

基于太阳能技术的热泵供热系统研究进展

李孜绪¹, 刘媛媛², 徐胜利¹, 刘晓华¹

(1. 大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024; 2. 中国航空发动机集团有限公司, 北京 100089)

摘要: 太阳能热泵供热系统将太阳能与热泵技术有机结合, 具有高效节能、低碳环保等优势。本文综述了不同形式太阳能热泵供热系统的当前研究现状和应用情况, 分析了热源温度、热媒流量、环境温度等因素对系统性能和经济性的影响, 同时归纳总结了各类太阳能热泵供热系统的优势与不足之处, 最后展望了基于太阳能技术的热泵供热系统的发展方向。

关键词: 太阳能技术; 压缩式热泵; 吸收式热泵; PV/T 热泵; 供热

中图分类号: TK11 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2024.08.001

[引用本文格式] 李孜绪, 刘媛媛, 徐胜利, 等. 基于太阳能技术的热泵供热系统研究进展[J]. 热能动力工程, 2024, 39(8): 1-12. LI Zixu, LIU Yuanyuan, XU Shengli, et al. Research progress of heat pump heating systems based on solar energy technologies[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(8): 1-12.

Research Progress of Heat Pump Heating Systems based on Solar Energy Technologies

LI Zixu¹, LIU Yuanyuan², XU Shengli¹, LIU Xiaohua¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, Post Code: 116024;

2. Aero Engine Corporation of China, Beijing, China, Post Code: 100089)

Abstract: Solar heat pump heating system combines solar energy and heat pump technology organically, which has many advantages such as high efficiency and energy saving, low carbon and environmental protection. This paper summarizes the current research status and application of different forms of solar heat pump heating system, analyzes the influence of heat source temperature, heat medium flow rate, ambient temperature and other factors on the performance of the system and the economy, at the same time, summarizes the advantages and shortcomings of various types of solar heat pump heating system, finally, looks forward to the development direction of heat pump heating system based on solar technology.

Key words: solar technology, compression heat pump, absorption heat pump, PV/T heat pump, heating

引言

能源需求的快速增长导致碳排放量增大, 造成

温室效应和大气污染等环境问题。对此, 采用可再生能源是十分必要的^[1]。将太阳能技术与热泵供热系统相结合进行供热, 对有效利用可再生能源、改善能源消费结构、减少碳排放等具有极为重要

收稿日期: 2023-12-21; 修订日期: 2024-01-25

基金项目: 辽宁省高等学校“揭榜挂帅”项目(2021-26-4)

Fund-supported Project: Liaoning Provincial Higher Education Institutions "Unveiling the List of Commanders" Project(2021-26-4)

作者简介: 李孜绪(1998-), 男, 大连理工大学硕士研究生。

通信作者: 刘晓华(1970-), 女, 大连理工大学教授。

的意义。

太阳能取之不尽、用之不竭,是当前最清洁、环保低碳的可再生能源之一;热泵是一种以消耗部分能量为补偿条件,使热量从低温物体转移到高温物体的能量利用装置,它能够把空气、土壤、污水和海水等相关热源中所含的低品位能量转换为用户所需要的热能。因此,将太阳能转化为电能和热能,再与热泵技术相结合,为用户供热,将节约大量优质资源、保护环境、减少碳排放,这也更符合当前我国对能源结构化调整的强烈需求,为我国实现“碳中和”、“碳达峰”的目标助力^[2]。

太阳能与热泵技术联合运行的思想是由太阳能热利用的先驱者 Jordan 和 Threlkeld^[3] 在 20 世纪 50 年代的研究中提出的,该学者也最早指出了太阳能热泵技术的优越性。随后,日本、美国、瑞典、澳大利亚等发达国家纷纷投入了大量的资源对基于太阳能技术的热泵供热系统进行深入研究与开发,在各地实施了多项供热示范工程,取得了一定的经济效益和良好的社会效益。

为提高冬季供热能源利用率,减少碳排放,并进一步为工程实践提供指导,本文对基于太阳能技术的热泵供热系统形式进行分类总结,分析影响各系统性能的关键参数和影响规律,对比各系统的优劣,指出不足和后续研究方向。

1 光伏压缩式热泵供热系统

光伏压缩式热泵供热系统利用光电转化技术,将太阳能转换为电能,进一步驱动压缩式热泵机组实现供热。由于太阳能辐照具有波动性,在现有的研究中,大多数依靠蓄电池或市电网来维持光伏压缩式热泵系统的稳定性。而完全离网、直接利用光伏组件驱动的压缩式热泵系统因其运行稳定性较差,且此系统的研究报道较少,本文将不作介绍。

按照热泵机组补充供能方式的不同,光伏压缩式热泵系统主要分为独立式和并网式两类,如图 1、图 2 所示。两者的区别在于:在光照辐射强度充足的条件下,独立式光伏热泵系统中的光伏阵列产生的多余电量被储存在蓄电池中,在夜间、阴雨天气等光照不足甚至没有的条件下,采用蓄电池对压缩式热泵系统进行供能;而并网式则将其接入市电网,光照不足时用市电网进行电能的补充。

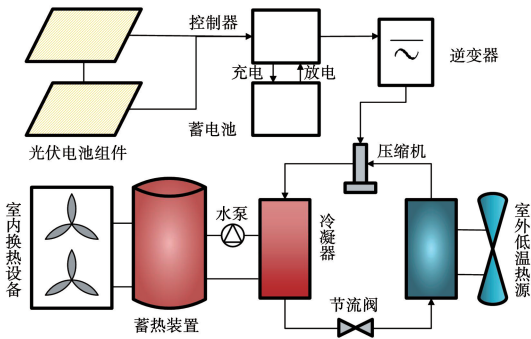


图 1 独立式光伏热泵供热系统

Fig. 1 Stand-alone photovoltaic heat pump heating system

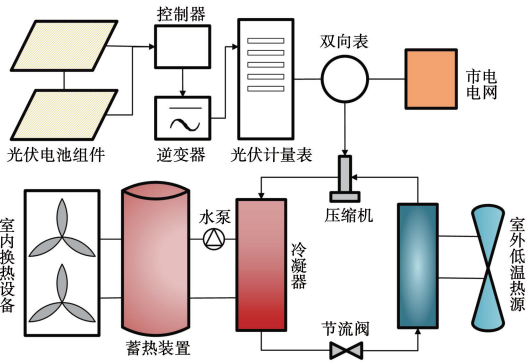


图 2 并网式光伏热泵供热系统

Fig. 2 Grid-connected photovoltaic heat pump heating system

1.1 独立式光伏热泵系统

1995 年,日本的 SANYO 首次提出了光伏驱动式热泵系统的概念,该系统使用光伏组件和市电网共同为热泵机组的压缩机进行供电,保证系统的正常运行^[4]。后续越来越多的研究者对光伏压缩式热泵供热系统开展了研究。

对于独立式光伏热泵供热系统,主要在系统性能的影响规律、性能评价、系统优化等方面开展研究。在系统性能的影响规律方面,Huang 等人^[5]将 6 台不同尺寸的太阳能电池板和空调器进行相互匹配,搭建了独立式光伏热泵系统,研究不同太阳辐照下的系统运行特性,光伏板的面积越大,该系统运行可靠性越好,但其成本也随之增高。王良^[6]设计搭建了一套 2 600 W 光伏驱动式空气源热泵系统对用户进行供暖,实验测试结果表明,系统制热量随着光照辐射强度的增加而增加,两者具有较好的线性关系。苏坤焯^[7]在昆明地区对系统开展实验测试时发现,太阳能电池板和蓄电池的效率对系统性能影响程度较大,因此在独立式光伏热泵系统中,选择合

适的光伏板和蓄电池容量,并且将各部件之间的匹配性做到最佳,系统能源利用率将提升 11% ~ 13%。吕光昭^[8]通过分析独立式光伏热泵系统在冬季一天的供暖运行数据时发现,系统中逆变器的平均效率为 65.7%,对系统性能有较大影响,在设计时同样需要考虑逆变器与热泵系统的匹配性,同时该学者通过实验运行数据发现,当天光照辐射强度不足、控制器不具有最大功率点追踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)功能、电池板表面灰尘的存在等不利因素,使得该系统未能达到最佳运行状态。在系统性能评价方面, Li 等人^[9]针对上海地区冬季供热的生活需求进行了实验研究,该系统在冬季制热时,能源利用率为 0.37,系统中的光伏阵列可产生电能 9.34 kW·h,其中, 7.27 kW·h 转换为交流电供热泵系统消耗,其余电能储存在蓄电池中,该系统可满足冬季供暖需求。孙超等人^[10]针对极端热湿气候条件下偏远海岛建筑,以 500 kW 为设计热负荷,按照光伏板总发电量与系统总耗电量相等原则,对独立式光伏海水源热泵供热系统进行匹配性计算和性能评价,该系统的总耗电量为 146.55 kW,热泵系统的性能系数(Coefficient of Performance, COP)为 3.41,可实现偏远海岛地区的能量自给自足。

在系统优化方面,文献[11-12]以独立式光伏热泵供热系统的初投资和运行成本为优化目标,一方面通过 MPPT 控制器来控制光伏阵列始终处于最大功率点状态,另一方面控制系统中电机的电流和转速,对系统进行优化。梁祥莹^[13]通过应用数字 PID 控制技术对热泵系统的热负荷进行精准调控,从而完成对系统的优化,实验结果证明了该技术的应用可有效提高系统的能源利用效率。在实际工程应用方面,国外已有相关成熟产品投放市场,美国 Solar Panels Plus 公司已经有独立式光伏变频空调产品,该系统最大制热能力有 6.0 kW,而在国内市场和工程应用领域还未大面积普及。

1.2 并网式光伏热泵系统

对于并网式光伏热泵供热系统,文献[14-15]搭建一套光伏和市电网联合供电的空气源热泵系统,满足典型用户的热负荷需求,当热泵机组的压缩机不能完全消耗完光伏转换的电能时,多余的光伏电能将驱动热水箱中的电加热丝为水加热,进行热

量存储,通过一年的运行数据发现,热泵系统年均 COP 可达 3.5,日均发电量为 6.2 kW·h,日均花费 0.11 欧元,具有良好的经济性。Francisco 等人^[16]搭建了光伏并网式变频热泵系统,对办公楼建筑进行供热,测试结果表明,该系统在冬季供热期间的热泵系统平均 COP 为 4.11,供热的输出功率为 2 313 kW·h。Zhou 等人^[17]通过实验测试了采用滚动粘合结构光伏板的并联式系统在过渡季节和冬季的系统性能,测试发现,系统的平均供热 COP 分别是 5 和 4.4,平均光伏发电效率为 11.9% 和 10.2%,相比于采用传统光伏板的热泵系统,其性能有所提升。彭胜男^[18]针对 89 m²的农村典型建筑,采用多源互补瞬态计算模型对并网式光伏-空气源热泵联合供热系统的经济性、环境效益进行分析,结果表明,当光伏发电量能恰好满足建筑供热耗电量时,内部收益率最高,该系统的费用年值低于农村小煤炉以及单独空气源热泵供热系统。文献[19-20]在校园内搭建了光伏并网驱动额定制热量为 7 900 W 的空气源热泵系统,通过系统热力学分析和实验数据的对比得到,与仅依靠市电驱动的空气源热泵系统相比,该系统每年至少可节约运行费用 7 542.6 元,CO₂排放量减少 0.427 t,研究结果证明了并网式光伏空气源热泵系统的显著经济优势。

相比于传统锅炉供热和市电驱动的压缩式热泵系统,采用光伏压缩式热泵系统对用户进行供热,初投资较高,但是从系统生命周期综合来看,光伏压缩式热泵系统供热运行的综合成本和 CO₂、烟尘等排放量低于传统锅炉供热系统。光伏压缩式热泵系统在供热期间的平均 COP 为 3~5,但由于系统中光伏板的光电转化效率低,使得系统对太阳能的能源利用率较低,一般为 0.3~0.4。从目前的研究报道可以发现,光伏压缩式热泵供热系统的 COP 和供热量随着光照强度的增加而增加,因此将供热系统应用于光照充足、常年日照时间较长的地区,其系统性能和经济性将更加显著。在光伏组件中,太阳能电池板和蓄电池的效率对系统性能影响程度较大,在设计匹配时,需要考虑与压缩机、供热末端用户热负荷之间的匹配性。在供热工程方面,大多研究基于单级压缩式热泵系统,采用光伏直驱的双级压缩热泵系统和复叠式热泵系统满足大温升用户供热需求的研究报道较为少见。从现有研究结果可以发现,光

伏组件、蓄电池的成本较高、光伏板的光电转化效率不够理想及太阳辐射、环境温度的波动等不利因素限制了光伏压缩式热泵供热系统的推广。

2 光热吸收式热泵供热系统

光热吸收式热泵供热系统是利用太阳能集热组件加热热媒(热油、水等),进而驱动吸收式热泵系统运行,最终将热量转移至热用户。

按照驱动热源的利用形式,将光热吸收式热泵系统分为光热单效吸收式热泵系统和光热双效吸收式热泵系统(多效式多以双效式为主)。在光热单效吸收式热泵系统中,驱动热源在热泵系统中被直接利用一次,如图 3 所示。在光热双效吸收式热泵系统中,驱动热源被直接或间接地利用了两次,即驱动热源产生的热量在高压发生器和低压发生器中被利用,如图 4 所示。

2.1 光热单效吸收式热泵系统

光热吸收式热泵供热系统早在 20 世纪 30 年代就已经被研究,但由于其初始投资高、工作效率低并没有受到重视。直到上个世纪 70 年代,由于其对环境危害小,可再生能源利用率高,以及越来越严峻的能源形势,光热吸收式热泵供热技术才得到较大的发展^[21]。文献[22-24]首先提出了太阳能集热系统与吸收式热泵系统并联运行的方案,并且指明了两系统联合运行供热的广阔前景。

在光热单效吸收式热泵供热系统性能评价方面,Gomri^[25]设计了一种太阳能/天然气单效溴化锂吸收式水源热泵系统,设计负荷为 10 kW,当光照不足时,利用天然气燃烧产生热量进行补充供能,通过仿真结果发现,蒸发温度恒定时,冷凝温度从 28 ℃变化到 36 ℃的过程中,能源利用率最大为 0.82,最大烟效率约为 30%。王洪利等人^[26]利用光热吸收式热泵系统对 8 000 m² 厂房进行冬季供热,模拟结果显示,系统 COP 最大能达到 1.9。Figaj 等人^[27]针对矿区小规模用户,设计了一种带有聚光器和集热器的光热单效吸收式热泵系统,从环境中取热,并转移至用户侧,通过对系统进行动态仿真发现:该系统的热效率始终在 70% 以上,能源利用率约为 0.35。Sozen 等人^[28]在土耳其安卡拉的气候条件下对光热氨-水吸收式热泵系统进行了实验性能测试,并采用烟分析方法探究供热过程中设备不可逆损失对系统性能产生的影响,通过数据发现,蒸发器和吸收器的烟损失高于其他设备,这为开展系统部件优化提供了方向。胡秋明等人^[29]以邯钢余热为低温热源,以太阳能为驱动热源,设计了一种太阳能-废热溴化锂吸收式热泵系统为某综合办公楼供暖,实验测试该系统制热量达 311 kW,热泵系统的 COP 为 1.45。

与其他供热系统对比分析时,Argiriou 等人^[30]发现相比于传统市电直供的压缩式热泵,采用功率为 10 kW 的光热单效吸收式空气源热泵系统对房间用户进行供暖,能源消耗可节约 20% ~ 70%。Salehi 等人^[31]以地热温泉为低温热源,对光热溴化锂吸收式热泵系统和光热氨-水吸收式热泵系统进行对比分析,当光照辐射强度从 80 W/m² 增加到 260 W/m² 时,两者单位供热成本分别下降了 60% 和 30%。周倩^[32]探究了以循环冷冻水为低温热源的

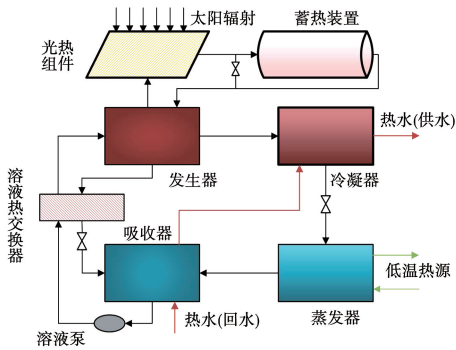


图 3 光热单效吸收式热泵供热系统

Fig. 3 Photothermal single-effect absorption heat pump heating system

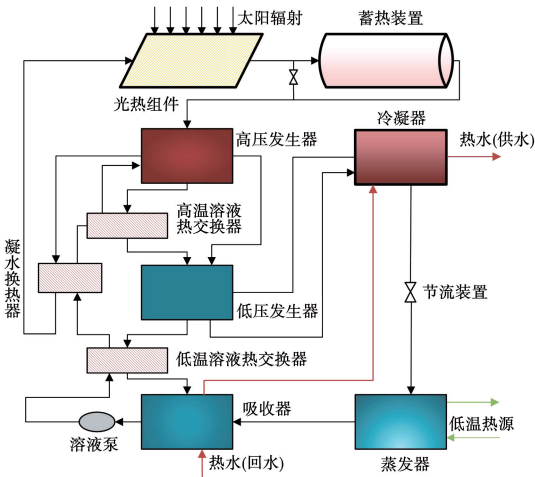


图 4 光热双效吸收式热泵供热系统

Fig. 4 Photothermal double-effect absorption heat pump heating system

光热吸收式热泵供热系统的性能,并将其与燃气热水锅炉、燃油型直燃式溴化锂机组进行了对比,结果表明,对建筑面积 4 000 m²,热负荷需求为 500 kW 的办公楼进行供热时,光热单效吸收式热泵系统的初投资较高,但是运行费用及费用年值相比于其他系统都更低,环境效益方面,光热吸收式热泵系统的 CO₂ 排放量最小,环保效益优于其他二者。Sun^[33] 针对低温区域冬季供热需求的时间和空间失配等问题,设计一种新型的太阳能单效溴化锂吸收式热泵供热系统,并对其进行热力学和经济学分析,新型太

阳能低温区域供热供冷系统年系统性能系数约为 8.52,炯效率约为 36.7%,与传统供热系统相比,该系统的供热成本和年碳排放量分别可降低约 27.14 元/GJ 和 23 kg/m²,每年可节约电力约 4.33 (kW·h)/m²。

在性能影响因素方面,文献[34–39]中学者们主要探究了低温热源温度和流量、驱动热源温度和流量、供热热水温度等相关变量对光热单效吸收式热泵系统 COP 的影响规律,具体研究结果如表 1 所示。

表 1 光热单效吸收式热泵供热系统性能影响规律研究总结
Tab. 1 Summary of the research on the influence law of the performance of photothermal single-effect absorption heat pump heating system

文 献	研究方式	研究结果
[34]	数值模拟	驱动热源热水入口温度上升,溴化锂浓溶液的质量分数增大,放气范围增大,系统 COP 增加。
[35]	系统仿真	热泵系统 COP 随着系统热水供水温度、流量的增大而减小,但流量变化对系统性能影响不明显;热泵系统的 COP 随着低温热源出口温度的升高而增大。
[36]	数值模拟	光热单效吸收式热泵系统的 COP 随着发生温度的升高而增大,但是系统中的发生温度越高,性能系数提升的速度越慢。
[37]	实验测试	溶液循环量越低,驱动热源介质流量越高,系统 COP 越大。
[38]	仿真计算	蒸发器中冷水出口温度和发生器中热媒水出口温度的升高导致系统放气范围增大,COP 升高;冷凝器中热水出口温度升高,导致系统放气范围减小,COP 减小。
[39]	模拟和实验	废水质量流量减少,蒸发器换热效果变差,蒸发温度降低,系统 COP 减小。

2.2 光热双效吸收式热泵供热系统

对于光热双效吸收式热泵供热系统,杨筱静^[40] 针对名义制热量为 868 kW 的蒸汽型双效溴化锂吸收式热泵机组进行制热工况下的模拟计算,冬季低温热源水进入蒸发器,使得系统从中提取热量,分析设备换热温差对系统性能的影响规律发现,蒸发器传热温差和吸收器传热温差对机组 COP 的影响最大,两者每增加 1 ℃,COP 降低约为 0.02;高压发生器传热温差对机组 COP 影响较小,传热温差每增加 1 ℃,COP 降低约为 0.002。李杰等人^[41] 以地下土壤为低温热源,对导热油型光热双效溴化锂吸收式热泵进行了动态性能分析,在导热油出口温度升高后,总放气范围增加,制热量增加,COP 增大。张艺斌^[42] 为满足某建筑面积的负荷需求,设计了一种光热双效吸收式地源热泵与电网驱动的压缩式热泵联合运行系统,通过模拟联合运行系统在全年运行的情况,并与压缩式机组加燃气锅炉系统对比分析发

现,在联合系统承担负荷比例不变的情况下,光照辐射强度越大,联合运行系统的年总费用先减小后增大;当光热吸收式系统承担 30% 负荷,集热器面积按 600 W/m² 设计时,联合运行系统相对于独立压缩式系统的年运行节能量最大,为 25 416 kW·h,但系统的投资回收期为 13 年;经济性方面,当太阳能吸收式机组承担负荷比例为 10%,光照辐射强度为 800 W/m² 时,联合运行系统的年总费用最低,投资回收期最短,仅为 6.5 年。

基于传统的光热单效、双效吸收式热泵系统,部分学者针对系统流程和设备的结构做了进一步优化,并取得了良好的效果。廉永旺等人^[43] 提出一种不加溶液泵、采用浓溶液直接喷淋循环方式的光热溴化锂热泵系统,该系统以环境空气为低温热源,无冷剂循环水泵,优化后的系统初投资减少。何梓年等人^[44] 将一种新型热管式真空管集热器应用到光热吸收式空气源热泵系统,该真空管集热器相较于传统集热器,具有热效率更高、保温效果更好等优

势。Ibarra 等人^[45]在光热吸收式热泵系统中采用新型抛物面槽式聚光型集热器作为驱动热源,实验测试结果性能良好。Bellos 等人^[46]研究了太阳能驱动的三联热泵系统,该系统包括储罐、有机朗肯循环模块和溴化锂吸收式热泵系统,对三联热泵系统进行实验测试,测试结果证明了光热吸收式热泵系统在节能方面的巨大优势。Kazagic 等人^[47]针对维索科地区面积为 11 000 m²的供暖需求,也建立了三联系统供热系统示范工程,通过系统全年的运行结果发现,热泵 COP 约为 2.8,CO₂排放量每年可减少 10 000 t,一定程度上缓解了当地能源紧缺的形式。文献[48-49]在不同环境工况下将光热单/双效溴化锂吸收式热泵系统切换不同的运行模式,以此达到了系统优化的目的。王丽文等人^[50]将槽式太阳能集热器、氨-水吸收式热泵和板式换热器进行组合供热,增加了板式换热器,实验测试效果显著。

对于光热吸收式热泵供热系统,众学者基于数值仿真和实验验证,在系统性能评价、特性分析、运行调控模式、结构和设备优化等方面开展了研究。总体上,光热吸收式热泵供热系统的 COP 约 1.9,能源利用率达到 80% 以上。光热吸收式热泵供热系统的 COP 与低温热源的温度和流量、驱动热源温度成正相关,与冷凝器出口热水温度、流量成反相关。在实际工程应用方面,光热吸收式热泵系统一般适用集中供热等大中型项目,尤其适用于余热丰富、热能廉价的地区。与传统燃气热水锅炉及燃油型直燃式溴化锂机组相比,光热吸收式热泵系统在能源利用率、减排降碳等方面具有显著优势。但光热吸收式热泵供热系统存在初投资较高、循环工质对容易发生结晶和具有腐蚀性等问题,因此在其设计、运行和维护过程中,也对运行工况、管路密封、部件的结构等提出了更为严格的要求,这也是阻碍目前光热吸收式热泵供热技术推广和应用的主要原因。

3 光伏/光热一体化热泵供热系统

光伏/光热一体化热泵系统是将太阳能的光伏效应与光热效应结合在一起,再与热泵系统耦合以保证机组的正常工作,由此构成了光伏光热一体化热泵系统(Solar Photovoltaic/Thermal, PV/T),其中, PV/T 组件的通常做法是将集热器与太阳能电池板贴合为一体。

根据 PV/T 组件与热泵组合配置方式的不同,将其分为直接膨胀式 PV/T 热泵供热系统和非直接膨胀式 PV/T 热泵供热系统,如图 5、图 6 所示。

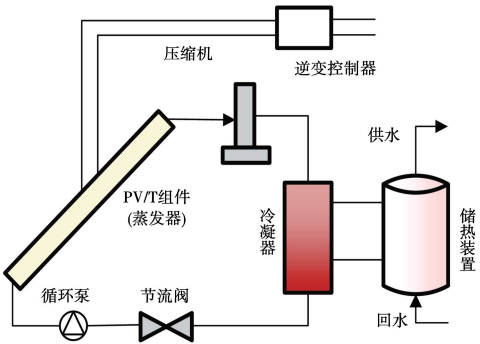


图 5 直接膨胀式 PV/T 热泵供热系统
Fig. 5 Direct expansion PV/T heat pump heating system

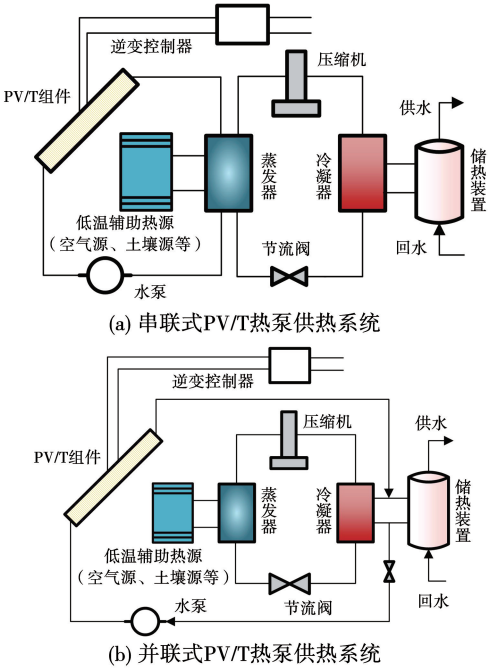


图 6 非直接膨胀式 PV/T 热泵供热系统
Fig. 6 Non-direct expansion PV/T heat pump heating systems

在直接膨胀式 PV/T 热泵供热系统中,太阳能集热器、光伏板和蒸发器复合为一个整体(PV/T 蒸发器),即热泵工质直接在 PV/T 组件蒸发器中吸收太阳辐射能而得到蒸发,同时产生电能。而在非直接膨胀式 PV/T 热泵系统(串联、并联)中,太阳能集热器、光伏板复合而成的 PV/T 组件与蒸发器之间相互分立。在串联系统中,集热介质在 PV/T 组件

中吸收太阳能,在蒸发器中将热量传递给热泵机组;在并联系统中,PV/T 系统与热泵系统(以空气源、水源、土壤源等为低温热源)并联后,向蓄热装置供热,最终满足用户热负荷需求。

3.1 直接膨胀式 PV/T 热泵系统

对于直接膨胀式 PV/T 热泵系统供暖技术的研究,在系统性能影响因素方面,文献[51–52]针对直接膨胀式 PV/T 空气源热泵系统,分别从数值模拟和实验测试两方面证明了系统的 COP 主要受光照辐射强度和环境温度的影响,适当增加光照辐射强度和环境温度可使系统 COP 显著提升。文献[53–55]在对直膨式 PV/T 热泵系统优化方面做了进一步的研究,在常规双热源直膨式 PV/T 热泵系统的基础上,并联引入空气源蒸发器,以提高低光照辐射下的系统性能,对优化后的系统开展数值计算时发现,增加光照辐射强度和环境温度可提高系统 COP,与常规的直膨式 PV/T 热泵系统相比,该系统性能更优越。

在与其他单一热源热泵供热系统的性能对比研究时,王祥达等人^[56]实验测试发现,室外温度为 0℃、太阳辐射照度为 500 W/m²时,PV/T 热泵系统的耗电量比风冷式热泵系统小 279 W,COP 比风冷式热泵高 27.6%,PV/T 组件背板温升与辐射强度成正比,增大通风速度可有效降低背板温升,该结论也与马丽群等人^[57]的研究结果相互印证。刘仙萍等人^[58]利用 TRNSYS 软件研究光伏/光热-地源热泵联合供热系统的运行特性时发现,该联合供热系统 COP 相对于传统地源热泵系统提高了 43.8%,与独立光伏系统相比,PV/T 组件的光伏电池最高温度降低约 35℃。陆王琳等人^[59]通过仿真分析探究北京、拉萨、兰州地区的直膨式 PV/T 热泵系统运行性能的差异,当冷凝温度为 50℃时,采暖季系统平均 COP 分别为 3.67、5.01 和 3.41,但随着冷凝温度的上升,系统集热能力有所下降。孔祥强等人^[60]探究了以 R410A 为工质的直膨式太阳能热泵热水器系统的性能特性,光照辐射强度从 300 W/m²增至 900 W/m²时,COP 由 4.27 增至 5.92,当环境温度由 5℃增至 35℃时,COP 由 4.35 增至 6.06。Shirazi 等人^[61]在加拿大多伦多地区建立太阳能驱动的 PV/T 热泵供热系统,并与生物质燃烧供热系统进行

对比,该 PV/T 热泵供热的能源成本为 78.9 美元/(MW·h),太阳能驱动的 PV/T 热泵每年 CO₂排放量比基于生物质燃料的系统少 7.2 t。

在系统的运行调控模式方面,董科枫^[62]对直接膨胀式 PV/T 热泵供热系统采用控制策略表、启动阶段的频率策略和启动时间策略等综合控制策略,实验结果证实了综合控制策略实行后的显著节能效果。杜伯尧等人^[63]通过改变蒸发器侧的取热方式调整直膨式太阳能/空气能多能互补热泵系统的运行模式,从而达到优化系统的目的。张政等人^[64]针对不同运行工况,将 PV/T 热泵系统采用环形热管-热泵复合模式(PV/T 组件直接加热热水系统与 PV/T 热泵系统并联运行)和热泵模式(仅 PV/T 热泵系统运行)切换运行,从而使得该系统能耗最低。

3.2 非直接膨胀式 PV/T 热泵系统

早期研究主要集中在结构形式较为简单的直接膨胀式 PV/T 热泵系统,但该系统对太阳辐射的依赖性较大,无法长期稳定运行,因此太阳能与热泵技术结合的带有蓄热装置的非直接膨胀式 PV/T 热泵系统开始成为众多学者研究的重点。

在非直接膨胀式 PV/T 热泵系统的运行特性分析方面,文献[65–66]设计了串联式 PV/T 双热源热泵系统,热泵系统白天吸收来自 PV/T 集热器转化的太阳能,夜间或光照强度不足时,则启用风冷式蒸发器。对系统进行实验研究发现,系统全年平均热性能系数 COP 为 5.4,平均光电转化效率为 16.6%,光伏组件单位面积的平均输电功率为 91.3 W/m²;随着 PV/T 集热器面积的增加,系统性能、输电功率和烟效率增加,增速逐渐变缓。曲明璐等人^[67]利用 TRNSYS 软件建立了非直接膨胀式 PV/T 热泵系统数学模型,系统从循环水箱中获取热量,并将热量转移至用户侧,该学者将其与单一光伏发电系统、单一空气源热泵系统进行了能量与烟的对比分析,非直接膨胀式 PV/T 热泵系统的全年总发电量、热泵系统 COP 均高于单一光伏发电系统加单一空气源热泵系统,其能耗与烟损也更低。张露等人^[68]搭建串联式 PV/T 热泵系统应用示范平台,用以某企业楼全年供生活用水和发电并网,该系统使用双热源热泵机组,空气源与水源可同时或者单独使用,实验测试表明,PV/T 热泵系统的平均 COP 为 4.7,综合效

率达 74.4%,且 PV/T 部件发电量较传统光伏组件提高了 11.0%,与纯 PV 组件和集热器相比,将 PV/T 组件应用于热泵系统,具有较大优势。Bordignon 等人^[69]采用并联式 PV/T 地源热泵耦合系统对小型住宅区进行冬季供暖和发电,通过模拟分析同样得到系统的 PV/T 组件输出电能多于单一 PV 组件的发电量,热泵系统 COP 也高于单一低温热源的热泵系统的,年均 COP 约 4.0。Anvar 等人^[70]针对乌兹别克斯坦地区某建筑设计了串联式 PV/T 热泵复合供热系统向用户提供 55℃ 的生活热水,运行结果显示:该系统无需外部能量输入,可实现系统内部能量的自给自足,运行成本几乎为零,经济效益显著。Sangmu 等人^[71]实验测试并联式 PV/T 空气源热泵系统的运行特性时发现:与传统空气源热泵系统相比,PV/T 模块可将并联式 PV/T 空气源热泵系统的性能提高 52%,与土壤源热泵系统相比,该系统初投资费用可降低 44%,系统的平均制热 COP 为 3.54。文献[72~73]设计了在雅典地区的并联式 PV/T 热泵系统,典型气候条件下的 COP 为 2.89~3.59,与传统电热水器或燃气热水器相比,该系统的节能率可达 70%。Bakirci 等人^[74]在室外空气温度 -10.8~14.6℃ 的工况下开展热泵系统性能测试,结果表明在太阳能平板集热器面积为 20 m² 时,系统集热器效率为 33%~47%,系统的能源利用率为 0.69,运行效果良好。Liang 等人^[75]采用实验和模拟相结合的方法对 PV/T 并联式热泵系统的性能进行了评价,结果显示冬季系统的 COP 约为 4.32,PV/T 的发电量可抵消冬季总耗电量的 43%,该系统的投资回收期为 6.53 年,具有较好的区域适应性和经济性。Tzivanidis 等人^[76]进一步针对雅典地区的太阳辐照度 600 W/m²、环境温度 1.85~8.75℃ 的环境工况,利用 TRNSYS 对比分析串联式和并联式 PV/T 供热系统的性能,串联式系统平均 COP 为 5.15,性能优于并联式系统的 COP(3.24)。Lu 等人^[77]利用 TRNSYS 对比分析 39 个城市的非直接膨胀式 PV/T 热泵系统的运行特性时发现,以空气源热泵为辅助热源时,并联系统的性能总体上优于串联系统,特别是在较高的太阳辐射和温暖的气候地区并联式空气源热泵系统将拥有显著优势,而在严寒地区,串联式 PV/T 水源热泵系统的性能更优。

在系统优化方面,蒲学胜等人^[78]利用遗传算法对非直接膨胀式太阳能热泵系统的集热器面积、集热水箱体积、生活热水箱体积进行优化,使其与热泵机组其他设备的匹配性更佳,系统优化后运行能耗消耗减少 27.2%。张梦等人^[79]对并联式 PV/T 热泵系统进行多目标优化设计,以 PV/T 组件发电量最大为目标函数,以 PV/T 组件的倾角、方位角、蓄热水箱容积、各循环侧工质流量等为设计变量,开展了优化设计。Xia 等人^[80]以系统运行 20 年的总成本为优化目标,以光伏电池价格、钻井成本和市电价格为设计变量,通过人工神经网络模型和遗传算法相结合的方法,提出了 PV/T 地源热泵复合系统的优化设计策略。

根据目前研究结果发现,PV/T 热泵供热系统中的 PV/T 组件可有效降低光伏电池的温度,相比于单一光伏组件而言,其平均光电转换效率更高,使用寿命更长,提高了 PV/T 热泵供热系统对使用环境的适应性,降低了系统的运行费用,也拓宽了其应用范围。总体上,PV/T 热泵供热系统的 COP 达到 5.0 以上,在同一运行工况下,相较于传统压缩式热泵系统,其供热性能更优。在运行特性的研究方面,随着光照辐射强度的增大,PV/T 热泵系统的 COP 开始增长迅速,当光照辐射强度达到一定值时,热泵系统的 COP 增长速度变缓;提高蒸发温度和降低冷凝温度均可提高 PV/T 热泵系统的 COP,蒸发温度的提升对系统性能的影响程度更大。目前由于光电、光热转化效率较低及 PV/T 组件构成较为复杂、成本较高等限制,在长期供热过程中,PV/T 组件利用太阳能所产生的电能和热能无法保证热泵系统的稳定运行,需要接入市电网等其他能源进行能量补充。

4 结论与展望

(1) 相比于其他两种系统,由于光电转化技术的限制,光伏压缩式热泵系统成本较高且能源利用率较低,但系统组成简单,应用上方便灵活,在家庭用户等小规模应用方面,国外已有小负荷商业化机组;对于光热吸收式热泵供热系统,将其应用于中大规模供暖项目,系统的能源利用率和经济性优势更显著,在国内目前已有相关示范工程的应用,但相比

于光伏压缩式热泵系统,光热吸收式热泵系统设备组成复杂,运行维护费用较高,且溴化锂工质在循环过程中存在溶液结晶、腐蚀设备等问题;PV/T 热泵系统相比于独立的光伏压缩式热泵系统与光热吸收式热泵系统,其适应需求的灵活性更大、应用温度范围更广、太阳能综合利用率更高,但 PV/T 集热器结构和系统组合方式较为复杂、制造成本较高。

(2) 在光伏压缩式热泵供热系统中,针对光电转化效率较低、蓄电池与光伏组件的成本较高等问题,未来应加大对光电转化技术、储能技术的研究,实现系统能源利用率和经济性的提升。此外,对于光伏压缩式热泵供热系统的研究,大多基于单级压缩,针对光伏驱动的双级压缩热泵系统和复叠式热泵系统的研究较少,未来可进一步探究光伏直驱双级压缩热泵供热系统和复叠式热泵供热系统的特性分析,满足大温升用户供热需求。

(3) 对于光热吸收式热泵供热系统,用户侧供热负荷的波动、气象参数的变化等使热泵系统的运行性能受到影响。开展将太阳能热泵技术与人工智能相结合的研究,对该系统主要运行参数及环境的实时变化进行监测,从而使系统根据实时数据进行优化调整,最大限度地提升系统性能。同时,加大对新的吸收式热泵工质的研究,寻找更理想的热媒介质,对设备结构进行优化,增强吸收式热泵的换热效果和耐腐蚀性能。

(4) 对于 PV/T 热泵供热系统,其 PV/T 组件工艺复杂,成本较高,此外,PV/T 热泵系统的供热应用规模较小。未来可加快对高效 PV/T 组件的研发,降低系统的总成本,推动 PV/T 热泵供热系统的高度集成化和规模化应用。同时,根据不同地域特点,结合当地环境和供热建筑结构分布,因地制宜地研发和推广多能互补、协同供热的 PV/T 热泵系统,实现节能降碳。

参考文献:

[1] 耿直,段博文,王剑利,等.多能互补清洁供暖系统特性分析[J].热能动力工程,2023,38(11):175-184.

GENG Zhi, DUAN Bowen, WANG Jianli, et al. Characteristic analysis of multi-energy complementary clean heating system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38 (11): 175-184.

[2] HOVE A. Synergies between China's whole county photovoltaic program and rural heat pump adoption[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, 2023 (12): 488.

[3] JORDAN R C, THRELKELD J L. Solar energy availability for heating in United States[J]. Heating Piping & Air Conditioning, 1953, 26: 1-2.

[4] OHNISHI M, TAKEOKA A, NAKANO S, et al. Advanced photovoltaic technologies and residential applications [J]. Renewable Energy, 1995, 6(3): 275-282.

[5] HUANG B J, HOU T F, HSU P C, et al. Design of direct solar PV driven air conditioner[J]. Renewable Energy, 2016, 88: 95-101.

[6] 王良. 光伏直驱热泵系统性能及其能量耦合特性研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2020.

WANG Liang. Study on the performance and energy coupling characteristics of heat pump system directly driven by photovoltaic [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2020.

[7] 苏坤烨. 分布式独立光伏空调系统性能及部件匹配特性研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2016.

SU Kunye. Research on the performance and component matching characteristics of distributed independent photovoltaic air conditioning systems [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2016.

[8] 吕光昭. 独立光伏空调系统的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.

LYU Guangzhao. Research on stand-alone photovoltaic air conditioning system [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.

[9] LI Y, ZHANG G, LYU G Z, et al. Performance study of a solar photovoltaic air conditioner in the hot summer and cold winter zone [J]. Solar Energy, 2015, 117: 167-179.

[10] 孙超, 孙婷婷, 刘艳峰. 极端热湿气候条件下独立光伏海水源热泵系统优化匹配研究[J]. 暖通空调, 2018, 48(5): 42-46.

SUN Chao, SUN Tingting, LIU Yanfeng. Study on optimal matching of stand-alone photovoltaic seawater-source heat pump system under extreme hot and humid condition[J]. Heating Ventilating and Air Conditioning, 2018, 48(5): 42-46.

[11] ABDEL-RAHIM N M B, SHALTOUT A. Analysis and design of photovoltaic powered air conditioners using slip-frequency control scheme [J]. Electric Power Components and Systems, 2007, 35(1): 81-95.

[12] ABDEL-RAHIM N M B. Adjustable-speed unsymmetrical two-phase induction motor drive for photovoltaic powered air conditioners [J]. Electric Power Components and Systems, 2010, 38(5/8): 865-880.

[13] 梁祥莹. 太阳能—地源热泵式空调系统的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.

LIANG Xiangying. The research on photovoltaic-solar assisted

- ground resource heat pump air-condition system [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- [14] HUANG B J, HOU T F, HSU P C, et al. Design of direct solar PV driven air conditioner [J]. *Renewable Energy*, 2016, 88: 95 – 101.
- [15] AGUILAR F J, ALEDO S, QUILES P V. Experimental study of the solar photovoltaic contribution for the domestic hot water production with heat pumps in dwellings [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 101: 379 – 389.
- [16] FRANCISCO J, PEDRO V. Operation and energy efficiency of a hybrid air conditioner simultaneously connected to the grid and to photovoltaic panels [J]. *Energy Procedia*, 2014, 48 (1): 768 – 777.
- [17] ZHOU C, RIAZ A, WANG J, et al. Photovoltaic thermal heat pump assessment for power and domestic hot water generation [J]. *Energies*, 2023, 16(19): 6984.
- [18] 彭胜男. 适用于北方农村独立民居的光伏—空气源热泵联合供热系统研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.
- PENG Shengnan. Study on photovoltaic-air source heat pump combined heating system for independent rural dwellings in northern [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2019.
- [19] WANG C, GONG G, SU H, et al. Efficacy of integrated photovoltaics-air source heat pump systems for application in Central-south China [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 49: 1190 – 1197.
- [20] WANG C, GONG G, SU H, et al. Dimensionless and thermodynamic modelling of integrated photovoltaics-air source heat pump systems [J]. *Solar Energy*, 2015, 118: 175 – 185.
- [21] 蔡世杰. 太阳能利用技术研究现状及发展前景 [J]. *中国高新技术*, 2018, 33(21): 52 – 54.
- CAI Shijie. Research status and development prospects of solar energy utilization technology [J]. *China High and New Technology*, 2018, 33(21): 52 – 54.
- [22] JORDAN R C, THERKELD J L. Design and economics of solar energy heat pump systems [J]. *Heating Piping and Air Conditioning*, 1954, 26: 122 – 130.
- [23] JORDAN R C, THERKELD J L. Utilization of solar energy for house heating [J]. *Heating Piping and Air Conditioning*, 1954, 26: 193 – 201.
- [24] JORDAN R C, THERKELD J L. Solar energy availability for heating in the United States [J]. *Heating Piping and Air Conditioning*, 1953, 25: 116.
- [25] GOMRI R. Simulation study on the performance of solar/natural gas absorption cooling chillers [J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 65 (SI): 675 – 681.
- [26] 王洪利, 张 强, 唐琦龙, 等. 多目标优化的太阳能吸收式热泵性能分析 [J]. *河北联合大学学报 (自然科学版)*, 2016, 38(1): 88 – 93.
- WANG Hongli, ZHANG Qiang, TANG Qilong, et al. Performance analysis of solar absorption heat pump based on multi-objective optimization [J]. *Journal of Hebei Polytechnic University (Social Science Edition)*, 2016, 38(1): 88 – 93.
- [27] FIGAJ R, SZUBEL M, PRZENZAK E, et al. Feasibility of a small-scale hybrid dish/flat-plate solar collector system as a heat source for an absorption cooling unit [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 163: 114399.
- [28] SOZEN A, ALTIPARMAK D, USTA H. Development and testing of a prototype of absorption heat pump system operated by solar energy [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2002, 22 (16): 1847 – 1859.
- [29] 胡秋明, 王景刚, 鲍玲玲. 邯郸太阳能—废热源溴化锂吸收式热泵系统优化研究 [C]//第 6 届全国建筑环境与设备技术交流大会论文集, 2015: 147 – 151.
- HU Qiuming, WANG Jinggang, BAO Lingling. Optimization study of Handan solar-waste heat source lithium bromide absorption heat pump system [C]//The 6th National Conference on Technical Exchange of Building Environment and Equipment, 2015: 147 – 151.
- [30] ARGIRIOU A, BALARAS C, KONTOYIANNIDIS S, et al. Numerical simulation and performance assessment of a low capacity solar assisted absorption heat pump coupled with a sub-floor system [J]. *Solar Energy*, 2005, 79(3): 290 – 301.
- [31] SALEHI S, YARI M, ROSEN M A. Exergoeconomic comparison of solar-assisted absorption heat pumps, solar heaters and gas boiler systems for district heating in Sarein Town, Iran [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 153: 409 – 425.
- [32] 周 倩. 兰州地区太阳能吸收式空调冷热源系统的数值模拟研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- ZHOU Qian. A numerical analysis and simulation for cold and heat sources in a solar-powered absorption air-conditioning system in Lanzhou [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013.
- [33] SUN F T, ZHAO X Q, HAO B R. Novel solar-driven low temperature district heating and cooling system based on distributed half-effect absorption heat pumps with lithium bromide [J]. *Energy*, 2023, 270: 126884.
- [34] JEONG S, KANG B H, KARNG S W. Dynamic simulation of an absorption heat pump for recovering low grade waste heat [J]. *Applied Thermal Engineering*, 1998, 18(1/2): 1 – 12.
- [35] ATMACA I, YIGIT A. Simulation of solar-powered absorption cooling system [J]. *Renewable Energy*, 2003, 28(8): 1277 – 1293.
- [36] 路 哲. 单效溴化锂吸收式制冷系统的理论分析与模拟计算 [D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- LU Zhe. The theoretical analysis and simulation calculation of the

- single-effect lithium bromide absorption refrigeration system [D]. Nanning: Guangxi University, 2017.
- [37] 凌辰,陈振乾,施明恒. 太阳能驱动第二类吸收式热泵的模拟研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(1): 90-94.
- LING Chen, CHEN Zhenqian, SHI Mingheng. Numerical simulation of an absorption heat pump (Type II) driven by solar energy [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2002, 32(1): 90-94.
- [38] VEGA M D, ALMENDROS-IBANEZ J A, RUIZ G. Performance of a LiBr-H₂O absorption chiller operating with plate heat exchangers [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(18/19): 3393-3407.
- [39] 苗展丽,刘汉臣,王泽鹏. 基于太阳能热源的溴化锂第二类吸收式热泵的设计与仿真[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 675-679.
- MIAO Zhanli, LIU Hanchen, WANG Zepeng. Design and simulation of the LiBr-H₂O absorption heat transformer driven by solar energy [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 36(6): 675-679.
- [40] 杨筱静. 蒸汽型双效溴化锂吸收式热泵机组性能及优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- YANG Xiaojing. Performance and optimization of steam operated double effect water-lithium bromide absorption heat pump [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [41] 李杰,俞刚,马鑫. 导热油型太阳能双效溴化锂吸收式热泵动态性能分析[J]. 建筑节能, 2015, 43(1): 30-33.
- LI Jie, YU Gang, MA Xin. Dynamic performance analysis of solar double effect absorption heat pump driven by oil [J]. Building Energy Efficiency, 2015, 43(1): 30-33.
- [42] 张艺斌. 太阳能双效吸收式地源热泵的性能与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- ZHANG Yibin. Performance and application research on solar powered double effect absorption geothermal heat pump [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [43] 廉永旺,马伟斌,李戡洪. 小型太阳能溴化锂制冷机的一种新型结构[J]. 太阳能学报, 2003, 24(5): 601-604.
- LIAN Yongwang, MA Weibin, LI Jianhong. A new structure of small solar LiBr absorption chiller [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2003, 24(5): 601-604.
- [44] 何梓年,朱宁,刘芳,等. 太阳能吸收式空调及供热系统的设计和性能[J]. 太阳能学报, 2001, 22(1): 6-11.
- HE Zinian, ZHU Ning, LIU Fang, et al. Design and performance of a solar absorption air-conditioning and heating-supply system [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2001, 22(1): 6-11.
- [45] IBARRA B J, DEHESA C U, MONTIEL G M, et al. Feasibility analysis of a hot water solar system coupled to an absorption heat transformer [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 114: 1176-1185.
- [46] BELLOS E, TZIVANIDIS C. Parametric analysis and optimization of a solar driven trigeneration system based on ORC and absorption heat pump [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 161: 493-509.
- [47] KAZAGIC A, MERZIC A, REDZIC E, et al. Optimization of modular district heating solution based on CHP and RES-demonstration case of the municipality of Visoko [J]. Energy, 2019, 181: 56-65.
- [48] 宋思浩,许显馨. 太阳能单/双效溴化锂吸收式制冷机性能模拟与实验分析[J]. 科技展望, 2014(17): 32-33.
- SONG Sihao, XU Haoxin. Performance simulation and experimental analysis of solar single/double-effect lithium bromide absorption chillers [J]. Science and Technology, 2014(17): 32-33.
- [49] 姜秀华. 双模式运行的第一类吸收式热泵的工艺研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2007.
- JIANG Xiuhua. Technological design of the absorption heat pump operated in bimodal modes [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2007.
- [50] 王丽文,李营,龙垚. 天津地区太阳能与空气能互补供暖系统优化[J]. 资源节约与环保, 2019(7): 23-24.
- WANG Liwen, LI Ying, LONG Yao. Optimization of solar and air complementary heating system in Tianjin area [J]. Resources Economization and Environmental Protection, 2019(7): 23-24.
- [51] 何汉峰,季杰,裴刚,等. 基于动态分布参数模型的光伏太阳能热泵系统的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2008, 29(12): 1504-1509.
- HE Hanfeng, JI Jie, PEI Gang, et al. The numerical simulation base on a dynamic and distributed model for a photovoltaic solar assisted heat pump [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2008, 29(12): 1504-1509.
- [52] 徐国英. 太阳能光伏/光热一体化热泵系统及实验研究[D]. 南京: 东南大学, 2012.
- XU Guoying. Theoretical and experimental study of solar photovoltaic/thermal integrated heat pump system [D]. Nanjing: Southeast University, 2012.
- [53] DENG W S, YU J L. Simulation analysis on dynamic performance of a combined solar/air dual source heat pump water heater [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 120(7): 378-387.
- [54] JI J, PEI G, CHOW T. Experimental study of photovoltaic solar assisted heat pump system [J]. Solar Energy, 2008, 82(1): 43-52.
- [55] JI J, HE H, CHOW T. Distributed dynamic modeling and experimental study of PV evaporator in a PV/T solar-assisted heat pump [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(5/6): 1365-1373.

- [56] 王祥达,范 满,徐建伟,等. 复合型光伏光热一体化(PVT)热泵系统热电性能研究[J]. 制冷与空调,2022,36(3):346-351.
- WANG Xiangda,FAN Man,XU Jianwei,et al. Research on thermoelectric performance of photovoltaic/thermal-assisted heat pump system[J]. Refrigeration and Air Conditioning,2022,36(3):346-351.
- [57] 马丽群,赵玉龙,赵运通,等. 通风型光伏/光热建筑一体化系统的实验研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2022,56(11):2168-2174.
- MA Liqun,ZHAO Yulong,ZHAO Yuntong,et al. Experimental study of ventilated building integrated photovoltaic/thermal system[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2022,56(11):2168-2174.
- [58] 刘仙萍,雷豫豪,田 东,等. 夏热冬冷地区太阳能光伏/光热-地源热泵联合供热系统运行性能模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(6):1892-1900.
- LIU Xianping,LEI Yuhao,TIAN Dong,et al. Numerical simulation for performance of solar photovoltaic/thermal-ground source heat pump hybrid heating system in hot summer and cold winter zone[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2021,52(6):1892-1900.
- [59] 陆王琳,陈 培,陆启亮,等. 不同地区太阳能 PVT 热泵系统仿真模拟与运行性能分析[J]. 动力工程学报,2023,43(11):1487-1493.
- LU Wanglin,CHEN Pei,LU Qiliang,et al. Simulation and performance analysis of solar-assisted PVT heat pump system in different areas[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2023,43(11):1487-1493.
- [60] 孔祥强,林 琳,李 瑛,等. R410A 直膨式太阳能热泵热水器性能研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2013,47(9):1666-1671.
- KONG Xiangqiang,LIN Lin,LI Ying,et al. Performance of direct expansion solar assisted heat pump water heater using R410A[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2013,47(9):1666-1671.
- [61] SHIRAZI P,BEHZADI A,AHMADI P,et al. Comparison of control strategies for efficient thermal energy storage to decarbonize residential buildings in cold climates: A focus on solar and biomass sources[J]. Renewable Energy,2024,220:119681.
- [62] 董科枫. 光伏太阳能热泵的结构优化和变容量控制研究[D]. 南京:东南大学,2017.
- DONG Kefeng. Study on structure optimization and variable capacity control of photovoltaic/thermal integrated solar heat pump system[D]. Nanjing:Southeast University,2017.
- [63] 杜伯尧,全贞花,侯隆澍,等. 新型光伏直膨式太阳能/空气能多能互补热泵性能[J]. 化工学报,2020,71(S1):368-374.
- DU Boyao,QUAN Zhenhua,HOU Longshu,et al. Performance of direct-expansion photovoltaic/thermal (PV/T)-air source heat pump system[J]. CIESC Journal,2020,71(S1):368-374.
- [64] 张 政,李舒宏. 光伏太阳能热泵/环形热管复合热水系统性能模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版),2017,48(12):3392-3399.
- ZHANG Zheng,LI Shuhong. Performance simulation of photovoltaic solar assisted heat pump/loop heat pipe hybrid water heater system[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2017,48(12):3392-3399.
- [65] 褚磊驰,赵善国,高远志,等. 光伏直驱 PV/T 双源热泵热水系统性能研究[J]. 太阳能学报,2023,44(5):188-194.
- CHU Leichi,ZHAO Shanguo,GAO Yuanzhi,et al. Experimental study on performance study of photovoltaic direct-driven PV/T dual-source heat pump hot water system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2023,44(5):188-194.
- [66] 褚磊驰. 基于太阳能光伏光热一体化的直驱式双源热泵热水系统性能研究[D]. 南京:东南大学,2022.
- CHU Leichi. Experimental and theoretical study of photovoltaic drive PV/T dual heat pump heating system[D]. Nanjing:Southeast University,2022.
- [67] 曲明璐,王海洋,闫楠楠,等. 太阳能光伏光热-热泵系统能量与焓分析[J]. 暖通空调,2022,52(2):118-123.
- QU Minglu,WANG Haiyang,YAN Nannan,et al. Energy and exergy analysis of solar photovoltaic photothermal-heat pump systems[J]. Heating Ventilating and Air Conditioning,2022,52(2):118-123.
- [68] 张 露,代彦军. 太阳能光伏光热(PVT)热泵热水系统实验研究[J]. 建筑科学,2019,35(2):62-67.
- ZHANG Lu,DAI Yanjun. Experimental study on the indirect photovoltaic/thermal heat pump hot water system[J]. Building Science,2019,35(2):62-67.
- [69] BORDIGNON S,QUAGGIOTTO D,VIVIAN J,et al. A solar-assisted low-temperature district heating and cooling network coupled with a ground-source heat pump[J]. Energy Conversion and Management,2022,267:115838.
- [70] ANVAR A,MEXRIYA K. Autonomous hybrid solar-heat pump for system heat-cooling in buildings[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2021,1030(1):012178.
- [71] SANGMU B,HOBUNG C,YUJIN N. Experimental analysis of an integrated system using photovoltaic-thermal and air source heat pump for real applications[J]. Renewable Energy,2023,217:119128.
- [72] PANARAS G,MATHIOULAKIS E,BELESSIOTIS V. Investigation of the performance of a combined solar hot water system[J]. Solar Energy,2013,93:169-182.