

## 基于复合絮凝剂的 SBR 工艺中试研究

王启斌<sup>1,2</sup>, 何文妍<sup>1</sup>, 宫 徽<sup>1</sup>, 朱 越<sup>1</sup>, 史彦伟<sup>2</sup>, 汪翠萍<sup>1,3</sup>, 王凯军<sup>1</sup>

(1. 清华大学环境学院 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 2. 北控水务  
<中国>投资有限公司, 北京 100102; 3. 北京博汇特环保科技股份有限公司, 北京 100102)

**摘 要:** 为解决传统活性污泥法处理能力较低及占地大的问题,利用纳米型复合絮凝剂可使活性污泥快速沉降的特性,采用基于纳米型复合絮凝剂的 SBR 工艺处理市政污水。在 SBR 中试装置中,当纳米型复合絮凝剂投加量为 20  $\mu\text{L}/\text{L}$  时,长期运行结果显示污泥性能稳定,污泥容积指数 (SVI) < 50 mL/g,表明污泥沉降速度已达到好氧颗粒污泥的水平。纳米型复合絮凝剂投加到水体后,通过吸附电中和作用促进絮凝,并利用大分子有机物的吸附架桥和卷扫等辅助作用,使污泥絮体及小颗粒迅速聚集成团下降,显著提升了出水水质。基于该纳米型复合絮凝剂的 SBR 出水水质可达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 的一级 A 要求。综上,该工艺适用于污水处理厂提标改造和延缓扩容的工程实践。

**关键词:** 复合絮凝剂; SBR; 污泥容积指数; 脱氮除磷

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)09-0091-05

## Study on Pilot-scale SBR Process Based on Composite Flocculant

WANG Qi-bin<sup>1,2</sup>, HE Wen-yan<sup>1</sup>, GONG Hui<sup>1</sup>, ZHU Yue<sup>1</sup>, SHI Yan-wei<sup>2</sup>,  
WANG Cui-ping<sup>1,3</sup>, WANG Kai-jun<sup>1</sup>

(1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Enterprises Water Group <China> Investment Limited, Beijing 100102, China; 3. Beijing Bohuite Environmental Technology Co. Ltd., Beijing 100102, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of low treating capacity and large footprint for the traditional activated sludge process, municipal wastewater was treated by SBR process based on nano-type composite flocculant through its property to accelerate rapid sedimentation of activated sludge. When the dosage of nano-type composite flocculant was 20  $\mu\text{L}/\text{L}$ , the long-term operation results showed that the sludge was stable and sludge volume index (SVI) was less than 50 mL/g in the pilot-scale SBR, which indicated that the sludge settling velocity was equivalent to that of aerobic granular sludge. The addition of nano-type composite flocculant could accelerate the rapid aggregation and sedimentation of flocs and small particles through adsorption & electrical neutralization, adsorption bridging of macromolecular organics and auxiliary functions such as sweeping, which eventually improved the effluent quality. The effluent quality of SBR process based on composite flocculant could meet the first class A standard of

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103-001)

通信作者: 王凯军 E-mail: wkj@tsinghua.edu.cn

*Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant (GB 18918 - 2002).* Therefore, the process is applicable for upgrading & reconstruction and delaying expansion of sewage treatment plants.

**Key words:** composite flocculant; SBR; sludge volume index (SVI); nitrogen and phosphorus removal

随着社会经济的发展,水环境污染越来越引起人们的重视,目前污水厂的建设与高效运行是解决该问题的基本措施之一。氧化沟、 $A^2/O$ 、SBR 是我国当前主流的以活性污泥法为基础的工艺<sup>[1]</sup>,然而传统活性污泥法普遍存在处理能力较低、占地面积大等问题;同时为保障出水水质达标,往往需要投加大量化学药剂<sup>[2]</sup>,有可能会引起二次污染,严重制约着传统活性污泥法的应用。随着纳米材料科学的不断发展,纳米材料在水处理中的应用越来越受到关注<sup>[3-5]</sup>。根据所用材料不同,可将复合絮凝剂分为无机复合絮凝剂、有机复合絮凝剂、无机-有机复合絮凝剂等,其中应用较多的是无机-有机复合絮凝剂<sup>[6-7]</sup>。纳米型复合絮凝剂具有表面原子数多、颗粒比表面积大、比表面能高、吸附性能强、制备简单、投加量少等优点,且相比于普通絮凝剂其絮凝沉淀效果更好、沉降速度更快、对污染物的去除效果更佳<sup>[5-6,8-9]</sup>。笔者通过向 SBR 中试反应器中长期投加纳米型复合絮凝剂,研究了 SBR 系统的出水水质、污染物去除机制、技术适用性等内容,旨在为开发基于复合絮凝剂的污水处理新工艺提供参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 中试装置与试验药剂

中试装置见图1,其主体为不锈钢材质的圆柱体,内径为1.2 m,高为6 m,有效容积为6.22 m<sup>3</sup>,在反应器两侧不同高度处设有排水口、取样口和加药口,该装置配有1 m<sup>3</sup>的进水箱和1 m<sup>3</sup>的加药箱。

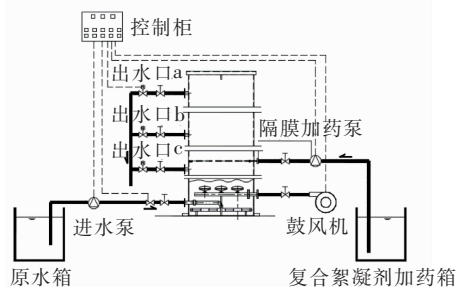


图1 SBR 中试装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of pilot-scale SBR device

反应器底部设有布水装置及曝气头,采用固定式变频管道泵自反应器底部进水、上部出水的方式,通过变频式超高压离心风机进行曝气,使用隔膜加药泵加药。系统配有 PLC 自控系统,可以通过控制柜设定运行参数,自动运行。试验污水取自生活污水厂细格栅的出水,好氧运行时溶解氧控制在1.5~4.5 mg/L,温度为室温(20~29℃)。

试验所用复合絮凝剂购于某环保公司,该絮凝剂为无味浅绿色黏稠溶液,密度为1.2 g/cm<sup>3</sup>,絮凝剂自身为强酸性,pH 值为0.9,蒸汽压为2.3 kPa (20℃),沸点为120℃<sup>[6]</sup>。

### 1.2 试验步骤

具体中试方案共分为5个阶段:

① 短 HRT 条件下试验(阶段Ⅰ):持续时间为0~112 d。进水60 min,曝气110 min,加药持续2 min(曝气结束前2 min 投加),沉淀30 min,排水10 min,排水比为50%,从装置中间出水口b出水。HRT 为7 h,SRT 为30 d。加药方式为每周周期加药,加药量为20 μL/L,通过隔膜加药泵加药。

② 长 HRT 条件下驯化稳定阶段(阶段Ⅱ):持续时间为113~157 d,未加复合药剂。将污水厂污泥回流池中的活性污泥接种于 SBR 反应器中,闷曝2 d后开始低负荷进水。每个运行周期为8 h,分为进水180 min,曝气270 min,沉淀30 min。采用下进水上排水的连续进出水方式,在排水口a处出水,排水比为50%。HRT 为16 h,SRT 为20 d。

③ 长 HRT 条件下加药试验阶段(阶段Ⅲ):持续时间为158~202 d。反应器运行稳定后,开始投加复合絮凝剂。加药方式为每周周期加药,加药量为20 μL/L,通过隔膜加药泵加药。加药时间为周期曝气结束前2 min,其他运行参数与阶段Ⅱ相同。

在前期试验的基础上,增设缺氧段,利用泵将上部的硝化液从底部穿过污泥层,以强化生物脱氮。重新加入接种污泥,开展了阶段Ⅳ和Ⅴ的试验研究。

④ 未加药条件下试验(阶段Ⅳ):持续时间为203~222 d。进水45 min,缺氧回流45 min,曝气

145 min,沉淀5 min。采用下进水上排水的连续进出水方式,排水比为25%。反应器运行周期为4 h,HRT为16 h,SRT为20 d。

⑤ 加药条件下驯化稳定阶段(阶段V):持续时间为223~262 d。进水45 min,缺氧回流45 min,曝气145 min,沉淀5 min。采用下进水上排水的连续进出水方式,排水比为25%。反应器运行周期为4 h,HRT为16 h,SRT为20 d。加药方式采用每周加药,加药量为20  $\mu\text{L/L}$ ,通过隔膜加药泵加药。

### 1.3 分析项目及方法

TP、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN等水质指标,以及污泥容积指数(SVI)、MLSS、MLVSS等污泥指标均按《水和废水监测分析方法》(第4版)测定;COD采用哈希快速消解法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 中试装置去除污染物的效果

图2为SBR中试装置对COD的去除效果。可以看出,进水COD浓度波动较大,但是系统的出水COD浓度十分稳定,始终都在50  $\text{mg/L}$ 以下。相较于阶段I,阶段II将装置运行周期由3.5 h延长至8 h,排水方式由单独排水改为连续进出水,且未投加复合絮凝剂;而阶段III的运行参数与阶段II的相同,只是投加了复合絮凝剂。阶段I、II、III对COD的去除率分别为74%、90%和92%。而对中试装置进行改进之后(阶段IV和阶段V),无论是否投加复合絮凝剂,进水COD浓度对出水COD浓度几乎没有影响。

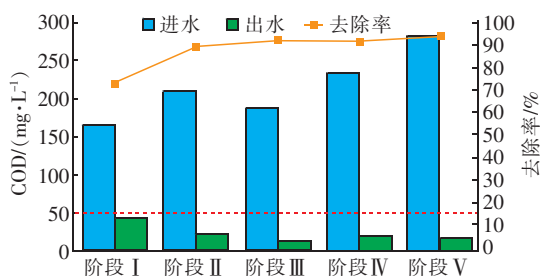


图2 SBR对COD的去除效果

Fig. 2 Removal effect of COD by SBR

图3为SBR对氨氮的去除效果。可以看出,在阶段I,装置的出水氨氮浓度偏高,主要是由于采用从中间出水的方式,沉降较慢的污泥流失导致污泥浓度偏低,影响了硝化效果。在阶段II和阶段III,出水方式改为顶水后,对氨氮的去除效果良好,出水氨氮低于5  $\text{mg/L}$ ,去除率达到94%以上。在阶段IV,

出水氨氮浓度十分稳定,平均值为1  $\text{mg/L}$ 。而在阶段V,平均出水氨氮为0.27  $\text{mg/L}$ 。可见,投加复合絮凝剂之后,中试装置对氨氮的去除效果更好。

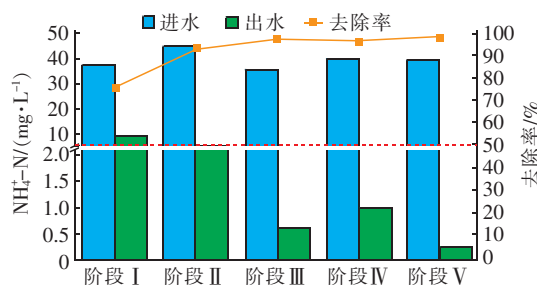


图3 SBR对氨氮的去除效果

Fig. 3 Removal effect of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  by SBR

图4为SBR对总氮的去除效果。可以看出,在阶段I对TN的去除率约为34%,脱氮效果不理想。到了阶段III,装置的脱氮能力有了一定的提高,对TN的去除率达到42%,但出水TN浓度仍然较高,平均值为24.5  $\text{mg/L}$ 。由于阶段IV和阶段V增加了缺氧段,装置具有较强的脱氮能力,特别是在阶段V,出水总氮平均值可达到15  $\text{mg/L}$ 以下。

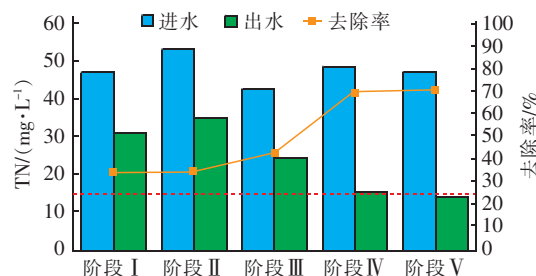


图4 SBR对TN的去除效果

Fig. 4 Removal effect of TN by SBR

图5为SBR对TP的去除效果。可以看出,从阶段I到阶段II,对TP的平均去除率从56%提高至76%,出水平均浓度从2.6  $\text{mg/L}$ 降至1.5  $\text{mg/L}$ 。这是因为阶段II增加了厌氧进水时间,由60 min延长至180 min,可将水中溶解性有机物转化为挥发性脂肪酸;同时,聚磷菌把细胞内的磷水解为磷酸盐,并从中获取能量,同化成碳能源存贮物——聚 $\beta$ -羟基丁酸(PHB)或 $\beta$ -羟基戊酸(PHV)等;在好氧条件下,聚磷菌以分子氧或化合态氧作为电子受体,氧化代谢内贮物质(PHB或PHV等),并产生能量,然后过量地从污水中摄取磷酸盐,以高能物质ATP的形式存储,其中一部分又转化为聚合磷,通过剩余污泥的排放实现高效生物除磷目的。在阶段III,通

过投加复合絮凝剂,对TP的平均去除率提高到92%,出水TP平均值为0.46 mg/L,可见复合絮凝剂的化学辅助除磷效果显著。在阶段Ⅳ和阶段Ⅴ,进水TP平均浓度在10 mg/L左右,出水TP浓度在投加复合絮凝剂前后差别较大。阶段Ⅳ没有投加复合絮凝剂,出水TP平均值为1.3 mg/L,对TP的平均去除率为88%;而阶段Ⅴ对TP的平均去除率为96%,出水TP平均值降至0.36 mg/L。可以看出,复合絮凝剂辅助除磷的效果十分明显。

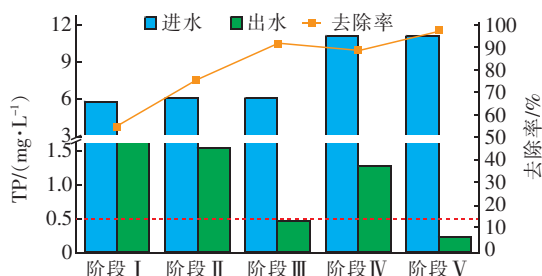


图5 SBR对TP的去除效果

Fig. 5 Removal effect of TP by SBR

综上所述,基于复合絮凝剂的SBR工艺可使COD、 $\text{NH}_4^+$ -N、TN、TP指标达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。

## 2.2 污泥的沉降情况

试验过程中,阶段Ⅰ~Ⅴ的SVI值分别为74、48、36、63、42 mL/g。可见,由于在阶段Ⅲ和阶段Ⅴ投加了复合絮凝剂,SVI值<50 mL/g,下降明显,这表明复合絮凝剂对污泥性能的改善具有促进作用,可显著提高污泥的沉降速度。Liu等<sup>[10]</sup>认为,好氧颗粒污泥的SVI值一般都在50 mL/g以下,因此本系统中的污泥沉降速度已达到好氧颗粒污泥的沉降水平。

## 2.3 污染物强化去除机制分析

复合絮凝剂投入水体之后,带正电荷的离子与活性污泥絮体中胞外聚合物(EPS)携带的负电荷基团进行反应,通过电中和作用迅速与反应物相结合,该种结构可快速产生凝聚效果,同时可解除悬浮物的静止状态,从而不断加快悬浮物的凝聚并迅速下沉<sup>[11]</sup>。这些扩大的悬浮物通过吸附、架桥、卷扫等作用使胶体凝聚,也可使细小的颗粒、胶体等随之沉降。传统工艺出水中的颗粒态磷含量较高(5%~6%)<sup>[12]</sup>,因此降低出水中的颗粒含量对降低出水TP浓度十分重要。

在基于复合絮凝剂的SBR工艺中,生物脱氮除

磷是去除污水中营养盐的主要方式。投加复合絮凝剂之后,投入的大分子有机物可起到骨架的作用,有利于增大污泥粒径,形成比较理想的厌氧/缺氧/好氧微环境,从而提高系统脱氮除磷的能力。

## 2.4 技术适用性分析

占地问题已成为污水处理厂运行评价体系中的一个重要内容<sup>[13]</sup>。传统活性污泥法的沉淀池占据了整个污水处理厂相当大的一部分,可占到全部占地面积的30%~50%<sup>[3]</sup>。复合絮凝剂技术以SBR的模式运行,具有沉降快速、辅助除磷等优点,无需设置初沉池和二沉池,也不需要设置滤布、滤池等强化处理设施,工艺流程更加简化。保守估计,与传统活性污泥法相比,基于复合絮凝剂的SBR工艺可节省占地30%~60%。实际上,基于复合絮凝剂的SBR工艺显著缩短了沉淀时间,运行周期相应缩短,增加了污水处理量。因此,基于复合絮凝剂的SBR工艺可以用于污水处理厂提标改造和延缓扩容的工程实践中。

## 3 结论

① 基于复合絮凝剂的SBR工艺通过电中和作用促进絮凝,并利用大分子有机物吸附、卷扫等辅助作用使污泥絮体及小颗粒迅速聚集成团下降,显著提升出水水质。中试装置出水水质可稳定达到一级A标准。

② 在运行时序中增设缺氧段,将上部的硝化液从底部穿过污泥层,增加了硝酸盐氮与反硝化菌的接触时间,显著提高了生物脱氮效率。

③ 复合絮凝剂对污泥性能的改善具有促进作用,可以显著提高污泥的沉降速度,从而达到好氧颗粒污泥的沉降水平。基于复合絮凝剂的SBR工艺可用于污水厂提标改造和延缓扩容的工程实践中。

## 参考文献:

- [1] 刘梦,伯鑫,孟凡琳,等. 2015年中国城镇污水处理厂达标排放评估[J]. 环境工程,2017,35(10):77-81,90.  
Liu Meng, Bo Xin, Meng Fanlin, et al. Standard discharge evaluation of Chinese urban sewage plants in 2015 based on continuous emission monitoring system data[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(10): 77-81,90(in Chinese).
- [2] Wang Q, Chen Q, Chen J. Optimizing external carbon source addition in domestics wastewater treatment based on



- online sensing data and a numerical model[J]. *Water Sci Technol*,2017,75(11/12):2716–2725.
- [3] Sadegh H, Ali G A M, Gupta V K, *et al.* The role of nanomaterials as effective adsorbents and their applications in wastewater treatment [J]. *Journal of Nanostructure in Chemistry*,2017,7(1):1–14.
- [4] Bueno D L C P, Gillerman L, Gehr R, *et al.* Nanotechnology for sustainable wastewater treatment and use for agricultural production: A comparative long-term study[J]. *Water Res*,2017,110:66–73.
- [5] Gehrke I, Geiser A, Somborn-Schulz A. Innovations in nanotechnology for water treatment[J]. *Nanotechnol Sci Appl*,2015,8:1–17.
- [6] 吴玉杰. Nanofloc 强化 SBR 工艺处理市政污水[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.
- Wu Yujie. Nanofloc Enhanced SBR Process for Municipal Wastewater Treatment [D]. Hefei: Hefei University of Technology,2017(in Chinese).
- [7] 晏井春,闫永胜,朱富坤,等. 纳米聚硅氯化铝复合絮凝剂的制备、表征与应用研究[J]. *净水技术*,2008,27(2):57–61.
- Yan Jingchun, Yan Yongsheng, Zhu Fukun, *et al.* Study on preparation, characterization and application of nanosized polyaluminum silicate chloride coagulant[J]. *Water Purification Technology*,2008,27(2):57–61(in Chinese).
- [8] 李猛,崔康平,宫徽,等. 纳米絮凝剂在SBR系统中的应用[J]. *中国给水排水*,2018,34(19):96–100.
- Li Meng, Cui Kangping, Gong Hui, *et al.* Application of nano flocculant in SBR system [J]. *China Water & Wastewater*,2018,34(19):96–100(in Chinese).
- [9] 周锋. 污水处理厂应用絮凝+长纤维过滤提标改造试验研究[D]. 南京:东南大学,2015.
- Zhou Feng. The Experimental Research of Upgrading and Reconstruction of Sewage Treatment Plant Applying Flocculation + Long Fiber Filter[D]. Nanjing: Southeast University,2015(in Chinese).
- [10] Liu Y, Tay J H. State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment [J]. *Biotechnol Adv*,2004,22(7):533–563.
- [11] Oikonomidis I, Burrows L J, Carliell-Marquet C M, *et al.* Mode of action of ferric and ferrous iron salts in activated sludge[J]. *J Chem Technol Biotechnol*,2010,85(8):1067–1076.
- [12] 郝晓地,李天宇,吴远远,等. A<sup>2</sup>/O 工艺用于污水处理厂升级改造的适宜性探讨[J]. *中国给水排水*,2017,33(21):18–24.
- Hao Xiaodi, Li Tianyu, Wu Yuanyuan, *et al.* Discussion on suitability of A<sup>2</sup>/O process for upgrading of wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*,2017,33(21):18–24(in Chinese).
- [13] de Bruin L M M, de Kreuk M K, van der Roest H F R, *et al.* Aerobic granular sludge technology: an alternative to activated sludge? [J]. *Water Sci Technol*,2004,49(11/12):1–7.



作者简介:王启镔(1983–),男,山东临沂人,博士,助理研究员,主要研究方向为水污染控制理论与技术。

E-mail:wangqibin188@163.com

收稿日期:2018–10–12