

文章编号:0253-4339(2025)01-0046-08

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.01.046

热泵技术专栏

空气源热泵毛细管地板辐射供暖系统实验研究

牛建会 王海超 吕天舒 李永亮

(河北省可再生能源供热工程技术中心 河北建筑工程学院 张家口 075000)

摘要 空气源热泵毛细管地板辐射供暖系统以制冷剂为热工质直接加热地板,具有系统简单、传热效果好的优点。搭建了空气源热泵毛细管地板辐射供暖实验装置,在不同室外环境温度下对平行布置的毛细管地板辐射末端进行供暖实验研究。实验结果表明:室外温度越低,毛细管地板辐射末端温度稳定所需时间越长,当室外温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,稳定时间为120 min;同一根毛细管壁上排气入口端与凝液出口端温差较大,可达到 $6.40\text{ }^{\circ}\text{C}$,2 cm厚水泥地板表面温差可达 $4.20\text{ }^{\circ}\text{C}$;从毛细管壁至水泥地板表面竖向温差较小,不超过 $0.40\text{ }^{\circ}\text{C}$,地板竖向传热效果良好;不同毛细管的同一位置处温差在 $0.80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,温度均匀性良好;室外温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,机组稳定运行制热 COP 可达4.61,性能良好。

关键词 空气源热泵;毛细管;地板辐射;制热性能

中图分类号:TB61⁺1;TU832.1⁺6

文献标识码:A

Experimental Study on Capillary Floor Radiation Heating System with Air-Source Heat Pump

Niu Jianhui Wang Haichao Lü Tianshu Li Yongliang

(Hebei Renewable Energy Heating Engineering Technology Center, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou, 075000, China)

Abstract The air-source heat pump capillary radiant floor heating system directly heats the floor using a refrigerant as the heat transfer fluid, which employs a simple system and promotes good heat transfer. This study developed an experimental device for capillary floor radiant heating with an air-source heat pump, and a heating experiment with parallel capillary floor radiant terminal was conducted at different outdoor ambient temperatures. The experimental results demonstrate that a longer time is required for the temperature of the capillary floor radiation terminal to reach steady as the outdoor temperature decreases. When the outdoor temperature was $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, the required time was 120 min. The temperature difference between the discharge inlet end and the condenser outlet end on the same capillary wall was large. The temperature difference on the capillary wall reached $6.40\text{ }^{\circ}\text{C}$, while that on the surface of the 20 mm-thick cement floor reached $4.20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Conversely, the vertical temperature difference from the capillary wall to the cement floor surface was small, not exceeding $0.40\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the vertical heat transfer effect of the floor was good. The temperature difference at the same position of different capillaries was within $0.80\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the temperature uniformity was good. When the outdoor temperature was $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, the heating coefficient of performance of the unit reached 4.61 with good heating performance.

Keywords air-source heat pump; capillary; floor radiation; heating performance

由于空气源热泵在北方寒冷地区供暖时兼具节能与舒适特性^[1-3],近几年在我国北方煤改电工程中得到了广泛应用。

随着国家“碳达峰”“碳中和”政策的开展,空气源热泵将会得到进一步应用。另一方面随着经济的发展和人们生活水平的不断提高,人们对居住环境的舒适性和健康性提出了更高的要求,为了更好地满足节能、环保和舒适、健康的要求,空气源热泵供暖末端也出现了多种形式^[4-6],其中毛细管地板辐射热泵就是其中之一^[7-9]。

空气源热泵毛细管地板辐射供暖系统因系统简单、无需二次换热,而逐渐引起学者们的关注。张帅等^[10]将空气源热泵和散热器组合在一起针对北方农村地区采用高保温、大温差、小流量的输配方式供暖,提高了整体性能。许洁^[11]将低温散热器空调供暖系统应用于夏热冬冷地区,得到了很强的舒适性。王琳^[12]对制冷剂直膨式毛细管供热的空气源热泵地板换热特性进行研究,为直膨式供热末端的推广提供指导。傅允准等^[13]总结了毛细管辐射采暖的优缺点,并对系统的应用前景、系统性能等方面作出展望。曾

章传等^[14]是国内最早研发直接地板辐射供暖系统的,发现该系统具有高于传统地暖系统的节能性。王园园等^[15]设计了一种新型的空气源热泵制冷剂直热式建筑供暖系统,该系统在满足热舒适性的同时,节能效果达50%,运行稳定后制热COP(性能系数,coefficient of performance)达到3.3。黎天标^[16]研究表明,当室外温度为0℃,相对湿度为50%时,直凝式空气源热泵地暖系统小时能效比达2.72以上,当室外温度升至5℃,机组小时能效比升至3.41以上,远高于其他采暖形式。李龙新^[17]通过理论分析与计算,得出整个供暖季系统制热COP集中在2.5~3.0,具有较强的节能性。赵军等^[18]通过太阳能集热器数学模型,分析得到直膨式太阳能热泵系统制热COP可达到4.0~6.5。文献[19~21]针对制冷剂直接冷凝末端,建立了二维热传导微分方程和边界条件求解数学模型,模拟计算制冷剂和地板结构层之间的传热过程。文献[22~24]对毛细管辐射末端进行实验研究,表明毛细管地板辐射供暖系统不仅室内温度场分布均匀,而且室内热舒适性指标PMV-PPD(predicted mean vote-predicted percentage dissatisfied)可以达到规范I级的舒适标准。

目前空气源热泵毛细管地板辐射供暖系统研究主要集中在系统性能及热舒适性方面,而针对毛细管地板辐射供暖末端的地板温度特性研究较少。本文搭建了空气源热泵毛细管地板辐射供暖系统实验装置,在人工环境控制室研究不同室外环境温度下,空气源热泵毛细管地板辐射供暖系统的地板温度特性及系统制热性能的变化。

1 实验装置

空气源热泵毛细管地板辐射供暖系统实验装置搭建在河北建筑工程学院人工环境控制室内,控制室分室内侧和室外侧两间,室内外环境控制室内温度均能控制在-15~40℃,精度±0.2℃;湿度均能控制在30%~85%,不确定度5%。

热泵系统由空气源热泵室外机组及毛细管地板辐射供暖末端两部分组成。室外机组位于室外人工环境控制室内,由额定功率为0.735kW某品牌滚动转子压缩机、翅片管式蒸发器、电子膨胀阀等组成。毛细管地板辐射供暖末端由16根外径为4mm的铜管平行布置组成。采用R410A作为制冷剂并通过电子膨胀阀来实时控制蒸发器出口过热度为5℃。压缩机排出的高温高压制冷剂蒸气直接进入毛细管地板辐射末端冷凝放热,冷凝后的高压制冷剂液体经过电子膨胀阀节流降压后进入蒸发器蒸发吸热,实验装

置如图1所示。

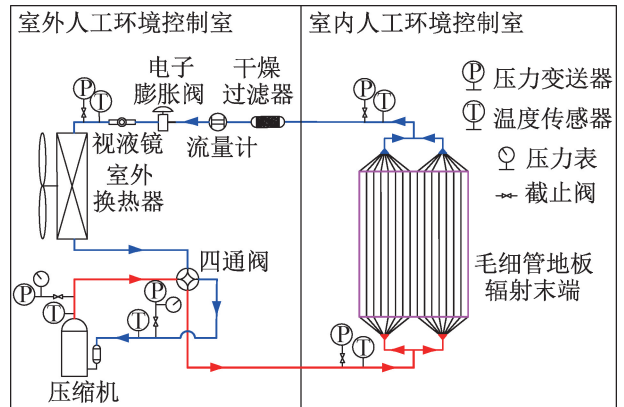


图1 空气源热泵毛细管地板辐射供暖系统实验装置
Fig.1 Experimental device for capillary floor radiation heating system with air-source heat pump

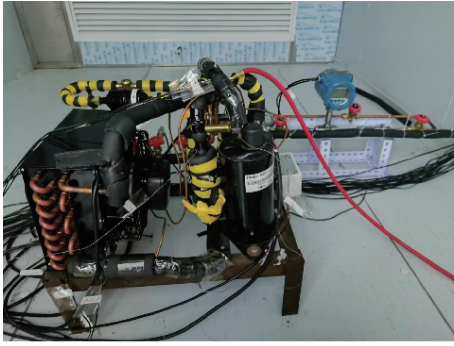
在人工环境控制室内搭建尺寸为2m×1.5m(长×宽)的毛细管地板辐射供暖地面,由自室内环境控制室地面依次向上敷设50mm厚聚苯乙烯保温板、0.04mm铝箔镜面反射膜、铁丝网、毛细管、20mm厚水泥砂浆层构成。毛细管末端通过铜管与室外机组连接,采用16根外径为4mm、壁厚为0.5mm、直管段长度为2000mm的铜管,相邻毛细管之间间距为100mm。为了保证分液均匀,实验地板辐射末端装置采用两组8分支分液器分流,高温高压的气态制冷剂经过分液器分流后,进入各毛细管支路。支路采用平行型布置方式且每个支路毛细管等长,支路和主路焊接连接。空气源热泵毛细管地板辐射供暖系统实物如图2所示。

2 测试环境与仪表

本实验只进行冬季热泵制热工况运行,实验将室内侧温度稳定在20℃,实验研究当室外侧温度分别为5、0、-5℃时,热泵机组从开机至稳定这一动态变化过程中,毛细管地板辐射末端温度特性及热泵机组制热性能的变化规律。

毛细管地板辐射供暖地面的温度测点由下至上分3层布置,每一层测点位置相同,均布置5个测点,如图3所示。第1层布置在毛细管壁面,测点分别为1'、2'、3'、4'、5';第2层布置在10mm厚水泥砂浆找平层中,测点分别为1''、2''、3''、4''、5'';第3层布置在水泥地板表面,测点分别为1、2、3、4、5。

在机组主要设备进出口处设置温度、压力等传感器,主要测量压缩机吸排气温度及压力、压缩机功率、冷凝器进出口温度及压力、制冷剂质量流量等参数,通过Agilent 34972A数据采集仪采集记录数据,各测



(a) 空气源热泵室外机组



(b) 毛细管地板辐射供暖末端

图 2 空气源热泵毛细管地板辐射供暖系统实物
Fig.2 Physical of capillary floor radiation heating system with air-source heat pump

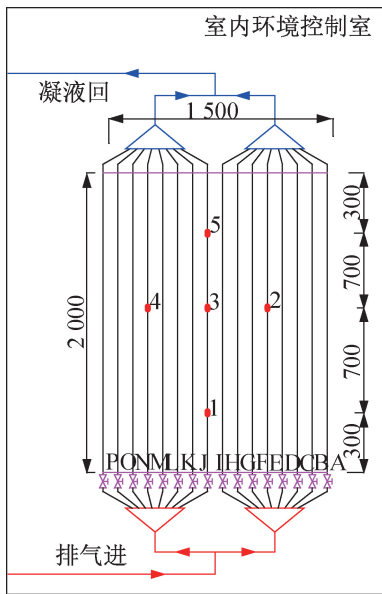


图 3 毛细管地板辐射末端温度测点布置 (单位: mm)
Fig.3 Arrangement of temperature measuring points at the end of capillary floor radiation (Unit: mm)

量用仪表性能参数如表 1 所示。

3 数据分析及误差处理

实验过程中使用温度、压力传感器、流量计以及

表 1 仪器仪表性能参数

Tab.1 Performance parameters of instrument

测量参数	仪表型号	测量范围	精度
压力	Huba	-0.1~4.0 MPa	±0.2%
温度	Pt100	-150~150 °C	±0.15%
功率	PD6000-Y30	0~10 kW	0.5%
质量流量	LW 型	0~150 kg/h	±1%
数据采集	Agilent34972A		±0.2%

功率表等仪表获得直接测量的物理量,间接物性参数由测量获得的温度、压力等参数经查询软件 REFPROP 9.1 获得,系统制热量由冷凝器入口与出口制冷剂焓差乘以制冷剂质量流量获得:

$$Q = q(h_i - h_o) \quad (1)$$

式中: Q 为制热量, kW; q 为制冷剂质量流量, kg/s; h_i 、 h_o 分别为冷凝器入口、出口制冷剂焓值, kJ/kg。

系统制热 COP:

$$COP = Q/P \quad (2)$$

式中: P 为压缩机功率, kW。

在数据分析过程中,对于不能直接测得的被测量 Y ,若与其他测量值 x_1, x_2, \dots, x_n (输入量) 存在如下函数关系:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3)$$

被测量 Y 的估计值 y 的标准不确定度,是由相应输入量 x_1, x_2, \dots, x_n 的标准不确定度适当合成求得的,记为 $u_c(y)$ 。当全部输入量 x_i 彼此独立时,合成标准不确定度利用式(4)计算:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_k}\right)^2 \cdot u^2(x_k)} \quad (4)$$

式中: $u(x_k)$ 为标准不确定度; $\partial f/\partial x_k$ 为函数 y 在 x_k 的误差传递系数,表示估计值 y 随 x_k 的变化而变化的程度。

由式(1)与式(2)可知:

$$Q = q(h_i - h_o) = f(q, p_i, t_i, p_o, t_o) \quad (5)$$

$$COP = Q/P = f(q, p_i, t_i, p_o, t_o, P) \quad (6)$$

系统制热量与制热 COP 的误差按式(7)~式(10)计算:

$$u_Q = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial q} u_q\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial t_i} u_{t_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial t_o} u_{t_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial p_i} u_{p_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial p_o} u_{p_o}\right)^2} \quad (7)$$

$$u_{COP} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial q} u_q\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial t_i} u_{t_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial t_o} u_{t_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial p_i} u_{p_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial p_o} u_{p_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial P} u_P\right)^2} \quad (8)$$

$$u_{rel,Q} = u_Q/Q \quad (9)$$

$$u_{rel,COP} = u_{COP}/COP \quad (10)$$

式中: $u_q, u_{t_i}, u_{t_o}, u_P, u_{p_i}, u_{p_o}$ 为参数不确定度; u_Q, u_{COP} 为合成标准不确定度; $u_{rel,Q}, u_{rel,COP}$ 为测量误差。

在实验过程中,数据采集每隔 10 s 扫描记录一次,取每 20 个连续测量数据的平均值作为一个测量值,代入式(7)~式(10)计算得到制热量测量误差为 2.8%,制热 COP 测量误差为 5.4%。

4 实验结果与分析

当室外温度为 0 °C,室内温度为 20 °C 时,毛细管地板辐射末端各测点的温度变化如图 4~图 6 所示。开机初期,各测点的升温过程明显,待系统运行 120 min 后,各测点温度趋于稳定。

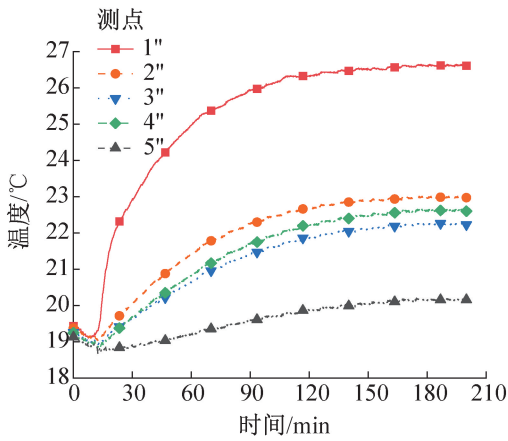


图 4 毛细管壁温度变化

Fig.4 Temperature variation of capillary wall

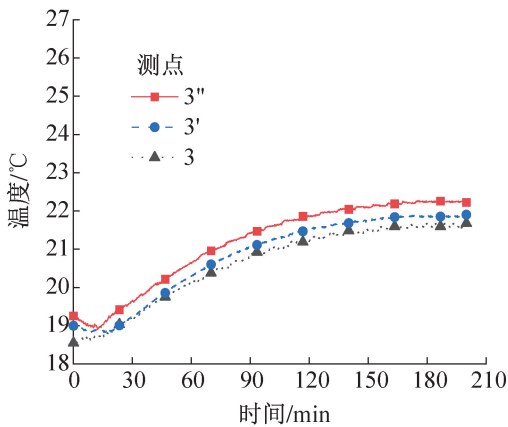


图 5 地板竖向不同厚度上温度变化

Fig.5 Temperature variation on different vertical thicknesses of the floor

图 4 所示为毛细管壁温度变化,测点 1''、3''、5'' 分别位于同一根毛细管的排气进口端、中段及凝液出口端 3 个位置上。由图 4 可知,1'' 温升最快,5'' 温升最

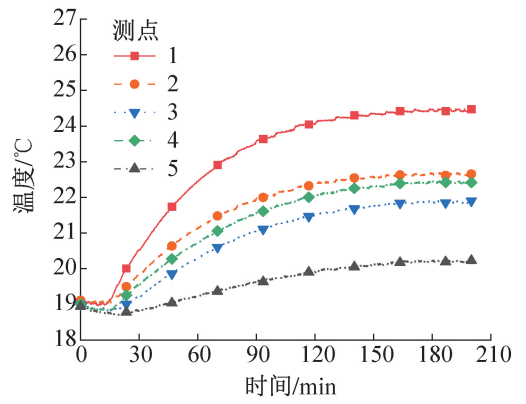


图 6 水泥地板表面温度变化

Fig.6 Surface temperature variation of cement floor

慢,待系统运行稳定后 1'' 温度最高维持在 26.5 °C,而 5'' 温度最低为 20.1 °C,两者相差 6.4 °C,而 3'' 温度介于两者之间,与 1'' 和 5'' 温差分别为 4.4 °C 和 2.1 °C。这是由于 1'' 位于排气进口端,压缩机排气进入毛细管后最先加热 1'' 位置。而 5'' 位于凝液出口端,放热后的制冷剂凝液温度较低,因而 5'' 管段温度较低,同一根毛细管不同位置处温差较明显。

测点 2''、3'' 与 4'' 位于不同毛细管的相同位置处,由图 4 可知,这三者温度接近,最大温差不超过 0.80 °C,说明机组分液均匀,毛细管末端冷凝放热效果均匀一致。

图 5 所示为地板竖向不同厚度上温度变化。由图 5 可知,在不同厚度上各测点温度接近,毛细管壁 3'' 温度最高为 22.3 °C,地板表面 3 温度最低为 21.9 °C,两者最大温差为 0.40 °C。说明较薄的水泥填充层对地板竖向温度影响较小。

图 6 所示为水泥地板表面温度变化。与图 4 相比,从开机至稳定运行,不同位置处测点温升变缓,但依然是排气进口端测点 1 温度最高,凝液出口端测点 5 温度最低,温度稳定后,两者温度分别为 24.5 °C 和 20.3 °C,温差为 4.20 °C,与图 4 中毛细管壁温相比,两者温差减小 2.20 °C。稳定后测点 1 与测点 3 温差为 2.50 °C,测点 3 与测点 5 温差为 1.70 °C。不同毛细管相同位置上测点 2、3、4 温度接近,且均稳定在 22.0 °C 附近,3 个测点之间的温差不超 0.70 °C。与毛细管壁面温差相比,敷设较薄的水泥填充层对地板温度影响较小。

由此可知,毛细管地板辐射供暖的温度均匀性是系统设计需特别注意的问题,应该在设计初期和施工过程中保证制冷剂流量分配均匀,特别是分液器/分气器的选择和管路的长度等结构参数选取;此外,敷设毛细管时可以冷热逆流间隔布置,同时在铺设水泥前

进行开机试运行,保证均匀度在可接受的范围内。

图7所示为当室外环境温度 t_o 分别为5、0、-5℃,室内温度为20℃时,地板表面测点1、3、5的温度变化对比。

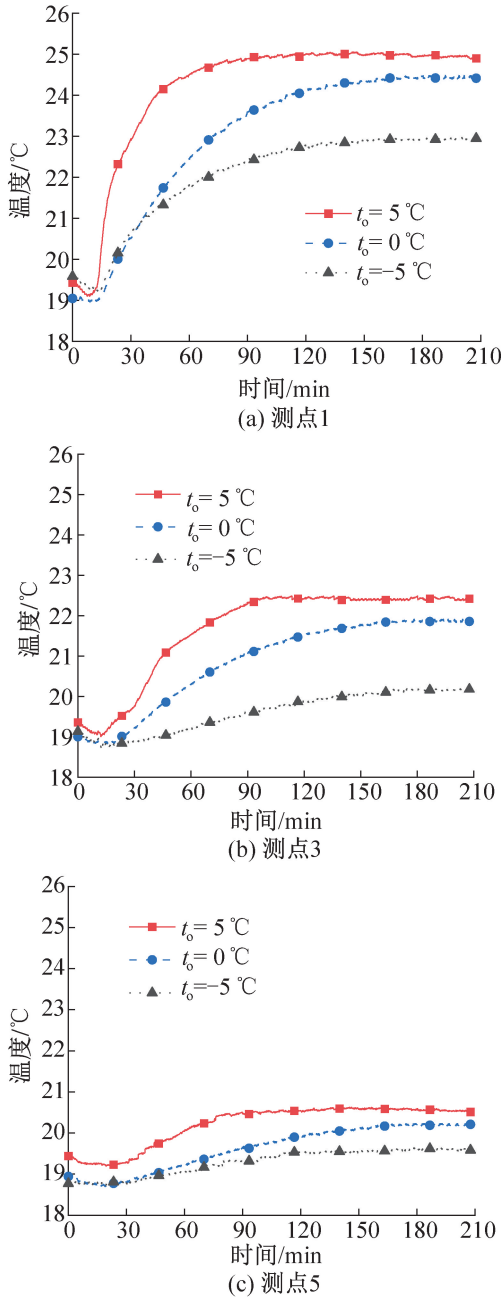


图7 不同工况测点1、3、5温度变化

Fig.7 Temperature variation of measuring point 1, 3, 5 under different conditions

图7(a)所示为地板表面测点1在3种不同工况下的温度变化,由图7(a)可知,室外环境温度越高,地表升温速度越快,机组达到稳定所需时间越短,且运行稳定后温度也越高。测点1在室外环境为5℃时,从开机30min至60min内温度升高速率最快,平均为0.74℃/10min,开机90min后机组基本达到稳

定,该点温度最高,稳定运行后温度维持在约25.0℃。当室外环境温度为-5℃时,测点1温度升高速率最慢,从开机30min至60min内温度升高速率平均为0.47℃/10min,且开机160min后机组达到稳定,其温度为22.9℃。室外环境温度为0℃时,测点1的升温速率与机组运行稳定后温度介于上述两种环境温度之间。

图7(b)所示为地板表面测点3在3种不同工况下的温度变化。由图7(b)可知,测点3温度变化趋势与图7(a)中测点1的温度变化趋势基本相同,但与测点1温度相比,不同工况下温升速率明显下降,且温度稳定后测点3平均温度明显低于测点1的温度。同样5℃工况升温最快,为0.43℃/10min,-5℃工况升温速度最慢,为0.19℃/10min,温度稳定后5℃工况时,平均温度为22.4℃,-5℃时温度为20.2℃,而0℃工况下,温度介于两者之间。与图7(a)中测点1相比,测点3位于制冷剂凝结段,因此温度比排气入口端的温度稍低。

图7(c)所示为地板表面测点5在3种不同工况下的温度变化,由于测点5位于凝液出口段,制冷剂温度较低,因此机组开机初期未出现明显升温,而是一直基本维持在平均温度附近。5℃时维持在20.6℃,0℃时维持在20.2℃,-5℃时维持在19.9℃。这也与图4中毛细管壁温5"测点温度相吻合。

图8所示为不同工况下系统制热量的变化。由图8可知,系统制热量随室外温度的降低而降低,当室外温度为5℃时,制热量稳定在约2.46kW;当室外温度为0℃时,制热量稳定在约2.22kW;当室外温度为-5℃时制热量稳定在约1.89kW。

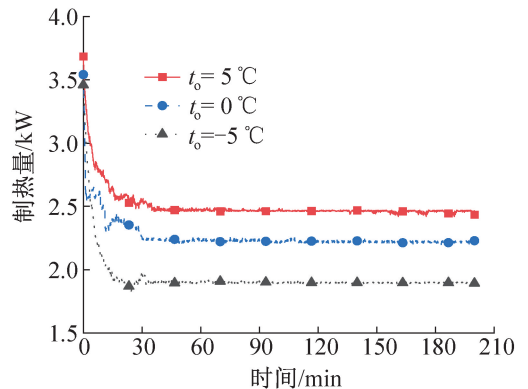


图8 不同工况下制热量的变化

Fig.8 Variation of heating capacity under different conditions

图9所示为不同工况下系统制热COP的变化。由图9可知,系统制热COP的变化规律与系统制热

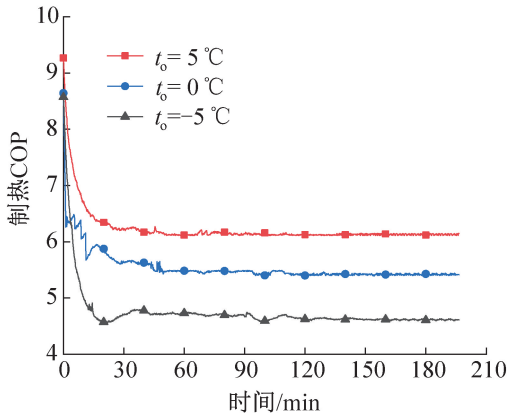


图9 不同工况下制热 COP 变化

Fig.9 Variation of heating COP under different conditions

量的变化规律基本相同,随室外温度降低,制热 COP 下降。当室外温度分别为 5、0、-5 °C 时,制热 COP 基本稳定在约 6.12、5.47、4.61。系统制热 COP 较高,节能效果良好。

5 结论

空气源热泵毛细管地板辐射供暖系统直接以液态制冷剂作为热载体加热地面,通过在不同室外环境温度下进行实验研究,得到以下结论:

1) 室外温度越低,毛细管地板辐射末端温度稳定所需时间越长,当室外温度为-5 °C 时,稳定时间为 120 min。同一根毛细管壁面上排气入口端与凝液出口端温差较大,可达到 6.40 °C,20 mm 厚水泥地板表面温差可达到 4.20 °C,建议在敷设毛细管初期充分考虑制冷剂分配与地板表面温度均匀等问题;从毛细管壁至水泥地板表面竖向温差较小,不超过 0.40 °C,地板竖向传热效果良好。不同毛细管同一位置处温差在 0.80 °C 以内,温度均匀性良好。

2) 地板表面排气入口端升温速率随室外环境温度降低而逐渐下降,5 °C 工况升温最快,为 0.74 °C/10 min, -5 °C 工况升温速度最慢,为 0.47 °C/10 min。待温度稳定后,地板表面不同位置处温度均随室外环境温度下降而有所下降。室外环境温度为-5 °C 时,地板中部位置温度为 20.2 °C,凝液出口端温度为 19.9 °C。

3) 热泵机组制热性能随室外温度的降低而下降,当室外温度为-5 °C 时,机组制热量达到 1.89 kW,制热 COP 稳定在 4.61,机组性能良好。

本文受河北建筑工程学院博士科研启动基金项目(B-202303),河北建筑工程学院研究生创新基金项目(XY2023052)资助。(The project was supported by the Doctoral

Research Initiation Fund Project of Hebei University of Architecture (No. B-202303) and the Graduate Innovation Fund Project of Hebei University of Architecture (No. XY2023052).)

参考文献

[1] 杜彦,田琦,杨晋明,等. 空气源热泵直接地板辐射供暖系统优化运行方式[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(2): 199-204. (DU Yan, TIAN Qi, YANG Jinming, et al. Research of optimizing running modes for direct radiant floor heating system with air source heat pump [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2015, 36(2): 199-204.)

[2] 李元哲,于涛,陈天侠. 空气源热泵地板供暖系统在北方寒冷地区应用的节能性与适用性[J]. 暖通空调, 2012, 42(2): 62-65. (LI Yuanzhe, YU Tao, CHEN Tianxia. Energy efficiency and applicability of air-source heat pump floor radiant heating system in the Northern cold areas [J]. Journal of HV&AC, 2012, 42(2): 62-65.)

[3] 王宇航,王巍,张藤,等. 空气源热泵供暖在寒冷地区临建中的应用研究[J]. 中国设备工程, 2022(2): 19-21. (WANG Yuhang, WANG Wei, ZHANG Teng, et al. Study on the application of air source heat pump heating in temporary construction in cold areas [J]. China Plant Engineering, 2022(2): 19-21.)

[4] HWANG Y J, JEONG J W. Energy saving potential of radiant floor heating assisted by an air source heat pump in residential buildings [J]. Energies, 2021, 14: 1321.

[5] LIU Minzhang, ZHANG Huan, ZHENG Wandong, et al. Heat transfer research of a new type of radiant floor heating system [J]. Heat Transfer Engineering, 2020, 41(18): 1626-1641.

[6] 杨华,赵福松,李少雄,等. 地板辐射加风盘冷暖两联供系统的应用分析[J]. 建设科技, 2018(23): 69-71. (YANG Hua, ZHAO Fusong, LI Shaoxiong, et al. Application analysis of two combined supply system for floor radiation and air cooling system [J]. Construction Science and Technology, 2018(23): 69-71.)

[7] ZHENG Chen, YOU Shijun, ZHANG Huan, et al. Defrosting performance improvement of air-source heat pump combined refrigerant direct-condensation radiant floor heating system with phase change material [J]. Energies, 2020, 13(18): 4594.

[8] 王李子. 严寒地区空气源热泵直凝地板辐射传热及冷凝特性研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2020. (WANG Lizi. Study on radiation heat transfer and condensation characteristics of air source heat pump direct condensing floor in severe cold area [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu

- University, 2020.)
- [9] ZHAO M, GU Z L, KANG W B, et al. Experimental investigation and feasibility analysis on a capillary radiant heating system based on solar and air source heat pump dual heat source[J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 2094–2105.
- [10] 张帅, 胡文举, 李德英, 等. 北京地区空气源热泵供暖系统的分析与改进[J]. *建筑热能通风空调*, 2016, 35(8): 61–63. (ZHANG Shuai, HU Wenju, LI Deying, et al. Research and analysis of air source heat pump and radiator heating system in Beijing area [J]. *Building Energy & Environment*, 2016, 35(8): 61–63.)
- [11] 许洁. 低温散热器供暖系统在合肥地区的适宜性研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2018. (XU Jie. Study on suitability of low temperature radiator heating system in Hefei area[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2018.)
- [12] 王琳. 基于直膨式毛细管供热的空气源热泵地板换热特性研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021. (WANG Lin. Study on floor heat transfer characteristics of air source heat pump based on direct expansion capillary heating[D]. Qingdao: Qingdao Tehcnology University, 2021.)
- [13] 傅允准, 杨林, 韩坚洁, 等. 毛细管辐射采暖系统应用探讨[J]. *上海工程技术大学学报*, 2012, 26(2): 172–175. (FU Yunzhun, YANG Lin, HAN Jianjie, et al. Discussion on application of capillary radiant heating system[J]. *Journal of Shanghai University of Engineering Science*, 2012, 26(2): 172–175.)
- [14] 曾章传, 吴锦京, 魏新利. 空气源热泵直接地板辐射采暖系统实验研究及热力性能分析[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(8): 1151–1157. (ZENG Zhangchuan, WU Jinjing, WEI Xinli. Experimental research and thermodynamics analysis of direct radiant floor heating system with air source heat pump [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2011, 32(8): 1151–1157.)
- [15] 王园园, 张超, 梁年良, 等. 空气源热泵冷剂直热式建筑采暖系统研究现状[J]. *建筑节能*, 2015, 43(7): 21–24. (WANG Yuanyuan, ZHANG Chao, LIANG Nianliang, et al. Status of the refrigerant direct-heating system in building with air-source heat pump[J]. *Building Energy Efficiency*, 2015, 43(7): 21–24.)
- [16] 黎天标. 直凝式空气源热泵地暖系统研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016. (LI Tianbiao. Study on direct condensing air source heat pump radiant floor heating system [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.)
- [17] 李龙新. 空气源热泵直凝式地板辐射供暖系统地板热及运行特性研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018. (LI Longxin. Study on the heat transfer and operation characteristics of air source heat pump direct condensing floor radiant heating system [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.)
- [18] 赵军, 刘立平, 李丽新, 等. R134a 应用于直接膨胀式太阳能热泵系统[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2000, 33(3): 302–305. (ZHAO Jun, LIU Liping, LI Lixin, et al. Investigation into the use of R134a in a direct expansion solar assisted heat pump[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2000, 33(3): 302–305.)
- [19] MA Kunru, HOU Nana, WANG Xin, et al. Analysis and study of the effect of the direct floor radiant heating system of the air source heat pump at heating working conditions [J]. *International Journal of Simulation: Systems*, 2016, 17(28):41–45.
- [20] 戴春祥, 夏焱, 韩伟, 等. 空气源热泵双末端系统冬季供暖性能试验研究[J]. *南京师范大学学报(工程技术版)*, 2020, 20(4): 10–15. (DAI Chunxiang, XIA Yi, HAN Wei, et al. Experimental research on heating performance of air source heat pump double-end system in winter [J]. *Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition)*, 2020, 20(4): 10–15.)
- [21] 袁旭东, 贾磊, 宋有强. 送风+辐射组合末端供暖动态特性研究[J]. *流体机械*, 2018, 46(10): 68–72. (YUAN Xudong, JIA Lei, SONG Youqiang. Study on heating dynamical characteristics of combined air supply and radiation terminal [J]. *Fluid Machinery*, 2018, 46(10): 68–72.)
- [22] GENDELIS S, JAKOVIČS A, BANDENIECE L. Experimental research of thermal comfort conditions in small test buildings with different types of heating [J]. *Energy Procedia*, 2015, 78: 2929–2934.
- [23] MÁRQUEZ A A, LÓPEZ J M C, HERNÁNDEZ F F, et al. A comparison of heating terminal units: fan-coil versus radiant floor, and the combination of both[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 138: 621–629.
- [24] 马小丹, 王梦飞, 蒲宇航, 等. 多联干式毛细管辐射热泵室内热舒适性实验研究[J]. *制冷学报*, 2020, 41(3): 102–110. (MA Xiaodan, WANG Mengfei, PU Yuhang, et al. Experimental study on indoor thermal comfort of multi-connected dry capillary radiation heat pump[J]. *Journal of Refrigeration*, 2020, 41(3): 102–110.)

(下转第 166 页)

Chemie, 2018, 57(22): 6568–6571.

通信作者简介

周新丽,女,教授,上海理工大学生物系统热科学研究所,13817547878,E-mail: zjulily@163.com。研究方向:低温生物医学。

About the corresponding author

Zhou Xinli, female, professor, Institute of Biothermal Technology, University of Shanghai for Science and Technology, 86-13817547878, E-mail: zjulily@163.com. Research fields: cryobiology.

(上接第52页)

通信作者简介

牛建会,女,博士,副教授,硕士生导师,河北建筑工程学院能源工程系,15324033180,E-mail: zjknjh@163.com。研究方向:新型制冷热泵系统及其节能环保技术。

About the corresponding author

Niu Jianhui, female, Ph. D., associate professor, master super-

visor, Department of Energy Engineering, Hebei University of Architecture, 86-15324033180, E-mail: zjknjh@163.com. Research fields: new-type refrigeration and heat pump system and its energy saving and environmental protection technology.