

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.10.011

# 我国超大超滤水厂——广州北部水厂工艺设计

李丰庆

(广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510060)

**摘要:** 广州北部水厂总规模  $150 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 一期设计规模  $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 是目前国内建成的最大规模超滤水厂。大型自来水厂设计应充分考虑工艺技术先进可靠、应急安全供水的目标和经济合理的节能减排需要。经多角度研究论证, 该厂设计采用常规工艺+臭氧-生物活性炭+超滤+消毒工艺。工艺流程中设置了多处超越管线, 可灵活地组合调度运行, 降低运行成本; 此外, 设置了原水监测预警及多种药剂投加系统, 可应对原水突发性水污染事故, 确保水厂的安全运行。工程总投资 25 亿元, 其中超滤部分 2.7 亿元, 超滤单元运行成本为  $0.18 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

**关键词:** 自来水厂; 超滤; 臭氧; 活性炭

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)10-0066-05

## Process Design of the Super Large Ultrafiltration Waterworks in China: Guangzhou Beibu Waterworks

LI Feng-qing

(Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510060, China)

**Abstract:** The total scale of Beibu Waterworks in Guangzhou is  $1.5 \text{ million m}^3/\text{d}$ , and the design scale of the first stage is  $600\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ . It is the largest ultrafiltration water plant in China. The process route of large-scale water plant should take full account of the advanced and reliable technology, the goal of emergency safe water supply and the need for rational energy conservation and emission reduction. After multi-angle research and demonstration, conventional process, ozone-bioactivated carbon, ultrafiltration and disinfection process were used. A number of transcend pipelines were set during the process, which can combine scheduling operation flexibly, and reduce operating costs. Besides, raw water monitoring, early warning and a variety of pharmaceutical feeding systems were set up to deal with sudden water pollution accidents from raw water and ensure the safe operation of water plant. The total investment of the project was 2.5 billion yuan, of which 270 million yuan was ultrafiltration part, and the operating cost of the ultrafiltration unit was  $0.18 \text{ yuan}/\text{m}^3$ .

**Key words:** waterworks; ultrafiltration; ozone; activated carbon

广州北部水厂由广州水投集团投资建设, 用地  $49.9 \text{ hm}^2$ , 总设计规模  $150 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 一期工程规模  $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 一期工程于 2019 年 11 月全面运行通水, 破解了广州北部地区供水需求瓶颈, 惠及 150 万人。该工程是目前国内建成的最大规模超滤水厂。该水厂以西江水为水源, 采用国际先进超滤膜处理技术, 出厂水水质达到并优于《生活饮用水

卫生标准》(GB 5749—2006) 和《饮用净水水质标准》(CJ 94—2005)。

### 1 西江水源水质

北部水厂水源取自西江下陈段, 通过取水泵站及  $47.6 \text{ km}$  管道输送至厂区。

#### 1.1 经常性原水水质

国家城市供水水质监测网广州监测站水质检测

数据显示,西江下陈水源监测点2006年—2013年水源水质监测结果与《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅱ类标准比较,基本属于Ⅱ类水源,原水水质近年来较为稳定,仅在个别时段个别项目不能满足Ⅱ类要求,主要超标项目有:铁、氨氮、耗氧量、溶解氧。西江水源部分时段也会出现高浊度、高藻类、异味等突发情况。下陈泵站测得原水浊度曾达2 000 NTU,藻类高发期间总藻类在 $100 \times 10^4$ 个/L以下。

## 1.2 突发水源污染情况

西江下陈取水点位于西江、北江两江交汇点下游1 000 m,水源汇集流域面积广,受航运和沿岸工业生产影响范围大。西江流经云南、贵州、广西、广东等省份。北江流经江西、湖南、广东省,有韶关、英德等主要工业城镇,沿岸有金属冶炼、水泥、发电、电镀等大中型企业。

近几年影响较广的西北江水源污染事件有:2005年北江镉污染事件,2010年北江铊污染事件,2012年广西龙江河镉污染事件,2012年西江、北江遭受挥发酚污染事件,2013年广西贺江铊、镉污染事件,2013年北江遭受挥发酚污染事件等。2014年高浊水期间,西江水源曾出现铁、锰、铊、铅含量超标。

综上所述,下陈水源可能受到污染的类型有臭味、挥发酚、油污等有机污染,重金属、氰化物、酸、硫化物、氟化物等无机污染。

## 2 出厂水水质目标

### 2.1 饮用水水质标准发展趋势分析

目前,国际上具有权威性、代表性的饮用水水质标准主要有3部:世界卫生组织(WHO)的《饮用水水质准则》、欧盟(EC)的《饮用水水质指令》和美国环保局(USEPA)的《国家饮用水水质标准》,它们是我国制订水质标准的主要基础和重要参考。近10多年来在以上水质标准不断修订过程中,不难发现国际饮用水水质标准有如下的发展趋势:重视微生物指标;重视消毒剂及其副产物对人体健康的影响;密切关注新型激素类对人体健康的影响。指标的规定趋向全面严格,指标数量大幅增加,指标限值要求也越来越严格。随着我国经济社会的快速发展,水源保护区受人类活动影响加剧,预计近期将对饮用水水质标准再进行修订。考虑一些新出现的污染物新种类,会新增控制指标,如持久性有机污染物、内分

泌干扰物、药品与个人护理用品、含氮消毒副产物等。

### 2.2 北部水厂出厂水水质目标

① 针对正常水源水质,出厂水水质要确保达到现行《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),基本达到《饮用净水水质标准》(CJ 94—2005),其中出厂水浊度达到0.3 NTU以下。

② 针对水源突发重金属污染事件,净水工艺具有应急应对措施。

③ 采用能够代表引领我国自来水行业的净水技术,与生活饮用水卫生标准不断提升相适应。

## 3 净水工艺

### 3.1 总体净水工艺流程

常规处理工艺(混凝—沉淀—过滤)是以去除水中无机悬浮物以及大分子质量有机物为主,而对水中小分子质量、溶解性、亲水性、极性有机物,溶解性的有机碳(DOC),生物可以同化的溶解性有机碳(BDOC)等去除作用甚微。

臭氧生物活性炭工艺是高级氧化、吸附和生物降解工艺的组合。首先利用臭氧的强氧化性氧化水体中有机物生成低分子质量有机物或矿化,再利用活性炭吸附去除臭氧氧化生成的低分子质量有机物,另一方面在炭床中大量生长繁殖微生物,同时降解有机物。臭氧生物活性炭工艺对激素类药品和个人护理品、含氮消毒副产物、藻类致嗅物质等都有很好的去除效果,是城市自来水厂应对各类新兴有机污染物的通用解决之道,同时对提高水厂应对突发污染事件的能力也作用显著。但炭滤池中滋生了大量的红虫、剑水蚤等微型生物,存在微型生物泄漏的风险。

超滤膜出水浊度一般达到0.1 NTU以下,颗粒数远少于常规工艺出水,可完全去除细菌、病毒等微生物。采用膜处理工艺是抵抗生物风险的最有效方法,还能减少投氯量,更有利于降低致突变性。臭氧活性炭工艺和超滤膜工艺相结合,既能保障安全供水也能大大提高水质<sup>[1]</sup>。

因此北部水厂一期工程净水工艺路线采用常规处理+臭氧生物活性炭+超滤膜工艺。根据节能减排要求,排泥水采用重力浓缩,离心机脱水,设计废水回收利用,水厂自用水率由10%降低至0.1%左右,基本做到零排放。

整体流程见图1。

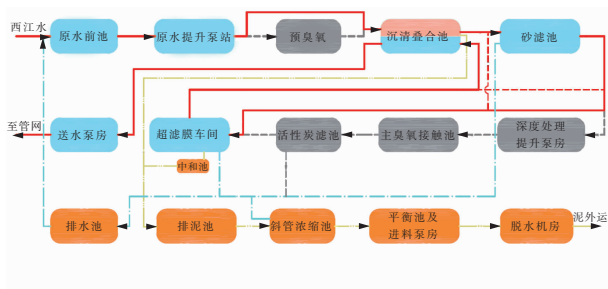


图 1 水厂工艺流程

Fig. 1 Process flow chart of waterworks

图 1 工艺流程可根据原水水质条件分阶段实施,水厂建成后可根据水质情况,实现四种净水工艺流程:混凝沉淀+砂滤+臭氧活性炭+超滤膜过滤;混凝沉淀+砂滤+超滤膜过滤;混凝沉淀+超滤膜过滤;混凝沉淀+砂滤。

### 3.2 采用超滤工艺的必要性

生物污染是危及公众健康的重要因素,然而仅通过消毒并不能确保水质的生物安全性,采取有效的防止生物活性炭滤池生物泄漏以及控制颗粒数与浊度的工艺措施,是降低微生物风险的关键途径。通过加强对水厂待滤水与滤后水的浊度控制,虽然可以减小生物风险,但是在珠三角湿热气候下并不可靠,采用膜处理工艺则是抵抗生物风险的最有效方法。

城市供水对社会和经济发展具有先导性和制约作用。随着广州市经济建设的蓬勃发展,作为城市重要配套设施的供水项目应该在高起点、高标准上提前投入。北部水厂是广州市最大型的水厂,其生产技术应具有先进性和前瞻性,既要考虑原水水质变化趋势,又要考虑满足国家对饮用水水质标准的提升,还要确保供水安全。采用常规工艺后增加深度处理很有必要。

### 3.3 超滤工艺的可行性

超滤技术于 20 世纪 80 年代开始用于饮用水处理,并在水处理中得到了迅速发展。超滤膜能够有效去除水体中的悬浮物、浊度、胶体、藻类、细菌、病毒等,使出水浊度达到 0.1 NTU,保证饮用水安全性。一般情况下,超滤膜对贾第虫、隐孢子虫去除率  $>4\text{-lg}$ ;大肠杆菌去除率  $>4\text{-lg}$ ,即 99.99%;病毒去除率  $>3.5\text{-lg}$ ,即 99.97%;藻类去除率 100%。根据广州市自来水公司与华南理工大学 2010 年在三水金本水厂针对西江原水的超滤膜中试数据,超滤膜出水浊度通常在 0.1 NTU 以下,出水粒径  $<2\text{ }\mu\text{m}$

颗粒数在 150 个/mL 以下;砂滤池出水浊度通常在 0.2~0.3 NTU 之间,出水粒径  $<2\text{ }\mu\text{m}$  颗粒数通常在 1800 个/mL 以上。因此超滤是防止微生物泄漏的有效保障措施<sup>[1]</sup>。

## 4 超滤膜选型及主要设计参数

### 4.1 压力式和浸没式选择

压力式膜按运行模式分死端过滤或错流式过滤,过滤系统示意图见图 2。浸没式超滤膜运行行为死端过滤,过滤系统示意图见图 3。

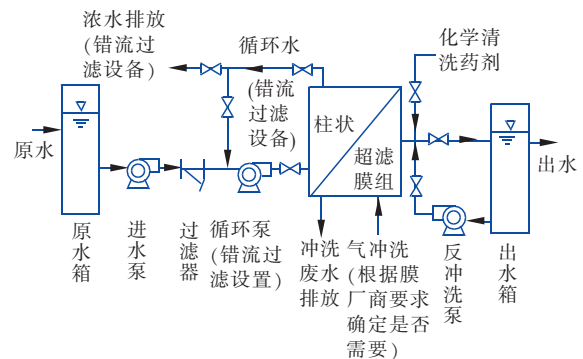


图 2 压力式超滤膜过滤系统示意

Fig. 2 Schematic diagram of pressure ultrafiltration membrane filtration system

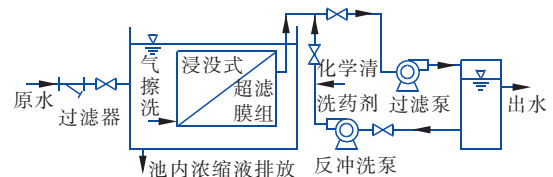


图 3 浸没式真空抽吸超滤膜过滤系统示意

Fig. 3 Schematic diagram of the immersion vacuum suction ultrafiltration membrane filtration system

压力式膜具有通量大、布置紧凑、外观精美、土建量小的特点,但对进水水质要求较高,需要设置中间水池和膜进水加压泵。

浸没式超滤膜成组布置在水池中,抗污染能力强,无需设中间水池,系统更简单,水厂流程水损更小,但通量小、土建工程量较大。

压力式膜与浸没式膜系统比较见表 1。压力式膜系统运行成本略高于浸没式膜系统,冲洗较频繁,阀门要求高,但压力式膜不建膜池,通量大,投资省,总膜面积小,更换费用少,外观更加美观、整洁,封闭式运行,水质也更具有安全感。因此本工程推荐采用压力式超滤膜。



表 1 压力式膜与浸没式膜系统对比

Tab. 1 Comparison of pressure membrane and immersion membrane systems

项 目	压力式膜系统	浸没式膜系统
系统	密闭式系统设计	开放式系统设计
膜材料	PES、PS、PVDF、PVC	PVDF、PVC
预处理要求和抗污染能力	单根压力式膜组件装填密度高,过流通道小,要求完善的预处理,抗污堵能力差	单根膜组件装填密度中等,过流通道宽,只要求简单的预处理,抗污堵能力强
跨膜压差/kPa	正常小于 100,最大 200	正常小于 30,最大 50
单套最大规模	单套系统一般处理规模为 4 000 ~ 15 000 m <sup>3</sup> /d,对于大型水厂,系统会变得比较庞大	单套系统产量可到 20 000 m <sup>3</sup> /d 以上,适合大型水厂,规模优势明显
冲洗方式	气冲、正冲、反冲、维护性清洗、恢复性清洗。单组系统需要更多和复杂的组件	气冲、反冲、维护性清洗、恢复性清洗。单组系统组件较少
常用通量/(L·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	30 ~ 80	20 ~ 45
外观	系统成套设备布置,整齐美观,过滤过程封闭,卫生条件好,感官佳	膜池系统简洁,池顶设移动罩,卫生条件好
运行管理	设备数量多,维护管理工作量大;膜组安装在地面上,维护过程无需进行膜组吊装,巡视检查维护方便	设备数量少,维护管理工作量大;膜组安装在水中,部分检修工作需进行膜组吊装,巡视检查维护较难
设计寿命/a	7	7
单位建安费/(元·m <sup>-3</sup> )	501.05	561.6
制水成本/(元·m <sup>-3</sup> )	0.249	0.243

4.2 膜通量分析

膜通量与膜价格、膜污染和跨膜压差有关。

膜技术发展初期,膜价格贵,所以采用较高的膜通量。膜通量高,需采用频繁的物理和化学方法来清除污染,恢复膜通量,这不仅使运行费用增大,也影响膜的寿命。

因此,超滤系统通量的合理确定需对投资和运行费用平衡综合考虑。在考虑各前处理工艺、进水水质、水温等的基础上,必要时进行试验或者参考同类同地域项目运行经验以确定合适的膜通量<sup>[2]</sup>。

国内现有超滤膜水厂压力式膜系统通量一般取值 50 ~ 80 L/(m<sup>2</sup>·h),浸没式膜系统通量一般取值 20 ~ 40 L/(m<sup>2</sup>·h)。本工程原水水质较好,工艺流程完善,膜系统进水水质基本已达到饮用水标准要求,而且水温较高,膜通量增加对跨膜压差增加的影响小。同时参考广州现有江村超滤膜水厂,设计通量采用 70 L/(m<sup>2</sup>·h),实际运行通量为 72 L/(m<sup>2</sup>·h)。因此,本工程超滤膜系统设计采用较高的设计通量,即 70 L/(m<sup>2</sup>·h)。

4.3 超滤膜处理系统设计

超滤膜处理系统分为 8 个子系统,分别为超滤膜系统、进水系统、预处理系统、反洗系统、药洗系统、压缩空气系统、废水回收系统、检测系统。

① 超滤膜系统

超滤膜间内共设 40 个膜堆安装位置,分 4 列对称布置,每列 10 个。超滤膜系统主进水管及主出水管布置于地下负一层,其他管道采用地上式架空布置。每个膜堆包括 2 个膜支架和膜单元、1 个阀门支架和阀门单元、仪表等。每个膜堆设 272 支超滤膜组件,每个膜组件的有效膜面积为 40 m<sup>2</sup>,设计通量 70 L/(m<sup>2</sup>·h),最大为 80 L/(m<sup>2</sup>·h)。

每个膜堆控制阀门包括 1 个电动调节阀和若干个气动开关阀门。其中电动调节阀为进水电动调节蝶阀,气动开关阀分别为进水阀、产水阀、气洗阀、放空阀、反洗进水阀和排水阀等。

每个膜堆仪表包括进水产水压力变送器、产水流量计、产水浊度仪。

② 进水系统

原水提升系统由吸水井、进水泵及配套管路、阀门、仪表、电气系统等组成。

进水泵房设 12 台(8 用 4 备)提升泵,每 2 台对应 1 列膜组,单泵流量 3 500 m<sup>3</sup>/h,扬程 250 kPa。

进水泵根据运行跨膜压差变频控制,改变水泵扬程,保持每个膜堆的瞬时流量基本不变。原水提升系统采取自动控制实现与外部系统的自动协调运行。进水泵与吸水井、清水池实行联动控制。

③ 预处理系统

超滤膜前设置自清洗过滤器作为预处理系统。

自清洗过滤器系统由自清洗过滤器、进出口管道阀门、仪表和控制系统组成。

每列膜堆均设自清洗过滤器,共设28台,单列设7台(6用1备),单台处理水量 $1\,200\text{ m}^3/\text{h}$ ,过滤精度 $200\text{ }\mu\text{m}$ 。自清洗过滤器进口配手动隔离阀、自动切换控制阀;出口配止回阀、手动隔离阀。

#### ④ 反洗系统

设定运行最大跨膜压差值,达到设定值时反洗系统自动进行反洗。一般每 $60\sim 120\text{ min}$ 就要进行水冲和气冲洗。

每支膜反洗水流量为 $1.8\text{ m}^3/\text{h}$ ,气洗流量为 $5.1\text{ m}^3/\text{h}$ ,历时 $60\text{ s}$ ;每支膜顺冲水量为 $3.4\text{ m}^3/\text{h}$ ,历时 $30\text{ s}$ 。设置反洗水池1座,有效容积 $800\text{ m}^3$ ,进水管接自膜系统出水母管。反冲洗水泵变频调速。反洗设备间设置气洗罗茨风机6台(4用2备),单台流量 $1\,000\text{ m}^3/\text{h}$ ,压力 $70\text{ kPa}$ 。

#### ⑤ 药洗系统

药洗工艺过程分为维护性化学清洗(CEB,约1次/周)和恢复性化学清洗(CIP,周期约3个月),化学药剂包括次氯酸钠、氢氧化钠、柠檬酸和盐酸。

#### ⑥ 压缩空气系统

空气动力系统包括储气罐、螺杆式空压机、过滤器、冷干机及其他附属设备和附件。

#### ⑦ 废水回收系统

药洗废液排入中和池,用亚硫酸氢钠、盐酸和氢氧化钠中和。采用中和水泵做内循环,在线加药中和。中和系统包括中和池、循环潜污泵、酸加药、碱加药、还原剂加药及pH、ORP仪表和阀门管道等。

#### ⑧ 检测系统

完整性检测方法包括压力衰减检测和气泡观察法。压力衰减检测用空气注入超滤膜壳,当压力稳定后切断注入超滤膜壳的空气流量,在规定时间内测量压力衰减数据,据此判断膜丝是否破损。气泡观察法通过观察每个组件上侧口连接管路上的一段透明管,由是否有气泡判断有问题的膜组件。

### 5 运行效果

一期工程于2019年11月全面运行通水,调试期间,运行水量约 $30\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,常规工艺砂滤池出水浊度为 $0.1\text{ NTU}$ ,超滤膜出水浊度为 $0.05\text{ NTU}$

以下。砂滤出水中粒径 $<2\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒数在 $1\,600$ 个/ $\text{mL}$ 左右,超滤后颗粒数经常不到 $130$ 个/ $\text{mL}$ ,超滤出水洁净透明。有效去除了包括隐孢子虫、贾第鞭毛虫、细菌和病毒等在内的微生物,显著提高了饮用水的微生物安全性。总体加氯量比同水源的常规水厂减少约 $1\text{ mg/L}$ 。

### 6 结语

北部水厂的设计本着“可靠、安全、先进”的原则,同时考虑到广州市作为国际大都市的定位,一期工程采用常规处理+臭氧生物活性炭+超滤膜处理工艺,该工艺对今后水源水质变化和供水水质标准提高具有较好的适应性,将供水水质提高到国际先进水平,并具有较高的应对水源突发污染的能力。水厂工艺运行灵活,对安全优质供水有重大意义,对类似水源(如珠三角地区)有参考和示范作用。

本项目创新设计:活性炭滤池采用全国首座上向流颗粒炭滤池,获国家新型发明专利;深入研究超滤对微生物污染的作用效果,采用全球规模最大的压力式超滤膜系统;结合主流程采取投加应急处理药剂措施应对突发性水源污染事件,具有适用范围广、反应快、投加灵活的特点,可保证安全供水。

### 参考文献:

- [1] 钟高辉,陆少鸣. 浸没式超滤工艺在给水处理中的应用研究[J]. 水处理技术,2012,38(2):91-93,97. ZHONG Gaohui, LU Shaoming. Study on the application of submerged ultrafiltration technology in feed water treatment[J]. Technology of Water Treatment, 2012, 38(2):91-93,97(in Chinese).
- [2] 芮旻,周杰敏,许嘉炯,等. 饮用水处理工程超滤膜系统设计关键技术[J]. 给水排水,2010,36(1):21-26. RUI Min, ZHOU Jiemin, XU Jiajiong, et al. Key technologies of the ultrafiltration membrane drinking water treatment design [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(1):21-26(in Chinese).

作者简介:李丰庆(1971-),男,河南正阳人,大学本科,高级工程师,副总工程师,主要从事市政给排水设计研究工作。

E-mail:527249233@qq.com

收稿日期:2020-03-10

修回日期:2020-05-12

(编辑:孔红春)