

文章编号: 0253-4339(2026)02-0026-09
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250110001

空气源热泵阵列“冷湿岛效应”与结除霜现象相互影响实测研究

梁士民^{1,2} 王哲^{1,2} 高学锋^{1,2} 闫月茹^{1,2} 王刚^{1,2} 胡松涛^{1,2} 王洪伟³

(1 青岛理工大学环境与市政工程学院 青岛 266520; 2 健康环境与低碳能源山东省工程研究中心 青岛 266520;
3 山东佐耀智能装备股份有限公司 威海 264300)

摘要 随着空气源热泵供暖规模的扩大,空气源热泵阵列成为中大型供暖项目主要布置方式,然而在空气源热泵阵列中心极易形成“冷岛效应”和“湿岛效应”,诱发热泵机组频繁结除霜,相反频繁结除霜也会影响空气源热泵阵列“冷湿岛效应”。为研究空气源热泵阵列“冷湿岛效应”与结除霜现象相互影响,依托山东省威海市某空气源热泵阵列供暖示范工程,搭建测试平台,进行现场实测。典型日下测试结果表明:在“冷湿岛效应”的影响下,阵列中心机组相比于外侧机组除霜频率增加 225%;频繁除霜导致阵列中心机组的冷岛强度降低了 4.3%,湿岛强度升高了 3.9%,频繁除霜对空气源热泵阵列“冷湿岛效应”影响效果并不显著;阵列中心机组相比于外侧机组结除霜过程名义制热量损失系数增加 59.3%,平均制热能力和 COP 下降分别降了 31.6% 和 34.0%,阵列中心机组性能衰减显著。

关键词 空气源热泵阵列;冷湿岛效应;结除霜;现场测试

中图分类号: TU832.1;TB61⁺1

文献标识码: A

Field Test on the Interactions Between "Cold and Wet Island Effect" and Frosting-Defrosting Phenomenon for Air-Source Heat Pump Array

Liang Shimin^{1,2} Wang Zhe^{1,2} Gao Xuefeng^{1,2} Yan Yueru^{1,2} Wang Gang^{1,2}
Hu Songtao^{1,2} Wang Hongwei³

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, 266520, China; 2. Qingdao University of Technology, Shandong Engineering Research Center of Healthy Environment and Low-Carbon Energy, Qingdao, 266520, China; 3. Shandong Zuoyao Intelligent Equipment Co., Ltd., Weihai, 264300, China)

Abstract With the expansion of air-source heat pump (ASHP) heating systems, ASHP arrays have become the primary arrangements for medium-to large-scale heating projects. However, the "cold island effect" and "wet island effect" are likely to form at the center of the ASHP arrays. This results in frequent frosting and defrosting in the heat pump units. Conversely, the frequent frosting and defrosting also influence the "cold and wet island effect" in the ASHP array. To evaluate the mutual influences between the "cold and wet island effects" and the phenomena of frosting and defrosting, this study performed an investigation based on a demonstration project using ASHP array in Weihai, Shandong Province. The study established a field-testing platform and conducted field measurements. Typical day-testing results indicate that under the influence of the "cold and wet island effect", the defrosting frequency of ASHP unit at the center of the array increased by 225% compared with those on the periphery. Frequent defrosting reduced the intensity of the cold island effect of the central units by 4.3% and increased the wet island effect intensity by 3.9%. However, the effect was not significant. Additionally, the nominal heating capacity loss coefficient during the frosting-defrosting cycle for the central units increased by 59.3%, and their average heating capacity and COP decreased by 31.6% and 34.0%, respectively, compared with the peripheral units. This indicates a significant performance degradation in the central units.

Keywords air-source heat pump array; cold and wet island effects; frosting and defrosting; field tests

空气源热泵(air-source heat pump, ASHP)作为一种高效节能的可再生能源技术,可有效降低建筑能源消耗并减少碳排放^[1-2],在全球范围内得到广泛的关注^[3-5]。尤其近年来,在我国“清洁取暖”工作的大

力推动下,ASHP已成为替代燃煤等传统供热方式的可靠技术,在我国北方寒冷地区得到广泛应用^[6]。《中国热泵产业发展报告(2023)》^[7]显示,ASHP被广泛应用于大型社区、办公建筑、养殖业等中大型供暖场

收稿日期:2025-01-10;修回日期:2025-02-12;录用日期:2025-04-15

景。ASHP 供暖场景规模从户级扩大至百万平米级别的大型项目,ASHP 阵列成为中大型供暖项目的主要布置方式。然而,随着 ASHP 供暖规模的扩大,ASHP 阵列中心极易形成“冷岛效应”和“湿岛效应”(简称:冷湿岛效应)^[8]。其中,“冷岛效应”降低了机组进风温度,恶化了机组制热性能;“湿岛效应”增加了机组结霜风险及结除霜损失,进一步恶化了机组制热性能。

现有研究主要关注空气源热泵“冷岛效应”影响因素和改善措施方面。国内外学者关注的“冷岛效应”影响因素主要包括阵列安装间距^[9-11]、阵列规模^[12]、环境风场、环境温度和周围遮挡物^[10-12]、ASHP 机组容量^[13]等,并通过数值模拟和实验验证的方法,提出了一系列相应措施,例如改变机组布置方式、添加拔风罩、改装周围挡板^[14]、加大机组间距、增设隔流板和提高机组架高^[16-18]等。研究表明,“冷岛效应”对机组最直接的影响就是对机组运行性能的影响,通过改变机组布置方式等一系列措施,能够起到削弱“冷岛效应”的效果。Liang Shimin 等^[19]通过现场实测研究了 ASHP“冷岛效应”特征及其对 ASHP 阵列运行性能的影响。结果表明,在 ASHP 阵列中明显存在“冷岛效应”,其强度随环境温度的升高而增大,导致中心机组除霜频繁。与外侧机组相比,阵列中心机组的除霜频率增加 243.5%,结除霜损失系数增加 519.0%,平均制热性能下降 27.7%。但现有研究多

采用仿真模拟的方法来研究稳态运行下的 ASHP 阵列“冷岛效应”,忽略了运行过程中结除霜以及环境湿度的动态变化,掩蔽了“湿岛效应”,缺乏对 ASHP 阵列“冷湿岛效应”与结除霜现象之间相互影响的研究。

本文依托山东省威海市某 ASHP 阵列供暖示范工程,围绕阵列中心和外侧机组,采用现场测试的方法,全面揭示 ASHP 阵列“冷湿岛效应”与结霜除霜现象相互影响关系,为 ASHP 规模化应用和高效运行提供理论支撑。

1 测试项目及系统

本文选取山东省威海市某 ASHP 阵列供暖示范工程,并搭建了较为完善的全自动监控测试系统,通过云平台获取各参数的实时测试数据。

1.1 测试项目

测试项目位于山东省威海市,属于寒冷地区,冬季空调设计室外空气温度为 $-7.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 61.0%。项目采用 ASHP 作为热源,共 44 台 ASHP,供热面积约为 $53\ 000\ \text{m}^2$,具体布置如图 1 所示。可以看到,该项目 ASHP 热源阵列共有 4 排,每排 11 台 ASHP 机组紧密安装,各排之间的间距为 1.74 m,占地面积为 $202.8\ \text{m}^2$ 。此外,每台 ASHP 机组配有 2 台定频压缩机,2 个室外风机,制冷剂采用 R410A,详细结构参数及铭牌如表 1 所示。

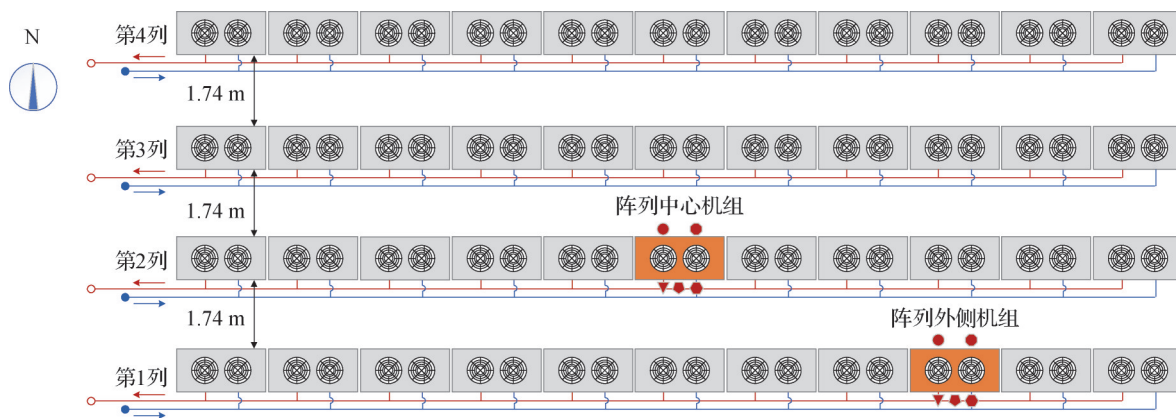


图 1 测试项目平面示意图

Fig.1 Plan of the test project

1.2 测试系统

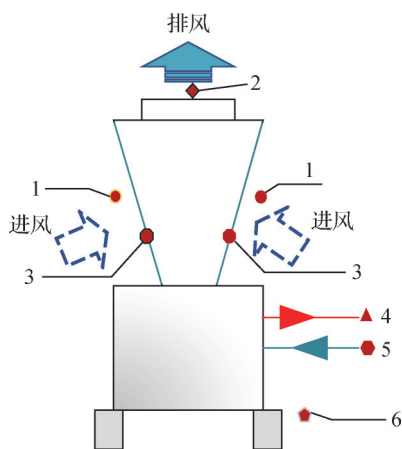
为了深入研究 ASHP 阵列“冷湿岛效应”与结-除霜现象相互影响关系,分别选取阵列中心和外侧机组(图 1),并搭建了较为完善的全自动监控测试系统,系统可实现 60 s/次采集和记录数据。该系统分别对阵列中心机组和外侧机组的空气侧、制冷剂侧、水侧及功率等参数进行测试。测试参数涵盖了进风

温湿度、排风温湿度、盘管温度、吸气温度、排气温度、供回水温度、供水流量、机组功率以及底部环境温度湿度,测点位置如图 2 所示,各传感器的参数如表 2 所示。此外,在项目上风位布置 1 个小型气象站监测环境温度、湿度、风速、风向等参数。

由于测试系统各传感器的直接测量误差不可避免地传递至间接测量值中,从而产生间接测量误差,

表 1 ASHP 铭牌及结构参数
Tab.1 ASHP nameplate and structure parameters

| 编号 | 机组及关键部件 | 参数或类型 | 值或详情 |
|----|---------|--------------------------|------------------------------------|
| 1 | 机组 | 名义工况 | 干球温度 7 °C/湿球温度 6 °C; 出水温度 45 °C |
| | | 名义制热量/kW | 78.0 |
| | | 名义输入功率/kW | 23.6 |
| | | 名义制热 COP | 3.35 |
| | | 外形尺寸/ (mm×mm×mm) | 2 000×1 000×2 100 |
| 2 | 压缩机 | 数量/个 | 2 |
| | | 类型 | 涡旋 |
| | | 频率/Hz | 50 |
| | | 制冷剂 | R410A |
| 3 | 室外侧换热器 | 数量/个 | 2 |
| | | 翅片类型 | 平翅片 |
| | | 传热面积/m ² | 134.8 |
| 4 | 室外侧风机 | 数量/个 | 2 |
| | | 类型 | 轴流风机 |
| | | 额定风量/(m ³ /h) | 12 500 |



1 进风温湿度测点; 2 排风温湿度测点; 3 盘管温度测点;
4 供水温度测点; 5 回水温度测点; 6 底部温湿度测点。

图 2 单台 ASHP 机组测点布置

Fig.2 Arrangement of measurement points for a single ASHP unit

因此对间接测量结果进行误差分析是非常必要的^[20]。本文选用相对不确定度 U_r 进行分析, 表达式如下:

$$N = f(X, Y, Z \dots) \quad (1)$$

$$\delta_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial X} \delta_X\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial Y} \delta_Y\right)^2} + L \quad (2)$$

$$U_r = \delta_N / \bar{N} \quad (3)$$

式中: N 为间接测量参数; X, Y, Z 为计算 N 的相关参

数; δ_N 为标准不确定度。

2 测试方案及评价

本研究于 2023 年 1 月 29 日对 ASHP 阵列中心机组与阵列外侧机组进行典型结霜工况下机组性能测试。

2.1 测试方案

典型日结霜测试工况在结霜图谱上的分布如图 3 所示^[21]。由图 3 可知, 测试期间结霜工况达到 82.8%, 结霜风险较高。测试期间温湿度变化范围较大, 其中环境温度在 -6.1~7.5 °C 波动, 平均室外温度为 0.07 °C; 环境相对湿度在 44.6%~77.5% 波动, 平均相对湿度为 63.11%。气象站数据显示, 典型日工况下自然环境风风向风速如图 4 所示, 测试期间该地区室外环境风向以北风为主导风向, 北风风向占比为 100.0%, 环境风速变化范围为 0~7.8 m/s, 平均风速为 1.1 m/s, 无风工况占比为 46.3%。

此外, 测试期间 2 台测试机组供水均设定温度为 45 °C, 除霜控制均采用常规的时间-温度 (T-T) 逻辑^[22]。

除霜开始条件: 当机组室外换热器盘管温度 $T_{coil} \leq -3$ °C 时, 机组的控制器开始记录压缩机的运行时间 t , 当 t 达到或超过除霜时间的设定值 (通常为 45 min), 且 $T_{coil} \leq -3$ °C 时, 机组的四通换向阀转向, 机组进入除霜模式运行, 同时关闭室外风机, 开始除霜操作。

除霜结束条件: 在除霜过程中, 当 T_{coil} 达到或超过退出除霜温度的设定值 (15 °C) 时, 四通换向阀再次转向, 机组退出除霜模式, 并转换为制热模式继续正常运行。

2.2 评价指标

为了有效评价“冷湿度效应”, 选取“冷岛效应”强度 ΔT_{in} 和“湿岛效应”强度 $\Delta \varphi_{in}$ 作为主要评价指标。根据城市热岛的概念^[23]对 ASHP 机组进风处的冷岛强度 ΔT_{in} 进行如下定义:

$$\Delta T_{in} = T_a - T_{in} \quad (4)$$

式中: T_a 为 ASHP 阵列上风位环境空气温度, °C; T_{in} 为 ASHP 机组进风温度, °C。

根据文献[24]中对“湿岛效应”强度的定义, 对 ASHP 机组进风处“湿岛效应”强度 $\Delta \varphi_{in}$ 进行如下定义:

$$\Delta \varphi_{in} = \varphi_{in} - \varphi_a \quad (5)$$

式中: φ_a 为 ASHP 阵列上风位环境空气相对湿度, %; φ_{in} 为 ASHP 机组进风相对湿度, %。

表 2 传感器参数
Tab.2 Detailed specifications of sensors

| 类型 | 型号 | 精度 | 量程 |
|--------|--------------------|---------------|--------------------|
| 温度传感器 | NTC(10 K) | ±1.0% | -50~125 °C |
| 温湿度传感器 | VMS-3000-WS-N01-MK | ±0.3 °C、±3%RH | -40~85 °C、0~100%RH |
| 风向传感器 | VMS-3000-FXJT-N01 | ±1° | 0~359.9° |
| 风速传感器 | VMS-3000-FSJT-N01 | ±0.2 m/s | 0~20 m/s |
| 三相电表 | DTSU6606 | ±1.0% | |
| 电流互感器 | JCKCT-16 | ±1.0% | 0~50 A |
| 超声波流量计 | MIK-2000H | ±0.5% | 0~70 m/s |

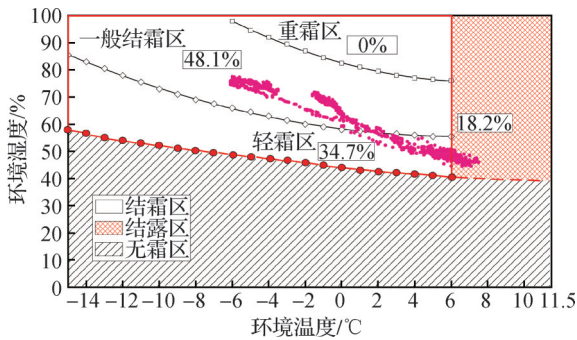
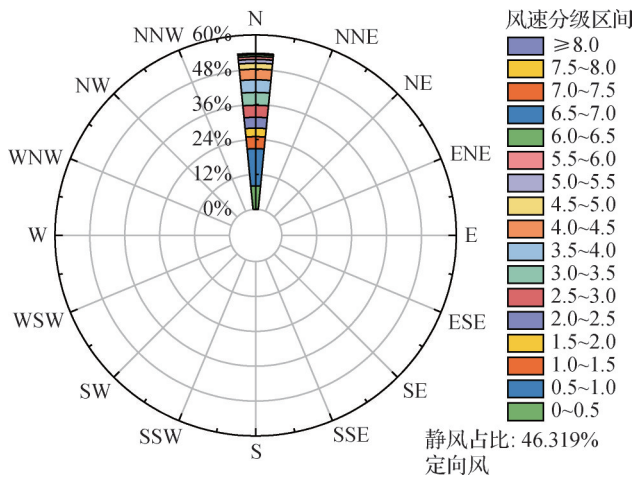


图 3 典型日结霜测试工况在结霜图谱上的分布^[21]

Fig.3 Distribution of typical daily frosting tested conditions on the frosting map^[21]



注:46.319%表示在整个测试期间中,有约46.319%的时间是静风状态;图中的同心圆比例表示各个方向上风的出现频率(百分比);定向风指具有风向的风,除静风外其余测得的风都有固定风向。

图 4 典型日工况下自然环境风风向风速

Fig.4 Natural ambient wind direction and speed under typical daily operating conditions

此外,为了分析冷湿岛效应对 ASHP 阵列性能的影响,选取瞬时制热能力 q 、ASHP 机组消耗单位电能产生的供热量 COP(性能系数,coefficient of performance)作为机组制热性能的评价指标:

$$q = c_w m_w \Delta T_w \quad (6)$$

$$COP = \frac{q}{W} \quad (7)$$

式中: q 为机组的瞬时制热能力,kW; c_w 为机组循环水的比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; m_w 为机组循环水的流量, m^3/h ; ΔT_w 为机组的供回水温差, $^\circ C$; W 为 ASHP 机组的输入功率,kW。

为了有效评价结除霜对机组的实际影响,采用结除霜控制过程的名义制热量损失系数 ε_{NL} ^[25]进行评价:

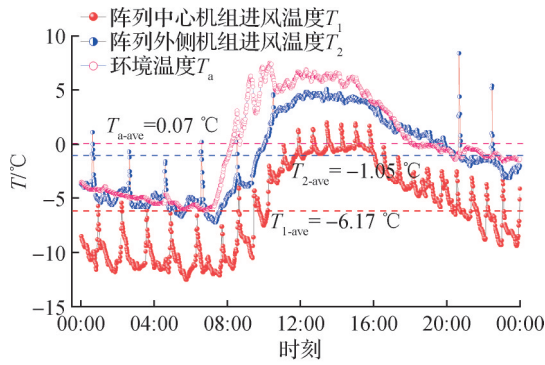
$$\varepsilon_{NL} = \frac{\int_0^{t_n} q_{hc} - q dt}{\int_0^{t_n} q dt} \quad (8)$$

式中: ε_{NL} 为结除霜过程名义制热量损失系数,%; t_n 为 ASHP 机组除霜恢复结束时刻至下一次除霜恢复结束时刻时间,s; q_{hc} 为机组名义制热量,本文取 78 kW。

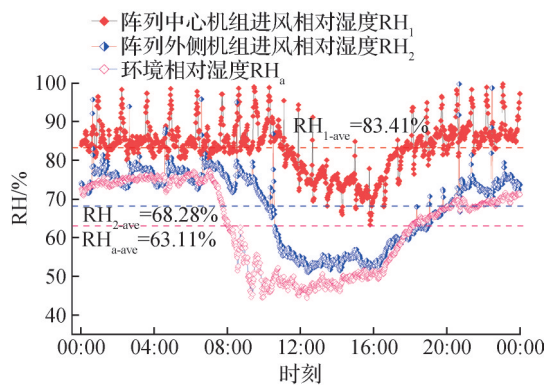
3 测试结果与分析

3.1 “冷湿岛效应”对机组结霜除霜的影响分析

典型结霜测试工况下环境温湿度、ASHP 阵列中心和外侧机组的进风温湿度变化如图 5 所示。由图 5 (a)可知,环境平均温度、阵列中心、外侧机组的平均进风温度分别为 -0.07 、 -6.17 、 -1.05 $^\circ C$ 。由式(4)可以计算出阵列中心和外侧机组冷岛强度分别为 6.24 $^\circ C$ 和 1.12 $^\circ C$,阵列中心机组进风平均冷岛强度相较于外侧机组升高 5.12 $^\circ C$,相对比例升高 457.1% 。由图 5(b)可知,环境平均相对湿度、阵列中心和外侧机组的平均进风相对湿度分别为 63.11% 、 83.41% 和 68.28% 。由式(5)可以计算出阵列中心和外侧机组湿岛强度分别为 20.30% 与 5.17% ,阵列中心机组进风平均湿岛强度相较于外侧机组升高了 15.13% ,相对比例升高了 292.6% 。由此可知,在该典型日工况下,外侧机组的“冷湿岛效应”较弱,阵列中心机组存在显著的“冷湿岛效应”。



(a) 进风温度



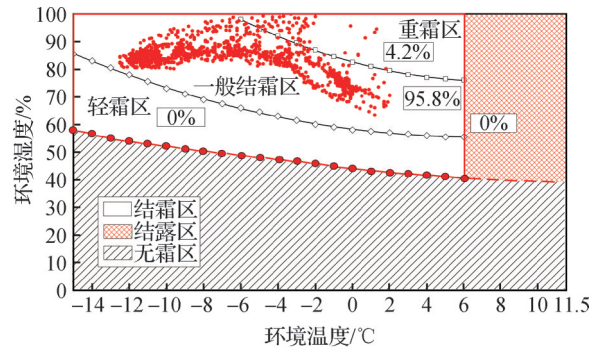
(b) 进风相对湿度

图 5 典型结霜测试工况下环境温湿度、ASHP 阵列中心和外侧机组的进风温湿度变化

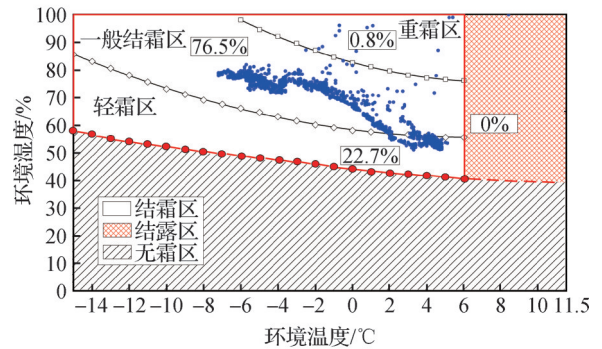
Fig.5 Changes of ambient temperature and humidity, as well as inlet air temperature and humidity of the central and outer units in the ASHP array under typical frosting tested conditions

为了评估阵列中心和外侧机组结霜除霜风险,通过空气源热泵分区域结霜图谱^[21]进行了详细分析。典型结霜测试工况下阵列中心和外侧机组进风温湿度在结霜图谱上的分布如图 6 所示。由图 6 可知,阵列中心机组进风温湿度分布较阵列外侧机组整体向左上方向偏移。其中,阵列中心机组一般结霜区和重霜区工况占比分别为 95.8% 和 4.2%,阵列外侧机组重霜区、一般结霜区和轻霜区工况占比分别为 0.8%、76.5% 和 22.7%。阵列中心机组相比于阵列外侧机组一般结霜区工况和重霜区工况占比分别增加 25.2% 和 425%,阵列中心机组结霜风险显著增加。

典型工况下阵列中心和外侧机组的盘管温度变化如图 7 所示。由图 7 可知,阵列中心机组由于频繁除霜,盘管温度出现了频繁的快速升高规律,阵列中心机组累计除霜 26 次,外侧机组累计除霜 8 次,阵列中心机组较外侧机组增加了 225%。可见,“冷湿岛效应”强度的升高会增加机组的结霜风险,加剧机组的结霜现象。



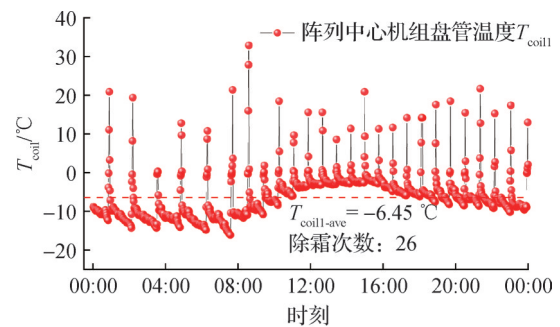
(a) 阵列中心机组



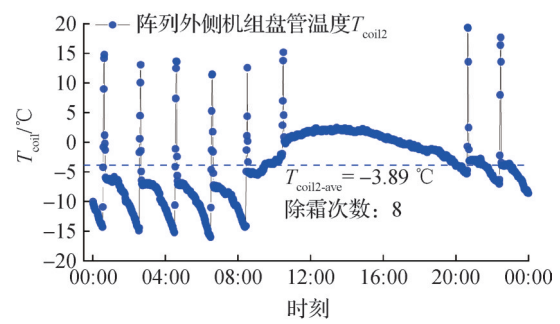
(b) 阵列外侧机组

图 6 典型日工况下测试机组进风温湿度在结霜图谱上的分布^[21]

Fig.6 Distribution of the inlet air temperature and humidity of the tested units on the frosting map under typical daily conditions^[21]



(a) 阵列中心机组



(b) 阵列外侧机组

图 7 典型结霜测试工况下 ASHP 阵列中心和外侧机组的盘管温度变化

Fig.7 Changes of coil temperature for the central and outer units in the ASHP array under typical frosting tested conditions

3.2 除霜过程对“冷湿岛效应”的影响分析

通过 3.1 节分析,“冷湿岛效应”会对机组结霜除霜产生显著影响,然而机组除霜过程是机组通过室外换热器向环境放热和加湿的过程,为了研究除霜过程对“冷湿岛效应”的影响,选取了单个结除霜循环和典型日下的冷岛强度和湿岛强度进行分析。阵列中心机组单个结除霜循环下冷岛强度与湿岛强度变化如图 8 所示。由图 8 可知,阵列中心机组 33 组结除霜过程和仅结霜过程的平均冷岛强度分别为 5.26 °C 与 5.39 °C,除霜过程使得阵列中心机组平均冷岛强度降低了 0.13 °C,降低比例仅为 2.4%;阵列中心机组结除霜过程和仅结霜过程的平均湿岛强度分别为 19.06% 与 17.51%,除霜过程使得阵列中心平均湿岛强度升高了 1.55%,升高比例为 8.9%。

通过单个结除霜循环结果分析可知,除霜时间过短(一般 3~5 min),导致除霜过程并未对冷岛强度和湿岛强度产生显著影响。

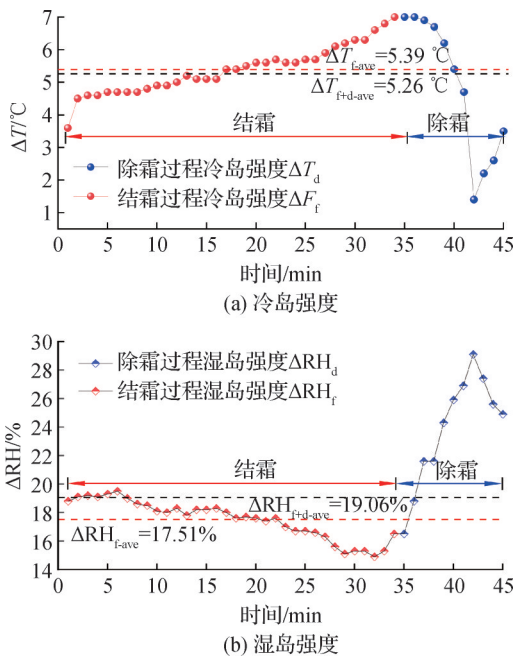


图 8 ASHP 阵列中心机组单个结除霜循环下冷岛强度与湿岛强度变化

Fig.8 Changes of cold island effect intensity and wet island effect intensity during a single frosting-defrosting cycle for the central unit in the ASHP array

为了进一步揭示除霜过程对“冷湿岛效应”的影响,选取了典型日工况下阵列中心机组结除霜循环平均冷岛强度与平均湿岛强度变化规律进行详细分析,如图 9 所示。可以看到,仅结霜过程(不含除霜过程)的平均冷岛强度与结除霜过程(含除霜过程)的平均冷岛强度分别为 6.57 °C 与 6.29 °C,含除霜过程

的平均冷岛强度相比于不含除霜过程的平均冷岛强度仅降低了 0.28 °C,降低比例为 4.3%;同时,不含除霜过程的平均湿岛强度与含除霜过程的平均湿岛强度分别为 20.90% 与 21.71%,含除霜过程的平均湿岛强度相比于不含除霜过程的平均湿岛强度仅升高了 0.81%,升高比例为 3.9%。

上述结果进一步表明,频繁除霜过程会削弱 ASHP 阵列“冷岛效应”,增强“湿岛效应”,但整体影响较小。

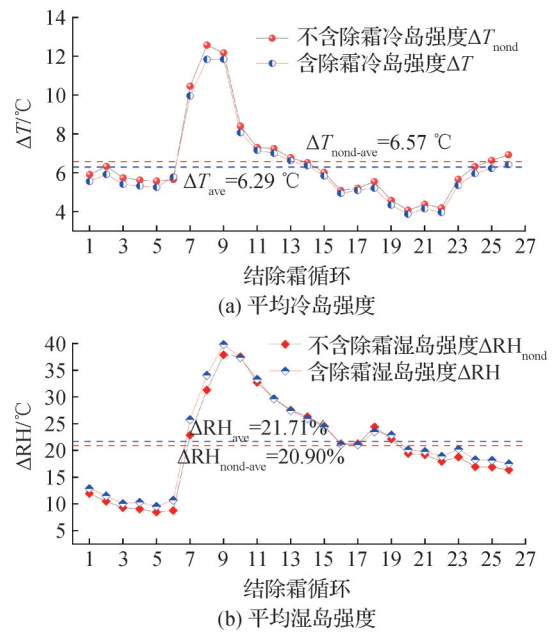


图 9 典型日工况下 ASHP 阵列中心机组结除霜循环平均冷岛强度与平均湿岛强度变化

Fig.9 Changes of average cold island effect intensity and average wet island effect intensity during the frosting-defrosting cycle of the central unit in ASHP array under typical daily conditions

3.3 “冷湿岛效应”作用下的 ASHP 机组运行性能分析

由上述分析可知,“冷湿岛效应”会增加阵列中心机组除霜频次,进而对 ASHP 机组运行性能产生严重影响。本节通过测试机组的结除霜控制过程的名义制热量损失系数 ϵ_{NL} 、制热量和 COP 全面评估“冷湿岛效应”作用下的 ASHP 机组性能表现。

如图 10 所示,为典型日工况下 2 台测试机组的结除霜过程名义制热量损失系数变化规律。可以看到,阵列外侧和中心机组各结除霜过程名义制热量损失系数平均值分别为 0.27 和 0.43。结果表明,阵列中心机组性能恶化较为严重,阵列中心机组结除霜过程名义制热量损失系数平均值相较于阵列外侧机组升高 59.3%。

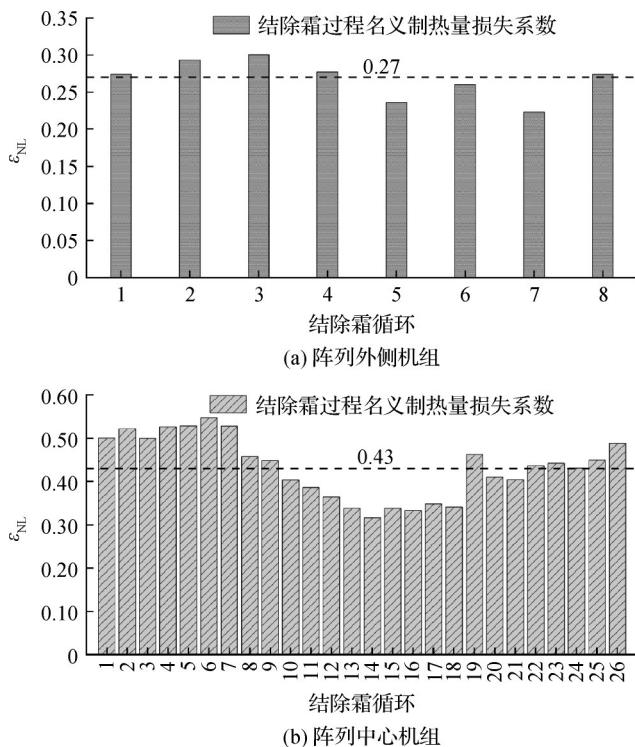


图 10 典型工况下测试机组的结除霜过程名义制热量损失系数变化

Fig.10 Changes of the nominal heating capacity loss coefficient during the frosting-defrosting process of the test units under typical daily conditions

典型工况下 2 台测试机组结除霜过程的瞬时制热量 q 与 COP 变化如图 11 所示。由图 11 可知,阵列中心机组与阵列外侧机组的平均瞬时制热量分别为 43.29 kW 与 63.27 kW。在“冷湿岛效应”的影响下,阵列中心机组平均瞬时制热量相比于阵列外侧机组下降 31.6%。此外,阵列中心机组平均 COP 仅为 1.38,较外侧机组 2.09 的平均 COP 下降 34.0%。结果表明,在“冷湿岛效应”影响下,阵列中心机组平均瞬时制热量和 COP 较外侧机组恶化显著,分别下降了 31.6% 和 34.0%。

此外,按照式(1)~式(3)可以计算出冷岛强度、湿岛强度、名义结除霜制热量损失系数、制热量、COP 的相对不确定度值分别为 3.9%、4.1%、6.1%、5.4%、5.6%,均在合理范围内,说明测试结果具有较好的可信度。

4 结论

本文依托山东省威海市某 ASHP 阵列供暖示范工程长期测试工况数据,分析了 ASHP 阵列“冷湿岛效应”与机组结除霜之间的相互影响以及对机组制热性能的影响,得到如下结论:

1)“冷湿岛效应”加剧机组的结除霜现象。测试结果表明,在阵列中心 ASHP“冷湿岛效应”分别升高

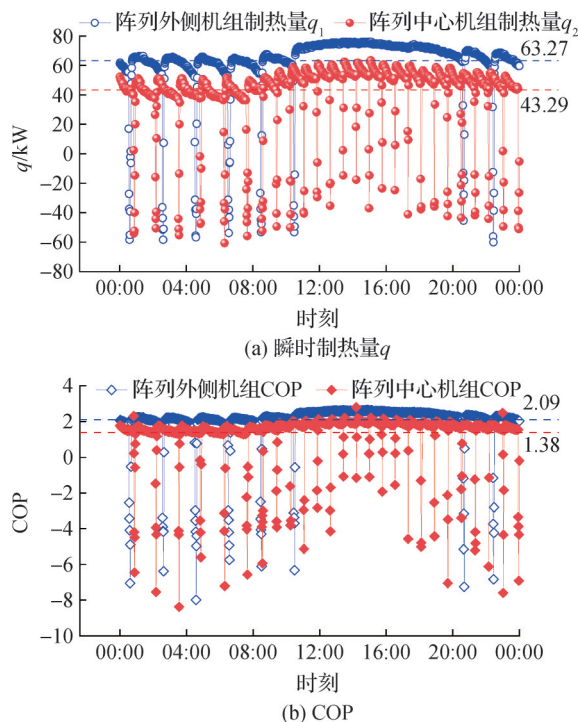


图 11 典型工况下测试机组结除霜过程的瞬时制热量 q 与 COP 变化

Fig.11 Changes of instantaneous heating capacity q and COP of the test units under typical working conditions during frosting and defrosting process

5.12 °C 和 15.13% 的情况下,阵列中心机组除霜次数相比于阵列外侧机组增加了 225%。

2) 除霜过程对“冷湿岛效应”的影响较小。测试结果表明,结除霜过程(含除霜过程)的平均冷岛强度相比于仅结霜过程(不含除霜过程)的平均冷岛强度降低 4.3%,含除霜过程的平均湿岛强度相比于不含除霜过程的平均湿岛强度升高 3.9%,频繁除霜过程会削弱 ASHP 阵列“冷岛效应”,增强“湿岛效应”,但整体影响较小。

3) 在“冷湿岛效应”的影响下,阵列中心机组较外侧机组,结除霜过程名义制热量损失显著升高、平均瞬时制热量和 COP 均大幅下降。结果表明,阵列中心机组结除霜过程名义制热量损失系数平均值升高了 59.3%,平均瞬时制热量和 COP 分别下降了 31.6% 和 34.0%。

本文受山东省自然科学基金面上项目(ZR2022ME148)和青岛市科技惠民示范专项项目(25-1-5-cspz-1-nsh)资助。(The project was supported by Shandong Municipal Natural Science Foundation (No. ZR2022ME148) and Qingdao Science and Technology Benefiting the People Demonstration Special Project (No. 25-1-5-cspz-1-nsh).)

参考文献

- [1] 赵万清. 可再生能源技术在建筑行业中的应用[J]. 太阳能学报, 2024, 45(5): 613. (ZHAO Wanqing. Application of renewable energy technology in construction industry [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(5): 613.)
- [2] 蒲思倩. 论“双碳”目标下可再生能源法制的协同优化[J]. 中国石油大学学报(社会科学版), 2024, 40(1): 53-62. (PU Siqian. On the collaborative optimization of legislation of renewable energy under the "dual carbon" goals [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Social Sciences), 2024, 40(1): 53-62.)
- [3] 姚春妮, 刘幼农. 空气热能纳入可再生能源的建筑应用技术研究[J]. 建设科技, 2016(2): 12-16. (YAO Chunni, LIU Younong. Research on building application technology of air thermal energy incorporating into renewable energy[J]. Construction Science and Technology, 2016(2): 12-16.)
- [4] NIKITIN A, DEYMI-DASHTEBAYAZ M, MURAVEINIKOV S, et al. Comparative study of air source and ground source heat pumps in 10 coldest Russian cities based on energy-exergy-economic-environmental analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 321: 128979.
- [5] LIANG Shimin, GAO Xuefeng, WANG Gang, et al. Experimental study on operating performances of the low and high temperature stages for cascade air source heat pumps [J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 167: 127-136.
- [6] 吴迪, 胡斌, 王如竹, 等. 我国空气源热泵供热现状、技术及政策[J]. 制冷技术, 2017, 37(5): 1-7. (WU Di, HU Bin, WANG Ruzhu, et al. Present situation, technology and policy of air source heat pump heating in China [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2017, 37(5): 1-7.)
- [7] 中国节能协会热泵专业委员会. 中国热泵产业发展报告(2023) [R/OL]. (2023-09-05) [2025-01-10]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/654425413>. (China Energy Conservation Association Heat Pump Professional Committee. Report on the development of China's heat pump industry (2023) [R/OL]. (2023-09-05) [2025-01-10]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/654425413>.)
- [8] 王涵. 空气源热泵阵列“冷湿岛效应”特征及影响研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2024. (WANG Han. Study on the characteristics and influence of "cold and wet island effect" of air source heat pump array [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2024.)
- [9] 赵宝国, 王立群, 韩献军. 集中式空气源热泵用于采暖工程的实例研究[J]. 制冷技术, 2018, 38(3): 48-51. (ZHAO Baoguo, WANG Liqun, HAN Xianjun. Case study of central air-source heat pump for heating application [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2018, 38(3): 48-51.)
- [10] 郭郑道, 许强强, 陈锦鹏, 等. 空气源热泵冷岛效应形成机理及实验验证[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 7-14. (GUO Zhengdao, XU Qiangqiang, CHEN Jinpeng, et al. Formation mechanism and experimental verification of cold island effect of air source heat pumps [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(10): 7-14.)
- [11] 谭庆澎, 刘金平, 陈建勋, 等. 阵列低环温空气源热泵外流场模拟研究[J]. 制冷学报, 2024, 45(2): 81-93. (TAN Qingpeng, LIU Jinping, CHEN Jianxun, et al. External flow field simulation of low ambient temperature air-source heat pump array [J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(2): 81-93.)
- [12] 田晓焱, 马广兴, 梁春阳. 严寒地区供暖用空气源热泵机组群热环境模拟[J]. 建筑节能, 2020, 48(12): 83-88. (TIAN Xiaoyan, MA Guangxing, LIANG Chunyang. Simulation on thermal environment of air source heat pump units for heating in severe cold regions [J]. Building Energy Efficiency, 2020, 48(12): 83-88.)
- [13] 周港. 空气源热泵机组群周围热环境研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2022. (ZHOU Gang. Study on thermal environment around air source heat pump unit group [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2022.)
- [14] 刘黔奇. 空气源热泵群工作环境模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. (LIU Qianqi. Simulation study on working environment of air source heat pump group [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.)
- [15] 马原. 改善空气源热泵机组阵列冷岛效应的技术措施研究[D]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2021. (MA Yuan. Research on technical measures to improve the cold island effect of air source heat pump unit arrays [D]. Zhangjiakou: Hebei University of Architecture, 2021.)
- [16] SUN Yong, LIU Shuaishuai, LIU Yang, et al. Study on optimal operation of boiler-assisted air source heat pump heating system [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2185(1): 012071.
- [17] SUN Yong, XU Huixuan, LIU Yang, et al. Technical measures for improving the cold island effect of air source heat pump unit array [J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2022, 22(6): 2387-2411.
- [18] 雷艳杰, 陈奎. 空气源热泵集群式布置的采暖系统中冷岛效应的产生机理及控制措施[J]. 节能与环保, 2021(5): 51-54. (LEI Yanjie, CHEN Kui. The generating mechanism and controlling measures of cold island effect

- in clustered air-source heat pump heating system [J]. *Energy Conservation & Environmental Protection*, 2021 (5): 51-54.)
- [19] LIANG Shimin, WANG Han, BAI Xiaoxia, et al. A field study on the impacts of cold island effect on operating performances of air source heat pump array for space heating [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 82: 108266.
- [20] 邓春芳. 间接测量误差分析及数据处理[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2010, 25(4): 79-81. (DENG Chunfang. Analysis of indirect measurement error and data processing [J]. *Journal of Beijing Information Science & Technology University*, 2010, 25(4): 79-81.)
- [21] ZHU Jiahe, SUN Yuying, WANG Wei, et al. A novel temperature-humidity-time defrosting control method based on a frosting map for air-source heat pumps [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 54: 45-54.
- [22] 王伟, 刘景东, 孙育英, 等. 空气源热泵两种新型高效除霜控制方法的实测研究[J]. 制冷与空调(北京), 2017, 17(3): 67-76. (WANG Wei, LIU Jingdong, SUN Yuying, et al. Field test study of two types of the novel efficient defrosting control methods for air source heat pumps [J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2017, 17 (3): 67-76.)
- [23] ZHOU B, RYBSKI D, KROPP J P. On the statistics of urban heat island intensity [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(20): 5486-5491.
- [24] LIU R, SOGACHEV A, YANG X, et al. Investigating microclimate effects in an oasis-desert interaction zone [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 290: 107992.
- [25] LI Zhaoyang, WANG Wei, SUN Yuying, et al. A novel defrosting initiating method for air source heat pumps based on the optimal defrosting initiating time point [J]. *Energy and Buildings*, 2020, 222: 110064.

通信作者简介

梁士民,男,副教授,青岛理工大学环境与市政工程学院,15066250675, E-mail: liangshimin@qut.edu.cn。研究方向:可再生能源利用、建筑节能、健康睡眠。

About the corresponding author

Liang Shimin, male, associate professor, College of Environment and Municipal Engineering, Qingdao University of Science and Technology, 86-15066250675, E-mail: liangshimin@qut.edu.cn. Research fields: renewable energy utilization, building energy efficiency, healthy sleeping.