

应用于农村住宅的全太阳能供暖系统研究

刘小瑞, 李磊, 文欣然, 佟振*, 郑进福

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525)

摘要:为实现农村住宅建筑的全太阳能供暖,设计了光热供暖和光伏光热一体化(PV/T)光电供暖 2 种全太阳能供暖系统。以拉萨为典型地区,使用 TRNSYS 软件模拟分析了 2 种系统的运行性能和经济性,并进行了对比分析。研究发现,经过合理的设计,2 种系统均可以满足室内供暖需求,相比之下,光热供暖系统的室内温度波动较大,而 PV/T 光电供暖系统可以实现稳定的室内温度。此外,光热供暖系统所需的集热器面积和水箱体积均明显大于 PV/T 光电供暖系统。与常规供暖系统相比,光热系统和 PV/T 光电系统的投资回收期分别为 5.87 年和 2.3 年。因此,PV/T 光电供暖系统在农村单体式住宅建筑中更具有应用前景。

关键词:太阳能供暖;农村住宅;运行性能;经济性;TRNSYS 模拟

中图分类号:TU832.17 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2024)06-0136-09

Research on the full-solar heating system applied to rural residence

LIU Xiaorui, LI Lei, WEN Xinran, TONG Zhen*, ZHENG Jinfu

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: In order to realize full-solar heating of rural residential buildings, this study designed two types of full-solar heating systems, that are photothermal heating systems and photovoltaic / thermal(PV/T)photoelectric heating systems. Taking Lhasa as a typical area, this study simulated the operation performance and economy effect of the two systems by using TRNSYS software and made a comparative analysis. The results showed that the two systems could both satisfy the needs of indoor heating through reasonable design. The PV/T photoelectric heating system can achieve stable indoor temperature, while in contrast the indoor temperature of the photothermal heating system fluctuated greatly. Furthermore, the collector area and water tank volume required by the photothermal heating system are significantly larger than that of the PV/T photoelectric heating system. Compared with conventional heating systems, the payback periods of the photothermal heating system and the PV/T photoelectric heating system are 5.87 years and 2.3 years respectively. Therefore, PV/T photoelectric heating system has more application prospects in the single residential buildings in rural areas.

Key words: solar heating; rural residential buildings; operation performance; economy; TRNSYS simulation

收稿日期:2023-10-31

基金项目:山东省自然科学基金青年项目(ZR2022QE178)

作者简介:刘小瑞(2000—),男,山东德州人。硕士,研究方向为太阳能利用技术、人工环境。E-mail:lxr2672003558@163.com。

*通信作者:佟振(1987—),女,满族,山东青岛人。博士,副教授,主要从事数据中心空调节能技术、分离式热管冷却技术、太阳能利用技术等方面的研究。E-mail:tong-tong@foxmail.com。

我国农村地区因为位置偏僻、居住分散、能源资源分布不均等问题,无法实行集中供暖^[1],太阳能供暖作为一种清洁供暖方式在农村地区具有广阔的应用前景。

太阳能供暖系统主要分为光热直接供暖和光电间接供暖。光热直接供暖系统是利用太阳能集热器将太阳能转化为热能直接用于供暖,光热转化效率一般可以达到 33%~67%^[2-3]。而光电间接供暖系统是利用光伏电池将太阳能转化为电能,再通过电能驱动供暖设备进行供暖,光伏电池的光电转化效率一般为 10%~13.3%^[4-5]。光伏光热一体化(PV/T)系统通过冷却介质对光伏电池降温,可使光电转化效率提高至 17%~22%,同时伴随着 23.85%~47%的光热转化^[6-7]。目前关于光热直接供暖系统的研究较多,陈戈等^[8]对太阳能热水供暖系统进行了测试,使用辐射板作为供暖末端,得到日平均地板温度为 19.2℃,峰值温度为 25.5℃,在夜间室内空气温度仍能保持在 13℃以上。HASSAN 等^[9]将太阳能集热器集成到屋顶,开发了有限元模型预测其热性能,当集热器面积为 150 m²、建筑面积为 1357 m² 时,从 11 月到次年 2 月,在美国弗吉尼亚州每月收集的热量分别能够满足 88%、51%、31%和 88%的供暖需求。另外,也有一些学者研究了光电间接供暖系统。WANG 等^[10]在中南地区住宅中应用了光伏集成空气源热泵系统,系统的预期寿命为 26 年,节能率达到 35.2%。LI 等^[11]研究了上海地区光伏集成空气源热泵的性能,结果表明,系统在白天的采暖中能提供 77.7%的热泵耗电量。

目前的研究中,太阳能只解决了建筑的部分供暖负荷,并不是以全太阳能供暖为目标,此外,现有研究也并未涉及光热供暖和 PV/T 光电供暖 2 种系统的应用对比。基于此,考虑到太阳能资源以及农村住宅的供暖现状,本文以太阳光资源丰富的拉萨作为典型地区,建立了光热供暖和 PV/T 光电供暖 2 种全太阳能供暖系统,并使用 TRNSYS 软件模拟分析了其在农村住宅中的应用情况,为农村住宅全太阳能供暖的实现提供了解决思路。

1 研究方法

1.1 全太阳能系统设计

1.1.1 光热供暖系统

图 1 为光热供暖系统的原理。系统采用水作为热媒,双水箱设计,集热水箱用于储存高温热水,实现水箱蓄热,供暖水箱通过混水使地暖入口水温满足要求。

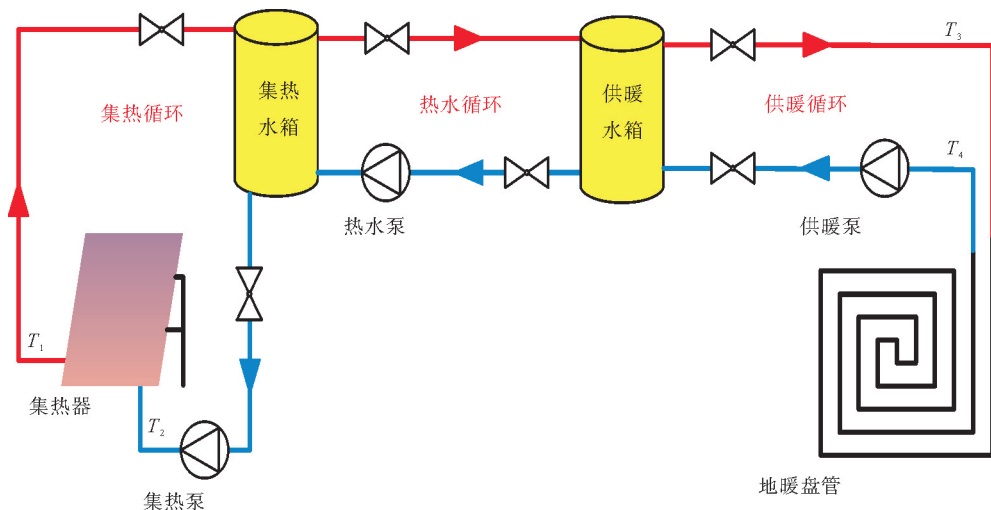


图 1 光热供暖系统

T_1 —集热器出口水温; T_2 —集热器进口水温; T_3 —地暖盘管进口水温; T_4 —地暖盘管出口水温

集热循环采用温差控制,当 $T_1 - T_2 > 8^\circ\text{C}$ 时,开启集热泵;当 $T_1 - T_2 < 2^\circ\text{C}$ 或 $T_1 > 100^\circ\text{C}$ 时,关闭集热泵;当 $2^\circ\text{C} \leq T_1 - T_2 \leq 8^\circ\text{C}$ 时,不触发启停控制,集热泵延续前一阶段状态,使系统尽可能在低泵耗下获得更多的太阳能热量。热水循环采用水温控制,当 $T_3 < 45^\circ\text{C}$ 时,开启热水泵;当 $T_3 > 50^\circ\text{C}$ 时,关闭

a_0, a_1, a_2 为系数。

2) PV/T 组件。PV/T 组件光伏电池的能量平衡方程:

$$S - h_{\text{outer}}(T_{\text{PV}} - T_{\text{a}}) - h_{\text{rad}}(T_{\text{PV}} - T_{\text{sky}}) - \frac{(T_{\text{PV}} - T_{\text{abs}})}{R_{\text{T}}} = 0 \quad (2)$$

式中: S 为净吸收太阳能, W/m^2 ; h_{outer} 为光伏电池与空气的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; T_{PV} 为光伏电池的温度, $^\circ\text{C}$; T_{a} 为空气温度, $^\circ\text{C}$; h_{rad} 为光伏电池与天空的辐射换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; T_{sky} 为天空辐射温度, $^\circ\text{C}$; T_{abs} 为吸热板的温度, $^\circ\text{C}$; R_{T} 为光伏电池和吸热板间的传热热阻, $(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$ 。

PV/T 组件的光电效率计算:

$$\eta_{\text{PV}} = \eta_{\text{n}} X_{\text{CellTemp}} X_{\text{Radiation}} \quad (3)$$

式中: η_{PV} 为光电效率, %; η_{n} 为参考条件下的光电效率; X_{CellTemp} 为影响光电效率的温度系数; $X_{\text{Radiation}}$ 为影响光电效率的辐射系数。

PV/T 组件的产电功率计算:

$$P = (\tau\alpha)_{\text{n}} \epsilon G_{\text{T}} A \eta_{\text{PV}} \quad (4)$$

式中: P 为光伏功率, W ; $(\tau\alpha)_{\text{n}}$ 为直射时透射率与吸收率的乘积, %; ϵ 为入射角修正系数, 无量纲; G_{T} 为单位面积的太阳辐射, W/m^2 ; A 为集热器面积, m^2 。

PV/T 的集热量计算:

$$Q_{\text{u}} = m C_{\text{p}} (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (5)$$

式中: Q_{u} 为集热量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; m 为循环水质量, kg ; C_{p} 为水的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; T_{out} 为循环水的出口温度, $^\circ\text{C}$; T_{in} 为循环水的进口温度, $^\circ\text{C}$ 。

3) 空气源热泵。空气源热泵的性能系数 COP 与室外温度有关, 计算如下^[12]:

$$\text{COP} = \text{COP}_{\text{n}} \frac{1.01 \times e^{0.023 T_{\text{a}}}}{0.011 \times (T_{\text{a}} + 0.922)} \quad (6)$$

式中: COP_{n} 为机组名义工况的性能系数, 取 3; e 为自然常数, 约为 2.72; T_{a} 为室外空气温度, $^\circ\text{C}$ 。

4) 水泵。水泵选取的定速泵是 TYPE114, 由于水泵电机产生热量, 泵的出口水温计算:

$$T_{\text{out}} = T_{\text{in}} + \frac{Q_{\text{f}}}{m_{\text{f}} C_{\text{p}}} \quad (7)$$

式中: T_{out} 为出口水温, $^\circ\text{C}$; T_{in} 为入口水温, $^\circ\text{C}$; Q_{f} 为水泵电机总产热量; m_{f} 为水的质量流量, kg/h 。

5) 集热水箱。集热水箱采用 TRNSYS 软件中的 TYPE158 模块进行模拟, TYPE158 模拟的是 1 个充满液体的圆柱形水箱, 有 2 个进口、2 个出口, 没有内置换热器, 进入水箱中的 2 股水流直接混合并进行热交换。图 3 为水箱的模型示意, 集热循环的水上进下出, 热水循环的水下进上出。

1.3 典型地区

本文选取拉萨作为典型城市进行 TRNSYS 仿真模拟。拉萨属于寒冷地区, 供暖能耗大, 但全年多晴朗天气, 太阳能资源丰富。拉萨地区供暖季的室外气象条件来自 Meteonorm 的天气文件, 拉萨地区供暖季的室外气温波动较大, 在供暖季中期, 温度相对较低, 最低温度能达到 $-14\text{ }^\circ\text{C}$, 这时的热负荷也相对较大。供暖季的太阳辐射表现出间歇性和不稳定性特点, 基本在每天 9:00 开始接受太阳辐射, 在 17:00 时太阳辐射值趋于 0。整个供暖季, 太阳能集热器倾斜表面的总辐射量为 $3341.52\text{ MJ}/\text{m}^2$, 日平均辐射量为 $25.5\text{ MJ}/\text{m}^2$ 。

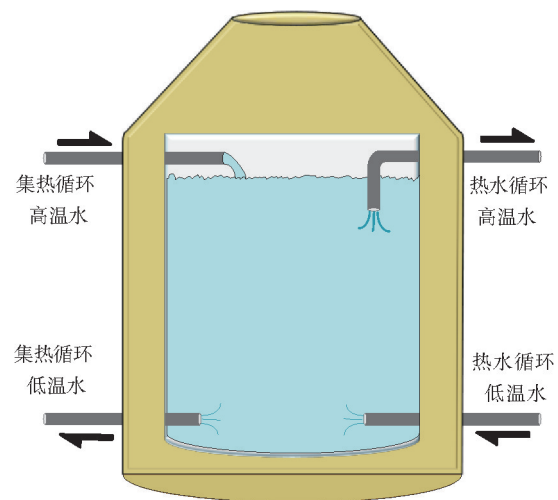


图 3 集热水箱结构示意图

1.4 典型建筑及负荷

建立了1个总供暖面积为60 m²的建筑模型,建筑围护结构的传热系数根据《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 26—2018)^[13]选择。使用DeST软件对该建筑供暖季热负荷进行模拟,结果显示,拉萨地区室外计算温度为-5.2℃,供暖季时间为3144 h,峰值热负荷为2938 W,平均热负荷为1511 W,室内总耗热量为4750 kW·h,单位面积热指标为49 W/m²。

1.5 典型参数选取

进行TRNSYS模拟前,需要选取典型参数范围,如:2种系统的集热器面积和水箱体积,之后根据具体的范围,结合典型地区的相关参数进行模拟分析。

对于集热器面积,先通过相关规范中的经验公式进行估算^[14],在此基础上进一步选择不同集热器面积进行优化分析^[15],最终确定出合理的集热器面积。

光热系统:

$$A_1 = \frac{86400Q_1 f}{J_T \eta_{cd}(1-\eta_L)} \quad (8)$$

式中: A_1 为集热器面积,m²; Q_1 为太阳能集热器设计负荷,W; f 为太阳能保证率,取值为80%; J_T 为当地供暖季的集热器表面太阳辐射照量,J/(m²·d); η_{cd} 为当地供暖季的集热器平均集热效率,取值为40%~60%; η_L 为蓄热水箱热损失率,取值为30%。

光电系统:

$$A_2 = \frac{Q_2}{P \cdot t \cdot COP} \quad (9)$$

式中: A_2 为PV/T面积,m²; Q_2 为单日室内供热量,kW·h; P 为单位面积PV/T的平均电功率,kW/m²,取0.12~0.20 kW/m²; t 为产电运行时间,h,取值为8 h; COP为热泵制热量与耗电量之比,取值为3。

根据式(8)、式(9)分别得到光热系统和光电系统的面积范围后,再通过TRNSYS进行一步模拟分析。

水箱体积的计算同理。

2 光热供暖系统

2.1 运行性能

模拟结果显示,在供暖季前期和中期,由于太阳能资源较充足,集热水箱的平均水温较高。地暖入口水温可保持在45~50℃。在供暖季后期,太阳能资源变差,特别是出现连续多天太阳辐射强度较低的情况,使得地暖入口水温出现了较为明显的降低。图4为室内温度的变化曲线,在整个供暖季,室内温度维持在15~20℃,满足农村住宅室内人员的热舒适要求^[16]。

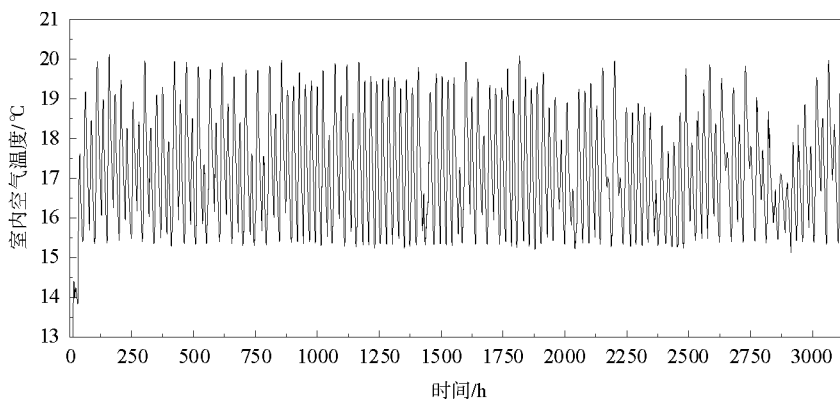


图4 室内温度变化

太阳能集热器的平均热效率为48.3%,系统的太阳能总集热量为10 230 kW·h,建筑得热量占太阳能总集热量的59.6%。系统中只有水泵产生电耗,总耗电量为421 kW·h。可见,太阳能光热供暖系统

表现出了较好的运行性能。

2.2 经济性分析

以常规燃气锅炉供暖系统作为参照,计算了太阳能供暖系统的投资回收期,以此作为经济性的评价指标,该值越小,说明经济性好^[17]。太阳能系统的初投资包括设备采购费 19 220 元和设备安装费 2 883 元,总计 22 103 元。设备安装费按照设备采购费的 15% 计算^[18]。系统的运行费用包括电费和运行维护费,分别为 206 元/年和 769 元/年。系统投资回收期 N 计算:

$$N = \frac{I_{PT} - I}{R - R_{PT}} \quad (10)$$

式中: I_{PT} 和 I 分别为光热供暖系统和燃气锅炉供暖系统的初投资,元,取 $I_{PT}=22\ 103$ 、 $I=12\ 771$; R_{PT} 和 R 分别为光热供暖系统和燃气锅炉供暖系统的年运行费用,元,取 $R_{PT}=975$ 、 $R=2565$ 。

计算得到光热供暖系统投资回收期为 5.87 年,与常规供暖系统相比,实现了供暖能耗的大幅降低,有较好的经济性。

3 PV/T 光电供暖系统

3.1 运行性能

由于 PV/T 光电供暖系统是采用光伏发电驱动空气源热泵进行供暖,在供暖负荷计算时,将室内温度设定为 18 °C,由于热泵可以实现供热量的灵活调节,因此,当按照所计算的负荷提供热量时,认为室内温度可保持在 18 °C。整个供暖季系统输出的平均电功率为 1031 W,平均热功率为 1728 W。如图 5 所示,在供暖季的前期和中期,产能较为稳定,供暖季的后期,由于太阳辐射不稳定造成了产能多次下降。

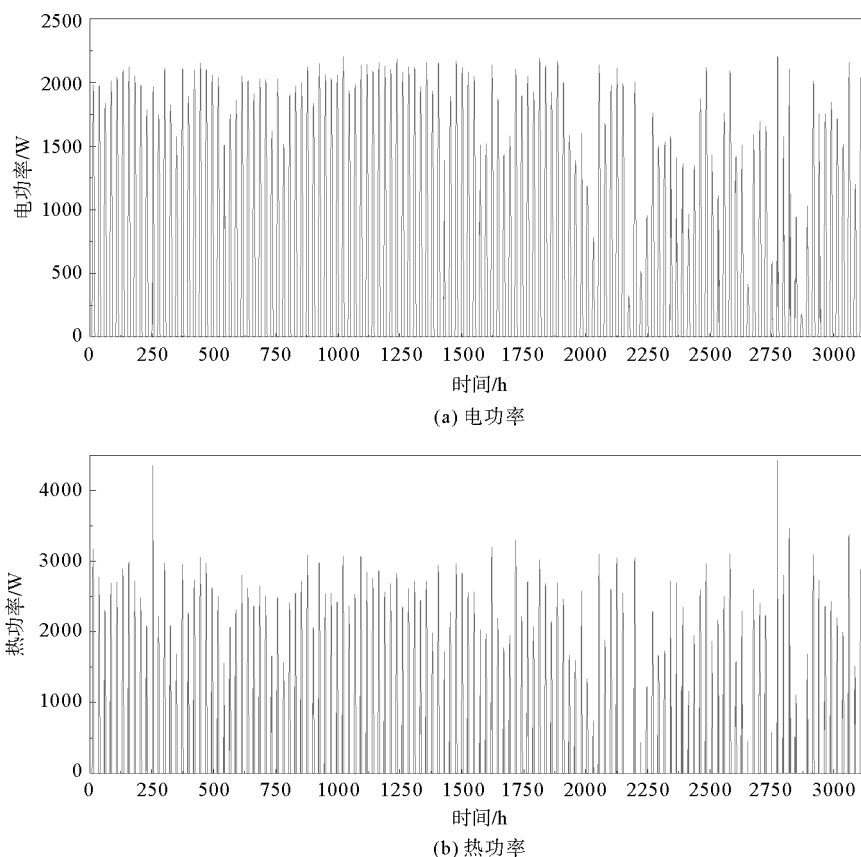


图 5 PV/T 光电供暖系统产能逐时变化曲线

系统中的主要耗能设备为水泵和热泵机组。水泵主要用于驱动热水系统的水循环,采取启停控制,功率为 200 W,总耗电量为 154 kW·h。图 6 给出了热泵系统耗电功率的逐时变化曲线,供暖季中期的热泵

耗电功率最大,最大功率约为 1012 W,整个供暖季热泵的平均 COP 为 3.37。热泵的总耗电量为 1214 kW·h,占系统总电耗的 88.7%。

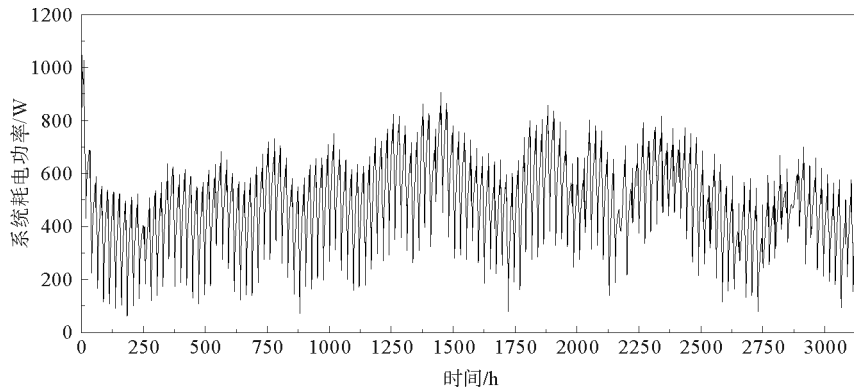


图6 热泵系统耗电功率逐时变化曲线

PV/T 组件的平均光电效率为 19.6%,平均光热效率为 19.7%。供暖季总产电量为 1429 kW·h,总集热量为 1334 kW·h。除了承担建筑供暖电耗,系统净产电量为 61 kW·h,即系统可实现零能耗供暖,甚至存在部分结余的电能。在整个供暖季,生活水箱出口温度高于 40℃的时间占整个供暖季的 61%。

3.2 经济性分析

采用与 2.2 部分相同的方法计算 PV/T 供暖系统的投资回收期。PV/T 光电供暖系统不仅实现零能耗供暖,还有净产能输出,年运行费用为 170 元,初投资为 19 999 元;常规供暖系统的初投资为 12 771 元,年运行费用为 2 565 元。计算得到 PV/T 光电供暖系统的投资回收期为 3.0 年,但实际上,该系统在非供暖季仍能持续输出电能,如果同时考虑系统在非供暖季的产电量,计算得到的投资回收期可以进一步缩短为 2.3 年。

4 对比分析

光热供暖系统和 PV/T 光电供暖系统在室内温度控制、系统规模、经济性等方面均存在差异,2 种系统的对比如表 3 所示。

1) 2 种系统通过合理的设计均能达到全太阳能供暖的目标,相比之下,光热供暖系统在整个供暖季的室内温度波动较大,而 PV/T 光电供暖系统由于采用空气源热泵供暖,室内温度可以保持稳定,调节更加灵活方便。

2) 在满足供暖要求的情况下,光热供暖系统所需的集热器面积和水箱体积均较大,使得其系统占地面积更大、安装难度更高;而 PV/T 光电供暖系统所需的 PV/T 面积较小,系统可直接连接电网,解决了蓄能的问题,系统的占地面积大大减少,可行性更高。

3) 光热供暖系统利用太阳能集热,而 PV/T 光电供暖系统则直接获得高品质的电能,利用电能驱动性能系数较高的热泵实现供暖,结合能量品位来看,在相同的太阳照射面积下,PV/T 光电供暖系统的能源利用率要明显高于光热供暖系统。此外,在 PV/T 光电供暖系统的能量输送和储存过程中,能量损失较少,而光热供暖系统受环境的影响,能量损失较大,容易出现供需不匹配的问题。

4) 在非供暖季,光热供暖系统只能提供生活热水,且供给量远大于生活热水需求量,易造成能量的浪

表3 光热供暖系统和 PV/T 光电供暖系统的参数对比

性能指标	光热供暖系统	PV/T 光电供暖系统
供暖温度/℃	15~20	18
平均热效率/%	48.3	19.6
平均电效率/%	—	19.7
耗电量/(kW·h)	421	-61
投资回收期/a	5.87	2.30
屋顶设备面积/m ²	25	9
水箱总体积/m ³	3.0	0.5

费。而 PV/T 光电供暖系统在非供暖季也能得到很好的利用,一方面可以提供生活热水,另一方面产生的电能还可以满足住宅建筑的日常用电,经济效益可观。

综上所述,PV/T 光电供暖系统的性能更好、应用更方便,比光热供暖系统具有更好的应用前景。在太阳能资源丰富的地区,PV/T 光电供暖系统能够获得很好的节能效果,在有限的 PV/T 敷设面积下,不仅能够满足建筑自身用能,还有望实现产能输出,即使在太阳能资源差的地区,光热供暖系统难以实现,PV/T 光电供暖系统依然具有可行性。

5 讨论

本文的模拟结果存在一定的局限性,文中采用水作为供暖系统的热媒,而在实际应用中,对于冬季水管存在结冻风险的地区,热媒中往往需要添加防冻液。在室外温度不低於 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,常用 $40\%\sim 50\%$ 的乙二醇溶液。乙二醇溶液与水的物理性质参数存在一定差异,在热媒的工作温度范围内,乙二醇溶液的比热容大约是水的 $80\%\sim 85\%$,乙二醇溶液的导热系数比水小,密度与水接近,黏度大于水。结合两者物理性质参数的差别可知,若系统中采用乙二醇溶液作为热媒,实现相同供暖效果的情况下,需要适当增加换热设备的换热面积,水泵的电耗也会有所增加,因此,系统的初投资和运行费用会略有增大。然而,由于 PV/T 系统中的热媒只用于制备生活热水,热媒物理性质参数对系统性能的影响较小,因此,当采用乙二醇溶液时,PV/T 系统的优势将更加显著。若使用防冻液,虽然可以进一步提高系统低温条件下的稳定性,但是考虑到系统中水和防冻液不能混掺,本研究中直接混合换热的水箱将不能满足需求,需要内置换热结构。

6 结论

本文针对农村住宅建筑设计了光热供暖和 PV/T 光电供暖 2 种全太阳能供暖系统,模拟研究了 2 种系统在拉萨地区的应用效果,主要结论如下:

1) 在拉萨地区应用光热供暖系统,对于供暖面积为 60 m^2 的农村住宅,设计 25 m^2 的集热面积和 3 m^3 的总水箱体积,能够实现全太阳能供暖,将室温维持在 $15\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2) 在拉萨地区应用 PV/T 光电供暖系统,同样的供暖面积仅需要 9 m^2 的 PV/T 面积即可实现全太阳能供暖,使系统的产电量大于供暖所需耗电量,通过空气源热泵的灵活控制,可维持室温稳定在 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3) 2 种系统均具有较好的节能效果,相比之下,光热供暖系统投资回收期为 5.87 年,PV/T 光电供暖系统在考虑了非供暖季产电收益时,系统的投资回收期为 2.3 年,且额外输出生活热水,其优势更加显著。

参考文献(References):

- [1] 刘亚非,张有,焦铭泽,等. 北方农村地区供暖现状与对策[J]. 煤气与热力,2019,39(1):29-32.
LIU Yafei,ZHANG You,JIAO Mingze,et al. Current status and countermeasures of heating in rural areas of Northern China[J]. Gas & Heat,2019,39(1):29-32.
- [2] LENZ A M,DE SOUZA S N M,NOGUEIRA C E C,et al. Analysis of absorbed energy and efficiency of a solar flat plate collector[J]. Acta Scientiarum Technology,2017,39(3):279-284.
- [3] Al-MANEA A,Al-RBAIHAT R,KADHIM H T,et al. Experimental and numerical study to develop TRANSYS model for an active flat plate solar collector with an internally serpentine tube receiver[J]. International Journal of Thermofluids,2022,15:100189.
- [4] YURCHENKO A,SYRIAMKIN V,OKHORZINA A,et al. PV effectiveness under natural conditions[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol:IOP Publishing,2015,81(1):012097.
- [5] HACHEM F,ABDULHAY B,RAMADAN M,et al. Improving the performance of photovoltaic cells using pure and combined phase change materials;Experiments and transient energy balance[J]. Renewable Energy,2017,107:567-575.
- [6] LIU Y,YANG H X,LV J,et al. Numerical simulation and experimental study on heat pipe PV/T system[J]. Advanced Materials Research,2014,997:758-761.
- [7] CHEN H F,YANG J,JI J,et al. Experimental study on a high concentration photovoltaic/thermal system with plane mirrors array[J]. Thermal Science,2018,22:264.

- [8] 陈戈,王如竹,代彦军,等. 太阳能地板辐射采暖系统的实验与数值模拟分析[J]. 能源技术,2005(2):77-80.
CHEN Ge,WANG Ruzhu,DAI Yanjun,et al. Experiment and numerical simulation of solar radiant floor heating systems[J]. Energy Technology,2005(2):77-80.
- [9] HASSAN M M,BELIVEAU Y. Design construction and performance prediction of integrated solar roof collectors using finite element analysis[J]. Construction & Building Materials,2007,21:1069-1078.
- [10] WANG C G,GONG G C,SU H,et al. Efficacy of integrated photovoltaics-air source heat pump systems for application in Central-South China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2015,49:1190-1197.
- [11] LI Y,ZHANG G,LV 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.
- [12] 梁士民,王伟,孙育英,等. 抑霜型空气源热泵机组应用实测研究[J]. 制冷学报,2022,43(5):24-32.
LIANG Shimin,WANG Wei,SUN Yuying,et al. Field study on the application of frost-suppression air-source heat pump units[J]. Journal of Refrigeration,2022,43(5):24-32.
- [13] JGJ 26—2018,严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准[S].
JGJ 26—2018,Design standard for energy efficiency of residential buildings in severe cold and cold zones[S].
- [14] GB 50495—2019,太阳能供热采暖工程技术标准[S].
GB 50495—2019,Technical standard for solar heating system[S].
- [15] 邱升. 太阳能光伏光热系统集成集热器流动传热特性及优化[D]. 扬州:扬州大学,2018.
QIU Sheng. Flow heat transfer characteristics and optimization of photovoltaic/thermal system collector[D]. Yangzhou:Yangzhou University,2018.
- [16] 赵群,徐尤锦,李峥嵘,等. 农村居民行为对村落供暖负荷的影响[J]. 建筑科学,2019,35(4):96-100.
ZHAO Qun,XU Youjin,LI Zhengrong,et al. Influence of residents' behaviors on space heating load in villages[J]. Building Science,2019,35(4):96-100.
- [17] 罗志冬,胡松涛,刘光乘. 某医院空调系统冷热源的经济性对比分析[J]. 青岛理工大学学报,2015,36(3):68-71.
LUO Zhidong,HU Songtao,LIU Guangcheng. Economy contrast analysis of hot and cold source in a hospital air-conditioning system[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2015,36(3):68-71.
- [18] 刘明辉. 海水-土壤双源热泵系统的气候适用性研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2022.
LIU Minghui. Study on climate applicability of seawater ground dual source heat pump system[D]. Qingdao:Qingdao University of Technology,2022.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)

(上接第 117 页)

- [14] KIM S M,MUDAWAR I. Flow condensation in parallel micro-channels Part 2:Heat transfer results and correlation technique[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2012,55(4):984-994.
- [15] HE G G,ZHOU S,LI D D,et al. Experimental study on the flow boiling heat transfer characteristics of R32 in horizontal tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2018,125:943-958.
- [16] LILLO G,MASTRULLO R,MAURO A W,et al. Flow boiling of R32 in a horizontal stainless steel tube with 6.00 mm ID. experiments,assessment of correlations and comparison with refrigerant R410A[J]. International Journal of Refrigeration,2019,97:143-156.
- [17] LONGO G A,MANCINI S,RIGHETTI G,et al. Comparative analysis of microfin vs smooth tubes in R32 and R410A boiling[J]. International Journal of Refrigeration,2021,131:515-525.
- [18] BEDIKOB E G,RULLIÈRE R,MARCHETTO D B,et al. Flow boiling heat transfer of R1234ze(E) in a horizontal mini-channel at medium and high saturation temperatures[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2024,226:125495.
- [19] LI H P,HRNJAK P. Heat transfer and pressure drop of R32 evaporating in one pass microchannel tube with parallel channels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2018,127:526-540.
- [20] KONDOU C,BABA De,MISHIMA F,et al. Flow boiling of non-azeotropic mixture R32/R1234ze(E) in horizontal microfin tubes[J]. International Journal of Refrigeration,2013,36(8):2366-2378.
- [21] HUANG X H,ZHANG J,HAGLIND F. Experimental analysis of high temperature flow boiling of zeotropic mixture R134a/R245fa in a plate heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering,2023,220:119652.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)