

平流式沉淀池数值模拟分析

蔡金榜¹ 朱 亮² 段祥宝¹

(1. 南京水利科学研究院水工研究所, 江苏 南京 210029 ; 2. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 利用前人已建立的二维沉淀池数学模型计算沉淀池内水流的流场和过流曲线, 并进行验证, 结果表明, 该模型能够很好地模拟沉淀池中水流的流动以及示踪剂在池内的流动过程. 利用该模型, 分别计算平流式沉淀池在不同挡板位置、进水口流速和沉淀池长高比下的水流流场、悬浮物的浓度场, 并用示踪剂分别计算其过流曲线. 分析比较挡板位置、进水口流速、沉淀池长高比等对沉淀池运行效果的影响, 并依此确定沉淀池合理的挡板位置、长高比和进水口流速.

关键词 平流式沉淀池; 数值模拟; 过流曲线; 停留时间

中图分类号 :X703.3 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2004)01-0027-05

沉淀池是常规水处理中必不可少的构筑物之一, 设计中仍存在着许多不确定性因素. 解决这些问题, 通过实验研究仍有一定困难, 而数值模拟手段随着计算技术的发展而逐渐成熟. 数值模型可以模拟水流在沉淀池内具体的流动情况以及悬浮物在池内的浓度分布, 并由此得到水流在沉淀池内的流速分布、悬浮物的去除率以及水流在池内的停留时间分布, 为沉淀池的设计和运行管理提供依据.

1 数 学 模 型

1.1 基本方程

本文所采用的二维沉淀池数学模型的基本方程、边界条件处理等详见文献 [1~4]. 基本方程包括水流连续方程、水流动量方程、标准 $k-\epsilon$ 紊流模型、悬浮物输移方程和示踪剂扩散输运方程. 在悬浮物输移方程中, 引入悬浮颗粒相对于水流的垂向沉降速度 V_s (V_s 的计算采用双指数公式).

1.2 数值方法

采用三角形有限单元的离散方法, 为了避免直接求解 Navier-Stokes 方程会遇到流动压力难以确定的问题, 引入剖开算法. 根据上述方程的特性将其剖分为对流算子、扩散算子、反应算子(源汇作用项) 和波动算子方程, 并针对算子性质采用各自合适的计算方法求解. 对流方程采用改进特征线法, 扩散方程采用 Galerkin 有限元法, 反应方程(源项) 采用解析解, 纯波动方程采用 Galerkin 有限元求解.

1.3 边界条件

a. 进水口: 采用流速均匀分布的假定, 进水口断面的紊动动能 k 及其耗散率 ϵ 、悬浮物浓度 C 也假设为均匀分布.

b. 自由表面: 采用 $y = h$ 的平面边界作为自由面, 并且认为此边界为无粘性的“刚性盖”.

c. 固壁边界: 满足壁面质量通量为零的条件.

对示踪剂扩散输运方程, 还要补充以下 2 个条件.

a. 初始条件: 计算沉淀池示踪剂含量必须给出精确的初始条件, 开始时池中无示踪剂, 因而池中任何处含量均为零, 即 $C_i = 0$ ($t = 0$).

b. 进水口: 在连续投加示踪剂的时间段 t_1 内, 进水口示踪剂浓度采用均匀分布的假定, 即 $C_{in} = C_0$ ($0 < t \leq t_1$). 停止投加示踪剂后, 进水为清水, 进水口示踪剂的浓度为零, 即 $C_{in} = 0$ ($t_1 < t$).

2 计算结果的验证与分析

2.1 验证模型

本文采用 Imam^[2]做过的矩形沉淀池各种水流结构和染料含量分布试验作为验证实例,理想化的沉淀池几何形状和计算区域如图 1 所示.计算网格采用三角形网格.

2.2 结果分析

采用 Imam^[2]的物理模型试验作为验证实例,本文计算流速分布与 Imam 激光实测结果的对比见图 2

(相应的计算参数为 $L=73\text{ cm}$, $h=11.95\text{ cm}$, $h_i=5.0\text{ cm}$, $h_w=8.5\text{ cm}$, $q=109.4\text{ cm}^3/(\text{s}\cdot\text{cm})$).从图 2 可知,本文采用均匀分布的进口流速,不需要进行率定就能使计算值与实测值吻合较好. Imam 利用常涡旋粘滞系数数值模型计算的结果需要进行率定才能与实测值相吻合.由此可见, $k-\epsilon$ 紊流模型的引入,使数值模型能更好地模拟沉淀池的流动和紊动场.

分别用理论含量 C_0 和理论停留时间 T_0 对出口处示踪剂含量和示踪剂到达出口的时间进行无量纲化,并以规格化时间作为 x 轴,相对含量作为 y 轴,绘制过流曲线,见图 3.从图 3 中可知,虽然计算值没有达到试验曲线中的峰值,但吻合程度还是相当好,这可能是由于进口边界条件的不确定性因素造成的.模型计算的峰值含量到达出口时间与实测情况是一致的,因此本模型可以预测沉淀池的过流曲线.

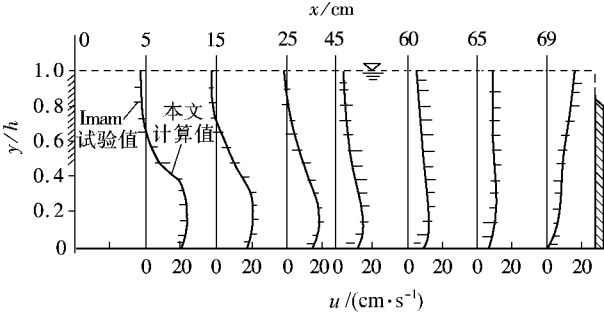


图 2 流速分布计算值与试验值对比
Fig.2 Comparison of calculated and measured velocity profiles

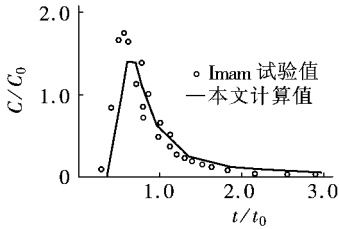


图 3 过流曲线计算值与试验值对比
Fig.3 Comparison of calculated and measured flow-through curve

3 计算实例分析

3.1 基本计算参数

平流式沉淀池长 $L=36.8\text{ m}$,宽 6 m ,水深 $H=3.1\text{ m}$,进水流量 $Q=0.09\text{ m}^3/\text{s}$,进口处水深 $h_i=1.0\text{ m}$,理论停留时间 $T_0=HL/q=2.11\text{ h}$.计算时对沉淀池作了简化,并假定池底坡度 $i=0$,计算简图见图 4.计算网格采用三角形网格,整个沉淀池共布置 3 524 个单元、1 901 个节点.

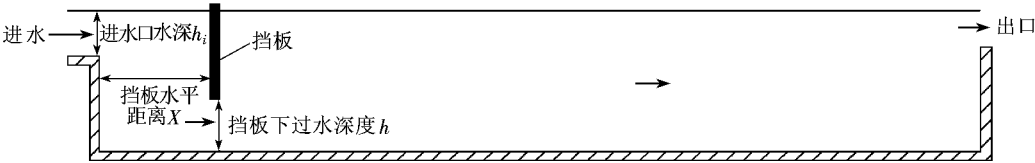


图 4 沉淀池计算简图
Fig.4 Sketch of calculation for settling tanks

3.2 计算分析

利用上述数学模型,计算沉淀池内水流的流速场、悬浮物的浓度场分布以及示踪剂在沉淀池内的流动过程.根据浓度场计算悬浮物的去除率,以出口示踪剂浓度和时间坐标轴绘制过流曲线.利用过流曲线分别求出示踪剂在出口初始出现时间 T_i 、示踪剂在出口处的峰值浓度 $C_{\max}$ 、出口浓度峰值的出现时间 T_p 、示踪剂 90% 通过出口的时间 T_{90} 、示踪剂 10% 通过出口的时间 T_{10} .其中 T_i/T_0 反映沉淀池的短流程度,该值越小表示短流越厉害; T_p/T_0 表示水流在沉淀池内实际停留时间的长短,该值越大表示停留时间越长; T_{90}/T_{10} 为分散系数,表示水流均匀程度,此值越大则表示水流搅动混合越厉害.

3.2.1 挡板对沉淀效果的影响

挡板分别布置在水平距离 $X=0.5\ 1.0\ 2.0\ 3.0\ 4.0\ 5.0\text{ m}$ 等位置,挡板下过水深度 h 与沉淀池高度 H 的比值 h/H 分别取 $0.15\ 0.25\ 0.30\ 0.40\ 0.50\ 0.60\ 0.65$.计算结果见图 5~8.

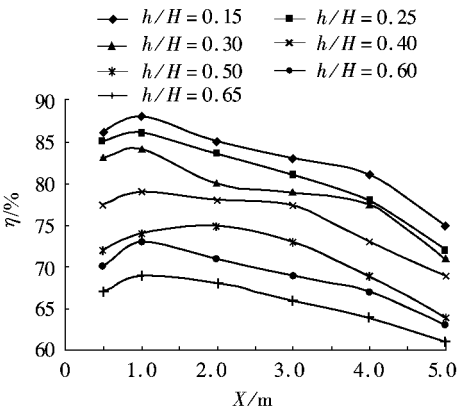


图 5 悬浮物去除率 η 与挡板位置的关系
Fig.5 Relationship between removal ratio of suspended solids η and location of baffles

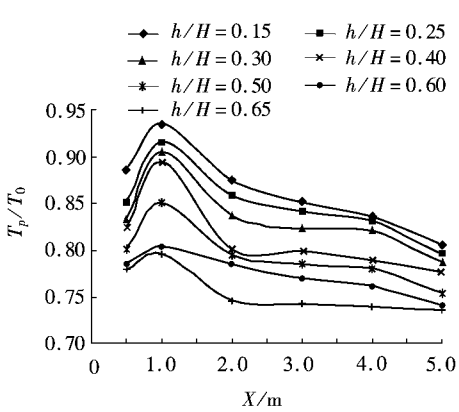


图 6 停留时间与挡板位置的关系
Fig.6 Relationship between detention time and location of baffles

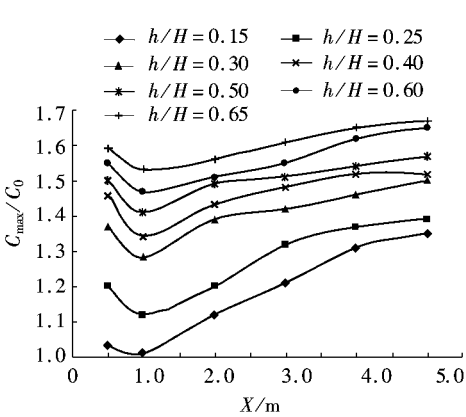


图 7 $C_{\max}/C_0$ 与挡板位置的关系
Fig.7 Relationship between $C_{\max}/C_0$ and location of baffles

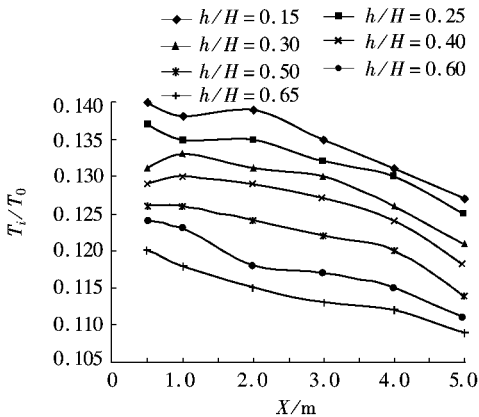


图 8 T_i/T_0 与挡板位置的关系
Fig.8 Relationship between T_i/T_0 and location of baffles

a. 挡板的水平位置 X .从图 5~8 可以看出,在挡板下的过水深度不变的条件下,随着挡板水平距离 X 的增加 (a) 水流在池内的实际停留时间和悬浮物的去除率从 $X=0.5\text{ m}$ 处开始逐渐增加,在 $X=1.0\text{ m}$ 处达到最大值 (个别情况除外),然后随 X 的增加而减小,当 $X\geq 3\text{ m}$ 时,其运行效果已经很不理想.(b) 示踪剂在出口处的峰值浓度从 $X=0.5\text{ m}$ 时开始逐渐减小,并在 $X=1.0\text{ m}$ 处达到最小值,然后随着 X 的增加而呈线性上升趋势.(c) 示踪剂在出口初始出现时间 T_i 值变得越来越小,这说明水流在沉淀池内的短流程度越来越严重.因此建议挡板的水平距离布置在 $X=1.0\sim 2.0\text{ m}$ 范围内.

b. 挡板下的过水深度 h .从图 5~8 可以看出,在挡板水平距离不变的条件下,随着挡板下过水深度的

增加 (a) 悬浮物的去除率逐渐下降, 而且当挡板下的过水深度 $h/H > 0.40$ 时, 悬浮物的去除效果很差, 去除率均下降到 75% 以下 (b) 水流在沉淀池内的实际停留时间都变得越来越短, 在 $X = 0.5 \sim 2.0\text{ m}$ 范围内, 当 $h/H > 0.40$ 时, 停留时间减小的幅度更加明显 (c) 示踪剂在出口处的浓度峰值逐渐增加 (d) 示踪剂在出口初始出现时间变得越来越早, 说明水流在沉淀池内发生短流的程度越来越严重.

3.2.2 进口流速对沉淀效果的影响

在进口流量保持不变的情况下, 通过改变进水口水深来改变进口水流流速, 计算分析进水口流速对沉淀池运行效果的影响. 计算时进口高度 h_i 与沉淀池高度 H 的比值分别为 0.15 0.25 0.30 0.40 0.50, 计算结果见表 1.

从表 1 可知, 随着进水口处进水速度的减小, 水流在沉淀池内的实际停留时间都有大幅度的增长, 而且短流程度得到改善. 沉淀池悬浮物去除率受进水流速的影响很大, 去除率随着进水流速的减小而增加. 当 $h_i/H < 0.30$ 时, 悬浮物的去除率下降到 80% 以下, 水流在池内的实际停留时间与理论停留时间的比值也下降到 0.90 以下, 沉淀池的运行效果很不理想.

3.2.3 沉淀池长高比对沉淀效果的影响

在保持沉淀池容积不变的情况下, 改变沉淀池的高度和长度, 研究在相同进水流量时, 不同长高比对沉淀池运行效果的影响. 沉淀池长高比 L/H 分别取 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 计算结果见表 2.

从表 2 可以看出, 水流在池内的实际停留时间和悬浮物的去除率都随着 L/H 比值的减少而下降, 而且短流程度严重. 当 $L/H \leq 7$ 时, 沉淀池的运行状况很差, 悬浮物的去除率降到 70% 以下, 水流实际停留时间与理论停留时间的比值也下降到 0.7 以下. 当 $L/H \geq 9$ 时, 虽然水流实际停留时间和悬浮物的去除率仍随着 L/H 比值的增加而增加, 但悬浮物去除率增加的幅度并不大, 特别是当 $L/H = 11, 12$ 时, 增加的趋势更小.

4 结 论

- a. 验证结果表明本文数学模型能够很好地模拟沉淀池中水流的流动以及示踪剂在沉淀池内的流动过程.
- b. 当挡板下的过水深度不变时, 随着挡板水平距离的增加, 水流实际停留时间和悬浮物的去除率也越来越小. 当挡板的水平距离 $X \geq 3\text{ m}$ 时, 挡板的作用越来越不明显, 沉淀池的运行效果越来越差. 但是当挡板的水平距离过小时, 沉淀池的运行效果也不理想. 因此, 建议挡板的水平距离布置在 $X = 1.0 \sim 2.0\text{ m}$ 范围内.
- c. 当挡板的水平距离一定时, 随着挡板下过水深度的增加, 挡板的作用越来越不明显, 沉淀池的运行效果越来越接近无挡板时的运行情况, 而且当 $h/H > 0.40$ 时, 水流在沉淀池内的停留时间分布和悬浮物的去除效果都较差, 因此设计时应尽可能使 h/H 的比值小一些, 但应考虑水流对底部污泥的冲刷作用, 建议挡板下的过水深取 $h/H = 0.15 \sim 0.40$.
- d. 在进水流量保持不变时, 随着进水流速的减小, 沉淀池运行效果越来越好, 而且当进水口水深与沉淀池高度的比值 $h_i/H \geq 0.30$ 时, 沉淀池才能达到比较好的运行状况. 因此沉淀池设计时应尽可能降低其进水口处水流的流速, 但同时还要考虑避免悬浮颗粒在进水渠道上淤积.
- e. 随着沉淀池长高比 L/H 的增加, 悬浮物的去除率和水流实际停留时间不断增加, 但是当 $L/H = 11$ 和 12 时, 悬浮物去除率增加的幅度很小, 沉淀池的容积没有得到充分利用, 而且在实际工程设计中 L/H 的比

表 1 不同进水口高度时的计算结果

Table 1 Calculated results for different water levels at water inlet

H_i/H	T_i/T_0	T_p/T_0	峰值浓度 ($C_{\max}/C_0$)	T_{90}/T_{10}	去除率 η /%
0.15	0.128	0.842	1.59	3.77	76
0.25	0.130	0.863	1.48	3.93	80
0.30	0.135	0.915	1.12	4.35	86
0.40	0.137	0.923	1.03	4.03	89
0.50	0.139	0.934	1.01	4.01	91

表 2 不同长高比时的计算结果

Table 2 Calculated results for different length-to-height ratios of settling tanks

L/H	T_i/T_0	T_p/T_0	峰值浓度 ($C_{\max}/C_0$)	T_{90}/T_{10}	去除率 η /%
12	0.135	0.915	1.12	4.35	86
11	0.126	0.858	1.40	4.42	84
10	0.116	0.806	1.47	4.51	81
9	0.105	0.753	1.54	4.59	79
8	0.100	0.727	1.57	4.68	75
7	0.084	0.616	1.83	4.74	63
6	0.074	0.558	1.96	4.85	56
5	0.068	0.526	1.89	5.24	49

值太大也会对平面布置有影响,因此沉淀池的长高比值不宜过大,宜控制在 $L/H\leq 12$.但是当 $L/H\leq 7$ 时,沉淀池的运行效果很差.因此,沉淀池设计时其长高比应控制在 8~12 范围内.

参考文献：

[1] ZHOU S ,McCORQUODALE J A. Modeling of rectangular settling tanks[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE ,1992 ,118(10) : 1391—1400.

[2] IMAM E ,McCORQUODALE J A. Simulation of flow in rectangular clarifiers[J]. Journal of Environmental Engineering ,ASCE ,1983 ,109 (3) :713—730.

[3] STAMOU A I ,ADAMS E W ,RODI W. Numerical modeling of flow and settling in primary rectangular clarifiers[J]. Journal of Hydraulic Research , IAHR ,1989 ,27(5) :665—682.

[4] TAKAMATSU T ,NATIO M ,SHIBA S ,et al . Effect of deposit resuspension on settling basins[J]. Journal of Environmental Engineering Division ,ASCE ,1974 ,100(4) :883—903.

Numerical simulation for rectangular settling tanks

CAI Jin-bang¹ , ZHU Liang² , DUAN Xiang-bao¹

(1. Hydraulic Engineering Department , Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing 210029 , China ;
2. College of Environmental Science and Engineering , Hohai Univ . , Nanjing 210098 , China)

Abstract : A 2-D mathematical model for settling tanks , developed by former scholars , is adopted for calculation of the velocity field and flow-through curve for the settling tanks . The comparison of numerical results with the experimental data shows that the mathematical model can well simulate the hydrodynamic characteristics of water flow and mixing process of dye tracers in settling tanks . Furthermore , the mathematical model is applied to calculation of the velocity field of water flow , concentration field of suspended solids , and flow-through curve for rectangular settling tanks under different locations of baffles , different flow velocities at water inlets , and different length-to-height ratios of settling tanks . By analysis of the calculated results , the rational location of baffles , length-to-height ratio of settling tanks , and flow velocity at water inlets are determined .

Key words : rectangular settling tanks ; numerical simulation ; flow-through curve ; retention time