

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.10.012

烟台市套子湾污水厂双膜法再生水工程设计

刘晓军

(烟台市城市排水服务中心, 山东 烟台 264000)

摘要: 为了缓解烟台市水资源紧缺的局面,满足万华工业园百万吨大乙烯建设及烟台发电厂等项目对再生水的需求,实现水资源的合理利用,开展了套子湾污水厂再生水回用工程建设。一期新建规模为 $5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,利用污水处理厂原有反渗透设施,一期工程建成后再生水总规模达到 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。再生水进水来源为套子湾污水厂出水,进水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。基于进水水质特点和出水使用要求,采用超滤+反渗透再生水回用处理工艺。建成后出水水质优于《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)各项指标要求,出水浊度平均值为0.3 NTU, TDS平均值为110 mg/L。

关键词: 再生水; 超滤; 反渗透

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)10-0079-04

Design of Double Membrane Reclaimed Water Project of Yantai Taoziwan Wastewater Treatment Plant

LIU Xiao-jun

(Yantai Urban Drainage Service Center, Yantai 264000, China)

Abstract: A reclaimed water reuse project in Taoziwan wastewater treatment plant was constructed to realize rational utilization of water resources. The project is expected to alleviate the shortage of water resources in Yantai and meet the demand of reclaimed water for one million tons of ethylene construction project in Wanhua industrial park, Yantai power plant and other projects. The new scale of the phase I project is $5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, and the total scale of the reclaimed water plant after completion of the phase I project will reach $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ by utilizing the original reverse osmosis facilities of the wastewater treatment plant. The water source of the reclaimed water plant is the effluent from Taoziwan wastewater treatment plant, and the influent water quality needs to meet the first level A criteria specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant*(GB 18918—2002). Based on the characteristics of the influent quality and the utilization requirements of the effluent, a combined process consisting of ultrafiltration and reverse osmosis was eventually determined. After completion of the project, the effluent quality is better than the requirements of *The Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Industrial Uses* (GB/T 19923—2005), and the average turbidity and TDS in the effluent are 0.3 NTU and 110 mg/L, respectively.

Key words: reclaimed water; ultrafiltration; reverse osmosis

烟台市属缺水型城市,城市供水水源主要依赖市区枯水年份的水资源量约为 $3.7\times 10^8\text{ m}^3$,特枯年份水资源量为 $1.34\times 10^8\text{ m}^3$ 。2020年市区城市公共门楼水库(兴利库容 $1.3\times 10^8\text{ m}^3$)以及部分地下水,

供水量 $1.57 \times 10^8 \text{ m}^3$, 城市污水处理量 $1.48 \times 10^8 \text{ m}^3$ [1]。烟台套子湾污水厂再生水回用工程是烟台市市区城建重点工程,也是烟台市首个大规模用于工业企业的城市污水再生回用工程,一期工程建成后每年可以增加工业用再生水 $1.825 \times 10^4 \text{ m}^3$,市区2020年市政再生水利用 $5.308 \times 10^4 \text{ m}^3$,达到35.8%,满足国家《关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见》文件要求,可有效缓解旱季门楼水库蓄水严重不足,而导致市区生产、生活用水异常紧张的问题。同时为万华工业园百万吨大乙烯建设及烟台发电厂等项目提供用水,实现水资源的合理利用,并降低工业企业的运行费用。

1 设计规模及进、出水水质

烟台市套子湾污水处理厂服务范围主要包括

烟台市芝罘区(南郊除外)、福山区和开发区东部,总处理能力达到 $35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用AA/O+MBR组合处理系统,出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准 [2]。

烟台套子湾污水厂再生水回用一期工程出水主要回用于烟台万华工业园和烟台发电厂,一期工程建设期为2018年—2020年,新建 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 再生水规模,并利用套子湾污水厂原有的 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 再生水处理设施($2.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 反渗透与 $2.75 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 满足一级A标准的污水混合),使再生水规模达到 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。设计进水即为套子湾污水处理厂二期工程出水。设计出水水质满足《城市污水再生利用工业用水水质》(GB/T 19923—2005)标准,并根据工业用户要求适当调整。设计水质见表1。

表1 再生水回用工程设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality of reclaimed water treatment project

项目	pH	SS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	浊度/ NTU	色度/度	$\text{COD}_{\text{Mn}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{NH}_4^+-\text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	粪大肠菌 群/($\text{个} \cdot \text{L}^{-1}$)	余氯/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TDS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总铁/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
进水	6~9	8.0		8	50	5	10^3		2 515	
出水	6~7.5	≤ 1.0	≤ 0.5	≤ 10	≤ 2.0	≤ 0.5	≤ 500	≥ 0.05	≤ 120	≤ 0.05

2 工程设计

2.1 工艺选择

① 进水水质特点

对照污水厂出水标准及万华工业园对再生水水质的要求,还需去除总硬度、碱度、溶解性固体、氯离子、铁等,特别是对TDS的要求较高,所以新建再生水处理系统应采用脱盐效果更好的处理工艺及设施。

② 工艺选择要点

再生水处理的主要目标为氯离子和溶解性固体,即主要任务是脱盐。

大规模除盐方法主要是离子交换法、电渗析法、反渗透法以及电吸附法。其中,离子交换法常用于水的深度除盐、制备纯水,一般应用在反渗透或电渗析工艺之后;电渗析法能耗大、工作电压较高、成本较高;电吸附法单个模块处理量较小,单条生产线最大产水能力约为 $4\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。鉴于本工程处理规模较大,且需要与现有箱体内再生水处理系统衔接,本工程选择反渗透法作为脱盐工艺。

③ 浓盐水处理

浓盐水处理的重点是含有溶解性不可降解的

COD和溶解性总固体,套子湾污水处理厂总规模为 $35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,一期工程建成后产生的浓盐水约为 $2.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,设计将其排入污水处理厂一期工程生物池中。从目前实际运行效果看,对污水厂出水达标无明显影响。

2.2 工艺流程

套子湾污水处理厂出水通过输水管线进入本工程,工艺流程如图1所示。本工程主体工艺为超滤(UF)+反渗透(RO)耦合技术,超滤可以作为反渗透的预处理工艺。污水处理厂MBR工艺本身就是膜过滤工艺,为提高运行保障,在其前端增加自动清洗过滤器以保证后续超滤及反渗透的稳定运行。此外,超滤出水产水箱及设备管道中防腐材料会不定期脱落,形成粒径较大的颗粒物,这些颗粒物经过高压泵加压作用后,有可能击穿反渗透膜组件,会导致高压泵的机械损坏。因此,为截留反渗透进水中的较大颗粒物(粒径 $> 5 \mu\text{m}$),防止其进入反渗透系统,在反渗透装置膜组件的前端设置保安过滤器。

浓盐水主要含有溶解性不可降解的COD和溶解性总固体,污染物浓度较高,需进一步处理后再排放。一期再生水工程产生的浓盐水约为 $2.3 \times$

$10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,设计排入污水处理厂一期工程生物池中进行后续处理。套子湾一期升级改造工程已设计粉末活性炭投加系统,粉末活性炭可以吸附污水中的部分难降解COD。其处理流程见图2。

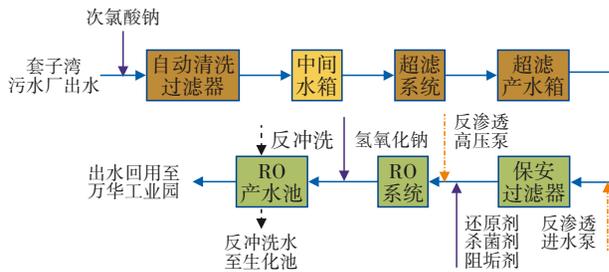


图1 再生水回用工艺流程

Fig.1 Flow chart of reclaimed water treatment process

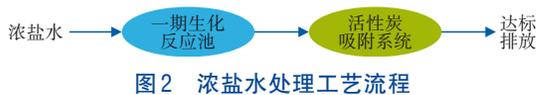


图2 浓盐水处理工艺流程

Fig.2 Flow chart of concentrated brine treatment process

2.3 主要处理系统及设计参数

2.3.1 预处理系统

① 次氯酸钠加药系统

次氯酸钠加药箱1台,有效容积为 5 m^3 ,加药泵1台,机械隔膜泵 $Q=50 \text{ L/h}$, $H=0.5 \text{ MPa}$, $P=0.25 \text{ kW}$ 。

② 自动清洗过滤器

设置自动清洗过滤器系统作为超滤膜的预处理工艺。设备4台(3用1备),过滤精度为 $100 \mu\text{m}$, $Q=750 \text{ m}^3/\text{h}$, $P=0.37 \text{ kW}$ 。

③ 中间水箱

为了实现超滤系统稳定连续进水,设中间水箱储存自动清洗过滤器出水,具有均衡水量的作用。中间水箱采用半地下式钢筋混凝土结构,有效容积为 800 m^3 ,池内设置液位仪。

2.3.2 超滤处理系统

① 超滤给水泵

超滤给水泵的作用是为超滤系统提供充足的原水流量和压力。设置卧式离心泵11套(8用3备,变频控制), $Q=419 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=450 \text{ kPa}$ 。

② 超滤装置

超滤出水需满足反渗透进水水质的要求,浊度 $<0.2 \text{ NTU}$ 。设置外压式超滤系统6套,单套设168支膜,设计通量 $40.39 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,工作温度 $3\sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

③ 超滤反洗设备

反洗周期:系统运行 $20\sim 30 \text{ min}$,反洗 $30\sim 90 \text{ s}$ 。反洗泵由变频器供电,通过PID调节使反洗流量恒定。设卧式离心泵3台(2用1备), $Q=238 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=300 \text{ kPa}$,叶轮材质为SS316。根据运行情况按一定周期($60\sim 90 \text{ d}$)进行化学清洗,将配制好的盐酸、柠檬酸、氢氧化钠和次氯酸钠等分别投入膜组件循环清洗。

④ 空气压缩机

设置2台螺杆式空气压缩机(1用1备), $Q=5.4 \text{ m}^3/\text{min}$,压力 0.8 MPa , $P=30 \text{ kW}$ 。同时设置2台压缩空气储罐:1台为工艺用气储气罐, 12 m^3 ,压力 0.8 MPa ;1台为仪表用气储气罐, 2 m^3 ,压力 0.8 MPa 。

⑤ 超滤产水箱

超滤产水箱用来储存超滤产生的水,为超滤反洗提供水源。采用2座玻璃钢矩形水池,有效容积 420 m^3 。

2.3.3 反渗透(RO)系统

反渗透系统是最主要的脱盐装置,利用反渗透膜的选择特性去除水中绝大部分可溶性盐分、胶体颗粒、有机物及微生物。反渗透系统由反渗透供水泵、保安过滤器、高压泵、反渗透膜组件、反渗透反洗、清洗装置及加药系统等组成。 $Q=5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

① 反渗透供水泵、保安过滤器及反渗透高压泵。反渗透增压泵采用卧式离心泵,10台(8用2备), $Q=355 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=300 \text{ kPa}$, $P=45 \text{ kW}$ 。

保安过滤器中的滤元为可更换卡式滤棒,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,应及时更换。 $Q=300 \text{ m}^3/\text{h}$,过滤精度 $5 \mu\text{m}$,数量12台,外壳为不锈钢SS316材料,熔喷(PP)滤芯。

采用变频器来控制反渗透高压泵的压力,解决系统低温下的产水能力不足问题。这种设计可显著地降低运行成本,节省投资费用。采用卧式离心泵12台, $Q=300 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=1.42 \text{ MPa}$, $P=185 \text{ kW}$ 。

② 反渗透装置。反渗透装置包括反渗透主机、冲洗系统及清洗系统三部分。反渗透主机设备12套,每套含378根膜组件,产水能力为 $230 \text{ m}^3/\text{h}$ 。采用抗污染复合膜,具有高脱盐率、较强抗污染性、高通量、低压运行等特点。

反渗透冲洗系统设置卧式离心泵6台(4用2备), $Q=250 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=400 \text{ kPa}$, $P=45 \text{ kW}$ 。

反渗透化学清洗装置包括清洗液箱、清洗过滤

器、清洗泵以及配套管道、阀门和仪表。

设置卧式离心泵6台,流量200 m³/h,扬程400 kPa, P=37 kW。此外,设反渗透清洗罐4座,容积20 m³。清洗过滤器4台,流量200 m³/h,精度5 μm。电加热器8台,功率60 kW,材质SS316。

③ 加药系统。通过加药系统向反渗透系统进水中投加化学药剂,包括还原剂加药装置、阻垢剂加药装置及非氧化性杀菌剂加药装置三类,每种加药装置均配置一个药剂计量箱,配搅拌器,采用PE材料。

其主要设备包括药罐、盐酸罐、液碱罐、计量泵及加药泵等。药罐用来存储还原剂、阻垢剂,4座,容积2 m³;盐酸罐1座,容积5 m³;液碱罐1座,容积2 m³。

计量泵及加药泵基本参数见表2。

表2 反渗透系统计量泵及加药泵基本设计参数

Tab.2 Basic design parameters of metering pump and dosing pump used in RO system

设备名称	数量/台	流量/(L·h ⁻¹)	扬程/10 ⁵ Pa	功率/kW
阻垢剂计量泵	12	9.5	6.9	0.25
还原剂计量泵	12	9.5	6.9	0.25
非氧化性杀菌剂加药泵	4	170	7	0.25
盐酸加药泵	12	15.1	7	0.25
化学清洗盐酸配药泵	2	170	7	0.25
氢氧化钠加药泵	2	170	7	0.25
氢氧化钠清洗加药泵	2	170	7	0.25
化学清洗碱配药泵	2	170	7	0.25

3 运行效果及经济分析

本项目一期工程于2019年1月完工,目前已经运行3年多。系统出水水质见表3。可见出水水质符合《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)中的冷却用水(敞开放式循环冷却水系统补充水)标准,全部指标均优于设计水质,完全满足万华工业园回用水要求。

本工程超滤+RO处理工艺的投资费用为1700元/m³。基于膜折旧年限(3年)和药剂投加量估算,预测直接运行成本为1.99元/m³,实际为1.82元/m³。目前烟台市再生水水价为4元/m³,低于烟台市区非居民供水价格(5.02元/m³),本工程显著降低了园区内工业企业的运行费用。

表3 再生水出水水质

Tab.3 Effluent quality of reclaimed water

项目	检测结果(平均值±标准误差)	GB/T 19923—2005标准值	设计出水
pH	6.86±0.48	6.5~8.5	6~7.5
SS/(mg·L ⁻¹)	0.35±0.15		≤1.0
浊度/NTU	0.30±0.09	≤5	≤0.5
色度/度	<5	≤30	≤10
BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	0.52±0.26	≤10	
NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	0.20±0.17	≤10	≤0.5
粪大肠菌群/(个·L ⁻¹)	237±68	≤2 000	≤500
余氯/(mg·L ⁻¹)	>0.1	≥0.05	≥0.05
TDS/(mg·L ⁻¹)	75.84±36.19	≤1 000	≤120
铁/(mg·L ⁻¹)	<0.02	≤0.3	≤0.05
总磷/(mg·L ⁻¹)	0.07±0.09	≤1	
总硬度(以CaCO ₃ 计)/(mg·L ⁻¹)	6.8±1.20	≤450	

4 结语

本再生水回用工程采用超滤+反渗透双膜法工艺,出水各项指标均优于《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)中的冷却用水(敞开放式循环冷却水系统补充水)标准相关要求,达到预期设计目标。

参考文献:

- [1] 李瑶,师林林,牛健健,等. 试析烟台市水资源开发利用的现状与对策[J]. 商情, 2018(11):70-71.
LI Yao, SHI Linlin, NIU Jianjian, et al. Analysis on the current situation and countermeasures of water resources development and utilization in Yantai City [J]. Business Situation, 2018(11):70-71(in Chinese).
- [2] 秦桂海. 烟台套子湾污水处理厂(一期)一级A升级改造[J]. 中国给水排水, 2018, 34(10):82-85,91.
QIN Guihai. Upgrade for meeting the first-level A standard of phase I of Yantai Taoziwan WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(10):82-85,91(in Chinese).

作者简介:刘晓军(1974—),男,山东荣成人,在职研究生学历,高级工程师,从事城市排水工程及污水处理工程设计与管理工作。

E-mail:lxjsr@163.com

收稿日期:2021-11-10

修回日期:2021-12-07

(编辑:孔红春)