

沉淀池数值模拟技术的研究进展与评论

刘百仓^{1,2} 白玉华³ 任春梅³ 王南威³ 马 军⁴

(1 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065; 2 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065;
3 中国市政工程西南设计研究院, 成都 610081; 4 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要 在水处理应用当中的沉淀池数值模拟研究近些年取得了很大的进展。自 20 世纪 70 年代, 国外的研究人员开始进行许多沉淀池场方面的试验研究与数值模拟工作, 在试验测量方面进行了原型池与模型池的测量, 包括对速度场与浓度场都进行了许多的测量工作。国内于近几年也开始开展一些数值模拟研究工作, 但试验测量方面的工作几乎没有。数值模拟技术尚未能很好地发展到实际工程应用的阶段。对模型的最新进展、所需解决的关键性问题进行了总结。

关键词 沉淀池 计算流体动力学 湍流 沉降模型

Development and comments on numerical simulation of sedimentation tanks

Liu Baicang^{1,2}, Bai Yuhua³, Ren Chunmei³, Wang Nanwei³, Ma Jun⁴

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Southwest Municipal Engineering Design and Research Institute of China, Chengdu 610081, China; 4. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In the field of water treatment theory study, the numerical research on sedimentation tank has made great progress recently. Since 1970s, some foreign researchers have started to conduct many numerical simulation and field measurements work on sedimentation tanks, including the velocity and concentration field measurements. In domestic, some numerical simulation work has been conducted in recent years. However, there is almost no measurement work. The numerical modeling technique has not arrived the stage of practical engineering application. Finally, the latest progress in model and some key problems that need to solve were summarized.

Keywords: Sedimentation tanks; Computational fluid dynamics; Turbulence flow; Settling model

随着我国经济的迅速发展, 环境污染问题逐渐突出, 尤其是近几年来我国水环境污染日益严重, 全国各地不断兴建污水处理厂, 而沉淀池是污水处理过程中不可缺少的一个重要环节, 目前对沉淀池的设计, 仍然依据理想沉淀模型^[1], 通过溢流率及停留时间进行设计, 而这种假设不能反映实际情况, 如沉

淀池内颗粒污染物在沉降的过程中沿水流流动方向浓度的变化, 进出口处流速的分布, 风速以及挡板高度对沉淀效果的影响, 在不同的季节絮体沉降的特性也有所不同, 如设计不当还会存在短流现象。近年来利用计算流体动力学实现沉淀池优化设计及运行状况分析方面的研究成为热点关注的问题。

不同类型的沉淀池各自的优势如何, 适用于什么样的条件, 虽然有定性的依据, 但尚难以量化。因此设计过程中, 常常未能很好地结合当地的特点,

教育部重大项目培育基金资助项目(705013); 水资源与水电工程科学国家重点实验室开放研究基金资助项目(2009B055); 城市水资源与水环境国家重点实验室开放研究项目(08UWQA04)。

选取合适的参数。实验室研究时通过烧杯搅拌试验来模拟实际条件是目前常采用的办法,这种全场平均的方法通常会产生较大的偏差。近些年来,数值模拟技术越来越得到广泛应用,国外在沉淀池流场及污染物的扩散、传质、沉淀及设计优化工作方面开展了许多工作,尤其是温度对沉淀池流场的影响是目前的热点问题。而国内近几年对沉淀池流场方面的研究逐渐增多。

1 速度及浓度场的研究

对沉淀池内沉淀情况的考察,通常采用烧杯搅拌试验的方法。这是对沉淀池全场进行平均简单而有效的方法,然而在工程实际中,沉淀池的运行受很多因素的影响,如进出口形式、密度回流、风速及降雨等。对这些问题的研究,通过烧杯搅拌试验是无法完成的。因此有必要对沉淀池内速度及浓度场进行更为深入的研究。

主要通过场测量和数值计算法揭示流体流动的机理。沉淀池流场及浓度场的测量可以利用 PIV (Particle Image Velocimetry)^[2~4]、LDV (Laser Doppler Velocimetry)^[5~9]、ADV (Acoustic Doppler Velocimeter)^[10~12] 等仪器;计算流体动力学发展得相当迅速。而且应用的范围也极为广阔,在水处理过程中正在以前所未有的速度向前发展,对许多试验现象及机理分析提供了非常有用的帮助。

从 20 世纪 70 年代开始,国外的研究人员进行许多沉淀池场测量方面的试验研究与数值模拟工作。具有代表性的有,试验方面, Larsen^[13] 利用超声测速技术对一些原型池及模型进行了大量的测量工作, Imam^[14] 利用激光多普勒测速技术对模型池进行了测量。Lyn 和 Rodi^[15] 在沉淀池内无挡板、单向挡板及双向挡板条件下进行了流场测量。Deininger 等人^[16] 对圆形二沉池内的速度与浓度场进行了测量。Dahl 等人^[17] 对二沉池模型进行了测量。Kim 等人^[18] 利用雷达示踪技术对沉淀池内水流流动特性进行了测量。对于二沉池,当入口处污染物浓度高于池内水体的浓度时,易形成密度回流,导致分层。van Marle 和 Kranenburg^[19], Bretscher 等^[20] 通过试验发现三层甚至四层的流动结构。

在数值计算方面, Imam 等人^[21] 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,未考虑密度流的影响。Celik 和 Rodi^[22] 开始采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行模拟工作,在此之后国外的研究工作均采用湍流模型,湍流模型更符合实际情况。Adams 和 Rodi^[23] 指出示踪剂的浓度场预测准确程度主要受到流场预测的准确性影响,同时也比较了不同数值离散格式对结果准确性的影响。Stamou 等人^[24] 对加拿大安大略洲 Sarnia 市的沉淀池进行了流场的计算,指出对于原型池的预测存在一定的偏差,主要是做二维简化与模型池简化过程中产生的。对于沉淀池内低悬浮污染物 (SS) 浓度时,一般 $SS < 200 \text{ mg/L}$, 采用文献^[24] 中的模型简化方法能得到较好的结果。

对于较高悬浮污染物(SS)浓度的情形, Devantier 和 Larock^[25] 利用 Galerkin 有限元方法模拟了二沉池并考虑了浮力在垂直方向上的影响。Lyn 等人^[26] 考虑了密度流(density current)的影响并提出一个简单描述絮凝过程的模型。Zhou 和 McCorquodale^[27] 使用 Takács 等人^[28] 的污泥沉降公式考虑了沉淀后在池底的再悬浮过程并用混合差分进行了求解。Lakehal 等人^[29] 模拟流场时考虑了活性污泥的流变特性。Mazzolain 等人^[30] 提出了一个通用化的沉降模型,该模型考虑了低浓度区的沉速和高浓度区抑制沉淀的沉速。Lainé 等人^[31] 使用计算流体动力学商用软件 Fluent 对絮凝沉淀池内的流动特性进行了模拟。McCorquodale 和 Zhou^[32] 对沉淀池在不同水力负荷和固体负荷时的运行进行了模拟分析。二沉池内的沉降过程非常复杂,包括自由沉降、絮凝沉降、区域沉降及压缩沉降,对重力沉降速率的描述有不同的表达式。将这样的表达式耦合传质沉降方程中,可求得流速场与浓度场,从而通过数值计算即可对二沉池在不同条件下的运行特性进行分析,进行工况比较来优化设计。

目前,国内在此方面的研究工作也开始增多,曾光明等人^[33,34] 利用涡量-流函数方法对沉淀池悬浮物分布进行了模拟,求解过程中利用的是差分方法。蔡金傍等人^[35] 采用三角形有限单元离散方法并使用了 $k-\varepsilon$ 湍流模型对沉淀池进行了模拟。郭生昌等人^[36] 利用层流模型对沉淀池内流速场进行了数值模拟。杨开等人^[37] 也利用有限元方法通过数值模拟确定集水槽长度。屈强等人^[38] 利用 Fluent 软件

中的 $k-\varepsilon$ 湍流模型分析了两种类型沉淀池内水流的流态,指出折流式沉淀池内的流态不如尺寸相同的平流式沉淀池的水流特征。屈强等人^[39]利用 Fluent 软件中的 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型又对平流式初沉池内的水流流态进行了数值模拟。何国建、汪德耀^[40]考虑了悬浮物沉降引起水体密度的变化,使用 $k-\varepsilon$ 湍流模型对悬浮物及水流的运动进行了模拟。蔡金傍等人^[41,42]对沉淀池的几何参数进行了分析与优化。严晨敏等人^[43]对沉淀模型进行了综述。屈强等人^[44]对辐流式二沉池使用改进的 RNG $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型和混合物模型进行了模拟。赵金保、杨海真^[45]做一维简化对二沉池内的污泥浓度进行了模拟。张明星等人^[46]对计算流体动力学在二沉池优化设计中的应用进行了综述。彭杨等人^[47]对异重流进行了二维数值模拟。杨红、潘光在^[48]在验证 $k-\varepsilon$ 湍流模型的基础上,对大禹渡沉砂池内水流的运动特性进行了研究。刘百仓等人^[49]应用常湍流粘性系数模型,求解方法为混合有限分析解法对 Imam 等人的模型池进行了一系列的模拟并与试验结果吻合良好。刘百仓等人^[50]利用稀疏颗粒模型对带翼片斜板沉淀池内颗粒沉降的轨迹进行了模拟,对平流式沉淀池数值模拟技术进行了较为全面的检验^[51]。

2 温度对流场的影响

某水厂使用地表水源,夏季时常出现运行效果不好的现象,Lainé 等人^[31]发现,来流水温常高于池内水温,采用 Fluent 对运行情况分析发现对运行效果产生不利影响的主要原因是温度。由于温差产生的浮力流,使得水流在池内的停留时间缩短。密度流受多种因素的影响,如污染物浓度、温差及池体几何形状等,几种因素同时作用下,其内在的机理十分复杂。Athanasia 等人^[52]利用计算流体动力学软件 Fluent 分析了高温水进入二沉池内低温水时的流场特性及对处理效果的影响,1℃的温差就会产生密度差流,Taebir Harandy 和 Schroeder^[53]通过试验对二沉池内密度流的原因进行了分析,指出上述影响因素中温差是最主要原因,Taebir Harandy 和 Schroeder^[53]与 Zhou 和 McCorquodale^[54]指出仅 0.2℃的温差就能产生密度流。Zhou 等人^[55]对热水进入相对较冷的池体水及无温差情形进行了对比

研究。Kim 等人^[56]得出结论温差密度流与浓度差密度流在初始阶段具有相似的流动结构。

对沉淀池的运行来说,温度是其中一个重要的影响因素,一直未得到重视。Lau^[57]指出温度对同向沉淀速度有显著的影响。Wells 和 LaLiberte^[58]也指出池内温度降低,沉降速率变慢。此时,可降低运行负荷或通过改变混凝剂的投药量来改善沉淀条件。

3 沉降模型的研究

3.1 沉淀的类型

沉淀的类型分为四类,自由沉淀(Discrete Particle Settling)、絮凝沉淀(Flocculant Settling)、拥挤或区域沉淀(Hindered or Zone Settling)与压缩沉淀(Compression Settling),在实际应用中,是不可能完全符合理想的自由沉淀的,水处理构筑物中,在污染物浓度较低时认为颗粒物对流场不产生影响,一般可以做自由沉淀的假定。沉淀池内不同区域污染物浓度不同,所发生的沉淀类型也有所不同,对四种沉淀的描述都有理论或经验公式,初次沉淀池中主要发生自由沉淀,二沉池中主要发生拥挤沉淀或区域沉淀。

3.2 絮凝沉降速率

通过投加化学药剂进行絮凝沉淀,而将水中的杂质颗粒去除,是广泛采用的方法。絮凝过程中形成的絮体形状不规则,而且是渗水性的,其沉淀速度与自由沉淀存在区别。对于不规则的聚合物的沉淀速度,试验测定值平均比 Stokes 定律计算值大 4~8.3 倍(Johnson 等人^[59])。不同尺寸、不同类型的颗粒物在水中会相互作用,如相互碰撞,在水流不同运动特点的水体中结果也是不同的,它们相互作用后的沉淀速度会发生变化^[60~61]。可将污水中颗粒分为如下几类:①可沉淀 $>100\mu\text{m}$;②超胶体 $1\sim100\mu\text{m}$;③胶体 $10^{-3}\sim1\mu\text{m}$;④溶解物 $<10^{-3}\mu\text{m}$ 。无絮凝剂投加的情况下,沉淀只能去除①与部分②。投加絮凝剂可以改变颗粒的分布,产生较大的絮体,从而使尺寸很小部分的颗粒通过吸附、静电等作用粘附在絮体上通过沉淀而使其去除。

3.3 污泥沉降速率

二沉池中的主要沉降是拥挤沉降或区域沉降,其沉降速率遵从固体通量理论,沉降速率与污泥浓

度有关,用于描述它的公式有 Vesilind^[64] 公式和 Cho^[65] 公式等,应用最多的是 Vesilind 公式。Vesilind 公式的参数可以直接通过活性污泥的沉降试验得到,也可以通过它们和污泥沉降性能参数的经验关系式得到^[66~69]。

$$V_s = V_0 e^{-\alpha X} \quad (1)$$

式中 V_s ——悬浮物的沉淀速度;

V_0 ——最大沉淀速度;

α ——模型参数;

X ——悬浮物浓度。

由于四种类型的沉淀在二沉池中都存在,为了使表达式更好地表述二沉池内的沉淀过程, Takács^[28] 在 Vesilind 速率公式的基础提出一个新的污泥沉降速率公式,该公式不仅可以描述区域沉降,而且选取合适的参数也可以描述低污染物浓度的沉降速率,从而得到了广泛的应用。Grijnspeerd^[70] 通过 10 组试验数据,对 Dupont 和 Henze^[71] 公式、Otterpohl 和 Freund^[72] 沉降速率公式及 Takács^[28] 公式进行了对比研究,结果表明采用 Takács 公式可得到最理想的结果。Zhang 等人^[73] 对二沉池内活性污泥的沉淀速度进行了描述。

对于污泥浓度更高的压缩沉降,机理更复杂,其沉降速率不仅和污泥浓度有关,还和其他很多因素有关,如污泥特性(孔隙率、渗透率等)及压力等因素。在大多数的二沉池模型中,由于区域沉降可测,区域沉降速率公式往往直接应用到压缩沉降过程。如 Härtel^[74] 通过引入一个修正因子,使 Vesilind 表达式能较好地描述压缩沉降。Clercq 等人^[75,76] 将这种描述完整沉降过程的 Vesilind 公式应用于二沉池一维通量模型的研究。

对二沉池内的流场模拟,浓度方程中需要包含污泥沉降速率的表达式,沉降速率表达式仍为污泥浓度的函数,因此将沉降速率耦合到浓度方程中进行求解,可以得到二沉池内的流场,污染物的浓度场^[32]。

如 Ekama 和 Marais^[77] 通过二维水动力学模型评价了一维通量理论对二沉池设计的适用性。Chancelier 等人^[78] 对估计沉淀速度过程与方法进行了总结与分析。Chancelier 等人^[79] 建立了一维非线

性动力学模型研究二沉池并与试验结果进行比较。Bai 和 Lung^[80] 基于 Environmental Fluid Dynamics Code(EFDC) 模型提出了模拟 fecal 细菌沉积过程的模型。Demir^[81] 采用两阶段非线性回归的通用方程来表达沉淀效率。Sterling Jr. 等人^[82] 研究了在河口及海岸环境下,不同碎片的絮凝模型。Podsechin 等人^[83] 用直接搜寻优化方法来估计模型参数,并指出沉淀速度对模型输出的重要影响。McNair 等人^[84] 在湍流水体中采用随机分散模型来预测颗粒物的轨迹。Brach-Papa 等人^[85] 记录了沉淀池内随时间变化颗粒物浓度,对不同颗粒组的质量份额及沉淀速度进行了数值分析。Usher 和 Scales^[86] 预测稳态浓缩过程,并考虑了材料特性及悬浮物的网状结构。Mazumder 和 Ghoshal^[87] 针对均一沉淀负荷情况,计算了速度及浓度的剖面并与试验结果吻合良好。

4 优化设计的研究

通过计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)的方法可以对沉淀池内各种复杂的环境条件进行模拟,因此,在数值模拟的基础上结合必要的试验,可以对沉淀池进行优化设计(Optimized Design),提出更为合理的设计参数。Huggins 等人^[88] 指出用 CFD 软件 Fluent 做设计是一种高效、快速和节省的工具。Bretscher 等人^[20] 对终沉池(Final Settling Tanks)入口结构进行了初步的改善,以提高其运行效率。Krebs 等人^[89] 对沉淀池入口形式设计也提出了参考意见,初沉池与二沉池的优化设计过程不同,初沉池的入口设计主要为了消能,而二沉池设计需要考虑密度流(Density Current)以及活性污泥(Activated Sludge)的特性对流场的影响。Valioulis 和 List^[90,91] 建立了考虑絮凝(Flocculation)过程的模拟方法,将其应用于沉淀池的设计。Goula 等人^[92] 利用 CFD 的方法分析加入挡板后可以明显提高沉淀池的处理效率。

综上,可见国内在沉淀池数值模拟方面所开展的工作,仍主要集中在模拟沉淀池内湍流流场的研究,与国外研究人员的工作相比尚未考虑到絮凝过程、密度回流及高浓度时污泥流变特性的影响,未将高浓度污染物的沉降模型耦合到湍流流

场的研究,因此虽有少量的优化设计工作,但所进行的优化工作其适用性未得到推广。在数值模拟方面,随着计算速度的提升、数值方法的发展,在今后开发出三维湍流模型且考虑到絮凝过程、密度回流、高浓度污泥流变特性等方面成为可能;考虑到风速场的影响,温度等因素,将某些化学与生物的过程模型耦合到上述构建的模型框架中成为可能;另外结合自动控制技术,对沉淀池进行控制也成为今后可能的发展方向。

5 结论

(1) 近几年虽然国内越来越多的研究者开展了沉淀池流态模拟的工作,但由于计算流体动力学的复杂性,及数值模拟对试验的依赖性,所开展的工作还很局限,限制了它的进一步发展,如现有的试验资料并不丰富,许多研究者依据的计算模型所得的数值计算结果没有经过试验结果的验证,因而某种程度上存在计算结果不符合实际物理过程的可能性。

(2) 由于浓度或温差引起的密度回流,风速对流场的影响,絮凝过程及池体几何形状等因素对流场的影响越来越全面地包括在数值模拟的过程中,CFD 可以越来越准确地模拟沉淀池内实际的流场特性,进而优化设计。实现这样的目标,还需开展大量的研究工作。

(3) 对沉淀池场方面的信息进行准确测量,包括原型及模型的测量,将是具有重要意义的工作。

参考文献

- Hazen A. On sedimentation. Trans, ASCE, 1904, 53: 45~ 71
- Adrian R J. Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics. Annu Rev Fluid Mech, 1991, 23: 261~ 304
- Meselhe E A, Peeva T, Muste M. Large scale particle image velocimetry for low velocity and shallow water flows. J Hydraul Eng, ASCE, 2004, 130(9): 937~ 940
- Martin J R, Steinberg Jr L J, Michaelides E E. Determination of bed shear stress by digital particle image velocimetry in turbulent open channel flow. Joint Conference in Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management, Minneapolis, MN August, 2000
- Logory L M, Hirs A, Anthony D G. Interaction of wake turbulence with a free surface. Phys Fluids, 1996, 8(3): 805~ 815
- Akins R E, Hottle N E, Reinhold T A. Laser doppler velocimeter measurements of flow field around a bluff body. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 77-78: 457~ 465
- Schneider M E, Goldstein R J. Laser doppler measurement of turbulence parameters in a two dimensional plane wall jet. Phys Fluids, 1994, 6(9): 3116~ 3129
- Choo Y J, Kang B S. The velocity distribution of the liquid sheet formed by two low-speed impinging jets. Phys Fluids, 2002, 14(2): 622~ 627
- Wang P, Bai X S, Wessman M, et al. Large eddy simulation and experimental studies of a confined turbulent swirling flow. Phys Fluids, 2004, 16(9): 3306~ 3324
- Gardá C M, Cantero M I, Niño Y, et al. Turbulence measurements with acoustic doppler velocimeters. J Hydraul Eng, ASCE, 2005, 131(12): 1062~ 1073
- Rehmel M. Application of acoustic doppler velocimeters for streamflow measurements. J Hydraul Eng, ASCE, 2007, 133(12): 1433~ 1438
- Kawanishi K, Shiozaki R. Turbulent effects on the settling velocity of suspended sediment. J Hydraul Eng, ASCE, 2008, 134(2): 261~ 266
- Larsen P. On the hydraulics of rectangular settling basins. Report 1001, Dept of Water Resour Eng Lund Institute of Technology, Univ of Lund, Sweden, 1977
- Imam E. Numerical modeling of rectangular clarifiers. Ph D Thesis, University of Windsor, Windsor, Ontario, Canada, 1981
- Lyn D A, Rodi W. Turbulent measurements in model settling tank. J Hydraul Eng, ASCE, 1990, 116(1): 3~ 21
- Deininger A, Holthausen E, Wilderer P A. Velocity and solids distribution in circular secondary clarifiers: Full scale measurements and numerical modelling. Water Res, 1998, 32(10): 2951~ 2958
- Dahl C, Larsen T, Peterson O. Numerical modeling and measurement in a test secondary settling tank. Water Sci Technol, 1994, 30: 219~ 228
- Kim H S, Shin M S, Jang D S, et al. Study of flow characteristics in a secondary clarifier by numerical simulation and radioisotope tracer technique. Appl Radiat Isot, 2005, 63: 519~ 526
- van Marle C, Kranenburg C. Effects of gravity currents in circular secondary clarifiers. J Environ Eng, ASCE, 1994, 120(4): 943~ 960
- Bretscher U, Krebs P, Hager W H. Improvement of flow in final settling tanks. J Environ Eng, ASCE, 1992, 118(3): 307~ 321
- Imam E, McCorquodale J A. Simulation of flow in rectangular clarifiers. J Environ Eng, ASCE, 1983, 109(3): 713~ 730
- Celik I, Rodi W. Simulation of hydrodynamic and transport characteristics of rectangular settling tanks. Proc, Euromech 192: Transport of suspended solids in open channels, Neubiberg,

- Munich, Germany, 1985. 129~ 132
- 23 Adams E W, Rodi W. Modelling flow and mixing in sedimentation tanks. J Hydraul Eng, ASCE, 1990, 116(7): 895~ 913
- 24 Stamou A I, Adams E A, Rodi W. Numerical modelling of flow and settling in primary rectangular clarifiers. J Hydraul Res, IAHR, 1989, 27(5): 665~ 682
- 25 DeVantier B A, Larock B E. Modeling sediment induced density currents in sedimentation basins. J Hydraul Eng, ASCE, 1987, 113(1): 80~ 94
- 26 Lyn D A, Stamou A I, Rodi W. Density currents and shear induced flocculation in sedimentation tanks. J Hydraul Eng, ASCE, 1992, 118(6): 849~ 867
- 27 Zhou S, McCorquodale J A. Modeling of rectangular settling tanks. J Hydraul Eng, ASCE, 1992, 118(10): 1391~ 1405
- 28 Takács I, Patry G G, Nolasco D. A dynamic model of the clarification thickening process. Wat Res, 1991, 25(10): 1263 ~ 1271
- 29 Lakehal D, Krebs P, Krijgsman J, et al. Computing shear flow and sludge blanket in secondary clarifiers. J Hydraul Eng, ASCE, 1999, 125(3): 253~ 262
- 30 Mazzolani G, Pirozzi F, d'Antoni G. A generalized settling approach in the numerical modeling of sedimentation tanks. Water Sci Technol, 1998, 38(3): 95~ 102
- 31 Lainé S, Phan L, Pellarin P, et al. Operating diagnostics on a flocculator settling tank using Fluent CFD software. Water Sci Technol, 1999, 39(4): 155~ 162
- 32 McCorquodale J A, Zhou S. Effects of hydraulic and solids loading on clarifier performance. J Hydraul Res, 1993, 31(4): 461~ 477
- 33 曾光明, 葛卫华, 秦肖生, 等. 数值模拟方法在二维沉淀池优化设计中的应用. 环境工程, 2002, 20(2): 10~ 13
- 34 曾光明, 葛卫华, 秦肖生. 污水厂二维沉淀池水流和悬浮物运动数值模拟. 中国环境科学, 2002, 22(4): 338~ 341
- 35 蔡金榜, 段祥宝, 朱亮. 沉淀池水流数值模拟. 重庆建筑大学学报, 2003, 64~ 69
- 36 郭生昌, 陈亮, 胡晋明. 平流沉淀池流场的计算及探讨. 江苏环境科技, 2003, 10~ 12
- 37 杨开, 周涛, 关凯. 确定平流沉淀池指形集水槽长度数值模拟方法. 武汉水利电力大学学报, 1999, 32(1): 78~ 79
- 38 屈强, 马鲁铭, 王红武, 等. 折流式沉淀池流态模拟. 中国给水排水, 2005, 21(4): 58~ 61
- 39 屈强, 马鲁铭, 王红武. 初沉淀内速度场数值模拟. 环境保护科学, 2006, 32(2): 8~ 10
- 40 何国建, 汪德耀. 矩形沉淀池内悬浮物沉降模拟. 清华大学学报, 2005, 45(12): 1617~ 1620
- 41 蔡金榜, 朱亮, 段祥宝. 平流式流沉池数值模拟分析. 河海大学学报, 2004, 27~ 31
- 42 蔡金榜, 朱亮, 段祥宝. 平流式沉淀池优化设计研究. 重庆建筑大学学报, 2005, 67~ 70
- 43 严晨敏, 张代钧, 卢培利, 等. 沉淀池模型 的现状与展望. 重庆大学学报, 2004, 130~ 133
- 44 屈强, 马鲁铭, 王红武. 辐流式二沉池固液两相流数值模拟. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(9): 1212~ 1216
- 45 赵金保, 杨海真. 二次沉淀池模型的研究. 工业用水与废水, 2004, 1~ 4
- 46 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. 中国给水排水, 2006, 16~ 19
- 47 彭杨, 李义天, 槐文信. 异重流潜入运动的剖面二维数值模拟. 泥沙研究, 2000, (6): 25~ 30
- 48 杨红, 潘光在. 沉沙池立面流场数值模拟研究. 泥沙研究, 2000, (2): 55~ 59
- 49 刘百仓, 马军, 黄社华, 等. 模拟沉淀池流速场的层流模型扩展性研究. 中国给水排水, 2007, 23(11): 102~ 104
- 50 刘百仓, 马军, 张素霞, 等. 带翼片侧向流斜板沉淀池内颗粒沉降过程的数值模拟. 给水排水, 2007, 33(11): 139~ 142
- 51 刘百仓, 马军, 罗麟, 等. 平流式沉淀池二维数值模拟——模型及数值计算方法的验证. 四川大学学报, 2008, 40(2): 13~ 18
- 52 Athanasia M G, Margaritis K, Thodoris D K. The effect of influent temperature variations in a sedimentation tank for potable water treatment a computational fluid dynamics study. Water Res, 2008, 42(13): 3405~ 3414
- 53 Taebi-Harandy A, Schroeder E D. Formation of density currents in secondary clarifier. Water Res, 2000, 34(4): 1225~ 1232
- 54 Zhou S, McCorquodale J A. Influence of skirt radius on performance of circular clarifiers with density stratification. Int J Numer Methods Fluids, 1992, 14(4): 919
- 55 Zhou S, McCorquodale J A, Godo A M. Short circuiting and density interface in primary clarifiers. J Hydraul Eng, ASCE, 1994, 120(9): 1060~ 1080
- 56 Kim J, Kim S, Yoon J. The evaluation of a density current experiment as a verification tool of a secondary clarifier model. Water Sci Technol, 2003, 47(12): 113~ 118
- 57 Lau Y L. Temperature effect on settling velocity and deposition of cohesive sediments. J Hydraul Res, 1994, 33: 41~ 52
- 58 Wells S A, LaLiberte D M. Winter temperature gradients in circular clarifiers. Water Environ Res, 1998, 70(7): 1274~ 1279
- 59 Johnson C P, Li X Y, Logan B E. Settling velocities of fractal aggregates. Environ Sci Technol, 1996, 30: 1911~ 1918
- 60 Li X Y, Logan B E. Collision frequencies between fractal aggregates and small particles in a turbulently sheared fluid. Environ Sci Technol, 1997, 31: 1237~ 1242
- 61 Li X Y, Logan B E. Collision frequencies of fractal aggregates with small particles by differential sedimentation. Environ Sci Technol, 1997, 31: 1229~ 1236
- 62 Li X Y, Yuan Y. Collision frequencies of microbial aggregates

- p>with small particles by differential sedimentation.
- Environ Sci Technol*
- , 2002, 36: 387~ 393
- 63 Serra T, Logan B E. Collision frequencies of fractal bacterial aggregates with small particles in a sheared fluid. *Environ Sci Technol*, 1999, 33: 2247~ 2251
 - 64 Vesilind P A. Theoretical considerations: design of prototype thickeners from batch settling tests. *Water and Sewage Works*, 1968, 115(7): 302~ 307
 - 65 Cho S H, Colin F, Sardin M, et al. Settling velocity model of activated sludge. *Water Res*, 1993, 27: 1237~ 1242
 - 66 Giokas D L, Daigger G T, von Sperling M, et al. Comparison and evaluation of empirical zone settling velocity parameters based on sludge volume index using a unified settling characteristics database. *Water Res*, 2003, 37: 3821~ 3826
 - 67 Daigger G T. Development of refined clarifier operating diagrams using an updated settling characteristics database. *Water Environ Res*, 1995, 67(1): 95~ 100
 - 68 von Sperling M, Fróes C V. Determination of the required surface area for activated sludge final clarifiers based on a unified database. *Water Res*, 1999, 33(8): 1884~ 1894
 - 69 Ozinsky A E, Ekama G A. Secondary settling tank modelling and design. part 2. linking sludge settleability measures. *Water S.A.*, 1995, 21(4): 333~ 350
 - 70 Grijpspeerd K, Vanrolleghem P, Verstrate W. Selection of one dimensional sedimentation models for online use. *Water Sci Technol*, 1995, 31(2): 193~ 204
 - 71 Dupont R, Henze M. Modelling of the secondary clarifier combined with the activated sludge model No. 1. *Water Sci Technol*, 1992, 25(6): 285~ 300
 - 72 Otterpohl R, Freund M. Dynamic models for clarifiers of activated sludge plants with dry and wet weather flows. *Water Sci Technol*, 1992, 26(5/6): 1391~ 1400
 - 73 Zhang D J, Li Z L, Lu P L, et al. A method for characterizing the complete settling process of activated sludge. *Water Res*, 2006, 40: 2637~ 2644
 - 74 Härtel L, Pöpel H J. A dynamic secondary clarifier model including processes of sludge thickening. *Water Sci Technol*, 1992, 25(6): 267~ 284
 - 75 Clercq D J, Devisscher M, Boonen I, et al. A new one dimensional clarifier model verification using full scale experimental data. *Water Sci Technol*, 2003, 47(12): 105~ 112
 - 76 Clercq D J, Devisscher M, Boonen I, et al. Analysis and simulation of the sludge profile dynamics in a full scale clarifier. *J Chem Technol Biotechnol*, 2005, 80: 523~ 530
 - 77 Ekama G A, Marais P. Assessing the applicability of the 1D flux theory to full scale secondary settling tank design with a 2D hydrodynamic model. *Water Res*, 2004, (38): 495~ 506
 - 78 Chancelier J Ph, Chebbo G, Lucas aiguier E. Estimation of settling velocities. *Water Res*, 1998, 32(11): 3461~ 3471
 - 79 Chancelier J Ph, Cohen M, Lara D E, et al. New Insights in dynamic modeling of a secondary settler-II. dynamical analysis. *Water Res*, 1997, 31(8): 1857~ 1866
 - 80 Bai Sen, Lung Wir Seng. Modeling sediment impact on the transport of fecal bacteria. *Water Res*, 2005, 39: 5232~ 5240
 - 81 Demir Ahmet. Determination of settling efficiency and optimum plate angle for plated settling tanks. *Water Res*, 1995, 29(2): 611~ 616
 - 82 Michael C Sterling Jr, James S Bonner, Andrew NS Ernest, et al. Application of fractal flocculation and vertical transport model to aquatic soft sediment systems. *Water Res*, 2005, 39: 1818~ 1830
 - 83 Podsechin V, Tejakusuma I, Schernewski G, et al. On parameters estimation in dynamic model of suspended sediments. *Journal of Hydrology*, 2006, 318: 17~ 23
 - 84 McNair J. N Probabilistic settling in the local exchange model of turbulent particle transport. *Journal of Theoretical Biology*, 2006, 241: 420~ 437
 - 85 Brach Papa C, Boyer P, Ternat F, et al. Settling classes for fine suspended particles. *C R Mecanique*, 2006, 334: 560~ 567
 - 86 Usher S P, Scales P J. Steady state thickener modelling from the compressive yield stress and hindered settling function. *Chemical Engineering Journal*, 2005, 111: 253~ 261
 - 87 Mazumder B S, Ghoshal K. Velocity and concentration profiles in uniform sediment laden flow. *Applied Mathematical Modelling*, 2006, 30: 164~ 176
 - 88 Huggins D L, Piedrahita R H, Rumsey T. Use of computational fluid dynamics (CFD) for aquaculture raceway design to increase settling effectiveness. *Aquacultural Eng*, 2005, 33: 167~ 180
 - 89 Krebs P, Vischer D, Gujer W. Inlet structure design for final clarifiers. *J Environ Eng, ASCE*, 1995, 121(8): 558~ 564
 - 90 Valioulis I A, List E J. Numerical simulation of a sedimentation basin. 1. model development. *Environ Sci Technol*, 1984, 18(4): 242~ 247
 - 91 Valioulis I A, List E J. Numerical simulation of a sedimentation basin. 2. design application. *Environ Sci Technol*, 1984, 18(4): 248~ 253
 - 92 Goula A M, Kostoglou M, Karapantsios T D, et al. A CFD methodology for the design of sedimentation tanks in potable water treatment. case study: the influence of a feed flow control baffle. *Chem Eng J*, 2008, 140(1/3): 110~ 121

○ E-mail: baicangliu@yahoo.com.cn

收稿日期: 2008-12-25

修回日期: 2009-06-15