倾斜式太阳能蒸馏海水淡化研究进展

李 强[1],任建波[2*],苗 超[2],刘鸿雁[1]
(1. 河北工业大学化工学院,天津 300130;
2. 国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所,天津 300192)

摘要:综述了近年来倾斜式太阳能蒸馏器海水淡化技术的研究进展,重点介绍了倾斜盘式太阳能蒸馏器和倾斜芯型太阳能蒸馏,以及在此基础上演变出的各种新型倾斜式太阳能蒸馏器。认为降低盖板温度、提高太阳辐射吸收效率、附加蓄热装置对于提高倾斜式太阳能蒸馏器的性能具有重要作用。

关键词:海水淡化;太阳能;倾斜式蒸馏器
中图分类号:P747.14 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-4320(2015)04-0052-05

Progress of inclined solar powered seawater desalination system

LI Qiang[1], *REN Jian-bo*[2*], *MIAO Chao*[2], *LIU Hong-yan*[1]
(1. Chemical Engineering Institute, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;
2. The Institute of seawater Desalination and Multipurpose Utilization, SOA, Tianjin 300192, China)

Abstract: The research progress of seawater desalination technology powered by the inclined solar still is reviewed. The tilting basin type solar distiller, inclined wick solar still and the related new inclined solar still are highlighted. Reducing cover temperature, increasing the efficiency of solar radiation absorption and additional heat storage device are considered to play important roles in improving the performance of inclined solar still.

Key words: desalination; solar energy; inclined still

人类利用太阳能淡化海水历史悠久,最早有文献记载的太阳能海水淡化方法始于中世纪时期[1]。时至今日太阳能蒸馏器仍应用于海上救援、海岛海水淡化、偏远地区苦咸水淡化等领域,但由于运行温度不高、产水量低、太阳能利用效率低以及单位产水量的设备投资高等不利用因素,大大限制了其推广应用。

为提高太阳能蒸馏器的经济性,人们开展了诸多的研究,提出了不同形式的太阳能蒸馏器。倾斜式太阳能蒸馏器以集热效率高、有效蒸发面积大、蒸发速率快等优点得到广泛关注。倾斜式太阳能蒸馏器主要有倾斜盘式太阳能蒸馏器和倾斜芯型太阳能蒸馏器2种。本文中将对2种形式的倾斜式太阳能蒸馏器进行详细综述,介绍在这2种蒸馏器基础上产生的各种新型倾斜式太阳能蒸馏器,并对倾斜式太阳能蒸馏器进一步的发展进行初步展望。

1 倾斜盘式太阳能蒸馏器

1.1 简单倾斜盘式太阳能蒸馏器

盘式太阳能蒸馏器是最古老的太阳能蒸馏器,由于盘内海水水平分布,吸热面积仅为盖板的投影面积。若能形成倾斜的水面将能够增大吸热面积,从而提高蒸馏器的集热效率。基于此,众多研究者提出了倾斜式盘式太阳能蒸馏器。倾斜盘式太阳能蒸馏器如图1所示。

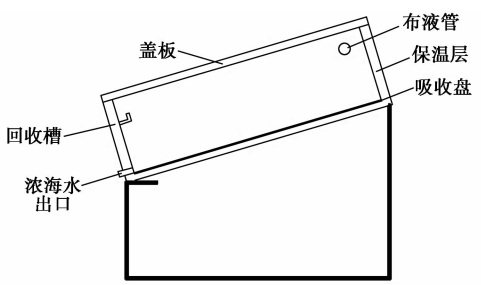

图1 简单倾斜盘式太阳能蒸馏器

Phillips等[2]对图1所示的倾斜盘式太阳能蒸馏器进行试验研究,日产水量仅为3.56 L。究其主要原因是由于盐水在倾斜面上停留时间较短,没有充分利用倾斜面上吸收的太阳辐射。

1.2 倾斜阶梯型太阳能蒸馏器

倾斜阶梯型太阳能蒸馏器将海水均匀分配在不同的阶梯中,盘内的水层较薄,通过吸收太阳能辐

收稿日期:2014-10-08;**修回日期**:2015-02-04
基金项目:国家自然科学基金项目(51209043);中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(K-JBYWF-2013-G6);上海市科学技术委员会科研计划项目(14DZ1204803)
作者简介:李强(1989-),男,硕士生;任建波(1981-),男,博士,高级工程师,主要从事可再生能源海水淡化和蒸馏海水淡化关键节能技术研究,通讯联系人,022-87898151,renjb0625@gmail.com。

射,使海水温度迅速升高,加快蒸发速率,产水率明显高于盘式蒸馏器。倾斜阶梯型太阳能蒸馏器如图 2 所示。

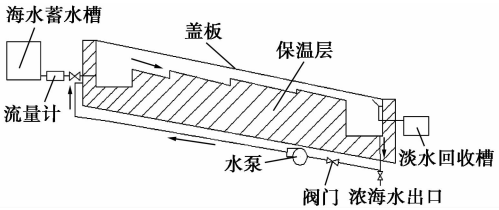

图 2　倾斜阶梯型太阳能蒸馏器

倾斜阶梯型太阳能蒸馏器包括顶部吸收盘、底部吸收盘和中间部分,中间部分的吸收盘呈现不均匀的阶梯状,海水从顶部流入至底部的回收槽中,未蒸发的海水通过水泵送回顶部,进行循环操作。该类型的太阳能蒸馏器能够增大盐水在蒸馏器内的停留时间,同时能够提高太阳辐射的吸收效率。Sadineni 等[3]对图 2 所示的太阳能蒸馏器进行了理论和实验研究,盖板采用单层和双层进行实验分析,在拉斯维加斯的 8、9 月份双层和单层盖板的平均日产水量分别为 2.2、5.5 L/m^2。

2　倾斜芯型太阳能蒸馏器

倾斜式蒸馏器是通过改变工艺参数来提高太阳能蒸馏器的蒸发速率,海水在倾斜式蒸馏器中的流动时间越长,海水的蒸发速率就越快,从而增加产水量。在底盘中多孔的芯体材料可以增加海水的蒸发面积,海水在芯体材料的表面流动缓慢,并形成一层薄水膜,从而提高产水量。Frick 等[4]提出了倾斜式芯型蒸馏器。

2.1　单级倾斜芯型太阳能蒸馏器

单级倾斜芯型太阳能蒸馏器中,海水通过液体分布器,均匀地分布在芯体上,由于蒸馏器是倾斜的,依靠重力作用润湿芯体,在吸液芯表面形成一层水膜,水膜很快蒸发并形成水蒸汽,水蒸汽在盖板的下表面冷凝形成淡水。单级倾斜芯型太阳能蒸馏器如图 3 所示。

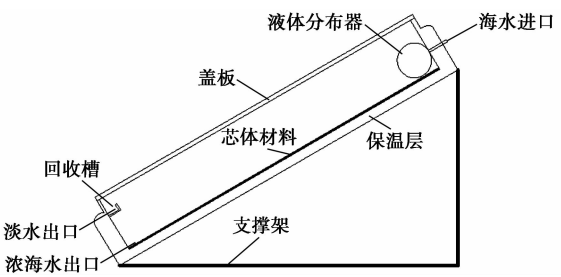

图 3　单级倾斜芯型太阳能蒸馏器

许多学者对倾斜芯型太阳能蒸馏器进行了理论计算和数值分析[5-8]。Hikmet 等[9]对不同的芯体材料的倾斜芯型太阳能蒸馏器(如图 3 所示)进行了实验研究,通过实验分析,倾斜芯型太阳能蒸馏器的产水量在相同实验条件下是普通盘式蒸馏器产水量的 2 ~3 倍。倾斜芯型太阳能蒸馏器和传统太阳能蒸馏器不同,海水在吸收盘表面流动,系统同时产出淡水和热的浓盐水。海水在吸收盘表面的流动时间越长,产生的水蒸汽就越多,从而产出更多的淡水,单位面积每天可产出 3.5 ~5.4 kg 的淡水,同时浓海水可被加热到 40℃左右,这些浓海水可被很好地利用。

芯体材料是倾斜芯型太阳能蒸馏器的关键部件,Mona 等[10]对竹炭颗粒床的 3 种颗粒直径和不同的给水流速对倾斜蒸馏器的性能影响进行了研究,蒸馏器的腔体采用塑料材质,减少了成本的投入,蒸馏器的底部用锯屑作为保温材料,将竹炭颗粒床作为芯体材料,通过对比实验研究得出结论,给水速率为 160 m/min,竹炭颗粒直径为 0.005 m 时可得出最高的产水量。

2.2　多级倾斜芯型太阳能蒸馏器

为提高倾斜芯型太阳能蒸馏器的热性能,提高单位面积的产水量,Sodha 等[11]提出了多级芯型太阳能蒸馏器(如图 4 所示),并对多级芯型蒸馏器的性能进行了研究。

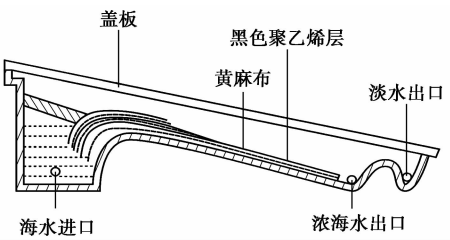

图 4　多级倾斜芯型太阳能蒸馏器

在蒸馏器内铺上一层涂黑的黄麻布,海水在其表面形成一层薄的水膜,由于水膜的热容量比较低,通过吸收来至太阳能的辐射,转换为热能并加热海水,海水很快就会达到很高的温度。

实验结果表明,在气温较低的晴天,蒸馏器的日产水量为 2.5 L/m^2,效率为 34%,而传统的盘式蒸馏器的最大效率仅为 30%,在相同面积的条件下,芯型蒸馏器的操作费用仅为盘式蒸馏器的一半,但产水量却高于盘式蒸馏器的产水量。多级芯型太阳能蒸馏器其核心是芯体材料(如黄麻布、棉纱布、竹炭布等),同时这些芯体材料作为太阳能的吸收器,

吸收来自太阳能的热量,这些芯体是对水有强亲和力作用或毛细作用的纤维材料,海水会在纤维表面形成一个均匀的海水薄层,由于薄层中海水的热容量很小,很快被加热到较高的温度形成水蒸汽,水蒸汽在盖板的内表面冷凝形成小水滴,在重力作用下流入回收槽中。

2.3　浮动式倾斜芯型太阳能蒸馏器

减小海水热容量来促进海水蒸发是芯型太阳能蒸馏器的主要特点。Janarthanan 等[12] 提出了浮动式倾斜芯型太阳能蒸馏器,结构如图 5 所示。

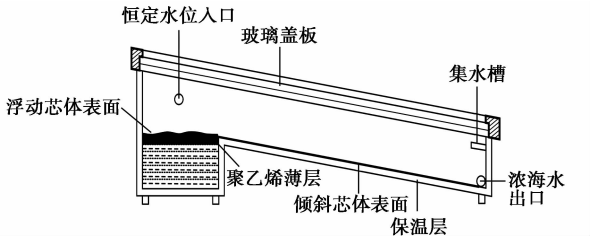

图 5　浮动式倾斜芯型太阳能蒸馏器

蒸馏器中海水在芯体的毛细作用下,缓慢流经倾斜面,由于吸液芯的存在,海水在倾斜面上保持较薄的液膜,由于液膜具有更小的热容量,所以更容易蒸发,另外由于在玻璃盖板上也有冷海水流动,降低了玻璃温度,增强了蒸汽冷凝效果,淡水产量也有所提高。

通过理论计算和实验研究了浮动式倾斜芯型太阳能蒸馏器的性能,并结合水流在盖板外表面流动、芯体材料表面水膜的热容量、水膜的温度以及系统的效率对蒸馏器的影响,结果指出,理论计算和实验研究的相对标准偏差很小,平均盖板的偏差小于 8%,倾斜芯体水层表面的偏差小于 2%。

2.4　倾斜芯体转动式太阳能蒸馏器

为提高盐水在芯体表面的停留时间,Helmy 等[13] 提出了倾斜芯体转动式太阳能蒸馏器,结构如图 6 所示。

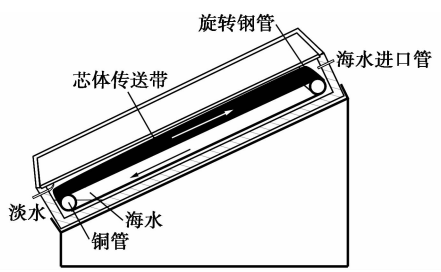

图 6　倾斜芯体转动式太阳能蒸馏器

芯体依靠直流电机驱动在蒸馏器内自下而上转动,提高了盐水在芯体表面的停留时间,从而提高太阳能蒸馏器的热效率。理论和实验研究证明,该装置能够大大提高太阳能蒸馏器的产水率。

3　新型倾斜式太阳能蒸馏器

为提高倾斜式太阳能蒸馏器的性能,不断有附加外部部件的新型蒸馏器出现,主要体现在以下几个方面。

3.1　安装反射器的倾斜式太阳能蒸馏器

反射器可以通过调整适宜的角度将太阳光照反射到蒸馏器内,由于太阳方位的变化,需要调整蒸馏器的方向,通过安装反射器,可使蒸馏器更多地吸收太阳能来加热海水,从而提高产水量。

Tanaka 等[14] 通过安装平板反射器来提高倾斜芯型太阳能蒸馏器的性能,并建立数学模型分析增加外置平板反射器对倾斜芯型太阳能蒸馏器的产水量的影响,利用几何方法计算外置反射器经过反射被芯体材料吸收的太阳能辐射强度,并在蒸馏器的腔体内建立传热和传质数学模型来分析产水量的变化,通过计算得出,增加外置反射器可以提高蒸馏器的产水量,但是在夏季产水量的变化却不明显,平均产水量可提高 9% 左右。增加平板反射器的倾斜芯型太阳能蒸馏器如图 7 所示。这种蒸馏器可加强对太阳能辐射的吸收,加快了水的蒸发效率,从而提高了蒸馏器的效率。但是同时也要加快冷凝速率,否则蒸馏器的腔体内会存在大量水蒸汽,降低芯体对太阳能的吸收,反而会降低蒸馏器的产水率。

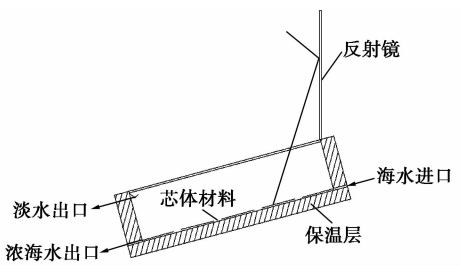

图 7　带有平板反射器的倾斜芯型太阳能蒸馏器

随后 Tanaka 等[15] 对耦合外置反射器的倾斜芯型太阳能蒸馏器进行了研究,并建立了传热、传质的数学模型,经研究发现,在春分、夏至、秋分、冬至这 4 天,通过安装反射器的倾斜芯型太阳能蒸馏器的产水量分别高于未安装反射器的倾斜芯型太阳能蒸馏器产水量的 0%、57%、40%、27%。Abdul 等[16] 在冬季对增加反射器的倾斜太阳能蒸馏器的性能进行了实验测试,通过增加内部和外部反射器来增加蒸馏器的产水量,反射器的角度分别为 0°、10°、20°

和 30°,蒸馏器的倾斜角度为 20°、30°和 40°。当蒸馏器的倾斜角度为 20°和外置反射器的倾斜角度为 20°条件下的产水量是其他倾斜角度蒸馏器的 2.45 倍。

3.2　耦合集热器的倾斜式太阳能蒸馏器

集热器原则上分为 2 大类:一类是不带聚光镜的称为平板式集热器,另一类是带聚光镜的集热器,真空管式集热器属于特殊的平板式集热器。海水在进入蒸馏器之前,先在集热器中进行预热,再通入蒸馏器中,这种方法可以充分利用太阳能,并提高了海水温度,有利于海水的蒸发,提高产水量。

Adel[17]设计了一种新型的倾斜芯型太阳能蒸馏器,其结构如图 8 所示,在倾斜芯型太阳能蒸馏器的基础上,在海水进口段安装了太阳能平板集热器,蒸馏器的内部也有所改进,在蒸馏器内部安装多个隔板,海水在蒸馏器中呈现 S 型流动,这样就延长了海水在蒸馏器中的流动时间,充分吸收热量,提高了太阳能的利用率,从而提高了蒸馏器的产水量。

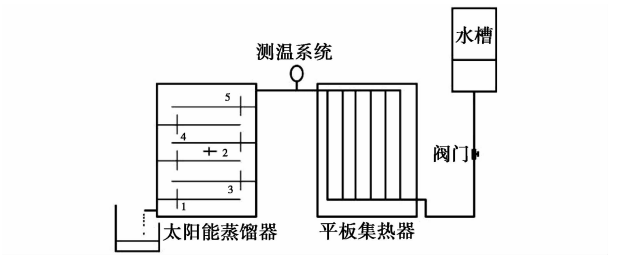

图 8　新型倾斜芯型太阳能蒸馏器

Omara 等[18]对传统盘式太阳能蒸馏器和倾斜芯型太阳能蒸馏器进行了对比实验研究和理论分析,其中倾斜芯型太阳能蒸馏器分为单层芯体和双层芯体结构,并在进水管前安装了太阳能真空管集热器,海水在进入太阳能蒸馏器前进行预热,使太阳能蒸馏器能够连续工作。通过实验和理论产水量的计算,保证了数据的准确性。其结果表明,双层倾斜芯型太阳能蒸馏器在倾角为 30°时,相对于传统盘式太阳能蒸馏器的产水量增加 114%,日平均产水率可达 71.5%,而在夜间的产水量是传统盘式蒸馏器产水量的 215%。

3.3　耦合蓄热材料的倾斜式太阳能蒸馏器

由于受自然因素的影响,在阴雨天或夜晚时,传统的太阳能蒸馏器就无法继续运行,学者们又对太阳能蒸馏器进行了优化,在太阳能蒸馏器底部加入相变蓄热材料,以提高系统的热效率,在太阳能不足的情况下继续运行。

Tabrizi 等[19]对耦合蓄热材料的倾斜布置的盘式太阳能蒸馏器和未加入蓄热材料的倾斜布置的盘式太阳能蒸馏器进行了实验对比研究,其系统结构如图 9 所示。蓄热材料采用固体石蜡,通过固-液相变储存热能,在每一层阶梯上表面覆盖一层芯体材料以延长海水在蒸馏器内的流动时间,在芯体材料表面保持一层水膜流动,加快蒸发速率。该系统利用石蜡的固-液相变,储存多余的太阳能,在晴天和阴天分别进行了实验研究,产水量提高了 31%[20]。相变蓄热材料由于较大的热容量,对于提高太阳能蒸馏器的热效率具有重要作用。固体石蜡的熔点变化范围 23 ~ 67℃[21],烃链越长,熔点就越高,从而热容量也就越高。

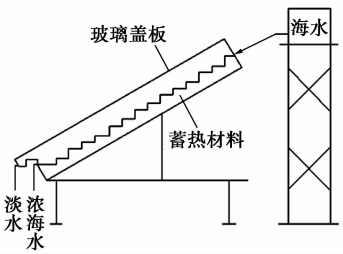

图 9　耦合相变蓄热材料的阶梯式太阳能蒸馏器

Radhawan[22]和 El -Sebaii 等[23]分别对带相变蓄热存储的倾斜布置的盘式太阳能蒸馏器和传统盘式太阳能蒸馏器的瞬态特性进行了理论研究。带相变蓄热存储的倾斜布置的盘式太阳能蒸馏器可延长海水在蒸馏器内流动的时间,提高热利用率,日产水量可达 4.6 L/m^2。盘式太阳能蒸馏器增加蓄热材料后,夏天蒸馏器的效率可高达 85.3%,在冬天太阳能蒸馏器的产水量也有明显的提高。

3.4　带有盖板冷却的倾斜式太阳能蒸馏器

增大蒸馏器内海水和盖板的温差有利于加快冷凝速率,而水蒸汽冷凝会放出潜热,这部分热量通过盖板扩散到环境中,同时也会增加透明盖板的温度,所以通过有效的措施降低盖板温度,从而增大盖板和海水的温差可有效地提高冷凝速率,从而提高产水量。

Dhiman 等[24]在多级芯型太阳蒸馏器的基础上进行了优化,在盖板的外表面保持一层水膜流动来降低盖板温度,增大盖板和蒸馏器内海水的温差,加快冷凝速率,从而提高了产水量,通过和多级芯型太阳蒸馏器进行实验对比,产水量增大 10% 左右。

4　结论与展望

倾斜式太阳能蒸馏器对于提高太阳能海水淡化

系统的经济性具有重要作用,综合倾斜式太阳能蒸馏器的研究现状,可在以下几个方面开展工作。

(1)通过调节芯体材料或阶梯挡水板高度,保持蒸馏器内适宜的海水层厚度,减小海水热容量,从而加快蒸发速度,以实现尽可能多的热量用于海水的蒸发。

(2)合理布置太阳能蒸馏器的倾斜角度和朝向,附加外置反射器或太阳能集热器,最大限度地提高太阳能蒸馏器的集热效率,提高蒸馏器内海水的蒸发温度,最大限度地提高蒸馏器单位面积的产水量。

(3)改善设计,利用冷却盖板的循环介质回收蒸汽潜热,用于加热海水,达到以蒸汽潜热驱动海水蒸发的目的,使热量循环利用,提高能源利用效率。

(4)增加蓄热材料,延长太阳能蒸馏器的运行时间,并合理利用夜间的低温环境,提高太阳能蒸馏器的产水量。

参考文献

[1] 郑鸿飞,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,2013:13 – 15.

[2] Phillips O Agboola, Al-Mutaz I S, Jamel Orfi, *et al*. Economic investigation of different configurations of inclined solar water desalination systems[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, (2014):1 – 7.

[3] Sadineni S B, Hurt R, Halford C K, *et al*. Theory and experimental investigation of a weir-type inclined solar still[J]. Energy, 2008, 33(1):71 – 80.

[4] Frick G, Sommeffeld J V. Solar still of inclined evaporating cloth[J]. Solar Energy, 1973, 14(4):427 – 431.

[5] Gandhidasan P. Theoritical study of tilted solar still as a regenerator for liquid desiccants[J]. Energy Convers and Management, 1983, 23(2):97 – 101.

[6] Sadineni S B, Hurt R, Halford C K, *et al*. Theory and experimental investigation of a weir-type inclined solar still[J]. Energy, 2008, 33(1):71 – 80.

[7] Hikmet Aybar. Mathematical modeling of an inclined solar water distillation system[J]. Desalination, 2006, 190(1/2/3):63 – 70.

[8] Ho-Ming Yeh, Lie-Chaing Chen. The effects of climatic, design and operational parameters on the performance of wick-type solar distillers[J]. Energy Convers and Management, 1986, 26(2):175 – 180.

[9] Hikmet S Aybar, Fuat Egelioglu, Atikol U. An experimental study on inclined solar water distillation system[J]. Desalination, 2005, 180(1/2/3):285 – 289.

[10] Mona M Naim, Mervat A Abd El Kawi. Non-conventional solar stills with charcoal particles as absorber medium[J]. Desalination, 2002, 153(1/2/3):55 – 64.

[11] Sodha M S, Kumar A, Tiwari G N, *et al*. Simple multiple-wick solar still: Analysis and performance[J]. Solar Energy, 1981, 26(2):127 – 131.

[12] Janarthanan B, Chandrasekaran J, Kumar S. Performance of floating cum tilted-wick type solar still with the effect of water flowing over the glass cover[J]. Desalination, 2006, 190(1/2/3):51 – 62.

[13] Helmy E Gad, Safya M El-Gayar, Hisham E Gad. Performance of a solar still with clothes moving wick[A]. Fifteenth International Water Technology Conference[C]. Alexandria, 2011:28 – 30.

[14] Tanaka Hiroshi, Nakatake Yasuhito. Improvement of the tilted wick solar still by using a flat plate reflector[J]. Desalination, 2007, 216(1/2/3):139 – 146.

[15] Tanaka Hiroshi, Nakatake Yasuhito. One step azimuth tracking tilted-wick solar still with a vertical flat plate reflector[J]. Desalination, 2009, 235(1/2/3):1 – 8.

[16] Abdul Jabbar N Khalifa, Hussein A Ibrahim. Effect of inclination of the external reflector of simple solar still in winter: An experimental investigation for different cover angles[J]. Desalination, 2010, 264(1/2):129 – 33.

[17] Adel M Abdel Dayem. New inclined wick solar water distiller[A]. Tenth International congress of fluid dynamics[C]. Egypt, 2010:16 – 19.

[18] Omara Z M, Mohamed A Eltawil, ElSayed A ElNashar. A new hybrid desalination system using wicks/solar still and evacuated solar water heater[J]. Desalination, 2013, 325(16):56 – 64.

[19] Tabrizi Farshad Farshchi, Dashtban Mohammad, Moghaddam Hamid. Experimental investigation of a weir-type cascade solar still with built-in latent heat thermal energy storage system[J]. Desalination, 2010, 260(1/2):248 – 253.

[20] Mohammad Dashtban, Farshad Farshchi Tabrizi. Thermal analysis of a weir-type cascade solar still integrated with PCM storage[J]. Desalination, 2011, 279(1/2/3):415 – 422.

[21] Gowtham, Mohan, Hari, *et al*. Solar desalination with latent heat storage materials and solar collector[J]. Department of Mechanics Engineering and Automation, 2011, 2:126 – 134.

[22] Radhawan A M. Transient performance of a stepped solar still with built-in latent heat thermal energy storage[J]. Desalination, 2004, 171(1):61 – 76.

[23] El-Sebaii A A, Al-Ghamdi A A, Al-Hazmi F S, *et al*. Thermal performance of a single basin solar still with PCM as a storage medium[J]. Applied Energy, 2009, 86(7/8):1187 – 1195.

[24] Dhiman N K, Tiwari G N. Effect of water flowing over the glass cover of a multi-wick solar still[J]. Energy Convers and Management, 1990, 30(3):245 – 250. ■