac{1}{Pr_t} \frac{1}{z} \right] \frac{T}{z} = \left[\frac{2T}{x^2} + \frac{2T}{y^2} + \frac{2T}{z^2} \right] \quad (5)$$

湍动能 k 方程

$$Re_k \left[u - \frac{1}{k} \frac{1}{x} \right] \frac{k}{x} + Re_k \left[v - \frac{1}{k} \frac{1}{y} \right] \frac{k}{y} + Re_k \left[w - \frac{1}{k} \frac{1}{z} \right] \frac{k}{z} = \left[\frac{2k}{x^2} + \frac{2k}{y^2} + \frac{2k}{z^2} \right] + Re_k \left[P_k + g \frac{1}{Pr_t} \frac{T}{z} \frac{D}{u_j^2} - \right] \quad (6)$$

湍动能耗散率 方程

$$Re \left[u - \frac{1}{x} \right] \frac{1}{x} + Re \left[v - \frac{1}{y} \right] \frac{1}{y} + Re \left[w - \frac{1}{z} \right] \frac{1}{z} = \left[\frac{2}{x^2} + \frac{2}{y^2} + \frac{2}{z^2} \right] + Re \left[\frac{1}{k} \left(C_1 P_k + C_1 g \frac{1}{Pr_t} \frac{T}{z} \frac{D}{u_j^2} - C_2 \right) \right], \quad (7)$$

式中: u 、 v 、 w 分别表示 x 、 y 、 z 方向的分量, k 和 为湍动能和湍动能耗散率,

$$Re_t = \frac{Re}{1 + Re_t}, \quad Re_k = \frac{Re \cdot k}{k + Re_t}, \quad Re = \frac{Re}{1 + Re_t}$$

$$Re_T = \frac{Re Pr_t}{1 + Re_t}, \quad Re = \frac{u_j D}{\nu}, \quad \nu = C \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$P_k = \nu \left[2 \left(\frac{u}{x} \right)^2 + 2 \left(\frac{v}{y} \right)^2 + 2 \left(\frac{w}{z} \right)^2 + \left(\frac{v}{x} + \frac{u}{y} \right)^2 + \left(\frac{w}{y} + \frac{v}{z} \right)^2 + \left(\frac{u}{z} + \frac{w}{x} \right)^2 \right],$$

g 为重力加速度; Pr_t 为紊流普朗特数, 取 $Pr_t = 0.614$; 模型中的常数 $C = 0.085$, $k = 0.7179$, $\epsilon = 0.7179$, $C_1 = 1.42 - (1 - \nu / \nu_0) / (1 + \nu^3)$, 其中 $\nu = sk / \epsilon$, $s = \sqrt{P_k / \nu}$, $\nu_0 = 4.38$,

$= 0.015, C_2 = 1.68$, 模型中的 D 为温度扩散系数, 采用经验公式计算: $(T) = (-0.773 + 0.19T - 0.0027T^2 + 0.000021T^3) \times 10^{-4}$, 这里, T 以 $^{\circ}\text{C}$ 计

3 计算方法及边界条件

3.1 计算方法

方程(1)~(7)均为非线性偏微分方程, 可写成如下统一形式:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = 2A \frac{\partial}{\partial x} + 2B \frac{\partial}{\partial y} + 2C \frac{\partial}{\partial z} + G \quad (8)$$

针对方程(8), 采用三维定常流的混合有限分析7点格式进行离散求解^[16]

$$P = C_W W + C_E E + C_S S + C_N N + C_B B + C_F F + C_P P, \quad (9)$$

式中 $C_W, C_E, C_S, C_N, C_B, C_F, C_P$ 均为混合有限分析系数, G_P 为源项

为了解决动量方程中压力梯度项的离散求解困难, 采用基于交错网格体系上的 SIMPLE 算法, 并用 TDMA 方法对代数方程进行求解 计算区域在主流方向总长为 $250D$, 横断面尺寸如图1所示, 喷口位于距离上游进口 $16.5D$ 计算网格采用非均匀网格, 喷口及其上方 $2D$ 、下游 $10D$ 范围内和近壁面区网格较密, 其余范围网格较为稀疏, 网格数为 $81 \times 49 \times 81$ 详细步骤和过程参见文献[16] 计算残差依次为: 连续方程为 1×10^{-3} , 动量方程为 1×10^{-4} , 能量方程为 1×10^{-6} , k 方程和 ϵ 方程为 1×10^{-5}

3.2 边界条件

计算区域如图1所示, 边界条件按以下方式确定:

1) 上游进口边界条件的确定: 首先计算得出以均匀流为上游进口边界条件下的结果(在无射流排放情况下), 然后选择靠近出口处一个断面的主流速分布作为本文的上游环境流体进口主流速分布 为了验证其可行性, 对上游进口断面上4个典型位置(即沿断面宽度方向5等分位置处, 位置编号从主槽向边滩依次为1、2、3、4)进行了实验测量 图2给出了相应上游进口断面上4个典型位置的主流速沿水深的分布图, 从图中可以看出计算数据与实验数据吻合较好 其余条件如:

$$\frac{u}{y} = \frac{w}{y} = \frac{k}{y} = \frac{\epsilon}{y} = \frac{T}{y} = 0$$

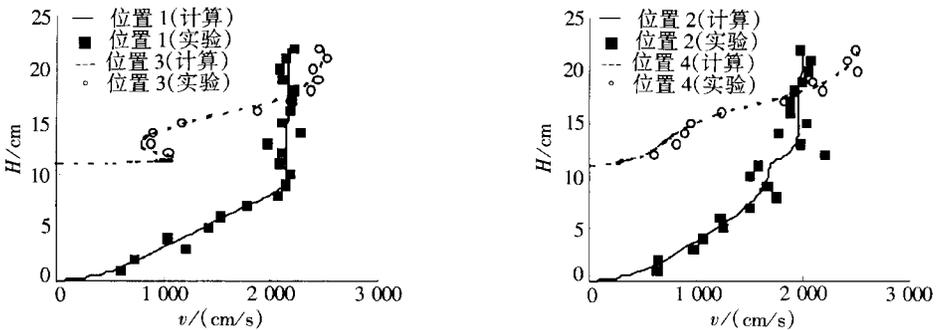


图2 进口断面典型位置主流速沿水深分布图

2) 下游出口边界条件:

$$\frac{u}{y} = \frac{v}{y} = \frac{w}{y} = \frac{k}{y} = \frac{\epsilon}{y} = \frac{T}{y} = 0$$

3) 壁面边界条件: 壁面法向速度为0, 切向速度以及 k 、 E 采用标准壁函数^[15] 求解, $5T/5x_j = 0$

4) 水面条件:

$$w = 0, \frac{5u}{5z} = \frac{5v}{5z} = \frac{5k}{5z} = \frac{5E}{5z} = \frac{5T}{5z} = 0$$

5) 喷口边界条件:

$$u = u_j, v = w = 0, T = T_j, k = 0.06u_j^2, E = 0.06u_j^3/D$$

4 数值结果与实验结果的对比分析

为了与上述试验工况的试验成果对比, 本文对各工况分别进行了计算。首先给出计算的三维流动全貌图, 以从整体上对其特征有所认识, 再从主流速等值线、二次流和温度等值线 3 个方面来进行深入分析。

4.1 三维流动图

图3为计算得出的工况5 ($R = 15$) 时的射流三维流动全貌, 图中绘出了喷口附近的射流流线, 以及喷口中心及下游3个横断面的温度等值线图, 下游3个横断面分别位于距离喷口 $50D$ 、 $100D$ 和 $150D$ 处。从图中可以看出, 射流出流以后, 在环境来流和边滩阻碍作用下向下游弯曲。在此过程中, 由于浮力和二次流的作用, 使得射流轨迹被分成两股: 一股因主槽底部附壁作用强于浮力作用而向下弯曲, 流动过程中又在浮力作用和主槽边滩间的岸壁的附壁作用下靠近岸壁向水面发展; 另一股在浮力作用向水面弯曲, 流动过程中又受到主槽边滩间的二次流作用向主槽岸边发展。而从4个横断面的温度等值线分布可以看出温度场随射流发展而变化的过程。图3清楚地表明水平热排放和环境来流、浮力、复式断面二次流作用下流动呈现出的复杂流态, 对射流分叉现象、边滩二次流对热扩散的作用及附壁效应(Conada 效应) 均有所体现。下面分别从断面流速分布、二次流以及温度等值线 3 个方面来进行研究。

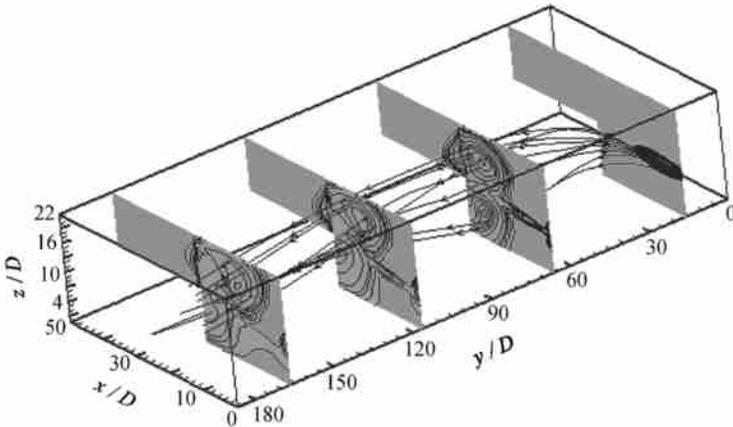


图3 复式断面明渠流中水平浮力射流三维流动图

4.2 主流速等值线

图4(a)所示为工况4喷口下游 $45D$ 处横断面的流线分布图。在主槽、边滩之间, 等值线远离边滩朝主槽方向凸起呈现出二次流的特征, 最大主流速发生在主槽和边滩之间。由图4(b)所示的计算结果可见, 采用基于浮力效应的 $RNGk-E$ 双方程模型计算能够模拟二次流现象, 而且可以看出主流速等值线分布, 最大的那条(值为14)在距离主槽底部约 $6D$ 处是封闭

的, 而另一条凸起到近 $11D$ 水深处1 两者对比来看, 该模型能较好地模拟复式断面明渠流, 而且计算结果与试验数据吻合较好, 但计算结果所示的凸起处的角度比试验测量的要缓1

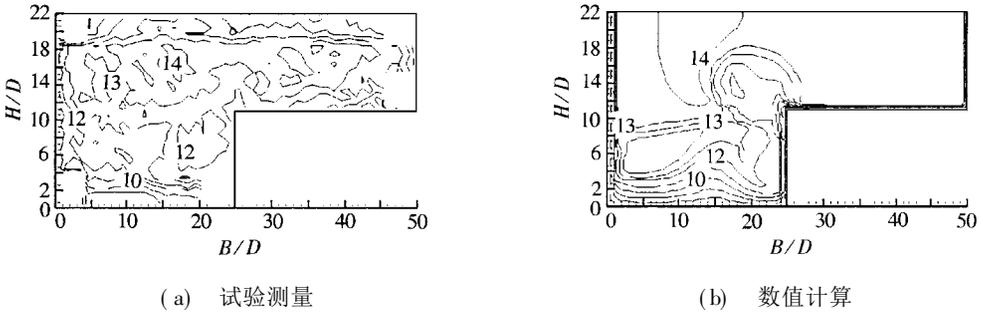


图4 流线分布图

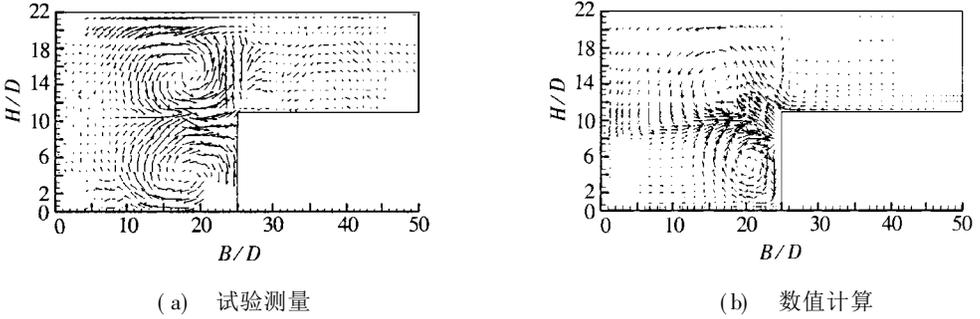
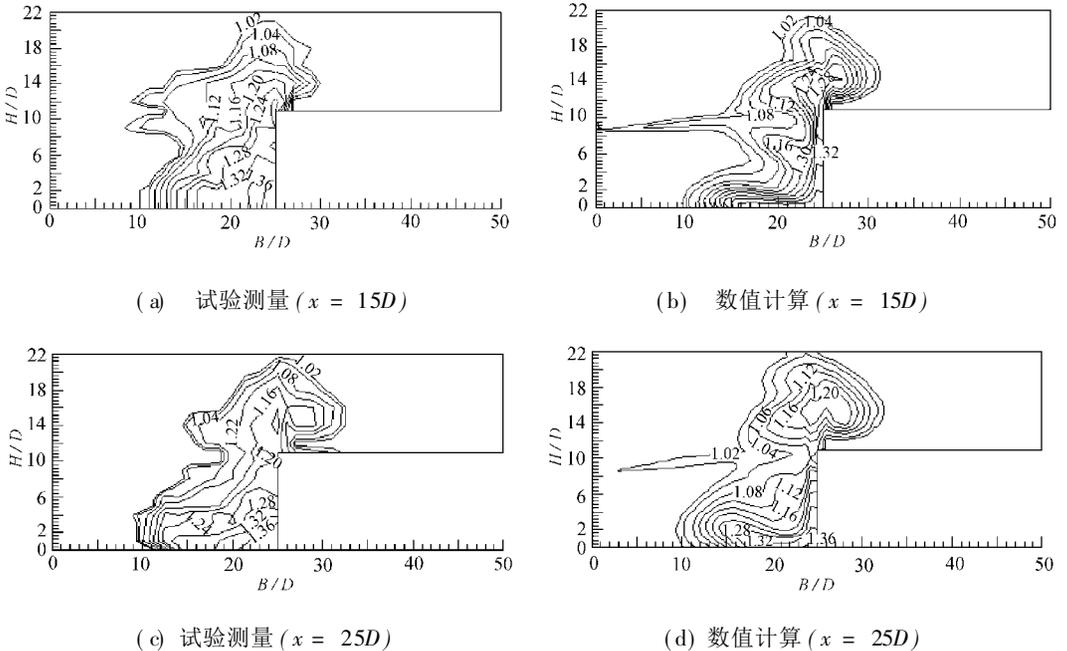


图5 试验测量和数值计算得到的二次流

4.3 二次流

图5所示为工况4喷口下游 $45D$ 处横断面的试验测量和数值计算得到的二次流, 从图中可以看出, 在主槽靠近边滩处有两个漩涡, 在边滩靠近主槽处有一个漩涡, 这是复式断面明渠流水平热浮力射流近区一个重要的特征1 表明本文提出的数学模型很好地模拟了复式断面



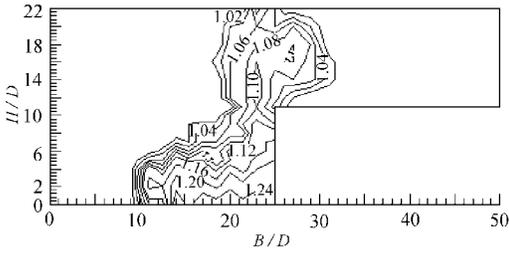
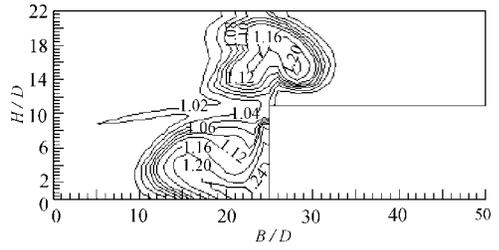

 (e) 试验测量 ($x = 35D$)

 (f) 数值计算 ($x = 35D$)

图6 断面温度等值线

明渠流中水平浮力射流近区主槽、边滩处因二次流影响产生的漩涡结构,二次流的尺度大小与试验数据也比较接近,槽滩交界处两个漩涡的倾斜角度也与试验值相接近¹

4.4 温度等值线

为了对射流掺混区的温度分布进行对比分析,图6分别给出了工况5 ($R = 15$) 喷口下游 $15D$ 、 $25D$ 、 $35D$ 处横断面上的温度等值线图¹。从试验测量数据看出,因流速比较大,射流冲到边滩岸壁,继而受到边滩岸壁的阻碍,从而断面上出现上下两股高温区,且中间瘦小两头大¹。由于河床底部与射流间不能提供充足的环境流体而使下股高温区贴底(也即 Conada 效应),然而到了下游由于浮力效应逐渐加强,下股高温区逐渐上升;而上股高温区则向边滩发展,受到二次流的阻碍作用、以及浮力作用和温度扩散作用,离喷口较远处的上股高温区呈现出蘑菇云形¹。从数值计算数据与试验测量数据对比看,本文模型能较好地对多因素作用下的温度场进行模拟¹。而且,从计算结果可见,在喷口水深的位置出现了尾翼,尾翼往下游发展逐渐变短¹。

5 结 论

本文建立了用于模拟复式断面明渠中水平圆孔热水射流的数学模型,并结合混合有限分析法对该类流动进行了数值计算,与试验资料的对比表明,从主流速流线分布、二次流、温度等值线分布3个方面验证了数值计算的可靠性,同时揭示出了复式断面明渠流中水平圆孔浮力射流近区的流动特性,即射流在来流、浮力效应、复式断面二次流3种因素作用下,所表现出来的射流分叉现象、附壁效应(Conada 效应)等¹。

[参 考 文 献]

- [1] Shiono K, Knight D. Turbulent open channel flows with variable depth across the channel[J]. J Fluid Mech, 1991, 222(1): 617-647.
- [2] Tominaga A, Nezu I. Turbulent structure in compound open channel flows[J]. J Hydr Engrg, 1991, 117(1): 21-41.
- [3] Naot D, Nezu I, Vakagawa H. Hydrodynamic behaviour of compound rectangular open channels[J]. J Hydr Engrg, 1993, 119(3): 390-408.
- [4] 余常昭. 环境流体力学导论[M]. 北京:清华大学出版社, 1992.
- [5] 张燕, 王道增, 樊靖郁. 流动环境中高浓度射流扩散实验研究[J]. 应用数学和力学, 2002, 23(12): 1276-1282.
- [6] 槐文信. 浅水型同流污水排放近区稀释特性[J]. 水动力学研究与进展, 1998, 13(1): 79-86.
- [7] Johnston A J, Nguyen N, Volker R E. Round buoyant jet entering shallow water in motion[J]. Journal of Hydraulic Research, 1993, 31(1): 121-138.

- [8] Johnston A J, Nguyen N, Volker R E. Round buoyant jet entering shallow water: bed shear velocity [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1994, 32(2): 233-250.
- [9] Ramsey J W, Goldstein R J. Interaction of a heated jet with a deflecting steam[J]. *J Heat Transfer Trans ASME*, 1971, 93(4): 365-372.
- [10] Kamotani Y, Greber I. Experiments on a turbulent jet in a cross flow[J]. *AIAA J*, 1972, 10(11): 1425-1429.
- [11] 曾玉红, 槐文信. 横流中三维圆形垂直浮力射流特性数值分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2005, 13(2): 120-128.
- [12] 槐文信, 李炜, 彭文启. 横流中单圆孔紊动射流计算与特性分析[J]. *水利学报*, 1998, 29(4): 7-14.
- [13] 槐文信, 梁爱国. 浅水横流中底部水平热水射流近区的初始稀释)) (Ñ) 数学模型及其验证[J]. *四川大学学报*, 2005, 37(3): 1-4.
- [14] 梁爱国, 槐文信. 浅水横流中底部水平热水射流近区的初始稀释)) (ò) 特性分析[J]. *四川大学学报*, 2005, 37(4): 20-24.
- [15] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- [16] 槐文信, 赵明登, 童汉毅. 河道及近海水流数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

S t u d y o n t h e B e h a v i o r o f N e a r- F i e l d D i l u t i o n o f
T h e r m a l B u o y a n t J e t D i s c h a r g e d H o r i z o n t a l l y
i n C o m p o u n d O p e n- C h a n n e l

H U A I W e n- x i n, X I A O Q i n g- h u a, Z E N G Y u- h o n g,

Y A N G Z h o n g- h u a, Q I A N Z h o n g- d o n g

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science,
Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China)

Abstract: The RNG k - ϵ model with consideration of the buoyancy effect, which was solved by using the hybrid finite analytic method, was used to simulate the mixture of the horizontal round thermal buoyant jet in compound open channel flow. The mixing features near the spout and flowing characteristic of the secondary currents were studied by numerical simulation. Meanwhile, 1) the distribution of the measured isovels for stream-wise velocity, 2) secondary currents, 3) the distribution of the measured isovels for temperature of typical cross-section near the spout, were obtained by using the three-dimensional Micro ADV and the temperature measuring device. Compared with experimental data, the RNG k - ϵ model based on buoyancy effect can preferably simulate the jet which performs the bifurcation phenomenon, jet reattachment (Conada effect) and beach secondary currents phenomenon with the effect of ambient flow, buoyancy, and secondary currents of compound section and so on.

Key words: turbulence model; compound channel; buoyant jets; hybrid finite analytic method; secondary currents