沉淀池中的异重流运动特性

詹 咏[1]， 吴文权[1]， 王惠民[2]
（1.上海理工大学 城建学院，上海 200093；2.河海大学 水文水资源及环境学院，江苏 南京 210098）

摘 要：通过对沉淀池中异重流运动特性的试验研究，指出水流流型的稳定性是防止沉淀池中出现异重流的有利措施，并以此对沉淀池进行了合理改造，取得了较稳定的水流流型，较好地控制了沉淀池中异重流的发生。

关键词：沉淀池；沉淀效率；异重流
中图分类号：TU991.23 文献标识码：C 文章编号：1000－4602(2003)01－0043－03

水流条件是影响平流式沉淀池沉淀效率的重要因素之一，而水流对悬浮颗粒沉淀过程的影响尤以异重流为最大。进水与池内水的温差或悬浮颗粒浓度差使得进水与池内水之间具有一定的重度差，当进入沉淀池的水温低于池内水温时便形成密度较大的进水沉于池子下部的流动，池中原来温度较高的水便浮在池子上部，即产生下异重流（反之，当进水的温度高时，则出现进水浮在池子上部的上异重流）。同时，进水与池内水含悬浮物浓度不同所引起的密度差也会导致异重流。进水会以潜流形式沿水平方向向水池出口推进，且随着池中水的运动，异重流的形态和特征也在不断地变化和发展，使得沉淀池上部很大部分成为环流的死水区，严重影响沉淀池的处理效果，因此需对沉淀池中异重流的形成及其特性作进一步研究。

1 沉淀池模型

根据试验场地条件及具体要求，选用正态动床模型。由于惯性力和重力为沉淀池中水流运动的重要作用力，采用弗汝德相似准则设计模型，并按几何比尺 $\lambda_l=\lambda_h=5$、流速比尺 $\lambda_u=\lambda_l^{1/2}$、时间比尺 $\lambda_{tl}=\lambda_l/\lambda_u$、流量比尺 $\lambda_q=\lambda_l^{5/2}$ 严格加工而成。为观测方便，池外侧采用有机玻璃材料，并设有7个取样断面，同时外侧设有排泥管。试验主要按两种方案进行：方案一，为使水流分配均匀，在进水和出水处设置带有整流墙的沉淀池；方案二，针对方案一出现的严重异重流现象，在沉淀池中间部位均匀设置导流墙，从而大大改善水流条件，使沉淀效率得到明显提高。沉淀池模型如图1所示。

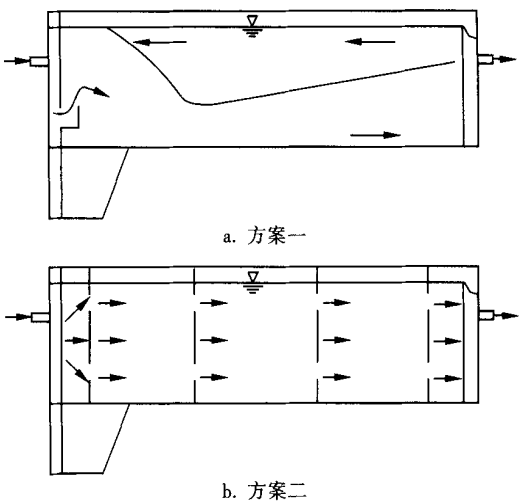

图1 沉淀池模型示意图

模型制成后，首先进行了清水验证试验，主要包括模型糙率测定及模型水流检验，从而保证了本模型的水流和悬浮颗粒运动相似条件。在此基础上进行了正式试验。

2 结果与讨论

2.1 悬浮物浓度分布的沿程变化

试验表明，距沉淀池进口较近处的悬浮物浓度沿垂线分布不太均匀，在异重流潜入点处的浓度为零。在距斗槽进口较远处，浓度分布比较均匀，于交界面附近有明显折点，表明悬浮物浓度沿程分布递减（如图2所示）。经分析可知，悬浮物浓度越大则沿垂线的分布越不均匀、沿程分布变化越大。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

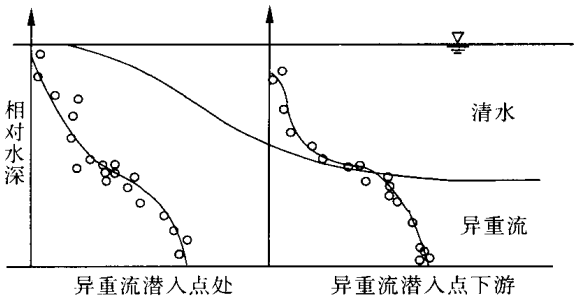

图 2 悬浮物浓度分布的沿程变化

2.2 淤泥面与浑液面变化率

因淤泥面与浑液面变化率是高浊度水动态沉淀计算的重要参数，故试验中做了较深入的观测，对初始悬浮物浓度为 17.1 kg/m^3、水深为 60 cm 的模型实测结果见表 1。

表 1 浑水区厚度 h 和淤泥厚度 z 随时间 t 的变化

断面	190 min		250 min		320 min	
	h(cm)	z(cm)	h(cm)	z(cm)	h(cm)	z(cm)
1	0	1.6	0	3.5	0	3.1
2	12.6	1.5	13.2	3.4	15.5	3.1
3	15.1	1.5	17.2	3.2	19.0	3.8
4	16.6	1.7	17.4	3.1	20.4	2.9
5	12.5	1.5	14.4	2.9	17.6	2.2
6	11.7	1.4	15.0	3.0	20.0	2.1
7	9.3	1.3	10.8	2.5	11.8	2.7

经回归分析可得浑水区厚度和淤泥厚度随时间的变化规律：

$$h = 2.58\ t \tag{1}$$

$$z = 1.62\ t \tag{2}$$

2.3 异重流中流速分布

沉淀池模型是矩形规则断面，实测流速分布如图 3 所示。过折点 A 的平面为清浑水交界面，浑水区厚度为 h，按最大流速所在点位置可化分为上、下两个区域，其厚度分别为 h_1 和 h_2，在两区域流速分布规律不同。

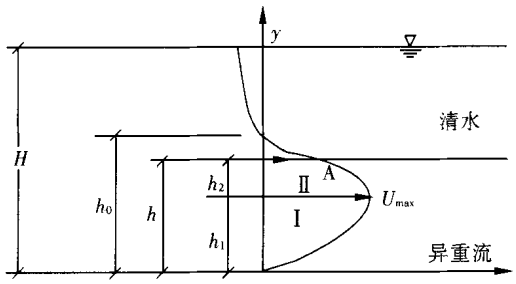

图 3 流速分布

在Ⅰ区，水流未受交界面阻力影响，因此流速分布与一般明渠水流相同，速度(u)的分布基本遵循对数规律：

$$u = Au_{max}\left(\frac{y}{h_1}\right)^{1/m} \tag{3}$$

式中 A、m——该区平均流速的函数

在Ⅱ区，即异重流与上层清水水流之间的区域($h_1 < y < h_0$)，流速分布经折点 A 而达到零，曲线形状与紊流射流在扩散后的流速分布十分相似，遵循高斯正常误差定律：

$$\frac{u}{u_{max}} = e^{\frac{1}{2}\left(\frac{y-h_1}{\sigma}\right)^2} \tag{4}$$

式中 σ——最大流速点至转折点的距离

由式(4)可算出这一区域内的平均速度为最大流速的 0.854 倍。同时根据实测模型流速分布，可认为沉降过程中水流为缓流异重流。

2.4 稳定悬浮物与极限粒径

高浊度水中均浓浑水层悬浮颗粒的极限粒径是指组成稳定颗粒的最大粒径，给水工程中常取 d_{90} 为极限粒径代表值。事实上，随着非稳定颗粒的不断分选，经过一段时间，水中非稳定颗粒下沉结束并开始出现较稳定的均浓浑水层之后的最大悬浮颗粒才代表极限粒径。

当已知异重流流速 U 和其级配时，可从 U 和 d_{90} 关系式求得异重流中可能挟带颗粒的 d_{90} 值，即可推算异重流悬浮颗粒浓度的沿程变化(见图 4)。

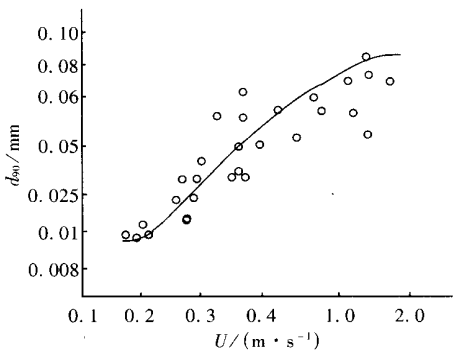

图 4 异重流速与 d_{90} 的关系

由本试验及以往所做高浊度水试验结果可得位于浑液面以下均浑水层颗粒极限粒径与悬浮颗粒浓度的关系：

$$(d_{90})_k = 0.019\ 9 + 810S_r \tag{5}$$

式中 $(d_{90})_k$——极限粒径，mm

S_r——稳定悬浮颗粒浓度，mg/L

2.5 清水分离速度 V_y

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

根据沉淀池中的浑水浓缩规律，浑液面距沉淀池底的高度应为时间 t 的函数，经动态沉淀理论分析，高浊度水动态沉淀的清水分离速度 V_y 小于相同条件下的动水浑液面沉速 V_G，其比值为：

$$\frac{V_y}{V_G}=(1-\frac{S_0}{S_u}) \tag{6}$$

式中 S_0——进水颗粒浓度，mg/L

S_u——排泥水颗粒浓度，mg/L

对高浊度水异重流沉降的试验研究得出，当颗粒粒径 d_{50}在 0.05～0.06 mm 范围内变化、水温为 20 ℃时，其清水分离速度的计算式为：

$$V_y=0.019\ S_0^{2/3} \tag{7}$$

当然，细粉沙颗粒越多则清水分离速度比以粘土泥沙为主的高浊度水试验所得清水分离速度越大。另外，沉淀池形式及进水和出水条件的改变也将对清水分离速度产生影响。

3 防止异重流出现的条件

有关资料表明，在10～20 ℃内每增加0.5 ℃则水的密度约减少 0.105 kg/m^3，每增加 100 mg/L 悬浮颗粒则水的密度约增加0.062 3 kg/m^3。在本试验中，由于方案一池子进口区设计的缺陷，在温差约为0.4 ℃时便出现了明显的异重流，使得池子上部约五分之三的容积成为死水区。控制沉淀池异重流出现的办法首先是要控制水流流型的稳定性（如在试验方案二中增设了导流墙，从而大大改善了水流条件，异重流现象基本消失）。如前所述，沉淀池的水流是一种重力流，水流流型的控制应该按弗汝德公式计算[1]：

$$F_r'=\frac{v^2}{(1-\frac{\rho}{\rho'})gR}=\frac{v^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho'}gR} \tag{8}$$

式中 F_r——弗汝德数

ρ'——含悬浮颗粒浑水或者低温水的密度

ρ——清水的密度

R——沉淀池断面的水力半径

v——流速

$\Delta\rho$——密度差

引用明渠的研究结果，当 F_r 为 $0.2^2\sim0.7^2$ 时则沉淀池内出现稳定的异重流。因此，当进入沉淀池的水温比池内低 0.5 ℃同时多含 100 mg/L 悬浮颗粒时，密度差＝0.167 kg/m^3，为了使沉淀池中不出现异重流现象，必须满足条件：

$$F_r=\frac{v^2}{gR}>(0.2^2\sim0.7^2)\times\frac{0.167}{1\,000}=10^{-5}\sim10^{-4} \tag{9}$$

同样可得，当进水比池内水多含 1 000 mg/L 悬浮颗粒时，$F_r>(3\times10^{-5}\sim4\times10^{-4})$才不至于使沉淀池内出现异重流现象。因此，加大沉淀池的水平流速以使 F_r 随之增加，也就增强了沉淀池的抗异重流性，起到了保持水流稳定的作用。

4 结论

① 整个沉淀池的水流为异重流，通过试验得出了针对异重流特性的有关参数——淤泥面、浑液面变化率以及清水分离速度。

② 试验分析了受异重流影响的沉淀池中流速分布情况，并对紊流异重流近底区指数流速分布公式中系数 A 和指数 m 与平均流速的关系进行了研究。

③ 从异重流流速与 d_{90}的关系可推算出异重流颗粒浓度的沿程变化，同时得出了位于浑液面以下均浓层颗粒极限粒径与稳定悬浮颗粒浓度的关系式。

④ 指出控制水流流型的稳定性是控制沉淀池中异重流现象出现的重要措施，通过控制 F_r 数即可防止异重流的出现。

参考文献：

[1] 许保玖，安鼎年. 给水处理理论与设计[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1992.

电话：(021)65685710

收稿日期：2002－06－02

创建节水型城市，实施可持续发展

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net