

1种超声雾化太阳能海水淡化系统的研制

杨可¹, 陈学攀¹, 郭浩², 彭昌盛¹

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 京科高新(北京)科学研究所, 北京 101111)

摘要 将均匀曝气与超声雾化2种技术结合, 设计研制出一种新型的增湿除湿式太阳能海水淡化系统, 并研究了太阳光辐射照度与温度的关系以及超声雾化、液位、气体流量对产水速度的影响。结果表明, 太阳光辐射照度与温度呈正相关, 超声雾化对产水量有显著影响, 在全天累计曝辐射量为 $22.96 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、液位为 20 cm 、气体体积流量为 $15.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 的情况下, 系统累计产水量为 20 L/d , 热效率为 0.56 , 单位面积产水量为 $5.6 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 是前人成果的 $1.2 \sim 2.6$ 倍, 产水性能提升明显。

关键词 海水淡化; 太阳能; 增湿除湿; 均匀曝气; 超声雾化

中图分类号 TP747.7

文献标识码 A

文章编号 1000-3770(2017)10-0033-004

海水淡化, 作为解决水资源危机的重要方法, 已经成为世界各国的研究重点。海水淡化的方法有很多种, 常规方法有多级闪蒸、多效蒸馏以及反渗透3种, 但这3种技术都以化石燃料作为能源, 容易陷入“能源换淡水”的怪圈, 因此, 将太阳能应用到海水淡化领域, 一定程度上可以缓解能源与淡水之间的矛盾。

与传统的太阳能蒸馏器相比, 增湿除湿式太阳能海水淡化系统具有占地面积小、受环境影响小、单位面积产水量高的特点, 得到了越来越广泛的应用^[1-2]。为了进一步提高增湿除湿法的产水量, 袁怡刚等在增湿系统内通过水膜加湿器增大了海水与空气的接触面积, 系统产水率提高了 $25\% \sim 50\%$, 但更换膜组件等增加了系统成本^[3]。随后郭丽炜等设计了1种均匀曝气的经济型太阳能海水淡化装置, 在蒸发舱内放置曝气管, 曝气管上布有均匀的小孔, 热空气在风机的作用下通入曝气管均匀喷出, 实验结果证明这种方法提高了海水的蒸发量, 蒸发量较不曝气条件下提高了 20% 左右, 但是热效率仅为 0.07 ^[4]。刘忠等采用多效曝气技术回收热凝潜热, 提高了系统效率并且最大小时产水量可以提升至 1.67 L/h , 但第1级的进水温度需要达到 90°C , 对系统温度要求较高^[5]。KHALI 等用微孔板, 对热海水实现均匀曝气, 并用保温材料包裹系统, 防止热量散失, 实验测得日产水

量可达到 21 L/d , 热效率为 0.53 , 但是蒸发速度受水温影响较大, 水温降低时, 蒸发速度也迅速降低^[6]。

席细平等利用超声波的特性和基本原理, 尝试将超声波雾化技术运用到海水淡化领域中^[7-8]。张凌云等设计了1种耦合超声波雾化与露点凝结技术的新型海水淡化装置, 实验结果表明, 超声波在较低的水温下, 仍然可以使水分子迅速雾化成微米级雾滴, 增加蒸发面积, 从而显著提高蒸发量^[9]。但露点凝结技术使用的降膜传质方式, 水泵的功耗远大于曝气传质的空气泵功耗^[10]。

目前, 增湿除湿式海水淡化系统存在的问题有传热效率低、功耗大、低温条件下产水不稳定等。对这些题, 本研究设计了1种新型增湿除湿太阳能海水淡化系统。该系统具有以下特点: 1) 采用曝气与超声雾化相结合的方式, 增大了传热面积, 因此传热效率提高; 2) 采用真空管集热器对进水加温, 空气集热器预热进气, 避免对常规能源的消耗, 降低了系统能耗; 3) 超声雾化的介入增加了气液传热面积, 保证了低温条件下的产水量。

1 实验部分

1.1 实验装置

新型的增湿除湿式太阳能海水淡化系统如图1所示, 系统主要由真空管式太阳能集热器(ETC)、

收稿日期 2016-11-24

基金项目 山东省重点研发计划项目(2016GSF115040), 环境基准与风险评估国家重点实验室开放课题(SKLECRA2013FP12)

作者简介 杨可(1992—)女, 硕士研究生, 研究方向为太阳能海水淡化技术, 联系电话 18300271020, 电子邮件 yangke_1992@163.com

联系作者 彭昌盛, 博士, 博士生导师, 电子邮件 cspeng@ouc.edu.cn

太阳能空气集热器 (SAC)、蒸发舱 (HUM)、冷凝器 (DEH)、淡水箱 (FWT) 以及光伏板 (PV) 等构成。

系统的工作流程如图 2 所示。

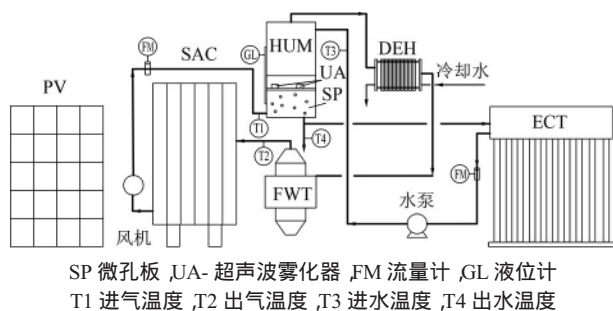


图 1 增湿除湿式太阳能海水淡化系统

Fig.1 The schematic diagram of solar humidification-dehumidification desalination system

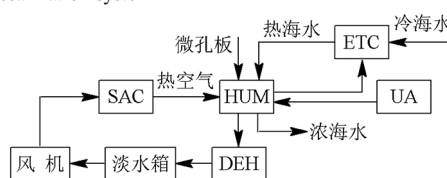


图 2 系统工作流程

Fig.2 The flow-chart of system

系统的热海水在 ETC 内吸收太阳能被加热, 自上而下流入 HUM, 冷空气先通过 SAC 被加热成热空气, 然后在风机的作用下进入蒸发舱底部与热海水进行热交换, 大量水分子形成水蒸气, 在压力和气流的作用下进入冷凝器除湿形成淡水, 淡水在重力和气流作用下进入淡水箱, 除湿后的冷空气回流至太阳能空气集热器内重新被加热进入蒸发舱。蒸发舱内未蒸发的海水通过三通阀门, 一部分作为补充海水进入到真空管式太阳能集热器内, 提高了补给海水的初始温度, 有利于海水的升温, 多余的海水通过浓海水出口排出, 水泵、风机等需要的电能均由光伏板提供。

实验设计了 2 种不同的蒸发条件, 第 1 种是只进行均匀曝气, 在蒸发舱底部放置了 1 个孔径 1 mm、孔间距 5 mm 左右的微孔板, 使热空气通过微孔板均匀喷出, 形成大量气泡; 第 2 种是同时进行均匀曝气和超声波雾化, 在微孔板上放置超声波雾化装置, 在适当的条件下, 超声波雾化器迅速将海水雾化成细小的雾滴, 在液面上形成白色的气雾。

实验在室外进行, 从 8:00 开始 20:00 结束, 环境温度 25~30 °C, 环境相对湿度为 34.6%~96.7%, 冷凝水的体积流量 17.6 L/h。系统采用 10 支 ETC, 采光面积为 1.75 m², SAC 采光面积为 2 m², 同时整个淡化系统均涂有防腐蚀阻垢涂层。实验在各测点布置有 K 型热电偶等传感器, 测量水温及气体温

度, 蒸发舱外部安装有刻度尺, 实时观察液面高度。

1.2 系统热效率计算

采用产水量和热效率 η 来评价太阳能海水淡化系统性能的好坏, 产水量越大, 表明系统性能越强, 热效率 η 是获得淡水理论所需的热量与系统所实际获得的热量的比:

$$\eta = q_{m,w} h_{fg} / \Phi$$

式中 $q_{m,w}$ 为淡水产量, h_{fg} 为水蒸发质量焓 (近似取 2.3 kJ/g), Φ 为太阳光辐通量。 Φ 可以通过下式得到:

$$\Phi = EA$$

式中 E 为太阳光辐射照度, A 为集热面积。

2 结果与讨论

2.1 太阳辐射照量对温度的影响

实验测试了进气体积流量在 15 m³/h 条件下, 太阳光辐射照度、进出口水温 and 进出口气温随时间的变化, 如图 3 所示。

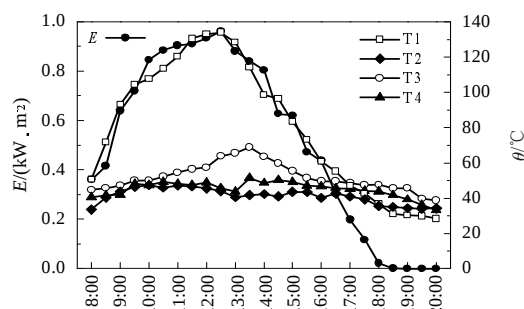


图 3 太阳光辐射照度和进出口水温、进出口气温随时间变化
Fig.3 Changes of solar irradiance, water and air temperatures of inlet and outlet with time

由图 3 可知, 太阳光辐射照度先逐渐上升, 12:30 时达到最大, 然后缓慢降低, 19:00 日落之后减少至 0。进气温度 (T1) 的变化趋势与辐射照度同步, 在最大辐射照度处达到最大, 为 134.1 °C; 当辐射强度开始减弱的时候, 进气温度也开始降低, 原因是空气比热较小, 对辐射照度的变化敏感, 出气温度 (T2) 起伏较小, 在 34~48 °C, 18:30 之后, 出气温度 (T2) 开始高于进气温度 (T1), 原因是日落之后, 进气温度迅速降低, 通过热海水后, 吸收了热海水的热量, 所以温度略高于进气温度, 进水温度 (T3) 随着辐射照度不断增强, 温度也不断上升, 达到最大后随着辐射照度的减弱, 温度也逐渐降低, 与进气温度变化趋势不同的是, 水温变化要比太阳辐射量变化滞后, 最高水温较最大辐射照度延后了 1.5 h, 在 13:30 时达到最大的 68.8 °C。

由图 3 还可知, 进气和进水的平均温度分别为 80.7°C 和 52°C , 因此海水对系统不会造成严重的腐蚀问题。

2.2 曝气和超声波雾化对产水量的影响

为了进一步提高系统的产水量, 实验在蒸发舱内放置了一个超声雾化装置, 雾化装置呈圆柱形, 工作功率为 19 W 。实验设计了只通气(不装微孔板)、只均匀曝气(装微孔板)和均匀曝气加超声雾化 3 种情况, 并分别测定了 3 种情况下的产水量 q_v (通过量取每小时淡水箱内的淡水体积变化得到), 结果见图 4。

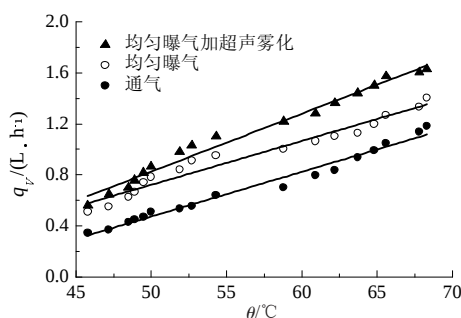


图 4 曝气和超声波雾化对产水量的影响

Fig.4 The influence of the ultrasonic atomizing and air bubble on water yields

由图 4 可知, 在通气、均匀曝气和均匀曝气加超声波雾化 3 种情况下, 产水速度均随着进水温度的升高而升高, 基本呈线性关系。在同一温度下, 均匀曝气加超声波雾化下的产水速度明显高于前 2 种, 当水温为 60°C 时, 通气、均匀曝气、均匀曝气加超声波雾化下的产水量分别为 0.8 、 1.1 、 1.36 L/h 。

2.3 液位对产水量的影响

因为超声雾化装置的使用存在一个优化的液位高度, 当液位过低时, 超声空化作用较弱, 装置无法雾化; 当液位过高超过超声波在液体中能量密度最大处时, 溶液的雾化速率也会急剧减小^[11]。因此实验为了寻找出系统优化液位高度, 分别在 15 、 20 、 25 cm 3 种液位下, 分别测试了产水量和累计产水量 V 随时间的变化, 结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 当液位从 15 cm 升高至 20 cm 时, 产水量也相应提高, 最大产水量由 1.8 L/h 提高至 2.3 L/h ; 当液位继续升高至 25 cm 时, 蒸发舱内海水雾化呈现困难, 基本没有雾气产生, 最大产水量降低 1.5 L/h 。因此, 优化产水液位为 20 cm , 累计产水量为 21 L/d 。

2.4 气体流量对产水量的影响

因为气体流量对增湿除湿式太阳能海水淡化系

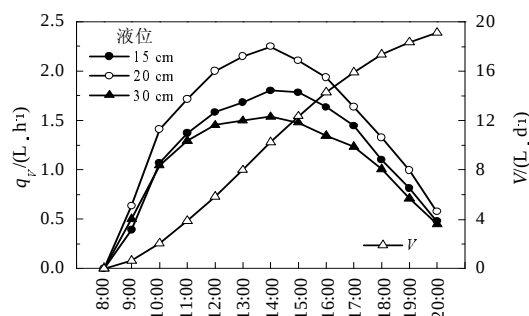


图 5 不同液位下产水量和累计产水量随时间的变化

Fig.5 Changes of instantaneous water yield and total yield with time under different water level

统的产水量往往有显著影响, 因此分别研究了气体体积流量 11 、 13 、 $15\text{ m}^3/\text{h}$ 时系统的产水量^[12-13]。结果如图 6 所示。

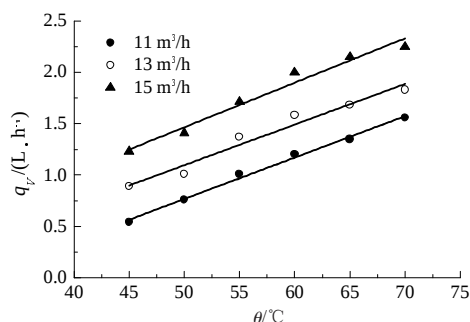


图 6 不同气体流量下产水量随温度的变化

Fig.6 Change of water yield with temperature under different inlet air flow rate

由图 6 可知, 在同一温度下, 产水量与气体流量呈正相关, 在 65°C 的水温下, 进气体积流量从 $11\text{ m}^3/\text{h}$ 提高 $15\text{ m}^3/\text{h}$, 相应的产水量从 1.4 L/h 提高至 2.2 L/h , 提高了 57% 。原因是气体流量增大, 一方面加剧了液面扰动, 提高了传热系数; 另一方面增大了驱动力, 有利于更多水蒸气进入冷凝器。尽管气体流量越大, 产水量越高, 但会增加系统能耗, 因此在实际操作过程中, 需要选取合适的进气流量。

2.5 系统热效率计算

测试当天, 累计太阳光曝辐射量为 $22.96\text{ MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 采光面积为 3.75 m^2 , 则太阳能集热器接受的总太阳光辐通量为 86 MJ/d ; 全天累计淡水产水量为 21 kg , 由此计算可得系统的热效率 $\eta=0.56$ 。表 1 列举了几位国内外学者的研究成果, 并与本系统的产水性能进行比较。

由表 1 可知, 本系统的单位面积产水量为 $5.6\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 是之前成果的 $1.2\sim 2.6$ 倍。

3 结 论

为了提高增湿除湿式海水淡化系统的产水量和

表 1 不同增湿除湿系统产水性能比较

Tab.1 Performance Comparison between different solar HDH systems

研究者	工艺特点	$V^3/(L \cdot m^2 \cdot d^3)$	η	文献
ZHANI	曝气管曝气	2.39	0.27	[14]
郭丽玮	只通气	0.46	0.07	[4]
AMER	微孔板曝气,系统保温	3.67	0.41	[15]
KHALIL	微孔板曝气联合超声雾化	4.8	0.53	[6]
本系统		5.6	0.56	

①单位面积产水量。

热效率,设计研制了 1 套新型太阳能海水淡化系统,将均匀曝气与超声波雾化相结合,通过增加海水的蒸发面积,提高系统的产水量,研究了太阳光辐射照度、温度、超声雾化、液位和气体流量对产水速度的影响,确定了系统的优化工作参数。

均匀曝气与超声波雾化联合使用,可以显著提高系统产水速度,在 60 °C 水温下,系统仍保持较高的产水量 1.36 L/h,该系统在气体体积流量 15 m³/h、液位 20 cm 工作条件下,产水性能最佳。

系统最大产水量为 2.2 L/h,最大累计产水量为 20 L/d,热效率为 0.56。

系统的单位面积产水量为 5.6 L/(m²·d),是前人成果的 1.2~2.6 倍,产水性能良好。

参考文献:

- [1] 李长松,徐畅达,王栋.热法海水淡化新兴技术研究进展[C].南京:第十二届长三角能源论坛——互联网时代高效清洁的能源革命与创新,2015.
- [2] PAREKH S, FARID M M, SELMAN J R, et al. Solar desalination with a humidification-dehumidification technique-a comprehensive technical review[J].Desalination,2004,160(2):167-186.

- [3] 袁怡刚,董勇,赖艳华,等.多级增湿太阳能海水淡化的实验研究[J].节能技术,2012,30(1):23-33.
- [4] 郭玮丽,鼓泡增湿-去湿太阳能海水淡化技术的研究[D].天津:天津大学,2009.
- [5] 刘忠,曾胜,程涛涛,等.多效鼓泡蒸发太阳能海水淡化系统的稳态实验研究[J].太阳能学报,2012,33(3):380-385.
- [6] KHALIL A, EL-AGOUZ S A, EL-SAMADONY Y A F, et al. Solar water desalination using an air bubble column humidifier[J].Desalination,2015,372:7-16.
- [7] 席细平,马重方,王伟.超声波技术应用现状[J].山西化工,2007,27(1):25-29
- [8] 席细平.应用超声波技术海水淡化的基础实验研究[D].北京:北京工业大学,2007.
- [9] 张凌云.超声波露点法海水淡化关键技术研究[D].青岛:青岛理工大学,2011.
- [10] 陶钧,官建国,曾胜,等.增湿去湿海水淡化技术的研究进展[J].化工进展,2012,31(7):1419-1424.
- [11] 黄晖,姚熹,汪敏强,等.超声雾化系统的雾化性能测试[J].压电与声光,2004,26(1):62-64.
- [12] TOW E W, LIENHARD J H. Experiments and modeling of bubble column dehumidifier performance[J].International Journal of Thermal Sciences,2014,80: 65-75.
- [13] BEHNAM P, SHAFII M B. Examination of a solar desalination system equipped with an air bubble column humidifier, evacuated tube collectors and thermosyphon heat pipes[J].Desalination,2016,397:30-37.
- [14] Zhani K. Solar desalination based on multiple effect humidification process: thermal performance and experimental validation[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2013,24:406-417.
- [15] ZAMEN M, AMIDPOUR M, REZAKHANI N. Theoretical and experimental investigation of humidification process in supersaturated state[J].Desalination,2015,369:165-174.

Development of a Solar Desalination System Based on Ultrasonic Atomization

YANG Ke¹, CHEN Xuepan¹, GUO Hao², PENG Changsheng¹

(1.College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2.Beijing Institute of high-tech Environmental Science, Beijing 101111, China)

Abstract: A novel solar humidification-dehumidification desalination system couple with air bubble and ultrasonic atomization was designed and developed. And the relationship of sun-light irradiance and temperature, the effect of ultrasonic atomizing, water level, air flow rate on water production rate was studied. The results showed that the sun-light irradiance and water temperature had positive relation, and ultrasonic atomization strongly affected the water yield. When all day accumulated radiance exposure, water level and air volume flow rate was 22.96 MJ/(m²·d), 20 cm and 15.4 m³/h respectively, the water yield, heat efficiency and daily productivity per area was 20 L, 0.53, and 5.6 L/(m²·d) respectively, which was 1.2~2.6 times than previous research results, the water production performance improved obviously.

Keywords: desalination; solar energy; humidification-dehumidification; air bubble; ultrasonic atomization

对接国家战略,发展海洋经济