

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.14.016

饮用水深度处理工程中的膜工艺设计要点

彭晓旭, 陈寿彬

(福州城建设计研究院有限公司, 福建 福州 350001)

摘要: 福州某新水厂深度处理工程土建规模为 $20\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,设备规模 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,其中主要设备均为现状旧水厂搬迁利用。新水厂经升级改造后,在现状常规净水工艺基础上形成了“混凝+沉淀+砂滤+超滤+纳滤+反渗透+氯消毒”的组合工艺。工艺流程中设多处超越管线,可实现灵活调度运行,提高水厂将来应对水源水质及供水水质标准变化的能力,同时可降低运行成本。平面布置中通过叠建、合建等方式,在保证产水规模的同时,可节省用地。浓水排放管线充分利用现状已建设施,以节省工程造价,缩短项目工期。工程建成运行后,组合工艺能有效应对不同水源水质,膜工艺出水电导率去除率基本稳定在99%以上,出水水质达到优质饮用水标准。

关键词: 常规净水工艺; 纳滤; 浓水排放

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)14-0096-06

Key Points of Membrane Process Design in Drinking Water Advanced Treatment Project

PENG Xiao-xu, CHEN Shou-bin

(Fuzhou City Construction Design & Research Institute Co. Ltd., Fuzhou 350001, China)

Abstract: The scale of the advanced treatment project of a new waterworks in Fuzhou is $20\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, and the scale of the equipment is $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, among which the main equipment is relocated from the existing old waterworks. After upgrading and reconstruction of the new waterworks, a combined process consisting of coagulation, sedimentation, sand filtration, ultrafiltration, nanofiltration, reverse osmosis and chlorine disinfection is adopted on the basis of the current conventional water purification process. Several transcendental pipes are set in the process flow, which realize flexible scheduling, improve the ability of the waterworks to cope with future source water quality and water quality standard changes, and reduce the operation cost. In the layout design, overlapping construction and co-construction of structures saves footprint area while ensures the scale of water production. The concentrated water discharge pipeline makes full use of the existing facilities to save the project cost and shorten the construction period. After completion and operation of the project, the combined process effectively deals with the water quality of different water sources. The conductivity removal efficiency of the membrane process basically stabilizes above 99%, and the effluent quality meets the standard of high-quality drinking water.

Key words: conventional water purification process; nanofiltration; concentrated water discharge

目前,膜处理技术已被广泛应用于市政给水厂水质提升工程中,该技术主要包括微滤(MF)、超滤

(UF)、纳滤(NF)及反渗透(RO)四类,其中以超滤或纳滤为核心的膜工艺在新厂建设或旧厂升级改造中应用最广泛^[1]。如广州北部水厂采用“常规处理+臭氧+生物活性炭+超滤+消毒”工艺,出水水质优于国标,且提升了水厂抗生物风险能力^[2];张家港第三、四水厂采用以纳滤为核心、微滤或超滤为预处理工艺的双膜工艺,在提供高品质饮用水的同时,提高了水厂应对突发污染风险的能力^[3-4]。

1 工程背景

2018年,为应对闽江炎山取水口咸潮上溯的情况,在保障水厂供水规模(水厂现状供水规模为 $11.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,要求最终产水规模 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$)的同时,福州某旧水厂在常规净水工艺基础上(V型滤池后端)增设“超滤+纳滤+反渗透”膜组合工艺,运行效果良好,在进水氯化物(以Cl⁻计)为1 500 mg/L(最高设计进水氯化物浓度)时,出水中氯化物 $\leq 200\text{ mg/L}$,咸潮期出厂水中氯化物含量满足国标要求。

2021年8月该旧水厂废除,膜处理设备搬迁至新水厂继续利用,新水厂饮用水深度处理工程于2021年10月投入运行。由于水厂闽江取水口受咸潮影响愈发严重,随着某大型引调水工程建成通水,2022年6月项目所在地各水厂主水源由原闽江切换为大樟溪。

2 原水水质

新水厂主水源为大樟溪,备用水源为闽江。主水源基本为地表水Ⅱ类水质,备用水源除氯化物、化学需氧量、粪大肠菌群等存在超标外,基本为Ⅲ类水质(见表1)。

表1 水源水质

Tab.1 Water quality of water source

项 目	《地表水环境质量标准》 (GB 3838—2002)基本项目 标准限值			2022 年1月 闽江水 源	2022年 10月大 樟溪水 源
	I类	II类	III类		
pH	6~9			7.00	7.30
溶解氧/(mg·L ⁻¹)	饱和率 90% (或7.5)	6	5	8.79	7.30
COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	2	4	6	2.31	1.84
COD/(mg·L ⁻¹)	15	15	20	47	<12
BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	3	3	4	<2	<2
氨氮/(mg·L ⁻¹)	0.15	0.5	1	0.278	<0.03
粪大肠菌群/(个·L ⁻¹)	200	2 000	10 000	55 000	1 300
氯化物/(mg·L ⁻¹)	250			630	11.5

3 工艺流程

水厂中常用涉膜工艺包括:原水+膜处理+消毒、原水+沉淀+膜处理+消毒、原水+沉淀+砂滤+膜处理+消毒或原水+沉淀+砂滤+臭氧活性炭+膜处理+消毒等。新水厂主水源大樟溪水质良好,常规工艺已能满足国标要求。为提高水厂应对主水源突发污染能力,提升出水口感,以及为保障咸潮期时大樟溪事故而启用闽江水源时水厂供水能力,拟将膜组合工艺置于现状V型滤池后端。具体工艺流程见图1。

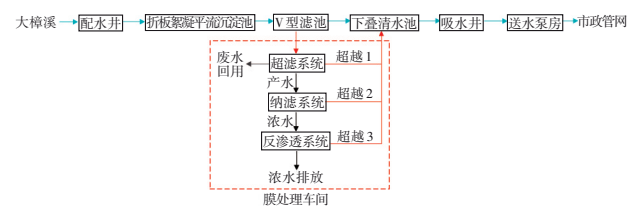


图1 水厂工艺流程

Fig.1 Process flow chart of the waterworks

V型滤池产水分两路,一路至现状叠建清水池,另一路至超滤进水池(进水管上设调节阀),经增压后进入超滤系统。超滤产水分两路,若产水水质满足优质水标准,则直接进入叠建清水池;若产水水质不满足要求,则收集至超滤产水池经增压进入纳滤系统,同时为进一步提高产水率,纳滤浓水进入反渗透系统,反渗透浓水外排,产水与纳滤产水混合后进入叠建清水池。最终与常规工艺产水混合,经增压后进入市政供水管网。

4 工程设计

4.1 项目规模

新水厂规划总供水规模 $30\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,近期供水规模 $20\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。近期工程部分建、构筑物(如送水泵房、加药间、泥处理设施等)土建按供水规模 $30\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 一次建成。

新水厂供水范围主要为老、旧城区,为与近期工程配套,本次提升工程土建按 $20\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 建设,考虑到旧水厂已实施饮用水深度处理,其膜设备产水量基本满足用水需求,在现阶段财政资金不足的情况下设备按 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 安装,其中膜处理设备由旧水厂搬迁,后期根据需求再增加膜设备。

4.2 总平布置

新水厂厂区内可利用地块有限,本着集约用地、工艺流程顺畅原则,新建膜处理车间布置于厂

区东南侧空地,现状V型滤池南侧。水厂总平面布置见图2。

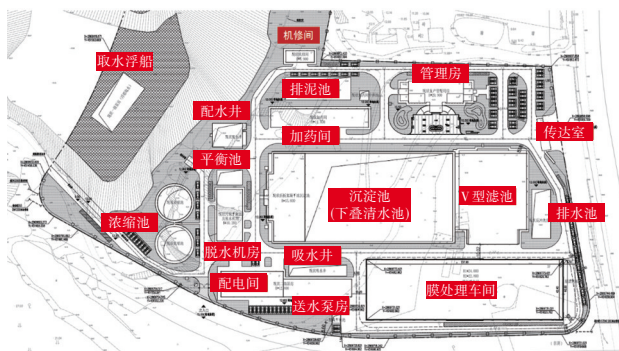


图2 水厂总平面布置

Fig.2 General plane layout of the waterworks

4.3 膜处理车间

4.3.1 车间布置

因厂区用地不足,将车间设计为三层框架结构,建筑高度 22.80 m,平面尺寸 137.50 m×42.00 m。

各层平面布置见图3。



图3 各层平面布置

Fig.3 Plane layout of each floor

其中一层为水泵及附属配套生产层,包括各类水泵间、化洗间、加药间、配电间、水池等;二层为管道区;三层为膜组,主要有超滤膜 12 组、纳滤膜 10 组、反渗透膜 4 组及值班中控室,并预留远期膜组安

装空间。

4.3.2 超滤系统

超滤系统前设进水池及提升泵。其中进水池有效容积约 2 300 m³, 设提升泵 3 台 (2 用 1 备, 单台 $Q=2\,550\text{ m}^3/\text{h}$, $H=460\text{ kPa}$), 预留远期 3 台泵位。超滤膜采用外压式死端过滤膜, 材质 PVDF, 共 12 套, 单套含 80 支膜元件, 设计通量 $65.57\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 设计产水率 95.9%, 预留远期 14 套膜组安装位置。

4.3.3 纳滤系统

纳滤膜系统前设提升泵、高压泵及超滤产水池。其中产水池总有效容积4 300 m³,设提升泵3台(2用1备,单台 $Q=2\,315\text{ m}^3/\text{h}$, $H=500\text{ kPa}$),预留远期3台泵位;设高压泵11台(10用1库备,单台 $Q=465\text{ m}^3/\text{h}$, $H=760\text{ kPa}$),预留远期12台泵位;段间增压泵与纳滤膜组同步布置,共设11台(10用1库备,单台 $Q=220\text{ m}^3/\text{h}$, $H=500\text{ kPa}$)。纳滤膜组共10套,单套72支,7芯装,一级两段排列(48:24),设计产水率80%,预留远期12套膜组安装位置。

4.3.4 反渗透系统

反渗透膜系统前设提升泵、高压泵及纳滤浓水池,其中浓水池总有效容积450 m³,设提升泵2台(1用1备,单台 $Q=930\text{ m}^3/\text{h}$, $H=620\text{ kPa}$),预留远期1台泵位;设高压泵5台(4用1库备,单台 $Q=240\text{ m}^3/\text{h}$, $H=2\,540\text{ kPa}$),预留远期6台泵位。反渗透膜组共4套,单套26支,6芯装,两套共用膜架,设计产水率60%,预留远期6套膜组安装位置。

4.3.5 加药系统

纳滤及反渗透膜系统主要投加还原剂、阻垢剂及非氧化性杀菌剂。还原剂采用 10% 的 NaHSO_3 溶液,投加浓度为 3 mg/L。阻垢剂采用 10% 有机磷酸盐系列溶液,投加浓度为 3 mg/L。非氧化性杀菌剂投加浓度为 3 mg/L,均为连续投加。

4.3.6 清洗系统

超滤膜含水反洗、正洗、气擦洗及化学清洗 (EFM 及 CIP 化学清洗)。设超滤反洗泵 2 台 (1 用 1 备, 单台 $Q=640 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=510 \text{ kPa}$); 反洗废水池 1 座, 有效容积 250 m^3 ; 废水回流泵 2 台 (1 用 1 备, 单台 $Q=200 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=150 \text{ kPa}$); 空压机 2 台 (1 用 1 备, 单台 $Q=10.5 \text{ m}^3/\text{h}$, $P=0.85 \text{ MPa}$); 化洗储罐 (单套 15 m^3)、化学清洗泵各 2 台 (单台 $Q=160 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=520 \text{ kPa}$), 酸洗采用柠檬酸溶液, 碱洗采用次氯酸钠 + 氢氧化钠混合溶液。

超滤清洗参数如表2所示。

表2 超滤清洗参数
Tab.2 Parameters for ultrafiltration cleaning

项目	正洗	反洗	气洗	EFM化洗	CIP化洗
清洗历时	30 s	50 s	30 s	2 h	2 h
清洗流量或通量	4.0 m ³ /h (每支组件)	100 L/(m ² ·h)	10.0 m ³ /h (每支组件)	2.0 m ³ /h (每支组件)	2.0 m ³ /h (每支组件)
清洗频率	与运行及反洗结合进行	1次/45 min	1次/45 min	1次/3 d	1次/30 d
药剂及浓度	超滤进水或产水	超滤产水	无油空气	1.0% 柠檬酸, 0.05%NaOH, 100 mg/L NaClO	2.0% 柠檬酸, 1.0% NaOH, 500 mg/L NaClO

纳滤及反渗透膜清洗含化学清洗及低压冲洗。酸性及碱性清洗分别采用2.5%酸性和碱性清洗剂,设化洗罐(单套15 m³)、化学清洗泵各2台(单台Q=240 m³/h,H=570 kPa);低压冲洗设水泵1台(单台Q=260 m³/h,H=580 kPa)。纳滤或反渗透清洗参数如表3所示。

表3 纳滤或反渗透清洗参数
Tab.3 Parameters for nanofiltration or reverse osmosis cleaning

项 目	低压清洗	化学清洗
清洗历时/h	0.5~1	2
清洗流量或通量/(m ³ ·h ⁻¹)	10.0(每支组件)	10.0(每支组件)
清洗频率	启动或停运时	1次/60 d
药剂及浓度	纳滤或反渗透产水	2.5%酸性或碱性清洗剂

4.3.7 废液处理系统

本工程在膜车间西侧设酸碱中和池1座,有效容积约100 m³。池顶设有自吸式循环泵,池内设pH检测装置,通过投入酸、碱中和试剂,并利用自吸泵循环搅拌作用,调节池内pH,水质达标后排入厂区污水系统。

4.3.8 浓水排放系统

经水量平衡计算分析,产水规模为20×10⁴ m³/d时,膜系统浓水排放量约1.59×10⁴ m³/d。浓水经De560 PE管道收集后,集中排放至厂区西侧三叉港内河口(为原旧厂浓水排放口,与外海连通,环评已批复),管道总长约4.40 km,全段采用开挖+隧洞明敷(利用现状新水厂原水管道隧洞)+水平定向钻组

合施工方式,管道路由见图4。

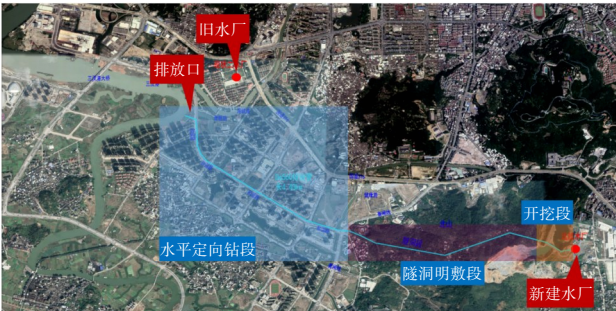


图4 管道路由示意
Fig.4 Schematic diagram of pipeline route

4.3.9 搬迁利旧情况

新、旧水厂厂址相距约5 km。本工程主要设备如膜组设备及阀门、部分水泵、电气自控仪表设备、管线等均为旧厂搬迁,过程中涉及工艺及电气仪表设备保护性拆除、吊装、仓储和膜组养护、安装等。同时,由于旧水厂膜车间为一层钢结构厂房,新水厂膜车间为三层框架结构厂房,且膜组位于第三层,经水力计算复核,部分水泵扬程不能满足设计需求,因此对其进行更换,同时将旧水泵搬迁至其他水厂提升工程进行利旧。主要设备搬迁利旧情况见表4。

表4 主要利旧设备
Tab.4 Utilization of main old facilities

设备名称	数量	备注
超滤膜设备、膜架及阀门	12套	搬迁利旧
纳滤膜设备、膜架及阀门	10套	搬迁利旧
反渗透膜设备、膜架及阀门	4套	搬迁利旧
超滤提升泵	3台	新增,现状搬迁至其他水厂
超滤反洗泵	2台	新增,现状搬迁至其他水厂
超滤废水回流泵	2台	新增,现状搬迁至其他水厂
纳滤提升泵	3台	新增,现状搬迁至其他水厂
纳滤高压泵及阀门	10台	搬迁利旧
段间增压泵及阀门	10台	搬迁利旧
反渗透提升泵	2台	废除现状,新增
反渗透高压泵及阀门	4台	搬迁利旧
超滤化学清洗泵	2台	新增
纳滤化学清洗泵	2台	新增,现状搬迁至其他水厂
反渗透化学清洗泵	2台	新增,现状搬迁至其他水厂
低压冲洗泵	1台	新增
电气自控及仪表	1套	搬迁利旧

5 设计特点

① 节省占地。新水厂可利用空地有限,考虑

安全退距后,基本无法实现大供水规模工艺提升改造。为此,设计中采用车间下方叠建水池、膜车间布置为多层、水池泵房和配电间合建等多种方式,将不同工艺模块集成化,总用地约 0.813 hm^2 ,其中进水池及膜处理车间用地约 0.613 hm^2 ,低于相关用地标准,为用地紧张的老旧水厂升级改造提供了借鉴。

② 设超越及调节措施。超滤进水池进水管设调节阀,砂滤池、超滤、纳滤、反渗透膜之间设超越管,运行中针对不同原水及产水水质要求,实现膜工艺与常规工艺产水的不同比例掺和,同时可实现全流程或短流程处理,提高新水厂应急处置能力。

③ 合理利用现状设施。原设计考虑浓水排放管沿现状国道、市政道路敷设至排放点,管道总长约 5.30 km ,沿线交通量大、地下管线复杂、穿越闹市区、造价高,因此最终设计利用已建管道隧洞检修通道(隧洞设计时未考虑浓水管道管位)进行管道明敷穿越,便于新、旧管道检修,同时节省工程造价,保证项目工期。管道管位示意图5。

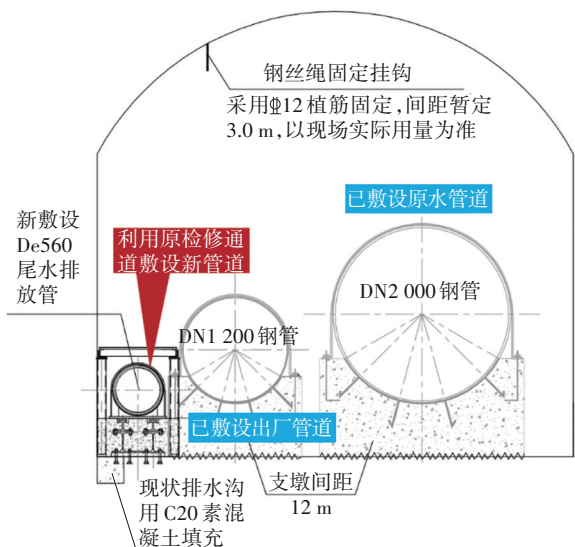


图5 管道管位示意

Fig.5 Schematic diagram of pipeline location

④ 大型膜水厂搬迁设计经验。搬迁中涉及工艺及电气仪表设备保护性拆除、吊装、仓储和膜组养护、安装,本工程相关经验可为类似工程提供参考。

6 优化建议

① 合理布局车间内功能分区。旧厂为单层

车间,所有设备、膜组、中控值班室等集中于一层,设备噪声大,管理人员工作环境差。新厂膜车间对噪声设备、膜组等分层布置,形成集中功能分区,同时设减噪降噪措施。将中控值班室设于车间第三层,噪声设备设于车间第一层,便于巡检管理,同时改善了人员工作环境。

② 设管道层或管沟。旧厂几乎所有管线明敷于膜架上方,设计时需考虑膜架承重,且需设钢支架保证管道运行安全,检修不便,管道纵横交错、美观不足。新厂统一设置管道夹层或管沟,形成管道功能分区,便于检修管理,同时提升车间膜组层视觉美观性。

③ 注重膜材质亲水性能。旧厂取用闽江水源时,旱季时不仅受咸潮影响,且原水中耗氧量较高。运行中造成超滤膜组跨膜压差上升速率快,化洗频率高,甚至造成膜组停运。一方面,建议设计中应考虑充足备用膜组,防止产水不足,影响后端膜系统运行;另一方面,拆膜分析表明,由于超滤膜亲水性能欠佳,导致化洗效果差,再投入使用时跨膜压差急剧上升,化洗频繁。

④ 超滤与纳滤或反渗透化洗系统应单独设置。旧厂为节省投资,同时便于维护管理,利用1套化洗系统,以阀门切换方式实现超滤与纳滤或反渗透化洗。实际运行中储罐及管道中的残留试剂较难彻底清除,由于超滤化洗中 NaClO 溶液具有氧化性,对芳香聚酰胺类纳滤或反渗透膜存在损伤风险。同时1套系统无法实现多套同时化洗。新厂膜车间设计时,超滤、纳滤及反渗透化洗系统单独设置、互不干扰。

⑤ 水泵应根据水源水质合理搭配。旧厂在水源咸潮期时,原水中氯化物含量变化幅度大,无规律可循,设计时水泵扬程常以较高氯化物浓度为依据计算选取,实际运行中大部分时段氯化物浓度低于设计值,极易造成水泵长时间低频运行,能耗增加。建议设计时在充分考虑工况预留的同时,要合理进行增压泵、高压泵搭配,如利用多台水泵串联并设出水超越管线,通过不同泵种启停避免水泵长时间低效运行。

7 运行情况

膜处理车间进水接自现状V型滤池,当水厂采用大樟溪或闽江水源(咸潮期除外)时,进水水质已

基本能满足甚至优于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),因此对进、出水常规水质指标进行比较意义不大。仅针对总产水电导率指标及单个膜组运行压力参数进行相关分析。

新水厂水源为闽江时,以2022年1月为例,膜车间进水电导率为400~1 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$,出水电导率为0.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 左右,达到优质饮用水标准。以1#纳滤膜组为例,一段进水压力基本在0.60~0.70 MPa,二段进水压力基本在0.50~0.70 MPa,浓水压力基本在0.50~0.70 MPa。实际运行中,为节省运行费用,水厂根据进水电导率变化幅度及供水水质标准情况,对膜处理车间进水总阀门进行开启度调节,同时控制现有膜组设备部分或全部开启,实现膜处理与常规处理产水不同比例掺和。

新水厂水源为大樟溪时,以2022年8月为例,膜车间进水电导率为50~70 $\mu\text{S}/\text{cm}$,出水电导率为0.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 左右,达到优质饮用水标准。以1#纳滤膜组为例,由于水质优于闽江水源,经过水泵变频调节或启停等各段运行压力均有不同幅度降低,一段进水压力基本在0.20~0.50 MPa,二段进水压力基本在0.20~0.35 MPa,浓水压力基本在0.10~0.30 MPa。实际运行中,由于原水水质较优,部分时段膜车间不投入运行亦可达到优质水标准,或间断开启超滤或超滤+纳滤,未开启反渗透膜组,在进一步提升口感的同时,还达到了对膜组维护保养的目的。

8 投资及成本

本工程膜组设备及配套阀门和部分水泵、电气仪表设备等均为现状搬迁利旧,总投资17 737.16万元,其中工程费用15 959.21万元(其中净水厂土建7 570.02万元,浓水排放管1 750.96万元,膜组设备拆除搬迁安装、养护、仓储、吊装存放、新增工艺及电气仪表设备等6 638.23万元),预备费515.31万元,铺底流动资金45.00万元,其他费用1 217.64万元。年平均单位处理成本0.95元/ m^3 ,年平均单位经营成本0.74元/ m^3 (闽江水源咸潮时理论测算值)。

9 结语

福州某新建水厂通过搬迁利旧原膜设备,在常规净水工艺基础上增设“超滤+纳滤+反渗透”组合

工艺,且在常规工艺与膜处理工艺间设调节阀和多处超越,实现了水厂的灵活调度运行,提高了水厂应对水源水质及供水水质标准变化的能力,对安全优质供水意义重大,对周边沿海地区类似水源有参考及示范作用。

参考文献:

- [1] 李圭白,田家宇,齐鲁. 第三代城市饮用水净化工艺及超滤的零污染通量[J]. 给水排水,2010,36(8): 11-15.
LI Guibai, TIAN Jiayu, QI Lu. The third generation of urban drinking water treatment process and zero-membrane fouling flux of ultrafiltration [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36 (8) : 11-15 (in Chinese).
- [2] 李丰庆. 我国超大超滤水厂——广州北部水厂工艺设计[J]. 中国给水排水,2021,37(10):66-70.
LI Fengqing. Process design of the super large ultrafiltration waterworks in China: Guangzhou Beibu waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37 (10):66-70(in Chinese).
- [3] 王少华,施卫娟,贺鑫,等. 纳滤深度处理在饮用水厂的应用与实践[J]. 给水排水,2021,47(10):13-19.
WANG Shaohua, SHI Weijuan, HE Xin, et al. Application and practice of nanofiltration advanced treatment in water treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47 (10) : 13-19 (in Chinese).
- [4] 刘牡,王少华,王同春,等. 微滤-纳滤组合工艺在饮用水深度处理中的大型工程应用[J]. 环境工程, 2021,39(7):151-155.
LIU Mu, WANG Shaohua, WANG Tongchun, et al. A large-scale engineering application of microfiltration-nanofiltration combined technology in drinking water advanced treatment [J]. Environmental Engineering, 2021,39(7):151-155(in Chinese).

作者简介:彭晓旭(1992—),男,贵州遵义人,工学硕士,工程师,注册公用设备工程师(给水排水),所长助理,主要从事市政给水工程设计工作。

E-mail:1049719390@qq.com

收稿日期:2023-01-05

修回日期:2023-01-12

(编辑:孔红春)