

直膨式太阳能热泵系统特性分析及优化

卜其辉¹, 秦红¹, 梁振南², 叶泽文³

(1. 广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510006; 2. 陪思电子有限公司, 广东 深圳 518000; 3. 松下万宝压缩机有限公司, 广东 番禺 511495)

摘要: 总结了太阳能热泵系统的分类、原理及特点, 并对国内外直膨式太阳能热泵(DX-SAHP)集热蒸发器、系统容量匹配等相关特性进行了研究分析. 在此基础上分析了当前直膨式太阳能热泵技术存在的主要问题, 就当前问题提出了一系列提高集热效率, 优化系统匹配性以提高热泵效率的思路与方法.

关键词: 太阳能; 空气能; 太阳能热泵; 直膨式太阳能热泵

中图分类号: TK519

文献标识码: A

文章编号: 1007-7162(2010)02-0061-04

热泵是通过消耗一部分高品质(如电、气、煤等)的能量把热量从低温热源转移到高温热源中的一种装置. 转移到高温热源中的热量包括消耗掉的高品质热量和从低温热源中吸收的热量, 所以热泵是一种高效节能的制热方式.

太阳能/空气能双源一体式热泵是将太阳能集热器和热泵有效相结合, 从太阳能和空气中提取热量的高效节能设备. 它能避免太阳能热泵受时间和天气影响的不足, 同时在空气源热泵基础上利用太阳能以进一步提高能效, 也缓解了空气源热泵在低温环境下结霜导致运行效率低和舒适度下降等问题, 是当前国内外学者关注的热点.

和非直膨式两种. 在非直膨式热泵系统中, 太阳能集热介质通常采用水、空气或防冻溶液等流体, 使它们在太阳能集热器中吸收热量, 然后将此热量直接传递给加热对象或作为蒸发器热源经热泵循环升温后再加热物体. 非直膨式系统按太阳能集热系统与热泵系统的结合方式又可分为串联系统、并联系统、双源式系统等.

直膨式系统, 如图1(a), 即将热泵系统的蒸发器与太阳能集热系统的集热器合二为一, 制冷剂直接在集热器中蒸发吸热, 节省非直膨式系统中集热循环与热泵循环之间的换热设备, 不仅简化了系统结构, 而且可有效提高集热器性能和热泵供热性能; 串联系统, 如图1(b), 即热泵置于太阳能系统与用户之间. 系统设置一个集热水箱, 集热器中以水作为传热介质, 热泵工质不直接进入集热器, 而是在集热

1 太阳能热泵系统的分类及特点

太阳能/空气能双源一体式热泵可分为直膨式

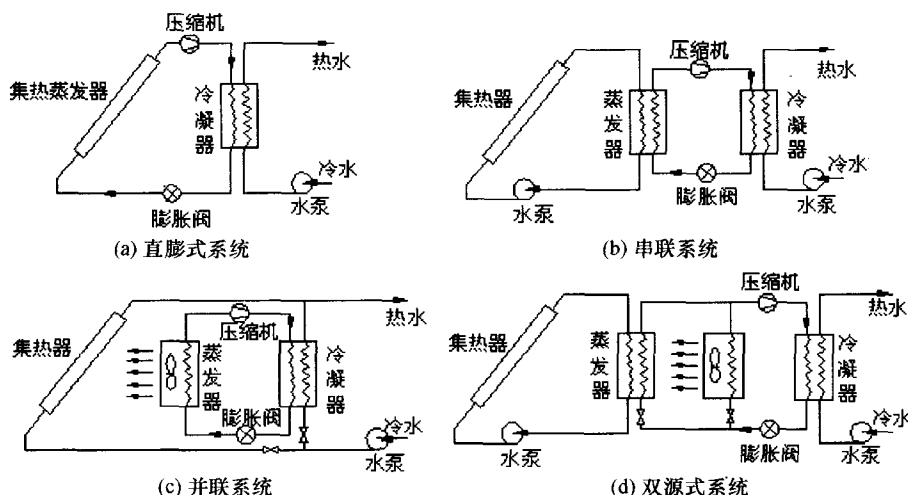


图1 太阳能热泵系统类型

收稿日期: 2009-10-15

基金项目: 广东省科技攻关项目(2007B010800033)

作者简介: 卜其辉(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源的开发利用技术.

水箱的蒸发器中蒸发;并联系统,如图1(c),即太阳能收集的热量直接供给用户,另外与之并联一台以环境空气作为热源的热泵系统;双源式系统,如图1(d),即热泵有两个蒸发器,一个蒸发器由太阳能集热器充当,即以太阳能为热源,另一个与之并联是传统的以空气为热源的蒸发器。

2 直膨式太阳能热泵相关特性研究

太阳能热泵技术的研究和发展是建立在太阳能热利用技术和热泵技术基础之上的,并随着这两种技术的日益成熟和大规模应用而获得了广阔的发展空间与应用。

太阳能热利用先驱者 Jodan、Therkeld 等首先对太阳能与热泵的联合供暖系统进行了研究,指出了该种系统在美国大部分地区进行供暖的技术和经济可行性^[1-3]。1955年,美国西弗吉尼亚的 Sporn 和 Ambrose 通过实验研究第一次提出了直膨式太阳能辅助热泵的概念,虽然他们的压缩机容量太大,集热器面积太小,二者严重不匹配,但他们的实验研究还是表明了直膨式结构可以同时提高热泵机组和太阳能集热器的热性能^[4]。我国上海交通大学、天津大学、东南大学、青岛建筑工程学院、广东工业大学等先后对太阳能热泵热水系统进行了初步实验和理论研究,并取得相关成果。在市场应用方面,美国的 SolarKing 系列以及澳大利亚的 Quantum 系列走在了产业化的前端。

2.1 太阳能集热蒸发器的研究

Charter 和 Taylor^[5]在1976年开发出了一种无玻璃盖板平板式太阳能集热器作为直膨式热泵系统的蒸发器。之后各国学者开始了关于直膨式热泵集热蒸发器的研究。

最初,用裸平板、有底部保温的铜板铜管太阳能集热器作为直膨式太阳能热泵蒸发器的居多,集热板表面喷涂光谱选择性吸收涂层,吸收比可达到90%,这种集热蒸发器结构简单,成本低,缺点是跟空气对流换热弱,太阳能不足时总体效率比较低。Chaturvedi、Shen^[6]在这方面做了大量的研究,其系统 COP 是2~3,集热效率为40%~70%。

随着各国学者对太阳能集热蒸发器研究力度的加大,发明了结构更简单的全裸板式铜板铜管集热蒸发器,表面喷涂光谱选择性吸收涂层,后来逐渐采用易加工、价格便宜、重量轻的材料,比如铜管/铝板焊接方式或全铝板热吹胀等方式制作。例如日本 Ito 等^[7]采用全裸板式铜板铜管集热蒸发器,集热面积

3.24 m²,系统 COP 达2.8~7.5。上海交大旷玉辉、王如竹等在这方面也做了大量的研究^[8-9],他们采用无盖板、无底部保温、表面喷涂光谱选择性材料的平板型集热蒸发器,选用铜管/铝板焊接方式或全铝板热吹胀方式制作,系统 COP 是3.11~6.61。

为了增加集热器对太阳能和空气能的吸收能力,近几年螺旋管翅式集热器作为蒸发器已逐渐应用在直膨式太阳能热泵上。东南大学徐国英等人对南京冬季环境下配备2.2 m²全裸式螺旋管翅集热器作为直膨式热泵系统蒸发器进行模拟^[10],得到冬季环境温度5℃时,将150 L水从5℃加热到55℃热泵的能效比,当太阳辐射 $I = 100 \text{ W/m}^2$ 时, $t_0 = -9 \text{ }^\circ\text{C}$,太阳能输入比为28%,集热蒸发器的热量收益72%来自空气,平均 COP = 3.48,当 $I = 300 \text{ W/m}^2$ 时, $t_0 = -4 \text{ }^\circ\text{C}$,平均 COP = 3.83,太阳能输入比0.69,系统综合利用了太阳能和空气中热量(太阳能占69%,空气热量占31%),即使在平均太阳辐射不是很强、环境温度也较低的工况下,仍然具有较高的 COP;而当 $I = 900 \text{ W/m}^2$ 时,蒸发温度比环境温度高10℃左右, COP 高达6.07,系统是以高效、节能的太阳能热泵方式工作。该类螺旋管翅式集热器综合利用了太阳能和空气能的热量,使得系统在太阳辐射强度不是很强时仍具有较高的性能系数。

2.2 系统容量匹配性研究

系统容量匹配性对整个热泵系统有很大影响,国内外许多学者都对此问题进行了分析研究。Haw-lader 等建立了直膨式太阳能热泵热水系统实验台^[11],在新加坡气候条件下对系统循环进行性能测试,利用获得的实验数据为系统匹配和控制优化服务。对于当地的气候条件,当水箱水温为30~50℃时,集热器效率大约为40%~75%,系统 COP 值为4~9。在此基础上建立了该系统的数学模型,模拟结果得出该系统的性能主要受集热器面积、太阳辐射以及压缩机转速等因素的影响。对于当地气候下的该系统,研究得出对于100 L的水箱容积匹配能够获得最优化的性能。此外还进行了经济性分析,结果表明系统热性能较为稳定,且具有明显的节能效果,最短投资回收期约为2 a。

Kuang Y. H. 等模拟分析了太阳辐射、环境温度、集热面积及水箱容积等因素对直膨式太阳能热泵热水系统性能的影响^[8-9]。为减小系统不匹配导致系统性能下降,提出采用变频压缩机和电子膨胀阀,模拟结果显示即使在冬天环境温度较低和太阳辐射

较弱的情况下,COP值仍在2.5以上.研究还表明,系统单位集热面积所匹配的水箱容积约为75~125 L.

Chaturvedi 等在其研究的变流量太阳能热泵热水系统中^[12],采用无盖板集热器和变频压缩机,对系统进行实验与模拟研究得出:在环境温度由冬季向夏季过渡时,通过降低压缩机的转速,可以明显地提高系统性能系数;当系统频率调节在40~70 Hz范围内时,由实验所测得的COP值和水侧的热容量系数与理论预测值比较一致.日本的Ito等^[7]也介绍了一系列DX-SAHP仿真实验研究,得出了系统匹配相关方面的一些结论:集热器的面积要与热泵系统匹配,集热平板厚度的适当减小、平板后的制冷剂管道间距的合理增大等措施不会给系统的COP值带来太大影响,但可以降低设备成本.这几点应值得在系统设备选型时加以考虑.

3 直膨式太阳能热泵系统主要技术问题及解决办法

近年来虽然直膨式太阳能热泵取得了飞速发展,但就目前发展水平而言,太阳能热泵装置在我国的发展还比较缓慢,其主要原因在于系统初投资普遍较高,集热器难以与建筑外观协调一致,集热效率低,且系统容量匹配性问题亟待进一步的改善和提高.综述以上文献的研究,可以分析出目前直膨式热泵最大问题主要有两方面:一是集热蒸发器不能同时高效吸收太阳能及空气能以及集热效率低、热损失严重等问题.二是系统容量匹配性问题,尤其是集热蒸发器和压缩机的匹配性不合理问题.

我们经过对直膨式太阳能热泵集热蒸发器及系统容量匹配性等相关特性的研究分析,认为应从以下几方面加以优化研究:

1) 提高集热蒸发器集热效率的途径主要有两种:一是加大对太阳能和空气能的吸收能力,二是尽量减少集热器的热损失.为了提高集热蒸发器的集热效率,分析得出应该在大幅提高集热蒸发器对太阳辐射能吸收能力的同时,尽可能增大集热蒸发器的集热面积,使其能同时高效吸收太阳能和空气能.具体可从以下几方面着手:

(1) 材料:集热蒸发器采用导热性能良好、易加工的铜铝材料相结合方式制作,增强导热性能,同时降低造价.当材料一定时,翅片的形式也对集热器的性能起到很大的影响,如果采用开孔式,可以加强与空气的对流换热,减少用材,节约成本,但由于面积

的减少,可能会削减对太阳能的吸收.

(2) 表面性能:集热蒸发器表面涂镀太阳光选择性黑铬涂层,其性能应符合我国十一五太阳能技术发展计划,吸收比 $\alpha=0.96$,发射比 $\varepsilon=0.09$,涂层为一级,从而加大太阳能的吸收,降低热能损失.通过调整翅片的间距和角度,使太阳光在翅片上下表面间不断反射,形成“黑箱效应”.

(3) 结构形状:翅片的形状、角度和间距等结构参数应按照以下几大原则来确定:一是在有限的太阳能受光面积上,尽量减少翅片间的遮挡,增加有效太阳能集热面积;二是使翅片在一天中吸收的太阳能最多的同时,也使得空气与集热器充分接触,提高空气对流换热能力,以便在阳光不足或无阳光条件下能有效利用空气能;三是减少空气流动阻力,促进空气在自然对流条件下或消耗最小动力条件下的对流,强化对流换热,提高其热重比.

通过吸收太阳辐射能,随着翅片温度的升高,翅片的平均Nu和平均换热系数一般都随之增加;在直膨式集热蒸发器上,通过独特的翅片设置形成烟囱作用,加大自然对流,提高集热蒸发器空气侧换热能力,随着倾斜角度的增加,自然对流过程中边界层受到冲刷的程度加剧,从而导致边界层变薄,使得自然对流换热逐渐加强;由翅片组成的空气流动入口处,翅片上下表面流动边界层厚度沿着流动方向增厚,因此相应的换热量减少,由于翅片下表面对流体流动的阻挡作用,通道入口速度在翅片下表面附件比在上表面附件衰减得较快,相应的边界层厚度大于上表面,在通道出口处,流场受到上下相邻流场及下部来流的影响,加强对流,Nu将增大,所以上下翅片对附近翅片换热存在一定的影响,翅片之间应该存在一个最优的间距,使翅片之间自然对流换热受限最小.

(4) 保温:采用可控的保温装置,当环境温度低于集热蒸发器蒸发温度时集热器底部及周边保温,减少热损失,增加集热效率;当环境温度高于集热蒸发器蒸发温度时采用全裸板式,加强空气对流换热,提高集热蒸发器吸收空气能的能力,最大程度地利用空气能的同时减少热量损失.

2) 解决系统容量匹配性问题,使系统各部件能安全、高效地运行,可从以下几方面着手:

(1) 经分析表明:太阳辐射、环境温度和风速直接影响蒸发压力(蒸发温度),因此可采用变频压缩机或电子膨胀阀控制制冷剂流量,使压缩机容量随蒸发压力(蒸发温度)的改变而改变.当太阳辐射增

强,环境温度升高,蒸发压力(蒸发温度)升高到超过某一设定值时,则提高压缩机的转速或增大膨胀阀开度,增加单位时间内的排气量;反之,则减小压缩机的转速或膨胀阀开度,减少单位时间内的排气量。

(2) 根据蒸发温度的变化来控制集热蒸发器的工作面积。在结构上,将集热蒸发器的工质流动管路采取并联方式,并在各并联支路入口处安装电磁阀或其它控制阀。当太阳辐射增大,环境温度升高,蒸发温度升高到超过设定值时,通过自动调节机构控制执行机构(电磁阀或其它控制阀)关闭某些并联支路,即减小了集热蒸发器的工作面积;反之,则反过来调节,打开某些并联支路,增大集热蒸发器的工作面积,使系统匹配性达到最优。

4 结论与展望

本文对国内外直膨式太阳能热泵系统相关特性的研究进行分析,总结出目前直膨式太阳能热泵主要技术问题是集热蒸发器集热效率低、热损失严重、系统容量匹配不合理,尤其是集热蒸发器的面积和压缩机容量的匹配性不合理等问题。我们经过对直膨式太阳能热泵系统相关特性的研究,认为应从压缩机、制冷剂流量以及集热器面积、材料、表面性能、结构形状、保温等多方面对太阳能直膨式热泵以及集热蒸发器进行优化设计。

高效直膨式太阳能热泵热水系统将成为社会与技术发展的一种必然趋势,在我国大力推广节能环保的大趋势下,太阳能热泵技术将会有更广阔的发展空间。

参考文献:

[1] Jordan R C, Therkeld J L. Design and economics of solar

energy heat pump systems [J]. ASME Journal Section, Heating, Piping, and Air Cond. 1954, 26: 122-130.

- [2] Jordan R C, Therkeld J L. Utilization of solar energy for house heating [J]. ASME Journal Section, Heating, Piping, and Air Cond. 1954, 26: 193-201.
- [3] Jordan R C, Therkeld J L. Solar energy availability for heating in the United States [J]. ASME Journal Section, Heating, Piping, and Air Cond. 1953, 25: 116.
- [4] Sporn P, Ambrose E R. The heat pump and solar energy [J]. Proceedings of the World Symposium on Applied Solar Energy, Phoenix, Ariz, 1955, Nov: 1-5.
- [5] Charter W W S, Taylor L E. Some performance characteristics of a solar boosted heat pump [J]. Proceedings of the I. R. Conference, Melbourne, Australia, 1976, 64: 1-8.
- [6] Chaturvedi S K, Shen J Y. Thermal performance of a direct expansion solar-assisted heat pump [J]. Solar Energy, 1984, 33: 155-162.
- [7] Ito S, Miura N, Wang K. Performance of a heat pump using direct expansion solar collectors [J]. Solar Energy, 1999, 65 (3): 189-196.
- [8] 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): 279-381.
- [9] Kuang Y H, Wang R Z, Yu L Q. Experimental study of solar assisted heat pump system for heat supply [J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(7): 1089-1098.
- [10] 徐国英, 张小松. 复合热源热泵系统集热/蒸发器的模型 [J]. 工程热物理. 2006, 27: 61-64.
- [11] Xu guoying, Zhang xiaosong. A simulation study on the operating performance of a solar-air source heat pump water heater [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26: 1257-1265
- [12] Hawlader M, Chou S K, Ullah M. The performance of a solar assisted heat pump water heating system [J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21: 1049-1065.

Characteristic Analysis and Optimization of Direct-expansion Solar-assisted Heat Pump System

Bu Qi-hui¹, Qin Hong¹, Liang Zhen-nan², Ye Ze-wen³

(1. Faculty of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. IAS Electronics Co., Ltd., Shenzhen, 518000, China; 3. Panasonic Wanbao Compressor Co., Ltd., Panyu 511495, China)

Abstract: The classification, principles and characteristics of the solar-assisted heat pump system are summarized, and some latest researches on collector evaporator and system capacity matching as well as some related properties of the direct-expansion solar-assisted heat pump system (DX-SAHP) are stated. Based upon these results, the main technical problems of the DX-SAHP are analyzed, and a series of thoughts and methods of improving the collection efficiency and optimizing system matching to improve the efficiency of this system are proposed.

Key words: solar energy; air energy; solar-assisted heat pump; direct-expansion solar-assisted heat pump