

文章编号: 1671-6612 (2025) 02-157-05

工质充注量对热管散热器影响的实验研究

赵 谱¹ 许树学¹ 孙尚瑜¹ 勾倩倩¹ 王月月² 李思凡¹

(1. 北京工业大学 北京 100124;

2. 北京国贸东孚工程科技有限公司 北京 100037)

【摘 要】 在国家清洁采暖的大背景下,以热管散热器为末端的家用空气源热泵系统集成高效、便利、零排放于一体。在环境控制室内对其进行测试,在启动、稳定运行及除霜过程,研究热管散热器的工质充注量对其表面温度均匀性的影响。结果表明,随着工质充注量的增加启动时间变长,但散热器表面均温性更小,1.0kg 充注量散热器表面温度最大差值为 2.01℃,而 3.5kg 充注量下仅 1.49℃;稳定运行时散热器表面温度从上到下逐渐降低,但底端温度有所上升;除霜时散热器表面温降主要集中在下集管,充注量越大温降越小,除霜完成时间越短,且未造成室内温度大幅度波动。

【关键词】 空气源热泵;热管;除霜;工质充注量

中图分类号 TU832 文献标志码 A

Experimental Study on the Effect of Working Fluid Charge on Heat Pipe Radiator

Zhao Pu¹ Xu Shuxue¹ Sun Shangyu¹ Gou Qianqian¹ Wang Yueyue² Li Sifan¹

(1. Beijing University of Technology, Beijing, 100124;

2. Beijing Guomao Dongfu Engineering Technology Co., Ltd, Beijing, 100037)

【Abstract】 A household air source heat pump system with a heat pipe radiator as its terminal was built and tested in the environmental control room. In the process of start-up, stable operation and defrosting, the effect of the amount of working fluid charged on the surface temperature uniformity of the heat pipe radiator was studied. The results show that the starting time becomes longer with the increase of the charge of working fluid, but the average temperature of radiator surface becomes smaller. The maximum difference of radiator surface temperature is 2.01℃ with 1.0kg charge, while it is only 1.49℃ with 3.5kg charge. In stable operation, the surface temperature of the radiator gradually decreases from top to bottom, but the bottom temperature increases. During defrosting, the surface temperature drop of the radiator is mainly concentrated in the lower header. The higher the charge amount, the smaller the temperature drop, the shorter the defrosting completion time, and the indoor temperature did not fluctuate greatly.

【Keywords】 Air source heat pump; Heat pipe; Defrost; Working fluid charge

0 引言

“双碳”目标的驱动下,节能减排技术受到持续关注。国家统计局数据显示,2022年能源消费总量54.1亿t标准煤,比上年增长2.87%,其中我国建

筑行业的能源消耗近10年持续增长。空气源热泵作为21世纪清洁供暖方式的代表,既可以缓解能源压力,又能消除传统供暖方式对环境带来的不利影响。家用空气源热泵为压缩机驱动工质吸热和散

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3802500)资助项目

作者简介:赵 谱(1999.02-),女,硕士研究生,E-mail: zhaopu1220@163.com

通讯作者:许树学(1981.08-),男,博士,副研究员,E-mail: xsx@bjut.edu.cn

收稿日期:2023-11-17

热,在室内换热末端以强制对流或自然对流的方式将热量供到室内。在室内的换热末端中,自然对流散热器结构简单且舒适性高,国内房间中使用最广泛。与传统的基于对流放热的散热器相比,辐射采暖使室内温度分布更均匀,房间热舒适性更好。Xu^[1]等的研究发现,热管散热器表面温度分布的均匀性很好,最高温度和最低温度值之差小于1℃,将其作为散热器,可以改善热泵系统在低温条件下的性能。热管充分结合了热传导和相变介质快速传热的原理,可以有效地在两个固体界面之间传热,基本可以在恒定温度下高效地输送大量热量且不需要任何外部电力输入。热管散热器被广泛应用于锂离子电池^[2]、电子^[3]、核工业^[4]、建筑余热回收^[5-7]等领域。Lim^[8]等证实了用热管作为地热器替代地下环路热交换器的可行性。

室外换热器的结霜现象会诱发空气源热泵在低温环境中运行不稳定、制热量快速衰减、制热效率变低,良好的除霜对于热管换热器与空气源热泵技术的结合具有重要作用。空气源热泵机组除霜是系统发生较为复杂的动态变化过程,融霜热量主要来源于室内空气和压缩机的做功。当系统除霜热量不足时系统会从室内吸收热量,导致热管换热器表面温度波动,房间舒适性变差,除霜时间变长。谢福林^[9]等研究了不同翅片类型下空气源热泵翅片管换热器表面的结霜情况,并发现波纹片换热器性能最佳,且其最佳翅片间距为2.2mm。Wu^[10]等通过实验证明变频技术可以

有效延长空气源热泵系统的无霜期,缩短除霜期。Wang^[11]等提出了一种结合超疏水翅片表面特性和高速热气流的综合除霜方法。李帅帅^[12]等则采用相变蓄能为空气源热泵逆循环除霜提供热量。当前除霜研究中,考虑因素较为单一,主要集中在不同控制原件的优化上,较少做到按需除霜。此外,较少考虑除霜对于室内热舒适性的影响。

本文将热管散热器末端与空气源热泵系统进行结合,以热管散热器内工质充注量作为变量,对其表面温度分布、除霜时间等参数进行比较分析,研究不同工质充注量对系统运行及除霜过程中室内热舒适性的影响。对于寒冷地区热泵驱动热管式暖气散热器采暖技术的推动具有重要意义。

1 实验装置及原理

以热管散热器为末端的空气源热泵原理如图1所示。系统包括热泵和热管散热器两部分,热泵由压缩机、冷凝盘管、储液器、节流阀和蒸发器组成;热管散热器由多根重力热管平行组成,各平行管通过集液管连接并与热泵的冷凝器隔离焊接在一起,内部抽空后充注工质。制热运行时,压缩机排出的高温高压制冷剂气体进入冷凝管束,通过冷凝管束与热管散热器中的另一种工质换热,在冷凝管束中高温高压的制冷剂气体冷凝放热后变成液态,经节流阀节流后进入室外蒸发器,在室外蒸发器中吸热蒸发为气体,被压缩机吸入完成一个循环。

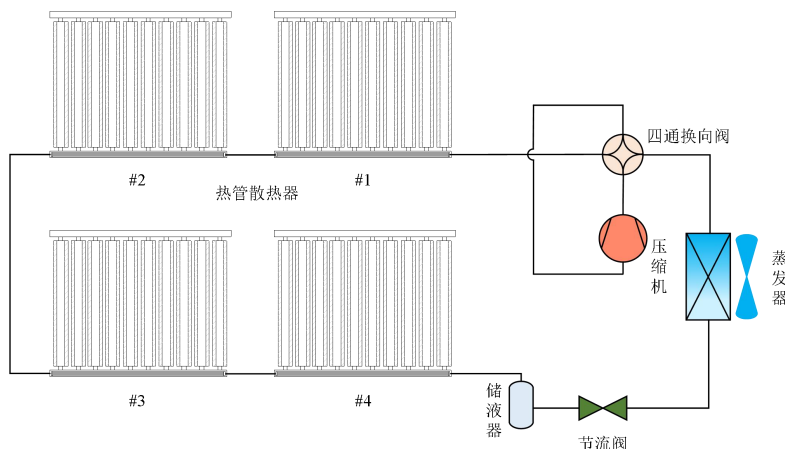


图1 热泵直接驱动热管式供热装置

Fig.1 Heat pipe heating device driven directly by heat pump

除霜时通过四通换向阀逆循环除霜,压缩机吸气口与室内热管散热器相通,排气口与室外换热器相通。压缩机排气进入蒸发器进行除霜,之后经节

流阀、储液器流入热管散热器,在热管散热器中吸热蒸发为气体,后再次回到压缩机完成循环。

本实验中末端的热管束由10根带有翅片组的

热管竖直排列组合而成。其中热管为高 700mm 的铝管,其外径为 29mm、厚 2mm,上、下集液管则采用长 1310mm、宽 40mm、高 50mm 的铝管,热管前后两侧分别带有宽度为 60mm 和 110mm 的 10 组平行翅片,冷凝管束由 8 根紫铜光管水平平行排列组成,其长 1210mm、外径 9.52mm、壁厚 0.3mm。

实验搭建了 1 台额定 1kW 压缩机串联 4 台热管散热器的系统,在环境控制室内进行测试,热管工质为 R134a,实验主要用仪器仪表性能参数如表 1 所示。

表 1 实验用仪器仪表性能参数

Table 1 Experimental instrument performance parameters

测量仪器	测量变量	测量范围	测量精度
PT100	温度/℃	-150~150	±0.15
压力传感器	压力/MP	-0.1~4.5	±0.2%
数据采集器	——	0~100mA	±0.2%
流量计	制冷剂流量/(kg/h)	0~150	±0.2%
功率计	压缩机功耗/kW	——	±0.5

2 实验方案与测量方法

分别对系统的启动过程、运行过程及除霜过程进行测试。R134a 的充注量设定均为 1.0kg、1.5kg、2.0kg、2.5kg、3.0kg 和 3.5kg。定量研究不同工质充注量对系统的启动特性、热管散热器表面均温性及除霜性能的影响,包括除霜时间、除霜过程温度分布均匀性及其对室内温度、人体舒适度的影响等。图 2 所示为热管散热器表面各个温度测点的布置图,在每台热管散热器的 800mm、600mm、400mm、200mm、0mm 高度位置布置热电偶。

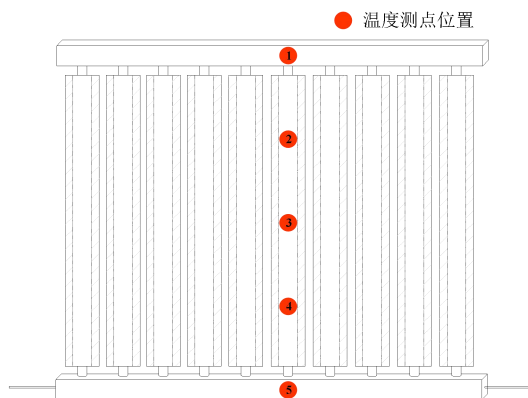


图 2 散热器表面温度测点

Fig.2 Measuring points of radiator surface temperature

3 结果与分析

3.1 启动过程

对系统初始启动时温度增长趋势进行对比分析。系统启动后各热管散热器表面温度均平稳上升。图 3 是室外温度 -2℃,室内初始温度为 12℃ 时,不同工质充注量下系统启动前 4 分钟热管散热器的表面平均温度随时间的变化。由图 3 可知,工质充注量越大,相同时间内散热器表面温升越慢,导致系统启动时间延长。第 4 分钟时,充注量 1kg 的散热器温度达到 17.79℃,而充注量 3.5kg 的散热器温度仅 15.4℃。由于两种工质通过相变换热,系统的启动过程直观体现在热管散热器的表面温升。系统启动初始时刻,热泵制冷剂放出的热量通过冷凝管束传递给热管工质,散热器下集管内液体工质吸收热量,温度升高,达到热管工质饱和温度后持续吸热且温度不变,工质蒸气在热管壁面冷凝放热使散热器表面温度升高。在此传热过程中,要先把热管工质加热到饱和温度,随着热管工质充注量的增加,达到饱和温度需要的热量越多,启动时间越长。

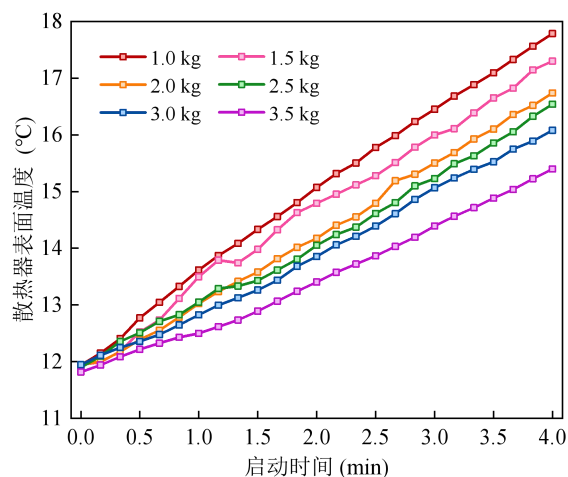


图 3 热管散热器表面温度随启动时间的变化

Fig.3 Change of surface temperature of heat pipe radiator with start-up time

3.2 稳定运行

图 4 所示为室外温度 -2℃,室内温度 18℃,系统稳定运行时热管散热器表面温度分布。以图 1 中的 #2 热管散热器为例进行观测。不同充注量下,最高温度均出现在热管顶端,表面温度由上到下呈现逐渐降低的趋势,但底端温度有所上升,其原因可能为热管内壁冷凝液膜在重力的作用下由上到

下越积越厚,热阻沿热管高度方向也越来越大,其影响表现为散热器表面温度随热管高度降低而略微降低。此外,由于热泵系统的冷凝器浸没在散热器下集管中,相当于热管散热器的热源,使接近下集管处的测点温度略高。

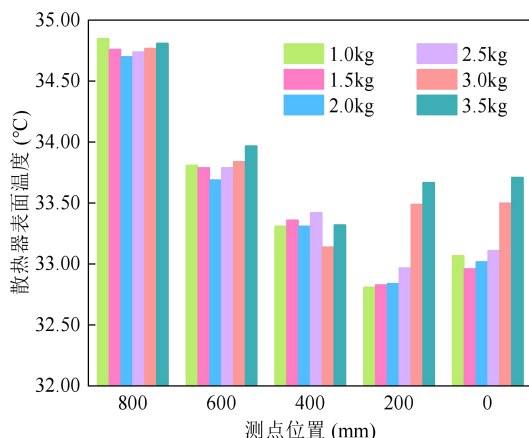


图4 稳定运行时热管散热器表面温度分布

Fig.4 Surface temperature distribution of heat pipe radiator

图5所示为散热器表面均温性随充注量的变化。由图5可知散热器表面均温性 ($\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$) 随充注量的增加而逐渐变小。原因可能在于热管高度一定的情况下,工质充注量越大,下集管内工质高度越高,冷凝段越小,冷凝液膜只存在于热管的冷凝段,均温性波动是液膜引起的,即充注量越大,散热器表面温度分布越均匀。

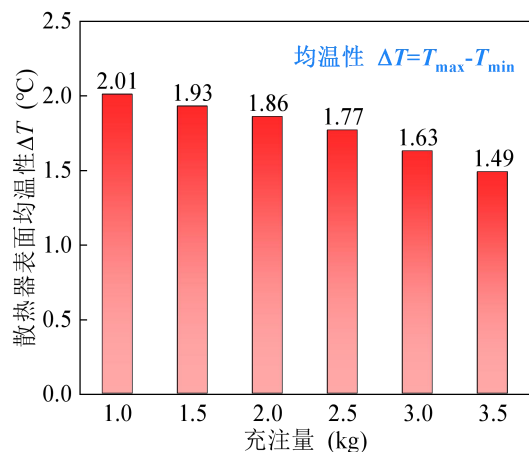


图5 散热器表面均温性随充注量的变化

Fig.5 Variation of surface temperature difference of radiator with charge quantity

3.3 除霜过程

逆循环除霜时从房间吸收热量,会导致室温下

降,热舒适性变差,特别是除霜时间较长时,也会降低系统能效。热管内充注的工质本身具有储热功能,这部分热量本质上仍是热泵产生热量的一部分。通过调控热管工质的充注量,理论上可以尽量减少除霜时间,并相应减小室内及散热器表面温度波动程度。图6是工质充注量2kg时#2热管散热器除霜过程中表面温度变化。由图6可知,散热器表面温度随除霜时间的增加而逐渐减小,散热器底端(0mm)温度下降最为明显。分析其原因可能为逆循环除霜时,除霜热量主要来源于热管工质,工质温度下降使热管表面温度降低。又由于热泵蒸发器(制热工况冷凝管束)浸没在热管工质下集管中,除霜时直接热量来源于下集管工质,所以0mm处测点温降最为明显。

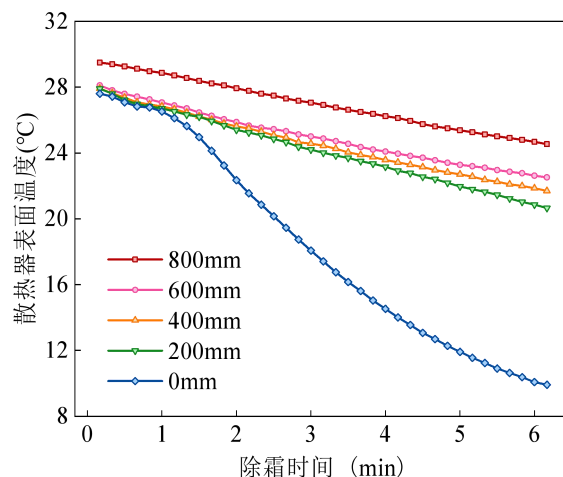


图6 散热器表面温度随时间变化

Fig.6 The surface temperature of the radiator changes with time

除霜工况设定为室外 0°C ,室内 18°C 。图7是不同充注量下#2热管散热器底端0mm测点在整个除霜过程中均温性情况。由图7可知,工质充注量越大,散热器底端温度越高,其最高温度与最低温度之差逐渐减小,除霜用时逐渐缩短。分析其原因可能为工质充注量越大,运行过程中下集管内工质蓄热量越大,为除霜过程提供的热量越多,下集管内温降越不明显,且完成除霜所需要的时间越短。比如,当充注量1.0kg时,除霜完成时0mm测点温度 8.92°C ,整个除霜过程中温降达 16.92°C ,除霜用时350s;当充注量3.5kg时,除霜完成时0mm测点温度 15.04°C ,整个除霜过程中温降 13.33°C ,除霜时间220s。

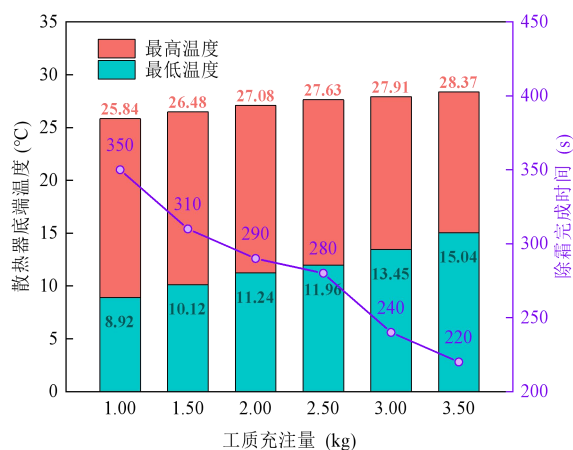


图7 不同工质充注量下散热器底端(0mm测点)温度及除霜完成时间

Fig.7 Temperature at the bottom of the radiator (0mm measuring point) and defrosting completion time under different working fluid charge amount

图8是热管散热器中工质充注量为2kg时,系统除霜过程中室内温度的变化趋势。由图8可知除霜前室内温度为18.03℃,除霜6分钟结束时室内温度17.65℃,除霜过程中温度波动不超过0.6℃。利用热管内工质储存的热量进行除霜,在不同充注量下,除霜过程对室内温度均未造成太大的波动。

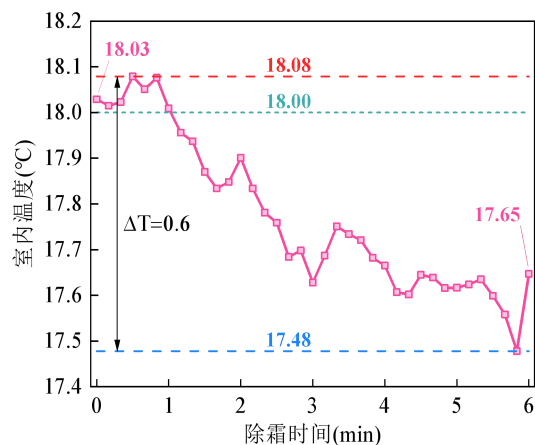


图8 除霜阶段室内温度变化

Fig.8 Room temperature change during defrosting stage

4 结论

本文基于我国北方农村地区清洁供暖的需求,提出了以热管散热器为末端的家用空气源热泵系统,本文对不同充注量下的系统运行效果进行研究,主要结论如下:

(1) 启动过程中,随着充注量的增加,散热

器表面温升越慢,系统启动时间变长。

(2) 稳定运行时,热管顶端温度最高,由上到下温度逐渐降低,而底端有所上升,随着工质充注量的增加,散热器表面均温性变小。3.5kg充注量下,0.8m高的散热器表面均温性仅1.49℃。

(3) 除霜过程中,散热器表面温降主要集中在下集管处,随着充注量增加,散热器下集管处温降变小,完成除霜用时缩短。充注量3.5kg时下集管处温降为13.33℃,完成除霜仅需220s。利用热管内工质的热量进行除霜在不同工质充注量的情况下均表现良好,未引起太大的室内温度波动。

本研究致力于分析工质充注量对系统性能的影响,旨在为热管散热器工质充注量的优化提供理论依据,促进带有热管散热器的空气源热泵作为传统供暖系统替代品的应用与发展。为进一步提高系统性能,未来的研究可以考虑对热管散热器内部工质进行优化选择,深入分析不同工质对系统性能的差异化影响。此外,散热器结构的特性(如高度、形状等参数)对其表面温度分布的影响也值得深入研究。

参考文献:

- [1] Xu S H, Ding R C, Niu J, et al. Investigation of air-source heat pump using heat pipes as heat radiator[J]. International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid, 2018,90:91-98.
- [2] Weragoda D M, Tian G, Burkitbayev A, et al. A comprehensive review on heat pipe based battery thermal management systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2023,224:120070.
- [3] S R A K, Sivan S, V C M, et al. Experimental and numerical investigation of solid-solid phase change material assisted heat sink with integrated heat pipe for electronic cooling[J]. Journal of Energy Storage, 2023,59:106494.
- [4] 李衍智,都家宇,吴莘馨,等.先进核能技术中的热管应用[J].清华大学学报(自然科学版),2023,63(8):1173-1183.
- [5] Burlacu A, Sosoi G, Vizitiu R S, et al. Energy efficient heat pipe heat exchanger for waste heat recovery in buildings[C]. 11th International Conference on Interdisciplinarity in Engineering (INTER-ENG), 2017: 714-721.

(下转第178页)