

蓄热式倾斜芯型太阳能蒸馏系统 实验研究

李强,任建波*,吕宏卿,王鑫,孙鹏浩,王可宁

(国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所,天津300192)

摘要:建立了蓄热式倾斜芯型太阳能蒸馏系统,在实际天气条件下进行了实验研究,分析了给水流量和倾斜角度等对系统性能的影响。结果表明,在倾斜角度为 45° 时,白天的产水量最高可达 4.07 L/m^2 ,在倾斜角度为 30° 时,白天的产水量最高可达 3.67 L/m^2 ;随着给水流量的增大,太阳能蒸馏器的产水量降低;注入相变蓄热材料后夜间产水量最大可提高104%,日产水量最高可达到 5.16 L/m^2 ,是传统式太阳能蒸馏器产水量的2.58倍。

关键词:相变蓄热;倾斜式;太阳能;海水淡化

中图分类号:P747.14

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)06-0141-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2016.06.034

Experimental research on the inclined solar distillation system with PCM as a storage medium

LI Qiang, REN Jian-bo*, LV Hong-qing, WANG Xin, SUN Peng-hao, WANG Ke-ning

(The Institute of seawater Desalination and Multipurpose Utilization, SOA, Tianjin 300192, China)

Abstract: The inclined solar distillation system is established. The experiments are performed under the condition of the practical weather outdoor. The performance of the system is analyzed with different feed water flow and inclination. The results show that, in the inclination of 45° , the daily water production can be up to 4.07 L/m^2 , and in the inclination of 30° , the daily water production can be up to 3.67 L/m^2 . The production water rate of solar distillation system is reduced with the increase of feed flow rate. The night water production could be increased by 104% after injecting PCM, and the highest water production could reach 5.16 L/m^2 . The production water is 2.58 times of a traditional solar distillation system.

Key words: PCM; inclined; solar; desalination

淡水资源短缺是人类一直面临的难题,尤其是在电力匮乏的偏远山区以及海岛。太阳能海水淡化技术对于解决海岛淡水资源短缺,偏远且电力资源不可到达的缺水地区的苦咸水淡化具有重要的意义。

传统式太阳能蒸馏器具有结构简单、取材方便、不需要常规能源等优点,因而广泛为人们所采用,但由于运行温度低、产水量不高、太阳能利用效率较低以及设备投资较高等弊端,在工程实际中的推广应用受到一定的限制,其日产水量在夏季时为 5.5 kg/m^2 ,而在冬季仅为 2 kg/m^2 ^[1]。为提高太阳能蒸馏器的经济性,众多学者^[2-6]开展了诸多研究,提出了不同形式的倾斜式太阳能蒸馏器来提高产水量,但太阳能的有效利用率有限,因此在现有的倾斜式太阳能蒸馏技术研究的基础上,提高太阳能蒸馏器的热效率和产水量具有重要的现实意义。本文中

将蓄热式太阳能蒸馏器与倾斜芯型太阳能蒸馏器进行耦合,设计并搭建了蓄热式倾斜芯型太阳能蒸馏系统,通过相变蓄热材料白天存储多余的太阳能,用于夜间海水在低温条件下蒸发来提高产水量,从而有效地提高倾斜式太阳能蒸馏器的性能。

1 实验流程

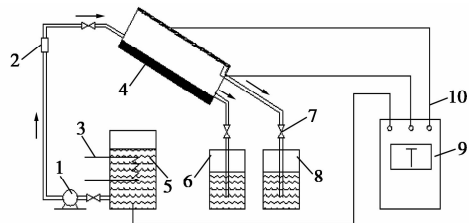
蓄热式倾斜芯型太阳能蒸馏系统流程如图1所示。海水给水通过液体分布器均匀地分布在芯体上,依靠重力作用润湿芯体,在吸液芯表面形成一层薄水膜,由于水膜的热容量比较低,水膜很快蒸发并形成水蒸汽,当盖板温度降至低于水蒸汽的露点温度时,水蒸汽在盖板的内表面发生冷凝,并形成冷凝水,在重力的作用下沿盖板向下流动,汇集到淡水回收槽内,流至产品水箱8内,未蒸发的浓盐水流入浓盐水槽6中。同时相变蓄热材料吸收多余的太阳

收稿日期:2015-11-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51209043)

作者简介:李强(1989-),男,硕士,助理工程师,主要从事热法海水淡化和可再生能源海水淡化技术研究;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,022-87898150,renjb0625@gmail.com。

能,并通过固-液相变来储存热能,这些热能可用于夜间海水的蒸发,根据季节的温度特点,可选用不同熔点的相变蓄热材料来储存太阳能。



1—水泵;2—流量计;3—加热器;4—太阳能蒸馏器;
5—海水贮水槽;6—浓海水贮水槽;7—阀门;
8—淡水贮水槽;9—测温系统;10—温度传感器

图 1 蓄热式倾斜芯型太阳能蒸馏器系统流程图

2 实验装置设计

蒸馏系统主要由 4 部分构成,分别为太阳能蒸馏器、海水输送及储存系统、测温系统和小型气象站。

蒸馏系统如图 2 所示,蒸馏器的有效蒸发面积为 $800\text{ mm} \times 800\text{ mm}$,腔体总高度为 150 mm ,其中蓄热箱高度为 50 mm ,盖板为 3 mm 厚的透明玻璃板,可透过 92.0% 以上的太阳光,紫外线透过率达 73.5% 。在蒸馏器底部铺设一层黑色芯体材料,芯体材料具有强吸附功能,对可见光的吸收率达 98.0% ,对红外辐射的吸收率达 99.0% 。在芯体材料上方安装液体分布器,以保证液体呈均匀分布状态,芯体材料下方为蓄热箱,蓄热材料选用固体石蜡,熔点为 $30\text{ }^\circ\text{C}$,相变焓约为 200 kJ/kg ,储热密度为 150 MJ/m^3 ,通过相变在白天储存多余的太阳能。在蒸馏器腔体外侧包裹岩棉作为保温层,以减少热损失,在保温层外部包裹一层不锈钢板,防止保温层破损。



图 2 蓄热式倾斜芯型太阳能蒸馏器装置

支撑架上半部分用以支撑蒸馏器,并可调节倾斜角度,下半部分主要用于放置水箱、水泵以及测温系统等。水泵采用 DP-125 型隔膜泵,吸程为 5 m ,

转速为 375 r/min ,流量计选用 LZD 型海水流量计,量程为 80 L/h 。

测温系统主要用于测量玻璃盖板温度、芯体表面海水层温度、蓄热材料温度、腔体内水蒸汽温度,以及进、出水口处温度,2 个蒸馏器共安装 14 个贴片式热电阻,测量精度为 $\pm(0.15 + 0.002|t|)\text{ }^\circ\text{C}$, $|t|$ 为实测温度的绝对值,通过温度传感器和数据采集模块与电脑相连,对各点温度进行实时监控并自动记录时间间隔为 1 min 各点的温度数据。

小型气象站如图 3 所示,主要是对环境温度、风速、风向以及太阳能辐射强度等实时数据进行监测并记录。通过气象站监测软件与电脑相连,对气象数据进行时间间隔为 1 min 的自动记录。



图 3 小型气象站

3 实验结果与分析

影响太阳能蒸馏系统性能的因素除了太阳能辐射强度、风速、环境温度等自然因素以外,还有蒸馏器的倾斜角度、给水流量、芯体材料的性能、蓄热材料的热容量等。本实验主要分为 2 组,1 号蒸馏器蓄热箱内注入了蓄热材料,2 号蒸馏器未加入蓄热材料,在不同倾斜角度 (30° 、 45°) 和流量 (10 、 20 、 30 、 40 L/h) 的条件下进行实验对比分析,并对相变蓄热材料在白天和夜晚对蒸馏器产水量的影响进行研究分析。

3.1 太阳能辐射强度对系统性能的影响

太阳能辐射强度是影响太阳能蒸馏系统性能的重要因素之一,小型气象站可以对太阳能总辐射、直射辐射、散射辐射进行自动监测,并通过电脑对数据进行实时记录,以 2015 年 3 月 23 日的气象站实验数据为例,太阳能辐射数据如表 1 所示。

表 1 不同时间段的辐射值

时间/h	总辐射/ $(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2})$	直射/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	散射/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$
8	449	973	18
9	486	1071	23
10	652	1058	35

续表

时间/h	总辐射/(MJ·m ⁻²)	直射/(W·m ⁻²)	散射/(W·m ⁻²)
11	740	1124	51
12	792	1128	57
13	754	1144	69
14	670	1013	62
15	552	380	50
16	378	317	27
17	222	305	12

从辐射强度与产水量关系曲线(图4)中可以看出,太阳能辐射强度在中午之前是呈逐渐上升的状态,而在下午又会逐渐降低,在12至15点之间达到最高产水量。

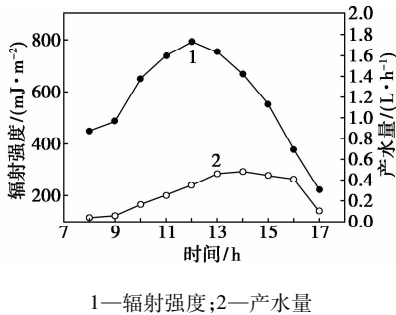


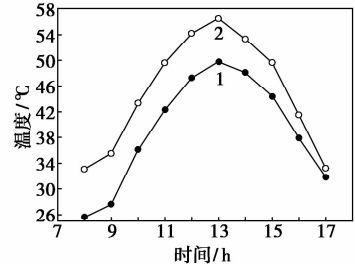
图4 辐射强度与产水量关系曲线

从图4中可以看出早晨的产水量较低,主要是由于玻璃盖板和内表面的冷凝水滴会吸收部分太阳能并转化为热能,以及水蒸汽冷凝后放出的潜热致使盖板温度升高,从而降低海水和盖板之间的温差,导致产水量较低;随着太阳能辐射强度的增大,经过一段时间吸收太阳能辐射后,芯体表面温度升高,腔体内的海水温度也随之升高,增大与盖板之间的温差,加快蒸发速率,从而增大产水量。

3.2 蓄热材料对系统性能的影响

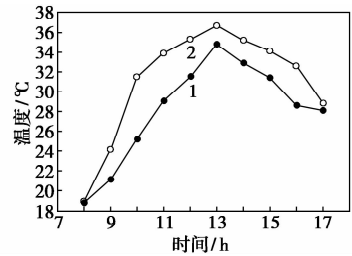
太阳能蒸馏器腔体内、玻璃盖板以及芯体材料的温度随时间变化曲线分别如图5~图7所示,通过对比1号和2号蒸馏器腔体内温度,可以看出注入蓄热材料后,1号蒸馏器腔体内温度要略低于未注入蓄热材料的2号蒸馏器腔体的温度,而芯体材料温度相反,这是由于蓄热材料要吸收一部分热能,导致蒸馏器腔体内温度降低,芯体材料的温度升高,而盖板温度的变化与之相反,注入蓄热材料后会降低盖板和液膜之间的温差,从而导致产水量降低,但在夜间低温条件下,蓄热材料会释放热能,为海水蒸发提供驱动力,在低温条件下增大夜

间的产水量。



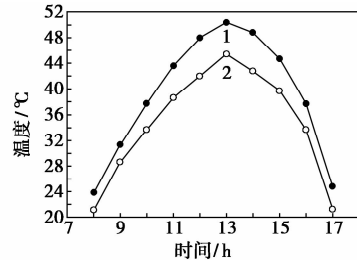
1—1#蒸馏器;2—2#蒸馏器

图5 蒸馏器腔体内温度



1—1#蒸馏器;2—2#蒸馏器

图6 玻璃盖板温度



1—1#蒸馏器;2—2#蒸馏器

图7 芯体材料温度

夜间产水量数据如表2所示,相变蓄热材料在白天阳光充足时吸收多余的太阳能并转换为热能,由于在夜晚环境温度比较低,通过释放热能来加热海水,从而增大液膜和盖板之间的温差,增大夜间产水量。加入相变蓄热材料后,会降低蒸馏器在白天的产水量,但提高了夜间的产水量以及太阳能热利用率,从而会进一步提高倾斜式太阳能蒸馏器的总产水量,夜间产水量最高可提高104%,总产水量最

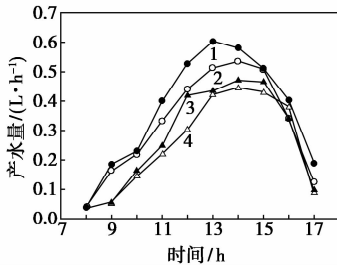
表2 夜间产水量数据

流量/(L·h ⁻¹)	蒸馏器产水量/L	
	1#	2#
10	1.36	0.72
20	1.29	0.63
30	1.02	0.53
40	0.98	0.48

高可达 5.16 L/m², 是传统式太阳能蒸馏器产水量的 2.58 倍。

3.3 给水流量对系统性能的影响

给水流量的大小也是影响倾斜式太阳能蒸馏器的重要因素, 给水流量与产水量之间的关系如图 8 所示, 随着流量的增大, 产水量随之降低。流量增大会加快海水在蒸馏器内的流速, 致使停留时间短, 海水没有吸收足够的热能蒸发而流出蒸馏器, 增大了蒸馏器的热损失, 降低了热利用率。



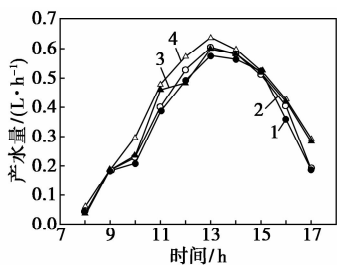
流量: 1—10 L/h; 2—20 L/h; 3—30 L/h; 4—40 L/h

图 8 不同流量下的产水量

从图 8 中数据可以看出, 随着流速的增大, 产水量峰值后移, 这是高流速造成的能量损失的直接表现, 在较低流速、太阳辐射最高时, 水温达到全天的最高值, 产水量也较高; 而在高流速下, 系统水温升高没有快速反映出来, 因此出现产水量峰值后移的现象。

3.4 倾斜角度对系统性能的影响

合适的倾斜角度可以最大限度吸收太阳能辐射, 致使产水量达到最大。不同倾斜角度与蒸馏器产水量之间的关系曲线如图 9 所示, 倾角为 45°时, 太阳能蒸馏器的日产水量要略高于倾角为 30°时的产水量, 特别是在下午, 当太阳能辐射强度降低后差距较为明显。倾角为 30°时, 白天最大产水量可达 3.67 L/m², 倾角为 45°时, 太阳能蒸馏器的产水量可达 4.07 L/m²。而在太阳能不充足的情况下, 1[#]蒸馏器的产水量要略高于 2[#]蒸馏器的产水量。



1—30°1[#]; 2—30°2[#]; 3—45°1[#]; 4—45°2[#]

图 9 不同倾斜角度下的产水量

蒸馏器产水速率随着倾斜角度的增大而增加。随着倾斜角度的增大, 冷凝面上的蒸馏水液膜迅速滑落至淡水收集槽中, 使得液膜迅速变薄, 会加速水蒸汽在盖板内表面冷凝, 随着倾斜角度的增大, 冷凝面上的液膜变薄的趋势将趋于缓慢, 液膜热阻逐渐以较慢的速度减小。在实际运行过程中, 为了使蒸馏器的吸热面尽可能多地吸收太阳辐射, 倾斜角度应根据季节的特点进行调整。

4 结论

设计并搭建了蓄热式倾斜芯型太阳能蒸馏器实验装置平台, 在不同的实验条件下, 对倾斜式太阳能蒸馏器进行了实验研究, 实验结果表明, 在相同给水流量的条件下, 倾角为 45°时, 太阳能蒸馏器的日产水量要略高于倾角为 30°时的产水量; 在相同倾斜角度的条件下, 随着给水流量的增大, 太阳能蒸馏器的产水量降低, 在保证有足够海水蒸发的前提下, 尽量降低海水给水的流速; 在倾斜角度为 45°, 流量为 10 L/h 的条件下, 白天产水量最高可达 4.07 L/m²; 蓄热材料在阳光充足的情况下, 会略微降低蒸馏器的产水量, 而在夜晚则会提供大量热能, 使总产水量增大, 加入蓄热材料后, 夜间产水量最大可提高 104%, 总产水量最高可达到 5.16 L/m²。

参考文献

- [1] Sampathkumar K, Senthilkumar P. Utilization of solar water heater in a single basin solar still—An experimental study[J]. Desalination, 2012, 297: 8–19.
- [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, 1: 1–7.
- [3] Kalidasa K Murugavel, Anburaj P, Samuel Hanson R, et al. Progresses in inclined type solar stills[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 20: 364–377.
- [4] 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: 56–64.
- [5] 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, (1/2/3): 248–253.
- [6] 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. ■