

基于冷媒的太阳能 PVT 热泵技术研究及示范

陈廷敏 张孝德

宁夏中昊银晨能源技术服务有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i1.7645

[摘要] 随着对清洁能源需求的增长以及传统能源带来的环境和供应问题凸显，太阳能等可再生能源的利用备受关注。我国太阳能资源丰富，但存在间歇性等问题。传统供暖方式效率低且污染大。基于冷媒的太阳能 PVT 热泵技术将太阳能光伏光热与热泵结合，解决了 PVT 系统热量供应不稳定及电池背板温度过高问题。其系统设计涵盖原理、构成、技术路线等多方面，技术指标在制热量、能效等方面表现优异，具有高效节能、能源多元、全天候供热等特点，创新点突出，示范应用节能效果显著，对提高能源利用率、促进产业进步意义重大，旨在推动清洁能源广泛应用。

[关键词] 太阳能 PVT 热泵；清洁能源；能源利用率；节能环保；技术创新

Research and Demonstration of Solar PVT Heat Pump Technology Based on Refrigerant

Chen Tingmin Zhang Xiaode

Ningxia Zhonghao Yincheng Energy Technology Service Co.

[Abstract] The use of renewable energy sources such as solar energy has attracted much attention due to the growing need for clean energy and the environmental and supply challenges posed by traditional energy sources. China has abundant solar energy resources, but there are intermittent problems. Traditional heating methods are inefficient and polluting. Solar energy PVT heat pump technology based on refrigerant combines solar energy photovoltaic light and heat pump to solve the problem of unstable heat supply of PVT system and high temperature of battery backplane. Its system design covers principles, composition, technical routes and other aspects. The technical indicators performed excellently in heat production and energy efficiency, with characteristics such as high efficiency energy conservation, energy diversification, and 24 / 7 heating, prominent innovation points, and demonstration applications showing significant energy saving, which is of great significance to improving energy utilization rate and promoting industrial progress, and aims to promote the widespread application of clean energy.

[Key words] solar PVT heat pump; Clean energy; Energy utilization rate; Energy conservation and environmental protection; technological innovation

引言：

在全球能源格局深刻变革的当下，传统化石能源的大量消耗引发了能源短缺与环境污染的双重危机。我国作为能源消费大国，建筑耗能占比颇高，且传统供暖方式弊端尽显，急需高效清洁的替代方案。太阳能虽具潜力，但其间歇性和不稳定性限制了大规模应用。在此背景下，基于冷媒的太阳能 PVT 热泵技术崭露头角。它巧妙融合太阳能光伏光热与热泵技术，有效弥补了各自不足，展现出卓越的能源利用效能和环保特性，有望重塑能源利用模式，开启清洁能源利用的新篇章，其技术原理、创新成果及应用成效值得深入探究。

一、太阳能 PVT 热泵技术的现状与困境

（一）我国能源结构与环境压力

我国能源消费结构长期以来以煤炭等化石能源为主，这在

支撑经济快速发展的同时，也带来了严重的环境问题。据统计，2016 年中国北方建筑取暖消耗大量煤炭，仅农村地区每年因取暖燃烧的散煤就产生巨量的 CO₂、SO₂ 和 NO_x 等污染物，导致雾霾天气频发、酸雨现象增加以及全球温度上升等环境恶化后果。而且，传统化石能源的大量燃烧不仅危害人体健康，还造成了巨大的经济损失，环境污染造成的损失占我国国民生产总值的 3% - 4%。随着我国经济持续发展，能源消耗量不断攀升，预计到 2050 年能源消耗量将达到新高峰，这使得能源短缺和环境污染的矛盾愈发尖锐。同时，我国建筑耗能占社会总能耗比例高，与交通耗能、工业耗能并列成为能源消耗的“大户”，而供暖季的能源消耗更是加重了环境负担，迫切需要向清洁能源转型。

（二）太阳能资源特性与利用局限

太阳能作为可再生能源中的重要组成部分,具有“普遍、无害、量大、长久”的显著特点,我国太阳能资源丰富,全国 2/3 以上地区年太阳辐照量超过 5000MJ/m²,年日照数达 2200h 以上,其分布呈现西高东低的趋势,且在寒冷和严寒区域与建筑热分区有一定重合,具备良好的利用条件。然而,太阳能自身也存在不可忽视的缺陷。其强度受气候、季节和地点影响极大,能源密度相对较低,无法持续稳定供应能量。例如,在太阳辐射强度较弱时,太阳能系统集热量难以满足建筑热需求,需要其他辅助热源。此外,太阳能光伏光热系统中的 PVT 光伏光热系统存在太阳能间歇性问题,导致光热转换难以连续进行,并且集热后太阳能电池背板温度过高,使得电池板光伏发电效率明显下降,这些因素都限制了太阳能的高效利用,急需有效的技术手段来克服。

(三) 传统供暖方式的弊端

我国传统供暖方式在满足冬季取暖需求的同时,暴露出诸多问题。区域锅炉房采暖和煤炉采暖多以煤炭为热源,煤炭燃烧过程中产生的有害气体不仅造成一次污染,排放到空气中后还会引发二次污染,对生态环境和人体健康构成严重威胁,这也促使我国近年来大力推进“煤改电”等政策。电采暖方式虽然相对清洁,但将电能转化为热能的过程中,由于电能属于高品位能源,用于小区域供热造成了能源的不合理分配和浪费。而且传统供暖方式普遍存在产热效率低下的情况,在能源开采和使用过程中均存在大量优质能源的浪费现象,降低了能源的整体利用效率,无法适应现代社会对高效、清洁供暖的需求。

(四) 太阳能 PVT 热泵技术面临的挑战

在节能减排的大趋势下,太阳能光伏光热技术和空气源热泵技术虽具有诸多优势,但太阳能 PVT 热泵技术仍面临一些挑战。目前,大面积使用 PV/T 集热器时,初投资成本较高,回收周期较长,系统效率受室外环境和气候条件影响较大,限制了其大规模推广应用^[1]。PV/T - 空气源热泵集成供热系统中,虽然一定程度上提升了机组性能,但集成系统采用的 PV/T 集热面积往往较小,导致系统能量利用受限,无法充分发挥 PV/T 技术的潜力。此外,现有技术在提升太阳能综合能源利用率、增强系统稳定性和适应性等方面仍有待进一步突破,以更好地满足实际应用中的多样化需求,实现高效、稳定、低成本的能源供应。

二、基于冷媒的太阳能 PVT 热泵技术创新策略

(一) 优化系统原理提升能源转换效率

为克服太阳能间歇性和不稳定性以及提高能源利用率,该技术对系统原理进行了深度优化。在太阳能光伏光热技术方面,通过特殊的层压或胶粘技术将光伏电池与太阳能集热器紧密结合,使得约 85% 的长波辐射能量能高效转换为热能被集热板吸收,集热板表面温度可升高到 40 - 85℃,同时约 15% 的短波辐射能量转化为电能输出。并且,研究发现光伏电池表面温度升高 1℃发电效率降低约 0.5%,于是采用定温加热和温差循环技术,有效降低太阳能电池背板温度,提高光伏发电

效率。例如,组件太阳能综合利用率可达 80% 以上,相对发电效率提升达 10% 以上,工作温度降幅超 20℃。在 PV/T - 空气源热泵集成供热系统原理上,采用 PV/T 空气集热器阵列铺设在建筑外墙构成幕墙形式,上下两端设风口与风管连接空气源热泵机组进出口,实现空气强制循环。利用空气作为热媒吸收 PV/T 幕墙空腔余热,这种方式避免了空气源热泵冬天在低温环境运行时蒸发器结霜导致的换热效果恶化问题,因为 PV/T 空气集热器在能量转移时几乎无过热、冻结、沸腾、腐蚀及泄漏问题,其维护费用低于液体集热器,从而提升了系统整体性能。

(二) 创新系统设计实现灵活高效运行

基于冷媒的太阳能 PVT 热泵系统设计思路独具匠心。考虑到太阳能光照资源的间歇性,将太阳能与空气能相结合作为热泵低温热源,使两者优势互补。PVT 系统集太阳能电池和集热器于一体,利用光生伏特效应实现光能到电能的转化,再经逆变器转换为工频交流电供用户使用,同时收集光电转换过程中的热能加热水,达成热电联供。在系统构成上,各组件协同工作,如光伏组件发电、集热器收集热量等。系统工作原理围绕 PV/T 集热器与热泵系统联合运行展开,通过多能联动功能原理图实现能量的有效转化和传输,空气源热泵作为供暖补充热源,确保系统在不同工况下稳定运行。在技术路线方面,从调研开始,依次进行功能设计、系统结构设计、关键部件设计,然后开展系统比对、优化和开发控制,接着进行产品测试,最后进行示范应用,形成完整的研发链条。例如,在确定主要设计参数时,针对不同规格型号如 YCHR - PVEIT3.0A 和 YCHR - PVEIT5.0A 等产品,精准确定制热量、制热输入功率、电压、制冷量、进出水管径、出水温度、太阳能光伏电池功率等一系列参数,确保系统在不同需求下的高效运行。

(三) 突破技术瓶颈增强系统性能优势

针对传统太阳能 PVT 热泵技术的局限,该技术在多个方面实现了创新突破。在耦合循环构建上,将 PVT 组件与蒸汽压缩式热泵系统结合,PVT 组件作为热泵循环的蒸发器,吸收光伏组件光电转化产生的废热并从空气中吸热。这一耦合方式利用潜热工质降低光伏组件工作温度,改善温度均匀性,提高发电效率;热泵系统对废热升温提质,输出高品位热能满足供暖需求;采用直膨式组件与光伏组件耦合,相比空气源热泵的管翅式蒸发器,低温适应性更强且效能更高。在低温适应性提升方面,把 PVT 组件与补气增焓热泵循环耦合,通过引入中间补气环节,降低排气温度、增加排气量,从而提升系统制热量与能效,有效解决了传统空气源热泵在低温环境下能效下降和蒸发器结霜堵塞失效的问题。在系统集成优化与仿真平台开发上,开展太阳能 PVT 热泵系统集成优化研究,基于低温型太阳能 PVT 热泵循环机理分析、宁夏地区典型用能模式定义、供能 - 用能匹配运行控制策略设计与优化,开发动态仿真平台。该平台建立各元件参数化模型并耦合,实现高速、稳定、高精度仿真运算,通过典型用能模式定义获取用户侧需求波动特性作为参数输入,结合供能 - 用能匹配原则设计优化运行

控制策略，形成运行控制模块，为系统性能提升提供有力支持。

（四）细化产品设计打造多元功能特性

产品设计上的创新为基于冷媒的太阳能 PVT 热泵系统赋予了诸多独特功能。在高效节能方面，系统能效比普通空气源热泵提高 2 倍，COP 值大于 3.0，可在环境温度 -30°C 以上正常工作，年平均比电锅炉节能 80% 以上，比空气源热泵年平均节能 30% - 50% 以上。能量来源多元化体现在可同时利用空气能和太阳能，充分发挥两者优势。全天候高效供热功能使其在阴雨天及晚上也能正常使用，这得益于其特殊的工作原理和组件设计^[2]。系统采用极低温度点相变环保冷媒，冰点温度 -78°C ，循环管道使用 -30°C 防冻液做换热介质，彻底解决了冬季防冻问题。操作上，触屏控信息显示直观，操作简便。同时，搭载宁夏清洁能源物联网智慧管理平台，实现对设备的远程监控、运行分析、优化调配、故障预警和远程运维，极大地方便了用户使用。此外，系统对安装空间要求较低，可灵活安装于屋面或阳光无遮挡院落，适应不同安装环境。在性能参数方面，不同规格型号如 YCHR - PVT3.0A、YCHR - PVT5.0A 和 YCHR - PVT8.0A 等产品在制热量、制热输入功率、电压、制冷量、适用面积等参数上各有差异，以满足不同用户需求，确保系统在各种场景下的高效稳定运行。

三、技术应用案例与成效评估

（一）平罗县宝丰镇兴胜村零碳住宅项目概况

平罗县宝丰镇兴胜村零碳住宅研究作为典型应用案例，占地 37085.36m^2 ，其中 B 区零碳住宅总建筑面积 2695.36m^2 ，总占地面积 8910m^2 ，共建设 33 户零碳住宅。住宅户型有 60m^2 、 90m^2 、 120m^2 三种，满足不同家庭需求。该项目采用多种先进技术，屋面采用光热光伏一体化屋面板（PVT 板），保温层为 210mm 石墨烯复合保温板，主体结构为 120mm 现浇钢筋混凝土板，其综合传热系数为 $0.15\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ，符合《近零能

耗建筑技术标准》。近零能耗建筑单位面积耗热量指标为 $14.85\text{W}/\text{m}^2$ ，对比建筑（1980 年）单位面积耗热量指标为 $161.18\text{W}/\text{m}^2$ 。每户安装 6KW 光伏发电系统，建筑光伏板发电量远大于建筑耗电量，如 6KW 光伏发电系统全年发电量为 $8100\text{KWh}/\text{a}$ ，而兴胜村近零能耗建筑采暖期按 150 天计算，采用普通电采暖 108.56m^2 建筑一个采暖期耗电量为 $5804\text{KWh}/\text{a}$ ，采用空气源热泵采暖耗电量为 $2072\text{KWh}/\text{a}$ ，建筑电气照明耗电量按配置标准计算为 $1600\text{KWh}/\text{a}$ ，全年耗电量为 $3672\text{KWh}/\text{a}$ 。

（二）太阳能 PV/T 热泵一体化系统运行效果

该项目采用太阳能 PV/T（光伏 / 光热）热泵一体化系统，实现了多种功能。系统光伏组件产生电能用于建筑内照明、设备等用电需求，光热组件产生热能加热生活热水，热泵满足建筑供暖需求，达成绿电自用、余电上网。在采暖期，附加阳光间得热量计算显示，其热效率取 30%，采暖期内投射在阳光间走廊垂直南向面总日射辐照量不同月份有所差异，11 月为 $16.92\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ，12 月为 $16.32\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ，1 月为 $16.48\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ，2 月为 $16.37\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ，3 月为 $13.16\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ，平均值为 $15.85\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 。 120 平米建筑阳光间集热面积 27.6m^2 ，占总建筑面积 22.6%，由此计算出附加阳光间采暖期单位建筑面积净太阳辐射得热量为 $1.07\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，采暖期单位建筑面积净太阳辐射得热量指标为 $12.43\text{W}/\text{m}^2$ ，使近零能耗建筑采暖耗热量指标从 $27.41\text{W}/\text{m}^2$ 降为 $14.85\text{W}/\text{m}^2$ 。

（三）节能效果综合对比分析

通过与 1980 年对比建筑相比，兴胜村近零能耗建筑在节能方面成效显著。建筑本体节能率为 90.78%，加上光伏发电系统并利用空气源热泵系统采暖后，综合节能率达到 108.92%，每年可产生多余电量 5727kWh ^[3]。以下为建筑节能计算分析详细数据对比（表 1）：

表 1 对比分析

对比项目	对比建筑（1980 年）	兴胜村近零能耗建筑
围护结构传热系数（平均值）（ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ）	2.03（外墙）、6.4（外窗）等	0.15（外墙）、1.2（外窗）等
基本耗热量（W）（以某典型外墙为例）	1749.66（东外墙）	129.29（东外墙）
单位面积耗热量指标（ W/m^2 ）	161.18	14.85
采暖期总用电量（ kWh/a ）	62992.34	2073
光伏发电量（ kWh/a ）	0	8100

结语：

基于冷媒的太阳能 PVT 热泵技术通过创新设计与优化，有效解决了传统能源利用及太阳能应用的诸多问题。在原理、系统构成、技术指标等方面的改进，使其具备高效节能、稳定供热等优势，产品功能丰富且性能卓越。平罗县宝丰镇兴胜村零碳住宅案例充分展示其实际应用成效，显著降低建筑能耗，提升能源利用率。该技术为清洁能源发展提供了有力支撑，有望在更多领域推广应用，助力能源结构优化与可持续发展目标的实现。

【参考文献】

[1]纪培栋，彭浩，周楠栩，等.直膨式太阳能 PVT 热泵热

水系统经济性及其影响因素研究[J].建筑科学，2024，40（08）：122-127.

[2]陈尔健，贾腾，姚剑，等.太阳能空调与热泵技术进展及应用[J].华电技术，2021，43（11）：40-48.

[3]陈海儿，赵得宝，韦国玲.太阳能光热耦合空气源热泵技术应用研究及可行性投资分析——以广西区居建项目为例[C]//中国城市科学研究会，苏州市人民政府，中美绿色基金，中国城市科学研究会绿色建筑与节能专业委员会，中国城市科学研究会生态城市研究专业委员会.2020 国际绿色建筑与建筑节能大会论文集.[出版者不详]，2020：5.