

多层平板单元组合沉淀池的三维两相流数值模拟

李雨阳¹, 周克钊¹, 邓钦祖¹, 符新建², 黄佳木²

(1. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610081; 2. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要: 针对多层平板单元组合沉淀池,使用计算流体力学软件建立三维模型,对固液两相流进行了数值模拟,并从理论上解析了平板单元内部流场和污泥颗粒浓度场的情况。结果表明,平板单元的理论最佳平板数目为4,此时同等水量下可使沉淀池面积缩小为原面积的66%。在不同污泥浓度和不同池长情况下,该工艺理论上可使沉淀池面积缩小为原面积的59%~68%,并且能够发挥较好的强化沉淀效果。

关键词: 沉淀池; 多层平板单元; 三维数值模拟; 计算流体力学

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)07-0060-05

Three-dimensional Numerical Simulation of Two-phase Flow in Sedimentation Tank Combined with Multi-layer Plates Unit

LI Yu-yang¹, ZHOU Ke-zhao¹, DENG Qin-zu¹, FU Xin-jian², HUANG Jia-mu²

(1. Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610081, China;
2. College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Sedimentation tank combined with multi-layer plates unit is a newly developed process. A three-dimensional numerical simulation of the solid-liquid two-phase flow was performed using computational fluid dynamics (CFD) software. The flow field of wastewater and the concentration field of the activated sludge inside the plates unit were analyzed theoretically. The simulation results demonstrated that the optimal layer of the plates unit was four, and the sedimentation tank area could be reduced to 66% under the same wastewater flow rate. Under different activated sludge concentrations and tank lengths, this process could reduce the sedimentation tank area to 59% - 68%, and stimulate enhanced sedimentation effects.

Key words: sedimentation tank; multi-layer plates unit; three-dimensional numerical simulation; computational fluid dynamics (CFD)

多层平板单元组合沉淀池是处理城市污水的新工艺,也可用于给水和工业废水的处理^[1]。该工艺将多个圆形平板重叠组合成多层平板单元,再将多个单元安装在平流沉淀池的澄清区内,以达到提高

泥水分离效果、改善出水水质、节约沉淀池占地面积的目的。笔者在前期研究的基础上,使用计算流体力学软件 FLUENT 对多层平板单元组合沉淀池进行三维固液两相流数值模拟,旨在从理论上了解工艺

内部的水流流场和污泥颗粒浓度场的情况,从而为实际工程的应用提供参考。

1 数学模型及边界条件的确定

1.1 模型建立依据

① 组合沉淀池尺寸。试验装置总长为 10 m, 宽为 2.2 m, 高为 3.5 m (见图 1)。其中, 在沉淀池中放置多层平板单元, 该试验仅针对沉淀池建立模型。多层平板为圆形, 平板厚度为 0.005 m, 具有中心传动刮泥机, 中心开孔, 可以容纳刮泥机传动轴, 并作为向下排出污泥的通道。在沉淀池底部设链式刮泥机, 刮泥机线速度取 2 m/min。沉淀池底部设集泥槽, 内置穿孔排泥管, 管径为 100 mm。穿孔排泥管孔眼向下, 孔径为 5 mm, 孔距为 50 mm。

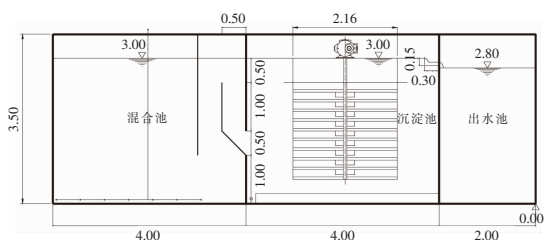


图1 试验装置尺寸示意

Fig.1 Schematic diagram of sedimentation tank size

② Gambit 建模。为了便于划分网格并减少不必要的计算, 在使用 Gambit 软件建立模型的过程中, 将穿孔排泥管在原位置等效为相同面积的矩形排泥口, 并忽略平板中心的开孔和刮泥机。计算时采用稳态模拟, 即认为最终计算达到稳态时, 污泥颗粒落到平板上即被刮泥机刮走, 不会再次上浮回到流体区域。网格划分采用四面体非结构化网格, 网格的基本尺寸为 0.1 m。在平板侧面, 出水口和排泥口局部加密网格。根据设置条件, 最终将整个池子的网格数划分在 $(47 \sim 120) \times 10^4$ 之间, 见图 2。

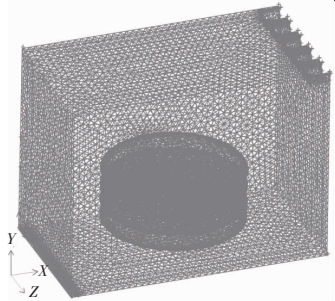


图2 沉淀池三维模型网格划分结果

Fig.2 Meshing result of three-dimensional model of sedimentation tank

1.2 控制方程

试验采用固液两相流混合模型, 池内流体流速较低, 可以视为不可压缩的牛顿流体, 满足质量守恒定律、动量守恒定律。采用标准 $\kappa - \varepsilon$ 模型求解沉淀池内的流场结构, 其控制方程包括连续性方程、动量方程、湍流动能的 κ 方程以及湍流耗散率 ε 方程^[2,3]。微分方程采用有限体积法求解, 压力速度耦合结果采用 SIMPLEC 算法求解, 湍流动能、湍流耗散率和体积分方程均采用二阶迎风格式求解。

1.3 边界条件的确定

① 入口边界: 选择速度入口, 假定流速、悬浮物含量、湍流动能及其耗散率为均匀分布。湍流动能及其耗散率按照公式 $\kappa_{in} = \alpha v^2$ 、 $\varepsilon_{in} = C_{\mu}^{0.75} \kappa^{1.5} / l_m$ 确定, 其中 α 取 0.2, C_{μ} 取 0.09, 混合长度 l_m 取进水高度的 10%^[4]。

② 出口边界: 采用压力出口, 出口压力为 1 个大气压。排泥口也是压力出口, 悬浮颗粒只有沉积, 没有冲刷。

③ 固体壁面边界: 沉淀池边壁、底部均为固壁, 采用标准函数法。所有固壁处的节点应用无滑移条件, 对靠近壁面的第一个网格节点采用标准壁面函数方法。

④ 自由水面边界: 沉淀池表面为自由水面, 采用刚盖假定和无剪切力假定, 即在自由面上的节点认为垂向流速为零, 其他所有变量的法向梯度为零, 计算中认为此边界是关于流体的对称面。

2 结果与讨论

2.1 计算工况的确定

设置水相密度为 998.2 kg/m³, 污泥颗粒密度为 1 051 kg/m³。根据中试现场的实际情况, 设定入口污泥浓度为 3 600 mg/L, 换算成颗粒体积比例为 3.43×10^{-3} 。此外, 通过静置沉淀试验得到该污泥沉速对应的污泥颗粒粒径约为 1.95 mm。初始时刻假定沉淀池内污泥浓度为零, 水流在各个方向的速度为零。

当沉淀池表面水力负荷为 3.5 m³/(m² · h) 时, 对应的入口流速为 0.016 m/s, 水流和污泥颗粒流速相同。污泥回流比设为 1, 松弛因子取 FLUENT 默认值。迭代过程中监控出水口和排泥口的污泥颗粒体积分变化, 当迭代超过 2 000 次时, 两个出口的平均体积分浓度检测曲线基本达到平稳。此时进行物料衡算, 进、出口的质量流量差值为 3.27×10^{-6} 。

kg/s,说明出口处浓度不再发生变化,同时表明沉淀池内污泥浓度分布也达到稳态。之后在不同参数条件下进行计算时,均以这两个标准作为迭代终止条件。

2.2 稳态结果分析

当沉淀池表面水力负荷为 $3.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,达到稳态之后,分析池子中部 $z=1.1 \text{ m}$ 平面纵断处的流速等值线分布,如图3所示。可以看出,沉淀池入水口和排泥口周围流速较大,在进入沉淀池之后,流速放缓。平板区域内流速相对较小,形成了一个低流速区域,有利于污泥颗粒的沉降。平板后端形成了一个流速上升的回流区,这可能是由于平板离沉淀池后壁较近形成的,在实际使用中可以通过加长沉淀池来避免。

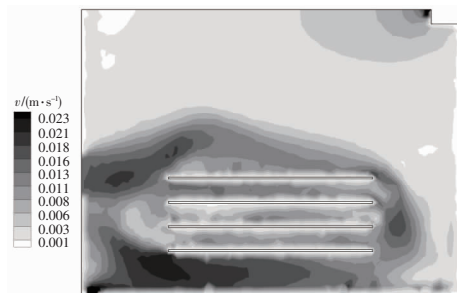
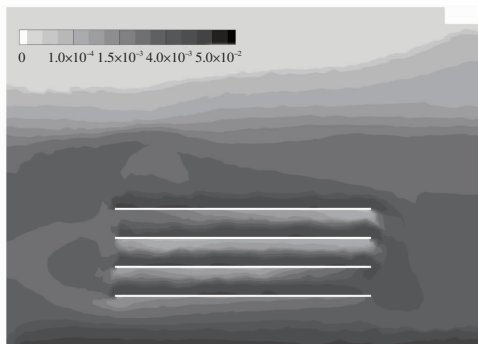


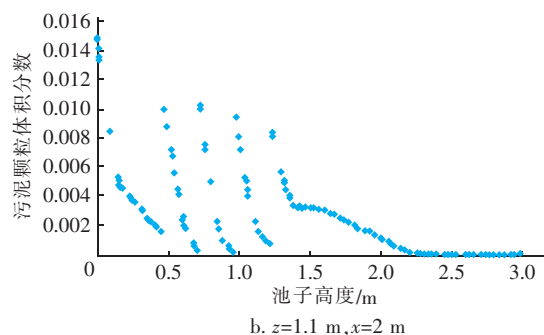
图3 沉淀池 $z=1.1 \text{ m}$ 平面处流速等值线

Fig.3 Contours of velocity magnitude in plane of $z=1.1 \text{ m}$

在稳态情况下,分析三维流场内污泥颗粒的分布情况,污泥浓度由池底到水面逐渐降低。模拟过程中在 $z=1.1 \text{ m}$ 处做沉淀池纵断,平板之间出现了明显的污泥颗粒浓度梯度,每层平板下方一定范围内出现了明显的低浓度区,浓度低于同一高度上其他池内区域[见图4(a)]。此外,在 $z=1.1 \text{ m}$ 、 $x=2 \text{ m}$ 处分析平板纵向的污泥颗粒分布可知,沿池子高度方向污泥颗粒的体积分数出现了4次显著的下降过程,刚好对应4块平板的位置[见图4(b)]。



a. $z=1.1 \text{ m}$



b. $z=1.1 \text{ m}$, $x=2 \text{ m}$

图4 平板区域的污泥颗粒体积分分布

Fig.4 Volume fraction distribution of activated sludge in plates area

可见,在平板作用区域内污泥颗粒得到了很好的沉降,平板单元确实发挥了强化沉淀的作用。FLUENT 计算结果表明,该工况达到稳态时,出口处的污泥颗粒体积分数为 2.05×10^{-6} ,换算成 SS 浓度为 2.15 mg/L ,达到了一级 A 标准。

2.3 影响因素分析

2.3.1 平板数目对沉淀效果的影响

为了对平板单元进行优化,寻找最优的平板层数 n ,在本次模拟中保持板间距不变,从池底往上分别设置平板层数为 0、2、4、6、8、10,控制水力负荷从 $1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 升高至 $4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,出水浓度见图5。

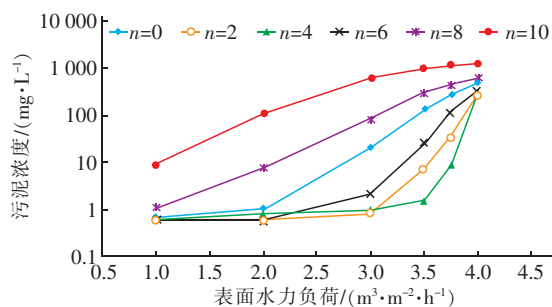


图5 不同平板数目的沉淀效果

Fig.5 Sedimentation results of different plates layers

由图5可知,当平板层数少于4时,平板数目越多,沉淀池的沉淀面积越大,沉淀效果越好。当平板层数为4时出水效果最佳,当表面水力负荷低于 $3.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,出水污泥浓度随水力负荷的增大缓慢上升,高于 $3.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 后污泥浓度才开始迅速升高。在表面水力负荷为 $3.75 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 条件下,平板层数为4时依然能够保持低于 10 mg/L 的模拟出水浓度,而同等负荷下没有放置平板时 ($n=0$),出水浓度高达 260 mg/L 。

当平板层数超过4时,沉淀效果逐渐变差,这可能是因为高层平板造成池内流态紊乱。当放置8层和10层平板时,由于平板位置过高,引起池子上方靠近出口处流态的扰动,其流速矢量图显示在平板边缘和出口位置出现了大量紊流(见图6),这导致沉淀池出水浓度高于没有放置平板时的情况,此时平板起负作用。

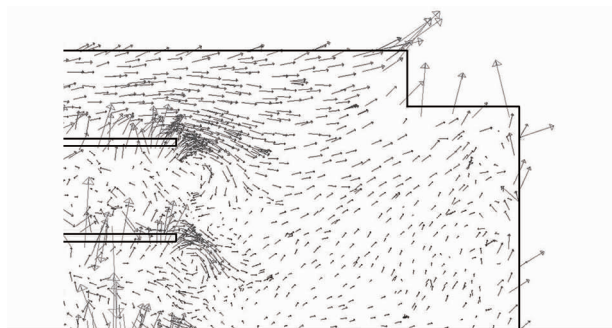


图6 $n=10$ 时 $z=1.1$ m 断面出口处的流速矢量

Fig. 6 Vectors of velocity magnitude in outlet area with z of 1.1 m and n of 10

通过线性插值计算不同平板数目达到一级A标准出水浓度时的表面水力负荷,称为最大表面水力负荷。结果表明,当平板数 $n=4$ 时,最大表面水力负荷最高,为 $3.76 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,而 $n=0$ 时最大水力负荷为 $2.49 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,即平板单元在 $n=4$ 的最优条件下,相比于没有放置平板的情况,将沉淀池的最大表面水力负荷提升了51%。这表明在同等水量情况下,利用平板单元可使沉淀池用地面积缩小为原面积的66%。

2.3.2 污泥浓度对沉淀效果的影响

在上述分析中,采用的污泥浓度均为 $3\ 600 \text{ mg/L}$,然而在一些特殊的污水处理工艺中,污泥浓度可能会高达 $6\ 000 \sim 7\ 000 \text{ mg/L}$ 。为研究平板单元对高浓度活性污泥的沉淀效果,调整入口污泥浓度为 $7\ 000 \text{ mg/L}$,换算成污泥颗粒体积分数为 $0.006\ 66$ 。考虑到不同污泥浓度下模型的主要变量是颗粒物,对水流流场的影响较小,因此认为在高浓度下平板数 n 对沉淀效果的影响与低浓度时类似,这里不再赘述。取优化后的平板数 $n=4$ 作为模拟条件,沉淀结果如图7所示。可以看出,当入口为高浓度活性污泥时,模拟出水浓度相对于低污泥浓度时均有一定的增加,但板情况下的增加幅度小于无板情况,表明平板发挥了一定的强化作用。在高浓度时,有

板相对于无板仍然具有较大的沉降优势。以达到一级A出水标准为基准,在平板存在的情况下最大表面负荷为 $3.69 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,无平板时最大表面负荷为 $2.18 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,提升了69%,同等水量下节省沉淀池41%的使用面积。这表明在高活性污泥浓度条件下,平板单元更能够发挥强化沉淀的作用。

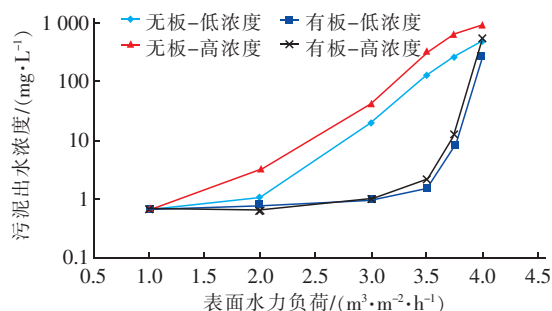


图7 不同浓度下平板单元的沉淀效果

Fig. 7 Sedimentation results of plates unit under different activated sludge concentrations

2.3.3 池子长度对沉淀效果的影响

为研究单组平板单元的作用,选取沉淀池长度为4 m。在实际水厂中,沉淀池长度较长,为探究平板单元在更长池子范围内的沉淀情况,将池子长度扩展到8 m,同时比较放置单组和两组平板对沉淀效果的影响。放置单组平板时,平板位于池子的前半部分,即板中心处于 $x=2 \text{ m}$ 处。放置两组平板时,池子前后各有一组平板,板中心分别位于 $x=2 \text{ m}$ 和 $x=4.5 \text{ m}$ 处。

模拟采用的污泥浓度仍为低浓度 ($3\ 600 \text{ mg/L}$),模拟结果如图8所示。

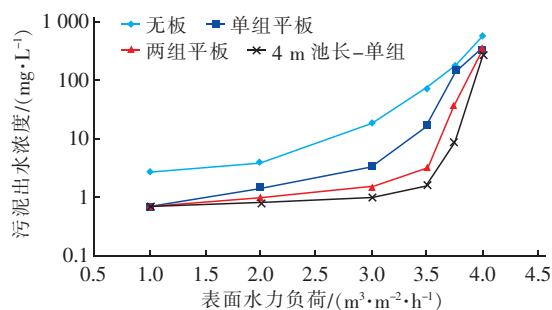


图8 池长为8 m时平板单元的沉淀效果

Fig. 8 Sedimentation results of plates unit with tank length of 8 m

由图8可知,增加池长之后,相同水力负荷下入口流速变为之前的两倍,这导致出水浓度均有所升高,但有板相对于无板仍然具有一定的优势。以达

到一级A出水标准为基准,通过线性插值计算,在无平板放置的情况下最大表面水力负荷为 $2.43 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;放置单组平板时最大表面水力负荷为 $3.26 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,提升了34%;放置两组平板时最大表面水力负荷为 $3.55 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,相比无平板情况提升了46%,相对于仅使用单组平板也有较大的提高,但略低于相同浓度下池长为4 m时单组平板的提升效率。

图9为两组平板情况下污泥颗粒的分布情况。可以看出,在两组平板的作用区域内均有较为明显的浓度分层。在平板中线处作污泥浓度分布曲线,也出现多次下降趋势,这表明污泥颗粒沉降性能很好,两组平板单元均发挥了较好的强化沉淀作用。

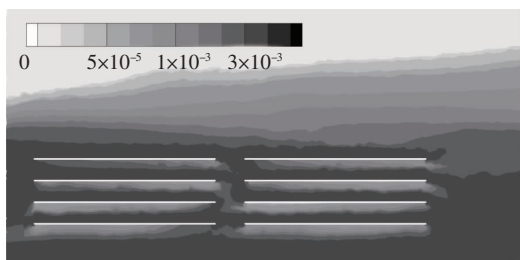


图9 两组平板情况下污泥颗粒的分布

Fig. 9 Distribution of activated sludge under situation of two plates group

以上结果表明,将平板单元的组合工艺应用于更长的池型是可行的,尽管相对于较短池长时的单组平板效率有所降低,但仍然能提升最大表面水力负荷,相当于同等水量下使沉淀池面积缩小为原面积的68%。这为模拟更大池型中多组平板的沉淀效果奠定了良好的基础,也对平板单元组合工艺在实际沉淀池中的应用提供了参考。

3 结论

① 多层平板单元能够发挥较好的强化沉淀作用,以放置平板数为4时效果最佳,能够将沉淀池最大表面水力负荷提高51%,同等水量下可使沉淀池面积缩小为原面积的66%。

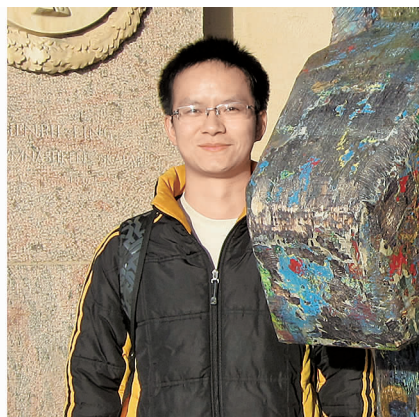
② 多层平板单元在3 600和7 000 mg/L两种污泥浓度下均有较好的强化沉淀效果,其中以高浓度7 000 mg/L效果更佳,能够将沉淀池最大表面水力负荷提高69%,同等水量下使沉淀池面积缩小为原面积的59%。

③ 当沉淀池池长为8 m时,通过增加一组平

板单元,能够将最大表面水力负荷提高46%,同等水量下使沉淀池面积缩小为原面积的68%。

参考文献:

- [1] 周克钊. 一种多层平板单元组合沉淀池工艺[P]. 中国专利:201310113956.8,2013-10-02.
Zhou Kezhao. The Process of Sedimentation Tank with Multi-plate Unit[P]. China:201310113956.8,2013-10-02(in Chinese).
- [2] 叶飞,许文峰,王学超,等. 辐流式二次沉淀池固液两相流三维数值模拟[J]. 中国给水排水,2011,27(9):63-66.
Ye Fei, Xu Wenfeng, Wang Xuechao, et al. 3D simulation of solid-liquid two-phase flow in circular secondary clarifier[J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(9):63-66(in Chinese).
- [3] 屈强,马鲁铭,王红武,等. 折流式沉淀池流态模拟[J]. 中国给水排水,2005,21(4):58-61.
Qu Qiang, Ma Luming, Wang Hongwu, et al. Simulation of flow pattern in baffled sedimentation tank[J]. China Water & Wastewater, 2005, 21(4):58-61(in Chinese).
- [4] 王晓玲,曹月波,张明星,等. 辐流式沉淀池固液两相流三维数值模拟[J]. 工程力学,2009,26(6):243-249.
Wang Xiaoling, Cao Yuebo, Zhang Mingxing, et al. Three-dimensional simulation of solid-liquid two-phase flow in a circular secondary clarifier[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(6):243-249(in Chinese).



作者简介:李雨阳(1990-),男,云南玉溪人,硕士,工程师,主要研究方向为水处理技术。

E-mail:963575109@qq.com

收稿日期:2017-09-22