

肇庆高新区超滤膜水厂示范工程运行分析

鄢忠森¹, 瞿芳术¹, 梁恒^{1,2}, 李冬平³, 孙国胜³, 李圭白¹

(1. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 城市水资源开发利用<北方>国家工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 广东粤海水务股份有限公司, 广东 深圳 518021)

摘要: 广东粤海水务有限公司对肇庆高新区水厂原华侨水厂一期工程进行了升级改造, 利用超滤膜代替传统砂滤, 提升了肇庆高新区的供水能力和水质, 为水厂的升级改造提供了示范。该工程充分利用地形优势, 采用了自流浸没式超滤膜池, 同时按低通量设计和运行, 具有显著特点。通过分析肇庆高新区超滤膜水厂运行状况, 总结了超滤膜应用于老水厂改造的工程经验, 为超滤技术在老水厂升级改造中的应用提供了借鉴。

关键词: 超滤膜; 饮用水处理; 升级改造; 膜污染

中图分类号: TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)07-0046-04

Operational Analysis of Ultrafiltration Membrane Water Treatment Demonstration Project at Zhaoqing High-tech Industrial Development Zone

YAN Zhong-sen¹, QU Fang-shu¹, LIANG Heng^{1,2}, LI Dong-ping³, SUN Guo-sheng³,
LI Gui-bai¹

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. National Engineering Research Center of Urban Water Resources, Harbin 150090, China; 3. Guangdong Yuehai Water Co. Ltd., Shenzhen 518021, China)

Abstract: Guangdong Yuehai Water Company Limited upgraded Zhaoqing High-tech Industrial Development Zone Water Plant (first phase construction of the former Huaqiao Water Plant). The project used ultrafiltration membranes to replace the traditional sand filtration, and enhanced water supply capacity and water quality, also provided a demonstration to the upgrading of water plants. The project made full advantage of the terrain, and used gravity-driven immersed ultrafiltration pool. It was designed and operated in low flux with distinguishing features. By analyzing operating conditions of the ultrafiltration membrane water plant, and summarizing the engineering experience of old water plant retrofits, advices on the application of ultrafiltration technology in old water plant retrofits were provided.

Key words: ultrafiltration membrane; drinking water treatment; upgrade and retrofit; membrane fouling

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07404-003); 黑龙江省博士后特别资助项目(LBH-TZ 1612)

通信作者: 李圭白 E-mail: Liguibai@vip.163.com

1 水厂介绍

1.1 工程背景

肇庆高新区超滤水厂为原华侨水厂一期工程。华侨水厂原水取自北江,供水规模为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用常规工艺,工艺流程为网格絮凝反应—斜管沉淀—无阀滤池。近年来,随着该流域经济发展,地表水水质日趋恶化,且该厂始建于1990年,年代久远,厂内大部分设备机械和管件设施老化严重。由于设计时间较早,老设施未进行自动化生产的相关设计,操作管理基本依赖手动,对运行操作和管理造成很大不便。

为了提升高新区的总供水能力,以及保障水厂出水水质,粤海水务公司对该水厂的一期工程进行了技术升级提标改造^[1],依托广东省教育部产学研结合重大项目,建设超滤示范工程,并于2012年9月投产运行。

1.2 工艺介绍

由于旧厂使用的网格絮凝反应池与斜管沉淀池运行较为稳定,有较好的预处理效果,故该示范工程在邻近空地扩建一组相同的预处理构筑物(规模为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),使得总处理规模达到 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。由于老工艺中无阀滤池的内部结构较复杂,改造不易,在该工程建设中予以拆除,原位新建处理容量为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的超滤膜池。改建后水厂工艺流程见图1。

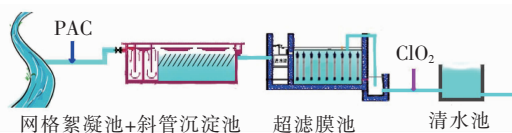


图1 改建后水厂工艺流程

Fig.1 Flow chart of WTP after reconstruction

由图1可知,经取水泵房取来的北江水,在水厂内通过加矾系统投加聚合氯化铝,投量根据原水浊度设定。通过管式混合器混合后,原水被输送至网格絮凝池,絮凝时间约为15 min。网格絮凝池与沉淀池合建,絮凝后的水通过配水花墙进入沉淀池,沉淀时间约为17 min,设计流速为0.215 5 m/s。通过预处理,原水中的悬浮颗粒、胶体和大分子物质被去除,减少了对后续超滤膜的污染。预处理的水经进水管均匀进入4个膜池。超滤膜设计通量为 $24.8 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。使用的膜组件为立升的PVC合金膜,有效膜面积为 15 m^2 、公称孔径为 $0.01 \mu\text{m}$ 、膜纤维

内/外径为1.0/1.6 mm、截留分子质量为50 ku。该膜具有通量大、价格低、运行跨膜压差低、耐污染能力强等特点,且pH值适用范围广(1~13),耐酸碱,最高运行温度为 40°C ,最高抽吸压力为80 kPa。通过膜池与清水池间液位差形成的虹吸作用,膜池内水透过超滤膜进入出水渠道,然后经过清水管路被输送至清水池内。

2 净水效能

2.1 浊度的去除

由于8月中下旬有几次强降雨,导致原水浊度高涨,最高时达到700 NTU。经过预处理,超滤进水浊度较为稳定,集中在2 NTU左右,在原水浊度最大的8月20日,超滤进水浊度最高为6.62 NTU。整体上,预处理平均除浊率达到87.46%,去除效果较好。

超滤出水浊度非常稳定,最低为0.028 NTU、最高为0.078 NTU。超滤膜的公称孔径仅为 $0.01 \mu\text{m}$,能较好截留水中的颗粒,因此在膜本身完好的情况下,不可能有大颗粒跑出。在8月20日,该厂并行的V型滤池在应对高浊度水时出现出水短时浊度高于1 NTU的情况。与超滤相比,砂滤孔隙较大,对于粒径为0.5 mm的细砂,形成的孔径约为 $80 \mu\text{m}$,过滤过程主要通过机械筛滤去除大粒径颗粒,对于小颗粒物质主要通过吸附截留。而滤池的吸附容量有限,并且当滤速提高时颗粒极易脱附而影响出水水质^[2]。对比可见,超滤能保障出水浊度的稳定性。

2.2 出水生物安全性

在生物安全性上,水厂日常检测的常规指标主要为细菌总数、总大肠菌群数和耐热大肠菌群数。图2为一个维护性清洗周期内超滤池与V型滤池出水的总大肠菌群数对比。原水的总大肠菌群数为200~900 CFU/100 mL。可以看出,超滤工艺出水总大肠菌群数极低,在一个维护性清洗周期内最高时仅为5 CFU/100 mL。对于水中的微生物,超滤具有良好的截留能力,理论上出水总大肠菌群数应为零。这可能是因为,长期运行过程中,维护期间水量较少,滋生了少量微生物。在观测的15 d中,出现多次总大肠菌群数为零的情况,说明超滤在保证微生物安全上有良好效果。而从V型滤池出水总大肠菌群数可以看出,普通砂滤并不足以保障饮用水的生物安全性。

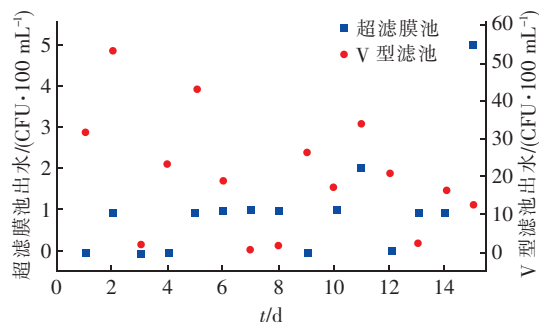


图2 超滤膜池与V型滤池出水的总大肠菌群数对比

Fig. 2 Comparison of total coliforms in ultrafiltration membrane and V-type filter effluent

2.3 有机物

由于原水水质较优,有机物含量较低, COD_{Mn} 年平均值为2.24 mg/L,除个别时间外,均低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的限值(3 mg/L)。通过两套工艺的处理,有机物得到一定的去除,V型滤池对 COD_{Mn} 的平均去除率为32.19%,超滤工艺对 COD_{Mn} 的平均去除率为36.21%,整体超滤较优,但具体到某天,超滤并无绝对优势。通过混凝,可以去除原水中大部分憎水成分、大分子物质以及小部分亲水成分和小分子物质^[2]。叶挺进等人的研究表明珠江水中以分子质量<1 ku的有机物为主^[3],而该厂使用的超滤膜截留分子质量为50 ku,因此对有机物的去除效果并不明显。

3 超滤系统

3.1 运行模式

该厂的预处理设施出水液位高于清水池3.22 m,故在超滤系统中设置了两种出流方式。一是采用膜池液位与出水槽的液位差形成的虹吸出水,二是在膜污染较为严重、虹吸出水水量不足或无法出水时,利用抽吸泵抽吸出水。超滤系统已连续运行了22个月,一直使用虹吸系统进行产水,抽吸系统尚未使用。虹吸出水管上设有调节阀,通过调节阀门开启度调节产水量。浸没式超滤膜共分为4个膜池,根据实际供水需求,4个膜池可依据原水流量轮流使用。

3.2 运行参数

当膜处理池运行一段时间后,沉后水中的颗粒物会在膜池里积聚,同时还可能在膜丝表面形成一个附着层,导致膜阻力增加,影响超滤膜组件的产水能力,此时需对膜组件进行清洗。日常维护主要采用水力反冲洗及维护性化学清洗。

① 水力反冲洗

目前,水厂预设的物理反冲洗周期主要分为冬、夏两季的运行方式。冬季的反冲洗周期为120 min,夏季的反冲洗周期为180 min。反冲洗过程:首先曝气刷洗30 s,压力为26 kPa;然后气水同步反冲洗60 s,水压为22 kPa。冲洗完后排污,每4次排空膜池1次,其他3次为直接排污至过滤液位重新过滤。

② 维护性化学清洗

随着运行时间的增加,膜丝表面的污染会越来越严重。当气水反冲洗已不能恢复浸没式超滤膜的水处理能力时需要进行维护性化学清洗。维护性清洗主要通过反冲洗水泵投加次氯酸钠,并在曝气混合后浸泡一段时间。维护性化学清洗主要是利用次氯酸根的强氧化性去除膜表面和膜孔中有机污染物和微生物污染物^[4]。具体操作过程如下:

浸没式超滤膜的维护性清洗周期为15 d(运行时间),清洗前先进行一次气水反冲洗,然后排污至液位为1.70 m,通过水力反冲管道和投药管共同投药,投药管投加浓度为10%的次氯酸钠,通过与水力反冲洗管道的进水混合使得NaClO溶液浓度降为0.2%,液位达到2.75 m时停止进药。药液透过膜,与膜池水混合,依据投药前后液位高度,膜池次氯酸钠平均浓度约为0.08%,浸泡1 h,再进行一次气水反冲洗,然后排空膜池。最后让膜池重新进水至2.70 m后再进行一次气水反冲洗,结束后排空膜池,使得残留在膜丝表面的NaClO被冲洗掉。根据产水实际需求可适当延长浸泡时间。

3.3 膜污染状态

在实验室研究中,超滤膜大都在恒通量下运行,因此常用某定通量下的跨膜压差变化来反映膜污染情况。而在生产实践中,由于城镇居民用水的波动性,且清水池的容积一定,水厂的产水量也随时间波动。在该水厂运行中,根据需水量调节预处理水量,通过调节膜池出水阀门开启度,控制膜池液位,变通量运行,此时跨膜压差难以反映膜污染状况。为此,以膜阻力为考察指标来研究膜污染情况。基于达西定律,膜阻力(R_t)可用下式计算^[5]:

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_t} \quad (1)$$

式中, J 为膜通量, $m^3/(m^2 \cdot s)$; ΔP 为跨膜压差,Pa; μ 为动力粘滞系数,Pa·s; R_t 为膜阻力, m^{-1} 。

由于水厂生产过程中仅在进出水总管上设置电

子流量计,故对于膜池流量的统计仅有4个膜池的总流量。在生产记录上,采取1d两次随机记录膜池的跨膜压差。由于4个膜池在运行工况上相近,故以4个膜池的平均阻力来反映膜池的整体污染状况。图3反映了该厂在2012年12月—2014年3月期间膜阻力与原水浊度的变化。

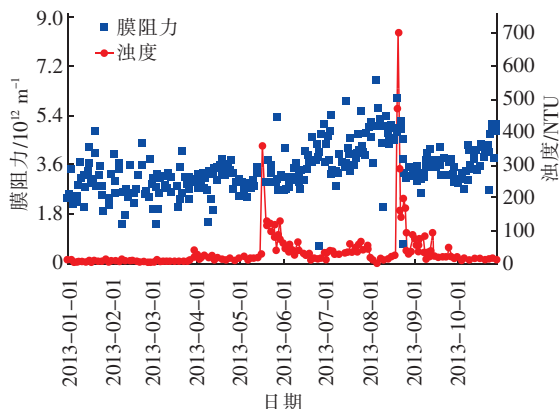


图3 膜阻力、原水浊度随时间的变化

Fig. 3 Variation of membrane resistance and turbidity of raw water with time

由于膜池非同步运行,随机采用膜池跨膜压差折算的膜阻力会在一定范围内波动,但依然能反映超滤膜整体的污染趋势。由图3可以看出,膜阻力随过滤时间的增加而逐渐增加。通过反冲洗、维护性化学清洗,膜阻力在局部减少。通过膜阻力变化与同期的原水浊度对比,发现高浊度水与膜阻力增长有很大的相关性。如2013年5月中旬,暴雨导致的原水浊度高涨,相应的膜污染增长迅速。8月20日,原水浊度高达700 NTU,记录的膜池进水浊度为6.62 NTU(但高浊度原水通过前段预处理,浊度测定上存在滞后性,实际浊度应高于记录值)。水厂对膜进行维护性清洗,即采用次氯酸钠浸泡2d,同时进行间歇式曝气,膜阻力得到降低。

4 结论与建议

① 集约化设计

新的饮用水卫生标准的实施,使得许多老水厂面临着升级改造。肇庆高新区水厂通过直接改造滤池为超滤膜池,在增加少部分占地的情况下,提高了出水水质及水量,成功经验值得其他水厂借鉴。超滤膜的高密度装填,使得相同面积膜池的产水能力可高达普通滤池的3倍。超滤的集约化设计为地面空间有限的水厂的升级改造提供了可能。针对优质的北江水,利用超滤代替传统滤池后加设膜池,减少

了工程投资及运行成本。经过近两年的运行,在无滤池处理的条件下,依然能有效控制膜污染。

② 超滤水厂的科学运行

超滤系统在运行上可采用自动与手动运行方式。自动模式采用恒定模式运行,未曾考虑来水水质影响,使得膜池运行上存在能量浪费。手动模式则依赖工人经验。然而,由于居民用水不均,大部分重力流膜水厂采用了变通量的运行模式,不同通量下的跨膜压差不能直接反映膜污染状况,故而难以决定何时对膜进行清洗。为此,水厂有必要确定不同通量下进行反冲洗、化学清洗的临界跨膜压差。

此外,超滤在应对高浊水时虽能保证出水水质,但极易造成膜孔堵塞,在采用超滤膜直接替代普通滤池时,应采取强化混凝等措施控制膜池进水浊度。

参考文献:

- [1] 徐叶琴,谭奇峰,李冬平,等. 肇庆高新区水厂超滤膜法升级提标改造示范工程[J]. 供水技术,2012,6(5):44-47.
- [2] 严煦世,范瑾初. 给水工程[M]. 北京:中国工业出版社,2011.
- [3] 叶挺进,何君,刘超斌,等. 珠江水中有机物分子量分布及其去除研究[J]. 供水技术,2010,4(3):12-16.
- [4] 陈益清,李凤,乔铁军,等. 基于化学清洗的超滤膜污染研究[J]. 中国给水排水,2013,29(17):51-54.
- [5] 王兆之. 地表水的超滤通量、厌氧氨氧化及低温氨氮去除[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.



作者简介:鄢忠森(1990-),男,福建福州人,博士研究生,研究方向为膜法水处理技术。

E-mail: talent3712@126.com

收稿日期:2016-08-12