

水厂沉淀池运行参数对沉淀效果影响的数值模拟

龚 然¹, 汪德²

(1. 南京工程学院环境工程系, 江苏 南京 211167; 2. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 运用已建立的二维沉淀池数学模型以及 $k-\epsilon$ 紊流模型, 采用非正交同位网格下 SIMPLE 算法求解水动力和悬浮物沉降的耦合模型, 模拟平流沉淀池中悬浮物的沉降过程, 在平流沉淀池不同进水浊度和产水量 Q (或停留时间 T) 下进行计算, 得出不同运行工况下沉淀池进水浊度与出水浊度之间的定量关系, 分析水厂运行管理控制对沉淀池出水质量产生的影响, 为水厂提高产水效率和控制沉淀池出水水质提供参考依据。

关键词 平流沉淀池; 数值模拟; SIMPLE 算法

中图分类号: TU991.2 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2009)06-0004-04

Numerical study on operational parameter effect on settling in horizontal flow sedimentation tank

GONG Ran¹, WANG De-guan²

(1. Department of Environmental Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract Using non-orthogonal collocated grids and an established two-dimensional mathematical model that consists of the $k-\epsilon$ turbulent model and suspended solid settling model, and employing the solution algorithm SIMPLE, the settling and transport processes of suspended solids in a rectangular horizontal flow sedimentation tank were simulated. The quantitative relationship between influent and effluent turbidity was obtained after a large amount of computations for different operation conditions with different values of influent turbidity and water production Q (or retention time T). Based on the results, the influence of operational management and control on the effluent water quality from a horizontal flow sedimentation tank was analyzed, and a reference basis was also provided for raising the water production efficiency and effluent water quality.

Key words horizontal flow sedimentation tanks; numerical simulation; SIMPLE algorithm

沉淀工艺是给水处理中去除固体悬浮物和杂质的重要环节, 沉淀过程的好坏关系到整个水处理效果的优劣、后续工艺的运行负荷和经济成本的高低。笔者运用二维数学模型和 $k-\epsilon$ 紊流模型, 采用非正交同位网格上的 SIMPLE 算法求解水动力和悬浮物沉降方程, 通过常规工况下的实测数据对模型进行验证并对沉淀池进行大量运行工况模拟, 得出不同工况下沉淀池进口浊度与出水浊度的定量关系。

1 研究背景

研究对象为某日产水量 20 万 t 水厂的平流沉淀

池, 其基本结构参数: 长 108 m, 单池宽 26.8 m, 单池设置一扇导流墙用以稳定水流, 沉淀池内有效水深 $H = 3$ m, 指型集水槽长 10 m, 宽 0.6 m, 单池内 14 个集水槽, 进口处穿孔花墙开孔率 $\eta = 20\%$, 如图 1 所示。

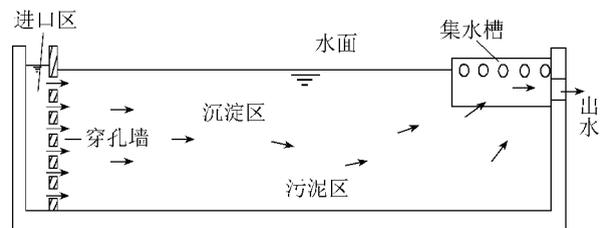


图 1 平流式沉淀池示意图

2 数学模型^[1]

2.1 水流方程

连续方程：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial u}{\partial y} \right) + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \right) + g \frac{\rho_r - \rho}{\rho_r} + S_v \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} \rho_r &= \rho + \alpha(1 - S_s^{-1}) \\ S_u &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ S_v &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

式中： x 为沉淀池的纵向长度； y 为沉淀池的垂向长度； u, v 分别为 x, y 方向的速度分量； t 为时间； p 为压力； f_x, f_y 分别为 x, y 方向的单位体积质量力； ρ_r 为混合液的液体密度； ρ 为清水的密度； C 为悬浮物浓度； S_s 为悬浮物固体颗粒的相对体积质量； $g \frac{\rho_r - \rho}{\rho_r}$ 反映流体密度的不均匀对流场的影响； S_u, S_v 为源项； ν_t 为紊动黏性系数，由标准 $k-\epsilon$ 紊流模型计算得出^[1-2]。

2.2 悬浮物沉降输移模型

沉淀池中的悬浮颗粒在动水中除了有跟随水流的运动以及紊流扩散外，还有相对于水流的垂向沉降速度 V_s ，其浓度 C 的控制方程为^[3]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{sx} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{sy} \frac{\partial C}{\partial y} + V_s C \right) \quad (5)$$

其中

$$\nu_{sx} = \frac{\nu_t}{\sigma_{sx}} \quad \nu_{sy} = \frac{\nu_t}{\sigma_{sy}}$$

式中： ν_{sx}, ν_{sy} 分别为 x, y 方向紊动物质扩散系数，略去分子扩散，并假定与 ν_t 成比例； σ_{sx}, σ_{sy} 分别为 x, y 方向紊动斯密特数(Schmit)，在纵向取 $\sigma_{sx} = 1.0$ ；垂向上，底部淤泥层($y/H \leq 0.2$)取 $\sigma_{sy} = 0.5$ ，淤泥层上部($y/H > 0.2$)取 $\sigma_{sy} = 1.0$ ； V_s 为悬浮颗粒的沉降速度，沉降速度是影响沉淀池运行效果的一个重要因素，与悬浮物浓度有很大关系，笔者采用双指数公式^[4]确定。

2.3 网格布置和悬浮物边界条件

网格布置：在沉淀池的计算区域内共布置了 340×16 个网格，网格形式为非正交结构四边形网格，为了能很好地模拟进水流态，在穿孔花墙孔口处网格较密，由于沉淀池内水流较为平缓，整个区域网格较为均匀。

边界条件：沉淀池底部边界采用 Takamatsu 等^[5]提出的能够模拟悬浮颗粒在沉淀池底部沉积和冲刷情况的边界条件：

$$\nu_{sy} \frac{\partial C}{\partial y} + KV_s C = 0$$

式中： K 为冲刷系数，取决于冲刷程度， $K > 1$ 时，沉淀池底部颗粒以冲刷为主要趋势， $K = 1$ ，沉积和冲刷达到平衡， $0 < K < 1$ 时，则以沉积为主， $K = 0$ ，只有沉积，没有冲刷；其他固壁边界条件满足壁面质量通量为零的条件： $\frac{\partial C}{\partial n} = 0$ ；自由面条件采用 Imam 等^[6]提出的自由面条件： $\nu_{sy} \frac{\partial C}{\partial y} + V_s C = 0$ ，进水口采用进口浓度均匀分布的条件。

3 数值计算方法与模型验证

计算方法采用同位正交网格下 SIMPLE(semi-implicit method for pressure-link equations)法求解方程组^[1,7]，由于模型为非恒定流，流速场中下一时刻的计算在上一时刻迭代收敛后进行。为了防止密度源项和压力梯度项相互作用产生数值振荡，引入亚松弛迭代系数 α ： $\rho = \alpha \rho_{\text{new}} + (1 - \alpha) \rho_{\text{old}}$ ， α 的取值在 $0.1 \sim 0.2$ 之间。

选择沉淀池实际运行的某时刻常规工况作为模型验证的计算基本参数：单池流量 $Q = 1.157 \text{ m}^3/\text{s}$ ，进口流速 $v = 0.069 \text{ m/s}$ ，进口悬浮物质量浓度 $\rho_0 = 120 \text{ mg/l}$ (实验室标准方法测定)，并假定计算在零时刻时沉淀池内各点的悬浮物质量浓度 $\rho_y = 10 \text{ mg/L}$ ，经过计算，得到计算稳定后沉淀池内浓度分布图，由于整个沉淀池长高比过大，故将池长缩小显示，见图2。

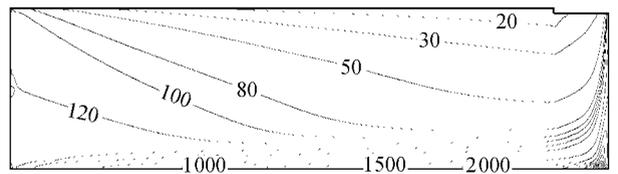


图2 计算稳定后沉淀池内浓度分布

在沉淀池长度方向 $20 \text{ m}, 40 \text{ m}, 60 \text{ m}, 80 \text{ m}, 100 \text{ m}$ 处的5个断面，沿水深方向 $1.5 \text{ m}, 2.9 \text{ m}$ 处共10个点取水样，经实验室标准方法测得其悬浮物浓度，并与模型计算得到的这10处计算值比较，确定模型重要参数 V_0 ，从而调整模型。经对比，在起始沉速 V_0

$= 0.0005 \text{ m/s}$ 的情况下,模型计算值能较好地符合实验室实测值,说明沉淀池内悬浮物的起始沉速选用此值较为合适。图3为选用 $V_0 = 0.0005 \text{ m/s}$ 时的模型计算值与实测值的对比情况。

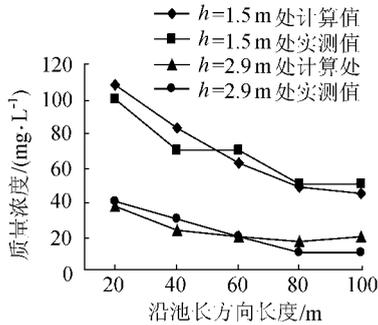


图3 悬浮物质量浓度计算值与实测值比较

4 浊度与浓度的近似关系

给水处理中通常用浊度表示水的透明程度,许多研究者一直致力于浊度与浓度之间定量关系的研究,但追求两者间的关系,在理论上是做不到的,在实践中也是无意义的。为了方便研究,笔者参考文献[8-9]中所建立的浊度及其悬浮物含量的近似关系,针对研究水样,测量模型验证中实测的10个水样的浊度,并与其浓度的实测值建立对应关系(图4)结果如下。

$$\rho(SS) = 2.17T + 2.53 \quad (6)$$

式中: $\rho(SS)$ 为沉淀池内水的悬浮固体质量浓度, mg/L ; T 为沉淀池内水的浊度, ntu 。

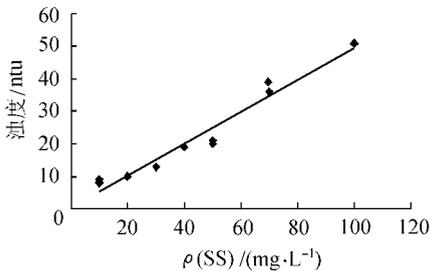


图4 颗粒的浓度与浊度关系

5 工况模拟计算

水厂取水水质通常呈现季节性变化,一般来说,冬季取水水质较好,夏季较差。从进水浊度和产水量两个变化参数的角度,选取沉淀池进水浊度为10 ntu 、19 ntu 、28 ntu 、37 ntu 、46 ntu 、55 ntu 、64 ntu 、73 ntu 、82 ntu 、91 ntu 、100 ntu 、109 ntu 等12种浊度条件,以及每种浊度条件下单池产水为8万 t/d 、9万 t/d 、10万 t/d 、11万 t/d 、12万 t/d 等5种单池产水量(对应的停留时间分别为2.6h、2.3h、2.1h、1.9h、1.7h),对所研究的平流沉淀池进行工况计算。

根据计算数据,利用已建立的浓度与浊度的近

似关系,可以得到在不同产水量 Q 或停留时间 t 下,沉淀池进水浊度与出水浊度的关系图(图5)。由图5可见,在产水量 Q 或停留时间 t 一定的情况下,沉淀池的出水浊度随着进水浊度的增加而增加;在进水浊度一定的情况下,沉淀池的出水浊度随着水力停留时间的减小而增加,例如,当进水浊度为64 ntu 时,5种停留时间下的出水浊度分别为8.1 ntu 、9.8 ntu 、11.1 ntu 、12.7 ntu 、13.9 ntu ,其浊度增长率分别为20.99%、13.26%、14.44%、9.45%,平均增长率为14.54%。水厂平流沉淀池的出水浊度要求一般在10 ntu 以下。计算结果显示,虚线以上所代表的工况条件下的出水浊度不符合水厂沉淀池出水标准。

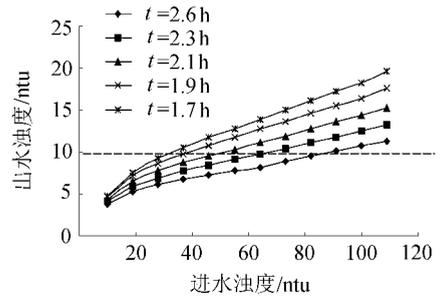


图5 各种工况下沉淀池进出口浊度关系

沉淀效果通常用去除率表示,根据计算结果可得到上述工况条件下沉淀效果的变化情况,如图6所示。从图6可知,在产水量 Q 一定即停留时间 t 一定的情况下,去除率随着进水浊度的增加而增加;当进水浊度在较小范围内变化时,去除率变化较大,随着进水浊度的增加,去除率的变化趋于平稳;在进水浊度一定的情况下,去除率随着产水量 Q 的增加即停留时间 t 的减小而减小。

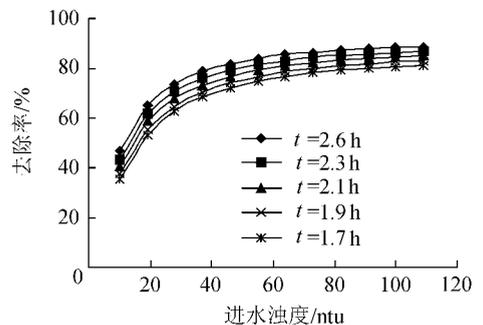


图6 各种工况下沉淀池去除效率

6 结论与分析

通过以上计算分析,可以看出沉淀池进水浊度与出水浊度的变化规律,在实际生产中,沉淀池出水浊度是否满足出水浊度标准更加具有现实意义。例如在沉淀池进水浊度为100 ntu 和55 ntu ,单池产水量均为9万 t/d ,即停留时间 $t = 2.3 \text{ h}$ 的2种工况下,由计算可知,前者的出水浊度为12.5 ntu ,去除效

率为 86.5% ; 后者的出水浊度为 9.1 ntu , 去除效率为 81.5% , 单从去除率来看 , 前者比后者高 , 但是后者的出水浊度要比前者低且后者的出水浊度达到水厂沉淀池的出水浊度标准 , 这说明当沉淀池进口浊度较大时 , 需增加停留时间以使出水浊度达到要求 , 增加停留时间的同时也降低了产水量 , 这是一对矛盾 , 但最终还是要以出水浊度达到标准作为依据。

从计算结果看 , 水厂可以通过调整产水量 Q 或停留时间 t , 从而有效地影响出水的浊度。例如 , 某天原水浊度较高 , 相应的沉淀池进水浊度较高 , 达到 91 ntu , 在这种情况下 , 可通过降低单池产水量至 8 万 t/d , 即增加停留时间至 2.6 h 使沉淀池出水浊度较低而符合标准 ; 同样 , 某天原水浊度较小 , 相应的沉淀池进水浊度较小 , 只有 46 ntu , 在这种情况下 , 可加大流量至 10 万 t/d , 即减小停留时间至 2.1 h , 出水浊度仍然符合出水标准。通过不同运行工况下沉淀池的进口浊度与出水浊度之间的关系分析 , 可以看出合理调整产水量 Q 或停留时间 t 可一定程度上提高水厂的产水效率。

近年来 , 随着生活用水水质要求的不断提高 , 实际生产过程中沉淀池出水水质通常要求小于 10 ntu , 许多水厂这一标准已经提高到了 8 ntu , 甚至 3 ntu。新建水厂在沉淀池出口设置有仪表进行出水水质的监控 , 一旦发现水质超标 , 所采取的措施主要是增加混凝剂的投放量和增加停留时间。有些情况下 , 增加混凝剂投放量仍达不到处理效果时 , 经验性的人工调整水流停留时间亦是一种补充缓解措施 , 在满足供水

需求产水量的同时 , 本研究结论为水厂提高产水效率和控制沉淀池出水水质提供了一些参考依据。

参考文献 :

- [1] 何国建 , 汪德 . 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.
- [2] 蔡金榜 , 段宝祥 , 朱亮 . 沉淀池水流数值模拟 [J]. 重庆建筑大学学报 , 2003 , 25(4) : 64-69.
- [3] ZHOU S , Mc CORQUODALE J A . Modeling of rectangular settling tanks [J]. Journal of Hydraulic Engineering , 1992 , 118(10) : 1391-1405
- [4] TAKACS I , PATRY G , NOLASCO D . Dynamic model of clarifier thickening process [J]. Journal of Water Research , 1991 , 25(10) : 1263-1271.
- [5] TAKAMATSU T , NATIO M , SHIBA S , et al . Effect of deposit resuspension on settling basins [J]. Journal of Environmental Engineering Division , 1974 , 100(4) : 883-903.
- [6] IMAM E , Mc CORQUODALE J A , BOWTRA J K . Numerical modeling of sedimentation tanks [J]. Journal of Hydraulic Engineering , 1983 , 109(12) : 1740-1754.
- [7] 王志东 , 汪德 , 赖锡军 . 非正交同位网格中的 SIMPLE 算法 [J]. 河海大学学报 : 自然科学版 , 2003 , 31(5) : 509-512.
- [8] 翟世奎 , 张怀静 , 范德江 , 等 . 长江口及其邻近海域悬浮物浓度和浊度的对应关系 [J]. 环境科学学报 , 2005 , 25(5) : 693-699.
- [9] 王勤华 , 贺俊兰 . 净水厂产泥量的确定和相关参数的选择 [J]. 中国给水排水 , 2002 , 18(8) : 64-66.

(收稿日期 2009-05-27 编辑 徐娟)

(上接第 3 页)

3 结论及建议

进行水-岩作用的反向地球化学模拟能够定量研究潜水的化学演化规律 , 有助于更深入地认识吉林西部第四系孔隙潜水与环境之间的相互作用关系。研究结果表明 , 在吉林西部洮儿河扇形地第四系孔隙潜水向东部大安径流排泄过程中 , 主要发生了方解石、石膏、高岭土 (或硅土) 的沉淀和钠长石、钾长石、岩盐、萤石的溶解 , 以及 Na^+ 、 Ca^{2+} 之间的离子交换 , 地下水类型从 SO_4^{2-} 型水演化为 $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$ 型水。

目前有关水质组分存在形式及其浓度分布的计算模型 , 只可以确定地下水中一些主要的无机络合物的形式及数量 , 对于有机络合物需进一步深入研究^[7] , 此外 , 长期动态观测数据中水样分析项目较简单 , 这对于水-岩作用的地球化学模拟有一定影响 , 随着科技的进步和研究的深入 , 这类问题将得到解决。

参考文献 :

- [1] 肖长来 . 吉林省西部地下水资源评价与水资源可持续开发利用研究 [D]. 长春 : 吉林大学 , 2001.
- [2] 苑丽华 . 松嫩平原地下水化学特征 [J]. 地质与资源 , 2006 , 15(2) : 122-124 , 132.
- [3] 王凤生 . 吉林地下水 [M]. 长春 : 吉林科学技术出版社 , 1998.
- [4] PLUMMER L N . Geochemical modeling of water rock interaction : past , present , future [C] / YOUSIF K K , ANN S M . Proceedings of the 7th International Symposium on Water-Rock Interaction . Rotterdam : Balkema , 1992 : 23-33.
- [5] 曹玉清 , 王占新 , 陈鸿雁 . 白城地区开采含水层水的化学成分及其形成问题的探讨 [C] / 地质矿产部水文地质工程地质研究所 . 水文地球化学理论与方法的研究 . 北京 : 地质出版社 , 1985 : 42-49.
- [6] 梁秀娟 . 吉林西部洋沙泡水库水土环境中氟的迁移转化机理研究 [D]. 长春 : 吉林大学 , 2008 : 59-142.
- [7] 沈照理 , 王焰新 . 水-岩相互作用研究的回顾与展望 [J]. 地球科学 , 2002 , 27(2) : 127-134.

(收稿日期 2008-12-05 编辑 徐娟)