文章编号: 1671-6612 (2025) 02-190-08

二氧化碳复叠式

空气源热泵供暖系统运行测试分析

刘宇腾1 王景刚1 罗景辉1,2 李 永3 张昌建1

(1. 河北工程大学能源与环境工程学院 邯郸 056038;

2. 河北省暖通空调技术创新中心 邯郸 056038;

3. 河北省建筑科学研究院有限公司 石家庄 050200)

【摘 要】 二氧化碳空气源热泵系统由于其清洁高效的优点,在实际生活生产中被广泛应用。为了分析复叠 式二氧化碳空气源热泵的实际运行效果,对石家庄市某小区复叠式二氧化碳空气源热泵系统的运 行情况进行了测试。根据实测运行数据显示,该系统在室外日均环境温度为-14.3℃-10℃工况下的 日 COP 值在 2.1-3.0 之间,出水温度范围为 36℃到 52℃,且出水温度与制热量、耗电量及 COP 存在较好的线性关系。同时,该系统在某严寒期内的 COP 仍可保持在 2.5-2.8。最后探究了四种不 同工况下复叠式二氧化碳热泵系统的运行性能,数据显示,低温工况下,进出水温度衰减较大, 而相对湿度过大造成的结霜情况则会导致平均制热量增大,分析上述四个工况可得,二氧化碳空 气源热泵系统的 COP 在四种工况下受到的影响均较小,日 COP 保持在 2.5 左右,体现出该复叠式 二氧化碳热泵系统较为优秀的性能。

【关键词】 复叠式空气源热泵;供暖;运行情况

中图分类号 TB657.5 文献标志码 A

Cascade Carbon Dioxide Air Source Heat Pump Heating Operation Test Analysis

Liu Yuteng¹ Wang Jinggang¹ Luo Jinghui^{1,2} Li Yong³ Zhang Changjian¹

(1.School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, 056038;

2. Hebei HVAC Technology Innovation Center, Handan, 056038;

3. Hebei Institute of Building Research Co., Ltd, Shijiazhuang, 050200)

(Abstract) Due to its advantages of clean and efficient, carbon dioxide air source heat pump system is widely used in practical life and production. In order to analyze the actual operation effect of cascade carbon dioxide air source heat pump, the operation of cascade carbon dioxide air source heat pump system in a residential area of Shijiazhuang City was tested. According to the measured operation data, the total daily average COP value of the system is between 2.1-3.0, and the effluent temperature ranges from $36 \,^{\circ}\text{C}$ to $52 \,^{\circ}\text{C}$, and there is a good linear relationship between the effluent temperature and the heating capacity, power consumption and COP. At the same time, the daily COP of the system can still be maintained at 2.5-2.8 during a severe cold period. Finally, the operation performance of the cascade carbon dioxide heat pump system under four different working conditions was

河北省重点研发计划项目"太阳能、地热能、相变能多能互补(电、热、冷系统)关键技术与装备研发与示范" (236Z4310G)资助

作者简介: 刘宇腾(2000-), 男,硕士研究生,研究方向为空气源热泵的清洁利用, E-mail: 582261728@qq.com

通讯作者: 王景刚(1962-), 男, 教授, 研究方向为清洁能源高效利用, E-mail: jinggangwang@hebeu.edu.cn 收稿日期: 2024-06-27

基金项目:河北省创新能力提升计划项目"河北省暖通空调后补助经费"(2256769H)资助;

explored, and the data showed that the temperature attenuation of the inlet and outlet water was greater under low temperature conditions, and the frosting caused by excessive relative humidity would lead to the increase of average heat production, and the analysis of the above four working conditions showed that the COP of the carbon dioxide air source heat pump system was less affected under the four working conditions, and the total average daily COP was basically maintained at about 2.5, which also reflected the superior performance of the cascade carbon dioxide heat pump system.

[Keywords] Cascade air source heat pump; Heating; Operation

0 引言

以空气作为热源介质的空气源热泵供暖是一种较为新型的供暖方式。但是,对于我国北方等严寒地区来说,由于压缩机工作特性的限制,在某些情况下无法实现高温热水的制取。复叠式空气源热泵系统相较空气源热泵系统工作温度区间更大而被广泛应用于低温环境的制热采暖^[1]。其中,以二氧化碳作为低温工质,R134a作为高温工质的R134a/R744 复叠式空气源热泵系统由于二氧化碳的优质性能以及 R134a 的环保性及安全性具有较高的研究价值^[2]。有研究表明,R134a/R744 复叠式空气源热泵系统较单级跨临界二氧化碳系统具有更高的制热性能与出水温度,并且在恶劣环境下仍能保持较高性能^[3]。

目前,对于二氧化碳复叠式空气源热泵系统的 研究主要集中在理论分析与实验阶段。Getu^[4]等人 对比了三种混合工质热泵系统的制热性能,最后得 出以 R404A/R717 为工质的复叠式空气源系统总 COP 最高。Messineo^[5]对二氧化碳复叠式热泵系统 的低温循环进行了研究,并与其他常用制冷剂进行 了对比,得出结论:二氧化碳可作为复叠式热泵系 统的制冷剂,且在安全与节能方面均有较为优异的 表现。鲁祥友16等人以小型复叠式空气源热泵采暖 系统性能影响因素进行了实验研究,实验结果表 明:在一定温度范围内,随着制取热水温度的升高, 热泵的制热量逐渐降低,热泵的输入功率逐渐增 大,系统 COP 呈下降趋势;许琪印使用 EES 软件 对空气源复叠式热泵系统性能进行模拟研究,结果 表明: 在变耦合温度调控下的热泵平均 COP 可以 达到 2.53, 证明了复叠式空气源热泵在高温输出下 具有较为优越的性能。Bhattacharyva^[8]等人通过回 归分析法模拟了环境温度与供水温度对复叠式系 统的影响,结果表明:系统性能系数随环境温度的 升高而增大,随供水温度的升高而降低。

目前,对空气源热泵类工程项目的研究主要集

中在空气源热泵系统的实际测试与分析上。周超 辉[9]等对北京某教学楼空气源热泵供暖系统进行 了现场实验,得出带有室温控制的 A 区系统供暖 效果优于无室温控制 B 区系统,室温更符合人员需 求的结论。白晓夏[10]等在 2015~2016 年供暖季针 对北京地区某办公楼空气源热泵系统进行了测试, 发现机组的供/回水温度、吸排气压力以及制热量 和 COP 均随环境温度的降低而整体降低,但是排 气温度升高,压缩比增大。周严[11]等对山东省胶东 地区7个空气源热泵系统进行了运行性能测试,实 测结果表明,实测机组性能系数和额定性能系数均 存在一定的差距,部分项目实测系统性能系数与机 组性能系数的差异较大。针对目前复叠式空气源热 泵研究中缺少实际项目数据测试的情况,本文对石 家庄某小区的 R134a/R744 复叠式空气源热泵系统 在集中供暖期间进行了测试,并对测试结果进行了 总结与分析,以探究该复叠式空气源热泵的实际运 行效果,为复叠式空气源热泵的推广与深入研究提 供一定的技术支持。

1 项目概况

1.1 建筑概况

石家庄市某小区 R134a/R744 复叠式二氧化碳 空气源热泵项目建筑总面积约 13 万平方米。选用 一套机组,采用二氧化碳复叠式空气源热泵实施分 布式供热。



Fig.1 Flow chart of cascade air source heat pump unit

1.2 设备特性参数介绍

本复叠式空气源热泵系统覆盖了整个冬季采 暖期,设备在额定工况下的特性参数如表1所示。

表1 设备特性参数

Table 1 Characteristic parameters of the unit

参数	参数
最大运行功率/kW	1061
名义制热功率/kW	670.7
名义制热 COP	2.97

本次测试对于复叠式空气源热泵系统的重要 性能参数以及评价供暖效果的重要指标,如室外环 境温湿度,机组的进出水温度,功率,耗电量等, 进行了长期监测,测试选用的仪器如表2所示。

表 2 测试设备参数

Table 2 Test device parameters

测试参数	测试设备名称	测试精度	测试范围
温湿度采集	温湿度自计仪	$\pm 0.2^\circ \mathrm{C}$	− 3 5°C/80°C
功率	功率测量表	$\pm 1\%$	
耗电量	智能电能表	±1%	50-750 V
			0.5-600A
进出水温度	温度自计仪	$\pm 0.3^\circ \mathrm{C}$	−50°C/100°C

2 测试数据分析

2.1 供暖阶段的划分

温湿度自记仪从 2023 年 11 月 11 日 0 时开始 记录,每隔五分钟记录一次,截止时间为2024年 2月6日晚0时。将室外温湿自计议的记录温度数 据导出后进行处理,求出每日的日平均温度。图2 所示为 2023 年 11 月 11 日至 2024 年 2 月 6 日供暖 期间共88天的室外平均温度与平均相对湿度,由 图 2 可知,温度平均值为-1.33℃。根据室外平均温 度的不同,可以大致将供暖期分为三个阶段。供暖 第一阶段为 2023 年 11 月 11 日至 2023 年 12 月 13 日,此时日平均气温较高,处于供暖初期,在2023 年11月22日前日平均气温基本都在0℃以上。且 在 2023 年 11 月 22 日以后到 2023 年 12 月 5 日前 的日平均温度多数高于 2℃。供暖第二阶段大致为 2023年12月14日至2024年1月10日前后,室 外平均温度急剧下降,开始进入供暖中期,此时室 外平均温度大多低于 0℃, 个别供暖日平均温度低 于-15℃。由于室外温度变化并不保持一定的规律 性,且为了保持每个阶段日期数量的相对均等,供 暖第三阶段大致为2024年1月11日到2024年2 月6日,此时室外平均气温整体高于第二阶段,进 入供暖中后期,虽然供暖日室外平均温度仍多数低 于0℃,但整体范围都在-5℃-0℃之间,且有一定 的上升趋势。





Fig.2 Daily average temperature and humidity changes

in outdoor

2.2 测试数据分析

本文连续测试了该二氧化碳复叠式空气源热 泵供暖系统在 2023 年 11 月 11 日到 2024 年 2 月 6 日的机组进出水温度情况。图 3 和图 4 记录了出水 温度和进水温度的变化趋势。供暖前期系统进水温 度大多位于 38℃-42℃之间,供暖中期及中后期, 进水温度大幅提高,基本保持在 46℃以上。此外, 系统的出水温度最高可达 52.5℃左右,且整个供暖 期大多数时间保持在 42℃以上。



Fig.3 Daily outlet water temperature change of the unit



Fig.4 Daily inlet water temperature change of the unit

在供暖期监测中,不仅统计和计算了系统逐日 的总制热量,总耗电量以及系统 COP,还进一步 推算了平均制热量,平均耗电量以及平均 COP。 图 5 到图 10 分别展示了供暖一、二、三阶段系统 逐日的总制热量,总耗电量,系统 COP 以及平均 制热量,平均耗电量和平均 COP,由图中可以看 出,系统的逐日总制热量呈现先增大后减小的整体 趋势。在供暖第一阶段,由于室外平均气温较高, 建筑需热量较小,系统的整体制热量相对较小,日 制热量平均值为 6115kW, 进入供暖第二阶段, 室 外平均气温大幅度下降,此时系统的制热量迅速增 大。供暖中期系统日制热量的平均值为10738kW。 供暖第三阶段开始,室外平均气温逐渐回升,系统 整体制热量开始缓慢下降,但由于整体气温仍然较 低,系统制热量下降并不显著,日制热量平均值为 9832kW。据图 8 到图 10 可判断出,随着室外平均 温度的下降, 机组内热泵制热时间逐渐增长, 从而 导致了二、三阶段系统日平均制热量的最大值与均 值均低于供暖第一阶段的情况。



Fig.5 Daily heat production, electricity consumption, COP of the first stage of heating



图 6 供暖第二阶段逐日制热量、耗电量、COP

Fig.6 Daily heat production, electricity consumption,

COP of the second stage of heating



Fig.7 Daily heat production, electricity consumption,

COP of the third stage of heating

系统耗电量的变化趋势与供热量的变化趋势 基本相同,随着供热量的增加耗电量呈增加趋势。 供暖第一阶段室外温度较高,此时系统日耗电量平 均值为2347kWh,供暖第二阶段室外温度骤降, 系统日耗电量上升,日耗电量平均值为4270kWh, 供暖第三阶段气温缓慢回升,系统日耗电量平均值 为3868kWh。



图 8 供暖第一阶段日平均制热量、耗电量、COP Fig.8 Daily average heat production, electricity consumption, COP of the first stage of heating







Fig.10 Daily average heat production, electricity consumption, COP of the third stage of heating

COP 是衡量热泵供暖系统性能的重要参数, COP 的值越大,热泵系统的制热性能越好。供暖 第一阶段系统日 COP 变化范围为 2.1-2.9, 平均值 为 2.7,供暖第二阶段系统日 COP 变化范围为 2.5-2.8, 平均值为 2.6, 供暖第三阶段系统日 COP 变化范围为 2.2-2.8, 平均值为 2.6。由该二氧化碳 复叠式热泵项目的 COP 可以得出,该系统具有较 为优越的制热性能, 日 COP 多数时间可稳定在 2.5 以上,最高可达 3.0。图 11 显示了该二氧化碳复叠 式空气源热泵系统在 2023 年 12 月 16 日到 2023 年 12月21日处于严寒期的日 COP 值随室外平均温 度的变化情况,可以看到该系统在低温情况下表现 良好, COP 最低为 2.5, 最高可达 2.8。普通空气 源热泵在低温环境下性能衰减严重,该项目二氧化 碳复叠式空气源热泵系统 COP 值较普通空气源热 泵系统大大提高,具有较好的制热性能与制热效 率。



图 11 示犹在未时权 参东田下时 COF 视线 Fig.11 COP performance of the system under severe cold

conditions over a period of time

出水温度是研究复叠式空气源热泵运行效果 中的重要参数。在复叠式空气源热泵的特性及实验 研究中,系统的制热量、耗电量随出水温度的升高 而升高,系统 COP 随出水温度的升高而降低。为 了验证实际工程中此规律的准确性,根据实测数据 使用软件线性拟合了测试期内系统制热量、耗电量 和性能系数随出水温度的变化。如图 12 所示,实 际工程中制热量、耗电量与 COP 随出水温度的变 化符合模拟及实验研究中复叠式空气源热泵系统 的变化趋势,这也进一步说明了此规律的准确性及 测试数据的可靠性。



图 12 制热量、耗电量和性能系数随出水温度的变化 Fig.12 Changes in heat production, power consumption, and coefficient of performance with inlet water

temperature

3 系统结霜情况分析及典型工况测试

3.1 结霜工况分布

为了进一步探究系统在不同工况下的运行情况,本文根据室外温度与相对湿度,结合 ZHU^[12]等提出的霜谱图,将测试期内处在合适范围内的逐时室外条件参数绘制到其中,结果如图 13 所示。



图 13 结霜工况分布图

Fig.13 Distribution of frosting conditions







stage

由图 13 可知,石家庄地区复叠式空气源热泵 结霜情况较多,处在范围内的测试点 57.2%位于结 霜区,8.3%位于结露区,34.5%位于无霜区。其中, 处在重霜区的测试点约占 18.4%。图 14 所示为依 据逐日平均温度与平均相对湿度绘制的测试期内 不同阶段的各区域占比情况。由图 14 可知,第一 阶段由于室外平均温度较高,结霜现象明显少于 二、三阶段。供暖第一阶段测试天数位于无霜区内 的为15天,轻霜区为7天,一般结霜区为4天, 结霜天数约占一阶段总天数的55%,供暖第二阶 段测试天数位于无霜区内的为8天,轻霜区为13 天,一般结霜区为6天,重霜区为1天,结霜天数 约占二阶段总天数的70%,供暖第三阶段测试天 数位于无霜区内的为8天,轻霜区为7天,一般结 霜区为10天,重霜区为2天,结霜天数约占三阶 段总天数的71%,由此可见,石家庄地区复叠式 空气源热泵结霜情况比较严重。

3.2 典型工况分析

为了对比系统不同运行条件下的运行特性,根据结霜工况分布图选取了四种不同的运行工况。图 15 到图 18 展示了低温、高湿、一般结霜与重霜四种典型日系统运行情况。典型日1(2023年12月 21日)为低温工况,最低室外温度为-20.8℃,室 外平均温度为-14.3℃,平均相对湿度为41%,位 于无霜区。该典型日平均进水温度为33.2℃,平均 出水温度为37.3℃,COP值为2.6,平均制热量为 477.6kW/h,低温工况下的运行情况如图15所示。



图 15 低温工况运行特性

Fig.15 Operating characteristics at low temperatures

典型日 2(2024 年 1 月 17 日)为高湿工况, 室外平均温度为 0℃,最高相对湿度为 97.2%,平 均相对湿度为 90%,位于重霜区。该典型日平均 进水温度为 46.6℃,平均出水温度为 51.4℃, COP 值为 2.5,平均制热量为 580.1kW/h,高湿工况下 的运行情况如图 16 所示。



图 16 高湿工况运行特性

Fig.16 Operating characteristics at high humidity

典型日 3(2024 年 1 月 9 日)为一般结霜工况, 室外平均温度为-0.7℃,平均相对湿度为 67.1%。 该典型日平均进水温度为 46.3℃,平均出水温度为 50.9℃,COP 值为 2.5,平均制热量为 572.91kW/h, 一般结霜工况下的运行情况如图 17 所示。



图 17 一般结霜工况运行特性

Fig.17 Operational characteristics under general frost conditions

典型日4(2024年1月18日)为重霜工况, 室外平均温度为-1℃,平均相对湿度为88.4%。该 典型日平均进水温度为46.5℃,平均出水温度为51.1℃,COP值为2.5,平均制热量为563.5kW/h, 重霜工况下的运行情况如图18所示。



Fig.18 Operational characteristics of heavy frost conditions

对比低温工况与高湿工况,得到以下结论:在 低温工况和高湿工况条件下,热泵制热性能与运行 效果均比较理想。低温工况下,进出水温度衰减较 大,而相对湿度过大造成的结霜情况则会导致平均 制热量增大。对比上述4个工况,可得到以下结论: 低温结霜等工况会一定程度的影响复叠式空气源 热泵的制热性能,但影响远小于普通的空气源热泵 系统。

4 结论

本文对石家庄市某小区 R134a/R744 复叠式二 氧化碳空气源热泵系统的运行效果进行了测试,得 出以下结论:

(1)连续测试了该二氧化碳复叠式空气源热 泵供暖系统在 2023 年 11 月 11 日到 2024 年 2 月 6 日的机组进出水温度情况,结果发现,系统的出水 温度最高可达 52.5℃左右,且整个供暖期大多数时 间保持在 42℃以上。

(2)统计和计算了系统逐日的总制热量,总 耗电量,还进一步推算了平均制热量,平均耗电量。 此外还量化了出水温度对于制热量、耗电量与性能 系数的影响,发现出水温度与制热量、耗电量、 COP均有较好的线性关系。

(3)对系统的逐日 COP 与平均 COP 进行了 计算。结果表明,该系统具有较为优越的制热性能, 逐日 COP 多数时间可稳定在 2.5 以上,最高可达 3.0,显著优于普通空气源热泵系统的逐日 COP 值。 同时分析了该二氧化碳复叠式空气源热泵系统在 严寒期的日 COP 值随室外平均温度的变化情况, 结果表明,该系统在低温情况下表现良好,COP 最低为 2.5,最高可达 2.8,具有较好的制热性能与 制热效率。

(4)根据室外温度与相对湿度绘制了结霜工况分布图,统计了各供暖阶段结霜情况的百分比。 选取了低温、高湿、一般结霜、重霜四种典型工况 进行了系统特性分析,得到以下结论:低温结霜等 工况会小幅影响复叠式空气源热泵机组的制热性 能,但影响远小于普通的空气源热泵系统。

参考文献:

- [1] 罗威.R134a/CO₂复叠式空气源热泵系统特性研究与能
 耗仿真[D].合肥:合肥工业大学,2019.
- [2] 中国节能协会热泵专业委员会.二氧化碳热泵发展白 皮书[R].2022.
- [3] 金磊,何永宁,杨东方,等.CO2 热泵在低温寒冷地区供暖 应用的研究分析[J].流体机械,2015,43(9):67-72,57.
- [4] Getu H M, Bansal P K. Thermodynamic analysis of an

R744–R717 cascade refrigeration system [J]. International Journal of Refrigeration, 2008,31(1):45-54.

- [5] Messineo A, Panno D. Performance evaluation of cascade refrigeration systems using different refrigerants
 [J]. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 2012,20(3):1250010.
- [6] 鲁祥友,凌帆,唐景春,等.小型复叠式空气源热泵采暖 系统性能影响因素的实验研究[J].制冷技术,2020, 48(4):47-51.
- [7] 许琦,张希,张兴伟,等.空气源复叠式热泵系统性能的 模拟分析[J].制冷技术,2023,43(2):1-7.
- [8] Bhattacharyya S, Mukhopadhyay S, Kumar A, et al. Optimization of a CO2–C3H8, cascade system for refrigeration and heating [J]. International Journal of Refrigeration, 2005,28(8):1284-1292.
- [9] 周超辉,傅旭辉,倪龙,等.北京某教学楼空气源热泵供 暖系统现场实验[J].制冷学报,2018,39(5):29-35.
- [10] 白晓夏,孙育英,王伟,等.北京地区空气源热泵低温工况下运行性能的实测研究[J].建筑科学,2017,33(10): 53-59,164.
- [11] 周严,魏庆芃,胡新语,等.空气源热泵系统在胶东地区的使用效果实测[J].暖通空调,2017,47(10):142-148.
- [12] ZHU Jiahe, SUN Yuying, WANG Wei, et al. A novel Temperatur-Humidity-Time defrosting control method based on a frosting map for air-source heat pumps[J]. International Journal of Refrigeration, 2015,54:45-54.