

氧化沟流场的计算流体力学数值模型研究

蒋成义¹, 黄卫东², 王淦³, 王颖哲³, 谢荣焕³

(1.安徽职业技术学院,安徽 合肥 230011; 2.中国科技大学地空学院,安徽 合肥 230037;
3.安徽国祯环保节能科技股份有限公司,安徽 合肥 230088)

摘要:该研究发展了氧化沟计算流体力学模型。采用三维标准 $k-\varepsilon$ 湍流计算流体力学模型对全尺度氧化沟进行了数值模拟和试验验证,并用动量源项方法描述倒伞曝气机对氧化沟中流体的驱动作用,试验结果和模拟计算间良好的一致性证明了模型的合理性。模拟和试验均发现大量低速区域的存在,尤其是表面曝气机下部靠近沟底的区域,有必要改善氧化沟的水力学性能。同时,对网格独立性进行了验证,比较了不同湍流模型的计算结果。

关键词:氧化沟; 流场; 计算流体力学; 动量源项; 倒伞曝气机

中图分类号:X703 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2010.08.031 文章编号:1003-6504(2010)08-0135-06

Numerical Computation of Flow Fields in An Oxidation Ditch by Computational Fluid Dynamics Model

JIANG Cheng-yi¹, HUANG Wei-dong², WANG Gan³,
WANG Ying-zhe³, XIE Rong-huan³

(1.Department of Chemical Engineering, Anhui Vocational and Technical College, Hefei 230011, China;
2.School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230037, China;
3.Anhui Guozhen Environmental Protection Sci. & Tech. Co. Ltd, Hefei 230088, China)

Abstract: On the basis of the standard three dimensional (3D) $k-\varepsilon$ turbulence model of computational fluid dynamics(CFD), an algorithm was developed for investigating the full-scale flow regime of an oxidation ditch (OD). Momentum source terms were used to depict the action of impellers that were driving the Carrousel OD. The CFD model was validated with flow velocity data measured through the *in situ* experiment. A number of low velocity zones were found from the results of both the experiment and simulation, particularly near the ditch bottom underneath the impellers, which suggested the need for improving the OD's hydrodynamics. Meanwhile, the grid-independence was validated; and different turbulence models were compared, such as Realizable $k-\varepsilon$ and Reynolds Stress, in terms of the volume average velocity and average velocity at different cross sections.

Key words: oxidation ditch; flow fields; computational fluid dynamics; source terms; impeller

氧化沟工艺是一种改良的活性污泥处理方法,其曝气池呈封闭的沟渠形,沟道中的污水和活性污泥混合液依靠表面机械曝气装置驱动形成循环流动完成充氧、污水与活性污泥混合等功能^[1]。在废水处理中,氧化沟被用来去除活性污泥中的碳和氮。最初,氧化沟工艺在荷兰得到应用和发展。1954年,荷兰 Voorschoten 安装了第一个实际运行的氧化沟。刚开始,它们只是被应用在小型的废水处理装置中^[2]。随着曝气装置的发展,它们才被广泛的应用在大尺寸的废水处理装置中。现在,世界上许多国家都广泛采用氧化沟工艺进行废水处理,单在美国就安装了近万座市政氧化沟^[3]。

计算流体力学工具在求解流体流动上功能强大。

近十年来,计算流体力学被广泛应用来了解流动物理学,帮助改善反应器的设计和运行。随着计算流体力学软件的发展,它将变得越来越高效、方便^[4]。

氧化沟中的理想流态应该是均匀高速流动,防止污泥沉降。一般认为,为了获得其独特的混合和处理效果,混合液循环流动最低流速应为 0.15m/s,而为了避免活性污泥的沉降,沟道平均流速应大于 0.3m/s^[5]。实际上,实际沟道中的流场是非常复杂的,沟道中的水力学特征在氧化沟的设计和运行中扮演着十分重要的角色^[6-7]。

近年来,在发展氧化沟废水处理工艺的数学模型上已取得一些突破,用来模拟氧化沟中水力学特征的

收稿日期:2009-10-19;修回 2010-01-17

基金项目:安徽省高校优秀青年人才基金(2009SQRZ212);国家高技术研究发展计划(863 计划)项目资助(2004AA601065)

作者简介:蒋成义(1980-),男,讲师,硕士,主要从事环境工程水力学研究,(手机)13514960390(电子信箱)jiangchengyi@126.com。

数学模型相继出现。De Clercq 等应用一维模型和二维垂直平均 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟了氧化沟中简单的水力学特征^[6,9-9]。Littleton 和 Daigger 通过给定流体已知的动量源,应用三维流体力学模型模拟并研究了转碟曝气的试验水池和氧化沟^[10]。罗麟等使用三维 $k-\varepsilon$ 湍流模型和滑移网格方法模拟了一体化氧化沟中的转刷运动^[11]。Simon 等发展了基于质量和动量守恒的理论模型来模拟并预测叶轮驱动的流体平均流速^[12]。

在本研究中,将动量源项加入三维计算流体力学模型来模拟由倒伞驱动并曝气的全尺度卡罗塞尔氧化沟,并发展了一种基于倒伞和转刷转速和尺寸的动量源项的计算方法。另外,通过比较理论计算结果与试验结果验证了该数学模拟的合理性。

1 方法与试验

1.1 试验氧化沟

试验所研究的卡罗塞尔氧化沟坐落在内蒙古华章纸业公司。沟宽为 34m,侧墙和水深分别为 5m 和 4.5m,水流在沟道中沿中心线的水平流动距离约为 467.5m。废水处理容量为 25000m³/d。

在氧化沟两侧布置了三座倒伞,每座倒伞由 8 个长 1.613m 的盘片组成。倒伞的顶端超出水面 10cm,倒伞转速为 30r/min。试验时,布置了五个截面(见图 1(a)中的截面 A-E)。每个截面布置了三条测线,测线与内墙的距离分别为 0.5m,4.25m 和 8m。每条测线上又布置了三个测点,测点与表面的距离分别为 0.5m,

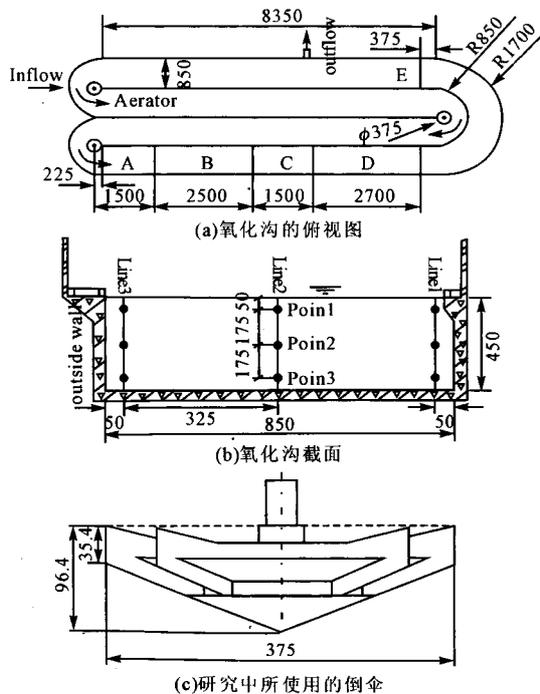


图1 试验氧化沟的轮廓及试验布点情况(cm)
Fig.1 Outline of the investigated oxidation ditch (cm)

2.25m 和 4m。用超声波流速仪(UVP, American Sigma 950 型流速仪)进行流速测量。测量时,先将超声波探针固定在金属竿上,保持探针方向与流动方向垂直,然后对探针的深度和方向进行调整,最后进行读数并取多次读数的算术平均数作为结果。当测量截面改变时,可以手动调节位置,但是要再次校正探针的方向。

1.2 控制方程

为了预测氧化沟中的流场情况,研究采用了单相流三维计算流体力学模型。求解了动量方程、连续性方程和 $k-\varepsilon$ 湍流方程^[13-14]。三维不可压缩流体运动的控制方程如下:

连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\rho \frac{D \mathbf{u}}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right\} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) + \rho g_i + S_i \quad (2)$$

式中 x_i 和 x_j 为笛卡儿坐标; u_i 和 u_j 分别为 x_i 和 x_j 方向的平均速度; u'_i 和 u'_j 为湍流速度; μ 为分子动力粘性系数; g_i 为 x_i 方向的重力加速度; p 为压力; ρ 为流体密度; S_i 为描述曝气机驱动力的动量源项。

在数值模拟中,用动量源项来表示倒伞对流体的作用(方程 3)。在描述船舶推进器推力效果时也用了相似的方程^[15]。在本研究中,假设倒伞区域的流体速度与倒伞叶片的速度一致,将动量源项表示为^[16]:

$$S_i = Q \cdot \frac{(u - u_0)}{V} = \frac{\rho \cdot S \cdot (u - u_0)}{V} \quad (3)$$

式中 S 为计算单元的截面积; Q 为单位时间通过单元的流量; V 为计算单元的体积; u 和 u_0 分别为倒伞(或转刷)盘片的速度和倒伞(或转刷)作用前流体的速度(u 用 $u=2\pi\omega r$ 计算, ω 为角速度, r 为网格中心到倒伞中心轴的距离)。本研究中, $\rho=1000\text{kg/m}^3$, $\omega=30\text{r/min}$ 。湍流能量 k 和湍流能量耗散率 ε 由半经验公式计算:

$$u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu + \frac{\mu}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G - \varepsilon \quad (4)$$

$$u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\nu + \frac{\mu}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中 σ_k 和 σ_ε 分别是关于 k 和 ε 的湍流 Prandtl 数; ν 为湍流粘度; G 是湍流能量生成项; $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 为常数($C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$)。使用基于有限体积法的商业计算流体力学软件工具 FLUENT 6 来求解以上的方程^[16]。

1.3 边界条件和数值方法

把氧化沟自由表面看作是刚性的盖子,采用滑移墙壁条件。侧墙、底墙和中间挡墙看作固体墙壁,并采用 Launder 和 Spalding 提议的标准壁面函数^[17]。

图 2 为计算网格。研究的氧化沟被离散为 181125 个非结构网格。其中,倒伞区域长度×深度×宽度方向被划分为 48×16×48 个网格单元,除倒伞区域外的其他区域在长度×深度×宽度方向被划分为 145×9×56 个网格单元。倒伞区域的网格宽度被加密到 0.09375m,其他区域的最大网格宽度为 0.75m。采用商业 CFD 网格生成软件 Gambit 进行网格划分。计算中,所有的参数保持其默认的值。压力项采用标准格式,其他项采用二阶上风离散格式。计算中使用 Fluent 的分离求解器。

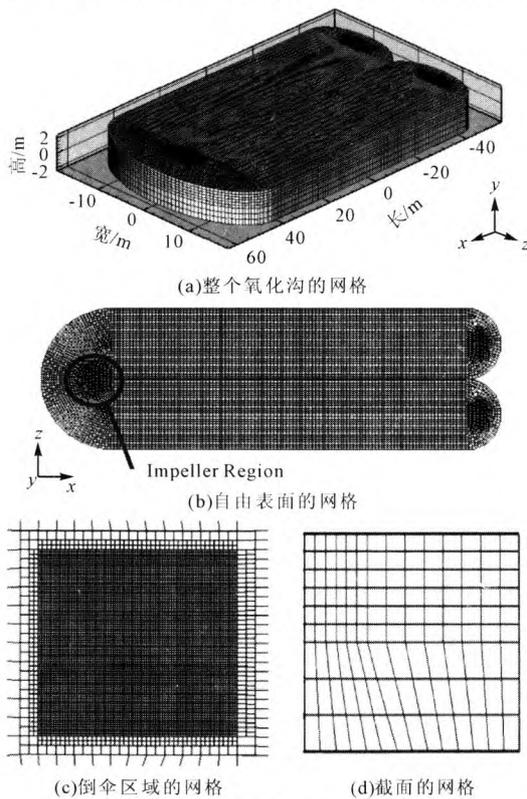


图2 氧化沟计算网格
Fig.2 Simplification of the computational mesh layout for the oxidation ditch

2 结果

2.1 网格独立性验证

为了验证解对于网格的独立性,倒伞区域网格被局部加密到 5 种不同尺寸,最大网格单元宽度分别为 0.75m,0.375m,0.1875m,0.09375m 和 0.046875m。

图3 为在不同网格宽度下计算得到的体平均速度大小。由图 3 可以看出,在粗网格条件下(最大网格宽度为 0.75m 和 0.375m) 计算得到的结果并不好;而当采用精细网格(最大网格宽度为 0.1875m,0.09375m 和 0.046875m)时,计算得到的体平均速度大致是相同的。由于数值计算的误差,随着网格变

得更加精细,体平均速度有微小的增大。当倒伞区域选用 0.09375m 网格宽度时,氧化沟的其他部分进一步从最大网格宽度 0.75m 加密到 0.375m,得到的体平均速度为 0.3098m/s。因此,有理由认为只要倒伞区域的网格足够精细,网格尺寸对计算结果的影响就可以忽略。

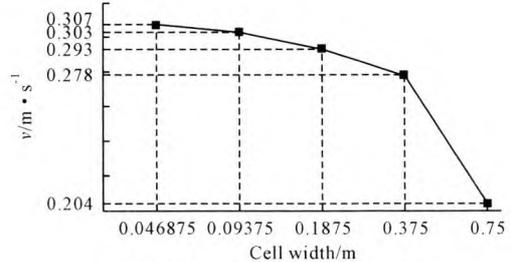


图3 不同网格宽度下的体平均速度
Fig.3 Comparison of volume-average velocity under five different cell widths

2.2 结果分析

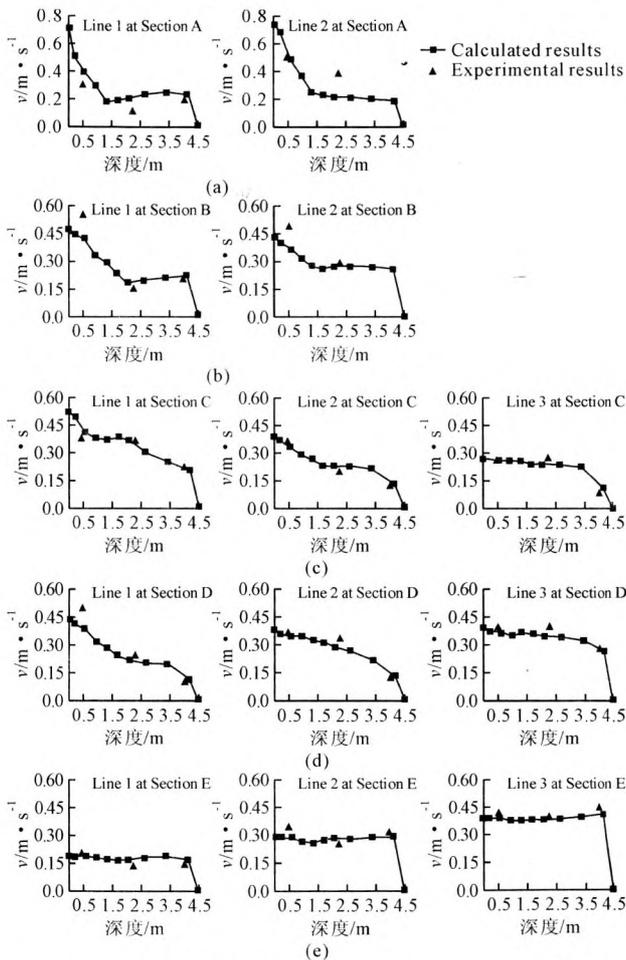
表 1 为截面 A-E 的速度测量结果。从表 1 中可以看到,在离开倒伞的下游区域中表面流速比底部流速高,随着流体通过沟道弯道部分,表面流速下降,底部流速增大。靠近沟道内墙的平均流速(0.258m/s)较靠近沟道外墙的平均速度(0.322m/s)要小,而且沟道中间的平均流速(0.329m/s)是最大的。

图 4 为流速在不同测点的计算值和试验值的比较。37 个测量点的流速计算值和试验测量值大体上一致,除了三个误差为 33.6%,39.6%和 24.7%的点,平均误差为 6.8%。那三个点位于倒伞附近,由于高湍流的影响,在那些区域中流动相当剧烈。图 5 给出了倒伞附近区域的 k 和 ε 轮廓。正是因为高湍流,在那些区域 CFD 模型预测和测量都很困难^[18]。在截面 C、D 和 E 上,测量的平均截面流速分别为 0.268m/s,0.296m/s 和 0.286m/s。图 6 对这三个截面上的平均流速的测量值和计算值进行了比较,误差分别为 2.2%,7.1%和 4.9%。因为每个截面上仅仅布了 9 个测点,所以测量值和计算值之间有 4.7%的平均误差。并且,不同截面平均流速的变化取决于测点少和测量、计算误差。一般来说,在 CFD 模拟应用当中,小于 10%的误差就认为很好的,小于 20%的误差认为是可以接受的^[19]。综合考虑上述因素,可以认为该研究所计算的结果与实测数据之间的吻合程度是可以接受和良好的,足以支持用动量源项进行的数值模拟的可靠性。

图 7 为氧化沟不同截面的流速轮廓线。可以看出,比较高的流速出现在倒伞附近的水表面,随着水流远离倒伞,流速慢慢减小。倒伞在水表面的运转导致倒伞附近区域形成了强烈的湍流。图 8 为流线图,更加清晰地展现了沟道内的流态。

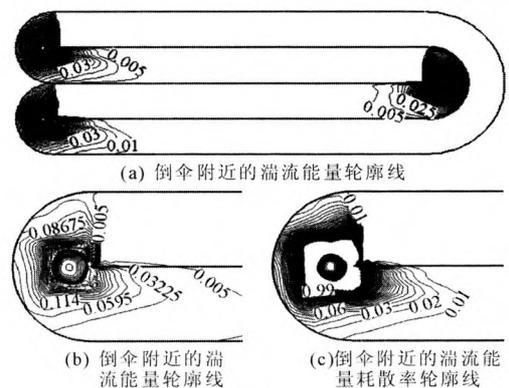
表 1 倒伞驱动的全尺度氧化沟速度测量结果
Table 1 Full-scale oxidation ditch velocity with three impellers

截面	深度(m)	水平速度大小(m/s)				
		测线 1	测线 2	测线 3	层平均	截面平均
A	0.50	0.299	0.547	-	0.423	
	2.25	0.113	0.417	-	0.265	-
	4.00	0.207	-	-	0.207	
B	0.50	0.552	0.481	-	0.517	
	2.25	0.149	0.284	-	0.217	-
	4.00	0.210	-	-	0.210	
C	0.50	0.559	0.353	0.261	0.391	
	2.25	0.360	0.192	0.267	0.273	0.268
	4.00	0.215	0.118	0.083	0.139	
D	0.50	0.484	0.350	0.386	0.407	
	2.25	0.236	0.324	0.391	0.317	0.296
	4.00	0.102	0.116	0.274	0.164	
E	0.50	0.189	0.334	0.408	0.310	
	2.25	0.126	0.246	0.388	0.253	0.286
	4.00	0.140	0.302	0.437	0.293	
测线平均	0.258	0.329	0.322			



(a), (b), (c), (d)和(e)分别显示不同测点流速在截面A-E的计算值和试验值
图4 流速在不同测点的计算值和试验值比较
Fig.4 Comparison of calculated and experimental velocity at different measurement points

综合图 7 和图 8 可以看到,倒伞叶片拖曳流体运动使得倒伞附近的表面形成了高速流动。当流动通过沟道弯道时,由于惯性离心力的作用^[9],速度大的流体被甩到沟道的外侧,并潜到沟道底部。这种流动趋



(a) 倒伞附近的湍流能量轮廓线

(b) 倒伞附近的湍流能量轮廓线

(c) 倒伞附近的湍流能量耗散率轮廓线

图5 倒伞附近的轮廓线

Fig.5 Contours of turbulent

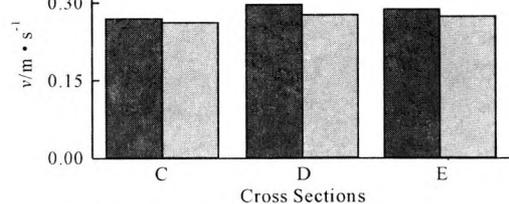


图6 不同截面上平均流速的计算值和试验值比较

Fig.6 Comparison of calculated and experimental average velocity at different cross sections

势同试验结果也是一致的。流场最值得注意的特征就是不均匀流动和弯道处形成了螺旋流动, Littleton 等也有相似的报道^[10-11]。

另外,不管是计算还是试验都发现了大量速度小于 0.3m/s 的区域,比如倒伞附近沟道的下部区域。众所周知,最初的氧化沟工艺要求沟道平均流速大于 0.3 m/s^[5],那些低流速区域就会形成活性污泥的堆积,最终影响处理效果。因此,对氧化沟的水力学性能进行改善是很有必要的。

2.3 不同湍流模型计算结果比较

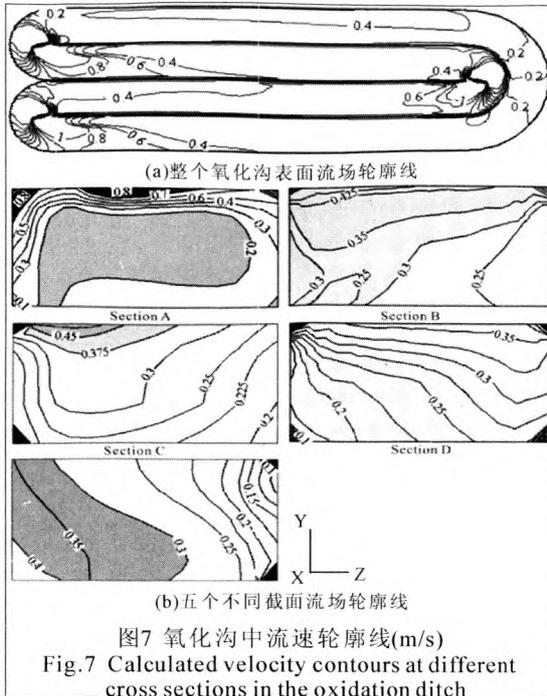


图7 氧化沟中流速轮廓线(m/s)
Fig.7 Calculated velocity contours at different cross sections in the oxidation ditch

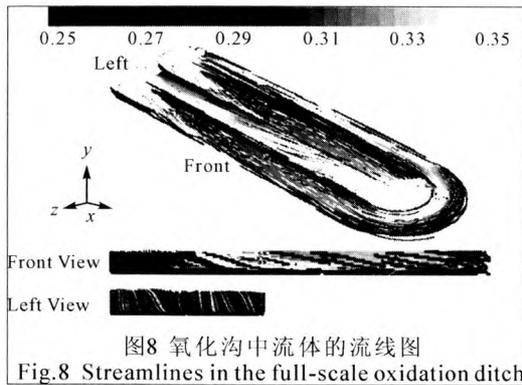


图8 氧化沟中流体的流线图
Fig.8 Streamlines in the full-scale oxidation ditch

图9 为使用不同湍流模型:标准 $k-\epsilon$ 模型、重整化群 $k-\epsilon$ 模型、可实现性的 $k-\epsilon$ 模型(Realizable $k-\epsilon$)、雷诺应力模型(Reynolds Stress)对氧化沟进行计算得到的体平均速度比较。图 10 为使用不同湍流模型对氧化沟进行计算得到的截面 C、D、E 平均速度比较。从图 9 和 10 可以看出针对本研究的氧化沟,使用标准 $k-\epsilon$ 模型更好。

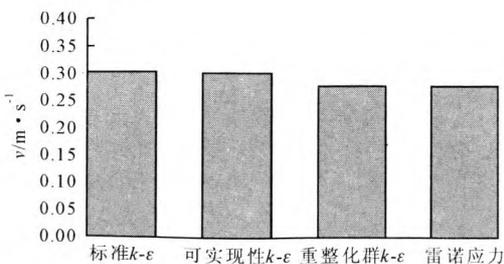


图9 体平均速度的不同模型计算结果
Fig.9 Comparison of volume-average velocity using different turbulence models

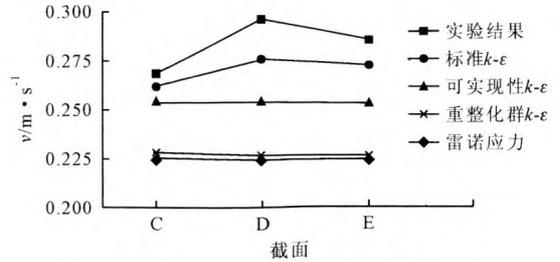


图10 截面平均速度的不同模型计算结果
Fig.10 Comparison of average velocity at different cross sections using different turbulence models

本文发展计算流体力学模型来研究氧化沟系统的水力学特征。

(1)模拟和试验结果的一致证明采用三维标准 $k-\epsilon$ 湍流模型来模拟研究卡罗塞尔氧化沟的水力学特征,并用动量源项来描述倒伞对液体的驱动是可行的。

(2)网格独立性得到了验证,即只要倒伞区域网格足够精细,网格尺寸对计算结果的影响就可忽略。

(3)通过各种湍流模型计算结果比较证明使用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型来模拟本研究中的氧化沟更好。

(4)表面曝气机驱动的氧化沟中的流动复杂且不均匀。模拟和试验均发现大量低流速区域,尤其是表面曝气机下部靠近沟底的区域,有必要改善氧化沟的水力学性能。

[参考文献]

[1] Eruce E, Rittmann, Rerry L Mccarty. 环境生物技术:原理与应用[M]. 文湘华,王建龙,译. 北京:清华大学出版社,2004. Bruce E, Rittmann, Perry L McCarty. Environmental Biotechnology: Principles and Applications[M]. Beijing Tsinghua University Press, 2004.(in Chinese)

[2] Eikelboom D H. Biological Characteristics of Oxidation Ditch Sludge[C]. In:Proceedings of the International Conference on Oxidation Ditch Technology, Amsterdam, CEP Consultants, Edindurgh, 1982:47-56.

[3] Water Environment Federation. Design of Municipal Wastewater Treatment Plants[R]. Alexandria, Virginia: Water Environment Federation, 1992.

[4] 屈强. 污水处理单元计算流体力学数值模拟研究及合流污水溢流高效处理装置开发[D]. 上海:同济大学,2005. Qu Qiang. Numerical Simulation on Flow-field Distribution in Sedimentation Tank of High-efficient Treatment Facility for Combined Sewer Overflow[D]. Shanghai:Tongji University, 2005.(in Chinese)

[5] De Clercq B, Coen F, Vanderhaegen B, et al. Calibrating simple models for mixing and flow propagation in waste water treatment plants[J]. Water Science and Technology, 1999, 39(4): 61-69.

[6] Dobbeck P. Orbal Channel Computational Fluid Dynamic Analysis[R]. US Filter/Envirex, Los Angeles, California, Inter-

3 结论

- nal Report, 1999.
- [7] Nameche T, Vassel J L. Hydrodynamic studies and modelization for aerated lagoons and waste stabilization ponds[J]. Water Research, 1998, 32(10):3039-3045.
- [8] Lesage N, Sperandio M, Lafforgue C, et al. Calibration and application of a 1-D model for oxidation ditches[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2003, 81 (A9):1259-1264.
- [9] Stamou A I. Modelling of oxidation ditches using an open channel flow 1-D advection-dispersion equation and ASMI process description[J]. Water Science and Technology, 1997, 36(5):269-276.
- [10] Littleton H X, Daigger G T. Application of Computational Fluid Dynamics to Closed Loop Bioreactors—Analysis of Macro-environment Variations in Simultaneous Biological Nutrient Removal Systems[C]. In: Proceedings of the Water Environment Federation 74th Annual Conference & Exposition on Water Quality and Wastewater Treatment, Atlanta, GA, CD-ROM, 2001.
- [11] 罗麟, 李伟民, 邓荣森, 等. 一体化氧化沟的三维流场模拟与分析[J]. 中国给水排水, 2003, 19(12):15-18.
Luo Lin, Li Wei-ming, Deng Rong-sen, et al. Numerical simulation of a combined oxidation ditch flow using 3D $k-\varepsilon$ turbulence model[J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(12):15-18.(in Chinese)
- [12] Simon S, Roustan M, Audic J M, et al. Prediction of mean circulation velocity in oxidation ditch[J]. Environmental Technology, 2001, 22(2):195-204.
- [13] Rodi W. Prediction Method for Turbulent Flows[M]. New York, USA: McGraw-Hill International Book Company, 1980a.
- [14] Rodi W. Turbulence Models and Their Applications in Hydraulics: A State of the Art Review[R]. In: IAHR, Delft, the Netherlands, 1980b.
- [15] Schneekluth H. Hydromechanik Zum Schiffsentwurf[M]. Herford: Koehler Book Company, 1988:3.
- [16] Fluent Incorporated. Fluent 6 User's Guide[EB/OL]. <http://www.fluent.com>, 2003, 7(15).
- [17] Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3:269-289.
- [18] Ranade V V. Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering Process Systems Engineering[M]. New York, USA: Academic Press, 2002:5.
- [19] 李炜, 徐孝平. 水力学[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000:244-250.
Li Wei, Xu Xiao-ping. Hydraulics[M]. Wuhan: Publishing Company of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 2000:244-250.(in Chinese)

(上接第 134 页)

- [5] Cai Bang-xiao, Ye Hai-lin, Li Yu. Preparation and separation performance of a dynamically formed MnO_2 membrane[J]. Desalination, 2000, 128(3):247-256.
- [6] Galjaard G, Buijs P, Beerendonk E, et al. Pre-coating (EPCE(R))UF membranes for direct treatment of surface water[J]. Desalination, 2001, 139(3):305-316.
- [7] Megat M M N, Fakhrol R A, Thamer A M, et al. Performance of flexible membrane using kaolin dynamic membrane in treating domestic wastewater[J]. Desalination, 2002, 147(2):263-268.
- [8] Li Na, Liu Zhong-zhou, Xu Shu-guang. Dynamically formed poly (vinylalcohol)ult-r filtration membranes with good anti-fouling characteristics[J]. Journal of Membrane Science, 2000, 169(1):17-28.
- [9] 卢进登, 李艳蕾, 康群, 等. 微网动态膜生物反应器对污染物的去除效果[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(5):93-94.
Lu Jin-deng, Li Yan-qiang, Kang Qun, et al. A bench-scale dynamic membrane bioreactor for purification of wastewater[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 29(5):93-94.(in Chinese)
- [10] 武小鹰, 郑平, 徐红亮. 动态膜技术及其在环境工程中的应用[J]. 膜科学与技术, 2003, 23(3):49-53.
Wu Xiao-ying, Zheng Ping, Xu Hong-liang. Dynamic membrane and its application in environment engineering[J]. Membrane Science and Technology, 2003, 23 (3):49-53.(in Chinese)