

不同供水工况毛细管网地板辐射供暖实验研究*

陈金华^{1,2†}, 杨雯芳^{1,2}, 沈雪莲^{1,2}, 李楠^{1,2}, 刘红^{1,2}, 梁秋锦^{1,2}

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045;

2. 低碳绿色建筑国际联合研究中心, 重庆 400045)

摘要:针对夏热冬冷地区冬季供暖问题,以空气源热泵+毛细管网地板辐射供暖系统为对象建立实验系统.实验测试并分析了供水温度分别为40℃,37℃,35℃,33℃和30℃时,不同供水工况毛细管网地板辐射供暖房间的室内空气温度、各内壁面温度的变化特性以及室内环境的舒适性.实验结果表明:在重庆地区,当毛细管网辐射面积占地面的50%,毛细管网间距为20mm,填充层厚度为50mm的豆石混凝土,面层为12mm的木质地板时,40℃,37℃,35℃,33℃和30℃供水工况稳定时的室内温度分别为18.73℃,18.06℃,17.03℃,16.09℃和15.28℃;室内热感觉(PMV)分别为-0.65,-0.82,-1.09,-1.31和-1.44;不满意百分率(PPD)分别为14%,19.08%,30.18%,40.71%和47.39%;各工况室内垂直方向和水平方向上最大温差分别为0.39℃和1.12℃.该地区供水温度 ≥ 33 ℃时,室内温度可满足舒适要求;供水温度 ≥ 37 ℃时,室内PMV和PPD满足我国热舒适评价标准,各工况毛细管网地板辐射供暖系统室内温度分布非常均匀.

关键词:毛细管网;辐射供暖;热舒适;室内热感觉(PMV);不满意百分率(PPD)

中图分类号:TU832

文献标志码:A

Experimental Research on Capillary Floor Radiant Heating in Different Water Supply Temperature

CHEN Jinhua^{1,2†}, YANG Wenfang^{1,2}, SHENG Xuelian^{1,2}, LI Nan^{1,2},
LIU Hong^{1,2}, LIANG Qiujin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. National Centre for International Research of Low-carbon and Green Buildings, Chongqing 400045, China)

Abstract: Aiming at the heating problem of hot-summer and cold-winter areas, the experiment system of air source heat pump and capillary floor radiant heating was established. The characteristics of indoor temperature, the walls temperature and indoor thermal environment were tested and analyzed under different water supply temperatures of 40℃, 37℃, 35℃, 33℃, 30℃. Under the condition that the cover area of capillary radiation over the ground is 50%, spacing of capillary is 20mm, the filled pomegranate concrete thickness is 50mm, the surface covered with the wooden floor thickness is 12mm in Chongqing, the exper-

* 收稿日期:2016-09-25

基金项目:国家国际科技合作与交流专项(2014DFA62970), The International Science & Technology Cooperation Program of China (2014DFA62970);重庆市科技研发基地建设计划项目(CSTC2013GIHZ9002), Science and Technology Research Base Construction Project of Chongqing(CSTC2013GIHZ9002)

作者简介:陈金华(1973—),男,四川宜宾人,重庆大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: c66578899@126.com

iment results show that the indoor temperature is stable at 18.73 °C, 18.06 °C, 17.03 °C, 16.09 °C, and 15.28 °C, the indoor thermal sensation (PMV) is -0.65, -0.82, -1.09, -1.31, and -1.44, and the percentages of dissatisfaction (PPD) is 14%, 19.08%, 30.18%, 40.71%, and 47.39%, respectively. The maximum temperature difference in the vertical and in the horizontal is 0.39 °C and 1.12 °C in the rooms with different conditions. When the water temperature is equal or greater than 33 °C, it satisfies the requirements of indoor temperature, and when the water temperature is equal or greater than 37 °C, the indoor PMV and PPD meet the evaluation of thermal comfort standards. In addition, the distribution of indoor temperature is uniform under different conditions.

Key words: capillary; radiant heating; thermal comfort; indoor thermal sensation (PMV); percentages of dissatisfaction (PPD)

重庆地处夏热冬冷地区、冬季阴冷潮湿、年降水量大、日照较少、无集中供暖,人们多采用分散式供暖,尤以分体式空调为主^[1].传统的分体式空调供暖因其室内纵向温度梯度大、空气干燥、噪音大、耗能等缺点^[2],严重影响人们的生活和工作.随着人们生活水平的提高,人们迫切需要高舒适度的室内环境.近年来,一种由模拟自然界植物叶脉和人体皮下血管输送能量的形式制作而成的新型辐射末端毛细管网进入公众视野,它是一种仿生回归的空调系统,可对室内空气进行微调节,因其舒适性高、噪声小、无细菌滋生、蓄热性能好、温度分布均匀、节省空间、安装灵活方便等优点^[1],越来越受到人们的关注.陈金华等^[3]对重庆地区中低海拔村镇旅游区住宅各季节热湿环境特性和室内热舒适进行了研究,发现冬季温湿度实测值范围偏离国家规范热舒适限制较大;韩杰等^[4]对夏热冬冷地区村镇住宅热环境和居民热舒适进行了现场调查,结果表明在冬季超过半数的居民希望室内再暖和些;Myhren等^[5]对比了瑞典办公室低温辐射供暖系统和高温散热器系统的供暖效果,研究结果表明低温辐射供暖系统可以改善室内气候,降低室内空气运动速度,减小房间温差,供暖效果优于散热器系统;Miriel等^[6]等研究出在法国西部吊顶辐射供冷供暖效果最好;Mikesk等^[7]分析了混凝土表面温度与系统供水温度、毛细管间距以及混凝土厚度的关系;Juusela^[8]实验研究表明居民对居住在低温辐射供暖房间内比居住在高温供暖系统房间更满意.付祥钊等^[9]指出了地板辐射供暖地板蓄热性对供暖效果的优势;张成昱^[10]建立重庆村镇地区空气源热泵地板毛细管网系统,分别对不同供水温度进行测试,并给出了适宜的供水温度;高艳娜等^[11]对成都地区一户式空气源热泵毛细管地板辐射采暖系统从一

般热舒适性指标和局部热舒适性指标两方面分别进行了分析.

目前工程上的技术规程^[12]虽对地板辐射供暖系统的水温范围做了规定,但无深入研究对比,仅建立在应用基础上,而现有的科研文献对毛细管网地板辐射供暖不同供水温度研究间隔较大,且未对室内环境的舒适性进行全面分析.本文对间距 20 mm、填充层厚度为 50 mm、面层为 12 mm 的木质地板毛细管网辐射系统进行不同供水温度的实验研究,从室内空气温度、地板表面温度、其他壁面温度、室内温度场、PMV-PPD 等角度全面分析毛细管网地板辐射供暖的舒适性.为重庆地区空气源热泵+毛细管网地板辐射供暖的推广提供数据参考.

1 实验

1.1 实验房间

本实验在重庆大学城市建设与环境工程实验中心一辐射供暖实验平台上进行,实验对象为如图 1 所示的单间房,房间面积为 21 m²,房间尺寸为 6 000 mm×3 500 mm×2 700 mm(长×宽×高),门尺寸 1 000 mm×2 100 mm(宽×高),外窗尺寸 2 800 mm×2 100 mm(宽×高);窗户为铝合金单层窗,玻璃厚度为 6 mm,内敷设蓝色厚窗帘;建筑外墙为 240 mm 的实心砖墙(未做保温),内墙为 200 mm 厚的实心砖墙.

1.2 实验系统

1.2.1 热源系统

系统热源为一台交流定频双压缩机空气源热泵机组.该机组额定制热量为 11 kW,功率为 4.1 kW,机组内置水泵,空气源热泵可根据需求提供≤45 °C 的空调水,用于供热.如图 2 所示,实验系统的

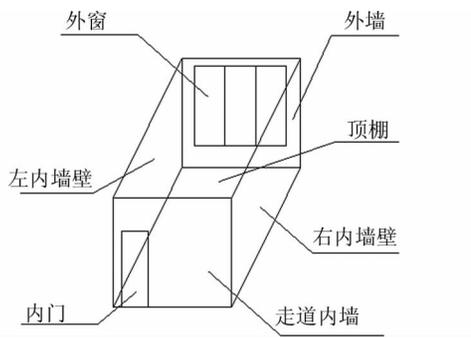


图 1 实验房间模型图

Fig.1 Model diagram of experimental room

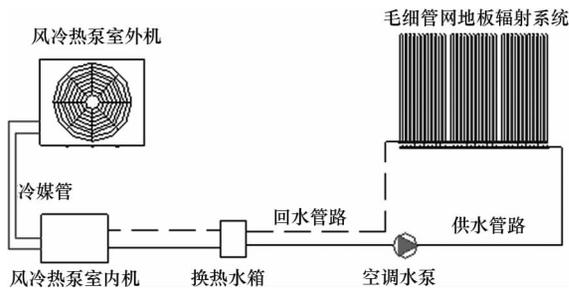


图 2 空气源热泵+毛细管网地板辐射系统原理

Fig.2 Schematic of air source pump and capillary radiant floor heating system

工作原理是冬季利用空气源热泵机组制取热水,经换热水箱调温后进入毛细管网换热,温度降低后继续回到水箱循环换热。

1.2.2 末端系统

系统采用同侧供回的 S 型毛细管网,如图 3 所示.为满足室内热负荷,计算得出毛细管网规格、数量等参数见表 1。



图 3 实验房间毛细管网地板敷设图

Fig.3 Laying diagram of capillary floor in laboratory room

表 1 实验房间毛细管网敷设参数

Tab.1 Laying parameters of capillary in laboratory room

敷设部位	地面面积 A/m^2	敷设面积 A_1/m^2	管径 D/mm	规格/ (mm×mm)	数量 /块	间距 d/mm
地面	21	10.5	4/4.8	1 000×3 500	3	20

毛细管网地板敷设的构造从下到上依次为结构

层、保温层、铝箔、铁丝层、毛细管网层、填充层、找平层、装饰层,具体构造及各主要尺寸如图 4 所示。

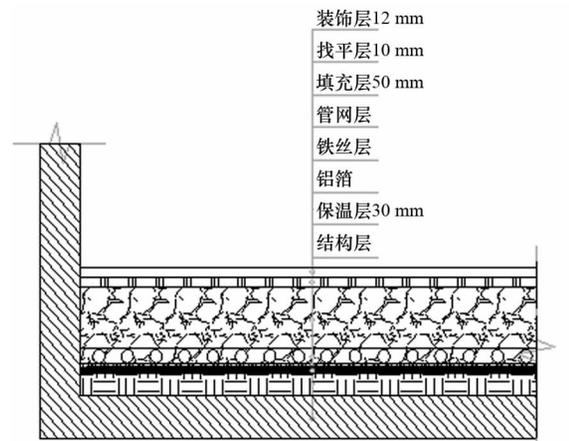


图 4 毛细管网地板构造示意图

Fig.4 Structure diagram of capillary floor

1.3 实验内容

1.3.1 测试方案

实验于冬季(2016 年 1 月末至 2016 年 3 月初)进行.供水工况分别为 40 °C, 37 °C, 35 °C, 33 °C 和 30 °C,设计供回水温差为 3 °C,设计水流量为 0.6 m³/h.根据 GB 50736—2012《民用建筑供暖通风及空气调节设计规范》^[13]规定夏热冬冷地区主要房间供暖室内设计温度宜采用 16 ~ 22 °C,本实验以 16 °C 为最低要求温度.系统开机时间为早 8:00 点至第二天早 8:00 点;主要测试参数包括室内空气温湿度、实验房间壁面温度、室外空气温湿度,系统供回水温度.按照文献^[14]对实验房间进行测点布置,测试时间间隔均为 10 min;实验期间,两侧相邻房间均为供暖房间,实验人员 1 人,可随意进出房间。

1)地板表面温度测点共 5 个(A,B,C,D,E),如图 5 所示,呈梅花状分布,进行实时监测。

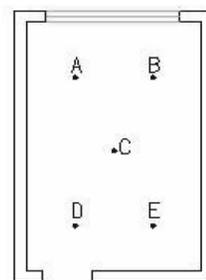


图 5 地板表面温度测点布置图

Fig.5 Layout diagram of floor surface temperature point

2)室内空气温度测点布置.在图 5 中 A,B,C,D,E 测点位置上,竖直方向在距地面分别为 0.1 m, 0.6 m, 1.1 m 和 1.7 m 处布置温度测点,分别代表人

体脚踝高度处、人体膝盖处、人体坐姿头顶处、人体站立头顶处,进行实时监测。

3)左右壁面、吊顶的测点布置同地面测点,外墙及门侧墙壁各布置两个测点,实时监测。

4)室外温湿度、室内湿度由温湿度自记仪 HOBO 实时监测。

5)实验期间房间进出水温度均由超声波热量表测得。

1.3.2 测试仪器

实验测试仪器见表 2。

表 2 实验测试仪器

Tab.2 Test instruments of experiment

测试内容	仪器	型号	测试范围	精度
室外温度	温湿度	HOBO	-20~	±0.2 °C
室内湿度	自记仪	UX100-011	+70 °C	
室内温度	热电偶	T型	-40~ +125 °C	±0.5 °C
	数据采集仪	Agilent 34970A	—	
壁面温度	热电偶	T型	-40~ +125 °C	±0.5 °C
	数据采集仪	Agilent 34970A	—	
供回水温度及流量	超声波流量计	UH32-6.0	0.06~12 m ³ /h 0~105 °C	0.01 m ³ /h 0.1 °C

1.3.3 误差分析

1)室内空气温度和各壁面温度误差分析.实验中,室内空气温度和各壁面温度采用 T 型铜-康铜热电偶温度传感器进行测量,并采用数据采集仪 Agilent34970A 逐时采集温度值.由表 2 知,T 型铜-康铜热电偶温度传感器的测试误差为 ±0.5 °C,本次测试中室内空气温度和各壁面温度范围在 10.05 ~25.97 °C.该 T 型热电偶的相对误差最大值计算^[1]为:

$$\frac{\Delta t}{t} = \frac{0.5}{10.05} = 4.9\% \quad (1)$$

可见,本次测试的室内空气温度和各表面温度的相对误差在 4.9 % 以内。

2)室外温度误差分析.实验中,室外空气温度采用 HOBO UX100-011 温湿度自记仪实时监测.由表 2 知该仪器的误差为 ±0.2 °C,本次测试中室外空气温度的范围为 3.86~13.38 °C.该仪器的相对误差最大值计算公式为:

$$\frac{\Delta t}{t} = \frac{0.2}{3.86} = 5.2\% \quad (2)$$

可见,本次室外温度测量的相对误差在 5.2%

以内。

2 实验结果

测试期间,按设计流量 0.6 m³/h 运行,发现房间温度始终未能满足要求,故将系统流量增加到 0.81 m³/h. 40 °C,37 °C,35 °C,33 °C 和 30 °C 各工况的供回水温差分别为 1.62 °C,1.58 °C,1.41 °C,1.23 °C 和 1.1 °C,系统流量加大,加之系统管路较短,换热较小,使得供回水温差减小。

2.1 室外空气温度分析

40 °C,37 °C,35 °C,33 °C 和 30 °C 工况的室外平均温度分别为 6.98 °C,8.05 °C,6.83 °C,8.47 °C 和 6.44 °C,最低温度分别为 4.62 °C,5.12 °C,6.53 °C,5.02 °C 和 4.84 °C.33 °C 工况室外天气晴朗,30 °C 工况阴雨连绵,其余工况多云.测试期间,室外逐时温度见图 6。

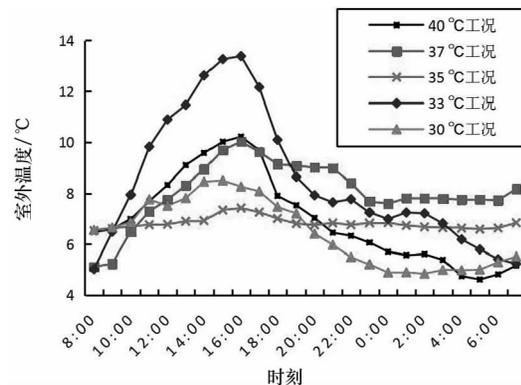


图 6 测试期间室外温度变化曲线

Fig.6 Curve of outdoor air temperature during the test

2.2 室内空气温度分析

图 7 为不同供水工况室内空气温度随时间的变化曲线,从图中可以看出:

1)系统供水温度越高,室内温度上升越快.系统启动后,各工况室内温度随时间呈指数函数变化,40 °C 和 37 °C 工况室内温度曲线递增明显,35 °C 和 33 °C 次之,30 °C 最为平缓;

2)在初始温度相似的情况下,供水温度越高,室内热响应时间越短.40 °C,37 °C,35 °C 和 33 °C 工况室内温度上升到 16 °C 的时间分别为 2 h,3 h,4 h 和 5 h,30 °C 工况从未上升到 16 °C,可见各工况室内温度响应时间较长,这是因为施工原因造成地板厚度比原设计略厚。

3)当系统稳定时,供水温度 ≥33 °C 均可满足室内温度要求.40 °C,37 °C,35 °C,33 °C 和 30 °C 工况

的室内温度分别稳定在 18.73 °C, 18.06 °C, 17.03 °C, 16.09 °C 和 15.28 °C.

4) 太阳辐射对室内温度影响很大. 33 °C 工况在下午 13:00~18:00 因太阳辐射增强使室内温度有明显的上升; 其余工况的测试均在多云或阴雨的室外环境下测得, 室内温度基本稳定.

5) 当室外温度接近甚至低于重庆供暖室外计算温度 4.1 °C^[13] 时, 室内温度仍能满足 16 °C 的要求, 由图 7 可知, 在无强烈太阳辐射的条件下, 室外温度波动对室内空气温度影响微弱.

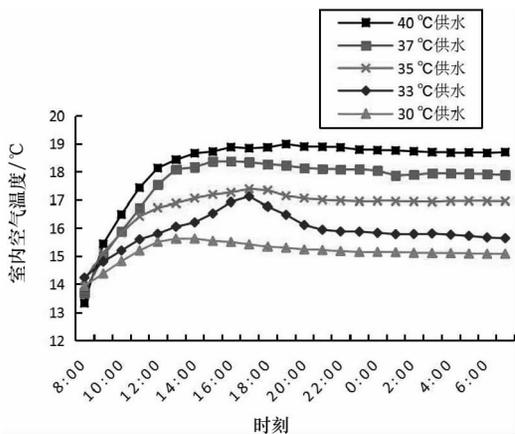


图 7 不同工况室内空气温度变化曲线
Fig.7 Curve of indoor air temperature in different water supply temperature

2.3 不同工况的单位时间温升

单位时间温升(°C/h)是指每小时室内空气温度上升的大小. 图 8 为供水温度和单位时间温升(°C/h)之间的关系.

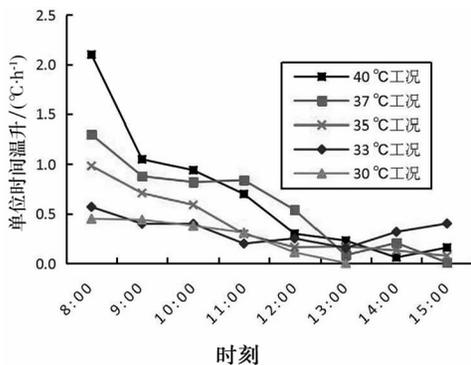


图 8 不同工况单位温升曲线
Fig.8 Curve of temperature per unit time in different water supply temperature

由图 8 可知:

1) 单位时间温升随供水温度的升高而增大, 在 0.01~2.1 °C 之间变化; 随着时间的延续, 各工况单位时间温升(°C/h)不断减小, 稳定后接近零.

2) 各工况温升曲线不规律, 与室内温度传感器的精度有关.

2.4 地板表面温度分析

图 9 为不同工况地板表面温度随时间的变化曲线. 与室内空气温度有相似的规律.

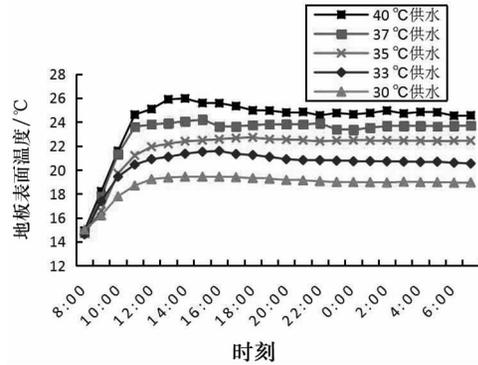


图 9 不同工况地板表面温度变化曲线
Fig.9 Curve of floor surface temperature in different water supply temperature

1) 系统供水温度越高, 室内温度上升越快. 在系统启动后, 各工况地板表面升温迅速, 地板表面温度呈线型变化.

2) 40 °C 和 37 °C 工况系统运行时, 因机组原因, 供水温度略偏离机组设定值, 致使地板表面温度出现短暂升高.

3) 40 °C 工况满足 JGJ 142—2012《地面辐射供暖技术规程》中人员经常停留时的地板表面平均温度 25~27 °C^[12]. 系统稳定后, 地板表面温度基本趋于稳定, 各工况下地板表面平均温度分别为 25.02 °C, 23.73 °C, 22.39 °C, 20.92 °C 和 19.15 °C.

4) 较低的地板表面温度也可以保证室内温度在舒适范围以内. 供水温度为 33 °C, 地板表面温度为 20.92 °C 时, 室内空气温度为 16.09 °C, 满足 ≥16 °C 的要求.

2.5 室内围护结构温度分布

图 10 为不同工况下室内各非加热壁面的平均温度分布图, 由图 10 看出:

1) 各工况壁面平均温度随着供水温度的升高而升高. 随着供水温度的升高, 各工况壁面平均温度由 13.17 °C 升高到 17.70 °C.

2) 户间传热不可忽视. 不同工况围护结构壁面平均温度左墙壁 > 顶棚 > 右墙壁 > 内墙(走道) > 外墙; 这是因为不同工况靠近左墙壁的房间进行同工况墙壁毛细管网实验, 靠近右墙壁的房间进行另一侧墙壁的供暖实验, 两侧墙壁均未作保温.

3) 顶棚的温度高于右侧墙壁, 因为顶棚与毛细

管网辐射地板表面平行,毛细管网辐射地板对顶棚表面的辐射角系数最大;外墙的温度最低,且与其他墙壁温度相差较大,这是因为外墙邻近室外,受室外环境影响较大。

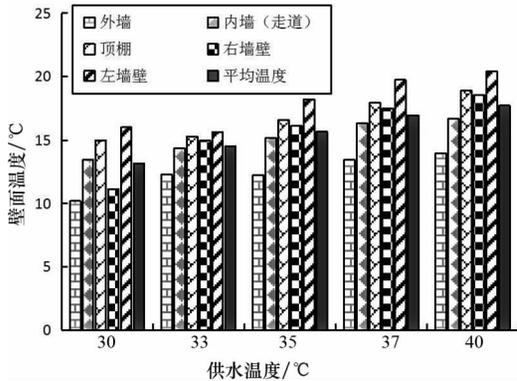


图 10 不同供水工况非加热壁面平均温度
Fig.10 Average temperature of the non-heating wall in different water supply temperature

2.6 室内竖直方向温度分布

实验分别测试了距地面竖直高度 0.1 m, 0.6 m, 1.1 m 和 1.7 m 处的室内温度,图 11 为各工况稳定状态下各垂直高度的温度曲线。

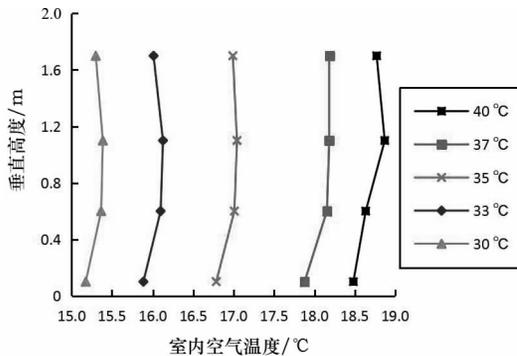


图 11 不同工况室内竖直方向温度分布曲线
Fig.11 Distribution curve of indoor vertical air temperature in different water supply temperature

由图 11 可看出,室内垂直高度的空气并不是严格的递增或递减.各工况距地 1.1 m 时的温度最大,在 1.1 ~ 1.7 m 之间,随着高度增加,室内空气温度呈现下降趋势,这是因为下部的空气受热上升,上部的冷空气因密度大而下沉,使得空气温度在垂直方向上出现“下热上冷”的现象,与对流散热设备造成室内温度明显“上热下冷”的分布相比,毛细管网地板辐射更加舒适,符合人体的生理特点。

为了更加深入分析地板毛细管网室内竖直方向温度分布,本文分别计算了各种工况在稳定运行期间的室内竖直方向温度的峰谷差和方差,见表 3。

由表 3 可以看出:

1)系统稳定后,各工况竖直方向温度场分布非常均匀,最大均方差为 0.17,室内空气温度的变化与平均值相比最大为 0.17 °C。

2)供水温度越高,峰谷差越大,室内竖直方向温度分布越不均匀;供水温度越低,峰谷差越小,室内竖直方向温度分布越均匀。

表 3 室内温度竖直方向上的峰谷差和方差

Tab.3 Peak-valley difference and variance of indoor vertical air temperature

供水工况 (温度)/°C	最大温度 值 $T_{max}/^{\circ}C$	最小温度 值 $T_{min}/^{\circ}C$	峰谷差 $\Delta t/^{\circ}C$	方差	均方差
30	15.39	15.18	0.21	0.01	0.1
33	16.13	15.88	0.25	0.01	0.11
35	17.04	16.78	0.26	0.01	0.12
37	18.19	17.88	0.31	0.02	0.15
40	18.87	18.48	0.39	0.03	0.17

2.7 室内水平方向温度分布

根据实测数据分析出 A, B, C, D, E 测点方向上的室内水平平均温度如图 12 所示。

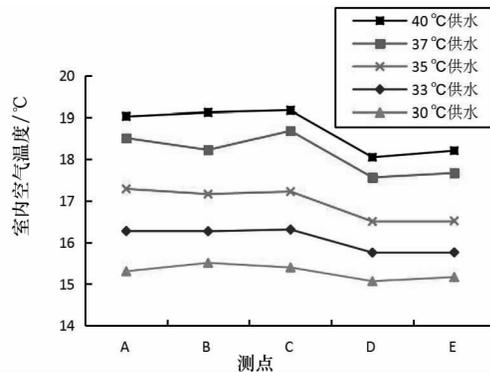


图 12 不同工况室内水平温度分布曲线

Fig.12 Distribution curve of indoor horizontal air temperature in different water supply temperature

由图 12 看出:

1)地板毛细管网供暖时,室内水平温度分布均匀,水平方向最大峰谷差为 1.12 °C;

2)由图 12 明显看出,各工况下中心位置 C 点的室内温度最高;A, B 点次之; D, E 点最低;这是因为 C 点在中心位置,受其他因素影响小;D, E 点靠近门侧,室内人员进出房间将走道的冷空气带入,导致 D, E 点温度最低。

为了进一步分析室内水平方向温度的均匀性,本文分别计算了不同工况在稳定运行期间的室内水平方向温度的峰谷差和方差,见表 4。

由表 4 可知:

1)系统稳定后,各工况水平方向温度场分布均

匀,最大均方差为 0.54,室内空气温度的变化与平均值相比最大为 0.29 °C;因水平方向温度受室外和走道影响大,由表 3 和 4 对比看出,水平方向温度均匀性劣于垂直方向。

2)供水温度越高,峰谷差越大,室内水平方向温度分布越不均匀,供水温度越低,峰谷差越小,室内水平方向温度分布越均匀。

3)供水温度越高,均方差越大,室内水平方向温度波动越大。

表 4 室内温度水平方向上的峰谷差和方差

Tab.4 Peak-valley difference and variance of indoor horizontal air temperature

供水工况 (温度)/°C	最大温度 值 $T_{max}/°C$	最小温度 值 $T_{min}/°C$	峰谷差 $\Delta t/°C$	方差	均方差
30	15.51	15.07	0.44	0.03	0.18
33	16.31	15.76	0.55	0.08	0.29
35	17.29	16.51	0.78	0.15	0.39
37	18.68	17.56	1.12	0.25	0.50
40	19.17	18.05	1.12	0.29	0.54

2.8 热舒适预测平均评价指标 PMV-PPD

本文热舒适预测评价方法采用 Fanger 教授基于人体热平衡原理提出稳态环境下描述和评价热环境的指标 PMV-PPD^[15].PMV 和 PPD 的表达式分别为:

$$PMV = [0.303\exp(-0.036M) + 0.0275] \times \{M - W - 3.05[5.733 - 0.007(M - W) - P_a] - 0.42(M - W - 58.2) - 0.0173M(5.86 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)\} = f(M, W, I_{cl}, t_a, P_a, v_a, t_r)$$

$$PPD = 100 - 95\exp[-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)] \quad (3)$$

分析时,人体的机械效率 W 为 0,人体的能量代谢 M 为 1.0 met,人体的服饰热阻取 1.3 clo^[16],室内空气风速 v_a 取 0.1 m/s,人体周围空气水蒸气分压力 P_a ,空气温度 t_a ,平均辐射温度 t_r ,根据实测值计算.影响人体热舒适性的主要参数是室内空气温度、室内相对湿度、室内平均辐射温度,即 $PMV = f(t_a, P_a, t_r)$.图 13 和图 14 是利用现场实测数据室内空气温度、室内相对湿度、室内平均辐射温度代入基于 Matlab 编写的程序中,经过计算得到预测热感觉投票值 PMV 和预测不满意百分比 PPD.

由图 13 和图 14 可知:

1)系统启动之后,在室内空气、室内相对湿度、室内平均辐射温度共同作用下,各工况 PMV 随时间近似为一簇递增指数曲线,PPD 随时间近似为一

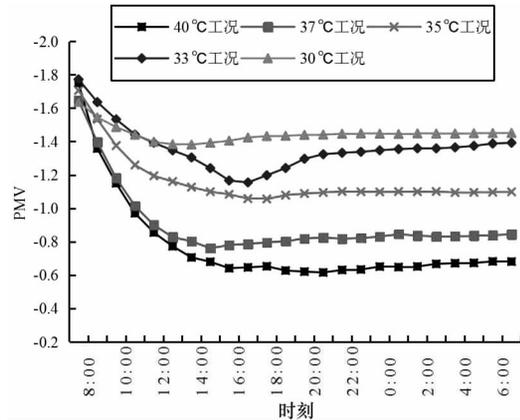


图 13 不同工况热舒适指标(PMV)

Fig.13 Thermal comfort index (PMV) in different water supply temperature

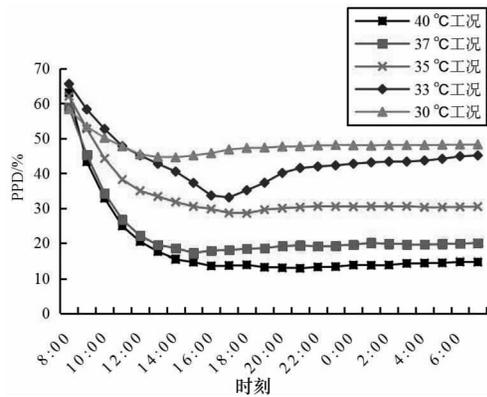


图 14 不同工况热环境不满意百分数(PPD)

Fig.14 Predicted percentage dissatisfied(PPD)in different water supply temperature

簇递减指数曲线;当系统稳定时,PMV 和 PPD 趋近于平稳。

2)热感觉和不满意百分率随供水温度变化而变化.系统稳定后,40 °C,37 °C,35 °C,33 °C 和 30 °C 工况的热感觉分别为 -0.65, -0.82, -1.09, -1.31, -1.44, 不满意百分比分别为 14 %,19.08 %,30.18 %,40.71 %,47.39 %.

3)因 33 °C 供水工况在 13:00~18:00 之间室外太阳辐射强烈,室内的热量增大,室内温度变化明显,PMV 和 PPD 也随之变化。

4)基于建筑节能的考虑,我国要求供热工况室内环境在满足舒适的条件下偏冷(-1 ≤ PMV ≤ 0)^[14];本文 40 °C 和 37 °C 工况热感觉为 -1 ≤ PMV < -0.5, 不满意百分比 10% < PPD ≤ 25%, 满足文献[14]的热舒适评价指标;可见 40 °C 和 37 °C 供水能够较好地满足我国室内舒适、节能的室内环境标准。

3 结 论

本文以空气源热泵+毛细管网地板辐射供暖为对象对冬季不同供水温度分别为 40 °C, 37 °C, 35 °C, 33 °C 和 30 °C 工况的室内环境进行分析, 得出以下结论:

1) 系统启动后, 室内空气温度呈指数函数递增, 热响应随供水温度的升高而加快, 当供水温度 ≥ 33 °C 时, 室内空气温度可满足不小于 16 °C 的要求。

2) 系统启动后, 地板表面温度呈线型递增; 整个房间壁面平均温度随供水温度的升高而升高; 当系统稳定时, 40 °C 工况满足人员经常停留时地板表面温度 25~27 °C 的要求。

3) 毛细管网地板辐射供暖室内温度分布均匀, 竖直方向最大温差为 0.39 °C, 供水温度越低, 温差越小, 温度分布越均匀, 且满足“脚暖头凉”的舒适感觉, 符合人体的生理特点。

4) 系统稳定之前, 各工况 PMV 随时间近似为一簇递增指数曲线, PPD 随时间近似为一簇递减指数曲线; 当供水温度 ≥ 37 °C 时, PMV 和 PPD 满足我国 GB/T 50785-2012《民用建筑室内热湿环境评价标准》中的热舒适评价指标。

参考文献

- [1] 陈雅蕾. 毛细管网辐射供暖及节能型分析[D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2015: 1-4.
CHEN Yalei. Heating properties and energy saving analysis of capillary radiation system [D]. Chongqing: College of Urban Construction and Environmental Engineering of Chongqing University, 2015: 1-4. (In Chinese)
- [2] NAGANO K, MOCHIDA T. Experiments on thermal environmental design of ceiling radiant cooling for supine human subjects [J]. *Building and Environment*, 2004, 39(3): 267-275.
- [3] 陈金华, 赵福滔, 李文强, 等. 重庆市中低海拔村镇旅游区住宅热湿环境实测与热舒适研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2015, 42(7): 128-134.
CHEN Jinhua, ZHAO Futao, LI Wenqiang, *et al.* Field study of thermal and humidity environment and thermal comfort study of residences in mid and low altitude rural tourism area of Chongqing [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2015, 42(7): 128-134. (In Chinese)
- [4] 韩杰, 张国强, 周晋. 夏热冬冷地区村镇住宅热环境与热舒适研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2009, 36(6): 13-17.
HAN Jie, ZHANG Guoqiang, ZHOU Jin. Research on the rural residential thermal environment and thermal comfort in hot summer and cold winter climate zone [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2009, 36(6): 13-17. (In Chinese)
- [5] MYHREN J A, HOLMBERG S. Flow patterns and thermal comfort in a room with panel, floor and wall heating [J]. *Energy & Buildings*, 2008, 40(4): 524-536.
- [6] MIRIEL J, SERRES L, TROMBE A. Radiant ceiling panel heating-cooling systems: experimental and simulated study of the performances, thermal comfort and energy consumptions [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2002, 22(16): 1861-1873.
- [7] MIKESKA T, SVENDSEN S. Heating and cooling with capillary micro tubes integrated in a thin shale concrete sandwich element [C]// Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark. Passivhus Norden, Denmark; Tomas Mikeska, Svend Svendsen, 2012: 1-9.
- [8] JUUSELA M. Heating and cooling with focus on increased energy efficiency and improved comfort: guidebook to IEA ECBCS annex 37 low exergy systems for heating and cooling of buildings summary report [J]. VTT Tiedotteita-Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, 2004(2256): 3-44.
- [9] 付祥钊, 林真国, 王勇. 空气源热泵与地板供暖联合运行实验研究[J]. 暖通空调, 2005, 35(2): 100-103.
FU Xiangzhao, LIN Zhengguo, WANG Yong. Experimental research on combined air-source heat pump and floor heating systems [J]. *HV & AC*, 2005, 35(2): 100-103. (In Chinese)
- [10] 张成昱. 重庆村镇地区空气源热泵毛细管辐射供暖系统实验研究[D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2015: 31-51.
ZHANG Chenyu. Experimental study on capillary radiant heating systems with air-source heat pump in the Village of Chongqing [D]. Chongqing: College of Urban Construction and Environmental Engineering of Chongqing University, 2015: 31-51. (In Chinese)
- [11] 高艳娜, 全柏铭, 徐龙, 等. 成都地区毛细管采暖系统运行特性与热舒适性分析[J]. 制冷与空调, 2014, 28(2): 107-111.
GAO Yanna, QUAN Baiming, XU Long, *et al.* Analysis of thermal comfort and operating performance of capillary-tube air conditioning heating systems in Chengdu city [J]. *Refrigeration and Air Conditioning*, 2014, 28(2): 107-111. (In Chinese)
- [12] GJ 142-2012 地面辐射供暖技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 6-10.
GJ 142-2012 Technical specification for radiant heating and cooling [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013: 6-10. (In Chinese)
- [13] GB 50736-2012 民用建筑供暖通风及空气调节设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 6-8.
GB 50736-2012 Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012: 6-8. (In Chinese)
- [14] GB/T 50785-2012 民用建筑室内热湿环境评价标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 11-12.
GB/T 50785-2012 Evaluation standard for indoor thermal environment in civil buildings [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012: 11-12. (In Chinese)
- [15] ISO 7730-2005 Moderate thermal environments determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort [S]. Geneva: International Standards Organization, 2005: 33-35.
- [16] 高智杰. 夏热冬冷地区不同采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: 15-16.
GAO Zhijie. Study on adjustment strategies and heating characteristics of different heating terminal units in hot summer and cold-winter region [D]. Xian: Xian University of Architecture and Technology, 2013: 15-16. (In Chinese)