

新型悬浮填料澄清池中填料对澄清作用的影响初探

董 滨^{1,2} 段妮娜¹ 何群彪¹ 陈洪斌¹ 高廷耀¹

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 浙江大学宁波理工学院, 宁波 315100)

摘 要 为考察可取代传统二沉池的新型悬浮填料澄清池技术的原理及关键参数, 小试试验研究了填料对新型悬浮填料澄清池固液分离过程中附着污泥形成及其絮凝性能的影响, 并对填料在澄清中的作用机理进行了探讨。结果表明, 当泥水界面上升至填料区后, 可以形成较悬浮污泥更加致密稳定的附着污泥区, 并形成孔道流, 强化了对混合液中污泥颗粒的絮凝效果; 填料区可以捕捉去除从悬浮污泥区中“逃逸”的微小污泥絮体, 并降低出水浊度, 有效地保证了出水水质的稳定性。填料的存在发挥了强大的整流作用, 降低了雷诺数 Re , 提高了弗汝德数 Fr , 从而改善了污泥絮凝的水力条件, 提高了澄清能力。

关键词 澄清池 悬浮填料 活性污泥 絮凝性能

中图分类号 X703 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2009)02-0253-05

Influence of media on clarity of novel suspended media clarifier

Dong Bin^{1,2} Duan Nina¹ He Qunbiao¹ Chen Hongbin¹ Gao Tingyao¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092;

2. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100)

Abstract The influence of media on the formation of the attached sludge in the solid-liquid separation of the novel clarifier was investigated. Experimental results indicated that duct streams could be formed around the more compact and stable attached sludge when the interface of sludge rose to the media section, which improved the flocculation effect. The minute flocculation escaped from the suspended sludge section could be trapped and removed by the media, which decreased turbidity and obtained a stable effluent quality. In conclusion, strong stability effect exists in the media section, which decreases Re and increases Fr . As a result, the flocculation of the sludge is improved and high effluent quality is achieved.

Key words clarifier; suspended media; activated sludge; flocculation performance

传统二次沉淀池的基本功能为固液分离与污泥浓缩, 在污泥性能正常的情况下, 由于污泥压缩性能较好, 因此固液分离即澄清能力是处理能力的控制因素; 但当污泥性能变差, 例如发生膨胀时, 浓缩能力将首先达到饱和, 此时浓缩能力将成为处理能力的控制因素^[1]。在二次沉淀池的运行过程中, 当加大表面负荷时, 一般情况下澄清能力会首先达到饱和, 而浓缩能力往往仍有一定潜力^[2]。影响澄清能力的两大关键因素是表面负荷率与沉淀、缓冲区的絮凝效果, 在一定的澄清能力下, 为使水平面积尽可能小, 必须提高絮凝区的污泥絮凝效果^[3,4]。为此, 提出一种新型悬浮填料澄清池技术^[5], 其首要功能正是改善活性污泥的絮凝条件, 提高澄清能力。悬浮填料澄清池内可观察到 6 个不同的功能分区: 清

水区、附着污泥区、高浓度悬浮污泥层区、混合区、污泥沉降区和污泥浓缩区。从悬浮污泥的运行特点来看, 其固液分离既体现出过滤的特征, 又体现出絮凝的特征^[6]。

本文对新型悬浮填料澄清池中的填料对附着污泥形成及其絮凝性能的影响进行了研究, 并对其作用机理进行了初步探讨。

基金项目: 上海市科委重大项目 (07dz22019); 上海市科委项目 (08dz2290602); 宁波市科技局重大项目 (2008C10023); 同济大学青年优秀人才培养行动计划资助项目

收稿日期: 2008-04-17; 修订日期: 2008-08-12

作者简介: 董滨 (1978~), 男, 博士, 讲师, 主要从事水污染控制方向的教学与科研工作。E-mail: tj_dongbin@163.com

1 试验材料与方法

1.1 小试试验设备

采用 10 mm 厚度有机玻璃制成。1[#]小试试验设备高 2.25 m, 断面尺寸为 355 mm, 有效水深 2.1 m, 离池底 0.1 m 处设置 2 个进水口, 下隔栅位于距离池底 1 m 处, 上隔栅位于距离池底 1.8 m 处, 上下隔栅间采用 25 mm 本文所提的悬浮填料, 填料区高度 0.6 m, 全池设 5 个取样口, 分别位于距离池底 0.5、1、1.4、1.8 和 2.1 m, 5 个取样口处以内径 6 mm 的硬塑料管插入装置 0.1 m, 可兼作冲洗时所需的进气口。小试试验装置的实物照片如图 1 所示。



图 1 小试试验装置图
Fig 1 Experimental setup

1.2 填料

填料如图 2 所示, 呈球形, 主要由瓣状翼板与环构成, 在球形填料的叶片轴心方向上开有圆孔, 具有



图 2 小试试验填料实物示意
Fig 2 Media used in experiment

良好的通气和过水性能。该悬浮填料可直接放入水中, 停气时浮于水面, 曝气时流化于全池, 便于安装更换。其技术参数如下: 填料形状为球形; 直径 25 mm; 比表面积 $285 \text{ m}^2/\text{m}^3$; 孔隙率 90%; 排列个数 $64\,000 \text{ 个}/\text{m}^3$; 排列重量 $83 \text{ kg}/\text{m}^3$; 填料材料为聚丙烯塑料。

2 试验结果与分析

2.1 附着污泥的形成过程及存在状态

1[#]小试装置开始运行时, 形成附着污泥时的主要技术参数为: 入流浓度 $2.32 \sim 2.63 \text{ g/L}$; 填料区高度 0.6 m; 填料直径 25 mm; 表面负荷 $2.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; $\text{SVI } 95 \text{ mL/g}$

运行后, 随着运行时间的延长, 由于污泥的增多以及进水顶托作用, 悬浮污泥层的泥水界面不断上升, 逐渐进入填料层。进入填料层的污泥随即附着在填料表面, 随着填料表面附着污泥量的增加, 使混合液上升的通道越来越小, 并逐渐在填料区下部形成明显的孔道流 (图 3a, 图 3b), 上升混合液在流经附着污泥与填料所形成的孔道时, 携带的大部分污泥颗粒被悬浮污泥和附着污泥所捕捉。

附着污泥形成的实质是混合液的上升超过了高浓度污泥层截留污泥固体通量的极限, 使悬浮污泥层上升进入填料区, 并与填料之间形成空间立体结构。

当表面负荷提高时, 污泥层上升直至进入填料区。进入填料的污泥絮体直径一般比填料孔隙的尺寸要小很多。但由于填料表面生长有生物膜, 而生物膜本身呈一种立体结构, 具有巨大的比表面 (图 3c), 对水中的颗粒物具有相当强的捕捉作用, 很容易使污泥颗粒附着。

当污泥颗粒占据填料表面后, 附着污泥的形成过程就由污泥颗粒与填料之间的相互作用转变为污泥颗粒之间的絮凝胶连作用^[7]。由于与填料表面成为与之直接接触的污泥颗粒的“固定”的附着点, 后续的附着污泥也会逐渐“固定”在附着污泥表面, 从而使整个附着污泥层具有 2 个明显的特征: 其一为较强的稳定性, 附着污泥并不容易随水流迁移; 其二为污泥可以在整个填料的空间内互相絮凝成为一种较大的立体结构。随着附着污泥絮体不断变大, 填料间的孔隙也就越来越小, 逐渐会形成如图 3a 所示的孔道流, 此时附着污泥的澄清机理便具有了明显的深层过滤特征。

此时混合液中污泥颗粒被截留于填料与附着污泥共同组成的“过滤”介质内部的孔隙中,由于填料区内空隙率大,且可以形成密度较高的附着污泥,因此填料区具有较大的颗粒截留能力。正是这种深层

过滤与污泥絮凝过程相结合的作用机理^[8],使得填料区可以在较高负荷条件下获得含 SS 很低的澄清液。

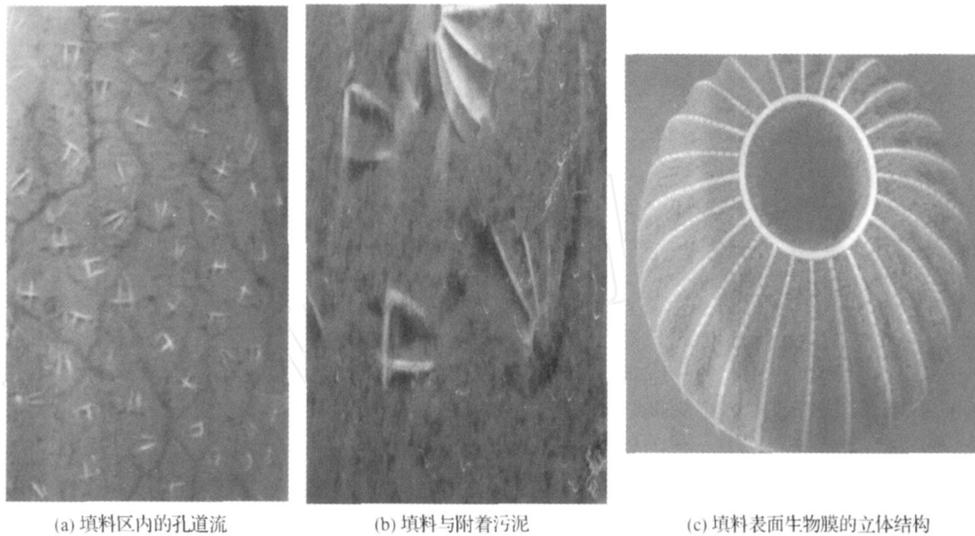


图 3 填料区内的孔道流及其形成的附着污泥

Fig 3 Duct streams and attached sludge in media section

2.2 附着污泥的絮凝性能

为了研究附着污泥所具有的絮凝性能,研究选在 1[#]小试试验设备曝气池由于进水原因导致出水水质出现恶化的时候,此时试验设备出水的浊度数值较高,有利于对比絮凝性的差异。取同样的曝气池污泥混合液,进行 12 min 慢速搅拌 (15 r/min) 絮凝,再经 30 min 沉降,以上清液的浊度来表征悬浮污泥的絮凝性能;为了进行有效的对比,小试试验附着污泥的絮凝性则通过观测填料区进出水浊度的变化来表征。填料区上下格栅所取水样为污泥混合液,均沉淀 30 min 后取上清液测定其浊度。取样间隔均为每 1 ~ 1.5 h 同步取样一次。小试试验主要技术参数同前述 (2.1),试验结果见表 1。

从上述试验可以看出,在出水浊度增高的情况下,同样经过 12 min 絮凝过程,附着污泥区出水的平均浊度由 46 NTU 下降为 23 NTU,去除率平均达到 50%;而悬浮污泥上清液为 35 NTU。两者相比,附着污泥的絮凝功能优于悬浮污泥。原因在于相对于悬浮污泥而言,污泥颗粒附着于填料表面以后可以形成更加密实,表面积巨大的污泥絮体结构,提高了对水中胶体物质的絮凝能力。

为了进一步验证在正常情况下填料附着污泥的

絮凝和澄清能力,在 1[#]小试试验设备研究了填料区进出水 SS 与浊度,将进水表面负荷降低为 $1.6 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$,使泥水界面降到填料区以下。经过 3 h 左右稳定运行以后,分别在填料区的上下格栅处取样测定其 SS 和浊度。由于所需水样均较为清澈,因此 SS 的检测均为取 1 L 水样按标准方法进行测试;而浊度的测试则为所取水样先经过 0.5 h 沉淀后取上清液进行测试,取样间隔为 2 h。试验期间主要技术参数如下:入流浓度 3 ~ 3.35 g/L;填料区高度

表 1 附着污泥絮凝试验结果

Table 1 Flocculation of attached sludge

测试次数	附着污泥区			悬浮污泥上清液 (NTU)
	进水 (NTU)	出水 (NTU)	去除率 (%)	
1	46	25	46	35
2	42	23	45	31
3	51	23	55	39
4	45	21	53	33
5	47	20	57	36
6	43	27	37	34
平均	46	23	50	35

0.6 m; 填料直径 25 mm; 表面负荷 $1.6 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 污泥回流比 100%。试验结果见表 2。

表 2 $q = 1.6 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 条件下填料区进出水 SS 与浊度
Table 2 SS and turbidity in media section at $q = 1.6 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$

测试次数	SS			浊度		
	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	去除率 (%)	进水 (NTU)	出水 (NTU)	去除率 (%)
1	50	5	90	27	8	70
2	47	0	100	33	9	73
3	63	10	84	31	6	81
4	37	8	78	18	5	72
5	45	0	100	24	7	71
6	101	15	85	29	9	69
平均	57	6	89	27	7	74

试验结果表明,在表面负荷为 $1.6 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,虽然泥水界面可以稳定在填料区以下,但是由于此时水流上升速度已经明显超出二次沉淀池的容许范围,泥水界面以上还会有少量未被絮凝截留的微小絮体,使得上清液的 SS 无法达标。表 2 中填料区进水处取样 SS 平均为 57 mg/L ,而填料区出水处取样 SS 平均仅为 6 mg/L ,并有 2 次无法检出出水中 SS,平均去除率达到 89%。可见在悬浮污泥区未被絮凝截留的少量微小絮体可被填料表面粘附去除,弥补了较高出水负荷条件下悬浮污泥区无法截留全部污泥的问题。浊度主要是由水中的胶体类物质引起的,从填料区进出水浊度测试结果来看,浊度由下格栅取样点 27 NTU 下降为上格栅取样点的 7 NTU,去除率达到 74%。说明填料区对于较高负荷条件下悬浮污泥区较高的出水浊度有良好的处理效果。由此可见,填料区具有在较高负荷条件下捕捉从悬浮污泥区中“逃逸”的污泥絮体,并降低出水浊度的作用,即具有澄清和絮凝的双重功能。

2.3 填料的作用机理探讨

填料的存在无疑明显提高了澄清池的澄清能力,根据 Hazen 提出的“浅池沉淀理论”^[6],填料的投加似乎相当于许多“斜板”,增加了澄清池的水平投影面积,有助于固液分离效果的提高。

2.3.1 填料的投加对澄清池流态的影响

从雷诺数 Re 上来判断:

$$Re = \frac{vR}{\nu} \quad (1)$$

$$R = \frac{A}{\pi} \quad (2)$$

其中: Re —雷诺数,层流临界值 $Re_c = 500$;

R —水力半径 (m);

A —过流断面面积 (m^2);

π —湿周,即过流断面与边界表面相接触的周界 (m);

v —无填料区时过流断面处平均水流速度 (m/s);

ν —污泥混合液的运动粘度 (m^2/s)。

并设定:

L —澄清池过流断面周长 (m);

f —填料的比表面积 (m^2/m^3);

S —过流断面上填料表面的总周长,其数值 $S = \pi A$ (m);

f —填料孔隙率。

当没有填料区时,池内入流口以上的任一过流断面处:

$$Re = \frac{vR}{\nu} = \frac{vA}{L\nu} = \frac{vA}{L\nu} \quad (3)$$

当存在填料区时,由于填料的投加会使填料区内过流断面处的平均水流速度增加, $v' = v/f$, 此时填料区内任一过流断面处:

$$Re' = \frac{v'R}{\nu} = \frac{v'A}{f(L+A)\nu} = \frac{vA}{f(L+A)\nu} \quad (4)$$

由此可得:

$$\frac{Re'}{Re} = \frac{L}{f(L+A)} \quad (5)$$

从弗汝德数 Fr 上来判断: $Fr = v^2 / (R \cdot g)$

$$Fr = \frac{v^2}{R \cdot g} \quad (6)$$

其中: Fr 表示弗汝德数;

g 表示重力加速度 (m/s^2)。

当没有填料区时,池内入流口以上的任一过流断面处:

$$Fr = \frac{v^2}{Ag} = \frac{v^2 L}{Ag} \quad (7)$$

当存在填料区时,根据雷诺数的求解参数,此时填料区内任一过流断面处:

$$Fr' = \frac{v'^2}{Rg} = \frac{v^2 (L+A)}{f^2 Ag} \quad (8)$$

由此可得:

$$\frac{Fr'}{Fr} = \frac{(L+A)}{Lf^2} \quad (9)$$

根据式 (5) 和式 (9) 的分析结果,可以代入试验设备的相关技术参数进行求解:

当使用 100 mm 型悬浮填料时: $f = 0.9, \nu =$

$100 \text{ m}^2/\text{m}^3, L = 3.6 \text{ m}, A = 0.8 \text{ m}^2$ 。

代入计算可得:

$$\frac{Re'}{Re} = \frac{L}{f(L+A)} = \frac{1}{20}$$

$$\frac{Fr'}{Fr} = \frac{(L+A)}{Lf^2} = 29$$

由此可见,填料区的存在使得雷诺数 Re 降为无填料区时的 $1/20$,并使弗汝德数 Fr 增加为无填料区时的 29 倍,从而水流紊动性减小,稳定性增大,明显的改善了水力条件。因此,填料的作用不仅增大了沉淀的水平投影面积,更重要的是,发挥了强大的整流作用。这一整流作用不仅是对填料区内的水流条件,而且也对填料区下部的悬浮污泥层区发挥重要作用。

以上分析以混合液为流体,以填料表面为边界。若将附着污泥与填料构成的空间结构看做整体,则其比表面积远大于填料的比表面积,由此可推知 Re 的减小及 Fr 的增大将更为显著,整流作用亦更加显而易见。

2.3.2 填料的投加对澄清池流态的影响的验证

为了进一步验证理论分析的结果,在 1[#]小试试验设备上进行了是否存在填料区的临界表面负荷试验。临界表面负荷是指能够保持泥水界面稳定的最大出水表面负荷。小试试验的基本技术参数及试验结果见表 3 所示。

表 3 临界表面负荷对比

Table 3 Comparison of critical surface-load

入流浓度 (g/L)	填料区高度 (m)	填料直径 (mm)	泥面距下格栅距离 (m)	SVI (mL/g)	临界负荷 ($\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)	
A	3.12	无	25	0.30	75	1.1
B	3.15	0.60	25	0.35	81	1.8

从表 3 的试验数据来看,没有填料区的情况下 (A),当表面负荷达到 $1.1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时其泥水界面就失去了稳定性;设有填料区时 (B),1[#]小试试验设备的临界表面负荷明显提高,达到 $1.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,而 A/B 2 种情况下泥水界面均位于填料区以下。这说明填料的存在不仅可以改善填料区内的水力条件,而且也对填料区下方污泥区的水流紊动具有明显的缓解作用,从而提高了整个澄清池内部水

流的稳定性,为污泥颗粒的絮凝创造了良好的条件,保证了澄清能力的提高。

3 结 论

(1) 填料的存在发挥了明显的整流作用,降低了雷诺数 Re ,提高了弗汝德数 Fr ,从而改善了活性污泥絮凝的水力条件,提高了澄清能力。

(2) 当澄清池中泥水界面上升至填料区后,可以形成较悬浮污泥更加致密稳定的附着污泥区,并形成孔道流,强化了对混合液中污泥颗粒的絮凝效果。

(3) 填料区可以捕捉去除从悬浮污泥区中“逃逸”的微小污泥絮体,并降低出水浊度,有效地保证了出水水质的稳定性。

参 考 文 献

- [1] Mongen H., Rene D., Peter G., *et al* Rising sludge in secondary settlers *Water Research*, **1993**, 27(2): 231 ~ 236
- [2] WEF/ASCE Design of Municipal Wastewater Treatment Plants *Water Environment Federation /American Society of Civil Engineers*, **1992**
- [3] 马鲁铭. 二次沉淀池运行工况的研究及其设计理论和新工艺的探讨 [博士学位论文]. 上海: 同济大学, **1988**
- [4] Von S M., Froes C M. V. Detemination of the required area for activated sludge final clarifiers based on unified database *Wat Res*, **1999**, 33(8): 1884 ~ 1894
- [5] 董滨,柳翠,傅钢,等. 悬浮填料固定床固液分离新技术的研究. *给水排水*, **2006**, 32(4): 28 ~ 31
- [6] 董滨. 应用于活性污泥法系统的新型悬浮填料澄清池的机理及运行研究 [博士学位论文]. 上海: 同济大学, **2006**
- [7] Odegaard H., Liao Z., Hansen A. T. Coarse media filtration—An alternative to settling in wastewater treatment *Wat Sci and Technol*, **2003**, 47(12): 81 ~ 88
- [8] Moghadasi J., Muller-Steinhagen H., Jamialahmadi M., *et al* Theoretical and experimental study of particle movement and deposition in porous media during water injection *Journal of Petroleum Science & Engineering*, **2004**, 43: 163 ~ 181
- [9] Xie W. M., Wang Q. H., Song G L., *et al* Upflow biological filtration with floating filter media *Process Biochemistry*, **2004**, 39(6): 765 ~ 770