

## 户式空气源热泵供暖系统运行特性研究

董 策, 李绪泉\*, 龚鸣禹, 周子毅, 于慧俐

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525)

**摘 要:** 选取某新型户式空气源热泵, 实现热泵的“一拖多”特性。通过对热能进行分配, 该设备在供暖的同时, 还可以制备生活热水。本文旨在研究该户式空气源热泵供暖系统在供暖并制备生活热水模式下的供暖效果与能效比(COP)表现。通过实测分析了采用风机盘管作为供暖末端的户式空气源热泵系统在供暖和制备生活热水工况下的运行特性。研究结果显示, 间歇供暖工况下系统的 COP 和供暖效果均低于连续供暖工况。在开启生活热水制备功能后, 压缩机的功耗和水泵功率会显著提高, 房间温度会下降。当生活热水达到设定温度后, 压缩机的功耗和水泵功率便会恢复至当日的平均水平。

**关键词:** 空气源热泵; 生活热水制备; 风机盘管采暖; 能效比(COP)

**中图分类号:** TU832.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2026)02-0083-07

**DOI:** 10.3969/j.issn.1673-4602.2026.02.011

## Research on the operating characteristics of residential air-source heat pump heating system

DONG Ce, LI Xuquan\*, GONG Mingyu, ZHOU Ziyi, YU Huili

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

**Abstract:** A new type of residential air-source heat pump is selected to achieve the multi-split characteristics of heat pumps. By distributing heat energy, the device can produce domestic hot water while heating. This study aims to investigate the heating performance and coefficient of performance (COP) of the residential air-source heat pump heating system in the operating modes of heating and domestic hot water production. Through experimental analysis, the operational characteristics of a residential air-source heat pump system which uses fan coil units as terminal are explored under the operating conditions of heating and domestic hot water production. The research results show that the COP and heating performance of the system under intermittent heating conditions are lower than those under continuous heating conditions. After activating the hot water production function, the power consumption of the compressor and water pump power will significantly increase, and the room temperature will decrease. When the domestic hot water reaches the set temperature, the power consumption of the compressor and water pump power will return to the average level of the day.

**Key words:** air-source heat pump; domestic hot water production; fan coil heating; COP

收稿日期: 2024-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(52078257)

作者简介: 董 策(1997—), 男, 河北张家口人。硕士, 研究方向为空气源热泵。E-mail: 1312641703@qq.com。

\* 通信作者: 李绪泉(1969—), 男, 山东莒南人。博士, 副教授, 主要从事可再生能源利用方面的研究。E-mail: lxuquan@163.com。

空气源热泵是一种高效的能量转换装置,可通过消耗少量电力将空气中的低品位热能转化为高品位热能,再运输至各用热设备<sup>[1]</sup>。空气取之不尽、用之不竭,而空气源热泵的安装与使用也较为方便,同时空气源热泵还具有升温速度快、安全性高、环境友好等优点,可以源源不断地供应热能<sup>[2]</sup>。

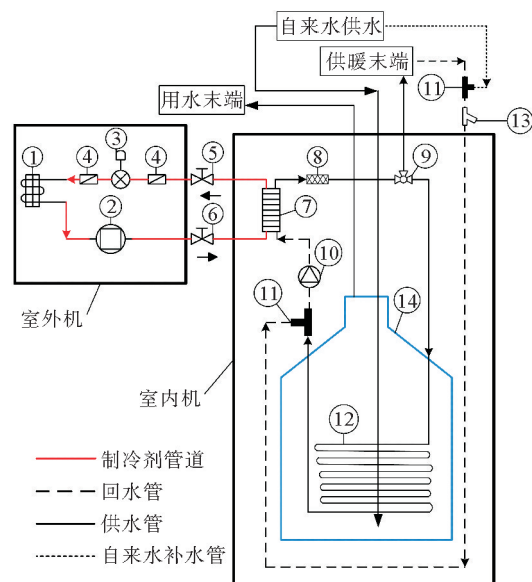
一般来说,空气源热泵的能效比(COP)与环境温度呈正相关<sup>[3-6]</sup>。杨景洋等<sup>[7]</sup>创建了空气源热泵供暖的仿真模型,并研究空气源热泵的运行特性,结果表明系统耗电量会随室外环境温度升高而下降,同时供暖季节气温最低时不宜只用空气源热泵系统供暖,应搭配辅助热源。KONRAD等<sup>[8]</sup>对市面上的空气源热泵进行了调研,发现普通温和气候的空气源热泵系统在应对寒冷气候时会出现严重的性能损失问题,并且大多数热泵在环境温度下降到 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下后会难以满足用户房间的供暖需求。空气源热泵的COP一般还与供水温度呈负相关<sup>[9-11]</sup>。WU等<sup>[12]</sup>在中国寒冷地区的大庆市进行了空气源热泵供暖试验研究,结果表明当室外温度在 $(-5\pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,供水温度每升高约 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,COP下降约 $14.2\%$ 。LIU等<sup>[13]</sup>提出了一种依据每小时室外温度而改变供水温度的可变供水温度控制策略,研究了可变供水温度控制策略与恒定供水温度控制策略下的系统性能,结果表明,与在恒温( $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ )策略下运行相比,在典型的高和低环境温度情况下,变温策略下运行的系统日功耗分别下降了 $56.7\%$ 和 $29.5\%$ 。除环境温度与供水温度外,汪保利等<sup>[14]</sup>建立了空气源热泵集中供暖系统的数学模型,在考虑结除霜和启停损失的前提下,基于该模型提出3种适合于空气源热泵的调节方式,结果表明,结除霜损失修正使机组的耗电量增大了 $3.85\%\sim 17.41\%$ ,季节COP降低了 $3.72\%\sim 14.83\%$ ,启停损失修正的影响会随着供暖面积的增大逐渐降低。蒋浩等<sup>[15]</sup>将水箱温度传感器与统计学方法相结合,识别出了空气源热泵热水器用水的高峰段、平段和低谷段,使得空气源热泵热水器能够在各个时间段内实施最合适的制热策略。

以上研究主要关注环境温度与供水温度对空气源热泵耗电量、制热量与COP的影响。本文研究的户式空气源热泵相对上述文献所用的热泵在结构上有所创新。该设备实现了热泵的“一拖多”特性,不仅可以连接供暖末端,而且设备内部配有生活热水水箱,可将热能进行再分配,使其既可满足供暖需求,也能用于制备生活热水。

## 1 户式空气源热泵结构原理

本文所用户式空气源热泵机组为分体式机组,额定制热量为 $8\text{ kW}$ ,含室内机与室外机。室内外机以制冷剂管道相连,制冷剂为R32,室外机主要零部件包括蒸发器、压缩机、电子膨胀阀等。室内机的主要零部件包括板式换热器、电加热器、水泵、三通电磁阀、盘管式换热器、生活热水水箱。户式空气源热泵结构如图1所示。

由图1可以看出,该户式空气源热泵机组可分为2个部分。①室外机部分,此部分主要为制冷剂循环,制冷剂经膨胀阀、蒸发器及压缩机后以高温高压的制冷剂蒸汽形式进入室内机板式换热器与水进行换热。②室内机部分,此部分主要为供暖热水循环,离开板式换热器的供暖热水在流经三通电磁阀时会进行分流,一部分离开室内机流入供暖末端;另一部分会流向室内机下部的生活热水水箱内的盘管式换热器,热水会进入换热器与水箱内的低温生活用水进行换热,之后离开水箱换热器再与返回室内机的供暖回水混合,再经水泵驱动后流进板式换热器与制冷剂蒸汽进行换热再次循环。



1—蒸发器;2—压缩机;3—电子膨胀阀;4—过滤器;5—液体截止阀;  
6—气体截止阀;7—板式换热器;8—电加热器;9—三通电磁阀;10—水泵;  
11—三通电磁阀;12—盘管式换热器;13—Y型过滤器;14—生活热水水箱。

图1 户式空气源热泵结构

## 2 户式空气源热泵供暖系统实验

### 2.1 户式空气源热泵供暖系统实验对象及目的

本实验以青岛理工大学暖通实验室为对象,实验系统平面如图 2 所示。实验房间面积为  $96.05 \text{ m}^2$ ,外墙包括南外墙与东外墙,其中东外墙面积为  $38.12 \text{ m}^2$ ,东外窗面积为  $10.08 \text{ m}^2$ ;南外墙面积为  $27.56 \text{ m}^2$ ,南外窗面积为  $6.72 \text{ m}^2$ 。由于房间 A 与 B 负荷存在差异,故房间 A 布置 2 台风机盘管(FP340 与 FP680),总风量为  $1020 \text{ m}^3/\text{h}$ ;房间 B 布置 1 台风机盘管(FP340),风量为  $340 \text{ m}^3/\text{h}$ 。风机盘管的启停、风速均由智能线控器控制。线控器内带有温度检测模块,可自行检测室内温度,在室内温度达到设定温度时,便会控制系统停机,室内温度降至设定温度以下后,系统又会重新运行。如系统需持续运行,则是在不改变供水温度的前提下将线控器的温度调整至高于设定温度。

实验目的是研究户式空气源热泵供暖系统冬季供暖期的运行特性,分析参数有系统总功耗、压缩机功耗、水泵功率与功耗、供暖制热量、总制热量、室内外温度变化、系统 COP。所需参数中压缩机功耗、水泵功率与功耗、室内外温度可由仪器直接测量得出,实时功率与功耗由多路数据记录仪测量,其中功耗测量精度为  $0.01 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ;室内外温度由热电偶测得,测量精度为  $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。而供暖制热量、生活热水制热量、系统 COP 则需根据测得的数据计算得到。

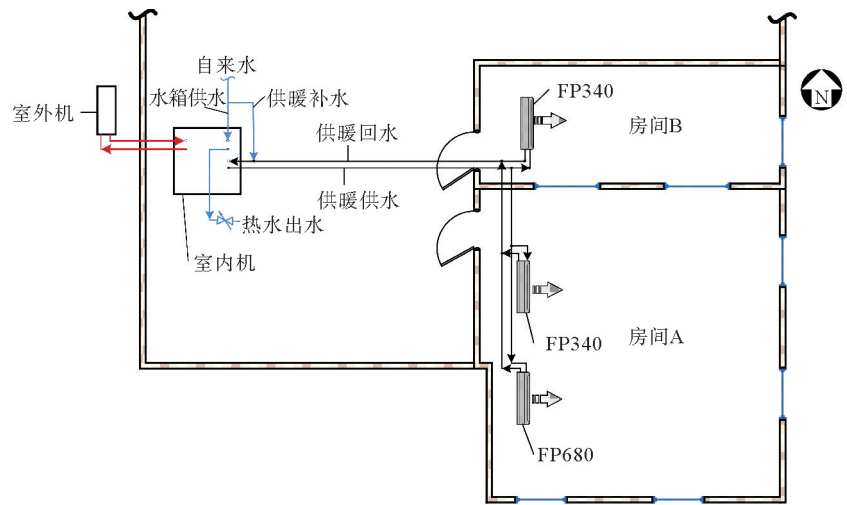


图 2 实验系统平面

$$\epsilon = \frac{Q_h}{Q_p} \quad (1)$$

式中: $\epsilon$  为系统 COP; $Q_h$  为系统制热量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ ; $Q_p$  为系统耗电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

$$Q_h = Q_n + Q_r \quad (2)$$

式中: $Q_n$  为供暖制热量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ ; $Q_r$  为生活热水制热量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

$$Q_n = [cM(T_{ou} - T_{in})]/3600 \quad (3)$$

式中: $c$  为水的比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ ; $M$  为供暖用水质量流量, $\text{kg}$ ; $T_{ou}$  为供暖用水供水温度, $^\circ\text{C}$ ; $T_{in}$  为供暖回水供水温度, $^\circ\text{C}$ 。

$$Q_r = [cG(T_e - T_s)]/3600 \quad (4)$$

式中: $G$  为加热生活热水质量, $\text{kg}$ ; $T_e$  为加热结束时水箱温度, $^\circ\text{C}$ ; $T_s$  为加热开始时水箱温度, $^\circ\text{C}$ 。

$$Q_p = Q_c + Q_w + Q_e \quad (5)$$

式中: $Q_c$  为压缩机耗电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ ; $Q_w$  为水泵功耗, $\text{kW} \cdot \text{h}$ ; $Q_e$  为电加热功耗, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

### 2.2 户式空气源热泵供暖系统实验方案

针对户式空气源热泵的普遍应用环境,此次实验分析全天定水温供暖同时制备生活热水模式下户式空气源热泵供暖系统的运行性能。

在此模式下,系统全天保持启动状态,机组产生的热量一部分用作满足实验房间的供暖需求,另一部分用作制备生活热水。在制备生活热水时,需在每天 10:00—12:00 启动生活热水加热功能,生活热水达到设定温度后关闭此项功能。依据规范[16]及文献[17],将测试期间每天生活热水总用量设置为 120 L。每天 12:00—13:00 时段排放 40 L,20:00—22:00 时段排放 80 L。

在计算日均 COP 时,系统制热量包括供暖制热量和生活热水制热量。这种模式在运行中同样分为间歇运行和连续运行两个工况。以上所有运行模式供暖用水温度均恒定。依据文献[18],将本次实验供暖用水温度设定为 45 ℃。

### 2.3 实验数据分析

测试分间歇供暖和连续供暖两个工况,其中间歇供暖测试线控器温度设为 20 ℃,间歇供暖测试期在 2023 年 12 月,测试时间 168 h;连续供暖测试在 2024 年 1 月,测试时间 72 h。两个阶段均需制备生活热水,生活热水设定温度为 45 ℃。

#### 2.3.1 间歇供暖阶段室内温度变化分析

间歇供暖阶段室外温度为 1.0~5.5 ℃,经测试,当月平均气温为-0.3 ℃。测试期间,12 月 31 日室外平均温度为 1.0 ℃,在测试阶段与当月平均气温最为接近,故以 12 月 31 日为例进行分析。12 月 31 日室内温度变化如图 3 所示,房间 B 温度较为稳定,在 11:04 达到全天最高温度 21.1 ℃,在 23:59 达到全天最低温度 20.1 ℃,其余时段室内温度基本稳定在当日平均温度 20.4 ℃ 附近。房间 A 温度出现多次波动,波动范围为 19.5~22.3 ℃,平均温度 20.9 ℃。

#### 2.3.2 间歇供暖阶段能效分析

测试期内,系统日总 COP 变化与室外温度呈正相关。12 月 31 日室外温度最低为 1.0 ℃, COP 也最低,为 2.65;12 月 30 日室外温度最高为 5.5 ℃, COP 同样最高,为 3.10。

12 月 31 日功耗汇总如图 4 所示。由图 4 可见,在 10:00—12:00 时段,室外温度呈上升趋势,而压缩机功耗也呈上升趋势并且 11:00 时段压缩机功耗为全日最高。而依据实验方案,每日 10:00 后启动生活热水加热功能,故推测生活热水加热功能开启后,系统热负荷除房间热负荷外,额外增加了生活热水热负荷,压缩机功耗提高,制热量增大。

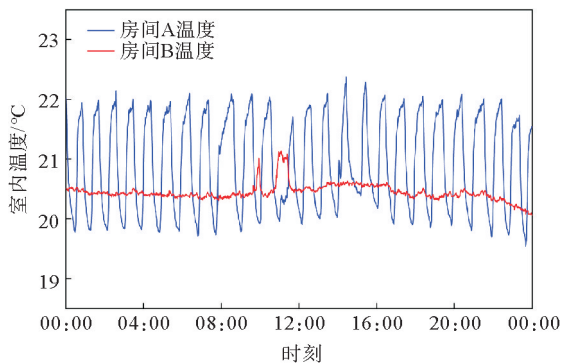


图3 12月31日室内温度变化

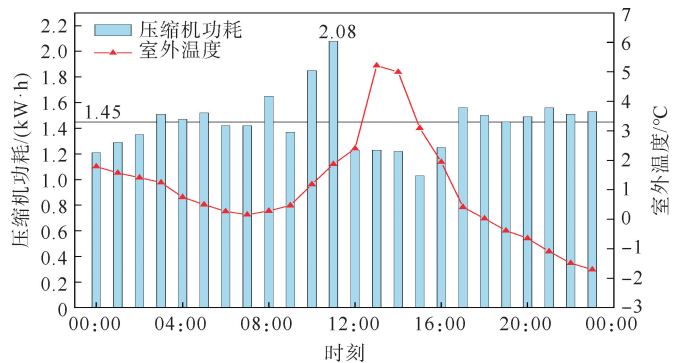


图4 12月31日压缩机功耗变化

测试期水泵功率汇总如图 5 所示。由图 5 可见,每日开启生活热水制备功能的时段 10:00—12:00 水泵功率均有显著提高,并且 12:00 后生活热水温度达标,该功能关闭,而在生活热水制备完成后又会迅速回落到 60 W 左右。因为开启生活热水制备功能后,系统既需满足供暖需求又要加热生活热水,系统水量一部分用于供暖,一部分用于生活热水水箱换热,水流量增大,故位于回水干管上的水泵功率会发生变化。

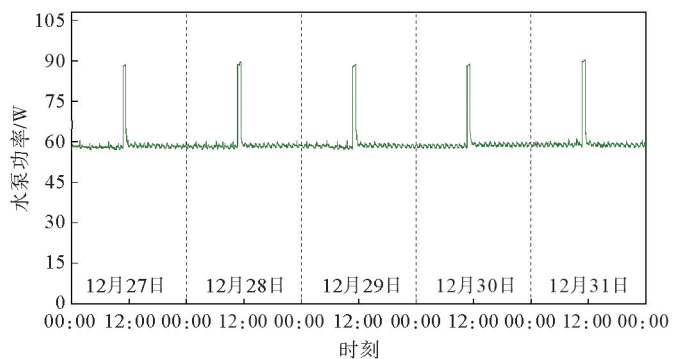


图5 水泵功率变化

综上,生活热水制备功能开启后,系统总热负荷在短时间内显著提高,因此空气源热泵压缩机的功耗

与水泵功率都会随之大幅提高。当生活热水制备完成后,系统总热负荷又降低为仅需满足房间供暖需求,所以压缩机的功耗与水泵的功率又回落至生活热水制备功能开启之前的水平。

### 2.3.3 连续供暖阶段室内温度变化分析

连续供暖阶段风机盘管全天无间断工作,同时需与间歇供暖阶段一样,每日 10:00 开启生活热水制备功能,测试期为 1 月 5 日—1 月 7 日,室内温度变化如图 6—图 8 所示。经测量,1 月平均温度为 1.53 ℃,而 1 月 6 日室外平均温度为 2.30 ℃,在测试期内与月平均温度最接近,因此以 1 月 6 日为例。1 月 6 日房间 A 温度 22.5~24.9 ℃,平均温度 23.9 ℃;房间 B 温度 20.8~22.7 ℃,平均温度 21.2 ℃。

同时从图 6—图 8 中可发现,在每日 10:00—12:00 时段,房间 A 的温度会出现一次明显的下降而后上升,而生活热水制备功能在 10:00 开启,供暖用水主要用于生活热水加热,流经风机盘管的水流量降低。又因为房间 A 和房间 B 的风机盘管流量配比为 3:1,导致房间 A 风机盘管的流量下降幅度远大于房间 B,故房间 A 温度会出现明显变化,而房间 B 却不会。

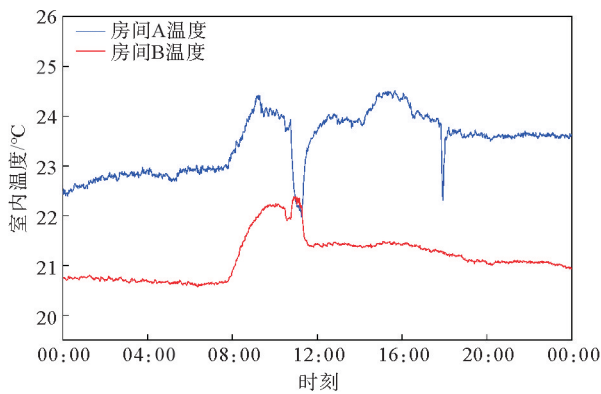


图 6 1 月 5 日室内温度变化

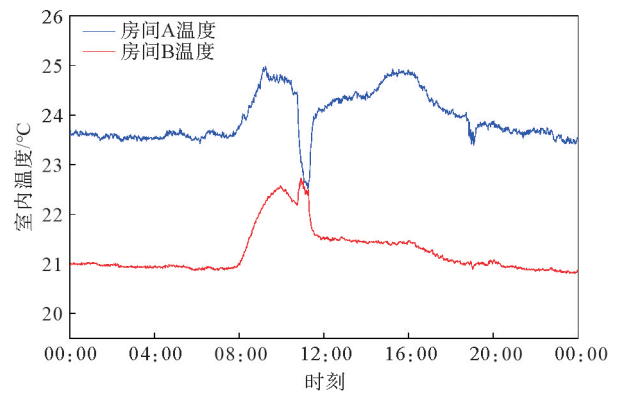


图 7 1 月 6 日室内温度变化

### 2.3.4 连续供暖阶段能效分析

测试期间能效汇总如表 1 所示。1 月 5 日—1 月 7 日,随着室外温度逐日下降,系统总制热量、压缩机功耗及总功耗逐日上升,COP 逐日下降。其中 1 月 5 日与 1 月 6 日室外温度均在 0 ℃ 之上,随着室外温度的下降,总制热量上升 1.0%,总功耗上升 2.9%,变化幅度均较低。1 月 6 日—1 月 7 日室外温度降至 0 ℃ 之下,总制热量上升 1.8%,总功耗上升 6.0%,变化幅度较大。

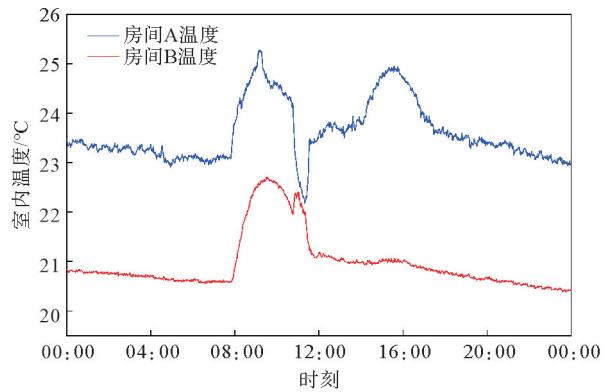


图 8 1 月 7 日室内温度变化

表 1 连续供暖能效汇总

日期	总制热量/(kW·h)	压缩机功耗/(kW·h)	水泵功耗/(kW·h)	总功耗/(kW·h)	室外温度/℃	COP
1 月 5 日	142.83	40.39	1.45	41.84	4.9	3.41
1 月 6 日	144.28	41.62	1.43	43.05	2.3	3.35
1 月 7 日	146.93	44.23	1.42	45.65	-0.3	3.21

### 2.3.5 间歇供暖与连续供暖效果与能效对比

为保证热负荷相近,选取室外平均温度与波动范围均相近的两日。经计算,间歇供暖阶段 12 月 28 日室外温度范围是 1.1~8.2 ℃,平均温度 3.3 ℃;连续供暖阶段 1 月 6 日室外温度波动范围是 -1.0~8.8 ℃,平均温度 2.3 ℃,这两日的室外平均温度与温度范围均相近,故将这两日的供暖效果与能效数据进行对比。

供暖效果方面,连续供暖阶段两个房间的温度较间歇供暖阶段均有上升。其中房间 A 平均温度由 21.2 °C 升至 23.9 °C,涨幅 2.7 °C;最低温度由 19.7 °C 升至 22.5 °C,涨幅 2.8 °C,最高温度由 22.4 °C 升至 25.0 °C,涨幅 2.6 °C。房间 B 平均温度由 19.9 °C 升至 21.2 °C,涨幅 1.3 °C;最低温度由 19.1 °C 升至 20.8 °C,涨幅 1.7 °C;最高温度由 21.1 °C 升至 22.7 °C,涨幅 1.6 °C。由此可见,连续供暖对房间温度的提升效果明显,在此基础上,当风机盘管的送风量较大时,房间温度的提升更为明显。

在功耗方面,1月6日和12月28日的功耗变化如图9和图10所示。从图9、图10中可以看出,这两日室外温度随时间的变化较为相似,1月6日连续供暖(图9),压缩机整体功耗很稳定,除10:00—12:00时间段开启生活热水制备功能外,压缩机其他时段的功耗都与当日平均功耗 1.73 kW·h 差距很小;而12月28日间歇供暖(图10),压缩机功耗波动很大,平均功耗为 1.47 kW·h,较1月6日有所下降,但是压缩机功耗最高的时段与1月6日相同,均为开启生活热水制备功能的10:00—12:00时段。

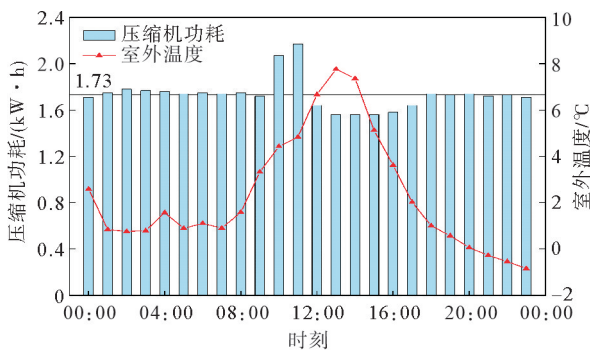


图9 1月6日压缩机功耗的变化

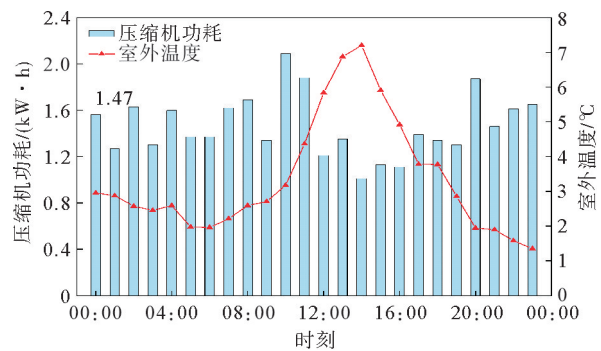


图10 12月28日压缩机功耗的变化

在能效方面,1月6日的总制热量、总功耗与 COP 均高于12月28日,如表2所示,可见在间歇运行工况下,总功耗更低,更加节能,但系统频繁的启停会对空气源热泵的制热能力产生负面影响致使 COP 下降,而在连续运行工况下,压缩机功耗始终维持在稳定水平,更有利于空气源热泵发挥其制热性能, COP 更高。

表2 间歇供暖与连续供暖能效对比

日期	总制热量/(kW·h)	压缩机功耗/(kW·h)	水泵功耗/(kW·h)	总功耗/(kW·h)	室外温度/°C	COP
12月28日	105.57	35.15	1.44	36.59	3.3	2.88
1月6日	144.28	41.62	1.43	43.05	2.3	3.35

### 3 结论

本文实测了户式空气源热泵供暖系统在制备生活热水模式下间歇运行与连续运行两种工况下的供暖效果与能效的变化规律。

1) 连续供暖阶段的系统 COP 更高,更能发挥设备的制热能力,对房间温度的提升效果也更好。间歇供暖阶段由于房间温度达到设定温度后系统会停止运行,系统运行时间少于连续供暖阶段,故功耗明显降低。但系统频繁的启停会导致间歇运行时系统 COP 低于连续运行时的 COP。

2) 生活热水制备功能开启后,三通电磁阀开启,系统循环水流量增大,且大部分流入生活热水水箱中的管壳式换热器加热生活热水,因此压缩机功耗与水泵功率都会出现明显上升。

3) 在生活热水加热期间,因供暖用水大部分用于加热生活热水,流经风机盘管的水流量降低,风机盘管的散热量降低,供暖效果下降,房间温度在此期间会降低。

## 参考文献(References):

- [1] WANG S W, CUI J T. Sensor-fault detection, diagnosis and estimation for centrifugal chiller systems using principal-component analysis method[J]. *Applied Energy*, 2004, 82(3):197-213.
- [2] 黎珍, 邓志扬, 张勇, 等. 环境温度和进水温度对低温空气源热泵性能的影响[J]. *环境技术*, 2023, 41(1):92-97.  
LI Zhen, DENG Zhiyang, ZHANG Yong, et al. Influence of ambient temperature and inlet water temperature on performance of low temperature air source heat pump[J]. *Environmental Technology*, 2023, 41(1):92-97.
- [3] 虞启辉, 王海宇, 王前程, 等. 环境温度对空气源热泵系统制热性能的影响研究[J]. *区域供热*, 2021(3):64-70.  
YU Qihui, WANG Haiyu, WANG Qiancheng, et al. Research on the influence of environmental temperature on the heating performance of air-source heat pump systems[J]. *District Heating*, 2021(3):64-70.
- [4] 陈振豪, 吴静怡, 陆平, 等. 空气源热泵热水器季节性能实验及优化运行研究[J]. *能源技术*, 2005(3):117-119.  
CHEN Zhenhao, WU Jingyi, LU Ping, et al. Optimization of air-source heat pump water heater system based on seasonal performance experiment[J]. *Energy Technology*, 2005(3):117-119.
- [5] 贾恩灿, 王刚, 梁士民, 等. 西北地区复叠式空气源热泵机组应用的现场实测研究[J]. *青岛理工大学学报*, 2024, 45(6):126-135.  
JIA Encan, WANG Gang, LIANG Shimin, et al. A field study on the application of cascade air source heat pump unit in Northwest China[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2024, 45(6):126-135.
- [6] 洪静, 杨桂春, 郝彩侠, 等. 新流程空气源热泵在寒冷地区应用的测试[J]. *暖通空调*, 2010, 40(5):118-120.  
HONG Jing, YANG Guichun, HAO Caixia, et al. Performance testing of a new flow ASHP system in cold regions[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2010, 40(5):118-120.
- [7] 杨景洋, 梁思源, 彭泽焱, 等. 严寒地区空气源热泵供暖运行性能研究[J]. *制冷与空调*, 2020, 20(10):73-77.  
YANG Jingyang, LIANG Siyuan, PENG Zehan, et al. Study on heating operation performance of air source heat pump in severe cold area[J]. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2020, 20(10):73-77.
- [8] KONRAD M E, MACDONALD B D. Cold climate air source heat pumps: Industry progress and thermodynamic analysis of market-available residential units[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 188:113739.
- [9] 吴学红, 徐帅, 桂许龙, 等. 供水温度对低温空气源热泵制热性能的影响[J]. *制冷学报*, 2019, 40(3):66-71.  
WU Xuehong, XU Shuai, GUI Xulong, et al. Effect of water supply temperature on the performance of low temperature air source heat pump system[J]. *Journal of Refrigeration*, 2019, 40(3):66-71.
- [10] 袁朝阳, 陶乐仁, 虞中旸. 初始水温对空气源热泵热水器系统性能的影响[J]. *制冷学报*, 2017, 38(6):73-79.  
YUAN Zhaoyang, TAO Leren, YU Zhongyang. Effect of initial water temperature on the performance of air-source heat pump water heater system[J]. *Journal of Refrigeration*, 2017, 38(6):73-79.
- [11] 王晓东, 张晨阳, 张哲, 等. 空气源热泵性能的实验研究[J]. *暖通空调*, 2014, 44(5):119-123.  
WANG Xiaodong, ZHANG Chenyang, ZHANG Zhe, et al. Experimental research on performance of air-source heat pumps[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2014, 44(5):119-123.
- [12] WU C L, LIU F, LI X F, et al. Low-temperature air source heat pump system for heating in severely cold area: Long-term applicability evaluation[J]. *Building and Environment*, 2022, 208:108594.
- [13] LIU Y R, NAN X H, HAN H, et al. The variable water temperature control strategy of the air-source heat pump compatible with floor heating system for an apartment[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 90:109440.
- [14] 汪保利, 林木森, 李天普, 等. 空气源热泵集中供暖系统调节理论分析[J]. *制冷与空调*, 2024, 24(4):73-79.  
WANG Baoli, LIN Musen, LI Tianpu, et al. Theoretical analysis on regulating modes of air source heat pump system for central heating[J]. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2024, 24(4):73-79.
- [15] 蒋浩, 雷鹏飞. 空气源热泵热水器用水习惯分析与节能策略[J]. *制冷*, 2023, 42(4):28-31.  
JIANG Hao, LEI Pengfei. Water usage habits analysis and energy-saving strategies for air source heat pump water heaters[J]. *Refrigeration*, 2023, 42(4):28-31.
- [16] GB/T 50331—2002, 城市居民生活用水量标准[S]. 2023年版.  
GB/T 50331—2002, The standard of domestic water consumption for urban residents[S]. 2023 ed.
- [17] 张磊, 陈超, 梁万军. 居民平均日热水用量研究与分析[J]. *给水排水*, 2006(9):66-69.  
ZHANG Lei, CHEN Chao, LIANG Wanjun. Research and analysis on average daily domestic hot water consumption of residents[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2006(9):66-69.
- [18] 王伟. 风机盘管机组:CN105352049A[P]. 2016-02-24.  
WANG Wei. Fan coil unit:CN105352049A[P]. 2016-02-24.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)