

7-2-2020

Numerical Simulation for Influence of Baffle Length on Hydraulic Characteristics in Radial Sedimentation Tanks

Wenli Wei

State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

Zewei Zhang

State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

Yunfei Hong

State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

Yuling Liu

State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Numerical Simulation for Influence of Baffle Length on Hydraulic Characteristics in Radial Sedimentation Tanks

Abstract

Abstract: The VOF (volume of fluid) method was applied to track the free water surface, and the RNG turbulent model was used to close the two-phase flow time-averaged equations. The influence of inlet vertical baffle with different lengths on hydraulic characteristics in radial sedimentation tank was simulated and analyzed. The control equations were discretized using the finite volume method. Velocity and pressure were solved using the PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) algorithm. *The research results show that: the long length feed flow baffle model has a smaller recirculation zone, better velocity field distribution than short length baffle, and the long length feed flow baffle model is conducive to improve sedimentation efficiency. The results can provide a reference for optimization design of an actual engineering of sedimentation tanks.*

Keywords

sedimentation tank, numerical simulation, hydraulic characteristics, flow field

Recommended Citation

Wei Wenli, Zhang Zewei, Hong Yunfei, Liu Yuling. Numerical Simulation for Influence of Baffle Length on Hydraulic Characteristics in Radial Sedimentation Tanks[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(4): 826-832.

挡板长度对辐流式沉淀池水力特性影响的数值模拟

魏文礼, 张泽伟, 洪云飞, 刘玉玲

(西安理工大学 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室, 西安 710048)

摘要: 采用 VOF(volume of fluid)方法追踪自由液面, 辅以 RNG(重正化群) $k-\varepsilon$ 湍流模型封闭两相流时均方程, 模拟并分析了进水口处垂直挡板不同长度对辐流式沉淀池水力特性的影响。控制方程的离散采用有限体积法, 速度与压力耦合求解使用了压力隐式算子分裂 PISO(Pressure-Implicit with Splitting of Operators)算法。研究结果表明: 长挡板模型的回流区比短挡板小, 流速场分布更合理, 有利于提高沉淀效率。研究结果可为实际工程中沉淀池的优化设计提供参考。

关键词: 沉淀池; 数值模拟; 水力特性; 流场

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2016)04-0826-07

Numerical Simulation for Influence of Baffle Length on Hydraulic Characteristics in Radial Sedimentation Tanks

Wei Wenli, Zhang Zewei, Hong Yunfei, Liu Yuling

(State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The VOF (volume of fluid) method was applied to track the free water surface, and the RNG $k-\varepsilon$ turbulent model was used to close the two-phase flow time-averaged equations. The influence of inlet vertical baffle with different lengths on hydraulic characteristics in radial sedimentation tank was simulated and analyzed. The control equations were discretized using the finite volume method. Velocity and pressure were solved using the PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) algorithm. *The research results show that: the long length feed flow baffle model has a smaller recirculation zone, better velocity field distribution than short length baffle, and the long length feed flow baffle model is conducive to improve sedimentation efficiency. The results can provide a reference for optimization design of an actual engineering of sedimentation tanks.*

Keywords: sedimentation tank; numerical simulation; hydraulic characteristics; flow field

引言

沉淀池是污水处理过程中一种重要的处理构筑物, 辐流式沉淀池由于其排泥性能好, 出水水质高、占地面积少, 在现代污水处理厂被广泛应用。沉淀池的容量和处理能力受很多因素的影响: 固体

浓度、池子形状、沉淀机理、进口设计、挡板的位置和承载率等。

近年来国内外研究者对沉淀池做了大量的研究, 其中一部分人采用计算流体力学(CFD)技术来模拟沉淀池的运行情况。Tamayol 等^[1]研究发现挡板最好的位置是在回流区域, 用来破坏回流区, 这个结果对初沉池很有效。Razmi 等^[2]用实验和数值模拟 2 种方法来研究初沉池中挡板位置的影响。Liu 等^[3]用 2D 激光多普勒测速仪测量一个矩形沉淀池中的流场, 用研究结果优化沉淀池的设计参



收稿日期: 2014-11-26 修回日期: 2015-04-26;
基金项目: 国家自然科学基金(51178391); 陕西省科学研究计划(2014K15-03-05); 中央财政支持地方高校发展专项资金特色重点学科(106-00X101);
作者简介: 魏文礼(1965-), 男, 陕西大荔, 博士, 教授, 研究方向为环境水力学、水污染控制理论与技术。

<http://www.china-simulation.com>

数。他们的研究表明, 挡板附近的流速梯度很大, 然后流速梯度随着水流变均匀而渐渐减小。秦博^[4]通过在辐流式沉淀区内设置斜管, 对辐流式斜管沉淀池处理生活污水进行实验研究, 掌握了斜管沉淀池的构造功能及沉淀原理, 并通过改变运行因素来验证斜管沉淀池的处理效率。刘玉玲^[5-6]等采用两相流混合模型, 选取 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对辐流式沉淀池液固两相流水力特性进行数值模拟, 得到了速度场、紊动能和污泥质量浓度等参量在空间的分布规律。蔡金傍^[7]采用标准 $k-\varepsilon$ 模型对平流式沉淀池进行了数值模拟。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^[8]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, 用有限差分法求解控制方程, 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^[9]等采用多相流欧拉模型、标准 $k-\varepsilon$ 模型和 Boussinesq 假设研究了沉淀池中活性污泥和表面散热引起的异重流。屈强等^[10]利用改进的 RNG $k-\varepsilon$ 模型和简化的多相流 Mixture 模型, 对辐流式沉淀池内速度场和污泥质量浓度场进行了数值模拟研究。金光^[11]等利用计算流体动力学分析软件建立可以实现混凝沉淀的新型辐流式沉淀池数值模, 并对其可行性进行数值模拟研究, 结果表明, 在传统辐流式沉淀池内增设强化扰流和改变水流方向的反应罩和导流板, 可以使辐流式沉淀池内部流场紊动强度明显增强。

本文为了研究进水口处垂直挡板不同长度对辐流式沉淀池水力特性的影响, 建立两个三维模型: 一个进水口处设有一短挡板, 另一个进水口处设有一长挡板, 采用 FLUENT 软件进行气液两相流数值模拟。根据模拟结果分析比较了不同挡板长度对辐流式沉淀池内流线分布、速度场和紊动能等水力特性的影响。

1 数学模型

1.1 湍流模型

改进的 RNG $k-\varepsilon$ 两方程模型, 通过修正湍动粘度, 考虑了平均流动中的旋转及旋流流动情况, 提高了计算精度并可以正确处理近壁区域, 可以更好的处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动, 所以本文选用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。其控制方程^[12]如下:

连续方程:

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

式中: ρ 为流体的密度; t 是时间; x_i 是沿 i ($i=1, 2, 3$) 方向的空间坐标; u_i 是沿 i 方向的时均速度分量。

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u_i' u_j'}) + \rho g_i \quad (2)$$

式中: p 为压强; x_j 是沿 j 方向的空间坐标; μ 为流体的时均粘度; u_j 是沿 j 方向的时均速度分量; $\overline{u_i' u_j'}$ 为雷诺应力; g_i 为 i 方向的重力加速度。

雷诺应力方程:

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

式中: k 为湍动动能; μ_t 为紊动黏度; δ_{ij} 是 Kronecker 函数: $\delta_{ij} = 1$ ($i=j$); $\delta_{ij} = 0$ ($i \neq j$)。

它的紊流动能 k 和紊流动能耗散率 ε 的运输方程分别为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_m \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

其中: $\mu_m = \mu + \mu_t$; $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$; $C_\mu = 0.0845$;
 $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$; $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \eta(1 - \eta / \eta_0) / (1 + \beta\eta^3)$;
 $C_{1\varepsilon} = 1.42$; $C_{2\varepsilon} = 1.68$; $\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} k / \varepsilon$;
 $E_{ij} = 1/2(\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i)$; $\eta_0 = 4.377$; $\beta = 0.012$ 。

式(5)中: u_i 为时均速度; G_k 为由于平均速度梯度引起的紊动能 k 的产生项, μ 为时均粘度, μ_t 为紊动粘度, μ_m 是混合粘度, E_{ij} 为时均应变率, α_k , α_ε , $C_{1\varepsilon}^*$, C_μ , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, η_0 , β 都为经验常数。

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。

1.2 VOF 方法

VOF 方法^[13]是一种处理自由表面的有效方法。其基本思路是通过研究网格单元中流体和网格体积比函数 $F_w(x_i, t)$ 来确定自由面($i=1,2,3$), 追踪流体的变化而非追踪自由液面上质点的运动:

$F_w(x_i, t) = 1$, 则表示该单元被液体充满; 当 $F_w(x_i, t) = 0$, 则表示它是一个空单元; 若 $F_w(x_i, t) \in (0, 1)$, 则表示该单元部分充满液体。

描述 F_w 的控制方程为:

$$\frac{\partial F_w}{\partial t} + \frac{\partial(u_i F_w)}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

引入 VOF 后, ρ , μ 是 $F_w(x_i, t)$ 的函数, 其表示式为:

$$\rho = F_w \rho_w + (1 - F_w) \rho_a \quad (7)$$

$$\mu = F_w \mu_w + (1 - F_w) \mu_a \quad (8)$$

式中: ρ_w 和 ρ_a 分别为水和空气的密度, μ_w 和 μ_a 分别为水和空气的分子黏性系数。

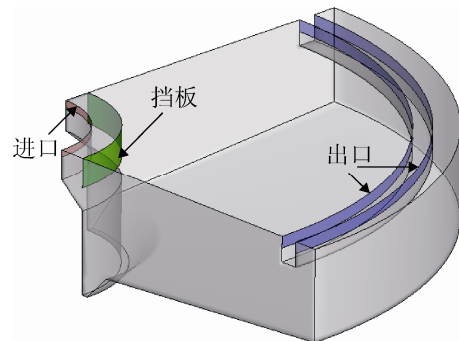
将上述方程(6)、(7)和(8)与紊流数学模型基本方程(1)至(5)联立求解, 就可得到相应各未知变量, 如压力、流速、紊动能、耗散率以及水体体积率函数等的分布。

2 模型和方法

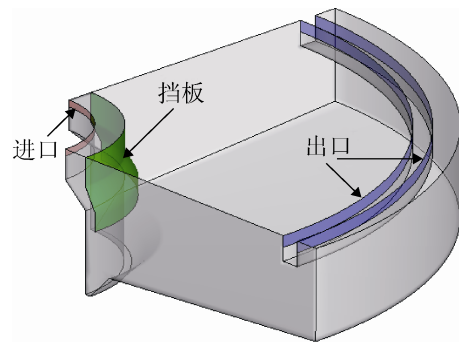
2.1 沉淀池模型

本文以中进周出式辐流沉淀池为研究对象, 它的处理能力大约是 $150\,000\text{ m}^3/\text{d}$, 沉淀池容积大约是 $2\,960\text{ m}^3$, 该沉淀池中心设环形进水口进水, 四周是圆形围堰。出口是设置在围堰内侧附近的一个环形水槽, 沉淀池中经沉淀过后的清水溢流到水槽中排出。沉淀池底部污泥斗的坡度是 12.5° , 沉淀池进水口圆环半径 $r=3.75\text{ m}$ 。

考虑到辐流式沉淀池模型的对称性, 为了降低网格数, 减少计算时间, 故取 90° 圆弧段区域进行数值模拟。经过适当的简化, 建立 2 个模型: 一个是进水口后端只有一小段垂直挡板, 高 1.3 m ; 另一个是进水口后端有一长挡板, 挡板走势跟外墙相同, 高为 3 m , 2 模型其他尺寸都一样。模型区域如图 1 所示, 模型沿径向断面尺寸如图 2 所示。为叙述方便, 下文中 2 种模型分别用短挡板模型和长挡板模型表示。



(a) 短挡板



(b) 长挡板

图 1 90° 圆弧段沉淀池区域图

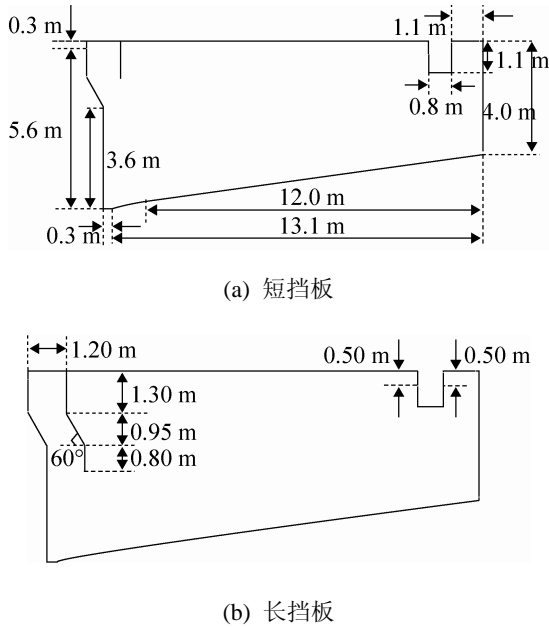


图 2 沉淀池横断面尺寸图

2.2 网格划分

采用 GAMBIT 软件建模, 对整体区域采用结构化网格来进行划分, 为了提高计算精度, 对液面附近的网格做适度加密处理。区域网格如图 3 所示, 2 个模型网格划分的方法一致, 网格总单元数为 79 872 个。

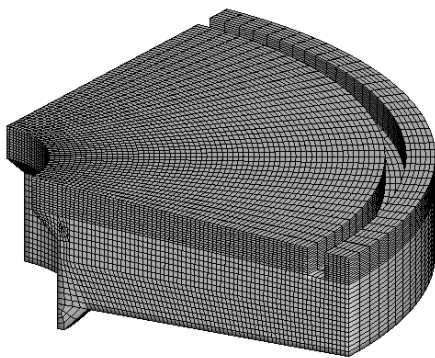


图 3 沉淀池三维计算区域网格图

2.3 边界条件

进口边界给定速度值 $v=0.085$ m/s; 出口为压力出口, 顶面与大气相通, 设为压力进口。设置进水口湍流强度为 $I=4.5\%$, 水力直径为 $D_H=2.28$, 设置出水口湍流强度 $I=5\%$, 湍动粘度比

$\mu_t / \mu = 10\%$ 。池底和边壁(包括挡板)为固体壁面, 使用标准壁面函数法确定。

采用 VOF 法追踪自由水面, 辅以 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型封闭时均流方程, 控制方程的离散采用有限体积法, 速度与压力耦合求解时使用了压力隐式算子分裂 PISO 算法, 紊动能、耗散率、动能均采用二阶迎风(Second Order Upwind)离散格式。直到进出口流量差值小于 1%, 认为计算收敛。

3 结果分析和讨论

3.1 自由液面

以长挡板模型为例, 液相组分值取 0.5 时自由液面分布如图 4 所示。从图中可以看出, 自由液面分布在挡板后的整个池内, 液面高度与出口高度齐平, 即水流从出口溢流到环形水槽中排出。而且整个流场的水面几乎水平, 没有波动。

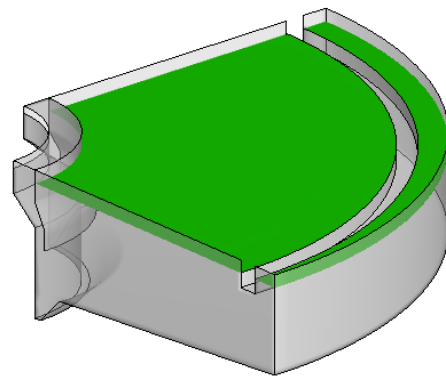
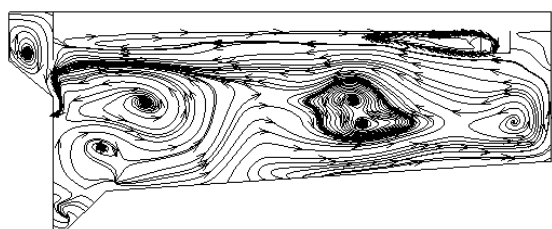


图 4 自由液面分布图

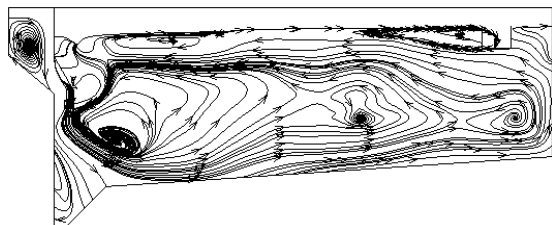
3.2 流线分布

2 个模型的 45°径向横截面流线分布如图 5 所示。图 5 中(a)图在池子左下方污泥斗中有个小回流区, 池子前部有两个大回流区, 中间部分有一个较大的回流区, 右下角有个小回流区。整个流场比较紊乱, 回流区面积大, 有效流动面积小, 流场不均匀。图(b)中回流面积明显减小, 有效流动面积比图(a)大。图(b)中左下方污泥斗中没有回流, 流线朝下, 有利于大粒径污泥沉淀在污泥斗中。图(b)

中池子前部有个小回流区，比(a)中小很多，这有利于挡板下沿出口处固液分离；而且图(b)中挡板下部流线平顺，直达池子底部，这样的水流把污泥推送到池子底部，利于污泥在池中底部沉淀下来，相比之下图(a)中挡板下部流线紊乱，不利于污泥沉淀。另外图(b)中池子中部几乎没有回流，流线均匀，流线在水平方向近似平行于池底，有利于污泥沉淀到底板上。比较两个流线图还发现，两模型池子后部和水面附近流线分布很相似，故进口处长挡板和短挡板主要对沉淀池的前部和中部流场分布有影响。



(a) 短挡板



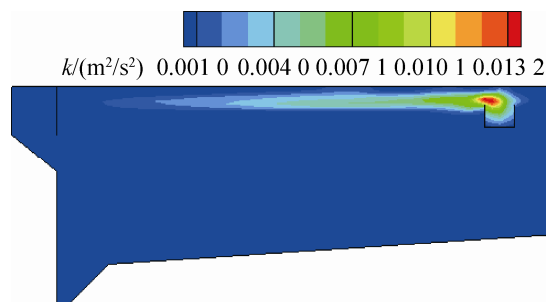
(b) 长挡板

图 5 45°径向横截面流线分布图

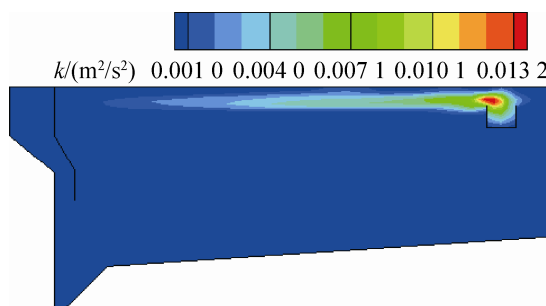
3.3 紊动能分布

两个模型流场的紊动能分布云图如图 6 所示。比较图 6 中(a)、(b)2 个图，总体而言 2 模型中紊动能分布非常相似：出口水面附近紊动能值较大，其余部分很小，几乎为 0，说明进口处挡板的不同长度，对沉淀池紊动能分布的影响很小。出水口水面附近紊动能较大是由于出口水槽的影响：池中水要越过水槽边缘溢流入水槽中，由于下层水流的推动力和水槽固壁的阻力相互作用，从而导致了出口处

水流的紊动增强。这与实际相符，也证明了模拟结果的正确性。



(a) 短挡板



(b) 长挡板

图 6 45°截面紊动能云图

3.4 流速分布

2 个模型的流速分布云图如图 7 所示。从图 7 中(a)、(b)2 个图可以看出，2 模型中池子中、后部分流速都非常小，流速大小相近，这样的流速场有利于污泥沉降到池底。但污泥斗上部区域，图(b)中的流速明显比图(a)中大，图(a)中由于挡板比较短，污水在池子前部上层就缓慢流入整个池子，整个流场速度值分布较均匀；而图(b)中由于挡板较长，挡板把进口污水导向池子底部，在污泥斗上部形成比图(a)中大的流速区。另外从流速云图中可以看出，(b)中挡板下大流速区域面积较大，几乎达到池子中部，这有利于把污水送至池子下层，使污泥快速沉淀下来，利于固液分离，从而使得出口水质提升。从这里也可以得出结论：长挡板模型比短挡板模型优越。

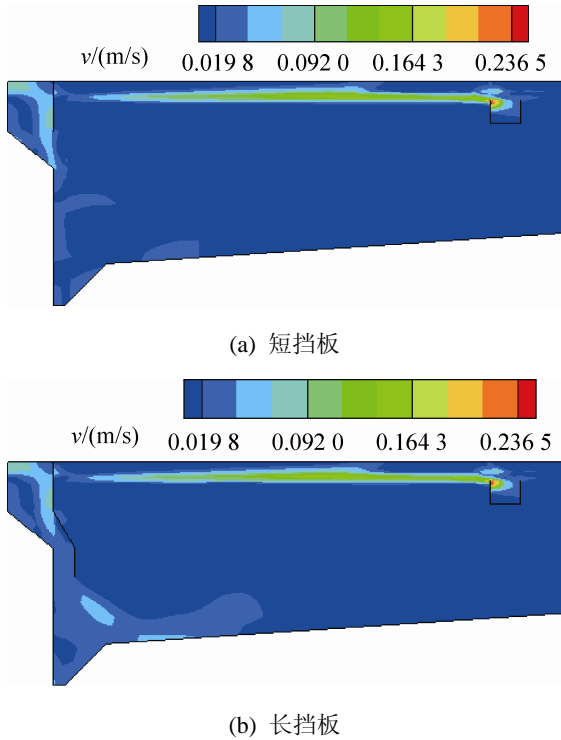


图 7 45°截面流速云图

从上面的流线和流速云图分析可知: 进口处长挡板和短挡板对流场的影响主要分布在池子前、中部分。为了更精确的分析挡板附近 2 模型中流速大小的差异, 在 45°径向横截面上布设 4 条垂直测线, 如图 8 所示, 提取测线上的流速值, 分别比较两个模型在这 4 个位置上的流速分布, 结果如图 9 所示。

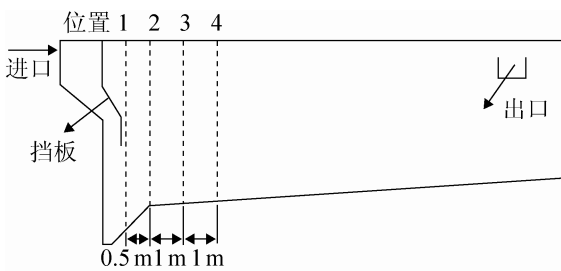


图 8 流速测线布设图

从测线流速分布图 9 可以看出, 越靠近挡板的位置, 两模型流速分布差异越大, 而且主要集中在挡板以下区域。在靠近挡板的地方, 长挡板模型挡板下沿出口处流速比短挡板模型大很多, 最大处达到将近 3 倍, 这样的流速更易把污泥输送到池子底部。在短挡板下沿和长挡板下沿之间的部分, 短档

板模型中的流速要比长挡板大一些, 这是符合实际的, 因为短挡板模型中污水出口位置比长挡板要高。这使得短挡板模型中的污泥主要流向池子的中上层, 结果短挡板模型中高浓度污泥主要集中在池中上层, 然后再慢慢沉淀, 使污泥沉淀难度增大, 从而导致出口水质降低。

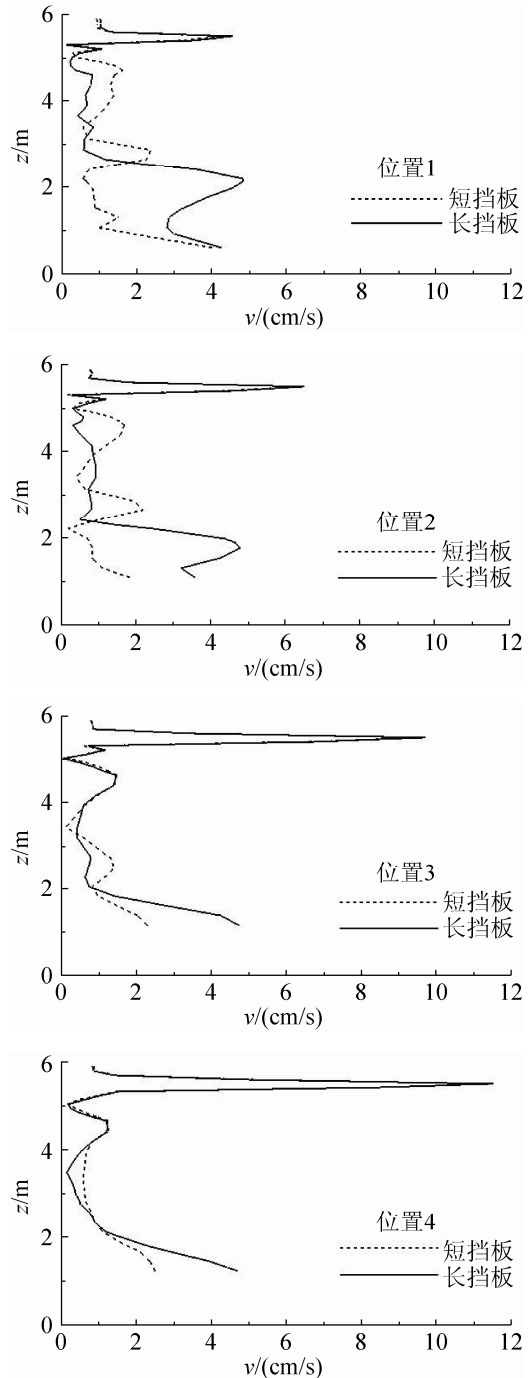


图 9 两模型流速分布比较图

分析图 9 还可知, 离挡板越远的地方, 2 模型的流速分布越相似, 基本不受进口挡板长短的影响。分析原因: 这是由于污水流过挡板下沿后, 在池中相互碰撞, 动量重新分配的结果。

4 结论

本文模拟并分析了进口处挡板不同长度对沉淀池水力特性的影响。从模拟结果可知: 进口处设置长挡板可以明显减小流场内的回流面积, 增大有效流动区域, 流速场分布更合理, 从而有利于提高沉淀池污泥处理能力。这一结论可以为现实中沉淀池的设计和运行提供参考。

此外, 从上文紊动场的分析可以看出, 出口水面附近紊动能较大, 这与实际相符, 证明了数值模拟结果的可靠性。像这种微小的紊动在模型实验中是不易观察的, 而数值模拟能清晰的显示出来, 体现了数值模拟在沉淀池设计、模拟、分析上的优势。

参考文献:

- [1] Tamayol A, Firoozabadi B, Ahmadi G. Effects of Inlet Position and Baffle Configuration on Hydraulic Performance of Primary Settling Tanks [J]. Journal of Hydraulic Engineering (S0733-9429), 2008, 134(7): 1004-1009.
- [2] Razmi A, Firoozabadi B, Ahmadi G. Experimental and Numerical Approach to Enlargement of Performance of Primary Settling Tanks [J]. Journal of Applied Fluid Mechanics (S1735-3645), 2009, 2(1): 1-12.
- [3] Liu B, Ma J, Luo J, et al. Two-Dimensional LDV Measurement, Modeling, and Optimal Design of Rectangular Primary Settling Tanks [J]. Journal of Environmental Engineering (S0733-9372), 2010, 136(5): 501-507.
- [4] 秦博. 辐流式斜管沉淀池处理生活污水的实验研究 [J]. 环境科学与管理, 2012, 37(4): 82-85.
- [5] 刘玉玲, 张沛, 魏文礼. 辐流式沉淀池液固两相流力学特性二维数值模拟 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(4): 410-412.
- [6] 刘玉玲, 张沛, 魏文礼, 等. 辐流式沉淀池液固两相流力学特性三维数值模拟 [J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(4): 25-27.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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(6): 846-852.
- [10] 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.
- [11] 金光, 张保生, 张菊, 等. 实现辐流式沉淀池混凝沉淀的数值模拟研究 [J]. 人民黄河, 2011, 33(5): 41-45.
- [12] 魏文礼, 戴会超. 紊流模型理论及工程应用 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2006.
- [13] Hirt C W, Nichols B D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries [J]. Journal of Computational Physics (S0021-9991), 1981, 39(1): 201-225.
- [14] 罗靓, 沈真, 杨胜春, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料层合板低速冲击性能实验研究 [J]. 复合材料学报, 2008, 25(3): 20-24.
- [15] 路冬, 李志凯, 融亦鸣, 等. 基于宏观各向异性碳纤维增强树脂基复合材料的切削仿真 [J]. 复合材料学报, 2014, 31(03): 584-590.

(上接第 825 页)

- [61] Wern C W, Ramulu M. Influence of fibre on the cutting stress state in machining idealized glass fibre composite [J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design (S0309-3247), 1997, 32(1): 19-27.
- [62] Mkaddem A, Demirci I, El Mansori M. A micro-macro combined approach using FEM for modelling of machining of FRP composites: Cutting forces analysis

[J]. Composites Science and Technology (S0266-3538), 2008, 68(15): 3123-3127.

- [63] 罗靓, 沈真, 杨胜春, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料层合板低速冲击性能实验研究 [J]. 复合材料学报, 2008, 25(3): 20-24.
- [64] 路冬, 李志凯, 融亦鸣, 等. 基于宏观各向异性碳纤维增强树脂基复合材料的切削仿真 [J]. 复合材料学报, 2014, 31(03): 584-590.