

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2008.06.006

海水淡化太阳能蒸馏技术研究现状与展望

左 璐¹, 郑 源¹, 周建华², 屈 波¹

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098;2.河海大学电气工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:介绍了海水淡化太阳能蒸馏技术的背景、原理、特点,综述了太阳能蒸馏装置的研究进展,对太阳能蒸馏技术的研究方法和研究现状从技术原理、装置分类、装置性能、装置中自然对流系数确定、装置经济性评估等方面进行全面总结,指出传统太阳能蒸馏装置存在的主要问题是占地面积大、产水量过低、太阳能利用率不高,分析了导致其产水量过低的原因,并对未来海水淡化太阳能蒸馏技术进行了展望。

关键词:太阳能;海水淡化;蒸馏技术

中图分类号:TK515 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1980(2008)06-0753-05

水是生命的源泉,是人类不可替代的宝贵自然资源,但随着人类文明不断发展和社会不断进步,水资源短缺已成为 21 世纪人类面临的重大问题。我国水资源形势更加不容乐观,作为世界上 13 个贫水国之一,人均水资源年占有量只相当于世界平均值的 1/4,缺水城市占全国城市的 2/3。中国工程院发布的《中国可持续发展水资源战略研究综合报告》^[1]指出,到 2030 年前后,当我国人口增至 16 亿时将出现用水高峰,用水总量为 7 000 亿~8 000 亿 m^3/a ,人均综合用水量为 400~500 m^3/a ,接近国际用水紧张的标准,而全国实际可利用水资源量为 8 000 亿~9 000 亿 m^3/a ,需水量已接近可利用水量的极限。地球上的海水资源非常丰富,97% 的水都在海洋里,而其中蕴含着大量的淡水。发展海水淡化事业,向海洋索取淡水已经成为世界各国的共同发展趋势。我国是海洋大国,海岸线总长 32 647 km,且沿海和中西部地区拥有极为丰富的地下苦咸水资源。在地下取水和跨区域调水受到越来越多条件限制的情况下,开发利用海水和苦咸水资源,进行海水(苦咸水)淡化,是解决我国淡水紧缺的重要战略途径。

海水淡化,就是利用海水脱盐生产淡水的技术和过程。目前,在已经开发的 20 多种海水淡化技术中,蒸馏法、电渗析法、反渗透法都达到一定水平,然而传统的海水淡化技术投资高,能源消耗过大,所耗能源主要来自石油和煤炭等化石燃料,因而导致海水淡化技术无法推广。众所周知,化石燃料储量有限,不可再生,在燃烧时会向环境中释放出大量的温室气体。世界海水淡化规模的不断扩大在缓解淡水资源紧张的同时,也给能源和环境带来了新的压力。常规能源短缺、生态环境恶化的双重压力迫使人们去寻找新能源和可再生能源。在众多能源中,太阳能以其储量无限、完全清洁的独特优势脱颖而出。利用太阳能进行海水或苦咸水的淡化,已愈来愈受到重视。太阳能海水淡化的优势很多,如不消耗常规能源,不产生二次污染,运行费用最省等。太阳能海水淡化技术是新能源与新水源研究与应用的主要方向之一,也将成为 21 世纪解决水源紧缺的根本措施。本文对太阳能蒸馏技术的研究方法和研究现状从技术原理、装置分类、装置性能、装置中自然对流系数确定、经济性评估等方面进行全面总结,指出太阳能蒸馏装置存在的主要问题和未来海水淡化太阳能蒸馏技术的发展方向。

1 太阳能蒸馏技术简介

利用太阳能进行海水(或苦咸水)的淡化,其能量利用方式有 2 种^[2]:一是利用太阳能产生的热能来驱动的海水相变过程(即为蒸馏过程);二是利用太阳能发电来驱动的电渗析过程。

收稿日期:2007-11-09

基金项目:河海大学自然科学基金(2007419611)

作者简介:左璐(1966—),女,江苏江都人,讲师,博士,主要从事新水源与新能源技术研究。

太阳能蒸馏技术是指利用从太阳能采集的热量,加热海水(或苦咸水),使海水(或苦咸水)蒸发产生相变过程形成水蒸气,再使水蒸气冷凝收集淡水,其原理如图1所示。太阳能蒸馏法的优点是装置结构简单,取材方便,运行、管理费用最低,不受原海水浓度限制,所获淡水纯度高。其缺点是装置占地面积较大,单位面积产水量较低,装置热性能受地区及气候条件的影响也较大。太阳能蒸馏技术特别适用于气温高、日照充足的缺水干旱地区。

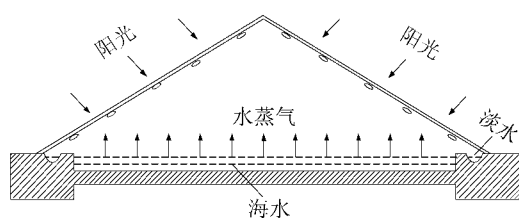


图1 太阳能蒸馏原理

Fig.1 Distillation principles of solar energy

2 太阳能蒸馏装置研发进展

世界上第一个大型的太阳能海水淡化装置是由瑞典工程师 Wilson 于 1872 年建造于智利北部的顶棚式太阳能蒸馏装置^[3],总集热面积 $4\,700\text{ m}^2$,晴天每天可生产淡水 23 t ,其结构简单,类似于一个温室,但占地面积大,日产水率一般为 $2\sim 4\text{ kg/m}^2$,热效率只能达到 $35\%\sim 45\%$ 。太阳能蒸馏器在传统的顶棚式(池式)之后又出现了倾斜幕芯式、倾斜盘式、充气式、吸液芯式等多种形式。在这些基本形式的基础上,为了提高热利用效率,又逐渐由单级结构发展到多级结构。目前,人们研究得最多、技术上最为成熟的仍是盘式太阳能蒸馏器,这种装置因结构简单和取材方便而易于推广应用。然而,盘式太阳能蒸馏器具有效率不高的严重缺陷,一般而言,它的年产率仅为 $1\,000\text{ kg/m}^2$ 左右,不能满足用户的要求。理论和实践均已证明,如果在系统运行过程中,水蒸气的冷凝潜热能被重复利用,蒸发过程所需的热能将被显著降低。在多效蒸馏系统中可实现上述要求,其主要优点在于成功地将水蒸气的凝结潜热和热盐水的显热再循环加以利用,用之预热进入的海水。但是,它们的结构通常都很复杂,运行成本及固定资本的投入相对较高,使得这些先进的系统通常只对大型的设备具有经济可行性。而在大型的系统,它们又正在逐步地被大规模的反渗透系统所代替。

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上。太阳能集热器有许多种,适合于蒸馏法海水淡化装置的集热器主要有平板集热器、真空管集热器、复合抛物面集热器以及槽形抛物面集热器。它们通过太阳能加热吸热管中的流体(水或合成油),被加热的流体储存在隔热容器里或用来加热其他储热介质。其中前2种是直射非聚光型集热器,后2种是反射聚光型集热器。目前,中温太阳能集热器的应用日益普及,这使得建立在较高温度段运行的太阳能蒸馏系统成为可能,也使得以太阳能作为能源的海水淡化系统与传统海水淡化系统相结合可能变成现实,也正在成为太阳能海水淡化研究中的一个很活跃的课题。

3 太阳能蒸馏技术研究进展与现状

从目前可查到的文献资料看,国内外学者对于海水淡化太阳能蒸馏技术的研究主要集中在探索提高太阳能蒸馏系统产水量的方法及提高太阳能的利用率上,研究内容体现在以下几个方面:

3.1 太阳能蒸馏技术的原理研究

太阳能蒸馏技术原理的研究主要是通过热、质平衡建立数学模型,采用不同的数学模型方法来预测计算太阳能蒸馏系统的性能。例如有计算机模拟法^[4]、热网络和 sankey 图解(thermic circuit and the sankey-diagrams)法^[5]、周期和暂态分析(periodic and transient analysis)法^[6]、迭代法^[7]、数值方法^[8]。

3.2 太阳能蒸馏装置的分类研究

太阳能蒸馏装置分主动式系统和被动式系统2大类。在主动式太阳能蒸馏系统中,以外部方式将外部热能加入到系统来提高蒸馏器的蒸发作用,此方式可以采用集热板方式。如果没有外部方式加热则为被动式太阳能蒸馏系统。目前研究的太阳能蒸馏装置类型主要有:传统太阳能蒸馏器,具有被动冷凝器的单斜面的太阳能蒸馏器,双冷凝室太阳能蒸馏器^[9],垂直太阳能蒸馏器^[10],逆向吸收式太阳能蒸馏器^[11],多级芯型太阳能蒸馏器^[12],多效太阳能蒸馏器^[13],混合太阳能蒸馏器^[14]。

3.3 太阳能蒸馏装置的性能研究

这一方面的研究主要通过对装置的试验测试来进行,研究表明,风速、太阳辐射、天空温度、周围环境温度、相对湿度等气象参数及含盐浓度、海水厚度、水中海藻情况、矿物层等^[15-16]对太阳能蒸馏装置的性能有

显著影响.在装置内部,许多结构参数对装置性能也会构成影响,甚至有些参数的影响非常明显.为了提高常规太阳能蒸馏器性能,对其进行了以下改进:(a)减少盘式与多级芯型太阳能蒸馏器底部的损失系数和池中海水的深度^[16];(b)采用反射镜^[17]、内部和外部冷凝器^[18-19]、内墙壁附棉织物法^[20]等;(c)在海水中添加染料^[21]、木炭^[22]、海绵体^[23]等;(d)采用能量储存装置^[22]、多级芯型装置^[12]、冷凝盖板冷却装置^[24]、倾斜式装置^[25]等;(e)采用扩大蒸发面积^[26]以及不同的设计^[27]等办法.

3.4 太阳能蒸馏装置中自然对流换热系数确定的研究

众所周知,蒸馏装置中自然对流换热系数的正确确定是淡水产量计算准确与否的关键因素.因此,寻求适用范围更广,与实际偏差较小的传热传质关系式是长久以来一直不断探索的课题.Dunkle 首先给出了蒸馏器中一组完整的自然对流关系式^[21].随后,不少学者根据实验数据又建立了不少新的关系式.但是,各位学者在建立这些关系式时,都作了不同程度的近似假设,因而使其应用受到了限制.Zheng 等^[28]建立的盘式太阳能蒸馏器中传热传质关系式,改进了 Dunkle 关系式中自然对流换热系数与表征蒸馏器自由水面与透明盖板间的特征尺寸无关的不足,使得该关系式适用的温度和瑞利数范围更宽,更利于在实际中应用.

3.5 太阳能蒸馏装置的经济性评估研究

对太阳能蒸馏装置进行经济性评估来测试其技术经济性与社会生存能力是非常重要的.Howe 等^[29]指出容量小于 $200 \text{ m}^3/\text{d}$ 的太阳能蒸馏厂比其他蒸馏厂更经济.许多研究者^[30-31]通过综合考虑补助金、降雨量、系统维修费等因素的影响,对盘式和多级芯型太阳能蒸馏器进行了经济性分析研究.Barrera^[32]在墨西哥开发出阶梯状太阳能蒸馏器并对其进行技术经济分析,指出此装置获取可饮用水的经济性是化学获取法的 3.5 倍.Adhikari 等^[33]分别对带有太阳能集热器的多级盘式太阳能蒸馏器进行了技术经济分析.Fath 等^[34]将锥形太阳能蒸馏器与单斜面蒸馏器进行了经济性分析与对比,指出单斜面比锥形的更有效、经济.

4 海水淡化太阳能蒸馏技术存在的问题、原因及展望

传统太阳能蒸馏器的产水量过低,大大限制了它的推广应用.为此,科学家们设计了多种为传统太阳能蒸馏器配备其他太阳能集热器的方案,但这些设计方案在大大提高单位采光面积的产水量时却增加了单位产量的设备投资.长期以来,科学家们为改善其性能而进行了大量的理论分析和实验研究,并提出了不少有效的措施,如选择透射性更好的盖板、润湿性更佳的凝结面,设法增加海水对阳光的吸收率,减少盖板的发射率,确定盛水盘中待蒸馏海水的最佳厚度及降低系统的热损失等.尽管这些措施对改善传统太阳能蒸馏器的性能均起到了一定的作用,但其热效率依然没有得到大幅度的提高,产水量只比原来提高了 $5\% \sim 10\%$ ^[11].

传统太阳能蒸馏器产水量过低有 3 点原因:一是水蒸气的凝结潜热未被重新利用,而是通过盖板散失到大气中去了;二是传统太阳能蒸馏器中自然对流的换热模式,大大限制了蒸馏器热性能的提高;三是待蒸发的海水热容量太大,限制了运行温度的提高,从而减弱了蒸发的驱动力.因此,要提高太阳能蒸馏系统的产水量,必须克服上述 3 个缺陷.

研究发展结构紧凑、占地面积小、产水率高、热能利用率高的太阳能海水淡化系统一直是科学家们追寻的热门课题.目前,最主要的研究方向是如何将太阳能技术与传统的海水淡化技术结合起来.未来的太阳能海水淡化技术,在近期内仍将以蒸馏方法为主,若能克服传统太阳能蒸馏系统的 3 个缺陷之一,必将大大改善蒸馏系统的热性能.若能将解决 3 个缺陷的方案结合在一起,无疑是太阳能海水淡化技术的又一场革命.由于传统蒸馏装置的缺点,单纯太阳能蒸馏技术基本处在停滞的状态.联合太阳能热发电、海水淡化、海盐生产等多目标产业的综合系统的研究不失为好的发展方向.随着膜技术的快速发展,将膜技术与太阳能蒸馏系统相结合的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] 钱正英,张光斗.中国可持续发展水资源战略研究综合报告[M].北京:中国水利水电出版社,2000.
- [2] 郑宏飞,何开岩,陈子乾.太阳能海水淡化技术[M].北京:北京理工大学出版社,2005.
- [3] SOTERIS K. Survey of solar desalination systems and system selection[J]. Energy, 1997, 22(1): 69-81.
- [4] COOPER P I. Digital simulation of transient solar still processes[J]. Solar Energy, 1969, 13(3): 313-325.
- [5] FRICK B. Some new considerations about solar still[C]//Proceedings of International Solar Energy Congress. Melbourne [s. n.], 1970:

395-404.

- [6] COOPER P I. The transient analysis of glass covered solar still[D]. Perth : University of Western Australia , 1970.
- [7] TOURE S , MEUKAM P. A numerical model and experimental investigation for a solar still climatic conditions in Abidjar[J]. Renewable Energy , 1997 , 11(3) 319-330.
- [8] AYBAR H S. Mathematical modeling of an inclined solar water distillation system[J]. Desalination , 2006 , 190 363-70.
- [9] TIWARI G N , KUPFERMANN A , AGRAWAL S. A new design of double condensing chamber solar still[J]. Desalination , 1997 , 114 : 153-164.
- [10] KIATSIRIROAT T , BHATTACHARYA S C , WIBULSWAS P. Transient simulation of vertical solar still[J]. Energy Convers Manag , 1987 , 27(2) 247-261.
- [11] SUNEJA S , TIWARI G N. Optimization of number of effects for higher yield from an inverted absorber solar still using the Runge-Kutta method[J]. Desalination , 1998 , 120 :197-209.
- [12] JANARTHANAN B , CHANDRASEKARAN J , KUMAR S. Evaporative heat loss and heat transfer for open-and closed-cycle systems of a floating tilted wick solar still[J]. Desalination , 2005 , 180 291-305.
- [13] TANAKA H , NOSOKO T , NAGATA T. Experimental study of basin-type , multiple-effect , diffusion-coupled solar still[J]. Desalination , 2002 , 150 :131-144.
- [14] VAROL H S , YAZAR A. A hybrid high efficiency single basin solar still[J]. Int J Energy Research , 1996 , 20(6) 541-546.
- [15] GARG H P , MANN H S. Effect of climatic , operational and design parameters on the year round performance of single sloped and double sloped solar still under Indian and arid zone condition[J]. Solar Energy , 1976 , 18(2) :159-164.
- [16] RAJESH T , TIWARI G N. Thermal modeling of passive and active solar stills for different depths of water by using the concept of solar fraction[J]. Solar Energy , 2006 , 80 956-967.
- [17] HIROSHI T , YASUHIITO N. Improvement of the tilted wick solar still by using a flat plate reflector[J]. Desalination , 2007 , 216 :139-146.
- [18] AHMED S T. Study of single effect solar still with an internal condenser[J]. Solar & Wind Technology , 1988 , 5(6) 637-643.
- [19] FATANI A A , ZAKI G M. Analysis of roof type solar stills with assisting external condenser[J]. Solar Energy , 1995 , 17(1) 27-33.
- [20] WIBULSWAS P , TADTIUM S. Improvement of a basin type solar still by means of a vertical back wall[C]//International Symposium Workshop on Renewable Energy Sources. Amsterdam [s. n.] , 1984 301-309.
- [21] LAWRENCE S , GUPTA S , TIWARI G N. Experimental validation of thermal analysis of solar still with dye[J]. Solar Energy , 1988 , 6 : 291-307.
- [22] MONA M N , KAWI M A A. Non-conventional solar stills with charcoal particles as absorber medium[J]. Desalination , 2002 , 153 :55-64.
- [23] 莫海龙 , 葛新石 , 李业发. 漂浮黑色海绵吸热 蒸发层太阳能蒸馏装置的实验研究[J]. 太阳能学报 , 1994 , 15(4) 386-390.
- [24] BASSAM A , HIJLEH K A , MOUSA H A. Water film cooling over the glass cover of a solar still including evaporation effects[J]. Energy , 1997 , 22(1) 43-48.
- [25] AYBAR H S , EGELIOGLU F , ATIKOL U. An experimental study on an inclined solar distillation system[J]. Desalination , 2005 , 180 : 285-289.
- [26] KWATRA H S. Performance of a solar still :predicted effect of enhanced evaporation area in yield and evaporation temperature[J]. Solar Energy , 1996 , 56(3) 261-266.
- [27] IMAD A , OMAR O B. The effect of using different designs of solar stills on water distillation[J]. Desalination , 2004 , 169 :121-127.
- [28] ZHENG Hong-fei , ZHANG Xiao-yan , ZHANG Jing , et al. A group of improved heat and mass transfer correlations in solar stills[J]. Energy Conversion and Management , 2002 , 43 2469-2478.
- [29] HOWE E D , TLEIMAT B W. Twenty years of work on solar distillation at the University of California[J]. Solar Energy , 1974 , 16 97-101.
- [30] DELYANNIS E E , DELYANNIS A. Economics of solar stills[J]. Desalination , 1985 , 52 :167-171.
- [31] TIWARI G N , YADAV Y P. Economic analysis of large scale solar distillation plant[J]. Energy Convers Manag , 1985 , 25 :423-429.
- [32] BARRERA E. A technical and economical analysis of solar water still in Mexico[J]. Renewable Energy , 1992 , 2(4) 489-495.
- [33] ADHIKARI R S , KUMAR A , GARGA H P. Techno-economic analysis of a multi-stage stacked tray(MSST) solar still[J]. Desalination , 2000 , 127 :19-26.
- [34] FATH H E S , EL-SAMANOUDY M , FAHMY K , et al. Thermal-economic analysis and comparison between pyramid-shaped and single-slope solar still configurations[J]. Desalination , 2003 , 159 69-79.

Present situation and prospect of researches on
solar distillation technology for seawater desalination

ZUO Lu¹, ZHENG Yuan¹, ZHOU Jian-hua², QU Bo¹

- (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. College of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : The background, principles and characteristics of the solar distillation technology for seawater desalination were introduced. Based on the summary of research progress in this field, the research methods and situation of the solar distillation technology for seawater desalination were reviewed from the aspects of the technical principles, the device classification, the device performance, the determination of the natural convection coefficients as well as the evaluation of economic means of the solar distillation devices. The existing problems of the traditional solar distillation technology were put forward: large area of the devices, low water yield and low utilization of solar energy. The causes for the low water yield were analyzed. The solar distillation technology for seawater desalination in the future was prospected.

Key words : solar energy; seawater desalination; distillation technology

《水资源保护》征订启事

全国中文核心期刊 中国科技核心期刊

《水资源保护》是河海大学和环境水利研究会主办的科学技术期刊,创刊于 1985 年,双月刊,96 页,国内外公开发行,国内统一连续出版物号:CN32-1356/TV. 现为全国中文核心期刊、中国科技核心期刊和江苏省一级期刊.

《水资源保护》主要刊登与水资源保护有关的基础研究,应用技术,工程措施,综合述评,专题讲座,国外动态,书刊评介,科技简讯,水资源管理、评价、监测、优化配置,节水技术,水环境污染控制等方面的文章. 近年来,重点关注与水有关的生态环境领域中的研究方向,新增设相关的基础研究、防治技术、城市水环境治理等内容.

主要读者对象:全国从事与水资源保护工作有关的工程技术人员、科研人员、管理干部以及大专院校的师生.

《水资源保护》邮发代号 28-298,双月刊 8 元/期,全年 48 元,每逢单月 30 日出版. 可在全国各地邮局订阅,也可直接与编辑部联系订阅.

编辑部地址 210098 南京市西康路 1 号 河海大学《水资源保护》编辑部

电话/传真 (025) 83786642

E-mail bh@hhu.edu.cn

网址 http://kkb.hhu.edu.cn/index_bh.htm