

# 空气源热泵双末端系统冬季供暖性能 试验研究

戴春祥<sup>1</sup>, 夏 焱<sup>1</sup>, 韩 伟<sup>2</sup>, 朱益秀<sup>1</sup>

(1. 南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210023)

(2. 扬州颐和投资发展有限公司, 江苏 扬州 225000)

**[摘要]** 对空气源热泵双末端进行实际应用, 测试风机盘管和地面辐射两种空调末端冬季供暖时的送风温度、地面温度、室内空气温度、主机供回水温度及不同地面装饰材料房间的供回水温度和地面温度, 进而得出两种空调末端的提温速度及室内垂直温度分布。研究表明: 前者送风温度的升温速度是后者提温速度的 11.2 倍, 且在两种空调末端供热下, 前者室内 1 m 处空气温度的升温速度是地暖末端的 3.73 倍, 因此前者使室内能更快达到室内舒适的温度; 地暖辐射虽然使室内升温速度慢, 但房间的垂直温度分布的均匀性要优于风机盘管。主机室外机化霜对风机盘管末端的送风温度影响较大, 而辐射地面末端由于地面混凝土层等材料具有蓄热性, 对辐射地板表面温度和房间温度影响较小。地暖末端供暖时, 大理石地面的升温速度是木地板的 1.67 倍, 因此大理石地面能更快达到舒适温度的需求。

**[关键词]** 风机盘管, 地面辐射供暖, 化霜, 供暖性能, 空气源热泵

**[中图分类号]** TK-9 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2020)04-0010-06

## Experimental Research on Heating Performance of Air Source Heat Pump Double-End System in Winter

Dai Chunxiang<sup>1</sup>, Xia Yi<sup>1</sup>, Han Wei<sup>2</sup>, Zhu Yixiu<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. Yangzhou Yihe Investment Development Co., Ltd., Yangzhou 225000, China)

**Abstract:** The paper conducts an air source heat pump double terminal practical application, tests the supply air temperature, ground temperature, indoor air temperature, main engine supply and return water temperature and supply and return of rooms with different floor decoration materials during winter heating at the fan coil and ground radiation air conditioner terminals water temperature and ground temperature, and then gets the temperature increase speed and indoor vertical temperature distribution of the two air conditioners. The results of the study show that: the former's supply air temperature rises at a rate of 11.2 times that of the latter's questioning rate, and under the two types of air-conditioning terminal heating, the former's indoor air temperature at 1m rises at 3.73 times that of the floor heating terminal. It can reach a comfortable indoor temperature faster. Although the floor heating radiation slows the indoor heating speed, the uniformity of the vertical temperature distribution in the room is better than that of the fan coil. The defrosting of the main engine outdoor unit has a greater impact on the air supply temperature at the end of the fan coil. The end of the radiant floor, because the concrete layer of the ground has heat storage properties, has little effect on the surface temperature of the radiant floor and the temperature of the room. When the floor heating end is heated, the heating rate of the marble floor is 1.67 times that of the wooden floor, so the marble floor can reach a comfortable temperature faster.

**Key words:** fan coil, ground radiant heating, defrost, heating performance, air source heat pump

辐射末端因其高舒适性及良好的稳定性而得到广泛应用<sup>[1]</sup>,但供暖惰性大,房间升温速度慢,不能使房间尽快达到热舒适的状态.而风机盘管末端升温速度快,能够使室内空气温度快速达到热舒适的温度.

国内外学者对地板辐射及风机盘管两种供暖末端进行了广泛的研究.其中,一部分研究通过几种不同供暖末端的对比,来分析地板辐射及风机盘管末端室内空气温度分布的均匀性.例如,文献[2-4]对风机盘管和地面辐射两种供暖末端进行研究,得出地面辐射末端下的室内温度垂直方向温度梯度小,更为均匀,舒适度较高,但是风机盘管末端垂直温度梯度大. Daniel 等<sup>[5]</sup>利用 CFD 软件模拟计算和评估,对地板辐射供暖、通过通风系统供暖和风机盘管三种供暖末端进行研究.研究表明,地板辐射供暖的室内温度分布最为均匀. Hasan 等<sup>[6]</sup>通过对地板和墙面辐射两种系统进行分析对比,针对不同供水温度对室内空气流动和热量传递进行数值模拟研究.结果表明,地板辐射供暖具有更好的舒适性,且室内温度分布更为均匀,温度梯度小于  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ . 另一部分通过对两种不同供暖末端室内舒适性的对比,探讨哪一种末端更加舒适.例如,文献[7-9]通过对几种不同供暖末端下舒适度的对比,得出地面辐射末端下更为舒适. Stanislavs 等<sup>[10]</sup>认为在建筑物内持续供暖时,风机盘管和地面辐射两种供暖末端都能够满足室内热舒适的要求.曾璟等<sup>[11]</sup>通过对蓄能型空气源热泵地板辐射供暖系统的试验测试,得出蓄能型空气源热泵地板辐射供暖系统具有良好的室内热舒适性. Antonio 等<sup>[12]</sup>比较了同一热区内辐射地板和风机盘管两种不同末端单元组合的循环供暖系统的几种控制策略.结果表明,地面辐射系统升温速度慢,使得室内较慢达到舒适感,风机盘管虽然舒适度较差,但可通过提高温度设定值来解决.

从现有的研究来看,大多数学者的研究集中在风机盘管和地面辐射供暖末端的热舒适性以及室内空气温度分布均匀性,而对两种供暖末端到达室内温度分布均匀性与热舒适度的所需时间、地暖末端不同装饰材料供暖特性以及冬季环境温度对空气源热泵性能影响却鲜有研究,但是供暖末端的升温速率却直接影响到人们在室内达到热舒适性的速度.对此,本文研究以空气源热泵为热源的两种供暖末端系统,分析两种空调末端的升温速度、化霜过程对末端性能的影响以及地板辐射末端不同装饰材料的供暖特性.

## 1 实验简介

### 1.1 实验对象

该试验对象是南京市某住宅小区五层单元房的第四层和第五层<sup>[13]</sup>,它位于西侧,为南北向型,总建筑面积为  $286.9\text{ m}^2$ ,试验测试的时间段为 2019 年 1 月 26 日 19:00 到 1 月 27 日 10:00. 该住宅的实际使用面积为  $250.6\text{ m}^2$ ,地板采暖面积为  $170\text{ m}^2$ ,该房间的房屋类型和风机盘管的布局分别如图 1、图 2 所示. 该住户相邻的区域均未集中供暖,该住宅建筑围护结构传热系数如表 1 所示.

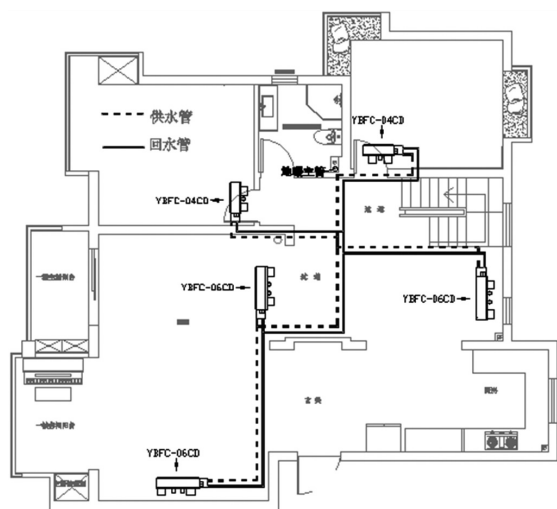


图 1 四楼平面图和空调系统布置图

Fig. 1 The fourth floor plan and air conditioning system layout

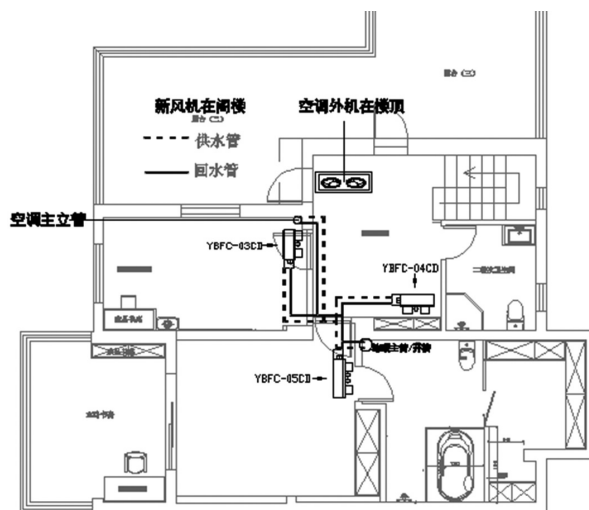


图 2 五楼平面图和空调系统布置图

Fig. 2 The fifth floor plan and air conditioning system layout

表 1 建筑围护结构传热系数  
Table 1 Heat transfer coefficient of building envelope

墙体类型	材料	厚度/mm	传热系数/(kJ/(h·m <sup>2</sup> ·K))
外墙	保温层+砖+抹灰浆材	300	0.473
内墙	陶粒混凝土+抹灰浆材	220	1.429
楼板	混凝土楼板+抹灰浆材	130	3.05
楼顶	抹灰浆材+混凝土+保温层	260	0.535

1.2 实验系统

空气源热泵双末端系统联合运行性能测试系统见图 3。空气源热泵双末端系统主要包括空气源热泵机组、地面盘管系统、风机盘管系统、分集水器等部件,其中风机盘管安装在天花板下方。

该系统所采用的热源主机为某品牌的变频空气源热泵机组,采用的制冷剂为 R410a,压缩机为直流变频喷气增焓压缩机,室外机风机为直流变频风机,循环水泵额定功率为 0.55 kW。热泵机组名义制冷量为 28 kW,名义制热量为 30 kW,额定制冷输入功率为 8.4 kW,额定制热输入功率 8.5 kW,制冷系数 EER 3.33,制热系数 COP 3.55<sup>[13]</sup>。地暖末端为湿式地暖系统,如图 4 所示。地暖盘管采用的材料为耐热聚乙烯管,其内外径分别为 12 mm/16 mm,盘管间距为 150 mm,布置成回字型,风机盘管末端采用三排管风机盘管。

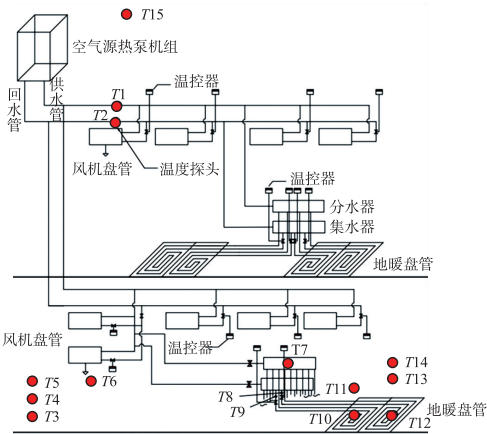
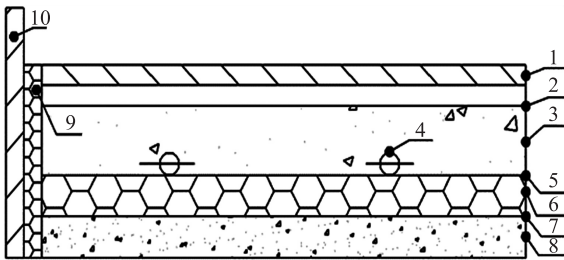


图 3 空气源热泵双末端测试系统图

Fig. 3 Air source heat pump double-end test system diagram



1.地面装饰层;2.防水层;3.混凝土找平层;4.地暖盘管;5.反射膜,钢丝网;6.保温层;7.防水层;8.原始地面层;9.边墙保温;10.墙体

图 4 湿式地暖结构

Fig. 4 Wet floor heating structure

1.3 测试仪器

表 2 为本次试验主要的测试项目以及测试所需仪器仪表的精度和测温范围。数据采集仪 Agilent34970A 如图 5 所示。

表 2 主要测试项目和试验仪器仪表

Table 2 Main test items and experimental instruments

测试项目	测量位置	仪器	精度
室外机供回水温度	T1, T2	NTC10K 热敏电阻(−30~110 ℃)	±1%
地面温度	T3, T10, T12	NTC10K 热敏电阻(−30~110 ℃)	±1%
室内温度	T4, T5, T11, T13, T14	NTC10K 热敏电阻(−30~110 ℃)	±1%
地暖供回水温度	T7~T9	NTC10K 热敏电阻(−30~110 ℃)	±1%
风机盘管送风温度	T6	NTC10K 热敏电阻(−30~110 ℃)	±1%
室外空气温度	T15	NTC10K 热敏电阻(−30~110 ℃)	±1%



图 5 测试用数据采集仪

Fig. 5 Data acquisition instrument for testing

表中,T1 为室外机供水温度;T2 为室外机回水温度;T3、T4、T5 分别风机盘管房间内为地面温度、距离地面 1 m、2 m 温度;T6 为风机盘管送风温度;T7~T9 为地暖盘管供回水温度;T10 为地暖房间内地面温度。

1.4 实验方案

为了研究空气源热泵双末端系统在冬季的运行特性,本试验对目标房间进行了 15 h 的性能测试,测试的时间段为 2019 年 1 月 26 日 19:00 到 1 月 27 日 10:00。在试验测试之前打开所有房间的门窗进行通风,1 h 后再将门窗进行关闭。测试对象为两个不相邻的房间及客厅,其中一个房间和客厅只打开地暖,另一个房间只

打开风机盘管. 设定室外主机回水温度为  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 开启热泵主机、两个房间的末端及客厅的末端, 测试两个房间和客厅内两种末端温度以及房间内室内温度变化情况, 并且使用数据采集仪 Agilent34970A 来记录相关数据, 记录数据的时间间隔为  $2\text{ min}$ .

## 2 实验结果与分析

### 2.1 热泵主机供回水温度与两种末端温度的比较分析

在整个试验周期内, 将空气源热泵机组的回水温度设置为  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 图 6 为该供暖系统在运行周期内, 主管的供回水温度、风机盘管下的送风温度以及大理石地面表面温度随着时间而变化的曲线分布图. 从图 6 可见, (1) 当空气源热泵机组开启之后, 主机的供回水温度、风机盘管下的送风温度以及大理石地面的表面温度都开始逐渐上升并且温升速率逐渐增加. 当热泵机组运行  $400\text{ min}$  后, 主机回水温度到达设定温度  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 当回水温度达到温度设定值时, 压缩机的运行频率相应降低, 并且实现无极调节, 使得回水温度在  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右. 由曲线的变化趋势可知, 空气源热泵机组回水温度调节性好, 可以保持  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右的回水温度. 热泵机组供水温度整体波动较小且相对稳定, 室内温度无明显波动, 能达到人们热舒适要求.

(2) 在化霜期间, 主机供回水温度下降. 这主要是由于空气源热泵主机化霜时, 通过四通阀切换, 原先从室外空气中吸热的“氟-空气换热器”由蒸发器转换为冷凝器进行热力除霜, 而原先给循环水加热的“氟-水换热器”由冷凝器转变为蒸发器, 从循环水中吸热导致供回水温度下降.

(3) 热泵机组在运行到  $520\text{ min}$  时, 室外空气为零下  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 化霜成周期性, 共出现两次除霜周期, 并且每次除霜时间为  $4\text{ min}$ . 当热泵除霜时, 供回水温度出现一个较大的下降趋势, 使得供水温度从  $46.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  下降到  $35.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 下降了  $22.1\%$ , 回水温度从  $43.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  下降到  $35.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 下降了  $17.3\%$ .

(4) 在第一次化霜周期中, 风机盘管的送风温度从  $40.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  下降到  $32.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 下降了  $19.5\%$ . 在第二次化霜周期中, 风机盘管的送风温度从  $40.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  下降到  $31.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 下降了  $21.7\%$ . 试验表明风机盘管末端的送风温度受化霜的影响较大. 而混凝土地面具有良好的蓄热性, 使得大理石地面温度短时间内不受化霜的影响, 仍然继续上升.

### 2.2 风机盘管末端出风温度及地暖末端温度对房间温度影响分析

由于地暖辐射末端加热地面主要通过热辐射为房间供热, 风机盘管末端送热风主要通过热对流为房间供热. 根据《辐射供暖供冷技术工程 JGJ142—2012》的要求, 当地板辐射供暖时, 在人员经常停留的地面, 宜采用的平均温度为  $25\sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 平均温度的上限值为  $29\text{ }^{\circ}\text{C}$  [14]. 因此从图 7、图 8 中可以看出, 地暖辐射末端下, 地板表面温度从  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$  上升到  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 共需  $292\text{ min}$ . 而风机盘管末端下, 它的送风温度从  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  上升到  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 共需  $26\text{ min}$ . 由此可以看出, 从系统启动到达设计温度  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 风机盘管末端的起温速度是地暖辐射末端的  $11.2$  倍.

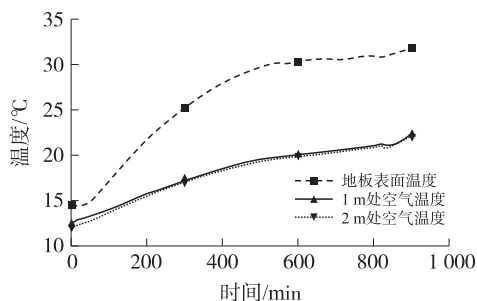


图 7 地暖末端地面温度及房间温度变化图

Fig. 7 Ground temperature and room temperature changes at the end of floor heating

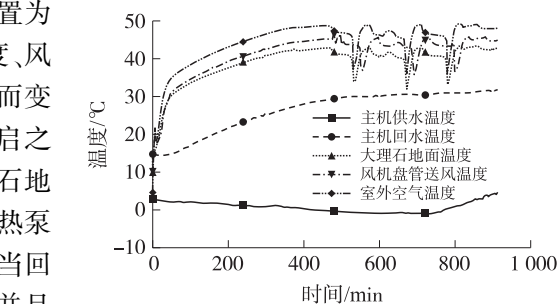


图 6 热泵主机供回水温度与两种末端温度变化图

Fig. 6 Heat pump main engine supply and return water temperature and two terminal temperature changes

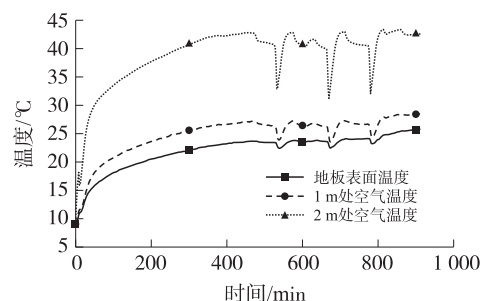


图 8 风机盘管末端出风温度及房间温度变化图

Fig. 8 The air outlet temperature at the end of the fan coil and the temperature change of the room



从图 7、图 8 中可以看出,地板辐射供暖时,供暖房间中 1 m 和 2 m 处的室内空气温度基本相等,在整个试验测试周期内,同一时刻这两种高度的最大温差为 0.6 ℃,温度梯度为 0.6 ℃/m,其平均温差为 0.2 ℃. 室内空气温度基本保持了相对稳定的变化, $T_1$ 、 $T_2$  稳定时的温度为 24.7 ℃、24.6 ℃. 风机盘管供暖时,在同一时刻,风机盘管的室内温度梯度比地板辐射供暖时的大,1 m 与 2 m 最大温差 3.6 ℃,温度梯度为 3.6 ℃/m,其平均温度为 2.9 ℃, $T_1$ 、 $T_2$  稳定时的温度为 23.7 ℃、26.8 ℃. 由此可以得出地板辐射供暖工况下室内温度分布的均匀性优于风机盘管供暖工况.

根据《中等热环境 PMV 和 PPD 指数的测定及热舒适条件的规定》(GB/T 18049—2000)<sup>[15]</sup>,冬季在有供暖的室内从事轻(主要是坐姿)的活动,舒适温度在 20~24 ℃. 对比两种末端下 1 m 处的室内空气温度,辐射末端下 1 m 处的室内空气温度从 12 ℃ 上升到 20 ℃ 需要 575 min,而在风机盘管末端下,温度升高到 20 ℃ 只需 182 min. 因此可以得到在本试验周期内,系统启动后,室内 1 m 处的空气温度在风机盘管末端下达到热舒适状态的速度是地面辐射末端下的 3.16 倍.

从图 7、图 8 中可知,当空气源热泵机组进入除霜的状态时,风机盘管末端下 1 m 处的室内空气温度迅速下降,而地板辐射末端 1 m 处的室内温度仍然继续稳步上升. 这是因为地板表面温度的降低具有滞后性,所以较短时间内的除霜几乎不会令地面温度产生波动.

### 2.3 不同地面装饰材料下地暖辐射末端供暖性能分析

不同的地面装饰材料对人体的热舒适性有较大的影响<sup>[16]</sup>. 因此本实验选择木地板和大理石两种装饰材料进行比较. 大理石和木地板的温度分布如图 9 所示. 可见,(1)在相同的供水温度下,木地板和大理石的地面温度不同. 当系统开启之后,地板的地面温度开始低于大理石的地面温度,这是由于木地板的导热系数为 0.12~0.30 W/(m·K),而大理石的导热系数为 2.9 W/(m·K)<sup>[17]</sup>,在供水温度相同的情况下,传热系数越小,传热温差就越大,因此木地板的地面温度低于大理石地板的地面温度.

(2)在相同的供水温度下,大理石和木地板的回水温度不同. 这主要是由于木地板的热导系数比大理石的热导系数小,从而导致木地板与盘管换热量小,使得木地板的回水温度高,导致木地板的供回水温差比大理石的供回水温差小.

(3)热泵机组启动后,大理石地面温度从 18 ℃ 上升到 25 ℃ 所需时间为 178 min,而木地板地面温度从 18 ℃ 上升到 25 ℃ 所需时间为 298 min,大理石地面的升温速度是大理石的 1.67 倍,因此大理石地面能更快达到舒适温度的需求.

## 3 结论

(1)机组化霜对风机盘管末端有较大的影响,而由于混凝土地面有良好的蓄热性,使得结霜对地面辐射末端没太大影响.

(2)对于风机盘管和地面辐射两种末端,在测试范围内,风机盘管末端送风温度到 25 ℃ 的速度是地暖辐射末端地面温度到 25 ℃ 的 11.2 倍. 室内 1 m 处的室内空气温度在风机盘管末端下到 20 ℃ 的升温速度是地面辐射末端下的 3.16 倍,两种空调末端供热,风机盘管末端能更快达到室内舒适的温度.

(3)对于风机盘管和地面辐射两种末端,在供暖房间 1 m 和 2 m 处,风机盘管末端下的温度梯度为 3.6 ℃/m,地面辐射供暖下的温度梯度为 0.6 ℃/m,由此可知地板辐射供暖下的室内温度的分布均匀性是优于风机盘管供暖工况,因此地面辐射末端更加舒适.

(4)对于地面辐射供暖末端,在相同的供水温度下,木地板的地面温度比大理石的低,回水温度比大理石高;大理石地面温度的升温速度是木地板的 1.67 倍,因此大理石地面能更快达到热舒适.

(5)空气源热泵双末端系统具有高舒适度,但要大范围推广应用该系统,需要合理设计地板结构、完善系统控制策略等工作,所以对该系统存在的不足仍需进一步开展深入研究.

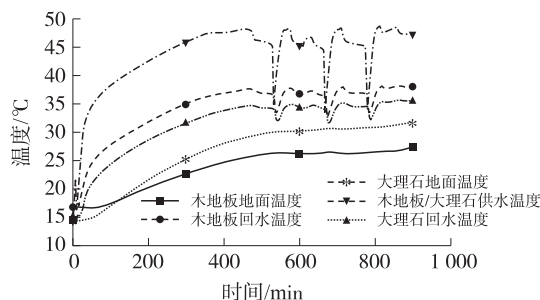


图 9 大理石和木地板的温度变化图  
Fig. 9 Temperature change graph of marble and wood floors

## [参考文献] (References)

- [1] 傅允准,蔡颖玲,陈帅,等. 毛细管地板辐射采暖特性试验研究[J]. 流体机械,2009,37(8):54-57.
- [2] 高智杰. 夏热冬冷地区不同供暖末端的供热特性及调控规律研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.
- [3] 唐海达,张涛,刘晓华. 长江流域住宅中混凝土辐射地板与风机盘管供暖性能实测[J]. 暖通空调,2017,47(11):97-103.
- [4] 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.
- [5] DANIEL R,LARS W,MATTIAS V,et al. CFD simulation and evaluation of different heating systems installed in low energy building located in sub-arctic climate[J]. Building and Environment,2015,89:160-169.
- [6] HASAN K,MüSLÜM A,MURAT S. A numerical investigation of fluid flow and heat transfer inside a room for floor heating and wall heating systems[J]. Energy and Buildings,2013,67:471-478.
- [7] 赵雨博. 辐射与通风混合供暖系统室内传热及舒适性研究[D]. 长沙:中南大学,2014.
- [8] 潘雷刚,徐昭炜,杨强,等. 户式空气源热泵供暖系统不同末端形式分析[J]. 暖通空调,2018,48(2):40-43.
- [9] 战乃岩,沈翔欧,赵艳萍. 不同供热形式末端性能研究[J]. 节能,2019,38(2):65-68.
- [10] STANISLAVS G,ANDRIS J. Experimental research of thermal comfort conditions in small test buildings with different types of heating[J]. Energy Procedia,2015,78:2929-2934.
- [11] 曾璟,李念平,成剑林,等. 蓄能型空气源热泵地板辐射供暖系统的试验研究[J]. 建筑科学,2016,32(6):33-38.
- [12] ANTONIO A M,JOSE M C L,FRANCISCO F H,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.
- [13] 韩伟. 空气源热泵双末端系统应用研究[D]. 南京:南京师范大学,2019.
- [14] 中国建筑科学研究院. 辐射供暖供冷技术规程:JCJ142—2012[S]. 北京:行业标准-建筑工业,2012.
- [15] 中国标准化与信息分类编码研究所. 中等热环境 PMV 和 PPD 指数的测定及热舒适条件的规定:GB/T 18049—2000[S]. 北京:国家质量技术监督局,2000.
- [16] 王忠华,徐颖,刘晓燕,等. 不同地面覆盖层材料对低温热水地板辐射采暖系统的影响[C]//全国暖通空调制冷 2010 年学术年会. 杭州:中国制冷学会,2011:629-632.
- [17] 郭晓磊. 低温地板辐射采暖系统特点及木地板在其中的应用[J]. 中国人造板,2007,7:16-19.

[责任编辑:陈 庆]