

真空膜蒸馏海水淡化过程的强化研究

徐夫臣, 潘艳秋, 王同华

(大连理工大学化工学院, 辽宁大连 116012)

摘要: 采用气液两相流技术对管状炭膜真空膜蒸馏模拟海水淡化过程进行强化研究。纯水物系和 NaCl 水溶液的气液两相流强化实验中, 相比未通气体时通量分别增加了 29% ~ 35% 和 16% ~ 66%。气体流量、渗透侧真空度和膜组件放置方式对两相流膜蒸馏过程通量的影响结果表明: 气液体积流量之比在 (1 ~ 2): 1 时两相流强化效果最佳; 通量随着渗透侧真空度的增大而增大, 且气液两相流操作在较小真空度时通量增加的幅度大于较大真空度时; 膜组件的放置方式对通量影响较大, 相对于水平放置时, 膜管竖直放置时的通量较大, 最大可达水平放置时的 131% 左右。

关键词: 真空膜蒸馏; 两相流; 过程强化; 管状炭膜; NaCl 水溶液

中图分类号: TQ028.31; TQ03-39

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2010)03-0069-04

Enhancement of vacuum membrane distillation in seawater desalinization

XU Fu-chen, PAN Yan-qiu, WANG Tong-hua

(School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116012, China)

Abstract: Gas-liquid two-phase flow enhancing vacuum membrane distillation (VMD) has been experimentally studied using a tubular carbon membrane. In the gas-liquid two-phase flow enhancing experiment of pure water and NaCl aqueous, the permeate flux increases by 29% - 35%, and 16% - 66% respectively compared with no gas sparging. Influences of gas flow, permeate-side vacuum degree and membrane orientation on flux are investigated. The results show that when the gas flow to liquid flow is (1 ~ 2): 1, the enhanced result is optimum. The flux increases with the increase of permeate-side vacuum degree, in addition the flux amplitude is greater when the permeate-side vacuum degree is lower compared with the higher one. Also the influence of membrane orientation is very important, and the membrane mounted vertically leads to flux enhancement as high as about 131% as horizontally.

Key words: vacuum membrane distillation; two-phase flow; process enhancement; tubular carbon membrane; NaCl solution

膜蒸馏是一种新型的膜分离技术, 在跨膜压差推动下, 溶液中的易挥发组分在膜表面气化并传递通过疏水多孔膜。根据冷凝侧蒸汽冷凝方式或排除方式的不同, 膜蒸馏过程可以分为直接接触式 (DCMD)、气隙式 (AGMD)、气体吹扫式 (SGMD) 和真空式 (VMD) 4 种操作方式^[1]。

大部分膜蒸馏过程的通量均较低, 其主要原因是温度极化和浓度极化使得膜面上形成一层温度和浓度边界层, 大大减弱了传热传质效率。为了解决这一问题, 人们采用了许多方法进行过程强化, 其强化方法主要可分为两大类: 一是制备高渗透性的膜。如研究开发新的膜材料, 或通过新的制备方法对膜进行改性制备出性能良好的膜。Bonyadi 等^[2-3] 在纺丝过程中加入质量分数 70% ~ 80% 甲醇水溶液凝结剂, 制备双层纺丝高渗透的无微孔纤维膜, 进行了直接接触式膜蒸馏研究, 发现在 90℃ 时渗透通量

可达 55 kg/(m²·h), 截留率达 100%。Li 等^[4] 在多孔疏水聚丙烯中空纤维膜的外表面上涂覆了一层多孔的等离子聚合硅树脂含氟聚合物, 用于真空膜蒸馏脱盐过程, 发现料液错流流动时通量较高, 并且发现涂覆层能够有效地防止膜的润湿和污染。强化膜蒸馏过程的第 2 种方法是优化膜组件及膜过程。如装设湍流促进器, 加入隔片或挡板改变组件流动通道, 以达到充分混合。Teoh 等^[5] 研究了直接接触式脱盐过程, 通过在膜通道内加入挡板、隔片和改变中空纤维的几何形状来强化膜蒸馏过程。结果表明, 3 种方法通量分别增加了 20%、28%、36%, 而且在高温时增加效果明显。段小林等^[6] 对超声波强化真空膜蒸馏进行了实验研究。结果表明, 超声波强化能较显著地提高通量, 在实验范围内通量提高了 31%; 超声波功率越大、温度越低、流速越小, 强化效果越明显。另外, 通过改变操作方式也可达到强化

收稿日期: 2009-12-13

作者简介: 徐夫臣(1984-), 男, 硕士生; 潘艳秋(1962-), 女, 博士, 教授, 从事化工分离过程研究, 通讯联系人, 0411-39893979, yqpan@dlut.edu.cn。

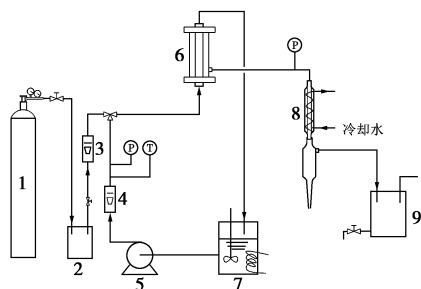
过程的目的,如 Cath 等^[7]在直接接触式膜蒸馏中,把进料泵和冷凝液泵由在组件前改为在组件后抽吸,发现通量有所增加。

气液两相流是气液两相混合在一起共同流动,在20世纪90年代初期引起科研工作者的广泛关注,在动力、石油、化工等行业中有广泛的应用。其在膜分离技术中的应用已见报道,如在微滤、超滤技术中的应用^[8-9]。此外,Fontalvo 等^[10]把气液两相流应用于渗透汽化过程,取得了较好的效果。气液两相流在膜蒸馏领域中的应用鲜见报道。笔者开展了气液两相流在膜蒸馏 NaCl 水溶液中的对比实验研究,并考察操作条件对气液两相流膜蒸馏过程的影响,为进一步的机理研究和工业应用提供依据。

1 实验部分

1.1 实验装置及流程

实验装置及流程如图1所示。料液在恒温水浴加热到指定温度后,由料液泵输送,与气体混合形成气液两相流进入膜组件,液体和气体流量分别由转子流量计控制,膜渗透侧真空度由真空泵控制,冷凝后的渗透液经收集并测量其体积。



1—氮气瓶;2—缓冲罐;3—气体流量计;4—液体流量计;
5—料液泵;6—膜组件;7—恒温槽;8—冷凝器;9—储罐

图1 膜蒸馏 NaCl 水溶液实验装置流程图

1.2 实验材料

管状炭膜:大连理工大学膜技术研究中心制备,膜管内径5.0 mm、外径9.0 mm、有效长度100 mm、平均孔径0.25 μm。NaCl 溶液:自配,由 NaCl 晶体(分析纯,天津市大茂化学试剂厂生产)和去离子水配制而成。气体:氮气。

1.3 分析方法

渗透通量和截留率是考察膜蒸馏性能的2个指标,本实验中膜渗透通量按式(1)计算:

$$J = V/At \quad (1)$$

式(1)中, J 为膜通量; V 为渗透液体积; A 为膜的有效面积; t 为时间。

膜蒸馏过程的理论截留率为100%,但由于膜本身的缺陷,实际的截留率低于100%。NaCl 水溶液在较低的浓度下,其浓度和电导率成线性关系^[11],所以本文中截留率按式(2)计算:

$$R = (1 - C_p/C_f) \times 100\% = (1 - S_p/S_f) \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中, R 为截留率; C_f, C_p 分别为原料液与渗透液浓度; S_f, S_p 分别为原料液与渗透液的电导率,由 DDS-307 型电导率仪测定。

2 实验结果与讨论

2.1 纯水实验

以纯水为料液,在其流量为40 L/h、温度60℃、渗透侧真空度2 kPa 下进行膜蒸馏实验。两相流时通入30 L/h 的气体,测得的通量值如表1所示。

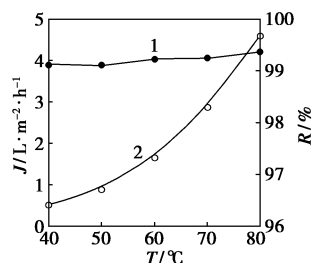
表1 未通入气体和两相流时通量对比

序号	未通入气体时 $J_0/$ $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$	两相流时 $J'/$ $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$	J'/J_0
1	2.31	2.99	1.294
2	2.29	3.06	1.336
3	2.33	3.06	1.313
4	2.23	3.02	1.354

由表1可知,通入气体后,渗透通量增加了29%~35%。可见,气体的通入增加了料液的湍动程度,能够很好地破坏温度边界层,增加了推动力,强化了传热和传质过程。由该实验可以得出,气液两相流能够起到强化膜蒸馏过程的作用。

2.2 两相流 NaCl 溶液实验

图2显示了以 NaCl 溶液为料液、质量浓度为10 g/L、流量40 L/h、渗透侧真空度2 kPa 的条件下,通入气体流量为30 L/h 时,渗透通量随温度的变化关系。由图2可知渗透通量随着温度的增加明显增加,而且温度越高,增加的幅度越大。这是因为膜蒸馏过程是以膜两侧的水蒸气分压差为传质推动力,而水蒸气的分压与温度成指数关系。



1—截留率;2—渗透通量

图2 两相流通量随温度的变化关系图

图3显示了未通入气体和两相流时渗透通量的对比关系。通入气体后, 通量增加了16%~66%。这是由于气体的通入, 破坏了温度和浓度边界层, 强化了传热和传质, 致使通量增加。膜截留率对比如表2所示。可知有无气体通入, 膜的截留率均在99%以上, 炭膜的截留效果良好。

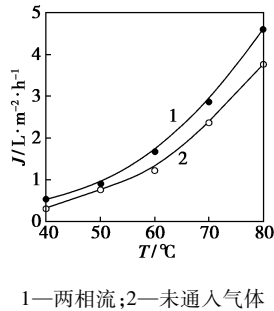


图3 通入气体前后通量对比关系

表2 未通入气体时和两相流时截留率对比 %

	温度/°C				
	40	50	60	70	80
未通入气体时	99.02	99.45	99.18	99.59	99.61
两相流时	99.13	99.10	99.22	99.25	99.36

2.3 气体流量对两相流渗透通量的影响

图4显示了在NaCl溶液质量浓度为10 g/L、流量40 L/h、温度60°C、渗透侧真空度2 kPa的条件下, 渗透通量随气体流量的变化关系。

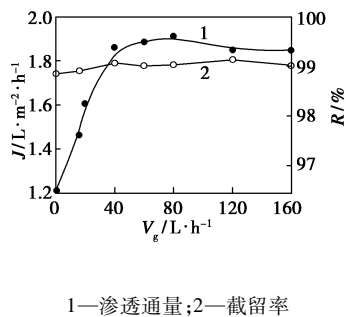


图4 通量随气体流量的变化关系图

由图4可见, 随着气体流量的增加, 渗透通量先增加后趋于平缓, 最后略微有所下降。原因是在气体流量较小时, 气液两相流的流型为泡状流, 大量小气泡散布在料液中, 增加了料液的扰动程度, 在一定程度上破坏了边界层; 随着气体流量增加, 流型转化为弹状流^[12], 小气泡聚结成大气泡, 使料液的湍动程度加剧, 起到了很好的强化效果; 但随着气体流量继续增大, 当气体流量大于40 L/h后, 两相流的强化作用变缓。此时再增加气体流量, 气弹将占据整

个流通截面, 气弹的大小不能继续增加, 导致两相流的作用变缓; 随着气体流量进一步增加, 大气弹发生分裂, 周围的水膜上下波动, 使料液与膜表面不能充分接触, 致使通量稍微有所下降。最后可以得出, 气液流量之比在(1~2):1(气体流量对应40~80 L/h)时, 强化效果最好。

2.4 真空度对两相流渗透通量的影响

图5显示了NaCl溶液在质量浓度为10 g/L、流量为40 L/h、温度60°C、气体流量40 L/h时, 渗透侧真空度对气液两相流渗透通量的影响。由图5可知, 在不同的真空度下, 气液两相流操作都可以增加渗透通量, 并且低真空度下的通量增加幅度相对较大。原因是在较低的真空度时, 推动力也较小, 温度和浓度边界层阻力对传热和传质影响较大, 此时气液两相流破坏了边界层, 强化效果明显; 而在较高的真空度时, 两侧压差大, 跨膜推动力也较大, 温度和浓度边界层的存在而产生的阻力相对于推动力很小, 相比在较低真空度时, 其强化的效果要差。

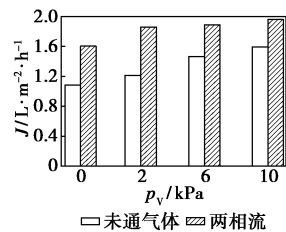


图5 不同真空度下通量对比关系

图6为NaCl溶液在质量浓度为10 g/L、流量为40 L/h、温度60°C时, 真空度为2 kPa和10 kPa下通量随气体流量的变化关系图。由图6可知, 在较大真空度时, 通量达到最大时的气体流量比低真空度时要小, 原因与图5解释的类似。

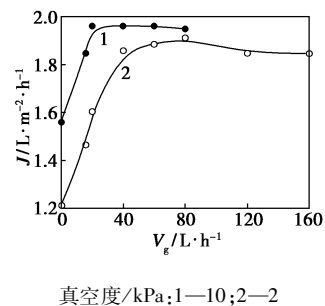


图6 通量随气体流量的变化关系图

2.5 膜组件的放置方式对两相流渗透通量的影响

图7是膜组件的放置方式对两相流渗透通量的影响, 实验条件为: NaCl溶液质量浓度为10 g/L、流量40 L/h, 温度60°C, 渗透侧真空度2 kPa。

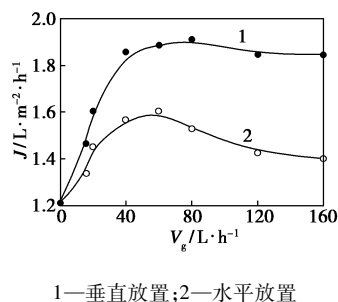


图7 膜组件不同放置方式的影响

由图7可知,竖直放置时渗透通量比水平放置时要大,最大时可达131%。这是由于膜组件放置方式不同导致气泡的形状发生变化,因为在水平放置时,由于重力的影响使气泡在管式炭膜内的上部流动,一方面使料液与膜的接触面积减小,另一方面对膜管下部的边界层的影响相对较小;而在竖直放置时,气泡能够较对称地分布在膜管内部,能使料液与膜面充分的接触,并且能够破坏温度和浓度边界层,使温度极化和浓度极化现象减弱,强化效果较好。由图7还可看出,水平放置时,渗透通量随着气体流量的增加先增大后减小,而且在较大的气体流量时,通量下降趋势比竖直放置时更为明显,原因是大的气泡占据整个膜管,仅下部的少量液体与膜管相接触,故通量下降。所以竖直时通量较大,在实验操作过程中,选择膜组件竖直放置比较好。

3 结论

将气液两相流技术应用到膜蒸馏过程中,对比研究考察了操作条件对过程的强化效果,得出如下实验结论:

(1)在膜蒸馏纯水过程中,通入气体能够较好地强化过程,通量增加了29%~35%;在膜蒸馏NaCl水溶液过程中,气液两相流的强化效果明显,通量增加了16%~66%,截留率在99%以上。

(2)操作条件影响的实验结果表明:随着气体流量的增加,膜的渗透通量先增加、后趋于平缓,再略微有所下降,气液流量之比在(1~2):1时的强化效果最佳;渗透侧真空度较小时,两相流的强化效果大于真空度较大时,但其达到最大通量所对应的气体流量比较大真空度时要小;膜组件竖直放置时的两相流通量比水平放置时大,最大可达131%左右。

符号说明:

A —膜的有效面积/ m^2	S_i —原料液电导率/ $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$
C_i —料液质量浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	S_p —渗透液电导率/ $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$
C_p —渗透液质量浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	t —时间/h
J —渗透通量/ $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	T —温度/ $^{\circ}\text{C}$
P_v —渗透侧真空度/kPa	V —渗透液体积/mL
R —截留率	v_g —气体流量/ $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$

参考文献

- [1] El-Bourawi M S, Ding Z, Ma R, *et al.* A framework for better understanding membrane distillation separation process [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 285(1/2): 4-29.
- [2] Bonyadi Sina, Chung Tai Shung, Rajagopalan Raj. A novel approach to fabricate macrovoid-free and highly permeable PVDF hollow fiber membranes for membrane distillation[J]. *AIChE Journal*, 2009, 55(3): 828-833.
- [3] Bonyadi Sina, Chung Tai Shung. Flux enhancement in membrane distillation by fabrication of dual layer hydrophilic-hydrophobic hollow fiber membranes[J]. *Journal of Membrane Science*, 2007, 306(1/2): 134-146.
- [4] Li Baoan, Sirkar Kamalesh K. Novel membrane and device for vacuum membrane distillation-based desalination process[J]. *Journal of Membrane Science*, 2005, 257(1/2): 60-75.
- [5] Teoh May May, Bonyadi Sina, Chung Tai-Shung. Investigation of different hollow fiber module designs for flux enhancement in the membrane distillation process[J]. *Journal of Membrane Science*, 2008, 311(1/2): 371-379.
- [6] 段小林, 陈冰冰. 超声波强化真空膜蒸馏的试验研究[J]. *化学工程师*, 2005(7): 15-16.
- [7] Cath Tzahi Y, Dean Adams V, Childress Amy E. Experimental study of desalination using direct contact membrane distillation; A new approach to flux enhancement[J]. *Journal of Membrane Science*, 2004, 228(1): 5-16.
- [8] Cui Z F, Wright K I T. Gas-liquid two-phase cross-flow ultrafiltration of BSA and dextran solution[J]. *Journal of Membrane Science*, 1994, 90(1/2): 183-189.
- [9] 潘艳秋, 李凤延, 张威, 等. 气液两相流在炭膜微滤钛白悬浮液中的应用研究[J]. *高校化学工程学报*, 2009, 23(1): 34-38.
- [10] Fontalvo J, Vorstman M A G, Wijers J G, *et al.* Heat supply and reduction of polarization effects in pervaporation by two-phase feed [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 279(1/2): 156-164.
- [11] 刘成伦, 徐龙君, 鲜学福. 水溶液中盐的浓度与其电导率的关系研究[J]. *中国环境监测*, 1999, 15(4): 21-24.
- [12] Vera L, Villarreal R, Delgado S, *et al.* Enhancing microfiltration through an inorganic tubular membrane by gas sparging[J]. *Journal of Membrane Science*, 2001, 165(1): 47-57. ■