

CFD 模拟粒径对二沉池水流流速的影响

王莉烨, 邓保庆

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 建立了平流式沉淀池水流的两相流模型,应用计算流体力学软件 Fluent 求解模型。结果表明二沉池内水流速度是非均匀的;证明了悬浮物粒径对二沉池水流和悬浮物流速分布无明显影响,对实际污水厂处理有一定的指导意义。

关键词: 计算流体力学;二沉池;两相流模型;悬浮物粒径

中图分类号:TV143

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2013)04-0131-03

Influence of particle diameter simulated by CFD on flow velocity in rectangular secondary sedimentation tanks

WANG Liye, DENG Baoqing

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The paper built a two-phase flow model in rectangular secondary sedimentation tanks and resolved the model by use of the computational fluid dynamics software Fluent. The results showed that the distribution of flow velocity is not uniform, and MLSS diameter has no effect on the distribution of flow velocity of MLSS. It has some guidance for wastewater treatment.

Key words: CFD; secondary sedimentation tank; two-phase flow model; MLSS diameter

1 概述

二沉池是污水处理流程中一个必不可少的环节,污水处理厂的总投资约有 25% 用于二沉池处理。二沉池的主要作用为澄清和浓缩,澄清即保证出水 SS 稳定达标;浓缩是为了提高回流污泥浓度。目前,对二沉池的设计主要是基于理想沉淀池的假设^[1],由此确定的二沉池有很大的经验性,所以有必要对二沉池内的水流流态和悬浮物分布进行研究,从而更好的确定二沉池的尺寸和沉淀效率。

随着计算机技术的提高,对二沉池数值模拟仿真能力也逐渐加强。Imam^[2]、郭生昌^[3]、曾光明等^[4]均利用涡量-流函数建立了二沉池内二维不可压缩粘性流体的速度场模型,未考虑悬浮物对水流的影响;Imam 等^[5]进一步运用二维悬浮物方程分析了不同粒径悬浮物的去除率,考虑了悬浮物对于水流的影响;蔡金榜等^[6,7]在悬浮物模型中假设悬浮物在水流的夹带下与水流同步运动,仅考虑悬浮物颗粒因自身重力产生的沉降影响;Krebs 等^[8]采用两相流模型进行计算。但是这些模型将实际的

三维问题简化为了二维问题,认为各参量在宽度方向均匀分布,这与实际情况不符,因此有必要对沉淀池进行三维模拟。本文研究平流式二沉池内固液两相三维流动,并研究悬浮物颗粒大小对沉淀池内流动的影响。

2 研究方法

常用的研究两相流的方法有 Eulerian 和 Lagrange 方法,前者是将流体作为连续介质,假设其在空间中有传递性质;后者把流体作为连续介质而把分散相颗粒作为离散体系。由于 Lagrange 方法在复杂流动中网格会受到很大影响使结果误差大,而 Eulerian 方法则这方面无网格变形问题,适合不可压缩的流体。一般来讲,研究二沉池流体计算中多用 Eulerian 方法。

2.1 控制方程

流体流动满足质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。二沉池中的流体流速较低,可被看作是**不可压缩的牛顿流。本文采用的是 Eulerian - Eulerian 两相流连续性方程和动量方程。

收稿日期:2013-01-13; 修回日期:2013-02-26

作者简介:王莉烨(1987-),女,山西阳城人,硕士研究生,研究方向:环境数值模拟,从事环境仿真数值模拟相关领域研究。

通讯作者:邓保庆(1972-),男,河南安阳人,博士,副教授,主要从事流体力学、VOC 散发、环境仿真数值模拟方面的教学与研究工作。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_w \rho_w) + \nabla \cdot (\alpha_w \rho_w u_w) = 0 \quad (1)$$

式中: α_w 为体积分数; ρ_w 为密度, kg/m^3 ; u_w 为第 w 相的平均速度矢量, m/s ; w 为液相 l 或固相 s 。

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_w \rho_w u_w) + \nabla \cdot (\alpha_w \rho_w u_w u_w) = -\alpha_w \nabla p + \alpha_w \rho_w g + \nabla [\alpha_w (\tau_w + \tau'_w)] + S_D \quad (2)$$

式中: τ_w 、 τ'_w 为层流应力和湍动应力, N/m^2 ; p 为压强, Pa , 假设各相压力相等; g 为重力矢量, m/s^2 ; S_D 为动量源项, N/m^3 。

紊动应力为涡粘度模型:

$$\tau'_w = \mu'_w \left\{ \nabla u_w + (\nabla u_w)' + \left[-\left(\frac{2}{3} \nabla \cdot u_w\right) I \right] \right\} - \frac{2}{3} \rho_w k_w I \quad (3)$$

式中: I 为湍流强度; μ'_w 为湍流粘度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, 且

$$\mu'_w = C_\mu \rho_w \frac{k^2 w}{\varepsilon_w} \quad (4)$$

取 $C_\mu = 0.09$, 通过相应函数 C_1 建立固相与水流的相关性, 固相湍流粘性为:

$$\mu'_s = \left(\frac{\rho_s}{\rho_2}\right) C_1^2 \mu'_1 \quad (5)$$

假设固相的湍流特性与液相一样, 则 $C_1 = 1$ 。

$k - \varepsilon$ 湍流模型:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_1 \rho_1 k_1) = \nabla \left[\frac{\alpha_1 (\mu_1 + \mu'_1)}{\sigma_w} \nabla k_1 \right] + \alpha_1 (G - \rho_1 \varepsilon_1) + S_{w2} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_1 \rho_1 \varepsilon_1) + \nabla (\alpha_1 \rho_1 \mu_1 \varepsilon_1) \\ = \nabla \left[\frac{\alpha_1 (\mu_1 + \mu'_1)}{\sigma_z} \nabla \varepsilon_1 \right] + \\ \alpha_1 \frac{\varepsilon_1}{k_1} (C_1 G - C_2 \rho_1 \varepsilon_1) + S_{\tau 2} \end{aligned} \quad (7)$$

$$G = \mu_1 (\nabla \mu_1 + (\nabla \mu_1)') / \nabla \mu_1 \quad (8)$$

式中: k_1 为液相湍动能, $\text{N} \cdot \text{m}$; μ_1 为液相分子粘度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; σ_w 、 σ_z 分别为 $k - \varepsilon$ 方程的湍流 Prandtl 数; ε_1 为 k_1 扩散率, N/s ; C_1 、 C_2 为 $k - \varepsilon$ 方程的常数; S_{w1} 、 $S_{\tau 2}$ 为两相间的相互作用, 由(9)、(10) 确定:

$$S_{w2} = -A_d \frac{v'_1}{\alpha_1 \alpha_s \alpha_\varphi} \mu_r \cdot \nabla \alpha_s + 2A_d (C_t - 1) k_t \quad (9)$$

$$S_{\tau 2} = 2A_d (C_t - 1) \varepsilon_t \quad (10)$$

其中: C_t 为相应函数, 其他湍流模型参数 $C_\mu = 0.09$, $\sigma_w = 0.9$, $\sigma_z = 1.22$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$ 。

2.2 边界条件

假定进水口处流速均匀分布, 进水口断面湍流

动能及其耗散率分别按 $k_{in} = 3/2((u_{in} I_{in})^2)$ 和 $\varepsilon = C_\mu^{0.75} k_{in}^{1.5}/l_m$ 确定, 其中 I 为湍流强度; l_m 为混合长度。本文取 $I = 10\%$, $l_m = C_\mu(0.5h_i)$ 。

二沉池表面的平面边界设为自由面, 二沉池外围边壁、底部及挡板等处均为固壁, 水平流速与垂向流速的法向梯度为零。

3 模拟计算

本文采用 Imam 的矩形沉淀池实验作为验证实例。不考虑污泥斗和挡板位置以及沉淀池底坡的影响, 沉淀池几何形状和计算区域如图 1。计算参数为流量 $Q = 109.4 \text{ cm}^3/\text{s}$, 进口悬浮物质量浓度 $C_0 = 840 \text{ mg/L}$ (体积分数为 0.0007), 悬浮物密度 $\rho = 1100 \text{ kg}/\text{m}^3$, $L = 73.7 \text{ cm}$, $b = 12.7 \text{ cm}$, $h = 11.95 \text{ cm}$, $h_i = 5.0 \text{ cm}$, $h_w = 8.5 \text{ cm}$, 计算边界如图 1。

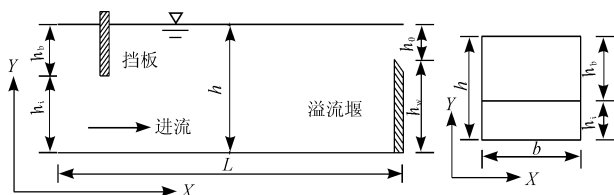


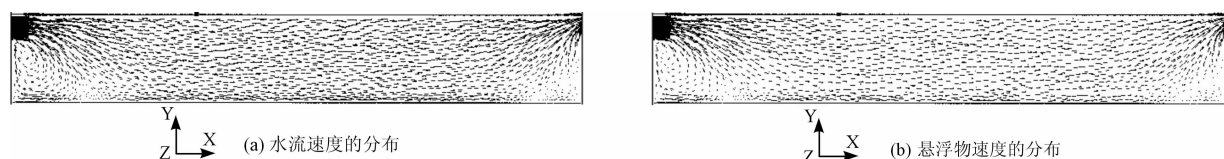
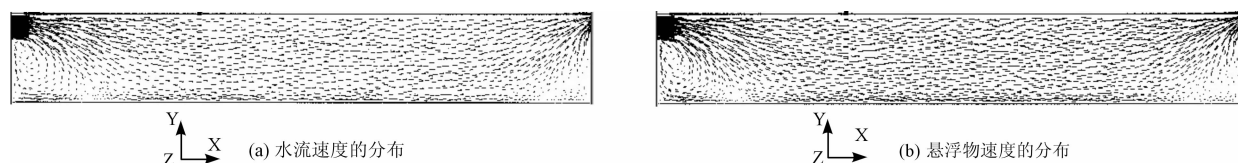
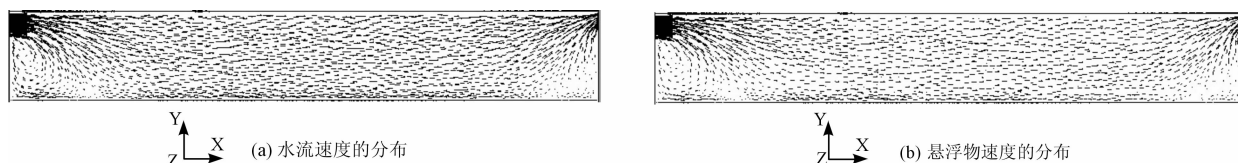
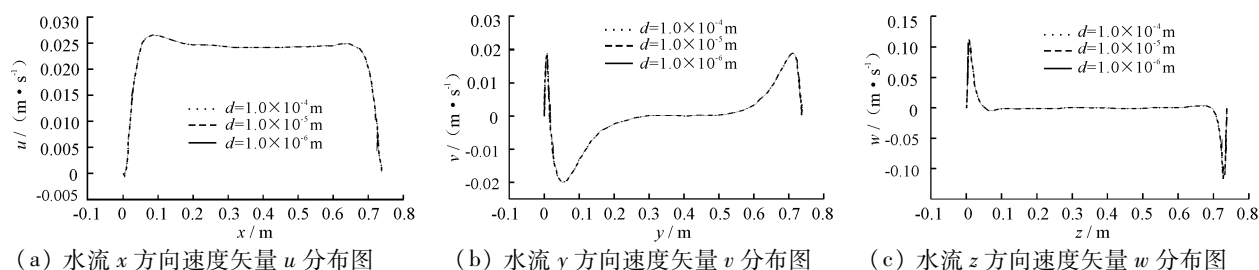
图 1 Imam 实验的物理模型

当 $z = 2.25 \text{ cm}$, $d = 1.0 \times 10^{-5} \text{ m}$ 时模拟的水流和悬浮物速度分布如图 3, 可知二沉池内水流和悬浮物流动趋势一致。水流和悬浮物从进口进去时候流速较大, 于挡板处形成回流区; 沉淀区内速度较小, 且相差不大; 到了出口处, 流速又逐渐变大, 并在溢流堰底部存在一小部分回流, 回流区速度又较小。模拟结果和二沉池实际流动符合, 因此采用两相流模型更能真实地模拟水流和悬浮物的流动情况。

在一定入流条件下, 当悬浮物粒径分别为 $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}$ 、 $1.0 \times 10^{-5} \text{ m}$ 、 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}$, 在 $z = 2.25 \text{ cm}$, $y = 6.5 \text{ cm}$ 时水流速度和悬浮物速度的分布为图 2、3、4, 对比可知, 由于悬浮物的浓度不高, 其粒径分布对速度无明显影响。如图 5 所示, 水流各方向分量分布基本相同, 无较大的差异。因此, 当 $z = 2.25 \text{ cm}$, $y = 6.5 \text{ cm}$ 时悬浮物的尺寸对水流场和悬浮物流场的影响并不明显。

4 结 语

本文建立了二沉池两相流模型, 并在模型中引入标准的紊流模型, 避免了选择涡旋粘滞系数和物质扩散系数的不确定因素。二沉池内水流悬浮物流速并不是均匀分布, 高速主要分布在二沉池前段, 而

图2 当 $d = 1.0 \times 10^{-4}$ m 时水流和悬浮物速度分布图3 当 $d = 1.0 \times 10^{-5}$ m 时水流和悬浮物速度的分布图4 当 $d = 1.0 \times 10^{-6}$ m 时水流和悬浮物速度的分布图5 不同粒径的水流各方向速度分量分布 ($z = 2.25$ cm, $y = 6.5$ cm)

池内的速度较小;二沉池主要存在两个主要的回流区,分别位于进水区和溢流堰。这说明了二沉池内的速度分布是非均匀的,不符合理想沉淀池假设。在一定条件下,悬浮物尺寸大小对水流流速和悬浮物流速分布影响并不明显,在模拟时可以采用颗粒尺寸的平均值。CFD 在二沉池中的数值模拟是具有实际作用的,说明了模型建立的方法及数值分析的应用前景,但是还必须有一个反复的验证过程才可以更好运用;同时,悬浮物尺寸大小并没有对紊流速有显著影响,究其原因,究竟是池内悬浮物密度太小,还是悬浮物尺寸相差不大而引起此现象,此问题仍需要在今后工作中进一步研究。

参考文献:

- [1] 张希衡. 水污染控制工程[M]. (第2版). 北京:冶金工业出版社,1993.
- [2] Imam E, McCorquodale J A. Simulation of flow in rectangular clarifiers [J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 1983, 109(3): 713-730.
- [3] 郭生昌. 沉淀池的计算机数值模拟[D]. 上海:东华大学,2004.
- [4] 曾光明,葛卫华,秦肖生,等. 污水厂二维沉淀池水流和悬浮物运动数值模拟[J]. 中国环境科学,2002,22(4):

338-341.

- [5] Imam E, McCorquodale J A, Bertram J K. Numerical modeling of sedimentation tanks[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 109(12): 1740-1754.
- [6] 蔡金榜,段祥宝,朱亮. 沉淀池水流数值模拟[J]. 重庆建筑大学学报,2003,25(4): 65-69.
- [7] 蔡金榜,朱亮,段祥宝. 平流式沉淀池数值模拟分析[J]. 河海大学学报,2004,32(1): 27-31.
- [8] Krebs P, Vischer D, Gujer W. Inlet-structure design for final clarifiers[J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 1995, 121(8): 558-564.
- [9] 肖尧,施汉昌,范尧. 基于计算流体力学的辐流式二沉池数值模拟[J]. 中国给水排水,2006,22(19): 100-104.
- [10] 王晓玲,杨丽丽,张明星,等. 平流式沉淀池水流三维CFD模拟[J]. 天津大学学报,2007,40(8): 921-930.
- [11] 屈强,马鲁铭,王红武,等. 折流式沉淀池流态模拟[J]. 中国给水排水,2005,21(4): 58-61.
- [12] 张明星,杨丽丽,王晓玲. 计算流体力学(CFD)在二沉池优化设计中的应用[J]. 中国给水排水,2006,22(22): 16-19.
- [13] 韦安磊,曾光明,黄国和,等. 计算流体力学在二沉池改造中的应用[J]. 工业用水与废水,2005,36(3): 52-54.
- [14] 何国建,汪德耀. 矩形沉淀池内悬浮物沉降模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版),2005,45(12): 1617-1620.