

太阳能海水淡化系统开发进展

王许云^{1,3} 张林¹ 陈欢林¹ 高从堦^{1,2}

(1 浙江大学材化学院, 杭州, 310027 2 海洋局杭州水处理技术中心 杭州, 310012

3 青岛科技大学化工学院, 青岛, 266042)

摘要: 本文综述了太阳能海水淡化的研究进展, 重点讨论了用于海水淡化的太阳能集热器及蒸发器的发展、太阳能海水淡化和太阳能膜法海水淡化技术开发现状。

关键词: 太阳能; 海水淡化; 集热器; 蒸发器; 膜蒸馏装置

1 海水淡化方法的种类及特点

目前, 世界上海水淡化的方法主要有热法和膜法及二者的集成。其中热法(蒸馏法)包括多级闪蒸(MSF)、多效蒸发(MED)和压汽蒸馏(VC)等; 膜法主要有反渗透(RO)、电渗析(ED)等; 另外, 还有冷冻结冰法、露点蒸发淡化技术等其它方法。

目前用于大规模海水淡化方法主要有RO(膜法)、MSF和MED(热法), 两者在全球产量比分别为49%和50%; 若按工厂数计, 膜法占78.5%, 而热法占21.5%。RO耗能相对较低, 但膜易受污染和结垢的影响, 预处理的要求较高; MSF工艺成熟, 运行可靠, 对原水预处理要求低, 出水品质好等。其缺点是耗电量大, 成本高; 上世纪80年代开发成功的低温多效蒸发(LT-MED), 对海水预处理的要求不高、过程循环动力消耗小、淡水水质高(盐度 $<5\text{mg/L}$)。MSF和MED法进行海水淡化均需要消耗大量的能源, 最好能与热电厂或核电厂的废热利用相结合; 膜蒸馏也需要利用各种低位热能(如太阳能、工业废热、地热等), 适合于小型海水淡化系统。

热法海水淡化的关键就是如何降低能耗, 走出以能源换水源——加重能源负荷和环境污染(水质污染)——加速水源匮乏的怪圈^[1]。太阳能为可再生能源, 洁净无污染, 较容易实现热能能级的合理匹配。近年来, 利用无污染的太阳能进行海水淡化, 走可持续发展的道路, 已成为世界各国关注的重点。对于边远地区、海岛、渔村等淡水资源不足却普遍缺乏电力的地区, 利用太阳能进行海水(苦咸水)淡化具有十分重要意义。目前, 中东地区、地中海地区、澳大利亚、美国、墨西哥等不少国家, 已开展规模化太阳能海水淡化系统的开发与应用。

2 太阳能海水淡化系统的分类

太阳能海水淡化系统,一般分为直接和间接式两大类。直接式是指采集的太阳能热量,直接用于海水加热蒸发(即太阳能接受器和蒸馏器为一体)。直接式太阳能海水淡化系统的典型代表是顶棚式(盘式)太阳能蒸发装置。其占地面积大,产水量低(通常为 $2\sim 4\text{L}/\text{m}^2\text{d}$),但因具有结构简单、取材方便、操作费用低等优点,目前仍然有地区使用。间接式是指太阳能集热器和蒸发器分开的装置。近年来,对太阳能海水淡化系统的研究,主要集中在对太阳能集热器、蒸发器、以及相应海水淡化装置的改进。太阳能海水淡化装置分类如图1所示。

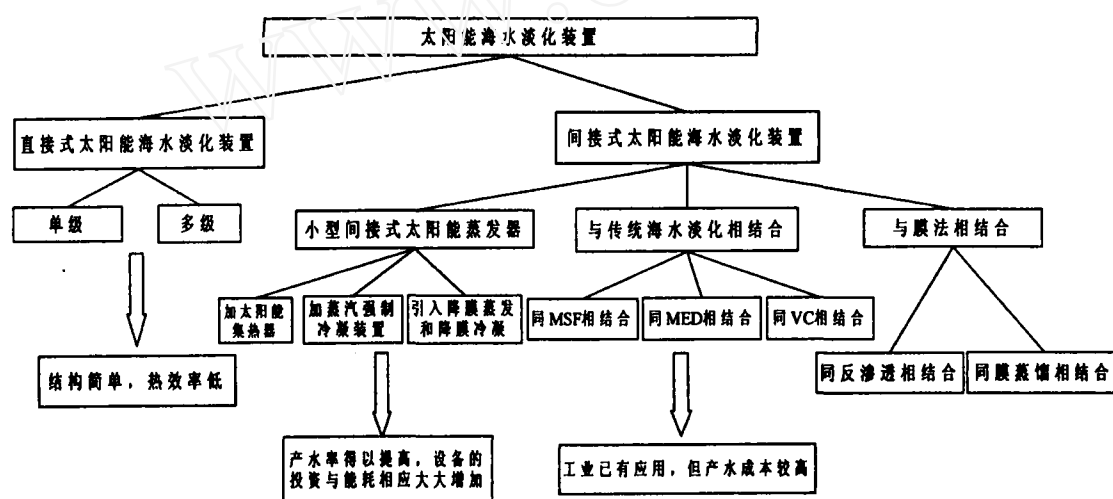


图 1 太阳能海水淡化系统分类

3 太阳能海水淡化系统的开发

长期以来,为提高太阳能海水淡化装置的热效率和产水率,研究者们对太阳能接受器的材料、结构,蒸发器的级(效)数、蒸汽强化,冷凝装置的冷凝效率等方面进行了大量的研究,获得了长足的改善,特别在太阳能海水淡化和太阳膜法海水淡化装置的集成积累了大量实践经验。

3.1 太阳能集热器

适用于海水淡化的太阳能集热器主要有:平板式集热器(Flat-Plate collectors,

FPC), 真空管式集热器 (Evacuated tube collectors, ETC), 槽式抛物面反射式集热器 (Parabolic trough collectors, PTC) 以及能够同时将太阳能转化成热能进行存储的盐度差太阳能池 (Salinity-gradient solar ponds, SP) 等。

平板式太阳能集热器通常是静态且没有太阳能聚集转换系统, 用水作为换热介质循环流过太阳能吸收管, 利用太阳能吸收管表面选择性涂层来强化对热辐射的吸收并减少热损失。如 Rahim^[2] 在太阳能集热器内水下20mm深处加一表面涂成黑色的铝板强化对太阳能的吸收; Patel 等人^[3] 在传统的太阳能蒸馏器的集热板上分别附上一层不同的半导体氧化物, PbO_2 、 CuO 与 MnO_2 作为光催化剂, 实验结果发现所得淡水的产量和质量均有提高; 基于相同的原理, Berreth Karl^[4] 提出的专利是在传统的板式太阳能接受器表面喷涂一层含有10%的氧化钛、氧化铁等金属性氧化物的太阳能吸收层, 用以强化对太阳能的吸收。

真空管式集热器是在太阳能接收管上方加一真空层以达到减少热损失的目的。真空管有两种类型: 一是杜瓦管 (两个同心的玻璃管), 二是内部为金属接受器, 外部为玻璃密封的真空管。真空管式集热器一般根据太阳能反射板的形状 (平板式、抛物面式等) 来设计。

抛物面槽式太阳能集热器的形状如图2所示: 反射面 a 将太阳光聚集到传热介质流过的管 b 上, 将传热介质加热。若直接用水作传热介质, 则可将其汽化^[5]; 若用油作传热介质, 则该集热器可将其温度加热到400℃左右。

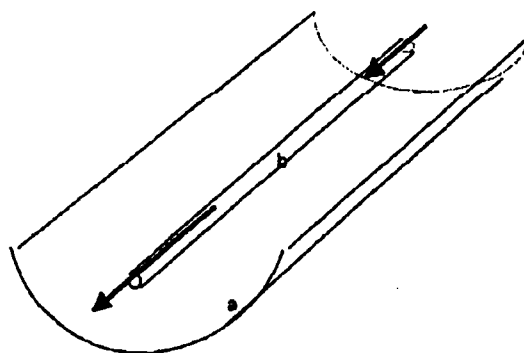


图2 抛物面槽式太阳能集热器示意图

a:反射面 b:接收器

3.2 太阳能海水淡化蒸发器

太阳能海水淡化蒸发器经历了由单一的太阳能接收器与蒸发器结合的简单装置, 经历将降膜蒸发与冷凝技术引入蒸发器等过程, 发展到外加储热器、多效蒸发器、蒸汽强制冷凝装置结合的复杂系统。

图3为Rahim^[2]在直接式太阳能海水淡化装置的基础上, 将蒸发区与冷凝区分开的太阳能海水淡化装置, 由此尽可能使蒸发区温度加以提高, 而冷凝区温度得到降低, 有利于热损失的减少。但目前该装置所能提供的蒸发面积还非常有限, 产水率仍然有待提高。

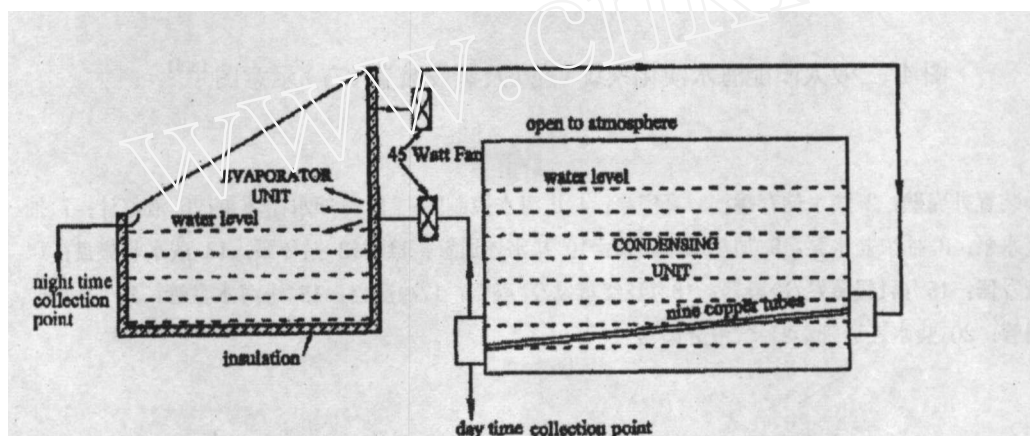


图3 蒸发区与冷凝区分开的太阳能海水淡化装置示意图

将单效蒸发改为多效蒸发, 海水淡化的热效率可大为提高。Reali^[6]对单级和两级太阳能常压蒸发器进行了对比, 在相同的操作时间内(10h), 达到相同淡水产量($36\text{m}^3/\text{d}$)时, 两级的太阳能集热器面积为单级的2/3。

Chafik^[7]提出的一种加湿除湿型太阳能海水淡化装置, 即将空气通过经太阳能加热后喷淋雾化的海水加湿, 然后再经过冷凝除湿得到淡水; 张鹤飞等人^[11]亦提出了一种加湿除湿型太阳能海水淡化装置。该装置是将热海水在降膜蒸发器上喷淋形成液膜, 气流在风机的驱动下, 强制流过蒸发器使热海水迅速蒸发成水蒸气, 再将接近饱和的湿空气经冷却海水冷却得到淡水, 该系统的产水率最高可达 $13\text{kg}/(\text{m}^2\text{d})$ 。

将工业上常用的降膜蒸发技术引入太阳能海水淡化系统中, 可强化太阳能海水淡化蒸发器的传热、传质过程。何开岩、陈子乾等^[8,9]采用多级降膜蒸发与冷凝技术, 设计出一套具有小型的三效太阳能海水淡化系统(图4), 该系统使其中大部分蒸气潜热及部分盐水的显热得到了多次重复利用。

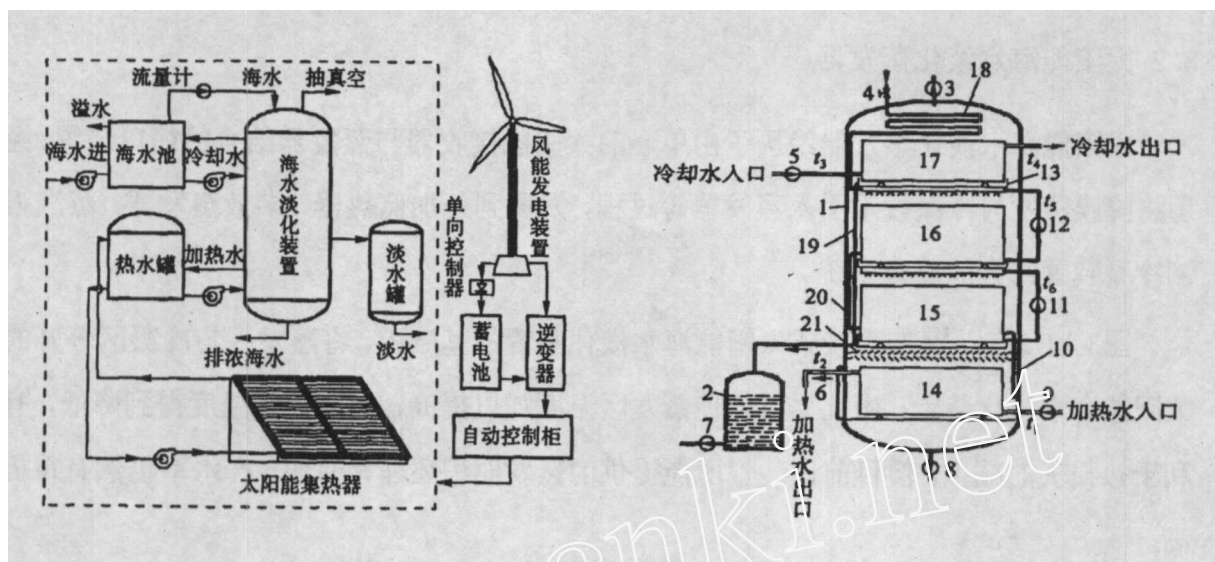


图4 三效太阳能海水淡化系统(左)及蒸发装置(右)示意图^[8,9]

1 装置外壳壁; 2 淡水储存罐; 3 真空泵; 4 进海水控制阀; 5 冷却水循环泵; 6 液位计; 7 抽淡水泵; 8 抽浓盐水泵; 9 加热水循环泵; 10 盐水连通管; 11, 12 循环泵; 13 淡水收集盘; 14 蒸发器; 15 第1级蒸发/冷凝器; 16 第2级蒸发/冷凝器; 17 冷凝器; 18 进海水盘管; 19 淡水连通管; 20 盐水连通管; 21 气液分离器

该系统采用真空管式太阳能集热器, 采光面积为 80m^2 。在晴朗天气下, 每平方米太阳能集热器的产水量可达 10 kg/d 。

尽管太阳能蒸发海水淡化的装置由简单到复杂, 能量或电力消耗逐步降低, 产水率有所提高(单位蒸发面积的最大日产水量由 $3\sim 4\text{L}$ 提高到 $>10\text{L}$), 而在产水率提高的同时, 设备的投资与能耗也相应增大, 所获得得单位质量淡水的成本仍不尽如人意。

3.3 太阳能多效蒸发与多级闪蒸海水淡化技术

在上述海水淡化技术中, 无论是能量的利用效率, 还是单位集热器采光面积的产水率, 都仍然较低, 并且在规模化和产业化方面也存在一定的困难, 不少问题有待于进一步研究。但目前世界上已有不少地方建成了将太阳能海水淡化工厂(见表1)^[10]。

表1 世界各地太阳能多效蒸发与多级闪蒸海水淡化工厂

太阳能海水、苦咸水淡化厂	海水淡化方法	生产能力 m ³ /d	太阳能接受器
La Desired 岛, 法国	ME, 14效	40	真空管
Abu Dhabi, 阿拉伯联合酋长国	ME, 18效	120	真空管
科威特	MSF 自动控制	100	抛物面槽式反射镜
La Paz, 墨西哥	MSF 10级	10	平板+抛物面槽式反射镜
阿拉伯海湾	ME	6000	抛物面槽式反射镜
Al-Ain, 阿拉伯联合酋长国	ME 55级、MSF 75级	500	抛物面槽式反射镜
Takami 岛, 日本	ME, 16效	16	平板
Margarita de Savoya, 意大利	MSF	20	-
Lampedusa 岛, 意大利	MSF	0.3	低强度聚集
安科纳大学, 意大利	ME-TC	30	太阳池
PSA, 西班牙	ME, 热泵	72	槽式抛物面反射镜
Gran, 西班牙	MSF	10	低浓度

3.4 太阳能膜法海水淡化技术

3.4.1 太阳能反渗透技术^[11]

太阳能反渗透海水淡化系统主要由太阳能供电系统和反渗透系统组成。前者包括太阳能电池、蓄电池和直交变换器, 后者则由海水取水、预处理、反渗透系统和排水系统组成。20世纪80年代, 德国GKSS板式太阳能光电池反渗透海水淡化装置采用8.2m²的膜面积, 日产淡水1.5m³。1995年美国佛罗里达州太阳能中心建立了光电池反渗透脱盐系统, 为4000名参观者每天提供757升的饮用水。但是, 太阳能发电系统的设备投资以及反渗透操作对进料预处理的造作费用均较高, 因此太阳能与反渗透相结合进行海水淡化目前仍有一定的局限性。

3.4.2 太阳能膜蒸馏技术

膜蒸馏过程发生在疏水性微孔膜两侧,经太阳能加热的海水或苦咸水在膜的表面汽化,蒸汽透过膜孔到达膜的另一侧,冷凝后得到淡水。其特点是进水不需要严格的预处理,不易结垢,且可在常压下操作,结构紧凑,可回收冷凝潜热。Banat等人^[12]开展的太阳能膜蒸馏海水脱盐研究,结果发现,单纯利用太阳能蒸馏海水所得淡水通量仅为太阳能膜蒸馏的20%。德国C. Bier等人利用太阳能卷式膜蒸馏海水淡化的研究:膜面积 10m^2 ,在流速 300L/h 、水温为 $60\sim 80^\circ\text{C}$ 的条件下,产水 $15\sim 25\text{L/h}$,所得淡水的电导率小于 10mS/cm 。但目前太阳能膜蒸馏海水淡化仍停留在小型阶段,尚无工业化规模的装置。

4 太阳能海水淡化存在的问题

尽管采用外加集热器、将单效蒸发改为多效蒸发,外加蒸汽强制冷凝装置、将降膜蒸发和降膜冷凝引入蒸发器等措施,已使太阳能蒸发器的热效率和单位面积产量大为提高,然而太阳能海水淡化系统冷凝潜热未能重新利用、蒸发器中自然对流的传热效果差、单位受热面积的产水率低、设备所占空间较大等主要问题尚未得到根本的解决。因此,发展结构紧凑、占地面积小、产水率高、热能利用高的太阳能海水淡化系统仍然有待探索。随着膜技术的快速发展,太阳能膜蒸馏系统将有可能成为今后太阳能海水淡化的主要发展方向。

参考文献

- [1] 张耀明, 邹宁宇. 海水淡化技术与太阳能利用. 中国工程科学, 2005, 7 (11): 37-41
- [2] Nabil Hussain A. Rahim, Utilisation of new technique to improve the efficiency of horizontal solar desalination still. Desalination, 2001, 138 :121-128
- [3] Suresh G. Patel, Shilpi Bhatnagar, Jitendra Vardia, Suresh C. Ameta. Use of photocatalysts in solar desalination. Desalination, 2006, 189:287-291
- [4] Berreth Karl, Solar collector used for domestic water and/or space heating or for seawater desalination plants, 2004, Patent number: DE19933050
- [5] Lourdes Garcia-Rodriguez, Ana I. Palmero-Marreroa, Carlos Gbmez-Camachob. Comparison of solar

- thermal technologies for applications in seawater desalination, *Desalination*, 2002, 142:135-142
- [6] M. Reali, Solar barometric distillation for seawater desalting Part II: Analyses of one-stage and two-stage distillation technologies. *Desalination*, 2006, 190:29-42
- [7] Efat Chafik, A new seawater desalination process using solar energy, *Desalination*, 2002, 15:325-37
- [8] 何开岩 郑宏飞 杨英俊 陈子乾, 太阳能海水淡化装置, *太阳能*, 2005,(1):38-39
- [9] 陈子乾, 郑宏飞, 何开岩, 杨英俊, 李正良. 一种新型多效内回热式太阳能海水淡化装置. *北京理工大学学报*, 2005, 25 (9) : 761-764
- [10] Lourdes Garcia-Rodriguez, Carlos Gomez-Camacho, Perspectives of solar-assisted seawater distillation, *Desalination*, 2001, 136:213-218
- [11] 高从堦, 陈国华. 海水淡化技术与工程手册. 北京, 化学工业出版社, 2004.
- [12] F.Banat, R.Jumah, M. Garaibeh. Exploitation of solar energy collected by solar stills for desalination by membrane distillation. *Renewable Energy*, 2002, 25:293-305