

# 臭氧-生物活性炭对微絮凝强化过滤的影响研究

刘宏远<sup>1</sup>, 许子洋<sup>1</sup>, 朱海涛<sup>2</sup>, 孙海平<sup>2</sup>, 叶守开<sup>1</sup>, 代鹏<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 嘉源给排水有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

**摘要:** 嘉兴市某水厂采用臭氧-生物活性炭结合微絮凝强化过滤工艺, 实现了出水浊度和 $2\ \mu\text{m}$ 以上颗粒数分别稳定在 $0.1\ \text{NTU}$ 和 $30\ \text{个/mL}$ 以下的良好效果。结合该水厂的净水工艺, 考察了臭氧-生物活性炭工艺对微絮凝强化过滤工艺的影响。结果表明, 臭氧-生物活性炭工艺去除了大量有机物, 影响了胶体的稳定性, 有利于微絮凝强化过滤工艺对浊度与颗粒物的去除。臭氧-生物活性炭工艺出水Zeta电位处于 $-5\sim 0\ \text{mV}$ 范围内, 粒径为 $5\sim 20\ \mu\text{m}$ 的大颗粒数量减少、粒径为 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 的小颗粒数量上升, 总颗粒数和浊度上升, 经微絮凝和砂滤池处理后, Zeta电位进一步上升直至接近于零, 水中颗粒物与浊度被大幅去除。

**关键词:** 臭氧; 生物活性炭; 微絮凝; 强化过滤; Zeta电位

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)01-0060-04

## Influence of Ozone/BAC on Micro-flocculation and Enhanced Filtration

LIU Hong-yuan<sup>1</sup>, XU Zi-yang<sup>1</sup>, ZHU Hai-tao<sup>2</sup>, SUN Hai-ping<sup>2</sup>, YE Shou-kai<sup>1</sup>, DAI Peng<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Jiayuan Water Supply and Discharge Co. Ltd., Jiaxing 314000, China)

**Abstract:** After the micro-flocculation and enhanced filtration process were combined with ozone/BAC process in a waterworks in Jiaxing, an excellent treatment result was achieved, in which the turbidity of the effluent was below  $0.1\ \text{NTU}$  and the number of particles ( $>2\ \mu\text{m}$ ) was within  $30\ \text{p/mL}$ . Combined with the process of the waterworks, influence of  $\text{O}_3/\text{BAC}$  on the micro-flocculation and the enhanced filtration was investigated. The results showed that the removal of substantial amount of organic compounds affected the stability of colloidal particles in the  $\text{O}_3/\text{BAC}$  process and it was beneficial to the removal of turbidity and particle in the micro-flocculation and enhanced filtration process. The Zeta potential of the  $\text{O}_3/\text{BAC}$  effluent was in a range from  $-5$  to  $0\ \text{mV}$ . The large particle of  $5\sim 20\ \mu\text{m}$  in diameter was reduced, and the small particle of  $2\sim 5\ \mu\text{m}$  in diameter was increased. The total number of particles and the turbidity of effluent were increased. After the micro-flocculation and the sand filter process, the Zeta potential further increased to close to zero, and the total number of particles and turbidity were removed substantially.

**Key words:** ozone; BAC; micro-flocculation; enhanced filtration; Zeta potential

作为饮用水深度处理的重要工艺, 臭氧-生物活性炭工艺能有效去除水中氨氮和有机物等, 同时

使色度、臭和味等多项水质指标得到全面改善<sup>[1]</sup>。但其若作为饮用水厂最后一道工序,出水浊度不能稳定达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中小于1 NTU的要求,更难以达到2013版《浙江省城市供水现代化水厂评价标准》中浊度 $\leq 0.1$  NTU的要求,并且存在出水颗粒数较高以及微生物泄漏等安全隐患<sup>[2]</sup>。嘉兴市某水厂为有效解决上述问题,在臭氧-生物活性炭工艺后应用了微絮凝强化过滤工艺(即设置快速微絮凝、砂滤池组合工艺)<sup>[3]</sup>,取得了出厂水浊度稳定在0.02~0.07 NTU及2  $\mu\text{m}$ 以上颗粒数 $<30$ 个/mL的良好效果。

针对这一工程问题,笔者通过考察该水厂生物滤池、臭氧接触池、生物活性炭池、快速微絮凝、砂滤池等各构筑物中溶解性有机物的分子质量和有机物的变化情况、胶体稳定性的变化情况及颗粒物数量和粒径的变化情况,研究了臭氧-生物活性炭工艺对微絮凝强化过滤工艺的影响,旨在为同类型的水厂工艺优化提供参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 工艺介绍

图1是嘉兴市某水厂生产工艺流程。水源水经水泵提升后加入高锰酸盐、臭氧、混凝剂,然后依次流经折板絮凝平流沉淀池、生物滤池、臭氧接触池、生物活性炭池,生物活性炭池出水加入混凝剂后经快速微絮凝至砂滤池,砂滤池出水加入次氯酸钠后送至清水池。其中,臭氧接触池中臭氧投加量为2 mg/L,总接触时间为17 min,生物活性炭池采用上向流,快速微絮凝前投加5 mg/L聚合氯化铝,快速微絮凝池的水力停留时间约为30 s,砂滤池采用序批式翻板滤池。

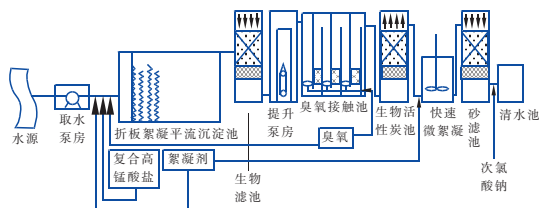


图1 嘉兴市某水厂生产工艺流程

Fig. 1 Flow chart of a waterworks in Jiaxing City

### 1.2 水质情况及标准

2015年8月—2016年7月嘉兴市该水厂水源水质如下:浊度为13.8~52.8 NTU、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为0.27~4.32 mg/L、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 为4.31~7.68 mg/L、Zeta

电位为-18.8~-15.9 mV;出厂水水质如下:浊度为0.02~0.07 NTU、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为0.02~0.16 mg/L、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 为1.61~1.90 mg/L、Zeta 电位为-2.04~-0.40 mV、 $>2 \mu\text{m}$ 颗粒数为3~24个/mL;2013版《浙江省城市供水现代化水厂评价标准》规定出厂水浊度 $\leq 0.1$  NTU、 $\text{NH}_4^+ - \text{N} \leq 0.5$  mg/L、 $\text{COD}_{\text{Mn}} \leq 2.0$  mg/L。

### 1.3 检测方法及标准

本试验水质检测方法采用《生活饮用水卫生标准检验方法》(GB/T 5750—2006)。溶解性有机物的分子质量采用膜(1、3、10、100 ku)依次截留后测量;浊度采用哈希2100N浊度仪检测;颗粒物的数量和粒径采用IBR Versacount颗粒分析仪检测,范围为2~400  $\mu\text{m}$ ;Zeta 电位采用Zetasizer Nano检测。

## 2 结果与讨论

### 2.1 臭氧工艺对处理效果的影响

由于有机物吸附在胶体颗粒表面后会使胶体颗粒更加稳定<sup>[4]</sup>,因此去除水中有机物会影响胶体颗粒的稳定性。臭氧作为强氧化剂( $E_0 = 2.07 \text{ V}$ ),能氧化或部分氧化水中有机物,在一定程度上破坏胶体颗粒表面的有机物保护层,影响胶体颗粒的稳定性<sup>[5]</sup>。检测结果表明,在生产中若不投加臭氧,直接经活性炭池吸附后至微絮凝砂滤池,其出水浊度为0.19~0.36 NTU,不能满足出水浊度 $\leq 0.1$  NTU的要求。投加臭氧后,经生物活性炭池至微絮凝砂滤池,其出水浊度为0.02~0.07 NTU,满足要求。

### 2.2 臭氧-生物活性炭工艺对处理效果的影响

#### 2.2.1 胶体稳定性的变化

沉淀池、生物滤池、臭氧接触池、生物活性炭池、快速微絮凝、砂滤池出水的Zeta 电位变化情况如图2所示。

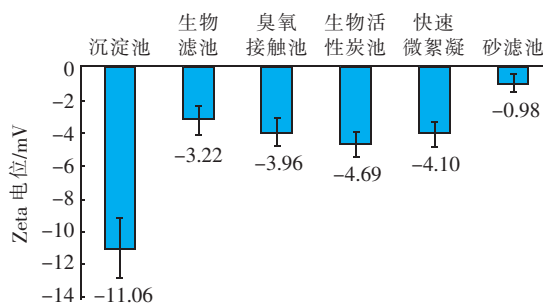


图2 各构筑物出水 Zeta 电位变化

Fig. 2 Change of Zeta potential of each unit effluent

由图2可以看出,从沉淀池至砂滤池 Zeta 电位

首先呈现明显上升然后少量下降,最后再显著上升直至接近于零。其中,沉淀池出水经生物滤池后,Zeta 电位上升至  $-3.22 \text{ mV}$ ,这可能是由于生物滤池中的絮凝反应及生物作用提高了水中的 Zeta 电位。刘文君等人的研究也表明了生物滤池中有机物的去除、pH 值的降低及微生物产生的微絮凝作用能有效提高水中的 Zeta 电位<sup>[6]</sup>。生物滤池出水经臭氧接触池后,Zeta 电位微下降至  $-3.96 \text{ mV}$ ,再经生物活性炭池后,Zeta 电位微下降至  $-4.69 \text{ mV}$ 。经臭氧接触池后 Zeta 电位微下降可能是由于臭氧将大分子有机物氧化为了小分子有机物,导致电荷数量发生变化,后续研究中颗粒物数量的变化趋势也与之相同;经生物活性炭池后 Zeta 电位微下降可能是由生物活性炭池中的微生物引起的。

由图 2 还可以看出,生物滤池出水后 Zeta 电位均在  $-5 \sim 0 \text{ mV}$  内,研究表明 Zeta 电位在  $-5 \sim 0 \text{ mV}$  范围内可以产生良好的絮凝效果<sup>[4]</sup>,因此臭氧-生物活性炭工艺出水有良好的絮凝条件。由图 2 中快速微絮凝、砂滤池出水的 Zeta 电位变化情况可以看出,当臭氧-生物活性炭工艺出水经快速微絮凝后,Zeta 电位上升至  $-4.10 \text{ mV}$ ,快速微絮凝中 Zeta 电位上升较少可能是由于水力停留时间较短,絮凝反应没有进行完全。进入砂滤池后,絮凝反应继续进行至充分反应,Zeta 电位进一步上升至  $-0.98 \text{ mV}$ ,接近于零,脱稳颗粒在滤料表层至深部不断相互碰撞、接触、絮凝而被滤料吸附、截留,有效地提高了对浊度和颗粒物的去除效果。

## 2.2.2 浊度和颗粒物的变化

生物滤池出水经过臭氧接触池后,浊度由  $0.21 \text{ NTU}$  上升至  $0.29 \text{ NTU}$ ;臭氧接触池出水经过生物活性炭池后,浊度下降至  $0.27 \text{ NTU}$ ,去除率为  $8.9\%$ 。可以看出,生物活性炭池出水浊度大于生物滤池出水浊度,经计算发现相对于生物滤池的出水浊度,臭氧-生物活性炭工艺出水浊度上升了  $25.0\%$ 。生物滤池出水经过臭氧接触池后,水中粒径为  $2 \sim 3$ 、 $3 \sim 5 \mu\text{m}$  的小颗粒数量上升, $5 \sim 20 \mu\text{m}$  的大颗粒数量有不同程度的减少,总颗粒数上升了  $46.0\%$ ;臭氧接触池出水经过生物活性炭池后,水中粒径为  $2 \sim 20 \mu\text{m}$  的颗粒数均有所下降,总颗粒数下降了  $12.6\%$ 。可以看出,生物活性炭池的出水总颗粒数大于生物滤池的出水总颗粒数,经计算可知相对于生物滤池的出水总颗粒数,臭氧-生物活性炭工艺

的出水总颗粒数上升了  $27.6\%$ 。

此外,臭氧-生物活性炭工艺出水经快速微絮凝、砂滤池后水中浊度和总颗粒数都大大降低,砂滤池的出水浊度平均值与总颗粒数仅为  $0.04 \text{ NTU}$  和  $23 \text{ 个/mL}$ 。经计算,快速微絮凝、砂滤池对浊度与总颗粒数的去除率分别为  $84.9\%$ 、 $96.5\%$ 。

综上,浊度与总颗粒数在臭氧-生物活性炭工艺中的变化趋势相同。二者经臭氧-生物活性炭工艺处理后均有所上升,其中,经臭氧接触池处理后水中浊度与总颗粒数均显著上升,这可能是由于臭氧氧化及部分氧化了有机物,使得部分大颗粒或大分子物质转换成小颗粒或小分子物质<sup>[7]</sup>;经生物活性炭池后水中浊度与总颗粒数均有少量下降,这可能是由生物活性炭池中炭粒与微生物的吸附作用引起的。臭氧-生物活性炭工艺出水经快速微絮凝至砂滤池后,颗粒间或颗粒与滤料间相互碰撞、接触、絮凝而被滤料吸附、截留,从而进一步降低了砂滤池出水浊度和总颗粒数。此外,经臭氧-生物活性炭工艺处理后水中浊度和总颗粒数分别上升了  $25.0\%$ 、 $27.6\%$ ,浊度和颗粒数的适量上升有助于提高快速微絮凝、砂滤池中颗粒间或颗粒与滤料间的碰撞、粘附几率。徐兵等人的研究也表明,适当提高微絮凝强化过滤的进水浊度有利于达到过滤效果<sup>[3]</sup>。

## 2.3 有机物的变化规律

### 2.3.1 溶解性有机物分子质量变化情况

图 3 是生物滤池、臭氧接触池、生物活性炭池的溶解性有机物分子质量的变化情况。

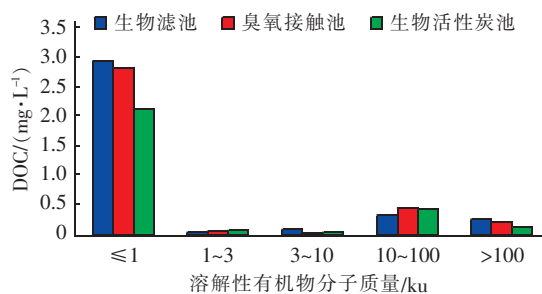


图 3 各构筑物的溶解性有机物分子质量的变化情况

Fig. 3 Change of molecular weight of dissolved organic substances of each unit effluent

由图 3 可以看出,由于臭氧氧化或部分氧化了水中溶解性有机物,生物滤池出水经臭氧接触池后,分子质量较大的溶解性有机物占比下降,溶解性有机物分子质量降低。其中,分子质量在  $1 \sim 3 \text{ ku}$  的溶解性有机物增加了  $0.027 \text{ mg/L}$ ,分子质量在  $10 \sim$



100 ku 区间的有机物增加了 0.125 mg/L,其他分子质量区间的溶解性有机物则有所下降。臭氧接触池出水经生物活性炭池后,由于物理吸附和生物降解,水中各分子质量区间溶解性有机物均有所下降。

### 2.3.2 $UV_{254}$ 和 $COD_{Mn}$ 的变化情况

图4是生物滤池、臭氧接触池、生物活性炭池出水中  $UV_{254}$  和  $COD_{Mn}$  的变化情况。

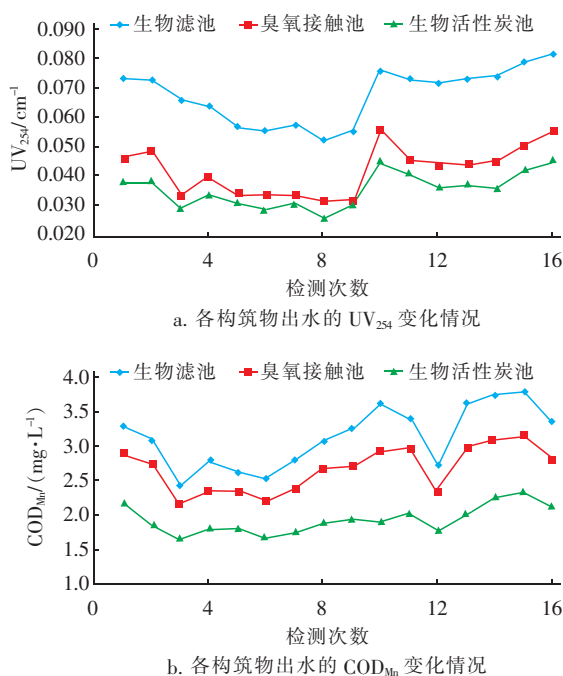


图4 各构筑物出水的  $UV_{254}$  和  $COD_{Mn}$  变化情况

Fig.4 Change of  $UV_{254}$  and  $COD_{Mn}$  of each unit effluent

由图4可以看出,臭氧-生物活性炭对  $UV_{254}$  和  $COD_{Mn}$  的平均去除率分别为 47.6%、37.4%,出水平均值分别为  $0.036\text{ cm}^{-1}$ 、 $1.94\text{ mg/L}$ 。这是由于在臭氧接触池中有不同程度的腐殖质类大分子有机物以及  $C=C$  双键和  $C=O$  双键的芳香族化合物被氧化,难降解的大分子有机物被氧化成易降解的小分子有机物,提高了有机物的生物可降解性能,生物活性炭池通过生物活性炭的物理吸附及其表面微生物的活动也去除了水中大量有机物<sup>[8]</sup>。

综上,臭氧-生物活性炭工艺出水中溶解性有机物分子质量、 $UV_{254}$  和  $COD_{Mn}$  均有明显下降,有机物被大量去除,在一定程度上破坏了颗粒物的有机物保护层,有利于微絮凝强化过滤的处理效果。

## 3 结论

在臭氧-生物活性炭工艺中溶解性有机物分子质量降低、有机物被大量去除,从而影响了水中胶体

颗粒物的稳定性,有利于在后续微絮凝强化过滤工艺中被去除。臭氧-生物活性炭工艺出水再经微絮凝强化过滤处理后,水中 Zeta 电位进一步上升直至接近于零,浊度与颗粒物在砂滤池中被大幅去除,从而保障了供水水质。

### 参考文献:

- [1] 陈义春,戴盛,朱永林,等. 臭氧/生物活性炭深度去除有机物的效果研究[J]. 中国给水排水,2015,31(23): 51-53.
- [2] 查人光,徐兵,朱海涛,等. 上向流 BAC 吸附池在净水生产中的应用[J]. 给水排水,2010,36(6):14-17.
- [3] 徐兵,陈伟. 微絮凝强化过滤在嘉兴贯泾港水厂的应用[J]. 中国给水排水,2009,25(12):57-59.
- [4] 李敏,宗栋良. 混凝中 Zeta 电位的影响因素[J]. 环境科技,2010,23(3):9-11.
- [5] Sadrnourmohamadi M, Gorczyca B. Effects of ozone as a stand-alone and coagulation-aid treatment on the reduction of trihalomethanes precursors from high DOC and hardness water[J]. Water Res,2015,73:171-180.
- [6] 刘文君,贺北平,张锡辉. 生物预处理对受有机污染源水中胶体 Zeta 电位的影响研究[J]. 中国给水排水,1996,12(4):27-29.
- [7] 王娜,马军,何文杰,等. 强化混凝与臭氧预氧化强化处理微污染水的对比[J]. 中国给水排水,2010,26(5):63-65.
- [8] 霍志刚,郑彦华,邵爽. 臭氧/生物活性炭深度处理工艺的设计参数研究[J]. 中国给水排水,2014,30(13):50-53.



作者简介:刘宏远(1971-),男,辽宁辽中人,博士,副教授,主要从事水处理技术研究。

E-mail: lhyzyy@zjut.edu.cn

收稿日期:2017-04-15