

# 老旧水厂深度处理改造工程实践

邵志昌, 王长平, 黄孟斌, 王刚, 王梅芳, 陈文杰, 钟炎辉,  
谭家昌, 蒋旗军

(深圳市深水宝安水务集团有限公司, 广东 深圳 518133)

**摘要:** 深圳市上南水厂臭氧-炭砂滤池短流程深度处理工程改造内容主要包括新建臭氧接触池一座,将原空置的库房改造成臭氧发生间,将一、二期砂滤池改造成炭砂滤池,对原反冲洗系统进行改造以同时满足炭砂滤池和砂滤池冲洗要求。改造后臭氧-炭砂滤池对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和  $\text{UV}_{254}$  的去除率分别提高了约 20% 和 15%, 滤后水浊度略有上升。挂膜成熟后,滤后水菌落总数可稳定在 200~400 CFU/mL。此项改造工程占地面积小、改造内容少、投资成本低、水质改善效果明显,可为用地紧张的老旧水厂工艺升级改造提供参考。

**关键词:** 臭氧; 炭砂滤池; 升级改造; 深度处理

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)02-0081-05

## Reconstruction Practice of Advanced Treatment Process in an Aging Waterworks

SHAO Zhi-chang, WANG Chang-ping, HUANG Meng-bin, WANG Gang,  
WANG Mei-fang, CHEN Wen-jie, ZHONG Yan-hui, TAN Jia-chang, JIANG Qi-jun  
(Shenzhen Shenshui Bao'an Water Group Co. Ltd., Shenzhen 518133, China)

**Abstract:** The reconstruction project of ozone-granular activated carbon (GAC) and sand dual media filter in Shenzhen Shangnan Waterworks mainly includes the construction of a new ozone contactor, transformation of a vacant warehouse into ozone generator workshop, transformation of the sand filters in the first & second stage into GAC and sand dual media filters, and transformation of the backwashing system to meet the requirement of both the sand filters as well as GAC and sand dual media filters. After reconstruction, the removal efficiencies of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  and  $\text{UV}_{254}$  have increased by about 20% and 15% for GAC and sand dual media filters respectively. However, the turbidity of filtered water increased slightly. After biofilm formation, the total number of colonies in the filtered water can be stabilized between 200 - 400 CFU/mL. The reconstruction project has improved effluent quality significantly with small footprint, few transformations, and low investment costs, which can provide reference for the upgrading of aging waterworks.

**Key words:** ozone; GAC and sand dual media filter; upgrading; advanced treatment

随着社会发展,居民对饮用水水质要求的不断提高,特别是常规工艺无法解决的消毒副产物和臭味问题促使越来越多的净水厂进行深度处理工艺升级改造。研究表明,臭氧-活性炭工艺对氯消

毒物和臭味物质的控制和去除是有效的<sup>[1,2]</sup>。但一般情况下,臭氧-生物活性炭工艺是在常规工艺基础上新增臭氧投加系统和颗粒活性炭滤池,占地面积大,不利于在土地资源缺乏的城市推广。为此,深

水宝安水务集团通过对上南水厂工艺进行升级改造,探索适用于建设用地缺乏的老旧中小水厂水质提升的深度处理工艺。

## 1 概况

上南水厂位于宝安区西部,初期于1985年建成,1990年后拆除重建,设计规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,目前实际供水量为 $(5.0 \sim 6.0) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,分四期建设,每期为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。工艺流程见图1。

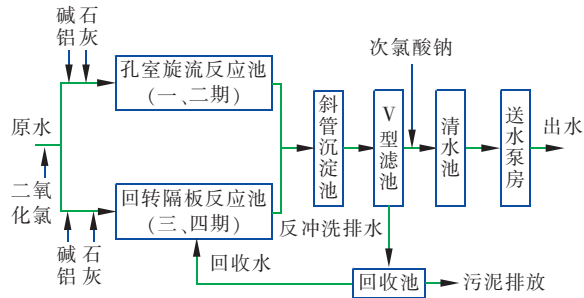


图1 上南水厂净水工艺流程

Fig. 1 Flow chart of Shangnan Waterworks

上南水厂原水为水库调蓄的东江原水。原水水质见表1。受水库周边环境污染,原水出现富营养化现象,其中总磷、总氮常年超过《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类标准,藻类大量繁殖,引起氯消毒副产物生成风险加大<sup>[3]</sup>和以2-甲基苄醇为主的臭味物质污染的增加<sup>[4]</sup>。

表1 原水水质

Tab. 1 Quality of raw water

项 目	平均值	最小值	最大值
浊度/NTU	5.68	2.72	16.50
菌落总数/(CFU · 100 mL <sup>-1</sup> )	1 100	580	7 800
pH 值	7.27	6.81	8.78
色度/度	20.7	15	50
COD <sub>Mn</sub> /(mg · L <sup>-1</sup> )	2.55	1.86	3.84
氨氮/(mg · L <sup>-1</sup> )	0.19	0.07	0.67
亚硝酸盐/(mg · L <sup>-1</sup> )	0.056	0.010	0.141
总氮/(mg · L <sup>-1</sup> )	1.87	1.18	3.20
总磷/(mg · L <sup>-1</sup> )	0.07	0.04	0.13
藻类/(10 <sup>4</sup> 个 · L <sup>-1</sup> )	5 680	1 200	17 000

## 2 深度处理改造方案

上南水厂无储备土地,厂区周边为民居,征地困难。而传统臭氧-活性炭深度处理工艺新增构筑物多,占地面积大,投资高,不适用于用地紧张的中水厂改造。“臭氧-炭砂滤池”短流程深度处理工艺直接在沉淀池后增加臭氧接触池,并将砂滤池改

造成炭砂滤池,充分利用现有构筑物,新增构筑物少。另外,为充分发挥炭砂滤池中活性炭的吸附作用,提高炭滤池运行效率,炭滤池要求进水浊度不高于3.0 NTU<sup>[5]</sup>,而实际改造工程中一般控制进水浊度为1.0 NTU左右<sup>[6]</sup>,因此上南水厂深度处理改造方案中需考虑沉淀池出水浊度控制问题。由于上南水厂原水属高藻低浊类原水,藻类暴发会大量消耗水体中氧气,产生的CO<sub>2</sub>致使原水酸碱缓冲系统失衡且使pH值急剧升高,导致混凝效果变差,同时混凝形成的絮体密度小,不易于沉淀。水厂通过采用高纯ClO<sub>2</sub>替代NaClO预氧化强化混凝沉淀工艺后,解决了藻类暴发期沉淀池出水浊度难以控制的问题,使沉淀后出水常年保持在0.3 NTU以下,几乎达到了普通砂滤池的出水水质,满足炭砂滤池进水要求。因此,上南水厂深度处理改造方案总体思路是在强化混凝沉淀基础上,增加“臭氧-炭砂滤池”短流程深度处理工艺。

## 3 改造内容

上南水厂“臭氧-炭砂滤池”短流程深度处理改造工程充分考虑上南水厂现状地形,结合现有构筑物布局特点,经充分论证,将原空置的库房改造成臭氧发生间;在现有一、二期沉淀池与滤池之间的空地上建造提升井和臭氧接触池;一、二期V型砂滤池改造成炭砂滤池;在原反冲洗系统增加两台反冲泵,通过变频方式同时满足改造后炭砂滤池与现状三、四期砂滤池反冲洗需求。工程改造完成后,上南水厂将拥有 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 规模的深度处理能力。

### 3.1 臭氧发生间

臭氧发生间包括四个单元:臭氧发生系统(含变配电和自控系统)、空气处理系统、内循环冷却水系统和尾气破坏系统。采用两台空气源臭氧发生器,配备两套空气处理系统。按设计规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,臭氧发生器额定产量选择1 kg/h,额定浓度为30 mg/L。水厂负荷达到设计规模时,同时启用2台臭氧发生器,无备用;由于上南水厂实际负荷长期不高于设计规模的60%,实际运行工况下2台臭氧发生器及空气处理系统可实现一用一备。

在臭氧发生器选择方面,经综合评估投资额和国内外臭氧发生器厂家技术水平、服务质量及运行管理便利性,上南水厂采用了国产某品牌空气源臭氧发生器,大幅降低了投资成本和供货周期。臭氧发生器按气源系统不同,可分为氧气源和空气源两

种。就运行成本而言,液氧氧气源发生器最经济,现场制氧方式次之,空气源发生器成本最高。但氧气属于乙类火灾危险气体,无论采用液氧罐储存或者现场制备氧气,均需与周围建筑保持足够距离。根据《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)规定,湿式氧气储罐与民用建筑的安全距离不小于18 m,与其他建筑的间距按建筑物耐火等级考虑分别为10~18 m。由于上南水厂周边被民房包围,无可用地能满足液氧罐安全使用要求。在运行管理方面,氧气源发生器附属设备较多,液氧罐需维持压力稳定,运行维护麻烦。经多因素综合考虑,选择空气源臭氧发生器更适合上南水厂。

### 3.2 臭氧接触池及提升井

新建臭氧接触池及提升井嵌入沉淀池和炭砂滤池之间,需同时考虑平面布局与高程设置。新建臭氧接触池接触时间要求6~15 min,由平面尺寸和池体导流墙高度决定,而水厂改造中优先考虑在有限空间平面布局的可行性,然后再尽可能利用现有富余水头确定池体高程。由于上南水厂建设于20世纪80年代中期,为村级中小水厂,设计资料缺乏,高程设计需根据实际勘察结果确定。在沿程水力设计时,从现有砂滤池运行水位高程反向推算,以保证新建构筑物与原工艺衔接平顺。经勘察,上南水厂沉淀池出水堰口比滤池最高运行水位高0.7 m,可满足现状正常运行工况下经接触池自流入滤池的水头,故设计过程应考虑充分利用这部分富余水头以达到节能目的,同时为避免满负荷运行时水头损失过大而影响臭氧接触池运行,本工程设置了提升泵,通过变频方式平衡提升井进、出水流量。臭氧投加量为1.0 mg/L,按1:1投加比例导入两个接触单元格内,通过微孔扩散器进行投加。

臭氧接触池处理规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,平面尺寸为 $6.6 \text{ m} \times 7.45 \text{ m}$ ,设计水深为5.8 m,接触时间为6.3 min,臭氧投加量为1.0 mg/L,余臭氧浓度为0.2 mg/L;提升井规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (平均分两组),平面尺寸为 $2.9 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ ,单组设2台回流泵, $Q=188 \text{ L/s}$ , $H=10 \text{ kPa}$ , $P=4.0 \text{ kW}$ 。

### 3.3 砂滤池改造

上南水厂原有砂滤池为气水反冲洗V型滤池,砾石承托层厚为0.2 m,粒径为4~8 mm;石英砂滤料层厚为1.2 m,粒径为0.8~1.2 mm,单格过滤面积均为 $35 \text{ m}^2$ ,原反冲洗系统设罗茨鼓风机2台,风

量为 $28.4 \text{ m}^3/\text{min}$ ,风压为49 kPa,气冲强度为 $13.7 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,设反冲洗水泵1台,流量为 $558 \text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程为210 kPa,水冲强度为 $4.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

现将一期和二期砂滤池改造为炭砂滤池。根据中试结果及查阅相关文献,炭砂滤池采用粒径为 $8 \times 30$ 目的柱状颗粒活性炭反冲洗时有良好的水力分级效果<sup>[7]</sup>;砂层主要起防止生物穿透的功能,且厚度为0.3 m、级配为0.8~1.2 mm的砂垫层即可达到预期效果<sup>[8]</sup>。故改造后的炭砂滤池保留砾石承托层和底层0.3 m石英砂滤料,表层滤料更换为1.0 m厚、粒径 $8 \times 30$ 目的柱状颗粒活性炭。同时,由于V型滤池改造而成的炭砂滤池反冲洗过程滤料易流失,本次改造在V型滤池排水堰处安装了30 cm高的筛网。

上南水厂将一、二期砂滤池改造成炭砂滤池后,仍与三、四期砂滤池共用一套反冲洗系统。由于炭砂滤池反冲洗需要较大膨胀率以保持炭砂分层,反冲洗水冲强度为砂滤池的2~3倍,为同时满足新旧工艺对反冲洗强度的需求,本次改造新增两台变频反冲洗水泵,反冲泵参数: $Q=690 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=130 \text{ kPa}$ , $N=37 \text{ kW}$ 。反冲洗出水总管设置流量计,根据滤池反冲洗需要,通过变频和不同反冲泵的匹配,使水冲强度控制在 $4 \sim 15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。由于水冲洗流量大幅增加,经水力核算,需将原反冲洗水管管径由DN300扩至DN500。

## 4 运行效果

上南水厂“臭氧-炭砂滤池”短流程深度处理改造工程于2017年6月30日投入运行。臭氧投加量为1.0~1.5 mg/L,接触后余臭氧为0.02~0.10 mg/L;炭砂滤池滤速为5~7 m/h,反冲洗周期为48~72 h,气冲强度为 $14 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,气冲洗时间为1 min,水冲洗强度为 $10 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,水冲洗时间为10 min。改造前、后滤后水浊度变化见图2。2017年6月23日前为改造前砂滤池运行情况,2017年6月30日后为改造后臭氧-炭砂滤池运行情况。改造前砂滤池进水浊度为0.13~0.47 NTU,平均值为0.25 NTU;出水浊度为0.07~0.17 NTU,平均值为0.13 NTU,浊度去除率平均值为45.2%。改造后炭砂滤池进水浊度为0.19~0.38 NTU,平均值为0.29 NTU;出水浊度为0.14~0.22 NTU,平均值为0.17 NTU,浊度去除率平均值为40.6%。表明砂滤池改造为炭砂滤池后,浊度去除能力略有下降,但仍可维

持浊度在较低水平。

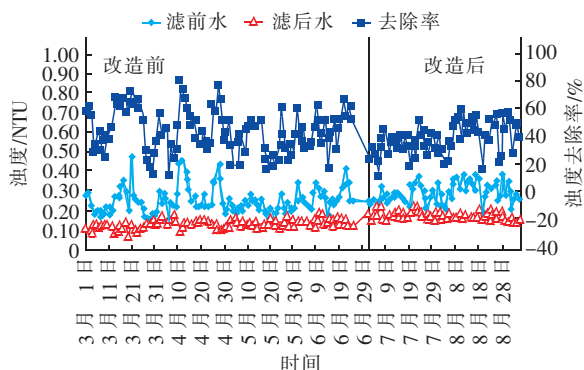


图2 改造前、后滤后水浊度

Fig. 2 Turbidity before and after the transformation in the filtered water

改造前、后滤后水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的变化见图3。

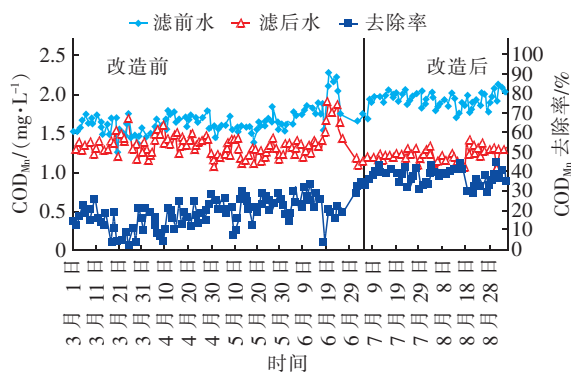


图3 改造前、后滤后水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的变化

Fig. 3  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  before and after the transformation in the filtered water

改造前砂滤池进水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  为 1.25 ~ 2.27 mg/L, 平均值为 1.64 mg/L; 出水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  为 1.07 ~ 1.89 mg/L, 平均值为 1.37 mg/L, 去除率平均值为 18.3%。改造后炭砂滤池进水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  为 1.63 ~ 2.10

mg/L, 平均值为 1.91 mg/L; 出水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  为 0.95 ~ 1.37 mg/L, 平均值为 1.20 mg/L, 去除率平均值为 37.3%。砂滤池改造为炭砂滤池后, 初期主要通过活性炭吸附去除有机物。随着活性炭表面生物膜的生长, 形成了活性炭吸附-生物降解再生体系, 以保持对有机物的持续去除能力。改造后“臭氧-炭砂滤池”短流程深度处理工艺对有机物的去除效果明显改善。

改造前、后滤后水  $\text{UV}_{254}$  的变化见图4。

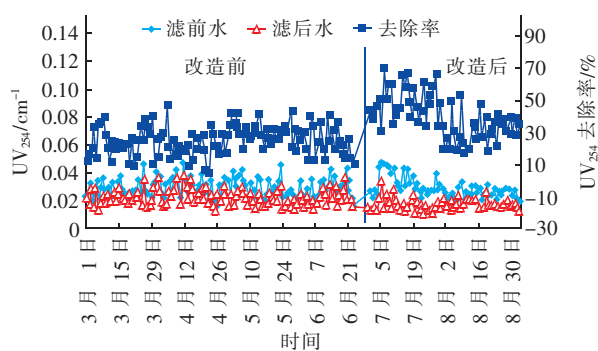


图4 改造前、后滤后水  $\text{UV}_{254}$  的变化

Fig. 4  $\text{UV}_{254}$  before and after the transformation in the filtered water

改造前砂滤池进水  $\text{UV}_{254}$  为 0.018 ~ 0.048  $\text{cm}^{-1}$ , 平均值为 0.030  $\text{cm}^{-1}$ ; 出水  $\text{UV}_{254}$  为 0.013 ~ 0.038  $\text{cm}^{-1}$ , 平均值为 0.022  $\text{cm}^{-1}$ , 去除率平均值为 25%。改造后炭砂滤池进水  $\text{UV}_{254}$  为 0.020 ~ 0.047  $\text{cm}^{-1}$ , 平均值为 0.030  $\text{cm}^{-1}$ ; 出水  $\text{UV}_{254}$  为 0.011 ~ 0.033  $\text{cm}^{-1}$ , 平均值为 0.017  $\text{cm}^{-1}$ , 去除率平均值为 39.6%。这表明通过臭氧氧化-活性炭吸附可明显提高对  $\text{UV}_{254}$  表征的大分子有机物的去除效果。

改造前、后滤后水菌落总数的变化见图5。

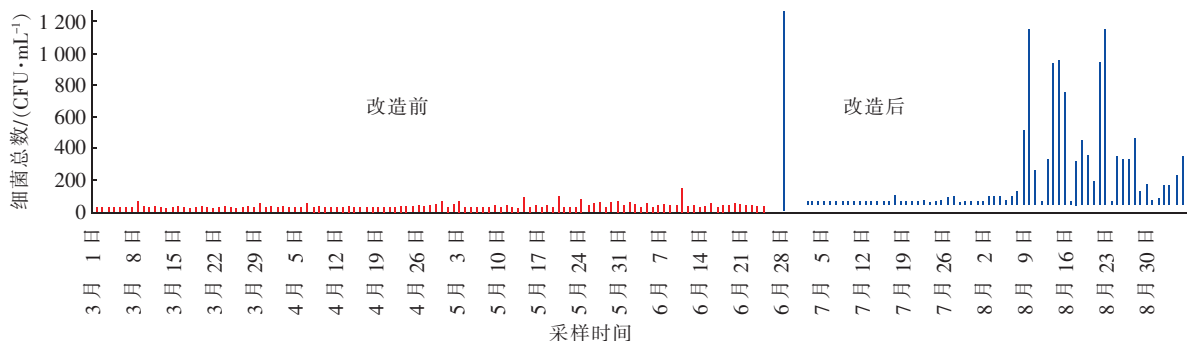


图5 改造前、后滤后水菌落总数的变化

Fig. 5 Aerobic plate count before and after the transformation in the filtered water

改造前, 水厂滤前投加次氯酸钠, 砂滤池出水菌落总数一般保持在 100 CFU/mL 以下的较低水平。



改造后炭砂滤池经挂膜稳定后,出水菌落总数较高,偶有超过1 000 CFU/mL。缩短反冲洗周期至48 h时,滤后水菌落总数稳定在200~400 CFU/mL之间。由于炭砂滤池挂膜成熟后,主要通过微生物降解有机物再生活性炭,老化生物膜脱落造成滤后水菌落总数增加是必然的,建议有条件的水厂可在滤后增加紫外线消毒系统,以加强生物安全保障。

## 5 改造工程经济分析

上南水厂“臭氧-炭砂滤池”短流程深度处理工艺改造中臭氧设备购置及臭氧间改造、臭氧接触池(含提升井)建造、炭砂滤池改造、反冲洗泵房(含配套管道改造)改造的总造价为605.6万元,单位工程投资成本为121.1元/(m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>),约为一般臭氧-活性炭深度处理工艺投资成本的1/5~1/4<sup>[9,10]</sup>,表明短流程臭氧-炭砂滤池深度处理工艺可利用很低的成本,实现水质的提升,提高供水水质安全保障能力。

## 6 结语

上南水厂“臭氧-炭砂滤池”短流程深度处理工艺是在原有强化混凝沉淀工艺基础上进行改造,新增一座臭氧接触池,将原库房改造成臭氧投加间,砂滤池及反冲洗系统改造成炭砂滤池及相配套的反冲洗系统。整个改造工程占地面积小,改造内容少,投资成本低,可为类似用地紧张的老旧水厂工艺提升改造提供参考。

改造后的上南水厂“臭氧-炭砂滤池”滤后水浊度略有上升,COD<sub>Mn</sub>去除率提高了约20%,UV<sub>254</sub>去除率提高了约15%。挂膜成熟后,滤后水菌落总数可稳定在200~400 CFU/mL。

## 参考文献:

- [1] 张金松,张红亮,董文艺,等. O<sub>3</sub>-BAC对氯化消毒副产物的控制作用[J]. 中国给水排水,2004,20(2):16-20.
- [2] 刘文君,杨宏伟,张丽萍,等. 高臭味、高溴离子引黄水库水臭氧-生物活性炭处理技术与示范[J].

给水排水,2012,38(12):9-14.

- [3] 陈超,张晓健,朱玲侠,等. 高藻期控制消毒副产物及其前体物的优化工艺组合[J]. 环境科学,2007,28(12):2722-2726.
- [4] 仲鑫,崔崇威. 藻源臭味物质 Geosmin 与 2-MIB 的生成途径及控制研究[J]. 给水排水,2015,41(S1):9-13.
- [5] 上海市市政工程设计研究院. 给水排水设计手册(第3册):城镇给水(第2版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [6] 洪觉民. 现代化净水厂技术手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [7] 冯硕. 炭砂滤池的构建技术、处理效果和工艺特性研究[D]. 北京:清华大学,2012.
- [8] 张金松,乔铁军. 臭氧-生物活性炭技术水质安全性及控制措施[J]. 给水排水,2009,35(3):9-13.
- [9] 周云,罗启达. 臭氧活性炭处理工艺在周家渡水厂的应用[J]. 给水排水,2003,29(9):5-9.
- [10] 王海亮,周云. 上海市某水厂臭氧-生物活性炭技术的应用分析[J]. 中国给水排水,2010,26(22):11-13.



**作者简介:**邵志昌(1986-),男,广东茂名,硕士,工程师,主要从事饮用水工艺管理和技术研究工作。

**E-mail:** shaozhichang@qq.com

**收稿日期:**2017-09-27