

DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2014.01.026

苏艳敏, 郑化安, 付东升, 等. 煤化工反渗透浓水浓缩的研究现状[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(1): 104-109.

煤化工反渗透浓水浓缩的研究现状

苏艳敏^{1,2}, 郑化安^{1,2}, 付东升^{1,2}, 李克伦^{1,2}, 肖荣林^{1,2}, 吕晓丽^{1,2}

(1. 陕西煤业化工技术研究院 新材料技术研究所 陕西 西安 710065;

2. 国家能源煤炭分质清洁转化重点实验室 陕西 西安 710065)

摘要: 反渗透膜技术已逐渐成为煤化工含盐废水处理的首选技术,但是反渗透膜技术的产水率一般只有 75%, 剩余浓水的处理与排放问题日益突出, 处理这部分反渗透浓水对中国煤化工可持续发展和环境保护意义重大。从反渗透浓水浓缩技术、膜蒸馏浓缩反渗透浓水膜材料和制备聚偏氟乙烯膜 3 个方面对煤化工反渗透浓水浓缩进行了综述和展望。介绍了反渗透浓水浓缩技术研究进展, 概述了膜蒸馏用膜材料浓缩反渗透浓水的研究现状, 总结了影响煤化工反渗透浓水浓缩的聚偏氟乙烯膜结构和性能的因素。

关键词: 煤化工; 反渗透浓水; 浓缩; 膜蒸馏; 聚偏氟乙烯膜

中图分类号: X703; TD849

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2014)01-0104-06

Research progress of desalination-concentration of reverse osmosis drained wastewater from coal chemical industry

SU Yanmin^{1,2}, ZHENG Huaan^{1,2}, FU Dongsheng^{1,2}, LI Kelun^{1,2}, XIAO Ronglin^{1,2}, LYU Xiaoli^{1,2}

(1. Research Institute of Advance Materials Technology Shaanxi Coal and

Chemical Technology Institute Co., Ltd. Xi'an 710065, China;

2. State Energy Key Lab of Clean Coal Grading Conversion Xi'an 710065, China)

Abstract: Reverse osmosis membrane technology is the leading treatment technology for brine wastewater from coal chemical industry. However, its recovery rate is usually only 75 percent. The treatment of the concentrated water from the process is significant for the sustainable development of coal chemical industry and environmental protection. Investigate the desalination-concentration of reverse osmosis drained wastewater from concentration technologies, membrane materials and polyvinylidene fluoride (PVDF) membrane preparation. Introduce its research progress and the membrane materials used in the process. Analyse the influencing factors of PVDF membrane.

Key words: coal chemical industry; reverse osmosis drained wastewater; concentration; membrane distillation; polyvinylidene fluoride membrane

0 引 言

近年来煤化工项目密集建设和发展,耗水量和

产生的含盐废水量巨大。中国大多数煤炭资源丰富的地区缺水且无环境容量。因此,含盐废水的处理已成为中国煤化工可持续发展亟待解决的

收稿日期: 2013-11-07 责任编辑: 孙淑君

作者简介: 苏艳敏(1982—),女,河南安阳人,工程师,博士,主要从事煤质分质清洁转化方面的研究工作。E-mail: suyanmin_1982_2001@163.com

问题^[1-2]。

煤化工项目产生的含盐废水主要来源于煤化工企业的循环水排污水、脱盐水处理站反渗透排浓盐水等,总体呈现排放量大、水质变化小、氯离子含量偏高、水质含盐量较稳定且普遍不高等特点^[3]。常见的含盐废水处理技术有离子交换法、电渗析法、反渗透法、蒸馏法等。反渗透法以其能耗低、无污染、适应性强、便于操作、运行费用低,在含盐废水处理方面占据越来越重要的地位,但是反渗透法的产水率一般只有75%,仍会产生约25%的反渗透浓水^[4]。如果反渗透浓水直接排放会对土壤、地表水等产生不利影响。

本文从反渗透浓水浓缩技术、膜蒸馏用膜材料浓缩反渗透浓水和聚偏氟乙烯膜结构和性能的影响因素等方面对煤化工反渗透浓水浓缩进行了研究,寻找处理反渗透浓水的有效途径。

1 反渗透浓水浓缩技术研究概况

目前报道的反渗透浓水浓缩技术主要有高效反渗透技术、正渗透技术、膜蒸馏技术等。

1.1 高效反渗透技术

德巴斯什·穆霍帕德黑于1996年推出高效反渗透技术和设备的专利,目前该技术已成功运用于半导体行业高纯水制造领域。高效反渗透技术的核心工艺原理为:采用离子交换将水中的硬度去除,盐分则靠反渗透去除;同时,反渗透在高pH条件下运行,硅主要以离子形式存在,不会污染反渗透膜并可通过反渗透去除;而水中的有机物在高pH条件下皂化或弱电离,不会造成膜的有机物和生物污染。高效反渗透技术克服了单纯离子交换法和反渗透法的缺点,结合了两者的优点,既节省了大量的酸碱,又可使反渗透的回收率提高至90%以上(最高达95%)。

高效反渗透技术在煤化工含盐废水浓缩方面已实现工业化。内蒙古汇能煤化工16亿 m^3/a 煤制天然气回用水处理及零排放项目是第一个使用高效反渗透技术的项目,原水为循环水站排污水、脱盐水处理站排浓水和污水处理站出水,出水回用补入循环水系统,处理水量500 m^3/h ,盐截留率不低于90%,回收率不低于82%。中煤图克化肥废水回用和零液体排放项目使用高效反渗透系统来浓缩反渗透浓水。

高效反渗透技术成熟,回收率较传统反渗透技

术提高了20%,可将反渗透浓水含盐量浓缩到80 g/L ,但高效反渗透装置对进水COD指标有要求,而含盐废水经过浓缩COD指标会提高,超负荷运行会对膜寿命产生一定影响^[5]。

1.2 正渗透技术

正渗透技术是将浓盐水和驱动液分隔于正渗透膜两侧,依靠浓盐水的渗透压低于驱动液,水在渗透压作用下从低渗透压的浓盐水侧扩散至高渗透压的驱动液,实现浓盐水浓缩的技术^[6]。正渗透法浓缩浓盐水不需要外加驱动力,仅靠渗透压为驱动力完成膜的分离过程,无需能耗。自20世纪90年代,Osmotek公司开发出第一种商业化的正渗透膜以来,该正渗透膜已被广泛应用于相关领域的研究中,并且正渗透技术已成功应用于军事、娱乐和紧急救援领域。

在20世纪六七十年代就有人提出将正渗透技术应用于海水淡化方面的想法,近年来美国耶鲁大学的Elimelech课题组发明了一种利用正渗透进行海水脱盐的技术^[7],在小试装置上以6 mol/L 铵盐为驱动液让海水(约含0.5 mol/L NaCl溶液)通过HTI公司商业化的正渗透膜,50 $^{\circ}C$ 条件下产水通量高达25 $kg/(m^2 \cdot h)$,盐截留率高达95%。稀释后的驱动液,只需加热到60 $^{\circ}C$,驱动液中的铵盐就被分解为 NH_3 和 CO_2 ,而分离出去的 NH_3 和 CO_2 还可以循环使用。通过软件模拟发现,当稀释的驱动溶液浓度为1.5 mol/L 时,整个正渗透过程电能耗为0.25 kWh/m^3 ,低于目前脱盐技术的电能消耗,采用正渗透技术海水淡化比多级闪蒸节省能量85%,比反渗透技术节省能量72%^[8]。目前该技术已经进入中试阶段^[9]。

近年来已有正渗透技术浓缩反渗透浓盐水的研究报道,理想的正渗透浓缩过程目标是实现液体零排放,这对于煤化工企业实现废水零排放尤为重要。Tang W等^[10]研究了正渗透法浓缩浓盐水,以5 mol/L 糖溶液为驱动液让浓盐水(约含0.5 mol/L NaCl溶液)经过正渗透膜,50 $^{\circ}C$ 条件下产水通量可达8.21 $kg/(m^2 \cdot h)$,盐截留率大于99%,经过18h运行后,回收率约76%。Martinetti等^[11]采用正渗透技术浓缩反渗透浓水,以50 g/L NaCl溶液为驱动液让浓盐水A(TDS为7.5 g/L)和浓盐水B(TDS为17.5 g/L)经过正渗透膜,在40 $^{\circ}C$ 条件下浓盐水A产水通量可达12 $kg/(m^2 \cdot h)$,盐截留率大于99%,回收率大于80%;浓盐水B产水通量可达

9 kg/(m²·h) 盐截留率大于 99% ,回收率约 62%。

1.3 膜蒸馏技术

膜蒸馏技术是以疏水微孔膜两侧蒸气压差为传质驱动力的膜技术和蒸发过程相结合的新型膜分离技术^[12]。膜蒸馏技术设备简单、操作方便、可利用太阳能或余热等降低成本,已成功用于苦咸水淡化领域。根据下游侧挥发组分蒸汽冷凝方法或排除方法不同,膜蒸馏过程可分为:直接接触式膜蒸馏、空气隙式膜蒸馏、真空膜蒸馏、气体吹扫式膜蒸馏。

20 世纪 60 年代 美国的 Findly 和欧洲的 Haute、Henderyckx 最早提出膜蒸馏时主要用于海水淡化。吕晓龙等^[13-14]将海水(3.5% NaCl 水溶液)通过 3 种膜蒸馏装置,真空膜蒸馏过程的产水通量最大,在进料温度 50 °C、真空侧压力 0.09 MPa 条件下达到 21.8 kg/(m²·h),直接接触膜蒸馏次之,气扫式膜蒸馏最小;真空膜蒸馏过程、直接接触膜蒸馏过程和气扫式膜蒸馏过程脱盐率都大于 99%。曾辉等^[15]将海水(3.5% NaCl 水溶液)通过真空膜蒸馏装置,进料温度和真空度是影响系统性能的主要因素,进料流量和质量分数的影响较小。

近年来,膜蒸馏技术成为反渗透浓水的首选浓缩技术。王军等^[16]在内蒙古达拉特旗火电厂完成了膜蒸馏浓缩火电厂反渗透浓水的中试研究,当反渗透浓水浓缩倍数为 10 倍、连续 180 h 后,产水通量始终在 8 kg/(m²·h),出水电导率稳定在 3 μS/cm。膜蒸馏技术浓缩反渗透浓水不仅具有技术可行性和可操作性,而且大幅度提高了系统的产水率。孙项城等^[17]采用直接接触膜蒸馏装置浓缩某石化企业反渗透浓水,在进料温度约 50 °C 的条件下,浓缩 3 倍时,产水通量约为 15.6 kg/(m²·h);浓缩 4 倍时,产水通量约为 14.4 kg/(m²·h),出水电导率在 5 μS/cm 以下。安晓婵^[18]采用真空膜蒸馏浓缩反渗透浓水,在进料温度约 65 °C、真空侧压力 0.085 MPa 的条件下,产水通量达 17.86 kg/(m²·h),盐截留率达 99%,出水电导率小于 20 μS/cm。同其它操作方式相比,真空膜蒸馏过程容易获得较大的膜两侧蒸汽分压差,气体传质阻力小,产水通量较大,是常采用的操作方式。

1.4 常用的反渗透浓水浓缩技术比较

高效反渗透技术处理反渗透浓水技术成熟,既节省了大量的酸碱,又可将反渗透浓水的回收率提高至 90% 以上,高效反渗透技术在煤化工含盐废水

处理方面也实现工业化;但该技术可处理的盐水浓度受反渗透膜可承受的压力限制。正渗透膜技术是有前景的反渗透浓水浓缩方法,还需要在正渗透膜材料和驱动液两方面进一步研究,该技术距离实际应用尚有距离。与前两种技术相比,膜蒸馏技术可利用低品质热源、截留率高、水回收率高、膜通量大、占地面积小、对环境污染小、技术成熟,并已成功应用于苦咸水脱盐。如果能开发出更大产水通量、分离性能的膜材料,将能提高膜蒸馏技术在浓缩反渗透浓水应用中的竞争力。

2 膜材料研究现状及浓缩反渗透浓水可行性

膜蒸馏技术的核心是膜材料,膜材料的产水通量和脱盐率决定膜蒸馏处理反渗透浓水的难易程度和经济效益。目前报道用于膜蒸馏分离用膜材料主要为聚四氟乙烯膜、聚偏氟乙烯膜、聚丙烯膜。

2.1 聚四氟乙烯膜

聚四氟乙烯膜的表面张力为(25~33)×10⁻³ N/m,疏水性最好,具有良好的抗氧化性和化学稳定性,所应用的物系非常广泛。制取聚四氟乙烯膜可采用烧结法及拉伸法,中空纤维膜的制作尤为困难。

唐娜等^[19]对聚四氟乙烯膜真空膜蒸馏浓缩反渗透海水浓盐水进行研究,说明温度是影响海水淡化浓盐水膜蒸馏过程的关键因素,对产水通量影响较大。在进料温度 67 °C、真空侧压力 0.002 MPa 条件下,产水通量为 24.8 kg/(m²·h),盐截留率大于 98%。李玖明等^[20]对聚四氟乙烯膜真空膜蒸馏浓缩垃圾渗沥液反渗透浓水进行研究,在进料温度 75 °C、真空侧压力 0.095 MPa 条件下,膜蒸馏通量为 7.05 kg/(m²·h),出水电导率≤60 μS/cm。涂正环等^[21]考察了聚四氟乙烯膜孔径对真空膜蒸馏浓缩咸水产水通量的影响,说明产水通量随孔径的增大而增加。

利用聚四氟乙烯膜膜蒸馏进行浓盐水浓缩的研究较少,其研制的关键技术是如何增大膜的孔隙率及平均孔径,从而改善产水质量,增大膜通量。同时经济因素对聚四氟乙烯膜的推广也有一些的影响,应改善制膜工艺,降低成本,增加聚四氟乙烯膜材料的应用市场,达到工业化量产。

2.2 聚偏氟乙烯膜

聚偏氟乙烯膜的表面张力为(23~34)×10⁻³ N/m,疏水性较好,抗氧化性和化学稳定性仅次于聚四

氟乙烯膜;聚偏氟乙烯在常温下可溶于多种溶剂,较聚四氟乙烯膜容易制备,目前多采用溶剂致相转化法。聚偏氟乙烯膜是理想的膜蒸馏材料,近几年来对膜蒸馏材料的报道多集中于聚偏氟乙烯膜。

武春瑞等^[13 22-23]对聚偏氟乙烯膜真空膜蒸馏浓缩石化企业反渗透浓水进行了研究,进液流速对膜性能无明显影响;进料温度和真空度的提高都会使膜的产水通量明显上升,而产水电导保持稳定。在进料温度 70 °C、真空侧压力 0.095 MPa 的条件下,产水通量 25.83 kg/(m²·h),将反渗透浓水浓缩至 20 倍时,产水通量降至 11.8 kg/(m²·h),盐截留率大于 99%,出水电导率小于 4 μS/cm。安晓婵^[18]对聚偏氟乙烯膜真空膜蒸馏处理反渗透浓水进行研究,在进料温度 65 °C、真空侧压力 0.085 MPa 条件下,产水通量可达 17.86 kg/(m²·h),盐截留率大于 99%,出水电导率 ≤ 16 μS/cm。唐娜等^[19]对聚偏氟乙烯膜真空膜蒸馏浓缩反渗透海水浓盐水进行研究,在进料温度为 73 °C、真空侧压力为 0.002 MPa 条件下,产水通量为 13.3 kg/(m²·h),盐截留率大于 98%。

2.3 聚丙烯膜

聚丙烯膜的表面张力为 40×10^{-3} N/m,疏水性较聚四氟乙烯膜和聚偏氟乙烯膜差,抗氧化性和化学稳定性相对较差,但由于价格低廉,市场应用广泛。由于聚丙烯在常温下不溶于任何溶剂,故制取聚丙烯膜通常采用熔融纺丝-冷却拉伸法和热致相分离法。

朱宝库等^[24]对聚丙烯微孔膜真空膜蒸馏浓缩 0.51 mol/L NaCl 水溶液进行研究,在 40 ~ 65 °C 盐水温度范围内,2 个膜组件的脱盐效率接近 100%;产水通量随温度的升高而增大,与膜两侧的蒸汽压差成线性关系。王车礼等^[25]考察了真空度、进料温度、料液流速以及料液浓度对聚丙烯膜真空膜蒸馏浓缩 NaCl 水溶液产水通量与盐截留率的影响,产水通量随真空度增加呈线性增大,其受进料温度影响显著,随料液浓度的增加而减小;对 NaCl 的截留率接近 100%。张建芳等^[26]也考察了真空度、进料温度、料液流速以及料液浓度对聚丙烯膜真空膜蒸馏浓缩 NaCl 水溶液产水通量与盐截留率的影响,随着真空度、料液流量及进料温度的提高,产水通量有增加的趋势,当料液质量浓度在 10 g/L 以上时,产水通量有下降趋势;但出水电导率不受各因素

变化影响,通常在 4 μS/cm,盐截留率在 99% 以上。王宏涛^[27]在进料温度 85 °C、真空侧压力 0.04 MPa 条件下,将渤海深层海水通过自制的 1 m³/d 放大聚丙烯膜真空膜蒸馏装置,产水通量达 38 kg/(m²·h),盐截留率达 99%,回收率达到 75%。陈利等^[28]考察了真空度、进料温度、料液流速以及料液浓度对聚丙烯膜真空膜蒸馏处理反渗透海水淡化浓盐水产水通量和盐截留率的影响,真空度增大,产水通量和盐截留率呈增长趋势;进料温度升高,产水通量增加,盐截留率呈减少趋势;料液流速增加会使产水通量增加,盐截留率呈减少趋势,但影响相对不大。随着料液浓度的增加,膜的产水通量下降,盐截留率基本保持不变,最大盐截留率大于 99%。

3 聚偏氟乙烯膜的制备

目前,亲水微孔聚偏氟乙烯膜已成功应用于化工、医药等工业领域,疏水微孔聚偏氟乙烯膜在膜蒸馏等领域也已显示出广阔的应用前景。已有疏水微孔聚偏氟乙烯膜浓缩反渗透浓水的研究报告,针对反渗透浓水开发新型疏水微孔聚偏氟乙烯膜的相关研究也陆续报道。膜蒸馏是反渗透浓水中水在聚偏氟乙烯膜两侧的蒸汽压差的推动下实现传质分离的膜过程,所使用的聚偏氟乙烯膜应满足疏水性和多孔性 2 个要求,以保证水不会渗入到微孔内,并使膜具有较高的产水通量。膜的孔隙率在 60%~80%,孔径在 0.1~0.5 μm 最佳。

制备疏水微孔聚偏氟乙烯膜的常用方法为相转化法,其又可以分为溶剂蒸发相转化法、热诱导相转化法、气相沉淀相转化法和浸没沉淀相转化法。目前大部分聚偏氟乙烯膜采用浸没沉淀相转化法制备,即将聚合物溶液刮涂在适当的支撑体上,然后浸入含有非溶剂的凝固浴中,由于溶剂和非溶剂的交换导致聚合物固化成膜。

徐丽^[29]考察了聚偏氟乙烯铸膜液浓度、添加剂含量、凝固浴组成和温度对聚偏氟乙烯膜结构与产水通量的影响。结果表明,随着聚偏氟乙烯铸膜液浓度、添加剂 CaCl₂ 含量和凝固浴中溶剂 N,N-二甲基乙酰胺含量的增加,所形成膜表面更为致密,亚层由指状孔结构过渡为海绵状结构;当铸膜液中非溶剂 H₂O 的含量和凝固浴温度增加时,形成亚层为指状大孔的多孔膜;当铸膜液中聚偏氟乙烯浓度为 10.0%,CaCl₂ 为 3.0%,H₂O 含量为 3.0% 时,纯水凝固浴温度为 50 °C 的条件下,所制得膜的孔隙率

约为 86%；在 NaCl 溶液浓度为 3.5%、进料温度为 50℃、真空侧压力 0.03 MPa 的条件下，产水通量约为 2.4 kg/(m²·h)。

王许云^[30]考察了溶剂、聚偏氟乙烯分子量、铸膜液制备时的溶解温度和熟化时间、添加剂种类、用量及凝胶浴温度对聚偏氟乙烯膜结构和性能的影响。研究表明，N,N-二甲基乙酰胺作为制备膜蒸馏用聚偏氟乙烯膜的溶剂最佳；在所考察的 5 种分子量的聚偏氟乙烯中，分子量为 431000 的聚偏氟乙烯更适于制备膜；铸膜液宜采用较低的溶解温度(50~70℃)；铸膜液的熟化时间对膜内部的微孔结构亦具有显著影响，适当的熟化时间(6 d 左右)有利于制备连通性较好、产水通量较高的膜；采用甘油(2%)与水(3%)混合添加剂制得的膜产水通量及盐截留率均有较大提高。

安晓婵^[18]考察了聚偏氟乙烯铸膜液浓度、添加剂浓度、凝固浴组成和温度对膜结构与膜蒸馏性能影响。研究表明：随着聚偏氟乙烯铸膜液浓度、添加剂氯化锂(LiCl)含量和凝固浴中溶剂 N,N-二甲基乙酰胺含量的增加，所形成膜的表面更为致密；当铸膜液中非溶剂 H₂O 的含量和凝固浴温度增加时，形成表层为指状大孔的多孔膜；当铸膜液中聚偏氟乙烯质量分数为 12.0%、LiCl 为 5.0%、H₂O 为 2.0% 时，所制得的膜产水通量较大，在进水温度 55℃、真空侧压力 0.062 MPa 条件下，纯水通量最高可达 19.93 kg/(m²·h)，孔隙率为 30%，结构性能良好。

张琳^[31]研究不同的铸膜液体系发现，铸膜液中不加入任何添加剂时，膜表面容易形成大孔，但海绵层比较致密，产水通量较低；添加丙酮后，膜指状孔密度与尺寸变小，产水通量降低，但膜的皮层较厚，有利于提高膜的盐截留率；以磷酸为添加剂制备的平板疏水膜，其指状孔变短，呈“泪滴状”，平板膜表皮层相对较薄，有利于产水通量的提高；所制备的聚偏氟乙烯膜以 LiCl 为添加剂时，上表面致密且较厚，膜横截面靠近上表皮层处具有小的指状孔结构；磷酸、丙三醇、PEG-400 的加入会使膜横截面出现大孔空腔结构，均是较好的致孔剂。以丙酮和磷酸为混合添加剂制备的平板膜具有较好的产水通量及优异的盐截留率，当进料温度 50℃，料液用 35 g/L 的 NaCl 水溶液进行直接接触式膜蒸馏实验时，产水通量可达 12.45 kg/(m²·h)，盐截留率大于 99%。

目前，膜蒸馏用聚偏氟乙烯膜多处于研究阶段，应在原有基础上，进一步开发出高产水通量和高盐截留率的膜，推动膜蒸馏技术的发展。

4 结 语

含盐废水处理是中国煤化工可持续发展亟待解决的问题，其中反渗透浓水的浓缩是解决该问题的瓶颈。反渗透浓水浓缩技术主要有高效反渗透技术、正渗透技术和膜蒸馏技术，其中膜蒸馏技术浓缩反渗透浓水可利用低品质热源，具有截留率高、水回收率高、技术成熟的特点。膜蒸馏用膜材料主要有聚四氟乙烯膜、聚偏氟乙烯膜和聚丙烯膜，其中采用聚偏氟乙烯膜膜蒸馏浓缩反渗透浓水的研究较多，聚偏氟乙烯膜疏水性较好，抗氧化性和化学稳定性较好，较容易制备，是理想的膜蒸馏材料。聚偏氟乙烯铸膜液浓度、聚偏氟乙烯分子量、溶剂、添加剂及含量、铸膜液制备时的溶解温度和熟化时间、凝固浴组成和温度对聚偏氟乙烯膜结构与膜蒸馏性能都有影响。因此，可以通过调节这些因素来制备具有较高产水通量和盐截留率的聚偏氟乙烯膜。

参考文献：

- [1] 雒建中. 神华煤直接液化示范工程废水处理工艺分析[J]. 洁净煤技术, 2012, 18(1): 82-85, 101.
- [2] 郭森, 董莉, 周学双, 等. 煤化工行业高含盐废水处理探讨[J]. 煤化工, 2011, 39(1): 27-30.
- [3] 栗丽平. 浅谈含盐废水的综合利用[J]. 内蒙古石油化工, 2012, 5: 61-62.
- [4] 黄开东, 李强, 汪炎. 煤化工废水“零排放”技术及工程应用现状分析[J]. 工业用水与废水, 2012, 43(5): 1-6.
- [5] 宋哈楠, 李明, 张磊. 内蒙古自治区高含盐水处理技术现状及发展[J]. 北方环境, 2013, 29(1): 106-110.
- [6] 贾奇博, 韩洪亮, 刘必前, 等. 基于海水淡化的正渗透膜分离技术的发展[J]. 化学通报, 2012, 75(9): 771-780.
- [7] McCutcheon J R, McGinnis R L, Elimelech M. A novel ammonia-carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process[J]. Desalination, 2005, 174(1): 1-11.
- [8] McGinnis R L, Elimelech M. Energy requirements of ammonia carbon dioxide forward osmosis desalination[J]. Desalination, 2007, 207(1-3): 370-382.

- [9] Elimelech M. Yale constructs forward osmosis desalination pilot plant [J]. Membrane Technology, 2007, 2007(1): 7-8.
- [10] Tang W, How Y Ng. Concentration of brine by forward osmosis: Performance and influence of membrane structure [J]. Desalination, 2008, 224(1-3): 143.
- [11] Martinetti C R, Childress A E, Cath T Y. High recovery of concentrated RO brines using forward osmosis and membrane distillation [J]. Journal of Membrane Science, 2009, 331(1-2): 31-39.
- [12] 陈安稳, 时翔云. 膜蒸馏过程的影响因素及其联合集成工艺研究进展 [J]. 工业水处理, 2013, 33(2): 13-15.
- [13] 赵晶, 武春瑞, 吕晓龙. 膜蒸馏海水淡化过程研究: 三种膜蒸馏过程的比较 [J]. 膜科学与技术, 2009, 29(1): 83-89.
- [14] 吕晓龙. 聚偏氟乙烯中空纤维疏水膜及其初步应用 [J]. 化工环保, 2008, 28(5): 377-382.
- [15] 曾辉, 王永青. 减压膜蒸馏海水淡化实验研究 [J]. 化学工程, 2013, 41(5): 19-23.
- [16] 王军, 栾兆坤, 曲丹, 等. 疏水膜蒸馏浓缩技术用于 RO 浓水回用处理的研究 [J]. 中国给水排水, 2007, 23(19): 1-5.
- [17] 孙项城, 王军, 候得印, 等. 膜蒸馏法浓缩反渗透浓水的试验研究 [J]. 中国给水排水, 2011, 27(17): 22-30.
- [18] 安晓婵. PVDF 复合膜制备及其真空膜蒸馏过程研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2012.
- [19] 唐娜, 陈明玉, 袁建军. 海水淡化浓盐水真空膜蒸馏研究 [J]. 膜科学与技术, 2007, 27(6): 93-96.
- [20] 李玖明, 朱海霖, 郭玉海, 等. 真空膜蒸馏处理垃圾渗沥液反渗透浓水的研究 [J]. 水处理技术, 2013, 39(7): 89-95.
- [21] 涂正环, 贺高红, 尹立云, 等. 减压膜蒸馏法咸水淡化的实验研究 [J]. 海湖盐与化工, 2003, 32(5): 10-28.
- [22] 武春瑞, 刘东, 陈华艳, 等. PVDF 疏水中空纤维膜的膜蒸馏含盐废水处理性能研究 [J]. 功能材料, 2008, 39(12): 2018-2012.
- [23] 刘东, 武春瑞, 吕晓龙. 减压膜蒸馏法浓缩反渗透浓水试验研究 [J]. 水处理技术, 2009, 35(5): 60-63.
- [24] 朱宝库, 徐又一, 项慧, 等. 聚丙烯中空纤维微孔膜减压膜蒸馏 [J]. 膜科学与技术, 1999, 19(5): 51-54.
- [25] 王车礼, 王军, 钟璟. 减压膜蒸馏浓缩 NaCl 溶液的实验研究 [J]. 海湖盐与化工, 2002, 32(2): 8-10.
- [26] 张建芳, 李玲. 减压膜蒸馏淡化处理盐水的实验研究 [J]. 精细石油化工进展, 2005, 6(3): 10-12.
- [27] 王宏涛. 真空膜蒸馏海水淡化实验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [28] 陈利, 沈江南, 阮慧敏. 真空膜蒸馏浓缩反渗透浓盐水的工艺研究 [J]. 过滤与分离, 2009, 19(3): 45-45, 21.
- [29] 徐丽. 疏水微孔膜的制备及其在膜蒸馏中的应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [30] 王许云. PVDF 疏水膜制备及膜蒸馏集成技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [31] 张琳. PVDF 平板疏水膜的制备及其应用 [D]. 南昌: 南昌大学, 2012.

(上接第 73 页)

- [12] 吕永康, 庞先勇, 谢克昌, 等. 煤的等离子体转化 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [13] 赵建斌. 煤在直流电弧等离子体中热解过程研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2003.
- [14] 田玉龙. 电弧等离子体裂解甲烷制乙炔的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- [15] 郭伟, 鲍卫仁, 曹青, 等. 等离子体热解煤制乙炔工程化过程中的关键问题 [J]. 煤化工, 2006(5): 25-28.
- [16] Yan B H, Cheng Y, Jin Y, et al. Analysis of particle heating and devolatilization during rapid coal pyrolysis in a thermal plasma reactor [J]. Fuel Processing Technology, 2012(100): 1-10.
- [17] 鲍卫仁. 煤基原料等离子体转化合成的基础研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- [18] 熊新阳, 唐复兴, 周延红, 等. 等离子体裂解煤制乙炔技术的研究进展 [J]. 聚氯乙烯, 2012, 40(6): 13-19.
- [19] 方世东, 孟月东, 舒兴胜, 等. 氢等离子体裂解煤制乙炔的研究进展 [J]. 煤炭燃烧, 2009, 15(5): 60-70.
- [20] Li M D, Fan Y S, Dai B, et al. Study on mechanism of C-H radicals' recombination into Acetylene in the process of coal pyrolysis in hydrogen plasma [J]. Thin Solid Films, 2001, 390(1-2): 170-174.
- [21] 张立鹏, 孟月东, 舒兴胜, 等. 裂解煤制乙炔的热等离子体发生器概述 [J]. 煤炭燃烧, 2009, 15(1): 85-88.
- [22] 吴昌宁, 颜彬航, 章莉, 等. 热等离子体裂解煤一步法制乙炔关键技术及过程经济性分析 [J]. 化工学报, 2010, 61(7): 1636-1644.
- [23] 田原宇, 黄伟, 鲍为仁, 等. 煤等离子体热解制乙炔工艺的工程探讨 [J]. 现代化工, 2002, 22(2): 7-10.
- [24] Shen B X, Wu Y Q, Gao J H, et al. Study on the acetylene making by coal plasma pyrolysis [J]. Coal Conversion, 1994, 17(4): 67-71.