

可变因素对高效絮凝沉淀工艺的影响特性试验研究

芮旻¹, 张明德², 许嘉炯¹, 沈裘昌¹, 郑国兴¹, 查人光³

(1.上海市市政工程设计研究总院, 上海 200092; 2.上海市自来水市南有限公司, 上海 20002;
3.嘉兴市嘉源给排水有限公司, 浙江嘉兴 314000)

摘要 通过小试模拟中置式高密度沉淀池工艺运行过程, 研究了多种可变影响因素对有外部循环污泥的高效絮凝沉淀工艺的影响特性。研究表明, 活性污泥的投加显著地提高了原水的脱稳效果和颗粒絮凝效果。同时, 对于除浊而言, 存在一个合适的污泥投加量范围; 混凝剂投加量对浊度去除有较大的影响, 且该工艺下混凝剂投加量增大降低了出水中有机物的含量; 试验中较低的聚丙烯酰胺(PAM)投加量即能改善出水浑浊度, 随着PAM投加量的增大, 出水浑浊度反而升高, 当PAM在泥和水中的投加比例为1:1时, 出水浑浊度为最优。同时, 采用正交实验考察了不同因素对高效絮凝沉淀工艺的处理效果的影响程度, 分析得出影响试验出水浑浊度的显著性顺序依次为: 聚合氯化铁投加量>机械絮凝搅拌转速>活性污泥投加量>PAM投加量。

关键词 饮用水处理 污泥循环 高效絮凝沉淀

Study on Variable Parameters Effect on High Efficiency Flocculation- settling Processes

Rui Min¹, Zhang Mingde², Xu Jiajiong¹, Shen Qiuchang¹, Zheng Guoxing¹, Zha Renguang³

(1.Shanghai Municipal Engineering Design General Institute, Shanghai 200092, China; 2.Shanghai Municipal Water Works Shinan Co.Ltd, Shanghai 200002, China; 3.Jiayuan Water and Wastewater Co. Ltd., Jiaxing 314000, China)

Abstract Based on laboratory experiment simulating operation process of High Efficiency Mid-flocculation and sedimentation tank, effect of variable parameters on coagulation-flocculation- settling processes with sludge return was investigated in this paper. The results showed that addition of activated sludge facilitated losing stability of raw water and enhanced flocculation capacity of particles apparently. In the meanwhile, there exists a suitable range for sludge dosage concerning turbidity removal efficiency. Coagulant dosage exhibited a strong influence on turbidity removal efficiency, with low organic concentration of outflow in presence of high coagulant addition dosage. Addition of PAM could decrease turbidity of outflow at a low dosage level of PAM, however, turbidity of outflow increased with increasing of PAM dosage. Turbidity of outflow reached the lowest level when ration of PAM towards sludge and water together equaled 1:1. According to the orthogonal experiments, the sequence for four main factors of this technology influencing turbidity could be expressed as: poly-ferric chloride (PFC) dosage, rotational speed of mechanical blender, activated sludge dosage, and PAM dosage.

Key words drinking water treatment sludge circulation high efficiency flocculation- settling

近年来, 有外部循环污泥的高密度(或称高效)沉淀池在国内外净水厂设计以及改造中越来越多地被应用^[1,2,3], 国内常见的池型以法国 Densadeg 公司的高效澄清池和上海市市政设计研究总院设计研发的中置式高密度沉淀池等为代表。这种高效絮凝沉淀工艺的原理基本相同, 即外部循环具有活性的污泥, 使杂质颗粒与其发生接触絮凝而从水中分离, 进而提高原水的脱稳和颗粒絮凝效果, 经过有效沉淀后

有较低的出水浑浊度^[3,4]。

与常规的平流式沉淀池不同, 高效絮凝沉淀工艺有较多的可变影响因素, 如活性泥量的投加、混凝剂投加种类和投加量、助凝剂 PAM 投加量、PAM 两点投加比例和絮凝提升搅拌转速等。这些因素对出水的影响情况较为复杂, 因此, 需要详细研究各可变因素对该高效絮凝沉淀工艺的影响特性。在生产性试验之前, 上海市市政设计研究总院在嘉兴以嘉兴石

白漾水厂原水为试验用水,用杯罐试验模拟中置式高密度沉淀池工艺进行小试研究,考察并分析各可变因素的影响特性及其重要性,以期在生产运行优化调试提供技术支持。

1 试验设备与方法

1.1 试验原水

试验用水采用嘉兴石白漾水厂原水,试验在2006年7月份进行,原水部分水质指标如表1所示。

表1 试验期间原水部分水质指标平均值

指标	浑浊度/ NTU	pH值	水温/ /℃	COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	碱度 /(mg·L ⁻¹)	硬度 /(mg·L ⁻¹)	氯化物 /(mg·L ⁻¹)	氨氮 /(mg·L ⁻¹)	亚氮 /(mg·L ⁻¹)	锰 /(mg·L ⁻¹)	溶解氧 /(mg·L ⁻¹)	UV ₂₅₄ /cm ¹
数值	34.1	7.5	30.6	9.38	103	152	53	1.92	0.46	0.34	4.5	0.19

1.2 试验方法

采用杯罐试验研究各可变因素对出水的影响情况,杯罐试验按照《水的混凝、絮凝杯罐试验方法》

(GB/T 16881-1997)并参考中置式高密度沉淀池处理工艺运行过程设计,具体试验步骤如图1所示。

由于水厂实际运行中在进沉淀池前投加约

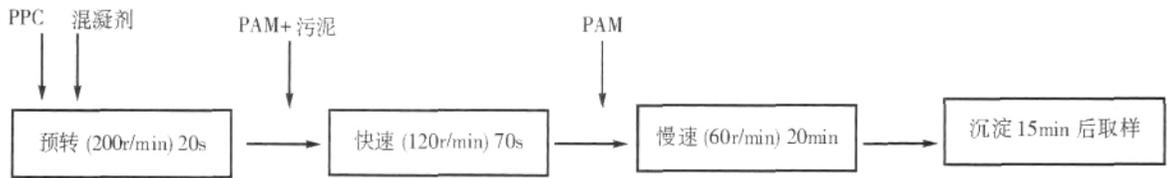


图1 试验具体步骤

1 mg/L的高锰酸盐复合药剂(PPC),起到除锰、助凝等效果,因此小试模拟试验前也在原水中与混凝剂一道投加1 mg/L的PPC。试验中高效助凝剂聚丙烯酰胺PAM投加模拟中置式高密度沉淀池按照两点投加方式投加,一部分和活性污泥一起投加后混合,一部分在混合后期絮凝阶段前投加。活性污泥采用生产运行中中置式高密度沉淀池内未投加PAM的回流污泥。沉淀15 min后取上清液测其浑浊度、COD_{Mn}和UV₂₅₄。

2 试验结果与分析

2.1 活性污泥投加量对出水水质的影响

混凝剂选用聚合氯化铝铁(PAFSC),投加量为30 mg/L,PAM投加量0.1 mg/L,PAM两点投加比例1:1,PPC投加量1 mg/L,在此条件下,改变不同的活性污泥投加量进行试验,不同污泥投加量条件下上清液浑浊度和COD_{Mn}如图2和图3所示。

从图2可以看出,投加活性污泥显著地提高了原水的脱稳效果和颗粒絮凝效果,降低了上清液浑浊度。污泥投加量在834 mg/L以下时,随着污泥投加量的增加,出水浑浊度降低明显,但当污泥投加量大于834 mg/L后,随着污泥投加量的添加,上清液浑浊度降低极其缓慢。这可能是由于污泥投加量达到一定浓度后,脱稳絮凝效果已接近极限,而污泥投加量继续增大会影响到静止沉淀的效果,因此,对于除浊而言,存在一个合适的污泥投加量范围。由图3

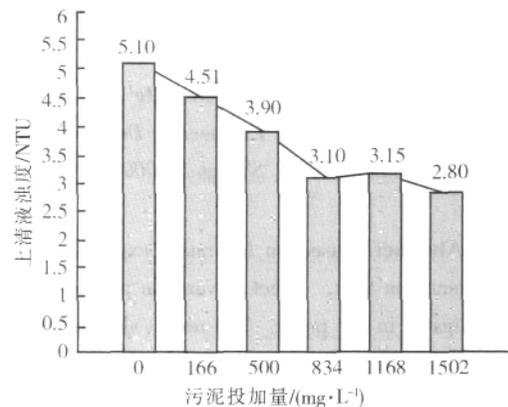


图2 不同污泥投加量条件下上清液浑浊度

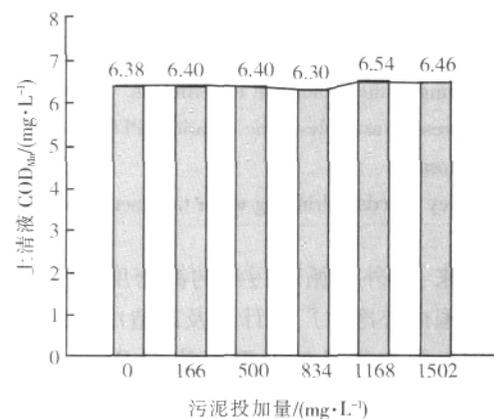


图3 不同污泥投加量条件下上清液COD_{Mn}

可以看出,小试试验中随着污泥投加量的增大,出水有机物含量变化不大。高浓度的活性污泥投加对出

水有机物可能存在正反两方面的影响: 第一, 除了胶体状有机物电中和沉淀作用、有机物聚合体的沉淀作用、吸附于金属氢氧化物表面的共沉淀作用去除有机物外^[9], 还存在吸附于体系中高浓度活性污泥及其形成的矾花上的共沉作用, 这将增加有机物的去除率; 第二, 由于投加到水样中的活性污泥溶液里有机物含量非常高, 不排除活性污泥中溶解性有机物进入水中, 从而降低系统的有机物去除率。从试验结果看, 这些影响都不明显, 或两方面影响相互抵消。

2.2 PAFSC 投加量对出水水质的影响

试验用水厂实际使用的 PAFSC 为混凝剂。在 PAM 投加量 0.1 mg/L, 两点投加比例 1:1, PPC 投加量 1 mg/L, 活性污泥投加量 834 mg/L 条件下, 改变不同混凝剂投加量进行试验, 其上清液浊度、COD_{Mn} 和 UV₂₅₄ 测试结果如图 4、图 5 和图 6 所示。

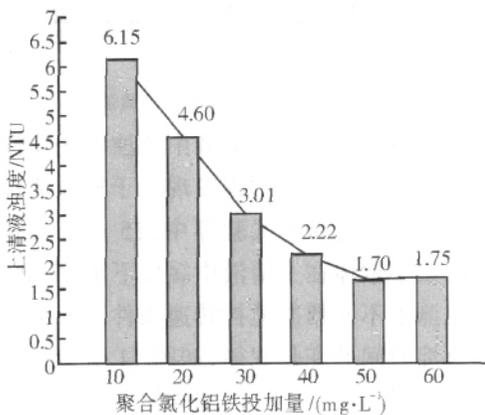


图 4 不同混凝剂投加量条件下上清液浊度

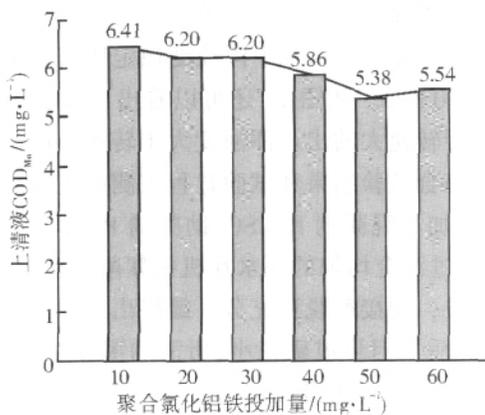


图 5 不同混凝剂投加量条件下上清液 COD_{Mn}

如图 4 所示, 当 PAFSC 投加量小于 50 mg/L 时, 混凝剂投加量大小对浊度去除有非常大的影响, 当 PAFSC 投加量大于 50 mg/L 时, 继续增大投

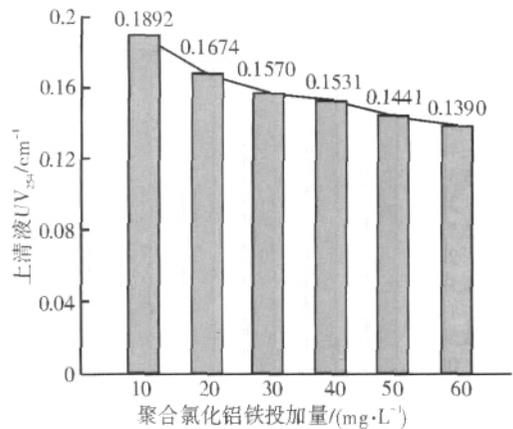


图 6 不同混凝剂投加量条件下上清液 UV₂₅₄

加量时浊度去除效果则不明显。从图 5 和图 6 可以看出, 混凝剂投加量增大能降低出水有机物的含量。混凝剂投加量从 10 mg/L 增大到 50 mg/L 时, 上清液 COD_{Mn} 和 UV₂₅₄ 分别从 6.41 mg/L 和 0.189 2 cm⁻¹ 降低至 5.38 mg/L 和 0.144 1 cm⁻¹, 对 UV₂₅₄ 的去除率明显高于 COD_{Mn}, 这表明强化混凝能更有效地去除 UV₂₅₄ 类有机物。

2.3 助凝剂 PAM 投加量对出水水质的影响

试验采用 PAM 为助凝剂, 其聚合度可高达 20 000~90 000, 相应的分子量高达 150 万~600 万。它的混凝助凝效果在于增大絮体尺寸, 对胶体表面具有吸附作用, 在胶体之间形成桥联^[9]。在 PAM 两点投加比例 1:1, PPC 投加量 1 mg/L, 活性污泥投加量 834 mg/L, PAFSC 投加量 40 mg/L 条件下, 改变不同 PAM 投加量进行试验, 上清液浊度和 COD_{Mn} 去除效果如图 7 和图 8 所示。

由图 7 可知, 较低的 PAM 投加量能改善上清液出水浊度, 但影响效果并不大, 且随着 PAM 投加量的增大, 出水浊度反而升高。由图 8 可知, PAM

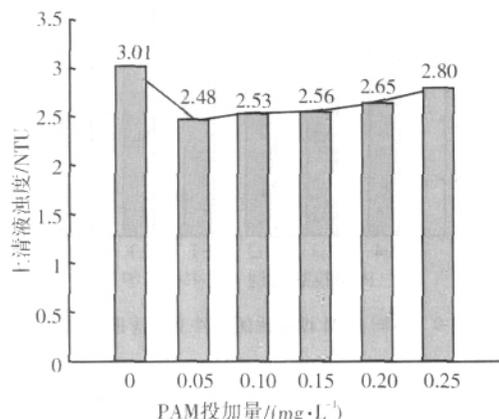
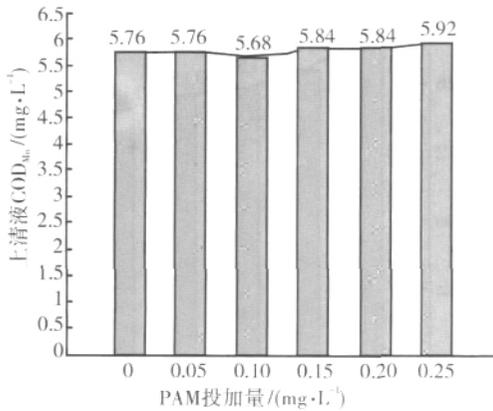


图 7 不同 PAM 投加量条件下上清液的浊度

图8 不同PAM投加量条件下上清液的COD_{Mn}

投加量的改变对有机物去除效果影响不大。

2.4 PAM 两点投加比例对出水水质的影响

水厂中置式高密度沉淀池实际运行采用PAM两点投加方式,第一点投加至回流污泥中,改善回流污泥性能的同时进入混合池与原水完全混合;第二点在混合后期絮凝阶段前投加。这是因为PAM及其水解产物在水中很易形成较长的分子链,吸附、架桥的絮凝作用明显,在混合池后絮凝池前的投加将避免由于PAM作用所形成的大絮体打碎。PAM投加量0.1 mg/L,PPC投加量1 mg/L,活性污泥投加量834 mg/L,混凝剂投加量40 mg/L条件下,改变PAM在两个不同投加点的投加比例进行试验,上清液浑浊度如图9所示。由图9可以看出,当PAM在泥和水中的投加比例为1:1时,出水浑浊度最优,即1:1是试验的最佳投加比例。试验还证实了PAM投加比例改变对有机物去除效果的影响不大。

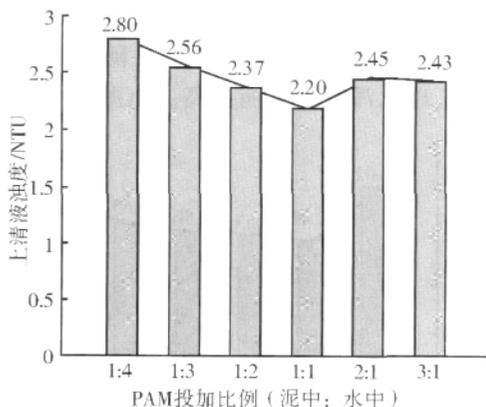


图9 不同PAM投加比例条件下上清液浑浊度

2.5 絮凝提升搅拌转速对出水水质的影响

中置式高密度沉淀池在混合池左右有两个絮凝

池,内置机械搅拌和絮凝提升桶,为了考察均匀混合了PAM和活性污泥的原水在絮凝池发生絮凝作用时所需要的机械搅拌程度,改变不同的絮凝搅拌转速进行试验研究。在PAM投加量0.1 mg/L,PAM两点投加比例1:1,PPC投加量1 mg/L,活性污泥投加量834 mg/L,混凝剂投加量40 mg/L条件下,慢速絮凝阶段絮凝搅拌转速分别设为20、40、60、80、100和120 r/min,试验结果如图10所示。

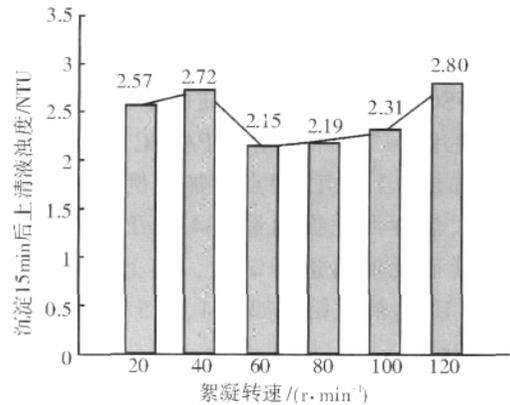


图10 不同絮凝搅拌转速条件下上清液浑浊度

由图10可以看出,上清液中浑浊度规律性表现的并不明显。同时,试验过程发现对于投加活性污泥和PAM的高絮凝转速试验杯中,15 min沉淀后还有较多的微小絮体在上清液中缓慢下沉。因此,试验进一步监测了不同絮凝搅拌转速条件下上清液中浑浊度随沉淀时间的变化规律,如图11所示。从试验监测结果可以看出,不同的絮凝转速所需要的稳定沉淀时间不同,当转速小于80 r/min时,沉淀15 min上清液中浑浊度即达到稳定值,即沉淀完全,当转速大于80 r/min时,出水中浑浊度稳定所需的沉淀时间大于50 min。从图11还可以看出,沉淀50 min时,絮凝转速大的出水浑浊度大于转速小的出水浑浊度。综合试验结果和试验过程观测的现象可以分析:在投加了混凝剂PAFSC、助凝剂PAM和活性污泥,并经过混合均匀的原水在机械絮凝阶段,如果搅拌转速快,则接触脱稳充分,最终出水中浑浊度低(50 min后),但形成矾花小,所需的沉淀时间较长;如果絮凝搅拌转速慢,矾花大,所需沉淀时间短,但最终出水中浑浊度较高(50 min后)。

2.6 各种影响因素对出水水质影响的重要性比较试验

由以上分析可知,影响高效絮凝沉淀工艺出水中浑浊度及有机物去除率的因子较多,影响情况较

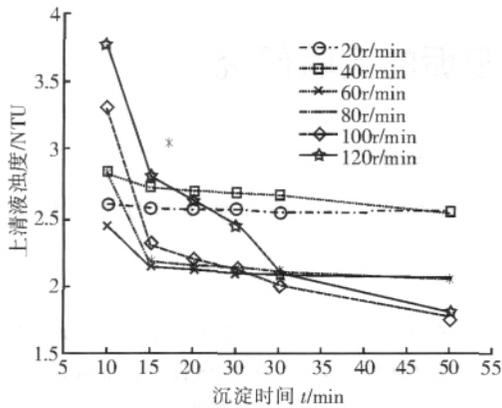


图 11 不同絮凝搅拌转速条件下上清液浊度随沉淀时间的变化情况

为复杂。试验进一步在前期研究结论的基础上设计正交实验深入研究各变量因素对混凝沉淀效果的影响程度。

本试验中影响出水水质的四个主要因素为：PAFSC 投加量、活性污泥投加量、PAM 投加量及絮凝搅拌速率，通过设计正交实验和交互效应分析，确定各影响因素对混凝沉淀效果影响的程度。试验中 PAM 在泥中和水中的投加比例参考前期试验结论按最佳方式 1:1 投加。试验四个可变因素的取值水平见表 2。

表 2 正交实验各因素的取值水平

水平	因素			
	(A) 聚合氯化铁投加量/(mg·L ⁻¹)	(B) 活性污泥投加量/(mg·L ⁻¹)	(C) PAM 投加量/(mg·L ⁻¹)	(D) 机械絮凝搅拌转速/(r·min ⁻¹)
(1)	20	350	0.05	20
(2)	30	583	0.10	40
(3)	40	817	0.15	60
(4)	50	1 050	0.20	80

采用 L₁₆(4⁵) 正交表安排试验，以便减少试验次数，16 个组合共进行了 16 次试验，试验结果见表 3。

表 3 中极差 R 是衡量数据波动大小的重要指标，极差越大的因素越重要。由表 3 可知，四因素在所取水平范围内影响出水浊度的显著性次序是：

聚合氯化铁投加量>机械絮凝搅拌转速>活性污泥投加量>PAM 投加量。

根据小试的结论可知影响出水浊度最主要的因素为聚合氯化铁投加量。从表 3 中可以看出，出水浊度最低的操作条件是：聚合氯化铁投加量=50 mg/L；活性污泥投加量=817 mg/L；PAM 投加量=0.10 mg/L，机械絮凝搅拌转速=80 r/min。

3 小试试验结果的讨论

表 3 正交实验分析表

试验号	混凝剂投加量/(mg·L ⁻¹)	污泥投加量/(mg·L ⁻¹)	PAM 投加量/(mg·L ⁻¹)	絮凝搅拌转速/rpm	出水浊度/NTU
1	20 (1)	350 (1)	0.05 (1)	20 (1)	7.06
2	20 (1)	583 (2)	0.10 (2)	40 (2)	5.20
3	20 (1)	817 (3)	0.15 (3)	60 (3)	4.90
4	20 (1)	1 050 (4)	0.20 (4)	80 (4)	4.09
5	30 (2)	350 (1)	0.10 (2)	60 (3)	3.78
6	30 (2)	583 (2)	0.05 (1)	80 (4)	2.80
7	30 (2)	817 (3)	0.20 (4)	20 (1)	4.66
8	30 (2)	1 050 (4)	0.15 (3)	40 (2)	3.78
9	40 (3)	350 (1)	0.15 (3)	80 (4)	2.72
10	40 (3)	583 (2)	0.20 (4)	60 (3)	3.03
11	40 (3)	817 (3)	0.05 (1)	40 (2)	2.60
12	40 (3)	1 050 (4)	0.10 (2)	20 (1)	2.60
13	50 (4)	350 (1)	0.20 (4)	40 (2)	2.15
14	50 (4)	583 (2)	0.15 (3)	20 (1)	2.68
15	50 (4)	817 (3)	0.10 (2)	80 (4)	1.72
16	50 (4)	1 050 (4)	0.05 (1)	60 (3)	2.30
(1)/4	5.313	3.928	3.690	4.250	
(2)/4	3.755	3.427	3.325	3.433	
(3)/4	2.737	3.470	3.520	3.502	
(4)/4	2.212	3.192	3.482	2.833	
极差 R	3.101	0.736	0.365	1.417	

说明：表中 (i)/(第 m 列) 为第 m 列中数字与“ (i) ”对应的出水中浊度之和；极差 R(第 m 列) 为第 m 列的 (i)/3 中最大值减最小值。

众所周知，影响混凝的因素很多，影响到利用回流污泥的高效絮凝沉淀工艺的因素则更多。本试验筛选出几点在实际运行控制中易于改变的影响因素作为研究目标，通过小试试验探讨其对高效絮凝沉淀工艺出水的影响规律。由于小试试验研究的局限性和针对的是嘉兴石臼漾水厂特定的水质条件等原因，所得的结论存在一定的特定性和局限性。并且，小试试验存在一些尚未明确的因素和不足，特别是小试混合、絮凝与实际搅拌混合、絮凝提升桶机械接触絮凝；静水沉淀情况与实际沉淀池的动水沉降存在一定的差异。因此，小试试验的结果与实际运行体现出来的规律可能会不完全相同。尽管如此，在后期生产性试验研究过程中发现它所反映出的部分结论和规律与实际运行非常吻合，方便地指导了生产调试和运行管理。

4 结论

(1) 与常规的水平流式沉淀池不同，高效絮凝沉淀工艺有较多的可变影响因素，如活性泥量的投加、混凝剂投加种类和投加量、助凝剂 PAM 投加量、PAM 两点投加比例和絮凝提升搅拌转速等，对出水水质的影响情况较为复杂。

(下转第 57 页)

- [12] 李捷, 宋志文, 孙新成, 等. 新型 BOD 微生物传感流动注射检测仪的研制[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6 (3): 91-94.
- [13] Trosok S P, Driscoll B T, Luong J H T. Mediated microbial biosensor using a novel yeast strain for wastewater BOD measurement[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2001, 56: 550-554.
- [14] 林玲, 戴媛静, 肖来龙, 等. 好氧微生物的种类对光化学 BOD 传感膜性能影响的研究[J]. 海洋技术, 2004, 23(4): 54-55.
- [15] 马莉, 崔建升, 王晓辉, 等. 地衣芽孢杆菌海水生化需氧量传感器研究[J]. 河北科技大学学报, 2004, 25(4): 53-57.
- [16] Chan C Y, Lehmann M, Tag K, et al. Measurement of biodegradable substances using the salt-tolerant yeast *arxula adenivorans* for a microbial sensor immobilized with poly(carbamoyl)sulfonate (PCS) Part I: construction and characterization of the microbial sensor[J]. Biosensors and Bioelectronics, 1999, 14: 295-302.
- [17] 张兰英, 刘娜, 孙立波, 等. 现代环境微生物技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005, 7: 384-385.
- [18] Chee G, Nomura Y, Ikebukuro K, et al. Optical fiber biosensor for the determination of low biochemical oxygen demand [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2000, 15: 371-376.
- [19] 戴媛静, 钟振明, 陈曦, 等. 基于氧猝灭的有机改性溶胶-凝胶微生物传感器测定 BOD 的研究 [J]. 环境科学学报, 2003, 23: 683-688.
- [20] Tan T C, Qian Z R. Dead bacillus subtilis cells for sensing biochemical oxygen demand of waters and wastewaters [J]. Sens Actuators B, 1997, 40(1): 65.
- [21] Yang Z, Sasaki S, Karube I. Fabrication of oxygen electrode arrays and their incorporation into sensors for measuring biochemical oxygen demand [J]. Anal Chim Acta, 1997, 357(1-2): 4.
- [22] 张先恩, 王志通, 简浩然. BOD 微生物传感器的研究[J]. 环境科学通报, 1986, 6(2): 184.
- [23] 张平奇, 安立超, 曾衍. 生物传感技术用于 BOD 的快速测定[J]. 环境监测管理与技术, 1995, 7(1): 34.
- [24] 普利锋, 赵璇. 生物传感器快速测定 BOD 的研究[J]. 中国生物工程杂志, 2003, 23(10): 85-88.
- [25] 林维晟, 林旂宏. 细胞固定化技术在城市污水的处理中的应用[J]. 南平师专学报, 2005, 24(2): 70-72, 63.
- [26] 李花子, 施汉昌, 张悦, 等. 以酵母菌作为敏感材料的 BOD 生物传感器研究[J]. 中国环境监测, 2002, 18(4): 12-14.
- [27] Jianbo Jia, Mingyu Tang, Xu Chen, et al. Co-immobilized microbial biosensor for BOD estimation based on sol-gel derived composite material[J]. Biosensors and Bioelectronics. 2003, 18: 1 023- 1 029.

收稿日期: 2007-04-15

第一作者简介: 李洛娜(1984-), 女, 青岛理工大学在读硕士生, 研究方向为环境微生物学。
通讯作者: 李捷, 电话: 0532-85071262, 13156880203, E-mail: jili1972@schu.com

(上接第 29 页)

(2) 活性污泥的投加显著地提高了原水的脱稳和颗粒絮凝效果, 降低上清液的浑浊度, 同时, 对于除浊而言, 存在一个合适的污泥投加量范围。当活性污泥投加量增大, 出水中有机物含量则变化不大。

(3) 试验中当混凝剂投加量小于 50 mg/L 时, 混凝剂投加量大小对浑浊度去除有较大的影响, 当混凝剂投加量大于 50 mg/L 时, 继续增大投加量时浑浊度去除效果则不明显。同时, 混凝剂投加量增大能降低出水中有机物的含量。

(4) 试验中较低的 PAM 投加量能改善上清液出水浑浊度, 但影响效果并不大, 且随着 PAM 投加量的增大, 出水中浑浊度反而升高。同时, 当 PAM 在泥和水中的投加比例为 1:1 时, 出水浑浊度为最优。

(5) 通过正交试验分析, 得出四因素在所取水样范围内影响试验出水中浑浊度的显著性次序是: 聚合氯化铁投加量 > 机械絮凝搅拌转速 > 活性污泥

投加量 > PAM 投加量。

参考文献

- [1] Christain Desjardins, Boniface Koudjonou, Raymond Desjardins. Laboratory study of ballasted flocculation [J]. Water Research, 2002, 36(3): 744-754.
- [2] B. Jimenez, A. Chavez and C. Hernandez. Alternative treatment for wastewater destined for agricultural use [J]. Wat. Sci. Tech, 1999, 40(4-5): 355-362.
- [3] 蒋玖璐, 李东升, 陈树勤. 高密度澄清池设计[J]. 给水排水, 2002, 28(9): 27-29.
- [4] 许嘉炯, 雷挺, 沈裘昌, 等. 嘉兴石臼漾水厂扩容工程的设计和调试运行[J]. 给水排水, 2006, 32(5): 1-4.
- [5] 王占生, 刘文君. 微污染水源饮用水处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001, 75-76.
- [6] 严熙世, 范瑾初. 给水工程(第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999, 262-263.

收稿日期: 2007-03-14

第一作者简介: 芮旻(1981-), 硕士, 上海市市政工程设计研究总院第一设计研究院, 从事给水处理的设计和研究。电话: 021-51298239, E-mail: rui-mgpl@smedi.com