

文章编号:1005-0523(2011)06-0028-05

# 斜管(板)沉淀技术优化研究进展

丰桂珍<sup>1,2</sup>, 童楨恭<sup>2</sup>, 唐朝春<sup>2</sup>

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:**斜管(板)沉淀技术由于其处理效率高、占地面积少等优点,经常用于固液分离中,对斜管(板)沉淀池沉淀效率的预测等问题是评价其沉淀性能的重要方面。文章从斜管断面形状、斜管长度、安装角度等结构参数对斜管沉淀效率的影响和斜管沉淀技术在设计运行存在的问题这两方面总结了近年来国内外研究者在斜管沉淀技术优化方面的研究,并对今后斜管(板)沉淀技术的研究方向进行了展望。

**关键词:**斜管沉淀;结构参数;水力条件;设计运行;沉淀效率

**中图分类号:**TU99

**文献标志码:**A

斜管(板)沉淀技术由于其处理效率高、占地面积少等优点,经常用于水处理工程的固液分离中,对斜管沉淀池沉淀效率的预测问题是评价其沉淀性能的重要方面。目前,我国城市供水行业面临水源水质污染、供水水质标准提高的双重压力。《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006)要求出厂水浊度保持在1NTU以下,这对关键处理工序之一的沉淀环节也提出了新的要求。如何从影响斜管(板)沉淀的各因素全面考虑该工艺的适应性及其性能优化,成为十分现实的问题。

本文从斜管结构参数对斜管沉淀效率的影响和斜管沉淀技术在设计运行中存在的问题这两方面总结了近年来国内外研究者在斜管沉淀技术优化方面的研究情况,并对该技术用于现有水处理构筑物方面的改造及其研究方向进行了展望。

## 1 斜管结构参数对沉淀效果的影响

### 1.1 斜管断面形状的研究

斜管沉淀技术中斜管的断面形式越来越多,曾出现的斜管断面形状有:正六边形(蜂窝型)、山形、正方形、缺角正方形、近菱形(新六边形)、矩形等。目前工程中应用的斜管断面形状多为正六边形,因为其管内水流条件、制造及整体强度等方面都相对较为理想。国内一些学者对缺角正方形、山形等斜管作了大量研究。刘荣光等<sup>[1]</sup>从水力半径、单位表面积的沉淀面积、制作斜管的单位体积材料消耗及水力特性参数公式等方面对缺角正方形斜管与蜂窝斜管作了研究,认为仅水力特性参数公式方面缺角正方形劣于蜂窝型斜管,其他方面缺角正方形均优于蜂窝型斜管,该研究仅局限于因过水断面形状影响的水力条件,不能全面反映沉淀的实际情况。廖足良等<sup>[2]</sup>提出了斜管沉淀池的6项评价指标,水力半径 $R$ 、单位液面的斜管沉淀面积 $A_s$ 、单位体积斜管材料耗量 $M_A$ 、粘接面百分数 $P$ 、滑泥性能以及斜管整体强度,推导出4种斜管(正六边形、山形、近菱形、缺角正方形)4项指标( $R$ 、 $A_s$ 、 $M_A$ 、 $P$ )的定量表达式,并指出这些指标不是孤立的,相互之间有一定的影响,需要综合评价。对比分析各种断面形状斜管的综合性能,也认为缺角正方形斜管最佳,这种斜管在降低斜管造价的前提下反而能提高沉淀性能,相同耗材的缺角正方形斜管较蜂窝斜管出水浊度能降低2~3 NTU。

收稿日期:2011-04-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50868005)

作者简介:丰桂珍(1977—),女,讲师,博士研究生,研究方向为水处理理论与技术。

## 1.2 斜管长度的研究

我国斜管沉淀中普遍采用的斜管长度为100 cm左右,而国外的斜管采用60~70 cm。无论是用于斜管沉淀池中还是澄清池等现有构筑物的改造中,若能在保证分离效果的前提下,缩短斜管长度或改变其结构参数,使池体高度降低,则可节省配水水头,降低能量消耗。

盛国荣<sup>[3]</sup>利用嘉陵江原水进行了各种类型斜管的模型试验,建立了浊度与管长、沉淀效率与管长之间关系的数学模型。研究表明,斜管前60~70 cm内沉淀效率较高,浊度随管长增加而迅速降低;在末端的30~40 cm内,沉淀效率较低,浊度随管长增加而略有降低;通过流态试验结果表明,各种类型的斜管在通常的表面负荷下,过渡段的长度仅3 cm左右,过渡段中水流紊动对管内颗粒沉淀影响甚微,论证了斜管长度由100 cm减少至60~70 cm的可能性。

田伟博<sup>[4]</sup>研究了斜管长度中的“过渡段”及斜管进水方式对沉淀效果的影响,其研究表明,从流态上讲“过渡段”确实存在,当液面负荷 $q$ 大于 $8 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ 时,斜管进口端的水流流线开始左右摆动,其摆动程度随 $q$ 的增大而增大,并求出了流线摆的数学模型;而从沉淀效率上讲,在斜管进口端0~20 cm处,各类斜管都具有比较高的沉淀效率,约占整个沉淀效率的30%~50%,这说明过渡段对沉淀效果的影响甚微,建议在斜管长度设计时不考虑过渡段。对于斜管进水方式的研究结果表明,当液面负荷 $q$ 小于 $18 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ 时,顺流进水和折流进水对水流在斜管中的沉淀效果影响不大。

廖足良等<sup>[5]</sup>通过试验研究得出:斜管的出水浊度与斜管长度存在指数函数关系 $c = A \cdot e^{B \cdot L_0 / L + L_0}$ ,当斜管长较小时,出水浊度随斜管长增加而下降速度较快,当斜管长大于60 cm时,出水浊度随斜管长下降速度较小。沉淀效率 $\eta$ 与斜管长之间存在指数函数关系 $\eta = 1 - A' \cdot e^{B' \cdot L_0 / L + L_0}$ ,当斜管长较小时 $\eta$ 值较小,但 $\eta$ 随斜管长增加而增加的较多,当斜管长大于60 cm时, $\eta$ 较大,但 $\eta$ 随斜管长增加而增加的较少。由此可见,斜管长不一定要100 cm,必要时采用60~80 cm仍能取得较好的沉淀效果,这对于平流式沉淀池及现有澄清池中清水区增设斜管的改造有较大的参考价值,同时在安装高度有限而出水水质要求不高的情况下,也可用长度为60 cm的斜管达到设计要求。

由上述研究可以看出,在受工程实际条件限制的情况下,可以尝试将斜管长度由100 cm减少至60~80 cm,出水效果不会受太大影响。

## 1.3 斜板的安装角度对沉淀效率的影响

在沉淀池的设计中,主要参数 $q_0 = \frac{Q}{A}$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ ),在 $Q$ 一定的条件下,沉淀池的沉淀效率取决于沉淀表面积 $A$ 的变化,因此要增大沉淀效率,在一定条件下可通过增加沉淀表面积 $A$ 来实现,但同时要考虑到沉淀污泥能否自然下滑问题。增加斜板后其表面负荷可表示为 $q_0' = \frac{q_0(w+t)}{H \cos \alpha + w}$ ,其中 $H$ 为沉淀水深, $w$ 为板距, $t$ 为板厚, $\alpha$ 为安装角度,由此式可以看出 $q_0'$ 随 $\frac{(w+t)}{H \cos \alpha + w}$ 的变化而变化。Ahmet Demir<sup>[6]</sup>通过试验研究了在不同表面负荷状态下,斜板沉淀池的沉淀效率与安装角度之间的关系,并运用二次非线性回归建立了关于沉淀效率与表面负荷和安装角度的关系式(此处删掉了具体表达式)。由此可方便的确定在不同表面负荷情况下,为获得最大沉淀效率的斜板最佳安装角度,这对于指导实际设计有重要意义。

## 1.4 斜板沉淀池沉淀效果的评价

目前,针对沉淀池的研究大多是围绕其设计和生产中的问题进行的,对预测沉淀效率的研究报道相对较少。近年来无因次分析法开始应用于斜板沉淀池沉淀效率的评价,虽然模型试验与实际沉淀池的水流状态存在差异,但其对确定影响沉淀效率的参数,并弄清这些参数之间的相互关系是非常重要的。Sudipto Sarkar<sup>[7]</sup>等利用无因次分析法分析了沉淀池沉淀效率 $\eta$ 与几何参数板间距 $w_p$ 、安装角度 $\alpha$ 、板长 $L_p$ 、板的粗糙度 $\varepsilon_p$ 、安装板的数量 $n_p$ 、颗粒直径 $d_s$ 之间的关系。该研究讨论了沉淀效率 $\eta$ 与无因次参数 $Z = \frac{\text{Re}}{Fr}$

之间的关系,建立了在不同范围内 $Z$ 与 $\eta$ 之间关系表达式(此处删掉了具体表达式);通过建立这些参数之间的关系,可以获得最佳的沉淀效率下,沉淀池斜板各部分的尺寸,这对于指导斜板沉淀池的设计具有重要意义。

黄廷林等<sup>[8]</sup>从理论角度分析了斜管沉淀池的结构参数对沉淀效果的影响,认为斜管沉淀池的结构参数(管径 $d$ 、管长 $L$ 、倾角 $\alpha$ )和控制参数(表面负荷 $q$ 、管内流速 $v$ )影响沉淀效率。他研究了进入斜管内絮体的运动轨迹,并借助姚氏特征参数推求设计参数对临界沉速 $u_0$ 的影响情况;同时对沿斜管内壁下滑的絮团进行受力分析,求取其对结构参数的最低要求。研究表明,临界沉速 $u_0$ 与表面负荷 $q$ 成正比,存在满足絮团下滑条件的最大表面负荷 $q$ ,且管径越大受表面负荷的影响越大;综合考虑絮体沉降和絮团下滑,不同表面负荷 $q$ 下存在较优管径 $d$ ;考虑管长方向上的比临界沉速,斜管管长 $L$ 宜选择为120~140 cm;斜管倾角35~60°基本能满足絮团下滑的要求。这与1.2中的研究结论并不矛盾,本研究旨在讨论管长方向上的比临界沉速、斜管管长与满足絮团下滑要求间的关系。

## 2 斜管沉淀池设计运行中的问题

### 2.1 水力条件对沉淀效果的影响

在沉淀池的设计和改造中,布水均匀性对沉淀效果影响很大。黄廷林等<sup>[9]</sup>建立了斜管沉淀池布水均匀性模型,通过简化模型和结合工程实际模拟计算认为:沉淀池的长宽比( $L/B$ )是影响布水均匀性的最重要参数,当 $L/B$ 大于6时,布水区末端斜管几乎没有水流,布水极不均匀。布水区高度的增加有利于均匀布水,基于沉淀池深度的限制,布水区高度不宜过大,通过模型计算认为欲使沉淀池均匀布水,沉淀池的高度不宜小于200 cm,并且布水不均匀程度随斜管管径的增大而增加。施周等<sup>[10]</sup>从管内流态为层流及流速分布呈旋转抛物面的假定出发,推导了包含沉淀颗粒加速度 $a$ 、初始沉速 $u_0$ 、斜管长 $L$ 、计算半径 $r_i$ 和倾角 $\alpha$ 等参数的斜管水力计算式,讨论了斜管内的流速分布。黄廷林<sup>[11-12]</sup>等又通过简化斜管沉淀池的布水均匀性水力模型,定性和定量分析了布水不均匀性对沉淀效果的影响,其研究表明随着长宽比( $L/B$ )的增加,絮体的沉降效果和出水水质逐渐变差,当表面负荷 $q$ 为 $10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ 时, $L/B$ 分别大于5和3时,下滑絮体的受力 $F_{\text{合}}$ 几乎为0,固液分离效果受到严重影响;随着布水区高度 $h_1$ 的增大首管的临界沉速逐渐减小,适宜的布水区高度 $h_1$ 为120~160 cm;随着斜管管径 $d$ 和表面负荷 $q$ 的增大,首管临界沉速与沉淀池平均临界沉速差值( $\Delta(u_{F0}-u_0)$ )逐渐加大。

要提高供水水质,关键问题之一是要降低水的浑浊度。近年来由于水源水质的不断恶化,传统的沉淀处理很难达到出水水质的要求,因此各种强化常规处理技术如斜管沉淀技术等相继出现。陈敏生<sup>[13]</sup>通过设计和工程实践认为合理选择配水流速 $v_1$ 与上升流速 $v_2$ ,并使其能有机的匹配,是斜管沉淀池能否高效运行的重要问题,通过对沉淀池的运行观察,凡是 $v_1$ 值过高者,即使 $v_2$ 值不高,其表面负荷及积泥深度对出水水质都有较大影响。周平等<sup>[14]</sup>在惠州某水厂的运行中也发现沉淀后水的浊度对积泥深度的变化敏感,及时排泥是沉淀池运转中极为重要的工作。段龙武<sup>[15]</sup>结合多年的工程设计经验,提出了改善斜管沉淀池出水效果的工程措施,如在反应池沉淀池平面布置时采用正向进水方式,以便获得较好的水流条件,而沉淀池短边进水对均匀布水带来的影响则可以通过调整集水槽控制均匀出流来弥补,并提出了选择最佳的集水方式的理论依据,得出了淹没孔口出流最有利于均匀集水的结论。

### 2.2 斜管安装改善运行效果的工程实践

工程中应用较多的上向流斜板(管)沉淀工艺在运行中存在一些问题,如滋生藻类,排泥不便、斜管顶部容易积泥等。随着城市工业和居民用水量的增加,挖掘现有水处理构筑物能力以增加产水量是目前的研究热点之一。秦建文等<sup>[16]</sup>在平流沉淀池改造为斜管沉淀池的工程实践中,在不影响集水槽正常集水及集泥槽正常集泥的情况下,调整斜管的安装高度,减少清水区的高度,增加配水区空间,同时减少泥斗的高度,增设泥斗并相应加装排泥管,在保证出水浊度的情况下,单位表面积产水量增至原来的1.33倍。K. Fujisaki<sup>[17]</sup>将原来水平放置在沉淀池中的斜板改为竖向放置方式,设计了一种新型的沉淀池,斜板左右边缘都

封闭,清水从两组板中间顶部流出,由于每一组模块都相当于一个小的沉淀池,所以该新池型的处理能力大大增加。通过实验室实验和现场运行试验证明,这种新型的安装方式可使沉淀池的处理效率大大增加。方永忠等<sup>[18]</sup>将传统上向流斜板/管由水平排列方式改为垂直排列方式,设计了新的沉淀分离工艺,经过理论分析和实际工程应用表明,在保持出水水质和工程投资基本不变的条件下,该工艺克服了上向流斜板(管)工艺易积泥,排泥困难等的缺点,同时通过增加沉淀池的高度提高了地面利用率。

### 2.3 斜板沉淀技术的CFD模拟和试验研究

Harald Laux<sup>[19]</sup>计算模拟和试验研究了两相对流斜板沉淀池中单分散性悬浮液固液分离的4种情况沉淀过程,包括浓度较大溶液和浓度小的溶液,带粘滞性的和不带粘滞性的溶液。详细讨论了容器中的分层流体,如清水层的厚度、速度剖面等,并对模拟计算结果与理论结果、实际实验结果进行了对比讨论。这项模拟工作的依据是双流体机械模型,即所应用的CFD程序,同时采用摄影技术测量了较稀悬浮液体的澄清液层厚度和沉淀层厚度。计算沉淀过程总的特征与实验观察结果吻合,但是速度剖面和顶部界面的运动与预想结果之间稍有偏差。对沉淀层的模拟结论也能与理论结论比较好的相符合,而且可以清楚的观察到微粒在斜面上的滑落过程。

### 2.4 斜板(斜管)沉淀技术的应用

除了直接在固液分离技术中采用的斜板/斜管沉淀池外,可将斜板置于其他的反应器或构筑物中增强分离效果,如将斜板(管)置于流化床反应器中用以增强分离效果。在2002年Galvin and Nguyentranlam<sup>[20]</sup>工作的基础上,Doroodchi等<sup>[20]</sup>研究了斜板对流化床中悬浮微粒分离的影响。该研究实验过程中所用斜管长度60 cm,安装角度为60°。研究过程中将斜管内的液体划分成上清液区、悬浮区,沉积层及各区之间的两个分界面,分别针对每一区域研究了微粒运动的路径问题,研究目的是要建立一个相对简单和准确的用于描述这一系统的新模型,用来解释系统中的流化悬浮液和接下来在斜管孔道中的分离过程。通过实验模拟得到了一个包含悬浮液的浓度变化、斜管中悬浮微粒的运动沉积路径等的最佳评价模型。研究结论认为澄清液浓度和悬浮物质在斜管中运动的路径长度取决于流化床的流化速度、颗粒粒径及其密度等。

Doroodchi等<sup>[22]</sup>还研究在放置了斜板的流化床中颗粒尺寸的分级问题。由于放置了斜板后增大了有效沉淀面积,所以大大增强了处理能力,本研究首次详细报道了在可控实验条件下,连续稳态条件时颗粒尺寸分级问题,设计了一种新的流化床处理方法,较原来普通流化床增强了颗粒的去除效率。并且若在分离相同颗粒尺寸条件下,可以增大处理负荷,其研究过程中发现系统的处理能力提高了3倍。

## 3 结语

由上述总结可以看出,国内外对斜管(板)沉淀池的研究主要是通过优化斜管的结构参数,如选择合理的斜管断面形状、斜管长度及安装角度,提高布水均匀性,选择合适的配水流速与上升流速等达到最优的沉淀效果。目前斜管沉淀技术用于其它构筑物如澄清池提高处理效果、增大产水能力,平流式沉淀池等的挖潜改造研究较多,但对于增设于其中的斜管特性参数优化几乎没有研究报道。今后研究可考虑对安设于澄清池清水区的斜管长度、安装角度,配水区高度等方面进行系统的研究,优化澄清池清水区的设计,结合软件模拟等分析水流及污泥在斜管配水区、斜管内部及清水区的流场状态和运动轨迹;对沿斜管内壁下滑的絮团进行受力分析,结合现场测试的水质参数值,研究优化斜管区的最佳安设位置,探索安设于澄清池澄清区的斜管沉淀技术参数,以提高现有澄清池的产水能力。

### 参考文献:

- [1] 刘荣光,罗辉荣,廖足良,等.关于缺角正方形斜管的研究[J].给水排水,1994,20(6):34-36.
- [2] 廖足良,刘荣光,罗辉荣,等.斜管沉淀的评价指标[J].水处理技术,1996,22(4):227-232.
- [3] 盛国荣.斜管沉淀池管长若干问题的研究[J].给水排水,1996,22(6):57-58.

- [4] 田伟博. 关于斜管沉淀若干问题的研究[J]. 给水排水, 1996, 22(4): 57-57.
- [5] 廖足良, 刘荣光. 斜管沉淀效率与斜长的试验研究[J]. 重庆建筑工程学院学报, 1993, 15(4): 45-51.
- [6] AHMET D. Determination optimum plate of settling efficiency and angle for plated settling tanks[J]. Water Research. 1995, 29(2): 611-616.
- [7] SUDIPTO S, DIBYENDU K. Effect of geometric and process variables on the performance of inclined plate settlers in treating aquacultural waste[J]. Water Research, 2007, 41: 993-1000.
- [8] 黄廷林, 李玉仙, 何文杰, 等. 斜管沉淀池结构参数优化的理论分析[J]. 给水排水, 2007, 33(4): 20-26.
- [9] 黄廷林, 李玉仙, 张志政, 等. 斜管沉淀池布水均匀性模拟计算与工艺参数分析[J]. 给水排水, 2005, 31(4): 16-19.
- [10] 施周, 姜乃昌, 秦成生, 等. 考虑三维流速分布的斜管沉淀水力计算研究[J]. 给水排水, 2001, 27(7): 26-29.
- [11] 黄廷林, 李玉仙, 何文杰, 等. 布水不均匀性对斜管沉淀池临界沉速的影响[J]. 水处理技术, 2008, 34(12): 28-31.
- [12] HUANG TINGLIN, LI YUXIAN, ZHANG HUI. Theoretical analysis on non-uniformity of water distribution and influence of construction parameters on settling efficiency[J]. Water Science & Technology, 2008, 58(5): 1007-1014.
- [13] 陈敏生, 梁璧凝, 陈章, 等. 斜管沉淀池设计中的几个问题[J]. 净水技术, 2005, 25(5): 74-74.
- [14] 周平, 张戎. 斜管沉淀池稳定运行因素探讨[J]. 给水排水, 2007, 33(7): 21-22.
- [15] 段龙武. 改善斜管沉淀池沉淀效果的工程措施[J]. 水利科技与经济, 2003, 9(4): 299-300.
- [16] 秦建文, 秦惠琛. 调整斜管安装高度增加产水量的工程实践[J]. 给水排水, 2005, 31(2): 37-37.
- [17] FUJISAKI K. Enhancement of settling tank capacity using a new type of tube settler[J]. Water Science & Technology, 2010, 62(6): 1213-1220.
- [18] 方永忠, 黄继华, 放永辉, 等. 立式斜板(管)沉淀工艺设计与应用[J]. 给水排水, 2010, 26(12): 150-154.
- [19] HARALD L, TOR Y. Computer simulation and experiments on two-phase flow in an inclined sedimentation vessel[J]. Powder Technology, 1997, 94: 35-49.
- [20] GALVIN K P, NGUYENTRANLAM G. Influence of parallel inclined plates in a liquid fluidised bed system[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57: 1231-1234.
- [21] DOROODCHI, FLETCHER D F, GALVIN K P. Influence of inclined plates on the expansion behaviour of particulate suspensions in a liquid fluidized bed[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59: 3559-3567.
- [22] DOROODCHI, ZHOU J, SWANN A, et al. Particle size classification in a fluidised bed containing parallel inclined plates[J]. Minerals Engineering, 2006, 19: 162-171.

## Research Advance of Inclined Pipe(Plate) Settling Technology Optimization

Feng Guizhen<sup>1,2</sup>, Tong Zhengong<sup>2</sup>, Tang Chaochun<sup>2</sup>,

(1 School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2 School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** The inclined settling technology is often used for solid-liquid separation process because of its high treatment efficiency and less floor area, the evaluation and forecast of settling efficiency is an important aspect of its performance. This paper sums up the research of optimization of the inclined settling technology both at home and abroad from configuration parameters of shape, length, installation angle of the inclined pipe. It also summarizes optimization of the inclined settling technology, and discusses the future research direction of the inclined pipe(plate) settling technology.

**Key words:** inclined settling technology; configuration parameters; hydraulic conditions; design and operation; deposition efficiency