

西安渭北工业区湾子水厂双膜法工艺设计

王 静¹, 党占奎², 马卫东¹, 王周理², 李旭辉¹

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 2. 西安市水务局, 陕西 西安 710021)

摘 要: 西安渭北工业区湾子水厂供水规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 一期工程建设规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。常规处理工艺由高效澄清池、V 型滤池组成; 深度处理工艺采用双膜法——超滤系统和纳滤系统, 其建设规模为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 主要解决原水中硫酸盐、总溶解性固体超标的问题, 两部分出水混合后供给用户。该组合工艺在试运行阶段处理效果稳定、良好。双膜法应用于苦咸水地区的市政供水行业, 具有一定的推广价值。

关键词: 水厂; 超滤系统; 纳滤系统; 脱盐

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)02-0058-04

Double Membrane Process Design in Wanzi Waterworks in Weibei Industrial Area, Xi'an

WANG Jing¹, DANG Zhan-kui², MA Wei-dong¹, WANG Zhou-li², LI Xu-hui¹

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China;
2. Xi'an Water Authority, Xi'an 710021, China)

Abstract: The water supplying capacity of Wanzi Waterworks was $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, in Weibei Industrial Zone of Xi'an. At the first phase of project, the water supplying capacity was $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$. The conventional treatment process was composed of high-efficiency clarifier and V type filter, and the advanced treatment process with treatment capacity of $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ adopted the double membrane mode including ultrafiltration section and nanofiltration section, which mainly solved the problem of excessive sulfate and total dissolved solids in raw water. Before the water was supplied to the users, the supplying water of two parts had to be mixed together. This kind of combined process had a stable treatment performance during the trial operation phase. The application of double membrane method to the water supply plant in brackish water area has certain promotional value.

Key words: waterworks; ultrafiltration; nanofiltration; desalination

1 项目背景

西安渭北工业区位于西安市渭河以北区域, 规划范围为 851 km^2 , 分设高陵装备工业组团、阎良航空工业组团、临潼现代工业组团, 打造西安现代工业聚集区、转型升级示范区。随着工业区产业发展步伐不断加快, 需水量逐年增加, 三个组团均提出了供水需求, 为此建设渭北工业区湾子水厂, 以泾惠渠西郊水库作为供水水源, 供水规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 分

两期实施, 一期规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。西郊水库补充水源来自泾河, 水量满足 95% 的枯水流量年保证率, 但水质中除常规污染物外, 硫酸盐、总溶解性固体超出《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006) 限值, 硬度接近标准中指标限值。

2 原水水质

对原水水质进行了长期监测。

取样点位于水库的引水渠道渠首, 设计进、出水

水质如表 1 所示。水厂设计中考虑了必要措施以应对超出限值的进水水质。

表 1 设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality

项目	浊度/ NTU	溶解性 总固体/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	硫酸盐/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总硬度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
进水	30	1 200	400	450
混合出水	0.5	950	250	350

3 工艺流程

进水中污染物分为两大类:一类是常规污染物,以浊度为主;另一类是离子类项目。离子类的超标是由于泾河上游支流汇入时带入部分类似苦咸水的水质使泾河河水整体表现出离子类时有超标的现象。因此,针对原水水质,常规污染物的处理采用强化常规处理工艺^[1];对于超标离子的去除采用脱盐技术^[1],最终选用双膜法(超滤+纳滤)。常规工艺规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其中 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 进行双膜法深度处理,两部分出水混合后供给用户。具体工艺流程见图 1。因工艺流程较长,并行系统多,各处理单元应采用高效、紧凑布置的构筑物类型,以尽量减少占地;沉淀单元综合考虑应对水质冬季低温、低浊,夏季浊度较高,兼顾后端处理设施对水质、水量的要求等各类条件限制,确定采用高效澄清池;过滤单元采用大规模水厂的主流工艺——V 型滤池,出水浊度达到 0.3 (0.5) NTU 以下,同时,保障后端处理工艺的稳定运行,减少污堵,延长膜组的运行周期

和使用寿命。

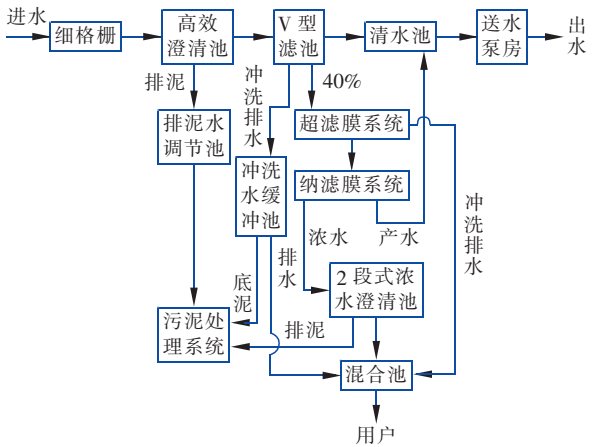


图 1 水厂工艺流程

Fig. 1 Flow chart of waterworks treatment process

脱盐工艺——双膜法工艺,前端的超滤系统作为纳滤系统的保障措施,满足纳滤进水 SDI < 3 的水质要求;针对水质中超标离子化合价均为二价,初步选定纳滤膜工艺^[1],经过为期半年不同品牌纳滤膜的中试,验证纳滤膜对 TDS 的脱除率能够稳定达到 94% 以上,对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 的脱除率达 96% ~ 99%,纳滤膜系统较反渗透系统有较低的能耗、较高的回收率、较大的膜通量。

4 主要处理设施和设计参数

在保证出水水质的前提下考虑投资和运行成本,针对来水中不同硫酸盐浓度对处理设施规模及常规、纳滤出水混合比例进行了计算,结果见表 2。

表 2 不同来水硫酸盐浓度掺混比例及设计流量

Tab. 2 Mixing ratio and design flow rate under different sulfate concentrations

硫酸盐含量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$250 < \text{SO}_4^{2-} \leq 300$	$300 < \text{SO}_4^{2-} \leq 350$	$350 < \text{SO}_4^{2-} \leq 400$	$400 < \text{SO}_4^{2-} \leq 430$	$430 < \text{SO}_4^{2-} \leq 480$
混合比例(常规:纳滤)	7 : 3	6.5 : 3.5	6 : 4	5.5 : 4.5	5 : 5
工程规模(一期)/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000
纳滤膜产水量(一期)/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	30 000	35 000	40 000	45 000	50 000
超滤膜产水量(一期)/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	40 000	46 667	53 333	60 000	66 667
超滤膜进水量(一期)/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	43 500	50 800	58 000	65 300	72 500
常规处理出水量(一期)/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	113 500	115 800	118 000	120 300	122 500

根据供水量、原水水质、出水水质、运行维护、成本对比等因素调整运行的膜组数量。

4.1 常规处理构筑物设计参数

① 高效澄清池

按近期规模设计, $Q = 5\,520 \text{ m}^3/\text{h}$, 1 座 2 组,混合池峰值停留时间为 1.89 min,絮凝池停留时间为 10.2 min,澄清区表面负荷为 $15.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,污

泥回流比为 2% ~ 4%,絮凝剂采用 PAC,助凝剂采用 PAM。控制投药量,避免对后端膜产生影响。

② V 型滤池

砂滤池为双排布置,设计滤速为 7.3 m/h ,滤料层厚为 1.2 m,均匀级配滤料 $K_{80} < 1.3$ 。气冲强度为 $43.2 \sim 54 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$;水冲强度为 $14.4 \sim 21.6 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$;表洗强度为 $7.2 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ 。

4.2 超滤膜系统设计参数

超滤膜系统包括进水单元、膜组器单元、反冲洗水单元和空气擦洗单元、化学清洗单元、膜维护性清洗加药单元和各单元配套的操作、控制系统。

① 进水单元

本工程超滤进水自滤池反冲洗水池吸水提升经自清洗过滤器过滤后进入膜组器。超滤系统进水泵分2组,每组水泵2用1备, $Q=850\text{ m}^3/\text{h}$, $H=300\text{ kPa}$, $N=110\text{ kW}$,水泵采用变频调速;自清洗过滤器与之相对应,分2组,每组2用1备,处理水量为 $950\text{ m}^3/\text{h}$,精度为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 。

② 超滤膜组器

膜组器是完成工艺处理的核心单元,本工程设计采用外压式超滤膜,材质为PVDF,膜平均孔径为 $0.02\text{ }\mu\text{m}$,在 $3\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$ 的水温条件下,超滤系统设计产水量为 $2\,350\text{ m}^3/\text{h}$;系统回收率 $\geq 92\%$;膜运行通量为 $45\sim 57\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$;总面积为 $55\,200\text{ m}^2$,膜组器共12组(10用2备)。

③ 膜组器反冲洗单元

膜反冲洗包括水冲洗和空气擦洗。水冲洗进水来自超滤产水池,经泵提升后进入膜组件冲洗,废水排入废水缓冲池;空气擦洗气源来自空压机房,减压后进入膜组件。水冲强度为 $80\sim 100\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,气冲强度为 $6\sim 10\text{ m}^3/(\text{支}\cdot\text{h})$,反冲洗设备共设2套,每套对应6组膜组器。反冲洗水泵 $Q=270\sim 320\text{ m}^3/\text{h}$, $H=300\text{ kPa}$,2用1备,变频调速;反冲洗空压机 $Q=10\text{ m}^3/\text{min}$, $P=0.7\text{ MPa}$,1用1备,储气罐 $V=8\text{ m}^3$,压力为 1.0 MPa ,2台。

④ 化学清洗单元

化学清洗分为维护性化学清洗和恢复性化学清洗。维护性清洗多采用NaOH和NaClO,视具体情况投加;恢复性清洗采用NaOH和柠檬酸,pH值为 $2\sim 11$, NaHSO_3 既可作还原剂也可以作为膜的保护液。设置化学清洗循环泵($Q=150\text{ m}^3/\text{h}$, $H=250\text{ kPa}$)、清洗储药罐($V=20\text{ m}^3$)以及配套的溶药罐、计量泵等。

超滤膜系统配套的阀门控制单元也是较为复杂的,为保证系统运行,阀门均采用气动执行机构,保证工作周期获得稳定的水量和水质。

4.3 纳滤膜系统设计参数

纳滤膜系统包括进水单元、纳滤膜单元、停机冲洗单元、化学清洗单元、药剂投加单元。

① 进水单元

纳滤膜进水自超滤产水池吸水提升至纳滤进水总管,总管分配至每一组纳滤膜组器,进入膜组器之前须经过保安过滤器和高压泵二次提升。保安过滤器是进膜组件之前的保障措施,过滤器进出口压差大于设定的值(通常为 $0.07\sim 0.1\text{ MPa}$)时,应当更换。纳滤进水泵分2组,每组2用1备, $Q=670\sim 750\text{ m}^3/\text{h}$, $H=300\text{ kPa}$,变频调速;保安过滤器 $Q=300\text{ m}^3/\text{h}$,精度为 $5\text{ }\mu\text{m}$;高压泵采用一对一设置,共12台(10用2备), $Q=230\sim 280\text{ m}^3/\text{h}$, $H=1.1\text{ MPa}$,变频调速。

② 纳滤膜单元

纳滤膜是脱盐的核心单元,经中试选定膜型号。膜组由压力容器和膜元件组成,本次设计采用一级两段,回收率为 75% ,在 $3\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$ 的水温条件下,单套膜组的产水量为 $170\sim 220\text{ m}^3/\text{h}$,共12组(10用2备)。单套膜组的压力容器为36支,每支压力容器内装6支纳滤膜,单组共216支膜;设计膜平均通量为 $20.8\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,可随实际运行做适当调整。

③ 停机冲洗单元

每组纳滤膜停机后必须进行冲洗,防止膜表面结垢,冲洗用水来自纳滤产水池,冲洗水泵 $Q=230\text{ m}^3/\text{h}$, $H=350\text{ kPa}$,1用1备。

④ 化学清洗单元

纳滤膜组化学清洗周期为 $2.5\sim 3$ 个月或更长,主要是通量恢复、清洗有机污染和无机结垢污染,但如果前端的保障措施不完善造成频繁的化学清洗会缩短膜的使用寿命。化学清洗有酸洗和碱洗,需要的药剂有NaOH和HCl,pH值为 $2\sim 11$,配置清洗储药罐、循环泵($Q=220\text{ m}^3/\text{h}$, $H=350\text{ kPa}$)。

⑤ 药剂投加单元

为了保证纳滤系统的安全可靠运行,进入纳滤膜之前,进水必须满足一定的条件,对于本工程满足pH值 <7.5 ,以降低碳酸钙结垢风险;投加适宜于水质的阻垢剂,防止浓水侧膜表面结垢;根据氧化还原电位投加还原剂,使纳滤膜免遭不可逆的氧化损伤;预留酸过量时的碱投加系统以及依据水质情况,对抗细菌的繁殖污堵膜表面冲击式投加非氧化性杀菌剂。每种类药剂的投加配备溶药罐和计量泵。

5 运行效果

该工程目前正在试运行阶段,对常规处理和膜处理两部分分别评价。

① 常规处理部分

调试运行阶段正值雨季和水库清空库容注水时期,水质波动明显,进水浊度为6~30 NTU,藻类较严重,采用前加氯和冲击性投加高锰酸钾效果显著^[2]。高效澄清池出水浊度稳定在0.8~1.5 NTU以下,即使在其他含量较高的离子干扰的前提下,PAC投加量仍能控制在14~16 mg/L,PAM能够控制在0.1~0.13 mg/L且滤池出水稳定在0.3 NTU以下。运行中应当特别关注藻类对pH值和投药量的影响。

② 膜处理部分

水库运行在低水位,使得进水离子浓度较高,甚至超出进水设定值,进水 SO_4^{2-} 约460 mg/L,TDS约1 160 mg/L,膜法深度处理后, SO_4^{2-} 在4.6 mg/L以下,TDS在58 mg/L以下,系统脱盐率 $\geq 95\%$,主要离子去除率 $\geq 99\%$,从数据分析来看,膜系统能够更好地、稳定地达到预期目标,但混合比例发生变化,可以根据水温,适当调整每组产水量和运行组数。

6 经济分析及膜系统设计建议

6.1 膜处理部分经济分析

超滤膜+纳滤膜处理部分规模为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,运行成本主要包括电耗、药剂、膜更换、滤芯更换费用,其中,电耗为0.673元/ m^3 ,药耗约为0.113元/ m^3 ,膜使用寿命以5年计(每年更换率20%),则膜更换费用为0.332元/ m^3 ,膜处理部分运行费用为1.216元/ m^3 (膜运行最不利工况下)。

6.2 膜系统设计建议

膜系统设计的几点建议:①对原水类型充分分析,建议对水中离子组合后作为初步选定膜的依据;②膜的选择建议采用试验的方式验证,从膜类型、运行压力、脱除率、性能恢复等多方面进行评价;③膜系统设计出水水质应模拟运行3年后系统脱除率为依据,主要考虑膜经过污染清洗后对膜的损伤影响;④工艺流程的选择应考虑前后端的相互制约和影响;⑤对于市政供水来说,需水量的不稳定对生产运行造成影响,除厂区设置较大的调蓄构筑物外,应对不同时段运行和维护的膜组数进行经济比较以便确定单套产水规模和组数;⑥温度对膜的运行压力、通量影响很大,在设计时应充分认识,保证水量要求;

⑦水量需求、温度变化等因素对不同工况组合提出了要求,变频调速是经常使用的方式。

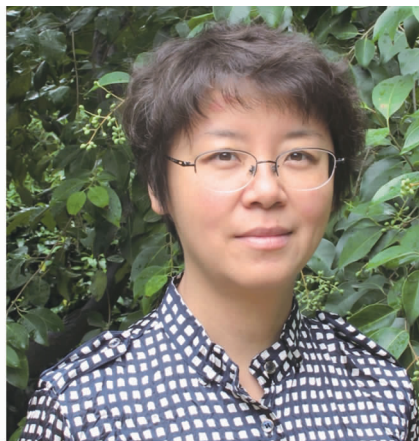
7 结论

西安渭北工业区湾子水厂采用高效澄清池+V型滤池的强化常规处理工艺和超滤膜+纳滤膜的深度处理工艺按照不同的混合比例运行,出水水质满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)。

针对硫酸盐、总溶解性固体,包括总硬度在内的超标离子采用超滤膜和纳滤膜的组合工艺,完全能够达到预期的出水水质。采用膜分离技术能够较为经济地解决离子超标的问题,对于苦咸水地区具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 许保玖. 给水处理理论[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000.
Xu Baojiu. Water Treatment Theories[M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2000(in Chinese).
- [2] GB 50013—2006,室外给水设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2006.
GB 50013 - 2006, Code for Design of Outdoor Water Supply Engineering [S]. Beijing: China Planning Press, 2006(in Chinese).



作者简介:王静(1977—),女,河北平山人,大学本科,高级工程师,注册公用设备工程师(给排水),主要从事市政给排水工程的设计与研究工作。

E-mail:604974319@qq.com

收稿日期:2018-07-20