

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.02.014



毛细管网供暖室内环境对比实验研究

陈金华¹, 梁秋锦², 李楠¹, 高亚锋¹, 刘红¹, 杨雯芳¹

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室; 低碳绿色建筑国际联合研究中心, 重庆 400045;

2. 重庆新鸥鹏地产(集团)有限公司, 重庆 400010)

摘要:对重庆地区毛细管网辐射供暖系统进行测试,分析在35℃供水工况下毛细管网顶棚、墙面、地面3种敷设方式的室内空气温度、围护结构壁面温度等参数。结果表明:在重庆地区35℃供水工况下,毛细管网顶棚、墙面、地面3种敷设方式供暖稳定时,室内人员活动区平均温度分别为16.53、16.4、16.94℃、辐射表面平均温度分别为29.21、28.17、22.98℃,纵向最大温差分别为1.76、3.16、0.3℃,水平最大温差分别为-0.26、0.59、-0.34℃,在实验条件下,该地区3种敷设方式供暖时室内温度均 $\geq 16^\circ\text{C}$,毛细管网构造层厚度与敷设位置直接影响室内舒适度。

关键词:毛细管网; 敷设方式; 辐射供暖; 舒适度

中图分类号: TU831 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)02-0088-07

Comparative experimental analysis of capillary radiant heating on indoor environment

Chen Jinhua¹, Liang Qiujin², Li Nan¹, Gao Yafeng¹, Liu Hong¹, Yang Wenfang¹

(1. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment; Ministry of Education; National Centre for International Research of Low-carbon and Green Buildings, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Chongqing Newopen Real Estate, Co., Ltd., Chongqing 400010, P. R. China)

Abstract: Tests of capillary radiant heating system in Chongqing district were carried out and indoor temperature, surface temperature of envelope in condition of three different capillary laying modes (ceiling, wall and floor) with 35℃ supply water temperature were analyzed. The experimental data indicates that in the three different conditions, when the temperature of the supply water is 35℃, the average temperature of indoor air is 16.53℃, 16.40℃ and 16.94℃ respectively and that of radiation surface is 29.21℃, 28.17℃ and 22.98℃ respectively. The largest vertical temperature difference tested is 1.76℃, 3.16℃ and 0.3℃ while the largest horizontal difference tested in the direction fall is -0.26℃, 0.59℃, -0.34℃ respectively. It is shown that the system meets the requirements of indoor temperature 16℃ in three

收稿日期: 2017-06-18

基金项目: 国家国际科技合作与交流专项(2014DFA62970); 重庆市科技研发基地建设计划(cstc2013gjh90002); 重庆市基础与前沿研究计划(CSTC2014jcyjA90018)

作者简介: 陈金华(1973-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事暖通空调、建筑节能、绿色建筑、可再生能源及新能源开发与利用研究, E-mail: c66578899@126.com。

Received: 2017-06-18

Foundation item: National International Scientific and Technology Cooperation and Exchange Projects(2014DFA62970); Chongqing Science and Technology Research and Development Base Construction Project(cstc2013gjh90002); Chongqing Foundation and Frontier Research Program(CSTC2014jcyjA90018)

Author brief: Chen Jinhua (1973-), professor, doctoral supervisor, main research interests: HVAC, building energy conservation, green building, renewable energy and new energy development and utilization, E-mail: c66578899@126.com.

conditions. Both the thickness of capillary structure layer and the laying mode have an directly influence on the indoor thermal comfort.

Keywords: capillary floor; laying mode; radiant heating; thermal comfort

毛细管网辐射供暖系统作为一种新型低温热水辐射供暖形式,具有舒适度高、安静、卫生、安全、节能、蓄热能力较强、节省建筑空间、布置灵活、可利用低品位能源等诸多优势。因此,无论是从系统的舒适性还是节能性上考虑,毛细管网辐射供暖系统都有巨大的应用潜力^[1-2]。Miriel等^[3]对毛细管顶棚供冷/供暖进行了软件模拟和实验测试,效果良好;Causone等^[4]通过实验研究,提出了冷却吊顶与房间换热的自然对流换热系数和辐射换热系数,并提出了统一参考温度设计及计算的重要性;Mikeska等^[5-6]针对毛细管辐射供冷供暖系统在高性能混凝土夹层中的传热过程,分析了不同的供水温度、毛细管间距和混凝土厚度时混凝土的表面温度;Lbeurn等^[7]从舒适性指标和节能型指标论证了低温热水地板辐射供暖的节能效果;Olesen等^[8]建立地板辐射供暖系统,通过室外环境温度、外窗传热和内部热源等主要影响因素对地板换热进行分析,提出了地板表面对流换热系数新的计算方法;Leiq等^[9]研究表明,地板辐射供暖系统室外温度同供水温度之间呈线性关系;吴小舟等^[10]对辐射地板传热过程进行分析,提出了基于形状因子的辐射地板传热量计算等效热阻模型。王婷婷等^[11-12]建立物理及数学模型,研究了不同辐射方式的供暖换热量。并通过设定物理模型,对不同供水温度,不同敷设方式下的供冷能力进行了对比计算。李永安等^[13]阐述了毛细管网传统敷设方式及其换热性能,利用 Airpark 对毛细管网与天花板呈一定夹角敷设形式进行了模拟研究;李莉等^[14]采用 CFD 软件建立模型,对毛细管席敷设在房间内的不同位置进行了冬夏两季多工况的数值模拟,得到了相对应的温度和 PMV, PPD 分布图;薛红香等^[15]、孙娟娟等^[16]分别建立了数学模型模拟了毛细管网不同辐射情况下的舒适性。

现有研究均是通过模拟与理论计算对毛细管网不同敷设方式进行供暖研究,或是仅对单一敷设方式进行模拟实验分析,并没有通过实验对毛细管网不同敷设方式进行供暖研究。通过 35℃ 供水温度下顶棚、墙面、地面 3 种敷设方式供暖的实验,从室内空气温度、辐射表面温度、其他壁面温度等角度全面分析不同敷设方式下毛细管网供暖的舒适性。

1 实验系统介绍

1.1 实验房间概况

实验在重庆大学辐射供暖实验平台进行,实验对象是如图 1 所示两间相同房间,410 房间、412 房间,每个房间面积为 21 m²,房间尺寸为 6 000 mm×3 500 mm×2 700 mm(长×宽×高),门尺寸为 800 mm×2 100 mm(宽×高),外窗尺寸为 2 700 mm×2 000 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,室内未布置任何家具。

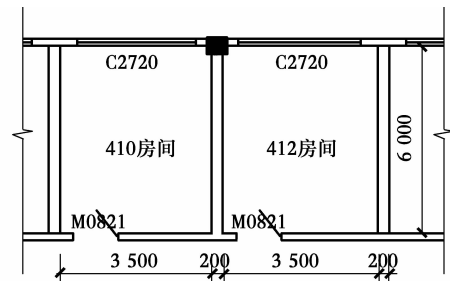


图 1 实验房间平面图

Fig. 1 Experimental room plan

1.2 实验系统

1.2.1 冷热源 实验系统冷热源采用空气源热泵机组,冬季利用空气源热泵机组制取 45℃ 的热水,45℃ 的高温热水通过换热水箱温度降为 35℃,供给毛细管网末端,毛细管网管路的供水温度通过换热水箱上的比例积分调节阀进行控制。原理如图 2 所示。

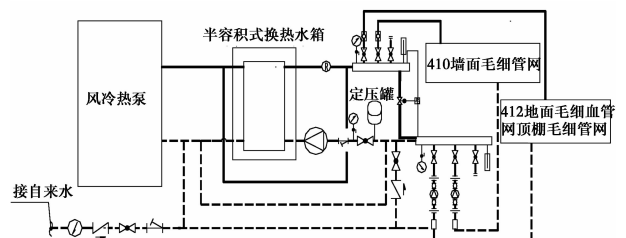


图 2 冷热源原理图

Fig. 2 Schematic diagram of cold and heat source

1.2.2 实验末端 实验系统分为 3 种敷设方式,412 房间顶棚敷设毛细管网,地面敷设毛细管网,410 房间墙面敷设毛细管网,毛细管网均采用同侧供回的 S 型,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。

表1 实验房间毛细管网敷设参数
Table 1 The situation of capillary radiation

敷设部位	房间面积 A/ m ²	敷设面积 A ₁ / m ²	管径 d/ mm	规格	数量	间距 d/ mm
顶棚	21	10.5	4/4.8	1 000 mm×3 500 mm	3	20
墙面	21	10.0	4/4.8	1 000 mm×2 500 mm	4	20
地面	21	10.5	4/4.8	1 000 mm×3 500 mm	3	20

3种敷设方式具体敷设位置图,构造示意图,如图3、图4所示。

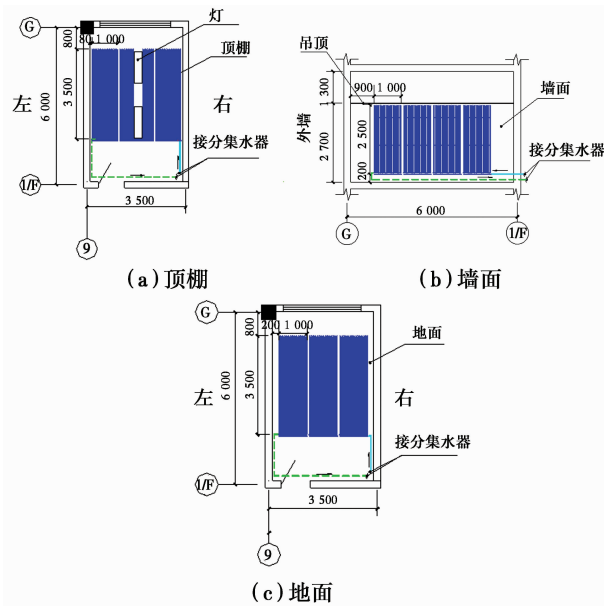


图3 毛细管网敷设具体位置

Fig. 3 The location map of capillary radiation

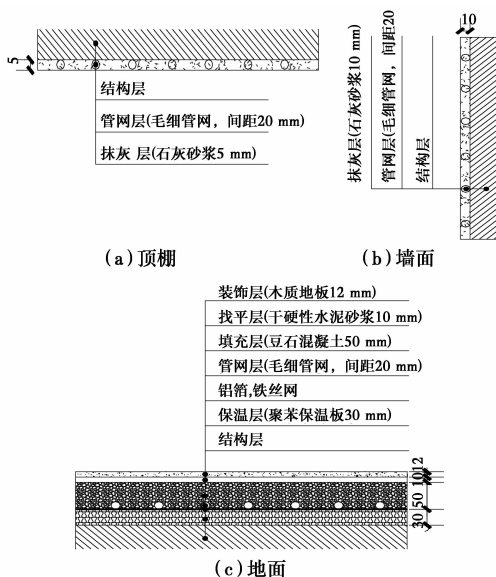


图4 毛细管网构造示意图

Fig. 4 The structure map of capillary radiation

1.3 实验内容

1.3.1 测试方案 实验测试于冬季(2016年1月末至2016年2月初)早上9:00—次日7:00进行。实验房间前一天未做任何实验,实验期间为保证后续人员实验,提前2h关闭机组。顶棚、墙面、地面3个工况,每个工况测试1d,具体运行工况详见表2。根据文献[17],毛细管网辐射系统供暖时,供水温度宜符合表3的规定,供回水温差宜采用3~6℃。因此,实验测试35℃供水温度下,3种敷设方式室内外温度与围护结构壁面温度等参数。实验期间,实验房间相邻房间均为供暖房间,实验人员1人。测点按照文献[18]相关规定布置,具体见图5和图6。测试时间间隔均为10min,实时监测。

表2 实验系统运行工况

Table 2 The running state of experiment system

供水温度/℃	测试房间	运行时间	备注
35	412-顶棚毛细管网	2016年1月28日 早上9:00—次日7:00	前一天该房间无人实验
	410-墙面毛细管网	2016年2月1日 早上9:00—次日7:00	前一天该房间无人实验
35	412-地面毛细管网	2016年2月1日 早上9:00—次日7:00	前一天该房间无人实验

表3 毛细管网供水温度

Table 3 Capillary net water supply temperature

设置位置	宜采用温度/℃	设置位置	宜采用温度/℃
顶棚	25~35	墙面	25~35
地面	30~40		

1)围护结构内表面测点布置 左墙、右墙分别布置9个温度测点,外墙、内墙分别布置2个温度测点,地面、顶棚分别布置a、b、c、d、e 5个温度测点。故围护结构内表面共有32个温度测点。

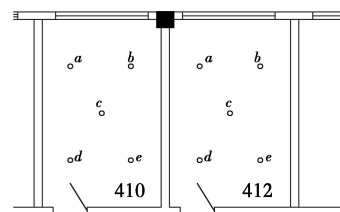


图5 地面、顶棚表面温度测点布置图

Fig. 5 The surface temperature measuring point arrangement of ground and ceiling

2)空间测点布置 空间测点在a、b、c、d、e 5个温度测点位置,距地0.1m(脚踝)、0.6m(膝盖)、1.1m(坐姿头顶)、1.7m(站姿头顶)、2.5m(房间上部)处

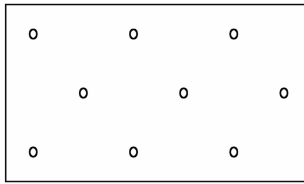


图 6 左墙,右墙表面温度测点布置图

Fig. 6 The surface temperature measuring point arrangement of left wall and right wall

布置温度测点,故空间共布有 25 个温度测点。

1.3.2 测试仪器 主要仪器设备如表 4 所示。

表 4 实验测试仪器

Table 4 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 自记仪	HOBO UX100-011	-20℃~+70℃	±0.2℃
	热电偶	T 型	-40℃~+125℃	±0.5℃
室内温度	数据 采集仪	Agilent 34970A		
	热电偶	T 型	-40℃~+125℃	±0.5℃
壁面温度	数据 采集仪	Agilent 34970A		

2 实验数据处理与结果分析

2.1 室外空气温度

35℃供水温度时,顶棚、墙面、地面 3 种敷设方式供暖,室外平均温度分别为 6.57、6.83、6.83℃,室外最低温度分别为 5.82、6.59、6.59℃。室外天气均为阴转多云,测试期间,室外逐时温度见图 7。

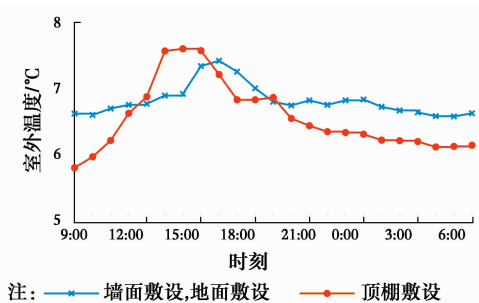


图 7 测试期间室外温度变化曲线

Fig. 7 Curve of outdoor air temperature during the test

2.2 室内人员活动区平均温度

室内人员活动区平均温度,即人员活动区域的平均温度,取 0.1、0.6、1.1、1.7 m 4 个纵向高度, a、b、c、d、e, 5 个水平位置, 20 个测点测得的温度的平均值为室内人员活动区平均温度。图 8 为 3 种敷设方式室内人员活动区逐时平均温度,由图 8 可知:

1)顶棚敷设供暖时,人员活动区温度达到室内设定温度 16℃时,响应时间最短。3 种敷设方式响应时间依次递减的顺序为:墙面敷设、地面敷设、顶棚敷设。

2)供暖稳定阶段,人员活动区平均温度均≥16℃,其中地面敷设供暖时人员活动区平均温度最高。顶棚、墙面、地面 3 种敷设方式供暖稳定阶段室内人员活动区平均温度分别为:16.53、16.40、16.95℃。

3)人员活动区平均温度受辐射表面温度、距辐射表面距离、蓄热性能以及临室传热等多方面因素影响。顶棚敷设毛细管网由于其构造层较薄,辐射表面温度高,虽然,距离人员活动区较远,但室内人员活动区能很快地达到室内设定温度;墙面敷设毛细管网,由于敷设单面,出现局部温度较高,但整个人员活动区温度并不能较快的达到室内设定温度;由于顶棚与墙面的蓄热特性较差,机组关机后,室内经过较短时间便达到不舒适温度。地面敷设毛细管网,由于其距离人员活动区最近,整个人员活动区温度达到室内设定温度较快;由于地面蓄热特性较强,机组关机后,室内经过较长时间才达到不舒适温度。同时,临室若进行供暖实验,则临室与实验房间共用的壁面温度较高,影响实验房间人员活动区温度。

4)热空气在顶部堆积。人员活动区测点主要集中在房间中下部,被加热的空气在房间上部堆积,影响顶棚敷设供暖的散热效果,故造成顶棚敷设供暖人员活动区温度低于地面敷设,可通过辅助新风系统减弱顶部热堆积的现象,以增强顶棚敷设供暖的换热效果。

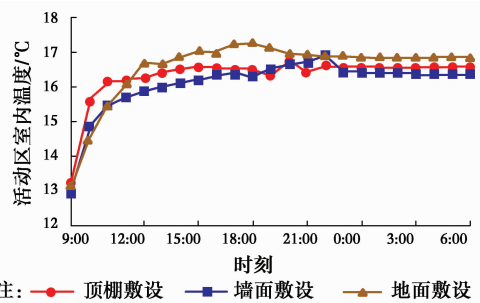


图 8 3 种敷设方式人员活动区平均温度

Fig. 8 The average temperature of personnel active area in three laying ways

2.3 辐射表面平均温度

辐射表面平均温度与毛细管网构造层存在密切联系。顶棚、墙面、地面 3 种敷设方式中,地面毛细管网的构造层最厚,墙面次之,顶棚最薄。图 9 为 3 种敷设方式供暖辐射表面逐时温度,由图 9 可知:

1)毛细管网构造层越薄,辐射壁面的热响应时间越快,辐射表面温度越高。地面、墙面、顶棚毛细管网构造层厚度依次递减,辐射壁面达到稳定阶段的响应时间依次递减,辐射表面平均温度依次递增,分别为 22.98、28.17、29.21 °C。

2)地面敷设供暖时,辐射壁面热响应时间长,辐射表面温度低。主要原因是地面毛细管网构造层的厚度较厚,同时,12 mm 的木地板传热系数较小使得整个地面的辐射供暖效果变差,因此,可降低地面毛细管网构造层厚度,更换传热系数较大材料的地板,以缩短热响应时间,提高辐射表面温度。

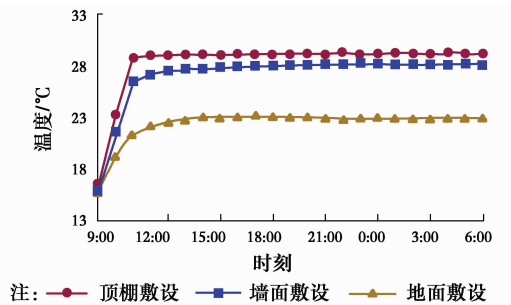


图 9 3 种敷设方式供暖辐射表面温度
Fig. 9 Radiation surface temperature of heating in three laying ways

2.4 围护结构壁面温度

图 10 为 3 种敷设方式围护结构各壁面温度,由图可知:

1)3 种敷设方式围护结构各壁面温度差别较大。顶棚、墙面、地面敷设毛细管网供暖时,围护结构壁面温度排序分别为:顶棚>左墙>地面>右墙>内墙>外墙;右墙>左墙>顶棚>内墙>地面>外墙;地面>左墙>顶棚>右墙>内墙>外墙。

2)辐射角系数越大,对应其壁面温度越高。顶棚、墙面、地面敷设毛细管网供暖时,非加热壁面温度最高的分别为地面(左墙除外)、左墙、顶棚(左墙除外)。

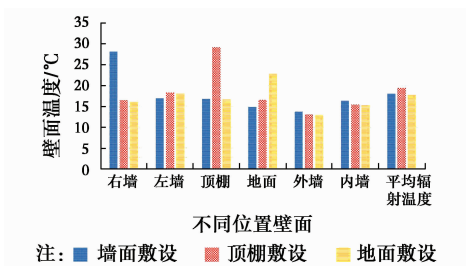


图 10 3 种敷设方式围护结构壁面温度
Fig. 10 The surface temperature of exterior-protected construction in three laying ways

3)外墙温度受室外环境影响较大。3 种敷设方式外墙的温度均最低,且与其他壁面温度相差较大。

4)户间传热明显。顶棚与地面敷设毛细管网供暖时,左墙临近的房间正在进行右墙供暖,墙面未做保温处理,故造成左墙温度高于右墙。

2.5 空间垂直方向温度分析

实验分别测试了距离地面垂直高度 0.1、0.6、1.1、1.7、2.5 m 处的室内温度,图 11 为 3 种敷设方式空间垂直温度分布,由图可知:

1)站姿时,纵向高度取 0.1~1.7 m,3 种敷设方式中地面敷设纵向温差最小,舒适度最好。顶棚、墙面、地面敷设毛细管网稳定阶段纵向最大温差分别为 1.76、3.16、0.30 °C,纵向最大温差梯度分别为 1.1、1.98、0.19 °C/m。

2)坐姿时,纵向高度为 0.1~1.1 m,3 种敷设方式中地面敷设纵向温差最小,舒适度最高。顶棚、墙面、地面敷设毛细管网稳定阶段纵向最大温差分别为 1.02、2.54、0.27 °C,纵向最大温差梯度分别为 1.02、2.54、0.27 °C/m。

3)无论从坐姿还是从站姿考虑,地面敷设供暖纵向温差明显低于顶棚敷设与墙面敷设,具有更高的舒适性。墙面敷设供暖站姿时,纵向最大温差为 3.35 °C,不满足 ASHRAE 标准。

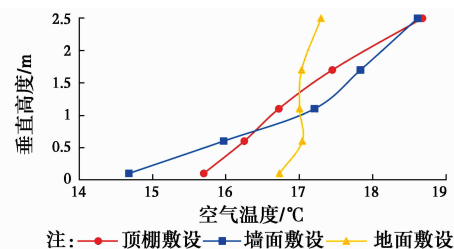


图 11 3 种敷设方式空间垂直温度分布
Fig. 11 The vertical temperature distribution in three laying ways

2.6 空间水平方向温度分析

根据人员活动区选取 1.1 m 高度水平温度场进行分析。图 12 为 3 种敷设方式空间水平温度分布,由图可知

1)3 种敷设方式中墙面敷设水平温差(从外墙到内墙)最大,舒适度较差。顶棚、墙面、地面敷设毛细管网稳定阶段水平温差(从外墙到内墙)分别为 -0.26、0.59、-0.34 °C,最大温差梯度分别为 -0.09、0.20、-0.11 °C/m。

2)3 种敷设方式中墙面敷设水平温差(从左墙到右墙)最大,舒适度较差。顶棚、墙面、地面敷设毛

细管网稳定阶段水平温差(从左墙到右墙)分别为-0.18、0.57、-0.20℃,最大温差梯度分别为-0.09、0.28、-0.10℃/m。

3)地面敷设与顶棚敷设供暖时,室内水平温度场均分布比较均匀,但两种敷设方式存在外高内低的情况。主要原因为顶棚与地面敷设的毛细管网靠近外窗安装。这种设计不仅满足了室内温度场的需求,同时也避免了毛细管网对房间内区数据采集设备的影响。

4)墙面水平温度场则内高外低,与墙面与顶棚不同。并且墙面(右墙)供暖时,造成室内温度场右侧明显高于左侧。

5)综合两种水平温度场,顶棚敷设与地面敷设方式效果相近,且优于墙面敷设。

6)墙面敷设供暖时,*d*、*e*点位于房间内区,并且内区的数据采集设备不断发热,故这两点温度较高,同时,由于实验期间实验人员坐在墙面敷设供暖房间的*e*点附近,因此,该点温度明显高于其他测点。

7)墙面敷设供暖时,辐射的不对称给人的主观感受最差。辐射的不对称性是指由于围护结构表面温度的差异导致人体感到自身局部的冷热差异。地面敷设给人脚暖头凉的感觉,最舒适。顶棚敷设给人头暖脚凉的感觉,较适中。但是,墙面敷设给人身体左右温度不同,很不舒适。因此,可两侧墙对向同时敷设,降低单面供暖引起的室内人员的不适感。

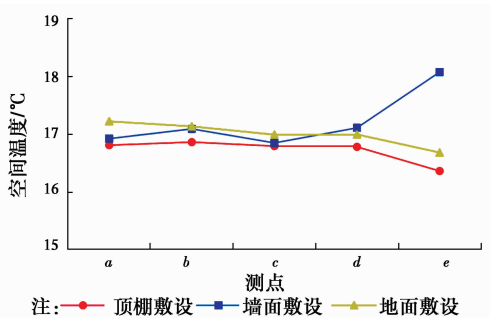


图 12 3种敷设方式空间水平温度分布

Fig. 12 The horizontal temperature distribution in three laying ways

3 结论

在实验条件下通过对毛细管网顶棚、墙面、地面辐射供暖系统冬季运行工况及室内热湿环境参数分析得出以下结论。

1)35℃供水温度工况下,3种敷设方式供暖时,室内温度均 ≥ 16 ℃。顶棚、墙面、地面敷设毛细管网供暖时,稳定时人员活动区空气温度依次为

16.53、16.40、16.95℃。

2)毛细管网构造层越薄,辐射表面温度越高,室内温度达到要求的热响应时间越短。顶棚、墙面、地板辐射毛细管网供暖时,室内温度达到要求的热响应时间依次递增,辐射表面温度依次为29.21、28.17、22.98℃。

3)无论是坐姿纵向温差还是站姿纵向温差,地面敷设供暖时纵向温差明显低于顶棚敷设与墙面敷设,具有更高的舒适性。墙面敷设供暖站姿时,纵向最大温差为3.35℃,不满足ASHRAE标准。

4)3种敷设方式供暖均宜进一步优化。传统地面供暖时宜减小地面毛细管网构造层厚度,提高辐射表面温度;墙面供暖时宜两侧墙对向同时敷设,降低单面供暖引起的室内人员的不适感;顶棚供暖时宜加新风系统,减弱顶部热堆积的现象,以增强换热效果。

参考文献:

- [1] 王子介. 低温辐射供暖与辐射供冷[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
WANG Z J. Low temperature radiation heating and radiation cooling [M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing House, 2004. (in Chinese)
- [2] 雷会玉, 余晓明, 朱祥政, 等. 毛细管辐射空调系统的节能性分析[J]. 能源工程, 2014, 2(2): 67-71.
LEI H Y, YU X M, ZHU X Z, et al. Energy analysis of capillary radiation air-conditioning system [J], Energy Engineering, 2014, 2(2): 67-71. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] CAUSONE F, CORGNATI S P, FILIPPI M, et al. Experimental evaluation of heat transfer coefficients between radiant ceiling and room [J]. Energy and Buildings, 2009, 41(6): 622-628.
- [5] 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
- [6] MIKESKA T, SVENDSEN S. Study of thermal performance of capillary micro tubes integrated into the building sandwich element made of high performance

- concrete[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 52(2): 576-584.
- [7] HNANAY L. A comparative study of proportional flux modulation and various types of temperature modulation approaches for radiant floor heating system control [J]. ASHRAE Hand book, 1994, 39(10):65-68.
- [8] OLESEN B W, PH D. Comparative experimental study of performance of radiant floor heating system sand a wall panel heating system under dynmaic conditions [J]. ASHRAE Hand Book, 1994, 13(2):84-94.
- [9] LEIQ S B, ARCH D. A Comparative study of proportional flux-modulation and various typesof temperature-modulation approaches of radiant floor heating system control [J]. ASHRAE Hand Book, 1994, 13(5):98-107.
- [10] 吴小舟, 赵加宁, 王泮浩. 基于形状因子的辐射地板传热计算等效热阻模型[J]. 湖南大学学报, 2016, 43(5):137-143.
WU X Z, ZHAO J N, WANG F H. An equivalent thermal resistance model to calculate the heat transfer of radiant floor heating and cooling systems using shape factor[J]. Journal of Hunan University. 2016, 43(5): 137-143. (in Chinese)
- [11] 王婷婷, 李永安. 基于采暖工况的毛细管网不同敷设方式热工性能分析[J]. 制冷与空调, 2012, 26(4): 341-344.
WANG T T, LI Y A. Thermal performance analysis of capillary network on different laying modes in heating condition [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2012, 26(4):341-344. (in Chinese)
- [12] 王婷婷. 毛细管平面辐射空调系统设置方式与运行策略研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2012.
WANG T T. Research on setting mode and operation strategy of capillary plane radiation air-conditioning system [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2012. (in Chinese)
- [13] 李永安, 闫佳佳. 毛细管网敷设方式对换热性能的影响研究[J]. 暖通空调. 2015, 45(4):78-84.
LI Y A, YAN J J. Influence of laying methods of capillary mats on heat transfer performance [J]. Journal of HV&AC. 2015, 45(4):78-84. (in Chinese)
- [14] 李莉. 毛细管网平面空调系统室内热环境的数值模拟[J]. 煤炭技术, 2010, 29(7):201-203.
LI L. Numerical simulation for indoor thermal environment of capillary plane HVAC system [J]. Coal Technology, 2010, 29(7):201-203. (in Chinese)
- [15] 薛红香. 毛细管空调系统舒适性及气流组织的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2009.
XUE H X. Research on the comfort and air flow organization of capillary air conditioning system [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2009. (in Chinese)
- [16] 孙娟娟. 毛细管平面辐射空调动态仿真及控制系统研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2011.
SUN J J. Research on dynamic simulation and control system of capillary plane radiation air-conditioning [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2011. (in Chinese)
- [17] 住房和城乡建设部. 辐射供暖供冷技术规程: JGJ 142—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013:6.
Ministry of housing and urban-rural development. Technical specification for radiant heating and cooling: JGJ 142-2012 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013:6. (in Chinese)
- [18] 住房和城乡建设部. 民用建筑室内热湿环境评价标准: GB/T50785—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012:10.
Ministry of Housing and Urban-rural Development. Evaluation standard for indoor thermal environment in civil buildings: GB/T50785-2012 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012:10. (in Chinese)

(编辑 胡玲)