

膜蒸馏海水淡化实验 ——介绍一个新型的膜分离化工实验

高明丽^{1,*}, 冯红艳¹, 蒋晨啸², 纪文根², 徐婷婷², 王钰熙¹

¹ 化学国家级实验教学示范中心(中国科学技术大学), 合肥 230026

² 中国科学技术大学化学与材料科学学院, 合肥 230026

摘要: 介绍了一个应用于本科教学的膜分离化工实验项目, 实验中考查了膜蒸馏海水淡化的效果。学生从本实验中了解了膜蒸馏相关的前沿知识, 学习了膜蒸馏海水淡化的实验技术, 同时增加了将科技成果转变为生产力的应用意识。

关键词: 本科教学; 化工实验; 膜蒸馏; 海水淡化

中图分类号: G64; O6-3

Experiment of Membrane Distillation for Seawater Desalination: A New Membrane Separation Chemical Engineering Experiment

GAO Mingli^{1,*}, FENG Hongyan¹, JIANG Chenxiao², JI Wengen², XU Tingting², WANG Yuxi¹

¹ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (University of Science and Technology of China), Hefei 230026, P. R. China.

² School of Chemistry and Materials Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, P. R. China.

Abstract: A membrane separation experimental project of chemical engineering was introduced, and it had been applied to the undergraduate laboratory teaching. The effect of the membrane distillation for seawater desalination was investigated. From this project, the students learned the advanced knowledge of membrane distillation and experimental technology of membrane distillation for seawater desalination. They also increased application consciousness of transforming scientific and technological achievements into productivity.

Key Words: Undergraduate teaching; Chemical engineering experiment; Membrane distillation; Seawater desalination

1 引言

化工基础实验是我校化学国家级实验教学示范中心的工科类基础实验课, 授课对象主要是化学与材料科学学院高年级本科生。相比于工科院校把学生培养成工程技术人员的目标, 理科院校化学类专业则更倾向于把学生培养成研发、教学人员, 因此更要注重培养学生的创新意识、工程意识, 以及将科研成果转化为生产力的能力。在近年的持续建设中, 我院化工实验课程形成了有自身特色的实验课程体系^[1,2], 除了传统的化工基础实验外, 还发展了一些由前沿科研成果转化而来的新型膜分离实验^[3,4]。

本文介绍了一个应用于化工基础实验教学的膜蒸馏海水淡化实验。膜蒸馏(membrane

收稿: 2018-02-11; 录用: 2018-03-22; 网络发表: 2018-04-12

*通讯作者, Email: gaoml@ustc.edu.cn

基金资助: 2016 年度中国科学技术大学本科教学研究项目(2016jyxm017)

2 实验内容

2.1 实验目的

- (1) 了解膜蒸馏海水淡化的基本原理、膜蒸馏组件的构造及操作方法。
- (2) 考查料液侧温度对海水淡化效果的影响。
- (3) 了解膜蒸馏在处理不同料液时的优点。

膜蒸馏是一种利用疏水性微孔膜将两种不同温度的溶液分开，较高温度侧溶液中的易挥发物质呈气态透过膜，进入膜另一侧冷凝的膜分离过程。它有别于其他膜分离过程：① 所用的膜是微孔膜；② 膜一侧不能被处理料液浸润；③ 膜孔内无毛细管冷凝现象；④ 只有蒸汽能通过膜孔传质；⑤ 膜不能改变操作溶液各组分的气液平衡；⑥ 膜蒸馏组件中膜至少一侧要与操作溶液直接接触。对于每一组分而言，膜操作的推动力是由于膜两侧蒸汽温度差造成的组分的气相分压梯度，它是热量和质量同时传递的过程，膜孔内传质过程是分子扩散和努森扩散的综合结果。原理如图 1 所示(减压膜蒸馏)，主要传质过程有：

- (1) 水在料液侧膜表面汽化。
- (2) 汽化水蒸气通过疏水膜进行传质。
- (3) 水蒸气在膜低温侧进行冷凝或者被抽入冷凝器中冷凝成液态水。

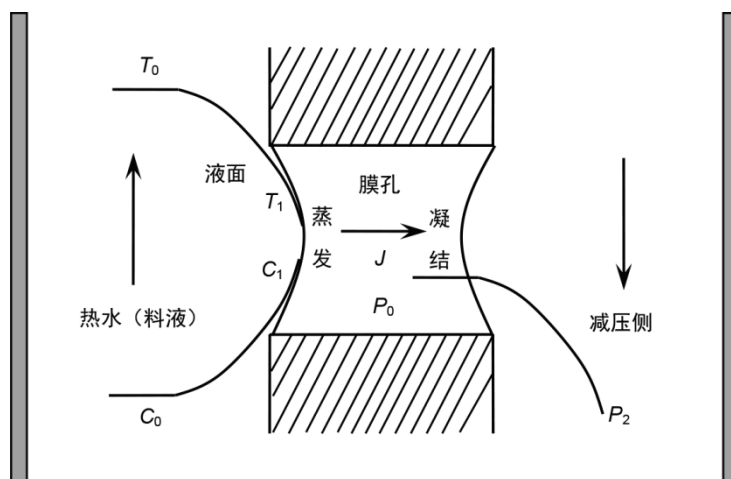


图 1 减压膜蒸馏原理图

膜蒸馏的优点主要有:

- (1) 截留率高, 对于盐的选择性可以大于反渗透甚至多效闪蒸。
- (2) 操作温度比传统蒸馏低得多, 对被处理物质物理化学性质影响较小, 可以利用地热、太阳能、工业废热预热等, 降低能耗。
- (3) 操作压力较其他膜分离过程低。
- (4) 可以获得纯度很高的透过液、浓缩倍数高的料液。

根据膜下游侧冷凝方式的不同,膜蒸馏过程可以分为以下类型:(a)直接接触膜蒸馏(DCMD);

(b) 空气隙膜蒸馏(AGMD); (c) 真空膜蒸馏(又称减压膜蒸馏, VMD); (d) 气扫膜蒸馏(SGMD), 如图 2 所示。

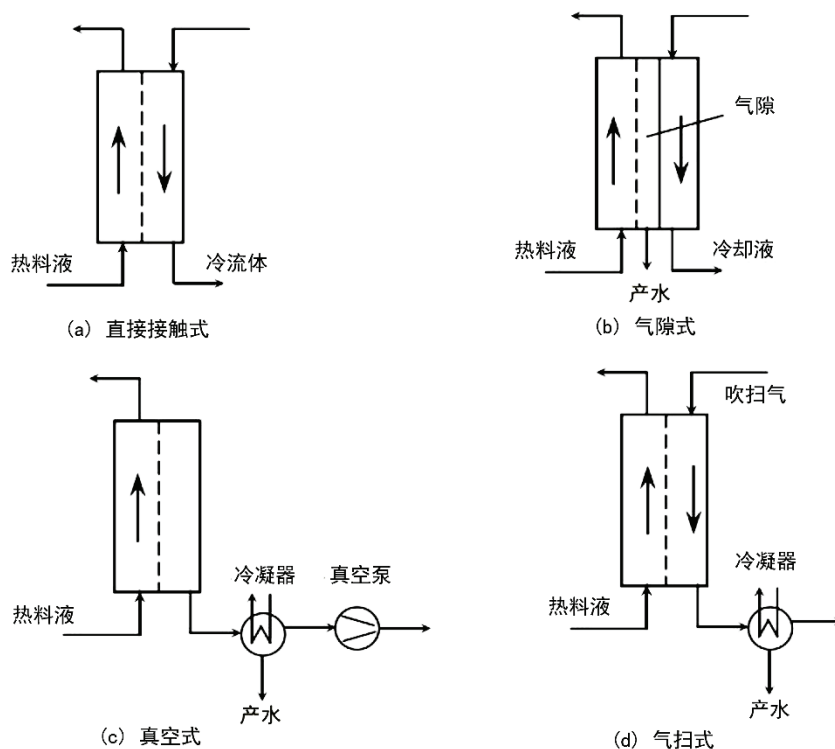


图 2 膜蒸馏类型^[6,7]

膜蒸馏过程应用广泛, 主要分为两类: 以渗透液为目的的产物和以截留物为目的的产物。

(1) 纯水生产: 如海水苦咸水脱盐; 电厂锅炉用水; 半导体工业用水。

(2) 溶液浓缩: 废水处理; 果汁等浓缩; 盐、酸、碱的浓缩。

(3) 挥发性生物产品脱除: 乙醇、丁醇、丙酮或者芳香族化合物等挥发性产品可以通过发酵过程制取并可以利用膜蒸馏过程脱除。处理含低浓度挥发性组分的水溶液, 如乙醇/水、三氯乙烯/水的体系。

本实验采用减压膜蒸馏对模拟海水进行淡化处理, 装置工艺流程如图 3 所示。

实验完成后产水中含盐量(TDS)由电导率仪测试。为了得到低浓度时 TDS 与电导率的关系, 首先在实验前我们先用 NaCl 配制 $0-0.005 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的标准溶液, 用电导率仪测相应的电导率(表 1), 然后做出模拟曲线, 给出标准曲线(图 4)。

在低浓度时 TDS 与电导率成线性关系, 拟合公式为: $y = 94.3x + 5.1$, 其中 x 代表 NaCl 浓度 ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$), y 代表电导率 ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), 拟合相关度(Adj.R-square)为 0.9998。

最终产水罐中产水的 TDS 含量将由图 4 中模拟标准曲线推导得到。

脱盐率计算公式如下:

$$R = \frac{(\delta_0 - \delta_t)}{\delta_0} \times 100\%$$

式中 R 为脱盐率(%), δ_0 为初始时原料液的电导率 ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), δ_t 为时间 t 时刻产水溶液的电导率 ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)。

水通量计算公式如下:

$$J_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\Delta m}{A\Delta t}$$

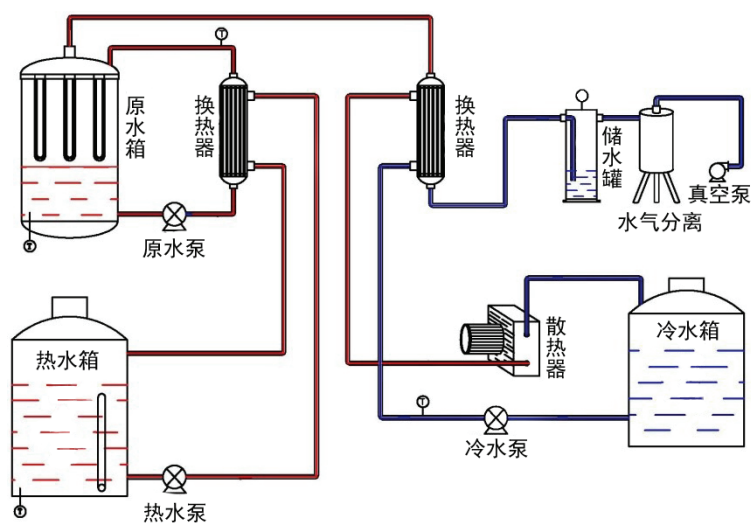


图3 膜蒸馏海水淡化流程图

表1 NaCl 浓度和电导率的关系

序号	$c(\text{NaCl})/(\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1})$	电导率/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$
1	0.05	6.80
2	0.1	14.10
3	0.5	55.4
4	1	100.2
5	5	476

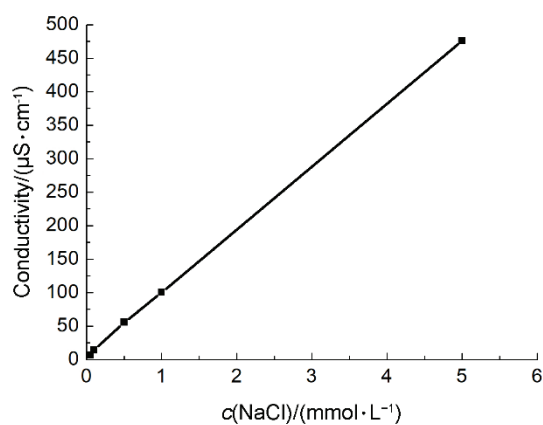


图4 电导-浓度模拟曲线

式中 $J_{\text{H}_2\text{O}}$ 为过程水通量($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), Δt 为实验操作时间(h), A 为膜组件有效面积(m^2), Δm 为产水罐 Δt 时间内所增加的产水质量(kg)。

2.3 实验试剂

模拟海水溶液: NaCl 溶液, $0.2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 16 L。

2.4 实验仪器

本实验采用浸没式膜蒸馏实验设备(图 5), 由浙江东大环境工程有限公司提供, 其中膜组件由聚四氟乙烯(PTFE)中空纤维膜制作而成, 膜参数见表 2。

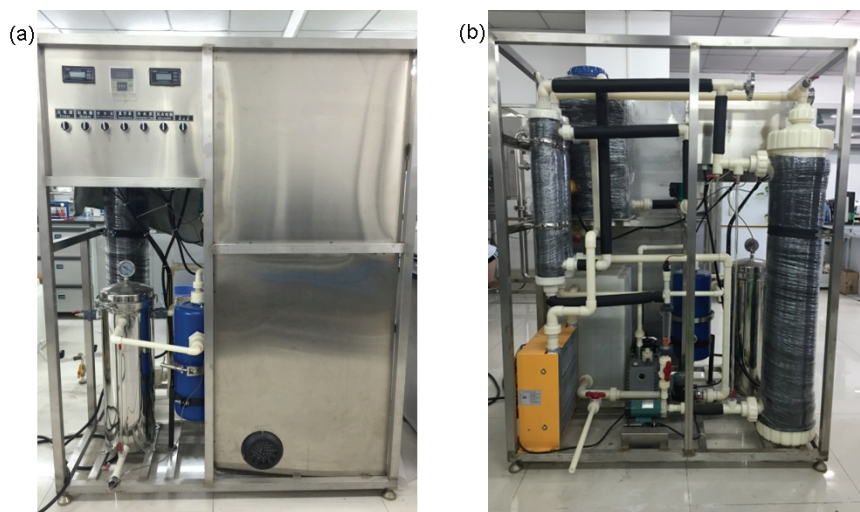


图5 膜蒸馏实验设备实物图

(a) 设备正面图; (b) 设备背面图

表2 聚四氟乙烯中空纤维膜参数

膜材料	平均膜厚/mm	纤维内经/mm	纤维外径/mm	平均孔径/ μm	孔隙率
聚四氟乙烯	0.5	1.2	2.2	0.25	45%~50%

实验采用 U 型中空纤维膜组件(图 6), 在组件内腔中均匀地按束平行排列, 膜组件参数见表 3。



图6 膜组件实物图

表3 膜组件参数

项目	参数
纤维数/(根/束)	60
纤维束数/束	12
纤维总数/根	720
纤维有效长度/cm	45
纤维组件内腔有效直径/mm	185
组件内腔有效高度(含罐体)/m	1
有效膜面积/ m^2	2.25

2.5 实验步骤

(1) 向原水箱中加入 16 L $0.2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 溶液(自己配制)作待处理模拟海水, 盖好原水箱, 热水箱和冷水箱中注满水, 并排空储水罐中残留液体。

(2) 打开总电源、原水泵, 过 5 min 记录原水电导率, 打开加热器、热水泵、冷水泵和风冷却器, 设置一套装置的热水箱温度为 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, 另一套装置的热水箱温度为 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ (两位学生一组, 两组学生分别做不同的温度)。

(3) 至热水箱温度达到设定温度, 并且原料液温度不再上升时打开真空泵, 待真空度达到稳定后记录原料液温度, 并开始计时。

(4) 30 min 后记录产水电导率, 依次关闭加热器、原水泵、热水泵、冷水泵、风冷却器, 并缓慢打开原水箱上方的通气阀门(防止水汽倒吸至真空泵内部), 再关闭真空泵, 最后关总电源。

(5) 打开储水罐下方的阀门, 同时收集产水, 记录产水体积。

(6) 打开水气分离器下方的阀门, 放出里面的存水。

2.6 结果分析

参见 2.2 节实验原理部分计算产水盐浓度 c 、水通量 J_{H_2O} , 以及脱盐率 R , 小组间实验数据共享, 比较料液侧温度对海水最终淡化效果的影响, 并分析水通量与料液侧温度的关系。实验数据可参考表 4 进行记录与处理。

表 4 数据记录与处理

项目	数据
热水箱加热温度 $T_1/^\circ\text{C}$	
原料液温度 $T_2/^\circ\text{C}$	
真空度/MPa	
时间 $\Delta t/\text{h}$	
初始时原料液电导 $\delta_0/(\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1})$	
t 时刻产水电导 $\delta_t/(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	
产水总体积 V/mL	
产水质量 $\Delta m/\text{kg}$	
产水盐浓度 $c/(\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1})$	
水通量 $J_{H_2O}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	
脱盐率 $R/\%$	

2.7 实验注意事项

(1) 待原料液温度上升至稳定时再打开真空泵开始计时。

(2) 实验结束后将膜从原水罐中取出, 用自来水冲洗, 避免膜的污染造成膜孔堵塞及脱盐性能的下降。

3 结语

将膜蒸馏海水淡化实验引入到本科生的化工基础实验课程中, 一方面作为一种新型的膜分离实验, 丰富了我院化工基础实验课程体系; 另一方面, 更重要的是, 通过本实验课的学习与动手操作, 使学生了解膜蒸馏相关的前沿知识, 增强了对化学工程学科的兴趣, 并且培养他们将科技成果应用到实际生活中的意识。经过一年多来的教学实践, 我们认为膜蒸馏海水淡化实验作为一个化工基础实验项目值得推广。

参 考 文 献

- [1] 冯红艳, 徐铜文, 杨伟华. 化工高等教育, **2014**, No. 1, 67.
- [2] 高明丽, 冯红艳. 化学教育, **2017**, 38 (14), 28.
- [3] 冯红艳, 徐铜文, 王晓林, 杨伟华. 大学化学, **2015**, 30 (1), 59.
- [4] 冯红艳, 徐铜文, 高明丽. 大学化学, **2016**, 31 (11), 56.
- [5] 申龙, 高瑞昶. 化工进展, **2013**, 33 (2), 289.
- [6] Alkhdhiri, A.; Darwish, N.; Hilal, N. *Desalination* **2012**, 287, 2.
- [7] 吕晓龙. 膜科学与技术, **2010**, 30 (3), 1.