

北京猪舍空气源热泵供暖的可行性

王 华¹, 易 路^{1,2}, 吴中红¹, 刘继军¹, 王美芝^{1*}

(1. 中国农业大学动物科技学院, 北京 100193; 2. 重庆市巫山县庙宇镇人民政府, 重庆 404100)

摘 要: 随着各界对环境保护的重视, 猪场迫切需要找到低成本的节能减排供暖方式。该研究把空气源热泵 (Air Source Heat Pump, ASHP) 供暖系统安装在猪舍里, 通过测量供回水温度和能效比 (Coefficient of Performance, COP), 分别比较了 ASHP 供暖系统与直接电加热的节能率, 以及 ASHP 供暖系统与直接电加热的电锅炉、管道天然气和液化天然气 (Liquefied Natural Gas, LNG) 的供暖运行费用。结果表明: 试验期间, 在北京供暖期室外平均温度为 0.1 °C 时, ASHP 系统的 COP 为 2.86。与直接电供暖相比, ASHP 供暖系统节能率为 66%。ASHP、电锅炉、管道天然气和 LNG 供暖运行费用单位能源价格分别为 0.22、0.62、0.34 和 0.37 元/kW·h。在猪舍供暖中, ASHP 系统具有降低能耗与减少 CO₂ 排放的潜力, 是一种经济、清洁的可替代燃煤的供暖方式。

关键词: 供暖; COP; 猪舍; 空气源热泵; 室内温度; 节能减排

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.027

中图分类号: S817.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-19-0236-07

王华, 易路, 吴中红, 等. 北京猪舍空气源热泵供暖的可行性[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 236-242.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.027 <http://www.tcsae.org>

Wang Hua, Yi Lu, Wu Zhonghong, et al. Feasibility of the air source heat pump system for heating swine houses in Beijing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(19): 236-242. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.027 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

中国政府加大了环境保护力度, 制定了相关法规, 例如“京津冀及周边地区 2017 年大气污染防治工作方案”^[1]。在中国北方地区煤炭被曾广泛应用于冬季采暖, 但出于环保考虑, 自 2017 年起, 中国北方地区开展实施冬季清洁取暖重点工程, 全面禁止煤炭在冬季供暖中的使用。为了降低冬季建筑物能耗指标, 减少建筑物运行阶段碳排放量, 人们不仅在工业和民用建筑领域, 同时还在畜舍中应用了建筑节能措施。当畜舍建筑保温隔热性能达到居住建筑节能设计标准限定值后, 畜舍采用一条新的节能减排途径就显得尤为重要。对于猪舍, 特别是保育猪来说, 由于保育猪身体虚弱, 不能承受冷热应激, 因此冬季猪舍仍需额外增加热源供暖, 清洁可再生能源将是猪舍供暖的最佳选择。采用热泵作为热源系统时, 根据热源的类型, 热泵系统可划分为三类: 地源热泵系统、空气源热泵系统和水源热泵系统^[2]。一些研究人员研究了地源热泵在畜牧业中的应用^[3-4], 并观察到一些局限性: 第一点是地热投资费用较高; 第二点是由于城市规划 and 环境保护等原因, 当猪场搬迁时, 地热设施难以

拆除, 不适用于猪场应用。同时, 随着地源热泵的使用, 地下土壤中会出现冷热堆积现象, 从而影响地下土壤温度场的热平衡, 地下土壤温度场长期无法得到恢复, 最终造成热泵系统换热效率大幅下降^[5]。此外, 设计不当的地源热泵会增加运营成本, 通常无法提供预期的减排效果^[6]。水源热泵同时被限制在北京及其周边地区使用。因此, 地源热泵与水源热泵系统不适用于这些地区的猪舍供暖。

空气源热泵是居住建筑供暖的一种选择, 越来越多的地区, 如欧盟、日本和中国将空气源热泵作为一种可再生能源系统^[7]。空气源热泵系统提供的冷热负荷大于其消耗的耗电量^[8], 为缓解北京及周边地区冬季燃煤排放造成的严重大气污染问题, Le 等^[9]提出了一种基于空气源热泵的冬季空间供暖方案。Zhang 等^[10]对低温空气源热泵供热系统与其它供热方式进行了技术经济比较。为提高北方农村地区居民住宅空气源热泵系统 COP, Nie 等^[11]研究了空气源热泵的不同氢氟碳制冷剂。在温暖地区, 由于采暖效果好, 冬季室外气温较高, 热负荷较低, 空气源热泵运行平稳高效^[6,12]。当室外空气温度持续几个月远低于冰点时, 将显著降低空气源热泵系统的制热能力^[12]。然而, 其他研究表明低温空气源热泵供热系统是最经济的方式^[10,13]。空气源热泵系统中末端系统形式多为风机盘管或者地板辐射供暖^[14]。辐射供暖系统因其节能潜力和较高的热舒适性而在建筑中得到广泛应用^[15]。空气源热泵系统末端采用地板辐射供暖的房间热舒适性最好^[16]。地板采暖是一种节能的显热采暖系统, 适用于低能耗建筑。为了节约能源, 建筑保温与利用可再生能源一起成为一种主导策略^[17]。到目前为止, 还没有关于空气源热泵在畜牧业中应用的研究。一些地面供暖试验只关注仔猪的福利^[18]。且室

收稿日期: 2021-06-09 修订日期: 2021-09-15

基金项目: 国家重点研发项目-特色地方猪高效安全养殖技术应用与示范 (2018YFD0501200); 生猪产业技术体系北京市创新团队项目 (BAIC02-2021)

作者简介: 王华, 博士生, 研究方向为畜牧工程与畜牧环境。

Email: wanghuatzlm@163.com

*通信作者: 王美芝, 副教授, 博士生导师, 研究方向为畜牧工程与畜牧环境。Email: meizhiwang@cau.edu.cn

内温度一般取地面上 1.5 m 处的温度，不是生猪生活区的实际温度。

为了解空气源热泵在北京某猪舍的供暖效果及可行性，本文对空气源热泵在猪舍地板辐射供暖中的应用效果进行了试验研究。

1 材料与方法

1.1 试验房舍的基本情况

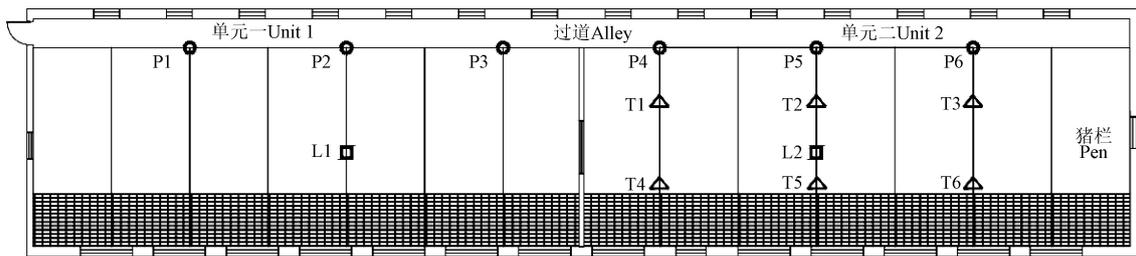
空气源热泵（Air Source Heat Pump, ASHP）供暖系统于 2016 年 11 月 5 日至 14 日建成，并在 2016 年 11 月 15 日至 2017 年 4 月 16 日期间对其性能进行了监测。

在北京市顺义区某保温猪舍进行了空气源热泵应用效果试验。试验猪舍呈南北走向，外围尺寸长 42 m，宽 9.3 m。南墙、北墙和东墙墙体厚度为 0.37 m，西墙墙体厚度为 0.24 m，墙体外侧均做 90 mm 挤塑聚苯板（B1 级）作为外保温，檐口高度 2.9 m，双坡屋顶材料为 100 mm 彩钢夹芯板。猪舍有 2 个相通单元，1 个单元有 7 个猪栏（每个猪栏宽 3 m、长 7.5 m），且每个猪栏安装长 2 m、宽 3 m 的漏缝地板（条宽 80 mm、缝宽 20 mm）。南北各有 14 个单层金属框外窗（南 13 个 2.00 m × 1.45 m、1 个 1.15 m × 1.15 m；北 14 个 1.00 m × 0.80 m）；东有 1 个

单层金属框外窗（1.18 m × 1.07 m）；西有 1 个单层金属框外窗（0.74 m × 1.17 m）。一个双层金属框西门（0.90 m × 1.77 m）。猪舍通风方式为自然通风，改造前猪舍的供暖能源为煤。为了评估空气源热泵系统在制热量、节能减排方面的可行性，分别将两台空气源热泵命名为 ASHP1 和 ASHP2，对试验猪舍进行供暖。供暖系统末端形式为地板辐射，饲养方式为地面（半漏缝地板）养殖，空气源热泵-地板辐射供暖系统适用于水泥地面猪舍，不适用于全漏缝地板猪舍。地暖管直径为 20 mm 的 PE-RT 管，在猪舍内的布置为 6 进 6 回。

猪舍的两个单元共有 442 头仔猪，仔猪的日龄为 61 d。2017 年 1 月 3 日至 2017 年 1 月 20 日对猪舍环境指标进行监测，猪舍内部环境测点见图 1、图 2。温湿度自动记录仪器型号为 Apresys 179A-TH（测量范围：0~100%和-40~100℃，测量误差：精度±2%和±0.2℃，分辨率 0.01%RH、0.01℃，艾普瑞（上海）精密光电有限公司），二氧化碳自记仪型号为 EZY-1S（测量范围：0~9 800 mg/m³，测量误差：精度±150 mg/m³，北京天建华仪科技发展有限公司）。

2017 年 1 月 8 日，2 单元的猪被运出，1 单元只饲养了 194 头猪。



注：●为 P1~P6 在猪舍内有猪时的两个单元内，分别在 0.3、0.8、1.2 和 1.5m 的高度处标明垂直测温点；■为 L1, L2 表示猪舍内温湿度和二氧化碳测点，高度 1.2m；△为 T1~T6 表示猪舍内 2 单元无猪时，地面、0.3、0.8 和 1.2m 高度的垂直测温点，下同。
Note: ● are P1-P6 indicate vertical temperature measuring points at height of 0.3, 0.8, 1.2 and 1.5 m in two Units with pigs in the pig house; ■ are L1, L2 indicate measuring points of indoor temperature, RH and CO₂ at height of 1.2 m; △ are T1-T6 indicate vertical temperature measuring points at height of 0, 0.3, 0.8 and 1.2 m in Unit2 without pigs in the pig house. The same below.

图 1 环境测点俯视图

Fig.1 Overhead view of environmental measuring points

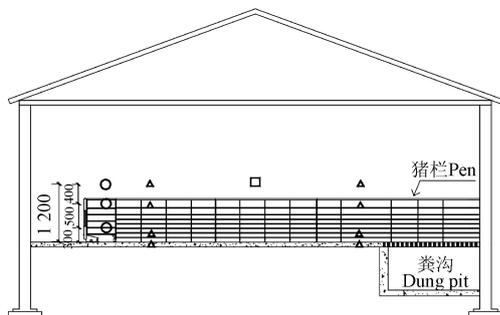


图 2 测点断面布置

Fig.2 Section arrangement of measuring points

1.2 空气源热泵系统设置

根据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》^[19]（GB50736-2012）北京地区冬季采暖室外计算温度为-7.6℃，在此温度下，猪舍供暖热负荷为 12.0 kW，舍

内设计温度 20℃，考虑管网输送效率，取安全系数为 1.3，则热负荷需要配置 15.6 kW。采用低温空气源热泵（WBC-19.5H-A-S（BC-L1））作为猪舍的试验加热设备。

北京室外极端最低气温可达-15℃以下，两台空气源热泵在干球温度为-7℃时的制热量为 22.4 kW，在干球温度为-15℃时的制热量为 20.2 kW（设备厂参数）。两台空气源热泵理论上满足供热负荷要求。两台空气源热泵对蓄热容量约 1 000 L 的水箱中的水进行加热，水箱中的热水被水泵送至猪舍加热。当水箱中的水温低于设定温度时，空气源热泵（一个或两个）通过 ASHP1（空气源热泵 ASHP1 的水泵叫 K1）或/和 ASHP2（空气源热泵 ASHP2 的水泵叫 K2）工作加热循环系统中的水，为水箱提供热水。当水箱中的水温高于设定温度时，空气源热泵将停止工作，而水箱中的水仍将被水泵（系统泵，K3）送以加热猪舍。空气源热泵系统见图 3。

1.3 空气源热泵供暖系统测点及试验器材

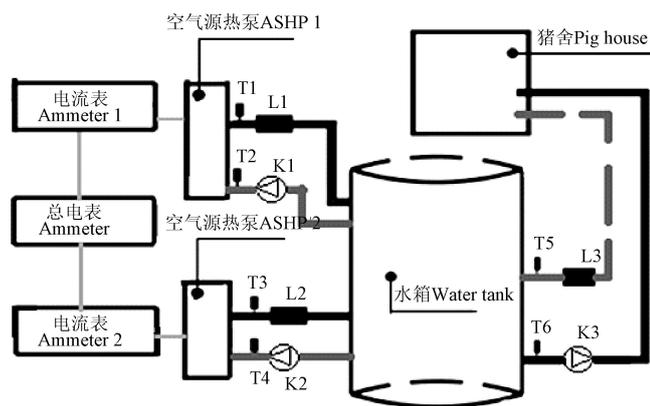
1.3.1 ASHP1、ASHP2 和空气源热泵总供暖系统

为评价单台空气源热泵和空气源热泵总系统 (Gross System, GS) 的性能, 在空气源热泵总系统中的供回水管中设置 6 个温度测点 (T1~T6), 以测量供回水温度。水温由 Pt100 温度传感器 (KZW/P-231, 测量范围 0~60 °C, 精度 0.15 °C, 允差值±1.5 °C, 北京昆仑中大传感器技术有限公司) 监测。设置三个循环水流量测点, 分别用三个流量计 L1、L2 及 L3 测量 ASHP1、ASHP2 和 GS 的水流量。L1、L2 流量计型号为 DMF-1-5-A 科氏力质量流量计(测量范围: 0~100 L/min, 北京首科实华自动化设备有限公司), L3 流量计型号为 DMF-1-5-B 科氏力质量流量计(测量范围: 0~150 L/min, 北京首科实华自动化设备有限公司)。所有水温和水流量数据均由 PLC 系统显示和记录。三台电能记录仪 (RN1-DN, 精度电流 0.5 级, 测量范围 AC220 V、AC380 V, 分辨率 0.01 kW·h, 工作温湿度-10~50 °C、≤93%RH, 上海瑞昕科技有限公司) 分别监测 ASHP1、ASHP2 和 GS 的用电量, 其仪器为电流表 1 (Ammeter1)、电流表 2 (Ammeter2)、总电流表 (General ammeter)。试验系统与应测点位置见图 4。



图 3 空气源热泵供暖系统

Fig.3 Air source heat pump heating system



注: T1~T6 为温度测点; K1~K3 为水泵; L1~L2 为流量计。
Note: T1-T6 is the temperature measuring point; K1-K3 is the water pump; L1-L2 is the flow meter.

图 4 空气源热供暖系统与测点

Fig.4 Air source heat pump heating system and measuring points

1.3.2 空气源热泵同性能指标

每隔 1 min 记录 ASHP1、ASHP2 和 GS 的性能指标, 包括耗电量、回水流量、供水和回水温度。每隔 5 min 记

录一次室外温度和相对湿度。从数据记录器系统中记录了三台不同水泵的供水和回水温度、三台不同水泵的水流量、单个空气源热泵和 GS 的用电量。

1.4 空气源热泵 COP 计算方法

采用能效比 (Coefficient of Performance, COP) 对 ASHP 和 GS 的性能进行了测试:

$$\text{COP} = \frac{Q_h}{W} \quad (1)$$

式中 Q_h 是单位时间内的名义制热量, kW, W 表示单位时间内空调器所消耗的功率, kW。

1.5 空气源热泵与电锅炉供暖的节能减排比较

直接电锅炉供热是替代燃煤供暖的另一种供热方式。直接电锅炉的效率通常大于 95%^[20]。假设猪舍采用直接电锅炉加热, 常规电锅炉的热效率为 100%, 直接电锅炉供暖的电能消耗将等于不计量系统水泵(K3)的 GS 供热量。可测量 ASHP 供暖系统的实际电能消耗。针对各种热水系统需要系统循环水的特点, 可以比较了无系统水泵时, GS 与直接电锅炉的电能消耗。因此, 与直接电锅炉相比, ASHP 的节能率可由式 (2) 计算得出。

$$\text{节能率} = (E_{EB} - E_{GS}) / E_{EB} \quad (2)$$

式中 E_{EB} 为直接电锅炉加热的用电量, kW·h; E_{GS} 为无系统泵 GS 的用电量, kW·h。

华北地区电网二氧化碳排放因子, 每 1 kW·h 单位用电量产生 0.547 kg 二氧化碳排放量^[21]。

与直接电锅炉相比, 不带系统水泵的 GS 的 CO₂ 减排量 (kg) 可用公式 (3) 计算。

$$\text{减排量} = (E_{EB} - E_{GS}) \times 0.547 \quad (3)$$

式中 E_{EB} 和 E_{GS} 的含义与式 (2) 相同, 减排率与节能率相同。

1.6 不同能源供暖运行费用分析

北京地区新建养猪场和既有养猪场冬季供暖主要采用电、液化天然气 (Liquefied Natural Gas, LNG) 或管道天然气作为能源供应主体。其中供热系统形式分别为空气源热泵系统, 电锅炉系统, 液化天然气 LNG 和管道天然气系统。供暖能源的选择应根据猪场所在区域的政策、可利用能源种类、能源价格、末端供暖方式等经过经济技术比较确定。因设备初期投资不方便估算, 本文不进行设备固定资产投资的比较。本文主要分析采用不同供热系统形式冬季供暖时的运行费用, 为方便比较, 将采用电锅炉、液化天然气 LNG 和管道天然气按照使用的能源价格折算为同一能源的单位价格, 即折算为“元/kW·h”。液化天然气 LNG^[22]和管道天然气^[23]使用的能源热值分别按照 31.4 和 39.6 MJ/kg (6 个 LNG 实例实测值的平均)。北京地区猪场峰谷电价日平均值为 0.62 元/kW·h^[24]。北京地区液化天然气 LNG 和管道天然气价格分别按照 4.1 元/kg (估计值, 随市场起伏不定) 和 3.0 元/m³ (供暖天然气价格 2.54 元/m³, 配气价格 0.46 元/m³)^[25]。空气源热泵系统耗电量根据公式 (1) 进行计算。猪舍末端供暖方式不同, 供暖系统的热效率也不同, 本文不讨论猪舍末端供暖方式, 统一假定电锅炉供暖系统、管道天然气和液化

天然气 LNG 供暖的热效率均为 100%。

1.7 不确定性分析

试验不确定度分析是评价试验测量和结果的关键^[26]。基于多个自变量计算结果时产生的试验不确定性(W_R):

$$W_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} W_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} W_2\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} W_3\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} W_n\right)^2} \quad (4)$$

式中结果 R 是自变量 x_1, x_2, \dots, x_n 的给定函数, W_1, W_2, \dots, W_n 是自变量中的不确定性。

1.8 统计分析

数据采用 ANOVA 统计分析系统的线性回归分析 (SPSS 21, Excel 2010)。结果以平均值±均值标准差表示, $P < 0.05$ 为差异显著性判断标准。

2 结果和分析

2.1 室内外温度、相对湿度和二氧化碳浓度

文献[27]分析了 2017 年 1 月 3 日至 2017 年 1 月 20 日空气源热泵系统供暖期间室内环境指标和空气源热泵地面供暖时猪舍内不同高度的温度分布规律。未对舍内二氧化碳浓度进行详细分析。

图 5 可以看出, 2017 年 1 月 3 日至 2017 年 1 月 20 日期间, 室外、单元一和单元二 CO_2 平均浓度分别为 (785 ± 253) 、 $(4\ 239 \pm 2591)$ 和 $(6\ 503 \pm 991) \text{mg/m}^3$ 。猪舍内部 CO_2 浓度最高值出现于 2017 年 1 月 7 日数值为 $13\ 075 \text{mg/m}^3$, 1 月 7 日受到暴雪影响舍内气窗关闭。供暖系统形式主要影响舍内垂直方向温度分布, 合理的末端系统形式有利于缓解舍内垂直方向温度分层现象。精准调控动物活动区微环境, 弱化舍内背景空间负荷的供暖系统形式, 有利于畜舍节能减排。

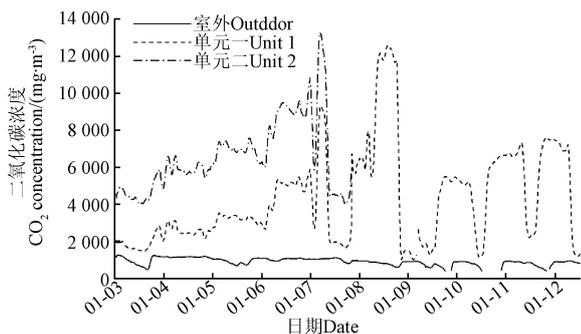


图 5 2017 年舍内二氧化碳浓度

Fig.5 The CO_2 concentration in 2017 in swine house

通过对猪舍内外环境指标分析表明, 该供暖方式基本能够满足仔猪对温度、空气质量的要求。北京市采用空气源热泵地面地板辐射系统供暖基本可行。

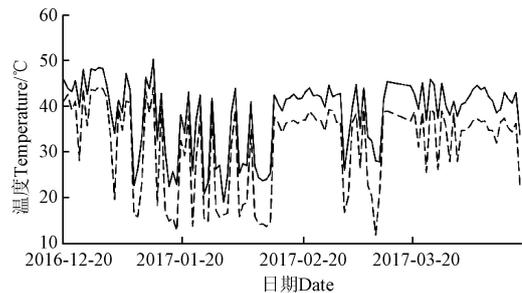
2.2 空气源热泵系统供回水温度

2016 年 12 月 20 日至 2017 年 4 月 16 日 (每 10 min 一次数据), 供热系统设定温度被设定和更改 14 次, 温度设定从最低 $33\text{ }^\circ\text{C}$ 到最高 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 。不同空气源热泵供暖系统的供回水温度如图 6 所示。

图 6 结果表明, 试验期间 GS 的平均供水温度为 $(37.6 \pm 2.4)\text{ }^\circ\text{C}$, 平均回水温度为 $(34.9 \pm 2.2)\text{ }^\circ\text{C}$ 。ASHP2 的平均供水温度为 $(38.3 \pm 7.1)\text{ }^\circ\text{C}$, 平均回水温度为 $(31.0 \pm 9.0)\text{ }^\circ\text{C}$ 。



a. 空气源热泵总系统水温
a. Temperature of ASHP water



b. 第二台空气源热泵水温
b. Temperature of ASHP2 water

图 6 空气源热泵系统相关的温度

Fig.6 Temperatures related to ASHP system

2.3 空气源热泵供暖系统性能指标

2.3.1 空气源热泵的运行

2016 年 12 月 19 日至 2017 年 3 月 30 日, 单个空气源热泵平均每天在各个时段 1 h 内的平均运行时间 (102 d 中每分钟的数据), 以及每天 ASHP1 和 ASHP2 在 1 h 内的运行时间之和如图 7 所示。

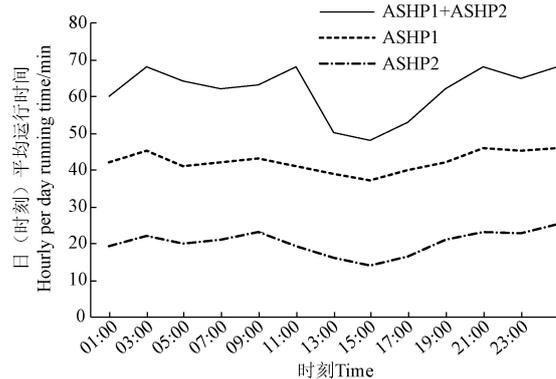


图 7 空气源热泵日 (时刻) 平均运行时间

Fig.7 Hourly per day running time of ASHP

由图 7 可以看出, 在 24 h 循环中, 有 16 h 的 ASHP1 和 ASHP2 在 1 h 内运行时间总和超过 60 min ($61.1 \sim 66.7 \text{ min}$)。ASHP1 和 ASHP2 在 1 h 内的运行时间之和在每日基础上少于 60 min ($46.7 \sim 58.7 \text{ min}$) 的只有 8 h。因此, 每天约 8 h 只需一台空气源热泵就可为猪舍供暖, 一天约 16 h 需两台空气源热泵。在整个供暖期间, 供暖系统主要由 ASHP1 工作。

2.3.2 不确定性分析

试验得到供水温度、回水温度、室内温度、室外温度、用电量、水流量和 COP 的不确定度为 0.10%~2.41%。与其他试验结果比较,不确定度范围为 0.5%~12.2%,均在可接受范围内^[28]。

2.3.3 空气源热泵系统的 COP 分析

2016年12月19日至2017年4月3日,记录 ASHP1、ASHP2 和 GS 每分钟的用电量、供水温度、回水温度和流量。ASHP1、ASHP2、GS 原始数据量与有效数据量水温度、流量和室外温度组成。如表 1 所示。

表 1 用于分析的数据量
Table 1 Data numbers for analysis

数据类型 Data type	ASHP1	ASHP2	GS	室外温度 Outdoor temperature
原始数据组 Original data group	124 710	124 654	124 755	25 736
有效数据组 Valid data group	56 160	71 280	110 880	25 736

将表 1 中按每 1 或 5 min 计算的有效数据转换为按每小时计算的数据。由于每种水暖系统都会有一台供暖系统循环水泵(系统泵),因此在计算无系统水泵的 GS 的 COP 时,从整个供暖系统的耗电量中减去供暖系统循环水泵的耗电量(图 4 中的 K3)。由于 ASHP1 温度测量系统存在一些问题,本文没有给出 ASHP1 的 COP。无系统水泵 GS 的 COP 与室外温度的关系(每小时数据)和 ASHP2 的 COP 与室外温度的关系(每小时数据)如图 8 所示。

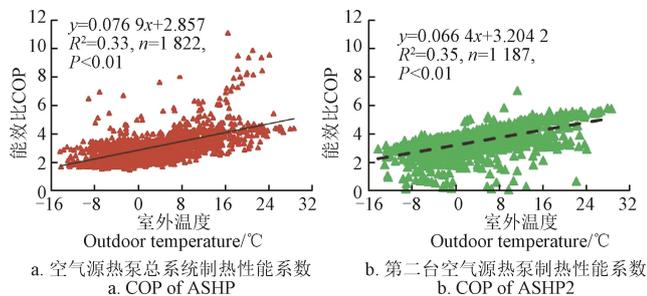


图 8 空气源热泵总系统和 ASHP2 的制热性能系数

Fig.8 Coefficient of Performance (COP) of the gross system and ASHP2

图 8 显示,无水泵 GS 的 COP 和 ASHP2 的 COP 均随室外温度升高而增加。在试验期间,室外最低温度为 -14.5 °C,此时无水泵 GS 和 ASHP2 的 COP 分别为 (3.04±1.05) 和 (3.40±0.91)。根据图 8 中的回归公式,可以计算出无泵 GS 的 COP 和不同室外温度下 ASHP2 的 COP。北京地区冬季采暖期室外平均温度为 0.1 °C,无水泵 GS 的 COP 为 2.86, ASHP2 的 COP 为 3.21。

室外冷空气在空气源热泵蒸发器翅片表面结霜将影响空气源热泵系统的换热效率。当室外空气相对湿度为 27%~37%时^[13],蒸发器表面冷空气露点温度较低,不宜结霜,同时伴随着空气源热泵系统应用技术的发展,蒸发器表面除霜的相关设备得到相应研发,为蒸发器表面结霜问题提供了技术支撑。研究表明,当室外空气温

度从 -4.0 °C 上升到 10.0 °C 时,采用新型辐射对流供暖终端并与 ASHP 系统耦合时, ASHP 的 COP 呈线性上升,上升率为 0.04%^[29]。根据文献[30]表明,当室外温度为 0 °C 时,空气源热泵的 COP 约为 2.4;当室外温度为 -10 °C,供水温度为 45 °C 时,空气源热泵的 COP 约为 1.92。北京地区空气源热泵系统为猪舍供暖具有可行性。

2.4 空气源热泵的节能减排量

根据无水泵 GS 的耗电量、直接电锅炉的耗电量计算系统节能率。无水泵 GS 的平均耗电量为 (4.35±2.02) kW·h (实测),无水泵 GS 的平均供热量为 (11.79±3.33) kW (实测),直接电锅炉的耗电量为 (11.79±3.33) kW·h (理论计算)。与直接电锅炉供热系统相比,GS 无水泵供热系统平均每小时节能 64%±10%。

2016年12月20日至2017年4月3日,根据无水泵 GS 的有效用电量数据和有效供热量数据,无水泵 GS 的总用电量为 7 997.7 kW·h,电锅炉供热系统理论计算总耗电量为 23 785.1 kW·h。与直接电锅炉供热系统相比,空气源热泵系统节能率约为 66%。根据有效数据,试验期内 CO₂ 减排量为 8 636 kg。

2.5 不同能源运行费用分析

在禁止燃煤供暖形势下,北京地区猪场采用空气源热泵、电锅炉、管道天然气和液化天然气 LNG 供暖的运行费用见表 2。

表 2 北京地区猪场不同能源供暖时的单位能源价格
Table 2 Energy price per unit of heating for different heating energies in pig farms in Beijing area

能源种类 Energy type	燃烧热值 Combustion heat value/MJ	单位能源价格 Energy price per unit/元	燃烧热值 Combustion heat value/(kW·h)	折合同一单位能源价格 Energy price at the same unit of energy/(元·kW·h ⁻¹)
天然气 Natural gas	31.4	3	8.79	0.34
液化天然气 LNG	39.6	4.1	11.1	0.37
电锅炉 Electric boiler	-	0.62	1	0.62
空气源热泵 ASHP	-	0.22	1	0.22

注:空气源热泵北京地区供暖期平均 COP=2.86。

Note: The average COP of air source heat pump during heating period in Beijing area is 2.86.

由表 2 可知,在北京地区及现有能源价格体系情况下,空气源热泵系统的供暖运行费用最低(0.22 元/kW·h),电锅炉的供暖费用最高(0.62 元/kW·h),液化天然气 LNG 与管道天然气供暖的运行费用分别为 0.37 和 0.34 元/kW·h,但从运行费用经济性比较,空气源热泵供暖为首选供暖方式。但是,空气源热泵供暖时,猪舍末端系统形式一般匹配地板辐射供暖,而该种猪舍末端供暖方式和地面养猪相对应,即猪舍内采用部分漏缝地板部分水泥实体地面养殖时,供暖系统末端系统形式可以配置地板辐射供暖,热源选择空气源热泵。对于采用全漏缝地板的猪舍,一般猪舍末端供暖方式采用热风供暖,热风供暖一般不适宜采用空气源热泵热水地面供暖,猪舍内采用风机盘管供暖时,也可以选择空气源热泵供暖。电锅炉、

管道天然气和液化天然气 LNG 都可以用于全漏缝地板猪舍热风或热水供暖。

3 结 论

1) 北京地区供暖期室外平均温度为 0.1 °C 时, 空气源热泵系统能效比为 2.86。

2) 空气源热泵系统与电锅炉供暖系统相比, 空气源热泵的节能率约为 66%, 试验猪舍试验期间 CO₂ 减排量为 8 636 kg。

3) 在北京地区及现有能源价格体系情况下, 空气源热泵系统的供暖运行费用最低 (0.22 元/kW·h), 电锅炉的供暖费用最高 (0.62 元/kW·h), 液化天然气与管道天然气供暖的运行费用分别为 0.37 和 0.34 元/kW·h。

[参 考 文 献]

- [1] MEE C. Air pollution prevention and control program in Beijing, Tianjin, Hebei and its surrounding areas from 2017 to 2018[J/OL]. [2021-05-15] <http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201708/W020170824378273815892.pdf>, 2017.
- [2] Deng J, Wei Q, Liang M, et al. Does heat pumps perform energy efficiently as we expected: Field tests and evaluations on various kinds of heat pump systems for space heating[J]. *Energy and Buildings*, 2019, 182:172-186.
- [3] Islam M M, Mun H-S, Bostami A B M R, et al. Evaluation of a ground source geothermal heat pump to save energy and reduce CO₂ and noxious gas emissions in a pig house[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 111: 446-454.
- [4] Borge-Diez D, Colmenar-Santos A, Pérez-Molina C, et al. Geothermal source heat pumps under energy services companies finance scheme to increase energy efficiency and production in stockbreeding facilities[J]. *Energy*, 2015, 88: 821-836.
- [5] Capozza A, Zarrella A, De Carli M. Long-term analysis of two GSHP systems using validated numerical models and proposals to optimize the operating parameters[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 93: 50-64.
- [6] Rui Y, Garber D, Yin M. Modelling ground source heat pump system by an integrated simulation programme[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 134: 450-459.
- [7] Wang R Z, Jin Z Q, Zhai X Q, et al. Investigation of annual energy performance of a VWV air source heat pump system[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 85: 383-394.
- [8] Qunli Z, Lin Z, Yinlong L. Suitability analysis of the heating method of low temperature air source heat pump applied in North China[J]. *Energy Procedia*, 2017, 105: 2569-2574.
- [9] Le H, Li H, Jiang Y. Using air source heat pump air heater(ASHp-AH) for rural space heating and power peak load shifting[J]. *Energy Procedia*, 2017, 122: 631-636.
- [10] Zhang Q, Zhang L, Nie J, et al. Techno-economic analysis of air source heat pump applied for space heating in northern China[J]. *Applied Energy*, 2017, 207: 533-542.
- [11] Nie J, Li Z, Kong X, et al. Analysis and comparison study on different HFC refrigerants for space heating air source heat pump in rural residential buildings of North China[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 205: 1201-1206.
- [12] Amirirad A, Kumar R, Fung A S, et al. Experimental and simulation studies on air source heat pump water heater for year-round applications in Canada[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 165:141-149.
- [13] Zhang Y, Ma Q, Li B, et al. Application of an air source heat pump (ASHp) for heating in Harbin, the coldest provincial capital of China[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 138: 96-103.
- [14] Zhang L, Dong J, Jiang Y, et al. An experimental study on frosting and defrosting performances of a novel air source heat pump unit with a radiant-convective heating terminal[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 163: 10-21.
- [15] Lin B, Wang Z, Sun H, 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.
- [16] Hu B, Wang R Z, Xiao B, et al. Performance evaluation of different heating terminals used in air source heat pump system[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, 98: 274-282.
- [17] Cvetković D, Bojić M. Optimization of thermal insulation of a house heated by using radiant panels[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 85: 329-336.
- [18] Malmkvist J, Pedersen L J, Damgaard B M, et al. Does floor heating around parturition affect the vitality of piglets born to loose housed sows?[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2006, 99: (1/2), 88-105.
- [19] 中国国家标准委员会. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB50736-2012[S]. 北京: 中国标准化出版社, 2012.
- [20] Latorre-Biel J I, Jiménez E, García J L, et al. Replacement of electric resistive space heating by an air-source heat pump in a residential application. Environmental amortization[J]. *Building and Environment*, 2018, 141: 193-205.
- [21] 马翠梅, 王田. 国家温室气体清单时间序列一致性和 2005 年清单重算研究[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(6): 641-648.
- [22] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 天然气: GB17820-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [23] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 液化天然气的一般特性: GB/T 19204-2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [24] 北京市发展和改革委员会. 电价.[EB/OL]. [2021-01-01]. <http://fgw.beijing.gov.cn/bmcx/djcx/jzldj/202012/P020201231616455448435.pdf>.
- [25] 北京市发展和改革委员会. 燃气价格.[EB/OL]. (2019-11-15). [2021-05-15] http://fgw.beijing.gov.cn/bmcx/djcx/jzldj/202003/t20200331_1752797.htm.
- [26] Hepbasli A, Akdemir O. Energy and exergy analysis of a ground source (geothermal) heat pump system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(5): 737-753.
- [27] 王美芝, 易路, 刘继军, 等. 空气源热泵用作北京保育猪舍地暖的供暖效果研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(4): 203-210.
Wang Meizhi, Yi Lu, Liu Jijun, et al. Study on heating effect of air source heat pump for floor heating of nursery pig house in Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(4): 203-210. (in Chinese with English abstract)

- [28] Shen J, Guo T, Tian Y, et al. Design and experimental study of an air source heat pump for drying with dual modes of single stage and cascade cycle[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 129: 280-289.
- [29] Dong J, Zhang L, Deng S, 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.
- [30] Li Y, Li W, Liu Z, et al. Theoretical and numerical study on performance of the air-source heat pump system in Tibet[J]. *Renewable Energy*, 2017, 114: 489-501.

Feasibility of the air source heat pump system for heating swine houses in Beijing

Wang Hua¹, Yi Lu^{1,2}, Wu Zhonghong¹, Liu Jijun¹, Wang Meizhi^{1*}

(1. *College of Animal Science and Technology, China Agriculture University, Beijing 100193, China;*

2. *People's Government of Miaoyu Town, Wushan County, Chongqing 404100, China*)

Abstract: Coal has been widely used in many aspects in northern China. Nevertheless, urgent environmental protection has been required to prohibit the coal combustion for the heating source in winter since 2017. The application of clean energy has been the key issue need to be solved in recent years, particularly on the energy consumption of buildings. Air source heat pump (ASHP) as a piece of clean energy equipment has widely been used in civil and industrial buildings. But there is no application of ASHP in swine houses. It is an urgent need to conserve energy and reduce pollution emissions. In this study, an investigation of ASHP was carried out in the swine houses of Shunyi District, Beijing. The experimental size of the swine houses was 42 m long and 9.3 m wide. The ASHP heating system was installed in a swine barn. There were 6 pipes to supply water, and other 6 pipes to return water for the heating floor. The monitoring period was selected for the equipment performance: November 20th, 2016-April 16th, 2017. The first stage (January 3rd, 2017-January 8th, 2017): swine houses with pig test (two units). The second stage (January 9th, 2017-January 20th, 2017): swine houses with no pig test. The energy-saving rate of ASHP and direct electric heating systems were compared to measure the Coefficient of Performance (COP). ASHP, direct electric heating, Liquefied Natural Gas (LNG), and natural gas heating were compared by the unit energy operating price. The average supply water and return water temperature of ASHP was also measured. The results showed that the COP of the ASHP system was 2.86 when the average outdoor temperature was 0.1 °C during the heating period. The energy-saving rate of ASHP was 66%, compared with direct electric heating. The unit energy operating prices of ASHP, LNG, Natural Gas, direct electric, and ASHP were 0.62, 0.34, 0.37, and 0.64 yuan/ kW·h, respectively. The CO₂ emission was reduced by 8 636 kg during the experiment. The average supply water temperature and return water temperature of ASHP were (37.6±2.4) and (34.9±2.2) °C, respectively. ASHP heating system presented the potential to reduce energy consumption and CO₂ emission, serving as an economical and clean alternative energy source for pig barns heating. Consequently, the air source heat pump system is suitable for swine houses with solid floors, but not with fully slatted floors.

Keywords: heating; coefficient of performance; pig house; air source heat pump; indoor temperature; energy saving and emission reduction