

臭氧/生物活性炭工艺的微生物安全性研究

乔铁军¹, 孙国芬²

(1. 深圳市水务<集团>有限公司, 广东 深圳 518031; 2. 深圳市环境科学研究所, 广东 深圳 518001)

摘要: 针对臭氧/生物活性炭工艺在应用过程中可能存在的微生物安全性问题, 通过中试和生产性试验从病原微生物、微生物群落、浊度和颗粒数、AOC 等四个方面进行了系统评价。结果表明, 臭氧/生物活性炭工艺在运行过程中形成了丰富的微生物群落, 但在活性炭上和出水中均未检测到病原微生物, 因此该工艺不存在由病原微生物引起的微生物安全问题, 但是应该引起足够重视。臭氧/生物活性炭工艺能够提高出水水质的生物稳定性, 并进一步降低了砂滤池出水的浊度和颗粒数, 有利于保障微生物安全性, 但要加强对初滤水的管理。

关键词: 臭氧/生物活性炭; 微生物安全性; 病原微生物; 浊度; 颗粒数; 可同化有机碳

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2008)05-0031-05

Study on Microbial Safety of Ozone/Biological Activated Carbon Process

QIAO Tie-jun¹, SUN Guo-fen²

(1. Shenzhen Water < Group > Co. Ltd., Shenzhen 518031, China; 2. Shenzhen Institute of Environmental Science, Shenzhen 518001, China)

Abstract: Aimed at the microbial safety of ozone/biological activated carbon (O_3 /BAC) process, through the pilot-scale and productive experiments, a systematic evaluation was carried out considering the aspects of pathogenic microorganisms, microbial population, turbidity, particle number and AOC. The results show that there exists rich microbial population in the operation of O_3 /BAC process, but pathogenic microorganisms are not found in the treated water and on GAC. Therefore, there are no problems of microbial safety produced by pathogenic microorganisms, but it should be paid attention to this. In addition, O_3 /BAC process can improve the biostability of outflow quality and reduce further the turbidity and particle number of sand filtered water, which is beneficial to ensure microbial safety. However, the management of initial filtration water should be enhanced.

Key words: O_3 /BAC; microbial safety; pathogenic microorganisms; turbidity; particle number; AOC

臭氧/生物活性炭(O_3 /BAC)工艺在美国、日本等发达国家已经得到广泛的应用^[1]。我国在20世纪70年代开始进行该技术的研究, 并相继建成了一

批采用该工艺的深度处理水厂, 取得了较好的处理效果^[2~5]。

随着臭氧/生物活性炭工艺在国内外研究和应

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2002AA601120)

用的不断发展,微生物安全性问题开始引起人们的关注^[6]。因此,对臭氧/生物活性炭工艺进行系统和科学的评价显得尤为必要。

1 试验装置和方法

1.1 试验装置

试验在南方某水厂的中试装置和生产系统上($60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)进行,两者所采用的工艺相同,均包括预臭氧、混凝、沉淀、砂滤池、主臭氧、生物活性炭滤池等单元。其中,中试装置的深度处理部分如图1所示。

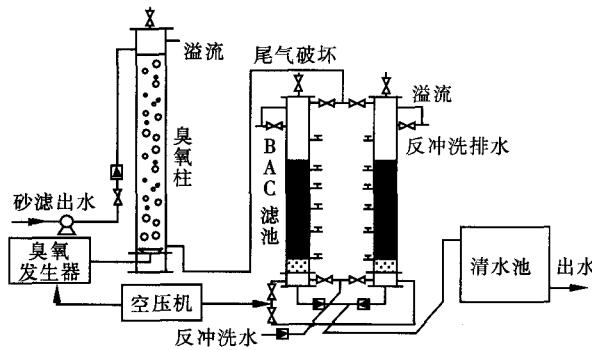


图1 中试 O_3/BAC 装置

Fig. 1 Schematic diagram of pilot-scale O_3/BAC process

原水取自某水库,主要水质特征为低浊、高藻、微污染,相对全国其他地区,其水温较高(年均值>20℃)。砂滤池出水水质如表1所示。

表1 砂滤池出水水质

Tab. 1 Treated water quality of sand filter

项目	浊度/ NTU	色度/ 倍	pH	水温/ ℃	总硬度/ (mg · L ⁻¹)	耗氧量/ (mg · L ⁻¹)	氨氮/ (mg · L ⁻¹)
平均值	0.130	<10	6.8	21.1	37.2	1.34	0.10
最大值	0.242	15	7.4	30.0	52.0	2.19	0.30
最小值	0.058	<5	6.6	9.5	30.0	0.60	<0.02

试验时间为2004年1月—2006年6月,其中中试于2004年1月启动,生产性试验于2004年12月启动。试验涉及的分析项目均采用国家标准方法测定。

1.2 评价指标

通过以下4个指标来评价臭氧/生物活性炭工艺的微生物安全性:①病原微生物,主要包括病毒、“两虫”、携带寄生虫的后生动物等,它是关于微生物安全性的最核心指标;②微生物群落,主要包括细菌等优势种群、原生动物、后生动物等,是第一个指标的扩展,其理论依据是微生物群落与病原微生物

之间存在某种相关关系;③浊度和颗粒数,作为常用的感官性状指标,当出水浊度和颗粒数降低到一定值后,病原微生物的致病风险将会降到较低水平;④AOC,这是表征细菌再生长潜力的一个指标,AOC浓度低则说明细菌重新生长的可能性小,致病风险就低。

表征微生物安全性的这4个指标之间是相互关联的,其中前2个相对比较直观,与微生物安全性最为密切,但是不容易检测;后2个是间接指标,其优点是可以快速检测,容易实现自动化,这对水厂的运行管理尤为重要。

2 结果与讨论

2.1 病原微生物

理论上有两种方法可用来检验活性炭上是否存在病原微生物,一种是进行全面的微生物鉴定,根据结果得出结论;另一种是利用公布的已知病原微生物库,如果找到其中的微生物,则认为不安全,反之则认为是安全的。在此次研究中笔者采用了后一种方法。

从中试生物活性炭滤池中取出活性炭,并委托某疾病控制中心进行检测,检测的范围以WHO公布的病原微生物种类为基础,并考虑该地区常见的病原微生物,结果见表2。

表2 活性炭上微生物的检测结果

Tab. 2 Monitoring result of microorganisms on GAC

项目	结果	项目	结果
金黄色葡萄球菌	未检出	溶血性链球菌	未检出
沙门氏菌	未检出	蜡样芽孢杆菌	检出
志贺氏菌	未检出	霍乱弧菌	未检出
副溶血弧菌	未检出	军团菌	未检出
变形杆菌	未检出	轮状病毒	阴性
致泻性大肠杆菌	未检出	Norwalk 病毒	阴性

从表2可以看出,在活性炭样品上未检测出病毒和病原菌,但检测到了蜡样芽孢杆菌。蜡样芽孢杆菌在自然界中分布广泛^[7],在食品中的检出率较高,该菌产生的肠毒素可引起食物中毒,但目前还没有关于蜡样芽孢杆菌通过饮水的途径引起疾病的报道。

隐孢子虫和贾第虫(即“两虫”)是病原微生物的重要代表。在生产性试验中对BAC滤池出水中隐孢子虫和贾第虫的检测结果见表3。

由表3可知,臭氧/生物活性炭工艺能够确保出水中的贾第虫和隐孢子虫处于较低值,在两次试验

中整个系统对贾第虫的去除率分别达到了95%和100%,对隐孢子虫的去除率分别为95%和97%。

表3 臭氧/生物活性炭工艺出水中的隐孢子虫和贾第虫情况

Tab. 3 *Giardia* and *Cryptosporidium* in treated water of O₃/BAC process

项目	原水/(个·L ⁻¹)	活性炭出水/(个·L ⁻¹)	去除率/%
隐孢子虫	1.6	0.08	95
	0.6	0.02	97
贾第虫	4	0	100
	1.3	0.06	95

注: 由于受试验条件的限制而未对砂滤池出水中的“两虫”进行检测。

2.2 微生物群落

臭氧/生物活性炭工艺为微生物的生长提供了良好的“载体”,同时臭氧的氧化作用还使得水中的营养物质更易被其利用,因此在BAC滤池中形成了丰富的微生物群落(见表4)。

表4 活性炭上的微生物

Tab. 4 Microorganisms found during experiment

类别	名称
优势菌群 (中试数据)	产吲哚黄杆菌、短芽孢杆菌、施氏假单胞菌、 α -变形菌、噬氢菌属、甲基杆菌属、食酸丛毛单胞菌、霉味假单胞菌、类黄噬氢胞菌
大型微生物 (生产数据)	无节幼虫、水蚤、剑水蚤、线虫、轮虫、其他未知微生物(十几种)

由表4可以看出,生物活性炭上形成了丰富的微生物群落,但都是水中常见的微生物,并没有致病性。微生物群落可以表征活性炭上生物膜的成熟程度,在群落形成的过程中其可能发生不断变化,首先形成的是零星菌落,接着菌胶团开始形成,并伴随有原生动物和后生动物出现,最后形成由大量菌胶团、原生动物和后生动物组成的微生物群落。在此过程中,可在BAC滤池出水中检测到多种微生物,关于这个问题目前还在研究中。

2.3 出水中微生物的数量

生产性运行结果表明,臭氧/生物活性炭工艺出水中的总大肠菌群<3个/L,但细菌数要高于砂滤池出水的,一般低于50个/mL,而在某些特殊情况下(如进水水质突变、运行周期过长、反冲洗效果不好、微生物群落变化等)则会大量增加,可达100~400个/mL。

由于给水中的营养物质比较匮乏,能在这种环境下生存的多数为寡营养细菌,因此采用R2A培养基测定了异养菌数(HPC)。结果表明,砂滤池出水中的HPC为10²数量级,经过臭氧化后降低到10CFU/mL甚至检测不出,生物活性炭滤池出水中的HPC显著升高,达到10³数量级,明显高于砂滤池出水的,但在正常的加氯消毒过程中可以被有效灭活,并且不会增加氯耗。

臭氧/生物活性炭工艺出水中的微生物多与细小的活性炭颗粒一起流出,由于受到活性炭颗粒的保护,其对消毒剂具有较大的抗性。经测定,出水中的炭粒浓度可达10²个/L。

运行一段时间的生物活性炭滤池,由于池内微生物群落的变化,在出水中可以观察到一些大型的微生物(见表5),因个别大型微生物是某些寄生虫的宿主,具有潜在的微生物安全问题,应引起足够重视。但是由于后续消毒的灭活作用,很少有活体进入管网。

表5 O₃/BAC工艺出水中的大型微生物数量

Tab. 5 Large microorganisms in treated water of O₃/BAC process

名称	活体数量 个·100 L ⁻¹
无节幼虫	16.4
猛水蚤	8.2
剑水蚤	1.7
线虫	2.1
腔轮虫	1 079
蛭态目轮虫	123
其他轮虫	18
其他大型微生物	未计数

2.4 浊度和颗粒数

浊度是评价水质微生物安全性的重要指标,为了控制病原微生物风险,特别是隐孢子虫和贾第虫风险,国外要求滤后水浊度<0.1 NTU。中试结果表明,臭氧/生物活性炭工艺对浊度具有一定的去除作用(见图2),在过滤周期内BAC滤池出水浊度总体上保持在0.1 NTU以下。不过需要注意的是,过滤初期(0.5~1 h)、过滤后期和过滤过程中均存在出水浊度超标的可能。其中,过滤过程中的浊度超标是由于进水水质发生突变造成的,可以通过优化运行和加强管理来解决;过滤后期的超标可以通过及时进行反冲洗来解决;解决过滤初期的超标问题还需要进一步研究。

美国 E. E. Hargesheimer 等^[8]的研究结果表明,当出水中粒径 > 2 μm 的颗粒数 > 50 个/mL 时,有可能存在贾第虫和隐孢子虫。常规工艺能够去除大部分的颗粒物,砂滤池出水中的颗粒数为 50 ~ 100 个/mL,再经过臭氧/生物活性炭工艺处理后颗粒数一般低于 50 个/mL(见图 3),水质的微生物安全性得以提高。

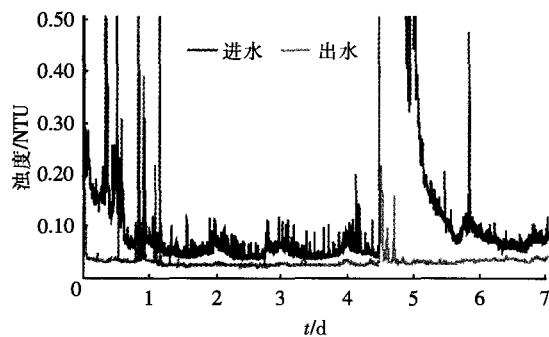


图 2 臭氧/生物活性炭工艺的进、出水浊度
Fig. 2 Turbidity of inflow and outflow water of O_3 /BAC process

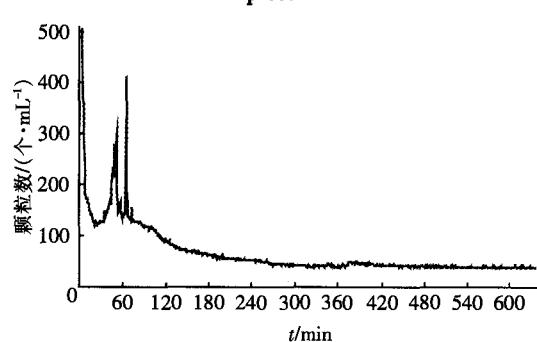


图 3 臭氧/生物活性炭工艺出水中的颗粒数随运行时间的变化
Fig. 3 Variation of particles in treated water of O_3 /BAC process with operation time

测定结果显示,初滤水中的颗粒数高达 6 000 个/mL,至过滤成熟期(3 ~ 5 h)后颗粒数可以降到 50 个/mL,甚至更低。因此,要加强对初滤水的管理。

2.5 AOC

采用经清华大学改进的先后接种法测定 AOC^[9],结果见表 6。

从表 6 可以看出,臭氧/生物活性炭工艺出水中的 AOC 基本上稳定在 100 μg/L 以下,而且低于 50 μg/L 的数据所占比例将近 40%;经臭氧氧化后

AOC 浓度会升高,再经活性炭过滤后又出现了降低。根据有关研究成果,当存在消毒剂时,AOC 浓度在 50 ~ 100 μg/L 之间可以抑制大肠杆菌的再生长^[10]。因此,臭氧/生物活性炭工艺可以提高出水水质的生物稳定性,有利于保障微生物安全性。

表 6 臭氧/生物活性炭工艺对 AOC 的去除效果

Tab. 6 AOC removal in O_3 /BAC process

	项目	砂滤出水	臭氧出水	$\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
中试	2004-09-21	84	115	40
	2004-09-28	28	70	46
	2004-10-13	57	135	49
	2004-10-20	46	39	34
	2004-11-10	45	144	67
	2005-03-10	88	136	98
	2005-03-16	84	119	84
	2005-03-23	94	183	104
	2005-03-28	97	84	79
	平均值	69	113	67
生产性试验	2005-03-01	118	88	62
	2005-03-09	107		80
	2005-05-25	58	172	87
	2005-06-01	115	115	64
	2005-06-07	60	109	80
	2005-06-15	43	28	21
	2005-09-06	47	80	39
	2005-09-13	20	67	30
	2005-09-20	34	54	57
	平均值	68	102	63

3 结论

① 在臭氧/生物活性炭工艺的运行工程中,活性炭上形成了丰富的微生物群落,但在活性炭上和出水中均未检测到病原微生物。因此,臭氧/生物活性炭工艺不存在由病原微生物引起的微生物安全问题,但是对此应给予足够重视。

② 臭氧/生物活性炭工艺可以提高出水水质的生物稳定性,能够进一步降低砂滤池出水的浊度和颗粒数,有利于保障微生物安全性,但应加强对初滤水的管理。

参考文献:

- [1] Dussert B W. The biological activated carbon process for water purification [J]. Water Eng Manage, 1994, 141

(下转第 39 页)

- [4] Hiroshi Yokoyama, Miyoko Waki, Naoko Moriya, et al. Effect of fermentation temperature on hydrogen production from cow waste slurry by using anaerobic microflora within the slurry [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2007, 74(2):474–483.
- [5] Lin Chiu-Yue, Hung Chun-Hsiung, Chen Chau-Huei, et al. Effects of initial cultivation pH on fermentative hydrogen production from xylose using natural mixed cultures [J]. *Process Biochem*, 2006, 41(6):1383–1390.
- [6] Fan Yaoting, Li Chenlin, Lay Jiunn Jyi, et al. Optimization of initial substrate and pH levels for germination of sporing hydrogen-producing anaerobes in cow dung compost [J]. *Bioresour Technol*, 2004, 91(2):189–193.
- [7] Li Chenlin, Herbert H P Fang. Inhibition of heavy metals on fermentative hydrogen production by granular sludge [J]. *Chemosphere*, 2007, 67(4):668–673.
- [8] 林明,任南琪,王爱杰,等. 几种金属离子对高效产氢细菌产氢能力的促进作用[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(2):147–151.
- [9] Zhu Heguang, Michel Béland. Evaluation of alternative methods of preparing hydrogen producing seeds from digested wastewater sludge [J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2006, 31(4):1980–1988.
- [10] Li Chenlin, Herbert H P Fang. Fermentative hydrogen production from wastewater and solid wastes by mixed cultures [J]. *Crit Rev Env Sci Technol*, 2007, 37(1):1–39.
- [11] 宁正祥. 食品成分分析手册 [M]. 北京:中国轻工业出版社,1998.
- [12] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [M]. New York:American Public Health Association, 1995.
- [13] Michel Frey. Hydrogenases;hydrogen-activating enzymes [J]. *Chem Biochem*, 2002, 3(2–3):153–160.
- [14] 丁杰,任南琪,刘敏,等. Fe 和 Fe²⁺ 对混合细菌产氢发酵的影响[J]. 环境科学,2004,25(4):48–53.
- [15] Zhang Yongfang, Liu Guangzhen, Shen Jianquan. Hydrogen production in batch culture of mixed bacteria with sucrose under different iron concentrations [J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2005, 31(10):855–860.

作者简介:万伟(1984—),男,河南新蔡人,硕士研究生,研究方向为水污染控制技术。

电话:(010)62778871 13120478356

E-mail:wangjl@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2007-11-20

(上接第34页)

(12):22–24.

- [2] 翁晓姚,周仰原. 臭氧—活性炭组合工艺在微污染原水深度处理中的应用[J]. 公用科技,1996,12(1):23–26.
- [3] 朱建文,许阳,汪大翠. 臭氧活性炭工艺在杭州南星桥水厂的应用[J]. 中国给水排水,2005,21(6):84–87.
- [4] 乔铁军,安娜,尤作亮,等. 梅林水厂臭氧生物活性炭工艺运行效果[J]. 中国给水排水,2006,22(13):10–13.
- [5] 李伟光. 臭氧生物活性炭技术在低温低浊水处理中的应用[J]. 水处理技术,2006,32(11):1–4.
- [6] 乔铁军,刘晓飞,范洁,等. 生物活性炭技术的安全性评价[J]. 中国给水排水,2004,20(2):31–33.
- [7] Notermans S, Batt C A. A risk assessment approach for food-borne *Bacillus cereus* and its toxins[J]. *J Appl Mi-*

crobio Symp Suppl, 1998, 84:51–61.

- [8] Hargesheimer E E. Tracking filter performance with particle counting [J]. *J AWWA*, 1998, 90(12):32–41.
- [9] 王占生,张丽萍,王亚娟,等. 饮用水中可同化有机碳(AOC)的测定方法研究[J]. 给水排水,2000,26(11):1–5.
- [10] LeChevallier M W, Babcock T M, Lee R G. Examination and characterization of distribution system biofilms [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1987, 53(12):2714–2724.

作者简介:乔铁军(1976—),男,山东宁津人,硕士,高级工程师,研究方向为水处理理论与技术。

电话:(0755)82127052

E-mail:qiaotiejun@waterchina.com

收稿日期:2007-10-11