

文章编号:0253-4339(2018)05-0067-05

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2018.05.067

热泵驱动热管式辐射供热装置的实验研究

丁若晨 许树学 马国远 姜明健

(北京工业大学环境与能源工程学院 北京 100124)

摘要 本文提出热泵驱动热管式辐射供热装置的循环原理,基于 1 HP 压缩机研制出一套样机,并在焓差室测试了样机在室内温度为 18~22℃,室外温度为-15~0℃的工况下的运行特性。结果表明:热管散热器启动迅速、表面温度分布均匀,热管工质的最佳充注比率为 0.1,当室内温度为 22℃,室外温度为-15~0℃时,制热 COP 最高可达 4.1。

关键词 热泵;热管;制热;COP

中图分类号:TB61⁺.1;TQ051.5;TU833⁺.1

文献标识码:A

Experimental Research on the Performance of Heat Pipe Radiation Heating Device Driven by Heat Pump

Ding Ruochen Xu Shuxue Ma Guoyuan Jiang Mingjian

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China)

Abstract In this study, the working principle of a heat pipe radiation heating device driven by heat pump was proposed. The prototype has been developed for testing based on a 1 HP compressor and the operating characteristics of the prototype under the working conditions of indoor temperature from 18℃ to 22℃, outdoor temperature from -15℃ to 0℃ are tested in the air enthalpy room. The experimental results showed that the heat pipe radiator can start rapidly and has a uniform temperature distribution. The optimal charge of heat pipe working fluid ratio is 0.1. The maximum heating coefficient of performance (COP) of the system can reach 4.1 under the condition of 22℃ indoors and -15~0℃ outdoors.

Keywords heat pump; heat pipe; heating; COP

自 2013 年初,我国大面积遭遇了不同程度的雾霾天气。京津冀多个城市 PM_{2.5} 的来源解析结果表明,燃煤排放出的多种污染物是形成 PM_{2.5} 污染的主要来源。加快郊区及城市上风口的农村地区采暖“煤改电”工程建设,是实现空气治理行动计划目标的重要措施^[1]。目前“煤改电”主流家用采暖设备为小型空气源热泵和分体式风冷热泵型空调器。家用小型空气源热泵采用蒸气压缩式热泵加水循环,通过水泵将热量输送到室内,此种设计需对热泵系统和水系统协调准确控制,系统构造复杂,安装和检修困难较大,同时须着重考虑冬季运行安全及水路的防冻问题。普通风冷热泵型分体式空调用风机供热,产生的热空气从上至下循环,不符合供暖的空气动力学及热力学原理,长时间运行后换热器内积累尘土和有害细菌并产生异味,对人体健康造成损害^[2]。

热管是一种高效的两相传热装置,与常规散热器

相比热管散热器的传热性能更好。国外对于将热泵与高效率传热热管相结合也有相关研究。N. Chotivisarut 等^[3-4]采用热管散热器将水箱里的热量抽出冷却热水。Zhang Xingxing 等^[5]将热管应用于太阳能换热装置,结果表明性能系数比传统换热器提高了 1.5~4 倍。H. Lim 等^[6]将热管应用于地源热泵的蒸发器端,蒸发器置于热管散热器内,结果表明:与普通直接膨胀式相比性能系数提高 10.3%;与复合回路换热型式相比性能系数提高 21.1%。C. Se-barchievici 等^[7-8]将热管应用于地源热泵,通过热管复合的地板将热量供给办公室。

本文提出的热泵驱动热管式辐射供热装置,结合了热泵与热管的优势,解决了现有空气源热泵安装困难、用户体验差、供热速度慢和供暖效率低的问题,提高了整个热泵系统的舒适度、供热速度和运行效率。

基金项目:国家自然科学基金(51641602)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51641602).)

收稿日期:2017 年 9 月 22 日

1 系统原理

热泵驱动热管式辐射供热装置如图 1 所示。系统包括热泵和热管散热器两部分,热泵由压缩机、冷凝器、节流装置和蒸发器组成;热管散热器由多个热管组成,通过集液管连接并与热泵的冷凝器隔离焊接。工作过程为:压缩机排出的高温高压制冷剂气体通过冷凝盘管与热管散热器中的工质换热,冷凝后的制冷剂液体经节流后进入蒸发器,在蒸发器中蒸发吸热,蒸发后的制冷剂气体回到压缩机。热管散热器中的工质吸热后热管启动,通过辐射和自然对流将热量传递给室内。

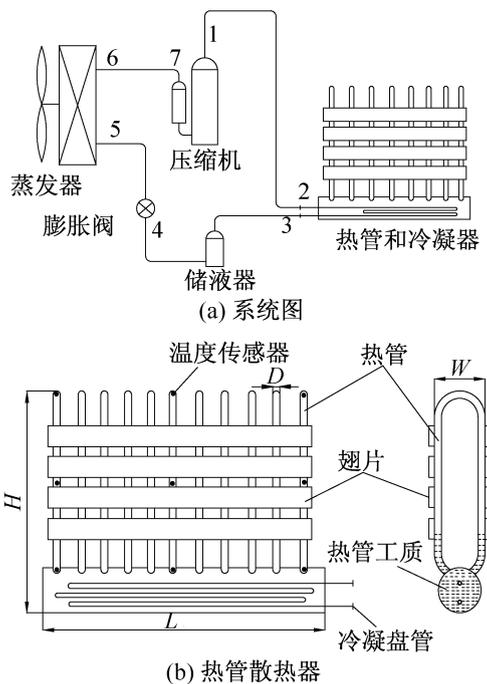


图 1 热泵驱动热管式辐射供热装置
Fig. 1 The heat pipe radiation heating device driven by heat pump

2 热力学分析模型

2.1 热泵工作过程

热管散热器输出的热量由热泵提供,热管散热器表面和室内环境的温差驱动散热器向室内散热。

制热量 Q :

$$Q = m(h_2 - h_3) \quad (1)$$

式中: m 为制冷剂质量流量, kg/s ; h_2 、 h_3 分别为图 1 中 2、3 点处的焓值, kJ/kg 。

制热 COP:

$$\text{COP} = \frac{Q}{P} \quad (2)$$

式中: P 为压缩机的输入功率, kW 。

2.2 辐射和自然对流换热

热管散热器和室内空间的换热主要包括辐射和自然对流两部分,热管散热器通过自然对流与房间的换热量为^[9-12]:

$$Q_c = h_c A (t_s - t_{\text{room}}) \quad (3)$$

式中: Q_c 为热管散热器通过自然对流与空间的换热量, kW ; A 为热管散热器的表面积, m^2 ; h_c 为表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$; t_s 为热管散热器表面温度, C ; t_{room} 为房间温度, C 。

h_c 由以下公式决定^[13]:

$$\text{湍流: } h_c = 1.31 (\theta)^{0.33} \quad (4)$$

$$\text{层流: } h_c = 1.41 \left(\frac{\theta}{l}\right)^{0.25} \quad (5)$$

流体流动特性(湍流或层流)可以由两个无量纲数(格拉晓夫数和普朗特数)决定:

$$\text{层流: } 10^4 < GrPr < 10^9 \quad (6)$$

$$\text{湍流: } 10^9 < GrPr < 10^{12} \quad (7)$$

普朗特数可从经验表达式中得到^[14]:

$$Pr = 0.680 + 4.69 \times 10^7 (t_k + 540)^2 \quad (8)$$

$$t_k = 273 + \frac{1}{2}(t_s + t_{\text{room}}) \quad (9)$$

$$G_k = \frac{\beta g l^3 \theta}{\nu^2} \quad (10)$$

式中: β 为流体体积膨胀系数; g 为重力加速度, m/s^2 ; l 为特征长度(散热器高), m ; θ 为散热器表面和室内空气的温差, C ; ν 为运动黏度, m^2/s 。

热管散热器通过辐射与房间换热的换热量为^[15]:

$$Q_r = A \varepsilon \sigma (t_s^4 - t_{\text{room}}^4) \quad (11)$$

式中: ε 取 0.9; σ 为 $5.6703 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; A 为散热器表面积, m^2 ; t_s 为热管散热器表面温度, C ^[16]。

根据式(3)~式(11),设计了一种全新的用于室内加热的热管散热器(适用于 1 HP 压缩机),结构如图 1(b)所示。结构特征:U 型热管并排连接在集液管上,U 型管表面焊接平板翅片,起固定 U 型管和增加散热面积的作用,热泵的冷凝器插入底部集液管,冷凝热传递给热管散热器内的液体工质。结构尺寸如表 1 所示。

表 1 热管散热器的主要结构尺寸

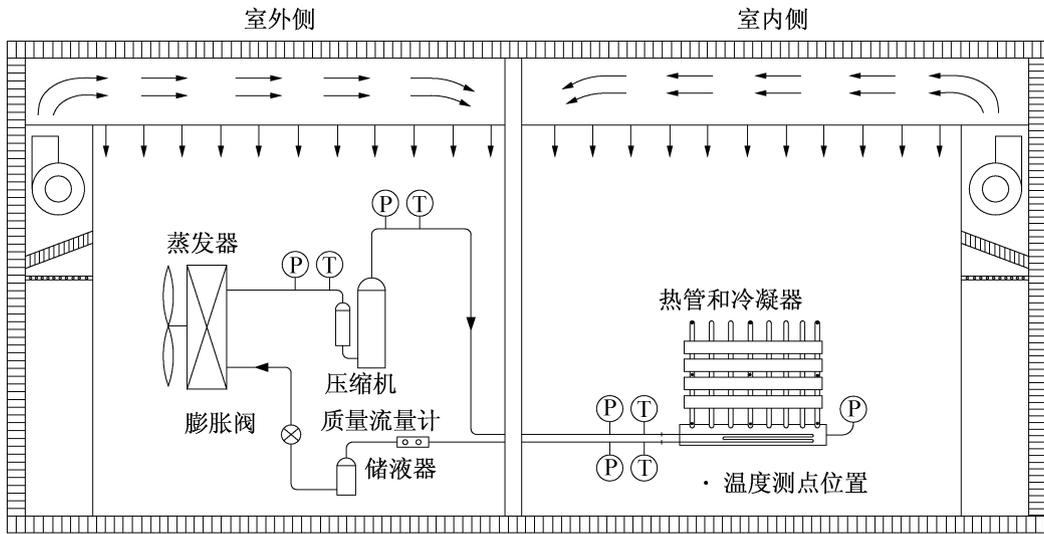
Tab. 1 Main structural dimension of heat pipe radiator

| 宽度 L/mm | 高度 H/mm | 厚度 W/mm | 直径 D/mm | 排数 n |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------|
| 800 | 600 | 200 | 16 | 24 |

3 实验装置与测试

热泵驱动热管式辐射供热装置安装在在焓差室

进行实验,室内侧和室外侧均可提供特定的空气温度和湿度,室内、室外侧送风由顶部通过均流孔向下均匀送至房间内。实验原理如图 2 所示。



P 压力测点;T 温度测点。

图 2 热泵驱动热管式辐射供热装置实验原理

Fig. 2 Experimental principle of heat pump driven heat pipe radiation heating device

为更好的评价系统性能,本实验对其主要部位的温度传感器、压力传感器及冷却水流量计、压缩机功率计、量热器功率计等仪表进行了标定,主要实验仪器参数如表 2 所示。

30 min 内逐渐减小并趋于稳定。稳定状态下冷凝温度与热管表面的温差仅为 1 ~ 1.5 °C。因为冷凝器和热管蒸发段仅通过铜管壁面传热,传热热阻非常小而传热面积相对较大。

表 2 主要实验仪器

Tab. 2 The parameter of main experiment sensors

| 测量仪器 | 测量变量 | 测量范围 | 测量精度 |
|-------|--------------|---------------|----------|
| Pt100 | 温度/°C | -150 ~ 150 °C | ±0.15 °C |
| 压力传感器 | 压力/MPa | -0.1 ~ 4.5 | ±0.2% |
| 数据采集器 | — | 0 ~ 100 mA | ±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% |

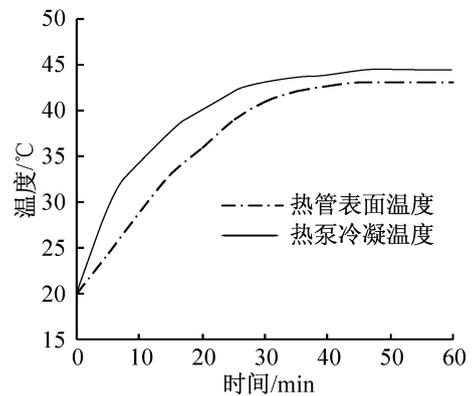


图 3 系统启动过程热管散热器表面温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of heat pipe radiator surface at starting process

4 实验结果与分析

在室内温度为 18 ~ 22 °C,室外温度为 -15 ~ 0 °C 的工况下,Pt100 的测量精度为 ±0.15 °C,热泵工质为 R22 时,分别研究了热管散热器充注 R22、R32、R410A 和 R134a 时的热管表面温度分布、制热量、制热 COP 等性能参数。

图 4 所示为在环境温度分别为 -15、-10、-5、0 °C 时,热管散热器表面的温度分布状况(t1 ~ t15 为均匀分布在热管散热器表面的 15 个温度测点的温度)。由图 4 可以看出,环境温度越低,热管散热器表面温度越低。在同一环境温度下,散热器表面温度最大和最小值之间温差小于 1 °C。表明热管散热器具有良好的表面温度分布均匀性,能有效地向周围环

图 3 所示为系统启动过程热管散热器表面温度分布。当室外温度为 -5 °C,室内温度为 20 °C 时,热泵冷凝温度在 30 min 内从 20 °C 升至 40 °C。随着热泵冷凝器温度的升高,热管散热器表面温度持续上升,热管表面温度与热泵冷凝温度之间的温度梯度在

境辐射热量。

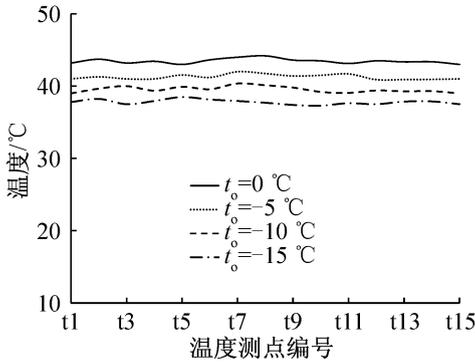


图 4 不同环境温度下热管散热器表面温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of heat pipe radiator surface under different temperature

图 5 所示为不同充注比率下系统的制热性能变化。充注比率定义为充注液体工质体积与热管散热器内部总容积的比值。图 6 所示为最佳充注比率下各工质制热 COP。由图 5 和图 6 可知,当工质为 R32 和 R410A 时系统可得到较高的制热量和制热 COP。R32 的制热 COP 比 R134a 高约 2.7%。系统制热量和制热 COP 随工质充注比率的增大先升高后降低, R32 的最佳充注比率为 14%, R410A、R22 和 R134a 的最佳充注比率为 10%。在最佳充注比率下, R32 获得系统最高的制热 COP。

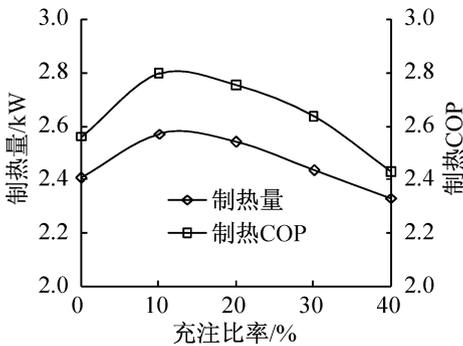


图 5 热管散热器充注比率不同时系统的制热性能变化

Fig. 5 The variation of heating performance with different working fluid charge ratio

图 7 所示为当室外温度 t_o 分别为 -15 、 -10 、 -5 、 0 °C, 室内温度 t_i 为 $18 \sim 22$ °C 时, 热管按最佳充注比率充注 R32 时系统制热 COP 的变化。由图 7 可以看出系统制热 COP 随环境温度的升高而升高, 在室外温度相同时, 系统制热 COP 随室内温度的升高而降低。

5 结论

本文提出了热泵驱动热管式辐射供热装置的循

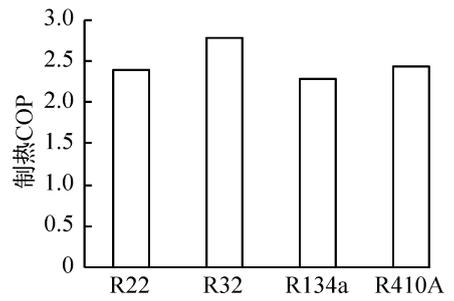


图 6 最佳充注比率下各工质制热 COP

Fig. 6 The variation of heating COP under optimal working fluid charge ratio

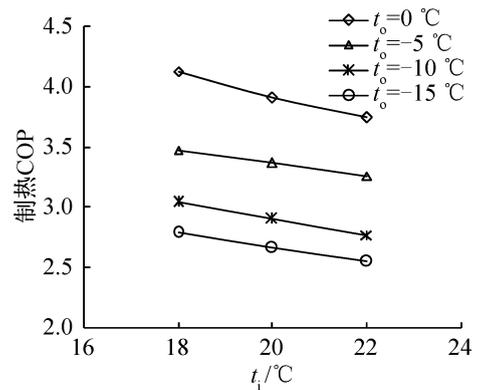


图 7 不同工况下热管散热器按最佳充注比率充注

R32 时系统制热 COP

Fig. 7 The variation of heating COP with optimum mass filling ratio of R32 of heat pipe radiator under different condition

环原理, 搭建了空气源热泵和热管散热器相结合的实验装置, 通过实验研究工质种类和工质充注比率对热管散热器的工作性能的影响, 不同工况下系统的制热量和制热 COP 的变化, 得到以下结论:

- 1) 热泵驱动热管式辐射供热装置启动过程快, 常温下 30 min 内达到稳定运行状态。
- 2) 热管散热器表面温度分布均匀, 最大表面温度和最小表面温度差小于 1 °C。
- 3) 热管散热器充注 R32 时可得到最高的制热量和制热 COP。系统的制热 COP 随充注比率呈先增大后减小的趋势, 最佳充注比率为 0.1。
- 4) 热泵冷凝温度和热管表面温度的温差为 1 ~ 1.5 °C。
- 5) 当室内温度为 22 °C, 室外温度为 $-15 \sim 0$ °C 时, 制热 COP 可分别达到 2.55 和 4.1。

本文受北京市教委科技计划项目 (SQKM201810005011) 和 2017 年度北京市优秀人才培养资助项目 (2017000026833TD02) 资助。(The project was supported by the Science and Technology

Plan Project of Beijing (No. SQKM201810005011) and 2017 Beijing Excellent Talent Training Fund (No. 2017000026833TD02.)

参考文献

[1] 王铁军, 徐维, 曾晓程, 等. 空气源热泵地暖系统冬季应用[J]. 制冷学报, 2017, 38(4): 31 - 35. (WANG Tiejun, XU Wei, ZENG Xiaocheng, et al. Application of air source heat pump system for floor heating during winter [J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(4): 31 - 35.)

[2] 孟华, 王海, 龙惟定. 夏热冬冷地区能源总线系统的区域能源规划方法[J]. 制冷学报, 2017, 38(4): 50 - 58. (MENG Hua, WANG Hai, LONG Weiding. District-energy planning method based on energy bus system in hot summer and cold winter areas [J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(4): 50 - 58.)

[3] CHOTIVISARUT N, KIATSIRIROAT T. Cooling load reduction of building by seasonal nocturnal cooling water from thermosyphon heat pipe radiator[J]. International Journal of Energy Research, 2009, 33(12): 1089 - 1098.

[4] CHOTIVISARUT N, NUNTAPHAN A, KIATSIRIROAT T. Seasonal cooling load reduction of building by thermosyphon heat pipe radiator in different climate areas[J]. Renewable Energy, 2012, 38(1): 188 - 194.

[5] ZHANG Xingxing, ZHAO Xudong, SHEN Jingchun, et al. Dynamic performance of a novel solar photovoltaic/loop heat pipe heat pump system[J]. Applied Energy, 2014, 114(2): 335 - 352.

[6] LIM H, KIM C, CHO Y, et al. Energy saving potentials from the application of heat pipes on geothermal heat pump system [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 126(11): 1191 - 1198.

[7] SEBARCHIEVICI C, SARBU I. Performance assessment of a ground-coupled heat pump for an office room heating using radiator or radiant floor heating systems[J]. Renewable Energy, 2015, 76(4): 148 - 159.

[8] SARBU I, SEBARCHIEVICI C. General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings[J]. Energy and Buildings, 2014, 70(1): 441 - 454.

[9] MAIVEL M, KONZELMANN M, KURNITSKI J. Heating system return temperature effect on heat pump performance [J]. Energy and Buildings, 2015, 94(3): 71 - 79.

[10] MAIVEL M, KONZELMANN M, KURNITSKI J. Energy performance of radiators with parallel and serial connected panels[J]. Energy and Buildings, 2014, 86(1): 745 - 753.

[11] BRADY L, ABDELLATIF M, CULLEN J, et al. An investigation into the effect of decorative covers on the heat output from LPHW radiators [J]. Energy and Buildings, 2016, 133(12): 414 - 422.

[12] BRADY L, ABDELLATIF M. Assessment of energy consumption in existing buildings[J]. Energy and Buildings, 2017, 149(8): 142 - 150.

[13] 陆耀庆. 供暖通风设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987. (LU Yaoqing. Handbook of heating and ventilation design [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1987.)

[14] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006. (YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.)

[15] 童钧耕. 工程热力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007. (TONG Jungeng. Engineering thermo dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.)

[16] 田玉卓. 供热工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008. (TIAN Yuzhuo. Heat supply engineering [M]. Beijing: China Machine Press, 2008.)

通信作者简介

许树学,男,助理研究员,硕士生导师,北京工业大学制冷实验室,13810094996,E-mail: xsx@bjut.edu.cn。研究方向:热泵技术及其应用,自然工质,制冷系统测试技术。

About the corresponding author

Xu Shuxue, male, research assistant, master tutor, Lab of Refrigeration, Beijing University of Technology, +86 13810094996, E-mail: xsx@bjut.edu.cn. Research fields: heat pump and its application, natural refrigerants, testing technology for refrigeration system.