

# 卤水处理纳滤膜的制备及其在工程化应用中的研究

郎丰国<sup>1</sup>, 潘玉强<sup>1</sup>, 薛林<sup>1</sup>, 梁松苗<sup>2\*</sup>, 胡利杰<sup>2</sup>, 郑燚<sup>2</sup>

(1. 山东海化集团有限公司, 山东 潍坊 262737; 2. 时代沃顿科技有限公司, 贵州 贵阳 550018)

**摘要:**通过在膜制备过程中引入两性离子 *N*-乙基哌嗪丙基磺酸盐(AEPPS)制备高性能卤水处理纳滤膜。当 AEPPS 添加量为 0.3% 时, 纳滤膜对  $\text{MgSO}_4$  脱除率达到 99.79%, 通量为  $40.13 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,  $\text{CaCl}_2$  脱除率为 88.68%, 通量为  $42.12 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 综合性能最佳。卤水处理工程化应用结果表明, 所制备纳滤膜对  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  脱除率分别达到 84%、95%, 同比优于国外竞品膜的 75%、92%, 两者系统产水量相当, 在同类行业中具有明显的技术和成本优势。

**关键词:**纳滤膜; 两性离子; 卤水处理; 工程化应用; 纯碱行业

中图分类号: TQ028.8

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)10-0204-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.10.042

## Preparation of nanofiltration membrane for brine treatment and application in engineering

LANG Feng-guo<sup>1</sup>, PAN Yu-qiang<sup>1</sup>, XUE Lin<sup>1</sup>, LIANG Song-miao<sup>2\*</sup>, HU Li-jie<sup>2</sup>, ZHENG Yi<sup>2</sup>

(1. Shandong Hailua Group Co., Ltd., Weifang 262737, China;

2. Vontron Membrane Technology Co., Ltd., Guiyang 550018, China)

**Abstract:** High performance nanofiltration membranes for brine treatment are prepared by adding ethyl aminopiperazine propyl sulfonate (AEPPS), a kind of zwitterionic, in aqueous solution during the preparation of membranes. As the addition of AEPPS is 0.3%, the membrane can remove 99.79% of  $\text{MgSO}_4$  with a flux of  $40.13 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , and remove 88.68% of  $\text{CaCl}_2$  with a flux of  $42.12 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ . As the prepared nanofiltration membranes are applied in actual brine treatment systems, the removal rates of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  reach 84% and 95%, respectively, compared with 75% and 92% by the imported membranes. Moreover, the system using the prepared membranes presents a similar permeation flux with that using the imported membranes, showing significant competitive advantages in the case of technology application and operation cost.

**Key words:** nanofiltration membrane; zwitterionic; brine treatment; engineering application; soda ash industry

卤水是指含盐量大于 5% 的液态矿产, 聚集在地表的称为表卤水, 聚集在地下的称为地下卤水。随着科学技术的不断进步, 卤水资源开发以多元水盐体系相图为依据, 在确定多种先进的物理化学工艺手段的同时, 还建立了众多大型的无机盐化工产品生产基地<sup>[1]</sup>, 卤水中的化学资源若进行综合利用, 将为我国国民经济的发展提供不可或缺的物质保证。然而, 我国渤海莱州湾近海沿岸地区地下卤水储量丰富, 卤水中含有大量  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$ , 同时含有  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{Br}^-$ 、 $\text{I}^-$  等离子<sup>[2]</sup>, 属于典型的氯化钠型卤水, 是生产原盐、氯碱、纯碱和小苏打等工业基础产品的重要原料<sup>[3]</sup>。由于地下卤水中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  等杂质成分含量较高, 在其利用过程中, 对 2 价离子的分离成为生产高品质产品的

关键<sup>[4]</sup>。传统去除 2 价离子的工艺如沉淀法、盐析法、蒸发结晶法、溶剂萃取法、吸附法、电渗析法等<sup>[5-6]</sup>存在提炼过程复杂、资源综合利用效率低、药剂消耗量大等缺点, 难以提高卤水资源开发利用的效益。因此, 为解决卤水资源的开发利用面临的技术不足与困境, 卤水处理过程必须进一步优化并结合具有核心竞争力的技术优势而进行。

膜技术是一种高效率、低能耗、易操作的液体分离技术, 具有处理效果好、可实现废水的循环利用及回收有用成分等优点<sup>[7]</sup>。而纳滤作为一种常见的水处理膜过程, 对高价离子及小分子有机物能够进行高效脱除, 具有高选择性、高通量特点<sup>[8-10]</sup>, 应用领域十分广泛。目前, 针对卤水资源化高效综合利用问题, 一些学者相继开展了纳滤膜在处理卤水方

收稿日期: 2020-11-13; 修回日期: 2021-08-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0403900); 国家重点研发计划项目(2016YFE0118800)

作者简介: 郎丰国(1970-), 男, 学士, 工程师, 主要从事卤水处理工程化应用研究, 13656462927@163.com; 梁松苗(1977-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 水处理膜材料的开发及工程化应用, 通讯联系人, liangsongmiao@vontron.com。

面的相关研究。陈涛等<sup>[11]</sup>采用界面聚合法制备聚哌嗪纳滤膜,通过在卤水脱芒硝的应用中表明,该纳滤膜对高含量卤水中的 $\text{SO}_4^{2-}$ 具有优异分离效果,脱除率达到98%,而 $\text{Cl}^-$ 的脱除率为5%。吴雅琴等<sup>[12]</sup>采用纳滤和电驱动集成技术处理高盐废水,运行结果显示,膜系统对 $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 的脱除率均高于99%, $\text{Ca}^{2+}$ 脱除率超过90%,获得了良好应用效果,但运行工艺相对复杂,消耗成本较高,推广应用范围有限。刘俊强等<sup>[13]</sup>将纳滤膜应用于卤水处理制备精制原盐,结果发现一级纳滤膜系统对 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 的脱除率分别为53.3%、82.14%、94.67%,脱除效果仍不能满足实际应用。潘玉强等<sup>[14]</sup>研究发现卤水处理过程中 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 的富集容易使纳滤膜表面形成结垢,膜通量大幅度衰减,清洗频率增加,使用寿命明显降低。综上可知,纳滤膜在处理卤水的工业应用中存在脱除率不足等问题,严重制约着其在卤水处理行业中的推广应用。因此,提高膜分离性能是卤水处理纳滤膜研究开发的方向。

*N*-乙基胺哌嗪丙基磺酸盐(AEPPS)是一种带有亲水基和反应性氨基的两性离子<sup>[15-16]</sup>,作为添加剂,在提高卤水纳滤膜水通量和稳定脱盐层结构方面具有潜在的适用性。基于AEPPS结构特性<sup>[17-19]</sup>,本工作尝试在膜制备过程中引入AEPPS制备高性能卤水处理纳滤膜,以期在保持钙镁离子高脱除率的同时,维持较高的通量,从而实现纯碱行业节能降本增效的目的<sup>[20]</sup>。

## 1 材料与试剂

### 1.1 实验材料及试剂

聚砜(PS,  $M_n \approx 22$  kDa, Solvay), *N,N*-二甲基乙

酰胺(DMAC 分析纯),间苯二胺(MPD 分析纯),磷酸钠(分析纯),均苯三甲酰氯(TMC 分析纯),*N*-乙基胺哌嗪丙基磺酸盐(AEPPS),乙基环己烷(EC 分析纯),正己烷(分析纯),甘油,十二烷基硫酸钠(SDS 分析纯),异丙醇(IPC 分析纯)等其他辅助溶剂及添加剂。

### 1.2 实验仪器

刮膜试验机、覆膜试验机及其他辅助设备。

## 2 实验方法

### 2.1 膜制备过程

超滤膜的制备:首先按照比例配制质量分数18%的聚砜溶液,150℃搅拌4 h,室温静置脱泡,完成铸膜液配制;调节刮膜机凝固浴温度10~15℃,热水箱温度60~70℃,设置线速度为4 m/min,制备厚度为0.13~0.15 mm的PS超滤膜。

水相溶液的配制:在去离子水中按质量分数分别为1.5%、0.05%的比例加入MPD、磷酸钠,调控AEPPS的添加量分别为0.1%、0.2%、0.3%、0.4%,搅拌均匀,得到水相溶液。

有机相溶液的配制:正己烷和乙基环己烷按质量比3:1混合,加入质量分数0.3%的有机相单体TMC,并搅拌溶解均匀,得到有机相溶液。

卤水处理纳滤膜的制备:取超滤膜浸于水中1 min,沥干表面水珠后再浸入有机相0.5 min,待膜面有机溶剂冷风吹干后将膜片浸入保湿剂(去离子水、甘油、异丙醇、十二烷基硫酸钠质量比为80:5:3:2),完成后处理过程。随后将膜片置于70~80℃烘箱中烘干,得到卤水处理纳滤膜。制备过程和反应机理如图1和图2所示。

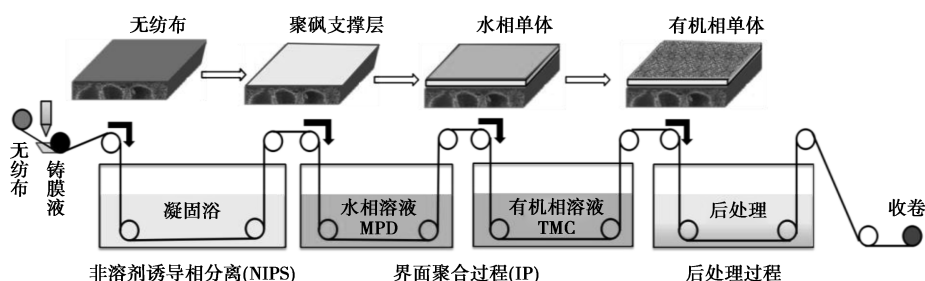


图1 纳滤膜制备工艺示意图

### 2.2 膜性能表征

场发射扫描电子显微镜(SEM, 型号 JEOL-7500F)检测膜表面形貌及断面结构;动态接触角测试(CA, 型号 DSA30),测试膜片表面的亲疏水性;X

射线能谱仪,表征膜片结构的功能层组分;Zeta 表面电位分析仪,测试膜表面的电势;8 联装膜片检测台及 8 寸膜元件检测装置测试膜片通量和脱盐基本性能。

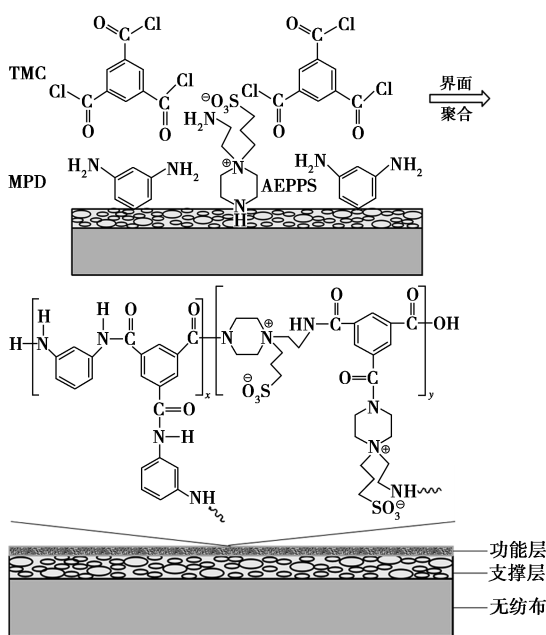


图 2 纳滤膜制备反应机理示意图

### 2.3 纳滤膜精制卤水的工程化应用设计

原卤水主要组分为  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$ , 并含有  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等离子, 纳滤膜进水水质指标如表 1 所示。基于原卤水组分及卤水纳滤膜进水水质要求, 精制卤水纳滤系统设计路线如图 3 所示。预处理后的原卤水经过供水泵, 通过调节 pH 保障纳滤膜进水水质, 而后过保安过滤器, 一部分进高压泵, 一部分进能量回收装置由增压泵增压后与高压泵混合进入纳滤系统, 利用纳滤膜特定分离性能, 分别得到高含量钙、镁、硫酸盐的纳滤浓水和氯化钠纯度较高的纳滤产水, 即精制卤水。本文中设计的卤水处理纳滤膜和国外 G 公司纳滤膜分别整套装配于生产装置中。

表 1 纳滤膜钙镁离子进水水质指标

组分	$\text{Ca}^{2+}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{Mg}^{2+}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{NaCl}/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$
进水	1000~1500	5000~6000	80~100

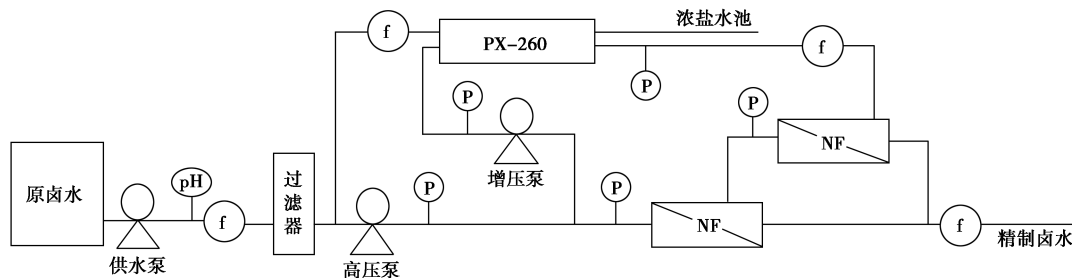


图 3 精制卤水纳滤系统设计

## 3 结果与讨论

### 3.1 AEPPS 含量对纳滤膜性能的影响

如表 2 所示, 随着 AEPPS 含量的增加, 纳滤膜通量先升高后降低, 当质量分数为 0.3% 时, 各溶液体系通量达到最高值。分析认为, 这可能是由于两性离子中亲水基团的作用使膜面更容易与体系中的

表 2 APPES 含量对纳滤膜产水通量的影响

AEPPS 添加量/%	NaCl 溶液 产水量/ ( $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )	$\text{MgSO}_4$ 溶液 产水量/ ( $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )	$\text{CaCl}_2$ 溶液 产水量/ ( $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )
0	35.0	31.2	33.2
0.1	37.2	35.0	36.8
0.2	41.2	38.0	39.8
0.3	45.1	40.6	41.6
0.4	42.2	38.3	40.1

测试条件: 100 psi, 25°C, 溶液浓度 0.2%。

自由水结合, 形成一层特殊的亲水层<sup>[21]</sup>, 进而纳滤膜通量随着 AEPPS 含量的增加而增加。当添加量大于质量分数 0.3% 时, 膜片通量有降低趋势, 分析认为, 造成这一现象的原因可能是由于两性离子含量超过一定程度时, 参与界面聚合反应的氨基和亚氨基数量增加, 造成功能层致密度有所提高, 膜通量下降。

如表 3 所示, 随着 AEPPS 含量的增加, 纳滤膜各溶液体系脱盐率平稳提高,  $\text{MgSO}_4$  脱除率达到 99% 以上,  $\text{CaCl}_2$  脱除率稳定在 87%~88%, 综合纳滤膜整体性能可知, 当 AEPPS 质量分数为 0.3% 时, 卤水纳滤膜对无机盐离子的脱除效果最佳。进一步分析认为, 两性离子结构中的亲水基团对纳滤膜体系性能起到主导作用, 而结构中的氨基在界面聚合过程中主要起到稳定脱盐层结构作用。因此, 制备卤水处理纳滤膜在保持高脱除率的同时, 维持较高的通量。

表 3 APPEs 含量对纳滤膜脱盐率的影响 %

AEPPS 添加量	NaCl 溶液 脱盐率	MgSO <sub>4</sub> 溶液 脱盐率	CaCl <sub>2</sub> 溶液 脱盐率
0	36.3	98.9	84.2
0.1	37.0	98.8	86.3
0.2	40.0	98.8	83.9
0.3	42.6	98.6	84.6
0.4	41.6	98.2	85.0

测试条件: 100 psi, 25°C, 溶液浓度 0.2%。

### 3.2 纳滤膜结构与表征

#### 3.2.1 膜表面基本性能

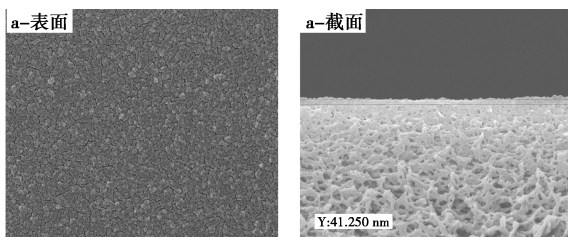
由表 4 可知, 卤水处理纳滤膜表面接触角为 25°, 表面电势为 -40.28 mV, 而常规纳滤膜接触角和表面电势分别为 36.8° 和 -22.68 mV。由此可见, 卤水处理纳滤膜表面亲水性更好且表面电势较高。根据离子化效应的影响<sup>[22]</sup>, 膜面所带电荷越多, 膜表面亲水性更好, 则更有利于膜通量的提高。

表 4 纳滤膜表面基本性能参数

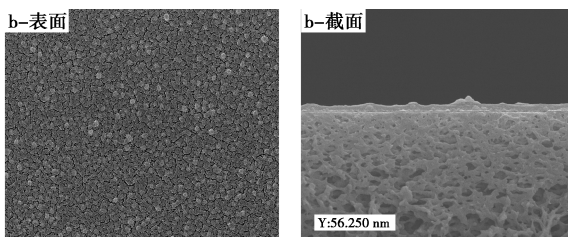
试样名称	接触角/(°)	表面电势/mV
卤水处理纳滤膜	25.0	-40.28
常规纳滤膜	36.8	-22.68

#### 3.2.2 纳滤膜形貌及结构

如图 4 所示, 从脱盐层微观结构分析, 相较于常规纳滤膜, 卤水处理纳滤膜表面粒径结构分布均匀, 粒径尺寸较小 (35 ~ 50 nm), 脱盐层厚度约为 41.5 nm, 分析认为造成这一现象的原因可能是由



(a) 卤水处理纳滤膜



(b) 常规纳滤膜

图 4 纳滤膜的表面形貌及结构

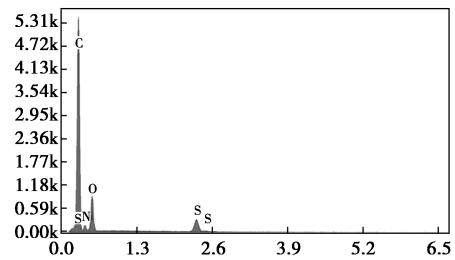
于界面聚合过程中 AEPPS 的引入, 使得参与界面聚合反应的氨基数量增多, 造成初生功能层更为致密, 一定程度上阻碍了后续水相单体透过初生层与有机相单体接触进一步反应, 所以最终生成的功能层薄而致密<sup>[23]</sup>。

#### 3.2.3 纳滤膜表面元素分析

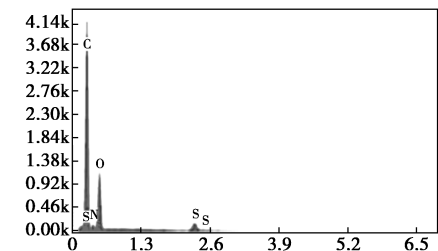
由表 5 和图 5 膜表面元素分析结果可知, 卤水处理纳滤膜 O/N 比值为 1.33, 较常规纳滤膜比值 2.52 小很多; 根据界面聚合过程反应机理推知, O/N 比能够定性地反映界面聚合过程的交联度, 其值越接近 1 代表着聚合物交联度就越大, 功能层也就越致密, 这一结论和 3.2.2 论证内容相吻合。致密的功能层结构更有利于纳滤膜对钙镁离子的脱除, 而交联度较高的膜结构综合性能往往更佳。因此, 卤水处理纳滤膜在特定系统的应用上也更具性能优势。

表 5 纳滤膜表面元素含量

试样名称	C/%	N/%	O/%	O/N
卤水处理纳滤膜	62.84	15.96	21.20	1.33
常规纳滤膜	61.56	10.84	27.37	2.52



(a) 卤水处理纳滤膜



(b) 常规纳滤膜

图 5 纳滤膜表面元素分析结果

### 3.3 卤水处理纳滤膜的工程化应用

目前市场上占有率较大的商品化纳滤膜为国外 G 公司生产的纳滤膜。因此在系统化应用上, 将本工作所设计的纳滤膜 (VONTRON 公司) 与国外 G 公司市售纳滤膜在卤水处理脱除钙镁离子及产水通量方面进行分析对比。

### 3.3.1 标准化镁离子脱除率

如图 6 所示,卤水处理纳滤膜对镁离子表现出优异的分性能,系统脱除率始终要高于国外 G 公司纳滤膜,系统运行 5 个月后镁离子的脱除率始终稳定在 95% 左右,12 个月后达到 87%,而 G 公司纳滤膜随着运行时间延长,对镁离子的脱除率由初始的 92% 下降到 84%。相对膜系统长期运行脱除镁盐效果而言,本文中研究制备的卤水处理纳滤膜更具有明显的技术优势。

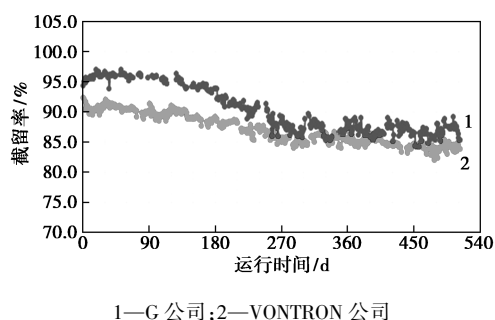


图 6 镁离子截留率随时间的变化趋势

### 3.3.2 标准化钙离子脱除率

如图 7 所示,卤水处理纳滤膜对钙离子脱除率稳定在 84% 左右,与国外 G 公司纳滤膜 75% 脱除率相比,明显高出 9% 左右。在后续长期运行过程中,虽然两组膜系统对  $\text{Ca}^{2+}$  的脱除率均有所下降,但从整体运行效果分析,本文中设计的卤水处理纳滤膜具有更好的  $\text{Ca}^{2+}$  脱除率,在系统工程应用中具备一定性能优势。

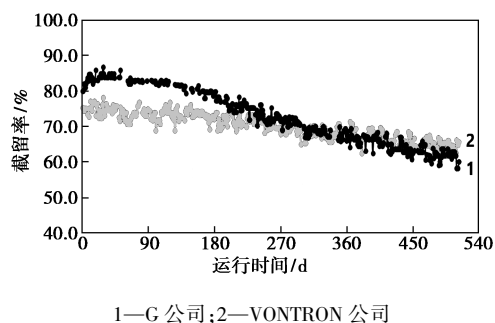


图 7 钙离子截留率随时间的变化趋势

### 3.3.3 标准化产水量

如图 8 所示,卤水处理纳滤膜工程化应用后,系统整体运行产水量稳定,运行 1 年后,通量衰减幅度较小。与国外 G 公司纳滤膜相比,卤水处理纳滤膜系统初始产水量和后续性能均与其相当。表明本文中设计的卤水处理纳滤膜在长期运行稳定性方面能够具备优异的工业适用性。

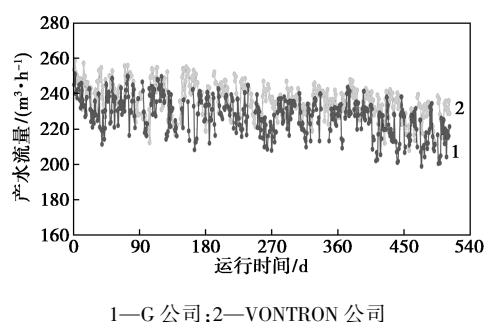


图 8 产水流量随时间的变化趋势

## 4 结论

(1) 通过在膜制备过程中引入两性离子 AEPPS 制备卤水处理纳滤膜。当 AEPPS 添加量为质量分数 0.3% 时,卤水处理纳滤膜对  $\text{MgSO}_4$  脱除率为 99.79%,通量为  $40.13 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,  $\text{CaCl}_2$  脱除率为 88.68%,通量为  $42.12 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,综合性能最佳。

(2) 卤水处理工程应用效果显示,本文中设计的卤水处理纳滤膜对  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  脱除率分别达到 84%、95%,同比优于国外竞品膜的 75%、92%,两者系统产水量相当。从长期运行效果可以看出,卤水处理纳滤膜能有效实现地下卤水直接应用纯碱生产的预期效果,在同类行业中具有明显的技术优势。

## 参考文献

- [1] 刘建路,刘霞,岳茂文,等.渤海莱州湾地下卤水纳滤过程的结垢趋势研究[J].无机盐工业,2019,51(8):64-68.
- [2] 潘玉强,吴中平,赵亮,等.纳滤技术处理地下卤水的研究及工程化应用[J].纯碱工业,2019,(4):3-7.
- [3] Liu L,Zhao C W.Study on nanofiltration for sulfate removal from high-salinity brine[J].Chlor-Alkali Industry,2017,53(7):1-4.
- [4] Song W D,Wang H Z,Xing K,et al.Nanofiltration technology and its application in the comprehensive utilization of bitterm resources[J].Journal of Salt lake Research,2006,14(4):56-60.
- [5] 成琪,关云山.高镁锂比卤水的纳滤膜分离性能研究[J].无机盐工业,2019,51(2):35-39.
- [6] 徐萍,钱晓明,郭昌盛,等.用于盐湖卤水镁锂分离的纳滤技术研究进展[J].材料导报,2019,33(2):410-417.
- [7] 李凤娟,徐菲,李小龙,等.高盐度废水处理技术研究进展[J].环境科学与管理,2014,39(2):72-75.
- [8] 郭乃妮,郑敏燕,杨连利.高性能荷电纳滤膜的制备研究进展[J].皮革与化工,2015,32(3):26-29.
- [9] 邓兆龙,邓慧宇,陈庆春,等.超支化聚酰胺纳滤膜的制备及其吸附性能研究[J].功能材料,2017,8(1):1099-1104.
- [10] 武福平,焦相伟,郭译文,等.国产纳滤膜对无机盐截留性能的研究[J].水处理技术,2017,(12):41-44.

(下转第 214 页)

## 参考文献

- [1] 林明敏. 浅析石油化工企业高含盐污水的处理方法[J]. 现代国企研究, 2018, (6): 48.
- [2] 马明奇. 超临界水氧化处理复杂成分有机废水特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [3] 欧阳创. 超临界水氧化法处理有机污染物研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [4] Du Xin, Zhang Rong, Gan Zhongxue, *et al.* Treatment of high strength coking wastewater by supercritical water oxidation [J]. *Fuel*, 2013, (104): 77-82.
- [5] Schubert M, Aubert J, Johannes B Müller, *et al.* Continuous salt precipitation and separation from supercritical water. Part 3: Interesting effects in processing type 2 salt mixtures [J]. *Journal of Supercritical Fluids*, 2012, (61): 44-54.
- [6] 周黎, 潘志彦, 林春绵, 等. 无机盐在超临界水中溶解性研究进展[J]. 现代化工, 2010, 30(5): 33-37.
- [7] Marinella Farré, Damià Barceló. Toxicity testing of wastewater and sewage sludge by biosensors, bioassays and chemical analysis [J]. *Cheminform*, 2003, 22(5): 299-310.
- [8] 赵汝松, 柳仁民, 崔庆新. 固相微萃取-气相色谱-质谱联用测定水中酚类化合物[J]. 分析化学, 2002, (10): 1240-1242.
- [9] 孟磊, 郑先福, 王永珊, 等. 高效液相色谱法测定工业废水中的硝基酚[J]. 光谱实验室, 2007, (5): 868-871.
- [10] 付文雯, 罗彤, 朱影, 等. QuEChERS-气相色谱-串联质谱测定牛奶中有机氯农药及多氯联苯的分析[J]. 食品科学, 2018, 39(8): 309-313.
- [11] Ján Tóth, Yaroslav Bazel'. Development of a new kinetic spectrophotometric method for the determination of chromium with an optical probe[J]. *Applied Spectroscopy*, 2018, 73(4): 492-502.
- [12] 段娟, 王毅, 罗大成, 等. 一种化工废水中有机物定性定量检测方法的建立和应用[J]. 化工管理, 2020, (11): 51-52.
- [13] 王雪丽. 煤化工废水“近零排放”技术与应用[J]. 化工管理, 2018, (21): 145-146.
- [14] 何明杰, 张艳, 孟庆伟, 等. 生化处理沙漠油田高盐含油污水[J]. 油气田环境保护, 2018, 28(2): 36-39.
- [15] 吴限. 煤化工废水处理技术面临的问题与技术优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [16] 韩沂洋. 三元驱采油污水的处理技术分析及其进展探讨[J]. 化学工程与装备, 2019, (4): 291-292.
- [17] 孙威, 张莉, 吴小丽, 等. 电镀废水有机污染物去除技术初探[J]. 科技创新导报, 2017, 14(35): 104-105.
- [18] 何灿, 黄祁, 张力磊, 等. 催化臭氧氧化深度处理高含盐废水的工程应用[J]. 工业水处理, 2019, 39(11): 107-109.
- [19] Mohammadreza Kosari, Morteza Golmohammadi, Jafar Towfighi, *et al.* Decomposition of tributyl phosphate at supercritical water oxidation conditions: Non-catalytic, catalytic, and kinetic reaction studies [J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2018, (133): 103-113.
- [20] 李晶晶, 董泽琴, 张维. 超临界水氧化法处理焦化废水的模拟试验[J]. 净水技术, 2013, 32(5): 26-30.
- [21] 李咏梅, 顾国雄, 赵建夫. 焦化废水中几种含氮杂环有机物在 A<sub>1</sub>-A<sub>2</sub>-O 系统中的降解特性研究[J]. 环境科学学报, 2002, (1): 34-39.
- [22] 刘建坤, 李全忠, 郑荣华, 等. 水中溶解性总固体测定标准方法比较[J]. 中国卫生检验杂志, 2010, 20(1): 214.
- [23] Savage, Phillip E. Organic chemical reactions in supercritical water [J]. *Chemical Reviews*, 1999, 99(2): 603-622.
- [24] Giorgio Modesti. Non-polar solutes solvation in supercritical water [J]. *Chemical Reviews*, 2007, 99(19): 543-563.
- [25] 周黎, 潘志彦, 林春绵, 等. 无机盐在超临界水中溶解性研究进展[J]. 现代化工, 2010, 30(5): 33-37. ■
- [11] 陈涛, 李俊俊, 刘文超, 等. 纳滤膜制备及其在卤水脱芒硝中的应用[J]. 水处理技术, 2015, 41(11): 71-74.
- [12] 吴雅琴, 杨波, 朱圆圆, 等. 膜集成技术在高含盐废水资源化中的应用[J]. 水处理技术, 2016, 42(7): 118-121.
- [13] 刘俊强, 路建新, 刘琪, 等. 纳滤卤水精制技术在纯碱生产中的应用[J]. 纯碱工业, 2015, (4): 15-17.
- [14] 潘玉强, 刘建路, 管志强, 等. 卤水纳滤过程中纳滤膜污染防治的意义及建议[J]. 纯碱工艺, 2018, (2): 3-6.
- [15] 魏秀珍, 孔新, 王松雪, 等. 两性离子在高分子膜改性及提高膜抗污染性中的研究进展[J]. 功能材料, 2014, 45(2): 02007-02012.
- [16] Ma T Y. Fabrication of high flux, antifouling nanofiltration membranes with zwitterionic monomer and hybrid materials [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [17] Ji Y L, An Q F, Zhao Q, *et al.* Novel composite nanofiltration membranes contain zwitterions with high permeate flux and improved anti-fouling performance [J]. *Journal of Membrane Science*, 2019, 390/391: 243-253.
- [18] An Q F, Sun W D, Zhao Q, *et al.* Study on novel nanofiltration membranes prepared by interfacial polymerization with zwitterionic amine monomers [J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, (431): 171-179.
- [19] 段龙繁, 邓慧宇, 陈庆春, 等. AEPPS 对超支化聚酰胺纳滤膜性能的影响[J]. 精细化工, 2020, 37(3): 590-597.
- [20] 张秀峰, 谭秀民, 张利珍. 纳滤膜分离技术应用于盐湖卤水提锂的研究进展[J]. 无机盐工业, 2017, 49(1): 1-5.
- [21] Sun S Q. Zwitterionic modification of nanofiltration membranes to improve anti-fouling property [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017.
- [22] 梁松苗, 许国杨, 金焱, 等. 醇类及氧化处理对反渗透膜表面的 Zeta 电势及性能的影响[J]. 水工业市场, 2012, (6): 73-76.
- [23] Kah P Lee, Jumeng Zheng, Gerrald Bargeman, *et al.* pH stable thin composite polyamine nanofiltration membranes by interfacial polymerisation [J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, (478): 75-84. ■

(上接第 208 页)