

# 气隙式膜蒸馏技术研究进展

郭智, 张新妙, 栾金义\*, 彭海珠

(中国石油化工股份有限公司北京化工研究院环保所, 北京 100013)

**摘要:**介绍了当前气隙式膜蒸馏技术的最新研究进展,着重对气隙式膜蒸馏使用的膜材料和膜组件、太阳能气隙式膜蒸馏系统以及计算机模拟技术辅助气隙式膜蒸馏过程进行了介绍。列举了气隙式膜蒸馏在不同领域的应用现状。认为气隙式膜蒸馏具有热效率高和技术适应性较强等优势,但同时存在膜通量较低的问题。可以从设计新型膜组件、回收产水中的潜热、提升热效率、结合太阳能集热器及太阳能光伏发电模块等方面进行改进,有望在不久的将来使气隙式膜蒸馏过程成功放大并实现其工业化应用。

**关键词:**气隙式膜蒸馏;膜材料;膜组件;太阳能;计算机模拟

**中图分类号:**TQ028.8

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2017)04-0016-04

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.04.004

## Research advances in air-gap membrane distillation technology

GUO Zhi, ZHANG Xin-miao, LUAN Jin-yi\*, PENG Hai-zhu

(Environmental Protection Research Institute, BRICI, SINOPEC, Beijing 100013, China)

**Abstract:** The latest research progress in air-gap membrane distillation (AGMD) technology is presented. The development of membrane material and membrane module used in air gap membrane distillation, solar powered AGMD system as well as computer simulation aided AGMD has been reviewed and highlighted. Meanwhile, the current status of AGMD application in different research fields has been introduced. AGMD has several attractive features, such as higher thermal efficiency and excellent technical applicability, but the membrane flux of AGMD is relatively lower compared with other MD configurations. AGMD performance can be improved based on design of new membrane module, recovering latent heat from permeate, enhancement of thermal efficiency, coupling with solar energy collectors and photovoltaics, etc., which will be promising to promote the scale-up procedure of AGMD and its industrialization in the coming future.

**Key words:** air-gap membrane distillation; membrane material; membrane module; solar energy; computer simulation

膜蒸馏(MD)是一种将热力学过程(蒸馏)与膜分离过程相结合的新型分离技术,被广泛应用于海水、苦咸水以及工业废水等的淡化、脱盐及浓缩过程。膜蒸馏技术利用微孔疏水膜将2种溶液分隔开来。根据 Antoine's 方程,温度不同的2种溶液中的易挥发组分会在膜两侧产生蒸气分压差,该蒸气分压差作为膜蒸馏过程的驱动力,可使得温度较高侧的原料液中的易挥发组分以气体分子形式穿过疏水膜;而与此同时,液体、不溶物和离子等则被完全截留在原料液侧,从而达到浓缩原料液和分离易挥发组分的目的。基于此特性,膜蒸馏的理论脱盐率可达100%,产水水质优良。另外,膜蒸馏过程不受渗透压的限制,因此对原料液的浓缩倍数高,水回收率可超过反渗透等技术。由于不需要将原料液加热至沸点,膜蒸馏的能耗相比普通蒸馏低很多,并且可利用太阳能、地热或工业废热等热源加热原料液,使其

能耗进一步下降。膜蒸馏技术发展至今,主要有4种形式,包括直接接触膜蒸馏(DCMD)、吹扫气膜蒸馏(SGMD)、真空膜蒸馏(VMD)和气隙式膜蒸馏(AGMD)。气隙式膜蒸馏其特征在于:分离膜与冷壁之间存在一层不流动的空气。高温侧的易挥发组分气体分子首先穿过疏水膜,而后继续经过该空气层,最终来到冷壁表面放热液化后被收集。基于该特殊结构,气隙式膜蒸馏具有2个独特优势:①气隙层的存在可以显著减少由于热传导造成的热量损失并且能够削弱温度极化效应,提高膜蒸馏过程的热效率;②膜组件的形态变得多样化,技术适应性强,限制少,操作灵活简便。由此,本文中回顾了近年来气隙式膜蒸馏技术中膜材料、膜组件、使用太阳能及计算机模拟技术的最新研究情况,并列出了气隙式膜蒸馏在不同领域的应用现状,对气隙式膜蒸馏今后的发展方向进行了展望。

收稿日期:2016-08-01

基金项目:中石化项目(15-14ZS0409)

作者简介:郭智(1985-),男,博士,工程师,研究方向为膜分离技术和污水深度处理回用,010-59202244, guoz. bjhy@ sinopec. com; 栾金义(1963-),男,教授级高级工程师,研究方向为水污染防治及污水资源综合利用,通讯联系人, luanjy. bjhy@ sinopec. com。

## 1 膜及膜材料

不同形式的膜蒸馏使用的膜材料大体相同,主要包括聚丙烯(PP)、聚偏氟乙烯(PVDF)和聚四氟乙烯(PTFE)<sup>[1]</sup>。除此之外,也有一些使用聚乙烯(PE)作为膜材料的膜蒸馏实验被报道<sup>[2]</sup>。膜蒸馏过程使用的分离膜一般应具备高疏水性、高孔隙率、较好的化学及热力学稳定性等特点。膜材料的最新研究进展主要来自以下几个方面:①对膜表面进行改性,使其疏水性增加,减少发生膜污染/结垢的概率和增长膜的使用寿命。Warsinger等<sup>[3]</sup>通过引发式化学气相沉积法在PVDF膜表面覆盖一层1H,1H,2H,2H-全氟癸基丙烯酸酯(PFDA),使得膜的接触角增大至157°。②制备混合基质膜。利用聚合物作为连续介质,在制膜过程中掺入无机颗粒,比如二氧化钛纳米颗粒<sup>[4]</sup>、碳纳米管<sup>[5]</sup>、碳酸钙纳米颗粒<sup>[6]</sup>等,可改变膜的内部结构,促进水蒸汽分子在膜内部的迁移,同时也可以增加膜表面的粗糙度,提高膜的疏水性。③使用新的膜制备方法。利用电纺丝法制备纳米纤维膜,并将其用于气隙式膜蒸馏过程于2008年首次被尝试<sup>[7]</sup>。得到的纳米纤维膜在经过近1个月的膜蒸馏实验后,仍能保持较高的脱盐率和稳定的膜通量,显示出电纺丝法在膜制备过程中较好的应用前景。

## 2 气隙式膜蒸馏组件

常见的气隙式膜蒸馏组件有平板式、中空纤维式和卷式,对于气隙式膜组件的改进都基于这3种膜组件的变化。由内蒙古工业大学和清华大学共同组成的科研团队设计了一种高通量的气隙式膜组件<sup>[8]</sup>。该组件采用3个互成120°的入流管将热料液以切向喷射冲刷膜表面,可以削弱温度和浓差极化现象,提高传热及传质效率,并且膜表面由于热料液冲击发生弯曲与冷壁部分接触。实验表明,当膜面接触率为75%~80%时,膜蒸馏通量可达到最大,较传统的气隙式膜蒸馏高4倍以上。杨晓宏等<sup>[9]</sup>自制了一种具有旋流结构分水盘的多层层叠式气隙膜组件,该组件由1个热腔体和2个冷腔体构成,以冷、热、冷顺序交替叠加放置。冷壁是气隙式膜蒸馏组件的重要组成部分,将直接影响膜蒸馏过程中膜通量的大小。Lawal等<sup>[10]</sup>设计了一种可同时为2股热原料液提供共用冷壁的气隙式膜组件,在减少制作成本和降低整体能耗的基础上,该组件的膜通量可以达到常规组件的2倍左右。来自马来西亚

的研究团队制作出的膜组件,其冷壁表面具有平行流道,该组件的最大产水量比普通组件高出50%<sup>[11]</sup>。Aryapratama等<sup>[12]</sup>则使用中空不锈钢管作为气隙式膜组件的冷壁,得到的产水量为12.5 kg/(m<sup>2</sup>·h),并将热效率( $\eta$ )提升至81.7%。气隙层的存在使得气隙式膜组件中的热损失被有效降低,但传质阻力却相应增大,导致该类型组件的膜通量相对较低。Francis等<sup>[13]</sup>设计的新型膜组件使用不同的材料,例如海绵、沙子等,对气隙进行填充,可有效减小气隙的存在对传质造成的不利影响,显著提升膜通量。传统膜蒸馏由于未对相变过程中释放的热量进行有效利用,使得这些热量白白流失,膜蒸馏过程热效率较低。针对该问题,科研人员提出多效膜蒸馏的概念,即在气隙式膜组件中加入热量回收系统,用水蒸汽冷凝释放的热量加热原料液,从而减少因使用外部换热器加热原料液所消耗的能量(图1)。Singh等<sup>[14]</sup>将微孔疏水中空纤维膜与实壁中空纤维膜组装在一个“

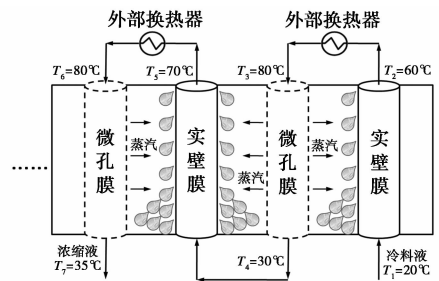


图1 多效膜蒸馏示意图

## 3 太阳能气隙式膜蒸馏系统

太阳能是一种取之不尽且获取方便的绿色能源。我国大部分地区属于3类及3类以上日照区(太阳能可利用地区),每年的日照时间可在2000h以上。因此,结合太阳能与膜蒸馏过程,使用太阳能集热装置代替传统的电加热方式,将膜蒸馏过程的原料液加热至所需温度,可大大降低能耗和减少运行费用。太阳能气隙式膜蒸馏系统的2个核心组成部分为膜组件和集热系统。集热系统基于光能-热能转换原理,通过吸收集热器从阳光获取的热量而

使冷水得以加热。周玲<sup>[16]</sup>对 5 种常见的太阳能集热器的性能进行了比较,指出玻璃金属结构管式真空管型太阳能加热器适合在膜蒸馏系统中使用。太阳能膜蒸馏系统被分为 2 种,一种为直接加热型,即原料液直接进入集热器被加热;另外一种为间接加热型,也就是太阳能集热器先加热水箱内的流体工质,之后原料液再和流体工质在换热器内进行换热。来自麻省理工学院的 Lienhard 的研究团队创新性地设计出一种太阳能气隙膜蒸馏系统<sup>[17]</sup>,在膜组件内的疏水微孔膜表面附上一层可吸收太阳能的亲水涂层。结果表明,该系统较传统的太阳能气隙膜蒸馏具有更高的产水量。太阳能膜蒸馏系统中的辅助设备,比如各种泵、电子仪表等都需要电来驱动,因此运行过程中辅助设备也会产生相应的能耗。而在太阳能膜蒸馏系统中添加太阳能光伏发电模块(PV)<sup>[18]</sup>,可以使用光伏模块产生的直流电经转换器转换为交流电后驱动膜蒸馏系统的运行(图 2),多余的电能还可以储存在蓄电池中,用于对原料液进行辅助加热。这种复合系统对进一步降低膜蒸馏的产水及运行成本具有重要意义。李卜义等<sup>[19]</sup>对太阳能气隙膜蒸馏系统的国内外研究情况进行了回顾,指出目前该系统尚处于实验室及小试研究阶段,主要的研究集中在对集热器及膜组件的性能优化,今后的研究方向将会是提高系统的集成度及降低总能耗。Khayet<sup>[20]</sup>和 Saffarini 等<sup>[21]</sup>则系统总结了太阳能膜蒸馏系统的能耗和产水成本是如何计算的,并认为应当建立一种标准方法用于分析和评价膜蒸馏过程的这 2 个重要指标。

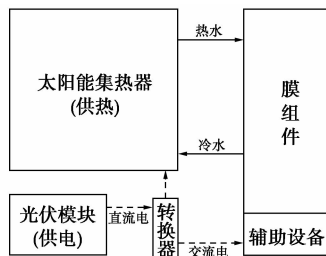


图 2 太阳能气隙式膜蒸馏复合系统示意图

#### 4 计算机模拟技术在气隙式膜蒸馏中的应用

计算机模拟技术在膜蒸馏过程中的使用正变得越来越普遍。通过计算机模拟结果与实验结果进行对比,可以考察模型的准确性。如果模拟结果与实验结果符合,那么该模型就可用于相似系统的性能预测工作,从而减少实验次数及时间。此外,计算机

模拟技术还可以对难以通过实验测定的参数进行模拟,并将结果图形化,对于深入理解实验过程及机理有很大帮助。Chang 等<sup>[22]</sup>在 2009 年使用 Aspen Plus 为气隙式膜蒸馏过程建立了模型,并使用该模型对放大后的膜组件进行了模拟和研究。Khayet 等<sup>[23]</sup>利用人工神经网络(ANN)模型预测在不同操作参数下,气隙膜蒸馏过程的产水量和脱盐率。得到的预测结果与实验结果高度符合,相关系数为 0.992。来自墨西哥的研究团队使用一维传热及传质模型研究和模拟了气隙式膜蒸馏组件的内部温度分布情况<sup>[24]</sup>,由模型预测的温度与实际测量的温度误差在 5% 左右。He 等<sup>[25]</sup>则通过响应面法(RSM)得到的回归模型研究了操作参数对气隙式膜蒸馏的产水量和造水比的影响。在经过该方法优化得到的操作条件下,最大的产水量和造水比分别为 5.07 L/(m<sup>2</sup>·h)和 8.78。Asghari 等<sup>[26]</sup>为气隙式膜蒸馏建立了传质及传热模型,使用 MATLAB 对模型进行求解。不仅研究了操作条件对膜蒸馏过程产水量的影响,同时也研究了膜的性质,比如膜的孔隙率、厚度、孔径等参数对膜通量的影响。模拟得到的结果与实验结果的平均偏差大约为 6%。计算流体力学技术(CFD)在气隙式膜蒸馏中的运用较少,Xu 等<sup>[27]</sup>对气隙式膜蒸馏过程的传热及传质行为进行了 CFD 模拟,得到的结果显示增大原料液的湍动程度,可以有效减少温度极化现象并提高产水量。该模拟结论与大多数通过实验得到的结论相符。

#### 5 应用领域

气隙式膜蒸馏技术在海水脱盐浓缩过程中的应用较多,基于该过程的大部分小试实验使用的原料液为模拟标准海水的氯化钠溶液。秦英杰等<sup>[28]</sup>使用自制的具有内部热量回收功能的多效气隙式膜组件浓缩不同浓度的氯化钠溶液,造水比可以达到 12.5。目前,已有海水/工业废水脱盐膜蒸馏中试示范装置建成并运行。德国的 Fraunhofer ISE 是较早开展利用太阳能气隙膜蒸馏对海水进行脱盐研究的机构,他们设计并制作了膜面积为 5 ~ 14 m<sup>2</sup> 的卷式气隙膜组件,当造水比达到 4.8 时,吨水消耗热能为 130 kWh<sup>[29]</sup>。除此之外,其他国外研究机构或公司也设计了一些用于海水淡化的气隙膜蒸馏系统,比如 Memstill、Scarab、Memsys 等。Duong 等<sup>[30]</sup>使用卷式气隙膜蒸馏组件结合超滤和反渗透技术对煤层气开采废水进行处理。在该研究中,一套膜面积为 7.2 m<sup>2</sup> 的中试膜蒸馏设备用于处理经反渗透技术

预处理后产生的浓水,其水回收率可以达到80%以上。从整体上看,反渗透结合膜蒸馏技术可高效处理煤层气开采废水,总的水回收率为95%。经过理论计算,如果利用太阳能集热器作为膜蒸馏过程的热源提供足够的热量,该处理工艺每天可处理472 t煤层气开采废水。除海水淡化脱盐浓缩,气隙式膜蒸馏也被用于其他研究领域,比如浓缩回收废水中的有机物、浓缩硫酸和磷酸水溶液、分离尿素水溶液、食品以及精细化工等领域的分离浓缩过程。

## 6 结论与建议

气隙式膜蒸馏由于其特殊结构,即气隙层的存在,有效减少了由于热传导造成的热量损失,过程热效率较高;另一方面,气隙层也会导致传质阻力增大,膜通量较低。该技术目前尚无工业化运行案例,中试阶段示范装置也大部分限于海水的淡化脱盐过程。气隙式膜蒸馏今后的发展可以从以下几个方面开展工作。①设计新型高效的膜蒸馏组件,比如在组件内增加热量回收系统,改进冷壁结构,降低空气隙间距等。②将其他形式的膜蒸馏与气隙式膜蒸馏相结合,如真空-气隙式膜蒸馏。③利用热泵等技术回收产水中的潜热,提升气隙式膜蒸馏过程的热效率。④将太阳能集热器及太阳能光伏发电模块与气隙式膜蒸馏进行有机结合,着力提高系统的集成度和成熟度,增加产水量及降低过程能耗。⑤结合计算机模拟技术对气隙式膜蒸馏的传质与传热过程加深理解,并预测膜蒸馏系统的运行情况,为该系统的进一步放大直至工业化应用提供理论依据和参考。

## 参考文献

[1] Xu J, Singh Y B, Amy G L, *et al.* Effect of operating parameters and membrane characteristics on air gap membrane distillation performance for the treatment of highly saline water[J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 512: 73 - 82.

[2] Li J M, Xu Z K, Liu Z W, *et al.* Micro porous polypropylene and polyethylene hollow fiber membranes. Part 3. Experimental studies on membrane distillation for desalination[J]. *Desalination*, 2003, 155: 153 - 156.

[3] Warsinger D M, Servi A, Belleghem S V, *et al.* Combining air recharging and membrane superhydrophobicity for fouling prevention in membrane distillation[J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 505: 241 - 252.

[4] Hamzah N, Leo C P. Fouling prevention in the membrane distillation of phenolic-rich solution using superhydrophobic PVDF membrane incorporated with TiO<sub>2</sub> nanoparticles[J]. *Separation and Purification Technology*, 2016, 167: 79 - 87.

[5] Bhadra M, Roy S, Mitra S. Flux enhancement in direct contact membrane distillation by implementing carbon nanotube immobilized PTFE membrane[J]. *Separation and Purification Technology*, 2016, 161: 136 - 143.

[6] Song Y, Wang Z, Wang Q, *et al.* Preparation of PVDF/CaCO<sub>3</sub> hybrid hollow fiber membranes for direct contact membrane distillation through TIPS method[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, 133(18): DOI:10.1002/app.43372.

[7] Feng C, Khulbe K C, Matsuura T, *et al.* Production of drinking water from saline water by air-gap membrane distillation using polyvinylidene fluoride nanofiber membrane[J]. *Journal of Membrane Science*, 2008, 311(1/2): 1 - 6.

[8] 田瑞, 李嵩, 杨晓宏, 等. 高通量空气隙膜蒸馏系统的实验研究[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2007, 47(1): 2056 - 2059.

[9] 杨晓宏, 田瑞, 马淑娟, 等. 叠式空气隙膜蒸馏组件膜污染实验研究[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(3): 963 - 968.

[10] Lawal D U, Khalifa A E. Experimental investigation of an air gap membrane distillation unit with double-sided cooling channel[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, 57(24): 11066 - 11080.

[11] Bahar R, Hawlader M N A, Ariff T F. Channeled coolant plate: A new method to enhance freshwater production from an air gap membrane distillation (AGMD) desalination unit[J]. *Desalination*, 2015, 359: 71 - 81.

[12] Aryapratama R, Koo H, Jeong S, *et al.* Performance evaluation of hollow fiber air gap membrane distillation module with multiple cooling channels[J]. *Desalination*, 2016, 385: 58 - 68.

[13] Francis L, Ghaffour N, Alsaadi A A, *et al.* Material gap membrane distillation: A new design for water vapor flux enhancement[J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, 448: 240 - 247.

[14] Singh D, Sirkar K K. Desalination by air gap membrane distillation using a two hollow-fiber-set membrane module[J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, 421/422: 172 - 179.

[15] 王奔, 秦英杰, 王彬, 等. 多效膜蒸馏过程用于海水和浓海水的深度浓缩[J]. *化工进展*, 2013, 32(9): 2233 - 2241.

[16] 周玲. 太阳能膜蒸馏系统中集热器性能试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2009.

[17] Summers E K, Lienhard V J H. Experimental study of thermal performance in air gap membrane distillation systems, including the direct solar heating of membranes[J]. *Desalination*, 2013, 330: 100 - 111.

[18] Qtaishat M R, Banat F. Desalination by solar powered membrane distillation systems[J]. *Desalination*, 2013, 308: 186 - 197.

[19] 李卜义, 王建友, 王济虎, 等. 太阳能空气隙膜蒸馏海水淡化技术研究进展[J]. *水处理技术*, 2015, 41(4): 1 - 6.

[20] Khayet M. Solar desalination by membrane distillation: Dispersion in energy consumption analysis and water production costs (a review)[J]. *Desalination*, 2013, 308: 89 - 101.

[21] Saffarini R B, Summers E K, Arafat H A, *et al.* Economic evaluation of stand-alone solar powered membrane systems[J]. *Desalination*, 2012, 299: 55 - 62.

链状;链与链之间通过桥氧键按对称关系连成面,面与面之间利用二次螺旋轴联结成三维骨架结构,如图1所示。

传统方式制备出来的分子筛材料仍具有原来的骨架结构,而多级孔道 ZSM-5 分子筛只是在普通材料中引入了细小的孔道,并没有改变其晶体结构。它的 BET 表面积和总体积比普通材料都大,如表1所示,与普通 ZSM-5 分子筛的微孔体积基本一致,介孔体积明显增大,孔径分布均匀,约为 10 nm。

表1 多级孔道 ZSM-5 和普通 ZSM-5 分子筛的结构分析

样品	$S_{\text{BET}}/$ ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	$V_{\text{总}}/$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	$V_{\text{微}}/$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	$V_{\text{内}}/$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	中孔大
ZSM-5	381	0.25	0.07	0.18	—
HP-ZSM-5	454	0.45	0.11	0.34	10

注:HP-ZSM-5 指的是多级孔道 ZSM-5 分子筛。

## 2 多级孔道 ZSM-5 分子筛的制备

### 2.1 化学后处理法

#### 2.1.1 碱液处理脱硅改性

研究发现,把制备的材料与适当浓度的碱液混合,会导致部分骨架硅脱除,并且可以引入介孔,使其相对结晶度降低,形成多级孔道沸石分子筛。

Fathi 等<sup>[6]</sup>用不同种类的碱性(NaOH、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{CaCO}_3$ )溶液对 HZSM-5 分子筛进行处理,证明了与碱液作用后确实可以脱除骨架当中的硅。Abello 等<sup>[7]</sup>利用碱性有机溶液处理分子筛,与常规碱液相比,优势有 2 点:①有机碱溶液处理后的 ZSM-5 分子筛经焙烧后直接形成 HP-ZSM-5 分子筛,省去了

碱溶液处理后再利用  $\text{NH}_3\text{NO}_3$  交换离子的步骤;②TPAOH 溶液中硅的溶解速度比 NaOH 慢得多,使脱硅过程高度可控。缺点是有机溶液脱硅的选择性比无机溶液差。

#### 2.1.2 脱铝改性引入介孔

脱铝改性的方法有 2 种:①高温水热处理脱铝;②化学脱铝。主要是为了提高分子筛应用方面的稳定性。化学脱铝的工艺主要有酸处理脱铝、螯合脱铝、无机配位离子(如  $\text{F}^-$ )与铝反应进行骨架脱铝、气-固相反应脱铝。此外,在脱铝改性的同时还可以引入 5~50 nm 的介孔,从而形成多级孔道。

Kumar 等<sup>[8]</sup>用化学脱铝法处理普通的 ZSM-5 分子筛,硅铝比、酸量及比表面积均增加,提高了催化活性。

通过以上方式对多级孔道沸石分子筛进行改性,虽然成本低、过程简单,但只有在特定的条件下它的孔道才会具有较好的连续性,并且形成的介孔大多不均一。经过酸碱处理后,难免会引起分子筛骨架的坍塌以及某些孔结构的破坏,影响其结晶度,从而降低催化活性。因此仍需其他更有效的方法来制备这种复合型孔道分子筛。

### 2.2 模板法

#### 2.2.1 硬模板法

在用硬模板法合成分子筛的过程当中,将预先处理好的前驱溶液与有序多孔介质混合,然后在一定条件下水热晶化,最后利用高温脱去其中的多孔材料,在其空位处形成介孔,便得到多级孔道分子筛。在诸多模板材料当中因炭材料具有廉价易得、孔径大小可调变、孔道彼此连通、大比表面积、碳骨架易除去等优点而被看好<sup>[9]</sup>。

(上接第 19 页)

[22] Chang H, Liu J S, Ho C D, et al. Simulation of membrane distillation modules for desalination by developing user's model on Aspen Plus platform[J]. Desalination, 2009, 249: 380-387.

[23] Khayet M, Cojocar C. Artificial neural network modeling and optimization of desalination by air gap membrane distillation[J]. Separation and Purification Technology, 2012, 86: 171-182.

[24] Dehesa-Carrasco U, Perez-Rabago C A, Arancibia-Bulnes C A. Experimental evaluation and modeling of internal temperatures in an air gap membrane distillation unit[J]. Desalination, 2013, 326(5): 47-54.

[25] He Q, Li P, Geng H, et al. Modeling and optimization of air gap membrane distillation system for desalination[J]. Desalination, 2014, 354: 68-75.

[26] Asghari M, Harandizadeh A, Dehghani M, et al. Persian Gulf desali-

nation using air gap membrane distillation: Numerical simulation and theoretical study[J]. Desalination, 2015, 374: 92-100.

[27] Xu Z, Pan Y, Yu Y. CFD simulation on membrane distillation of NaCl solution[J]. Frontiers of Chemical Engineering in China, 2009, 3: 293-297.

[28] 秦英杰, 刘立强, 何菲, 等. 内部热能回收式多效膜蒸馏用于海水淡化及浓盐水深度浓缩[J]. 膜科学与技术, 2012, 32(2): 52-58.

[29] Winter D, Koschikowski J, Wiegand M. Desalination using membrane distillation: Experimental studies on full scale spiral wound modules[J]. Journal of Membrane Science, 2011, 375(1/2): 104-112.

[30] Duong H C, Chivas A R, Nelemans B, et al. Treatment of RO brine from CSG produced water by spiral-wound air gap membrane distillation-A pilot study[J]. Desalination, 2015, 366: 121-129. ■