

文章编号:0253-4339(2026)03-0142-08  
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250301003

## 无水地暖热水两联供空气源热泵实验研究

牛建会 安泽龙 张晨旻 吴芋洲 张玉瑾

(河北省可再生能源供热工程技术中心 河北建筑工程学院 张家口 075000)

**摘要** 本文提出了一种新型的无水地暖热水两联供空气源热泵系统,其特征是制冷剂直接在地暖埋管中冷凝,同时高温的制冷剂在外绕盘管式热水器中进行热交换制取生活热水,实现室内供暖和生活热水供应。加工出样机并在单独地板采暖、两联供及单独热水器3种模式下进行测试。结果表明:3种模式下房间地板表面温度均维持在25~33℃,空气温度维持在18~22℃。毛细管地板具有蓄热作用,当停止向房间供热约113~245 min时,房间空气温度依然保持在18℃以上;在优先满足室内采暖要求下,该系统在环境温度为-5℃时,经过572.3 min,热水器水温升至45℃;系统制热量和EER最低分别达到2.70 kW和3.55。

**关键词** 空气源热泵;无水地暖;外绕盘管式热水器;制热性能

**中图分类号**: TB61<sup>+</sup>1; TU832.2

**文献标识码**: A

## Experimental Study on the Performance of Waterless Floor Heating and Hot Water Dual Supply Air-Source Heat Pump System

Niu Jianhui An Zelong Zhang Chenyang Wu Yuzhou Zhang Yujin

(Hebei Renewable Energy Heating Engineering Technology Center, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou, 075000, China)

**Abstract** A new type of air-source heat pump system is proposed, combining domestic hot water and waterless floor heating that is achieved by the direct condensation of the refrigerant in buried pipes. The high-temperature refrigerant is exchanged in the wrapped coil water heater to produce domestic hot water. The prototype was assembled and tested in three modes: standalone floor heating, dual supply, and standalone domestic hot water. The experimental results show that in all three cases, the surface temperature of the floor was maintained between 25℃ and 33℃, and the air temperature was maintained between 18℃ and 22℃. Due to the heat storage effect of the capillary floor, the air temperature in the room remained above 18℃ within 113–245 min after terminating the system. At an ambient temperature of -5℃, after 572.3 min, the water temperature of the water heater rose to 45℃. The minimum system heating capacity and energy efficiency ratio (EER) can reach 2.70 kW and 3.55, respectively.

**Keywords** air-source heat pump; waterless floor heating; external coil water heater; heating performance

随着全球能源需求的增加和环境污染问题的加剧,作为能源消耗重要部分的建筑能耗引起了人们广泛关注。据统计,2022年我国建筑与建筑业建造碳排放总量达51.3亿t CO<sub>2</sub>,占全国能源相关碳排放总量的48.3%;全国建筑与房屋建造碳排放总量达41.5亿t CO<sub>2</sub>,占全国能源相关碳排放的39.1%<sup>[1]</sup>。在建筑能源消费中,公共建筑和城镇居住建筑的碳排放量分别占42%、39%<sup>[2]</sup>。在该背景下,发展可再生能源技术已成为缓解能源危机和改善环境质量的关键措施<sup>[3-4]</sup>。

空气源热泵技术因其高能效、经济性以及安全性等优点,在建筑供暖和热水供应中展现出广阔的应用前景<sup>[5]</sup>。传统的空气源热泵采暖系统主要依赖

强制对流传热,虽能快速提升室内温度,但易造成室内垂直温度梯度大、舒适度差等问题<sup>[6]</sup>。相对而言,热水辐射采暖系统因其室内温度波动小、热分布均匀而受到推崇<sup>[7]</sup>。然而,此类系统中热水的循环输送增加了能耗,且存在冬季管道冻裂的风险<sup>[8-9]</sup>。

无水地暖空气源热泵系统利用高温高压制冷剂气体直接在房间散热,避免了传统系统中水作为热媒所带来的能量损失<sup>[10]</sup>。目前,空气源热泵技术与地板辐射采暖相结合的研究已表明,该组合方式可以显著减少能耗并提高供暖效率<sup>[11-12]</sup>。国内外的多项研究均证实,无论在温度舒适性还是能效方面,这种技术均具有明显的优势<sup>[13-18]</sup>。此外,空气源热泵热水器作为一种节能的热水供应设备,其市场逐渐从

南向北扩展,虽然北方寒冷地区的市场占有率还较低,但显示出巨大的发展潜力<sup>[19-21]</sup>。

本文提出一种新型的无水地暖热水两联供空气源热泵系统,制冷剂直接在地板辐射末端中冷凝,同时高温的制冷剂通过外绕盘管式热水箱制取生活热水。加工出样机在不同模式下进行实验,评价其性能系数、制热能力等。本研究旨在进一步探索和优化无水地暖空气源热泵系统的性能,开发在北方寒冷地区的综合应用潜力。

## 1 系统原理

无水地暖热水两联供空气源热泵供暖系统原理如图 1 所示,该系统由压缩机、室外换热器、室内无水地板辐射末端、外绕盘管式热水箱、膨胀阀及四通阀等主要部件组成。本系统优势在于将空气源无水地暖和生活热水集中在一体,是一种新型的多功能机型。系统可实现单独地板采暖模式,此时阀 3、4、5 关闭,阀 1、2 打开,压缩机排气直接进入地板辐射末端冷凝加热房间;无水地暖与热水两联供模式,此时阀 1、2、5 关闭,阀 3、4 打开,压缩机高温排气先进入热水箱上部外绕盘管内加热热水,再进入地板辐射末端利用中部冷凝热量加热房间,最后再进入热水箱下部外绕盘管内与温度较低的冷水换热过冷;单独热水器模式,此时阀 1、2、4 关闭,阀 3、5 打开,压缩机排

气先进入热水箱上部外绕盘管再进入下部外绕盘管,与热水箱内热水充分换热。

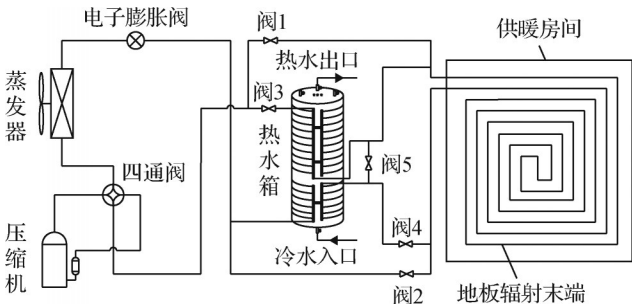


图 1 无水地暖热水两联供空气源热泵供暖系统原理

Fig.1 Principle of water-less floor heating and hot water dual supply air-source heat pump system

## 2 实验装置及步骤

### 2.1 实验装置

样机加工后在河北建筑工程学院的环境控制室内进行测试。室内外环境温度调节区间为 $-15\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,温度控制精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,湿度调节区间为 $30\%\sim 90\%$ ,湿度控制精度 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (湿球温度)。图 2 所示为实验装置,热水箱布置在室内环境控制室,地板辐射末端布置在室内环境控制室中由聚苯乙烯保温板搭建的房间小室内。

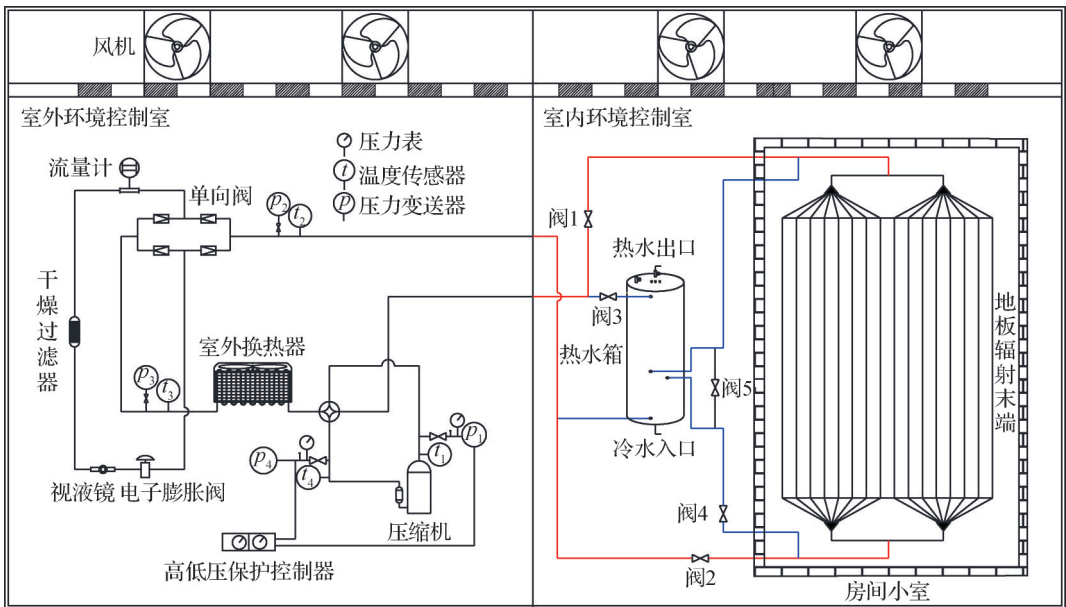


图 2 无水地暖热水两联供空气源热泵装置

Fig.2 Device of water-less floor heating and hot water dual supply air-source heat pump

地板辐射末端面积为 $2\text{ m}$ (长) $\times 1.5\text{ m}$ (宽),压缩机排气通过 2 组 8 分支的分液器进入无水地暖辐射末端。采用外径为 $4\text{ mm}$ 、壁厚为 $0.5\text{ mm}$ 的 16 根铜

制毛细管,间距为 $100\text{ mm}$ ,地板填充层为 $40\text{ mm}$ 厚水泥砂浆。毛细管下方依次敷设铁丝网、铝箔镜面反射膜和厚度为 $50\text{ mm}$ 的聚苯乙烯保温板。热水箱采

用外绕毛细铜盘管与不锈钢内胆进行热交换。热水箱内胆外部设有 2 组外绕毛细管盘管,第 1 组位于内胆上部,接收压缩机排出的高温气体以加热水。第 2 组外绕毛细管盘管位于内胆下部。图 3 所示为无水地暖热水两联供末端装置。



图 3 无水地暖热水两联供末端装置

Fig.3 Terminal device of waterless floor heating and hot water dual supply

图 4 所示为热水箱结构。热水箱外径为 300 mm, 高为 700 mm; 铜管焊接毛细管紧密环绕内胆。上组集液管 40 根毛细管, 下组集液管 20 根毛细管, 2 组集液管间隔为 20 mm。集液管上下端均距水箱顶部和底部 40 mm, 外壁加铝箔隔热保温材料。

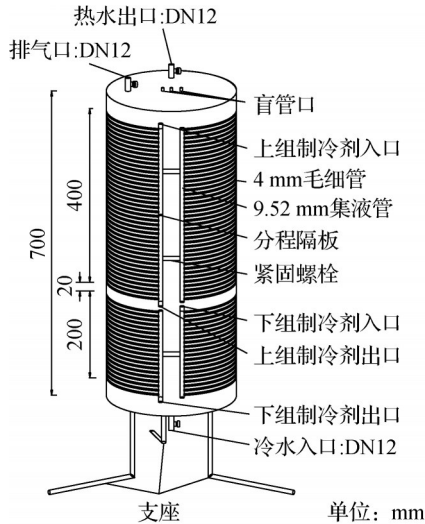


图 4 热水箱结构

Fig.4 Structure of hot water tank

水箱内胆顶部焊接 3 根测温盲管, 内置 Pt100, 分别测量 100、350、600 mm 处水温, 图 5 所示为热水箱内部测点。

图 6 所示为无水地暖毛细管布置及温度测点布置, 采用 T 型热电偶, 1#~5#测点位于地板表面, 6#~8#测点位于距地表以上 100 mm 处, 9#~11#测点位于距地表以上 1 100 mm 处, 12#~14#测点位于距地表以上 1 700 mm 处。

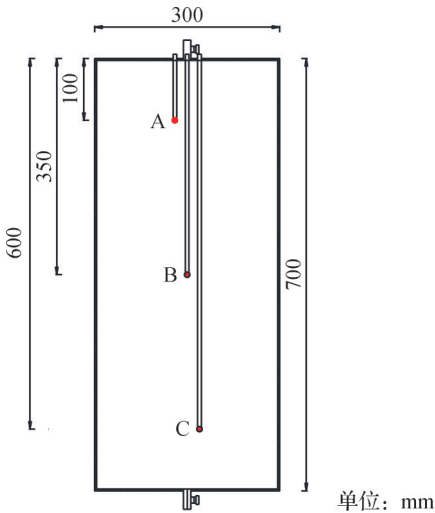


图 5 热水箱内部测点

Fig.5 Internal measurement point of hot water tank

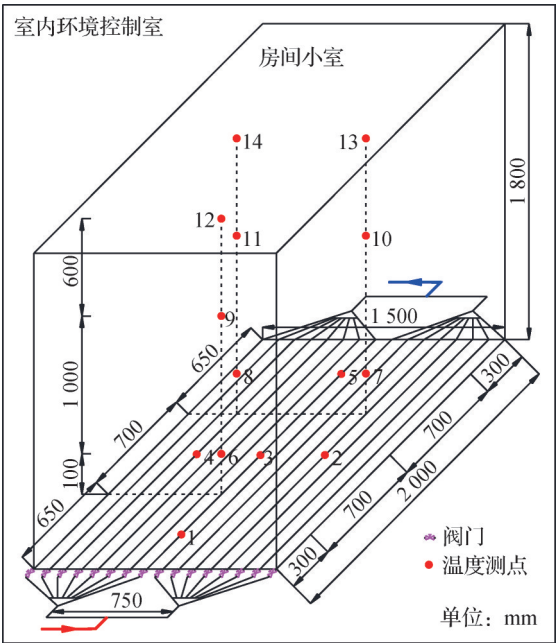


图 6 无水地暖毛细管布置及温度测点

Fig.6 Waterless floor heating capillary layout and measurement point

温度、压力、功率和制冷剂质量流量等关键参数均通过安捷伦 34972A 数据采集仪采集, 并与电脑连接导出 Excel 文档数据。测量仪表型号及参数如表 1 所示。

## 2.2 实验步骤

测试时环境温度  $t_a$  取 5、0、-5 °C, 房间小室初始空气温度为 13~16 °C, 热水箱初始平均水温为 30 °C。

实验步骤如下: 先运行单独地板采暖模式 (sole floor heating mode, SFHM), 房间空气温度达到 18 °C 后切换成两联供模式 (dual supply mode, DSM), 房间温度达到 22 °C 转为单独加热热水器模式 (sole water

表 1 测量仪表型号及参数

Tab.1 Measuring instrument model and parameter

| 测量参数  | 仪表型号         | 测量范围                        | 精度      |
|-------|--------------|-----------------------------|---------|
| 温度    | Pt100        | -150~150 ℃                  | ±0.15 ℃ |
|       | T 型热电偶       | -150~200 ℃                  | ±0.2 ℃  |
| 压力    | Huba         | -0.1~4.0 MPa                | ±0.2%   |
| 电功率   | PD6000-Y30   | 0~10 kW                     | 2%      |
| 制冷剂流量 | LW-4Z1M2SDSR | 0.04~0.25 m <sup>3</sup> /h | ±1%     |
| 数据采集仪 | 安捷伦 34972A   |                             | ±0.2%   |

heater mode, SWHM)。当房间小室空气温度再次降至 18 ℃时,恢复两联供模式,重复此过程直至热水箱水温达到设定值 45 ℃。房间小室空气温度采用 9 个空气测点温度的平均值( $t_a$ )。模式切换控制策略如表 2 所示。

表 2 模式切换控制策略

Tab.2 Mode switching control strategy

| 模式切换 | 小室空气温度             | 地暖启停 | 热水启停 |
|------|--------------------|------|------|
| SFHM | $t \leq 18$ ℃      | 启    | 停    |
| DSM  | $18$ ℃ $<t < 22$ ℃ | 启    | 启    |
| SWHM | $t \geq 22$ ℃      | 停    | 启    |

### 3 数据处理与误差分析

机组制热量:

$$Q = q(h_1 - h_2) \quad (1)$$

式中: $Q$ 为制热量,kW; $q$ 为制冷剂质量流量,kg/s; $h_1$ 为压缩机排气焓值,kJ/kg; $h_2$ 为主管回液焓值,kJ/kg。

能效比(energy efficiency ratio, EER):

$$\text{EER} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} Q_{\text{out}}(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_{\text{in}}(t) dt} \quad (2)$$

式中: $Q_{\text{out}}(t)$ 为瞬时制热量,kW; $P_{\text{in}}(t)$ 为瞬时输出功率,kW; $t_1$ 、 $t_2$ 均为积分时段。

若被测量  $M$  不能直接测得,采用输入  $m$  与其他测量值  $n_1, n_2, \dots, n_n$  (输入量)来进行估计,并对其误差进行分析<sup>[22]</sup>。经计算得出制热量测量误差为 4.8%, EER 的测量误差为 5.2%。

### 4 结果分析

#### 4.1 地板表面温度

图 7 所示为室外环境温度  $t_o$  为 5 ℃时,小室内各测点温度变化。首先运行 SFHM,经过 43.2 min 后,室内空气温度达到 18 ℃,1#测点位于制冷剂入口侧,

温度上升最快,达到 25.2 ℃,上升幅度为 7.1 ℃,5#测点温度最低,为 21.9 ℃,上升幅度为 4.0 ℃,两点温差为 3.3 ℃。2#~4#测点温度相近,为 22.5~23.2 ℃。此时开启 DSM,经过 61.7 min,空气温度达到 22 ℃,1#测点温度达到 32.1 ℃,上升幅度为 6.9 ℃,5#测点温度为 27.2 ℃,上升幅度为 5.3 ℃,两点温差为 4.9 ℃,2#~4#测点温度为 28.7~29.2 ℃。相比于 SFHM,DSM 地板升温变缓,这是由于该模式下压缩机高温排气首先进入热水箱外绕盘管加热热水。切换为 SWHM,由于地板的蓄热性能,245.4 min 后室内空气温度才降至 18 ℃,1#测点温度降为 25.8 ℃,下降幅度为 6.3 ℃,2#~4#测点温度保持在 23.8~24.2 ℃,5#测点温度降至 20.1 ℃,下降幅度为 7.1 ℃。由此可见,即使有较长时间热泵停机,但由于地板辐射末端的蓄热作用,未对室内热舒适产生影响。此时开启 DSM,当室内空气温度达到 22 ℃时,再次开启 SWHM,数据大小与变化规律与上一周期基本一致。

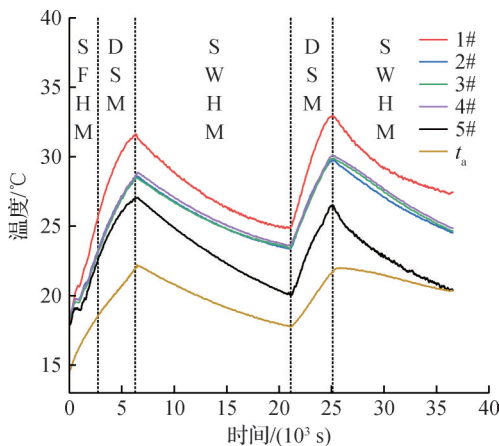


图 7  $t_o=5$  ℃时房间小室各测点温度变化

Fig.7 Temperature changes of each measuring points in the room chamber when  $t_o=5$  ℃

图 8 所示为室外环境温度  $t_o=0$  ℃时,房间小室各测点温度变化。首先运行 SFHM,49.8 min 后室内空气温度达到 18 ℃,与  $t_o=5$  ℃时相比,延迟 6.6 min,此时 1#测点温度达到 25.7 ℃,上升幅度为 7.1 ℃,2#~4#测点温度为 24.5~24.7 ℃,5#测点温度为 23.1 ℃,上升幅度为 4.4 ℃,1#测点和 5#测点的温差为 2.6 ℃,与前者温度相差较小。切换为 DSM,111.9 min 后室内空气温度达到 22 ℃,与  $t_o=5$  ℃时相比,延迟 50.2 min,地板各测点温度与前者接近,地板测点温度最高达到 33.2 ℃。开启 SWHM,由地板蓄热特性,经过 157.9 min 后室内空气温度降至 18 ℃,与  $t_o=5$  ℃时相比,提前 87.5 min,此时 1#测点温度为 27.3 ℃,

2#~4#测点温度为 25.7~27.3 °C, 5#测点温度为 23.3 °C, 与前者温度相差较小。此时系统开启 DSM, 室内空气温度达到 22 °C 时, 再次开启 SWHM。

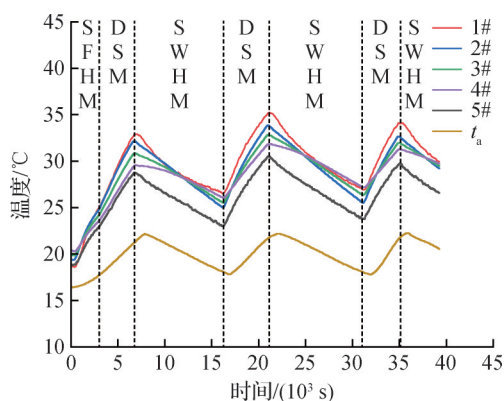


图8  $t_o=0$  °C 时房间小室各测点温度变化

Fig.8 Temperature changes of each measuring points in the room chamber when  $t_o=0$  °C

图9所示为室外环境温度  $t_o=-5$  °C, 小室内各测点温度变化。首先运行 SFHM, 189.8 min 后室内空气温度达到 18 °C, 与  $t_o=5$  °C 时相比, 延迟 146.6 min, 1#测点温度达到 29.5 °C, 上升幅度为 11.3 °C, 2#~4#测点温度为 25.8~26.4 °C, 5#测点温度为 24.8 °C, 上升幅度为 7.0 °C。开启 DSM, 96.3 min 后室内空气温度达到 22 °C, 与  $t_o=5$  °C 时相比, 延迟 34.6 min, 地板温度最高达到 32.1 °C。开启 SWHM, 经过 113.8 min 后, 室内空气温度降至 18 °C, 1#测点温度为 27.2 °C, 2#~4#测点温度为 23.8~24.2 °C, 5#测点温度为 23.8 °C, 1#测点和 5#测点的温差为 3.4 °C。

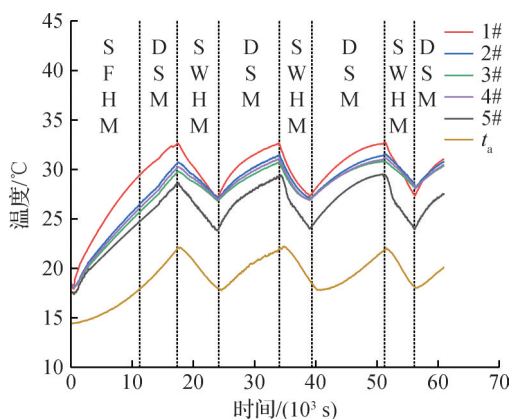


图9  $t_o=-5$  °C 时房间小室各测点温度变化

Fig.9 Temperature changes of each measuring points in the room chamber when  $t_o=-5$  °C

## 4.2 热水箱蓄热/放热水温变化

图10所示为室外环境温度  $t_o=5$  °C 时, 热水箱内部不同高度水温变化。测点 A、B、C 处的初始水温分

别为 32.9、31.4、23.3 °C。热泵机组开机后 43.2 min 之内, 由于运行单独地板加热模式, 热水箱内水温基本不变。随后运行 DSM, 热水温度缓慢上升, 经过 61.7 min 后, 测点 A、B、C 处的温度升至 34.1、32.9、26.5 °C, 分别升高 1.2、1.5、3.2 °C, 平均升温速率为 0.0318 °C/min。运行 SWHM, 经过 245.4 min 后, 测点 A、B、C 处的水温分别升至 42.3、41.2、33.3 °C, 分别升高 8.2、8.3、6.8 °C, 平均升温速率为 0.0316 °C/min。再次运行 DSM, 42.1 min 后即热泵开机 392.3 min 后, 测点 A 水温升至 45 °C, 此时测点 B、C 温度分别为 43.9、35.2 °C。经过 5.4 min 放水 15 L 后, 测点 A、B、C 处的水温分别降为 44.5、28.8、24.9 °C。由于不同模式下, 制冷剂均是先经过热水箱的上组集液管再经过下组, 所以上端热水升温较快。放水过程中, 热水箱顶部的温度始终较为稳定, 满足用户的热水需求。放水结束后, 进行二次加热与放水实验, 208 min 后热水温度再次达到设定值 45 °C。

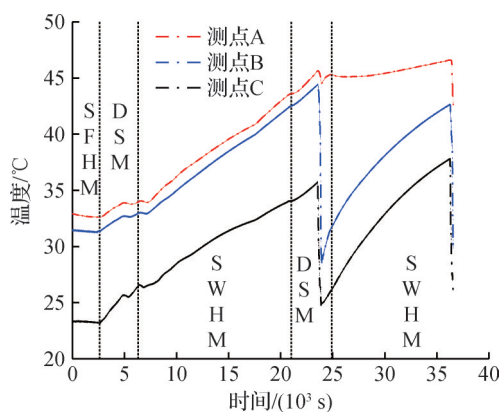


图10  $t_o=5$  °C 时热水箱不同位置水温变化

Fig.10 Water temperature changes at different locations of hot water tank when  $t_o=5$  °C

图11所示为室外环境温度  $t_o=0$  °C 时, 热水箱内部不同高度水温变化。开机运行 SFHM 经过 49.8 min, 切换为 DSM 开始加热热水, 此时测点 A、B、C 处的水温分别为 33.5、30.3、25.8 °C, 切换过程中制冷剂流路发生突变, 产生短暂扰动, 导致测点 A 初始温度下降, 而后系统稳定, 温度迅速回升, 经过 111.9 min 后, 测点 A、B、C 的水温升至 36.3、33.7、30 °C, 分别升高 2.8、3.4、4.2 °C, 平均升温速率为 0.031 °C/min。运行 SWHM, 经过 157.9 min 后, 测点 A、B、C 处的水温分别升至 44.7、41.9、36.3 °C, 分别升高 8.4、8.2、6.3 °C, 平均升温速率为 0.048 °C/min。热泵开机 397.3 min 后, 测点 A 水温升至 45.9 °C, 测点 B、C 处的水温分别为 44.4、38.7 °C。经过 5.65 min 放水 14.8 L 后, 测点 A、B、C 处的水温分别降至 43.8、

28.5、24.1℃,分别下降2.1、15.9、14.6℃。放水结束后,进行二次加热,245 min后热水温度再次达到设定值45℃。

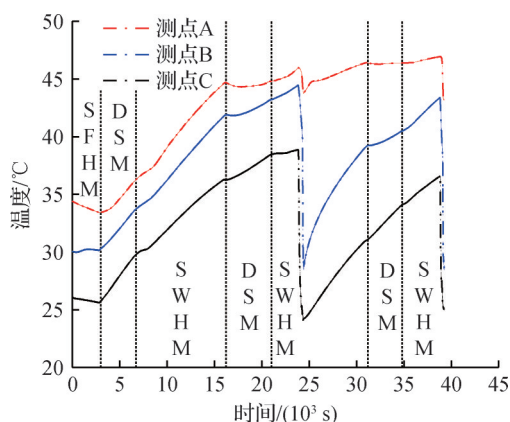


图11  $t_o=0$ ℃时热水箱不同位置水温变化

Fig.11 Water temperature changes at different locations of hot water tank when  $t_o=0$ ℃

图12所示为室外环境温度 $t_o=-5$ ℃时,热水箱内部不同高度水温变化。测点A、B、C处的初始水温分别为34.1、30.6、27.3℃。开机运行SFHM经过189.8 min,切换为DSM开始加热热水,此时测点A、B、C处的水温分别为30.7、29.9、26.7℃,经过96.3 min测点A、B、C的水温升至36.3、34.6、30.8℃,分别升高5.6、4.7、4.1℃,平均升温速率为0.05℃/min。运行SWHM,经过113.8 min后,测点A、B、C处的水温分别升至38.6、37.7、32℃,分别升高2.3、3.1、1.2℃,平均升温速率为0.019℃/min。开机经过572.3 min后,测点A水温升至45.7℃,测点B、C处的水温分别为44.6、34.8℃,与 $t_o=5$ ℃时相比,时间增长180 min。进行放水实验,4.67 min放水13.3 L,测点A、B、C处的水温分别降为44.9、27.8、22.3℃,分别下降0.8、16.8、12.5℃。放水结束后,进行二次加热,494 min后水箱热水温度再次达到设定值45℃。

通过上述数据分析可知,随着室外环境温度的降低,热水器水温加热到设定值所用时间随之增长,水温上升速率随之变慢。

### 4.3 机组制热性能

图13所示为不同工况下机组制热量变化。随着室外温度的降低,系统的制热量呈现显著下降趋势。在 $t_o=5$ ℃时,单独地板模式的制热量为3.71 kW,两联供模式为4.02 kW,单独热水器模式为3.41 kW。 $t_o=0$ ℃时,制热量分别降至3.01、3.1、2.91 kW。在 $t_o=-5$ ℃时,制热量进一步降至2.90、3.25、2.70 kW。与 $t_o=5$ ℃时相比,分别降低21.8%、19.2%、20.8%。

图14所示为不同室外温度不同模式下EER的变化

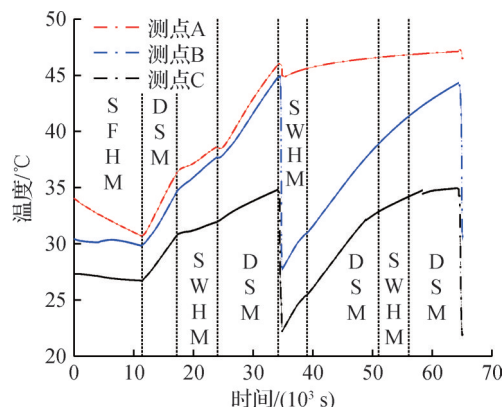


图12  $t_o=-5$ ℃时热水箱不同位置水温变化

Fig.12 Water temperature changes at different locations of hot water tank when  $t_o=-5$ ℃

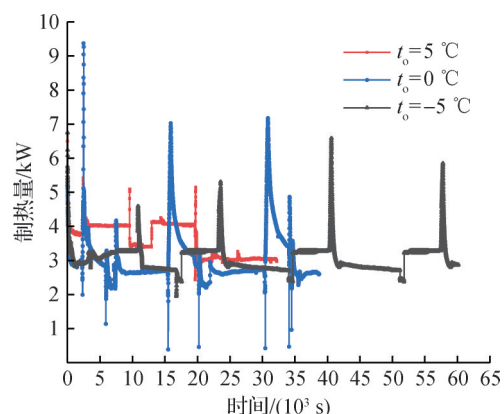


图13 系统制热量变化

Fig.13 Change of heating capacity

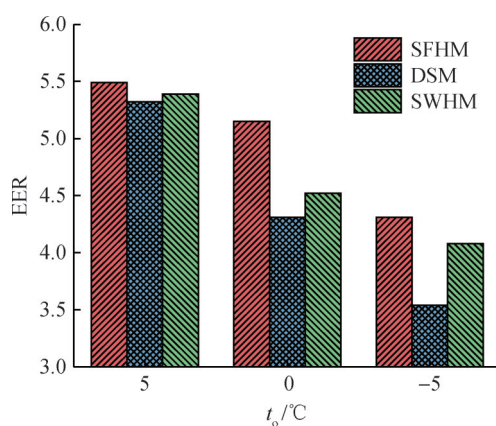


图14 不同室外温度不同模式下EER的变化

Fig.14 Changes in EER under different outdoor temperatures and modes

化。系统EER的变化规律与系统制热量的变化规律基本相同,随着外界环境温度降低,系统的EER逐渐降低。在 $t_o=5$ ℃环境下,单独地板模式的EER为5.49,两联供模式为5.32,单独热水器模式为5.39。当 $t_o=-5$ ℃时,单独地板模式的EER为4.31,两联供模式为3.54,单独热水器模式为4.08。显示出系统

在低环境温度下仍保持相对较高的能效。

## 5 结论

本文提出了一种无水地暖热水两联供空气源热泵采暖系统,制冷剂直接冷凝加热地暖盘管和外绕盘管式热水器,满足房间供暖和生活热水需要。搭建了实验装置,对其不同模式的运行性能进行测试,得到如下结论:

1)系统能够在不同室外环境温度、不同模式下稳定运行。地板表面温度基本维持在 $25\sim 33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,房间空气温度维持在 $18\sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,满足房间供暖要求。

2)随着室外环境温度的降低,在地板辐射末端的蓄热作用下,室内空气温度从 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间在缩短,由 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 $245.4\text{ min}$ 缩短至 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 $113.8\text{ min}$ ;在优先满足室内采暖要求下,热水器水温加热至设定温度 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所用时间随之增长,由 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 $392.3\text{ min}$ 增至 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 $572.3\text{ min}$ 。

3)系统在不同环境温度、不同模式下,均具有较高的能效。在环境温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,系统运行单独地板模式时EER为4.31,两联供模式时EER为3.55,单独热水器时EER为4.08。

本文受2024年度河北省高校基本科研业务费项目(2024QNJS03),河北建筑工程学院博士科研启动基金项目(B-202303),河北建筑工程学院研究生创新基金项目(XY2025074)资助。(The project was supported by the Basic Research Funds for Universities in Hebei Province in 2024 (No. 2024QNJS03), the Doctoral Research Initiation Fund Project of Hebei University of Architecture (No. B-202303), and the Graduate Innovation Fund Project of Hebei University of Architecture (No. XY2025074).)

## 参考文献

- [1] 蔡伟光,于艳辉,刘源.中国城乡建设领域碳排放研究报告(2024年)[J].建筑,2025(2):56-63.(CAI Weiguang, YU Yanhui, LIU Yuan. Research report on carbon emissions in urban and rural construction in China (2024)[J]. Construction and Architecture, 2025(2): 56-63.)
- [2] 中国建筑节能协会,重庆大学城乡建设与发展研究院.中国建筑能耗与碳排放研究报告(2023年)[J].建筑,2024(2):46-59.(China Building Energy Conservation Association, Institute of Urban and Rural Construction and Development, Chongqing University. Research report on China's building energy consumption and carbon emissions (2023)[J]. Construction and Architecture, 2024(2): 46-59.)
- [3] LIU Changping, XU Wei, LI Angui, et al. Energy balance evaluation and optimization of photovoltaic systems for zero energy residential buildings in different climate zones of China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 235: 1202-1215.
- [4] DONG Zhang, SU Xinyue, LIU Pengfei, et al. Experiment study on startup characteristics and operation performance of PV/T solar assisted heat pump water heater system driven by direct current variable frequency compressor[J]. Solar Energy, 2023, 263: 111771.
- [5] ZHENG Xuejing, SHI Rui, YOU Shijun, et al. Experimental study of defrosting control method based on image processing technology for air source heat pumps [J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 51: 101667.
- [6] LIN Borong, WANG Zhe, SUN Hongli, et al. Evaluation and comparison of thermal comfort of convective and radiant heating terminals in office buildings [J]. Building and Environment, 2016, 106: 91-102.
- [7] HU Bin, WANG Ruzhu, XIAO Biao, et al. Performance evaluation of different heating terminals used in air source heat pump system [J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 98: 274-282.
- [8] 孔祥飞,常宇帆,李晗.低温地板辐射与低温层式通风耦合供暖模式热性能实验研究[J].建筑科学,2021,37(8):50-58.(KONG Xiangfei, CHANG Yufan, LI Han. Experimental investigation of the thermal performance on the low-temperature radiant floor coupled with low-temperature stratum ventilation under heating mode [J]. Building Science, 2021, 37(8): 50-58.)
- [9] 李建凯,庄绪成,王海英,等.寒冷地区空气源热泵地板供暖系统运行及分析[J].建筑科学,2023,39(10):105-112.(LI Jiankai, ZHUANG Xuchen, WANG Haiying, et al. Operation and performance analysis of floor heating system of air-source heat pump in cold regions [J]. Building Science, 2023, 39(10): 105-112.)
- [10] SHAO Suola, ZHANG Huan, FAN Xianwang, et al. Thermodynamic and economic analysis of the air source heat pump system with direct-condensation radiant heating panel[J]. Energy, 2021, 225: 120195.
- [11] HWANG Y J, JEONG J W. Energy saving potential of radiant floor heating assisted by an air source heat pump in residential buildings[J]. Energies, 2021, 14(5): 1321.
- [12] LIU Minzhang, ZHANG Huan, ZHENG Wandong, et al. Heat transfer research of a new type of radiant floor heating system [J]. Heat Transfer Engineering, 2020, 41(18): 1626-1641.
- [13] BAE S, NAM Y, CHOI J H. Comparative analysis of system performance and thermal comfort for an integrated system with PVT and GSHP considering two load systems:

- convective heating and radiant floor heating[J]. *Energies*, 2020, 13(20): 5524.
- [14] 孙志利, 任彤, 刘起友, 等. 和田地区空气源热泵地暖辐射采暖系统实验[J]. *制冷学报*, 2023, 44(3): 67-73. (SUN Zhili, REN Tong, LIU Qiyu, et al. Experiment on radiant floor heating system of air-source heat pump in hotan area [J]. *Journal of Refrigeration*, 2023, 44(3): 67-73.)
- [15] ZHENG Chenxiao, YOU Shijun, ZHANG Huan, et al. Defrosting performance improvement of air-source heat pump combined refrigerant direct-condensation radiant floor heating system with phase change material [J]. *Energies*, 2020, 13(18): 4594.
- [16] WANG Zhihua, LI Guichen, WANG Fenghao, et al. Performance investigation of a transcritical CO<sub>2</sub> heat pump combined with the terminal of radiator and floor radiant coil for space heating in different climates, China [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44: 102927.
- [17] CONGEDO P M, BAGLIVO C, BONUSO S, et al. Numerical and experimental analysis of the energy performance of an air-source heat pump (ASHP) coupled with a horizontal earth-to-air heat exchanger (EAHX) in different climates[J]. *Geothermics*, 2020, 87: 101845.
- [18] DONG Jiankai, ZHANG Long, DENG Shiming, et al. An experimental study on a novel radiant-convective heating system based on air source heat pump [J]. *Energy and Buildings*, 2018, 158: 812-821.
- [19] FENAUGHTY K, PARKER D S, BUTZBAUGH J, et al. Detailed evaluation of electric demand load shifting potential of heat pump water heaters in a hot humid climate [J]. *Science and Technology for the Built Environment*, 2023, 29(9): 905-926.
- [20] 王家正, 马国远, 俞国新, 等. 带闪发补气的家用空气源热泵热水器实验研究[J]. *制冷学报*, 2022, 43(6): 100-106. (WANG Jiazheng, MA Guoyuan, YU Guoxin, et al. Experimental study on household air-source heat pump water heater with flash tank [J]. *Journal of Refrigeration*, 2022, 43(6): 100-106.)
- [21] 张志刚, 刘莹, 姚万祥. 空气源热泵热水器在寒冷地区冬季的能效分析[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(1): 543-550. (ZHANG Zhigang, LIU Ying, YAO Wanxiang. Energy efficiency analysis of air energy water heater in cold area in winter [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2023, 44(1): 543-550.)
- [22] MOFFAT R J. Using uncertainty analysis in the planning of an experiment[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1985, 107(2): 173-178.

#### 通信作者简介

张玉瑾,女,硕士,讲师,河北建筑工程学院能源工程系,15132351085,E-mail:zy841010@163.com。研究方向:可再生能源应用技术。

#### About the corresponding author

Zhang Yujin, female, master, lecturer, Department of Energy Engineering, Hebei University of Architecture, 86-15132351085, E-mail: zy841010@163.com. Research fields: renewable energy application technology.