

特约专栏

## 荷电正渗透膜的研究进展

熊 鹰<sup>1,2</sup>, 曾 香<sup>3</sup>, 崔佳鑫<sup>4</sup>, 毛旭辉<sup>4</sup>

(1. 南方科技大学环境科学与工程学院, 广东 深圳 518000)

(2. 北京大学深圳研究生院, 广东 深圳 518000)

(3. 中山朗清膜业有限公司, 广东 中山 528400)

(4. 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:** 正渗透是利用选择性半透膜两侧溶液的渗透压作为驱动力, 使纯水透过膜。正渗透分离技术是一项能耗低、回收率高、环境友好的绿色能源技术, 在废水处理、海水脱盐等方面具有很大的应用潜力。但是, 膜分离过程中的浓差极化现象, 限制了正渗透技术的商业化应用。荷电膜在分离过程中具有筛分和 Donnan 效应的双重作用, 能有效提高膜的分离效率、水通量及耐污染能力。荷电膜的特殊分离机理使得其在正渗透技术中的应用具有极大的优势。主要介绍了现有文献报道的荷电正渗透膜的制备方法, 并讨论了荷电膜的电荷性质及数量对正渗透过程的浓差极化、膜污染、水通量、亲水性、截留率及反向溶质扩散等因子的影响, 为未来正渗透膜材料的研究和正渗透技术的广泛应用提供参考。

**关键词:** 荷电正渗透膜; 正渗透; 制备方法; 浓差极化; 荷电膜

**中图分类号:** TQ021 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2018)02-0094-06

## A Review on Charged Forward Osmosis Membranes

XIONG Ying<sup>1,2</sup>, ZENG Xiang<sup>3</sup>, CUI Jiaxin<sup>4</sup>, MAO Xuhui<sup>4</sup>

(1. School of Environmental Science and Technology, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518000, China)

(2. Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518000, China)

(3. Zhongshan Lonkee Membrane Co., Ltd., Zhongshan 528400, China)

(4. School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Forward osmosis (FO) uses osmotic pressure of solution on both sides of membrane to drive water through membrane. FO is a kind of green technology with low energy consumption and high recovery rate. It has application prospect in wastewater treatment and seawater desalination. Meanwhile, the obstacle of the commercial application of FO is that the process suffers from the issue of concentration polarization. The charged membrane has the double effect of sieving and Donnan effect during the separation process, which can effectively improve the separation efficiency, water flux and pollution resistance of the membrane. This paper introduces the preparation method of charged forward osmosis membranes, discusses the influence of charge properties and number of charged membranes to fouling, hydrophilicity, water flux, retention rate and reverse effect of solute diffusion and other factors in FO process. The paper will provide reference for future research in FO membrane materials and the application of forward osmosis technology.

**Key words:** charged forward osmosis membrane; forward osmosis; preparation method; concentration polarization; charged membrane

### 1 前 言

正渗透(Forward Osmosis, FO)是一种新兴的分离/海水淡化过程, 通过两侧渗透压不同来驱动水通过膜<sup>[1,2]</sup>。FO水压要求低, 相比于RO(反渗透)、NF(纳滤膜)、UF(超滤膜), FO呈现出能耗低、污染轻、污垢易于清除和水回收率高等方面优势。近年, 在学术研究领域和工业领域引起越来越多的关注<sup>[3-5]</sup>。正渗透过程中, 膜两侧浓差极化的存在, 造成跨膜有效渗透压降低, 水通

收稿日期: 2017-12-02

基金项目: 深圳市战略新兴产业发展专项资金(JCYJ20140417144423188);  
中山市新型研发机构产业化项目(2016F2FC0025)

第一作者: 熊 鹰, 女, 1976年生, 高级工程师

通讯作者: 毛旭辉, 男, 1976年生, 教授, 博士生导师, Email:  
clab@whu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2018.02.03

量比预期的要低很多,这是目前正渗透膜分离技术发展面临的主要问题。

荷电膜即在膜表面或者本体中存在有固定电荷基团的膜,电荷的静电吸附和排斥作用可以使膜分离粒径更小的物质<sup>[6]</sup>;荷电膜界面处形成的凝胶层易于清洗,在一定程度上可以缓解膜污染,延长膜的使用周期;荷电基团的引入,可增加膜的亲水性,从而提高膜的透水性能。荷电膜以其特殊的分离机理,与中性膜相比具有很大的优势。

Hancock 等<sup>[7]</sup>研究 23 种非离子的和离子的微量有机污染物,表明采用正渗透荷电膜,对大部分的半工业规模的微量有机污染物去除率超过 90%。Xie 等<sup>[8]</sup>的研究表明,由于静电作用和位阻效应,非对称醋酸纤维素膜和聚酰胺复合正渗透膜对荷电微量有机污染物具有较高的截留率。

因此,为提高正渗透过程性能,减少浓差极化现象发生,对正渗透膜进行荷电化改性是有效途径之一。

## 2 荷电正渗透膜的制备

常见的荷正电膜带电基团为季铵盐和膦基,荷负电膜含磺酸根或羧酸根。为将带电基团引入到正渗透膜材料中,荷电正渗透膜的制备方法主要有化学交联法、界面聚合法、相转化法及其他方法。

### 2.1 化学交联法

化学交联是指在光、热、高能辐射、机械力、超声波和交联剂等作用下,大分子链间通过化学键联结起来,形成网状或体形结构高分子的过程。氧化石墨烯的含氧基团中所含的羧基在极性溶液中能电离生成羧酸根离子而使氧化石墨烯带上负电。颜峰等<sup>[9,10]</sup>基于真空抽滤-热致交联法成功制备出了超薄无支撑氧化石墨烯层状膜,当  $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$  为汲取液时膜的水通量高达  $35.5 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,而返盐率为  $0.56 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,且该种膜能够从有机染料中汲取出纯水,并将染料分子完全阻挡在膜一侧。

宣瑶芳等<sup>[11]</sup>以羧甲基纤维素钠为功能材料、氯化铁为交联剂,在膜表面层形成了羧甲基纤维素钠与  $\text{Fe}^{3+}$  以单齿作用形成的络合物构成的分离层。羧甲基纤维素钠中的羧基在 pH 约 4.6 条件下开始电离,则复合膜表面呈现负电荷。采用 PRO 模式进行 FO 试验,FO 水通量为  $12.3 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

南洋理工 Wang Rong 课题组的 Setiawan<sup>[3]</sup>首次采用化学交联反应,将基膜 PAI(聚酰胺亚胺)上的酰亚胺基团与胺基功能化的聚乙烯亚胺 PEI 反应,得到具有类似纳滤膜表面的荷正电双胺选择层的 PAI 正渗透膜(如图 1

所示)。该种正渗透膜在室温下对  $\text{NaCl}$  和  $\text{MgCl}_2$  的去除率分别为 49% 和 94%,适用于 FO 技术处理含有重金属的工业废水。接着,该课题组又在这种膜的制备基础上进行改进,制备了一系列荷正电正渗透膜<sup>[12-15]</sup>。Goh 等<sup>[12]</sup>通过真空过滤方法将羧基功能化的多壁碳纳米管(MWCNT)固定在荷正电的 PAI 正渗透膜中(如图 2 所示)。与未添加 CNT 的 PAI 膜相比,在 FO 模式下,采用  $0.5 \text{ M MgCl}_2$  溶液作为驱动液,水通量能够提高 29%。这主要是 CNT 的添加,使得结构中纳米通道增加。Setiawan 等<sup>[15]</sup>又制备了 PAI 作为外层, PES 作为内层的带正电的双层正渗透膜,该正渗透膜的水通量在室温下可达到  $27.5 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

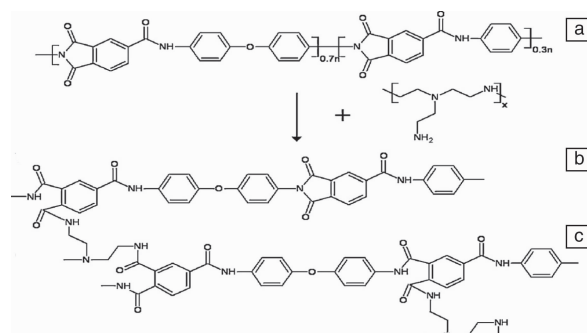


图1 聚酰胺亚胺 PAI(a)与聚乙烯亚胺 PEI(b)之间的反应生成交联 PAI(c)<sup>[3]</sup>

Fig. 1 Reaction scheme between poly(amide-imide) (PAI) (a) and polyethyleneimine (PEI) (b); cross-link PAI (c)<sup>[3]</sup>

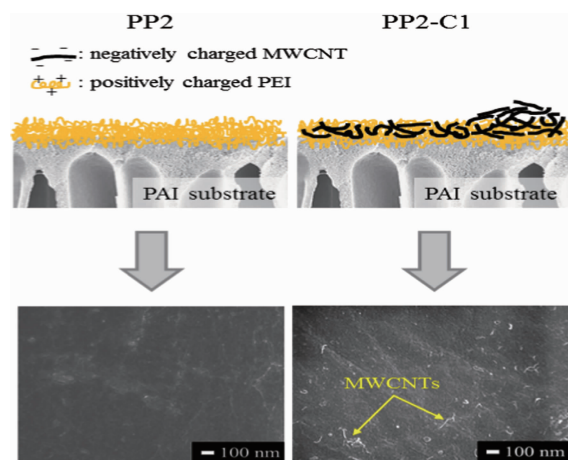


图2 表面采用碳纳米管增强的 PAI 中空纤维膜<sup>[12]</sup>

Fig. 2 Illustrations of PAI and selective layers of modified PAI hollow fibers membranes<sup>[12]</sup>

### 2.2 界面聚合法

界面聚合是将两种带有不同功能基的反应物在不同溶剂中,在接触界面处形成一层聚合物膜。鲍现等<sup>[16]</sup>采

用浸凝凝胶沉淀相转化法制备了磺化聚醚砜正渗透复合膜的支撑层,采用界面聚合生成聚酰胺活性层。对该复合正渗透膜进行热处理会使表面聚酰胺活性层发生水解,分子之间交联更加稳固,活性层整体更加致密,水和离子的扩散阻力增加,相应膜的水通量降低。

多巴胺(Dopamine, DA)和聚多巴胺表面沉淀对基膜表面进行改性,已经成为膜表面改性的有效方法。Liu

等<sup>[17]</sup>将 PSf 基膜浸没在聚多巴胺溶液中,将聚多巴胺只沉积到 PSf 膜底部,然后再通过界面聚合在 PSf 膜表面形成了聚酰胺活性层,最后制备了荷正电的双层薄膜复合正渗透膜(TFC-FO)(如图 3 所示)。多巴胺的加入增加了膜的亲水性及抗污染性能,在同样的实验条件下,制备的荷电复合正渗透膜在清洗后水通量能恢复 93.0%,远高于表面没有改性的双层膜(81.7%)和单层膜(61.7%)。

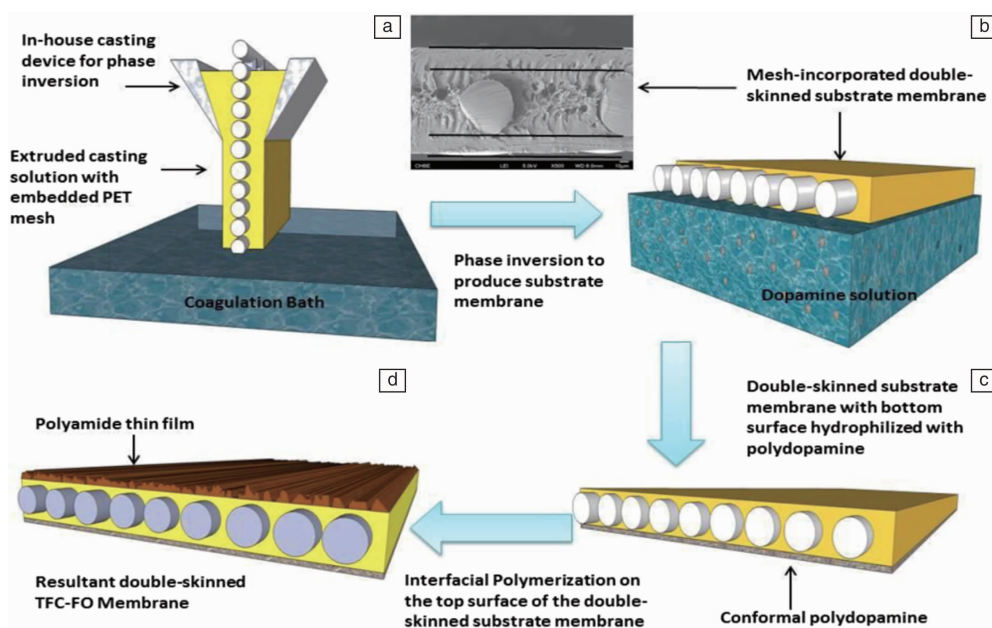


图 3 双层 TFC-FO 膜的合成原理: (a) 相转化生成双层基膜, (b) 多巴胺沉积到基膜底部, (c) 基膜顶部表面涂上聚多巴胺, (d) 基膜表面发生界面聚合后得到 TFC-FO 膜<sup>[17]</sup>

Fig. 3 Schematics of double-skinned TFC-FO membrane synthesis: (a) phase inversion of double-skinned substrate membrane, (b) dopamine deposition on the bottom surface of substrate membrane, (c) substrate membrane with bottom surface coated with polydopamine, and (d) resultant TFC-FO membrane after interfacial polymerization on the top surface of the substrate membrane<sup>[17]</sup>

PBI 分子内的杂环咪唑结构能使其分子间和分子内均发生氢键作用,且自身带有一定电荷量。因 PBI 自身亲水特性和带电特性,具备良好的抗污染性能。Wang 等<sup>[18,19]</sup>首次将 PBI 用于纳滤膜的制备,并进一步用于正渗透过程,结果显示当用 2.0 M 的  $\text{MgCl}_2$  溶液作为汲取液时,膜的水通量为  $9.02 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

### 2.3 相转化法

带极性基团或可离解基团的膜材料溶于溶剂中,通过相分离的过程制备正渗透膜。Park 等<sup>[20]</sup>将通过强酸功能化的 MWCNT 与醋酸纤维素混合,通过相转化制备了 fCNT-CA 正渗透膜。MWCNT 的加入增加了 CA 膜表面负电荷,使得电排斥力增加膜抗污染性能增强,因此藻酸盐在膜表面不易结垢。在结垢情况下,相对于纯的 CA 膜,1% fCNT-CA 正渗透膜的水通量下降仅为 CA 膜的 57%。

层状双氢氧化物 LDHs 是典型的阴离子层状化合物,处于 LDHs 结构层间的阴离子可以被其他阴离子交换,因此具有良好的阴离子交换性能。Lu 等<sup>[21]</sup>将 LDHs 与 PSf 基材混合通过相转化法制备了一系列新型荷正电 FO 膜。当 LDHs 添加量为 2 wt% 时,水通量为  $18.1 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,比纯 PSf 膜水通量高 42.5%。当采用 2 M NaCl 溶液作为驱动液时,最大水通量可以达到  $26.9 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

### 2.4 其他方法

吴子焱等<sup>[22]</sup>采用溶胶-凝胶法用正硅酸乙酯制备一种多孔对称无机正渗透膜,膜的等电点为  $\text{pH} = 1.8$ ,在实验条件下膜表面带负电。在驱动液浓度为 2 M 时,膜的水通量最大可达  $65.64 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。与商业化 HTI 膜相比,在去除不同浓度  $\text{Cd}^{2+}$  时,无机膜截留率可达 97% 左右,HTI 膜为 95% 左右。这种带电无机膜可用于正渗透技术处理重金属废水。

### 3 电荷对正渗透过程的影响

#### 3.1 电荷与浓差极化

浓差极化是一种在压力驱动和渗透压驱动膜中普遍且不可避免的现象。膜过程截留了水中的微粒、胶体等污染物,并在膜表面或孔内不断积累,进而对膜过程产生不利影响。渗透压驱动过程中,浓差极化是由非对称的 FO 两侧的驱动液和原液浓度不同引起。通常地,稠密的活性

层表面发生外部浓差极化,多孔的膜支撑层表面常发生内部浓差极化。Xie 等<sup>[23]</sup>研究正渗透对酰胺咪唑及磺胺甲恶唑的截留率和水通量,发现由于内浓差极化现象的出现导致渗透压差减小,正常 FO 模式的水通量比减压渗透 PRO 模式下的水通量小(如图 4 所示)。曾淦宁等<sup>[24]</sup>采用新型荷电膜对海藻酸钠进行分离,发现膜的荷电化改性改善了浓差极化和膜污染现象,并且膜分离性能得到进一步提高,海藻酸钠获得率从 5.8% 提升到 9.8%。

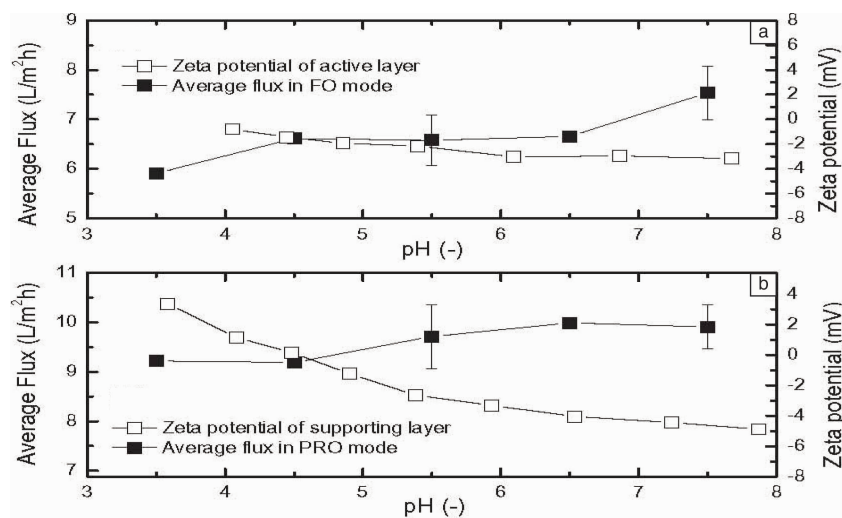


图4 在 FO 和 PRO 模式下,溶液 pH 与水通量的关系<sup>[23]</sup>

Fig. 4 The water flux as a function of feed pH in FO and PRO modes<sup>[23]</sup>

#### 3.2 电荷与膜污染

料液中的某些组分在膜表面或膜孔中沉积导致膜性能下降,低膜污染意味着更大的产水量、更少的清洁和更长的膜使用寿命,从而减少成本。荷电排斥作用可降低膜污染,提高膜表面亲水性,使得膜界面处形成的凝胶层变得疏松,能保持膜渗透性能的长期稳定性。增加膜表面的荷电性对提高膜的截留率、抗污染能力和延长膜使用寿命有重要的意义<sup>[25]</sup>。很多成膜材料本身带有一定电荷,为了尽可能减轻膜污染,选择与主要污染物电荷相同的膜,依靠电荷排斥作用降低污染物在膜面的吸附<sup>[26]</sup>。Alturki 等<sup>[27]</sup>系统地阐明 FO 对 40 种微量有机污染物混合物的截留,指出荷电微量有机污染物的截留,受静电交互和尺寸排阻的主导,然而对中性污染物的截留主要是尺寸排阻。Hancock 等<sup>[7]</sup>研究 23 种非离子的和离子的微量有机污染物,发现采用反渗透对荷电微量有机污染物的去除率大于 80%,而中性微量有机污染物的去除为 40%~90%。Kang 等<sup>[28]</sup>研究发现阴离子涂层,如膜表面的聚酯(丙烯酸)涂层,在提供有力的空间排阻的同时还具有很强的静电排斥,可以有效地防止带负电有机污染物在膜表面的吸附。Mi 等<sup>[29]</sup>研究发现 PA 膜比

CA 膜具有更高的表面结垢潜能。因为聚酰胺膜表面的主要官能团为羧基,使得膜带负电荷,能与  $\text{Ca}^{2+}$  形成复合物,最终形成无定形硫酸钙纳米颗粒和多晶体;而 CA 膜表面的主要官能团为羟基,呈中性,不与  $\text{Ca}^{2+}$  或  $\text{SO}_4^{2-}$  发生反应。

#### 3.3 电荷与亲水性

膜的表面的亲水性对于溶质的截留具有十分重要的作用。膜表面材料的亲水性越好,越有利于膜-液界面处水分子层的形成<sup>[1]</sup>。荷电膜因为带有极性基团,膜的亲水性能较强。且不少作为电荷改性加入的纳米材料如氧化石墨烯、CNT 及多巴胺等本身都是亲水性物质。因此,荷电正渗透膜均为亲水性膜。Linares 等<sup>[30]</sup>对微量污染物截留进行研究,发现除了亲水自然污染物以外,采用污染层对微量污染物的截留率增加,因为 FO 污染膜的截留率相比于清洁膜具有更高的亲水性,增强对亲水化合物的吸附能力,减少大量的转运能力。Xie 等<sup>[8]</sup>研究非对称醋酸纤维素膜和聚酰胺复合正渗透膜对微量有机污染物的截留,发现聚酰胺复合正渗透膜表面的负电荷增加了孔隙的水合性。冯敬等<sup>[6]</sup>将季铵基接枝到聚丙烯腈膜上,发现膜的接触角下降,膜的亲水性提高。



Wang 等<sup>[18]</sup>的研究表明,采用在水溶液中自身具有电荷的聚苯并咪唑(PBI),可以实现高的盐截留率、高的表面亲水性,并且呈现出低的膜污染趋势。

### 3.4 电荷与水通量

水通量是衡量膜性能的一个重要指标,水通量不仅与水的扩散系数有关,还与水进入膜内的自由能等有关。Goh 等<sup>[12]</sup>采用  $0.31$  和  $1.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的多层碳纳米管溶液制得的荷正电正渗透膜,正渗透水通量增加 29%。贾玉香等<sup>[31]</sup>考察碳纳米管不同电量电荷修饰对碳纳米管正渗透膜中水分子密度分布、扩散系数以及水通量的影响。结果显示,当碳纳米管管口荷电量为  $-0.3e$  时,碳纳米管膜可获得最大水通量(如图 5 所示)。这主要是对碳纳米管进行适当负电荷修饰后,能够有效降低碳纳米管口的自由能,从而使得水进入碳纳米管更加容易。Yang 等<sup>[18, 32]</sup>采用聚苯并咪唑制成的荷正电正渗透膜,当原液为去离子水,汲取液为  $5 \text{ M MgCl}_2$  溶液时,膜的通量达  $32.4 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,对盐分的截留率高达 99.5%。曹绪芝等<sup>[33]</sup>通过在聚醚砜(PES-C)微孔膜表面辐照接枝甲基丙烯酸羟乙酯(HEMA)和苯乙烯磺酸钠(SSS)制备的新型亲水性荷负电纳滤膜,对  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  截留率大于 95%,渗透通量达  $19.02 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

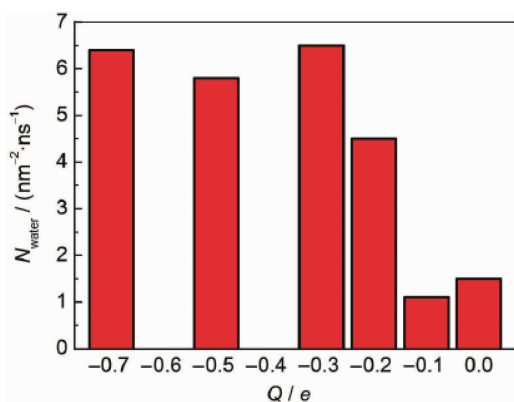


图 5 不同荷电量 CNT 膜的水通量<sup>[31]</sup>

Fig. 5 Water flux of the different charged CNT membranes<sup>[31]</sup>

### 3.5 电荷与截留率

截留率是指脱除特定组分的能力。Setiawan 等<sup>[3]</sup>制备了带正电的 PAI 中空纤维正渗透膜,在活性层朝向原料液时,相比于不带电膜,带电膜对盐离子有双倍的阻力,有效降低了盐的渗透,脱盐性能良好。冯敬等<sup>[6]</sup>的研究发现,接枝改性后的聚丙烯腈膜,荷正电的膜与和带有正电的 BSA 存在静电排斥作用,对 BSA 的截留率从 76.7% 提高到 90.2%。宣瑶芳等<sup>[11]</sup>制备了羧甲基纤维素钠为活性层的荷负电正渗透膜,能有效地截留无机盐离子,防止 FO 过程中无机盐离子的反向扩散,膜对  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

的截留率较高。Yang 等<sup>[32]</sup>采用聚苯并咪唑,制成了  $\text{pH} = 7.0$  时,膜表面荷正电,且亲水性和抗污染性效果都很好的单层和多层的中空纤维 FO 膜,由此制备的具有活性层和多孔支撑层结构的中空纤维 FO 膜对正价离子和二价离子的截留率均能达到较高的水平。

### 3.6 电荷与反向溶质扩散

渗透驱动膜过程中,因为浓度的差异,溶质从驱动液中通过膜进入原液的反向扩散。Setiawan 等<sup>[3]</sup>的研究表明,与中性膜不同,当膜活性层朝向原液时,荷正电正渗透膜将对盐离子有双倍的阻力,减少溶质的渗透;当活性层朝向汲取液时,正电荷将有利于盐分转运。当活性层朝向原液时候,因为高浓度汲取液和带正电活性层界面反向移动离子发生的保护作用,Js/Jv 比朝向汲取液时低。Nghiem 等<sup>[34]</sup>的研究发现 FO 模式和 PRO 模式下对四环素最高的截留率分别为 68.74% ( $1.5 \text{ M NaCl}$ ) 和 69.41% ( $1 \text{ M NaCl}$ ),可能是因为高反向盐渗透通过支撑层产生高的离子强度。由于膜电荷和荷电溶质分子之间的静电排斥,增强的离子强度将减少对荷电溶质的截留。

## 4 结 语

荷电正渗透膜的特殊分离机理能够有效减少正渗透过程中浓差极化现象的形成,膜的荷电化可以实现高的盐截留率、高的表面亲水性和较低的膜污染。性能优良价格低廉的荷电正渗透的膜制备将会加速正渗透技术的工业化应用。荷电正渗透膜的研究需要加强材料的制备和应用研究,推动这一材料在分离领域的大规模应用。

### 参考文献 References

- [1] Fang Yanyan (方彦彦), Tian Ye (田野), Wang Xiaolin (王晓琳). *Membrane Science and Technology* (膜科学与技术) [J], 2011, 31(06): 95–100.
- [2] Zhao S, Zou L, Tang C Y, et al. *Journal of Membrane Science* [J], 2012, 396(6): 1–21.
- [3] Setiawan L, Wang R, Li K, et al. *Journal of Membrane Science* [J], 2011, 369(1–2): 196–205.
- [4] Shaffer D L, Werber J R, Jaramillo H, et al. *Desalination* [J], 2015, 356(0): 271–284.
- [5] Wang Z, Tang J, Zhu C, et al. *Journal of Membrane Science* [J], 2015, 475(3): 184–192.
- [6] Feng Jing (冯敬), Wei Junfu (魏俊富), Zhao Kongyin (赵孔银), et al. *Journal of Tianjin Polytechnic University* (天津工业大学学报) [J], 2010, 29(1): 10–13.
- [7] Hancock N T, Xu P, Heil D M, et al. *Environmental Science Technology* [J], 2011, 45(19): 8483–8490.
- [8] Xie M, Nghiem L D, Price W E, et al. *Water Research* [J], 2014, 49(2): 265–274.

- [9] Yan Feng(颜峰). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [10] Yan F, Yu C, Zhang B, *et al.* *RSC Advances* [J], 2017, 7(3): 1326–1335.
- [11] Xuan Yaofang(宣瑶芳), Lv Zhenhua(吕振华), Yu Sanchuan(俞三传), *et al.* *Technology of Water Treatment* (水处理技术)[J], 2012, 38(11): 65–68.
- [12] Goh K, Setiawan L, Wei L, *et al.* *Journal of Membrane Science*[J], 2013, 446(21): 244–254.
- [13] Qiu C, Setiawan L, Wang R, *et al.* *Desalination* [J], 2012, 287(4): 266–270.
- [14] Fang W, Wang R, Chou S, *et al.* *Journal of Membrane Science*[J], 2012, 394(5): 140–150.
- [15] Setiawan L, Wang R, Shi L, *et al.* *Journal of Membrane Science* [J], 2012, 421(19): 238–246.
- [16] Bao Xian(鲍现). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [17] Liu X, Ong S L, Ng H Y. *Journal of Membrane Science*[J], 2016, 511(15): 40–53.
- [18] Wang K Y, Chung T S, Qin J J. *Journal of Membrane Science*[J], 2007, 300(1): 6–12.
- [19] Wang K Y, Yang Q, Chung T S, *et al.* *Chemical Engineering Science* [J], 2009, 64(7): 1577–1584.
- [20] Choi H G, Son M, Yoon S, *et al.* *Chemosphere*[J], 2015, 136(19): 204–210.
- [21] Lu P, Liang S, Qiu L, *et al.* *Journal of Membrane Science*[J], 2016, 504(8): 196–205.
- [22] Wu Ziyi(吴子焱). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [23] Xie M, Price W E, Nghiem L D. *Separation and Purification Technology*[J], 2012, 93(10): 107–114.
- [24] Zeng Ganning(曾淦宁), Shen Jiangnan(沈江南), HongKai(洪凯), *et al.* *Marine Science Bulletin*(海洋通报)[J], 2010, 29(01): 96–100.
- [25] Shi Liuqing(施柳青), Bian Xiaokai(卞晓锴), Lu Xiaofeng(陆晓峰). *Membrane Science and Technology*(膜科学与技术)[J], 2010, 30(6): 112–117.
- [26] Li Jingfeng(李井峰). *Industrial Water Treatment*(工业水处理)[J], 2015, 35(1): 106–108.
- [27] Alturki A A, McDonald J A, Khan S J, *et al.* *Separation and Purification Technology*[J], 2013, 103(2): 258–266.
- [28] Kang S, Asatekin A, Mayes A M, *et al.* *Journal of Membrane Science* [J], 2007, 296(1): 42–50.
- [29] Mi B, Elimelech M. *Journal of Membrane Science*[J], 2010, 348(1): 337–345.
- [30] Linares R V, Yangali Q V, Li Z, *et al.* *Water Research*[J], 2011, 45(20): 6737–6744.
- [31] Li Hailan(李海兰), Jia Yuxiang(贾玉香), Hu Yangdong(胡仰栋). *Acta Physico-Chimica Sinica*(物理化学学报)[J], 2012, 28(3): 573–577.
- [32] Yang Q, Wang K Y, Chung T S. *Environmental Science Technology* [J], 2009, 43(8): 2800–2805.
- [33] Cao Xuzhi(曹绪芝), Ping Zhenghua(平郑骅), Li Bengang(李本刚), *et al.* *Polymeric Materials Science and Engineering*(高分子材料科学与工程)[J], 2012, 28(09): 133–136.
- [34] Nghiem L D, Schäfer A I, Elimelech M. *Journal of Membrane Science* [J], 2006, 286(1): 52–59.

(编辑 吴琛)