

城镇给排水工程设计案例专栏

王国栋, 谢美连, 靳斌斌, 等. 采用超滤+纳滤双膜法对某地下水水厂硬度去除的设计要点[J]. 净水技术, 2026, 45(2): 181-187.

Wang G D, Xie M L, Jin B B, et al. Design key points of hardness removal with UF+NF dual-membrane process in a groundwater WTP[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(2): 181-187.

采用超滤+纳滤双膜法对某地下水水厂硬度去除的设计要点

王国栋*, 谢美连, 靳斌斌, 徐 绎

(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 【目的】作为重要水资源之一,地下水水源在城市供水系统中发挥着重要作用,随着人们对高品质饮用水需求的不断提升,地下水硬度较高问题受到关注。为提升居民的饮用体验和生活幸福感,许多现状水厂通过新增深度处理工艺,降低水厂出水硬度以提升供水水质。【方法】文章对某地下水水厂采用双膜法去除硬度的相关设计要点展开探究,包括提标改造工艺、工艺流程的制定,设计规模、出水指标等主要设计参数的确定,以及针对改造重难点提出的解决措施。【结果】超滤膜、纳滤膜前分别设置 200 μm 自清洗过滤器、5 μm 保安过滤器,可有效保护膜组,膜回收率分别达到 96.5%、80.2%;采用超滤+纳滤双膜工艺后,地下水硬度由 440~470 mg/L 降低至 20~30 mg/L;膜产水与原水在混合配水井掺混 1 min 后供水,可实现均匀配水和较好经济性;水质水量平衡计算表明,废水总溶解性固体(TDS)质量浓度不高于 2 000 mg/L,满足排放标准;通过设计要点分析和借助三维设计,采用超滤+纳滤工艺设计,项目建设克服了用地紧张、现状管线和设施复杂等困难,实现了出厂水硬度 ≤ 200 mg/L的预期目标;项目吨水投资 1 550 元,总成本为 1.22 元/t,增加水费为 1.34 元/t。【结论】针对项目特点,设计过程中需分析项目重难点并提出对策,选择合适设计参数。该项目设计要点可给类似项目和其他设计者提供设计思路和参考借鉴。

关键词 地下水 硬度 超滤(UF)+纳滤(NF) 双膜法 设计要点

中图分类号: TU991 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-0177(2026)02-0181-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.02.019

Design Key Points of Hardness Removal with UF + NF Dual-Membrane Process in a Groundwater WTP

Wang Guodong*, Xie Meilian, Jin Binbin, Xu Yi

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

Abstract [Objective] As one of the important water resources, groundwater sources play a crucial role in urban water supply systems. With the increasing demand for high-quality drinking water, the issue of high groundwater hardness has received attention. In order to improve the drinking experience and happiness of residents, many existing water treatment plants have added advanced treatment processes to reduce the hardness of the outflow and enhance the quality of water supply. [Methods] This paper explores the relevant design points of using the double membrane method to remove hardness in a certain groundwater WTP, including the establishment of upgrading and reconstruction processes, process flow, determination of design scale, outflow indices, and selection of main design parameters, as well as corresponding solutions for the key and difficult points of the reconstruction. [Results] Setting up a 200 μm self-cleaning filter and a 5 μm precision filter in front of the ultrafiltration membrane and nanofiltration membrane respectively can effectively protect the membrane group, with membrane recovery rates of 96.5% and 80.2%; After adopting the ultrafiltration+nanofiltration dual-membrane process, the hardness of groundwater decreases from 440-470 mg/L to 20-30 mg/L; Mixing membrane produced water with raw water in a mixing well for 1 min before supplying water can achieve uniform water

[收稿日期] 2025-06-21

[通信作者] 王国栋(1993—),男,工程师,主要从事市政给水、排水设计等工作,E-mail:1649911384@qq.com。

distribution and good economic efficiency; The calculation of water quality and quantity balance shows that the mass concentration of total dissolved solids (TDS) of the wastewater is not higher than 2 000 mg/L, which meets the discharge standards; By analyzing the key design points and utilizing three-dimensional design, the project construction overcomes difficulties such as land shortage, complex pipelines and facilities, and achieves the expected goal of factory water hardness ≤ 200 mg/L by adopting ultrafiltration+nanofiltration process design; The project has an investment of 1 550 yuan/t, with a total cost of 1.22 yuan/t, and an additional water fee of 1.34 yuan/t. [**Conclusion**] Based on the characteristics of the project, it is necessary to analyze the key and difficult points of the project and propose countermeasures during the design process, and select appropriate design parameters. The design points of this project can provide design ideas and reference for similar projects and other designers.

Keywords groundwater hardness ultrafiltration (UF)+ nanofiltration (NF) dual-membrane process design points

作为水资源的重要部分,地下水是我国主要饮用水水源之一。据统计,地下水的可利用量占我国水资源总利用量的 18%左右,开采量占总用水量的 30%左右,有超过 290 多个城市以地下水为主要水源^[1]。据 2008 年全国 100 多个大、中城市的供水数据^[2],地下水占总水量的 37%左右,其中北方地区地下水的使用量高达 59.8%以上。

地下水具有分布稳定、水质稳定、水量充足等特点,水处理一般只需要简单的沉淀和消毒,制水成本较低。但随着人们对饮用水水质要求的提高,近年来,某些水源水硬度较高的问题受到越来越多地关注。

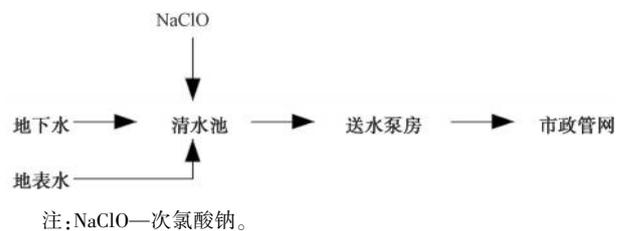
饮用水硬度过高主要是岩石层的矿物质丰富,导致水中含有过多的钙、镁离子。硬度过高的水通常被称为“硬水”,硬水会给生活和生产带来一定不利影响,如用硬水洗涤衣服,较为浪费肥皂,时间长了还会使衣服变硬;锅炉用水硬度高不仅浪费燃料,还会造成锅炉内结垢。随着人民对高品质用水需求的持续提升,通过提标降低供水硬度具有十分重要的意义。

1 某地下水水厂情况分析

1.1 水厂概述

某地下水水厂设计供水规模为 6 万~7 万 m^3/d ,下辖 4 个水源地,现状来水较为复杂,主要有厂区南部水源和东、西两路来水,同时,通过管网阀门控制,市区 3 个地表水厂调水也可进入厂区。地下水原水总硬度为 440~470 mg/L,其他指标均满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),原水通过深井泵提升后通过输水管进入清水池,消毒后即通过送水泵房送入市政管网。由于已有工艺不具备硬度去除功能,为保证出水硬度达标,通过和现状外调地表水在清水池掺混后供水,出水硬度在 360 mg/L 左右,

虽然满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中规定的 450 mg/L 限值,但距离高品质饮用水硬度指标仍有差距,且调水成本较高,亟须进行提标改造。水厂原工艺流程如图 1 所示。



注:NaClO—次氯酸钠。

图 1 水厂原工艺流程

Fig. 1 Original Process Flow of WTP

1.2 提标改造设计重难点分析

根据分析,该地下水水厂存在主要问题为水源水硬度较高,因此,确定合适的出厂水硬度指标,根据水质目标选择合适的提标改造工艺为项目设计重点之一。同时,合理确定提标规模、工艺参数科学合理、考虑运行便捷及节能等,是项目设计也需考虑的问题。

此外,厂区位于城市建成区,厂区布置紧凑,现状厂区建设有清水池、送水泵房、加氯间、高低压变配电间、综合楼等设施,可利用地仅为一个景观水池,面积约 1 000 m^2 ,用地资源紧张。由于水厂水源情况复杂及地下管网较多,提标改造需做好水源管线衔接及出水均匀分配,同时注意对现状设施避让和保护。

2 设计分析

2.1 工艺分析及参数选择

2.1.1 工艺选择分析

目前硬度的去除技术主要有基于沉淀反应的煮沸法、基于溶度积原理的药剂软化法、基于离子交换原理的离子交换软化法及基于物理筛分的膜过滤

法^[3-4]。离子交换软化法造价高、运行费用高,一般适用于小规模工业水处理;药剂软化法中石灰乳价格低廉、来源广泛,但需投加大量药剂,操作繁琐。随着膜技术的发展,膜工艺在降低总硬度的同时可以改善饮用水的口感,在水厂深度处理中应用广泛,膜法已成为软化除盐的主要措施。几种工艺对比如表1所示。于晓彬^[5]探究了济阳区济北水厂双膜法处理地下水工艺参数及运行状况,水厂采用超滤膜+反渗透膜组合工艺对地下水进行处理,系统回收率在76%~80%,脱盐率达99%以上,双膜处理后出水中硬度稳定在10 mg/L以下。刘成等^[6]采用反渗透膜装置测试了对水中硬度去除效果,结果表

明,处理后出水的总硬度可以由280~310 mg/L降低至10 mg/L以下,反渗透对水中一价离子去除率可达83%以上。

多数双膜法采用超滤膜+反渗透膜组合,对硬度去除率较高,但反渗透膜造价高、能耗高,去除硬度的同时也去除了水中一些对人体有益的元素。纳滤膜过滤精度介于反渗透膜和超滤膜之间,截留溶解性盐的能力为20%~98%。同时,纳滤膜的特殊之处在于其对单价阴离子盐溶液的脱除率低于高价阴离子盐溶液,如氯化钠及氯化钙的脱除率为20%~80%,而硫酸镁及硫酸钠的脱除率为90%~98%。

表1 几种硬度去除工艺对比
Tab. 1 Comparison of Several Hardness Removal Processes

项目	离子交换	纳滤	反渗透
处理效果	可去除水中钙、镁离子,但会引入钠离子	能截留纳米级物质,对钙、镁离子的去除效果好	过滤精度最高,能去除全部的钙、镁离子
优点	不受含量的限制,预处理要求简单、出水水质稳定	去除效果较好,操作压力小	去除效果好,对无机离子去除率可达95%
缺点	操作复杂,投资高,再生废水存在环境污染隐患	膜组件造价较贵	膜组件造价贵,不利于保留出水矿物质含量
占地面积	小	较小	较小
建设成本	高	较高	高
运行成本	高	较高	高

与反渗透相比,纳滤操作压力更小,能耗相对反渗透较低。综合考虑功能及建设、运行成本,项目设计采用超滤+纳滤工艺去除总硬度。

2.1.2 工艺流程确定

在超滤膜和纳滤膜之前,分别设置了自清洗过滤器和保安过滤器,主要作用是保护膜元件。自清洗过滤器和保安过滤器基于物理截留原理,过滤精度不同,自清洗过滤器内部为类似于格栅的滤网,可以根据压差或定时,自动对过滤元件进行清洗;具有小过滤压差、耐腐蚀、易清洗、全

自动运行、连续产水的特点;保安过滤器过滤元件为滤芯,过滤精度较自清洗过滤器更高,主要是应对纳滤膜前端膜丝脱落、反洗水中藻类滋生、混凝土脱落对纳滤膜影响。项目设计自清洗过滤器滤网孔径为200 μm,保安过滤器滤芯孔径为5 μm。

考虑到膜检修及应急供水,保留厂区原地下水供水系统,同时在超滤膜前设置了超越管,在进水指标较好的情况下,原水可直接进入纳滤系统,节能降耗。厂区提标后工艺流程如图2所示。

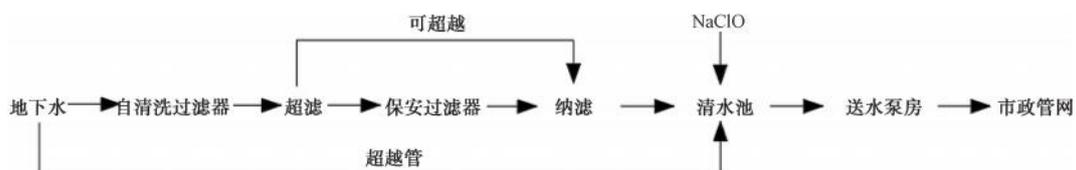


图2 水厂提标改造后工艺流程

Fig. 2 Process Flow after Upgrading and Reconstruction of WTP

2.1.3 出水指标确定

各个国家对饮用水中总硬度的限值存在较明显

差异,硬度过高或过低都有不利影响,确定合适的出水硬度指标对于工程投资和效益意义重大。研

究^[7]指出,长期饮用高硬度水容易形成结石,硬度过低,心脏病、糖尿病的患病率则上升,研究提出 170 mg/L 是一个比较合适的取值,综合考虑当地其他水厂出水硬度指标及工程投资,确定设置厂区出水总硬度 ≤ 200 mg/L。

2.1.4 膜设计参数

根据市面上主流膜产品性能及参考其他项目经验,设计超滤膜采用外压过滤,系统回收率为 90%,设计净通量为 49.84 L/(m²·h);纳滤膜设计一级两段式,其中一段和二段膜支数比为 2:1,系统回收率为 80%,设计通过平均通量为 21.6 L/(m²·h)。纳滤膜对硬度去除率设计为 90%,硝酸盐去除率为 55%,总溶解性固体(TDS)去除率为 50%。

超滤膜设计跨膜压差为 0.2 MPa,过滤周期为

60 min[产水 58 min,气洗、反洗、正洗时间为 2 min(可调)],水冲洗强度为 100 L/(m²·h),气冲洗强度为 10~15 m³/(h·单支膜),化学清洗周期为 1 月/次。纳滤膜设计操作压力为 0.5~0.9 MPa,水冲洗强度为 12 m³/(h·单支膜壳),清洗时间约 30 min,化学清洗频率为 1~3 月/次。为减少钙、镁离子结垢沉积对纳滤膜的影响,运行过程中连续投加阻垢剂(5 mg/L)及还原剂(2 mg/L)。

2.1.5 工程规模的确定

为降低工程投资,提标工程主要处理部分地下水,然后与未处理地下水掺混,根据厂区进出水水质硬度指标及膜系统回收率,设计测算了不同规模膜系统产水情况下,水厂总进水量、膜车间进出水量、掺混水量及厂区总供水量,如表 2 所示。

表 2 不同设计规模下进出水水量

Tab. 2 Inflow and Outflow Volume under Different Design Capacities

类别	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8
总进水量/(m ³ ·d ⁻¹)	1.97 万	3.95 万	5.92 万	7.89 万	9.87 万	11.84 万	13.81 万	15.79 万
膜车间进水量/(m ³ ·d ⁻¹)	1.39 万	2.78 万	4.17 万	5.56 万	6.94 万	8.33 万	9.72 万	11.11 万
膜车间出水量/(m ³ ·d ⁻¹)	1.00 万	2.00 万	3.00 万	4.00 万	5.00 万	6.00 万	7.00 万	8.00 万
掺混量/(m ³ ·d ⁻¹)	0.58 万	1.17 万	1.75 万	2.33 万	2.93 万	3.51 万	4.09 万	4.68 万
厂区供水量/(m ³ ·d ⁻¹)	1.58 万	3.17 万	4.75 万	6.33 万	7.93 万	9.51 万	11.09 万	12.68 万

由表 2 可知,膜车间产水规模为 4.00 万 m³/d 的情况下,可以掺混 2.33 万 m³/d 原水,水厂供水量基本满足水厂规划规模。考虑城市发展、水量预留及用地,膜车间设计规模按照 5.00 万 m³/d 设计,近期设备按照 4.00 万 m³/d 安装。

2.2 设计要点

2.2.1 水质水量平衡复核

确定了厂区提标规模和膜对不同物质去除率、

回收率等参数后,需要对废水指标做复核,确保废水 TDS 满足污水排入城镇下水道水质标准。图 3、图 4 分别是水厂近、远期水质水量平衡图,经过复核,废水可外排市政污水管道。

2.2.2 管线衔接及均匀配水

从厂区现状原水管道接出 DN1000 管道至膜系统,并设置多个阀门,通过阀门控制不同原水进入膜车间或应急情况下直接进入清水池,运行灵活。为

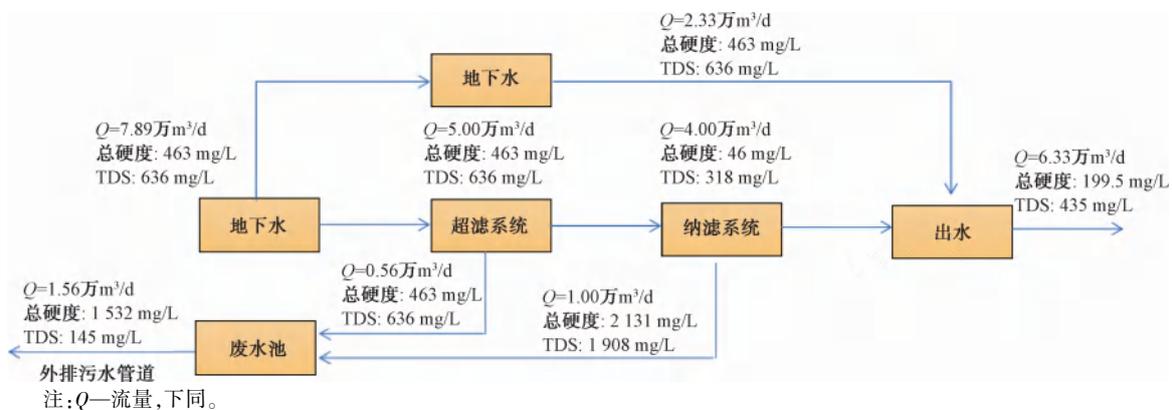


图 3 水厂近期水质水量平衡

Fig. 3 Water Quality and Quantity Balance of WTP in Near-Term

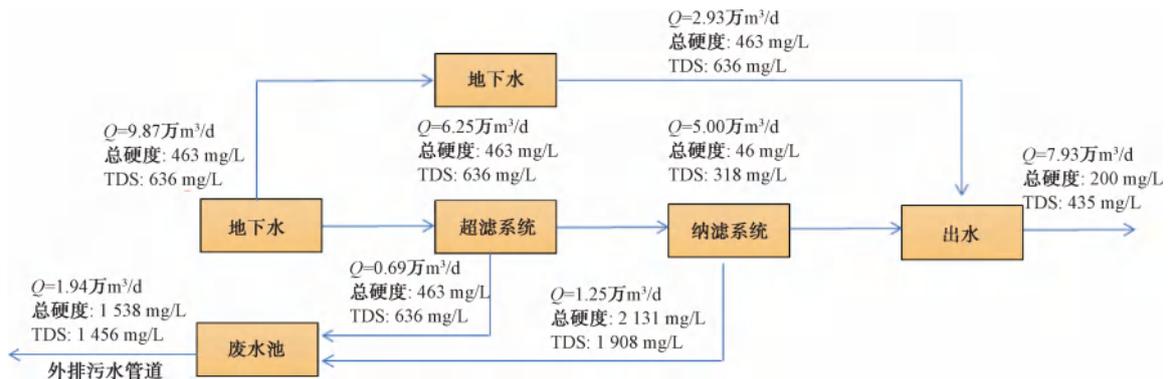


图4 水厂远期水质水量平衡

Fig. 4 Water Quality and Quantity Balance of WTP in Long Term

保证掺混效果,设计新建混合配水井,膜车间产水通过新建 DN800 管道重力输送至混合井,和未处理地

下水在混合井掺混并消毒后通过管道分两路输送至清水池(图5),设计掺混时间为 1 min。

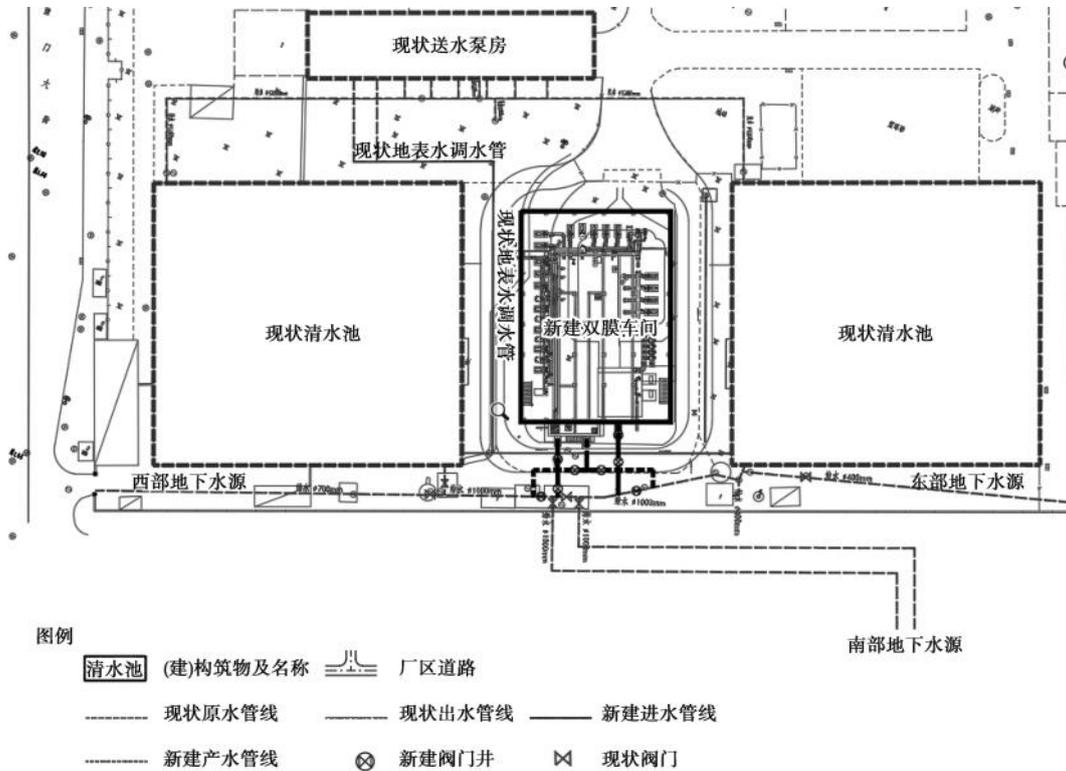


图5 提标后水厂布局及管线衔接

Fig. 5 Layout and Pipelines Connection of WTP after Upgrading

同时,根据现状清水池水位,根据水力计算确定了混合井及纳滤产水池水位,在纳滤产水池及混合井出水设置堰控制水头,以免纳滤池冲洗的时候产水池水位下降造成混合水倒流至产水池,不利情况下产水可通过清水池溢流管溢流,产水池和混合配水井不需额外做溢流管。

2.2.3 膜车间布局

因为用地紧张,双膜做常规单层厂房难以实现,

设计阶段对采用 2 层还是 3 层设计做了对比分析,如表 3 所示。

综合考虑建设标杆项目目标、美观性和功能投资,双膜车间设计为 3 层:下层为水池及设备,包含超滤进水池、产水池、纳滤产水池(兼做纳滤冲洗水池)和配套进水泵、高压泵、增压泵、冲洗泵、风机和过滤器等;中间层(管廊层)是加药间和各种连接管道,纳滤段间泵等;最上层为电气室和膜堆层,主要

表 3 膜车间布局设计对比

Tab. 3 Comparison of Layout Design in Membrane Workshop

方案	布局	优点	不足
2层布置	下层为水池及配套设备层,上层为连接管道(落地安装)和膜组	安装检修方便,经济实用	管道外露,美观性不足,通道也相对紧凑
3层布置	下层为水池及配套设备层,中层为管廊层(管道架空),上层为膜组	美观性好,膜堆层通道宽敞	车间土建量大,管道衔接复杂,相对2层方案耗能

为配套电气自控设备和超滤、纳滤膜组,单套膜组设计产水量为 1 万 m³/d,方便厂区根据需要灵活运行。

2.2.4 三维设计辅助

双膜系统管道较为复杂,在有限空间中需要布置超滤和纳滤膜配套进、产水管,水洗、气洗、药洗管

道等。本项目设计过程中借助目前较为流行的建筑信息模型(BIM)设计,在设计、安装实施过程中利用三维模型做指导,直观可视,有效避免了复杂管道之间的冲突碰撞。项目膜车间布置示意及管道连接三维设计如图 6 所示。

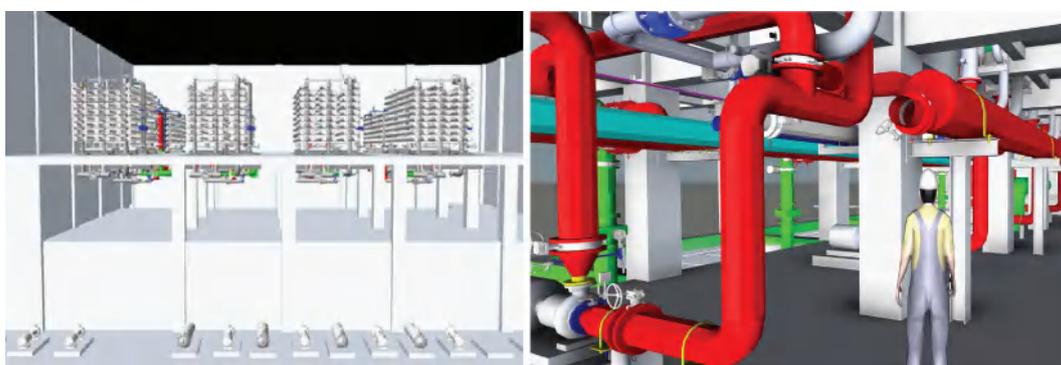


图 6 膜车间布置及管道连接三维设计

Fig. 6 Three-Dimensional Design for Membrane Workshop Layout and Pipelines Connection

2.3 项目经济及运营分析

该提标改造工程目前已建成并稳定运行。根据测算,项目吨水投资约 1 550 元,总成本约 1.22 元/m³,经营成本约 0.89 元/m³,考虑行业内部收益率、投资回收期等,增加水费约 1.34 元/m³。

根据运营数据,超滤膜回收率可达 96.5%,千吨水日耗电量约 92 kW·h,纳滤膜回收率约 80.2%,千吨水日耗电量约 338 kW·h。超滤及纳滤膜回收率日变化情况如图 7 所示。纳滤膜产水总硬度为 20~30 mg/L,对硬度去除率为 93.6%~95.5%,高于设计目标值。产水和原水掺混后供水,出厂水水质优于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中的各项指标。其中,浑浊度为 0.06~0.10 NTU,硬度稳定达到 ≤200 mg/L 的设计目标(图 8)。

3 结论

(1)几种硬度去除工艺对比分析表明,超滤膜+纳滤膜对地下水水厂硬度去除具有较好适用性。双

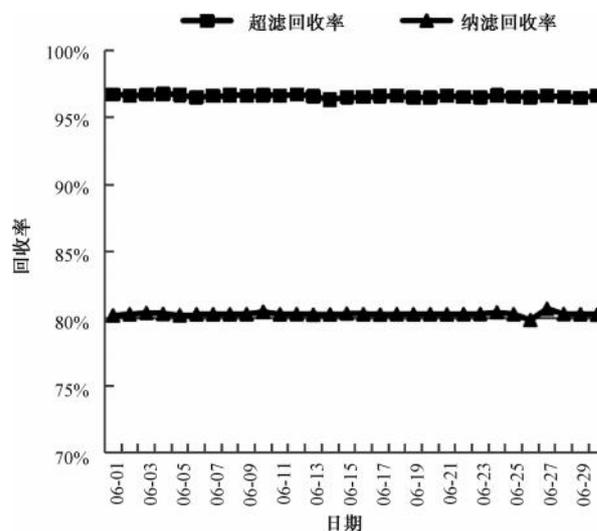


图 7 超滤膜及纳滤膜回收率变化曲线

Fig. 7 Recovery Curves of Ultrafiltration and Nanofiltration Membrane

膜法有助于提升饮用水品质,势必成为未来水厂深度处理重要技术之一。

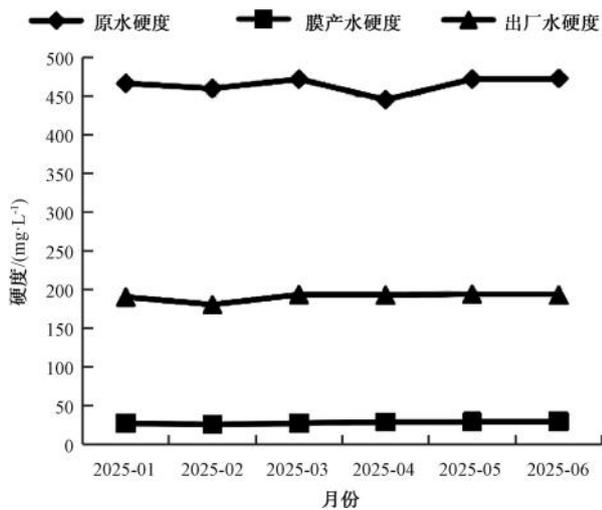


图8 提标改造后水厂进、出水硬度

Fig. 8 Hardness of Inflow and Outflow of WTP after Upgrading and Reconstruction

(2)在超滤膜、纳滤膜工艺前分别设置自清洗过滤器、保安过滤器可有效保护膜组件。工艺流程中设置超越管道,方便水厂灵活运行。

(3)通过处理部分地下水,然后与未处理原水掺混后供水,可有效降低工程投资。但是,设计需要计算掺混比例及复核水质水量平衡。同时,需考虑管道衔接及均匀配水方案的合理性,可参考借鉴本项目新建混合配水井及多点设置阀门。

(4)双膜车间设备、管道较为复杂,借助三维设计,实施过程中利用模型做指导,可有效避免复杂管道之间的冲突碰撞,具有较高的使用价值。

(5)饮用水硬度过高或过低都是不合适的,但明确的出水硬度指标未有一致结论,希望相关研究者进一步论证。此外,本项目膜车间考虑美观性,设计采用3层方案,但土建投资较高,管道检修较为不便,类似项目可参考2层方案布局。超滤膜+纳滤膜的双膜工艺能耗及运行成本较高,在运营过程中

有待进一步优化。

参考文献

- [1] 梁好, 盛选军, 刘传胜. 饮用水安全保障技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
Liang H, Sheng X J, Liu C S. Drinking water safety guarantee technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [2] 陈德华, 王贵玲, 陈玺. 我国北方城市地下水资源开发利用与潜力分析[J]. 地下水, 2008, 30(5): 21-24.
Chen D H, Wang G L, Chen X. Groundwater resources and their exploitation, utilization and potential analysis in northern Cities of our country[J]. Ground Water, 2008, 30(5): 21-24.
- [3] 胡涛. 石灰法与氢氧化钠法去除原水硬度的实验对比研究[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(7): 122, 124.
Hu T. Comparative study on the removal of raw water hardness by lime method and sodium hydroxide method [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2019, 45(7): 122, 124.
- [4] 郁振标, 侯晓帮, 吕淼, 等. 除硬度为目标的工业水厂工艺流程及药剂投加[J]. 净水技术, 2023, 42(10): 124-130.
Yu Z B, Hou X B, Lü M, et al. Process flow and chemical dosing under the target of hardness removal in industrial water treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(10): 124-130.
- [5] 于晓彬. 双膜法处理地下水工程应用[D]. 济南: 山东建筑大学, 2012.
Yu X B. Engineering application on double membrane method [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2012.
- [6] 刘成, 雷声杨, 孙韶华, 等. 我国高硬度地下水源水的处理技术适用性分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(9): 38-43.
Liu C, Lei S Y, Sun S H, et al. Applicability analysis of typical technologies for groundwater hardness removal in China [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(9): 38-43.
- [7] 刘成, 徐文慧, 邴颜, 等. 饮用水总硬度去除需求分析及控制目标探讨[J]. 净水技术, 2022, 41(2): 1-8, 80.
Liu C, Xu W H, Bing Y, et al. Discussion on the removal demand and control goal of total hardness in drinking water [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(2): 1-8, 80.