

基于计算流体力学的辐流式二沉池数值模拟

肖尧, 施汉昌, 范茏

(清华大学 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘要: 用数值模拟的方法准确描述城市污水处理厂二沉池中的流态及固相分布对保证其稳定运行和出水水质达标至关重要, 与其他常用于对二沉池进行数值模拟的经验模型、固体通量模型等相比, 计算流体力学 (CFD) 模型在精度上具有明显优势。以基于计算流体力学的商用软件 FLUENT 为工具, 用欧拉-拉格朗日和欧拉-欧拉方法对辐流式二沉池的流态, 尤其是固相行为和分布进行了模拟研究。结果表明, 固相颗粒在二沉池中的行为和分布受颗粒的粒径、密度等自身属性以及漩涡等特殊流动现象的影响, 呈现出不同于理想沉降理论的轨迹; 颗粒粒径及密度越小, 颗粒则越易受漩涡等的影响, 沉淀池的泥水分离效果也就越差。将模拟结果与实际污水处理厂的数

关键词: 二沉池; 计算流体力学; FLUENT 软件; 固相行为及分布

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2006)19-0100-05

Numerical Simulation of Radial Flow Secondary Sedimentation Tank Based on CFD

XIAO Yao, SHI Han-chang, FAN Long

(State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: It is crucial for ensuring stable operation and effluent quality of secondary sedimentation tank in municipal wastewater treatment plants (WWTPs) to numerically simulate the flow profile and its solid distribution accurately. Compared with other commonly used models for numerically simulating secondary sedimentation tank such as empirical models and solid mass flux model, computational fluid dynamics (CFD) model has greater advantages in simulation accuracy. The flow profile, with an emphasis on the solid behavior and distribution in a radial secondary sedimentation tank were simulated by using the commercial CFD software package FLUENT, and the Euler-Lagrange and Euler-Euler methods. The simulation results show that the solid behavior and distribution are influenced by its properties like the diameter and density and by special flow phenomenon like eddy in the tank. Thus the simulated sedimentation trajectory is different from the ideal one. The solid particles become easier to be affected by eddy and the efficiency of solid-liquid separation falls when the diameter and density of solid particles decrease. The comparison between simulation results and real data from WWTP suggests that the simulation is reliable and useful for engineering practice.

Key words: secondary sedimentation tank; CFD; FLUENT software; solid behavior and distribution

二沉池是城市污水处理厂常规生物处理工艺中的一个重要处理单元, 主要承担泥水分离的功能以

保证出水水质达标和生物处理系统的稳定运行。近年来,随着处理负荷的不断提高,许多现有二沉池及部分新建二沉池由于设计不合理或运行中发生了污泥反硝化等问题,导致处理效果不理想、悬浮物浓度超标。

有研究表明,采用数值模拟的方法可准确描述二沉池中的流态以及固相分布,这对保证二沉池的稳定运行和出水水质起着至关重要的作用,而计算流体力学(CFD)为这一方法提供了一种新的思路。CFD以纳维—斯托克斯(N-S)方程组与各种湍流模型为主体,是描述环境、化工等诸多领域内流场、流态问题的有效工具。Flamant等相继利用CFD对二沉池进行了模拟研究,并将模拟结果与试验结果对比,证明了CFD的有效性及其相对于其他常用数值方法在精度上的优势^[1]。但是这些研究大都侧重于描述二沉池中的流场,而对池中固相的行为和分布研究甚少。因此,笔者基于CFD对城市污水处理厂中常见的辐流式二沉池中的流态,特别是其中固相的行为及分布进行了模拟研究。

1 研究方法

1.1 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。在CFD计算中需要求解的连续性方程和N-S方程即是描述这些定律的方程。二沉池中的流体流速较低,可被看作是**不可压缩的牛顿流。因此二沉池中流场的控制方程可以表示为:

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + g_i \quad (2)$$

Jayanti和屈强等认为,二沉池中的流动可认为是湍流流动^[2,3]。对湍流问题的处理,目前工程上常用的是由雷诺时均方程得出的湍流模型,Karama等的研究证明,应用标准 $\kappa-\varepsilon$ 模型与雷诺应力模型模拟所得结果基本一致^[4]。因此,选用最常用的标准 $\kappa-\varepsilon$ 模型进行研究。

1.2 多相流模型的选择

通常有两种计算方法来处理多相流,即欧拉—欧拉(Euler)方法和欧拉—拉格朗日(Lagrange)方法。在Euler方法中,不同的相被处理成互相贯穿的连续介质,一种相所占体积无法被其他相占有;而在Lagrange方法中,流体相被处理为连续相,离散相

则被安排在流体相计算的指定间隙中独立完成。离散相和流体相之间可以有动量、质量和能量的交换。

Euler方法计算耗时较短,消耗资源较少;而Lagrange方法则能实现对离散相颗粒的行为及特点的描述,但它必须忽略离散相颗粒间的影响,因此适用于离散相体积比<10%的情况。由于在Lagrange方法中各个离散相轨道的计算相互独立,所以并不能获得某一网格处的固相比率。

二沉池中固相的体积比通常在1%以下,因此Lagrange方法是适用的。在研究中,可利用它来描述池中固相颗粒的行为以及水流对其的影响,同时利用Euler方法来描述池中的固相分布情况。

1.3 控制方程的求解

求解CFD过程中的每一步都是标准化的,因此可利用商用CFD软件进行求解,采用目前应用最为广泛的FLUENT软件进行模拟研究。

1.4 模型的验证

对模拟结果的验证是非常必要的,故以实际二沉池的数据与模拟结果进行比较,以验证模拟结果的可靠性。

2 结果和讨论

2.1 研究对象描述

研究对象为某城市污水处理厂的辐流式二沉池,该污水厂的处理规模为 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,设二沉池2座,直径为50 m,有效水深为4.5 m,总水深为7 m,单池面积为 1960 m^2 。采用中心进水、周边出水的方式,进水管直径为0.5 m,双边三角堰出水,间歇排泥。正常运行时进水流速为0.1 m/s,按纯水密度和粘度计算的雷诺数为4000。

所有的计算都将应用FLUENT软件6.0进行。利用FLUENT进行模拟的基础是得到一个研究对象的简化算例。由于辐流式二沉池的轴对称性,因此可以得到一个轴—径($z-r$)方向的二维算例,结果见图1。

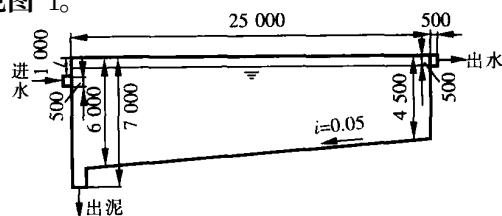


图 1 二沉池简化模型

Fig 1 Sketch of secondary clarifier

由于排泥间歇进行,且间隔时间足够长,可以认为排泥过程对池中流态不会产生较大的影响。另外考虑到为保证二沉池的轴对称性并避免额外的计算,在模拟中略去刮泥机等机械装置^[5]。

FLUENT 软件是基于有限体积法求解的,所以需要将流域划分为一定数量的、连续而不重叠的非结构网格。模拟的结果与网格的精细程度有关,但当网格数足够大时,模拟结果将与网格数无关。研究中对同一算例选择 2 000、4 000、6 000 个网格分别进行模拟,发现当网格数 $> 4\ 000$ 后就可获得足够精确的模拟结果。

根据二沉池的实际情况,边界条件的定义为:入流处采用速度入口,上清液出流处采用压力出口,污泥出流处采用出流模式,各壁面及水面处均采用壁面。

2.2 流场分布

模拟得到二沉池中水流流速矢量图和等速线图,结果如图 2 所示。

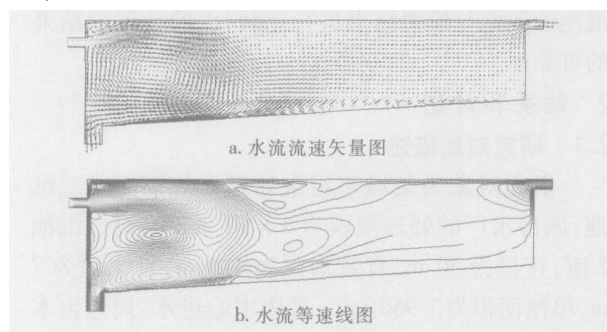


图 2 二沉池中水流的流场分布

Fig 2 Distributing of liquid field in clarifier

由图 2 可知,水流进入二沉池后,保持原有速度流动至水面,并在其作用下形成了一个较大的漩涡。同时在整个流场当中还存在着若干小的漩涡。此外,在靠近出水口区域的许多位置,水流的轴向流速 $> 0.004\text{ m/s}$,这高于 Matko 等给出的二沉池中固相颗粒的典型沉降速度 (0.003 m/s)^[6]。因此,二沉池中的流场分布必然会对固相颗粒的沉降和泥水分离的效果产生影响。

2.3 固相行为

在用 Lagrange 方法处理多相流时,FLUENT 提供了离散相模型来解决。研究中将颗粒视为刚性小球^[7],其密度为 $1\ 100\text{ kg/m}^3$ 。在二沉池中取样测定其中固体颗粒的粒径分布,结果表明颗粒粒径主要

为 $10\sim 250\text{ }\mu\text{m}$ 。以下关于离散相模型对固相颗粒行为的研究都将基于上述参数进行。

2.3.1 固相颗粒在二沉池中的行为

由于二沉池中的流场较复杂,固相颗粒的沉降轨迹并不是经典理论预测的理想轨迹,而是呈现出不规则的轨迹,结果如图 3 所示。

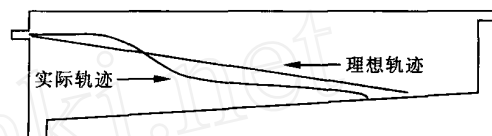


图 3 固相颗粒在池中的理想和实际模拟沉降轨迹

Fig 3 Ideal and simulated trajectories of solid particle in clarifier

2.3.2 颗粒粒径对其行为的影响

选择粒径分别为 10 、 50 、 100 、 150 、 200 、 $250\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒(密度均为 $1\ 100\text{ kg/m}^3$),将其在进水口中心处释放,模拟得到其在池中的轨迹,结果见图 4。

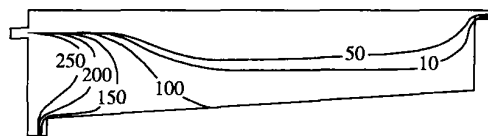


图 4 从进水口释放的不同粒径颗粒在池中的轨迹

Fig 4 Particle trajectories with different diameter emanating from inlet

由图 4 可知,粒径为 150 、 200 、 $250\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒进入二沉池后,很快在重力的作用下沉降下来,并被进水口附近的大漩涡卷入泥斗而离开流场。粒径为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒在沉降过程中受漩涡的影响较小,没有被卷入泥斗,而是被池底壁面(即二沉池中的泥层)捕获也实现了泥水分离。而粒径为 10 、 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒由于沉降速度较慢,并未受到进水口附近大漩涡的影响,但在其缓慢沉降的过程中受到了池中上部漩涡的影响,而偏离了正常的沉降轨迹,从而被向出水口集中的水流带出了流场。试验结果表明, $100\text{ }\mu\text{m}$ 是颗粒实现泥水分离的临界粒径。

2.3.3 颗粒密度对其行为的影响

由于工艺过程及运行参数等的不同,进入二沉池中固相颗粒的性质,尤其是密度往往差别很大。故选择粒径均为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 而密度分别为 250 (膨胀污泥)、 750 (反硝化上浮污泥)、 $1\ 000$ 、 $1\ 100\text{ kg/m}^3$ 的颗粒,将其在进水口中心处释放,模拟得到其在池中的轨迹,结果如图 5 所示。

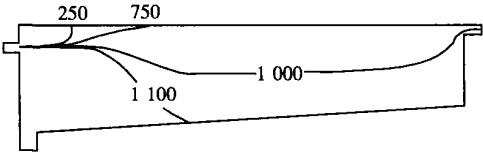


图 5 从进水口处释放的不同密度颗粒在池中的轨迹

Fig 5 Particle trajectories with different density emanating from inlet

由图 5 可知,密度为 $1\,100\text{ kg/m}^3$ 的颗粒沉降在池底的泥层上,密度为 $1\,000\text{ kg/m}^3$ 的颗粒则随水流流出,而密度为 250 、 750 kg/m^3 的颗粒则上浮至水面。这表明,密度对颗粒在流场中的行为有较大影响,高密度颗粒比低密度颗粒更易沉降。

2.3.4 漩涡对固相颗粒行为的影响

沉淀池中存在着很多强度不同的漩涡,为研究其对颗粒行为的影响,选择粒径为 10 、 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒,从流场中位于进水口附近大漩涡中的 A 点释放,模拟得到其在池中的轨迹,结果如图 6 所示。

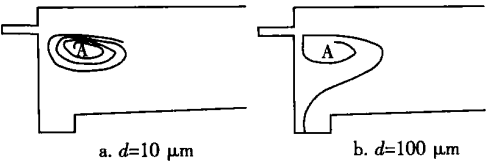


图 6 从 A 点释放的不同粒径的颗粒在池中的轨迹

Fig 6 Particles trajectories with different diameter emanating from point A

由图 6 可知,粒径为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒在漩涡的作用下一直悬浮在流场中,未能实现沉降,而粒径为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒则很快摆脱了漩涡的影响,沉降了下来。这表明,大粒径颗粒受漩涡的影响相对较小,小粒径的颗粒在随漩涡运动的过程中则有两种可能的结果:一是小粒径颗粒发生絮凝而变成大粒径颗粒,并最终沉降下来;二是小粒径颗粒在漩涡作用下返混并重新进入外部流场。

2.3.5 已沉降颗粒的行为

二沉池中许多已沉降在泥层中的颗粒往往会由于各种原因而重新进入流场,如刮泥机的干扰、污泥反硝化等。这些重新进入流场中的颗粒的行为将会对出水中的悬浮物浓度造成一定影响。选择一组粒径分别为 10 、 50 、 100 、 $250\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒(密度均为 $1\,100\text{ kg/m}^3$)和一组密度分别为 250 、 750 、 $1\,000$ 、 $1\,100\text{ kg/m}^3$ 的颗粒(粒径均为 $100\text{ }\mu\text{m}$),从流场中靠近池底的 B 点(可认为位于泥层中)释放,模拟得

到其在池中的轨迹,结果如图 7 所示。

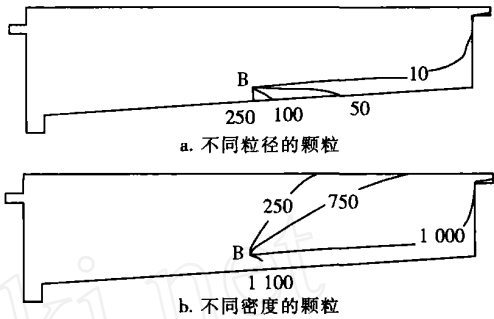


图 7 已沉降颗粒返混后的轨迹

Fig 7 Particle trajectories with sedimentation return from point B

由图 7(a)可知,粒径为 50 、 100 、 $250\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒在重新进入流场后仍能沉降下来,而粒径为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒则会被水流带走。这说明小粒径颗粒不仅沉降性能不好,而且沉降之后也易受到水流影响而发生上浮。

由图 7(b)可知,密度为 $1\,100\text{ kg/m}^3$ 的颗粒在重新进入流场后仍能快速沉降下来,密度为 250 、 750 kg/m^3 的颗粒则会随水流上浮,而密度为 $1\,000\text{ kg/m}^3$ 的颗粒则会被带入出水中。这说明如果池中的泥层发生污泥膨胀、反硝化等改变了污泥性质时,将导致泥水分离效果的急剧恶化,从而影响出水水质。

2.4 固相分布

在用 Euler 方法处理多相流时,FLUENT 提供了三种模型:VOF 模型、Mixture 模型和 Euler 模型。二沉池中的流动属于粒子加载率较低的液固两相沉降运动,采用 Mixture 模型是最佳的。

用于计算的液固两相的参数:液相为水,密度为 998.2 kg/m^3 ,动力粘度为 $0.001\text{ Pa}\cdot\text{s}$;固相为污泥,近似为刚性小球,密度为 $1\,100\text{ kg/m}^3$,等效直径为 $100\text{ }\mu\text{m}$,动力粘度为 $1.8\times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$;混合相中的固相浓度为 $2\,000\text{ mg/L}$ 。

2.4.1 固相浓度分布

模拟得到二沉池中固相浓度的分布情况,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,池上部固相浓度较低,靠近底部浓度较高,这与二沉池的实际情况相同。在二沉池中水面下 4.5 m 处的固相浓度为 $3\,000\text{ mg/L}$,可以视为泥层与流体的分界面^[6]。

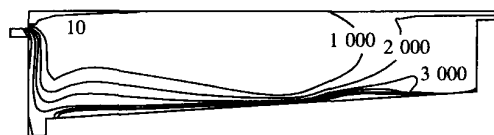


图 8 二沉池中固相浓度分布

Fig 8 Solid concentration distribution in secondary clarifier

2.4.2 流量对出水固相浓度的影响

通常雨季的进水流量剧增,二沉池的处理负荷也会相应增加,这就会影响出水 SS 的浓度。选择不同的进水流速,模拟得到相应的出水 SS 浓度。结果表明,出水 SS 随着进水流速的增大而急剧增加。这是由于流体在二沉池中的停留时间变短,导致泥水分离效率变低。

2.4.3 颗粒粒径对出水固相浓度的影响

由于出水 SS 是表征泥水分离效果的一个重要数据,故利用 Euler 方法考察了颗粒粒径对出水 SS 的影响,结果表明小粒径颗粒在出水中的浓度较高,证实了前面研究得到的小粒径颗粒的泥水分离效果较差的结论。

2.4.4 颗粒密度对出水固相浓度的影响

考察了颗粒密度对出水 SS 的影响,结果显示,与 Lagrange 方法的模拟结果类似,颗粒密度越大则泥水分离效果越好,出水 SS 浓度也就越低。

2.5 模拟结果的验证

以该污水处理厂二沉池连续运行 10 d 的进水流速和悬浮物浓度为基础进行模拟,并将模拟结果与相应的出水 SS 数据进行对比,结果如图 9 所示。

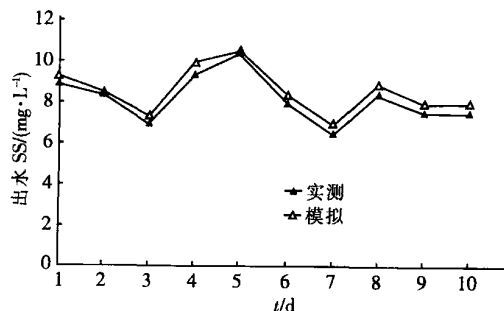


图 9 实际出水 SS 数据与模拟结果对比

Fig 9 Contrast of real SS in effluent with simulation results

由图 9 可知,实际出水 SS 与模拟结果基本一致 (误差 < 5%), 表明模拟结果能够反映二沉池的真实状态。

3 结论

① 基于 CFD 原理的商用软件 FLUENT 可对城市污水处理厂的二沉池进行模拟,是描述二沉池中流态及固相颗粒行为和分布的有效工具。

② 固相颗粒在二沉池中的行为受到池中复杂流场的作用,呈现出不同于理想沉降理论的轨迹。

③ 欧拉—拉格朗日方法和欧拉—欧拉方法模拟研究均证实,颗粒粒径和密度均对泥水分离效果具有较大影响。颗粒粒径越大,密度越大,则分离效果越好。

④ 二沉池中的特殊流动现象如漩涡等对固相颗粒的行为有直接影响,通过欧拉—拉格朗日方法模拟表明,小粒径的颗粒更易受其影响,从而使其归宿多样化。

⑤ 通过工程实际数据与模拟结果的对比,证明基于 CFD 原理对二沉池的数值模拟方法可靠性高,对工程实际具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Flamant O, Cockx A, Guimet V, *et al* Experimental analysis and simulation of settling process [J]. *Process Saf Environ Prot*, 2004, 82 (B4): 312 - 318.
- [2] Jayanti S, Narayanan S Computational study of particle-eddy interaction in sedimentation tanks [J]. *J Environ Eng*, 2004, 130 (1): 37 - 49.
- [3] 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.
- [4] Karama A B, Onyejekwe O O, Brouckaert C J, *et al* The use of computational fluid dynamics (CFD): technique for evaluating the efficiency of an activated sludge reactor [J]. *Water Sci Technol*, 1999, 39 (10 - 11): 329 - 332.
- [5] Brouckaert C J, Buckley C A. The use of computational fluid dynamics for improving the design and operation of water and wastewater treatment plants [J]. *Water Sci Technol*, 1999, 40: 81 - 89.
- [6] Matko T, Fawcett N, Sharp A, *et al* Recent progress in the numerical modeling of wastewater sedimentation tanks [J]. *Trans IChemE*, 1996, 74 (B): 245 - 257.
- [7] Deininger A, Gunther F W, Wilderer P A. The influence of currents on circular secondary clarifier performance and design [J]. *Water Sci Technol*, 1996, 34: 405 - 412.

电话: (010) 62796953

E-mail: xiaoyao00@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2006 - 05 - 28