

# 双膜法在盐碱地区再生水深度处理中的应用

马同宇, 褚一威, 陶 君, 马 帅  
(天津生态城水务投资建设有限公司, 天津 300467)

**摘 要:** 随着城市化进程的发展,人们对再生水的需求日益增加,再生水利用将成为满足城市用水的主要载体。为此,以满足国家一级A排放标准的污水厂尾水为研究对象,分析浸没式超滤+反渗透组合工艺(CMF-S+RO,双膜法)深度处理再生水的工程效果。结果表明,浸没式超滤+反渗透组合工艺可进一步去除尾水中的COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TP和溶解性总固体,相应指标的出水浓度分别为2.6~5.6、0.02~0.53、1.10~2.12、0.001~0.021和20~62 mg/L,同时对浊度的去除效果也较好,可使出水浊度降至0.02~0.15 NTU,出水水质满足《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002)的要求。

**关键词:** 污水处理厂尾水; 盐碱地区; 双膜法; 再生水; 深度处理

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)15-0085-05

## Application of Double Membrane Technology for Advanced Treatment of Municipal Reclaimed Water in Saline Area

MA Tong-yu, CHU Yi-wei, TAO Jun, MA Shuai

(Tianjin Eco-City Water Investment and Construction Co. Ltd., Tianjin 300467, China)

**Abstract:** Demanding for reclaimed water is increasing urgently with the development of urbanization. The utilization of reclaimed water will become the main carrier to meet urban water demand. This experiment took the effluent which had reached the national first class A discharge standards as the research object, and the advanced treatment of reclaimed water by submerged ultrafiltration and reverse osmosis combined process (CMF-S + RO, double membrane technology) was analyzed. The results showed that COD,  $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ , TP, turbidity and total dissolved solids in the tail water could be further removed by the combined process, and the corresponding effluent concentrations were 2.6–5.6 mg/L, 0.02–0.53 mg/L, 1.10–2.12 mg/L, 0.001–0.021 mg/L, 0.02–0.15 NTU and 20–62 mg/L, respectively. The effluent quality of the system could meet *The Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Urban Miscellaneous Water Consumption* (GB/T 18920–2002).

**Key words:** tail water of wastewater treatment plant; saline area; double membrane technology; reclaimed water; advanced treatment

开发利用非常规水资源是解决水资源危机的重要途径,由于污水处理厂出水水量大、水质稳定,因

此对污水处理厂出水进行深度处理,使其再生回用,成为了提高水资源利用率极为有效的手段。针对不

同的污水,再生水回用处理技术也有所不同<sup>[1]</sup>。目前,常规的再生水处理工艺已经在许多城市取得了工业化应用,而盐碱地区的城市污水处理厂出水中由于含盐量较高,常规的膜工艺无法满足盐度的处理要求,因此需要对膜工艺进行升级改造。

《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002)中车辆冲洗水的溶解性总固体(TDS)的限值为1 000 mg/L。实际调查发现,某污水厂二级出水具有高矿化度和高盐度特点,最高TDS可达5 734 mg/L,因此本研究选用反渗透(RO)技术作为除盐工艺<sup>[2]</sup>。为保证反渗透膜的进水要求,选用浸没式连续膜过滤技术进行预处理,采用负压运行。试验以污水厂提升工程的设计出水为研究对象,采用浸没式超滤+反渗透组合工艺(CMF-S+RO,双膜法)对污水厂出水进行深度处理,以期污水回用工程提供参考。

## 1 工程概况

污水厂设计产水规模近期为 $2.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,远期为 $4.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。气浮滤池出水进入机械膜格栅,设计流量为 $3.33 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,格栅出水进入浸没式超滤池。该厂具有6座浸没式超滤池,并联排列,出水由产水泵输送至超滤产水池,由于有 $3\,300 \text{ m}^3/\text{d}$ 的水量用于反冲洗,因此 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的水量通过RO增压泵、保安过滤器和RO串联泵进入RO和能量回收装置,然后进入RO池,得到 $9\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 的浓水需继续处理。工艺流程及水量平衡情况如图1所示。

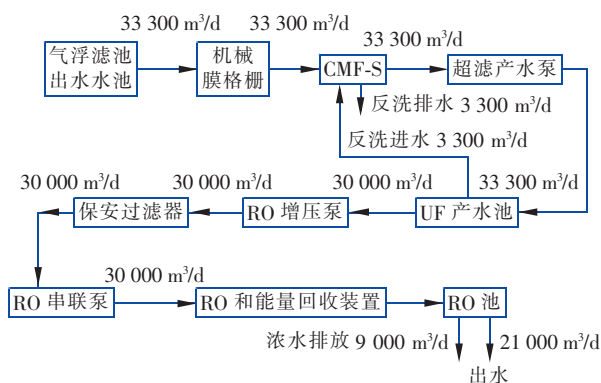


图1 工艺流程及水量平衡示意

Fig. 1 Schematic diagram of process and water balance

### 1.1 浸没式超滤膜系统

浸没式超滤系统的总设计进水规模为 $6.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,6座膜池共用一条配水渠,采用闸阀分配

各池的进水量。一期工程规模为 $3.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,产水量为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,选相邻的3座膜池安装设备,并在配水渠安装一组机械膜格栅,过滤精度为0.5 mm。膜池进水端采用 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的闸门控制进水量。膜池由浸没式膜组件(384组/池)、装配机架(16个/池)、产水泵及相关管路组成。电气系统主要包括配电设备和拖动设备,自控系统包括化学分析仪表、变送器、自动阀门、PLC及工业控制计算机等,自控系统通过计算机控制室内监视设备的运行状态,并可完成必要的控制操作。浸没式超滤系统由反洗管路及反洗泵等组成,清洗系统由供药泵、储罐、清洗加药系统与管路组成,采用PLC控制。供气系统由风机、空压机、空气净化器和供气管路组成,采用罗茨风机提供膜组件吹扫用气。

浸没式超滤系统为全流(死端)过滤的形式。气浮滤池产水通过压力渠经机械膜格栅去除对膜丝有损伤的大颗粒物质后,进入超滤膜池,并在超滤产水泵的抽吸作用下,通过中空纤维膜膜壁上的微孔进入膜纤维内腔,再经由产水端口汇集到集水管输送至超滤产水池,可去除细菌、大肠杆菌、悬浮物,降低浊度、污染指数(SDI),以保证反渗透系统的运行安全。

反冲洗水通常为超滤系统的产水,利用重力自流排放。为强化反洗效果,向超滤膜元件中通入气体抖动膜丝,使附着在膜丝上的污染物脱落。超滤设施化学清洗系统(CIP)的药液通过供药泵输送到膜池中,并利用超滤抽吸泵循环清洗。

### 1.2 反渗透系统

反渗透系统的总设计进水规模为 $4.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,回收率为70%,一期工程为 $2.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,采取并列布置,共建设8台反渗透膜架,其中一期使用4台。反渗透系统采用一级二段连接模式,设置4台供水泵,供水泵后端设置保安过滤器(钢制焊接的圆形容)。各段进水及浓水进出水总管上设有接口,并用硬管与清洗液进出管连接。进水口设置自动冲洗接口,浓水及产水侧设置自动冲洗排放口,各接口均设自动阀门,产水管装设爆破膜与不合格水自动排放阀门,浓水排水管上设置流量控制阀,产水管和浓水管上设取样点。反渗透产水出水方式为敞口式,停机时静压可自动释放一部分水。采用爆破膜防止反渗透膜背压破坏膜组件,当产水管路压力大于0.2 MPa时,爆破膜破裂,自动排水泄压。

## 2 结果与讨论

### 2.1 对浊度的去除

浸没式超滤系统对浊度的去除效果见图2。

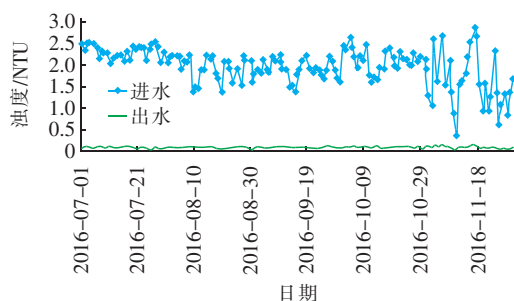


图2 浸没式超滤系统对浊度的去除效果

Fig. 2 Removal effect of turbidity by CMF-S

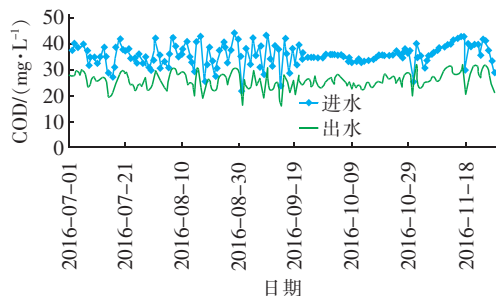
由图2可以看出,超滤膜池的进水浊度为0.33~2.84 NTU,平均为1.96 NTU,出水浊度为0.02~0.19 NTU,平均为0.10 NTU,且出水浊度的稳定性明显优于进水。7月份,原水浊度平均为2.31 NTU,经超滤膜池处理后,出水浊度平均为0.09 NTU,浊度平均去除率为96.1%。8月份,原水浊度平均为1.91 NTU,经超滤膜池处理后,出水浊度平均为0.09 NTU,浊度平均去除率为95.3%。9月份,原水浊度平均为1.89 NTU,超滤膜池出水浊度平均为0.09 NTU,浊度平均去除率为95.2%。10月份,原水浊度平均为2.08 NTU,超滤膜池出水浊度平均为0.12 NTU,浊度平均去除率为94.2%。11月份,原水浊度平均为1.61 NTU,超滤膜池出水浊度平均为0.09 NTU,浊度平均去除率为94.4%。可见,超滤膜池对浊度具有良好的去除效果,且去除率较为稳定。

当反渗透系统的进水浊度为0.02~0.19 NTU时,出水浊度为0.02~0.15 NTU,平均为0.08 NTU。7月—11月期间,浊度的月平均去除率在17.8%~20.1%之间,且较为稳定。可见,反渗透系统对浊度具有一定的去除能力,可以作为后续控制浊度的保障措施。

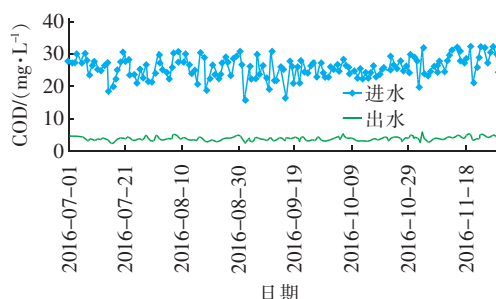
### 2.2 对COD的去除

浸没式超滤与反渗透组合工艺对COD的去除效果如图3所示。由图3(a)可知,超滤系统的进水COD在23~44 mg/L之间,平均为36 mg/L,出水COD在16~32 mg/L之间,平均为26 mg/L。监测期间,超滤膜池对COD的削减量为26.58 t,对COD的月平均去除率较为稳定,在26.4%~30.6%之

间。可见,超滤膜池对COD具有稳定的去除能力。



a. 浸没式超滤系统



b. 反渗透系统

图3 浸没式超滤与反渗透组合工艺对COD的去除效果

Fig. 3 Removal effect of COD by CMF-S + RO

由图3(b)可知,运行期间,反渗透系统的进水COD在16~32 mg/L之间,出水COD在2.6~5.6 mg/L之间,平均为4 mg/L。监测期间,反渗透系统对COD的削减量为45.29 t。对COD的月平均去除率在84.5%~85.0%之间。可见,反渗透系统对COD具有良好的去除能力,可以作为控制COD的保障措施。

### 2.3 对NH<sub>3</sub>-N的去除

工程运行期间,超滤膜池的进水氨氮为1.14~4.08 mg/L,平均为2.53 mg/L,出水氨氮为1.13~3.08 mg/L,平均为2.44 mg/L。监测期间,超滤膜池对氨氮的削减量仅为0.66 t,对氨氮的月平均去除率较低,在2.7%~3.9%之间。可见,超滤膜池对NH<sub>3</sub>-N的去除效果有限,因此对氨氮的去除应考虑采用前端处理或提高后端单元的去除能力。

反渗透系统对NH<sub>3</sub>-N的去除效果见图4。可知,反渗透系统的进水NH<sub>3</sub>-N为1.13~3.08 mg/L,出水NH<sub>3</sub>-N在0.02~0.53 mg/L之间,平均为0.25 mg/L。监测期间,反渗透系统对NH<sub>3</sub>-N的削减量为4.42 t,其对NH<sub>3</sub>-N的月平均去除率较高,在89.1%~90.3%之间。可见,反渗透系统对氨氮具有良好的去除能力,可以作为后续控制氨氮的保

障措施。

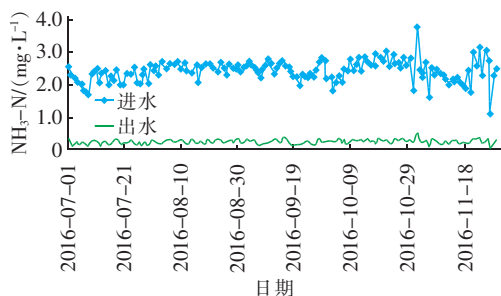


图4 反渗透系统对  $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除效果

Fig. 4 Removal effect of  $\text{NH}_3\text{-N}$  by RO

## 2.4 对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除

工程运行期间,超滤系统的进水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  为  $5.98 \sim 11.63 \text{ mg/L}$ ,平均为  $9.45 \text{ mg/L}$ ,出水硝态氮为  $6.74 \sim 11.95 \text{ mg/L}$ ,平均为  $9.38 \text{ mg/L}$ 。经计算,超滤膜池对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的月平均去除率较低,在  $-0.4\% \sim 2.1\%$  之间。因此,超滤膜池对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除效果有限,原水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除应考虑前端处理或提高后端保障单元的能力。

反渗透系统对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除效果见图5。

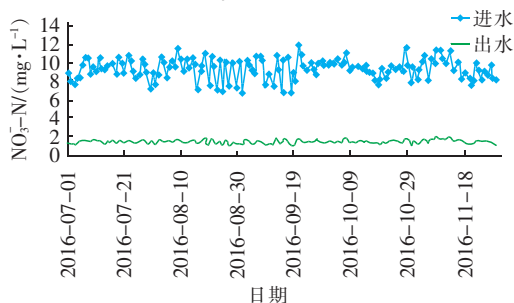


图5 反渗透系统对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除效果

Fig. 5 Removal effect of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  by RO

由图5可知,反渗透系统的进水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  在  $6.74 \sim 11.95 \text{ mg/L}$  之间,出水硝态氮在  $1.10 \sim 2.12 \text{ mg/L}$  之间,平均为  $1.53 \text{ mg/L}$ 。监测期间,反渗透系统对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的削减量为  $16.26 \text{ t}$ ,对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的月平均去除率在  $83.1\% \sim 83.9\%$  之间。可以看出,反渗透系统对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  具有良好的去除能力,可以保障出水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的浓度。

## 2.5 对TN的去除

工程运行期间,超滤膜池的进水TN在  $10.04 \sim 15 \text{ mg/L}$  之间,平均为  $13.29 \text{ mg/L}$ ,出水TN在  $9.77 \sim 14.87 \text{ mg/L}$  之间,平均为  $13.08 \text{ mg/L}$ 。监测期间,超滤膜池对TN的削减量为  $3.01 \text{ t}$ 。对TN的月

平均去除率较低,在  $1.4\% \sim 1.6\%$  之间。可以看出,超滤对原水TN的去除效果有限,对TN的去除应考虑前端处理或提高后端工艺的保障能力。

反渗透系统对TN的去除效果如图6所示。

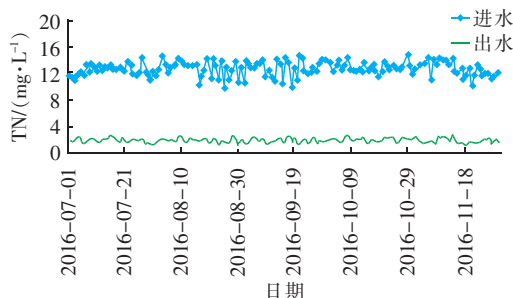


图6 反渗透系统对TN的去除效果

Fig. 6 Removal effect of TN by RO

由图6可知,反渗透系统的进水TN在  $9.77 \sim 14.87 \text{ mg/L}$  之间,平均为  $13.08 \text{ mg/L}$ ,出水TN在  $1.19 \sim 2.88 \text{ mg/L}$  之间,平均为  $1.97 \text{ mg/L}$ 。监测期间,有16%的天数出水TN满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的IV类水质要求,有55%的天数出水TN满足V类水质要求。该期间,反渗透系统对TN的削减量为  $22.92 \text{ t}$ ,对TN的月平均去除率在  $84.5\% \sim 85.6\%$  之间。可见,反渗透系统对TN具有良好的去除能力,使出水TN保持较低浓度。另外,出水TN的平均浓度不能完全满足GB 3838—2002中IV类水质的要求,这在一定程度上影响着其作为景观水体和应急调控保障水源的功能,因此需进一步发挥前端强化二级生物处理工段的脱氮能力,或在深度处理阶段增设强化反硝化脱氮工艺。

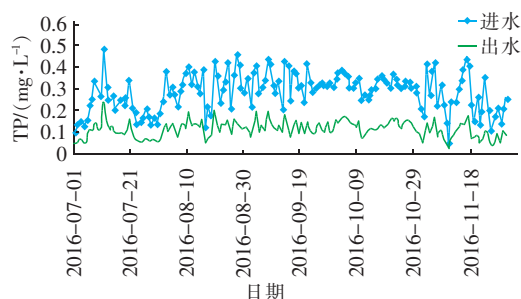
## 2.6 对TP的去除

浸没式超滤与反渗透组合工艺对TP的去除效果如图7所示。由图7(a)可知,超滤膜池的进水TP为  $0.05 \sim 0.49 \text{ mg/L}$ ,平均为  $0.29 \text{ mg/L}$ ,出水TP为  $0.02 \sim 0.24 \text{ mg/L}$ ,平均为  $0.11 \text{ mg/L}$ 。监测期间,超滤膜池对TP的削减量为  $0.40 \text{ t}$ ,月平均去除率较稳定,在  $58.6\% \sim 62.6\%$  之间。可见,超滤膜池对TP具有良好的去除效果,且去除率较稳定。

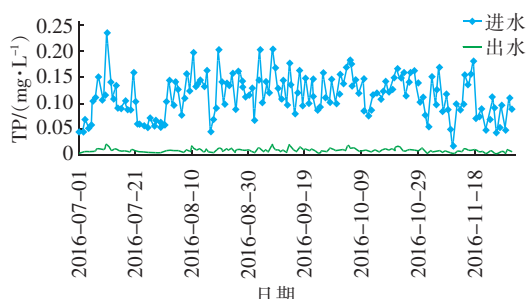
由图7(b)可知,反渗透系统的进水TP为  $0.02 \sim 0.24 \text{ mg/L}$ ,出水TP为  $0.001 \sim 0.021 \text{ mg/L}$ ,平均为  $0.009 \text{ mg/L}$ 。监测期间,反渗透系统对TP的削减量为  $0.40 \text{ t}$ ,月平均去除率较为稳定,在  $92.3\% \sim 92.7\%$  之间。可见,反渗透系统对TP具有良好的



去除能力,可以确保出水 TP 浓度在较低水平。



a. 浸没式超滤系统



b. 反渗透系统

图7 浸没式超滤与反渗透组合工艺对 TP 的去除效果

Fig. 7 Removal effect of TP by CMF-S + RO

## 2.7 对溶解性总固体的去除

由于对 TDS 的去除主要是在反渗透系统,故本研究将再生水系统作为一个整体,分析处理工艺对 TDS 的去除效果,图 8 为浸没式超滤与反渗透组合工艺对 TDS 的去除效果。

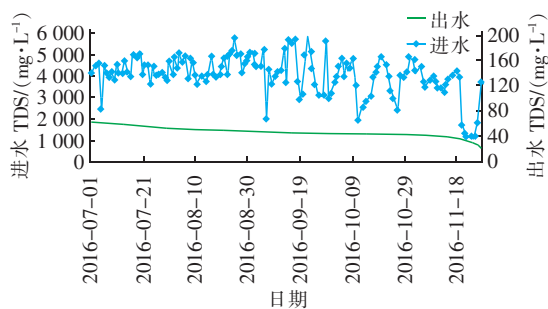


图8 浸没式超滤与反渗透组合工艺对 TDS 的去除效果

Fig. 8 Removal effect of TDS by CMF-S + RO

从图 8 可以看出,再生水系统的进水 TDS 浓度在 1 034 ~ 5 733 mg/L 之间,平均为 4 066 mg/L,出水 TDS 浓度在 20 ~ 62 mg/L 之间,平均为 46 mg/L,且 TDS 的月平均去除率较为稳定,均在 97% 以上。可见,该再生水系统对 TDS 具有良好的去除效果,且去除率较为稳定。

## 3 结论

采用浸没式超滤膜 + 反渗透组合工艺处理具有

高矿化度和高盐度的污水厂二级出水,该工艺对 TDS 的月平均去除率在 97% 以上。超滤系统对 COD、TP、浊度均具有较高的净化效能,可使平均出水 COD 和 TP 分别降低至 26、0.11 mg/L,平均出水浊度降低至 0.10 NTU,但对  $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TN 的去除能力有限。反渗透系统作为深度处理的保障单元,可使平均出水 COD、TP、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TN 分别降低至 4、0.009、0.25、1.53、1.97 mg/L,平均出水浊度降低至 0.08 NTU,出水水质达到《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002)中车辆冲洗水质要求。

## 参考文献:

- [1] 王旭.  $\text{A}^2/\text{O} - \text{MBR}$  处理城市污水的应用研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2011.  
Wang Xu. Applied Research on  $\text{A}^2/\text{O}$  Combined MBR Process for Municipal Wastewater[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011 (in Chinese).
- [2] 杨京生,孟瑞明. 微滤—反渗透工艺在高品质再生水回用工程中的应用[J]. 给水排水,2008,34(12):9-13.  
Yang Jingsheng, Meng Ruiming. Application of the micro-filtration - reverse osmosis process in high quality reclaimed wastewater recycling project [J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34(12):9-13 (in Chinese).



作者简介:马同宇(1982 - ), 男, 天津人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为水污染控制与水环境治理技术。

E-mail: matongyu@163.com

收稿日期:2018-01-11