

# 一种新型太阳能辅助高温热泵系统性能分析

宁静红,刘华阳,王润霞

(天津商业大学天津市制冷技术重点实验室,天津 300134)

**摘要:**为降低压缩机排气温度、优化热泵系统性能,设计了一种利用太阳能集热器加热压缩机排气,利用蒸气显热制取高温热水的新型太阳能辅助热泵系统。结合天津地区的辐射日照条件对新型太阳能辅助热泵系统进行了可行性和热力性能分析,并将其与直膨式太阳能辅助热泵系统的性能进行对比。结果表明:该系统通过提高蒸发温度,可以降低制冷压缩机排气温度,增大太阳能集热量,提高系统性能;在蒸发温度为 $-10\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况下,该系统制热性能系数较直膨式太阳能辅助热泵系统提高 $3.8\%\sim 5\%$ ,综合性能系数(COP)则是后者的 $1.9\sim 2$ 倍,系统月平均综合COP提高 $21.2\%$ ,年耗电减少 $7.7\%$ 。

**关键词:**高温热泵;太阳能辅助;直膨式;性能分析

中图分类号:TK11+5;TK519

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.01.023

[引用本文格式]宁静红,刘华阳,王润霞.一种新型太阳能辅助高温热泵系统性能分析[J].热能动力工程,2022,37(1):171-178. NING Jing-hong, LIU Hua-yang, WANG Run-xia. Performance analysis of a novel solar-assisted high temperature heat pump system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(1): 171-178.

## Performance Analysis of a Novel Solar-assisted High Temperature Heat Pump System

NING Jing-hong, LIU Hua-yang, WANG Run-xia

(Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, Tianjin, China, Post Code: 300134)

**Abstract:** In order to reduce the compressor discharge temperature and optimize the heat pump system performance, a novel solar-assisted heat pump system is designed, which uses solar collector to heat the compressor exhaust and uses steam sensible heat to produce high-temperature hot water. Combined with the solar radiation conditions in Tianjin, the feasibility and thermal performance analyses of the novel solar-assisted heat pump system are carried out, its performance is compared with that of the direct expansion solar-assisted heat pump system, and the annual operation performance is analyzed. The analysis results show that by increasing the evaporation temperature, the system can reduce the discharge temperature of the refrigeration compressor, increase the solar heat-collecting capacity and improve the performance of the system. When the evaporation temperature is  $-10$  to  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the heating performance coefficient of the system is  $3.8\%$  to  $5\%$  higher than that of the direct expansion solar-assisted heat pump system, the comprehensive coefficient of performance (COP) is  $1.9$  to  $2$  times of the latter, the monthly average comprehensive COP of the system is increased by  $21.2\%$ , and the annual power consumption is reduced by  $7.7\%$ .

**Key words:** high temperature heat pump, solar-assisted, direct expansion, performance analysis

## 引言

开发利用可再生能源,提高系统效率是解决能源危机和改善环境的重要方式,其中太阳能和热泵是减少化石燃料燃烧和温室气体排放的两种重要手段<sup>[1]</sup>。蒸气压缩式高温热泵存在压比大、排气温度高、系统能效低等问题。传统太阳能集热系统存在集热时间短、效率低、水垢堵塞、损耗大等问题<sup>[2]</sup>。太阳能与热泵结合的太阳能辅助热泵(SAHP)是一种很有前途的技术,可以在利用太阳能的同时回收利用冷凝废热,提升系统的性能。太阳能辅助热泵的概念最早于20世纪50年代提出,在20世纪70年代开始被广泛研究<sup>[3]</sup>,使用太阳能与热泵耦合可以满足家庭生活所需热水、供暖、冷负荷等供应<sup>[4]</sup>。国内外学者对太阳能辅助热泵系统进行了大量的研究,该系统一般分为直膨式和非直膨式两类<sup>[5]</sup>。直膨式太阳能辅助热泵系统利用太阳能集热器作为蒸发器,工质在集热器内直膨循环,与传统空气源热泵相比提高了蒸发温度,减少了低温工况下的热损失,降低了系统初始投资,同时避免了水在太阳能集热器内加热时结垢、结冰的情况。太阳能集热器在阴雨天或夜晚等太阳辐射强度弱的时候作为单纯的蒸发器,存在效率低、热损耗大等问题。蒋澄阳等人<sup>[6]</sup>通过对太阳能集热器/蒸发器增设肋片应用于直膨式太阳能热泵系统中,提高了系统的集热效率,在小雨天气可达3.43。Kim等人<sup>[7]</sup>提出了一种同时具有太阳能集热和空气源集热功能的混合太阳能集热器,该集热器在没有太阳辐射的条件下仍可以高效吸热,并通过实验证明该系统可以延长年运行时间,提高效率。非直膨式太阳能辅助热泵系统是太阳能集热器与空气源热泵通过串联、并联和混合连接等方式共同工作,太阳能集热器内以水、空气或者防冻液等作为工质<sup>[8]</sup>,系统具有单独的蒸发器,可以连续供热,在制热的同时满足制冷的需求,但同时还存在二次换热、效率低下等问题。李亚伦等人<sup>[2]</sup>通过将相变储能材料与太阳能集热器和热泵相结合,设计了空气式相变蓄能太阳能热泵,可以使太阳能热泵系统稳定运行,节能效果显著。

基于上述问题,本文设计了一种新型太阳能辅

助高温热泵系统,该系统是利用平板太阳能集热器加热压缩机排气,利用过热蒸气显热制取高温热水的新型太阳能辅助高温热泵系统,热泵系统有两种运行模式,可以保证全天候运行。通过结合天津地区的太阳能辐射日照条件对系统进行了可行性讨论,并进行了性能理论分析和全年经济性分析,最后与直膨式太阳能辅助热泵的性能进行了对比。

## 1 系统介绍

目前,市场上空气源热泵的工质多为R22和R410A,全球变暖潜力值(GWP)较大。根据基加利修正案,2024年将冻结高GWP制冷剂的生产和使用,因此寻求自然环保的替代工质十分必要<sup>[9]</sup>。氨作为自然工质具有良好的热力性质,适合作为高温热泵工质。因此,该高温热泵系统采用氨作为热泵工质。

如图1(a)所示,当光照充足时采用太阳能辅助高温热泵系统,系统由压缩机、太阳能集热器、冷却器、冷凝器、节流阀1和蒸发器组成。在阴雨天气或夜晚太阳辐射强度弱时采用冷凝全热回收热泵系统,系统为传统的蒸气压缩高温热泵,由制冷压缩机、热泵压缩机、中间冷却器、冷凝器、节流阀2、蒸发器组成。

系统状态点如图1(b)所示,压缩机排出的高温高压蒸气(点2)进入太阳能集热器吸热,升温后的过热蒸气(点3)进入冷却器内冷却,利用高品质的蒸气显热制取高温热水,然后进入冷凝器,利用冷凝潜热制取温水,冷凝后的工质(点4)经节流阀1后进入蒸发器蒸发制冷,完成太阳能供暖辅助高温热泵循环。冷凝全热回收热泵系统流程为,制冷压缩机排出的高温高压蒸气(点2)进入中间冷却器与冷凝节流后的制冷剂液体(点9)混合,冷却后的饱和蒸气(点6)进入热泵压缩机继续压缩升温升压(点7),然后在冷凝器内冷凝放热制取高温热水。冷凝后的工质则分为两部分,一部分用于冷却制冷压缩机排气,一部分节流后进入蒸发器蒸发制冷完成循环<sup>[10]</sup>。

系统根据冷热需求不同可分为3种运行模式,表1为不同模式下的运行方案。高温热泵系统可分为冷凝全热回收系统和太阳能辅助高温热泵系统。

3 种运行模式下系统均采用氨作为工质,通过调整截止阀开闭进行运行模式切换。

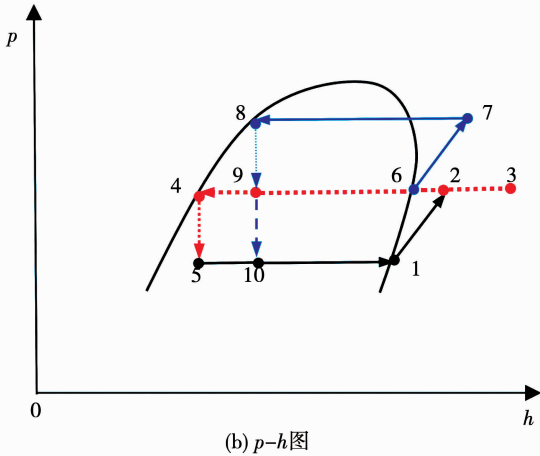
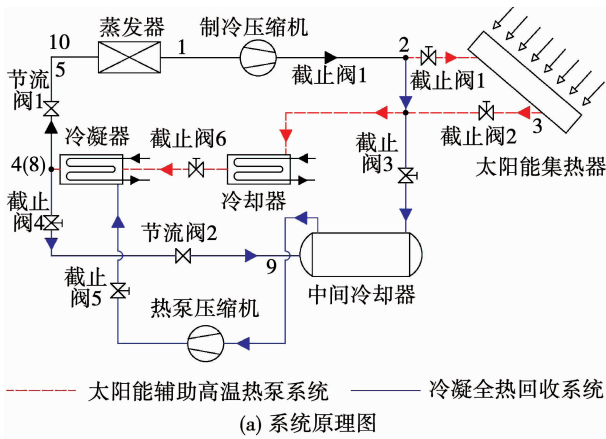


图 1 新型太阳能辅助高温热泵原理图及 p-h 图

Fig. 1 Schematic diagram and p-h diagram of a novel solar-assisted high temperature heat pump

表 1 系统不同模式运行方案

Tab. 1 Different operating mode schemes of system

| 运行模式      | 阀 1 | 阀 2 | 阀 3 | 阀 4 | 阀 5 | 阀 6 |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 单级压缩制冷系统  | 关   | 开   | 关   | 关   | 关   | 开   |
| 冷凝全热回收系统  | 关   | 关   | 开   | 开   | 开   | 关   |
| 太阳能辅助热泵系统 | 开   | 开   | 关   | 关   | 关   | 开   |

## 2 热力学模型

单级压缩制冷循环模式下热泵不工作,不再进行分析。基于能量和质量守恒定律,对热泵模式下的太阳能辅助热泵系统和冷凝全热回收系统建立热力学模型。为简化计算过程,假设如下:忽略工质与管道和部件之间的摩擦损失;蒸发器和冷凝器的出口流体为饱和状态;蒸气在太阳能集热器内的集热

过程存在热损失,用热损失系数来表示;压缩机的等熵效率为 0.85;系统的制冷量  $Q_c$  为 50 kW;冷凝过程的显热和潜热全部用来加热水。

平板太阳能集热器按一定的倾斜角度放置,不同太阳辐射角度照射到不同倾斜角太阳能集热器表面上的辐射量不同,集热量也不同。集热器表面的太阳辐射量可表示为<sup>[11]</sup>:

$$F = I_1 \cos\theta + I_2 \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (1)$$

式中: $F$ —照射至太阳能集热器的辐射量,  $W/m^2$ ;  $I_1$ —水平面上太阳辐射强度,  $W/m^2$ ;  $I_2$ —倾斜面上太阳直射辐射强度,  $W/m^2$ ;  $\theta$ —水平面上的太阳光入射角度,取  $90^\circ$ ;  $\beta$ —太阳能集热器安装角度,取  $50^\circ$ 。

对于太阳能辅助热泵系统,工质在太阳能集热器内吸热,太阳能一部分加热流体,另一部分则与周围环境之间存在热交换。当工质入口温度低于环境温度时入口流体吸收周围环境热量,当高于环境温度时则作为热源与周围环境存在对流、导热等热损失,总集热量为<sup>[7]</sup>:

$$Q_e = S \cdot [\varphi \cdot F - J \cdot (t_1 - t_2)] \quad (2)$$

式中: $Q_e$ —太阳能集热器集热量, kW;  $S$ —集热器面积,  $m^2$ ;  $\varphi$ —太阳能集热效率,取 0.83;  $J$ —热损失系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ,取 6;  $t_1, t_2$ —集热器工质入口温度和室外环境温度,  $^\circ C$  <sup>[12]</sup>。

太阳能辅助高温热泵系统内工质质量流量为:

$$q_{m1} = \frac{Q_c}{h_1 - h_5} \quad (3)$$

式中: $Q_c$ —系统制冷量, kW;  $h_i$ —不同状态点下的焓值, kJ/kg;  $q_{m1}$ —太阳能辅助高温热泵系统工质质量流量, kg/s; 下标  $i$ —系统不同状态点。

压缩机耗功为:

$$W_1 = \frac{q_{m1}(h_2 - h_1)}{\eta} \quad (4)$$

式中: $\eta$ —压缩机的等熵效率。

冷却器加热高温热水释放的热量为:

$$Q_1 = q_{m1}(h_2 - h_6 + Q_c) \quad (5)$$

冷凝器加热水释放的热量为:

$$Q_2 = q_{m1}(h_6 - h_4) \quad (6)$$

根据理论循环,对于冷凝全热回收热泵系统,经热泵压缩机压缩后的高温高压蒸气( $q_m$ )经冷凝器

冷凝后的饱和工质分为两部分,一部分( $q_{m2}$ )经节流阀降压后送入蒸发器蒸发制冷,另一部分( $q_{m3}$ )节流后进入中间冷却器内冷却压缩机排气。

$$q_{m2} = \frac{Q_c}{h_1 - h_{10}} \quad (7)$$

$$q_m = \frac{q_{m1}(h_2 - h_9)}{h_6 - h_9} \quad (8)$$

$$q_{m3} = q_m - q_{m2} \quad (9)$$

式中: $q_{m2}$ —蒸发器内工质的质量流量,kg/s; $q_{m3}$ —用于冷却压缩机排空气质的质量流量,kg/s; $q_m$ —热泵压缩机内工质质量流量,kg/s。

制冷压缩机的耗功为:

$$W_2 = \frac{q_{m2} \cdot (h_2 - h_1)}{\eta} \quad (10)$$

热泵压缩机的耗功为:

$$W_3 = \frac{q_m \cdot (h_7 - h_6)}{\eta} \quad (11)$$

冷凝器内冷却冷凝过程释放的热量为:

$$Q_3 = q_m \cdot (h_7 - h_8) \quad (12)$$

高温热泵系统可实现冷热联供,因此系统性能分析不能只考虑制冷系数或制热系数,应考虑系统的总体性能,采用综合性能系数来讨论系统的性能<sup>[13]</sup>。

综合性能系数为制冷、制热量与轴功率之比:

$$\text{COP} = \frac{Q_c + \sum Q}{\sum W} \quad (13)$$

式中: $Q$ —热泵系统制热过程制热量,kW; $\sum Q$ —总制热量,kW; $\sum W$ —各热泵系统总轴输入功率,kW。

### 3 系统性能分析

#### 3.1 可行性分析

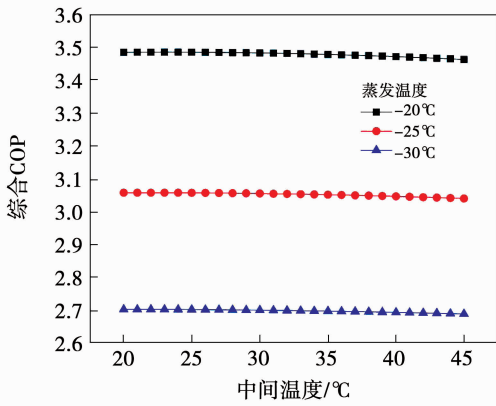
平板太阳能集热器具有耐久性强、采光面积大、集热效率高、结构简单、维护方便等优点。平板太阳能集热器的板内温度一般在 200 °C 以下,在晴朗或少云天气,吸热板可达到 120 °C 以上的高温,并可维持 5~6 h,在中午太阳辐射强时管内温度最高可达到 160 °C 以上<sup>[14]</sup>。氨单级压缩热泵系统排气温度不高、压力不大,在辐射强度满足要求时,可实现对压缩机排气补偿加热升温。天津地区太阳资源丰

富,平均月可利用太阳能日为 22 天,平均辐射强度为 609.2 W/m<sup>2</sup>,一天中满足加热要求的集热时间可达 5 h,总集热量约为 1 020 W/m<sup>2</sup><sup>[15-16]</sup>。系统采用平板太阳能集热器加热压缩机的排气,经太阳能集热器补偿升温后得到具有更高过热度的蒸气,与太阳能集热器加热水相比具有制取更高出水温度热水的潜力。在太阳辐射较弱时可以采用冷凝全热回收热泵模式,实现热泵系统的全天候运行,同时实现了对系统高温排气的回收利用,为热泵系统的节能与优化提供新的参考。

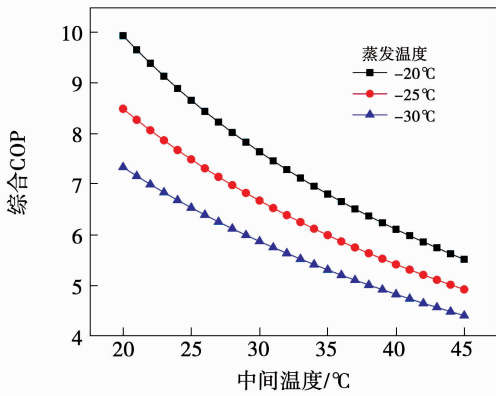
#### 3.2 热力性能分析

蒸发温度、冷凝温度和中间温度的改变都将影响工质的理论质量流量,相应的压缩机耗功、冷却显热、冷凝潜热和综合性能系数等参数都会发生变化。基于热力模型,采用 MATLAB 商业数学软件结合物性软件 REFPROP 9.0 编写计算程序,对氨工质在各状态点下的物性参数进行计算。通过对比不同工况下的性能计算结果,寻找热泵系统的最佳运行工况。

冷凝全热回收系统中间温度对应太阳能辅助热泵系统的冷凝温度,通过改变该温度对热泵系统进行热力性能分析。图 2 所示为蒸发温度分别为 -20、-25 和 -30 °C,冷凝温度为 85 °C 的条件下系统性能系数随中间温度的变化。分析发现,冷凝全热回收系统性能系数随中间温度的升高先增大后减小,随蒸发温度的升高增大。在蒸发温度为 -25 °C,中间温度为 26 °C 时,冷凝全热回收系统 COP 最大值为 3.06。这是由于中间温度的改变导致热泵压缩机和制冷压缩机的质量流量发生变化,制冷压缩机压比增大,耗功逐渐增大,热泵压缩机压比减少,耗功逐渐减少。在中间温度增加的初始阶段,热泵压缩机的耗功减少量大于制冷压缩机耗功增加量,故系统性能系数逐渐增大。随着中间温度的增加,制冷压缩机耗功增加量大于热泵压缩机功耗减少量,因此冷凝全热回收热泵性能系数先增大后减小。太阳能辅助热泵性能系数则随中间温度的升高逐渐降低,这是由于压缩机排气温度随着温度的升高而升高,蒸气在集热器内与周围环境的热损失增大,太阳能集热量减少,系统性能系数降低。



(a) 冷凝全热回收系统



(b) 太阳能辅助热泵系统

图 2 中间温度对热泵性能的影响

Fig.2 The effect of intermediate temperature on heat pump performance

如图 3 所示,在冷凝温度为 85 °C,中间温度为 26 °C 时,冷凝全热回收热泵系统的综合性能系数随蒸发温度的升高而增大,但相对太阳能辅助热泵系统变化较小。蒸发温度越高太阳能辅助热泵的性能系数增加越迅速,这是由于随着蒸发温度升高,制冷压缩机压比减小,相应的排气温度降低,耗电减少,太阳能集热量越多,故系统性能系数增大。

如图 4 所示,在蒸发温度分别为 -20, -25 和 -30 °C,中间温度为 26 °C 条件下,通过改变冷凝温度发现,冷凝全热回收热泵系统的性能系数随冷凝温度的升高而减小,随蒸发温度的升高而增大。这是由于,冷凝温度升高导致热泵工质质量流量增大,制冷压缩机、热泵压缩机工质质量流量均增大。同时,热泵压缩机压比增大,耗电增大,故性能系数降低。

假定太阳辐射强度为 600 W/m<sup>2</sup>,蒸发温度为 -20 °C,中间温度为 26 °C,冷凝温度为 85 °C 时太

阳能辅助高温热泵各状态点的性能参数如表 2 所示。通过对比状态点 2 和 3 可以发现,氨单级压缩热泵系统中的压缩机排气通过太阳能集热器加热可以明显提高蒸气温度,利用此部分高温度的显热可以制取更高温度的热水。同时,相对于全天候的冷凝全热回收热泵系统,太阳能辅助热泵系统的压缩机排气温度较低,系统功耗少,系统综合性能系数提高明显。

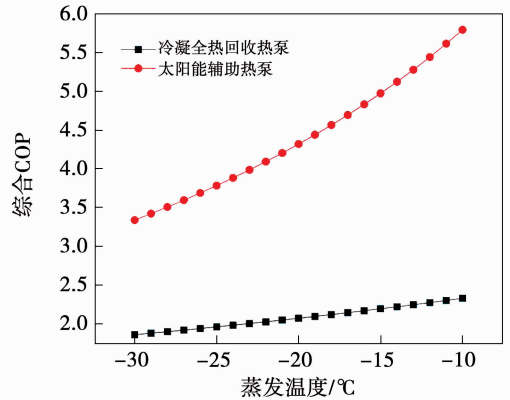


图 3 蒸发温度对系统综合性能的影响

Fig.3 Influence of evaporation temperature on heat pump comprehensive performance

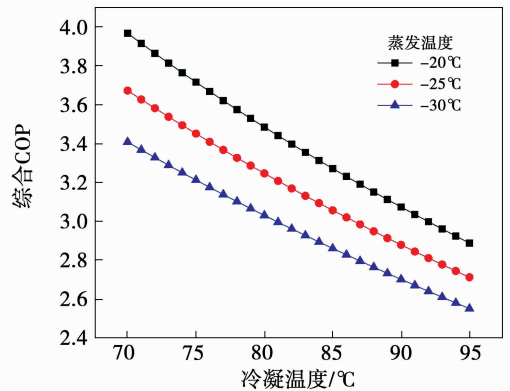


图 4 冷凝温度对冷凝全热回收热泵系统性能的影响

Fig.4 Influence of condensation temperature on comprehensive performance of condensation total heat recovery system

### 3.3 性能对比

由上述分析得出了热泵在不同运行状态下的最佳运行工况。该系统加热方式不同于传统太阳能热泵,采用太阳能集热器直接加热压缩机排气,故与直膨式太阳能辅助热泵系统进行性能对比。假定太阳

辐射强度为  $600 \text{ W/m}^2$ , 冷凝温度取热泵系统最佳中间温度, 即  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ , 蒸发温度取  $-10 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , 环境温度设定为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

表 2 新型太阳能辅助高温热泵各状态点参数

Tab. 2 Parameters of each state point of a novel solar-assisted high temperature heat pump

| 状态点 | 焓/<br>$\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{k})^{-1}$ | 温度/ $^\circ\text{C}$ | 压力/ $\text{kPa}$ | 比焓/<br>$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ |
|-----|---|----------------------|------------------|---|
| 1   | 6.376   | -20.0                | 190.08           | 1 580.83                                |
| 2   | 6.376   | 100.3                | 1 034.53         | 1 826.10                                |
| 3   | 6.654   | 145.0                | 1 034.53         | 1 936.03                                |
| 4   | 1.896   | 26.0                 | 1 034.53         | 465.62                                  |
| 5   | 1.970   | -20.0                | 190.08           | 465.62                                  |
| 6   | 5.779   | -20.0                | 1 034.53         | 1627.18                                 |
| 7   | 5.779   | 146.8                | 4 610.02         | 1852.94                                 |
| 8   | 2.809   | 85.0                 | 4 610.02         | 772.20                                  |

如图 5 所示, 通过改变蒸发温度对比直膨式太阳能辅助热泵和新型太阳能辅助热泵的制热性能。分析发现, 随蒸发温度的升高, 系统性能系数均增大, 新型太阳能辅助热泵的性能系数随蒸发温度的升高提升越来越明显。这是由于随着蒸发温度的升高, 压缩机耗功减少, 热泵压缩机的排气温度降低, 太阳能集热器内的热损失减少, 集热量增大, 故性能提升更明显。对比蒸发温度为  $-10 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$  时热泵系统性能发现, 该热泵性能系数较直膨式太阳能热泵约提高  $3.8\% \sim 5\%$ , 综合性能系数约提高  $1.9 \sim 2$  倍。

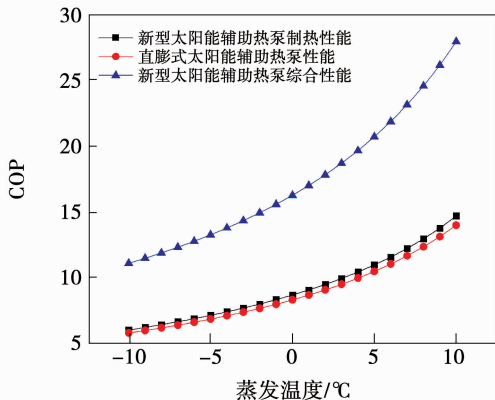


图 5 蒸发温度对太阳能辅助热泵性能的影响  
Fig. 5 Effect of evaporation temperature on the performance of solar-assisted heat pump

如图 6 所示, 对比蒸发温度对直膨式太阳能辅助热泵和新型太阳能辅助热泵集热量的影响。分析发现, 随蒸发温度升高, 新型太阳能辅助热泵的集热量逐渐增大, 直膨式太阳能辅助热泵的集热量则逐渐减少。这是由于直膨式太阳能辅助热泵工质在太阳能集热器内直接吸热蒸发, 集热器入口温度低于环境温度。工质集热量包括太阳能辐射所得能量和与周围环境换热的热量, 随着入口温度的升高, 与周围环境的换热量减少, 集热量则减少。新型太阳能辅助热泵则通过加热压缩机排气, 集热器入口温度高于周围环境温度, 工质收集的太阳能一部分用于加热压缩机排气, 另一部分则作为热损失传递到周围环境中。随着蒸发温度的升高, 压缩机排气温度降低, 太阳能集热量与环境的热损失相应减少, 集热量增加。

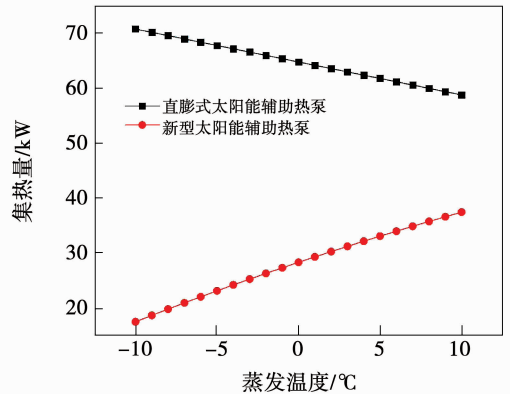


图 6 蒸发温度对太阳能辅助热泵集热量的影响  
Fig. 6 Effect of evaporation temperature on the heat-collecting capacity of solar-assisted heat pump

通过上述分析发现, 太阳能集热量与环境温度、蒸发温度和太阳能辐射强度有关, 新型太阳能辅助热泵系统性能优于传统直膨式太阳能辅助热泵。对于直膨式太阳能热泵系统, 在太阳辐射强度和环境温度固定的条件下, 提高蒸发温度可以提高系统性能系数, 但相应的太阳能集热量会减小。新型太阳能辅助热泵通过直接加热压缩机排气, 可以提高蒸发温度, 降低排气温度, 增大集热量, 减少系统耗功, 提高性能系数。因此, 在满足所需供冷温度条件下, 适当的提高蒸发温度有利于增大系统的制热量, 提高系统的性能。

### 3.4 性能分析

热泵系统存在两种运行模式,当辐射强度满足要求时为太阳能辅助热泵模式,此后转为冷凝全热回收热泵模式<sup>[11]</sup>。取 10:00 ~ 15:00 为太阳能辅助热泵的运行时段,根据天津地区气象数据,全年满足气象要求的天气约为 264 天,高温热泵系统制冷量为 50 kW。其中,太阳能辅助热泵热量回收分为显热部分和潜热部分,利用冷却器内的高温显热制取高温热水,在冷凝器内制取温水。假定热泵工质与水之间的夹点温差为 5 °C,取冷却器的进/出水温度为 30 °C/85 °C,则可制取的高温热水流量为 0.197 m<sup>3</sup>/h;冷凝器的进/出水温度为 15 °C/30 °C,可制取的温水流量为 3.069 m<sup>3</sup>/h。由于显热部分约占整个冷却冷凝过程的 15%,故制取的高温热水流量较小。但由于显热部分蒸气温度较高,可以通过提高冷却器进水温度的方式制取更高温度的热水。

取最佳运行工况对热泵系统进行全年运行计算,并与相同条件下全年运行的冷凝全热回收热泵系统进行耗电对比。由表 3 可知,系统的全年月平均运行 COP 明显提高,在太阳能辅助热泵工作时系统日平均耗电明显减少,系统全年总体的节能效果显著。

表 3 高温热泵全年运行性能对比

Tab. 3 Annual operating performance comparison of high temperature heat pump

| 参 数        | 新型太阳能辅助高温热泵 | 冷凝全热回收热泵系统 | 提升系数/% |
|------------|-------------|------------|--------|
| 全年月平均 COP  | 3.71        | 3.06       | 21.2   |
| 日平均耗电/kW   | 1139.1      | 1 272.3    | 10.5   |
| 全年月平均耗电/kW | 35 238.6    | 38 169     | 7.7    |

## 4 结 论

提出了利用太阳能集热器加热压缩机排气的新型太阳能辅助高温热泵系统,利用太阳能提高排气过热度,利用高温显热制取更高温度的热水。对系统进行了可行性和热力性能分析,并与直膨式太阳能辅助热泵进行性能对比得出结论:

(1) 新型太阳能辅助高温热泵系统可实现对制冷压缩机排气热能的回收利用,通过提升排气过热

度,具备制取更高温热水的潜力。

(2) 系统在满足供冷所需温度条件下,适当提高蒸发温度,可降低制冷压缩机的排气温度,提高最佳中间温度,增大太阳能集热量,提高系统的性能系数,蒸发温度每升高 10 °C,性能系数约提高 20%,蒸发温度越高,性能系数提升越明显。

(3) 系统与传统直膨式太阳能辅助热泵相比,性能优势明显。在蒸发温度为 -10 ~ 10 °C 时,随着蒸发温度升高,制热性能系数较直膨式提高 3.8% ~ 5%,综合性能系数提高 1.9 ~ 2 倍。

(4) 系统与冷凝全热回收热泵系统全年运行性能相比,月平均 COP 约提高 21.2%,年耗电约减少 7.7%,可为太阳能辅助高温热泵的优化提供新的参考。

### 参考文献:

- [1] LI H, SUN L L, ZHANG Y G. Performance investigation of a combined solar thermal heat pump heating system[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 71(1): 460 - 468.
- [2] 李亚伦, 李保国, 苏树强, 等. 空气式 PCM 太阳能热泵供暖系统实验研究与分析[J]. 热能动力工程, 2019, 34(8): 156 - 162.  
LI Ya-lun, LI Bao-guo, SU Shu-qiang, et al. Experimental research and analysis of air-type PCM solar heat pump heating system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(8): 156 - 162.
- [3] KONG X Q, YANG Y M, ZHANG M Y, et al. Experimental investigation on a direct-expansion solar-assisted heat pump water heater using R290 with micro-channel heat transfer technology during the winter period[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 113: 38 - 48.
- [4] CHU J, CRUICKSHANK C A. Solar-assisted heat pump systems: a review of existing studies and their applicability to the Canadian residential sector[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2014, 136(4): 041013.
- [5] 刘宗江, 贾春霞, 李 忠, 等. 一种太阳能辅助空气源热泵设备研究[J]. 建筑节能, 2018, 46(3): 44 - 48.  
LIU Zong-jiang, JIA Chun-xia, LI Zhong, et al. Research on a solar-assisted air source heat pump equipment[J]. Energy Conservation of Buildings, 2018, 46(3): 44 - 48.
- [6] 蒋澄阳, 代彦军. 基于肋片式集热板的直膨式太阳能热泵[J]. 化工学报, 2016, 67(S2): 318 - 325.  
JIANG Cheng-yang, DAI Yan-jun. Direct-expansion solar heat pump based on fin-type collector plate[J]. CIESC Journal, 2016, 67

- (S2): 318 – 325.
- [7] KIM T, CHOIB, HAN Y S, et al. A comparative investigation of solar-assisted heat pumps with solar thermal collectors for a hot water supply system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 172: 472 – 484.
- [8] 贺云龙, 代彦军. 基于 PV/T 的太阳能热泵热水系统实验研究 [J]. *太阳能学报*, 2020, 41(12): 83 – 89.  
HE Yun-long, DAI Yan-jun. Experimental study on solar heat pump hot water system based on PV/T [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2020, 41(12): 83 – 89.
- [9] DAI B M, QI H F, LIU S C, et al. Evaluation of transcritical CO<sub>2</sub> heat pump system integrated with mechanical subcooling by utilizing energy, exergy and economic methodologies for residential heating [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 192: 202 – 220.
- [10] 桑宪辉, 徐树伍, 于志强. NH<sub>3</sub> 螺杆式全热回收高温热泵系统研究 [J]. *制冷与空调*, 2016, 16(1): 41 – 44.  
SANG Xian-hui, XU Shu-wu, YU Zhi-qiang. Research on NH<sub>3</sub> screw type full heat recovery high temperature heat pump system [J]. *Refrigeration and Air Conditioning*, 2016, 16(1): 41 – 44.
- [11] 李洪, 孙跃, 付新书. 新型太阳能光伏 - 环路热管/热泵热水系统 [J]. *太阳能学报*, 2020, 41(4): 59 – 66.  
LI Hong, SUN Yue, FU Xin-shu. A new type of solar photovoltaic-loop heat pipe/heat pump hot water system [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2020, 41(4): 59 – 66.
- [12] 秦帅波, 郭晓颖, 李华松. R134a 和 R1234yf 太阳能辅助热泵系统性能对比 [J]. *低温与超导*, 2019, 47(10): 68 – 71.  
QIN Shuai-bo, GUO Xiao-ying, LI Hua-song. Performance comparison of R134a and R1234yf solar-assisted heat pump systems [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2019, 47(10): 68 – 71.
- [13] 翟晓婷, 张会明, 崔一丹, 等. 冷热互联系统研究及其能效计算准则讨论 [J]. *制冷学报*, 2018, 39(4): 128 – 134.  
ZHAI Xiao-ting, ZHANG Hui-ming, Cui Yi-dan, et al. Research on cold-heat interconnection system and discussion of energy efficiency calculation criteria [J]. *Journal of Refrigeration*, 2018, 39(4): 128 – 134.
- [14] 杨鲁伟. 平板太阳能集热器耐久可靠性的实验研究 [D]. 昆明: 云南师范大学, 2019.  
YANG Lu-wei. Experimental study on the durability and reliability of flat solar collectors [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2019.
- [15] 郭军. “中新天津生态城”太阳能资源评估 [J]. *天津科技*, 2009, 36(1): 86 – 88.  
GUO Jun. Assessment of solar energy resources in “Sino-Singapore Tianjin Eco-City” solar energy resource assessment [J]. *Tianjin Science and Technology*, 2009, 36(1): 86 – 88.
- [16] 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.  
MENG Xin, FENG Rong. Performance analysis of air source heat pump system based on solar compensation [J]. *Solar Energy*, 2020(3): 62 – 67.

(刘颖 编辑)

## (上接第 170 页)

- [3] SAFARI F, DINCER I. A review and comparative evaluation of thermochemical water splitting cycles for hydrogen production [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 205: 112182.
- [4] YOON H J, NO H C, LEE J, et al. Experimental validation of an optimal operating window in the Bunsen reaction section of the iodine-sulfur cycle [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(45): 15792 – 15800.
- [5] KASAHARA S, HWANG G J, NAKAJIMA H, et al. Effects of process parameters of the IS process on total thermal efficiency to produce hydrogen from water [J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2003, 36(7): 887 – 899.
- [6] PING Z, LAIJUN W, SONGZHE C, et al. Progress of nuclear hydrogen production through the iodine - sulfur process in China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81(2): 1802 – 1812.
- [7] YING Z, ZHENG X, ZHANG Y, et al. Development of a novel flow-sheet for sulfur-iodine cycle based on the electrochemical Bunsen reaction for hydrogen production [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(43): 26586 – 26596.
- [8] XU S, HE Y, HUANG B, et al. Decomposition of hydriodic acid by electrolysis in the thermochemical water sulfur-iodine splitting cycle [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(7): 3597 – 3604.
- [9] YING Z, WANG Y, ZHENG X, et al. Modeling and experimental assessment of the novel HI - I<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>O electrolysis for hydrogen generation in the sulfur-iodine cycle [J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(8): 6285 – 6296.
- [10] YING Z, WANG Y, Zheng X, et al. Experimental study and development of an improved sulfur-iodine cycle integrated with HI electrolysis for hydrogen production [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(24): 13176 – 13188.
- [11] GONZÁLEZ R D, BRAYNER DE OLIVEIRA LIRA C A, GARCÍA PARRA L R, et al. Computational model of a sulfur-iodine thermochemical water splitting system coupled to a VHTR for nuclear hydrogen production [J]. *Energy*, 2018, 147: 1165 – 1176.

(刘颖 编辑)