

## 两种正渗透膜的对比试验研究

刘 帅<sup>1</sup>, 谢朝新<sup>1,2</sup>, 周宁玉<sup>1,2</sup>, 王 毅<sup>1</sup>, 陈璐斌<sup>1</sup>

(1. 后勤工程学院 国防建筑规划与环境工程系, 重庆 401311; 2. 重庆市水工业与环境工程技术研究中心, 重庆 401311)

**摘 要:** 以不同浓度的葡萄糖、蔗糖溶液作为正渗透汲取液,对比了三醋酸纤维素(CTA)膜和聚酰胺(PA)膜在不同膜朝向下的水通量变化情况。结果表明:当膜的活性层朝向汲取液(AL-DS)时,相同汲取液浓度的PA膜水通量高于CTA膜,且随着汲取液浓度的增大,两种FO膜的水通量均增大,但水通量的增幅均随浓度的提高而减小,且蔗糖汲取液对应水通量的增幅高于葡萄糖汲取液;当膜的活性层朝向原料液(AL-FS)时,两种FO膜的水通量均远小于AL-DS模式下的水通量,此时相同汲取液浓度的CTA膜水通量反而高于PA膜,对于CTA膜,水通量变化规律与AL-DS模式相似,对于PA膜,随着汲取液浓度的增大,水通量几乎不变,增至高浓度时,水通量反而略有下降。

**关键词:** 正渗透; CTA膜; PA膜; 膜朝向; 水通量

**中图分类号:** TQ028.8 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)01-0080-05

## Comparative Study on Two Types of Forward Osmosis Membranes

LIU Shuai<sup>1</sup>, XIE Chao-xin<sup>1,2</sup>, ZHOU Ning-yu<sup>1,2</sup>, WANG Yi<sup>1</sup>, CHEN Lu-bin<sup>1</sup>

(1. Department of Architecture Planning and Environmental Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China; 2. Water Industry and Environmental Engineering Technology Research Center, Chongqing 401311, China)

**Abstract:** Glucose and sucrose solution with different concentrations were used as draw solution for forward osmosis, and the water flux change rule of the cellulose triacetate (CTA) membrane and polyamide (PA) membrane was compared under different membrane orientations. The results showed that when the membrane orientation was active layer-facing-draw solution (AL-DS), the water flux of PA membrane was higher than that of CTA membrane under identical draw solution concentration. With the increase of the draw solution concentration, the water flux of the two FO membranes both increased, but the amplification of water flux decreased, and the water flux amplification of sucrose solution was higher than that of glucose solution. When the membrane orientation was active layer-facing-feed solution (AL-FS), the water flux of the two FO membranes was far less than that in the AL-DS mode, the water flux of CTA membrane was higher than that of PA membrane under identical draw solution concentration. The water flux change rule of CTA membrane was similar with that in the AL-DS mode, but with the increase of the draw solution concentration, the water flux of PA membrane was approximately unchanged, as the concentration increased, the water flux slightly decreased instead.

**Key words:** forward osmosis; cellulose triacetate membrane; polyamide membrane; membrane orientation; water flux

正渗透(FO)技术作为一种新型膜分离技术,以高水回收率、高污染物截留率、轻膜污染等优势引起了人们的关注<sup>[1]</sup>。FO 过程不需要外加压力,其利用半透膜两侧溶液渗透压的差异,使水分子自发地从低渗透压侧流向高渗透压侧,即逆浓度梯度方向传递的过程<sup>[2]</sup>。同时,半透膜将低渗透压侧溶液中的溶质截留下来,实现脱盐或浓缩。在正渗透工艺中,高、低渗透压溶液分别称为汲取液、原料液。运行结束时,将溶质从被稀释汲取液中分离出来,可循环利用,同时得到纯净出水。

关于 FO 膜和汲取液的优化是 FO 技术研究的关键<sup>[3]</sup>。若以营养液作为 FO 过程的汲取液,避免了后续溶质分离过程,可节省大量能耗。20 世纪 80 年代国外学者就曾以营养液为汲取液,用当时的渗透膜进行过一些试验,但效果不理想。以糖类营养液为汲取液,对比研究当前 FO 膜的性能,至今还很少涉及。基于此,笔者以单糖、二糖最常见的代表物葡萄糖、蔗糖为汲取液溶质,对比当前两种 FO 膜的水通量变化情况,旨在为下一步研究提供参考。

## 1 试验部分

### 1.1 试验装置

M-1 膜为三醋酸纤维素(CTA)膜,该膜为非对称膜,由致密活性层和多孔支撑层组成,活性层材质为三醋酸纤维素,支撑层材质为聚酯;M-2 膜为聚酰胺(PA)膜,该膜也由致密活性层、多孔支撑层两部分组成,活性层材质为聚酰胺,支撑层材质为聚砜。采用平板小型试验装置,如图 1 所示<sup>[4]</sup>,其有效膜面积为 62.24 cm<sup>2</sup>。

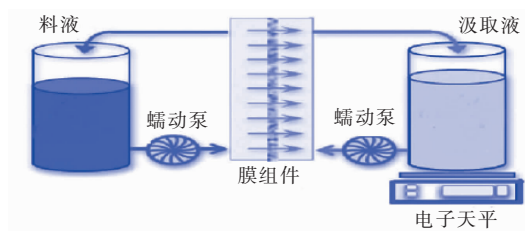


图 1 正渗透试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of FO experimental facility

### 1.2 试验试剂与仪器

试剂:葡萄糖(C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>)、蔗糖(C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub>),均为分析纯。

仪器:蠕动泵(BT-600EA/253Yx)、电子天平(APT456)、多参数水质分析仪(DZS-706)、数显恒温水浴锅(HH-S)、超纯水机(GWA-UN2-20)、数字式粘度计(NDJ-5S)、自制膜组件。

### 1.3 试验方法

试验以超纯水为原料液,以不同浓度的葡萄糖、蔗糖溶液为汲取液,原料液和汲取液的体积均为 1 L。恒定蠕动泵转速为 100 r/min,在蠕动泵提供的动力下,原料液和汲取液分别在 FO 膜两侧对称通道内循环并形成错流。将盛放汲取液的烧杯置于电子天平上,每隔 10 min 记录天平读数,用以计算水通量。

水通量计算公式如下:

$$J_w = \Delta m / \rho s t$$

式中, $J_w$  为正渗透水通量; $\Delta m$  为汲取液质量的增加值; $\rho$  为超纯水的密度; $s$  为有效膜面积; $t$  为记录的时间间隔。

每组试验运行 2.5 h,试验之前,用超纯水冲洗试验装置约 30 min。试验中,温度由数显恒温水浴锅控制为(20 ± 1) °C,溶液温度、pH 值等采用多参数水质分析仪实时监测。

## 2 结果与分析

### 2.1 汲取液对水通量的影响

当两种 FO 膜在活性层朝向汲取液(AL-DS)时,考察了浓度分别为 20%、40%、60%、80% 的葡萄糖、蔗糖汲取液对应的水通量随时间的变化。结果表明,在 AL-DS 模式下,对于两种 FO 膜,随着汲取液浓度的提高,葡萄糖、蔗糖对应的平均水通量均增大,但平均水通量的增加值均随汲取液浓度的提高而减小(见表 1)。原因可能是:汲取液浓度的提高增大了 FO 膜两侧溶液间的渗透压差,使驱动力增大,但同时也使汲取液粘度增大,加剧了外部浓差极化<sup>[5]</sup>,而且汲取液浓度增大还会加剧溶质的反向扩散,削弱 FO 膜两侧的一部分有效驱动力。在本试验中,由两侧溶液间渗透压差增大引起的水通量升高起了主要作用,而由汲取液浓度增大导致的外部浓差极化作用加剧仅起了次要作用,所以汲取液浓度提高仅在一定程度上阻碍了水通量的升高,并未能完全阻止水通量的升高。

表 1 两种膜在不同汲取液浓度下的平均水通量

Tab. 1 Average permeate flux of two FO membranes under different DS concentration  $\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 

项 目	汲取液种类	汲取液浓度			
		20%	40%	60%	80%
CTA 膜	葡萄糖	8.7	13.3	16.6	17.8
	蔗糖	4.7	8.3	10.6	12.7
PA 膜	葡萄糖	12.1	16.9	18.8	20
	蔗糖	8.2	12.5	15.9	18.7

另外,对于两种 FO 膜,汲取液浓度相同时,葡萄糖的水通量高于蔗糖,这是由于葡萄糖的分子质量小于蔗糖,相同质量浓度的葡萄糖溶液的渗透压高于蔗糖溶液,故葡萄糖的水通量较高。但蔗糖的水通量随汲取液浓度的增加幅度大于葡萄糖,具体见表 2。

表 2 两种膜的平均水通量随汲取液浓度的增幅

Tab. 2 Increase in permeate flux of two FO membranes with increase of DS concentration %

项 目	汲取液种类	汲取液浓度		
		20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80
CTA 膜	葡萄糖	52.9	24.8	7.2
	蔗糖	76.6	27.7	19.8
PA 膜	葡萄糖	39.6	11.2	6.4
	蔗糖	52.4	27.2	17.6

出现上述现象的原因可能是:由于 FO 膜的不致密性,在试验中不可避免会发生溶质的反向扩散,进而导致 FO 膜两侧的有效渗透压差降低。而且 FO 在 AL-DS 模式下溶质的反向扩散作用较显著<sup>[6]</sup>。由于蔗糖分子直径大于葡萄糖分子,故其反向扩散程度低于葡萄糖分子。随着汲取液浓度的提高,对于蔗糖汲取液,FO 膜两侧有效渗透压差的降低值较小<sup>[7]</sup>,其对应水通量的增加幅度就较大。

## 2.2 膜朝向对水通量的影响

FO 膜为非对称膜,试验中可采用两种不同的运行模式,即活性层朝向汲取液(AL-DS)和活性层朝向原料液(AL-FS),不同的运行模式对水通量会产生重要影响。在 2.1 节的基础上,改变膜的朝向,探究了当两种 FO 膜在 AL-FS 模式下,浓度为 20%、40%、60%、80% 的葡萄糖、蔗糖汲取液对应水通量的变化情况。结果表明,对于两种 FO 膜,AL-FS 模式下的水通量均比 AL-DS 模式小得多,这是由于在 AL-FS 模式下产生了与 AL-DS 模式不同的浓差极化,为稀释的内部浓差极化,该浓差极化对水通量有更强烈的影响<sup>[8]</sup>,故水通量很低。但是,

在试验的整个运行过程中,两种 FO 膜的水通量降幅均远小于 AL-DS 模式下的水通量降幅,这与 Parida 等<sup>[9]</sup>的试验结论基本相吻合。

对于 CTA 膜,在 AL-FS 模式下平均水通量随汲取液浓度的变化规律与 AL-DS 模式下的变化规律相似,但水通量的增幅却明显小于 AL-DS 模式下水通量的增幅。如葡萄糖汲取液浓度从 20% 增至 80%,对应的水通量分别为 4.2、5.5、6.4、6.6  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,增幅依次为 31%、16.4%、3.1%,明显小于 AL-DS 模式下相对应的 52.9%、24.8%、7.2%。蔗糖也有类似规律。可能的原因为:CTA 膜的支撑层较薄,其内部浓差极化并不太剧烈,在 AL-FS 模式下,膜两侧的渗透压差仍是影响水通量的主要因素,而内部浓差极化起次要作用,随着汲取液浓度的提高,其未能阻止水通量升高,但对水通量升高的阻碍作用强于 AL-DS 模式下的外部浓差极化,使得 AL-FS 模式下水通量随汲取液浓度的增幅较小。

对于 PA 膜,在 AL-FS 模式下,随着汲取液浓度的提高,葡萄糖、蔗糖的平均水通量均基本不变,增至高浓度时,水通量反而略微下降。如葡萄糖,汲取液浓度从 20% 增至 80%,对应水通量依次为 3.7、4.0、4.1、3.8  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,蔗糖也有类似规律,这与 PA 膜在 AL-DS 模式下的水通量变化规律大不相同。可能的原因是:高浓度糖溶液的粘度很大,溶质分子更不易在 PA 膜的较厚多孔支撑层内扩散,导致内部浓差极化作用加剧。在 AL-FS 模式下,PA 膜对应的内浓差极化成为影响水通量的主要因素。汲取液浓度很高时,这种作用阻止了水通量升高,而汲取液浓度增大引起膜两侧渗透压差增大对水通量并无明显影响。

## 2.3 膜材质对水通量的影响

膜材质如膜的结构、亲水性能、厚度等对 FO 过程会产生重要影响。对比了在其他条件相同时,两种 FO 膜在 AL-DS 和 AL-FS 模式下的水通量情况,见图 2。可知,对于各浓度的葡萄糖、蔗糖汲取液,在 AL-DS 模式下,CTA 膜的平均水通量都小于 PA 膜,两种 FO 膜的水通量随汲取液浓度的变化趋势具有较高相似性,均随汲取液浓度的提高而增大,且增幅越来越小;在 AL-FS 模式下,CTA 膜的平均水通量反而高于 PA 膜,二者水通量随汲取液浓度的变化趋势差异较大,即 CTA 膜的水通量随汲取液浓度的提高而增大,PA 膜的水通量基本不变。

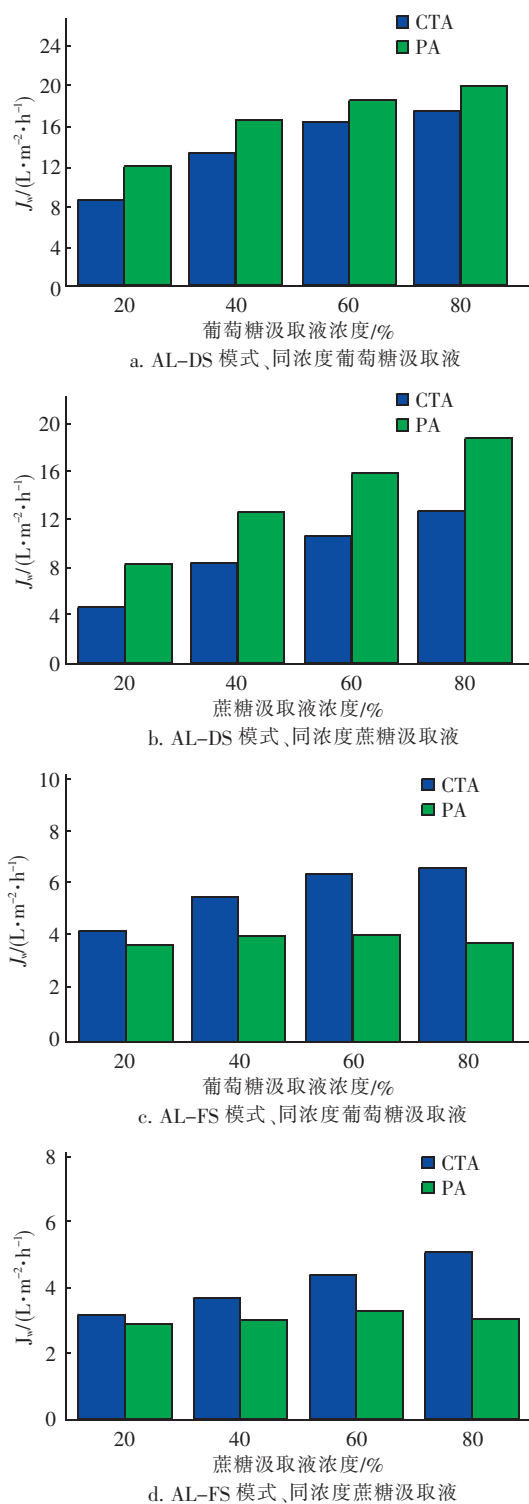


图 2 膜材质对水通量的影响

Fig. 2 Influence of membrane material on permeate flux of two FO membranes

可能的原因是:由于原料液为纯水,在 AL-DS 模式下仅产生稀释的外部浓差极化,外部浓差极化

对水通量的影响并不十分显著<sup>[8]</sup>。PA 膜活性层材质聚酰胺的亲水性高于 CTA 膜活性层材质三醋酸纤维素,膜的高亲水性会使溶液中的水分子优先吸附于膜表面,形成一层极薄纯水层,在膜两侧渗透压差的驱动下,纯水层在膜内形成毛细流动,通过膜将水分子输送到汲取液中,PA 膜输送水分子的速率较快,故 PA 膜的水通量要高于 CTA 膜<sup>[10]</sup>。

在 AL-FS 模式下,两种 FO 膜的支撑层内部均产生了稀释的内浓差极化。由于 PA 膜的支撑层比 CTA 膜厚,导致 PA 膜的内部浓差极化作用更剧烈。对于 PA 膜,AL-FS 模式下稀释的内部浓差极化成为决定水通量大小的关键因素,故 PA 膜在该模式下的水通量低于 CTA 膜,且水通量几乎不随汲取液浓度的提高而增大,相反,汲取液浓度过高时,水通量反而略有下降。

### 3 结论

① 在 AL-DS 模式下,两种 FO 膜的水通量均随汲取液浓度的提高而增大,但水通量的增幅随汲取液浓度的提高而减小。这是由于在 AL-DS 模式下产生的外部浓差极化对水通量的影响并不大,溶液间渗透压差才是影响水通量的主要因素;蔗糖汲取液对应的水通量增幅大于葡萄糖汲取液,这是由于蔗糖的反向扩散弱于葡萄糖,溶液间有效渗透压差的降低值较小造成的。

② 两种 FO 膜在 AL-FS 模式下的水通量均远小于 AL-DS 模式下的,整个试验过程中水通量随时间的降幅也远小于 AL-DS 模式下水通量的降幅;AL-FS 模式下 CTA 膜的水通量随汲取液浓度的变化规律与 AL-DS 模式相似,但水通量随浓度的增幅明显小于 AL-DS 模式下相对应的水通量增幅,PA 膜的水通量几乎不随汲取液浓度的提高而改变,汲取液增至高浓度时,水通量反而略微下降。

③ 在 AL-DS 模式下,两种 FO 膜的平均水通量随汲取液浓度的变化趋势相似,但相同汲取液浓度时,PA 膜的水通量明显高于 CTA 膜;在 AL-FS 模式下,二者水通量随浓度的变化趋势具有较大差异性,CTA 膜的水通量反而高于 PA 膜。

### 参考文献:

- [1] Chung T S, Zhang S, Wang K Y, et al. Forward osmosis processes: Yesterday, today and tomorrow[J]. Desalination (下转第 88 页)