

# 太阳能光热-光电空气隙膜蒸馏系统实验研究

邓洪玲<sup>1</sup>, 杨晓宏<sup>1,2</sup>, 田 瑞<sup>1,3</sup>, 李洪建<sup>1</sup>, 李 达<sup>1</sup>

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 风能太阳能利用技术教育部重点实验室(内蒙古工业大学), 呼和浩特 010051; 3. 内蒙古可再生能源重点实验室(内蒙古工业大学), 呼和浩特010051)

**摘 要:** 针对传统苦咸水淡化中的高能耗问题,设计太阳能光热-光电空气隙膜蒸馏耦合系统。实验研究系统运行稳定性,系统连续9、24 h运行工况下热电参数对膜通量的影响;系统获得温度和膜通量随太阳辐照度的变化,理论计算集热面积与膜面积最优匹配。研究表明:系统白天连续9 h运行最大膜通量为 $5.84 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,总产水量为 $1.80 \text{ kg}$ ,实际日产水量达 $43.47 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,单位产水热耗为 $495.3 \text{ kWh}/\text{m}^3$ ;连续24 h运行最大膜通量 $13.07 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,总产水量为 $2.99 \text{ kg}$ ,实际日产水量为 $71.95 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,单位淡水热耗为 $1095.1 \text{ kWh}/\text{m}^3$ ;系统在2种工况下均稳定运行,因此,按照系统连续9 h的产水量,需 $5.67 \text{ m}^2$ 的太阳集热器配备 $0.1248 \text{ m}^2$ 的平板膜和实际产水 $7.42 \text{ L/d}$ 满足3口之家 $6 \text{ L}$ 的日常饮用水需求。

**关键词:** 太阳能光热-光电; 空气隙膜蒸馏; 光热参数; 膜通量

**中图分类号:** TK124

**文献标识码:** A

## 0 引 言

膜蒸馏是一种新型的海水、苦咸水淡化技术,其原理利用跨膜温差导致的蒸汽压差推动热料液中的挥发性组分以蒸汽形式透过膜孔,实现料液分离<sup>[1-3]</sup>。而空气隙膜蒸馏相对其他形式的膜蒸馏系统具有热效率高、产品计量准确等特点,被广泛应用于科研以及生产当中<sup>[4-8]</sup>。传统膜蒸馏系统冷端通常采用机械制冷方式提供冷量,热端采用电加热方式提供热量,耗能较高<sup>[9-11]</sup>。为进一步解决膜蒸馏系统中存在的问题,本文提出建立太阳能光热光电膜蒸馏系统,并对此进行实验研究。

太阳能可为膜蒸馏系统提供热能和电能,低温太阳能集热装置即可达到膜蒸馏系统所需温度,太阳能光伏装置可为膜蒸馏系统提供电能,膜组件冷端采用循环冷却水物理降温方式可降低能耗。与传统淡化水工艺相比,太阳能光热-光电空气隙膜蒸馏技术能耗低,不产生二次污染,可达到降耗、环保的双重效益,尤其适用于小规模淡水供应。

目前,针对太阳能膜蒸馏淡化水技术,国外已有学者建立了太阳能聚光型集热器结合气隙

式膜蒸馏系统(膜总面积为 $2.8 \text{ m}^2$ )的装置,其产水容量可达 $0.5 \sim 50 \text{ m}^3/\text{d}$ ,实验表明:以 $1$ 和 $35 \text{ g/L}$ 的 $\text{NaCl}$ 溶液作为进料液时,最大膜通量分别达到 $6.5$ 和 $5.0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,单位淡水热耗为 $2200 \sim 810 \text{ kWh}/\text{m}^3$ <sup>[12]</sup>;澳大利亚学者使用 $3 \text{ m}^2$ 的太阳集热器结合 $1.8 \text{ m}^2$ 的平板膜组件,其产水量达 $17 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,热电消耗为 $55.6 \text{ kWh}/\text{m}^3$ <sup>[13]</sup>;安装大型太阳能膜蒸馏系统用于处理红海沿岸的海水时,系统每天产水达 $600 \sim 800 \text{ kg}$ ,热电消耗为 $200 \sim 250 \text{ kWh}/\text{m}^3$ <sup>[14, 15]</sup>。国内浙江大学杨华剑<sup>[2]</sup>对太阳能真空膜蒸馏组件进行模拟研究,模拟结果显示膜通量最大可达 $14 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。目前,国内对太阳能膜蒸馏系统的研究仍处于小型规模应用阶段<sup>[16-19]</sup>,且对太阳光热光电膜蒸馏实验系统研究较少,本文设计并搭建太阳能光热光电膜蒸馏系统,可解决太阳能膜组件产水量低、系统耗能高等问题<sup>[20]</sup>。

本文设计太阳能光热-光电耦合系统,配备具有旋向入流分水盘结构的高通量并接式膜组件,并以此为研究对象。实验系统运行所需的能源由太阳能光热光电系统提供。针对小型、结构紧凑的膜蒸馏产水系统,分析连续运行中太阳能光热参数对膜

收稿日期: 2017-05-27

基金项目: 风能太阳能利用技术教育部重点实验室(内蒙古工业大学)开放基金(201508); 国家自然科学基金(51266007); 内蒙古自然科学基金(2017MSLH0504)

通信作者: 杨晓宏(1971—),女,硕士、教授,主要从事太阳能膜分离技术中传热传质方面的研究。yxh1109@163.com

通量和系统温度的影响;并根据系统的热电消耗,分析太阳能系统与膜蒸馏组件的运行稳定性,找到两者的最佳匹配。

## 1 太阳能光热-光电膜蒸馏系统

### 1.1 系统组成

太阳能膜蒸馏海水淡化系统主要由热管式真空管集热器、空气隙膜蒸馏组件、光伏发电系统、管路系统组成。热管式真空管集热器为膜蒸馏系统中的热工质提供热量;光伏发电系统,使用带有自动除尘装置的多晶硅电池板为循环管路中的 2 台直流泵供电;空气隙膜蒸馏系统采用具有旋向入流分水盘结构的平板式膜组件;管路系统中的热循环管路连接集热器和膜组件热腔,冷循环管路连接冷却水箱和膜组件冷腔,循环管路系统中还包括 2 个玻璃转子流量计以及 2 个直流泵,如图 1 所示。

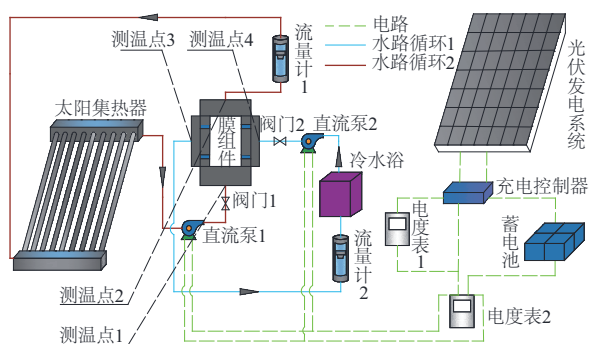


图1 太阳能光热-光电空气隙膜蒸馏系统

Fig. 1 Solar thermal-photovoltaic air gap membrane distillation system

### 1.2 工艺流程

热工质经过预处理后进入热管式真空管集热器中被加热,工质达到预定温度后,再由光伏组件驱动的直流泵作用下进入膜组件热容腔,组件中的热工质流体在温差作用下进行膜蒸馏过程,从热容腔出来的热工质流经流量计进入集热器再加热进行热工质循环。冷却水从冷却水箱出来经过流量计进入膜蒸馏组件冷容腔,冷却水从冷容腔出来后在直流泵作用下回到冷水箱进行冷却水循环。冷却水循环使用自主设计的冷却水箱代替传统机械半导体制冷方式,采用物理降温降低循环冷却水温度,不消耗电能,冷却水循环加大温差作用,增强传质推动力,利于产水。

## 2 实验方案

### 2.1 实验设备与测试

本实验所用的实验设备包括热管式真空管集热器(力诺瑞特),有效采光面积为  $1.89 \text{ m}^2$ ,储热水箱最大容积为  $150 \text{ L}$ 。空气隙膜蒸馏组件,采用实验室具有分水盘结构的高通量并接式平板膜组件,热工质通过热容腔进入热腔体后通过分水盘以旋转入流方式流进膜面后从热容腔出口流出,空气隙膜组件结构如图 2 所示。膜组件主要由热容腔和冷容腔组成,热容腔采用尼龙材料制作,尺寸为  $\Phi 160 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ,分水盘由保温、耐腐蚀的塑料板加工而成,造价低、易于加工、清洗方便、便于安装拆卸,分水盘可以防止热工质直接冲刷膜面,破坏浓度和温度极化,有效增加膜通量。分水盘外径  $115 \text{ mm}$ ,厚度为  $4 \text{ mm}$ ,分水盘上开 6 个出水槽,槽长  $12 \text{ mm}$ ,槽宽  $3 \text{ mm}$ ,开槽角度为  $45^\circ$ ,冷容腔与热容腔尺寸相同,冷热容腔间有  $5 \text{ mm}$  的空气隙。2 个热腔包含 4 张平板膜,单张膜面积为  $0.0104 \text{ m}^2$ ,总膜面积为  $0.0416 \text{ m}^2$ 。热容腔冷端采用冷水箱与膜组件冷腔相连,使用喷淋自然冷却物理降温方式,不消耗电能。由于本实验主要针对小型家用淡水系统,考虑经济性,采用由 304 不锈钢板焊接的体积为  $0.059 \text{ m}^3$  的冷却水箱,水箱顶部和侧面底部各有一个循环水的进出口,进出口圆孔直径为  $20 \text{ mm}$ 。冷水箱入口处安装旋转喷头,由旋转喷头喷出的冷却水先喷洒在冷水箱上部的散热板上,散热板选择价格低廉的不锈钢沥水器与不锈钢带孔平板焊接而成,散热板固定在水箱内壁的固定片上,有效为循环水散热,最大限度降低循环冷却水温度,节能高效。

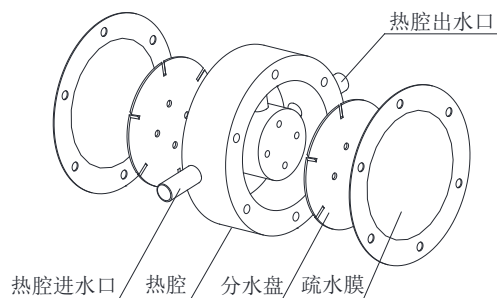


图2 膜组件热腔示意图

Fig. 2 Schematic diagram of heat chamber of membrane module

光伏系统由光伏组件、自动除尘系统组成,光伏板采光面积  $1.64 \text{ m}^2$ ,输出功率  $235 \text{ W}$ 。光伏板与太阳集热器并排布置,考虑呼和浩特地区纬度和太阳角度等因素,为高效利用太阳辐射,选择南北方向安装,安装角度为与水平面成  $50^\circ$  角。光伏组件产生的电量通过电压为  $50 \text{ V}$ ,电流为  $30 \text{ A}$  的充电控制器后驱动直流泵工作,多余的电量则储存于蓄电池中,经过充电控制器的电能经由功率转换器后驱动自动除尘设备工作。

实验中所用到的测试仪器包括太阳辐射监测系统,TP700 多路数据记录仪,体积流量计。太阳能监测系统由全紫铜太阳跟踪器和总辐射表等组成,跟踪精度小于  $0.1^\circ$ ,工作温度为  $-40\sim 50^\circ\text{C}$ ,数据存储时间为  $3 \text{ a}$ ,辐射响应时间  $5 \text{ s}$ ,精确度  $5 \text{ W/m}^2$ 。K 型热电偶用于监测实验中膜组件冷、热腔进出口温度,采用 TP700 多路数据记录仪采集实验数据,利用玻璃转子流量计测量管路中循环工质的体积流量。

## 2.2 实验方案

实验共布置 4 处温度测试点以研究系统进出口温度与冷热端温差,测温点分别为:热腔进口测点(1号)、热腔出口测点(2号)、冷腔出口测点(3号)、冷腔进口测点(4号),如图 3 所示。

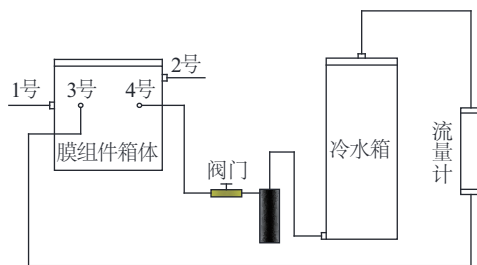


图3 温度测点位置布置图

Fig. 3 The location of temperature measurements

太阳能膜蒸馏系统中的膜通量主要受热工质温度及冷、热端温差影响,工质加热温度由集热器决定。实验研究了 2 种运行方式下测温点温度随太阳辐照度的变化以及太阳辐照度、热腔进口温度和冷热端温差对膜通量的影响。连续  $9 \text{ h}$  与连续  $24 \text{ h}$  热电参数对膜通量的影响实验于 2015 年 10 月 2 日~10 月 31 日在内蒙古呼和浩特市进行,其中 10 月 2 日~10 月 10 日主要研究白天连续  $9 \text{ h}$  运行热电参数的影响,根据热工质体积流量与冷循环工质体积流量的不同,实验分为 2 种工况。工况 1:冷循环水

体积流量为  $300 \text{ L/h}$ ,热工质体积流量调节范围为  $100\sim 250 \text{ L/h}$ ,每  $50 \text{ L}$  一个调节范围,共分成 4 组;工况 2:冷循环水体积流量为  $200 \text{ L/h}$ ,热工质体积流量调节与工况 1 相同。10 月 10 日~10 月 31 日研究连续  $24 \text{ h}$  运行热电参数对膜通量的影响及系统运行的稳定性,实验工况为热工质流量  $250 \text{ L/h}$ ,冷工质流量  $300 \text{ L/h}$ 。

2015 年 10 月 3 日连续  $9 \text{ h}$  运行实验工况为热工质流量  $250 \text{ L/h}$ ,冷循环水流量  $300 \text{ L/h}$ ,最高环境温度为  $21.1^\circ\text{C}$ ,最低环境温度为  $13.6^\circ\text{C}$ 。集热器内热工质起始温度  $48.0^\circ\text{C}$ ,终止温度  $55.5^\circ\text{C}$ ,冷循环水起始温度  $18.9^\circ\text{C}$ ,终止温度  $35.1^\circ\text{C}$ 。在此工况下研究膜通量随太阳辐照度、热腔进口温度、冷热端温差的变化,以及测温点随太阳辐照度的变化趋势,同时记录直流泵的稳定运行情况。

2015 年 10 月 30 日连续  $24 \text{ h}$  运行实验工况为热工质流量为  $250 \text{ L/h}$ ,冷工质流量为  $300 \text{ L/h}$ ,热工质起始温度  $72.4^\circ\text{C}$ ,在此工况下研究膜通量随太阳辐照度、热腔进口温度及冷热端温度的变化,以及测温点随太阳辐照度的变化趋势,更主要观察并记录系统运行的稳定性。

同时,对比上述 2 种运行方式以确定太阳集热器集热面积与膜面积的最优匹配。

## 3 结果与分析

### 3.1 连续 $9 \text{ h}$ 运行光热参数对膜通量的影响

系统白天连续  $9 \text{ h}$  运行的膜通量随辐照度,热腔进口温度及冷热温差的影响,以及测温点随太阳辐照度的变化如图 4~图 7 所示。

如图 4 所示,膜通量随太阳辐照度的增大而逐渐增加,两者的增加速率基本一致。太阳辐照度的增加使集热器内温度升高,热能增加,膜组件进口工质温度升高,膜组件热侧饱和蒸汽压随之升高,膜两侧传质推动力增强,促使膜通量增加。由于传热过程延迟,当太阳辐照度开始降低时,集热器温度仍然较高,热侧进口温度保持高温状态,因此膜通量仍缓缓增大。

如图 5 所示,在热腔进口温度最高时膜通量最大,进口温度最大时温差传质推动力强,所以膜通量最大;当太阳辐照度开始下降,导致进口温度下降,膜通量下降。

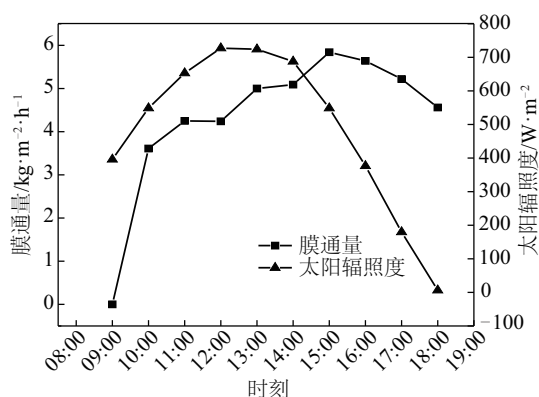


图4 膜通量与太阳辐照度的关系

Fig. 4 The relationship between membrane flux and irradiance

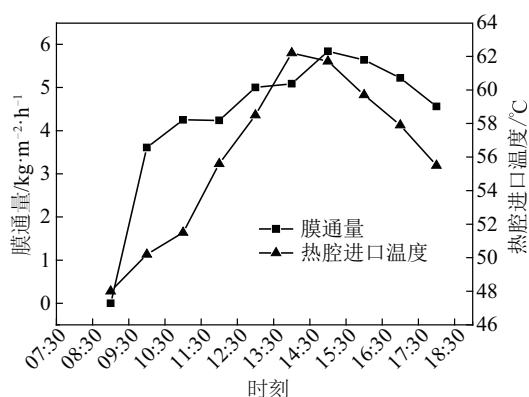


图5 膜通量与热腔进口温度的关系

Fig.5 The relationship between the membrane flux and the inlet temperature of heat cavities

如图6所示,当09:00开始实验时,因前一天经过集热器加热的水储存于水箱中,而系统初始运行时冷腔壁面接近环温,因此在实验初始阶段冷热腔温差较大,随系统的运行冷热腔温差随之减小;在11:00时,由于太阳辐照度较大,系统热腔进口水温随之上升,而冷腔壁温增加较为缓慢,所以冷热腔温差呈现小幅上升趋势;当系统运行至13:00时,由于太阳辐照度逐渐降低,热腔进口水温也随之降低,而此时环境温度较高,导致冷却水温度上升,冷腔换热效率降低,造成冷腔壁温随之上升,所以冷热腔温差呈下降趋势。当冷热端温差先减后增时,由于热腔温度升高的速率不断上升,此期间膜通量一直逐渐增大;而当热端温度降低,冷却水温度升高,冷热端温差减小时,膜通量随之减小。如图7所示,4处测温点温度与环境温度均随太阳辐照度的增大而升高,随太阳辐照度的减小而降低,基本呈同步变化趋势。

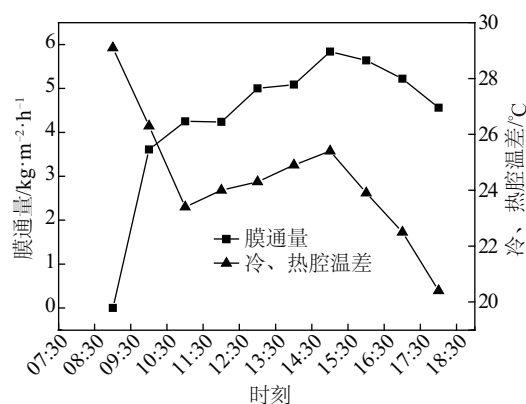


图6 膜通量与热、冷腔温差的关系

Fig. 6 The relationship between membrane flux and temperature difference of heat and cold cavities

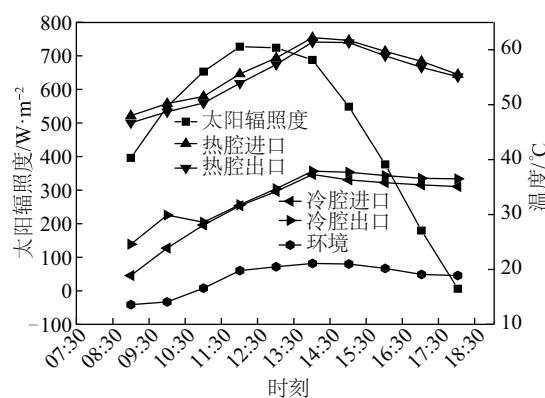


图7 测温点温度与太阳辐照度的变化

Fig.7 The change of the temperature with the irradiance

### 3.2 24 h运行方式光热参数对膜通量的影响

系统连续24 h运行时膜通量受太阳辐照度,热腔进口温度和冷热温差的影响,以及各处测温点温度随太阳辐照度的变化如图8~图11所示。由图8可知,系统产水主要集中在白天太阳辐照度较高时,夜晚系统产水量下降。系统初始运行时,膜通量急剧上升,经过夜间运行之后,热工质温度仍然可以保证系统产水,但温度逐渐下降时膜通量小,经过夜间运行系统温度下降,因此,第2天早上的膜通量值较低。当热腔进口温度降低,其热、冷端温差下降,传质推动力下降,膜通量随之下降。白天的热腔进口温度与冷热腔温差较大,因此膜通量在白天均呈现较好值,当辐射开始下降时,热腔进口温度下降;当无太阳辐射后,由于传热延迟,膜通量只呈现缓缓下降趋势,直至21:00后膜通量才开始逐渐接近于零。

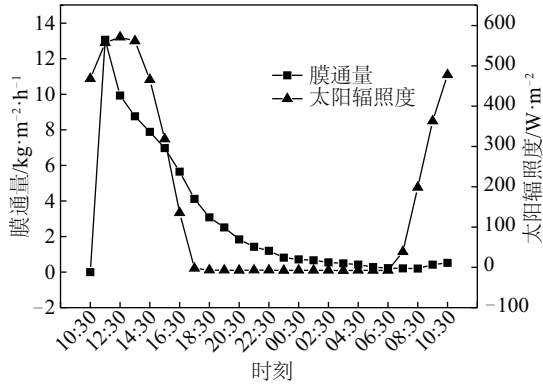


图8 膜通量与太阳辐照度的关系

Fig.8 The relationship between membrane flux and irradiance

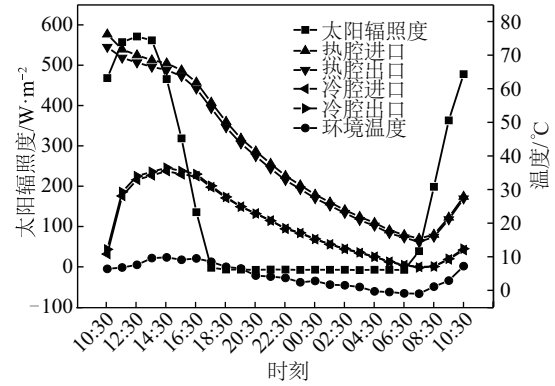


图11 各测温点温度与太阳辐照度的关系

Fig. 11 The change of the temperature with the irradiance

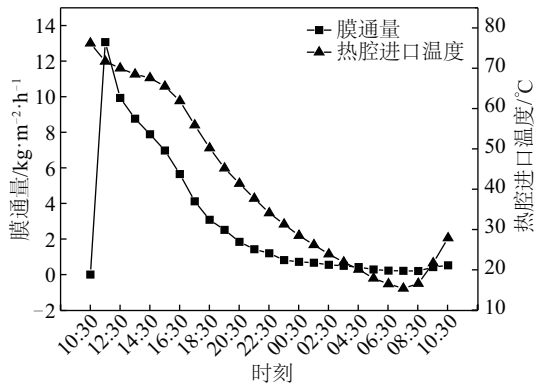


图9 膜通量与热腔进口温度的关系

Fig. 9 The relationship between the membrane flux and the inlet temperature of heat cavities

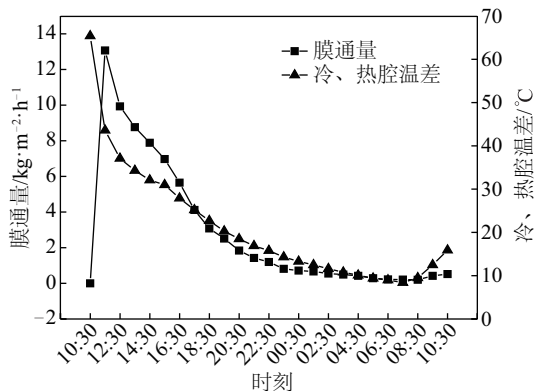


图10 膜通量与冷、热腔温差的关系

Fig. 10 The relationship between membrane flux and temperature difference of heat and cold cavities

对比 2 种运行方式,系统白天连续 9 h 运行的最大膜通量为  $5.84 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,总产水量为  $1.81 \text{ kg}$ ,实际日产水量可达  $43.47 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,单位产水热耗为  $495.30 \text{ kWh}/\text{m}^3$ ;连续 24 h 运行的最大膜通量出

现在 11:30,为  $13.07 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,总产水量为  $2.99 \text{ kg}$ ,实际日产水量为  $71.95 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,单位淡水热耗为  $1095.10 \text{ kWh}/\text{m}^3$ 。当系统连续运行了 24 h,经过一夜系统性能稳定,因此会出现某一个小时膜通量很大的情况。虽然连续 24 h 的总产水量和初始水温较高,但白天系统产水约占总产水量的 80%,且夜晚运行降低了第 2 天热工质的初始运行温度,从而影响整个系统的产水量;且热耗较高,产水成本增加。由于整个系统的产水主要集中在白天太阳辐照度强、热工质温度高、冷热温差大时,白天热工质温度不会出现快速下降现象,且热耗较小,可保证较高的膜通量和较好的经济性。综合分析,系统应选择白天运行,散热损失小,热耗小;夜间停止运行,降低热耗,提高系统的经济性。

### 3.3 系统稳定性

太阳能光伏系统的采光面积决定系统的可用电量,其中光伏日发电量计算公式为:

$$S = P_s \times t_s \times \eta_s \quad (1)$$

式中,  $S$  ——光伏板日发电量, kWh;  $P_s$  ——光伏板输出功率, W;  $t_s$  ——呼和浩特市峰值日照时数,取值为 5.57 h;  $\eta_s$  ——蓄电池的充电系数,取 0.7。

系统连续运行时,由实验过程中电压和电流的实际消耗计算出 2 台直流泵的消耗总功率为 27 W。由式(1)可得太阳电池板实际输出功率应不小于 169.1 W,由光伏板性能参数可知实验系统中的实际输出功率为 235 W,大于理论输出功率。由图 12 和图 13 及计算结果可知:系统可 24 h 连续运行,直流泵运行稳定,充分证明了光伏发电系统能为膜蒸馏系统提供稳定电能。

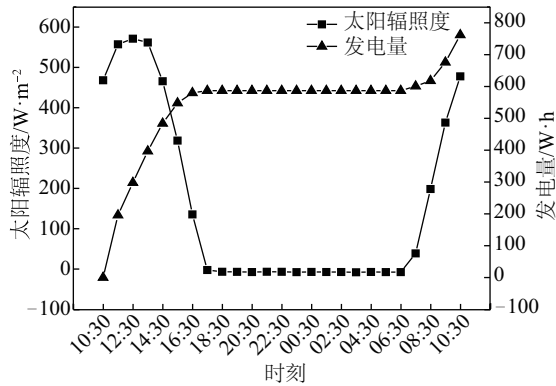


图 12 系统发电量与太阳辐照度的关系

Fig. 12 The relationship between generating capacity and irradiance

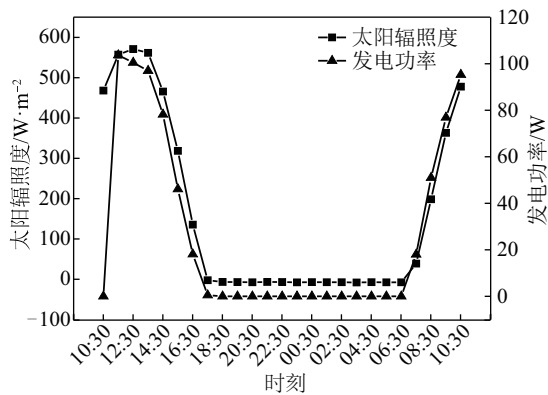


图 13 系统发电功率与太阳辐照度的关系

Fig. 13 The relationship between generated power and irradiance

### 3.4 膜面积与集热面积的最优匹配

集热器的热量以对流换热的方式由热工质传递到膜面热侧,热工质主体给膜蒸馏系统提供的总热量  $Q_r$  为:

$$Q_r = c_{ph} V_h \rho (T_{hi} - T_{ho}) \quad (2)$$

式中,  $c_{ph}$  ——热工质定压比热容,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $V_h$  ——热工质体积流量,  $L/h$ ;  $\rho$  ——热工质密度,  $kg/m^3$ ;  $T_{hi}$ 、 $T_{ho}$  ——热腔进口、出口温度,  $^{\circ}C$ 。

热量从冷壁的表面以对流方式传递给冷却水的热量  $Q_L$  为:

$$Q_L = c_{pc} V_c \rho (T_{co} - T_{ci}) \quad (3)$$

式中,  $c_{pc}$  ——冷循环水定压比热容,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $V_c$  ——冷循环水体积流量,  $L/h$ ;  $T_{ci}$ 、 $T_{co}$  ——冷却水进口、出口温度,  $^{\circ}C$ 。

太阳集热器中介质吸收的热量  $Q_j$  为:

$$Q_j = \tau \alpha I_{pd} A_{\alpha} - U_L (T - T_0) A_L t = I A_j \quad (4)$$

式中,  $\tau$  ——玻璃管的太阳透射比;  $\alpha$  ——集热器表面太阳吸收比;  $t$  ——累计辐射时间,  $h$ ;  $I_{pd}$  ——倾斜面上的太阳辐照度,  $W/m^2$ ;  $A_{\alpha}$  ——集热采光面积,  $m^2$ ;  $U_L$  ——平均热损系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $T$ 、 $T_0$  ——吸热板平均温度、环境温度,  $^{\circ}C$ ;  $A_L$  ——吸热管外表面积,  $m^2$ ;  $I$  ——单位面积日辐射量,  $J/(d \cdot m^2)$ ;  $A_j$  ——集热器有效换热面积,  $m^2$ 。

贮热水箱中水的热量  $Q_u$  为:

$$Q_u = \rho_w C_{pw} V_s (t_c - t_h) = \eta_j Q_j \quad (5)$$

式中,  $Q_u$  ——贮热水箱中水的得热量,  $J$ ;  $\rho_w$  ——水的密度,  $kg/m^3$ ;  $c_{pw}$  ——水的比热容,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $V_s$  ——水箱内的水体积,  $m^3$ ;  $t_h$ 、 $t_c$  ——实验开始、结束时的水温,  $^{\circ}C$ ;  $\eta_j$  ——集热器换热效率, 取 0.502。

由式(2)~式(5)计算得出:为保证系统连续 24 h 运行,集热面积至少为  $5.24 m^2$ ;为保证系统连续运行 9 h,集热面积至少为  $2.85 m^2$ 。根据中华人民共和国《城镇居民生活用水量标准》,一个 3 口家庭饮水量为 6.3 L/d,按照白天连续 9 h 运行的产水量,需要 3 套实验中的太阳能集热装置配备 12 张总面积为  $0.1248 m^2$  的平板膜和实际产水量 7.42 L/d 的太阳能膜蒸馏系统。

## 4 结 论

1) 太阳能驱动膜蒸馏系统是可行的。实验对比连续 9 h 与连续 24 h 这 2 种运行方式,系统白天运行的总产水量为 1.80 kg,实际日产水量可达  $43.47 kg/(m^2 \cdot d)$ ,单位产水热耗为  $495.3 kWh/m^3$ ;连续 24 h 运行的总产水量为 2.99 kg,实际日产水量为  $71.95 kg/(m^2 \cdot d)$ ,单位淡水热耗为  $1095.1 kWh/m^3$ ,考虑经济性,系统应选择白天运行,散热损失小,热耗小。

2) 虽然系统连续 24 h 运行的总产水量较高,但夜间运行降低了第 2 天热工质的初始运行温度,影响整个系统的产水量,且连续 24 h 运行的单位淡水热耗为  $1095.1 kWh/m^3$  远大于 9 h 连续运行的单位热耗  $495.3 kWh/m^3$ ,产水成本增加。因此,系统夜间应停止运行,降低热耗,提高系统的经济性。

3) 太阳能可为连续 9 h/24 h 这 2 种运行方式

提供稳定电能和足够热能,并保证较高的产水量。按照白天连续 9 h 运行的产水量,需  $5.67 \text{ m}^2$  的太阳能集热器配备 12 张总面积为  $0.1248 \text{ m}^2$  的平板膜和每天实际产水  $7.42 \text{ L/d}$  的太阳能膜蒸馏系统来满足 3 口家庭的饮用水需求。

### [参考文献]

- [1] 曾 辉,王永青. 太阳能膜蒸馏海水淡化技术研究和状况[J]. 能源与环境, 2013, (2): 31—38.
- [1] Zeng Hui, Wang Yongqing. Research and development of solar membrane distillation desalination technology [J]. Energy and Environment, 2013, (2): 31—38.
- [2] 杨华剑. 以太阳能为热源的真空膜蒸馏组件与系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [2] Yang Huajian. Study of the membrane module and system for solar heated vacuum membrane distillation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [3] 崔洪江,孙培廷,田 瑞. 太阳能膜蒸馏实验与数学建模[J]. 大连海事大学学报, 2010, (1): 119—122.
- [3] Cui Hongjiang, Sun Peiting, Tian Rui. Experimentation and mathematical modeling of solar membrane distillation [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2010, (1): 119—122.
- [4] 高 虹,田 瑞,杨晓宏,等. 高通量空气隙膜蒸馏传热研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(11): 1897—1900.
- [4] Gao Hong, Tian Rui, Yang Xiaohong, et al. Research for heat transfer of high flux air gap membrane distillation [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(11): 1897—1900.
- [5] 李卜义,王建友,王济虎,等. 太阳能空气隙膜蒸馏海水淡化技术研究进展[J]. 水处理技术, 2015, (4): 1—6.
- [5] Li Boyi, Wang Jianyou, Wang Jihu, et al. Advances in solar-powered air gap membrane distillation desalination technology [J]. Technology of Water Treatment, 2015, (4): 1—6.
- [6] 李 嵩,田 瑞,陈修怀,等. 高通量空气隙膜蒸馏系统的传热传质模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(11): 2060—2063.
- [6] Li song, Tian Rui, Chen Xiuhuai, et al. Heat and mass transfer model for a high-flux air gap membrane distillation system [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2007, 47 (11): 2060—2063.
- [7] 曾 辉. 太阳能膜蒸馏海水淡化系统实验研究[D]. 厦门: 集美大学, 2013.
- [7] Zeng Hui. Experimental investigation of a solar driven membrane distillation desalination system [D]. Xiamen: Jimei University, 2013.
- [8] 田 瑞. 高通量空气隙膜蒸馏系统的机理及应用研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2008.
- [8] Tian Rui. Mechanism and application study on high flux air gap membrane distillation system [D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2008.
- [9] Fath H E S, Elsherbiny S M, Hassan A A. PV and thermally driven small-scale, stand-alone solar desalination systems with very low maintenance needs [J]. Desalination, 2008, 225: 58—69.
- [10] Drioli E, Ali A, Macedonio F. Membrane distillation: Recent developments and perspectives [J]. Desalination, 2015, (356): 56—84.
- [11] Alkhudhiri A, Darwish N, Hilal N. Membrane distillation: A comprehensive review [J]. Desalination, 2012, (287): 2—18.
- [12] Koschikowski J, Wiegand M, Rommel M, et al. Experimental investigations on solar driven stand-alone membrane distillation systems for remote areas [J]. Desalination, 2009, 248 (6): 125—131.
- [13] Hogan P, Sudjito A, Morrison G. Desalination by solar heated membrane distillation [J]. Desalination, 1991, (81): 81—90.
- [14] Banat F, Jwaied N, Rommel M J, et al. Desalination by a “compact SMADES” autonomous solar powered membrane distillation unit [J]. Desalination, 2007, 217(1-3): 29—37.
- [15] Banat F, Jwaied N, Rommel M, et al. Performance evaluation of the “large SMADES” autonomous desalination solar-driven membrane distillation plant in Aqaba, Jordan [J]. Desalination, 2007, 217 (1-3): 17—28.
- [16] Wang P, Chung T S. Recent advances in membrane distillation processes: Membrane development, configuration design and application exploring [J]. Membrane Science, 2015, 474: 39—56.
- [17] Aly M, Elzahaby A E, Kabeela M M. Direct contact membrane water distillation assisted with solar energy [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 110: 397—406.
- [18] Shin Yonghyun, Cho Hyeonrak, Choi Jihyuck. Application of response surface methodology (RSM) in

- the optimization of dewetting conditions for flat sheet membrane distillation (MD) membranes [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, 57(22): 10020—10030.
- [19] Dume'e L F, Gray S, Duke M, et al. The role of membrane surface energy on direct contact membrane distillation performance [J]. *Desalination*, 2013, 323: 22—30.
- [20] Chung S, Seo C D, Lee H, et al. Design strategy for networking membrane module and heat exchanger for direct contact membrane distillation process in seawater desalination [J]. *Desalination*, 2014, 349: 126—135.
- [21] 郭 泉. 光伏组件发电效率影响因子的优化研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2015.
- [21] Guo Xiao. Study on optimization of power generation efficiency factors of PV module [D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2015.

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE SOLAR THERMAL-PHOTOVOLTAIC AIR GAP MEMBRANE DISTILLATION SYSTEM

Deng Hongling<sup>1</sup>, Yang Xiaohong<sup>1,2</sup>, Tian Rui<sup>1,3</sup>, Li Hongjian<sup>1</sup>, Li Da<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Key Laboratory of Wind Energy and Solar Energy Utilization Technology, Ministry of Education, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3. Inner Mongolia Renewable Energy Key Laboratories, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** This paper designs a solar thermal-photovoltaic air gap membrane distillation system. Studied the effects of thermoelectric parameters on membrane flux for two operating conditions of 9 hours and 24 hours; analyzed system temperature and membrane flux change with solar irradiation; theoretically calculated the stability of the system, and the optimal matching of the area of solar collector and the membrane area. The experimental results showed that under the condition of system runs for 9 consecutive hours during the day, the maximum permeate flux of the system was  $5.84 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , the total water production was 1.80 kg, the actual daily permeate flux reached  $43.47 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , the heat consumption of  $495.3 \text{ kWh}/\text{m}^3$ . Under the condition of system runs for 24 consecutive hours, the maximum permeate flux of the system was  $13.07 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , the total water production was 2.99 kg, the actual daily permeate flux reached  $71.95 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , the heat consumption of  $1095.1 \text{ kWh}/\text{m}^3$ . The system operates stably in both operating conditions. Rely on the solar thermal-photovoltaic drives the membrane distillation components is stable and feasible. In accordance with the 9 hours of permeate flux, needs the solar collector of  $5.67 \text{ m}^2$  with a total membrane area of  $0.1248 \text{ m}^2$  to reach the actual permeate flux of 7.42 L/d to meet a three population home of 6 L daily drinking water needs.

**Keywords:** solar thermal-photovoltaic; air gap membrane distillation; thermal parameters; permeate flux