

文章编号: 1671-6612 (2022) 02-243-06

直膨式太阳能空气源热泵制热的实验研究

荣维来 许树学 马国远 戴 晗

(北京工业大学 北京 100124)

【摘 要】 将太阳能热泵和空气源热泵结合起来, 搭建了直膨式太阳能空气源热泵实验台, 分别在太阳能单一热源和太阳能/空气双热源模式下对系统进行实际测试。测试结果发现, 单一热源时晴天工况平均制热 COP 达到 3.4, 阴天平均制热 COP 为 2.35; 双热源系统在晴天和阴天时, 制热 COP 最高分别为 4.3 和 3.5。

【关键词】 太阳能; 空气源热泵; 直膨式; 辐射强度
中图分类号 TB657 文献标识码 A

Experimental Study on Direct Expansion Solar Air Source Heat Pump Heating

Rong Weilai Xu Shuxue Ma Guoyuan Dai Han

(Beijing University of Technology, Beijing, 100124)

【Abstract】 Combine solar heat pump and air source heat pump, a direct expansion solar air source heat pump experiment platform was built. The actual test of the system was carried out in the solar single heat source and solar/air dual heat source modes. The test results found that the average heating COP under sunny conditions was 3.4 under a single heat source, and the average heating COP under cloudy conditions was 2.35; The highest heating COP of the dual heat source system in sunny and cloudy days is 4.3 and 3.5, respectively.

【Keywords】 Solar; Air source heat pump; Direct expansion; Radiation intensity

作者简介: 荣维来 (1998.05-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 1622728702@qq.com

通讯作者: 许树学 (1981.08-), 男, 博士, 副研究员, E-mail: xsx@bjut.edu.cn

收稿日期: 2021-06-30

0 引言

随着化石燃料的减少以及环境污染的加剧, 节能减排已经成为能源领域的重要任务, 清洁能源的利用变得越来越重要^[1]。太阳能是一种取之不尽用之不竭的清洁能源, 世界上多数国家都在加大对太阳能的研究与利用。根据专家预测, 直到 2050 年左右, 太阳能将在全球产能中占比达到 30%, 在本世纪末将取代核能成为世界第一能源。但太阳能不稳定, 受天气的影响比较大。比如在阴雨天气, 太阳辐射强度达不到要求, 太阳能板的集热效率会非常低, 不能满足用户的需求。热泵是一种高效利用低品位热源的技术, 通过逆卡诺循环将低品位的热能变成高品位热能, 既可以减少能源浪费, 又具有

节能减排特性。将太阳能与热泵相结合, 构造出太阳能空气源复合式热泵, 满足全天气温条件下用户的热量需求, 同时达到更高的节能效果。

制冷剂作为集热介质直接在太阳能集热器中吸热蒸发, 在冷凝器中释放冷凝热用来供热, 该系统结构紧凑, 无需防冻, 制热效率高。戴等建立了直膨式太阳能空气源热泵的仿真计算模型^[2]。侯隆澍等人将平板微热管光伏光热组件改造为新型光伏光热蒸发器, 研发出新型太阳能-空气双热源热泵系统, 对太阳能供热模式和双热源供热模式下系统的运行性能进行研究^[3]。刘朋等人使用 DeST 进行全年能耗模拟, 在此基础上确定太阳能集热器面积及热泵规格, 计算太阳能、空气源热泵、电锅炉

3种系统设备的最初投资及运行的成本费用,结果表明,太阳能空气源热泵系统相比于其他两系统节能性与经济性均优异^[4]。徐嘉等人编制了一套软件对太阳能一空气源热泵多能互补系统进行分析^[5]。佟健南等人提出了一种太阳能与空气源双蒸发器热泵复合供能系统,该系统可以满足建筑的供热、供冷、热水和部分电力的供应需求,根据用户的不同需求实现多种运行模式的自由切换^[6]。孟欣分别设计和搭建了两套系统:一套是传统空气源热泵系统,另一套是基于太阳能补偿的空气源热泵系统,利用两套系统为住宅供暖和提供全年生活热水,对两种系统方案进行建模,对其全年运行工况进行模拟和对比分析^[7]。Kjellsson等人研究了太阳能集热器和热泵的连接方案各种组合的可能性^[8]。Eslami等人研究了热泵和太阳能集热器并联运行以获取热水,效率显著提升^[9]。关欣等人搭建了直膨式太阳能热泵系统实验台,解苗苗等人在此基础上总结了内部参数和外部参数对直膨式太阳能热泵系统性能的影响,针对不同影响因素,给出了多种提高直膨式太阳能热泵系统性能的控制^[10]。

上述研究主要对单一太阳能热源的热泵运行性能进行了实验,对太阳能和空气源相结合的系统没有深入研究,单一热源的热泵系统和太阳能空气源热泵系统的对比也缺乏较深入的分析。本文将太阳能热泵和空气源热泵结合起来,搭建了直膨式太阳能空气源热泵实验台,分别测试以太阳能为单一热源的热泵系统和太阳能和空气源双热源热泵系统,对比数据可为相关研究提供参考。

1 系统原理

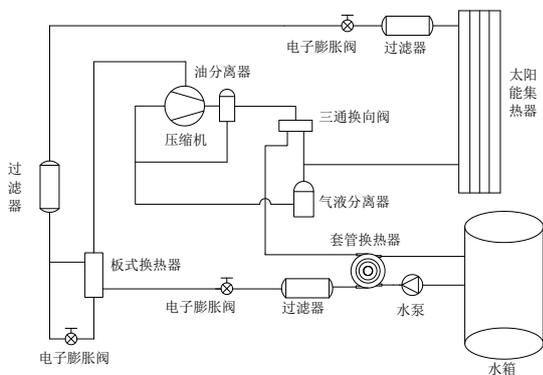


图1 直膨式太阳能空气源热泵系统原理

Fig.1 Principle of direct expansion solar air source heat pump system

直膨式太阳能空气源热泵的工作原理如图1所示。由太阳能集热/蒸发器、压缩机、套管换热器、电子膨胀阀、蓄热水箱等部件组成。工作过程如下:经电子膨胀阀节流降压后的工质流入集热器中吸收太阳能直接蒸发,制冷剂蒸汽被压缩机吸入,压缩成高温高压的制冷剂蒸汽。压缩机出口的制冷剂蒸汽流入套管式换热器,释放出的热量用于制取生活用热水或采暖,冷凝后的液体制冷剂经干燥过滤器和电子膨胀阀又流回太阳集热板中重新吸热、蒸发。

2 实验方法

太阳能集热器是直膨式太阳能空气源热泵的主要部件之一,通过吸收太阳辐射的能量,将能量传递给传热介质。本文选择平板式太阳能集热器作为系统太阳能端蒸发器,集热器面积采用如式(1)计算:

$$A_a = \frac{Q_{load}f}{I_T\eta_{cd}(1-\eta_L)} \tag{1}$$

式中: A_a 为太阳能集热板的总面积, m^2 ; Q_{load} 为建筑热水负荷能耗, W ; f 为太阳能保证率,变化范围一般为0.3-0.8,本文取0.3; I_T 为北京地区集热器采光面上的太阳辐射强度, W/m^2 ; η_{cd} 为集热器的年平均热效率,变化范围一般为0.25-0.5,本文取0.5; η_L 为蓄热水箱和水管路的热损耗,变化范围一般为0.2-0.3,本文取0.28。

选择气候条件较差的冬季工况来进行集热面积匹配计算。北京地区冬季晴天的最大太阳辐射强度约为 $750W/m^2$ 。全年工况变化范围内的平均制热性能系数COP取3,压缩机功率2.3kW,则平均热水负荷能耗为6.9kW。太阳能集热器的平均集热效率为0.8,晴天可吸收太阳能 $600W/m^2$ 。将数据代入集热面积计算公式可得到,总集热面积取 $9.6m^2$ 可基本满足该系统全年工况下正常运行的集热要求。

制冷剂选用R22,压缩机额定输入功率为2.3kW,冷凝器选用套管式换热器,蓄热水箱 $1m^3$ 。水箱下方设有用于降温的风冷换热器、两个风扇及循环水泵,水温和流量可以控制。太阳能集热器朝向西南方,以 55° 角度倾斜安装于室外屋顶上。空气源热泵主机、冷凝器以及蓄热水箱放置在一层室外。



图 2 太阳能集热板

Fig.2 Solar collector panel



图 3 蓄热水箱

Fig.3 Heat storage water tank



图 4 压缩机部分实物图

Fig.4 Picture of compressor parts

表 1 实验部件明细

Table 1 Details of experimental components

配件	型号
太阳能集热器	集热面积 9.6 平方米
压缩机	PRCH250
冷凝器	套管式
太阳辐射强度测量表	QTS-4 辐射表
温度传感器	PT100 铂热电阻、热电偶
压力传感器	Huba
流量计	RT-LD-DN32
功率表	TD96
数据采集器	安捷伦 34970A

测试在北京地区的 2021 年 3 月进行, 分两步: (1) 只开启太阳能集热器作为单一热源蒸发器时系统的运行性能。(2) 太阳能集热器与空气源风冷换热器同时开启, 考察系统的整体运行性能。两种模式实验都是从早上 9:00 开始到晚上 17:00 结束。通过温度传感器、太阳辐射强度测量表、压力传感器、功率表等实验器件分别测量出环境温度、水箱进出水温度、太阳辐射强度、压缩机吸排气压力和功耗等参数, 计算得出能够反映直膨式太阳能空气源热泵热水系统热力性能的评价指标, 包括系统制热量 Q 、制热 COP 。

系统制热量采用如式 (2) 计算:

$$Q = Cm\Delta t \quad (2)$$

式中: Q 为系统制热量, kW; C 为水的比热容, $4.2\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; m 为水的流量, kg/s ; Δt 为水箱进出水温差, $^\circ\text{C}$ 。

系统的 COP 采用如式 (3) 计算:

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (3)$$

式中: Q 为系统制热量, kW; W 为压缩机功耗, kW。

3 实验结果与分析

图 5 和图 6 所示为晴天和阴天条件下, 太阳辐射强度和室外温度的变化, 时间为上午 9:00 至下午 17:00。由图可知, 太阳辐射强度和室外温度均呈现先升高后降低的趋势, 最高点出现在中午至下午时段, 最高太阳辐射强度达到 $882\text{W}/\text{m}^2$, 最高室外温度为 16.5°C 。因为中午至下午阶段是一天之中

太阳强度最强的时候,此时太阳能板可以吸收较多的太阳能。通过计算得到平均太阳辐射强度为 $610\text{W}/\text{m}^2$,平均室外环境温度为 15°C 。太阳辐射强度受阴天影响较大,最大值仅为 $241\text{W}/\text{m}^2$,室外温度影响较小,最高温度为 15.9°C 。平均太阳辐射强度为 $158\text{W}/\text{m}^2$ 。

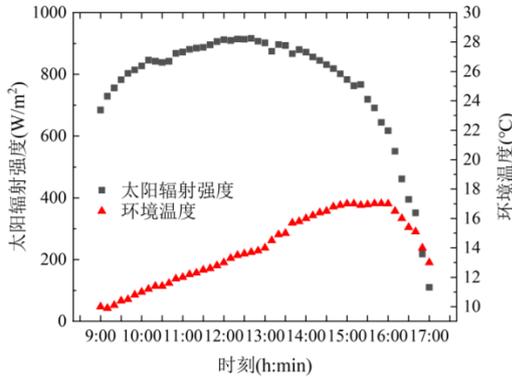


图 5 晴天工况

Fig.5 Sunny working conditions

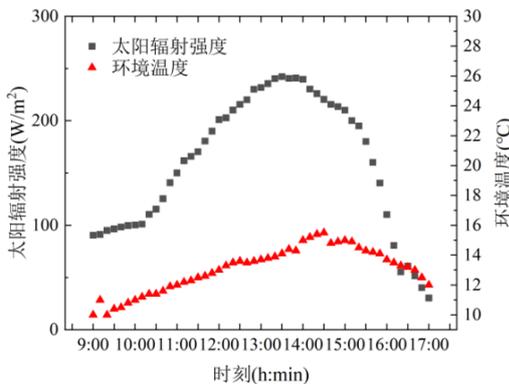


图 6 阴天工况

Fig.6 Cloudy working conditions

3.1 太阳能单一热源制热性能

图 7 所示为系统制热量、压缩机耗功随时间的变化规律。由图 7 可知,晴天工况下系统运行 1 小时后达到稳定状态,冷凝器持续放出热量,水箱的温度逐步上升,随着冷凝器出口水温的升高,冷凝器放热量逐渐减小,压缩机一直处于平稳运行状态,所以压缩机做功变化较为稳定。系统制热量呈先增大后减小最终趋于平缓的规律。中午太阳辐射强度较高,系统整体运行效果比较好,因此系统制热量最大值出现在中午 13:00,为 9kW ,压缩机平稳运行耗功始终维持在 2.2kW 左右。阴天工况下,系统制热量最低为 3.5kW ,最高为 8.9kW ,且平均值较低,缺少足够的太阳辐射强度,系统制热量不理

想。这同时也体现了以太阳能为单一热源式的不足。

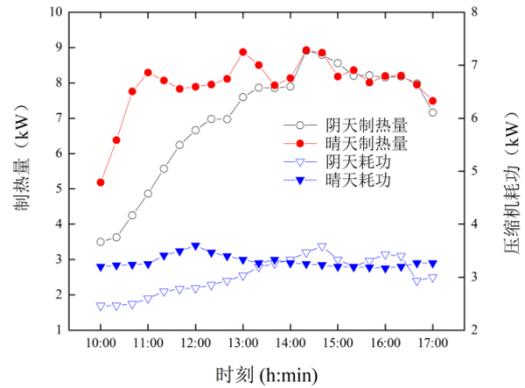


图 7 系统制热量和压缩机耗功随时间的变化

Fig.7 Change of system heat and compressor power consumption with time

图 8 所示为系统瞬时制热 COP 随时间的变化。由图 8 可知,晴天时,太阳辐射强度高,制热量大,系统的 COP 在 $3.0\sim 3.6$ 之间,平均 COP 为 3.4 ;阴天时太阳辐射强度小,制热量小,系统的 COP 在 $2.0\sim 3.3$ 之间,平均 COP 为 2.35 。晴天工况下,系统制热 COP 整体变化较为稳定。随着压缩机做功和太阳能集热器集热过程的进行,系统运行期间的平均制热性能随着室外温度变化呈现一定的波动,最大值出现在 13:00,波幅相对较小。阴天工况下,刚开始加热运行时,太阳辐射强度不高,系统的制热 COP 相对较低,但随着时间的推移逐渐升高,最终达到相对稳定的状态。两种工况下系统制热 COP 的波动规律和系统制热量的变化基本一致,但波幅相对较小。

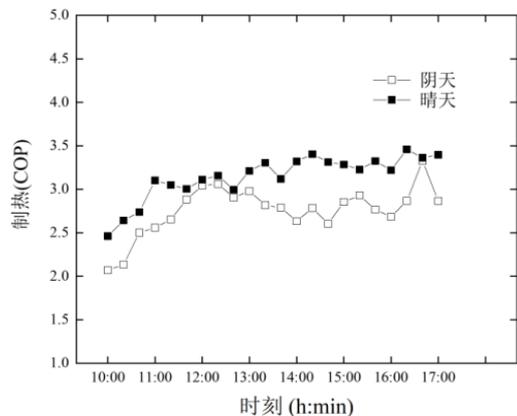


图 8 系统瞬时制热 COP 随时间的变化

Fig.8 System instantaneous heating COP changes with time

图 9 所示为压缩机吸气、排气压力随时间的变化。由图 9 可知,阴天和晴天的吸气压力都很稳定,

制冷剂在吸收太阳能集热器的热量后, 变为温度相对稳定的气体, 因此对应的压缩机吸气压力比较稳定。随着时间的推移, 制热量呈先增大后趋于稳定的趋势, 对应的排气温度也呈相同趋势, 所以排气压力先升高, 后趋于稳定。晴天时的压比变化在 0.8~3.7 之间, 阴天时压比变化范围是 2.8~4.4 之间。

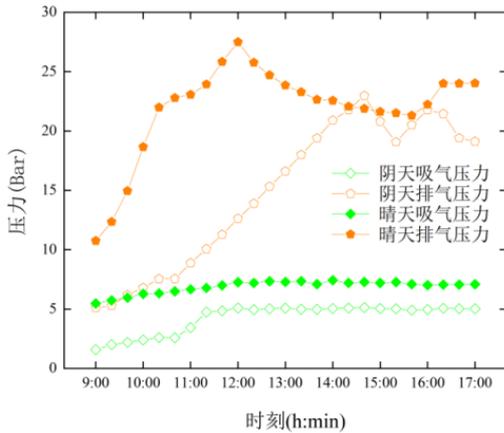


图 9 压缩机吸气和排气压力随时间的变化

Fig.9 Variation of compressor suction and discharge pressure with time

3.2 双热源系统制热性能

如图 10 所示为压缩机吸气和排气压力随时间的变化。由图可知, 阴天和晴天的吸气压力都很稳定, 和单一热源模式下的趋势相同。晴天时压比变化范围为 2.09~3.6, 同时排气压力也是呈先升高后趋于稳定的趋势, 但比单一热源模式下的运行更稳定了。阴天时压比变化范围为 3.5~4.79, 排气压力有一定的波动, 这和天气变化有一定的关系。

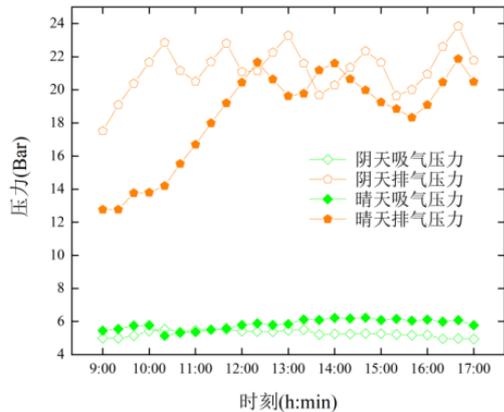


图 10 压缩机吸气和排气压力随时间的变化

Fig.10 Variation of compressor suction and discharge pressure with time

图 11 所示为系统制热量、压缩机耗功随时间

的变化。由图 11 可知, 两种天气状态下, 系统制热量均呈现先增大后趋于平缓的变化规律, 变化趋势基本一致。晴天时系统制热量最高升至 9.7kW, 阴天最高达到 8.4kW。系统压缩机耗功始终维持在 2.2kW 左右。晴天工况下午 13:00~14:30 时, 制热量较大且耗功较少, 这是由于系统在双热源工作时该时段系统集热吸收的太阳能辐射量越多, 即太阳能供热的配比较大, 致使传统空气源热泵循环的制热量负担越轻, 复合系统非常有利于提高供热装置的经济性及节能减排。

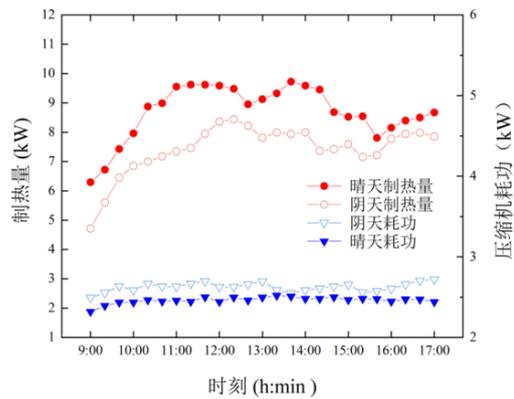


图 11 系统制热量、压缩机耗功随时间的变化

Fig.11 Variation of system heating capacity and compressor power consumption with time

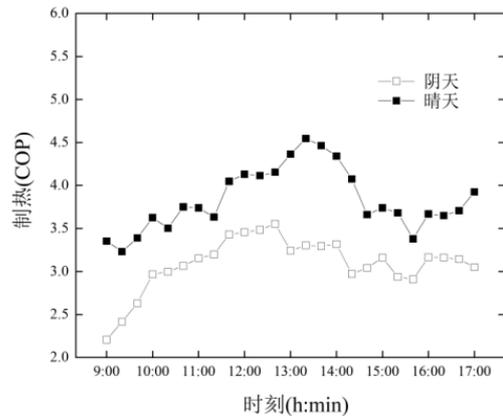


图 12 系统瞬时制热 COP 随时间的变化

Fig.12 System instantaneous heating COP changes with time

图 12 所示为系统瞬时制热 COP 随时间的变化。由图 12 可知, 系统开始运行制热 COP 较低, 随着工作开始后压缩机做功、太阳能集热器集热过程以及空气源热泵的同步进行, 系统制热 COP 呈现上升趋势, 系统运行期间的平均制热性能随着室外温度变化而呈现一定的波动。晴天工况下的系统

瞬时制热 COP 始终高于阴天工况,且两者呈现较为相似的变化趋势。晴天时制热 COP 最高为 4.3,阴天时制热 COP 最高为 3.5。

4 结论

本文将太阳能热泵和空气源热泵结合起来,搭建了直膨式太阳能空气源热泵实验台。实验分为以太阳能为单一热源的热泵系统和太阳能和空气源双热源热泵系统。实验结果发现,以太阳能为单一热源的热泵系统在晴天、阴天两种工况下均可达到设定水温并平稳运行。晴天时,系统制热量呈现先增大后减小最终趋于平缓的规律,最大值出现在中午 13:00,为 9kW,系统的 COP 在 3.0~3.6 之间,平均 COP 为 3.4;阴天时,系统制热量变化范围为 3.5kW~8.9kW,系统的制热 COP 在 2.0~3.3 之间,平均 COP 为 2.35,相对晴天工况有明显降低。双热源供热时,两种天气状态下,系统制热量均呈现先增大后趋于平缓的变化规律。晴天时系统制热量最高升至 9.7kW,制热 COP 最大为 4.3;阴天时系统制热量最高达到 8.4kW,制热 COP 最高为 3.5,整体高于以太阳能为单一热源工作时的制热 COP。

参考文献:

- [1] 马辉,杨帆.直膨式太阳能热泵系统供暖研究进展[J].煤气与热力,2019,(8):23-27.
- [2] 戴晗.直膨式太阳能空气源热泵全工况运行的性能模拟研究[D].北京:北京工业大学,2021.19-24.
- [3] 侯隆澍,全贞花,杜伯尧,等.太阳能-空气双热源热泵系统性能实验[J].化工学报,2020,71(12):5498-5505.
- [4] 刘朋,缪正坤,郑俊贤,等.太阳能-空气源热泵采暖系统节能经济性分析[J].江苏建筑职业技术学院学报,2019,19(4):25-28.
- [5] 徐嘉,李红旗,王东越,等.太阳能-空气源热泵多能互补系统能效分析[J].制冷与空调,2018,18(12):77-83.
- [6] 佟建南,全贞花,赵耀华,等.太阳能与空气源双蒸发器热泵复合供能系统性能实验研究[J].建筑科学,2018,34(4):58-65.
- [7] 孟欣,冯荣.基于太阳能补偿的空气源热泵系统性能分析[J].太阳能,2020,(3):62-67.
- [8] Kjellsson E, Hellstrom G, Perers B. Optimization of systems with the combination of ground-source heat pump and solar collectors in dwellings[J]. Energy, 2010,35(6):2667-2673.
- [9] Eslami-nejad P, Langlois A, Chapuis S, et al. 2009 Solar heat injection into boreholes 4th Canadian Solar Buildings Conference Proceedings[C]. 2009:237-246.
- [10] 解苗苗,党相兵,关欣,等.直膨式太阳能热泵系统性能分析及优化[J].能源研究与信息,2014,30(2):73-78.