

太阳能驱动第二类吸收式热泵海水淡化系统能量分析

鲁敦放, 胡 芑

(中国科学技术大学热科学和能源工程系, 安徽合肥 230027)

摘要: 第二类吸收式热泵可提升低温热能的温度, 基于此提出一种基于太阳能驱动第二类吸收式热泵的海水淡化系统. 该系统通过第二类吸收式热泵提升太阳能集热器热源温度对海水进行加热蒸发, 再对蒸气冷凝得到淡水, 同时预热海水. 通过对系统中各组件进行能量分析、焓分析, 获得了系统性能随时间变化规律, 并比较了有无冷凝器预热对系统性能的影响. 结果表明, 通过冷凝器预热海水, 系统平均热效率提高了 12.9%, 平均焓效率提高了 16.2%, 平均淡水产量相对提高了 29.2%.

关键词: 太阳能; 海水淡化; 模拟; 第二类吸收式热泵; 能量分析

中图分类号: TK01+1 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2020.05.003

引用格式: 鲁敦放, 胡芑. 太阳能驱动第二类吸收式热泵海水淡化系统能量分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2020, 50(5): 570-575.

LU Dunfang, HU Peng. Energy and exergy analyses of seawater desalination system based on absorption heat transformer driven by solar energy[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2020, 50(5): 570-575.

Energy and exergy analyses of seawater desalination system based on absorption heat transformer driven by solar energy

LU Dunfang, HU Peng

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: The absorption heat transformer (AHT) can raise the temperature of low-temperature thermal energy. In this study, a seawater desalination system was developed based on the AHT driven by solar energy, where AHT was used to raise the temperature of the solar collector heat source to heat and evaporate the seawater and then condense the steam to obtain fresh water while preheating the seawater. Through energy and exergy analyses of each component in the system, changes in system performance with time were obtained. Comparisons were conducted between the effects of condenser preheating or its absence on system performance. The results show that the seawater preheated by the condenser can increase the average thermal efficiency of the system by 12.9%, the average efficiency by 16.2%, and the average freshwater production by 29.2%.

Key words: solar energy; desalination; simulation; absorption heat transformer; energy and exergy analyses

收稿日期: 2019-02-17; 修回日期: 2019-05-06

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(WK2090130016)资助.

作者简介: 鲁敦放, 男, 1992年生, 硕士生. 研究方向: 海水淡化. E-mail: dunfang@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 胡芑, 博士/副教授. E-mail: hupeng@ustc.edu.cn

发生不足;④流动阻力、热损失和压力损失可以忽略;⑤节流前后焓值不变;⑥环境参考温度为 23℃.

表 1 太阳能集热器参数

Tab. 1 Parameters of solar collector

太阳能集热器参数	值
集热器面积/m ²	1.968
集热器数量	44
集热器倾斜角度/(°)	26.52
集热器内质量流量/(kg/s)	0.108
集热器吸收率	0.95
集热器发射率	0.13
纬度/(°)	31.87
经度/(°)	117.28
集热器厚度/mm	1

第二类吸收式热泵采用溴化锂溶液作为工质,各初始参数如表 2 所示,其中将蒸发器负载固定有利于系统尽早进入稳定运行状态.对各状态点的物性计算采用文献[10]中的拟合公式及方法.

表 2 第二类吸收式热泵各部件参数

Tab. 2 Parameters of each part of AHT

冷凝器	海水温度	T_{11}	23	℃
	海水流量	M_{11}	0.03	kg/s
	冷凝温度	T_{cd}	29	℃
吸收器	吸收温度	T_{ab}	103	℃
	蒸发温度	T_{ev}	$T_{ev} = T_{20} - 3$	℃
蒸发器	蒸发负载	Q_{ev}	50	kW
	入口温度	T_{21}	$T_{21} = T_{20}$	℃
	出口温度	T_{22}	$T_{22} = T_{21} - 5$	℃
	发生温度	T_g	$T_g = T_{20} - 3$	℃
发生器	入口温度	T_{24}	$T_{24} = T_{20}$	℃
	出口温度	T_{25}	$T_{25} = T_{24} - 5$	℃
换热器	效率	ϵ	80	%
分离器	两相水	T_{14}	100	℃
	饱和水	T_{17}	100	℃
	水蒸气	T_{15}	100	℃
溶液泵	泵效率	η_p	95	%

2.2.1 质量守恒

质量守恒包括总质量守恒以及每一部分流体质量守恒,控制方程为

$$\sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_o = 0 \quad (2)$$

$$\sum \dot{m}_i \cdot x_i - \sum \dot{m}_o \cdot x_o = 0 \quad (3)$$

式中, \dot{m} 是质量流量; x 是溴化锂溶液质量分数.

制冷剂质量流量可以通过蒸发器的能量守恒计算得到

$$\dot{m}_4 = \frac{Q_{ev}}{(h_3 - h_4)} \quad (4)$$

2.2.2 能量守恒

对于第二类吸收式热泵中的各组件均存在能量守恒,可由下式描述:

$$\left(\sum \dot{m}_i \cdot h_i - \sum \dot{m}_o \cdot h_o \right) + \left(\sum Q_i - \sum Q_o \right) + W = 0 \quad (5)$$

单效吸收式热泵系统各组件能量守恒可表示成发生器:

$$Q_g = \dot{m}_7 \cdot h_7 + \dot{m}_1 \cdot h_1 - \dot{m}_8 \cdot h_8 \quad (6)$$

蒸发器:

$$Q_{ev} = \dot{m}_3 \cdot h_3 - \dot{m}_4 \cdot h_4 \quad (7)$$

冷凝器:

$$Q_{cd} = \dot{m}_1 \cdot h_1 - \dot{m}_2 \cdot h_2 \quad (8)$$

吸收器:

$$Q_{ab} = \dot{m}_4 \cdot h_4 + \dot{m}_{10} \cdot h_{10} - \dot{m}_5 \cdot h_5 \quad (9)$$

冷剂泵:

$$W_{pump1} = \dot{m}_2 \cdot \frac{(p_3 - p_2)}{\eta_p \cdot \rho_2} \quad (10)$$

溶液泵:

$$W_{pump2} = \dot{m}_8 \cdot \frac{(p_9 - p_8)}{\eta_p \cdot \rho_8} \quad (11)$$

2.3 海水淡化系统热效率

计算模型基于以下假设:①吸收热(Q_{ab})总是以潜热(Q_{abl})和显热(Q_{abs})的形式传递给海水;②水蒸气完全冷凝;③系统工作在一个大气压下;④溶液分离器绝热.

海水淡化系统的热效率是吸收器所得热量比上蒸发器与发生器热量之和,即

$$\eta_{th-WP} = \frac{\dot{m}_{15} \cdot L_v}{Q_{ev} + Q_g} \quad (12)$$

式中, L_v 为海水的蒸发潜热,其值为 2414.4 kJ/kg.

3 焓分析

在环境条件下,能量中可转化为有用功的最高份额称为该能量的焓,焓参数的引出,为评价能量的“量”和“质”提供了一个统一尺度.由此而建立的热

系统焓平衡分析法,结合了热力学第一、第二定律,比起由热力学第一定律得出的能量平衡方法更科学、更合理.控制体积焓平衡方程描述如下^[11]:

$$E_{x,d} = E_1 + E_2 - E_3 - W \quad (13)$$

其中,

$$E_1 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \cdot Q_j \quad (14)$$

$$E_2 = \left(\sum_i \dot{m}_i \cdot ex_i\right)_{in} \quad (15)$$

$$E_3 = \left(\sum_i \dot{m}_i \cdot ex_i\right)_{out} \quad (16)$$

式中, E_1 为热量焓; E_2 、 E_3 是该控制体的流动焓; W 为控制体内做的功.

按照稳定流动焓的计算式^[12]

$$ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (17)$$

焓效率可通过产生的净焓比输入焓得到:

$$\eta_{ex} = \frac{\text{Exergy produced}}{\text{Exergy used}} \quad (18)$$

3.1 平板型太阳能集热器焓分析

集热器的焓损(E_{x-FPC})是由获得太阳能的热量焓(E_{x-IG})与集热器管内介质水所获得焓(E_{x-U})之差.可表示如下:

$$E_{x-FPC} = E_{x-IG} - E_{x-U} \quad (19)$$

$$E_{x-IG} = I_G \cdot A_C \cdot N_C \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_S}\right) \quad (20)$$

$$E_{x-U} = Q_U \cdot N_C \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{fm}}\right) \quad (21)$$

经过化简,集热器焓损计算如下:

$$E_{x-FPC} = I_G A_C N_C \left[\left(1 - \frac{T_0}{T_S}\right) - \eta_{th} \left(1 - \frac{T_0}{T_{fm}}\right) \right] \quad (22)$$

式中, T_S 为太阳表面温度; T_{fm} 为集热器平均温度.

集热器焓效率可以表示如下:

$$\eta_{ex-FPC} = \frac{E_{x-U}}{E_{x-IG}} = \frac{Q_U \cdot A_C \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{fm}}\right)}{I_G \cdot A_C \cdot N_C \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_S}\right)} \quad (23)$$

经过简化, η_{ex-FPC} 可表示成如下形式:

$$\eta_{ex-FPC} = \eta_{th-FPC} \cdot \frac{\left(1 - \frac{T_0}{T_{fm}}\right)}{\left(1 - \frac{T_0}{T_S}\right)} \quad (24)$$

因为 $T_S \gg T_0$,上式可写成如下形式:

$$\eta_{ex-FPC} \approx \eta_{th-FPC} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{fm}}\right) \quad (25)$$

3.2 海水淡化系统焓分析

海水淡化系统的焓效率可以表示为

$$\eta_{ex-WP} = \frac{\dot{m}_{15} L_v \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{15}}\right)}{\left[Q_{ev} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{ev}}\right) + Q_g \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_g}\right) + W_{pumps} \right]} \quad (26)$$

4 结果和讨论

太阳能平板集热器采集的数据是基于2017年7月21日合肥地区(经度:117.28°E,纬度:31.87°N)的日照.本文通过MATLAB程序对该系统进行热力学分析,该程序基于能量守恒、焓守恒和各个点的参考状态.初始条件包括环境状态、各组件温度、泵效率、热交换器效率、蒸发负载等.基于这些条件,各个点的热力性能都可以通过程序计算得到,从而可以计算系统各组件的热效率、焓损、焓效率以及获得的淡水质量流量.

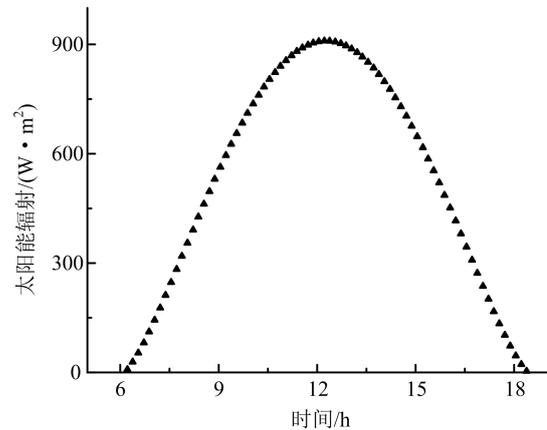


图2 太阳能平板集热器上热辐射随时间的变化

Fig. 2 Solar radiation incident on the flat plate collector per unit area varying with time

图2是太阳能平板集热器上热辐射随时间变化图.从图2可以看到,在12点左右太阳能辐射达到最大值约为900 W/m²,随着时间的推移,逐渐降低.

图3是海水淡化(WP)系统热效率随时间的变化图.从图中可以看出海水经过冷凝器预热后,海水淡化系统热效率提升明显,平均效率提升了12.9%.

图4是太阳能集热器焓损随时间变化的曲线.

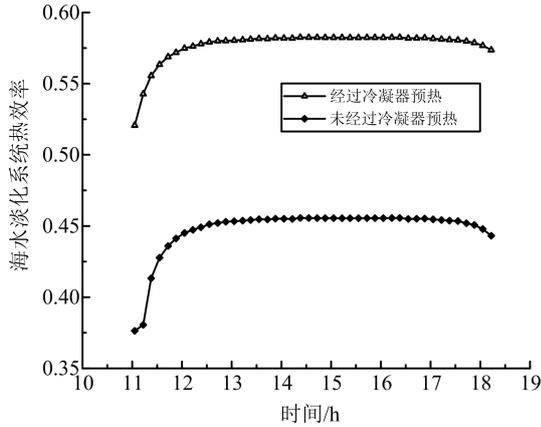


图 3 海水淡化系统热效率随时间的变化

Fig. 3 Thermal efficiency variation of seawater desalination

由图可以看出焓损的变化与太阳能辐射变化趋势相同. 在 12 点左右达到顶峰, 其后随时间衰减. 由于从太阳表面(温度 5800 K)传热给集热器管内的水, 二者之间的温差巨大, 因此导致太阳能集热器焓损极大.

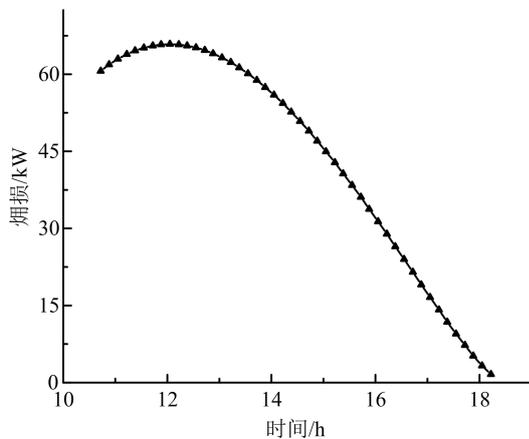


图 4 太阳能集热器焓损随时间的变化

Fig. 4 Variation of exergy destruction of solar collectors

图 5 是各组件焓损随时间的变化, 由于集热器焓损过大, 故没有将其与其他组件放在一起. 由图可以看出, 蒸发器、吸收器、热交换器和泵的焓损随时间波动很小. 对于发生器, 由于系统刚开始运行, 溴化锂溶液需要大量的热, 使其从环境温度加热到吸收式热泵运行温度, 让制冷剂 and 浓溶液分离, 所以焓损在 12 点前波动很大. 冷凝器则是由于大量热量交换产生焓损. 辅助冷凝器中的焓损是冷凝后热量传递给环境所导致的.

图 6 所示为海水淡化系统焓效率随时间的变化, 在 15 点后海水淡化系统随时间增长较快, 主要

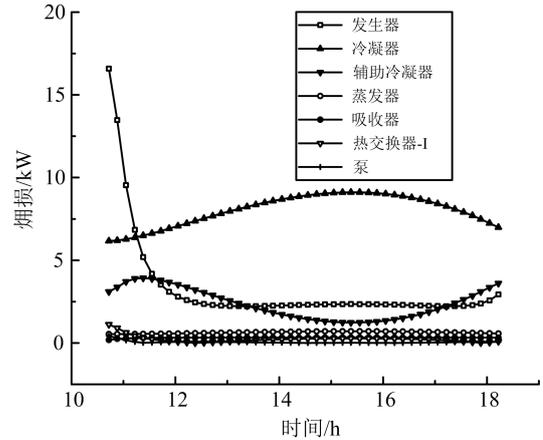


图 5 各组件焓损随时间的变化

Fig. 5 Exergy destruction of each component varying with time

是由于吸收器的热量焓随时间基本保持在一个定值, 而随着时间的推移, 由太阳辐射衰减导致太阳能集热器的热量焓逐渐减小, 提供给蒸发器和发生器的热量焓也随之减小.

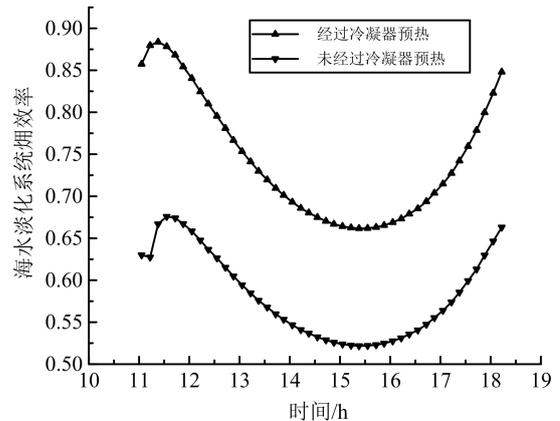


图 6 海水淡化系统焓效率随时间的变化

Fig. 6 Exergy efficiency of water desalination system varying with time

图 7 为淡水质量流量随时间的变化曲线. 由于系统获得的有效能量是用来产生淡水, 因此变化曲线与系统热效率相同. 另外如图所示, 利用冷凝器对入口海水进行预热, 平均淡水产量相对提升了 29.2%.

随着太阳辐射的增强, 淡水质量流量逐渐增加, 在 13 点左右达到稳定状态, 淡水质量流量几乎不变. 由于第二类吸收式热泵需要在某一个温度区间内才能工作, 从图 2 可以看出 12 点左右太阳能辐射达到峰值, 随着时间推移, 太阳能辐射减小, 集热器内温度不断降低, 直到低于第二类吸收式热泵的启

动温度,此时系统停止运行.

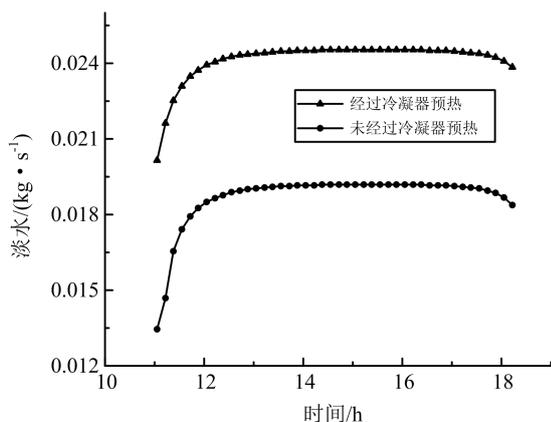


图7 淡水质量流量随时间的变化

Fig.7 Pure water mass flow rate varying with time

5 结论

本文将平板型太阳能集热器、第二类吸收式热泵和海水淡化系统结合在一起,并对各组件、子系统进行了能量分析、焓分析,得出如下结论:

(I) 随着时间的推移,使用冷凝器预热,海水系统平均热效率提升了12.9%,平均焓效率提升了16.2%.

(II) 系统中,太阳能集热器的焓损最大,达到44.2 kW,焓损较大的还有发生器、冷凝器、辅助冷凝器.

(III) 淡水生产质量流量在13点左右达到稳定状态,质量流量几乎不变,约为0.024 kg/s.

(IV) 利用冷凝器对入口海水进行预热,平均淡水产量相对提升了29.2%.

参考文献(References)

[1] DELYANNIS E. Historic background of desalination and renewable energies[J]. Solar Energy, 2003, 75(5): 357-366.

- [2] KORONEOS C, DOMPROS A, ROUMBAS G. Renewable energy driven desalination systems modelling[J]. Journal of Cleaner Production, 2007, 15(5): 449-464.
- [3] MOH'D S A J, KAMIYA I, NARASAKI Y. Proving test for a solar-powered desalination system in Gaza-Palestine[J]. Desalination, 2001, 137: 1-6.
- [4] KALOGIROU S A. Seawater desalination using renewable energy sources[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2005, 31(3): 242-281.
- [5] 王芳. 基于减压膜蒸馏法太阳能海水淡化系统研究[D]. 上海: 东华大学, 2016.
- [6] 解梦秋, 郑宏飞, 李正良, 等. 吸收式太阳能海水淡化系统中降膜吸收与再生过程研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(5): 477-481.
- [7] GOMRI R. Energy and exergy analyses of seawater desalination system integrated in a solar heat transformer[J]. Desalination, 2009, 249(1): 188-196.
- [8] 贺晓雷, 于贺军, 李建英, 等. 太阳方位角的公式求解及其应用[J]. 太阳能学报, 2008, 29(1): 69-73.
- [9] HAY J E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces[J]. Solar Energy, 1979, 23(4): 301-307.
- [10] 王林. 小型吸收式制冷机原理与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 26-35.
- [11] KOTAS T J. The exergy method of thermal plant analysis[M]. Elsevier, 2013.
- [12] KHOUKHI M, MARUYAMA S. Theoretical approach of a flat plate solar collector with clear and low-iron glass covers taking into account the spectral absorption and emission within glass covers layer[J]. Renewable Energy, 2005, 30(8): 1177-1194.