

# 一体化太阳能热泵热水器运行特性的实验研究

卫梁彦,王玲珑,吴 薇

(南京师范大学 能源与机械工程学院,江苏 南京 210042)

**[摘要]** 介绍并研究了一种新型集热/蓄能/蒸发一体化太阳能热泵热水器系统(SHPWHICSE)。该装置将真空管集热器、蓄能容器和蒸发器集于一体,通过相变潜热吸收并储存大量太阳能。根据相变材料(石蜡)在吸、放热过程中温度的变化计算蓄热量,确定相变材料中储存的热量能够满足系统热负荷。定义了一体化太阳能热泵系统的得热效率,并和直膨式太阳能热泵热水器得热效率进行比较。在春季典型工况下对容量为 150 L 的 SHPWHICSE 进行实验研究,结果表明:晴天工况下,系统 COP 可达 5.63;即使阴雨天,COP 也可达 4.13;太阳辐射强度的不稳定变化对热泵系统得热效率和 COP 的影响不大。因此,该系统在各种天气条件下都可以高效稳定地制取生活热水。

**[关键词]** 集热/蓄能/蒸发一体化太阳能热泵热水器;供热性能;得热效率

**[中图分类号]** TU519 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2011)03-0036-08

## Experimental Study on the Operating Characteristics of Solar Heat Pump Water Heater Integrated With Collector, Storage and Evaporation

Wei Liangyan, Wang Linglong, Wu Wei

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** A novel solar heat pump water heater integrated with collector, storage and evaporation (SHPWHICSE) is presented and analyzed. By adding phase-changing materials into the collector/storage/evaporator, the solar energy can be absorbed and stored as latent heat. Calculating the stored energy according to temperature variation of the phase-change material which is chosen as paraffin, the result is that the stored energy can meet the heat load of this system. Solar got efficiency of this system is defined and compared with the direct expansion solar heat pump water heater. Experimental studies of SHPWHICSE with 150L water heating capacity are done at typical weather conditions in spring. The results indicate the system's COP is 5.63 on sunny days. Although on overcast or rainy days, the system's COP can reach 4.13. Moreover, solar radiation intensity's unstable change has little influence on the solar got efficiency and COP. Therefore, SHPWHICSE can be operating highly efficiently and stably at various weather conditions for domestic hot water.

**Key words:** solar heat pump water heater integrated with collector, storage and evaporation, coefficient of performance, solar energy got efficiency

随着人们节能和环保意识的增强,开发新能源、利用可再生能源、节约现有能源和提高能源利用率已成为当今学者研究的重要课题。太阳能热泵系统将热泵技术和太阳能利用技术有机结合,克服了太阳能热流密度低、间歇性和不稳定性带来的负面影响。

自 20 世纪 50 年代,很多发达国家已经开始研究、开发太阳能热泵系统,并建成了许多示范工程<sup>[1-3]</sup>。90 年代以后,我国上海交通大学、天津大学、东南大学、哈尔滨工业大学、台湾国立大学等高校也投入了大量人力、物力对各种太阳能热泵系统进行了理论、实验及模拟研究,并且取得了一定的成果<sup>[4-11]</sup>。但是这些系统或多或少存在一些问题,太阳能热泵在阴雨天、夜间或太阳辐射不足的情况下,很难高效、稳定地运行。例如,上海交通大学搭建的直膨式太阳能热泵热水器实验样机<sup>[4,5]</sup>,系统 COP 受太阳辐射的影响较大,

收稿日期: 2011-07-01。

基金项目: 江苏省高校自然科学基金基础研究项目(07KJB480060); 江苏省高校自然科学基金基础研究项目(09KJB470005)。

通讯联系人: 吴 薇,副教授,研究方向: 制冷与节能技术研究。E-mail: wuwei@njnu.edu.cn

太阳辐射强度范围在  $250 \sim 955 \text{ W/m}^2$  之间时, COP 的变化值为  $3.1 \sim 6.6$ , 若太阳辐射强度低于  $250 \text{ W/m}^2$ , 则无法正常制取热水。蓄热型太阳能热泵可能出现显热蓄热装置过大、蓄热效率过低、潜热蓄热系统复杂、换热损失大等缺点。例如哈尔滨工业大学提出的太阳能季节相变蓄热热泵系统<sup>[10]</sup>, 利用相变材料 ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) 在夏季将太阳能储存起来, 冬季通过热泵系统将储存的热量从相变材料中取出来, 这样不仅解决了显热蓄能的种种缺陷, 还解决了冬季利用热泵效率低的问题, 但是该系统比较复杂, 需要另设蓄热装置, 利用载热介质从蓄热器中取热, 增加了二次传热损失。

鉴于以上研究, 我们设计了一种新型的集热/蓄能/蒸发一体化太阳能热泵热水器系统 (Solar Heat Pump Water Heater Integrated With Collector/Storage/Evaporation, SHPWHICSE)<sup>[12,13]</sup>。

## 1 一体化太阳能热泵热水器系统实验台简介

### 1.1 装置构成及原理

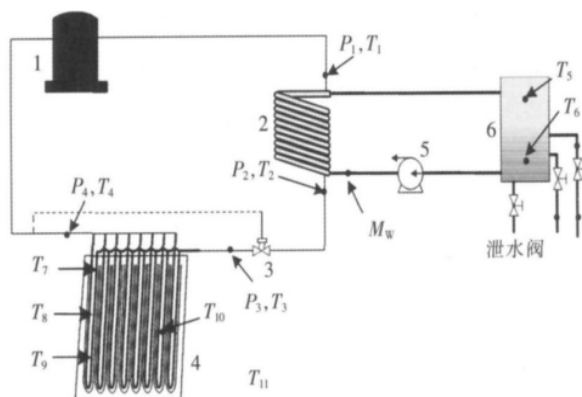
一体化太阳能热泵热水器系统工作原理如图 1 所示。其主要部件的参数列于表 1。

表 1 系统主要部件参数

Table 1 Main parameters of operating structures

名称	规格及型号	备注
太阳能集热/蓄能/蒸发器	16TT18/Φ58	全玻璃真空集热管, 有效集热面积 $1.67 \text{ m}^2$ , 蒸发器为 U 型铜管
压缩机	FG720CG-1UY	额定功率 735 W, 直流变频, 排气量 $10.9 \text{ mL/rev}$
冷凝器	水冷套管式	负荷 $3.5 \text{ kW}$
热水箱	承压式保温水箱	容积 150 L, 不锈钢内胆, 50 mm 厚的聚氨酯发泡保温层
水泵	PB-H089EA	扬程为 9 m, 流量为 $0.6 \text{ m}^3/\text{h}$

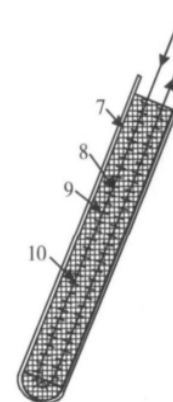
SHPWHICSE 是将太阳能热泵技术和相变蓄热技术有机结合起来的一种新系统。其中太阳能集热/蓄能/蒸发器如图 2 所示, 热泵系统的蒸发器以 U 形蒸发管的形式布置于太阳能真空集热管中, 每根蒸发管与真空集热管中间均以相变材料填充, 起到蓄能容器的作用。在白天太阳辐射较强的情况下, 相变材料通过固-液相变潜热对太阳能进行储存; 在夜间、连续阴雨天即太阳辐射较弱时, 通过热泵系统将储存在相变材料中的热量取出并加热水箱中的循环水, 保证系统能够向用户不间断地提供热水。



1. 压缩机; 2. 套管冷凝器; 3. 电子膨胀阀; 4. 集热/蓄能/蒸发器;  
5. 水泵; 6. 水箱; P. 压力测点; T. 温度测点; M. 流量测点

图 1 一体化太阳能热泵热水器原理图及测点布置图

Fig.1 Schematic and distribution of measuring points of the integrated solar-energy heat pump water heater



7. 真空集热管; 8. 制冷剂蒸发管;  
9. 滴定管试管刷; 10. 相变材料

图 2 太阳能集热/蓄能/蒸发器结构示意图

Fig.2 Diagram of solar collector/storage/evaporator structure

SHPWHICSE 由两个回路组成: 太阳能集热/蓄能/蒸发器和压缩机、水冷冷凝器的制冷剂管、电子膨胀阀串联连接成一个闭合的回路; 水冷冷凝器水冷管、水泵、水箱串联连接成一个闭合的回路。制冷剂 R22 直接在集热/蓄能/蒸发器中吸收太阳能和/或相变材料中储存的能量而蒸发, 然后进入压缩机, 被压缩成高温高压气体, 再经过套管冷凝器放热给循环水, 并冷凝成液体, 经过膨胀阀节流降压后回到集热/蓄能/蒸发器中, 依次循环。

## 1.2 系统的运行模式和特点

SHPWHICSE 的运行模式可分为以下 3 种:

(1) 蓄热-供热模式: 当太阳辐射强度足够高时, 集热器收集的太阳能可以满足系统热负荷. 同时, 相变材料完全液化, 吸收并储存多余太阳能, 作为太阳辐射不足或无太阳辐射时热泵系统的补给热源;

(2) 部分释热模式: 当太阳辐射强度不高时, 如在多云天气或阴雨天, 制冷剂吸收太阳辐射能的同时, 相变材料部分发生液-固相变, 将储存的太阳能释放出来作为补充热源;

(3) 释热模式: 当没有太阳辐射能可利用时, 如夜晚, 热泵系统完全从相变材料中吸取热量, 满足用户使用热水的需求.

SHPWHICSE 中的集热/蓄能/蒸发器集太阳能集热器、蓄能容器以及热泵系统的蒸发器于一体, 减少了中间换热环节, 省去了热媒循环系统, 节约了制造成本; 蒸发管外每隔一定距离以盘绕的方式布置滴定管试管刷, 解决了相变材料相变时由于密度变化引起分布不均的问题, 同时起到了肋片强化传热的作用; 在太阳能集热器中加入有机相变材料, 以固-液相变潜热对太阳能进行储存, 不仅解决了利用显热蓄热时蓄热量不足的问题, 还克服了热泵冬季运行效率不高和太阳能间歇性带来系统工作不稳定的缺陷, 能够保障热水器全天候高效地工作.

## 2 测试系统及评价指标

### 2.1 测试系统

实验过程中的测试装置及测点布置情况分别见表 2、表 3 和图 1.

表 2 测试系统的主要配置

Table 2 Main equipments of measuring system

名称	规格
测温装置	K 型热电偶, 测量范围 $-200 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ , 精度 $\pm 0.75\%$
侧压装置	麦克压阻, 测量范围 $0 \sim 1.5 \text{ MPa}$ 和 $0 \sim 3 \text{ MPa}$ , 精度 $\pm 0.25\%$ FS
功率测量	艾诺有功功率变送器, 输出电压信号 $5 \sim 10 \text{ A}$ , 单相输入 $220 \text{ V}$
流量测量	天仪涡轮流量计, 测量范围 $0.2 \sim 1.2 \text{ m}^3/\text{h}$ , 精度 $\pm 1\%$ R
数据采集仪	Agilent 34970A, 20 ~ 120 个通道, 6.5 位分辨率, 0.004% 基本直流电压精度, 扫描速率 250 通道/s
太阳能采集	太阳总辐射仪 PY56789, 测试范围 $0 \sim 2000 \text{ W/m}^2$ , 光谱范围 $0.3 \sim 3 \mu\text{m}$ , 精度 $\pm 2\%$ , 跟踪精度 $96 \text{ h} + 30 \text{ s}$

表 3 温度测点的布置

Table 3 Layout of the temperature measuring points

测温点	冷凝器进、出口温度; 压力	蒸发器进、出口温度; 压力	水箱进口温度	水箱出口温度	真空管内温度	集热温度	环境温度	循环水质量流量
符号	T1, T2; P1, P2	T3, T4; P3, P4	T5	T6	T7 ~ T9	T10	T11	$m_w$

### 2.2 系统的供热性能

系统运行过程中, 测试流经套管冷凝器的水流量及整个热泵系统的温度、压力、功率、制热量和性能系数等的变化情况, 其中系统制热量  $Q_w$  及性能系数 COP 不能自动测得, 可由下式<sup>[14]</sup>计算.

若忽略冷凝器的热量损失, 冷凝器的放热量相当于系统制热量, 即冷凝器中制冷剂与冷却水发生热量交换时冷却水的得热量.

$$Q_w = c_w m_w \Delta T_w = c_w \rho_w V_w (T_{w2} - T_{w1}) \quad (1)$$

$$\text{COP} = \frac{Q_w}{W} \quad (2)$$

式中  $\rho_w$  为水的密度,  $1000 \text{ kg/m}^3$ ;  $c_w$  为定压比热,  $4.184 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $m_w$  为水箱中水的质量流量,  $/(\text{kg}/\text{h})$ ;  $V_w$  为循环水的体积流量,  $/(\text{m}^3/\text{h})$ ;  $T_{w1}$ 、 $T_{w2}$ 、 $\Delta T_w$  为运行时间内储热水箱中起、终水温及温差,  $/^{\circ}\text{C}$ ;  $W$  为水箱中的水从起始温度加热到终止温度时间段内压缩机的耗电量,  $/(\text{kW} \cdot \text{h})$ .

### 2.3 得热效率

与传统的太阳能热泵不同, 集热/蓄能/蒸发一体化太阳能热泵热水器的低温热源除了集热器吸收的太阳能外, 还有储存在蓄能材料中的潜热或显热. 为了研究系统运行时制冷剂在蒸发器的得热量与太阳辐射强度之间的关系, 参考文献[15], 定义一种得热效率: 集热/蓄能/蒸发一体化太阳能热泵系统的得

热效率  $\eta_1$ .

集热 / 蓄能 / 蒸发一体化太阳能热泵系统的得热效率  $\eta_1$  可表示为:

$$\eta_1 = \frac{\text{制冷剂从真空集热管内吸收的热量}}{\text{太阳辐射总得热量}},$$

$$\eta_1 = \frac{Q_0}{I \cdot A} = \frac{(Q_w - P)}{I \cdot A} = \frac{c_w m_w \Delta T_w - P}{I \cdot A}, \quad (3)$$

式中:  $Q_0$  为集热 / 蓄能 / 蒸发器吸热量 /W;  $I$  为太阳辐射强度 /( $\text{W}/\text{m}^2$ );  $A$  为集热管集热面积 / $\text{m}^2$ ;  $P$  为压缩机及循环水泵的功率,其中水泵的功率为 105 W.

### 3 实验研究的结果及分析

我们选择在南京地区的 2011 年 4 月,在不同天气条件下,假定水的初始温度和环境温度相等,将 150 L 水从环境温度加热到  $50^\circ\text{C}$ ,对 SHPWHICSE 的运行特性进行实验研究,并分析其影响因素.该系统集热器采用的是全玻璃真空集热管,相对于平板集热器,热损失较小,同理,当环境温度高于集热温度时,真空集热管从空气中吸收的热量也相对较少.本实验所选用的相变材料为石蜡,其熔点为  $48^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ ,相变潜热  $L = 280 \text{ kJ/kg}$ ,密度  $\rho = 9001 \text{ kg/m}^3$ ,比热  $c_p = 3 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  [16].测试期间,每隔 10 min 记录一次数据.

#### 3.1 蓄能材料的蓄能过程

某晴天 6:00 ~ 24:00,测量真空管内相变材料的温度变化,如图 3 所示,为了验证相变材料能否在吸、放热过程中储存足够的热量保证系统正常运行.实验前一天,在真空集热管中布置热电偶,实验日 6:00 集热管内相变材料的温度为  $45.7^\circ\text{C}$ ,以环境温度  $11.6^\circ\text{C}$  为参考,相变材料中还储存着 7.0 MJ 的热量.随着太阳辐射的增强,石蜡温度升高.6:00 ~ 7:30,石蜡的温度基本保持在相变温度附近,升温缓慢,这时正处在潜热蓄热阶段,吸收热量 19.5 MJ.7:30 ~ 13:30,进入过热蓄热阶段,以显热蓄热,石蜡升温很快,最高温度可达  $193.6^\circ\text{C}$ ,吸收热量 28.7 MJ.升温过程中石蜡共吸收了 55.2 MJ 热量.随着太阳辐射强度的减弱,石蜡温度降低,热量迅速散失.0:00 时石蜡温度为  $61.5^\circ\text{C}$ ,过热显热几乎全部散失,石蜡中最终储存热量 28.1 MJ.

假设平均每人每天约消耗  $50^\circ\text{C}$  热水 50 L,以城市 3 口之家为例,则热水器系统每天需制取  $50^\circ\text{C}$  热水 150 L.设冷水的温度为环境温度  $11.6^\circ\text{C}$ ,则:  $Q = cm\Delta T = 4.184 \times 150 \times (50 - 11.6) = 24.1 \text{ MJ}$

通过家庭需热量和相变材料的蓄热量的计算可知,7:30 ~ 0:00 可以随时启动 SHPWHICSE 系统,制冷剂流过蒸发器将储存在相变材料中的热量取出并加热水箱中的循环水,满足用户对热水的需求.在白天相变材料含热量高的情况下,热泵系统通过蓄热 - 释热或部分释热模式运行,制取的热水储存在保温水箱中供晚上使用,避开高峰用电期.

#### 3.2 春季典型工况下的运行特性

##### 3.2.1 晴天时的运行特性

图 4 所示为系统实验测试期间(2011 年 4 月 16 日),太阳辐射强度、环境温度和真空管内石蜡的温度变化.测试期间,太阳辐射强度不稳定,在  $360 \sim 650 \text{ W}/\text{m}^2$  间上升并发生波动,平均值为  $550 \text{ W}/\text{m}^2$ .环境温度从  $16.4^\circ\text{C}$  上升到  $22.5^\circ\text{C}$ ,平均值为  $19.2^\circ\text{C}$ .加热水过程中,蒸发器不断从真空管内吸收热量,真空管内石蜡的温度迅速降低,后来随着太阳辐射强度的增大而升高.

系统运行过程中蒸发温度  $t_0$ 、水温  $t_w$  和 COP 随时间的变化如图 5 所示.水温从  $19^\circ\text{C}$  加热到  $50^\circ\text{C}$  共需 190 min.系统运行消耗石蜡中储存的热量,蒸发温度随着真空管内石蜡温度的降低而不断减小,但其数值仍然比较高,同时水温较低,热泵系统的工作压差较小,因此 COP 很高,约 7.3.随着水温的不断升高,系统从真空管内吸取的热量减小,同时由于太阳辐射强度的增大,石蜡中储存的热量开始增加,蒸发温度受到石蜡温度的影响而升高,但 COP 开始下降,直至 4.2.可见,水温的升高对系统性能的影响很大,太阳辐射强度影响相变材料蓄热量的多少,相变材料的温度变化又影响系统蒸发温度的大小.整个过程 COP 受太阳辐射波动的影响较小,平均 COP 可达 5.63,耗电量  $0.83 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,平均蒸发温度略高于环境温度(约  $17.4^\circ\text{C}$ ),因此 COP 值比普通的太阳能热泵提高了很多.热泵系统的得热效率反映系统运行时的蒸发得热效率.从图 6 中可知,热泵系统的得热效率  $\eta_1$  的变化规律与太阳辐射强度的变化规律完全相反,  $\eta_1$  仅

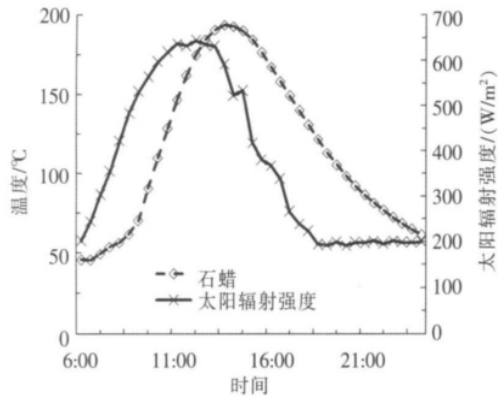


图 3 石蜡吸、放热过程中温度的变化

Fig.3 Temperature changes in the endothermic process and exothermic process of paraffin

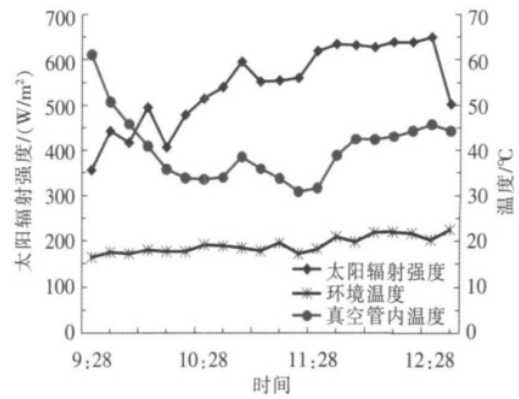


图 4 晴天太阳辐射强度,环境温度和真空管内温度随时间的变化

Fig.4 Variations of solar radiation intensity, ambient temperature and temperature in the vacuum tube with time on sunny day

在太阳辐射强度剧烈波动时有微弱的变化,相比太阳辐射对普通太阳能空气源热水系统得热效率的影响(如图 7 所示)<sup>[5]</sup>小,并且在运行期间  $\eta_1$  始终大于 1,说明相变材料中吸收并储存了大量的太阳能,系统从相变材料中吸收的热量远远大于太阳辐射能的瞬时输出量。

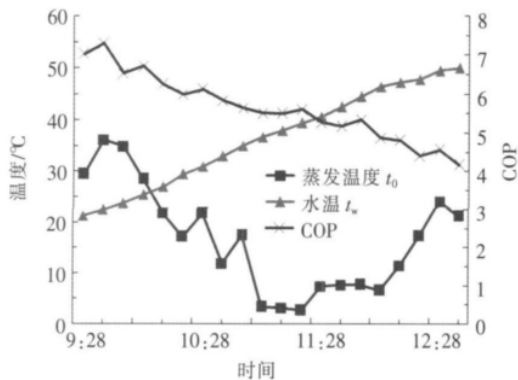


图 5 晴天加热过程中  $t_0$ ,  $t_w$  和 COP 随时间的变化

Fig.5 Variations of  $t_0$ ,  $t_w$  and COP with time on sunny day

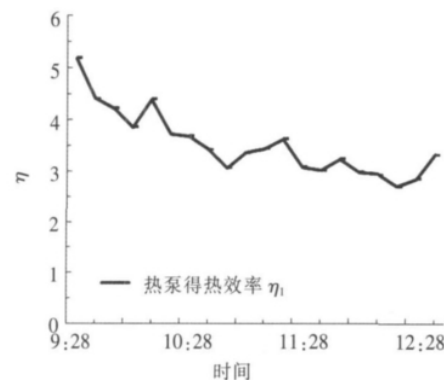


图 6 晴天时 SHPWHICSE 系统得热效率的特性

Fig.6 Variation of solar energy got efficiency of the integrated solar-energy heat pump water heater on sunny day

不难看出, SHPWHICSE 在整个加热过程中,太阳辐射强度决定真空管内相变材料温度的大小和蓄热量的多少,同时,蒸发温度受相变材料温度的影响很大,因此,在 SHPWHICSE 系统中,相变材料作为中间介质起着储存热量和移峰填谷的作用,可以有效提高系统的蒸发温度,并在一定程度上减缓太阳辐射变化对蒸发温度的影响,保证系统高效稳定运行。

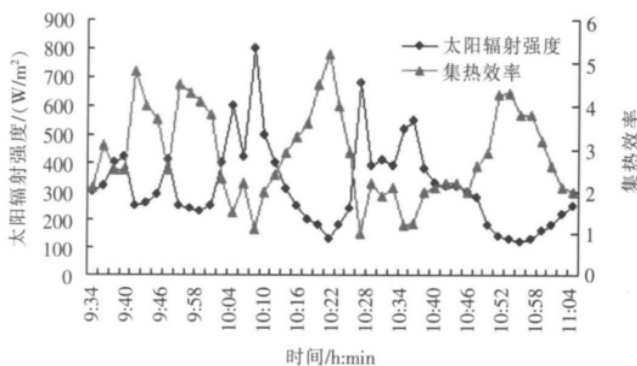


图 7 直膨式太阳能热泵热水器得热效率的特性<sup>[5]</sup>

Fig.7 Solar energy got efficiency of the direct expansion solar assisted heat pump water heater and solar radiation intensity change with time<sup>[5]</sup>

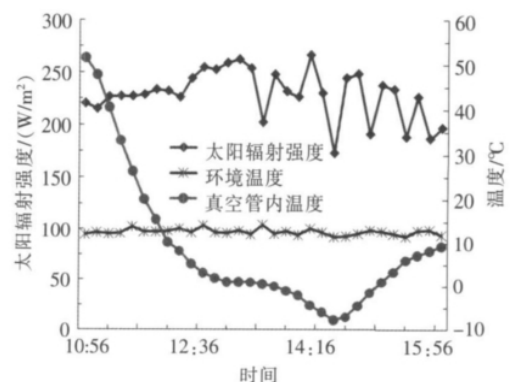


图 8 阴雨天太阳辐射强度,环境温度和真空管内温度随时间的变化

Fig.8 Variations of solar radiation intensity, ambient temperature and temperature in the vacuum tube with time on overcast or rainy day

### 3.2.2 阴雨天时的运行工况

阴雨天和夜间是太阳能热泵热水器系统最恶劣的运行工况. 本节研究实验样机在南京一个阴雨天(2011年4月6日)工况下的运行特性. 系统运行期间,平均太阳辐射强度为  $230 \text{ W/m}^2$ ,环境温度平均值为  $12.6^\circ\text{C}$ . 真空管内石蜡的温度随时间变化的幅度比较大,14:26后由于蒸发器吸热量的减小,太阳能的输入使石蜡的温度升高,见图8. 由图9所示的阴雨天工况下系统运行参数随时间的变化看出:300 min 可将循环水加热至  $50^\circ\text{C}$ . COP 仅在石蜡温度小于  $0^\circ\text{C}$  时随太阳辐射强度的变化有小幅波动,最大值可达 5.65,平均 COP 为 4.13,比系统在晴天运行时 COP 降低了 26.6%,比太阳能——空气复合热源热泵热水器系统<sup>[8]</sup>春季阴雨天时的 COP 值高 21.5%. 蒸发温度的变化趋势和石蜡温度的变化相同,平均值为  $1.09^\circ\text{C}$ . 耗电量为  $0.76 \text{ kW}\cdot\text{h}$ . 从图10可知,阴雨天时热泵系统的得热效率受太阳辐射强度变化的影响比晴天时大,但其值却比晴天时高,说明当太阳辐射强度较弱时,蒸发器吸收的热量大部分来自石蜡中储存的能量,当太阳辐射发生变化时,会影响蒸发器得热量和太阳能之间的比例.

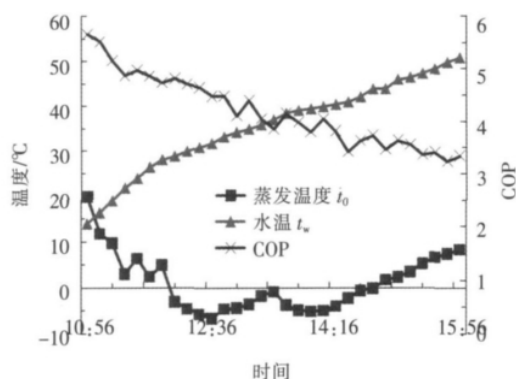


图9 阴雨天加热过程中  $i_0$ ,  $t_w$  和 COP 随时间的变化

Fig.9 Variations of  $i_0$ ,  $t_w$  and COP with time on overcast or rainy day

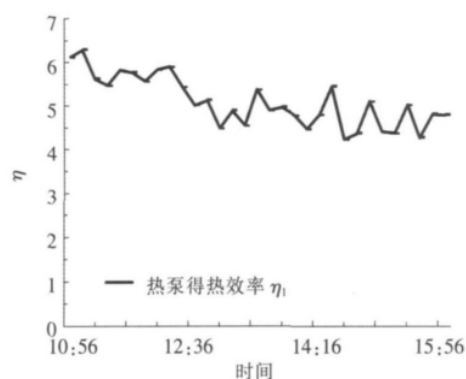


图10 阴雨天时 SHPWHICSE 系统得热效率的特性

Fig.10 Variation of solar energy got efficiency of the integrated solar-energy heat pump water heater on overcast or rainy day

由此可见,在太阳辐射较弱的阴雨天部分释热的模式下运行,系统同时吸收太阳辐射能和相变材料(石蜡)中储存的太阳能,保证较高的 COP 值,使其可以高效运行. 针对系统在连续阴雨天运行的性能,将在后续工作中做详细的研究.

### 3.2.3 夜晚时的运行工况

本节实验研究样机在南京一个夜晚(2011年4月24日),不考虑太阳辐射,在释热模式下运行,制冷剂直接从相变材料(石蜡)中吸取储存的热量. 环境温度仅有略微的降低,平均值为  $18.0^\circ\text{C}$ . 由于没有太阳能的补给,真空管内石蜡的温度不断降低,从图中可以明显的看出 18:14 ~ 18:44 之间为潜热放热阶段,在相变温度附近变化,可近似认为等温放热过程见图11. 如图12所示,水温的升温速度比较快,仅需要 240 min 就可以把水加热到  $50^\circ\text{C}$ . 耗电量为  $0.88 \text{ kW}\cdot\text{h}$ . 随着循环水温度的升高,压缩机耗功增加,而循环水的得热量降低,同时蒸发温度也不断降低,导致系统 COP 降低. 加热过程中,蒸发温度平均值为  $1.85^\circ\text{C}$ ,平均 COP 为 4.24,与晴天时相比,降低了 24.7%. 由此可见,SHPWICSE 在夜晚没有太阳辐射时运行, COP 相对晴天时降低的百分比较大,但其值较高且相对稳定.

从以上春季3种典型工况的分析可以看出,在太阳辐射强度较低或无太阳辐射时,例如阴雨天和夜晚,以石蜡为蓄能材料的 SHPWHICSE 系统可以通过各种模式高效稳定的运行,克服了传统的太阳能热泵在阴雨天无法稳定运行的缺陷.

## 4 结论与讨论

(1) 相变材料能够在晴天吸收并储存大量太阳辐射能,可以在任何时间为 SHPWHICSE 系统提供足够的热量,保证人们对生活热水的需求.

(2) 通过对 SHPWHICSE 系统在春季各种典型工况下实验数据的分析,虽然阴雨天和夜晚的 COP 相对晴天时降低了 26.6% 和 24.7%,但相变材料的加入有效提高了系统的蒸发温度,从而提高了 COP,比太阳能-空气复合热源热泵热水器系统 COP 高 21.5%;并且在一定程度上减缓了太阳辐射变化对蒸发温度

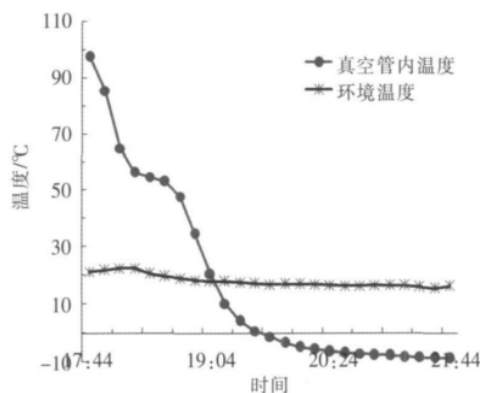
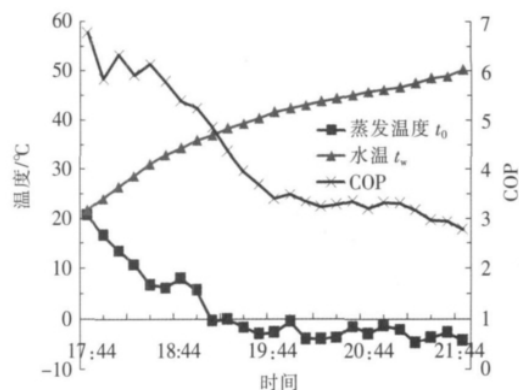


图 11 夜晚环境温度和真空管内温度随时间的变化

Fig.11 Variations of solar radiation intensity, ambient temperature and temperature in the vacuum tube with time at night

图 12 夜晚加热过程中  $t_0$ ,  $t_w$  和 COP 随时间的变化Fig.12 Variations of  $t_0$ ,  $t_w$  and COP with time at night

的影响. 因此, SHPWHICSE 系统可以在各种天气条件下高效稳定运行.

(3) 太阳辐射的不稳定波动对集热/蓄能/蒸发一体化太阳能热泵系统得热效率的影响比其对普通太阳能热泵热水系统得热效率的影响小. 一体化太阳能热泵系统得热效率始终保持很高值, 在相同的天气条件下, 高于直膨式太阳能热泵热水器.

### [参考文献] (References)

- [1] Chaturvedi S K, Chen D T, Kheirreddine A. Thermal performance of a variable capacity direct expansion solar-assisted heat pump [J]. *Energy Conversion and Management*, 1998, 35(1): 181-191.
- [2] Ito S, Miura N, Wang K. Performance of a heat pump using direct expansion solar collectors [J]. *Solar Energy*, 1999, 65(3): 189-196.
- [3] Lu Age, Charters W W S, Chaichana C. Solar heat pump systems for domestic hot water [J]. *Solar Energy*, 2002, 73(3): 169-175.
- [4] Li Y W, Wang R Z, Wu J Y, et al. Experimental performance analysis and optimization of direct expansion solar-assisted heat pump water heater [J]. *Energy*, 2007, 32: 1361-1374.
- [5] 李郁武, 王如竹, 王泰华, 等. 直膨式太阳能热泵热水器运行特性的实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2006, 27(6): 923-925.  
Li Yuwu, Wang Ruzhu, Wang Taihua, et al. Experimental study on the operational characteristics of direct expansion solar assisted heat pump water heater [J]. *Journal of Engineering Thermophysics* 2006, 27(6): 923-925. (in Chinese)
- [6] 刘立平, 赵军, 张华. 直膨式太阳能热泵系统的模拟仿真 [J]. *太阳能学报*, 2009, 30(5): 596-601.  
Liu Liping, Zhao Jun, Zhao Hua. Simulation study on the model of direct-expansion solar-assisted heat pump system [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2009, 30(5): 596-601. (in Chinese)
- [7] Xu G Y, Zhang X S, Deng S M. A simulation study on the operating performance of a solar-air source heat pump water heater [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26: 1257-1265.
- [8] 徐国英, 张小松. 太阳能——空气复合热源热泵系统热水器的性能模拟与分析 [J]. *太阳能学报*, 2006, 27(11): 1148-1154.  
Xu Guoying, Zhang Xiaosong. Analysis on the operating characteristics of solar-air source heat pump water heater [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2006, 27(11): 1148-1154. (in Chinese)
- [9] Chyng J P, Lee C P, Huang B J. Performance analysis of a solar-assisted heat pump water heater [J]. *Solar Energy*, 2003, 73(7): 33-44.
- [10] 姜益强, 齐琦, 姚杨, 等. 太阳能季节相变蓄热热泵系统在哈尔滨应用的模拟研究 [J]. *暖通空调*, 2007, 37(3): 15-20.  
Jiang Yiqiang, Qi Qi, Yao Yang, et al. Simulation of a heat pump heating system based on seasonal solar energy storage by phase change material used in Harbin [J]. *Heating Ventilating and Air Conditioning*, 2007, 37(3): 15-20. (in Chinese)
- [11] 王刚, 喻李葵, 陈建隆. 相变蓄能装置在太阳能热泵系统中的应用 [J]. *建筑热能通风空调*, 2008, 27(5): 47-49.  
Wang Gang, Yu Likui, Chen Jianlong. Applied phase-change heat storage equipment in solar heat pump [J]. *Building Energy*

- gy and Environment ,2008 ,27( 5) : 47-49. ( in Chinese)
- [12] 吴薇,刘兆亮,陈磊,等. 一种蓄能型一体化太阳能热泵热水器性能分析[J]. 南京师范大学:工程技术版,2009,9(1):28-34.  
Wu Wei ,Liu Zhaoliang ,Chen Lei ,et al. Performance analysis on a novel solar storage heat pump water heater integrated with collector/storage/evaporation[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Tecnology Edition ,2009 ,9( 1) : 28-34. ( in Chinese)
- [13] 卫梁彦,程清,刘宣义,等. 蓄能型太阳能热泵热水器系统性能系数的研究[C]// 中国工程热物理学会工程热物理与能源利用学术会议. 北京:中国热物理学会,2010.  
Wei Liangyan ,Cheng Qing ,Liu Xuanyi ,et al. Experimental study on the coefficient of performance of a novel solar storage heat pump water heater integrated with collector/storage/evaporation[C]// Journal of Engineering Thermophysics. Beijing: Journal of Engineering Thermophysics ,2010. ( in Chinese)
- [14] 旷玉辉,王如竹. 直膨式太阳能热泵热水器的实验研究[J]. 工程热物理学报,2005,26(3):379-381.  
Kuang Yuhui ,Wang Ruzhu. Exerimental study on the direct-expansion solar assisted heat-pump water heater[J]. Journal of Engineering Thermophysics ,2005 ,26( 3) : 379-381. ( in Chinese)
- [15] 王崇杰,管振忠,薛一冰. 渗透型太阳能空气集热器集热效率研究[J]. 太阳能学报,2008,29(1):35-39.  
Wang Chongjie ,Guan Zhenzhong ,Xue Yibing. Simulation study on unglazed transpired solar air collector[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica ,2008 ,29( 1) : 35-39. ( in Chinese)
- [16] 李晓倩. 石蜡相变储能与转换系统的研究[D]. 北京:中国农业大学水利与土木工程学院,2006.  
Li Xiaoqian. Research on phase change thermal energy storage and transition system with paraffin[D]. Beijing: College of Water Conservancy and Civil Engineering ,China Agricultural University ,2006. ( in Chinese)

[责任编辑:刘健]