

设计经验

“双膜工艺”在工业区污水处理厂再生水工程中的应用

姚吉¹, 张稳妥¹, 滕良方², 陶娟², 龚天翼², 冯华洋¹, 宓益磊¹

(1. 宁波市城建设计研究院有限公司, 浙江 宁波 315012; 2. 宁波市城市排水有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘要: 宁波市北区污水处理厂一、二期处理规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 再生水规模为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 进水水源采用二期出水(已达到一级A排放标准)。经中试论证采用“双膜工艺”(浸没式超滤+反渗透)去除氯离子, 以达到用户的水质要求(电导率 $\leq 400 \mu\text{S}/\text{cm}$, 氯化物 $\leq 80 \text{ mg}/\text{L}$)。由于北区污水处理厂用地紧张, 本项目利用二期现有调节池作为“双膜工艺”的原水池及产水池, 同时新建双膜车间, 双膜车间设上下两层, 上层为双膜设备间, 下层为综合水泵间及超滤产水池。本项目充分利用现有构筑物, 并利用地下空间, 最大限度地节约土地资源, 超滤工艺首次同时采用了柱式、帘式两种膜, 可为类似工业区污水处理厂再生水回用工程提供参考。

关键词: 再生水; 超滤; 反渗透; 脱盐

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)20-0037-05

Application of Double Membrane Process in Reuse Water Project of Industrial Wastewater Treatment Plant

YAO Ji¹, ZHANG Wen-tuo¹, TENG Liang-fang², TAO Juan², GONG Tian-yi²,
FENG Hua-yang¹, MI Yi-lei¹

(1. Ningbo Urban Construction Design Institute Co. Ltd., Ningbo 315012, China; 2. Ningbo Municipal Sewerage Co. Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract: The treatment scale of phase I and phase II of Ningbo Beiqu Wastewater Treatment Plant is $200\,000 \text{ m}^3/\text{d}$. The scale of reuse water is $60\,000 \text{ m}^3/\text{d}$, and the influent water source adopts second-stage effluent which had met the first class A discharge standard. The pilot test proved that the double membrane process (which included immersion ultrafiltration and reverse osmosis) could be used to remove chloride ions from the influent water in order to meet the water quality requirements of user (conductivity $\leq 400 \mu\text{S}/\text{cm}$, chloride $\leq 80 \text{ mg}/\text{L}$). Due to the shortage of land of Beiqu Wastewater Treatment Plant, the project used the existing adjustment tank of the second phase as the raw wastewater tank and production tank of the “double membrane process”, and at the same time, the new double membrane workshop was built. The double membrane workshop was set up with two layers. The upper layer was double membrane equipment room, the lower layer was the integrated pump room and the ultrafiltration production tank. The project made full use of existing structures and utilized underground space to maximize land resource conservation. The ultrafiltration process used both column and curtain membranes for the first time, which could provide reference for reclaimed water reuse projects in similar industrial wastewater treatment plants.

Key words: reuse water; ultrafiltration; reverse osmosis; desalination

1 项目背景

宁波市北区污水处理厂位于镇海化工区,一、二期污水厂处理规模各为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。化工区内工业企业众多,用水需求量较大,为响应国家及宁波市水污染防治行动计划以及节能减排政策号召,化工企业可根据其实际需求采用污水厂再生水作为其工业用水,充分利用再生水资源,促进可持续发展。经与部分企业对接,工业企业用水主要对水体中氯化物含量要求较高,为使污水厂出水满足工业企业的

要求,经三个月的中试论证后对北区污水处理厂 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 再生水采用“双膜工艺”(浸没式超滤+反渗透)进行脱盐处理。

2 设计水质

长期监测结果表明,北区污水处理厂二期出水 COD、BOD₅、TN、NH₃-N、SS、TP 指标能满足一级 A 排放标准,因此本工程将二期出水作为“双膜工艺”的进水源,再生水工程的具体设计进、出水水质见表 1。

表 1 设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality

项 目	SS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	电导率/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	色度/ 倍	氯化物(Cl^-)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SO_4^{2-} / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	石油类/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
进水	10	1 000	30	250	200	50	≤ 1	15
出水	5	400	15	80	90	20	1	5

3 工艺流程

本项目主要目的是对二期出水进行脱盐处理,使其含盐量满足工业企业要求,经过技术比较、经济分析后,确定采用反渗透工艺进行脱盐处理,反渗透膜对一价氯离子、钠离子等单价离子脱盐率超过了 98%^[1]。

本项目将超滤系统作为反渗透系统的预处理工艺,满足反渗透进水 SDI < 3 的水质要求^[2]。

因此,本项目选择“双膜工艺”(浸没式超滤+反渗透)对原水进行脱盐处理。“双膜工艺”进水采用北区污水处理厂出水,总处理规模为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其中原水 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 经膜格栅预处理后进入浸没式膜过滤系统,超滤产水进入超滤产水池,然后经反渗透系统处理后送至再生水池, $3.36 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$

反渗透产水与 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 原水混合后合计 $4.36 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 出水外送至用户用水点^[3]。

厂区平面图见图 1^[4],具体工艺流程及水量平衡见图 2。

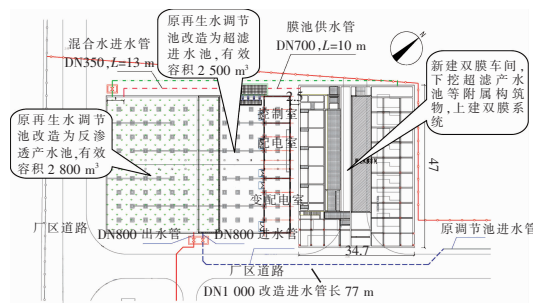


图 1 厂区平面图

Fig. 1 Planning of plant area

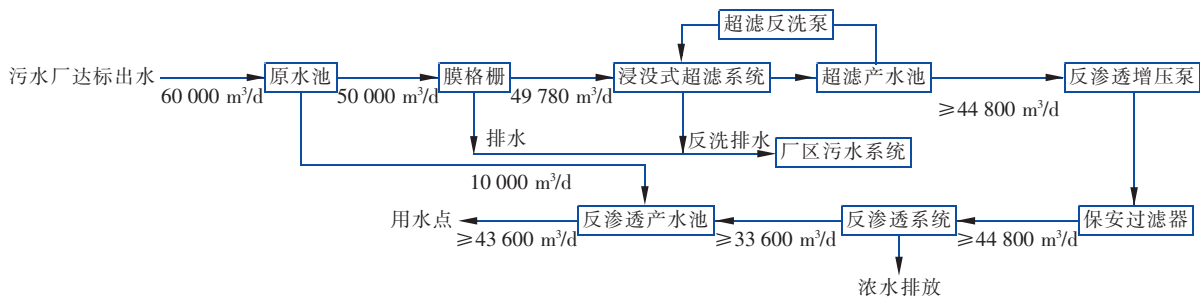


图 2 工艺流程及水量平衡

Fig. 2 Process flow and water balance diagram

4 超滤系统设计

浸没式超滤系统主要包括进水单元、浸没式超

滤膜设备、抽吸泵、反洗单元、化学清洗单元、空气系统、废水系统。

① 进水单元

超滤系统进水为北区污水处理厂二期原设计达标出水,总进水规模为 $60\,000\text{ m}^3/\text{d}$,利用原调节池作为超滤系统的进水池,其有效容积为 $3\,054\text{ m}^3$,停留时间约为 1.2 h 。

原水池 $50\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 经超滤供水泵提升进入膜格栅,经膜格栅处理后进入浸没式超滤系统;超滤供水泵共设置4台(3用1备),单台 $Q=700\text{ m}^3/\text{h}$,水泵采用变频控制;膜格栅采用过滤精度为 1 mm 的内进流形式格栅。

② 浸没式超滤膜设备

经膜格栅处理后,进入超滤系统的水量为 $49\,780\text{ m}^3/\text{d}$ 。本工程采用浸没式超滤膜,材质为PVDF,中空纤维超滤膜。

系统共设置5组膜池,按照两种膜形式供货。其中2座膜池采用柱式膜元件,单膜池配套9组膜组件,共计540支膜元件,过滤精度为 $0.03\text{ }\mu\text{m}$,单支膜过滤面积为 45 m^2 ,合计膜面积为 $24\,300\text{ m}^2$ 。其余3座膜池采用帘式膜元件,单膜池配套3组膜组件,共计828帘膜元件,过滤精度为 $0.03\text{ }\mu\text{m}$,单帘过滤面积为 45 m^2 ,合计膜面积为 $37\,260\text{ m}^2$ 。

超滤产水规模为 $44\,800\text{ m}^3/\text{d}$,系统回收率 $\geq 90\%$,总计膜面积为 $61\,560\text{ m}^2$,则系统平均膜通量为 $30.3\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。

③ 抽吸泵

抽吸泵的作用是通过泵的吸程和液位静压作用使源水通过中空纤维膜膜孔进入膜纤维内腔,再经由每个膜组件的产水端口汇集到集水管输送至产品水池。抽吸泵采用变频恒流量控制方式。PLC通过流量传感器采集产水母管的流量,经PID调节控制供水泵的转速,达到产水恒流量。

抽吸泵 $Q=465\text{ m}^3/\text{h}$, $H=150\text{ kPa}$, $P=37\text{ kW}$,共设置5台。

④ 超滤反洗

膜反洗过程包括单独气洗、气水双洗、单独水洗。水洗进水来自超滤产水池,经超滤反洗泵提升后进入膜组件冲洗,反洗通量为 $55\sim 60\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,单池膜面积为 $12\,200\text{ m}^2$,则反洗泵流量取 $705\text{ m}^3/\text{h}$,1用1备,变频调速运行。气洗气源来自鼓风机,气洗强度为 $60\sim 120\text{ m}^3/\text{h}$,设计取 $88\text{ m}^3/\text{h}$,单池面积为 19.89 m^2 ,则鼓风机风量 $Q=1\,750\text{ m}^3/\text{h}$ ($29.172\text{ m}^3/\text{min}$),选择罗茨鼓风机,设计风量为

$29.6\text{ m}^3/\text{min}$,满足要求。

⑤ 化学清洗

化学清洗分为维护性化学清洗和恢复性化学清洗。当超滤系统的跨膜压差达到 0.08 MPa 时,对膜组进行维护性化学清洗,采用次氯酸钠和氢氧化钠清洗,通常每2~3周一次。

恢复性化学清洗通常每2~3个月一次,根据膜组污染情况选择一种或几种药剂进行化学清洗,整个过程正常历时 4 h ,最长历时 8 h (复合药剂清洗)。

本系统中设置超滤反洗水泵2台(1用1备),为卧式离心泵, $Q=705\text{ m}^3/\text{h}$, $H=200\text{ kPa}$, $P=75\text{ kW}$,泵壳:球墨铸铁,叶轮:SS316。

本系统设置超滤化学清洗箱1台,有效容积为 40 m^3 ,清洗箱安装 50 kW 的电加热器2台;设置化学清洗水泵2台(1用1备),为卧式离心泵, $Q=240\text{ m}^3/\text{h}$, $H=200\text{ kPa}$, $P=30\text{ kW}$,配套加药罐、计量泵等设备。

⑥ 空气系统

设置螺杆式空气压缩机2台(1用1备), $Q=1.2\text{ m}^3/\text{min}$,压力为 0.8 MPa , $P=7.5\text{ kW}$ 。该空压机排气口设置外置式冷干机系统,空气压缩机的运动部件全部采用具有自润滑功能的特殊材料制作而成,运行时无需添加润滑油,排出的压缩空气洁净,不含油污,不污染作业环境及用气设施。

压缩空气储罐:设置储气罐进行缓冲以提高空压机的使用效率。

⑦ 废水系统

化学清洗中存在盐酸和氢氧化钠等药剂,需对其进行中和处理;冲洗废水通过废水渠排至废水收集池,有效容积为 200 m^3 。

5 反渗透系统设计

反渗透系统包括进水单元、RO保安过滤器、RO高压泵、反渗透装置、加药系统、冲洗和清洗系统。因总量平衡因素,反渗透浓水经水解酸化池及曝气生物池处理后再到北区三期的处理工艺。

① 进水单元

反渗透进水来自超滤产水池,将超滤产水通过反渗透增压泵提升进入反渗透系统进水总管,反渗透系统进水规模为 $44\,800\text{ m}^3/\text{d}$ (合计 $1\,867\text{ m}^3/\text{h}$),共设置5台(4用1备)反渗透增压泵,单台设计流量为 $470\text{ m}^3/\text{h}$ 。总管分配至每一组反渗透组件,进

入反渗透膜组件前需经过保安过滤器和高压泵二次提升。

② RO 保安过滤器

保安过滤器的作用是截留粒径 $>5\ \mu\text{m}$ 的颗粒,以防止其进入反渗透系统。过滤器中的滤芯为大流量滤芯,当过滤器进出口压差大于设定值(通常为 $0.07\sim 0.1\ \text{MPa}$)时,应当更换。保安过滤器共设置 8 台,单台设计流量为 $240\ \text{m}^3/\text{h}$,过滤精度为 $5\ \mu\text{m}$ 。

③ RO 高压泵

高压泵的作用是为反渗透本体装置提供足够的进水压力,保证反渗透膜的正常运行。根据反渗透本身的特性,需有一定的推动力去克服渗透压等阻力,才能保证达到设计的产水量。

本系统设置 8 台高压泵,为卧式离心泵,单台流量为 $255\ \text{m}^3/\text{h}$,扬程为 $1.55\ \text{MPa}$,材质:过流部件 316,变频控制。

④ 反渗透装置

反渗透系统处理规模为 $44\ 800\ \text{m}^3/\text{d}$,设置 8 台,单台净出水能力为 $175\ \text{m}^3/\text{h}$,并联运行。反渗透装置的回收率 $\geq 75\%$,采用一级两段式排列,反渗透出水量为 $33\ 600\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

每套反渗透装置配置 276 根膜组件,排列方式为 $30\times 6:16\times 6$;共计 2 208 支反渗透膜元件,每支膜元件有效面积为 $37\ \text{m}^2$,设计膜平均通量为 $17.14\ \text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,可根据实际运行情况做适当调整。

⑤ 冲洗系统

反渗透膜组在系统启动或停机时,需要进行反冲洗,从反渗透冲洗水池对反渗透膜组进行正向清洗。

本系统中设置反渗透冲洗水箱 1 台,有效容积为 $25\ \text{m}^3$,反渗透冲洗水泵 2 台(1 用 1 备),单台流量为 $235\ \text{m}^3/\text{h}$ 。

⑥ 化学清洗系统

反渗透膜经过长期运行后,会积累某些难以冲洗的污垢,如有机物、无机盐结垢等,造成反渗透膜性能下降。在反渗透系统的流量减少 10% 或压降升高 15% 或电导率升高的情况下,即需对膜进行化学清洗。无明显症状时定期进行化学清洗(约 3 月一次)。化学清洗有酸洗和碱洗,需要的药剂有氢氧化钠和盐酸。

系统设置反渗透化学清洗箱 1 台,有效容积为 $15\ \text{m}^3$,清洗箱安装 $30\ \text{kW}$ 电加热器 1 台;设置反渗

透化学清洗泵 1 台,流量为 $220\ \text{m}^3/\text{h}$;设置清洗保安过滤器 1 台,流量为 $220\ \text{m}^3/\text{h}$,过滤精度为 $10\ \mu\text{m}$ 。

⑦ 加药系统

a. 阻垢剂加药装置

在经过预处理后的原水进入反渗透系统之前,需加入高效率的专用阻垢剂,以防止反渗透浓水中碳酸钙、碳酸镁、硫酸钙等难溶盐浓缩后析出结垢,堵塞反渗透膜。装置配置:1 台计量箱,容积为 $2.0\ \text{m}^3$;加药泵共 8 台,流量为 $3.8\ \text{L}/\text{h}$ 。

b. 还原剂加药装置

还原剂的作用是还原原水中可能存在的氧化剂。因为反渗透膜对余氯十分敏感,需投加过量的 NaHSO_3 来还原原水中可能存在的氧化剂,以防止氧化性物质对膜的氧化降解,从而避免对反渗透膜组件的破坏。装置配置:2 台计量箱(配搅拌机),单台容积为 $2.0\ \text{m}^3$;加药泵共 8 台,流量为 $3.8\ \text{L}/\text{h}$ 。

c. 盐酸加药装置

在反渗透进水中加入盐酸,以防止反渗透浓水中碳酸钙、碳酸镁、硫酸钙等难溶盐浓缩后析出结垢,堵塞反渗透膜。装置配置:加酸泵 8 台,流量为 $3.8\ \text{L}/\text{h}$ 。

d. 非氧化杀菌剂加药装置

非氧化杀菌剂通过改变微生物上个别基团,抑制生物活性而达到杀菌的目的。设非氧化杀菌剂药箱 1 台,有效容积为 $1.0\ \text{m}^3$;非氧化杀菌剂加药泵 2 台(1 用 1 备),流量为 $25\ \text{L}/\text{h}$,压力为 $1.2\ \text{MPa}$ 。

e. 氢氧化钠加药装置

氢氧化钠的作用是调节反渗透产水的 pH 值,控制产水 pH 值在 $7\sim 7.5$ 。设加碱泵 2 台(1 用 1 备),流量为 $9\ \text{L}/\text{h}$,压力为 $1.2\ \text{MPa}$ 。

6 实际运行效果

该工程实际运行出水水质见表 2。

表 2 实际出水水质

Tab. 2 Actual effluent quality

项 目	RO 出水水质	总出水水质
电导率/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	50	350
色度/倍	5	10
氯化物(Cl^-)/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	15	70

7 经济分析

该工程建筑安装费为 5 800 余万元,超滤膜 + 反渗透膜处理部分规模为 $5\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$,直接运行成

本包括电耗、药耗费用,其中电耗为 $0.63\text{元}/\text{m}^3$ [电价按 $0.70\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计],药耗约为 $0.4\text{元}/\text{m}^3$ 。间接运行成本包括超滤及反渗透膜设备更换费用、工艺设备折旧,合计 $0.9\text{元}/\text{m}^3$ 。则系统运行费用为 $1.93\text{元}/\text{m}^3$ 。

8 结语

① 由于北区污水处理厂用地紧张,本项目利用二期现有调节池作为“双膜工艺”的原水池及产水池,同时新建双膜车间,双膜车间设上下两层,上层为双膜设备间,下层为综合水泵间及超滤产水池。本项目充分利用现有构筑物,并利用地下空间,最大限度节约土地资源,为类似工业区污水处理厂再生水回用工程提供案例及参考。

② 本工程有效利用再生水,为工业区用户提供了一个经济可靠的新水源,充分提高了再生水的利用率,对工业区污水处理厂再生水工程起到了示范作用。

参考文献:

- [1] GB 50335—2016, 城镇污水再生利用工程设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
GB 50335 - 2016, Code for Design of Municipal Wastewater Reclamation and Reuse[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017 (in Chinese).
- [2] HJ 579—2010, 膜分离法污水处理工程技术规范[S]. 北京:中国环境科学出版社,2011.
HJ 579 - 2010, Technical Specifications for Membrane Separation Process in Wastewater Treatment [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011 (in Chinese).

- [3] 范恩思,张永丽,王帅. 膜组合工艺在生活污水深度处理中的应用研究[J]. 中国给水排水,2014,30(3): 76-79.

Fan Ensi, Zhang Yongli, Wang Shuai. Application of combined membrane process in advanced sewage treatment[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(3): 76-79 (in Chinese).

- [4] 徐洪斌,耿颖,杨苗青. 双膜法用于城市污水深度处理回用的生产性试验[J]. 中国给水排水,2015,31(23):112-115.

Xu Hongbin, Geng Ying, Yang Miaoqing. Pilot study on ultrafiltration/reverse osmosis used in advanced treatment and reuse of municipal sewage [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(23):112-115 (in Chinese).



作者简介:姚吉(1978—),男,浙江台州人,大学本科,高级工程师,主要从事市政给排水工程的设计与研究工作。

E-mail:149794810@qq.com

收稿日期:2019-06-20

科学调水,依法管水,安全供水