

同流环境污水排放数值特性分析

魏小华 槐文信 曾玉红

(武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室 湖北 武汉 430072)

摘要 在 $k-\epsilon$ 双方程紊流模型基础上 , 结合混合有限分析交错网格法 , 对流动环境中的同轴纯射流进行了计算 , 将计算结果与前人的试验资料进行对比 , 两者吻合较好 , 表明建立的湍流数学模型及计算方法是有效的。在此基础上 , 对流速比较小工况时的情形进行预报 , 并给出同轴纯射流的浓度沿程分布图。

关键词 同流污水 ; 三维 纯射流 ; 数值模拟

中图分类号 : X12 文献标识码 : A 文章编号 : 1004-693X(2006)04-0068-03

Numerical analysis of sewage discharge in coflow

WEI Xiao-hua , HUAI Wen-xin , ZENG Yu-hong

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

Abstract The $k-\epsilon$ model was used to establish a mathematical model of non-buoyant jet in coflow by using the hybrid finite analytic method(FAM). The comparison result between the simulation and former experimental data is satisfactory , which indicates that the turbulence mathematical model and the numerical method are effective. The prediction results under condition of low velocity and the concentration trajectories of non-buoyant jet were given subsequently.

Key words coflow sewage ; three-dimensional model ; non-buoyant jet flow ; numerical simulation

同流污水排放是环境工程中经常选用的排污方案之一。近几年来 , 在环境水力学领域中对静止环境中的浮力射流研究得较多 , 且比较成熟 , 但对流动环境中水平排放的三维同轴射流尚未引起足够的重视 , 国内外的研究成果也较少。就目前公开发表的文献来看 , 主要有 McGuir^[1]、Ashok 等^[2]、余常昭^[3]、郑邦民^[4]、槐文信^[5-6]、Young 等^[7]做的工作。对于同轴纯射流 , 主要是 Landis 等^[8]、Eric 等^[9]做的工作。本文试图建立 $k-\epsilon$ 双方程紊流模型 , 得出同流水平纯射流的有关特性。

1 数学模型的建立

1.1 数学模型

图 1 所示的流动区域 , 喷口直径为 D , 水深为 H , 环境浓度为 C_a , 把污染物视为示踪质 , 不影响整个流场。环境流速为 u_a , 射流出口流速为 u_j , 浓度为 C_j 。定义流速比 $R = u_a/u_j$ 。 x, y, z 坐标均从喷

口处算起。

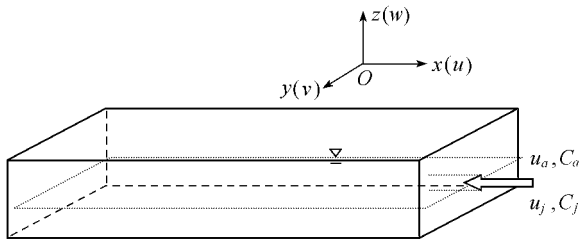


图 1 同流水平非浮力射流示意图

作 Boussinesq 假设 , 即在密度变化不是很大的变密度流动中 , 密度的变化并不显著改变流体的性质 , 粘滞性等保持不变 , 密度的变化对惯性力项、压力差项和黏性力项的影响可忽略不计。以喷口流速 u_j , 喷口直径 D , 环境浓度 C_a 为特征量 , 可得到图 1 所示直角坐标系下三维非定常紊流的无量纲化控制方程。

连续性方程 :

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

运动方程：

$$R_{et} \frac{\partial u}{\partial t} + R_{et} \left(u - 2 \frac{\partial v_t}{\partial x} \right) \frac{\partial u}{\partial x} + R_{et} \left(v - \frac{\partial v_t}{\partial y} \right) \frac{\partial u}{\partial y} + R_{et} \left(w - \frac{\partial v_t}{\partial z} \right) \frac{\partial u}{\partial z} = R_{et} \left(- \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{\partial v_t}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v_t}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$R_{et} \frac{\partial v}{\partial t} + R_{et} \left(u - \frac{\partial v_t}{\partial x} \right) \frac{\partial v}{\partial x} + R_{et} \left(v - 2 \frac{\partial v_t}{\partial y} \right) \frac{\partial v}{\partial y} + R_{et} \left(w - \frac{\partial v_t}{\partial z} \right) \frac{\partial v}{\partial z} = R_{et} \left(- \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial y} + \frac{\partial v_t}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v_t}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$R_{et} \frac{\partial w}{\partial t} + R_{et} \left(u - \frac{\partial v_t}{\partial x} \right) \frac{\partial w}{\partial x} + R_{et} \left(v - \frac{\partial v_t}{\partial y} \right) \frac{\partial w}{\partial y} + R_{et} \left(w - 2 \frac{\partial v_t}{\partial z} \right) \frac{\partial w}{\partial z} = R_{et} \left(- \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial z} + \frac{\partial v_t}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v_t}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

浓度方程：

$$R_{ec} \frac{\partial C}{\partial t} + R_{ec} \left(u - \frac{1}{S_{ct}} \frac{\partial v_t}{\partial x} \right) \frac{\partial C}{\partial x} + R_{ec} \left(v - \frac{1}{S_{ct}} \frac{\partial v_t}{\partial y} \right) \frac{\partial C}{\partial y} + R_{ec} \left(w - \frac{1}{S_{ct}} \frac{\partial v_t}{\partial z} \right) \frac{\partial C}{\partial z} = \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

湍动能 k 方程：

$$R_{ek} \frac{\partial k}{\partial t} + R_{ek} \left(u - \frac{1}{\sigma_k} \frac{\partial v_t}{\partial x} \right) \frac{\partial k}{\partial x} + R_{ek} \left(v - \frac{1}{\sigma_k} \frac{\partial v_t}{\partial y} \right) \frac{\partial k}{\partial y} + R_{ek} \left(w - \frac{1}{\sigma_k} \frac{\partial v_t}{\partial z} \right) \frac{\partial k}{\partial z} = \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + R_{ek} (P_k - \epsilon) \quad (6)$$

湍动能耗散率 ϵ 方程：

$$R_{e\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + R_{e\epsilon} \left(u - \frac{1}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial v_t}{\partial x} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + R_{e\epsilon} \left(v - \frac{1}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial v_t}{\partial y} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + R_{e\epsilon} \left(w - \frac{1}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial v_t}{\partial z} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = \left(\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial z^2} \right) + R_{e\epsilon} \left(C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \right) \quad (7)$$

其中：

$$P_k = \nu_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right], \nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, Re = \frac{u_j D}{\nu}, R_{et} = \frac{Re}{1 + Re\nu_t}, R_{ec} = \frac{1}{1 + (ReS_c)_+ + \nu_t/S_{ct}}, R_{ek} = \frac{Re}{1 + Re\nu_t/\sigma_k}, R_{e\epsilon} = \frac{Re}{1 + Re\nu_t/\sigma_\epsilon}$$

式中： S_c 为施密特数； S_{ct} 为湍流施密特数； p 为液体压强。模型中的常数： $C_\mu = 0.09$ ， $\sigma_\epsilon = 1.3$ ， $C_{\epsilon 1} = 1.44$ ， $C_{\epsilon 2} = 1.92$ ， $\sigma_k = 1.0$ ， $S_{ct} = 0.614$ 。

1.2 边界条件

喷口边界条件：

$$u = u_j, v = 0, w = 0, C = C_j, k = 0.06 u_j^2, \epsilon = 0.06 \frac{u_j^3}{D}$$

壁面边界条件：

槽底壁面 $v = 0$ ，槽侧壁面 $w = 0$ ； u, k, ϵ 采用标

准壁函数^[10]求解 $\frac{\partial C}{\partial x_j} = 0$ ；

上游来流边界条件：

$$u = u_a, \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial x} = 0$$

下游出口边界条件：

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial x} = 0$$

2 计算方法及求解

2.1 计算工况

在 Landis F 的试验资料中，所选的工况为 $R = 0.25, 0.46, 0.5$ 。本文选取 $R = 0.25$ 的工况进行计算与之比较，并对流速比较小时的工况 $R = 0.15, 0.125$ 进行预报。根据以往的试验经验，选取的计算工况如表 1 所示。

表 1 计算工况

工况	$R = \frac{u_a}{u_j}$	D/cm	H/D	L/D	W/D	$C_a/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$C_j/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
1	0.250	1.0	29	160	121	1.0	2.0
2	0.150	1.0	29	160	121	1.0	2.0
3	0.125	1.0	29	160	121	1.0	2.0

2.2 计算网格

混合有限分析法^[11]是一种有效的求解湍流的离散格式，已广泛应用于求解复杂的流动问题。在整个计算区域中，取 H 为 29 cm， L 为 121 cm， W 为 160 cm，网格数采用 $67 \times 45 \times 92$ ，求解过程应用交错网格下的 SIMPLER 算法。

3 流场的时均特性

3.1 流动的基本形状

图 2 为计算得出的 $R = 0.25$ 工况下射流的三维流动全貌，给出了喷口中心断面上的射流流线，以及喷口中心和喷口下游 $x = 40D, 80D, 120D$ 处 4 个横断面的浓度等值线图。可以看出，纯射流的流线始终沿水平方向向下游流动，而没有上下浮动的现象。在同轴射流条件下，射流向下游扩散，扩散程度主要受流速比的影响。在射流出口附近存在射流流核。Pratte 等^[12]对不同流速比时流动环境中射流流核长度进行了研究，发现流动环境中射流流核长度主要

取决于流速比。流速比越小,射流的作用越强烈,射流流核长度越小。随着流速比的增大,射流的作用逐渐减弱,射流流核的长度也会有相应的增加。

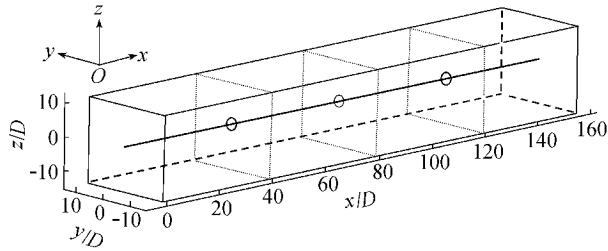


图2 同流非浮力射流三维流动全貌

3.2 资料对比

图3给出不同工况下($R = 0.25, 0.15, 0.125$)的 $x/r_0 \sim \Delta u_m/\Delta u_0$ 关系曲线。其中, r_0 为射流喷口半径, $\Delta u_m = u_m - u_a$, u_m 为射流中心线流速, $\Delta u_0 = u_j - u_a$ 。结果显示,计算值与试验资料值吻合较好。图3中最前段的一段计算点连线为直线,表明在射流流核段,射流中心线流速等于喷口流速。流速比 R 的值越小,该段长度越小,表明流核越短。这与 Pratte 等的结论是一致的^[12]。随着射流向下游的扩散,中心线流速很快衰减。在射流前段,射流比越小,流速衰减越快;在射流后段,流速衰减相对较缓,不同流速比情况下差别不大。

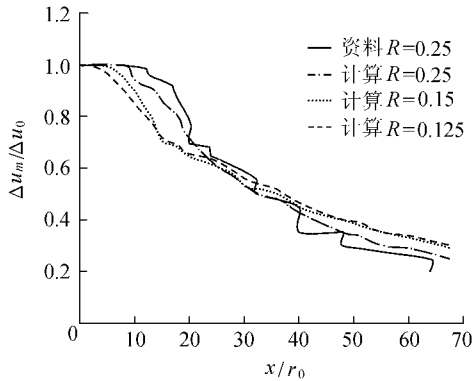


图3 同流非浮力射流中心线上的流速衰减曲线

3.3 浓度扩散的基本形状

图4给出 $R = 0.25, 0.15, 0.125$ 时距射流出口 $x = 10D, 20D$ 处下游横断面上的浓度等值线。在各个断面上的浓度等值线大致呈圆形,造成这些圆形不是十分规则的原因可能是由于在有限深度的流动环境中还有固壁的影响。在相同 x 位置处,流速比越小,浓度值越大,即射流喷口流速相对环境流速越大,相同位置的断面浓度越集中。

选取工况 $R = 0.15$,分析中心平面 xoy 和 xoz 的浓度等值线,见图5。整个流场的浓度基本沿中心轴水平趋势扩散,没有向上或向下的浮动现象,这也是纯射流的非浮力特性之一。图中显示的是 $x/D = 48 \sim 68$ 的一段。通过比较可见,在相同 x/D 处,

平面 xoy 和 xoz 的浓度等值线形状和数值基本相同,说明从小孔中射出的同轴射流呈一束圆水柱形状。该水柱各断面的半径与流速比有关,流速比越小,该半径越小;流速比越大,该半径越大。

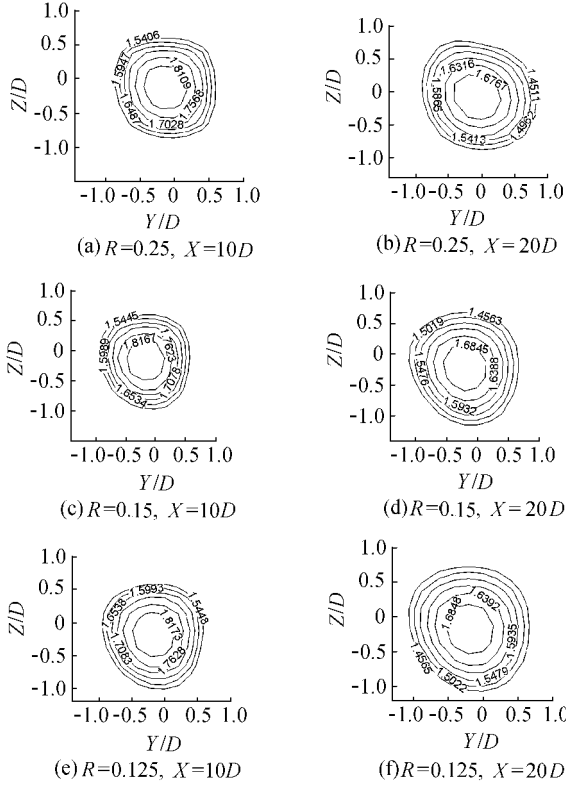


图4 平面 yoz 上的浓度等值线

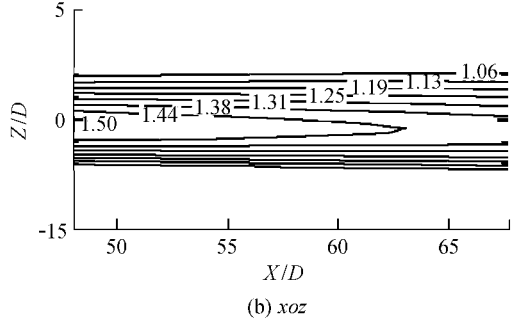
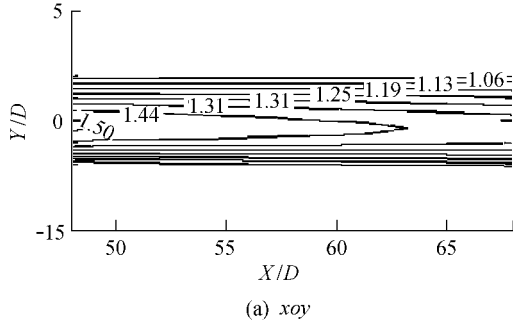


图5 中心平面 xoy 和 xoz 的浓度等值线

4 结 论

本文采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,运用交错网格下的混合有限分析法,对流动环境中的同轴纯射流进行了数值分析,得到以下几个结论(下转第87页)

施的主要原因是由于设计规范的内容严重滞后于城市发展的速度和规模。因此,有关方面应对此问题展开全面论证,在有关规范中修正化粪池设置的相关规定,明确有集中式污水处理厂的城市/城镇可以考虑完全取消化粪池。

取消化粪池后,建议建筑物室内的污、粪水管采用合流制,室内少敷设一根立管,便于住宅室内空间的使用;室外的管线也应相应减少,使施工更为简单。

对于已经设置化粪池的老城区,化粪池可以废弃,填埋后用作绿化用地,或清理、改造用作中水或雨水利用的贮水池。

参考文献：

[1] 侯剑秋.集中治理是解决水污染的有效途径[J].生态科学 2001 20(1/2):155-158.
[2] 国家城市给水排水工程技术研究中心.中国城市污水处理现状及规划[J].中国环保产业 2003(1) 32-34.

[3] 中国环境保护产业协会水污染治理委员会.我国水污染治理行业发展状况[J].中国环保产业 2003(1) 42-43.
[4] 核工业第二研究设计院.给水排水设计手册(二) [M].北京:中国建筑工业出版社 2001 684.
[5] 广东省建设厅.建筑工程[M].广州:广东省建设科技出版社 2003.
[6] 李艳,赖颢宁.广州不再新建化粪池,污水处理厂担此重任[EB/OL].[2004-2-17].http ://www.hwcc.com.cn.
[7] 闻士英.住宅小区取消化粪池之我见[J].住宅科技,1994 (11) 38-40.
[8] 张自杰.排水工程(下册) [M].北京:中国建筑工业出版社 2000 45.
[9] HAO X D. Model-based optimization of sustainable biological nutrient removal processes[M]. Delft :TU Delft 2001.
[10] 华光辉,张波.城市污水生物除磷脱氮工艺中的矛盾关系及对策[J].给排水 2000 26(12):1-5.
[11] 刘维城.中国城市排水行业的发展状况与目标[EB/OL].[2004-1-2].http ://www.h2o-china.com.
(收稿日期 2005-01-14 编辑:傅伟群)

(上接第 70 页)

- a. 结合典型的试验资料,计算结果与试验资料值的良好符合,表明本文提及的数学模型和相应的数值方法可用于同流三维模拟,同时,得出流速比较小时的工况情形。
- b. 得到了纯射流的流线特性,即始终是沿水平方向向下游流动,而没有上下浮动的现象。在同轴射流条件下,射流向下游扩散,扩散程度主要受流速比的影响。
- c. 得到了同轴射流的浓度场分布特性,即在垂直于射流方向的断面上,浓度等值线呈圆形,这与横流中的射流浓度等值线呈马蹄形是不同的。

参考文献：

[1] MCGUIRK J J. Prediction of turbulent buoyant jets in a co-flowing stream[D]. London :Uni of London ,1975.
[2] ASHOK K , RODI W. Prediction of heat and mass transfer in open channels[J]. J of the Hydr Div , ASCE ,1978 ,104(3): 397-420.
[3] 余常昭.紊动射流[M].北京:高等教育出版社,1993 39-96.

[4] 郑邦民.三维紊动对流扩散的数值分析[C]//中国力学学会.第 17 届国际理论与应用力学大会:中国学者论文集.北京:北京大学出版社,1991 :18-29.
[5] 槐文信.同流热污水排放的三维数学模型及计算方法[J].武汉水利电力大学学报,1997 30(4):1-5.
[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] YOUNG D K ,WON S ,SEE W K ,et al. Jet integral-particle tracking hybrid model for single buoyant jets[J]. J of Hydr Eng ,ASCE 2003(8):753-760.
[8] Landis F ,Shapiro A H. The turbulent mixing of co-axial gas jets [C]//4th Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute. Preprints of papers. Calif Stanford Univ Press ,1951 :19-25.
[9] ERIC H. Buoyant jets with three-dimensional trajectories[J]. J of the Hydr Div ,ASCE ,1972 98(11):1999-2014.
[10] 陶文铨.数值传热学[M].2 版.西安:西安交通大学出版社 2001 353-356.
[11] 李炜.黏性流体的混合有限分析解法[M].北京:科学出版社 2000 :147-154.
[12] PRATTE B D ,BAINES W D. Profiles of the round turbulent jet in a cross flow[J]. J of the Hydr Div ,ASCE ,1967 93(6):53-64.
(收稿日期 2005-01-06 编辑:徐娟)