

## 技术进展

# 海水淡化技术集成的研究进展

伍联营, 夏艳, 高从■

(中国海洋大学化学化工学院, 山东 青岛 266100)

**摘要:**分析了海水淡化技术之间的耦合特性, 详细介绍了海水淡化方法自身集成、不同方法间的集成、海水淡化与不同能源的集成、预处理技术与海水淡化的集成以及海水淡化产业链的深度集成的研究进展。指出了海水淡化存在集成度低、缺少理论指导等问题, 建议加强海水淡化集成及优化技术的理论研究。

**关键词:**海水淡化; 反渗透; 多级闪蒸; 多效蒸发; 集成

**中图分类号:** P747; TQ085.42

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2006)12-0013-04

## Advances in integration of seawater desalination technologies

WU Lian-ying, XIA Yan, GAO Cong-jie

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** The coupling characteristics of seawater desalination technologies are analyzed, and the integration of desalination processes is introduced, including desalination methods, the integration between desalination and energy resource, pretreatment and desalination and the desalination among industrial chains. In addition, some problems in desalination integration such as low degree of integration and lack of theoretical guidance are pointed out. It is therefore suggested that the theoretic study of desalination integration and optimum technologies should be strengthened.

**Key words:** desalination; reverse osmosis (RO); multi-stage flash (MSF); multi-effect distillation (MED); integration

海水淡化是解决淡水缺乏的重要途径, 但能耗高是制约其进一步推广应用的瓶颈, 因此, 如何降低淡化水的能耗是一个重要课题<sup>[1]</sup>。解决这一问题的途径主要有 2 方面: 一是开发新的海水淡化工艺, 包括淡化方法、淡化设备和材料等; 二是对现有的淡化技术进行集成与优化, 提高能源的利用效率, 实现海水淡化过程的零排放。考虑到环境友好和可持续发展的要求, 海水淡化技术的集成与优化必将成为越来越有前景的途径<sup>[2-3]</sup>。

## 1 海水淡化技术的耦合性

蒸馏法和膜法是迄今为止海水淡化技术中最主要的 2 种方法<sup>[4-5]</sup>, 其中前者以多级闪蒸 (MSF) 法和多效蒸发 (MED) 法为主, 后者以反渗透 (RO) 法为主。蒸馏法所需要的能量可以通过热能、电能、太阳能、风能等不同的方式来提供, 故其与不同的能源之间存在耦合的可能性。RO 法消耗的能量主要为压力能, 并最终可归结为电能, 因此 RO 法存在与不同发电过程进行耦合的可能性。

蒸馏法与膜法之间也存在耦合的可能性, 主要体现在: ①蒸馏法与膜法的物流、能流存在匹配的可

能性; ②排放的浓盐水可互为进料、共用一套预处理系统和排放系统、二者可与电厂相结合等。

## 2 海水淡化技术的集成

海水淡化技术集成的目的是充分发挥各方法的优势及合理利用能量, 降低成本获取综合效益。其集成大致有 3 种形式: ①海水淡化方法自身及方法间的集成; ②能源与海水淡化技术的集成; ③发电-海水淡化-综合利用的深度集成。

### 2.1 海水淡化方法自身及方法间的集成

海水淡化方法自身的集成如多段多级的反渗透或电渗析, 可以达到提高回收率或提高产水质量的目的。日本 Toray 公司研发的 BCS (brine conversion system) 系统的水回收率可达 60%, 并在西班牙 Mas-Palomas 4 500 t/d 的装置上实现商业化应用。现在世界范围内运行的 BCS 系统共有 12 套<sup>[6-9]</sup>。

海水淡化方法间的集成目前研究最多并应用于实际生产的是 RO 法与 MSF (MED) 法的组合。许多学者对 MSF 法和 RO 法的集成进行了理论研究。Misra 等分析了 RO 法与 MSF 法集成的优点。Cardona 等<sup>[10]</sup>对 MSF 法与 RO 法集成淡化系统的节能

性进行了研究,认为将 RO 法的盐水排放物作为 MSF 法的进水,可以减小预处理单元的规模,并相应降低了对膜组件的要求。Misra 等提出了将 MSF 法排放的盐水作为 RO 的进水的集成策略,将原料海水的固含量(TDS)和温度作为优化设计的变量进行综合考虑,使各物流、能流间实现最佳匹配。May 对 RO 法与 MSF 法集成工艺中影响产品水经济性的决定因素进行了研究。Helal 等<sup>[11-13]</sup>通过对 7 个不同的生产工艺流程进行比较得出:两级 RO 法的水生产费用最低,而 RO 法与 MSF 法的集成可以获得更好的经济性和操作特性。

目前,世界范围内已经建成了一些 RO 法与 MSF 法相结合的海水淡化工程<sup>[3]</sup>,如沙特阿拉伯的 Jeddah 厂在原有的 MSF/发电的双目的厂中建设了海水反渗透(SWRO)一期和二期工程;沙特阿拉伯的 Yanbu 厂对水电联产厂进行了扩建,即将 4 个 4 500 m<sup>3</sup>/d 容量的 MSF 厂与一个 12 800 m<sup>3</sup>/d 容量的 SWRO 厂联合操作;沙特阿拉伯的 Al-Jubail 厂在水电联产厂的基础上建设了一个 9 000 m<sup>3</sup>/d 容量的 SWRO 厂。阿拉伯联合酋长国的 Fujairah 海水淡化厂的设计和建设也是基于的 MSF/SWRO/发电的简单组合概念。

但是,目前的组合型淡化厂都是海水淡化方法间的简单组合,而非完全意义上的集成。MSF 法和

RO 法完全意义上的集成设计应遵循以下思路:充分利用 2 种过程的产品水的混合物及部分的排热段海水作为 RO 法的进料水,将 RO 法的盐水排放与 MSF 法的盐水循环相结合进行设计。

笔者所在本课题组结合黄岛发电厂的蒸馏法和膜法淡化示范工程开展了相关的集成与优化研究,并将其归结为一个混合整数非线性规划问题,采用随机优化算法进行求解;同时在现场对不同预处理技术进行了实验研究,将所得到的结果用于该示范工程的建设之中,取得了明显的效果。

## 2.2 预处理方法与海水淡化技术的集成<sup>[14-18]</sup>

近年来,随着微滤(MF)、超滤(UF)和纳滤(NF)技术的发展,全膜法预处理具有可有效减少化学品添加量、减少 SWRO 淡化过程中膜组件的清洗次数和降低结垢的可能性,操作过程对环境友好,操作成本低等优点。因此,全膜法预处理取代传统预处理将成为一种必然的发展趋势。

沙特阿拉伯的盐水转化公司(Saline Water Conversion Corporation, SWCC)建立的 NF-SWRO 集成海水淡化示范性工程,水回收率达到 70%,且水回收率随操作压力的增大而增大。SWCC 研究人员对 NF-MSF 集成的研究发现:实验过程在不加入任何防垢剂、酸或防泡剂情况下,没有观察到结垢现象,且 MSF 法的最高盐水温度可提高到 120~160℃,产

(上接第 12 页)

## 4 结论与建议

通过以上我国典型生物柴油样品质量测试结果和国外生物柴油标准的对比,可以得到以下结论:我国生物柴油的大部分指标,如闪点、残炭、硫质量分数、灰分、减压蒸馏、密度、十六烷值、酸值、铜片腐蚀、水分和总甘油均已达到欧洲或美国标准。冷滤点、凝点、运动黏度和脂肪酸甲酯的质量测试指标与国外标准相差较远。以上生物柴油指标的差异是由 2 个方面的因素引起的,第一个因素为原料差异,我国生物柴油原料主要为地沟油或高酸值废油,而美国生物柴油原料主要为大豆油,欧洲生物柴油原料主要为菜籽油。第二个因素为工艺过程,我国的生物柴油生产基本采用传统化学法生产,具有规模小,污染严重和质量不易控制的缺点。

因此,发展我国的生物柴油产业急需解决的关键问题是原料的规模化供应,我国虽有较多的地沟油,但数量远不能达到我国对生物柴油的需求。因此,我国需大力发展燃料植物油产业,一方面保证生

物柴油的生产,另一方面相对单一的原料也有利于生物柴油标准的制定。另外,我国的生物柴油生产技术也急需重大的技术创新和改造,以控制产品质量和降低成本。

## 参考文献

- [1] Mittelbach M. Diesel fuel derived from vegetable oils: VI. Specification and quality control of biodiesel[J]. *Bioresource Technology*, 1996, 56(1): 7-11.
- [2] Biofuel Systems Group Ltd. Biodiesel standards[S/OL]. [2006-08-01]. <http://www.biofuelsystems.com/specification.htm>.
- [3] 傅德慧,安华.油品闪点:主要安全指标[J]. *内蒙古质量技术监督*, 2001(6): 37.
- [4] 林柏千.提高燃料油标准中闪点的必要性[J]. *消防科学与技术*, 2004, 23(5): 75-75.
- [5] 豪彦. GB/T 19147—2003《车用柴油》和 EN 590《车用柴油》标准的比较[J]. *汽车与配件*, 2003, 30: 35-36.
- [6] 刘建福,瓦力斯江.浅析如何从检验数据判断轻柴油使用性能的好差[J]. *新疆化工*, 2005, 3: 33-34.
- [7] 李昌珠,蒋丽娟,程树棋,等.生物柴油-绿色能源[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [8] 马林才,夏良耀,盛艳波,等.车用轻柴油性能对柴油机燃烧及碳烟排放的影响[J]. *柴油机*, 2004, 3: 14-17. ■

品的能耗可由 230 kJ/kg 降到 168.7 kJ/kg。另外, NF 法与 SWRO 法和 MSF 法的集成不仅可以提高蒸馏法进料海水的水质,减少结垢的可能性,还可以提高最高操作温度和系统的造水比(蒸汽用量与淡水产量的比值),从而降低淡化水的成本。

### 2.3 能源与海水淡化技术的集成

能源与海水淡化技术集成的目的是合理利用余热(低品位能源)和剩余电力,达到能量合理利用。

#### 2.3.1 海水淡化与火电厂的集成

现代大型火电厂一方面消耗大量淡水,且对水质要求很高;另一方面又具有大量低品质余热能。因此,热电联产海水淡化已成为解决沿海电厂淡水资源短缺的最佳方案。如海湾地区的 Yanbu-Median II 期工程, Jeddah I、II 期工程, Al Khobar III 期工程和位于红海的 Shoaiba II 期工程均采用热电联产、反渗透与多级闪蒸的联合操作方案;阿联酋迪拜的 Jebel Ali 电站(G 座)发电 450 MW,多级闪蒸与反渗透联合造水 28.8 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ;阿布扎比(Abu Dhabi)建设了装机容量为 732 MW 的发电机组及 6 个 5.8 万  $\text{m}^3/\text{d}$  的多级闪蒸海水淡化厂<sup>[3]</sup>。

我国已经建成了多套水电联产的海水淡化装置,如天津大港电厂的多级闪蒸海水淡化装置、山东青岛黄岛发电厂的 3 000  $\text{m}^3/\text{d}$  MED 法海水淡化工程等,电厂的锅炉补水已全部由该淡化装置的产品水所取代。

#### 2.3.2 核能与海水淡化的集成

国际原子能机构(IAEA)将核能淡化定义为:在利用核反应堆作为能量来源的装置中从海水生产淡化水的方法。1973 年,前苏联在舍甫琴科市建成了一座大型核反应堆与 MED 法和 MSF 法装置相结合的多用途核动力联合企业,向全市居民和企业供应电力、热能和淡水。日本先后有近 10 个淡化装置与核反应堆结合,其中 MED、MSF 和 RO 装置均有使用,但规模较小,且没有进入供水管网。印度以 Madras 核电厂压力重水反应堆(PHWR)为基础,建设了与之结合的海水淡化装置,包括一个淡水产量为 4 500  $\text{t}/\text{d}$  的 MSF 装置和一个淡水产量为 1 800  $\text{t}/\text{d}$  的 RO 装置<sup>[19]</sup>。

韩国、埃及、阿根廷等国均有自己的核能海水淡化计划,我国也进行了相关研究。清华大学核能技术设计研究院开发了 10 MW 核供热堆,与高温 MED 淡化工艺耦合,日产淡水 8 000 t。山东省、浙江省以及大连和天津等都计划上核能海水淡化项目。

#### 2.3.3 太阳能与海水淡化的集成

太阳能海水淡化可以分为直接法和间接法 2

类<sup>[20]</sup>,直接法是应用集热装置用太阳能直接加热海水蒸馏制得淡水的方法。世界上第一个大型太阳能海水淡化装置是由瑞典工程师 Wilson 设计、建在智利北部 Salinas 的顶棚式太阳能蒸馏装置,总集热面积 4 700  $\text{m}^2$ ,每天生产淡水 23 t。20 世纪七八十年代,我国在南海岐州岛、西沙以及浙江嵊州等地也建成了日产数吨淡水的太阳能蒸馏器。直接法结构简单,运行维护方便,但产水量低,热效率只能达到 35%~45%。间接法是先把太阳能转化成热能或电能,再提供给淡化装置的方法。将太阳能转化为热能可使用集热器或盐度梯度太阳能池(SGSP)<sup>[21]</sup> 2 种方法,适合于蒸馏法海水淡化。美国得克萨斯州自 1987 年起对 SGSP 与 MSF 和多效多级闪蒸(MEMS)淡化装置结合进行研究。目前,SGSP 装置的浓盐水浓缩与回收系统(BCRS)正在试验中。该研究为实现海水淡化零排放的长远目标提供了有价值的信息。

将太阳能发电技术与 RO 技术等靠电力驱动的淡化装置相结合,是在特定条件下不失为一种可行的选择,20 世纪 80 年代初,以太阳能电池为能源的反渗透海水淡化装置开始在世界上运行,目前这一过程已经商业化<sup>[21]</sup>。

#### 2.3.4 其他能源与海水淡化的集成

除火电厂、核能和太阳能外,海水淡化中的替代型能源还包括风能、地热能、海洋能以及生物质能等。随着能源技术的不断进步,可以将替代型能源与 RO 法等主要依靠电力驱动的淡化工艺耦合起来。例如,西班牙 Gran Canari 地区运用风力发电作为一个 200  $\text{t}/\text{d}$  的苦咸水 RO 淡化厂的能源,产水能耗为 5  $\text{kWh}/\text{m}^3$ ,但替代型能源的不稳定性引起的发电量波动是需要解决的关键问题<sup>[19]</sup>。

### 2.4 发电-海水淡化-综合利用的深度集成

海水淡化与综合利用的深度集成是将海水淡化与制盐及盐化工生产相结合,实现海水淡化与制盐、盐化工生产联产,以达到合理配置资源、优化项目方案的目的。

已有学者对这一问题进行了探索,如阿曼的 Ahmed<sup>[22]</sup>和澳大利亚的 Arakel 提出了水、电、盐联产的集成思路:排放的浓盐水可以发展水产,如养鱼、盐水虾等;利用淡化厂的低品位热源及浓盐水进行太阳能池发电;对盐卤可以进行资源回收,发展制盐和盐化工,可有效地解决海水淡化过程的环境污染问题。

## 3 建议

综上所述,海水淡化技术存在集成度低、缺少进

行集成设计的理论指导等问题。因此,发展海水淡化技术集成应开展以下几个方面工作:

(1) 提出一些改进的方法以达到最优的预处理,开发天然的海水淡化预处理添加剂,减小对环境的污染。

(2) 研究对海水淡化技术进行优化集成的概念和方案,开发组合型的海水淡化系统。

(3) 考虑海水淡化与整个水系统的集成,研究不同消费团体或企业对不同水质的供应和需求曲线;研究海水淡化集成技术对不同层面的影响及国家或区域水系统中的供需关系;提出以淡化水为导向的供水体系的新概念。

(4) 关注降低与浓盐水排放有关的环境问题,发展零排放的概念,进行海水淡化产业链的研究。

### 参考文献

- [1] 林斯清,张维润.海水淡化的现状与未来[J].水处理技术,2000,26(1):7-12.
- [2] 高从■,俞三传,金可勇.集成膜过程[J].中国工程科学,2000,2(7):43-46.
- [3] Hamed O A. Overview of hybrid desalination systems: Current status and future prospects[J]. Desalination, 2005, 186(1/2/3): 207-214.
- [4] El-Dessouky H, Ettouney H. MSF developments may reduce desalination cost[J]. Water and Wastewater International, 2000, 15(6): 20-21.
- [5] 高从■.海水淡化浅谈[J].化工技术经济,2003,21(11):24-26.
- [6] Gründisch A, Schneider B P. Optimising energy consumption in SWRO systems with brine concentrators[J]. Desalination, 2001, 138(1/2/3): 223-229.
- [7] Taniguchi M, Kurihara M, Kimura S. Behavior of a reverse osmosis plant adopting a brine conversion two-stage process and its computer simulation[J]. J Membr Sci, 2001, 183(2): 249-257.
- [8] Kurihara M, Yamamura H, Nakanishi T. High recovery/high pressure membranes for brine conversion SWRO process development and its performance data[J]. Desalination, 1999, 125(1/2/3): 9-15.
- [9] Kurihara M, Yamamura H, Nakanishi T, et al. Operation and reliability of very high-recovery seawater desalination technologies by brine conversion two-stage RO desalination system[J]. Desalination, 2001, 138(1/2/3): 191-199.
- [10] Cardona E, Culotta S, Piacentino A. Energy saving with MSF-RO series desalination plants[J]. Desalination, 2003, 153(1/2/3): 167-171.
- [11] Helal A M, El-Nalshar A M, Al-Katheeri E, et al. Optimal design of hybrid RO/MSF desalination plants: Part I. Modeling and algorithms[J]. Desalination, 2003, 154(1): 43-66.
- [12] Helal A M, El-Nalshar A M, Al-Katheeri E, et al. Optimal design of hybrid RO/MSF desalination plants: Part II. Results and discussion[J]. Desalination, 2004, 160(1): 13-27.
- [13] Helal A M, El-Nalshar A M, Al-Katheeri E, et al. Optimal design of hybrid RO/MSF desalination plants: Part III. Sensitivity analysis[J]. Desalination, 2004, 169(1): 43-60.
- [14] 苏保卫,王志,王世昌.采用纳滤预处理的海水淡化集成技术[J].膜科学与技术,2003,23(6):54-58.
- [15] Hassan A M, Farooque A M, Jamaluddin A T M, et al. A demonstration plant based on the new NF-SWRO process[J]. Desalination, 2000, 131(1/2/3): 157-171.
- [16] Hassan A M, Al-Sofi M A-K, Al-Amoudi A S, et al. A new approach to membrane and thermal seawater desalination processes using nanofiltration membranes[J]. Desalination, 1998, 118(1/2/3): 35-51.
- [17] Al-Sofi M A K. Seawater desalination-SWCC experience and vision[J]. Desalination, 2001, 135(1/2/3): 121-139.
- [18] Al-Sofi M A K, Hassan A M, Hamed O A, et al. Optimization of hybridized seawater desalination process[J]. Desalination, 2000, 131(1/2/3): 147-156.
- [19] Nisan S, Caruso G, Humphries J R, et al. Seawater desalination with nuclear and other energy sources: The EURODESAL project[J]. Nuclear Engineering and Design, 2003, 221(1/2/3): 251-275.
- [20] Trieb F, Nitsch J, Kronshage S, et al. Combined solar power and desalination plants for the Mediterranean region-sustainable energy supply using large-scale solar thermal power plants[J]. Desalination, 2002, 153(1/2/3): 39-46.
- [21] Ludwig H. Hybrid systems in seawater desalination-practical design aspects, present status and development perspectives[J]. Desalination, 2004, 164(1): 1-18.
- [22] Ahmed M, Arakel A, Hoey D, et al. Integrated power, water and salt generation: A discussion paper[J]. Desalination, 2001, 134(1/2/3): 37-45. ■

## 朗盛纺织化学品业务部门将同时被荷兰风险投资公司 Egeria 和 纺织化学品业务部门管理层联合收购

德国领先化工企业朗盛集团日前在其总部勒沃库森宣布将出售其纺织化学品业务。除北美地区以外的所有纺织化学品业务部门的业务将同时被荷兰风险投资公司(Egeria)和纺织化学品业务管理层联合收购。将被出售的业务年销售额约 1.3 亿欧元,在全球拥有 330 名雇员。关于纺织化学品业务部门在北美的各项业务,朗盛集团正在寻求其他出路。朗盛集团于 2006 年 11 月 10 日上午与荷兰风险投资公司(Egeria)签署了该购买协议,售价为 5 400 万欧元。全部收购将于 2006 年年底完成。

在 2006 年 5 月召开的年度股东大会上,朗盛集团已透露将出售该业务的意向,因为该业务不能使朗盛集团在日

益整合的全球纺织化学品市场上获得更好的发展。朗盛集团董事会主席贺德满博士说,“近年来,该业务部门已经成功实现了重组,竞争力和盈利能力不断提高。因此,对于收购者 Egeria 以及经验丰富的纺织化学品业务部门管理层来说,该业务部门拥有良好的发展基础,在纺织化学品行业国际化合并的大背景下,将来定会取得成功”。

Egeria 与纺织化学品管理层将联手接管所有相关的生产设施,包括相关的专利,客户、供应协议、员工及其员工养老保险等事宜。在移交手续完结后,该业务将被重新命名并纳入 Tanatex Chemicals BV 旗下。(杨)