

# 辐流式沉淀池液固两相流力学特性三维数值模拟

刘玉玲<sup>1</sup>, 张沛<sup>2</sup>, 魏文礼<sup>1</sup>, 郑艳<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 淮海大学 水利水电学院, 南京 210024)

**摘要:** 采用两相流混合模型, 选取 RNG  $k - \varepsilon$  湍流模型封闭两相流时均方程, 对辐流式二次沉淀池液固两相流力学特性进行三维数值模拟。采用有限体积法求解微分方程; 紊动能、紊流耗散均采用 Quick 离散格式; 速度与压力耦合求解时使用了压力隐式算子分裂 PISO (Pressure - Implicit with Splitting of Operators) 算法。通过模拟获得了速度场、紊动能和污泥质量浓度等参量在空间的分布规律, 对沉淀池的设计有一定的参考价值。

**关键词:** 辐流式沉淀池; 力学特性; 三维模拟; 液固两相流

中图分类号: O359 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2013)04-0025-03

## Numerical simulation of mechanical property of solid-liquid two-phase turbulent flow in a secondary sedimentation tank of radial flow

LIU Yuling<sup>1</sup>, ZHANG Pei<sup>2</sup>, WEI Wenli<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>

(1. Faculty of Water Resources and Hydro Power, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China,

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The two-phase mixture model was used to study the mechanical feature of solid-liquid two-phase turbulent flow in a secondary sedimentation tank of radial flow by 3-D numerical simulation. The improved RNG two-equation turbulent model was used to close the two-phase time-averaged equations. The finite volume method was used to solve the differential equations; the turbulence kinetic energy and the kinetic energy of turbulent dissipation took quick discrete format; the coupling velocity and pressure equations were solved with PISO algorithm (pressure-implicit with splitting of operators). Through simulation, the paper obtained the distribution law of velocity field, turbulent kinetic energy, and quality concentration of sludge in space, which has certain reference value for the design of secondary sedimentation tank.

**Key words:** sedimentation tank of radial flow; solid-liquid two-phase turbulent flow; mechanical property; 3-D numerical simulation; two-phase turbulent flow

沉淀池是污水处理过程中一种重要的处理构筑物, 对整个污水处理系统的效率有着显著影响, 为保证出水质量、提高处理效率, 有必要对沉淀池进行深入研究。关于沉淀池消能的研究国内外已发表了一些研究成果<sup>[1-6]</sup>。实验方面, Larsen<sup>[1]</sup>、Imam<sup>[2]</sup>分别利用超声测速技术和激光多普勒测速技术对沉淀池进行了一系列的测量。数值计算方面, Imam 等采用涡量 - 流函数法对模型沉淀池进行了模拟, 对流项采用加权中心差分迎风格式来处理, 且未考虑密度差的影响。蔡金傍等<sup>[3]</sup>采用标准紊流模型, 对平流式沉淀池进行了模拟。对比了不同的挡板位置、进水流速以及沉淀池长高比下沉淀池内的流速场和浓度场, 并计算分析了平流式沉淀池的过流曲线。

曾光明等<sup>[4]</sup>等利用涡量 - 流函数法建立二维沉淀池速度场模型的控制方程, 用有限差分法求解模型方程, 利用二维浓度迁移方程对沉淀池浓度分布进行计算。蒋成义等<sup>[5]</sup>等采用多相流欧拉模型、标准模型和 Boussinesq 假设研究了二沉池中活性污泥和表面散热引起的异重流。屈强等<sup>[6]</sup>利用改进的 RNG  $k - \varepsilon$  两方程紊流模型和简化的多相流 Mixture 模型, 对辐流式二沉池内速度场和污泥质量浓度场进行了数值模拟。

本文采用两相流混合模型, 选取 RNG  $k - \varepsilon$  湍流模型对辐流式二次沉淀池进行数值模拟, 并验证了所建模型及计算方法。

收稿日期: 2013-06-17; 修回日期: 2013-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178391); 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室开放基金(106-221223); 中央财政支持地方高校发展专项资金特色重点学科项目资助(106-00X101)

作者简介: 刘玉玲(1969-), 女, 陕西合阳人, 博士, 教授, 主要从事环境水力学、水污染控制理论与技术研究。

## 1 数学模型

双流体模型可用来模拟二次沉淀池中的两相流。Mixture 模型是一种简化的双流体模型,它利用小空间尺度上的局部平衡来求解混合相的动量、连续性和能量方程,第二相的体积分率以及滑移速度和漂移速度。考虑该模型具有模型简单,计算量小且结果较为可靠等特点,这里采用 Mixture 模型。

Mixture 模型连续性方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = \dot{m} \quad (1)$$

$$\vec{v}_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k / \rho_m \quad (2)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (3)$$

式中:  $\rho_k$  是  $k$  相密度;  $\rho_m$  是混合相密度。  $v_m$  是混合相质量平均速度;  $v_k$  是  $k$  相质量平均速度;  $\alpha_k$  是  $k$  尾相体积分数;  $\dot{m}$  是用户定义的质量源相的质量传递。

Mixture 模型动量方程可以通过对所有相各自的动量方程求和来获得,形式如下:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) \\ &= -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \vec{v}_m^T)] + \\ & \rho_m g + F + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k}, \vec{v}_{dr,k} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $n$  是相数;  $F$  是体积力;  $g$  为重力加速度;  $\mu_m$  是混合粘性。

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (5)$$

$\vec{v}_{dr,k}$  是第  $k$  相的漂移速度。

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k + \vec{v}_m \quad (6)$$

滑移速度被定义为第  $p$  相的速度相对于主相  $q$  的速度

$$\vec{v}_{q,p} = \vec{v}_p + \vec{v}_q \quad (7)$$

滑移速度和漂移速度的关系为:

$$\vec{v}_{dr,p} = \vec{v}_{qp} - \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \vec{v}_{qk} \quad (8)$$

第  $p$  相的体积分率方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) \quad (9)$$

紊动黏性项采用基于重整化群的 RNG  $k - \varepsilon$  两方程模型来求得,它考虑了紊流漩涡,提高了计算精度并可以正确处理近壁区域,适用于分层流和浮力流。紊流动能和紊流动能耗散率的运输方程分别为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_{kb} - \rho \varepsilon \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ & \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \end{aligned} \quad (11)$$

其中:方程(10)为紊动动能方程,  $k$  表示紊动动能,方程(11)为紊动动能耗散紊方程,  $\varepsilon$  为紊动动能耗散率。其中经验系数的取值及各系数的计算公式如下:

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2, C_2 = 1.9$$

$$C_1 = \max\left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right), \eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon},$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

$$C_u = \frac{1}{A_0 + A_s U^* k / \varepsilon}, A_0 = 4.0, A_s = \sqrt{6} \cos \phi,$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W), W = \frac{E_{ij} E_{jk} E_{ki}}{(E_{ij} E_{ij})^{1/2}},$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{u_j}{\partial x_i} \right), U^* = \sqrt{E_{ij} + E_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}},$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk} \omega_k, \Omega_{ij} = \tilde{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k$$

以上方程组构成了求解流场分布规律的封闭方程组,根据实际工况施加相应的边界条件后,构成该方程组的定解问题。

## 2 数值模拟及验证

### 2.1 模型选取与网格划分

某辐流式二次沉淀池中心深 4.0 m,周边深 2.0 m,泥斗设在池中央,池底向中心倾斜,一块垂直挡板用于把入流引向池底,一块水平挡板用于防止进水和污泥回流之间的短流。属轴对称图形,几何尺寸如图 1 所示。初始计算网格由 GAMBIT 程序生成,网格划分采用了结构网格。计算网格如图 2。

### 2.2 边界条件

进口边界已知该池进水活性污泥质量浓度和进口流速;出口压力为大气压;水面为没有剪切和滑移速度的自由界面,池底和边壁为固体壁面,壁面上速度为零,使用标准壁面函数。采用有限体积法求解微分方程,紊动能、紊流耗散、动能均采用 Quick 离散格式,速度与压力耦合求解时使用了压力隐式算子分裂 PISO 算法进行求解。开始计算时,由于无法知道池内各处污泥质量浓度,所以需从非稳态开始

计算,初始假设池内充满清水,活性污泥混合液开始进入沉淀池,直到出水和底流污泥质量浓度不变,总质量等于进水污泥质量,池内污泥不再累积,认为达到稳定。

### 2.3 结果分析和讨论

图3为沉淀池内污泥质量浓度分布图,不同颜色代表不同的污泥质量浓度。由图3可见,沉淀池内存在着清晰的泥水分界面,在此界面以上,污泥浓度基本为零,为清水区,在此界面以下是污泥质量浓度逐渐升高的絮凝区,接下来是污泥质量浓度基本一致的成层沉淀区,池底有一层较薄的污泥压缩区。

图4是沉淀池内纵剖面速度流线图,流线的疏密程度可以表明速度的大小。由图4可以看出,由于水平和竖直两个挡板的作用,两挡板间的流线较密,

流速较大。水流在经过挡板后,一部分沿池底流向出口,一部分在沉淀池挡板后形成一个较大的回流区,同样在挡泥板下方也有一个较小的回流区,它们基本上都是死区,回流区的存在降低了沉淀池的有效利用容积,是影响沉淀池去除率的一个重要因素。

图5、6分别是三维速度矢量图和纵剖面速度矢量图;图7是沉淀池内纵剖面紊动动能图。由紊动动能分布图7可见,进水区紊动动能较大,而随着远离进口紊动动能逐渐减小。这是由于进水区流速较大,由于挡板的阻碍作用改变了水流速度方向,水流的紊动增强,当脱离进水区后,水流速度很快减小,水流的紊动随之减小。在沉淀区,水流紊动动能很小;其后由于出水口附近的水流速度增大,水流紊动强度的增强,使其紊动动能随之增大。

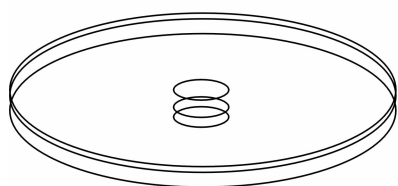


图1 计算区域

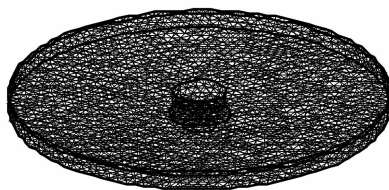


图2 网格图

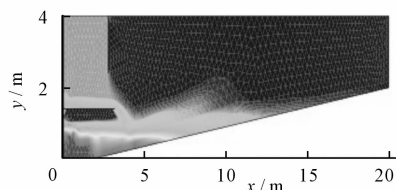


图3 纵剖面污泥质量浓度分布图

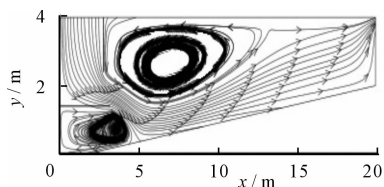


图4 纵剖面流线图

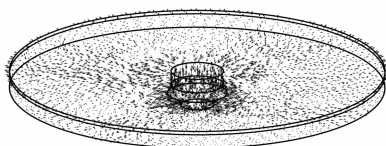


图5 三维流场图



图6 纵剖面流场图

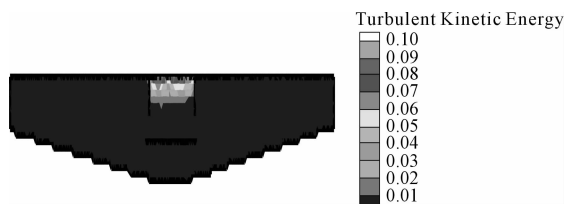


图7 纵剖面紊动动能图

## 3 结语

本文采用两相流混合模型,并选取 RNG  $K-\epsilon$  湍流模型,在对速度与压力解耦时使用 PISO 算法,对辐流式二次沉淀池进行数值模拟。结果表明沉淀池在上部和下部分别存在两个回流区,对沉淀池去除率有较大影响;并对挡板位置、长度对池内流场的影响进行探讨。该研究在一定程度上反映了沉淀池内部流速,紊动动能,紊动动能耗散率等水力特性的变化规律,可为沉淀池的体型设计提供一定参考依据。在实际工程中,由于湍流的复杂性以及水流边

界的不确定性,如何精细地模拟实际沉淀池内部的运动情况,还需要进一步的深入研究。

### 参考文献:

- [1] Larsen P. On the hydraulics of rectangular settling basins, experimental and the oretical studies [J]. Journal of Hydranlic Research, 1987, 23(4): 556-578.
- [2] Imam E, McCrquodale J A, Bewtra J K. Numerical modelling of sedimentation tank [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 109(12): 1740-1754.
- [3] 蔡金榜,朱亮,段祥宝. 平流式流沉池数值模拟分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(1): 27-31.
- [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.
- [5] 蒋成义,吴春笃,黄卫东. 辐流式二沉池中异重流的计算流体力学模型研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(11): 846-852.
- [6] 屈强,马鲁铭,王红武. 辐流式二沉池固液两相流数值模拟 [J]. 同济大学学报(自然科学版) 2006, 34(9): 1212-1216