

研究论述

平流式沉淀池中部进水流场测量与数值模拟

刘百仓^{1,2}, 陈大宏¹, 刘映祥³, 白玉华³, 马 军⁴

(1 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072 2 四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610065 3 中国市政工程西南设计研究院, 四川 成都 610081; 4 哈尔滨工业大学 市政与环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 为了深入了解与分析沉淀池内流场的特性, 采用激光多普勒测速仪 (Laser Doppler Velocimeter LDV) 对平流式模型沉淀池内中部进水情形时的流场进行了测量, 限于三维测量的难度, 初步进行了三维速度的精确测量, 实验结果表明沉淀池内不同区域存在不同程度的三维流动。采用 $k-\varepsilon$ 模型对流场进行了模拟, 计算结果与实验结果总体吻合良好。就风速对流场产生的影响进行了初步的测量及探讨, 发现风对沉淀池流场具有明显的影响, 然而建立相应的理论模型还需要进一步研究。

关键词: 沉淀池; 激光多普勒测速仪; 流场; 测量; 数值模拟

中图分类号: TU991.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9353(2010)05-0001-05
doi 10.3969/j.issn.1673-9353.2010.05.001

Measurement and modeling of rectangular primary sedimentation tanks with incoming flow at the middle of inlet

Liu Baicang^{1,2}, Chen Dahong¹, Liu Yingxiang³, Bai Yuhua³, Ma Jun⁴

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. College of Architecture and Environment, 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 order to analyze the characteristics of the flow field in sedimentation tank, Laser Doppler Velocimetry (LDV) instrument was used to measure the flow field of sedimentation tank with incoming flow at the middle of inlet. Limited to the difficulty of measuring three-dimensional velocity, a preliminary three-dimensional velocity measurement was conducted. There exists three-dimensional flow in sedimentation tank to varying degrees in different regions. The $k-\varepsilon$ model was used to conduct simulation of the model sedimentation tank, the overall results were in good agreement with experimental results. A preliminary measurement of flow field under wind speed impact was studied, and it was found that the wind could significantly affect the flow field on the sedimentation tank, however, a theoretical model should be established in the further research.

Key words sedimentation tank; Laser Doppler Velocimetry; flow field; measurement

基金项目: 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); 中央高校基本科研业务费四川大学青年教师科研启动基金资助项目 (2009SCU11046)

numerical simulation

1 研究背景

在水处理过程中依靠重力作用将水中固体颗粒分离出来的沉淀单元处理过程,在城市给水与污水处理中应用十分广泛。利用计算流体动力学(CFD)的理论对沉淀池进行模拟、优化设计,可以指导实际,是非常有用的工具。目前,国内外采用的计算模型通常是经过简化而来的,对于实际沉淀池进水口的简化如图 1 所示,可以将穿孔花墙的孔洞简化为相等进水面积的长的孔洞^[1]。这样的简化只会影响进水口附近很小的区域。

给水处理厂中的沉淀池,其计算模型的简化过程如图 2 所示,简化方法见文献[2]。因此,所计算的模型沉淀池内的污染物沉淀过程实际上是经过了四处简化而进行的。

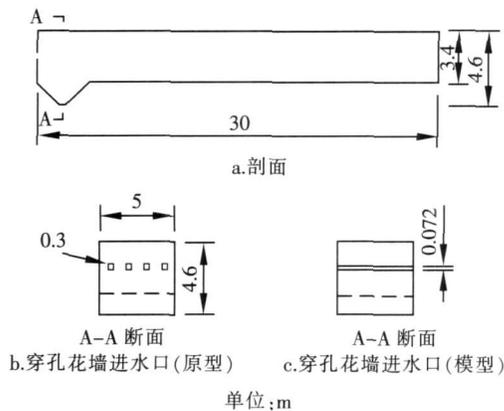


图 1 Äln hut 三级沉淀池示意

Fig 1 Äln hut tertiary sedimentation tanks

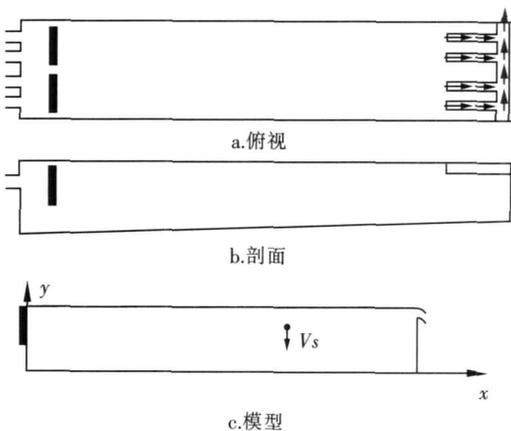


图 2 沉淀池模型的简化过程

Fig 2 Simplifying of the sedimentation tank model

将 CFD 应用于沉淀池内水流的分析,取得了重

要进展^[3-7],然而由于计算的准确性受许多因素影响,如网格的质量、数值格式、初始条件及边界条件的给定、沉降模型^[8-9]等,因此,数学模型及计算方法需经过严格的实验检验。然而不同工况的实验结果很少,Inam 等人于 1983 年利用一维激光测速技术测量了宽深比约为 1.0 的沉淀池内的水流流动,并建立了简化的数学模型^[10]。Lyn 和 Rodi^[11]采用 LDA 进行了流场的二维测量。目前所建立的模型往往由于实验资料有限,求得的数值结果缺少足够的实验验证而未能得到广泛的应用。

现阶段对不同运行工况下平流式沉淀池内水流流态的认识仍不够充分,因此笔者主要考察平流式沉淀池在不同运行工况时的流场特性,利用激光多普勒测速仪(Laser Doppler Velocimeter, LDV)对平流式沉淀池流场进行了一系列实验测量。LDV 是利用激光多普勒效应测速的仪器,其最大优点是非接触性,不干扰流场,有较高的空间分辨率和快速动态响应,测点小,可测得三维速度并判别速度方向。

2 实验装置及测量系统

2.1 实验装置

实验中可通过选择性地关闭阀门使用循环水,通过变频调速泵和阀门的开启度控制流量为 0.1~100 L/s。实验水槽宽度为 1.2 m,高度为 1.0 m,长度为 21 m。玻璃水槽边壁的厚度为 1.2 cm。实验段位于水槽中部,其长度为 2.4 m。

2.2 速度测量系统

激光多普勒测速系统位于模型沉淀池的一侧,激光来自 Innova70C 系列氩气激光发生装置,经分光器、布拉格光栅获得绿色、蓝色与紫色激光,激光传输至探头,通过玻璃侧壁测得水平、垂向与侧向速度,玻璃厚度为 1.2 cm。四束(二维测量)或六束光(三维测量)聚焦于水体中待测点,测量体直径为 5 mm,探头为 TSITLN 06-350 探头,探头固定在马达控制器上。激光图像检测模块为 PDM 100Q 流动分析单元为 FSA 350Q 探头采集数据经数据线连接至电脑,利用 FlowSizer 软件分析测量所得数据。

绿光与蓝光通过 TLN06-350 系列探头发出,其聚焦长度 FL=363 mm, k=3.97 deg 紫光通过另外一个小探头发射。绿光、蓝光和紫光的波长分别为 514.5 nm、488 nm 和 476.5 nm。实验过程中可选择打

开或关闭紫光。

3 数学模型及边界条件

3.1 数学模型

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量方程:

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i \tag{2}$$

其中 $u_i, u_j (i, j = 1, 2, 3)$ 为速度分量, f_i 为重力加速度, p 为压强, ρ 为流体密度, τ_{ij} 为湍流应力, $\tau_{ij} = \rho \nu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} k$, 其中 $\nu = C_\mu k^2 / \epsilon$

湍流动能 k 方程:

$$u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = P_k - \epsilon \tag{3}$$

湍流耗散率 ϵ 方程:

$$u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) = c_{\epsilon 1} P_k \frac{\epsilon}{k} - c_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \tag{4}$$

其中 k 为湍流动能, ϵ 为湍流耗散率, ν_t 为湍流涡粘性系数, P_k 为湍流动能产生项, $P_k = \nu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$

模型系数采用标准值: $C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, c_{\epsilon 1} = 1.3, c_{\epsilon 2} = 1.92$

3.2 边界条件

入口, 采用均一速度入口的假定:

$$u = u_0, v = 0, w = 0, k = 0, 2u_0^2, \epsilon = C_\mu^{3/4} (k^{3/2} / l_m) \tag{5}$$

其中 $l_m = C_\mu (0.5 H_m)^{1/2}$

自由表面, 垂直水面方向的速度为零, 采用刚盖假定:

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0, \phi = u, w, k, \epsilon, v = 0 \tag{6}$$

出口, 采用充分发展边界条件的假定:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0, \phi = u, k, \epsilon, v = 0 \tag{7}$$

壁面, 采用标准壁面函数法。

速度与压强解耦时采用 SIMPLE 方法, 方程求解方法为混合有限分析法^[13-14]。

4 流场的测量

4.1 中部进水时流场的二维测量

对进水口位于池子中部的流场进行了测量, 具

体实验工况参数见表 1。图 3 所示为工况 1 与工况 2 的速度测量值与数值计算结果的比较, 实验测量值与数值计算结果总体吻合良好, 所采用的计算方法及边界条件同文献[6]。图 3 b 中的第 4 第 5 个断面存在少许偏差, 可能是自由表面按刚盖假定及采用 $k-\epsilon$ 同向湍流模型而产生的。

表 1 实验工况参数

Tab 1 Experiment parameters

实验编号	进水口高度/cm	流量/(L·s ⁻¹)	池长/m	池宽/m	水深/cm	Re	平均流速/(cm·s ⁻¹)
工况 1	6	44.6	2.4	1.2	21.6	37 041	17.20
工况 2	6	6.9	2.4	1.2	18.6	5 712	3.08

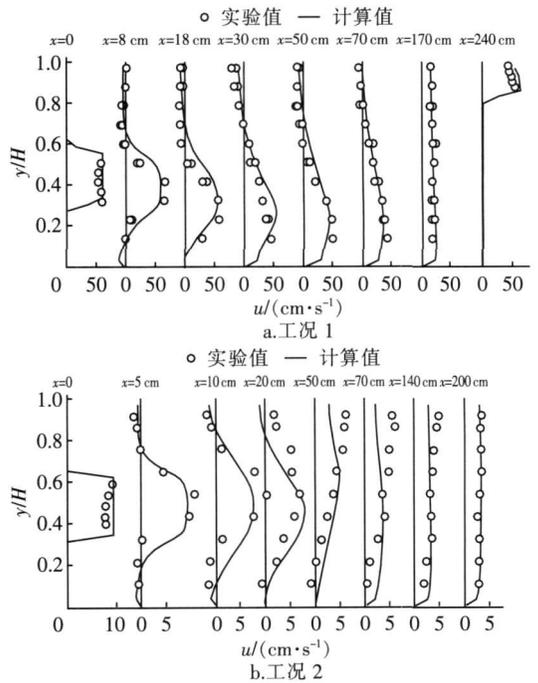


图 3 不同工况时水平速度 u 的流场

Fig 3 Velocity vector u field at different flow conditions

4.2 流场的三维测量

关于流场的三维速度测量及风速对流场的影响, 未能够进行系统的测量实验。主要是因为三维速度的测量难度大, 仪器调节困难, 紫色激光较弱, 调至较高信号率需要很长的时间, 绿光、蓝光和紫光聚焦于同一点很困难, 因此仅对少量点进行了测量, 但足以说明沉淀池内水流流动的三维效应是较明显存在的, 图 4 中速度 v 与速度 w 处于同样的级别, 均较小。10 cm $< y < 18$ cm 处未能进行测量, 因为实验过程中配套的第三维激光探头的焦聚为 14.4 cm, 激光由池底打入。如果从水面向下打入激光则

会因水面的波动,使测量结果不准确或无法得到有效的测量结果。

图 4. b 为 $x = 235 \text{ cm}$, $z = 110 \text{ cm}$ 处,即在出水堰附近的三维速度测量,速度 v 和速度 w 的数值均较明显地偏离了理想情况的 0 值。速度 v 与速度 w 的数值均为速度 u 的数值的 1/10 左右。

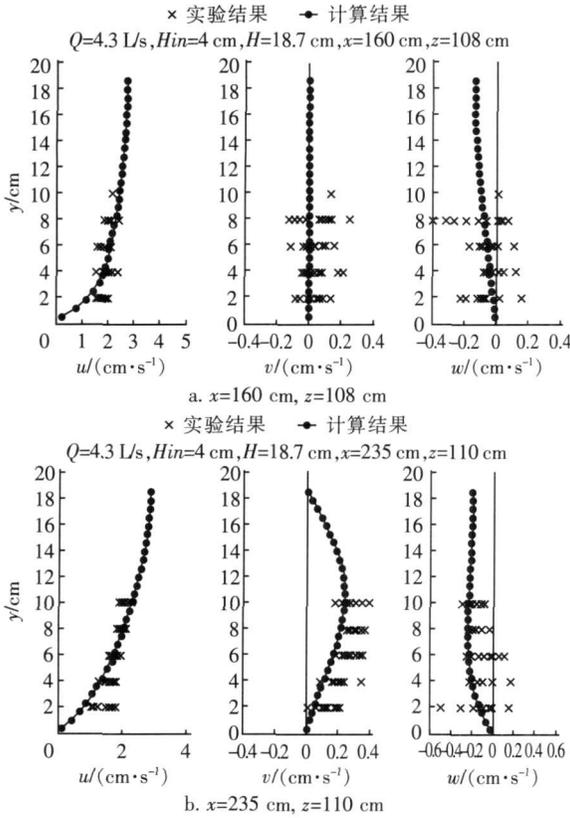


图 4 三维速度的流场

Fig 4 Flow field of three dimensional velocity vector

4.3 风速对流场的影响测量

为了说明风速对沉淀池的影响程度,在沉淀池出水堰后方放置了一台风扇,风速方向与水流方向相反,为逆流风向,选取沉淀池内池子中的某点进行测量,结果如图 5 所示。在有风的作用下,风速等级为 3 级 (3.4~5.4 m/s),沉淀池的流场结构发生了较为明显的变化。目前,对于风速对沉淀池流场的影响的理论及实验研究资料非常少,而且风速的影响会导致沉淀池水面波动,理论研究难度也特别大。同样为 3 级的风速,若模型沉淀池尺寸放大为原型,则其影响的程度也会发生变化,实际中风速可能为 5~6 级,流场变化规律需要实际测量。然而实际测量的难度很大,需要防水的探头深入水中并且操作难度大,或者需要建立完善的数学模型来模拟实际

沉淀池受风速影响时流场的变化规律。根据目前的测量结果,推测实际沉淀池受到风速的影响的程度将会比较显著,因此,建议室外水厂建设时采用挡风板来削弱风速对流场的影响,从而使运行效果更为理想,关于沉淀池内水流流场受风速的影响还有待进一步深入研究。

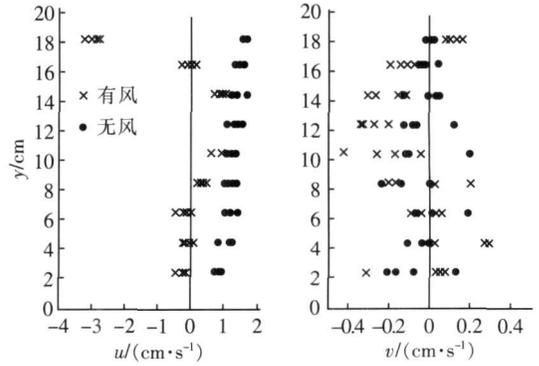


图 5 有风及无风作用时的速度

Fig 5 Velocity with and without wind

5 结论

- ① 初步进行了沉淀池流场三维速度的测量,测量结果表明沉淀池内不同区域存在不同程度的三维流动。
- ② 速度的测量结果与数值模拟结果总体吻合良好,但在中间断面存在一定的偏差,主要可能是由于自由表面按刚盖假定及采用 $k-\epsilon$ 同向湍流模型而产生的。
- ③ 风速场对流场产生较大的影响,模型尺寸放大,同样的风速等级产生的影响会缩小,研究实际情况下风速对沉淀池的影响,可能需要测量实际池子或建立完善的模拟理论与方法。如果实际工程中风速影响显著,需要加挡风板来减轻影响。

参考文献:

[1] Lyn D A, Stanou A I, Rodi W. Density currents and shear-induced flocculation in sedimentation tanks [J]. J Hydraul Eng ASCE, 1992, 118(6): 849- 867.

[2] Stanou A I, Adams E A, Rodi W. Numerical modelling of flow and settling in primary rectangular clarifiers [J]. J Hydraul Res, 1989, 27(5): 665- 682.

[3] 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.

[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] 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
- [6] Liu B C, Ma J, Huang S H, *et al*. Two-dimensional numerical simulation of primary settling tanks by hybrid finite analytic method[J]. J Environ Eng ASCE, 2008, 134(4): 273-282
- [7] Wang X L, Yang L L, Sun Y F, *et al*. Three-dimensional simulation on the water flow field and suspended solids concentration in the rectangular sedimentation tank[J]. J Environ Eng ASCE, 2008, 134(11): 902-911
- [8] Zhang D J, Li Z L, Lu P L, *et al*. A method for characterizing the complete settling process of activated sludge[J]. Water Res 2006, 40(14): 2637-2644
- [9] Guo L S, Zhang D J, Xu D Y, *et al*. An experimental study of low concentration sludge settling velocity under turbulent condition[J]. Water Res 2009, 43(9): 2383-2390
- [10] Inan E, McCorquodale J A, Bewtra J K. Numerical modeling of sedimentation tanks[J]. J Hydraul Eng ASCE, 1983, 109(12): 1740-1754
- [11] Lyn D A, Rodi W. Turbulent measurements in model settling tank[J]. J Hydraul Eng ASCE, 1990, 116(1): 3-21
- [12] Celik I, Rodi W. Simulation of hydrodynamic and transport characteristics of rectangular settling tanks[C]. Neuberg Transport of Suspended Solids in Open Channels, 1985.
- [13] 李炜. 黏性流体的混合有限分析解法[M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [14] 槐文信, 赵明登, 董汉毅. 河道及近海水流数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2005

作者简介: 刘百仓(1981-), 男, 黑龙江依安县人, 博士, 讲师, 主要从事给水与污水处理理论与工艺方面的研究。

E-mail: bcliu@scu.edu.cn

收稿日期: 2010-07-05

· 行业信息 ·

中国城镇供水排水协会科学技术委员会老水厂改造和 应急处理技术研讨会在银川召开

2010年8月18日至21日, 中国城镇供水排水协会科学技术委员会老水厂改造和应急处理技术研讨会在银川召开, 本次会议由科学技术委员会净水技术与水质监测工作部主办。本次年会共有包括51家水司、大学、科研院所等单位的120余位专业人士参加。

在会议开幕式上, 中国城镇供水排水协会科学技术委员会净水技术与水质监测工作部部长、天津市自来水集团有限公司何文杰总工程师对净水技术与水质监测工作部的工作做了年度总结, 银川市自来水总公司许海雁副总经理和王进宁副总经理分别致欢迎辞。

会议期间, 17位长期致力于供水安全、水处理方面的嘉宾针对饮用水水源水质监测、应对新水质标准的供水设施改造、饮用水安全保障、水处理新技术和新设备、供水应急处理、膜技术在老水厂改造中的应用等方面做了报告, 对新水质标准实施三年以来在老水厂改造、深度处理技术等方面的运行实例进行了探讨, 交流了饮用水处理技术与管理方面的最新研究成果。

中国城镇供水排水协会李振东会长作重要讲话, 对会议取得圆满成功表示祝贺, 代表水协向与会的各位专家和代表表示衷心感谢, 肯定了水协科技委净水技术和水质监测工作部在推动净水技术进步、改善供水水质方面所做的大量工作。李会长结合《城市供水行业2010年技术进步发展规划及2020年远景目标》具体任务要求, 就实现老水厂改造和应急技术的应用提出四点工作建议, 对水协新一届科学技术委员会的工作提出了殷切的希望, 并通报了水协目前正在进行的四件主要工作。

大会在完成了各项议程后, 于8月21日圆满落下帷幕。本次会议内容丰富, 成果丰硕, 明确了今后饮用水安全保障技术与管理方面的重点研究方向。参会代表对大会主办单位所作的各项工作给予高度评价, 并表示感谢。

本次会议的成功召开, 是进一步贯彻科学发展观, 促进供水行业和谐、可持续发展的体现, 有助于解决工艺升级改造中水质达标和提升、安全可靠运行、节能减排等问题, 充分发挥投资效益和又好又快地完成各项建设和改造任务, 必将对我国饮用水水质保障技术的提高起到重要推动作用。

(本刊编辑部 供稿)