

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.18.016

珠海某绿色高品质饮用水厂工程设计

吴艳华, 张明, 镇祥华, 司徒菲, 刘向荣, 万年红, 陈燕波
(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 珠海市某水厂设计总规模为 $45 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 其中近期规模为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。该水厂采用预臭氧/高效沉淀池/气水反冲洗滤池/主臭氧接触池/炭砂滤池/超滤/紫外+次氯酸钠组合消毒处理工艺。通过选择优质水源、取水设施设置在上游, 尽量避免咸潮上溯的影响。采用全流程多级屏障净水工艺强化各净水环节; 利用臭氧活性炭工艺降低色度、嗅味, 使饮用水质量更高; 同时采用超滤工艺将浊度降低至 0.1 NTU 以下, 减少消毒剂剂量; 采用紫外+氯组合消毒工艺减少消毒副产物的产生; 将出厂水调节至弱碱性, 改善口感, 保护身体健康。该工程可提供出水水质优于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006) 和《饮用净水水质标准》(CJ 94—2005) 的高品质饮用水。

关键词: 全流程处理工艺; 高品质供水; 集约化布置

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)18-0088-05

Design of a Green and High-quality Waterworks in Zhuhai

WU Yan-hua, ZHANG Ming, ZHEN Xiang-hua, SITU Fei, LIU Xiang-rong,
WAN Nian-hong, CHEN Yan-bo

(Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Wuhan
430010, China)

Abstract: The total scale of a waterworks in Zhuhai is $45 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, among which the recent scale is $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$. The purification process of the waterworks consists of pre-ozonation, high efficiency sedimentation tank, air-water backwash filter, ozone-contact tank, granular activated carbon and sand filter, ultrafiltration, UV and NaClO disinfection. The impact of upstream saltiness was avoided as far as possible by selecting high-quality water sources and setting the water intake facilities upstream. Each water purification step was enhanced by the whole multi-stage barrier process. The process of ozonation and activated carbon was employed to reduce the chromaticity, taste and odor, so as to improve the water quality of the drinking water. At the same time, ultrafiltration process was used to reduce the turbidity below 0.1 NTU and reduce the dosage of disinfectant. The combined disinfection process of ultraviolet and chlorination was used to reduce the production of disinfection by-products. The product water was adjusted to weak alkaline to improve the taste and protect the health. The project can provide high-quality drinking water that is better than the criteria specified in *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2006) and *Water Quality Standards for Fine Drinking Water* (CJ 94-2005).

Key words: whole process treatment technology; high-quality water supply; intensive layout

我国部分经济发达地区根据本地实际情况制定了更加严格的饮用水水质标准,珠海市某在建水厂作为珠海市第一座全流程水厂,出厂水水质标准除满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)外,还应符合《饮用净水水质标准》(CJ 94—2005),同时出厂水浊度内部控制标准为0.1 NTU。

1 水源水质

西江是珠海市最主要的城市供水水源之一,市区水厂水源水在丰水期时均来自西江,咸潮期则通过水库调水,形成了“江水为主、库水为辅、江库联动、江水补库、库水调咸”的供水模式。该水厂原水平时来自于西江磨刀门广昌泵站取水点和平岗泵站取水点,咸潮期来源于竹银水库和作为备用水源的梅溪水库和大境山水库。

2015年—2018年水质指标每年最高值(取样频率每月不低于1次):西江取水点高锰酸盐指数为1.34~2.89 mg/L,氨氮为0.02~0.12 mg/L,藻类为 $(8.04 \sim 493) \times 10^4$ 个/L,总氮为1.77~2.0 mg/L,

总磷为0.044~0.099 mg/L。竹银水库高锰酸盐指数为1.55~2.33 mg/L,氨氮为0.15~0.34 mg/L,藻类为 $(4\ 320 \sim 7\ 800) \times 10^4$ 个/L,总氮为1.53~2.55 mg/L,总磷为0.046~0.101 mg/L。可见,西江水质优良,竹银水库水质比西江水略差,除总氮、总磷偏高外,均适宜作为集中式生活饮用水水源。

2 中试研究及工艺选择

2.1 中试研究成果

该水厂原水受到的有机微污染、氨氮污染不明显,水质处理主要考虑咸潮期采用水库水时可能存在藻类偶然暴发带来的高藻和嗅味问题,同时考虑出水水质按照饮用净水水质标准控制,浊度控制目标值为0.1 NTU。为了满足用户对饮用水水质安全和口感的更高要求,该水厂在设计之初,就进行了1年多的中试研究,试验规模 $5\text{ m}^3/\text{h}$,工艺流程为“原水→预臭氧→混凝沉淀→砂滤→后臭氧→炭砂滤池→超滤”,试验期间(2018年10月—2019年12月)沿流程实测进、出水水质见表1。

表1 沿流程实测进、出水水质

Tab.1 Actual influent and effluent quality along process

项目	COD _{Mn} / (mg·L ⁻¹)	浊度/ NTU	含藻量/ (10 ⁴ 个·L ⁻¹)	菌落总数/ (CFU·mL ⁻¹)	土臭素/ (ng·L ⁻¹)	2-甲基异莰醇/ (ng·L ⁻¹)
原水	2.06 (1.19~3.50)	18.2 (2.54~136.5)	118(47~810)	75 (25~210)	<1	8.57 (2.67~16.15)
常规处理出水 (砂滤)	1.10 (0.59~1.35)	0.30 (0.10~1.25)	21 (11~37)	14 (8~25)	<1	4.98 (1.47~8.22)
深度处理 出水(超滤)	0.67 (0.24~0.99)	0.08 (0.06~0.11)	0.9 (0.2~3)	10 (5~20)	<1	<1

注: 括号内数值为波动范围。

试验期间原水氨氮最高值为0.06 mg/L,出水氨氮低于0.02 mg/L,原水微囊藻毒素-LR最高值0.081 μg/L,对臭氧接触池出水的溴酸盐和甲醛进行检测,分别低于0.005 mg/L和0.05 mg/L,不会产生溴酸盐和甲醛危害,总出水的三氯甲烷和四氯化碳最高值分别为4.13和0.19 μg/L,硫酸盐最高值为67 mg/L,氯化物最高值为32 mg/L,总硬度(以CaCO₃计)最高值为84 mg/L,均远低于相应的饮用水水质标准最高限值。

中试结果表明,采用该组合工艺能提供优于直饮水水质标准的高品质饮用水。

2.2 水厂工艺流程

水厂工艺:预臭氧→混凝沉淀过滤→臭氧活性炭→超滤→消毒,工艺流程见图1。

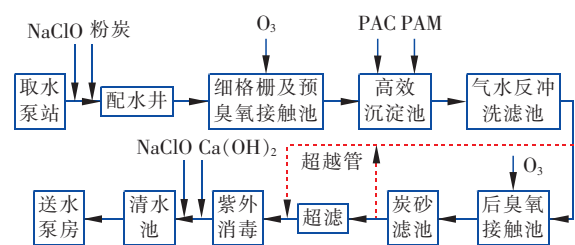


图1 水厂工艺流程

Fig.1 Process flow chart of the waterworks

3 工艺设计

3.1 工程设计规模

该水厂主要生产构筑物土建规模按 $30 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 一次建成,辅助生产构筑物土建规模按 $45 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 一次建成,设备规模按照 $15 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 分

两批安装。污泥处理原水浊度按 70 NTU 计算,远期不投加粉炭时,总干泥量为 57.3 t/d;投加粉炭时,总干泥量为 70.8 t/d,污泥工程构筑物按正常不加粉炭情况设计,设备按应急投加粉炭情况校核。

3.2 净水处理工程设计

3.2.1 预加氯投加点

工程设有两根 DN1 800 的原水进厂管,在配水井前 500 m 处的原水管上设置了 10% 次氯酸钠预加氯投加点,预加氯投加量 1.0 ~ 2.5 mg/L。

3.2.2 配水井

配水井按照远期建设,设置配水井 1 座,尺寸为 20 m × 12 m × 7.75 m,共设 3 格配水堰,每格对应一条 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的生产线,每格堰宽 12.5 m,设计负荷下堰上水头 0.25 m。

3.2.3 细格栅及预臭氧接触池

细格栅及预臭氧接触池 2 座,细格栅与预臭氧接触池合建,尺寸为 9.5 m × 36.2 m × 7.25 m,预臭氧接触池旁还附带排水池,尺寸为 2.5 m × 15.4 m × 4.25 m。单座细格栅分 2 格,格栅间隙 5 mm,栅前水深 2.45 m,格栅前后各设一个检修闸门。预臭氧接触池分为 2 格,单格有效水深 6.35 m,接触时间 7.4 min,预臭氧投加量为 0.5 ~ 1.0 mg/L。

3.2.4 高效沉淀池

高效沉淀池 2 组,单组设 3 座高效沉淀池,单座高效沉淀池设 2 格前混合池、1 格后混合池、1 格絮凝池和 1 格沉淀池。单格前混合池停留时间 1.25 min,单格后混合池停留时间 0.6 min,每格均设置 1 台机械搅拌器,搅拌器配备调速电机,单格絮凝池停留时间 12.1 min,单格沉淀池斜管区平均液面负荷 $13.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,峰值液面负荷 $14.4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。PAC 投加量 15 ~ 25 mg/L(有效含量 10%),PAM 投加量 0.2 ~ 0.5 mg/L。

3.2.5 气水反冲洗滤池及下叠排水池

气水反冲洗滤池及下叠排水池 2 组,单组滤池分 10 格,单格过滤面积 99.63 m^2 ,正常滤速 7.5 m/h,强制滤速 7.9 m/h。采用粒径 0.9 ~ 1.35 mm 的均匀级配石英砂滤料,滤料层厚 1.25 m,承托层厚 0.1 m,滤层以上水深 1.2 m。冲洗方式为气冲、气水冲和水冲三个阶段,气冲强度为 $17 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,冲洗时长 2 min;气、水联合冲洗时气冲强度为 $15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,水冲强度为 $2.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,冲洗时长 4 min;单独水冲强度为 $4 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,冲洗时长 8

min;表面扫洗强度为 $2.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,反洗周期 24 ~ 48 h。反冲洗结束后静置 1 min,然后投入运行同时进行初滤水排放。

设置 2 个排水池,1 号排水池设在北侧气水反冲洗滤池下方,有效水深 3.85 m,有效容积 7303 m^3 ,用于收集砂滤池的冲洗废水和初滤水,可满足远期连续冲洗 30 格砂滤池废水的调蓄。池内设 3 台潜污泵,单泵 $Q = 315 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 130 \text{ kPa}$ 。当原水含藻量低时,直接提升至配水井回用;当原水含藻量高时,先提升送至一体化气浮处理设备集中处理后,再送至配水井回用;当水质不适合回用时,可直接外排厂区截洪沟。2 号排水池设于南侧气水反冲洗滤池的下方,有效水深 2.1 m,有效体积 3169 m^3 ,用于收集炭砂滤池的反冲洗废水和初滤水,可满足远期连续冲洗 18 格炭砂滤池废水的调蓄。内设 3 台潜污泵,单泵 $Q = 315 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 130 \text{ kPa}$ 。正常情况下直接提升至配水井回用;紧急状态下亦可考虑提升排放至厂区截洪沟。2 座排水池池底布置有穿孔气管,排水池运行时同时曝气以防止泥砂沉积。

3.2.6 后臭氧接触池

后臭氧接触池 2 座,单座尺寸为 15.2 m × 24.6 m × 7.8 m,分 2 格,有效水深 6.3 m,接触时间 13.1 min,臭氧投加量为 1.0 ~ 2.0 mg/L,分三段投加,依次为 50%、30%、20%。

3.2.7 炭砂滤池

炭砂滤池 2 组,单组尺寸为 27.55 m × 48.7 m × 8.5 m,池型为翻板滤池,每组滤池分 6 格,单格过滤面积 112.5 m^2 ,空床滤速 11.1 m/h,空床接触时间 11 min。滤池内颗粒活性炭滤料层厚为 2.0 m,采用 8 × 30 目煤质颗粒活性炭,石英砂滤层厚度 0.5 m,粒径范围 0.45 ~ 1.25 mm,承托层厚度 0.3 m,滤层以上水深 2.0 m。采用气冲和水冲两阶段冲洗,气冲强度 $15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,冲洗时长 3 min,水冲强度 $8 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,冲洗时长 < 4 min。定期大强度水冲强度 $15 \sim 17 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,冲洗时长 < 2 min。

3.2.8 超滤膜车间

设置 2 座浸没式超滤膜池,池深 7.9 m,高 6.5 m,单座膜池设 16 套膜组件,每套总有效膜面积 1680 m^2 ,设计通量 $23.3 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,峰值通量 $26.9 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,产水率 > 95%。

膜车间内配备变电间、加药间、反冲洗废水池、中和水池、鼓风机房等。

3.2.9 紫外消毒井

超滤膜池出水总管上设置紫外消毒管,采用中高压管式紫外消毒方式,消毒井尺寸为 $1.3\text{ m} \times 15.1\text{ m} \times 5.3\text{ m}$,内设4根DN800的并联管道,近期设置2台管式消毒及其配套设备,远期采用4台管式消毒设备(3用1备)。管式紫外设备单管峰值流量 $16.65 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,紫外穿透率 $\geq 90\%$,最低紫外剂量 $40\text{ mJ}/\text{cm}^2$ 。

3.2.10 清水池

清水池按远期规模一次建成,分4格,总尺寸为 $111.6\text{ m} \times 109.6\text{ m} \times 5.2\text{ m}$ 。清水池顶部覆土 1 m ,并设有环形廊道,通气管避开廊道布置,采用高、低错落布置。

3.2.11 吸水井及送水泵房

吸水井和送水泵房土建按远期规模一次建成,平面尺寸为 $63.1\text{ m} \times 14\text{ m}$,地下深 7.5 m ,地上高 10.3 m 。内设8台泵位,大泵 $Q=6\,950\text{ m}^3/\text{h}$, $H=360\text{ kPa}$,采用工频;小泵 $Q=2\,500\text{ m}^3/\text{h}$, $H=360\text{ kPa}$,采用变频。各期的配泵方案如下:

近期(一期)配泵2大+2小,开启工况为:1台大泵常开,1台小泵(用水高峰时)变频搭配调节使用,1台大泵和1台小泵备用。

近期(二期)配泵3大+2小,开启工况为:2台大泵常开,2台小泵(用水高峰时)变频搭配调节使用,1台大泵备用。

远期(三期)配泵4大+2小,开启工况为:3台大泵常开,2台小泵(用水高峰时)变频搭配调节使用,1台大泵备用。

3.3 污泥处理工程设计

3.3.1 储泥池

储泥池用于接收高效沉淀池的剩余污泥(含水率 98%),该池在储存污泥的同时兼具一定的浓缩功能,出泥(含水率 97%)送往污泥平衡池。远期设3座储泥池,近期建设2座。单座储泥池内径 19.6 m ,池边水深 4.5 m 。一期运行1座,二期运行2座,固体负荷 $2.6\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,液面负荷 $0.13\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,设计停留时间 34.6 h 。池内配套安装中心传动刮泥机,设上清液溢流管至厂区雨水井。为避免泥水在储泥池内停留时间过长,在池体不同高度设置有上清液排放口,可根据实际情况灵活控制。

3.3.2 污泥平衡池

污泥平衡池1座,分2格,用于平衡储泥池与污

泥脱水机房之间污泥量。总尺寸 $12.7\text{ m} \times 6.5\text{ m} \times 5.2\text{ m}$,有效水深 4 m 。设放空管至厂区污水管。

3.3.3 污泥脱水车间

污泥脱水车间1座,土建按远期规模一次建成,尺寸为 $12.6\text{ m} \times 30\text{ m} \times 12.1\text{ m}$,内设5台离心机位,单台处理量为 $30\text{ m}^3/\text{h}$ 。进泥含水率 97% ,出泥含水率 80% 。污泥脱水车间内还设有配套的PAM投药系统、配电及自控操作间、进泥泵、污泥切割机、干泥泵等。车间外设有2套污泥料仓,单座容量 150 m^3 。工程近期安装1套,预留1套料仓位。

4 技术经济指标

本项目第一部分工程费用 $67\,088.02$ 万元,第二部分工程建设其他费用 $12\,165.67$ 万元,预备费 $3\,962.68$ 万元,总投资 $87\,348.81$ 万元。该水厂运行单位总成本为 $1.78\text{ 元}/\text{m}^3$,单位经营成本为 $0.82\text{ 元}/\text{m}^3$ 。

5 工程特点

① 智慧水务在水厂工程的广泛应用

本项目按生产流程分解为BIM设计、施工应用及运维平台应用三部分。BIM设计有利于各专业之间的高效协同设计,避免管线、构(建)筑物空间冲突与碰撞,实现最优的设计方案。在工程施工中利用BIM模型可以分别生成梁、板、柱各构件混凝土详细的工程量清单,通过与实际工程消耗量对比,做到现场的实时掌控。利用BIM可视化的特点,进行复杂节点施工模拟及施工中管线的安装综合应用,对施工现场的安装管理起到协调、指导作用。

此外,还为该水厂搭建了智慧运维管理平台,实现水厂工艺的可视化展示,支持全景 360° 自由浏览,或切换到行走模式,以第三人称视角进行场景漫游,同时伴有小地图与当前所在的位置信息。系统支持实时查看,点击相应的系统及子系统名称,对应的管线与设备模型都可快速呈现。平台能对水厂工艺设备进行资产管理,主要包括设备台账、维修和养护管理。平台还能在平板电脑、智能手机等移动终端使用,开发了供水运维系统的微信小程序,实现GIS展示,设备信息查询,维修工单发起、工单派送、工单统计,关键信息推送与查询等主要功能。

② 采用全流程多级屏障高品质净水工艺

通过选择优质水源,并将取水设施设置在上游,尽量避免咸潮上溯的影响。工艺强化各净水环节的风险管控能力,各净水单元具备不同功能。通过臭

氧预氧化改善浊度、色度、嗅味等感官指标,杀灭致病微生物及藻类,去除消毒副产物前驱物的同时还有助凝作用,减少后续混凝剂投加带来的二次污染;通过强化混凝沉淀过滤工艺进一步去除藻类和有机物;通过臭氧、炭砂滤池工艺降低药品和个人护理品、内分泌干扰物等新兴污染物带来的未知风险;通过超滤膜工艺稳定保持出水浊度在0.1 NTU以内,提高“两虫”的去除率,提高后续紫外消毒透光率和降低消毒剂剂量。美国水行业协会(AWWA)对浊度去除表现达到最高水平的水厂提供认可,要求所有申请第四阶段“水处理卓越奖”的水厂滤后水浊度 ≤ 0.1 NTU,韩国“水质安全计划”的五星级水质管理标准以及我国浙江省现代化水厂的评价标准,都要求出水浊度 ≤ 0.1 NTU,可见出水浊度 ≤ 0.1 NTU已成为各国水厂努力追求的控制目标。通过紫外和氯组合消毒二者联合产生协同效应^[1],降低消毒剂投加量,减少消毒副产物的产生,又能保障余氯达标;通过调节出水pH值至8.0~8.5,改善饮用口感,防止输水管道腐蚀。工艺整体系统性地提升了水厂水质安全裕度,提供出水水质优于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)和《饮用净水水质标准》(CJ 94—2005)的高品质饮用水。

③ 工程体现绿色和环保理念

该水厂厂区利用采石场废坑建设,变废为宝,充分利用山地地形,减少挖填方土石量,优化净水构筑物水力高程布置,减少水头损失,全流程没有设置中间提升泵房。

厂区构筑物采用集约化布置,选用设备简单紧凑、占地面积省的高效沉淀池,采用炭砂滤池工艺,大幅减少工程占地和节省投资。采用气水反冲洗滤池下叠排水池的立体布置方式,并设置回用系统,可选择性回用或外排,减少了水量损耗。

本工程考虑了海绵设计,大车间及综合楼屋顶进行覆绿设计,区域路牙采用开口式路牙,道路雨水通过路缘石开口流入转输型植草沟,导流至雨水花园及下凹式绿地,并通过下凹式绿地/雨水花园的溢流口将超量雨水排入雨水管网,下凹式绿地沟底标高比周边地面低30 cm,主要布置在绿化面积较小、地下管线较多的区域。

工艺上还采用了超滤^[2]和炭砂滤池等环境友好型的绿色净水技术。

④ 设计细节的考虑

在厂区竖向设计时,厂区地面高程从15.50、15.85、17.45、21.50 m至24.50 m变化,呈竖向阶梯型布置,与周边环境融合,没有很大的落差感,拾级而上,不会给人明显的爬坡感;将污泥处理、辅助生产等构筑物布置在厂区边边角角的地方,充分利用红线边的区域,又不太突兀;沿着中轴线设置巡检廊道,以便于在一个较高的高度巡检全厂的核心生产线;每格滤池后均设置质量控制点和取样点,便于取样检测,随时了解单格滤池的运行状况。

⑤ 灵活设置多种运行模式

可采用多种运行模式,以适应不同水质条件,包括:长流程运行模式,高品质供水时全部单元运行;短流程运行模式,在进水水质很好时,超越深度处理单元,采用常规处理运行;应急运行模式,突发原水水质恶劣时,设置粉末活性炭的投加,投加量为5~25 mg/L,以减轻后续臭氧活性炭的处理负荷。

6 结论

该水厂利用原采石场废坑建设,充分利用山地地形,优化净水构筑物水力高程布置,减少水头损失,全流程不设置中间提升泵房,设计上还考虑了海绵设计及智慧水务的应用。水厂采用预臭氧/高效沉淀池/气水反冲洗滤池/主臭氧接触池/炭砂滤池/超滤/紫外+次氯酸钠组合消毒全流程处理工艺,确保提供高品质水。

参考文献:

- [1] WANG X J, HU X X, WANG H B, et al. Synergistic effect of the sequential use of UV irradiation and chlorine to disinfect reclaimed water[J]. Water Research, 2012, 46(4): 1225 - 1232.
- [2] 李圭白, 杨艳玲. 超滤—第三代城市饮用水净化工艺的核心技术[J]. 供水技术, 2007, 1(1): 1 - 3.
LI Guibai, YANG Yanling. Ultrafiltration - the 3rd generation key water purification technology for city[J]. Water Technology, 2007, 1(1): 1 - 3 (in Chinese).

作者简介:吴艳华(1985 -),女,湖北荆门人,硕士,高级工程师,主要从事水处理工艺研发与设计工作。

E-mail: 442149670@qq.com

收稿日期: 2021 - 03 - 30

修回日期: 2021 - 04 - 08

(编辑:孔红春)