

蓄能材料对内插热管式太阳能热泵系统冬季性能的影响

吴 薇, 夏 曼, 尹正宇, 高旭娜, 黄金燕, 秦芷萱

(江苏省能源系统过程转化与减排技术工程实验室, 南京师范大学能源与机械工程学院, 南京 210042)

摘 要: 为充分利用太阳能, 提高太阳能热泵系统能效比, 该研究提出了一种蓄能型内插热管式太阳能热泵系统, 可实现太阳能分季节最大化利用。搭建了系统性能试验台, 在南京地区开展了 2 a 的试验研究, 对比分析了相近环境条件下充灌或未充灌相变材料的系统瞬时集热效率、平均集热效率、系统性能系数和供水水温等随太阳辐射波动性的变化规律。结果表明在与冬季白天相近的太阳辐射强度、太阳辐射波动性和环境温度下, 充灌相变材料系统的瞬时集热效率波动性比未充灌的系统降低近 60%, 平均集热效率较未充灌的系统提高 25%以上。夜间工况下, 充灌相变材料系统的 COP (coefficient of performance) 可达 3.0 以上, 且能更快达到供水水温 50 °C, 时间缩短 20%以上。研究结果可为太阳能热泵系统的推广应用提供参考。

关键词: 太阳能; 热泵; 效率

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.026

中图分类号: TK519

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-005-0226-07

吴 薇, 夏 曼, 尹正宇, 高旭娜, 黄金燕, 秦芷萱. 蓄能材料对内插热管式太阳能热泵系统冬季性能的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 226—232. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.026 <http://www.tcsae.org>

Wu Wei, Xia Man, Yin Zhengyu, Gao Xu'na, Huang Jinyan, Qin Zhixuan. Effect of energy storage materials on performance of solar heat pump system with inserted heat pipe in winter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(5): 226—232. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.026 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

能源危机以及环境污染日益加剧, 2018 年 1 月发布的《中共中央国务院关于实施乡村振兴战略的意见》提出, 优化农村能源供给结构, 大力发展太阳能、浅层地热能、生物质能等。中国南方地区农村住宅分布范围广, 科学运用太阳能热水系统能够提升能源综合利用率和生态环境质量。太阳能热泵系统利用太阳能作为热泵的低温热源, 可提高性能系数^[1-2]、热效率^[3], 提升系统的综合性能^[4-5], 实现能源的高效利用^[6]。但太阳能热泵系统同太阳能热水器一样受环境、气候等因素的影响较大, 在夜间及阴雨天(即太阳辐射强度低于 250 W/m²时)难以正常工作^[7]。利用蓄能材料的相变潜热储存太阳能, 可以在夜间和阴天太阳能不足时向系统提供热量^[8], 减少集热器面积^[9], 克服太阳辐射波动性对系统的影响, 提高系统能效比^[10-11]。Feliński 等^[12]研究表明在太阳能真空集热管中充灌相变蓄能材料可以减少系统在夜间的热量损失。Youssef 等^[13]发现加入相变蓄能装置后, 太阳能热泵系统在晴天和阴天的平均性能系数分别提高了 6.1%和 14.0%。可见加入蓄能材料可以显著提高太阳能热泵系统在夜间和阴雨天的性能。

由于热管具有无动力温差小高效传热等特性, 许多

研究者将其应用于太阳能集热器中^[14-16]。Nkwetta 等^[17]研究了 2 种不同类型的太阳能集热器, 发现应用热管后这 2 种集热器的集热性能均得到提升。Rittidech 等^[18]发现充注 R134a 工质的开放和闭合回路的振荡热管应用到太阳能集热器中, 集热效率分别可达 62%和 76%。这些研究表明热管应用于太阳能集热器后可提高系统热力性能。

目前对于蓄能型太阳能热泵系统的研究主要侧重于系统性能的提升, 关于添加蓄能材料后提升系统稳定性方面的研究相对较少。旷玉辉等^[19]搭建了一种带有蓄热水箱的太阳能热泵供热系统试验台, 研究结果表明蓄热水箱可以使蒸发器日平均吸热功率的变化趋于稳定, 即可以弥补太阳能的不稳定性和间歇性。但是使用蓄能材料后性能稳定性如何提高没有给出具体的评价指标。而标准偏差是一种用来衡量波动性的常用指标, 标准差越大, 波动性和不稳定性越强^[20-21]。因此, 将相近条件下充灌相变材料前后系统相关指标的标准偏差进行对比, 可以评价系统稳定性。

鉴于以上研究, 本文设计了一种蓄能型内插热管式太阳能热泵热水系统^[22], 将太阳能集热器、相变蓄能容器、振荡热管集于一体, 利用相变材料储存太阳能, 通过振荡热管高效传热, 根据太阳辐射强度选择运行模式, 实现太阳能分季节全天候利用, 提高系统整体性能和运行稳定性。搭建了蓄能型内插热管式太阳能热泵系统冬季性能试验台, 在南京地区冬季工况下开展了 2a 的试验研究, 通过大量的数据筛选, 对比研究了相近的太阳辐射强度、太阳辐射强度标准偏差和环境温度下, 充灌或未充灌相变材料的系统其瞬时集热效率、平均集热效率、

收稿日期: 2019-10-24 修订日期: 2020-02-09

基金项目: 江苏省自然科学基金面上研究项目(BK20151549); 江苏省太阳能技术重点实验室开放课题(KLSST201903)

作者简介: 吴 薇, 副教授, 主要从事太阳能热利用方面的研究。

Email: wuwe@njnu.edu.cn

系统性能系数 (coefficient of performance, COP) 和供水水温等随太阳辐射强度的变化规律, 得到了充灌相变材料对系统性能及稳定性的影响规律。

1 系统工作原理

蓄能型内插热管式太阳能热泵热水系统如图 1 所示, 主要由蓄能型内插热管式太阳能集热器、压缩机、冷凝器、热力膨胀阀、蒸发器、截止阀、水箱和水泵等组成。其中, 蓄能型内插热管太阳能集热器^[23]的结构如图 2 所示, 振荡热管换热器的蒸发段以 U 形管形式布置在太阳能真空集热管内, 相变材料填充在振荡热管的蒸发段与太阳能真空集热管之间。振荡热管换热器为南京工业大学设计加工, 材料为紫铜, 热管工质为 R134a, 充灌率为 50%。换热器外壳套在振荡热管冷凝段外部, 循环水管路的进口和出口设置在换热器外壳上, 振荡热管冷凝段与换热器外壳之间充满循环水。系统可以根据太阳辐射的季节性变化, 通过切换截止阀, 实现不同工作模式的转换。

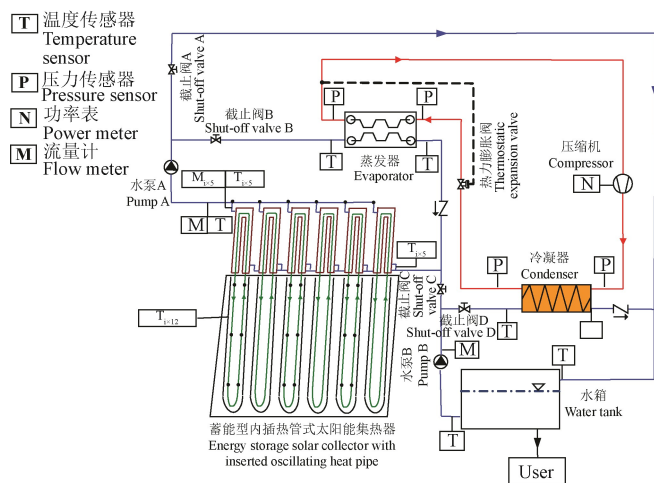


图 1 蓄能型内插热管式太阳能热泵系统图

Fig.1 Schematic diagram of energy storage solar heat pump system with inserted heat pipe

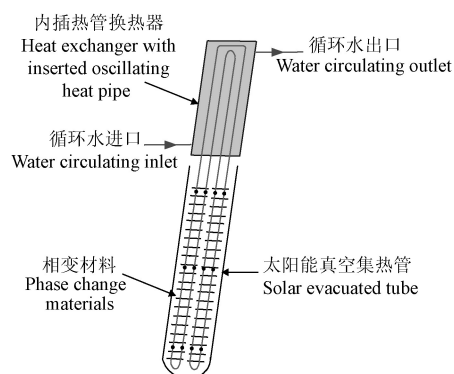


图 2 蓄能型内插热管式太阳能集热器结构图

Fig.2 Schematic diagram of energy storage solar collector with inserted heat pipe

夏季工况下, 热泵处于关闭状态, 截止阀 A、C 开通, B、D 关闭。夜间时, 相变材料将白天储存的热量释放出来, 通过振荡热管换热器直接加热循环水至所需供水温度。

冬季工况下, 热泵处于开启状态, 截止阀 B、D 开通, A、C 关闭, 如图 3 所示。蓄能型内插热管式太阳能集热器中相变材料传递或者白天储存供夜间放出的热量有限, 不足以直接加热循环水至所需温度。振荡热管换热器通过循环水将这部分热量传递给热泵系统的蒸发器, 通过热泵循环将热量传递到热泵系统冷凝器侧, 加热另一侧的循环水至所需供水温度。



图 3 冬季工况下的测试试验台

Fig.3 Test rig under winter condition

2 冬季工况下系统性能试验

2.1 试验台介绍

为了研究冬季工况下, 不同太阳辐射、不同环境温度以及充灌和未充灌相变材料对系统整体性能的影响, 在南京大学能源与机械工程学院 (32°04'26.26"N, 118°48'51.89"E) 搭建了图 3 中的系统性能测试试验台, 测点分布如图 1 所示。

根据国标《民用建筑太阳能热水系统应用技术标准 (GB50364-2018)》^[24]中规定, 太阳能热水系统的供水水温、水压和水质应符合现行国家标准《建筑给水排水设计规范 (GB50015-2017)》^[25]的有关规定。根据国标 GB50015-2017, 自备热水供应和淋浴设备的住宅每人每日最高日用水量为 40~80 L。取普通三口之家每日所需热水水量为 180 L。

试验中所用到的测试仪器见表 1, 其中太阳辐射强度由太阳辐射计 Global Water WE300 测量, 太阳辐射数据记录仪 GL500-7-2 记录。环境温度、冷凝器进出口水温由 K 型热电偶测量, 循环水体积流量由涡轮流量计测得, 压缩机和水泵的总功率由功率变送器测得。利用 Agilent 34972A 数据采集仪每 10 s 采集数据 1 次。试验中所用相变材料选用国药集团化学试剂有限公司生产的 48# 切片石蜡, 相变温度为 48~50 °C, 比热为 $2.9 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, 固态时密度为 912 kg/m^3 , 液体时密度为 769 kg/m^3 , 汽化潜热为 234 kJ/kg 。

本研究开展了 2 a 的试验, 第 1 年集热器中未充灌相变材料, 第 2 年集热器中充灌石蜡作为相变材料, 通过大量的数据筛选, 对比研究了相近的环境条件 (太阳辐射强度、太阳辐射强度标准偏差和环境温度) 下, 充灌相变材料对系统克服太阳辐射波动性的影响。

表 1 试验测量装置

Table 1 Test measurement device

名称 Items	技术规格 Technical specification
热电偶 Thermocouple	型号 OMG-TT-K-30-SLE, 测量范围: -200~1 300, 精度: 0.75%
压力变送器 Pressure transmitter	MPM480, 低压端测量范围: 1~1.5 MPa, 高压端测量范围: 1~3 MPa, 测量精度: ±0.25%
功率变送器 Power meter	AN7931X, 额定电压范围: 20.0~600.0 V, 额定电流范围: 0.03~40.00 A, 测量精度: 0.5%
涡轮流量计 Turbine flow meter	LWY-10C, 测量范围 0.2~1.2 m³/h, 精度 1%
太阳能辐射计 Solar radiometer	Global Water WE300, 测量范围: 0~ 1 500 W/m², 光谱范围: 0.3~3 μm, 测量 精度: ±2%
数据采集装置 Data acquisition device	Agilent 34970A, 20~120 路, 6.5 位分辨率, 0.004%基本直流电压精度

2.2 评价指标

2.2.1 系统集成热效率

冬季白天工况下太阳辐射弱, 蓄能型内插热管式太阳能集热器传递的热量不足, 需要启动热泵系统来实现加热热水。忽略振荡热管换热器出口循环水与热泵蒸发器传热时损失, 蓄能型内插热管太阳能集热器向外输出的热量等于热泵蒸发器得到的热量。从热泵循环侧能量平衡来看, 蒸发器获得的热量等于冷凝负荷与系统功耗的差。因此参照文献[26-28], 定义冬季工况下系统瞬时集热效率为

$$\eta = \frac{c_w \rho q_{vh} (t_{ho} - t_{hi}) - P}{AI} \quad (1)$$

式中 η 为系统瞬时集热效率; c_w 为水的比热容, J/(kg·K); ρ 为水的密度, kg/m³; q_{vh} 为热泵冷凝器侧循环水的体积流量, m³/s; t_{ho} 为热泵冷凝器侧循环水出水温度, °C; t_{hi} 为热泵冷凝器侧循环水进水温度, °C; A 为真空管受辐射面积, m²; I 为太阳辐射强度, W/m²; P 为系统压缩机和水泵总功耗, W。

2.2.2 供水水温

国标《城镇给水排水技术规范(GB50788-2012)》^[29]规定, 生活热水系统的供水温度不低于 45 °C, 洗浴用水温度为 50~60 °C。在南京地区夜间工况下, 对充灌与未充灌相变材料的蓄能型内插热管式太阳热泵热水系统供水温度开展试验, 对比了从相近水温加热到 50 °C 供水水温时 2 个系统所需时间。

2.2.3 性能系数

冬季夜间或阴雨天工况下, 蓄能型内插热管式太阳能集热器中相变材料将白天储存的热量释放出来, 通过振荡热管换热器传递给热泵蒸发器, 热泵系统的蒸发侧温度提高, 系统整体性能提升。系统性能系数为供热量与系统耗功之比^[30]

$$\text{COP} = \frac{\Phi_w}{P} = \frac{c_w \rho q_{vh} (t_{ho} - t_{hi})}{P} \quad (2)$$

式中 COP 为系统性能系数; Φ_w 为热泵冷凝器水侧得热量, W。

2.2.4 标准差

标准差又称均方差 S , 是离均差平方的算术平均数的

平方根, 反映各数据偏离平均数的程度, 常用来衡量一组数据的波动性。

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

式中 N 为测量次数; X_i 为各次的测量值; \bar{X} 表示测量平均值。

2.3 误差分析

冬季系统集成热效率可由公式(1)计算得到, 其中 ρ 、 c_w 、 A 可视为准确值。故有

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} \leq \sqrt{\left(\frac{2\Delta t}{t_{ho} - t_{hi}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta q_{vh}}{q_{vh}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2} \quad (4)$$

式中 $\Delta\eta$ 为效率的绝对误差; Δt 为温度测量的绝对误差, °C; ΔI 为太阳辐射强度测量的绝对误差, W/m²; Δq_{vh} 为体积流量测量的绝对误差, m³/s; ΔP 为功率测量的绝对误差, W。

系统 COP 可由公式(2)计算得到, 其中 ρ 、 c_w 可视为准确值。故有

$$\frac{\Delta\text{COP}}{\text{COP}} \leq \sqrt{\left(\frac{2\Delta t}{t_{ho} - t_{hi}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta q_{vh}}{q_{vh}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2} \quad (5)$$

根据表 1 各测量仪器的测量精度及误差, 计算可得 $\Delta t/(t_{ho} - t_{hi}) = 0.75\%$, $\Delta I/I \leq 2\%$, $\Delta q_{vh}/q_{vh} \leq 1\%$, $\Delta P/P \leq 0.5\%$, 将相关参数分别带入公式(4)、(5)中得到系统集成热效率 η 、COP 的误差分别为 2.7% 和 1.9%。

3 结果与分析

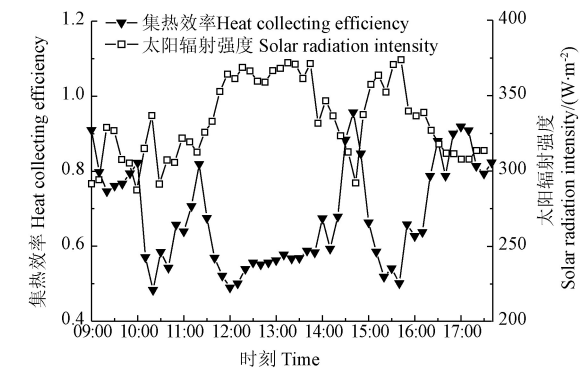
3.1 冬季白天工况下系统瞬时集热效率

选取南京地区冬季白天工况下, 平均太阳辐射强度、波动性和平均环境温度相近的某几天, 分别对充灌和未充灌相变材料的系统集成热效率进行试验。得到瞬时集热效率曲线如图 4 所示。

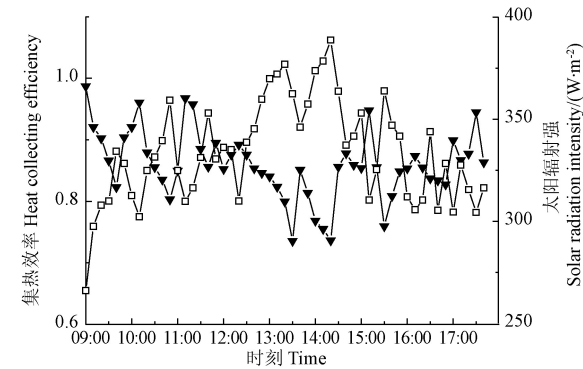
如图 4a 所示集热器内未充灌相变材料时, 环境温度平均为 7.6 °C, 平均太阳辐射强度为 334 W/m², 太阳辐射的标准偏差为 25.90 W/m², 此时系统平均集热效率 η 为 0.55, 集热效率的标准偏差为 0.13。

如图 4b 所示集热器内充灌相变材料时, 环境温度平均为 7.5 °C, 平均太阳辐射强度为 333 W/m², 太阳辐射的标准偏差为 25.63 W/m², 此时系统平均集热效率 η 为 0.74, 集热效率的标准偏差为 0.05。

由图 4 可知, 无论是充灌还是未充灌相变材料, 系统运行稳定后, 系统的瞬时集热效率 η 均与太阳辐射强度的变化规律相反, 随太阳辐射的增强而减小, 随太阳辐射的减弱而增大。对比图 4 中充灌和未充灌相变材料的系统瞬时集热效率曲线可以看出, 在相近的环境条件下, 充灌石蜡的系统其集热效率的稳定性优于未充灌的系统, 波动性减少了 61.5%, 且充灌石蜡的系统集热效率大于未充灌的系统, 高出约 34.5%。



a. 系统未充灌相变材料
a. System filled without PCMs



b. 系统内充灌相变材料
b. System filled with PCMs

注：a 图试验时间为 2017-11-19，平均环境温度 7.6℃；b 图试验时间为 2018-12-17，平均环境温度 7.5℃。
Note: Test time is 2017-11-19 in Fig.a, and the average ambient temperature is 7.6℃；Test time is 2018-12-17 in Fig.b, and the average ambient temperature is 7.5℃.

图 4 冬季白天工况下瞬时集热效率变化曲线

Fig.4 Variations of instantaneous heat collecting efficiency of system under winter daytime conditions

3.2 冬季白天工况下系统平均集热效率

选取南京地区 2017 年和 2018 年 11 月至来年 3 月白天工况下的天气条件相近的某几天，将试验时间段内的太阳能辐射强度 I 、环境温度 t_a 、瞬时集热效率取平均值，得到相近太阳辐射强度和环境温度下，充灌和未充灌相变材料的系统平均集热效率对比如表 2 所示。集热器输出热量随太阳辐射的变化曲线如图 5 所示。

由表 2 可知，冬季白天工况下，未充灌相变材料时，系统的平均集热效率随着太阳辐射和环境温度的降低而降低；充灌石蜡蓄热后，系统的平均集热效率随着太阳辐射和环境温度的降低而升高。这是因为石蜡的相变蓄热作用，在太阳辐射降低之后，能够将之前储存的热量释放出来，太阳辐射和环境温度越低，释放的热量越多。并且，在环境温度、太阳辐射强度、太阳辐射强度波动等情况相近的条件下，充灌相变材料系统的平均集热效率均高于未充灌相变材料的系统，平均提高了 25.5%。

从图 5 可知，充灌相变材料的集热器输出热量均高于未充灌相变材料的集热器，太阳辐射强度越小，差距越大。这是因为太阳辐射低的时候，充灌相变的集热器

内石蜡发生相变释放出热量，减少了系统的热量损失，提高了系统的集热效率。

表 2 集热器内未充灌或充灌相变材料时平均集热效率对比
Table 2 Comparison of average collecting efficiency of system filled or not filled with phase change materials

未充灌 Not filled with PCMs			充灌 Filled with PCMs		
太阳辐射强度 Solar radiation intensity I / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	环境温度 Aambient temperature t_a / $^{\circ}\text{C}$	平均集热效率 Average collecting efficiency	太阳辐射强度 Solar radiation intensity I / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	环境温度 Aambient temperature t_a / $^{\circ}\text{C}$	平均集热效率 Average collecting efficiency
460	18	0.62	462	17	0.66
424	16	0.61	433	17	0.67
413	16	0.61	425	16	0.66
396	15	0.60	419	15	0.68
352	13	0.60	350	10	0.73
296	11	0.58	283	10	0.77
258	10	0.55	261	8	0.83
232	7	0.54	228	8	0.87

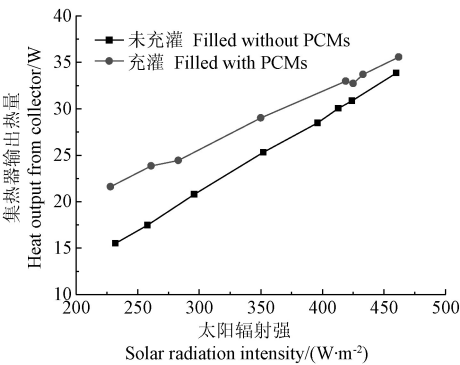


图 5 冬季工况下集热器输出热量的变化

Fig.5 Variations of heat output from solar collector in winter

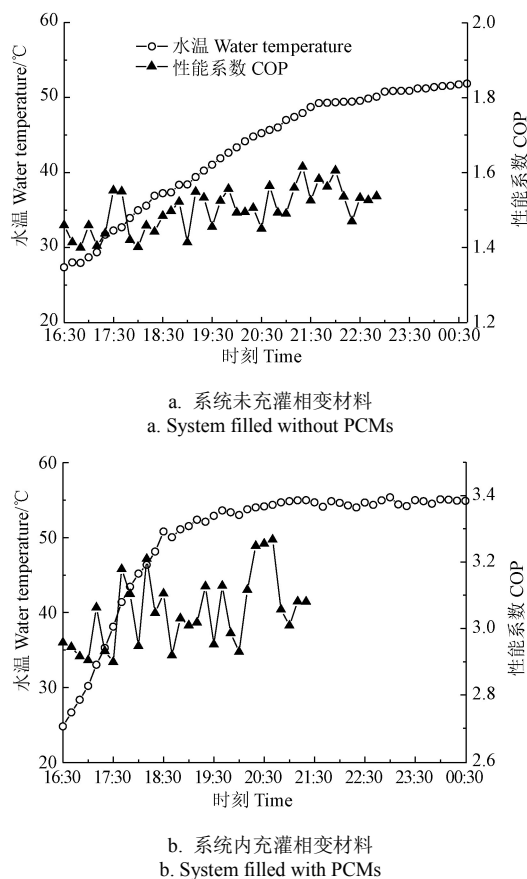
3.3 冬季夜间工况下系统瞬时性能系数和加热时间

冬季夜间工况下，集热器内充灌相变材料和未充灌相变材料的系统 COP 和供水水温随时间变化曲线如图 6 所示。

图 6a 所示为集热器内未充灌相变材料，试验时环境温度平均为 7℃，系统平均性能系数为 1.50。由图 6a 可知，热泵从 16:30 开始启动，到 18:30 水温可升至 37.2℃，到 20:30 水温上升到 45.2℃，21:40 水温上升到 49.2℃，之后保持稳定小幅度上升，最高水温为 50.1℃。水温从 27.4℃加热到 50.1℃，耗时 380 min。

如图 6b 所示集热器内充灌石蜡蓄热，环境温度为 4.5℃，系统平均性能系数为 3.05。由图 6b 可知，热泵从 16:30 开始启动，到 18:00 水温即可升至 45.2℃，到 20:30 水温上升到 54.2℃，之后保持稳定。水温从 24.8℃加热到 55.0℃，耗时 290 min。

由图 6 对比可知，冬季夜间工况下，充灌相变材料后系统的 COP 比未充灌相变材料的系统有明显提高，高出近 1 倍，且充灌石蜡蓄热的系统能在更短时间内达到供水水温 50℃，加热水时间缩短了 23.7%。



注: a 图试验时间: 2018-01-14, 平均环境温度 7 °C; b 图试验时间: 2019-01-06, 平均环境温度 4.5 °C。

Note: Test time is 2018-01-14 in Fig.a, and the average ambient temperature is 7 °C; Test time is 2019-01-06 in Fig.b, and the average ambient temperature is 4.5 °C.

图 6 冬季夜间工况下系统热性能曲线图

Fig.6 Variations of thermal performance of system under winter night conditions

4 结 论

本研究提出了一种蓄能型内插热管式太阳能热泵热水系统, 在集热器内充灌蓄能材料石蜡, 通过振荡热管高效传热, 根据太阳辐射强度切换工作模式, 可实现对太阳能的分季节最大化利用。在南京地区冬季工况下开展了试验研究, 分析了相近的环境条件充灌或未充灌相变材料的系统性能随太阳辐射波动性的变化规律, 结论如下:

1) 冬季白天工况下, 蓄能型内插热管式太阳能热泵热水系统在环境温度、太阳辐射强度、太阳辐射强度波动率等情况相近的条件下, 利用相变材料潜热蓄热的系统瞬时集热效率波动性比未充灌相变材料的系统减少 61.5%, 可以克服太阳辐射强度波动性对系统的直接影响。

2) 冬季白天工况下, 在环境温度、太阳辐射强度、太阳辐射强度波动等情况相近的条件下, 充灌相变材料系统的平均集热效率较未充灌相变材料的系统提高 25% 以上。

3) 冬季夜间工况下, 启动热泵循环后, 利用相变材料蓄热的蓄能型内插热管式太阳能热泵热水系统 COP 可达 3.0 以上, 是未充灌相变材料的系统近 2 倍, 且利用相变材料蓄热的系统能在更短时间内达到供水水温 50 °C。

[参 考 文 献]

- [1] Moreno-Rodríguez A, González-Gil A, Izquierdo M, et al. Theoretical model and experimental validation of a direct-expansion solar assisted heat pump for domestic hot water applications[J]. Energy, 2012, 45(1): 704—715.
- [2] 王岗, 全贞花, 赵耀华, 等. 太阳能-热泵复合供能系统[J]. 化工学报, 2017, 68(5): 2132—2139.
Wang Gang, Quan Zhenhua, Zhao Yaohua, et al. Solar-heat pump combined energy system[J]. CIESC Journal, 2017, 68(5): 2132—2139. (in Chinese with English abstract)
- [3] Omojaro P, Breitkopf C. Direct expansion solar assisted heat pumps: A review of applications and recent research[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 22(8): 33—45.
- [4] Suleman F, Dincer I, Agelin-Chaab M. Energy and exergy analyses of an integrated solar heat pump system[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1): 557—564.
- [5] Zhang D, Wu Q B, Li J P, et al. Effects of refrigerant charge and structural parameters on the performance of a direct-expansion solar-assisted heat pump system[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1): 520—526.
- [6] Ji J, Cai J, Huang W, et al. Experimental study on the performance of solar-assisted multi-functional heat pump based on enthalpy difference lab with solar simulator[J]. Renewable Energy, 2015, 75: 381—388.
- [7] 旷玉辉, 王如竹. 直膨式太阳能热泵热水器的实验研究[J]. 太阳能学报, 2005, 26(3): 379—381.
Kuang Yuhui, Wang Ruzhu. Experimental study of direct - expansion solar heat pump water heater[J]. Journal of Solar Energy, 2005, 26(3): 379—381. (in Chinese with English abstract)
- [8] Papadimitratos A, Sobhansarbandi S, Pozdin V, et al. Evacuated tube solar collectors integrated with phase change materials[J]. Solar Energy, 2016, 129: 10—19.
- [9] 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 study on solar seasonal phase change heat storage heat pump system in Harbin[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2007, 37(3): 15—20. (in Chinese with English abstract)
- [10] 杨灵艳, 倪龙, 马最良, 等. 三套管蓄能型太阳能和空气源热泵集成系统可行性实验[J]. 太阳能学报, 2010, 31(9): 1168—1172.
Yang Lingyan, Ni Long, Ma Zuiliang, et al. Feasibility experiment of integrated heat pump system with three-tube energy storage solar energy and air source[J]. Journal of Solar Energy, 2010, 31(9): 1168—1172. (in Chinese with English abstract)

- [11] 曲世琳, 彭莉, 吴晓琼, 等. 太阳能热利用中相变蓄热装置优化设计研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(7): 1705—1709.
Qu Shilin, Peng Li, Wu Xiaoqiong, et al. Optimum design of phase change thermal storage device in solar thermal utilization[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(7): 1705—1709. (in Chinese with English abstract)
- [12] Feliński P, Sekret R. Effect of PCM application inside an evacuated tube collector on the thermal performance of a domestic hot water system[J]. Energy & Buildings, 2017, 152: 558—567.
- [13] Youssef W, Ge Y T, Tassou S A. Effects of latent heat storage and controls on stability and performance of asolar assisted heat pump system for domestic hot water production[J]. Solar Energy, 2017, 150: 394—407.
- [14] 陈超, 张明星, 郑宏飞, 等. 日光温室用双集热管多曲面槽式空气集热器性能试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 245—252.
Chen Chao, Zhang Mingxing, Zheng Hongfei, et al. Thermal performance experiment for multiple clamber trough solar air collector with dual collector tubes for solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(15): 245—252. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王腾月, 刁彦华, 赵耀华, 等. 微热管阵列式太阳能空气集热-蓄热系统性能试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 148—156.
Wang Tengyue, Diao Yanhua, Zhao Yaohua, et al. Performance experiment on solar air collection-storage system with phase change material based on micro heat pipe arrays[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(18): 148—156. (in Chinese with English abstract)
- [16] 曾冬琪, 李慧, 代彦军. 内插管式太阳空气集热器阵列集热性能与流动阻力研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(3): 546—552.
Zeng Dongqi, Li Hui, Dai Yanjun. Research on thermal performance and flow resistance of evacuated tube solar air collectors[J]. Journal of Solar Energy, 2014, 35(3): 546—552. (in Chinese with English abstract)
- [17] Nkwetta D N, Smyth M, Haghighat F, et al. Experimental performance evaluation and comparative analyses of heat pipe and direct flow augmented solar collectors[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 60(1/2): 225—233.
- [18] Rittidech S, Wannapakne S. Experimental study of the performance of a solar collector by closed-end oscillating heat pipe (CEOHP)[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(11): 1978—1985.
- [19] 旷玉辉, 王如竹, 于立强. 太阳能热泵供热系统的实验研究[J]. 太阳能学报, 2002, 23(4): 408—413.
Kuang Yuhui, Wang Ruzhu, Yu Liqiang. Experimental study of solar assisted heat pump (SAHP) heating system for heat supply[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2002, 23(4): 408—413. (in Chinese with English abstract)
- [20] 鲁晓东, 李林峰. 多样化水平与中国企业出口波动: 基于产品与市场组合的研究[J]. 统计研究, 2018, 35(12): 56—67.
Lu Xiaodong, Li Linfeng. Diversification and volatility in the Chinese firms' exports: A study on product mix and market portfolio[J]. Statistical Research, 2018, 35(12): 56—67. (in Chinese with English abstract)
- [21] 袁小平, 李子旋, 倪亚南, 等. 基于自适应互补 LMD 方法的谐波检测与分析[J]. 电测与仪表, 2019, 56(3): 103—110.
Yuan Xiaoping, Li Zixuan, Ni Yanan, et al. Harmonic detection and analysis based on adaptive complementary LMD method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(3): 103—110. (in Chinese with English abstract)
- [22] 吴薇, 苏鹏飞, 王琴, 等. 一种全天候运行的高效蓄能型太阳能热泵供热方法 [P]. 中国发明专利, ZL201410161999.8, 2016-03-30.
- [23] 高旭娜, 吴薇, 孟志军, 等. 蓄能型振荡热管太阳能集热器热性能[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 234—240.
Gao Xuna, Wu Wei, Meng Zhijun, et al. Thermal performance of solar collector with energy storage materials and oscillating heat pipe[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(16): 234—240. (in Chinese with English abstract)
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑太阳能热水系统应用技术标准: GB50364-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑给水排水设计规范: GB50015-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [26] 袁颖利, 李勇, 代彦军, 等. 内插式太阳能真空管空气集热器性能分析[J]. 太阳能学报, 2010, 31(6): 703—708.
Yuan Yingli, Li Yong, Dai Yanjun, et al. Performance analysis of air collector with interposing solar vacuum tube[J]. Journal of Solar Energy, 2010, 31(6): 703—708. (in Chinese with English abstract)
- [27] Price H. A Parabolic trough solar power plant simulation model[R]. National Renewable Energy Laboratory 2003.
- [28] Tchinda R. Thermal behavior of solar air heater with compound parabolic concentrator[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49: 529—540.
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇给水排水技术规范: GB50788-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [30] 吴业正. 制冷原理及设备[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2015.

Effect of energy storage materials on performance of solar heat pump system with inserted heat pipe in winter

Wu Wei, Xia Man, Yin Zhengyu, Gao Xu'na, Huang Jinyan, Qin Zhixuan

(Engineering Laboratory for Energy System Process Conversion and Emission Control Technology of Jiangsu Province, School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: In order to make full use of solar energy and improve the energy efficiency of solar heat pump system, an energy storage solar heat pump water heating system with inserted oscillating heat pipe is proposed, which integrates solar collector, energy storage tank and oscillating heat pipe together reasonably and effectively. The system can store solar energy with the phase change materials (PCM) filled in the collector, transfer heat efficiently by oscillating heat pipe and switch operation mode according to solar radiation, and can realize the maximum utilization of solar energy in different seasons. In summer, enough heat is transferred or stored during the day to release at night by PCM in solar collector, which is directly used to heat the circulating water through the oscillating heat pipe heat exchanger. In winter, the heat transferred or stored during the day to release at night by PCM in solar collector is low, and the heat is transferred to the heat pump evaporator by the oscillating heat pipe heat exchanger to improve the evaporation temperature of the heat pump, and thus the overall performance of the system is improved. A test rig has also been established for the performance measurement of energy storage solar heat pump water heating system with inserted oscillating heat pipe. Paraffin is chose as phase change material of the system under the consideration of capacity, phase change temperature and latent heat of phase change. Experimental study has been carried out for two years under winter conditions in Nanjing, one year for the test rig without PCMs and another year with PCMs. Under similar environmental conditions (solar radiation intensity, fluctuation and ambient temperature), the variations of the instantaneous collecting efficiency, average collecting efficiency, COP (coefficient of performance) and water temperature of the system filling or not filling PCM with the fluctuation of solar radiation are compared and studied. The comparison and experimental results show that in winter daytime under similar solar radiation intensity, fluctuation and ambient temperature, the instantaneous collecting efficiency fluctuation with PCM is 61.5% less than that of the system without PCM, which can overcome the instantaneous influence of the fluctuation of solar radiation intensity on the system. Meanwhile the average collecting efficiency with PCM is 25.5% higher than that of the system without PCM. At winter night, under similar operation conditions, COP of the system filled with PCM is over 3.0, which is nearly twice as high as that of the system without PCM, and make water temperature reach 50 °C in a shorter time, shortening the time by more than 20%. The results can provide theoretical basis for the popularization and application of solar energy heat pump system.

Keywords: solar energy; heat pump; efficiency