

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.18.015

反渗透工艺在给水厂硝酸盐控制中的应用

张亚莉, 刘岩, 高宜

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381)

摘要: 烟台某给水厂原水硝酸盐、硫酸盐含量偏高,在降雨充沛时期原水硝酸盐浓度达13.54 mg/L,硫酸盐浓度达315 mg/L,常规混凝沉淀过滤处理工艺不能对其有效控制。该水厂深度处理以这两项为主要除盐目标,从砂滤池后取水进行反渗透深度处理,生产 7.20×10^4 m³/d脱盐水,与常规工段 9.04×10^4 m³/d出水掺混,最终实现达标供水 16.24×10^4 m³/d的生产目标。反渗透设计硝酸盐去除率 $\geq 80\%$,采用超滤进行预处理确保SDI < 3 ,设计淡水RO装置回收率 $\geq 80\%$,浓水RO装置回收率 $\geq 50\%$,系统总回收率 $\geq 90\%$,深度处理工段运行后出厂水水质指标优于设计值。

关键词: 给水; 硝酸盐; 硫酸盐; 超滤; 反渗透

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)18-0090-05

Application of Reverse Osmosis in Nitrate Control of Water Supply Plant

ZHANG Ya-li, LIU Yan, GAO Yi

(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China)

Abstract: High concentration of nitrate and sulfate is detected in raw water of a water supply plant in Yantai. The nitrate and sulfate concentration in raw water is 13.54 mg/L and 315 mg/L respectively in wet weather, which can not be effectively controlled by conventional coagulation, sedimentation and filtration process. These two items are main desalting objectives for the advanced treatment process. The effluent from the sand filter is treated by reverse osmosis to produce desalinated water with volume of 7.20×10^4 m³/d, which is mixed with the effluent from the conventional treatment process with volume of 9.04×10^4 m³/d, and the production target of water supply with capacity of 16.24×10^4 m³/d is eventually achieved. The nitrate removal efficiencies of reverse osmosis is not less than 80%, respectively. The ultrafiltration pretreatment ensures that the SDI is less than 3. The recovery rate of the fresh water RO unit is greater than 80%, the recovery rate of the concentrated water RO unit is greater than 50%, and the total recovery rate of the system is greater than 90%. The indicators of the effluent from the advanced treatment process are better than the design values.

Key words: water supply; nitrate; sulfate; ultrafiltration; reverse osmosis

烟台某水厂原水由引黄水、本地水库水混合,受上游及周边农作区域面源影响^[1],原水硝酸盐浓度较高,常规处理工艺不能对其有效控制,水厂原采用地表水与优质地下水混合的方式实现达标供水,因烟台属于资源型缺水城市,地下水水质稳定

但已严重超采,城市规划要求减少地下水的开采以保护备用水源。因此该水厂新建了深度处理系统以确保出水硝酸盐含量达标。

我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)规定硝酸盐(以N计)的质量浓度限值是10 mg/L。

硝酸盐去除技术有反渗透、离子交换、电渗析等,综合考虑该厂用地条件、处理规模、水质特点、去除效率、运行稳定性、生产成本等因素,最终确定深度处理采用反渗透工艺,其具有占地面积少、效果可靠、应用广泛等优点。

1 工程概况

该水厂已建 20 多年,采用常规处理工艺,流程见图 1。常规工段典型水质指标最大值见表 1。

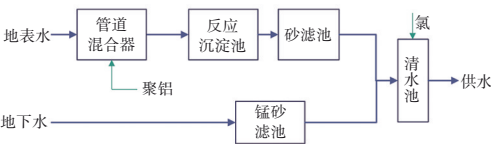


图 1 常规工段工艺流程
Fig.1 Conventional process flow diagram

表 1 常规工段进、出水水质

Tab.1 Influent and effluent quality of conventional process

项目	进水水质	出水水质
浊度/NTU	≤30	≤0.81
色度(铂钴色度单位)/度	≤15	≤9.8
总氮/(mg·L ⁻¹)	≤14.29	
硝酸盐(以 N 计)/(mg·L ⁻¹)	≤13.54	≤12
硫酸盐/(mg·L ⁻¹)	≤315	≤158
氯化物/(mg·L ⁻¹)	≤203	≤132
电导率/(μS·cm ⁻¹)	≤146.5	≤100.8
总硬度/(mg·L ⁻¹)	≤356	≤289
溶解性固体/(mg·L ⁻¹)		≤540

2 工程目标

原水溶解性盐分含量较高,总硬度最高 356 mg/L(引黄水),硫酸盐 315 mg/L(引黄水),硝酸盐可达 13.54 mg/L(本地水库水)。原水溶解性总固体主要为硫酸盐、氯化物与钙、镁离子等形成的溶解性盐分。反渗透技术在控制硫酸盐和硝酸盐的同时,也会大幅减少水中对人体健康有益的矿物质含量,长期饮用低矿化度淡化水可能会造成健康损害;另外,反渗透出水中 CO₃²⁻含量少,pH 低,缓冲能力差,在输送过程中易引起管网腐蚀^[2]。

本工程现有常规处理工段可去除原水中的大部分有害物质,对人体健康有益的绝大部分矿物质得以保留。从保障水质安全、节省工程投资考虑,深度处理工段对部分滤后水进行 RO 脱盐处理后,再与常规段出水掺混,一方面可以弥补反渗透纯水中矿物质的不足,另一方面可以控制纯水的 pH^[3],

同时实现工程方案可靠、经济合理。

深度处理段设计进水硫酸盐 310 mg/L、硝酸盐 14 mg/L、总硬度 356 mg/L,反渗透产水 7.20×10⁴ m³/d 与常规工段滤后水 9.04×10⁴ m³/d 混合,系统总产水量达 16.24×10⁴ m³/d,经消毒达到《生活饮用水卫生标准》的要求后送至配水管网。设计硫酸盐去除率≥95%,硝酸盐去除率≥80%,系统回收率≥90%,总出水水质计算见表 2。

表 2 混合水质

Tab.2 Mixed water quality mg·L⁻¹

项目	进水	产水	混合后水质
硫酸盐	≤315	≤15	≤182
硝酸盐	≤14	≤2.8	≤9.1

水厂增加深度处理后,因进厂原水总量不变,浓水排放导致该厂最终供水能力降低,供水服务区的需水量缺口由其他水厂补充。

地表水工段净水流程和水量平衡见图 2。

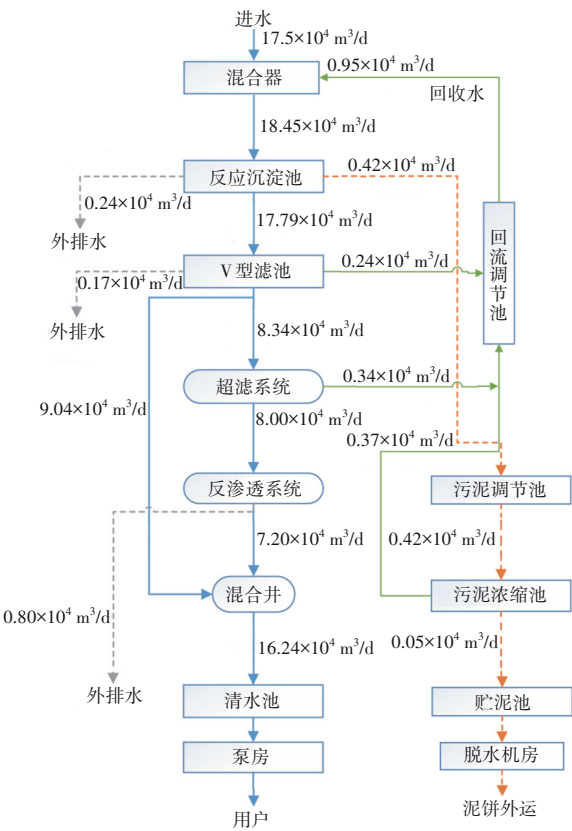


图 2 水量平衡图
Fig.2 Water balance diagram

为使水厂供水能力最大化,深度处理系统采用较高的回收率。设计淡水 RO 装置系统回收率≥

80%,浓水RO装置系统回收率 $\geq 50\%$ 。超滤产水 $8.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 经过淡水RO系统处理后,浓水($16\,000 \text{ m}^3/\text{d}$)进入浓水RO系统,其产水 $8\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 与淡水RO系统产水 $6.40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 在产水池混合后共 $7.20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,再于清水池进水井与砂滤池出水混合;RO浓水与厂内生产废水混合后排至厂外污水管网。

3 工程设计

深度处理系统进水 $8.34 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,产水 $7.20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;系统由超滤系统、反渗透系统和附属的清洗加药系统组成,集成设置在一座综合车间内。

深度处理间平面尺寸为 $75.7 \text{ m} \times 40.6 \text{ m}$,布置为两层,一层布置超滤系统、配电间、反冲洗设备和药剂清洗系统;二层布置RO系统、分控室,总建筑面积 $6\,162 \text{ m}^2$ 。

3.1 超滤系统

超滤是反渗透的预处理系统,通过超滤,水中大分子有机物基本得以去除,保证后续反渗透系统的进水SDI < 3 ,达到反渗透膜的进水要求。

超滤系统由缓冲水池、加压泵、过滤器、超滤膜组件和反冲洗清洗装置组成,系统回收率 $\geq 95\%$,系统流程见图3。

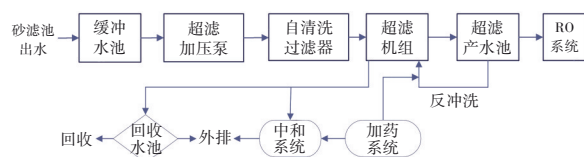


图3 超滤系统流程

Fig.3 Flow chart of ultrafiltration system

① 缓冲水池

缓冲水池为系统提供足够的缓冲容积以保证系统的连续安全运行,设计平面尺寸 $19.7 \text{ m} \times 11.8 \text{ m}$,有效水深 5.3 m ,水力停留时间大于 20 min 。

② 超滤加压泵

设卧式离心泵6台(5用1备),单泵流量 $760 \text{ m}^3/\text{h}$,水压 300 kPa ,变频控制。加压泵采用PLC实现恒压及恒流控制,根据在线流量监测仪表或压力检测仪表信号,通过变频器调整提升泵的转速,为超滤装置提供恒定流量或恒定压力的进水。

③ 自清洗过滤器

超滤膜进水前端设自清洗过滤器,过滤精度 $\leq 100 \mu\text{m}$,共6台设备,根据压差或时间设定自动清洗,水回收率达到 99.5% 以上。

④ 超滤膜机组

超滤膜过滤能有效降低浊度和污染指数(SDI),可最大程度保证反渗透系统的安全运行。

超滤(UF)系统共设10套机组,采用管式外压膜,共1140支膜元件,每套机组114支,膜材质为聚偏氟乙烯,有效面积 $75 \text{ m}^2/\text{支}$,过滤精度 $0.03 \mu\text{m}$,设计通量 $44 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

⑤ 超滤反冲洗系统

常规的自动检测和清洗循环会按时进行,在一定的周期内(可根据运行情况调整)以组件为单位依次自动进行反冲洗,在反冲洗过程中,先进行 $20 \sim 40 \text{ s}$ 空气擦洗,然后由反冲洗泵从超滤产水池内将水由超滤(UF)膜组件的清水出口反向打入中空纤维膜内进行冲洗。

系统配置反冲洗泵2台(1用1备),单泵流量 $680 \text{ m}^3/\text{h}$,水压 250 kPa 。配置罗茨鼓风机2台(1用1备),单机流量 $20 \text{ m}^3/\text{min}$,风压 70 kPa 。

⑥ 化学清洗系统

超滤膜的维护性清洗和恢复性化学清洗药剂均使用 NaClO 、盐酸和 NaOH 。

设置清洗用盐酸加药泵2台(1用1备),单台流量 $1\,380 \text{ L/h}$,压力 320 kPa ;次氯酸钠加药泵2台(1用1备),单台流量 $3\,500 \text{ L/h}$,压力 320 kPa ;氢氧化钠加药泵2台(1用1备),单台流量 $4\,000 \text{ L/h}$,压力 500 kPa 。

⑦ 废液中和系统

中和系统对超滤装置和反渗透装置化学清洗废液进行中和处理,超滤清洗主要产生含次氯酸钠、氢氧化钠、盐酸的废液,清洗废液的特征为pH过高或过低,需要进行中和来满足排放或进一步处理的要求。通常采用次氯酸钠、氢氧化钠进行第一步清洗,排放的废液为碱性和高氧化性废液,首先采用亚硫酸氢钠对次氯酸钠进行中和,使氧化还原电位(ORP)恢复正常值;然后与盐酸酸洗废液中和,根据实际pH情况加酸或加碱后经水泵排出。

设置中和水箱1座,有效容积 120 m^3 。设中和外排泵2台(1用1备),兼循环混合功能,单台流量 $50 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 150 kPa 。

3.2 反渗透系统

反渗透装置是系统脱盐的核心,主要由反渗透供水泵、加药系统、保安过滤器、反渗透高压泵、反渗透机组和化学清洗装置组成。系统流程见图4。

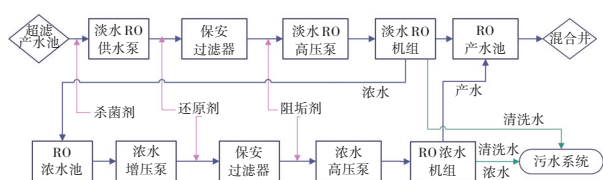


图4 反渗透系统流程

Fig.4 Flow chart of reverse osmosis system

超滤产水通过保安过滤器经反渗透高压泵升压送入反渗透机组单元,出水进入清水池进水井与砂滤池出水进行混合。淡水RO机组的浓水经浓水收集池后,由浓水高压泵配入浓水RO装置,进一步脱盐处理以提高整体回收率。浓水RO机组的废液排至厂外污水管网。

① 缓冲池

反渗透进水缓冲池即超滤产水池,平面尺寸 $19.7\text{ m}\times 11.8\text{ m}$,有效水深 5.3 m ,水力停留时间大于 20 min 。

② 反渗透供水泵

反渗透供水泵为系统提供连续稳定的进水,设卧式离心泵5台(4用1备),单泵流量 $850\text{ m}^3/\text{h}$,水压 400 kPa ,变频控制。

③ 保安过滤器

超滤系统的出水已完全满足反渗透膜的进水要求,但超滤产水池防腐材料的脱落或管道中可能存在的杂质以及系统可能发生的二次污染,导致RO组件进水中存在颗粒杂物的风险,一旦有颗粒物进入会损伤反渗透膜,造成大量漏盐的情况,因此设保安过滤器。

与RO机组对应设10台过滤精度 $\leq 5\text{ }\mu\text{m}$ 的保安过滤器,设计流量 $340\text{ m}^3/\text{h}$ 。保安过滤器的进水口和出水口分别装有压力表。当进出口水压差达到设定的值(约 0.07 MPa)时,需要更换滤芯。

④ RO高压泵

RO高压泵为反渗透膜组提供足够的进水压力,维持反渗透膜的正常运行。高压泵进口设置低压开关,出口设置高压开关。当其进口压力低于设定值时,反渗透增压泵停机以免造成高压泵损坏;当其出口压力过高时,增压泵停机以免对膜系统本身造成不可恢复的损伤。

配置淡水反渗透高压泵10台,单泵流量 $340\text{ m}^3/\text{h}$,浓水反渗透高压泵3台,单泵流量 $280\text{ m}^3/\text{h}$,扬程均为 1.5 MPa ,变频控制。

⑤ RO机组

配置淡水RO机组10套,浓水RO机组3套,每套RO装置进出水总管上设有连接清洗系统的管道及阀门。RO浓水排水管上装有流量控制阀和流量计,以控制回收率。

淡水RO机组产水能力 $270\text{ m}^3/\text{h}$,浓水RO机组产水能力 $170\text{ m}^3/\text{h}$,淡水RO膜运行通量 $19.7\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,浓水RO膜运行通量 $17.4\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。每套机组的进水端设有在线电导率、ORP、pH仪表,出水端有在线电导率仪表,所有数据上传至中控室。

⑥ 冲洗和清洗单元

冲洗采用反渗透产水置换反渗透膜中停机后滞留的浓水,防止浓水侧亚稳态的结垢物质出现结垢以保护反渗透膜。

设置反渗透冲洗水泵2台(1用1备),单泵流量 $350\text{ m}^3/\text{h}$, $H=350\text{ kPa}$ 。

RO膜组运行一段时间后,微量盐分结垢和有机物的积累会造成膜组件性能的下降,需用化学药品进行清洗。设置一套清洗装置,由1个有效容积 25 m^3 的清洗水罐、1台电加热器、2台清洗水泵和1台清洗保安过滤器组成。清洗水泵2台(1用1备),单机流量 $300\text{ m}^3/\text{h}$,扬程 400 kPa 。一般每1~4个月清洗一次,每次清洗约2~5 h。

⑦ 加药系统

还原剂:RO膜是聚酰胺复合膜,氧化后易降解,因此需对其进水进行脱氯处理。采用投加还原剂的办法来脱氯,还原剂选用 NaHSO_3 ,该化学品进入水中还原次氯酸,同时还能抑制微生物的活性。还原剂投加点设在保安过滤器前。

阻垢剂:阻垢剂的作用是防止反渗透浓水侧产生结垢,延长膜元件化学清洗周期。该厂进水硫酸盐浓度较大,硫酸盐结垢较难清洗去除,主要依靠阻垢剂来预防。所用阻垢剂属于复合分散剂,分子质量较大,投量较低,无法透过反渗透膜,在有效控制膜结垢污染的同时不会影响产水的水质。阻垢剂投加点设在原水进入RO膜之前。

设置1套阻垢剂计量箱、6台(5用1备)加药泵及配套水箱搅拌器,加药泵流量 $16.6\text{ L}/\text{h}$,压力 1 MPa 。

设置还原剂加药泵3台(2用1备)、还原剂药箱1套。加药泵流量 $16.6\text{ L}/\text{h}$,压力 1 MPa 。

⑧ 控制系统

与系统运行相关的控制参数如温度、液位、压力、流量、浊度和电导率均设置相应的在线分析仪表。采用操作员站进行监视控制,即通过CRT画面对整个工艺系统进行监视控制。

4 运行效果

该厂深度处理工段于2022年1月投产,运行结果表明,出水水质达到设计要求,混合后供水水质良好。各工段运行水质数据见表3。

表3 实际运行水质

Tab.3 Actual operation water quality

水质指标	砂滤出水	超滤出水	淡水RO出水	浓水RO出水
浊度/NTU	0.26	0.16		
电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)		940	11.8	238
pH	8.01	7.83	5.82	6.81
总硬度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	353		2	76
硝酸盐/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	12.5		0.67	4.47
硫酸盐/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	166		3	26
氯化物/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	80		1	16
氟化物/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.54		0.09	0.30

项目运行以来,原水水质随季节波动较大,降雨量多的月份地表径流把更多的面源污染物带入本地水库,原水硝酸盐氮最高可达到16 mg/L,经深度处理后各主要控制指标均优于设计值。

砂滤池出水和深度处理出水在清水池进水井混合,清水池后各项指标为:浊度 ≤ 0.5 NTU,总硬度 ≤ 220 mg/L,硫酸盐 ≤ 100 mg/L,硝酸盐 ≤ 8 mg/L。

该厂深度处理工段投资一类费9 035万元,运行中电耗成本0.594元/ m^3 ,药耗成本0.087元/ m^3 。

5 存在的问题

① 反渗透浓水出路

原设计反渗透浓水外排厂外污水管道,实际运行中浓水RO排放的废水硝酸盐达134.25 mg/L,需要和反洗水混合后方可达到城市下水道纳管标准。

反渗透浓水若要达标排放需进一步处理,无论是在水厂还是进入污水厂处理其成本都会计入水价,显然在污水厂处理更经济。因此,希望后续能和市政水务主管部门协商取得排放纳管许可。

② 浓水RO膜结垢问题

运行数月后发现浓水RO膜存在污堵,经检测,垢样的成分以硫酸盐为主。

现场通过稳定清洗水温度、加强化学药剂浓度等清洗方式,只能短暂缓解。后续计划将结合垢样成分有针对性地选择与RO膜相容的阻垢剂,同时进一步优化浓水反渗透机组的清洗参数。

6 结论

① 采用反渗透工艺可有效去除饮用水中硝酸盐,具有效果稳定、运行可靠等优点。

② 采用超滤可保障RO系统的稳定运行,但系统整体造价较高,水厂需通过加强数据监控和膜的清洗护理工作,延长膜组件的使用寿命。

③ 反渗透技术用于市政水厂的提标,会增加外排废水量、降低产水率,需结合实际水质条件通过水量和水质平衡,选择经济的规模和回收率。

④ 对浓水采用RO工艺再处理,高浓度盐结垢趋势增加,影响系统工作效率,还需结合水质条件和膜材质选择有效的阻垢剂。

参考文献:

- [1] 李玉中,贾小妨,徐春英,等.山东省地下水硝酸盐溯源研究[J].生态环境学报,2013,22(8):1401-1407.
LI Yuzhong, JIA Xiaofang, XU Chunying, et al. A study on the source tracing of groundwater nitrate in Shandong Province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(8): 1401-1407 (in Chinese).
- [2] 赵明,沈娜,何文杰.淡化水作为城市供水时的水质问题与对策[J].水处理技术,2011,37(10):1-3, 20.
ZHAO Ming, SHEN Na, HE Wenjie. Water quality issue and countermeasures in municipal water supply system using desalinated water [J]. Technology of Water Treatment, 2011, 37(10): 1-3, 20 (in Chinese).
- [3] 曹国民,盛梅,迟峰,等.反渗透法脱除地下水中硝酸盐的中试试验[J].净水技术,2011,30(5):7-10.
CAO Guomin, SHENG Mei, CHI Feng, et al. Pilot test for nitrate removal from ground water by reverse osmosis process [J]. Water Purification Technology, 2011, 30(5): 7-10 (in Chinese).

作者简介:张亚莉(1977—),女,陕西渭南人,本科,高级工程师,主要从事城市给水处理的设计研究工作。

E-mail: zhangyali00@cemi.com.cn

收稿日期:2023-04-03

修回日期:2023-05-15

(编辑:孔红春)