

文章编号:1000-582X(2004)03-0130-04

# 沉淀池模型的研究现状与展望\*

严晨敏<sup>1</sup>,张代钧<sup>1,2</sup>,卢培利<sup>1</sup>,李振亮<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 资源与环境科学学院,重庆 400030;

2. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室,重庆 400030)

**摘要:**对废水处理二沉池模型的研究现状进行了全面综述,重点介绍了基于固体通量理论的一维模型,以及沉降速率方程、层数等模型参数的选取。结合活性污泥模型研究进展和废水处理技术的发展方向,分析讨论了二沉池模型尚需解决的一些重要问题,指出了模型今后的研究应集中在如何建立包括生物反应过程的二沉池模型和完善对水力条件的模拟。

**关键词:**废水处理;二沉池;模型;固体通量

**中图分类号:**X703

**文献标识码:**A

二沉池是废水生物处理中的一个重要处理单元,同时具备澄清和浓缩的功能:一是对反应池出水进行泥水分离,保证出水中的悬浮物达到排放标准,二是对污泥进行浓缩、回流,使生物反应池中的微生物浓度保持在一定范围,保证废水生物处理系统的稳定运行。二沉池的运行状况对整个废水生物处理系统的处理效果有重要影响,是整个废水处理系统的重要制约因素。二沉池数学模型的研究与应用对于提高废水处理系统运行效果和控制水平、增强对系统动态行为的预测都具有重要的意义和作用。

## 1 一维模型

### 1.1 基本理论

二沉池一维模型是建立在 Kynch<sup>[1]</sup>提出的固体通量理论基础上的。模型假定在空间分布上同一水平断面处沉降颗粒物浓度相同,因此也被称为层模型。固体通量理论的一个最基本假设是:污泥重力沉降速率  $V_s$  由污泥浓度  $X$  决定,因此,可以忽略其他因素将污泥沉降速率定义为一个连续的方程。污泥沉降速率方程的建立是一维模型必须解决的核心问题。不同的研究人员提出了不同的污泥重力沉降速率方程,见表1。

表1中的沉降速率方程除 Mazzolani 方程外均以固体通量理论为基础,Mazzolani 方程则考虑了沉降颗

粒尺寸对沉降速率的影响,认为不同尺寸污泥拥有不同的沉降速率<sup>[2]</sup>。Grijnspeerd 等在用 10 组实验数据验证比较了 6 个不同的沉降速率方程后,指出无论是在稳态还是在动态情况下,Takacs 方程模拟结果与实验结果最为符合<sup>[3]</sup>。Vesilind<sup>[4]</sup>(1968)用一个指数函数方程来描述沉降速率与污泥浓度之间的关系,其中  $k, n$  为模型参数。参数  $k, n$  可以通过多次沉降实验确定,但是活性污泥系统运行条件的时变性使得污泥的沉降浓缩特性亦随时间不断变化。通常采用的多次沉降实验确定模型参数值的方法,难以满足对过程动态即时监测的要求。进一步的研究发现,污泥体积指数 SVI 与沉降参数  $k, n$  具有相关性,于是有学者提出利用 SVI 估计污泥沉降性能参数  $k$  和  $n$ <sup>[5-6]</sup>,这使得 Vesilind 方程的使用最为广泛。

表1 活性污泥的沉降速率方程

研究人员	速率方程
Vesilind(1968) <sup>[4]</sup>	$V_s = ke^{-nX}$
Dick & Young(1972) <sup>[7]</sup>	$V_s = kX^{-n}$
Takacs. (1991) <sup>[8]</sup>	$V_s = V_0 \cdot (e^{-r_1(X-X_{min})} - e^{-r_2(X-X_{min})})$
Cho. (1993) <sup>[9]</sup>	$V_s = k \frac{e^{-nX}}{X}$
Mazzolani. (1998) <sup>[2]</sup>	$V_s = fV_{s,0} + (1-f)V_s^* e^{-r_h X}$

\* 收稿日期:2003-11-08

基金项目:重庆市科委“十五”重点科技项目(7517-02)

作者简介:严晨敏(1978-),男,江苏江都人,重庆大学硕士研究生,主要从事废水处理技术与工程方面的研究。

### 1.2 一维模型方程

建立二沉池一维模型的基本思路是在垂直方向上将二沉池分割成若干个体元层，每一体元层为一CSTR，体元层内活性污泥浓度相同。图1为二沉池模型化示意图，体元层从水面到池底进行排列编号，进水口位于第*m*层。每一个体元层必须遵循物料守恒定律，对进水口以下*i*层进行物料衡算，得到*i*层污泥浓度随时间变化的离散化表达式：

$$\frac{\Delta X_i}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta Z_i} [V_{s,i} \cdot X_{i-1} - V_{s,i-1} \cdot X_i + V_d(X_i - X_{i-1})] \quad (1)$$

式中： $\Delta X_i$ 为*X<sub>i</sub>*在 $\Delta t$ 时间步长内的浓度变化； $\Delta Z_i$ 为该层层高； $V_{s,i}$ 为*i*层污泥沉降速率； $V_d$ 为进水层以下

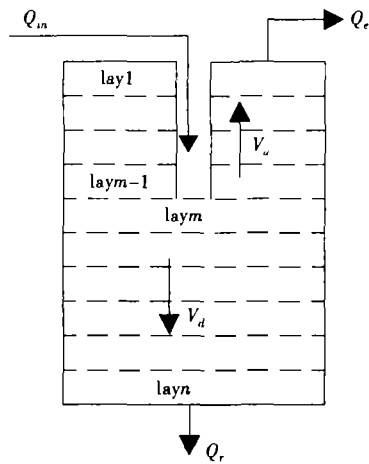


图1 二沉池系统分割示意图

水流流速。如果用连续性偏微分方程表示，则为：

$$\frac{\partial X}{\partial t} = - \frac{\partial (V_s S)}{\partial z} + V_d \frac{\partial X}{\partial z} \quad (2)$$

在二沉池中，水流的流动会在污泥颗粒周围造成涡流混合，影响沉降速率，Laikari<sup>[10]</sup>提出采用扩散系数来描述这种现象。考虑到扩散作用导致的固体通量沿池深高度方向的变化，Hamilton<sup>[11]</sup>在模型中引入了扩散系数*D*，从模拟结果来看，扩散系数的引入使得沿池深分布的污泥浓度曲线趋于平滑。

$$\frac{\partial X}{\partial t} = - \frac{\partial (V_s X)}{\partial z} + V_d \frac{\partial X}{\partial z} + D \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (3)$$

同理，对于进水口及进水口以上各层进行物料衡算得到相应的方程。

为解决模型线性不稳定问题和得到真实的仿真结果，Stenstrom<sup>[12]</sup>认为*i*层的沉降通量不能大于其下一层*i+1*层的沉降通量：

$$G_{s,i} = \min(V_{s,i} X_i, V_{s,i+1} X_{i+1}) \quad (4)$$

在污泥发生拥挤沉降的浓度范围内，特别是在0.2~2 g/L，通过沉降速率求得的沉降通量过高。为此，Takaes<sup>[8]</sup>定义了一个最大有效沉降速率的概念以避免在二沉池上层出现的线性失真。

在进行一维模型的模拟计算时，二沉池分层层数必须确定。Vitasovic<sup>[13]</sup>提出将二沉池分为10层，这也被Takaes<sup>[8]</sup>采纳。Hamilton模型的模拟结果表明，当层数大于24，模型的输出就不再随层数的变化而变化。Krebs<sup>[14]</sup>认为层数应尽可能增加，直至模型的输出对层数不再敏感。Jeppsson和Diehl<sup>[15]</sup>建议为得到一个比较精确的模拟结果，模型至少将二沉池分为30层。值得注意的是模拟结果并不仅仅受层数大小的影响，模型选择的算法也是一个重要因素。由此可见，层数的选择很大程度上取决于模型的具体应用。

### 2 二维、三维流场模型

与一维模型相比，二维模型的主要功能是模拟分析流场和沉淀过程。二维模型假定第一维为竖直方向，第二维为流体水平流向，在流体的第三维（垂直于第一、二维）方向流体流速与颗粒物浓度处处相同，将二沉池进行二维系统分割，先建立每一个二维网格内的机理模型，然后再综合，建立整个二沉池的二维流场模型。与一维模型相比，二维模型除了要满足固体悬浮物质量守恒方程，还需满足流体质量守恒方程，流体动量守恒方程，湍流动能守恒方程，湍流动能耗散速率方程。二沉池被分割成不连续的单元，每个单元都必须满足上述5个方程。对轴对称的圆形二沉池模拟结果显示，二维模型在描述二维断面上流体流速的分布和固体颗粒物浓度分布上具有较好的效果<sup>[16]</sup>。

三维模型的机理与二维模型类似，只是将第三维纳入模型之中。模型参数更多，模型更加复杂。与此同时，模型在描述二沉池流场方面更为全面、精确。

### 3 模型的应用

一维模型能够较好的预测二沉池的回流污泥浓度与污泥层高。在活性污泥系统中，一般通过调整污泥回流量来控制整个活性污泥系统的运行。因此，一维模型主要应用于包括反应池和二沉池的污水处理系统的控制与运行<sup>[14]</sup>。在线监测系统对污水处理系统进行监测并将原始数据传输至模拟系统，由模型对出水浓度、回流污泥浓度、污泥层高进行模拟预测，并根据预测结果

对运行参数(回流污泥量、排泥量等)进行调节,保证废水生物处理系统的稳定运行和出水的达标排放。

二维和三维模型可以模拟二沉池内流体流速的空间分布与流体之间的相互作用,主要应用于二沉池的设计与改造,例如进水口、出水口、折流板的位置与尺寸等。应用存在的主要问题是二沉池的模拟需要大量参数,计算复杂、使用不便,从而限制了模型的广泛应用。

#### 4 二沉池数学模型研究展望

经过各国学者长期的不断研究和探索,二沉池模型得到了长足的发展,并在实际应用中逐步显示出了其价值,但在二沉池的设计、运行、控制中还存在一些问题,与人们的要求还有差距。随着科学研究的进一步深入和人们对环境质量要求的不断提高,二沉池数学模型必将会有更大的发展,可能主要集中于以下2个方面。

##### 1) 生物反应过程的模拟

目前的二沉池数学模型大都没有考虑二沉池内的生物反应过程<sup>[17]</sup>,但生物反应在二沉池内必然发生,对二沉池稳定运行有着重要影响,如反硝化和污泥上浮直接影响二沉池的出水水质与回流污泥性质。因此,在二沉池数学模型中对生物反应过程进行模拟,必将提高模拟预测结果的精确性和模型的应用范围。在众多模拟生物反应的模型中,IWA(国际水协)推出的活性污泥模型ASM1、ASM2、ASM2d、ASM3已经成为国际上模拟活性污泥过程的通用平台,这些模型对废水生物处理的基本原理、反应过程进行了详尽的描述<sup>[18]</sup>。在二沉池生物反应模拟的研究中,研究人员进行了一些尝试。如Siegrist<sup>[19]</sup>对二沉池中污泥发生反硝化反应进行了模拟,Hydromantis<sup>[20]</sup>在1992年将一个简化过的ASM1模型应用于二沉池一维层模型。这使预测二沉池内的溶解氧浓度、氮气产生量、氨氮浓度成为可能。

##### 2) 水力条件的进一步完善

二沉池中的悬浮颗粒物浓度变化由对流、扩散、沉降等因素引起<sup>[21]</sup>。对流和扩散是由流体的流动决定的,很明显水力条件在二沉池行为中起着重要作用,特别是在水力条件发生瞬变时。因此,应深入分析与研究二沉池中的水力条件,以便建立更加精确适用的二维、三维水力模型。该模型应能够详尽准确地描述二沉池的各种水力情况包括死角、短路流、沟流等。

#### 5 结语

二沉池数学模型经历数十年的发展,已经从简单

数据拟合建立经验模型发展到今天的多维动态模型,其在污水处理厂设计、运行管理以及科学研究中的作用日益突出,计算机技术的进一步发展拓展了其适用空间。但在我国这一领域的研究显得滞后,当务之急是加速全国范围内的基础资料的收集和具有自主知识产权应用系统软件的开发,从而逐步缩小我国在模型研究和应用方面与国际先进水平的差距。

#### 参考文献:

- [1] KYNCH G E. A theory of sedimentation[J]. Trans Faraday Society,1952,48:166-176.
- [2] MAZZOLANI G, PIROZZI F. Settling modeling in the numerical analysis of sedimentation tanks[A]. Proceeding of IAWQ 19<sup>th</sup> biennial international conference: Water Quality international[C], Vancouver, Canada, 1998.
- [3] GRIJSPEERDT K, VANROLLEGHEM P, VERSTRATETE W. Selection of one-dimensional sedimentation models for on-line use[J]. Water Science and Technology,1995,31(2):193-204.
- [4] VESILIND P A. Theoretical consideration: Design of prototype thickeners from batch settling test[J]. Water & Sewage Works,1968,115(7):302-307.
- [5] 黄勇,幸响付. SVI与固体通量模型参数的相关性研究[J]. 苏州城建环保学院学报,1992,5(2):1-3.
- [6] WAHLBERG E J, KEINATH T M. Development of settling flux curves using SVI[J]. Journal Water Pollution Control Federation,1988,60(12):2095-2100.
- [7] DICK R I, Young K W. Analysis of thickening performance of final settling tanks[A]. Proceeding of the 27th Purdue industrial Waste Conference[C], Lafayette: Purdue University,1972,33-54.
- [8] TAKACS I, PATRY G G, NOLASCO D. Dynamic model of the clarification-thickening process[J]. Water Research, 1991,25(10):1263-1271.
- [9] COH S H, COLIN F, SARDIN M, et al. Settling velocity model of activated sludge[J]. Water Research, 1993, 27(7):1237-1242.
- [10] LAIKARI H. Simulation of the sludge blanket of a vertical clarifier in activate sludge process[J]. Water Science and technology,1989,21(6-7):621-629.
- [11] HAMILTON J, JAIN R, ANTONIOU P, et al. Modeling and pilot-scale experimental verification for predenitrification process[J]. Journal of Environmental Engineering, 1992,118(1):38-55.

- [12] STENSTROM M K. A dynamic model and computer compatible control strategies for wastewater treatment plants [D]. South Carolina;Clemson University,1975.
- [13] VTASOVIC Z, ANDREWS J F. Control system for activated sludge processes[J]. Water Pollution Research Journal of Canada, 1989,24(4):479-496.
- [14] KREBSP. Success and shortcoming of clarifier modelling[J]. Water Science and Technology, 1995,31(2):181-191.
- [15] JEPPSSON U, DIEHL S. An evaluation of a dynamic model of the secondary clarifier[J]. Water Science and Technology, 1996,34(5-6):19-26.
- [16] EKAMA G A, BARNARD J L, GUNTHER F W, et al. Secondary Settling Tanks; Theory, Modelling, Design and Operation[M]. London: The international Association on Water Quality,1997.
- [17] WATSON B, RUPKE M, TAKACS I, et al. Modelling of full-scale wastewater treatment plants: how detailed should it be[J]. Water Science and Technology, 1994,30(2):141-147.
- [18] 国际水协废水生物处理设计与运行数学模型课题组. 张亚雷. 活性污泥数学模型[M]. 李泳梅译. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [19] SIEGRIST H, KREBS P, BUHLER R. Denitrification in secondary clarifiers[J]. Water Science and Technology, 1995,31(2):205-214.
- [20] HYDROMANTIS, GPS - X Technical Reference [M]. Hamilton: Hydromantis Inc, 1992.
- [21] VITASOVIC Z, JI Z, MCCORQUODALE J A, et al. A Dynamic Solids Inventory Model for Activated Sludge Systems [A]. In: Proceedings of Water Environment Federation's annual technical conference (WEFTEC 94) [C]. Chicago: Water Environment Federation, 1994:129-140.

## The Study and Prospect of the Secondary Clarifier Models in Wastewater Treatment

YAN Chen-min<sup>1</sup>, ZHANG Dai-jun<sup>1,2</sup>, LU Pei-li<sup>1</sup>, LEE Zhen-liang<sup>1</sup>

(1. College of Resource & Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Key Laboratory for the Exploitation of South-western Resources & the Environmental Disaster Control Engineering under the State, Ministry of Education, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The paper reviews the research status of the secondary clarifier model from one-dimensional model to three-dimensional model. The one-dimensional model based on solid flux theory was outlined by discussing how to choose model parameters such as settling velocity function and the number of layers. Based on the achievement of activated sludge model and the development of wastewater treatment technology, it is suggested that the development of the secondary clarifier model should focus on the establishment of some clarifier model including biological processes and the enrichment of hydraulics phenomena modeling.

**Key words:** wastewater treatment; the secondary clarifier; models; solid flux theory

(编辑 姚飞)