

反渗透膜在压电双场源下的脱盐特性

伊学农, 钱荣羊

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 为进一步提高反渗透膜的脱盐性能,将电场施加于反渗透膜系统,形成双场源,建立处理水量为146 L的中试装置。在低、中以及高盐浓度进水条件下,对比单一压力场和压电双场源下膜通量、脱盐率和能耗情况。结果表明:外加电场后,反渗透膜的膜通量增大,低、中和高盐浓度进水对应的膜通量分别增长了0.6~1.2、0.8~1.7和1.8~4.2倍;电场对反渗透膜的脱盐率影响不显著,压电耦合场与单一压力场下的反渗透膜的脱盐率均保持在99%以上;进水盐浓度为3 000和20 000 mg/L时,耦合系统电耗比单一压力场时的低,最多分别降低了34%和29.7%。

关键词: 反渗透; 耦合场; 膜通量; 脱盐

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)11-0069-05

Desalination by Reverse Osmosis under Synergies of Electric Field and Pressure Field

YI Xue-nong, QIAN Rong-yang

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To improve the desalination performance of the reverse osmosis membrane, the electric field was coupled with the pressure field of the reverse osmosis membrane and tested in a pilot device with treatment capacity of 146 L. The membrane flux, desalination rate and energy consumption of the reverse osmosis membrane under the single pressure field and under the coupled fields were compared at different influent salt concentrations. The results showed that the membrane flux increased after the electric field was applied, and the increment in the fluxes of low, medium and high salt concentrations was 0.6–1.2 times, 0.8–1.7 times and 1.8–4.2 times, respectively. The effect of electric field on the desalination rate of reverse osmosis membrane was insignificant. The desalination rate of the reverse osmosis membrane under the coupled fields and the single pressure field were both above 99%. When the influent salt concentration was 3 000 mg/L and 20 000 mg/L, the power consumption of high pressure pump in the coupled system was lower than that of the single pressure field, and was reduced by up to 34% and 29.7%, respectively.

Key words: reverse osmosis; coupled fields; membrane flux; desalination

高盐废水是指含有机物和至少3.5% (质量分数)总溶解性固体的废水,该废水盐度一般在1%以上,甚至达到20%^[1-3]。现在工业上大多采用膜脱盐工艺^[4],其中,反渗透(RO)是以压力差为驱动力

除盐的淡化方法,将盐水加压,利用反渗透膜仅允许水通过的特性,使淡水透过选择性渗透膜来实现海水淡化,这是一种无相变的物理方法^[5]。RO在诸多方面具有传统水处理方法所没有的特点:系统简

单,操作方便,不耗酸、碱,相应的腐蚀和环境污染问题较少;产品水质稳定,波动小。但是反渗透设备运行过程耗电量较高;原水利用率低,仅为70%~80%;膜易污染,需要定期进行反冲洗^[6-8]。

针对现有反渗透技术的缺陷,国内外先后对膜组合工艺脱盐性能进行了探究^[9-10],强调了反渗透运行时操作条件的重要性^[11],但关于改变膜运行环境进行膜性能研究的报道较少。笔者在反渗透系统基础上增设外加电场,形成双场源,研发中试设备,以低、中、高盐浓度配水为试验水样,对压电双场源下反渗透膜的脱盐性能进行研究,探索外加电场对反渗透膜的脱盐率、膜通量的影响趋势,并对比压电耦合场与单一电场下系统的能耗情况。

1 材料与方法

1.1 试验材料与分析仪表

试验所用反渗透膜为GE公司的全芳香族聚酰胺低污染复合板式膜,膜性能参数如下:运行压力为6 200 kPa、建议运行温度为2~45℃、进水pH值为2~11、耐氯性<0.1 mg/L、最小盐水与产水流量比为5:1、最大进水SDI(15 min)为5.0、最大浊度为2 NTU、平均脱盐率为99.5%。

进水使用NaCl(工业纯)和自来水配制,配水盐浓度分别为3 000、5 000、20 000、30 000、50 000、80 000 mg/L。试验所需检测仪表包括:盐度检测笔、pH测定仪、万用表。

1.2 试验装置

双场源反渗透系统包括原水箱、高压离心泵、进水管、双场源RO系统、外接电源。其中,双场源RO系统为自行研发。反渗透板式膜由PVC支撑板支撑,厚度为16 mm,外部尺寸(长×宽)为280 mm×300 mm,中间镂空区域尺寸(长×宽)为250 mm×270 mm;支撑板由固定板框进行固定,采用PVC材质,厚度为3 mm,宽度为15 mm,外部尺寸与支撑板尺寸一致。在支撑板镂空区域按顺序放置与其尺寸相同的致密滤网、无纺布,再放置反渗透板式膜,膜尺寸(长×宽)为260 mm×280 mm。将固定板框置于膜左、右侧,压紧反渗透膜。

压电双场源系统构造如图1所示。以NaCl溶液为例,双场源RO系统由正、负电极板和反渗透膜构成的单元组成。反渗透膜与电极板垂直放置,形成若干个格室,两张反渗透膜片之间形成RO出水渠道。外壳采用16 mm厚的不锈钢板,壳体尺寸为

565 mm×470 mm×550 mm,壳体密封,顶盖设有压力表座和进水口。反渗透出水孔(本装置设3个)设于壳体侧面。由于电极板置于水中,壳体内部刷漆绝缘,防止通电后壳体漏电及水中带电。

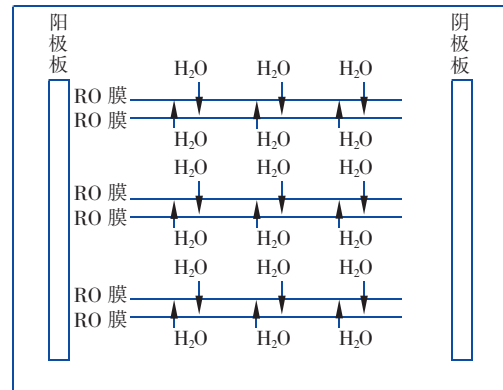


图1 双场源RO系统构造平面

Fig.1 Plane of RO system with coupled fields

1.3 试验方案

1.3.1 单一压力场试验

单一压力场试验是为了检测反渗透板式膜的运行效果,具体步骤是:在原水箱配制试验所需进水盐浓度,打开高压泵进水,试验进水量为146 L;对设备施压使之达到设计压力,外接直流电源不通电。依据设计参数中的进水设计压力作为本试验的运行压力,不同进水盐浓度对应的操作压力设计如下:进水盐浓度为3 000、5 000 mg/L(低盐浓度)时,设计压力分别为0.67、0.94 MPa;进水盐浓度为20 000、30 000 mg/L(中等盐浓度)时,设计压力分别为3.31、3.54 MPa;进水盐浓度为50 000、80 000 mg/L(高盐浓度)时,设计压力分别为5.92、6.57 MPa。按照低盐浓度、中等盐浓度、高盐浓度进行试验,每组试验进行24 h,每1 h收集出水口的淡水检测盐浓度,测定24 h总产水量,计算膜通量和脱盐率。

1.3.2 双场源试验

双场源试验在单一压力场试验基础上,将外接直流电源通电,由于3个浓度级别的影响趋势各自相似,故在低浓度、中等浓度、高浓度中各选取1个浓度分析6 h运行时间内反渗透膜通量的变化,选取的进水盐浓度为3 000(0.67 MPa)、20 000(3.31 MPa)和50 000 mg/L(5.92 MPa),步骤同上。

2 结果与讨论

2.1 单一压力场试验

在单一压力场试验中,采用6组进水盐浓度,在

各自对应的设计压力下运行,测定每组试验的产水量和产水盐浓度,得到膜通量与脱盐率,结果见图2。可以看出,随着进水盐浓度的升高,平均通量与脱盐率均有所降低。进水盐浓度是影响膜渗透压的重要指标,随着进水含盐量的增加,膜渗透压相应增大。尽管对应高盐浓度进水采用较高的进水压力,但随着进水盐浓度大梯度增加,渗透压也大幅度增加,抵消了部分进水推动力,因此膜通量整体呈现下降趋势;透盐率正比于膜正反两侧盐浓度差,进水盐浓度越高,浓度差也越大,透盐率上升,从而导致脱盐率下降。

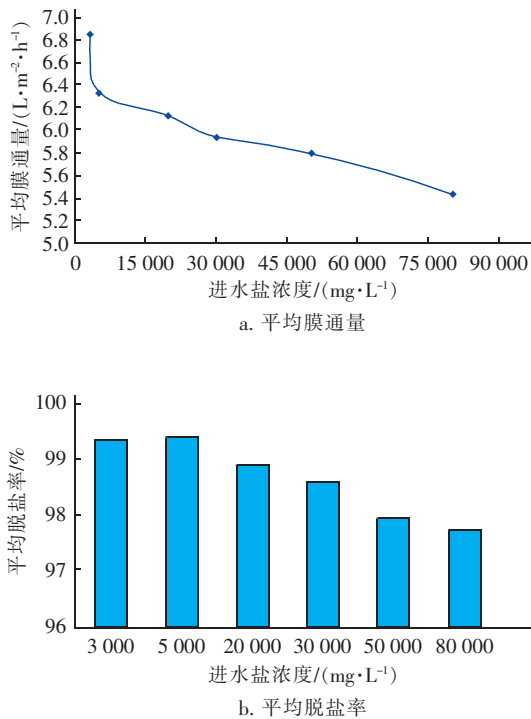


图2 不同进水盐浓度下平均膜通量和平均脱盐率的变化
Fig.2 Variation of average membrane flux and desalination rate at different influent salt concentrations

对平均膜通量与平均脱盐率进行线性回归分析,发现两者具有一定的相关性,但是影响不大,相关系数 $R^2 = 0.8221$ 。

2.2 双场源试验

2.2.1 产水量与膜通量

由于每组进水盐浓度在较低操作压力时会存在产水量为零的情况,所以对于同一进水盐浓度下,要研究不同电压对反渗透膜通量的影响结果,选取操作压力为各自设计压力时的试验结果进行分析,由于3个盐浓度级别的影响趋势各自相似,故在低浓

度、中等浓度、高浓度中各选取1个浓度(3 000、20 000、50 000 mg/L)分析6 h运行时间内反渗透膜通量的变化,结果见图3。

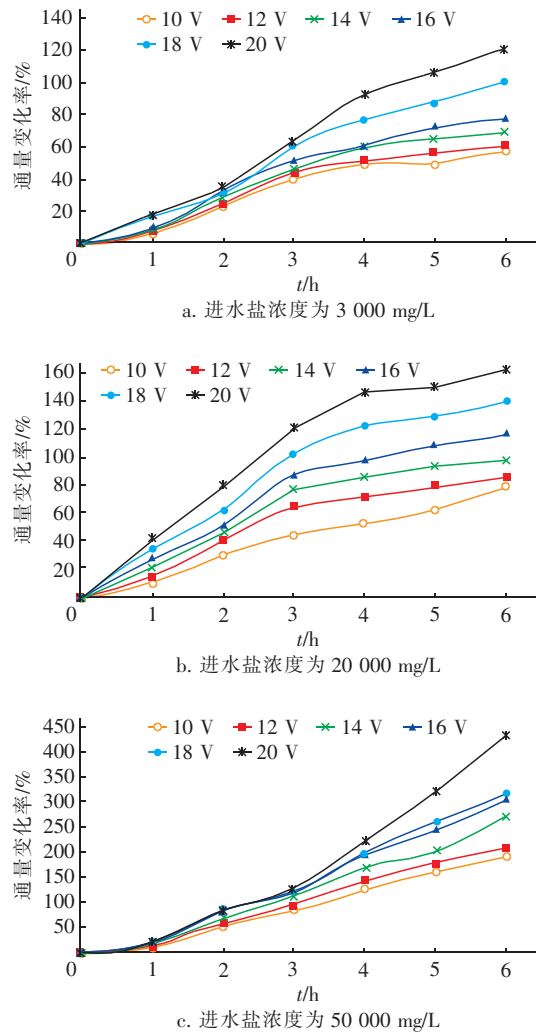


图3 不同进水盐浓度对膜通量的影响

Fig.3 Impact of influent salt concentrations on membrane flux

由图3可知,进水盐浓度为3 000 mg/L、运行压力为0.67 MPa时,运行6 h后,运行电压为10、12、14、16、18、20 V的膜通量变化率分别为55.23%、58.41%、65.88%、76.26%、100.01%、117.22%。进水盐浓度为20 000 mg/L、运行压力为3.31 MPa时,运行6 h后,运行电压为10、12、14、16、18、20 V的膜通量变化率分别为72.47%、83.06%、99.52%、108.87%、131.43%、160.45%。进水盐浓度为50 000 mg/L、运行压力为5.92 MPa时,运行6 h后,运行电压为10、12、14、16、18、20 V的膜通量变化率分别为177.18%、192.33%、260.27%、

289.24%、302.34%、419.4%。上述结果表明,外加电场后,对于同一进水盐浓度,膜通量变化率随着电压的升高而增大。对于不同盐浓度的进水,膜通量均随运行电压的增大而增大。膜通量与产水量成正比,即产水量也随着操作压力的增加而增大。由于设备运行时,固定的进水盐浓度有对应的设计操作压力,故此处主要研究膜通量与运行电压的相关性。选取进水盐浓度为3 000、20 000、50 000 mg/L时运行6 h的产水量计算膜通量,并进行线性回归,结果见图4。

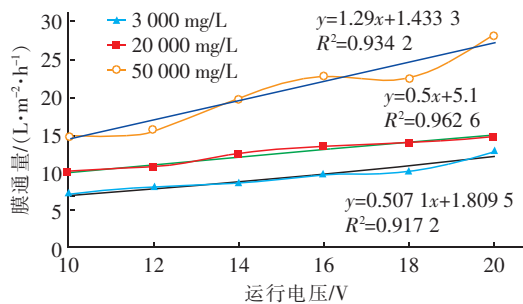


图4 膜通量与运行电压的相关性

Fig. 4 Correlation between membrane flux and operating voltage

从图4中的拟合均方差 R^2 均大于0.9可以看出,膜通量与运行电压的线性相关性较好,高盐浓度对应的进水压力较大,故进水盐浓度高,对应的初始膜通量也较高。比较3 000、20 000、50 000 mg/L时的相关系数,发现进水盐浓度越高则电压对膜通量的影响越大,且对应的平均膜通量变化率从大到小排序为50 000 mg/L > 20 000 mg/L > 3 000 mg/L,也说明电场对反渗透膜的影响在高进水盐浓度和高外加压力时更显著。杜慧玲等^[12]研究表明,在电场作用下,海水中部分带电荷的悬浮颗粒物会重新分布其所带电荷,可促进颗粒物之间的凝聚,同时减缓对反渗透膜的污染。对于传统反渗透系统,当进水盐浓度较高时,溶液中离子较多,渗透压增加,浓度差加大,会导致脱盐率下降。但本研究中由于电场的施加,发生电泳迁移现象,加剧溶液中离子向两极迁移的趋势,使其在膜表面的沉积减少,且外加电场压力和进水盐浓度越大效果越明显,当离子向两极迁移时,中部的离子浓度较低,有利于淡水进入反渗透膜,故膜通量有小范围上升趋势。对于在两极附近形成的离子聚集情况,后期将改进设备考虑增设浓水导管,将此部分浓水引入到进水口进行循环。另

外,由于电极间会形成静电场,能够在水中产生部分超氧阴离子自由基、羟基自由基等物质,可破坏反渗透膜表面的细菌细胞核,从而降低了反渗透膜的生物污染,间接地促进膜通量的稳定。

2.2.2 脱盐率

双场源RO系统反渗透膜出水的脱盐率均保持在99%~99.5%范围内,与单一压力场比较,并没有太大的变化。说明传统RO系统脱盐率较为稳定,且电场对脱盐率的影响不明显。

2.2.3 耗电量

双场源RO系统能耗主要在于高压泵和整流器直流电源的电消耗。与单一压力场相比,双场源系统所用的高压泵相同,功率一样,不同点在于反应时间和处理水量,选取进水盐浓度为3 000、20 000、50 000 mg/L计算电耗,结果见表1。

表1 双场源系统电耗

Tab. 1 Power consumption of high-pressure pump in coupled fields

进水盐浓度/(mg·L ⁻¹)	电耗/(kW·h·m ⁻³)						
	0	10 V	12 V	14 V	16 V	18 V	20 V
3 000	3.23	2.59	2.47	2.38	2.34	2.26	2.13
20 000	44.18	38.46	36.03	34.19	33.45	32.17	31.04
50 000	52.04	50.99	49.64	57.82	63.29	70.67	77.97

从表1可以看出:运行时间相同,进水盐浓度为3 000、20 000 mg/L时,双场源系统的整体电耗比传统单一压力场的电耗小,最多分别降低了34%和29.7%。这是由于施加双场源后,反渗透膜的膜通量即单位时间内双场源系统的产水量更大,处理的水量更多,使得单位产水量的电耗有降低趋势。

但当进水盐浓度为50 000 mg/L时,由于对应高压泵功率较大,仅在施加外加电场初期能降低部分电耗,后期随着运行电压的增加,膜通量的变化不足以与高压泵和直流电源的功率值成比例,从而造成在高进水盐浓度下,双场源系统电耗增大。

3 结论

① 外加电场后,反渗透膜的通量随着电压的升高而增大。当进水盐浓度分别为3 000、20 000、50 000 mg/L时,运行6 h后,对应膜通量分别增长了0.6~1.2、0.8~1.7和1.8~4.2倍,原水利用率也有所提高。通过线性回归分析可知,进水盐浓度和外加压力越高,电压对膜通量的影响越显著。

② 对比单一压力场,双场源下反渗透膜的脱

盐率同样保持在99%以上,即外加电场对反渗透膜的脱盐率影响不明显。

③ 当进水盐浓度在3 000和20 000 mg/L时,双场源系统电耗比单一压力场时的低,最多分别降低了34%和29.7%;但当进水盐浓度高达50 000 mg/L时,系统电耗增大,最多增大了49%。

参考文献:

- [1] 李耀辰,鲍建国,周旋. 高盐度有机废水对生物处理系统的影响研究进展[J]. 环境科学与技术,2006,29(6):109-112.
Li Yaochen, Bao Jianguo, Zhou Xuan. Review on biotreatment system affected by high salinity organic wastewater[J]. Environmental Science & Technology, 2006,29(6):109-112(in Chinese).
- [2] Abou-Elela S I, Kamel M M, Fawzy M E. Biological treatment of saline wastewater using a salt-tolerant microorganism[J]. Desalination,2010,250(1):1-5.
- [3] 李柄缘,刘光全,王莹,等. 高盐废水的形成及其处理技术进展[J]. 化工进展,2014,33(2):493-497,515.
Li Bingyuan, Liu Guangquan, Wang Ying, et al. Formation and treatment of high-salt wastewater[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(2):493-497,515(in Chinese).
- [4] 段锋,董卫果,田陆峰,等. 反渗透浓水中难降解有机物的去除技术研究进展[J]. 工业水处理,2017,37(1):22-26.
Duan Feng, Dong Weiguo, Tian Lufeng, et al. Research progress in the removing technologies of non-degradable organic substances in reverse osmosis (RO) concentrate[J]. Industrial Water Treatment, 2017,37(1):22-26(in Chinese).
- [5] Bourouni K. Availability assessment of a reverse osmosis plant: Comparison between reliability block diagram and fault tree analysis methods[J]. Desalination, 2013, 313(7):66-76.
- [6] Dababneh A J, Al-Nimr M A. A reverse osmosis desalination unit[J]. Desalination, 2002, 153(1/3):265-272.
- [7] Wang Z W, Wu Z C, Tang S J. Extracellular polymeric substances (EPS) properties and their effects on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor[J]. Water Res, 2009, 43(9):2504-2512.
- [8] Defrance L, Jaffrin M Y. Comparison between filtrations at fixed transmembrane pressure and fixed permeate flux: application to a membrane bioreactor used for wastewater treatment[J]. J Membr Sci, 1999, 152(2):203-210.
- [9] 马昕,安东子,寇彦德,等. 焦化废水膜法组合深度处理工艺设计与应用[J]. 工业水处理, 2017, 37(4):102-105.
Ma Xin, An Dongzi, Kou Yande, et al. Design and application of the combined process of membrane method for the advanced treatment of coking wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37(4):102-105(in Chinese).
- [10] M'nif A, Bouguecha S, Hamrouni B, et al. Coupling of membrane processes for brackish water desalination[J]. Desalination, 2007, 203(1/3):331-336.
- [11] Köseoglu H, Kabay N, Yüksel M, et al. Boron removal in seawater desalination by reverse osmosis membranes—the impacts of operating conditions[J]. Journal of the American Chemical Society, 2010, 78(3):125-144.
- [12] 杜慧玲,王建中,齐锦刚,等. 脉冲电场对海水中悬浮颗粒物沉降效率的影响[J]. 天津大学学报, 2007, 40(11):1305-1308.
Du Huiling, Wang Jianzhong, Qi Jingang, et al. Effect of pulsed electric field on settling rate of suspended solids in seawater[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(11):1305-1308(in Chinese).



作者简介:伊学农(1962—),男,山东高密人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为水处理与资源化、管网理论优化、给水处理技术。

E-mail:jackyi@126.com

收稿日期:2018-11-12