

文章编号:0254-0096(2016)12-3214-05

雾化加湿除湿海水淡化中蒸发过程实验研究

原郭丰¹, 赵子竞^{1,2}, Jakob Berg Johanson^{1,3},
李 兴¹, 徐 立¹, 李振锋⁴

(1. 中国科学院电工研究所, 中国科学院太阳能热利用与光伏系统重点实验室, 北京 100190;

2. 中国民航大学航空工程学院, 天津 300300; 3. 丹麦科技大学, 灵比 DK-2800 Kgs;

4. 广东五星太阳能股份有限公司, 东莞 523051)

摘 要: 将雾化强化加湿技术引入加湿除湿海水淡化系统, 搭建雾化加湿过程性能测试平台, 并对不同操作下雾化加湿器内的雾滴蒸发与空气热湿过程进行实验研究。实验表明, 气液体积比与进口空气温度对加湿器的加湿性能影响较大, 当加湿器进口空气温度为 90 ℃, 气液体积比为 $(20\sim 25)\times 10^3$ 时, 加湿器出口温度约为 36 ℃, 出口相对湿度在 90% 以上, 蒸发率在 50% 以上。

关键词: 海水淡化; 雾化蒸发; 热质传递; 气液体积比; 实验研究

中图分类号: TK513.5

文献标识码: A

0 引 言

加湿除湿海水淡化技术具有规模灵活、运维简单、可利用低位热能(如太阳能、地热、工厂废热)等优点, 被认为是小容量太阳能淡化中最具前景的方法之一^[1-4]。加湿器内空气的加湿过程是影响加湿除湿海水淡化系统性能及系统设计的关键因素。西北工业大学张鹤飞^[5]、高蓬辉等^[6]提出采用蜂窝加湿的太阳能加湿除湿海水淡化技术, 对其加湿中的热质传递过程进行研究, 并进行了热质传递数学分析。张立琚等^[7]、张旭朋等^[8]对影响鼓泡式加湿器的加湿性能因素进行了实验研究。

近年来, 美国、欧洲和中东等国家和地区均制定了对加湿除湿海水淡化技术研究的资助计划^[9-11]。中国科学院电工研究所于 2009 年建成一台基于蜂窝加湿的吨级太阳能加湿除湿海水淡化实验示范系统^[12, 13]。为进一步强化加湿器内的热质传递, 本研究将雾化蒸发技术引入加湿除湿海水淡化系统, 针对进口空气温度、海水初始温度及气液体积比等对雾化加湿过程的影响进行实验研究, 为海水淡化系统的优化设计提供实验基础。

1 雾化蒸发性能实验平台

雾化加湿除湿海水淡化蒸发过程实验测试平台如图 1 所示, 主要包括: 变频风机、计量泵、空气加热器、恒温水箱、雾化器、冷凝器等。空气经加热器调温后进入雾化加湿器, 与雾化液滴进行热质交换, 加湿器出口热湿空气进入冷凝器冷凝。进口空气通过电加热器在 20~110 ℃ 之间进行调节, 空气流量通过管道阀门进行调节, 喷淋海水的温度和流量分别通过恒温水箱及计量泵进行调节, 并采用安捷伦对空气及喷流水的温度、湿度及流量进行监测, 主要设备如表 1 所示。

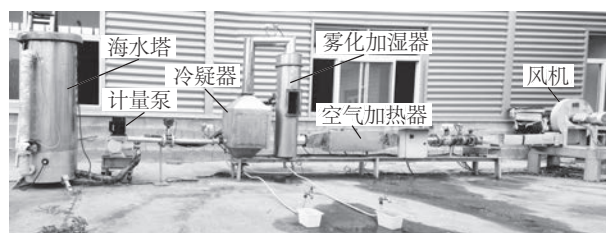


图 1 雾化加湿除湿海水淡化蒸发过程测试平台

Fig. 1 Spray atomization evaporation performance test platform

收稿日期: 2014-12-05

基金项目: 国家自然科学基金(51476164; 51106150); “十二五” 国家科技支撑计划(2012BAA05B06); 广东省引进创新创业团队计划(2013N070)

通信作者: 原郭丰(1978—) 男, 博士、副研究员, 主要从事太阳能中低温热利用及海水淡化技术方面的研究。yuanguofeng@163.com

表1 测试平台主要部件与仪表

Table 1 Main components and instrument list of test platform

名称	型号	数量	精度
计量泵	J 1.6A 24/1MPa	1台	±1%
风机	9-19 4A-6.3A	1台	±2%
空气加热器	QL-KQ-8956	1台	—
恒温水箱	—	1个	±1℃
雾化器	1/4FN-SS 1.0	1支	±1.5%
冷凝器	—	1个	—
空气流量计	LWQ-80P2M2	2台	±1%
液体流量计	LG-WL50	1台	±0.5%
温湿度传感器	JSK-6VBDB	4支	±2%RH ±0.5℃
数据采集器	Agilent34970A	1台	±0.004%

影响雾化加湿性能的参数主要包括:空气流量、空气温度以及海水流量和海水温度。以气液体积比表征的空气流量与海水流量关系是加湿器设计的重要参数,其定义如式(1)所示:

$$R = \frac{V_a}{V_w} \quad (1)$$

式中, R ——气液体积比; V_a ——空气体积流量, m^3/h ; V_w ——海水喷雾量, m^3/h 。

加湿器的主要性能评价指标包括蒸发率、加湿器出口相对湿度和加湿器出口温度。蒸发率计算方法如式(2)所示:

$$a = \frac{m_{ev}}{m_w} \times 100\% \quad (2)$$

式中, a ——蒸发率, %; m_{ev} ——蒸发量, g/s ; m_w ——喷雾量, g/s 。

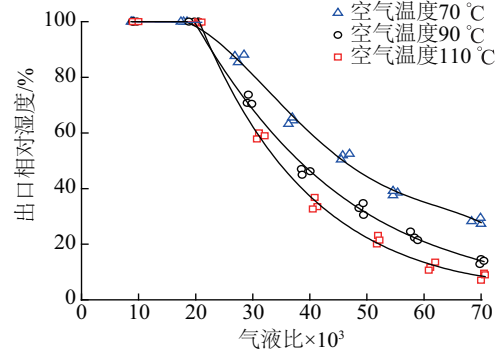
2 实验测试与分析

2.1 空气温度与气液体积比对加湿性能的影响

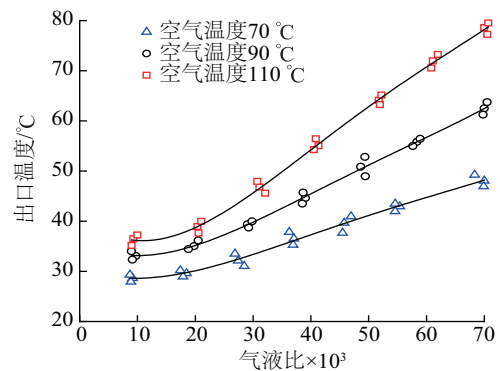
图2所示为进口水温为20℃,加湿器进口空气温度分别为70、90、110℃时,气液体积比对出口相对湿度、出口空气温度和蒸发率的影响。由图2可知,当加湿器进口空气温度一定时,随着气液比的增大,加湿器的蒸发率增大、出口温度升高,加湿器出口相对湿度减小;当气液比一定时,加湿器进口温度越高,加湿器的蒸发率越大、出口温度越高,加湿器出口相对湿度更小。

由图2a可见,当气液比低于 22.5×10^3 时,不同进口空气温度下加湿器出口空气相对湿度均能达

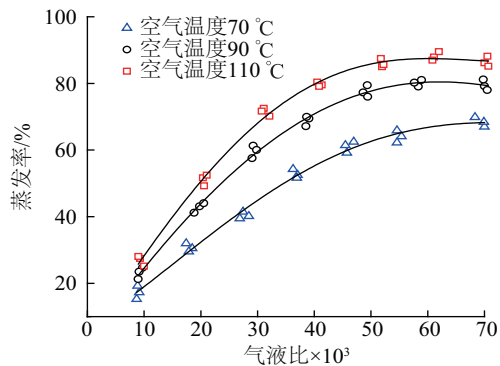
到90%以上,具有较好的加湿效果。随着气液比的增大,加湿器出口相对湿度逐渐减小,在进口空气温度较低的工况下,加湿器内空气温度快速降低,在相同的气液比条件下,具有更高的相对湿度,并不代表具有更高的含湿量。图2b与图2c表明,在相同的气液比变换条件下,出口空气温度与进口空气温度呈正向关系,进口温度可增大系统的蒸发率,



a. 出口相对湿度



b. 出口空气温度



c. 蒸发率

图2 不同初始空气温度下体积比对出口相对湿度、出口空气温度、蒸发率的影响

Fig. 2 The effect of gas liquid ratio on relative humidity, temperature, evaporation rate of outlet under different air temperature

量过大,加湿器内空气速度过快,热空气与雾滴接触,耦合时间缩短,热空气未被充分加湿就离开加湿器,也会进一步降低系统效率。

当进口空气温度为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、气液比小于 30×10^3 时,加湿器出口温度在 $28\sim 33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,加湿器出口相对湿度在 90% 以上,加湿器出口湿空气具有较为理想的饱和度且整个加湿过程热损相对较少。当加湿器进口气液比为 $(20\sim 25)\times 10^3$ 、进口空气温度约为 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,加湿器出口相对湿度大于 90% ,出口湿空气温度约为 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$,蒸发率可达 50% 以上,可为出口冷凝系统的设计提供足够的冷凝换热端温差和能量回收空间,有利于海水淡化系统的优化设计。

2.2 海水温度与气液比对加湿性能的影响

图 3 所示为进口空气温度为 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$,喷雾温度分别为 20 、 40 、 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,气液比对加湿器出口相对湿度、出口空气温度和蒸发率的影响。由图 3a 可知,当气液比小于 20×10^3 时,不同喷雾温度工况下加湿器出口湿空气均能达到饱和,结合图 3b 加湿器出口温度较低且在 $33\sim 36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 一个较小的范围波动,此时加湿器出口空气不饱和度引起的热损较小,并能为冷凝系统提供足够的冷凝换热端差,具有较高的能量利用率。随着气液比的进一步增大,出口相对湿度急剧减小,出口温度迅速升高,热空气未被充分加湿,导致系统除湿效率的降低。

由图 3c 可知,随着气液比的增大,气液间传热速率增强,蒸发率呈增大趋势,当气液比为 55×10^3 时,蒸发率为 80% ,达到最大值。当气液比一定时,

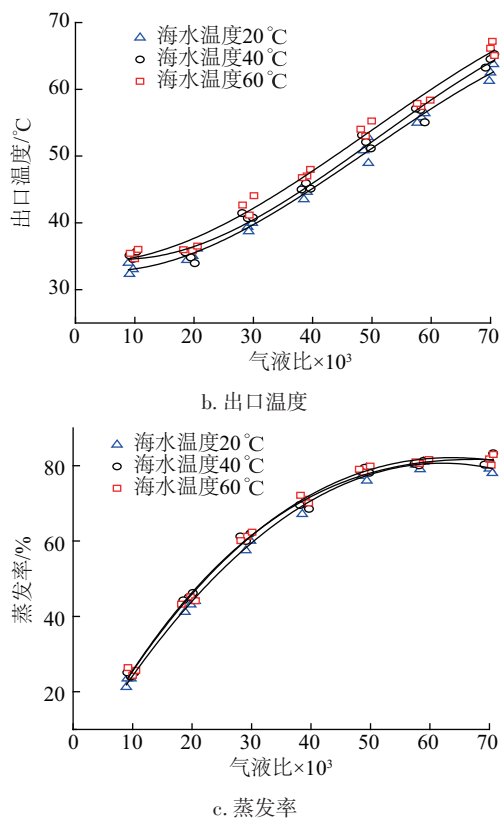
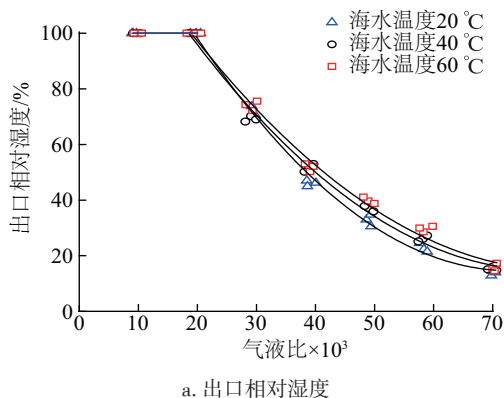


图 3 不同海水温度下气液比对出口相对湿度、出口温度、蒸发率的影响

Fig. 3 The effect of gas liquid ratio on relative humidity, temperature evaporation rate of outlet under different spray temperature

喷雾温度越高,加湿器的蒸发率、出口温度和出口相对湿度越高,当气液比为 25×10^3 ,当海水喷雾温度为 20 、 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,加湿器出口空气温度分别为 35 和 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$,蒸发率分别为 55% 和 58% ,出口相对湿度约为 80% 。相比加湿器进口空气温度的影响,喷雾温度对加湿器加湿性能的影响极小。

3 结 论

本文基于雾化加湿除湿海水淡化技术,搭建了雾化加湿器性能测试平台,并对海水温度、空气温度及气液比等对加湿性能的影响进行了实验测试与分析。实验结果表明:气液体积比与加湿器进口空气温度对加湿器的加湿性能影响较为显著,相比之下,海水喷雾温度的影响小得多。当加湿器进口空气温度为 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$,气液体积比为 $(20\sim 25)\times 10^3$ 时,加

湿器出口温度约为 36 ℃,出口相对湿度在 90%以上,蒸发率在 50%以上。

[参考文献]

- [1] Al-Hallaj S, Parekh S, Farid M M, et al. Solar desalination with humidification-dehumidification cycle: Review of economics[J]. Desalination, 2006, 195(1-3): 169—186.
- [2] Ettouney H, Rizzuti L. Solar desalination for the 21st Century[M]. Berlin: Springer, 2007, 1—18.
- [3] Michael Papapetrou, Marcel Wieghaus. Roadmap for the development of desalination powered by renewable energy[R]. Intelligent Energy for Europe Programme, 2010.
- [4] Eslamimanesh A, Hatamipour M S. Economical study of a small-scale direct contact humidification dehumidification desalination plant[J]. Desalination, 2010, 250(1): 203—207.
- [5] 张鹤飞. 太阳能热利用原理与计算机模拟[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2003: 21—43.
- [5] Zhang Hefei. Solar energy heat utilization principle and the computer simulation[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2003.
- [6] 高蓬辉, 张立琚, 张鹤飞. 蜂窝加湿器流体动力学模拟及传热传质分析[J]. 石油化工设备, 2007, 36(6): 5—9.
- [6] Gao Penghui, Zhang Lixi, Zhang Hefei. Fluid dynamics simulation of alveolate humidifier by heat and moisture transfer analysis[J]. Petro-Chemical Equipment, 2007, 36(6): 5—9.
- [7] Zhang Lixi, Gao Shiyuan, Zhang Hefei. Experimental researches of factors affecting bubbling humidification[J]. Intelligent System and Environment, 2011, 106: 359—364.
- [8] 张旭朋, 左 然. 一种新型太阳能海水淡化系统的实验研究[J]. 技能技术, 2010, 28(1): 51—55.
- [8] Zhang Xupeng, Zuo Ran. Experimental study on a new type solar desalination system[J]. Energy Conservation Technology, 2010, 28(1): 51—55.
- [9] El-Zahaby A M, Kabeel A E, Bakry A I. Enhancement of solar still performance using a reciprocating spray feeding system-An experimental approach[J]. Desalination, 2011, 267(2-3): 209—216.
- [10] Al-Sahali M, Ettouney H M. Humidification dehumidification desalination process: Design and performance evaluation[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 143(1-3): 257—264.
- [11] Ikegami Y, Sasaki H, Gouda T, et al. Experimental study on aspray flash desalination[J]. Desalination, 2006, 194(1): 81—89.
- [12] Yuan Guofeng, Zhang Hefei. Mathematical modeling of a closed circulation solar desalination unit with humidification-dehumidification[J]. Desalination, 2007, 205(1): 156—162.
- [13] Yuan Guofeng, Wang Zhifeng, Li Hongyong, et al. Experimental study of a solar desalination system based on humidification-dehumidification process[J]. Desalination, 2011, 277(1-3): 92—98.

EXPERIMENT RESEARCH OF EVAPORATION PROCESS IN SPRAY ATOMIZATION HUMIDIFICATION-DEHUMIDIFICATION DESALINATION

Yuan Guofeng¹, Zhao Zijing^{1,2}, Jakob Berg Johanson^{1,3}, Li Xing¹, Xu Li¹, Li Zhenfeng⁴

(1. Key Laboratory of Solar Thermal Energy and Photovoltaic System of Chinese Academy of Science, Institute of Electrical Engineering, Beijing 100190, China; 2. College of Aeronautical Engineering, China Civil Aviation University, Tianjin 300300, China; 3. Technical University of Denmark, Lyngby DK-2800 Kgs, Denmark; 4. Guangdong Five Star Solar Energy Co., Ltd., Dongguan 523051, China)

Abstract: The atomizing reinforced humidifying technology was inducted into humidification-dehumidification seawater desalination system, and the platform for testing the performance of spray humidification process was set up to carry out the experiment research of the fogdrop evaporation and air heat-humidity process in spray humidifier and in different operating conditions. The experimental results show that the effect of gas liquid volume ratio and the air temperature in the inlet of humidifier on the humidification performance of humidifier is larger. When the air temperature in the inlet of humidifier is 90 °C, the gas liquid volume ratio is between $(20\sim25)\times 10^3$, the temperature, the relative-humidity and the evaporation rate in the outlet are about 36 °C, above 90% and more than 50%, respectively.

Keywords: desalination; spray atomization; heat and mass transfer; gas liquid volume ratio; experiment research