

# GAC-石英砂滤池处理高氨氮原水的生产研究

陈艺韵, 陆少鸣

(华南理工大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:**以广州市珠江流溪河下游为水源,采用 GAC-石英砂滤池处理沉淀池出水,研究了该工艺对枯水期高氨氮原水的去除规律及其影响因素。结果表明:GAC-石英砂滤池滤与普通砂滤池相比氨氮的去除显著提高,滤后水氨氮平均值为 2.08mg/L,去除量约为 1.0 mg/L,去除率为 33.8%。研究显示氨氮处理效果受余氯的灭菌作用、溶解氧不足、原水水质下降、pH 值不足、活性炭滤料吸附性能下降、空床接触时间短、反冲洗周期与强度的影响。建议降低前投氯而加强后投氯量,同时使用无氯水进行反冲洗;保持滤后水溶解氧在 2~4mg/L 且 pH 值>7.5;延长反冲洗周期至 36h;适当降低运行负荷可提高 GAC-石英砂滤池对氨氮的去除效果。

**关键词:**GAC-石英砂滤池; 氨氮; 活性炭; 反冲洗; 工艺改进

**中图分类号:**X131.2 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1003-6504.2010.06.011 **文章编号:**1003-6504(2010)06-0045-04

## GAC/Quartz-sand Duel Media Filter for Treating Raw Water with High NH<sub>3</sub>-N Concentration

CHEN Yi-yun, LU Shao-ming

(School of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** This paper describes an *in situ* experimental water treatment for high ammonia raw water source situated on the Pearl River, Guangzhou City, using a duel media filter of granular activated carbon (GAC) plus quartz-sand. The comparative study shows the duel media filter is better than conventional sand filter in ammonia nitrogen removal. Factors negatively affecting the removal are pointed out, such as lack of DO, high residual chlorine, decreased pH and worsened raw water quality, and suggestion for improvement is made as well.

**Key words:** GAC/quartz-sand filter; ammonia nitrogen; activated carbon; backwash; process improvement

广州珠江流溪河下游毗邻工业区属于高污染源,在枯水期的综合水质情况基本处于《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)IV~V类,甚至劣于V类水质,氨氮和高锰酸盐指数等溶解性有机物明显增加,出水难以确保供水水质达到新水质国标《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006)的要求。而目前的常规处理工艺无法有效处理有机物污染的原水,强化传统净水处理工艺是目前控制水厂出水有机物含量最经济最具实效的手段。

GAC-石英砂滤池是一种短流程深度处理工艺,改造简单、效果显著、构筑物改造少、基本不占用土地等优点,成为近年旧水厂改造研究的热点<sup>[1-2]</sup>。改造后的 GAC-石英砂滤池成为双层滤料生物滤池,提高了净水效果:(1)利用颗粒炭的吸附作用、石英砂截留作用去除部分污染物,有效的保证了出水浊度;(2)利用颗粒炭上生长的微生物,发挥其生物作用,生化去除部分高锰酸盐指数和氨氮,减少后续加

氯量和有机物氯化物的生成。目前该工艺大多在水源水质较好的条件下进行,本文选取珠江原水遭受污染严重的枯水期,研究 GAC-石英砂滤池对原水的氨氮处理效果并探索影响去除的水质和工艺参数,为滤池的改造提供可行性和有效性的依据和建议。

### 1 GAC-石英砂滤池概况

#### 1.1 工艺流程

直接取自水厂沉淀池出水作为 GAC-石英砂滤池待滤水,工艺流程如图 1 所示。

#### 1.2 主要工艺参数

##### 1.2.1 水质参数

本试验设立在广州西部某水厂,在枯水期原水水质基本处于IV~V类,甚至劣于V类水质,远远达不到国家规定的生活饮用水水源水质要求。枯水期 10 月到 12 月原水及待滤水水质指标见表 1。

收稿日期:2009-05-01;修回 2009-06-15

基金项目:广州市自来水公司“GAC 砂滤池强化处理的研究”科研攻关计划项目(G01D8074330)

作者简介:陈艺韵(1985-),女,硕士研究生,研究方向为给水净化与水污染控制,(手机)13631368016(电子信箱)channelchan@163.com。

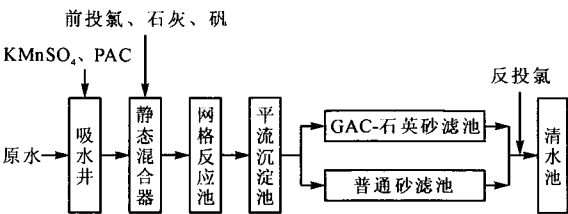


图1 给水处理工艺流程  
Fig.1 Treatment process of drinking water

表 1 枯水期水质参数

Table 1 The water quality parameter of raw water in low water period

| 项目      | 高锰酸盐指数<br>(mg/L) | 氨氮<br>(mg/L) | 浊度<br>(NTU) | 溶解氧<br>(mg/L) | pH   |
|---------|------------------|--------------|-------------|---------------|------|
| 最大值     | 7.74             | 7.57         | 39.4        | 6.9           | 3.20 |
| 原水 最小值  | 1.68             | 0.68         | 6.90        | 6.7           | 0.72 |
| 平均值     | 4.56             | 3.58         | 14.5        | 6.8           | 1.69 |
| 最大值     | 5.46             | 7.87         | 4.13        | 8.4           | 4.53 |
| 待滤水 最小值 | 1.10             | 1.10         | 0.57        | 6.4           | 1.18 |
| 平均值     | 2.52             | 3.49         | 1.35        | 7.6           | 2.66 |

1.2.2 滤池工艺参数

本试验 GAC-石英砂滤池由普通砂滤池增设颗粒活性炭滤层改造而成。石英砂层厚度为 0.7m,采用  $\phi 0.8\sim 1\text{mm}$  均质细砂,砂层上铺设 0.5m 活性炭滤料,粒径为  $(1.5\pm 0.2)\text{mm}$ 。对比的普通砂滤池为均质石英砂滤料,滤层厚度为 0.9m。其余工艺参数一致:滤池平面尺寸为  $12.5\text{m}\times 7.6\text{m}$ ,滤速  $8\sim 0\text{m/h}$ ,运行流量  $687.5\sim 791.7\text{m}^3/\text{h}$ ,采用降流式运行。

1.3 分析项目、测定方法及主要仪器

工艺运行期间,以沉淀池出水作待滤水,每天分别于 GAC-石英砂滤池和普通砂滤池进水端和出水端采集水样进行化验。每日测定项目为气温、浊度、pH 值、余氯、溶解氧、高锰酸盐指数、氨氮。颗粒活性炭的碘吸附值、亚甲基蓝吸附值每月测定一次。各项指标均按国家标准分析方法测定。

2 氨氮去除效果及评述

本工艺从 7 月开始运行,至次年 3 月 31 日停止,本文采用 10 月 26 日至 11 月 26 日的数据及运行工况进行分析。考察期间枯水期的水温为  $14\sim 28^\circ\text{C}$ ,平均为  $22^\circ\text{C}$ 。与普通砂滤池相比,GAC-石英砂滤池对高锰酸盐指数的去除有一定的提高,浊度去除无明显差异。滤后水高锰酸盐指数、浊度的平均值为  $2.34\text{mg/L}$ 、 $0.21\text{NTU}$ ,平均去除率为 15.1%、86.4%。

2.1 氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )的去除作用

氨氮的去除效果见图 2。试验期间待滤水氨氮值在  $1.35\sim 5.61\text{mg/L}$  之间,平均值为  $3.57\text{mg/L}$ 。GAC-石英砂滤池出水氨氮值平均为  $2.08\text{mg/L}$ ,相对待滤水去除量均值为  $1.02\text{mg/L}$ ,平均去除率为 33.8%;普通砂滤池出水氨氮平均为  $3.34\text{mg/L}$ ,相对去除量为

$0.23\text{mg/L}$ ,去除率为 6.63%。可见,当枯水期氨氮浓度高达  $3.5\text{mg/L}$  左右时,GAC-石英砂滤池对氨氮的去除不是一个固定的百分比关系,而是接近一个绝对值,大概能去除  $1.0\text{mg/L}$ 。

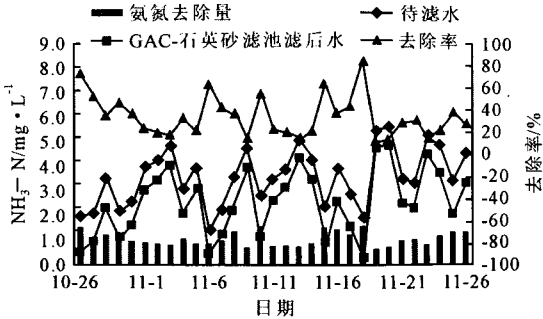
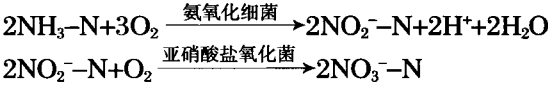


图2 GAC-石英砂滤池对氨氮的去除  
Fig.2  $\text{NH}_3\text{-N}$  removal by GAC-sand filter

普通砂滤池基本上不能去除氨氮,对氨氮的去除主要集中在混凝、沉淀工艺。颗粒活性炭的表面空隙使亚硝化细菌得到增殖成为生物滤池,氨氮的去除主要靠亚硝化细菌的生化作用以及氯对亚硝酸盐的氧化作用。因此 GAC-石英砂滤池工艺在处理氨氮方面优于普通砂滤池。

3 影响  $\text{NH}_3\text{-N}$  去除的条件分析

在硝化阶段,化学自养型硝化细菌在好氧条件下将  $\text{NH}_3\text{-N}$  转化为  $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$ 。亚硝化细菌又称为氨氧化细菌,硝化细菌又称为亚硝酸盐氧化菌。氨氮一般经过 2 个步骤被氧化为硝酸盐氮:



亚硝化细菌和硝化细菌是两类独立的细菌,但在开放体系中,这 2 类细菌普遍存在,互相依存。硝化反应的控制一定程度上取决于环境因素对两种硝化细菌的控制。研究表明,GAC-石英砂滤池的成功运行应具备以下条件:(1)良好的滤料;(2)充分的接触条件;(3)合理的反冲洗系统;(4)适宜的工作条件,如进水溶解氧、pH 值、水温、无机营养盐。

3.1 水质参数的影响

3.1.1 余氯的灭菌作用与 pH 的影响

余氯变化曲线见图 3。试验期间水厂采用前投氯消毒工艺,滤池反冲洗水直接来自含氯的清水池出水。待滤水余氯在  $2.04\sim 3.76\text{mg/L}$  之间,平均值为  $3.0\text{mg/L}$ ;GAC-石英砂滤池出水余氯在  $0.10\sim 0.34\text{mg/L}$  之间,平均为  $0.23\text{mg/L}$ ,相对待滤水下降低率为 92.2%;普通砂滤池出水余氯在  $1.29\sim 3.16\text{mg/L}$  之间,平均为  $2.52\text{mg/L}$ ,降低率为 16.2%。

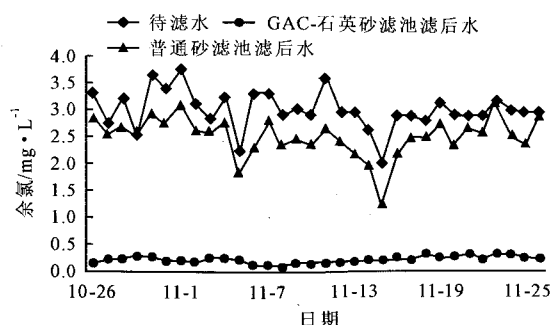


图3 余氯变化曲线  
Fig.3 Change curve of remain chlorine

滤后水余氯的下降,一方面由于活性炭对水中的余氯的吸附,另一方面水中存在的氨氮与氯形成氯胺化合物。在水源水受到污染的情况下,前加氯的氧化消毒效果要优于其他消毒剂。但氯对微生物有氧化致死作用,抑制生物膜上的微生物生长,减少生物量,并增大了对下层石英砂的冲击,导致滤池对BOM(可生物降解有机物)去除率下降,降低了氨氮向亚硝酸盐氮的转化。

此外,试验期间待滤水pH在6.4~8.8之间,平均值为7.6;GAC-石英砂滤池出水pH平均为7.2;普通砂滤池出水pH平均为7.5。微生物的硝化作用和氯参加的氧化还原导致了GAC-石英砂滤池出水pH下降,造成了枯水期氨氮的转化率偏低。研究表明氨氮转化率随待滤水pH值的增大而增大,当pH值从6.5上升到8.5时,氨氮转化率从38.4%提高到90.4%,而且pH值越大,硝化菌对O<sub>2</sub>的竞争能力越强<sup>[3]</sup>。

### 3.1.2 溶解氧不足

溶解氧变化曲线见图4。试验期间待滤水溶解氧在1.20~4.78mg/L之间,平均值为2.70mg/L;GAC-石英砂滤池出水溶解氧平均值为1.95mg/L,比待滤水平均减少了26.7%;普通砂滤池出水溶解氧平均值为3.56mg/L,平均增加了36.53%。

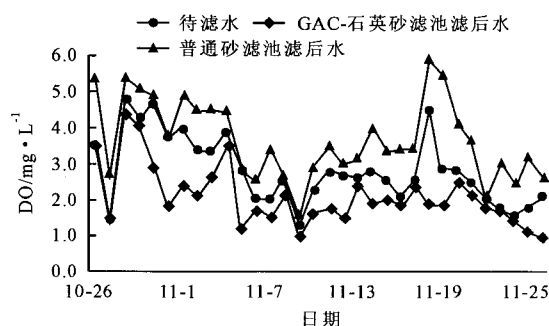


图4 溶解氧变化曲线图  
Fig.4 Change curve of dissolved oxygen

GAC-石英砂滤池进行了好氧微生物生化作用,特别是硝化作用较明显,滤后水溶解氧消耗量较大;普通砂滤池的硝化作用较弱,并且由过滤单元与空气接触过程和跌水作用,滤后水的溶解氧含量增加。去

除氨氮、高锰酸盐指数需要消耗大量的溶解氧,通常在1:4以上,每氧化1mg NH<sub>3</sub>-N为NO<sub>2</sub>-N,需要消耗3.34mg的溶解氧,每氧化1mg NO<sub>2</sub>-N为NO<sub>3</sub>-N需要消耗1.14mg的溶解氧。硝化菌的世代时间长,数量比较少,而枯水期待滤水溶解氧不足,亚硝化过程受阻,造成枯水期间氨氮的去除率平均只有33.8%。

### 3.1.3 原水水质下降

试验运行证明,处于丰水期的待滤水NH<sub>3</sub>-N浓度低于3.0mg/L,氨氮去除率保持在50%以上。枯水期,待滤水水质变差,NH<sub>3</sub>-N均值浓度高达3.50mg/L、高锰酸盐指数均值浓度高达2.52mg/L。NH<sub>3</sub>-N和高锰酸盐指数同时存在时,硝化细菌和异养菌同时争夺水中的溶解氧,由于异养菌对溶解氧的优先利用,包埋了载体表面的硝化菌,使得溶解氧和氨氮的传递受阻,限制了硝化细菌的生长繁殖,导致氨氮去除率下降。

## 3.2 运行工艺条件的影响

### 3.2.1 反冲洗工艺

(1)反冲洗后初滤水的变化。滤池在反冲洗后,发生从孔隙度较大的膨胀状态到孔隙度较小的正常状态的“坐床”过程,此过程中滤池的物理拦截作用降低。试验期间对反冲洗初滤水进行了24小时水质监测,以氨氮去除率表征活性炭的再生周期,见图5。数据显示GAC-石英砂滤池在反冲洗2h后,氨氮去除率超过了平均去除率,表明了此时活性炭性能基本恢复到冲洗以前状态。

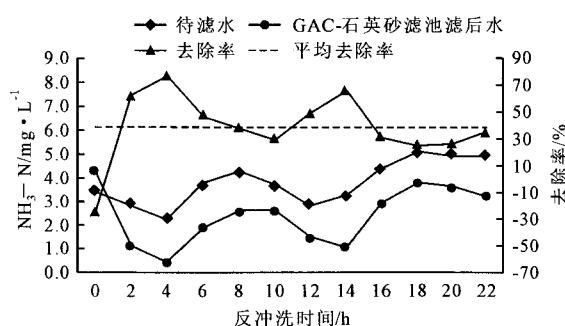


图5 GAC-石英砂滤池反冲洗后初滤水氨氮的去除  
Fig.5 NH<sub>3</sub>-N removal by GAC-sand filter after backwash

(2)反冲洗周期与强度。合理的反冲洗的强度和频率应保证:(1)砂层膨胀,不致活性炭流失;(2)冲去积泥,活性炭生物膜更新,且膜上有一定数量的硝化菌以维持滤池对氨氮的去除作用。试验采用气水反冲洗,气洗强度为15L/(m<sup>2</sup>·s),水洗强度为10~12L/(m<sup>2</sup>·s),反冲洗周期为24h。对GAC-石英砂滤池的炭砂混层情况进行了两次开挖观察,发现炭和砂分层清晰,没有出现混层的情况,滤料表面无积泥现象可以达到较好的冲洗效果。

硝化细菌的繁殖速率在20℃时一般为24~26h增

值一倍,如果滤池的反冲洗周期介于硝化细菌和亚硝化细菌的世代周期之间,则造成滤池系统中的硝化细菌逐渐被洗掉。GAC-石英砂滤池在运行过程中采用类似 BAC 滤池的自然挂膜形式,频繁的气水反冲洗对生物膜造成强烈冲刷,对世代周期长的硝化细菌非常不利,无法建立稳定的生态体系,影响微生物的生长。国内张声<sup>[4]</sup>等通过水头损失计算,表明 GAC-石英砂滤池的运行周期为 36h,建议延长反冲洗周期以提高氨氮去除率。

### 3.2.2 滤料的影响

(1)活性炭性能下降。试验期间对活性炭滤料进行吸附性能分析,亚甲基蓝吸附值、碘吸附值根据《煤质颗粒活性炭试验方法的测定》(GB/T 7702.6-1997)和(GB/T 7702.7-1997)测定,结果表 2 可知,活性炭在使用 5 个月后,表层和 20cm 深活性炭的亚甲基蓝值分别下降了 48mg/g、63mg/g,碘吸附值分别下降了 242mg/g、274mg/g。该水厂生产负荷大,平流沉淀池流速快,在沉淀池末端集水槽中能观察到有大量上浮的矾花微粒。待滤水中的微粒进入 GAC-石英砂滤池后,易吸附在颗粒炭滤料上,对炭滤料的表面微孔产生堵塞、包裹的作用,削弱了炭滤料微孔发达有利吸附和生物生长的优势。同时,下层活性炭两指标比上层下降幅度大,显示在使用一段时间后活性炭粒径因磨损发生变化,多次反冲洗后粒径小者处于炭层上层,粒径大者处于炭层下层,上层碳粒承担吸附余氯的作用,此层微生物受余氯影响灭活较大;水到达下层余氯基本除尽,下层碳粒由于生物吸附作用发挥好微孔堵塞较严重。

表 2 活性炭性能参数  
Table 2 Performance parameter of active carbon

| 指标                | 深度   | 7 月 | 8 月 | 9 月 | 10 月 | 11 月 |
|-------------------|------|-----|-----|-----|------|------|
| 碘吸附值<br>(mg/g)    | 表层   | 166 | 158 | 151 | 135  | 118  |
|                   | 20cm |     | 153 | 146 | 130  | 103  |
| 亚甲基蓝吸<br>附值(mg/g) | 表层   | 953 | 831 | 752 | 713  | 711  |
|                   | 20cm |     | 781 | 726 | 699  | 679  |

(2)空床接触时间(EBCT)短。GAC-石英砂滤池为 50cm,活性炭滤层炭床接触时间较短,仅为 3~4min。亚硝酸菌转化氨氮为亚硝酸盐氮的过程会产生大量的强酸,可使 pH 值下降到 5.6 或者更低,从 GAC-石英砂滤池滤后水 pH 下降为 7.2 可以看出待滤水停留时间较短,以至于氨氮来不及转化<sup>[5]</sup>。

## 4 结论与建议

(1)氯对微生物有氧化致死作用,建议降低前投氯而加强后投氯量,同时使用无氯水进行反冲洗。

(2)待滤水溶解氧降低到 1.95mg/L,亚硝化过程

受阻。建议在沉淀池与滤池之间的水渠中增设微孔曝气头以增加滤池进水溶解氧,滤池出水保持在 2~4mg/L,较好发挥池内生物作用。

(3)枯水期待滤水质  $\text{NH}_3\text{-N}$  均值浓度高达 3.50mg/L、高锰酸盐指数均值浓度高达 2.52mg/L,由于异养菌对溶解氧优先利用,使得溶解氧和氨氮传递受阻,限制了硝化细菌的生长繁殖,导致氨氮去除率下降。

(4)pH 值影响硝化菌对  $\text{O}_2$  的竞争能力,建议增加网格反应器内石灰的投加量保证滤后水 pH 值大于 7.5。

(5)采用气-水反冲洗,气洗强度为  $15\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,水洗强度为  $10\sim 12\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,能获得较好的反冲洗的效果,滤池在反冲洗 2h 后,活性炭性能基本恢复到冲洗以前状态。考虑到微生物世代周期以建立稳定的生态体系,建议延长反冲洗周期为 36h。

(6)活性炭滤料在使用 5 个月后吸附性能有所下降,失效时要进行再生。活性炭滤层炭床接触时间较短,建议降低运行负荷。

### [参考文献]

- [1] 王广智,李伟光,王锐,等. 炭砂滤池在松花江污染应急处理中的应用特性[J]. 给水排水, 2007, 33(8): 11-15.  
Wang Guang-zhi, Li Wei-guan, Wang Rui, et al. Study on emergent application of combined activated carbon and sand filter in Songhua River pollution accident[J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(8): 11-15. (in Chinese)
- [2] 罗国荣,陆少鸣,杨立. GAC 强化砂滤池处理微污染水中试研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(5): 138-140.  
Luo Guo-rong, Lu Shao-ming, Yang Li. GAC enhanced sand filtration for micro-contaminated water[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(5): 138-140. (in Chinese)
- [3] 李志霞,王磊,王韬,等. 自制微电极分析 pH 对硝化反应的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2008, (04): 56-59.  
Li Zhi-xia, Wang Lei, Wang Tao, et al. Effects of pH on nitrification using homemade probes[J]. Environmental Pollution & Control, 2008, (04): 56-59. (in Chinese)
- [4] 张声,刘洋,张晓健,等. 活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池处理高藻水源水的研究[J]. 环境科学, 2004, (05): 52-56.  
Zhang Sheng, Liu Yang, Zhang Xiao-jian, et al. Treating of algae-laden raw water with GAC-sand dual media deep bed dissolved air flotation/filtration[J]. Environmental Science, 2004, (05): 52-56. (in Chinese)
- [5] 王新为,孔庆鑫,金敏,等. pH 值与曝气对硝化细菌硝化作用的影响[J]. 解放军预防医学杂志, 2003, (05): 319-322.  
Wang Xin-wei, Kong Qing-xin, Jin Min, et al. Effect of pH and aeration on nitrification of nitrobacteria[J]. Journal of Preventive Medicine of Chinese People's Liberation Army, 2003, (05): 319-322. (in Chinese)