

海水淡化技术与太阳能利用

张耀明, 邹宁宇

(河海大学, 南京 210098)

[摘要] 海水淡化是解决水源危机的根本措施, 但海水淡化绝不能以牺牲能源为代价; 现有的几种海水淡化技术各有优劣, 应配套使用; 河海大学和南京玻纤院等研制的太阳能加热装置, 可以作为海水淡化装置中清洁、无污染的能源。

[关键词] 海水淡化; 太阳能; 定日镜; 能源; 水源

[中图分类号] P747 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)11-0037-05

1 前言

当能源紧缺严重制约我国经济发展, 并引起社会普遍关注之时, 水源危机的黄灯也在我国各地频频闪烁。能源和水源, 都是地球有限资源的主要组成部分, 是左右 21 世纪人类经济发展, 甚至政治局势、战争与和平的重要因素。水源, 对于某些地区和国家意味着生活方式的被迫改变, 对于某些地区和国家代表着生存与死亡。

水源紧缺, 对于我国具有特殊意义。我国人均占有水量处于世界中下水平, 仅为世界平均水平 25%, 而且具有降水量在季节和地域上严重不均的特点。据有关专家估计和有关资料报道, 到本世纪中叶, 我国供水能力的缺口占总供水量的 33%, 成为影响国家发展目标的主要障碍之一^[1-3]。

面对严峻形势, 多种措施建议如远程调水、废水利用、制定政策节约用水、溶化冰川, 等等, 均相应而出。但对于高山、沙漠、丘陵占据大片土地、水量严重不足的中国, 利用现代技术大规模地开辟新水源具有全局意义的主要途径, 无疑当属海水淡化。

对于人类社会而言, 所谓水源危机, 实质是指

淡水危机。地球并不缺水, 有人甚至将“地”球称谓改为水球, 因为从太空望去, 占据地球表面 70% 以上的海洋映射成美丽蔚蓝的色彩。但是, 地球的水, 绝大多数聚集在海洋之中, 溶解携带各种矿物。其中人类能够直接应用的淡水不足 3%, 而这些生命之水中, 河流、湖泊仅占 0.04%, 以冰川、冰山形式存在的占 2.51%, 随着河流湖泊污染严重和气温升高, 导致冰川融入海洋, 淡水资源日益减少。解决水源危机的根本出路, 只能是向占据地球水量 97% 以上的海洋索取淡水。海水淡化是 21 世纪解决水源紧缺的根本措施。

2 海水淡化技术

海水淡化是源远流长的古老技术, 远在 2000 年前我国《山海经》就提及“弊箪淡卤”现象(蒸饭竹席可吸附盐分); 随着西方航海工业技术的兴起, 16 世纪英国女皇就设置了海水淡化的重奖, 19 世纪船只就出现明火直接加热的单效蒸馏装置, 随后又出现多效蒸发。而到 20 世纪中叶, 伴随科技革命的步伐, 蒸馏、冷冻、电渗析和反渗透技术获得很大发展, 海水淡化开始走向实际应用时代。

2.1 海水淡化技术的分类

[收稿日期] 2004-11-03; **修回日期** 2005-01-11

[作者简介] 张耀明(1943-), 男, 江苏无锡市人, 中国工程院院士, 河海大学教授, 博士生导师, 研究方向: 太阳能热发电、非通讯光学纤维、纤维复合材料; 邹宁宇(1947-), 男, 山东蓬莱市人, 河海大学新材料新能源研究开发院高级工程师

海水是一个极其复杂的低品位体系,要将其所含的财富有效而经济地分离或富集,必须依靠高新技术的支持。现有的海水淡化技术原则上适用苦水淡化、咸水淡化、污水回收、硬水软化,世界各国众多科研机构,直接间接涉及这一领域。虽然方法众多,但主要可以分为如下几类^[1,4]。

2.1.1 蒸馏(蒸发)方法 原理出自瓦特以后众所周知的加热—蒸发—冷凝过程。设备包括:多效蒸发(ME)(又分竖管多效蒸发VTE、水平管多效蒸发HTE、高温低温多效蒸发MEI等);闪蒸(flash)(又分低温单级闪蒸SSF、多级闪蒸MSF等);压汽蒸馏(VC)(又分机械压汽蒸馏MVC和热力压汽蒸馏TVC)。

2.1.2 膜化 反渗透(RO)以压力差为推动力的淡化过程(有卷式膜组件、中组纤维组件等);膜蒸馏(MD)以温差为推动力的脱盐过程,纳滤(NF或膜软化MS)以低压差驱动的渗透过程,软化硬水和除盐。

2.1.3 电渗析法 电渗析(ED)以电位差为推动力,利用离子交换膜的选择透过性而脱除水中离子的淡化过程。电去离子(EDI)是一种电渗析和离子交换相结合的方法,在直接电场的作用下,实现电渗析过程,离子交换盐和离子交换连续再生过程。

2.1.4 冷冻法 天然冷冻和人工冷冻方法。

2.2 海水淡化技术前景

1) 以上诸项技术,都在不同程度取得进展,但也在不同程度上存在困难。有些技术虽然单独应用很有成效,但从整体考虑很难在世界范围推广,难使淡化海水成为人类用水的主要来源。究其原因就是能源和水源同属人类生存发展的紧缺资源,当前一些淡化装置采用的都是以能源换取水源的技术路线,对此很有探讨、分析的必要。

2) 现在海水淡化装置中,技术最成熟、运行安全性高、适用范围最广、可以用于大型或超大型装置者,当属MSF和ME,它们已为严重缺水的大海湾诸国推广。但MSF采用的是张羽煮海方法,总与火力电站联合运行,以汽轮机低抽气作为热源。据报道:世界上最大规模的海水淡化装置日产淡水(单机)达 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$,而日产淡水 $9 \times 10^4 \text{ m}^3$ (单机)的装置正在设计中。ME规模较小,一般日产淡水 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。这些装置的能源全靠火力电站提供。在我国山东半岛,也耗用巨资用火电或核

电蒸馏海水(同时火力发电本身也需大量用水,一所大型火力发电站,用水量相当于一座数10万人口的中等城市居民用水),这又加剧能源紧缺,造成新的水质和大气污染。按照大协调学、系统学的观点,这是一种只顾局部,忽视整体协调、平衡的决策。如同当年“农业学大寨”岁月,某地大旱,当地投入大量柴油机抽地下水灌溉,使用一条“用油换水,用水换粮”,挖肉补疮的作法。只是今天规模更大、污染更重。

3) RO是近年发展较快的技术,有的专家总结40年海水淡化工作以后预计,ME技术和RO技术是决定海水淡化的未来。RO技术关键在于反渗透膜电材料(主要为醋酸纤维素和芳香聚酰胺)的开发,反渗透组件和淡化工程的制造。反渗透淡化需要加压,目前最佳值虽已达到 $5.0 \sim 5.5 \text{ MPa}$,这意味着仍需耗用较大能量。同时RO技术对水质有较高要求,海水必须经过各种形式预处理,除去海水中的油污、颗粒、菌藻,使其接近纯净盐水标准。膜材定期清洗,消除堵塞、污染、结垢。这些都是要求很严的复杂工作。据北美地区统计,RO技术现主要用于苦咸水淡化,其生产产量为用于一般海水的300%,根据美国专家的规划,到2010年前后,RO技术的耗能费用仍为MSF技术的3倍以上,所以RO技术的应用亦有局限。

人工冷冻方法正在研究之中,降低同等温度是加热同等温度所需能量的数倍,同时涉及冰块中含盐梯度的切割等障碍。天然冷冻,包括从两极拖运冰山也有巨大技术难题。此外,还有向雪山、冰川表面撒铺大量黑粉,使其吸热融化等设想,实施均需较长时间。

2.3 海水淡化技术与能源

1) 海水淡化工业发展仅半个世纪,综上所述,现有的几种技术都取得一定成功,但并没有取得明显突破。20世纪50年代末期,我国开始海水淡化探索,40余年几经磨难,几经波折,现已发展成一定规模。当前全国从事海水淡化研发技术的单位300多个,具备海水淡化装置技术能力的电渗析技术、反渗透技术、超过滤技术、蒸馏技术均已投入运行,统计表明,国内正在运行的各种淡化设备达5000台。对解决一些舰船和偏远沿海海岛饮水,为巩固国防,改善人民生活,降低生产成本做出了贡献。但是也应该看到,海水淡化的根本目标是解决我国工业、农业和居民生活用水的严重短缺,欲

实现这个目标，海水淡化能力至少应在现有基础上扩大 1 000 倍。而我国现有的还属没有进入良性循环、“贵族技术”的海水淡化工艺，无法承受如此巨大的能源支出。必须在设备、工艺、尤其是使用能源种类等诸多方面进行变革。

2) 海水淡化是一项与能源密切相关的高新技术，关键之处就是降低能耗，走出以能源换水源→加重能源紧缺和环境污染（包括水质污染）→水源更加紧缺的怪圈。海水淡化必须满足两个前提：使用可再生无污染能源；海水淡化、海水化工、制盐等工业综合发展，以利环保、降低成本。

3) 技术发展历史还证明，一项新技术、新工艺取得突破或者实用，往往是在探索过程中将各种技术进行综合，发挥各自长处和整体优势。对于海水淡化工程，L.Awerbuch 已提出 MSF，VC，RO 联用方案，而太阳能海水淡化，更是各国关注的重点。如近期推出的利用太阳能热扩散多效蒸馏，每平方米日照面积产水量可超 30 L。

表 1 列举了蒸馏法、反渗透法和电渗析法的能耗，表中未列出热扩散多效蒸馏消耗的热能。实际上它消耗的热能并不小于其他蒸馏法，只不过认为太阳热供给是免费的。

表 1 生产 1 m³ 淡水的能耗

Table 1 Energy consumption for the production of 1 m³ freshwater

海水淡化方法	能耗
ME, MSF	热能: 221 900~276 300 kJ。电能: 3~4 kW·h
RO	电能: 8~14 kW·h
ED	电能: 8~16 kW·h
热扩散多效 ^①	电能: 1.6k W·h

① 泵、仪表控制用电力都来自太阳能。

热扩散多效蒸馏因利用太阳能热，已显示自身优势。但其靠毛细管输液造水量很少，投资较高，难以在大范围内推广。

3 太阳能热利用的现状和趋势

1) 太阳是地球能量和人类活动的主要源泉。据统计，通过源源不断地辐射，到达地球周围空间的太阳能量为 177×10^{12} kW，其中有 85×10^{12} kW（约占 47%）到达地球表面，保持地球平均为 15℃ 的气温； 40×10^{12} kW（约占 23%）成为海水蓄能，扮演风雨雷电、波浪、海流的动力，这一数字

超过世界平均发电能力的数十万倍。地球亿万生物光合作用所需能量更是相形见绌，仅占太阳能总量的 0.02%，为 4×10^{10} kW。开发没有污染，相对人类活动取之不尽、用之不竭的太阳能，已经是 21 世纪各国的关注焦点。

2) 目前，国内外太阳能利用技术不断提高，主要集中在直接的太阳光采集照明技术、太阳能光伏发电技术和太阳能热利用技术方面。其中，太阳能光伏发电技术发展比较迅猛，直接的太阳光采集照明技术的发展也已经引起广大科技工作者的兴趣，但两者受到价格和性能方面的制约，还难以取得可以与常规能源竞争的地位。

太阳能热利用技术，是可再生能源技术领域商业化程度最高、推广应用最普遍的技术之一，主要指太阳能热水器、太阳能热发电、太阳能空调调温、太阳房等几个方面。其中只有太阳能热水器已经形成了巨大产业，而作为最可能引起能源革命，实现大功率发电、替代常规能源的最经济手段之一的太阳能热利用，在我国的发展远不尽人意。

3) 太阳能热利用有两大难点：将分散到地球表面、具有各种波长（由红外到紫外）、相对较弱（地球表面平均每平方米接受 1.0 kW）的能量相对集中；将集中后的光、热转换为电能或直接利用。通过能接受太阳能热的高温集热器的开发，我国已经具备了解决这个关键设备的一定条件。目前，通过科技人员的坚持不懈与辛勤劳动，在高、中、低温的太阳能选择性吸收涂层及其基材、磁控溅射涂覆、硼硅玻璃真空管封接等领域的研究、开发与应用方面也积累了丰富的经验，建立了相当的基础，经过进一步攻关，设计并研制出高效高温集热器指日可待。这样聚集一定规模的太阳光能、热能装置，就成为提供太阳能作为海水淡化和各类工业能源的关键技术。

为提高聚集太阳能的效率，必须使装置具有随太阳同步运行的功能，其中定日镜应是成功的一种。现在美、西、意、俄、澳等国太阳能热利用的示范工程，有槽式聚焦系统、碟式系统和塔式系统，而使用定日镜的塔式系统，是规模大、热损耗小、聚光比和温度较高的一种，生产成本最低。

20 世纪 80 年代和 90 年代，美国在南加州分别建立起太阳能利用装置 Solar One 和 Solar Two，经过数年考核，已经证明技术方案的正确性。

在北京，中科院电工所对槽式抛物面反射镜太

阳能热发电用的槽型抛物面聚光集热器曾作过不少单元性试验研究,但工艺、材料、部件及相关技术未得到根本性的解决。

塔式太阳能集热装置概念设计原理系统由定日镜聚光装置、高温集热器、蓄热装置组成。其中定日镜聚光装置是关键单元,也是主要投资部分,所以它的方案设计、结构合理性、成本高低对电站至关重要。定日镜聚光装置由平面反射镜、镜架、跟踪机构及控制系统四部分组成,对定日镜的具体性能要求为:镜面反射率高、镜面平整度误差小于 $16'$ 、整体机械结构强度高、运行中能抗8级台风的袭击、运行稳定、可以大批量生产、易于安装、维护少、工作寿命长。

通过最近10年的工作,河海大学和南京玻纤院发明一种可以朝设定方向投射太阳光的平面反射镜定向反射装置,已申请中国及美国等多项专利,部分已获授权。这不仅可以解决千千万万户低收入家庭朝北住房的采光及采暖问题,还创造性地解决了塔式太阳能热发电系统中的关键部件定日镜技术方案不尽合理的难题,有望大幅度降低Solar Two的定日镜价格。

一个面积为 40 m^2 的定日镜,反射率为90%,可使80%能量集中在直径2 m范围内,99%能量集中在直径3 m范围内,而且多个定日镜组合使用,能达到同样效果。用这种定日镜和高温集热器取代直接加热海水,通过ME, MSF, VC等技术使其淡化,能源利用率明显高于使用火力发电或核能发电→电能加热的模式,生产成本降低(不需燃料),定日镜的数目(即获得热量)可按需要设计,同时定日镜和高温集热器原以产生 $300\text{ }^\circ\text{C}\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ 过热蒸汽作为驱动蒸汽轮机发电为目标,而MSF技术要求的蒸汽温度仅 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,与太阳能热直接发电相比,这个方案难度较低,按现有技术应可实施。

太阳能蓄热系统,可提供MSF或ME热源。由于太阳光的强度多变,而MSF, ME连续操作要求稳定的热源,就要把太阳能蓄集起来,连续稳定输出,如日本高见岛和阿联酋的阿布扎比的两套HTE(前者为15效,后者为18效),其性能见表2。

太阳能蓄热可作为多种化工过程的热源,用于提供MSF或ME热源的HTH装置和用于MSF/FBE(硫化床蒸发)等加热装置中的太阳能集热

器,都可以用定日镜系统汇集光能、热能,这较平面热水器型或小型碟式集热器可数十倍、数百倍提高热量和效率,以扩大海水淡化的规模。

表2 两套太阳能多效装置的性能

Table 2 Performance of two sets of multi-effect solar devices

项目	高见岛 (日本)		阿布扎比 (阿联酋)	
	集热水温/ $^\circ\text{C}$	100	82.0	99
第1效蒸发温度/ $^\circ\text{C}$	82	63.6	82	67.5
终效蒸发温度/ $^\circ\text{C}$	40	41.6	42.5	40.8
各效平均温差/ $^\circ\text{C}$	2.8	1.47	2.25	1.48
造水量(年平均)/ $\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$	16.4	120	118	
日照量/ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$		14 721		23 488
年平均气温/ $^\circ\text{C}$		18		27.4
最大造水量/ $\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$		23.3		143
平均造水量/ $\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$		10		117
耗热/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ (水)		223		175
耗电/ $\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$ (水)		14.2		4.8

这些太阳热+MSF海水淡化技术还可与风力发电、潮汐发电等技术匹配,在夜间或多云时间对需淡化的海水进行加热、保温。

河海大学已计划着手将这项新研制的定日镜技术、海水RO淡化技术和该校已经成熟的海岛雨水收集技术进行组合,应用到阳光充足、海水不断的海岛上,解决当地居民和驻军长期缺水的诸多困难。无疑这项双优组合将会在更大范围得以推广。

4 结论

海水淡化是解决水源不足的根本措施,各类海水淡化技术都是通过耗能使水分与各种杂质分离,能源利用是海水淡化能否发展的关键,利用太阳能等清洁能源是海水淡化的方向。聚集能量并使其转化是太阳能利用的难点。能够跟随太阳运行,按照设计需要聚集太阳能的定日镜与现有几种海水淡化技术组合,可取得较理想的效果。

现代资源科学理论认为:优质的自然资源、能源是由“负熵资本储存”组成的。在整个太阳-地球系统中,太阳处于低熵状态,而地球处于高熵状态。利用太阳热淡化海水,就是利用太阳热提供的负熵,使具有一定浓度的海水重新组合(成型、加

工), 排出废料^[5]。

太阳热海水淡化技术, 实质上在一定程度上重复了大自然中太阳加热海水→产生风雨雷电→滋润万物的过程, 是最经济的拯救环境的新生态技术。生态工业文明指向丰裕、清洁、可持续利用能源范围。相信这项技术的推广不仅为 21 世纪人类能源、水源紧缺的解决作出贡献, 也会成为构建中国循环经济、新能源开发和新生产方式的一部分。

参考文献

- [1] 张耀明. 阳光经济和能源革命[J]. 中国建材报, 2004, 7(5)
- [2] 中华人民共和国国家发展计划委员会基础产业发展司. 中国新能源与可再生能源[M]. 1999 年白皮书
- [3] 高从培. 海水淡化简介. 2004 年两院院士会议资料
- [4] 王世昌. 海水淡化工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003
- [5] 封志明. 资源科学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004

Seawater Desalination Technology and Solar Energy Utilization

Zhang Yaoming, Zou Ningyu

(*New Material and New Energy Source R & D Institute, Hehai University, Nanjing 210098, China*)

[**Abstract**] Seawater desalination provides a new approach to settle the water supply crisis, but a large amount of energy has to be cost during the process of desalination. Each of the several existing methods for seawater desalination has its own advantages and disadvantages, so a combination use of these methods is recommended. The solar heating equipment invented by Zhang can be used as a good energy source, which is clean and brings no pollution to the environment, for seawater desalination devices.

[**Key words**] seawater desalination; solar energy; heliostat; energy source; water supply