

## 3种工况下多功能太阳能热泵的热泵制热水性能

蒋爱国<sup>1</sup>, 季杰<sup>1</sup>, 裴刚<sup>1</sup>, 刘可亮<sup>1</sup>, 胡广良<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学热科学和能源工程系, 安徽合肥 230027; 2. 广东五星太阳能有限公司, 广东东莞 523051)

**摘要:** 简要介绍一种多功能太阳能热泵(MSAHP)系统的基本原理及其可实现的功能模式. 对MSAHP样机在3种不同工况下热泵制热水性能进行了实验研究和对比分析, 系统最高性能系数为6.1, 在低温环境下性能系数范围也能达到1.8~5.9, 表明MSAHP在热泵制热水模式下具有明显的节能效果.

**关键词:** 多功能; 太阳能热泵; 制热水

**中图分类号:** TK512      **文献标识码:** A      **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2011.10.008

### Performance of MSAHP in water heating mode under three different work conditions

JIANG Aiguo<sup>1</sup>, JI Jie<sup>1</sup>, PEI Gang<sup>1</sup>, LIU Keliang<sup>1</sup>, HU Guangliang<sup>2</sup>

(1. Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;  
2. Guangdong Five Star Solar Energy Co., Ltd., Dongguan 523051, China)

**Abstract:** The principle and different operating modes of a multifunctional solar assisted heat pump (MSAHP) were briefly introduced. The tests of the prototype of the MSAHP in water heating mode were conducted under three different work conditions, and the results were discussed. The coefficient of performance (COP) can reach 6.1, and the COP under the lowest ambient temperature ranges from 1.8 to 5.9. The results indicate that the MSAHP can obviously save energy in water heating mode.

**Key words:** multifunction; solar assisted heat pump; water heating

## 0 引言

热泵热水器(HPWH, heat pump water heater)是利用热泵原理,从周围介质中吸取热量制取生活热水实用装置.从节约能源和环保的观点来看,热泵热水器具有其独特的优点和广阔的市场前景<sup>[1]</sup>.然而,与其他热水器相比,热泵热水器具有一套完整的热泵系统,需要的初投资较高,因而影响了热泵热水器的推广应用.考虑到目前广泛使用的家

用空调器具有和热泵热水器相近的系统,研究者们提出了多功能热泵(MHP, multifunctional heat pump)并进行了相关研究<sup>[2-6]</sup>.MHP系统是家用空调器和热泵热水器的有机结合体,具有制热、制冷、制热水等多种功能.与家用空调器和热泵热水器两者相比,MHP不仅可以减少设备初投资,有利于推广使用,而且整机全年的运行时间长,设备利用率高,此外,可以实现夏季制冷同时回收冷凝热制取热水,既提高了能源的利用效率,又可适当减少冷凝热

收稿日期:2009-08-19;修回日期:2010-01-10

基金项目:广东省粤港关键领域重点突破项目(20061684),国家自然科学基金(50708105)资助.

作者简介:蒋爱国,男,1978年生,博士生.研究方向:太阳能热泵. E-mail:jiangag@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:季杰,博士/教授. E-mail:jijie@ustc.edu.cn

的直接排放而造成的热污染. 由此可见, MHP 在提高能源利用效率方面优点明显. 近年来诸多研究者在太阳能热泵方面<sup>[7-12]</sup>进行了较为深入的研究, 结果表明, 太阳能热泵系统在太阳能利用效率和热泵系统性能系数(coefficient of performance, COP)两个方面的提高都比较理想, 然而太阳能热泵受到天气因素的制约, 表现出明显季节性和时段性. 而太阳能热水器可以直接有效利用太阳能获得热水, 具有节能、环保等优点, 目前我国普及率比较高且发展迅速. 但是同样受天气因素的制约, 太阳能热水器难以保证全年正常的水温供应, 需要辅助热源. MHP 作为太阳能热水器的辅助热源是一个比较节能而又可行的选择. 因此, 从充分利用太阳能, 进一步减少电能的使用比例的角度考虑, 本文提出了一种集太阳能热水器、热泵热水器和家用空调器三者功能于一体的多功能太阳能热泵(MSAHP, multifunctional solar assisted heat pump)系统. 在此基础上试制了样机, 如图 1 所示, 并对样机进行了系统的测试. 本文将简要介绍 MSAHP 的系统原理和功能模式, 并着重对 MSAHP 样机在 3 种不同工况下热泵制热水模式进行了实验研究和分析.

### 1 MSAHP 系统原理及功能模式

MSAHP 可实现太阳能制热水、热泵制热水、制冷兼制热水、制冷、空气源热泵制热和太阳能热水水源制热等 6 种功能模式. MSAHP 系统原理及主要部件如图 2 所示, 图中箭头所示为除太阳能制热水



图 1 多功能太阳能热泵样机制热水实验台  
Fig. 1 Prototype of the MSAHP in water heating mode

模式外各模式下氟利昂的运行路径.

储热水箱中的水优先利用太阳能加热, 在太阳能不足而导致水温不能满足要求时, 用热泵系统作为辅助加热水箱中的水, 从而保证稳定的热水供应. 在房间需要制冷同时水箱中水又需要加热时, 运行制冷兼制热水模式, 制冷的同时实现冷凝热回收利用, 免费获得热水的同时减少了冷凝热的直接排放; 太阳能热水水源热泵制热模式, 在太阳能制取的生活热水有富余, 同时环境温度相对较低造成空气源热泵制热模式运行效率低时运行该模式, 从而提高系统制热效率和能力, 减少电能的消耗.

### 2 MSAHP 样机热泵制热水实验

#### 2.1 测试参数及装置

MSAHP 样机热泵制热水模式原理简图和参数测试各测点的位置分布如图 3 所示. 实验过程中主

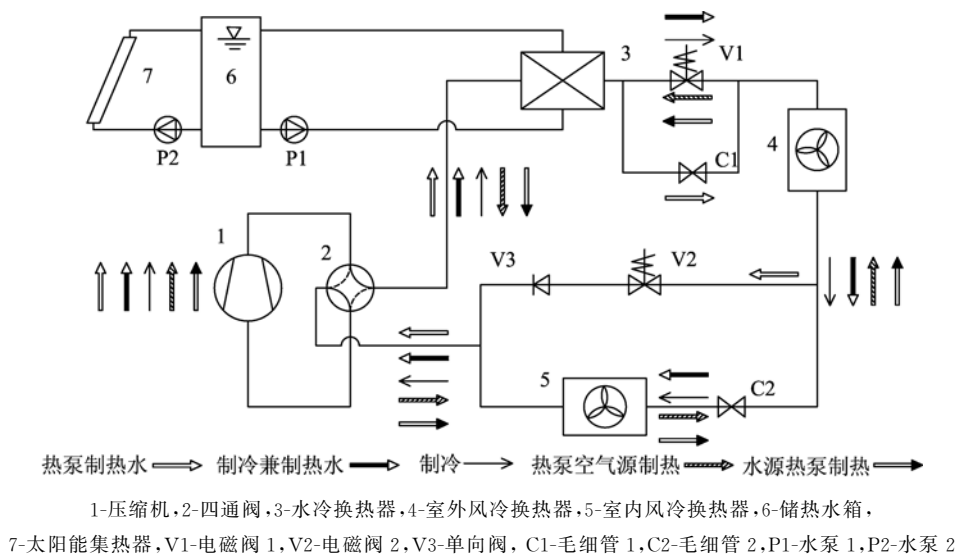


图 2 多功能太阳能热泵系统原理图  
Fig. 2 Schematic diagram of the MSAHP

要测试参数有温度、压力、功率等,测试装置名称、规格型号以及功能如表 1 所列.各测点测试参数全部由数据采集仪实时采集并由计算机记录保存.

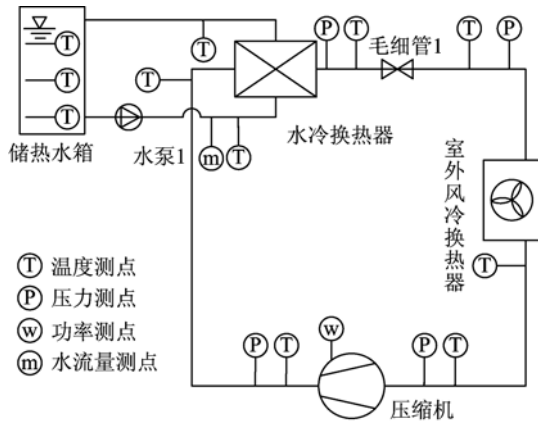


图 3 热泵制热水实验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the MSAHP experimental setup in water heating mode

表 1 测试装置  
Tab. 1 Test devices

名称	规格型号	功能
热电偶	0.2 mm 铜-康铜	温度测量
功率传感器	WBP112S91	功率测量
压力传感器	Huba506	压力测量
数据采集仪	Agilent34970A	数据采集

MSAHP 系统在热泵制热水模式下,系统的瞬时性能系数由式(1)计算:

$$COP = \frac{Q_w}{\omega_{in}} \quad (1)$$

式中,  $\omega_{in}/kW$  为压缩机的输入功率;  $Q_w/kW$  为水冷换热器的冷凝供热功率,

$$Q_w = mc(T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

式中,  $m/(kg \cdot s^{-1})$  为流过水冷换热器水的质量流量;  $c/(kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$  为水的比热容;  $T_{in}/^\circ C$ ,  $T_{out}/^\circ C$  分别为水冷换热器进出口水温.

### 2.2 实验方案

MSAHP 样机的调试和制热水模式测试工作是在广东五星太阳能有限公司实验室完成的.该实验室是用来测量热泵热水器热工性能的系统,整个系统依据国家标准 GB/T 7725-1996 和 GB/T 10870-2001 设计和建造,可以任意设定  $-10 \sim 45^\circ C$  之间的实验工况,系统通过计算机实现自动控制、数据采集及数据处理.

在 3 种不同工况下对 MSAHP 样机进行了热

泵制热水模式的实验研究.这 3 种工况分别为工况一:环境干、湿球温度分别为  $35^\circ C$  和  $24^\circ C$ ;工况二:环境干、湿球温度分别为  $20^\circ C$  和  $15^\circ C$ ;工况三:环境干、湿球温度分别为  $7^\circ C$  和  $6^\circ C$ .制热水的方式采用循环加热储热水箱中的水,所谓循环加热即将一定量的水从一个初始温度逐渐加热,直到实验结束达到一个最终温度.3 种工况下进行的热泵制热水实验加热的水量均为 300 L,循环水泵的水流量均为  $0.47 kg/s$ .实验过程中水温(水冷换热器进口水温)的变化范围分别为:工况一  $17.2 \sim 54.8^\circ C$ 、工况二  $15.5 \sim 53.9^\circ C$  和工况三  $15.8 \sim 53.9^\circ C$ .

## 3 结果分析

按照上述实验方案,在 3 种工况下,MSAHP 样机热泵制热水实验过程中压缩机输入功率、排气压力、排气温度以及制热水瞬时 COP 等参数随着水温的变化规律整理分析如下.

### 3.1 压缩机输入功率的变化

图 4 所示为 3 种实验工况下压缩机输入功率随着水温的变化趋势,从图中可见,3 次实验过程中随着水温的逐渐升高,压缩机输入功率均近似线性上升,系统均表现出明显的动态特性.这是因为在每次实验过程中虽然环境温度保持稳定状态,但是水温是逐渐升高的,使得水冷换热器的冷却条件处于不断变化之中,因此系统的工作特性是动态的.从图中 3 条曲线的相对关系看,环境温度对压机功率有一定的影响,但工况一和工况二的两条曲线比较接近;而工况三除实验开始阶段外,压缩机的输入功率都明显小于另外两种工况下的情况.

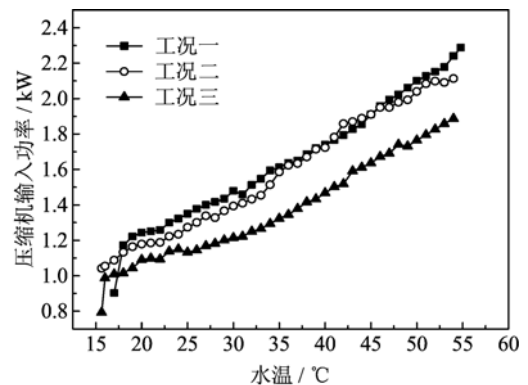


图 4 压缩机输入功率随水温的变化

Fig. 4 Compressor power consumption with water temperature

### 3.2 压缩机排气压力的变化

图 5 给出的是 3 次实验过程中压缩机排气压力在水温升高过程中的变化规律. 图中 3 条曲线的变化规律比较一致, 随着水温的逐步提高, 3 种工况下排气压力均呈近似单调上升的趋势, 可见水温对排气压力的影响显著; 而环境温度对排气压力的影响也比较明显, 除开始阶段外, 相同水温条件下环境温度低则排气压力也低, 反之亦然.

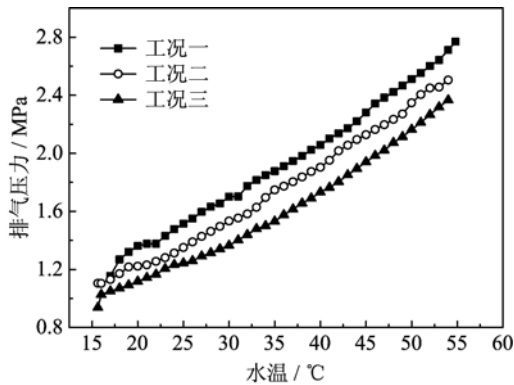


图 5 排气压力随水温的变化

Fig. 5 Discharge pressure with water temperature

### 3.3 压缩机排气温度的变化

3 种工况下水温变化过程中排气温度的变化规律如图 6 所示, 从图中可以看出, 3 种工况下排气温度的变化规律有所不同.

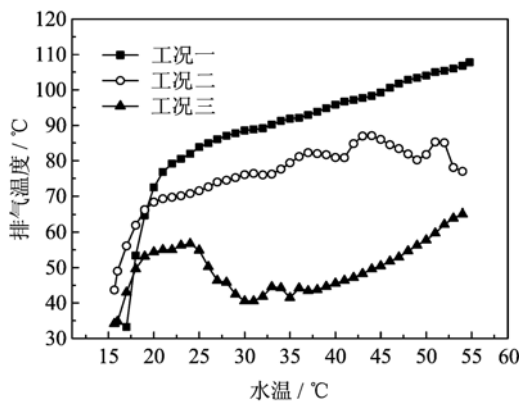


图 6 排气温度随水温的变化

Fig. 6 Discharge temperature with water temperature

工况一, 整个实验过程中排气温度随水温升高而单调增加, 排气温度在实验开始后迅速上升到 80 °C 左右, 此后排气温度随着水温的逐步提高而逐渐升高, 实验结束时排气温度达到最大值 107.8 °C.

工况二, 在水温从初始温度上升到约 20 °C 过程中, 排气温度迅速升高到 70 °C 左右, 此后, 随着水温

的进一步提高排气温度逐渐升高, 但上升趋势较前期变缓, 水温达到 35 °C 之后到实验结束, 排气温度的变化出现了一定的波动, 水温 44 °C 附近排气温度达到峰值 86.8 °C, 实验结束时排气温度为 77 °C. 可见, 该工况下, 排气温度维持在一个较高的范围内, 而最高排气温度 87 °C 左右, 这一特点既有利于制热水能力的提高, 又能保证系统处于合理的工作温度范围之内, 从而有利于系统的安全可靠运行.

工况三, 该工况下排气温度的变化规律与上述两个工况的差异较大. 实验开始后, 排气温度迅速升高到 55 °C 附近并维持到水温 25 °C 左右, 之后排气温度又快速下降, 水温上升到 32 °C 时排气温度下降到 40.5 °C, 然后排气温度出现小幅波动后再随水温的逐渐升高而升高, 实验结束时水温和排气温度分别为 53.9 °C 和 65.1 °C. 该工况下, 排气温度出现的先升高后明显下降再逐步上升的变化规律, 是因为该工况下环境温度较低, 在实验刚开始时水温较低的情况下, 室外风冷换热器上出现了部分结霜的情况, 而随着水温的逐步提高, 结霜程度逐步减小.

### 3.4 瞬时性能系数的变化

图 7 所示为 3 种工况下制热水瞬时 COP 随水温变化曲线, 从曲线的变化趋势看水温对系统的 COP 影响显著, 每种工况下热泵制热水瞬时 COP 随水温逐步增加而下降的趋势明显. 3 种工况下热泵制热水瞬时 COP 的变化范围分别为工况一 5.9 ~ 3.5、工况二 6.1 ~ 2.6 和工况三 5.9 ~ 1.8. 从 3 条曲线的相对位置关系可见环境温度对系统的瞬时 COP 也有明显的影响, 除实验开始阶段外, 环境温度越高瞬时 COP 值越高. 从瞬时 COP 的绝对值看, 即使是工况三的情况, 瞬时 COP 的最高值可以达到 5.9, 最低也能达到 1.8. 综上, MSAHP 的热泵制热

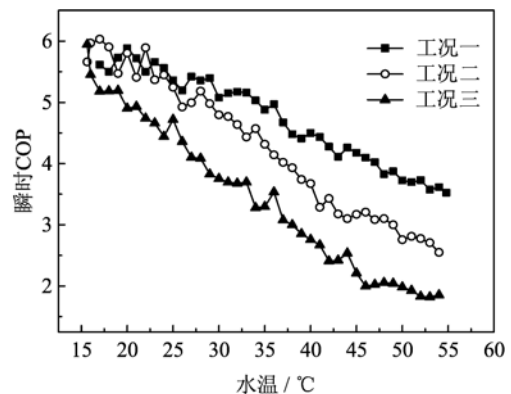


图 7 性能系数随水温的变化

Fig. 7 COP with water temperature

水模式节能效果显著,而且可工作的环境温度范围较广.

## 4 结论

本文研究的多功能太阳能热泵系统是一个具有太阳能制热水、热泵制热水、制冷兼制热水、制冷、空气源热泵制热和太阳能热水水源制热等多种功能的复杂系统.热泵制热水模式仅仅是该系统的模式之一,通过对试制的 MSAHP 样机在 3 种不同工况下进行的热泵制热水模式的实验,结果显示热泵制热水 COP 值较高,其中最高瞬时 COP 为 6.1;即使在环境温度只有 7 °C 的工况三的情况下,制热水的瞬时 COP 最低也能达到 1.8,而且最高值可以达到 5.9.实验结果表明 MSAHP 热泵制热水模式具有明显的节能效果,并且可以适应的环境温度范围较广,因此可以较大范围地推广应用.从水温对热泵制热水模式的 COP 的影响结果看,为了提高热泵的节能效果,在满足使用要求的情况下,应该尽量使水温维持在较低的范围内.而从环境温度对热泵制热水模式的运行结果看,应该让热泵在温度较高的环境中运行,从而有利于该模式下提高系统的节能效果.从本文的研究结果可见,多功能太阳能热泵系统的热泵制热水模式的运行是高效可行的.后续工作将进一步对其他各模式进行进一步的深入研究,保证各模式都能高效稳定运行.

### 参考文献(References)

- [1] Ji Jie, Pei Gang, He Wei, et al. Performance simulation and experiment of an air conditioner incorporated with a water heater in cooling and hot water supply [J]. HV & AC, 2003, 33(2): 19-23.  
季杰,裴刚,何伟,等.空调-热水器一体机制冷兼制热水模式的性能模拟和实验分析[J].暖通空调,2003, 33(2): 19-23.
- [2] Ji Jie, Chow Tintai, Pei Gang, et al. Domestic air-conditioner and integrated water-heater for subtropical climate [J]. Applied Thermal Engineer, 2003, 23: 581-592.
- [3] Ji Jie, Pei Gang, Chow Tintai, et al. Performance of multi-functional domestic heat pump system [J]. Applied Energy, 2005, 80: 307-326.
- [4] Li Shuhong, Wu Wenbin, Zhang Xiaosong. Experimental investigation on the multi-functional heat pump air conditioner water heater[J]. Fluid Machinery, 2005, 33(9): 48-50.  
李舒宏,武文斌,张小松.多功能热泵空调热水器的实验研究[J].流体机械,2005,33(9):48-50.
- [5] Jiang Huimin, Wang Yang, Ma Zuiliang, et al. Experimental research on the dynamic characteristics of the energy-saving type air conditioner with domestic hot water supply [J]. HV & AC, 2005, 35(9): 125-130.  
江辉民,王洋,马最良,等.带热水供应的节能型空调器动态特性的实验研究[J].暖通空调,2005,35(9): 125-130.
- [6] Ji Jie, Pei Gang, He Wei, et al. Performance simulation and experiment of an air conditioner incorporated with a water heater in heat supply only mode [J]. HV & AC, 2004, 34(12): 96-98.  
季杰,裴刚,何伟,等.空调-热水器一体机单独制热水模式的性能模拟和实验分析[J].暖通空调,2004, 34(12): 96-98.
- [7] Kuang Yuhui, Wang Ruzhu, Yu Liqiang. Experimental study of solar assisted heat pump system for heat supply [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2002, 23(4): 408-413.  
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.
- [8] Chyng J P, Lee C P, Huang B J. Performance analysis of a solar-assisted heat pump water heater [J]. Solar Energy, 2003, 74(1): 33-44.
- [9] Huang B J, Chyng J P. Performance characteristics of integral type solar-assisted heat pump water heater [J]. Solar Energy, 2001, 71(6): 403-414.
- [10] Huang B J, Lee C P. Long-term performance of solar-assisted heat pump water heater [J]. Renewable Energy, 2004, 29(4): 633-639.
- [11] Yang Jichun, Ji jie, Pei Gang, et al. Experimental investigation of an indirect expansion solar assisted multifunctional domestic heat pump [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, 37(1): 53-60.  
阳季春,季杰,裴刚,等.间接膨胀式太阳能多功能热泵供热实验[J].中国科学技术大学学报,2007,37(1): 53-60.
- [12] Pei Gang, Ji jie, Liu Keliang, et al. Performance of PV-SAHP under different condensing water temperatures [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2006, 36(10): 1 044-1 050.  
裴刚,季杰,刘可亮,等.光伏-太阳能热泵在不同冷凝水温下的特性[J].中国科学技术大学学报,2006, 36(10): 1 044-1 050.