

再生水梯级调时絮凝及其参数优化

高佳祺¹, 田一梅¹, 孟露¹, 李晋²

(1. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 天津中水有限公司, 天津 300221)

摘要: 普通的机械搅拌絮凝池各级絮凝时间相同, 搅拌强度逐级减弱, 称为梯级絮凝。为了探讨各级絮凝时间对絮凝效果的影响, 提高絮体的沉降性能, 将各级絮凝时间设计为各不相同的形式, 并将此种改变絮凝时间的梯级絮凝定义为梯级调时絮凝。基于此絮凝设计思想, 以天津市某再生水厂的混凝过程为研究对象, 根据絮体分形结构理论对梯级调时絮凝进行了中试研究。结果表明, 在速度梯度 G 逐级减小的常规控制指标基础上, 要为各级絮凝阶段配置合理的絮凝时间才能使整个絮凝达到最佳效果。

关键词: 再生水; 梯级调时絮凝; 絮凝时间; 分形维数; 速度梯度

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)03-0066-05

Cascade Time-varying Flocculation of Reclaimed Water and Its Parameter Optimization

GAO Jia-qi¹, TIAN Yi-mei¹, MENG Lu¹, LI Jin²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Water Recycling Co. Ltd., Tianjin 300221, China)

Abstract: Cascade flocculation is implemented in ordinary mechanical mixing flocculation tank with constant hydraulic retention time and gradually declined stirring intensity. A cascade time-varying flocculation mechanism was proposed to improve the effectiveness of flocculation, in which the hydraulic retention time was designed to vary among each of the four flocculation tanks. Based on the fractal structure theory of flocs, a pilot-scale study of the cascade time-varying flocculation was carried out at a reclaimed water plant in Tianjin. The results showed that, based on the stepwise decrease of the G value, reasonable allocation of flocculation time at each level was required to achieve the best results for the entire flocculation process.

Key words: reclaimed water; cascade time-varying flocculation; flocculation time; fractal dimension; velocity gradient

经典的混凝动力学认为, 各级絮凝的速度梯度 G 随着级数增加而逐渐减小是一个实用的控制指标。一直以来机械搅拌絮凝池的设计依然是各级絮凝时间 T 相同, 搅拌强度逐级减弱。但是, 由于混凝是一个复杂的过程, 包含着水力随机性、絮体物理

特性以及破损可能等诸多因素影响, 仅靠控制 G 值逐渐减小往往不能得到最佳絮凝效果。因此, 寻求一个可形成絮体粒径大、密度高的水力条件, 进而提出更加具体有效的混凝控制指标, 一直是有待研究的问题。

为了探讨各级絮凝时间对絮凝效果的影响,提高絮体的沉降性能,笔者提出了梯级调时絮凝,即将各级絮凝时间设计为各不相同的形式,并通过中试研究了一定 G 值条件下能使絮凝达到最佳效果的各级 T 值的变化。研究过程中,为了微观地表征絮体的尺寸及强度,引入了分形结构理论。

1 材料和方法

1.1 原水水质及药剂

试验用水为天津市某再生水厂的进水,浊度为 2.75 ~ 13.00 NTU,色度为 35 ~ 60 度, pH 值为 6.90 ~ 7.60, COD 为 39 ~ 60 mg/L, SS 为 5.2 ~ 16.8 mg/L, TP 为 0.44 ~ 3.25 mg/L, 氨氮为 15.4 ~ 32.2 mg/L。原水用双层纱布过滤两遍,以避免水中大颗粒杂质对混凝试验的影响。

试验用混凝剂为实际水厂混凝工艺投加的工业聚合氯化铝(PAC)。该 PAC 产品为液体药剂,密度约为 1.2 g/cm³。已测得氧化铝含量(以 Al₂O₃ 计)为 10.2%,碱化度为 72.5%,在工业 PAC 液体产品中属于较高水平。

1.2 梯级调时絮凝中试

中试装置位于再生水厂净水车间内,由混合池、絮凝池和沉淀池 3 部分组成,设计流量 Q 为 1.5 m³/h。图 1 为絮凝池装置示意。为实现在一定范围内调节停留时间的目的,在絮凝池底部设置可以上下浮动的挡板,并在第 2 格、第 4 格进水孔道设置不同尺寸竖插隔板以调节进水孔道位置,保证浮动挡板移动后仍可以顺利进水。絮凝池搅拌桨采用无极调速电机调节搅拌速度。

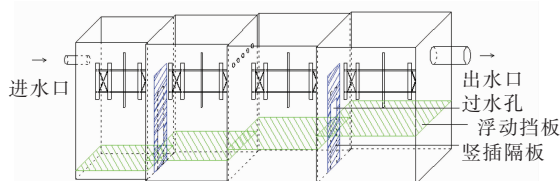


图1 梯级调时絮凝中试装置

Fig. 1 Schematic diagram of cascade time-varying flocculation device

前期通过混凝搅拌试验^[1]得到梯级调时絮凝最佳运行参数:混合速度梯度 G 为 300 s⁻¹,混合时间为 1 min;第 1 ~ 4 级絮凝速度梯度依次为 58.4、43.0、30.0、14.3 s⁻¹,对应絮凝时间分别为 3、4、5、6 min,总絮凝时间为 18 min。通过中试验证此参数设

置下的实际运行效果。

各级絮凝速度梯度保持不变。利用 4 因素 3 水平正交试验评价各级絮凝时间对除浊率的影响,4 个因素分别为 4 级絮凝时间。试验结束后分别测试出水浊度,并计算整个阶段的除浊率。

1.3 絮体生长性能试验

为进一步优化调时絮凝效果,基于分形结构理论,对不同混合时间以及不同总絮凝时间条件下絮体的生长状况进行分析。

絮体的生长状况使用显微测试方法^[2]进行评价。试验使用的显微镜为 MI12 生物倒置显微镜,显微镜连接的图像采集与处理系统为 MDX4-T 数码成像系统。每次试验取 20 ~ 30 个絮体进行测量,计算絮体最大直径和投影面积等信息。最终结果使用显微数码测量分析系统进行分析。

根据二维分形维数 D_f 定义公式^[3]绘制絮体尺寸-阴影面积的双对数坐标图,据此可以求得 D_f 。分形维数越大,表示絮体越密实,强度越大,絮凝效果越好^[4]。

$$A = \alpha \cdot d^{D_f} \quad (1)$$

式中: A 为絮体投影面积; d 为絮体最大直径; α 为相关系数。

1.3.1 不同混合时间的絮体生长试验

为了进一步优化调时絮凝效果,对不同混合时间下絮体生长状态进行了分析。试验采用的混合时间分别为 10、30、60 和 120 s。搅拌强度与各级絮凝时间仍使用前期混凝试验的最佳结果。第 1 ~ 4 级搅拌强度分别为 58.4、43.0、30.0、14.3 s⁻¹,絮凝时间分别为 3、4、5、6 min。

试验取样时间点设置如图 2 所示。

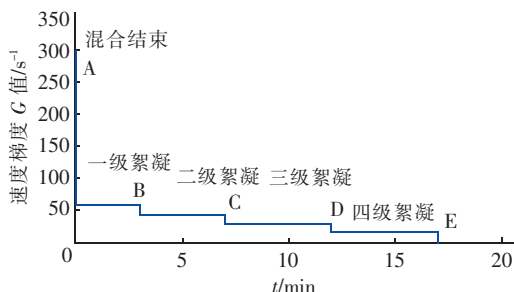


图2 取样时间点设计

Fig. 2 Design of sampling time

A 点为混合结束后取样,B、C、D、E 点依次为在各级絮凝阶段结束时刻取样。取样时需注意尽量不

对絮体结构造成影响,故取样使用的胶头滴管应截掉尖嘴,以避免絮体经过尖端时因流速变化过快而发生破碎,同时将取出的絮体溶液滴入盛有纯水的培养皿中稀释,以防止絮体取出后继续生长。将各阶段取出的絮体溶液放置于显微镜下,观察絮体显微图像,记录絮体最大粒径和投影面积,计算絮体的二维分形维数。

1.3.2 不同总絮凝时间的絮体生长试验

试验采用的总絮凝时间分别为9、18、36 min,各级絮凝时间按照小试最佳絮凝时间比例(3:4:5:6)的组成设计,即总絮凝时间为9 min时,第1~4级絮凝时间分别为1.5、2、2.5、3 min;总絮凝时间为18 min时,第1~4级絮凝时间分别为3、4、5、6 min;总絮凝时间为36 min时,第1~4级絮凝时间分别为6、8、10、12 min。混合时间设置为30 s,参照图2编号方法,将混合、各级絮凝结束时刻分别记作A、B、C、D、E点。其他水力条件、絮体的取样测试与二维分形维数的计算同上。

1.3.3 调时絮凝与均时絮凝对比试验

为了分析调时絮凝不同于传统的均时絮凝(各级停留时间相同)的絮凝过程,设计对比试验如下:调时絮凝的总絮凝时间为18 min,第1~4级絮凝时间分别为3、4、5、6 min;均时絮凝的总絮凝时间为18 min,第1~4级絮凝时间均为4.5 min。取样方法按照图2的编号进行,其他水力条件、絮体的取样测试与二维分形维数的计算同上。

2 结果与讨论

2.1 梯级调时絮凝试验结果

正交试验结果如表1所示。可以看出,各级水力停留时间对处理效果的影响程度排序为:第4级>第1级>第3级>第2级,而各级最适宜的絮凝时间组合为3、3、5、6 min。其中,第2级最适宜的絮凝时间为3 min,这与前期试验结果4 min略有差别。考虑到第2级絮凝时间对整个絮凝过程的处理效果影响程度最小,而且3 min与4 min对应的除浊率平均值仅相差0.1%,可以认为其对最终结果影响不大。

观察整个4级絮凝时间的变化规律,在第1级絮凝时间仅有3 min的情况下,絮凝时间增大的趋势非常明显。在各级搅拌强度几乎呈现均匀下降的情况下,第3、4级絮凝时间明显增加,特别是第4级絮凝时间更是增加到了第1级絮凝时间的两倍。

表1 调时絮凝试验结果

Tab. 1 Test results of cascade time-varying flocculation

试验号	第1级絮凝时间/min	第2级絮凝时间/min	第3级絮凝时间/min	第4级絮凝时间/min	除浊率/%
1	2.33	3	4	5	85.4
2	2.33	4	5	6	91.2
3	2.33	5	6	7	87.6
4	3	3	5	7	89.5
5	3	4	6	5	86.5
6	3	5	4	6	90.4
7	4	3	6	6	89.6
8	4	4	4	7	86.5
9	4	5	5	5	85.8
\bar{K}_1	88.07	88.17	87.43	85.90	
\bar{K}_2	88.80	88.07	88.83	90.40	
\bar{K}_3	87.30	87.93	87.90	87.87	
R	1.50	0.24	1.40	4.50	

第4级絮凝所需时间最长,其对絮凝效果影响最重要。这是由于在第4级絮凝时絮体生长已经接近末期,絮体尺寸较大,存在极大的破碎风险,故所需速度梯度较小,以免造成絮体破碎,同时需提供更长的絮凝时间,以利于絮体充分絮凝,进一步增大絮体粒径。

由此可见,絮凝过程不能只考虑G值逐步减小的一般控制指标,更应注意在不同条件下,应该选择与其确定G值相匹配的各级停留时间,这样才能得到理想的混凝效果。

2.2 絮体生长性能试验结果

2.2.1 不同混合时间下絮体生长试验结果

按照1.3.1节所述条件进行不同混合时间絮体生长试验,结果见图3、4。分析可知,在整个絮凝过程中,混合时间为10 s时,絮体在絮凝阶段分形维数增长缓慢,这是由于混合时间过短,反应难以完全进行;混合时间为30 s时,絮体平均粒径与分形维数在混合阶段、每级絮凝阶段都达到最大,絮体的沉降性能最好;而当时间再增至1 min和2 min时,絮凝效果反而下降,混合时间为2 min时不仅絮体平均粒径最小,而且分形维数的增长也较为缓慢,说明混合时间过长不仅影响絮体尺寸大小,还影响了絮体碰撞结合的紧密度。推测这种现象的形成原因是:在混合阶段絮体长时间暴露在高剪切力场中,造成絮体表面结构破坏,影响了絮凝阶段絮体间的结合能力。

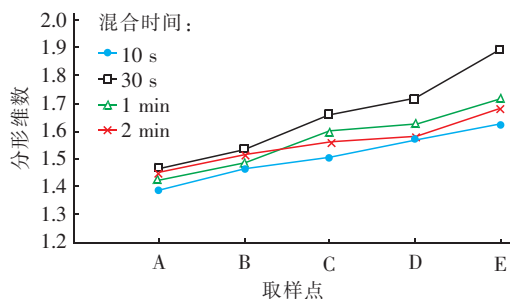


图3 混合时间对絮体分形维数的影响

Fig. 3 Effect of mixing time on fractal dimension

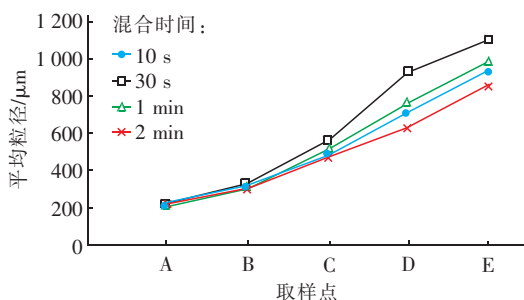


图4 混合时间对絮体平均粒径的影响

Fig. 4 Effect of mixing time on average floc size

2.2.2 不同总絮凝时间下絮体生长试验结果

进行了总絮凝时间依次为9、18和36 min的3组试验,每组试验各级絮凝时间分配比例相同,以对比分析总絮凝时间对絮体生长(分形维数和平均粒径)的影响,试验结果见图5、6。为了更好地对比絮体的生长趋势,以相同标记的取样点为横坐标,但值得注意的是3组试验相同阶段的絮凝时间长度是不同的。

分析图5、6可知,总絮凝时间为9 min时,因絮凝时间过短,絮凝反应没有进行完全,因此分形维数和平均粒径均低于其他两组试验。

对比总絮凝时间为18 min和36 min的试验发现,在絮凝的前3个阶段,在絮体尺寸的增长上,两者的趋势相近,但仍可以看出,即使是以取样点为横坐标,总絮凝时间为36 min的絮体尺寸小于总絮凝时间为18 min的絮体尺寸。分析原因在于,絮凝前3个阶段的G值较大,絮体长时间在较大的搅拌强度下不利于其生长,反而易于发生侵蚀性破碎。在分形维数方面,相同絮凝阶段下总絮凝时间为36 min的絮体分形维数虽较18 min的大,但前者花费了两倍于后者的时间,并且虽然得到了较密实的絮体,但絮体尺寸的增长缓慢,表明该絮体缺乏良好的结合性能。

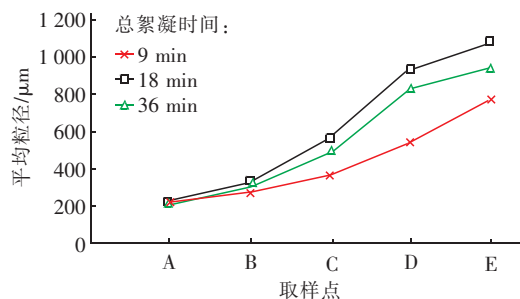


图5 总絮凝时间对絮体平均粒径的影响

Fig. 5 Effect of total flocculation time on average floc size

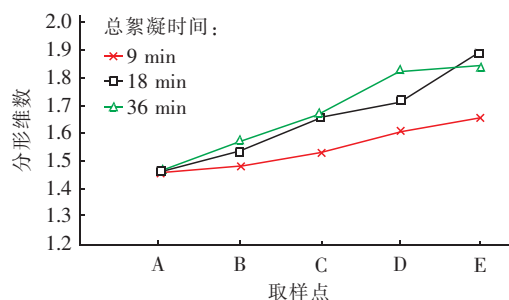


图6 总絮凝时间对絮体分形维数的影响

Fig. 6 Effect of total flocculation time on fractal dimension

36 min 絮凝试验最终稳定时的分形维数低于18 min 絮凝试验,进一步说明了过长的絮凝时间不利于提升絮体密实度。而且在最后阶段絮体尺寸的增长速度出现了下降趋势,总絮凝时间为36 min的试验中,最后阶段絮体的分形维数表现出了稳定趋势。为解释这一现象,引入絮体生长破碎公式:

$$R_{\text{floc}} = kR_{\text{col}} - R_{\text{br}} \quad (2)$$

式中: R_{floc} 为絮凝速率; R_{col} 为颗粒碰撞速率; R_{br} 为絮体破碎速率; k 为颗粒碰撞有效系数。

一般认为絮体絮凝分为两个阶段——絮体生长阶段和稳定阶段。絮凝初期絮体有效碰撞速率 kR_{col} 高,而破碎速率 R_{br} 低, R_{floc} 为正值,小尺寸絮体逐渐聚集为大尺寸絮体。在此过程中絮体尺寸增大、絮体数量减小,导致有效碰撞率逐渐降低、絮体破碎可能性大,表现为絮体生长速率逐渐减小。当有效碰撞速率等于絮体破碎速率时,絮体不再生长,进入稳定阶段。

2.2.3 调时絮凝与均时絮凝对比结果

调时絮凝与均时絮凝对比结果见图7、8。就分形维数而言,两者趋势一致,数值上也相对接近,调时絮凝较均时絮凝得到的絮体分形维数稍大。但就絮体尺寸而言,调时絮凝的絮体平均粒径曲线远高于均时絮凝,而且随着时间的增加,两种絮凝过程的

絮体尺寸差距逐渐增大。这说明,相对于均时絮凝,调时絮凝不仅能得到更加密实的絮体,其絮体的结合能力也远远超过均时絮凝。

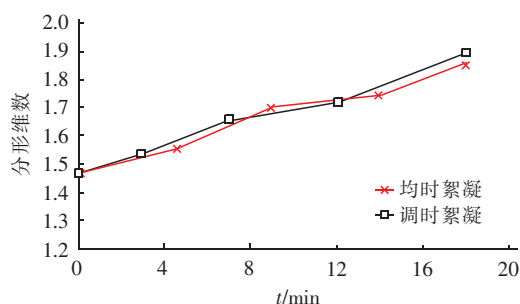


图7 絮凝方法对絮体分形维数的影响

Fig. 7 Effect of flocculation method on fractal dimension

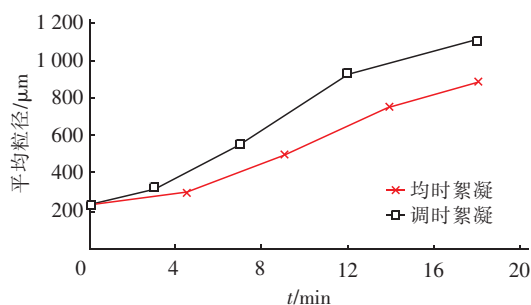


图8 絮凝方法对絮体平均粒径的影响

Fig. 8 Effect of flocculation method on average floc size

3 结论

① 利用中试装置,混合搅拌强度为 300 s^{-1} ,第1~4级絮凝强度分别为58.4、43.0、30.0、14.3 s^{-1} 时,各级相应的絮凝最适停留时间分别为3、3、5、6 min,总絮凝时间为17 min。在G值逐级减小的常规控制指标基础上,为各级絮凝阶段配置合理的絮凝时间,才能使整个絮凝达到最佳效果。

② 第1~4级絮凝时间分别为3、4、5和6 min时,最适混合时间为30 s,此条件下形成的絮体粒径最大、强度最高、结构最密实。混合时间过长不仅影响絮体尺寸大小,还影响絮体碰撞结合的紧密度,使絮体的结合能力变差。

③ 各级絮凝时间对絮凝影响的程度排序为:第4级>第1级>第3级>第2级。总絮凝时间过长或过短均会对絮体生长造成不利影响。总絮凝时

间不足,将导致絮体密实度不足;而总絮凝时间过长易造成絮体表面结构破坏,影响絮体间的结合能力。

④ 在各项条件都相同的情况下,相对于均时絮凝,调时絮凝可以得到更加密实、结合能力更强的絮体。由此说明,各级絮凝时间需合理配置,方能获得更好的絮凝效果。

参考文献:

- [1] 马媛. 再生水混凝机理试验研究[D]. 天津:天津大学,2013.
Ma Yuan. Experimental Research on the Coagulation Mechanism of Reclaimed Water[D]. Tianjin: Tianjin University,2013(in Chinese).
- [2] Droppo I G, Exall K, Stafford K. Effects of chemical amendments on aquatic floc structure, settling and strength[J]. Water Res,2008,42(1/2):169-179.
- [3] Bushell G C, Yan Y D, Woodfield D, et al. On techniques for the measurement of the mass fractal dimension of aggregates[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2002,95(1):1-50.
- [4] 常颖,张金松,王宝贞,等. 基于分形理论的混凝控制研究[J]. 中国给水排水,2005,21(2):1-5.
Chang Ying, Zhang Jinsong, Wang Baozhen, et al. Study on coagulation control based on fractal theory[J]. China Water & Wastewater,2005,21(2):1-5(in Chinese).



作者简介:高佳祺(1991-),男,河北石家庄人,硕士,主要从事再生水处理研究。

E-mail:gaojq@vanke.com

收稿日期:2018-05-13