

王莹莹, 王刚. 臭氧-活性炭工艺在东营某水厂升级改造中的应用[J]. 净水技术, 2024, 43(6):179-185.

WANG Y Y, WANG G. Application of ozone-activated carbon process in upgrading and reconstruction of a WTP in Dongying[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6):179-185.

臭氧-活性炭工艺在东营某水厂升级改造中的应用

王莹莹*, 王刚

(北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100032)

摘要 东营市垦利区某水厂为提高供水水质,需对现状水厂进行升级改造。水厂总规模为6万 m^3/d ,拟建地块的吨水用地指标偏低,出水水质在执行国家现行的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)基础上,要求浑浊度小于0.3 NTU。文章总结了该水厂处理工艺升级改造方案的比选、制定,详细介绍了臭氧-活性炭工艺在该项目中的设计及应用。该水厂臭氧-活性炭深度处理工艺的运行改善了水的色度、臭和味等感官指标,提高氨氮、亚硝酸盐、有机卤化物等耗氧指标的保障率,特别是当夏季水质恶化、水源含泥沙量较大时,可保障出水水质稳定,保证城市供水安全。

关键词 水厂 臭氧-活性炭工艺 升级改造 深度处理 浑浊度

中图分类号: TU991 文献标识码: B 文章编号: 1009-0177(2024)06-0179-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.06.021

Application of Ozone-Activated Carbon Process in Upgrading and Reconstruction of a WTP in Dongying

WANG Yingying*, WANG Gang

(Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing 100032, China)

Abstract In order to improve water quality, a water treatment plant (WTP) in Kenli District, Dongying City needs to upgrade the current WTP. The total scale of the WTP is 60 000 m^3/d . The metric ton water land index of the proposed plot is low, and the effluent water quality is less than 0.5 NTU based on the requirement of *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749—2022). This paper summarizes the comparison and formulation of the upgrading and reconstruction of the treatment process of the WTP, and introduces the design and application of ozone-activated carbon process in this project in detail. The operation of ozone-activated carbon advanced treatment technology in this WTP can improve the sensory indices such as chrominance, smell and taste of water, and improve the guarantee rate of aerobic indices such as ammonia nitrogen, nitrite and organic halide. Especially when the water quality deteriorates in summer and the water source contains large amount of mud, it can guarantee the stability of effluent water quality and ensure the safety of urban water supply.

Keywords waste treatment plant(WTP) ozone-activated carbon upgrading and reconstruction advanced treatment turbidity

东营市垦利区位于山东省东北部黄河三角洲地区的黄河入海口,目前垦利区共有水厂4座,设计供水能力分别为4万、2万、6万、3万 m^3/d 。垦利主城区用水大户分别为垦利石化总厂、慧能热电厂及绿化用水。随着工业的迅猛发展,工业用水已逐渐成为垦利区的用水大户。现垦利区4座水厂对工业和居民生活用水没有明显的区分,一方面不利于垦利

区生活供水安全的保障,另一方面工业用水所需水质相对较低,而水量较大,同质供水是对水资源的浪费,同时也不利于管理。东营市垦利区自来水公司水质提升及改造工程的实施,对于完善垦利区基础设施建设、改善人居环境、改善投资环境、增加招商引资以及促进国民经济的可持续发展都具有一定的重要意义。

1 工程概况

东营市垦利区某水厂设计供水能力为6万 m^3/d ,水厂自用水量系数按5%计,厂区占地面积约为

[收稿日期] 2024-01-03

[通信作者] 王莹莹(1989—),女,硕士,主要从事市政给排水设计与研究工作,E-mail:1027087012@qq.com。

60 亩(1 亩 \approx 666.67 m^2), 现状处理工艺流程为原水 \rightarrow 网格反应池 \rightarrow 平流沉淀池 \rightarrow 普通快滤池 \rightarrow 清水池 \rightarrow 二级泵房 \rightarrow 出水。水源为东营市胜利水库, 取水水源为地表水。现状水厂进水水质基本属于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) II 类水体, 经过适当的深度处理后, 可以作为饮用水水源。现状出水水质能达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022) 的要求, 但出水口感较差, 尤其是夏季水质恶化、水源含泥沙量较大时。现水厂需要对原工艺进行升级改造, 改善成品水的口感和嗅味, 要求

出水水质在执行国家现行的 GB 5749—2022 基础上, 浑浊度小于 0.3 NTU。当原水水质恶化或水源出现突发污染事故时, 水厂处理工艺可保障出水水质稳定, 保证城市供水安全。

增加深度处理工艺, 能进一步改善水的色度、臭和味等感官指标, 提高氨氮、亚硝酸盐、有机物、有机卤化物(AOX) 等耗氧指标的保障率, 特别是当原水水质恶化或水源出现突发污染事故时, 可保障出水水质稳定, 保证城市供水安全^[1]。水厂改造前平面图如图 1 所示, 改造前原水及出厂水水质如表 1 所示。

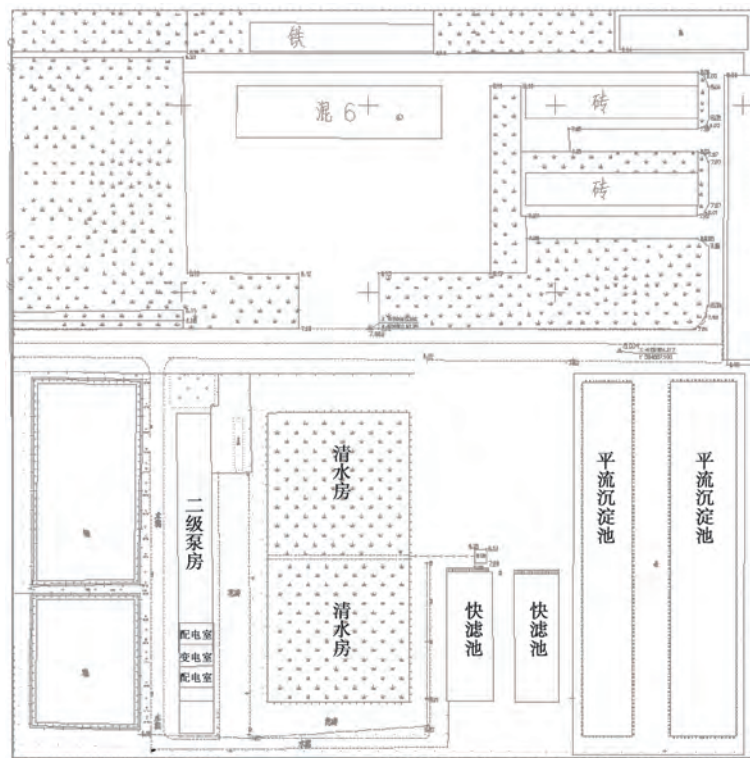


图 1 水厂改造前平面图

Fig. 1 Layout of WTP before Reconstruction

表 1 改造前原水及出厂水水质

Tab. 1 Raw Water and Finished Water Quality before Reconstruction

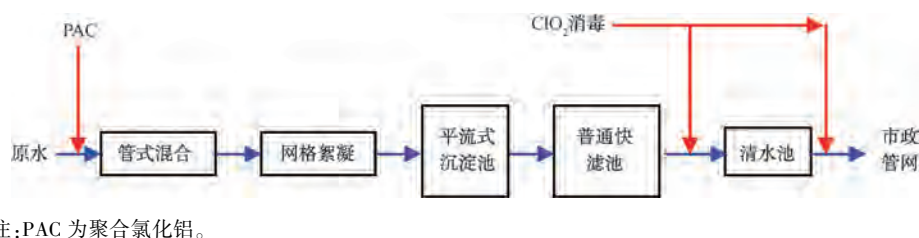
项目	色度/度	浑浊度/ NTU	臭和味	pH 值	COD _{Mn} / ($mg \cdot L^{-1}$)	氨氮/ ($mg \cdot L^{-1}$)	AOX/ ($\mu g \cdot L^{-1}$)	铁/ ($mg \cdot L^{-1}$)	锰/ ($mg \cdot L^{-1}$)	菌落总数/ (CFU $\cdot mL^{-1}$)
原水平均值	23.7	33.9	微弱	/	<8.0	0.37	18.6	<0.1	<0.05	/
出水平均值	5.7	0.5	无	7.86	2.8	0.11	64.8	<0.07	<0.07	8.5
GB 5749—2022 限值	15	1	无	6.5~8.5	3	0.5	/	0.3	0.1	100

2 水厂现状分析及问题总结

2.1 水厂现状处理工艺

水厂现状规模为 6 万 m^3/d , 净水处理工艺采用管式混合常规处理工艺; 絮凝采用网格絮凝工艺; 沉

淀池采用平流式沉淀池; 滤池采用普通快滤池; 消毒采用 ClO_2 消毒。现状水厂设置一座反冲洗泵房, 水厂水处理流程如图 2 所示。



注:PAC为聚合氯化铝。

图2 现状水处理工艺流程

Fig. 2 Flow of Existing Water Treatment Process

2.2 水厂现状构筑物分析

(1) 混合

混合采用管式静态混合器,安装于絮凝池进水管上。

(2) 絮凝沉淀池

絮凝池采用网格絮凝池,沉淀池采用平流沉淀池,合建,1座2组,共2座。平流式沉淀池有效水深为2.9 m,采用虹吸式吸泥机排泥。

(3) 滤池

现状滤池采用普通快滤池,共2座。单座滤池滤速为9.8 m/h,滤池共8格,单格面积为22 m²;采用单层石英砂滤料,粒径为0.6~1.2 mm;采用卵石承托层,粒径为4~32 mm。反冲洗方式为单水冲洗,冲洗强度为14 L/(m²·s),冲洗时间为6~8 min。滤池配水管开孔比为0.3%,单根配水支管长为1.6 m,管径为DN90,孔径为9 mm。

(4) 清水池

清水池共设置2座清水池,运行良好。

(5) 加氯加药间

加氯间与加药间合建,消毒剂采用ClO₂,质量分数为8%的ClO₂投加量为1.45 mg/L。混凝剂采用PAC,质量分数为13%的PAC投加量为51.1 mg/L。

2.3 问题总结及改造重难点

(1) 水厂要求改善成品水的口感和嗅味,降低成品水出水浑浊度,现状水处理工艺为常规水处理工艺,较为简单,需增加具有针对性处理的工艺。

(2) 水厂改造期间正常运行,不能停产。

(3) 改造只能在现状厂区内进行,水厂提供场地有限,仅2.7亩(1亩≈666.67 m²),极大地限制了升级方案的选择,对施工和维持生产运行的安全控制要求较高。

3 工艺比选

3.1 水质应对措施

水厂原水处理在常规处理(混凝→沉淀→过

滤)条件下,还有加强常规处理、增加预处理和深度处理等基本方法。根据大量的实践经验,各种处理工艺的处理效果不同。常规处理工艺是通过混凝、接触、凝聚等作用降低水的浑浊度,大约能去除20%的COD_{Mn}、10%~20%的氨氮,在一定程度上能降低水的色度、臭和味。加强常规处理工艺主要是强化混凝作用,与常规处理工艺相比,能进一步降低出水浑浊度,同时,COD_{Mn}去除效率能提高10%左右。增加预处理工艺如生物氧化,通过生物吸附降解等作用,能去除90%以上的氨氮以及亚硝酸盐,但对色度、臭和味的去除效果一般。深度处理工艺如超滤膜组合处理工艺通过膜分离筛除能使出水浑浊度降至0.1 NTU以下,臭氧-活性炭吸附工艺先进行化学氧化降低有机物浓度,使不易生物降解的有机物转化为易生物降解物质,再通过物理吸附、生物降解去除有机物。COD_{Mn}去除率可达40%~50%,氨氮、亚硝酸盐去除率为80%~90%,同时,具有很好的色度、臭和味去除效果^[2-3]。

根据上述分析,本次工艺选择需要针对性地进行比较分析,要求能改善水的色度、臭和味等感官指标,提高氨氮、亚硝酸盐、有机物、有机卤化物等耗氧指标的保障率,所以增加深度处理设施进行深度处理。因此,本工程重点工艺设计内容为深度处理方案的设计。

3.2 深度处理工艺对比选择

现阶段,深度处理工艺应用较多的主要有膜分离技术、紫外双氧水高级氧化技术和臭氧-活性炭技术^[1]。深度处理工艺优缺点对比如表2所示。

综上,臭氧-活性炭工艺,在土建和运行便捷性方面稍弱,但对于COD_{Mn}、挥发酚、氨氮的去除效果很好。此外,臭氧-活性炭技术应用广泛,国内运行经验丰富,投资成本及运行成本相对较低^[4]。深度处理工艺中膜分离技术吨水运行成本为0.5~0.9元,紫外双氧水高级氧化技术吨水运行成本为

表 2 深度处理工艺优缺点对比

Tab. 2 Advantages and Disadvantages of Advanced Treatment Process

工艺	优点	缺点
膜分离技术	1) 无需额外添加药剂, 污染物去除种类广, 可利用不同孔径的膜实现不同的分离效果 2) 运行稳定, 占地面积小, 便于自动控制等	1) 投资及运行费用高, 运行中膜易污染堵塞, 需要定期进行必要的化学清洗 2) 容易堵塞, 故前处理要求严格 3) 如何处理处置浓缩液仍存在争议
紫外双氧水高级氧化技术	1) 紫外双氧水技术与臭氧氧化相比, 安装方便灵活 2) 生产过程中无溴酸盐产生	1) 国产紫外灯管存在使用寿命短等问题, 需要经常维护更换, 而国外进口产品价格昂贵
臭氧-活性炭技术	1) 整合了活性炭物理化学吸附、臭氧化学氧化、生物氧化降解及臭氧灭菌消毒技术, 可实现 50% 以上的有机污染物去除率, 而常规处理有机污染物去除率仅为 30%~35% 2) 色度、臭和味的去除率显著提高, 感官性指标得到进一步改善	1) 给水臭氧氧化处理中臭氧利用率较低, 氧化能力有限 2) 水中若含有溴化物, 易生成有害的副产物

0.07~0.20 元, 臭氧-活性炭工艺吨水运行成本为 0.186~0.300 元^[3,5]。目前, 青岛市仙家寨水厂深度处理改造项目规模为 36.6 万 m³/d, 采用臭氧-生物活性炭处理工艺。黄岛区五水厂等水厂均采用臭氧-活性炭工艺, 出水水质及口感明显改善。因此, 综合考虑建议采用臭氧-活性炭工艺作为本工程深度处理工艺, 通过臭氧氧化、活性炭吸附和生物降解极大提高嗅味、消毒副产物前体物、难降解有机物的去除率, 从而达到水质深度净化的目的。

4 工艺设计

本工程需新建提升泵房、臭氧接触池、炭砂翻板滤池、反冲洗泵房、臭氧发生车间等生产性构(建)筑物, 设计供水能力为 6 万 m³/d, 水厂自用水系数按 5% 计。本工程受用地空间限制, 故采用臭氧发生车间、提升泵房、臭氧接触池、炭砂翻板滤池、反冲洗泵房合建的方式。

4.1 提升泵房

泵房平面尺寸为 20.3 m×8.9 m, 池深约为 4.2 m, 有效水深为 2.4 m, 进水为普通快滤池出水。考虑潜水轴流泵运转噪声低、安装面积小、无进出水阀门水损等优点, 提升泵房配置 3 台潜水轴流泵, $Q=365\sim 475$ L/s, $H=5.5\sim 8.3$ m, $N=45$ kW, 2 用 1 备。

4.2 臭氧接触池

砂滤水经提升后进入臭氧接触池, 臭氧接触池设计为密闭式。为保证臭氧在水中均匀且高效扩散, 采用微孔钛盘布气。臭氧尾气管道接入设置在池顶的臭氧尾气破坏装置, 尾气经分解后排入大气。

臭氧腐蚀性较强且有毒, 故臭氧接触池每条出水廊道采用薄壁堰跌落出水的方式, 不采用闸门, 以防闸板后期维护困难。另外, 采用堰出水可保证每

条线配水均匀。由于臭氧接触池采用全密闭结构, 在池顶设有 $\varphi 1000$ 人孔, 便于检修, 人孔材料为 SS316 L 不锈钢。

臭氧接触池按一期 6 万 m³/d 规模设 1 座, 分 2 格, 可单独运行。臭氧接触池设计数据如表 3 所示。

表 3 臭氧接触池主要设计参数

Tab. 3 Main Design Parameters of Ozone Contact Reactor

项目	参数
设计流量	2 625 m ³ /h
总平面尺寸	20.3 m×8.2 m, 1 座 2 格
有效水深	5.6 m
超高	0.6 m
臭氧投加量	1.0~2.0 mg/L
接触时间	3 级串联, 接触时间依次为 3、3、4 min

臭氧接触池设计为 3 级串联, 第 1 段臭氧投加量为 50%, 第 2 段为 30%, 第 3 段为 20%。池顶设有 2 台尾气破坏装置, 1 用 1 备, $P=0.25$ kW。采用膜片盘式臭氧曝气头, 规格为 DN180, 设置 2 套, 共 30 个, 由臭氧设备厂家配套提供。

4.3 炭砂翻板滤池

本工程采用翻板滤池, 设 1 座生物活性炭池。在每格滤池前设置进水堰板, 配水总渠的水可以通过堰板的调节实现自由出流配水, 以使每格滤池的进水流量均匀一致。过滤后的水通过设计在每座滤池后的薄壁堰跌落进入滤池管廊下的清水总管道。主要设计数据如表 4 所示。

生物活性炭池反冲洗完毕, 打开进水阀, 升水 60% 后, 开始滤池新的工作周期。考虑经济性以及滤池运行的稳定性, 滤池中所有参与控制操作的闸门、阀门均采用气动^[6]。

表 4 炭砂翻板滤池主要设计参数

Tab. 4 Main Design Parameters of Carbon Sand Flip Filter

项目	参数
设计流量	2 625 m ³ /h
总平面尺寸 (包括配水渠)	25.80 m×20.3 m, 1 座 4 格
单格平面尺寸	10.5 m×6.0 m
单格过滤面积	63 m ²
滤池布置形式	单排
滤速	10 m/h
接触时间	12 min
滤料	压块破碎炭
炭层厚度	2.0 m
滤料上水深	1.7 m
设计工作周期	3~6 d
配水、配气系统	每格滤池底部用不锈钢立管和不锈钢固定板组成纵向布水、布气管列
冲洗过程	单独气冲→气水联合冲→单独水冲, 重复 2 次 单独气冲: 强度为 15 L/(s·m ²), t=2 min 气水联合冲: 气冲强度为 15 L/(s·m ²), 水冲强度为 4 L/(s·m ²), t=4 min 单独水冲: 强度为 12 L/(s·m ²), t=47 s 停止反冲, 静沉 20 s 排水: 1.5 min 单独水冲: 强度为 12 L/(s·m ²), t=1.5 min 停止反冲, 静沉 20 s 排水: 1.5 min

4.4 臭氧发生间

臭氧发生车间建于提升泵房西侧, 平面尺寸为 8.6 m×9.3 m。臭氧发生车间需提供臭氧总产量为 3 kg/h。本套臭氧系统由 2 套液氧源为 3 kg/h 的臭氧发生器组成, 采取 1 用 1 备形式。配置气源处理系统 2 套以及投加系统、冷却循环水系统、尾气处理系统、配电柜、自控及监测系统等。臭氧投加系统采用曝气方式投加, 2 条投加线, 每条线 3 点投加, 投加比例为 2:1:1。

本工程采用的臭氧尾气破坏器通过加热催化作用分解臭氧, 由尾气破坏箱控制整个尾气破坏器。分解后的气体臭氧可直接排放到大气, 质量浓度小于 0.08 mg/L。

设备间内设有臭氧/氧气泄漏报警仪, 当设备间内臭氧/氧气泄漏浓度超标时上传可编程逻辑控制器 (PLC) 报警信号, 并通过发生器 PLC 与预留轴流风机形成联动。

4.5 反冲洗泵房

滤池反冲洗泵房按土建 6 万 m³/d 规模一次性设计施工。考虑到炭砂翻板滤池格数不多, 为节省投资, 反冲洗泵房按一次最多可同时冲洗 1 格滤池设计。泵房内主要有反冲洗水泵、反冲洗鼓风机等设备, 反冲洗泵房平面尺寸为 8.6 m×33.1 m。反冲洗安装相关设备如下。

(1) 反冲洗水泵

根据翻板活性炭池反冲洗要求, 气水联合冲时反冲水量为 734 m³/h, 单独水冲时反冲水量为 2 203 m³/h。设计选用反冲洗水泵 4 台, 3 用 1 备, 单泵性能参数为 Q=936 m³/h, H=10 m, N=45 kW, 均采用变频。气水同时冲洗时, 开 1 台泵 (变频), 其余泵备用; 单独水冲洗时, 开 3 台泵, 均变频, 1 台泵备用。

(2) 反冲洗鼓风机

翻板活性炭池要求反冲气量为 57 m³/min, 设计选用鼓风机 2 台, 1 用 1 备, 性能参数为 Q=58.5 m³/min, H=5 m, N=18 kW。

(3) 其他设备

为确保滤池气动阀门的气源不间断供应, 采用了可独立运行的 2 套压缩空气服务系统。其中包括空压机、干燥器、除油器、空气罐和空气过滤装置。设空压机 2 台, 1 用 1 备, 单台性能参数为 Q=1.6 m³/min, H=100 m, N=11 kW。

此外, 泵房内设起重量为 3 t 的电动单梁桥式起重机。

改造后厂区平面布置如图 3 所示。

5 实际运行情况

工程完成调试后于 2022 年初投入生产运行, 出水水质良好。由表 5 可知, 改造后水厂出水水质可达到 GB 5749—2022 的要求, 且 COD_{Mn}、氨氮、菌落总数等指标改善尤为明显。故本改造工艺可以有效去除氨氮及有机污染物, 同时降低出水浑浊度。此外, 该水厂运行后通过出水水质分析后置臭氧-活性炭工艺存在的炭池出水浑浊度升高、微生物泄漏的问题, 可以通过炭层下设置的砂滤层解决。

根据臭氧-活性炭工艺在垦利某水厂的应用数据, 该深度处理工艺在传统水处理工艺出水水质基础上, 浑浊度去除率可达 75%, 有机物去除率高于 50%, 氨氮去除率在 80% 左右, 能有效去除水中的有

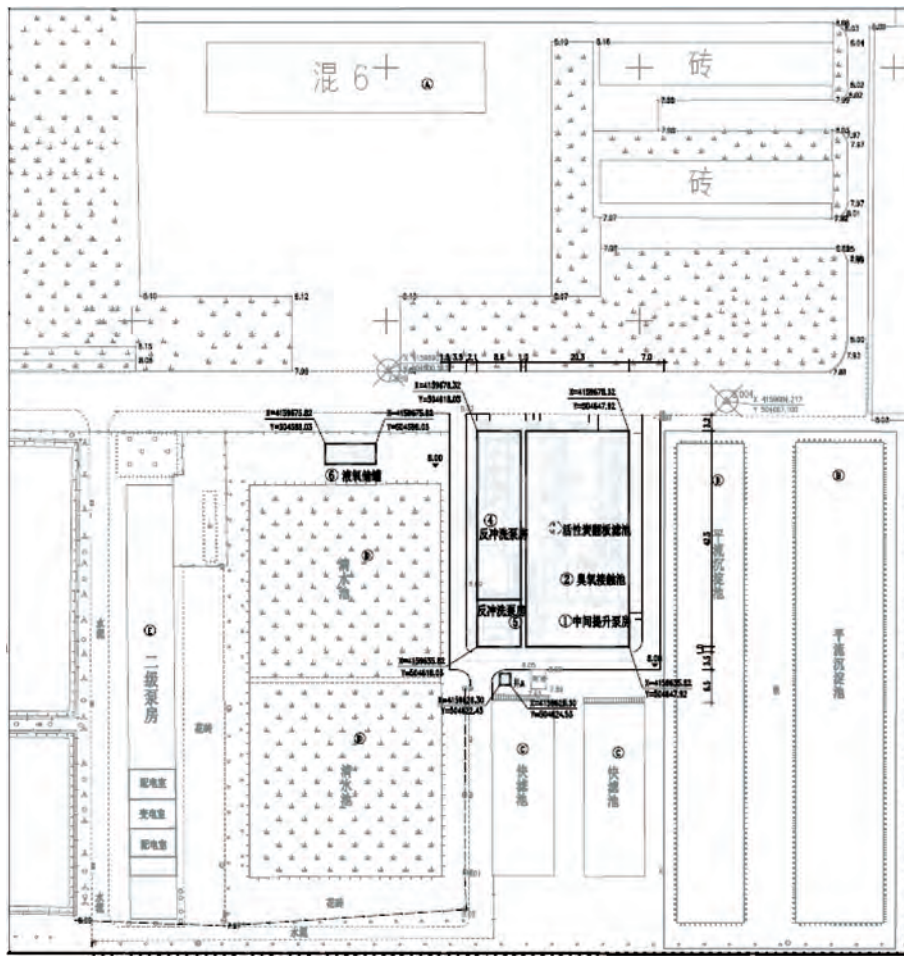


图3 改造后厂区平面布置

Fig. 3 Layout of WTP after Reconstruction

表5 2022年原水及出厂水水质

Tab. 5 Raw Water and Finished Water Quality in 2022

水质指标	色度/度	浊度度/ NTU	臭和味	pH 值	COD _{Mn} / (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	AOX/ (μg·L ⁻¹)	铁/ (mg·L ⁻¹)	锰/ (mg·L ⁻¹)	菌落总数/ (CFU·mL ⁻¹)
原水平均值	23.1	31.9	微弱	/	<8.0	0.31	17.10	<0.1	<0.05	/
出水平均值	<5	0.12	无	7.42	1.60	0.02	19.70	0.003 6	0.000 42	未检出
GB 5749—2022 限值	15	1	无	6.5~8.5	3	0.5	/	0.3	0.1	100

机物和氨氮,提高臭和味的去除率。此外,原水中含有一定量的 AOX,水厂加氯消毒过程中氯与水中微量烃类、酯类等物质生成一些 AOX,导致出厂水 AOX 升高。采用臭氧-活性炭深度处理工艺,经过臭氧氧化、活性炭吸附后,大大降低了出水的 AOX 浓度,出水中的 AOX 质量浓度降至 20 μg/L 以下。

针对东营垦利地区夏季原水浊度、COD_{Mn}、氨氮等指标略高于其他季节的情况,还可以通过调整絮凝剂和臭氧投加量,确保出水水质基本稳定^[5]。原水浊度较高时,可通过增加絮凝剂 PAC 的投加量来提高絮凝效果,加快水中悬浮颗粒的凝聚和沉降速度。投加量的调整应当依据实时的原水浊度

监测数据,采用梯度试验或在线监控系统来动态优化,既要保证絮凝效果,又要防止过量投加带来的不利影响,如增加污泥产量和处理难度。夏季 COD_{Mn} 和氨氮增高时,可通过提高臭氧投加量来强化氧化处理,但应防止臭氧过量导致的资源浪费和可能产生的副产品问题。臭氧投加量的调整需要综合考虑进水水质、水质目标、臭氧接触时间和混合效率等因素,可以通过控制臭氧发生器的输出来实现。此外,可实时监控各项水质指标,根据监测结果及时调整絮凝剂和臭氧的投加量,做到精细化管理。

6 结论

(1) 垦利某水厂在原常规处理工艺基础上增加臭氧-活性炭深度处理工艺,水处理整体工艺流程为“管式静态混合器→网格絮凝平流沉淀池→普通快滤池→提升泵房→臭氧接触池→翻板活性炭池→清水池”。该工艺具工艺流程紧凑顺畅、占地面积小、适应水质水量变化等优点。

(2) 该水厂改造完毕运行后,出水水质优于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)要求,且解决了出水 AOX 浓度升高的问题,色度、臭和味等感官指标比提标前有较大改善,为居民饮用水提供更好的保障。此外,应对突发性水源污染事件时,深度处理技术具有较强的应急处理能力和抗冲击负荷能力,可有效防范因原水水质突变引发的公共卫生风险,提高供水安全保障系数。因此,本工程具有重要的社会效益。

(3) 活性炭层下设置的石英砂滤层,对于解决后置臭氧-活性炭工艺出水浑浊度上升、微生物泄漏问题有极大帮助。

(4) 针对受季节影响的原水水质变化引起的出水水质变化问题,建议通过调整絮凝剂和臭氧投加量等运行参数解决,更好地保证出水水质的稳定性。

(5) 该工程实施后的升级改造在水厂内实施,设备紧凑,减少了构筑物的空间需求,节约宝贵的土地资源,减少建设和征地成本。虽然深度处理初期投资较大,但长期运行过程中,由于其较高的处理效率和稳定性,能够减少化学药剂的使用量,降低能源消耗。臭氧氧化和活性炭吸附不仅能高效去除

污染物,还可以在在一定程度上减少消毒剂(如氯)的需求,从而节省运行成本。因此,本工程具有重要的经济效益。

参考文献

- [1] 许兵,李珂,刘佳,等. 臭氧-生物活性炭工艺处理饮用水研究进展[J]. 净水技术, 2022, 41(12): 9-18, 25.
XU B, LI K, LIU J, et al. Research progress of ozone-biological activated carbon (O_3 -BAC) process for drinking water treatment [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(12): 9-18, 25.
- [2] 黄美心,邹苏红,张金松. 臭氧-生物活性炭技术在我国饮用水深度处理的研究进展[J]. 城镇供水, 2021(3): 46-50.
HUANG M X, ZOU S H, ZHANG J S. Research progress of ozone-biological activated carbon technology in advanced treatment of drinking water in China [J]. City and Town Water Supply, 2021(3): 46-50.
- [3] 刘连清. 臭氧-生物活性炭工艺在江苏某水厂提标扩建中的应用[J]. 净水技术, 2020, 39(7): 18-23.
LIU L Q. Application of ozone-BAC process in upgrading and extension project of a WTP in Jiangsu Province [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(7): 18-23.
- [4] 王红禹. 净水厂深度处理工艺选择和比较[J]. 中国市政工程, 2019(2): 50-56.
WANG H Y. Selection and comparison of advanced treatment technology in water purification plants [J]. China Municipal Engineering, 2019(2): 50-56.
- [5] 代荣,汪利军. 臭氧-生物活性炭滤池运行及水厂成本变化研究[J]. 给水排水, 2006, 32(10): 12-19.
DAI R, WANG L J. Research on operation of O_3 /BAC facility and operating cost of waterworks [J]. Water & Wastewater Engineering, 2006, 32(10): 12-19.
- [6] 宋欣,刘奋强,黄慧,等. 上向流臭氧生物活性炭工艺炭流失情况分析控制[J]. 给水排水, 2023, 49(8): 1-7.
SONG X, LIU F Q, HUANG H, et al. Analysis and control of carbon particle run-off situation in the up-flow ozone biological activated carbon process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(8): 1-7.
- [7] 沈恺乐,邓慧萍,沈冠杰. 浙江省某水厂臭氧活性炭深度处理工艺运行效果分析[J]. 给水排水, 2021, 47(7): 26-31.
SHEN K Y, DENG H P, SHEN G J. Operation effect analysis of ozone biological activated carbon advanced treatment process in a water plant in Zhejiang Province [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(7): 26-31.