

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2012.02.008

超大型周进周出式沉淀池优化设计中的水力性能数值模拟

王磊磊^{1,2}, 许光明³, 陈俊³, 周奇⁴, 王国华¹

(1. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司研发中心, 上海 200092;
2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 3. 常州市排水管理处, 江苏 常州 213017;
4. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为改善超大型周边进水、周边出水沉淀池的水力性能,利用计算流体力学的方法对工程初步设计方案进行水力性能模拟.针对南方某污水处理厂直径为 60 m 的周边进水、周边出水沉淀池,借助 FLUENT 6.3 软件包提供的 realizable $k-\epsilon$ 模型,运用交错网格有限体积法计算分析沉淀池的流场特征,提出了相关的优化设计参数.计算结果表明:竖向流进水并设置双向挡板的沉淀池,其内部环流的半径可增大至 26 ~ 28 m,径深比 θ 宜在 8.0 ~ 10.0 范围内选择,坡降 i 应控制为 0.050.通过适宜的工程优化措施,可提升该沉淀池的内部环流性能.

关键词:污水处理厂;泥水分离;重力沉淀池;径深比;流场;有限体积法;数值模拟

中图分类号: X703.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2012)02-0168-05

Numerical simulation of hydraulic performance of optimally designed super sedimentation tank with peripheral inflow and peripheral effluent

WANG Lei-lei^{1,2}, XU Guang-ming³, CHEN Jun³, ZHOU Qi⁴, WANG Guo-hua¹

(1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Changzhou Drainage Administration, Changzhou 213017, China;

4. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To improve the hydraulic performance of a super sedimentation tank with peripheral inflow and peripheral effluent, the computational fluid dynamics method was used to simulate the hydraulic performance in a preliminary design scheme for a sedimentation tank. A case study was conducted in a sedimentation tank (with a diameter of 60 m) with peripheral inflow and peripheral effluent in a wastewater treatment plant in the south of China. The optimal design parameters were determined through analysis of the flow field characteristics of the sedimentation tank calculated by means of the staggered-grid finite volume method, with the help of the realizable $k-\epsilon$ model provided by the FLUENT 6.3 software package. The results show that the radius of circulation increased to 26 to 28 m in the sedimentation tank with vertical flow and a two-way baffle, the appropriate ratio of diameter to depth (θ) ranged from 8.0 to 10.0, and the gradient (i) should be set at 0.050. The performance of circulation in the sedimentation tank could be improved by taking proper optimization measures.

Key words: wastewater treatment plant; mud-water separation; gravity settling tank; ratio of diameter to depth; flow field; finite volume method; numerical simulation

污水处理厂的泥水分离主要靠重力沉淀方式完成.重力沉淀池的形状大多采用圆形池,有效池深为 3 ~ 5 m,直径一般为 3 ~ 60 m.为了提高沉淀池的有效利用率,周边进水、周边出水(以下简称周进周出)式沉淀池替代了传统的辐流式沉淀池^[1],并在 2000 年后得到了普遍应用,目前已成为国内污水处理厂中常见的一种

收稿日期: 2011-03-25

基金项目: 上海市博士后基金(11R21421100); 十一五'国家水污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07313-006-01)

作者简介: 王磊磊(1981—),男,江苏徐州人,工程师,博士,主要从事水处理理论及技术研究. E-mail: wang_ll.yf@smedi.com

池型.实际运行表明,周进周出水系统易在池子中上部形成驻流或慢流区,特别是当沉淀池直径较大(>50 m)时,这种现象尤为突出,造成中上部已澄清的水无法及时排出,影响效率.通常在 1.5~2.0 h 的沉淀时间里,悬浮颗粒的去除率一般只有 50%~60%^[2],远低于设计水平.据报道,沉淀池内的水力性能^[3]、流场条件较差^[4-5],是造成这一问题的重要原因.目前我国主要城市的污水处理系统中尚没有直径超过 55 m 的周进周出式沉淀池,设计时该如何考虑这种超大型沉淀池的水力特性也未见报道,因此有必要对超大型圆形沉淀池内的流态和悬浮物浓度分布进行研究,从而精确地确定沉淀池的尺寸和沉淀效率.

周进周出式沉淀池主要用于水解酸化池厌氧污泥的泥水初步分离,并将沉淀污泥回流至水解池,以提高水解池污泥浓度^[6].笔者以南方某污水处理厂直径 60 m 的周进周出式沉淀池为研究对象,该沉淀池设计规模为 10 万 m³/d,初始设计方案为:直径 60 m,有效水深 5.2 m,底坡坡降 0.05,设计水力表面负荷 1.7 m³/(m²·h),圆周侧向进水,145 个配水孔.拟利用数值模拟的方法模拟水流在沉淀池内的流动情况,以得到水流在沉淀池内的流速分布和停留时间分布,据此优化沉淀池的结构,为其设计和运行管理提供依据.

1 数学模型

1.1 控制方程

沉淀池内的流场本质上属于固液两相流,但已有研究^[7-8]表明,进水活性污泥混合液固体质量分数不超过 0.3%,固体颗粒的密度在 1.015~1.034 g/cm³ 之间,粒径在 10~70 μm 之间,由于固相与液相密度接近,固体含量很低、直径很小,具有很好的跟随性.从流体力学的角度看,低加载率使得两相之间的耦合作用呈单向,即作为载体的流体介质可以通过推流和涡旋影响粒子的运动,但是粒子对流体运动却没有影响,因此可以简化为单相流场计算.

通用计算流体力学软件包 FLUENT 6.3 中提供了多种湍流模型,其中 realizable k-ε 模型^[7-8]在 k-ε 标准模型的基础上增加了湍流黏性公式和耗散率输运方程,因此在流动分离和二次流方面有很好的模拟性能.笔者在研究中选择 realizable k-ε 模型进行计算,其紊动能 k 和紊流动能耗散率 ε 的运输方程分别为

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_i}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + v_i \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \beta g_i \frac{v_i}{\sigma_i} \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} - \epsilon \tag{1}$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_i}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \tag{2}$$

式中符号含义同文献[7-8].

计算时假定进入沉淀池的清水密度为 1000.35 kg/m³,动力黏度为 1.005e⁻³ Pa·s.考虑进水口对沉淀池的影响较大,因此按原设计方案取 145 个进水口.沉淀池的主要设计参数见图 1.计算采用非结构网格,网格节点为 30 万个.

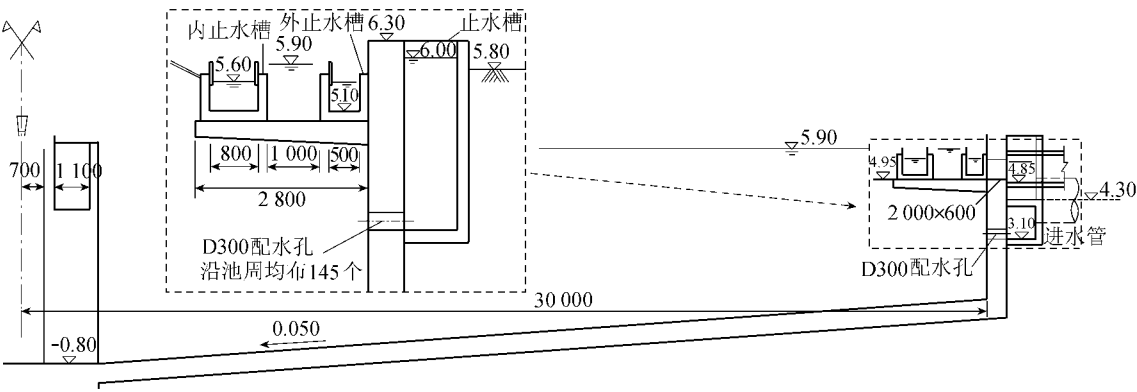


图 1 周进周出式沉淀池主要设计参数(高程单位:m;尺寸单位:mm)

Fig. 1 Main design parameters for sedimentation tank with peripheral inflow and peripheral effluent (Units :elevation in m, and size in mm)

1.2 边界条件

进口为速度边界条件,出口压力为敞开大气压,水面为自由界面,没有剪切和滑移速度,池底和边壁为固

体壁面,壁面上流速为零,使用标准壁面函数.用交错网格有限体积法(CVM)求解微分方程,压力与速度耦合方程用SIMPLEC方法进行求解,对湍动能、湍流耗散、动能均采用QUICK离散格式.

2 沉淀池内部环流的优化

利用已建立的沉淀池数值模型模拟计算周进周出式沉淀池内部环流区域的流场特征.辐流式沉淀池的内部环向流速受池底、边壁、进口挡板及出口溢流堰影响较大^[9],与假设切向速度为零的理想沉淀池存在很大差异.为改善内部环流,拟分别讨论进水方式、挡水裙板、径深比和坡降对沉淀池内流场的影响.

2.1 进水方式的比选

针对初始设计方案中侧向进水的方式计算沉淀池内的速度矢量分布,分析沉淀池内的流场特点.计算结果见图2.

尽管沉淀池内流态复杂,但如果忽略池底部及池顶自由液面的影响,池内各纵断面的流动情况基本一致,表明进水处水流的分配基本均匀.如图2所示,侧向进水时进口流速较大,水流未直接从挡板上方的溢流堰流出,而是在配水槽后10~20 m范围后形成一股旋流,但在同一断面内流速衰减较快,半径20 m的断面靠近池底处流速已接近 1.00×10^{-2} m/s.为了增加水流动力效应对悬浮污泥颗粒的裹挟作用并促使污泥均匀沉降,进一步增大池内水力环流的半径,将沉淀池进水方式改为竖向流,使断面上不同深度的流速增大.进口处局部放大的流速矢量显示,竖向进水时沉淀池中间水位的流速有所增加,一般在 $2.00 \times 10^{-2} \sim 4.50 \times 10^{-2}$ m/s,与设计流速基本吻合.

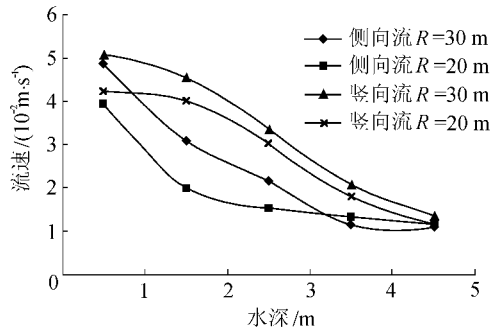


图2 进水方案不同断面的流速分布

Fig. 2 Inflow velocity distributions at different cross-sections

2.2 挡水裙板的优化设计

沉淀池挡水裙板的设置一方面可以起到消能和稳定水流的作用,且挡板浸入水下深度宜大些;另一方面,由配水槽向下流进水时,入口段挡板后方出现了一个较大的旋涡区,随着挡板相对淹没深度的增加,旋涡的回流区域也在增大,即淹没深度越大则池内死水区也越大,不利于沉淀^[10].因此,挡板的相对淹没深度存在一个合理范围.

根据设计方案,建模时选择3种方案(图3)进行比选.3种方案分别如下:方案b1,即原设计方案,无挡水裙板,沉淀池侧面进水;方案b2,沉淀池底部挡板旁边设置裙板,沉淀池上部进水;方案b3,进水口与方案b2的布置形式相同,但裙板的位置不同.分别对3种方案建立模型,并计算相应的流场特性参数.流速分布计算结果见图4.

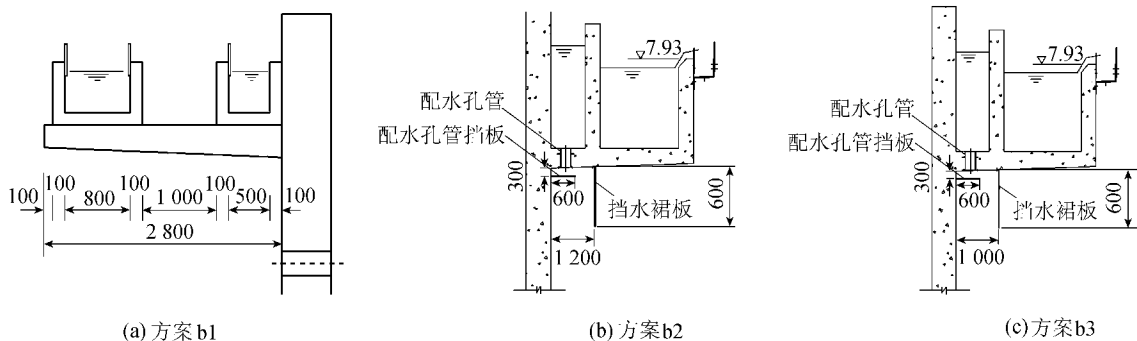


图3 挡水裙板布置示意图(高程单位:m;尺寸单位:mm)

Fig. 3 Layout of water-retaining baffle (Units: elevation in m, and size in mm)

对比局部断面的流线(图略)可知,方案1流线最短,可能是水流从侧面进入沉淀池后直接从上部的溢流堰流出,内部形成短流的可能性较大.因此,侧面进水时无挡板和裙板方案的水力条件较差.

试验结果及图4表明,沉淀池进口无挡板时,起端流速较大,但未在纵断面上形成明显的环流中心,池内流速的梯度差只有0.002 m/s,至池中心时流速偏于混乱,易造成已经形成的污泥颗粒沉降不均匀.方案b2

与方案 b3 的进水方式相同,但裙板布置方式不同,2 种方案中水流先从进水口进入,然后通过挡板和裙板折流至底部,再从溢流堰流出. 加设垂向挡板后,池内流速的梯度差增大至 0.007 m/s ,纵断面上形成明显的环流中心,并且随着 2 块挡板垂向间距的缩小,起端流速和环流半径均略有增加,池内沉降区流速分布较合理,悬浮污泥颗粒既能被带走又不至于破裂. 这 2 种方案的流线均较长,基本可至沉淀池中心位置,内部环流明显,形成短流的可能性较小.

2.3 径深比的影响

理论上,圆形沉淀池的径深比 θ (其直径与有效水深 h_e 之比) 越大,对污染物的去除越有利,但沉淀池占地面积随径深比的增加而增加,相应的工程费用也增加,且会对水厂的整体布局造成困难. 当径深比达到一定数值时,随着径深比的增大,沉淀池对污染物去除率的增加程度很小,因此有必要提出合理的径深比范围.

根据 GB50014—2006《室外排水设计规范》的推荐范围及设计方案,模拟计算时选择 8 种不同径深比方案(表 1)建模,以考察径深比对沉淀池内部环流的影响. 建模时,将中沉池进水及出水部分简化,并考虑对称建立半圆周的模型. 由于仅考察沉淀池径深比对内部环流的影响,因此建立二维模型、比较中心断面流场分布即可^[11-12]. 环流半径 R_c 和雷诺数 Re 计算结果见表 1.

试验结果得到的 8 种有效水深时沉淀池内速度矢量的分布情况表明: θ 由 8.6 增至 12.0 时,沉淀池内部低压区域由池周向中心移动,而速度分布显示内部环流逐渐缩小,环流半径由 28.6 m 降至 15.4 m ; θ 由 8.6 增至 10.0 时,紊流有所减弱; θ 由 10.0 增至 12.0 时,池内紊流程度略有升高,压力变化很小. 由此可见,设计时 θ 宜不小于 8.0,当其值大于 12.0 时沉淀池内基本上无环流产生,死水区域过大. 为节约用地、保证悬浮物的沉降,建议设计时取 $\theta = 8.0 \sim 10.0$.

2.4 池底坡降的影响

根据污泥颗粒的沉降特性,沉淀池底的坡度有益于沉积污泥的刮除或吸出. 坡度越大,沉淀池排泥越顺畅. 另一方面,沉淀池底坡度的增加要求机械排泥设备相应地提高传动深度. 以本工程为例,每增加 0.010 的坡降,污泥斗的深度需增加 0.3 m,同时沉淀池的工程造价也相应提高. 因此,按照 GB50014—2006《室外排水设计规范》和工程经验,辐流式沉淀池的坡降一般宜选择为 0.050. 以下通过建模和数值计算,分析沉淀池坡降适当增加对池内流态的影响.

根据设计方案,模拟计算时采用不同坡降 i 及中心深度 h ,选择 4 种坡降方案建模. 方案 d1, $i = 0.050$, $h = 6.70\text{ m}$ 方案 d2, $i = 0.050$, $h = 7.50\text{ m}$ 方案 d3, $i = 0.075$, $h = 8.25\text{ m}$ 方案 d4, $i = 0.100$, $h = 9.00\text{ m}$. 其中方案 d1 的有效水深为 5.2 m (初始设计方案),方案 d2 ~ d4 的有效水深为 6.0 m . 建模时,将中沉池进水及出水部分简化,并考虑对称建立半圆周的模型. 由于仅考察坡降对池内环流的影响,因此建立二维模型、比较中心断面流场分布即可. 计算结果见图 5.

计算结果表明,沉淀池底坡的坡降对池内流场有一定的影响. 图 5 显示了 3 种坡降(0.050,0.075,0.100)的紊动能变化情况,说明随着池底坡度的增大,池内流场的紊动半径向着中心有所减小,但整体紊动强度的减弱并不明显. 坡度 0.050 时沉淀池内部的环流明显,死水区域相对较小. 坡度 0.100 时沉淀池内部的环流几乎消失,只在池中心形成一定的环流区域,对集水不利,同时死水区域相对较大. 另外,3 种坡降的总压等

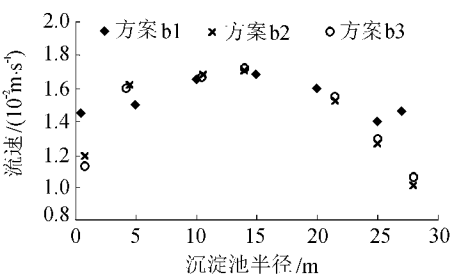


图 4 沉淀池不同裙板的纵向速度分布 ($h = 3.2\text{ m}$)
Fig. 4 Longitudinal flow velocity distributions in sedimentation tank with different layouts of baffle ($h = 3.2\text{ m}$)

表 1 不同径深比方案的环流半径和雷诺数比较
Table 1 Circulation radiuses and Reynolds numbers of options with different ratios of diameter to depth

方案	h_e/m	θ	R_c/m	Re
c1	10.0	6.0	19.8 ± 1.4	477 863
c2	8.5	7.1	22.0 ± 1.2	419 847
c3	7.5	8.0	24.1 ± 1.0	409 924
c4	7.0	8.6	27.7 ± 0.9	428 626
c5	6.5	9.2	27.5 ± 1.6	424 809
c6	6.0	10.0	26.9 ± 0.9	413 359
c7	5.5	10.9	25.3 ± 1.3	482 824
c8	5.0	12.0	16.1 ± 0.7	507 252

值线(图略)说明随着坡度的增大,高压区域逐渐分散,并向池中心移动,这与计算的速度矢量结果一致. 因此,在0.050~0.100的范围内增加沉淀池的坡降,对沉淀池内部的整体流态改善有限. 由于坡降增加对工程造价及设备要求的影响较大,因此沉淀池底坡降的设计应综合考虑工程造价等经济指标. 经数值计算后,建议本工程的沉淀池坡降选择0.050.

3 结 论

- a. 南方某污水处理厂直径为60 m的周进周出式沉淀池采用竖向流的进水方式较优,有利于提高沉淀池纵断面不同深度的流速分布,增大沉淀池内部的环流区域.
- b. 改进周进周出式沉淀池内部环流的措施包括:设置互为垂向的挡板和裙板,但挡板高度及边距对沉淀池运行效率影响不大. 沉淀池的径深比 θ 宜控制在8.0~10.0范围内. 在 $i=0.050\sim0.100$ 范围内,增加沉淀池的坡降对整体流态改善有限,沉淀池坡降宜选择0.050.

参考文献:

[1] BAJCARA T, GOSARB L, ŠIROKA B, et al. Influence of flow field on sedimentation efficiency in a circular settling tank with peripheral inflow and central effluent[J]. Chemical Engineering and Processing, 2010, 49(5): 514-522.

[2] EKAMA G, MARAIS P. Assessing the applicability of the 1D flux theory to full-scale secondary settling tank design with a 2D hydrodynamic model[J]. Water Research, 2004, 38(3): 495-506.

[3] LÓPEZ P R, LAVÍN A G, LÓPEZ M M M, et al. Flow models for rectangular sedimentation tanks[J]. Chemical Engineering and Processing, 2008, 47(9/10): 1705-1716.

[4] MARTIN A D. Optimisation of clarifier-thickeners processing stable suspensions for turn-up/turn-down[J]. Water Research, 2004, 38(6): 1568-1578.

[5] DAVID R, SAUCEZ P, VASEL J L, et al. Modeling and numerical simulation of secondary settlers: a method of lines strategy[J]. Water Research, 2009, 43(2): 319-330.

[6] GOULAA A M, KOSTOGLIOU M, KARAPANTSIOS T D, et al. The effect of influent temperature variations in a sedimentation tank for potable water treatment: a computational fluid dynamics study[J]. Water Research, 2008, 42(13): 3405-3414.

[7] GOSAR L, STEINMAN F, ŠIROK B, et al. Phenomenological sedimentation model for an industrial circular settling tank[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 55(5): 319-326.

[8] SBRIZZAIA F, LAVEZZOA V, VERZICCO R, et al. Direct numerical simulation of turbulent particle dispersion in an unbaffled stirred-tank reactor[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(9): 2843-2851.

[9] 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. (HE Guo-jian, WANG De-guan. Modeling of suspended solid transport in rectangular settling tanks[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2005, 45(12): 1617-1620. (in Chinese))

[10] 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 Xiao-ling, CAO Yue-bo, ZHANG Ming-xing, 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))

[11] 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(45): 58-61. (QU Qiang, MA Lu-ming, WANG Hong-wu, et al. Simulation of flow pattern in baffled sedimentation tank[J]. China Water & Wastewater, 2005, 21(45): 58-61. (in Chinese))

[12] 蔡金榜,段祥宝,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. (CAI Jin-bang, DUAN Xiang-bao, ZHU Liang. Numerical simulation of flow in sedimentation tanks[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2003, 25(4): 64-69. (in Chinese))

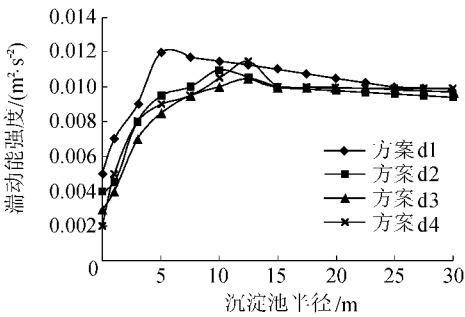


图5 沉淀池不同坡降的湍动能强度分布
Fig. 5 Turbulent kinetic energy intensity distributions at different gradients