

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.087



毛细管网供冷室内环境对比实验研究

梁秋锦¹, 陈金华², 段坤林³, 孙海¹, 韩浩然¹, 宋静²

(1. 重庆鲁能英大置业有限公司, 重庆 400060; 2. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045;
3. 重庆市设计院, 重庆 400015)

摘要:在 18 °C 供水温度下, 对重庆地区毛细管网辐射供冷系统进行实验测试, 分析了毛细管网顶棚、墙面、地面 3 种敷设方式的室内热工参数。结果表明: 毛细管网顶棚、墙面、地面 3 种敷设方式供冷稳定时, 人员活动区的平均温度依次为 26.27、27.22、26.57 °C, 辐射表面平均温度依次为 20.96、21.14、22.76 °C, PMV 依次为 -0.27、0.32、-0.2, PPD 依次为 7.06%、7.47%、6.34%。在实验条件下, 3 种敷设方式供冷时室内温度均能满足 ≤28 °C 的要求, PMV、PPD 均能满足《民用建筑室内热湿环境评价标准》(GB/T50785—2012) I 级热舒适评价指标。

关键词:毛细管网; 辐射供冷; 敷设位置; 室内环境

中图分类号: TU831 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2019)04-0185-08

Comparative experimental analysis of capillary radiant cooling on indoor environment

Liang Qiujin¹, Chen Jinhua², Duan Kunlin³, Sun Hai¹, Han Haoran¹, Song Jing²

(1. Chongqing Luneng Yingda Real Estate Co., Ltd, Chongqing 400060, P. R. China; 2. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 3. Chongqing Architectural Design Institute Chongqing 400015 P. R. China)

Abstract: Tests of capillary radiant cooling system in Chongqing were carried out and thermal parameter were analyzed in conditions of three different capillary laying modes (ceiling, wall and floor) with 18 °C supply water temperature. It concluded that when capillaries were laid on the ceiling, wall and floor respectively, the average temperature of working area was 26.27, 27.22 and 26.57 °C respectively and the radiation surface temperature was 20.96, 21.14 and 22.76 °C in turn. By calculation, the PMV of three conditions was -0.27, 0.32 and -0.2 PPD results were 7.06%, 7.47% and 6.34% respectively. It illustrated that all three laying ways at this experimental conditions could meet the air temperature requirements (no more than 28 °C) and PMV, PPD attain thermal environment category I.

Keywords: capillary; radiant cooling; laying way; indoor environment

收稿日期: 2018-12-29

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0700303)

作者简介: 梁秋锦(1990-), 女, 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: 1612323944@qq.com.

Received: 2018-12-29

Foundation item: National Key Research and Development Program (No. 2016YFC0700303)

Author brief: Liang Qiujin(1990-), mian research interests: HVAC, building energy conservation, green building, renewable energy and new energy development and utilization, E-mail: 1612323944@qq.com.

毛细管网作为一种新型空调末端形式,具有不占用室内空间、能与可再生能源结合及室内舒适度更高等优势,在能源成本越来越高、环境污染与温室效应加剧的大背景下,对毛细管网的研究与应用越来越多。Hoseggen 等^[1]对顶棚供冷节能与舒适度进行实验研究,并利用 ESP-r 软件进行模拟论证,结果表明:模拟结果与实验数据结果吻合。Mikeska 等^[2]对辐射供冷室内舒适性与供水温度关系进行研究,结果表明:当室内温度比供水温度高4 K时,室内温度舒适性较好。Kebrawi 等^[3]对顶棚供冷辅助新风系统设计遗传算法控制器,可实现低能耗下满足同样的舒适度。Lee 等^[4]对地面辐射与对流空调系统通过实测对比分析,结果表明:辐射空调系统室内垂直温差较小。Eusebio 等^[5]对辐射与对流空调系统进行实验对比分析,结果表明:辐射空调系统室内舒适度好。Kyū 等^[6]总结分析了近50年辐射空调系统应用,得出辐射空调系统在节能性、舒适性方面不断改进优化的结论。李昊等^[7]对毛细管网进行模拟研究,分析了毛细管网供冷能力影响因素。朱备等^[8]对毛细管网辐射供冷表面结露进行研究,提出了结合过冷度的运行策略。谢东、王赟等^[9-10]均针对毛细管顶棚辐射供冷进行模拟研究,分析了顶棚辐射供冷时的供冷量。张金明^[11]对壁面辐射供冷与对流空调系统进行模拟研究,对比两种空调方式下室内热工参数。刘猛等^[12]研究了不同供水温度与室外天气下毛细管网地棚供冷房间温度、供冷量与结露情况。李妍等^[13]分析了影响毛细管网的供冷能力相关曲线图。陈金华等^[14]对毛细管网地面不同供水温度供暖时的室内参数进行研究,确定了供暖的最佳供水温度。陈露等^[15]对毛细管网顶棚、墙面、地面进行模拟研究,分析了这3种敷设方式的舒适性。

对顶棚、墙面、地面毛细管网的研究,大多为理论计算与软件模拟,或只针对一种敷设方式进行实验研究。本文对毛细管网顶棚、墙面、地面3种敷设方式进行实验研究。从室内人员活动区温度、湿度、壁面温度、室内垂直与水平温度、PMV、PPD等热工参数,全面分析3种敷设方式毛细管网供冷的室内舒适性。

1 实验系统介绍

1.1 实验房间概况

实验地点为面积相同的两个房间^[16](图1),编

号分别为410和412,面积均为21 m²,尺寸为6 m×3.5 m×2.7 m(长×宽×高),门洞尺寸为0.8 m×2.1 m(宽×高),外窗尺寸为2 700 mm×2 000 mm(宽×高);建筑外墙为实心砖墙(未做保温),厚度为240 mm,内墙也为实心砖墙,厚度为200 mm。窗户为单层玻璃窗,厚度为6 mm,内设厚窗帘。

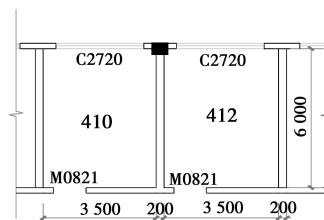


图1 实验房间平面图(单位:mm)

Fig. 1 Experimental room plan (Unit: mm)

1.2 实验系统

1.2.1 冷热源 该实验的冷热源为空气源热泵机组。冷热源与毛细管网末端中间设置换热水箱,通过换热水箱控制供水温度为18℃。原理图如图2所示。

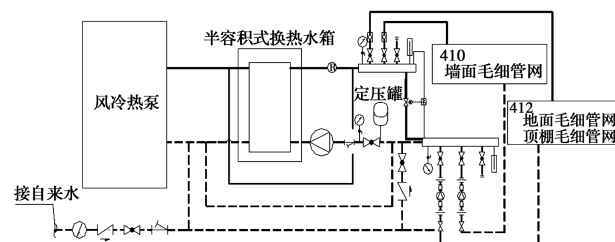


图2 冷热源原理图

Fig. 2 Schematic diagram of cold and heat source

1.2.2 实验末端 实验的末端为顶棚、墙面、地面3种敷设方式,410房间顶棚、墙面敷设同侧供回S型毛细管网,412房间地面敷设同侧供回S型毛细管网。实验室建设时,为满足室内冷负荷需求,设置毛细管网参数,见表1。

表1 毛细管网基本参数

Table 1 The situation of capillary radiation

敷设位置	敷设面积 A/m ²	规格/m	数量/块	管内/外径 d/mm	间距 d/mm
顶棚	10.5	1.0×3.5	3	4/4.8	20
墙面	10.0	1.0×2.5	4	4/4.8	20
地面	10.5	1.0×3.5	3	4/4.8	20

毛细管网顶棚、墙面、地面敷设位置图与构造示意图,如图3~图4所示。

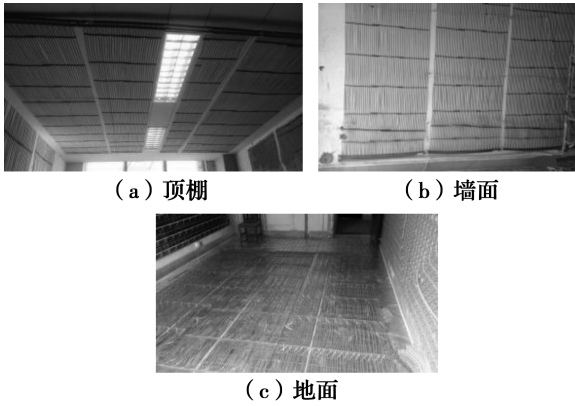


图 3 毛细管网敷设位置图

Fig. 3 The location of capillary

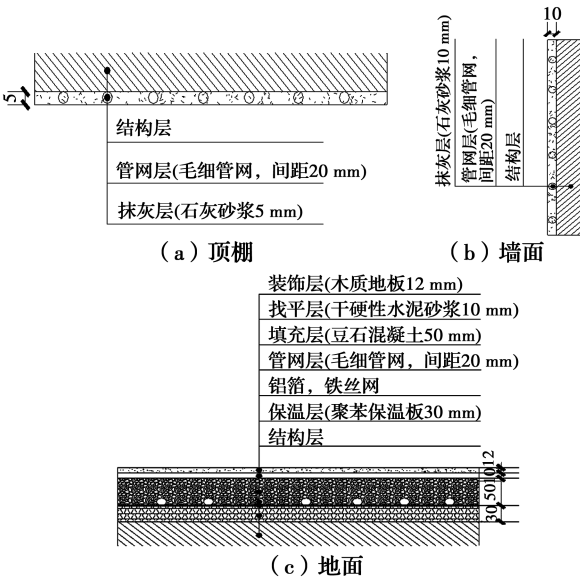


图 4 毛细管网构造示意图

Fig. 4 The structure drawing of capillary

1.2.3 新风系统 实验新风温度为 24 °C,相对湿度为 60%,新风量为 60 m³/h,新风送风方式为上送风。

1.3 实验内容

1.3.1 测试方案 实验系统运行工况见表 2,根据《辐射供暖供冷技术规程》(JGJ 142—2012)的规定:毛细管网供水温度应保证供冷表面温度高于露点温度 1~2 °C。故实验在 18 °C 供水温度下,测试毛细管网顶棚、墙面、地面 3 种敷设方式的室内热工参数。

1.3.2 测点布置 实验测点^[17]的布置原则参照《民用建筑室内热湿环境评价标准》(GB/T 50785—2012)的规定,详见图 5~图 6。实时监测实验数据,记录间隔为 10 min/次。

实验房间围护结构表面温度测点布置:顶棚布

置 5 个,地面布置 5 个,左墙布置 9 个,右墙布置 9 个,外墙布置 2 个,内墙布置 2 个,共计 32 个测点,如图 5、图 6。

表 2 实验系统运行工况

Table 2 The running state of experiment system

测试的房间位置	运行时间	备注
毛细管网顶棚	2016-08-07 8:00—22:00	前一天该房间无人实验,实验期间相邻房间均供冷
毛细管网墙面	2016-08-02 8:00—22:00	前一天该房间无人实验,实验期间相邻房间均供冷
毛细管网地面	2016-08-07 8:00—22:00	前一天该房间无人实验,实验期间相邻房间均供冷

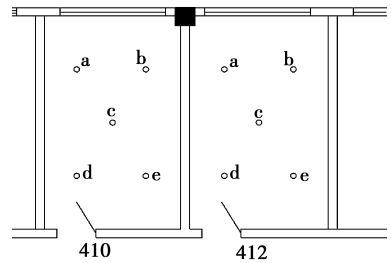


图 5 顶棚、地面壁面温度测点

Fig. 5 Arrangement of temperature measuring points on the ceiling and ground

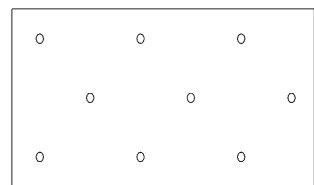


图 6 左、右墙壁面温度测点

Fig. 6 Arrangement of temperature measuring points on the left and right wall

实验房间空间温度测点布置在图 5 中 a、b、c、d、e 位置上距地 0.1 m(脚踝)、0.6 m(膝盖)、1.1 m(坐姿头部)、1.7 m(站姿头部)、2.5 m(房间上空)处,共计 25 个。空间湿度测点布置在 a、c、e 位置,距地 1.1 m 高度处,共计 3 个。

1.3.3 测试仪器 实验主要仪器见表 3。

2 实验数据分析

2.1 室外空气温度

实验期间室外逐时温度如图 7 所示。顶棚、墙面、地面 3 种敷设方式室外平均温度依次为 29.97、31.26、29.97 °C。

表3 实验测试仪器表

Table 3 Test apparatus

测试项	测试仪器	仪器型号	测试范围	仪器精度
室内外	温湿度	HOBO	-20~70 °C	±0.2 °C
温湿度	记录仪	UX100-011	1%~95%	±2.5%
室内温度	热电偶	T型	-40~125 °C	±0.5 °C
	数据	Agilent		
壁面温度	采集仪	34970A		
围护结构表	热成	FLIR	±0.1 °C 或读数	
面成像效果	像仪	T650-sc	-40~150 °C 的±1%	
			灵敏度<0.02 °C	
新风温度	万向	AirDistSys	0.05~5 m/s	±0.02 m/s 或读
与风速	风速仪	5 000		数的±1%

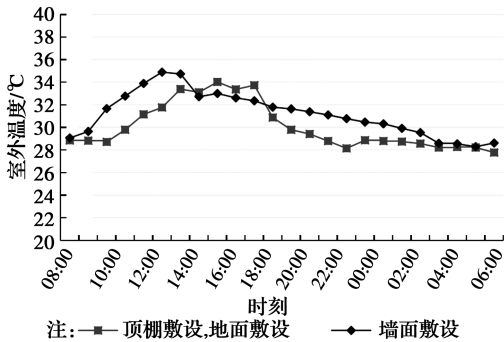


图7 3种工况室外温度分布

Fig. 7 The outdoor temperature of 3 conditions

2.2 室内人员活动区平均温度

人员活动区平均温度为 a、b、c、d、e 5 个水平位置分别距地 0.1、0.6、1.1、1.7 m 4 个垂直高度的 20 个测点平均值。3 种敷设方式实验期间人员活动区逐时温度如图 8 所示,由图 8 可知:

1)毛细管网地面辐射供冷时,人员活动区温度达到 28 °C,响应时间最长。顶棚、墙面、地面 3 种敷设方式响应时间依次为:20、50、60 min。

2)3 种敷设方式人员活动区平均温度均满足 ≤ 28 °C 要求,顶棚、墙面、地面 3 种敷设方式供冷稳定时,人员活动区的平均温度依次为:26.27、27.22、26.57 °C。

3)人员活动区温度的影响因素主要包括以下两个方面:辐射壁面温度与距辐射壁面距离。顶棚敷设毛细管网,由于其敷设构造较薄,辐射壁面温度低,因此,供冷稳定时,室内温度低于另外两种敷设方式;墙面敷设毛细管网,由于其敷设单面,冷空气横向传播速度慢,因此,供冷稳定时,室内温度高于

另外两种敷设方式;地面敷设毛细管网,虽然其辐射壁面温度较另外两种敷设方式高,但是距离人员活动区最近,因此,供冷稳定时,室内温度与顶棚敷设时温度接近。

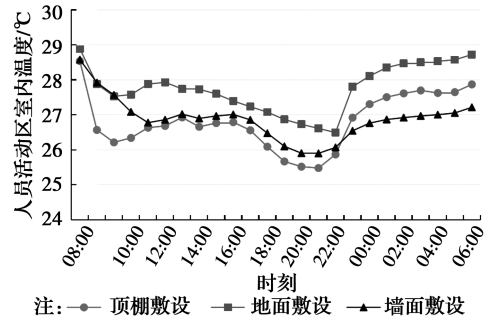


图8 3种工况人员活动区的平均温度

Fig. 8 The average temperature of working area of 3 conditions

2.3 室内人员活动区平均相对湿度

人员活动区平均相对湿度为 a、c、e 点距地 1.1 m 高度的相对湿度平均值,3 种敷设方式人员活动区逐时平均相对湿度如图 9 所示:顶棚、墙面、地面 3 种敷设方式人员活动区稳定时,平均相对湿度均能满足室内舒适要求;墙面敷设人员活动区平均相对湿度略小于顶棚、地面;平均相对湿度依次为 68.58%、64.13%、70.05%。

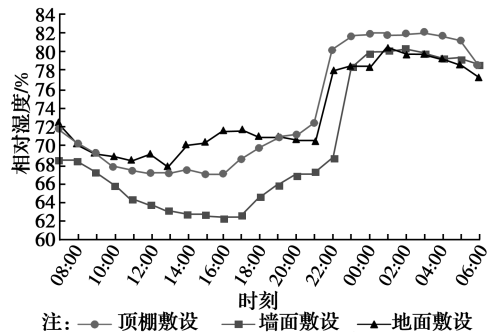


图9 3种工况人员活动区的平均相对湿度

Fig. 9 The average relative humidity of working area of 3 conditions

2.4 露点温度分析

3 种敷设方式露点温度如图 10 所示,顶棚、墙面、地面 3 种敷设方式的辐射壁面温度、附近空气温度均高于辐射壁面露点温度,因此,实验过程中均未出现结露现象。但重庆地区湿度较大,为防止辐射供冷时出现结露,应设置通风除湿系统。

2.5 辐射壁面平均温度

辐射壁面平均温度与毛细管网敷设构造密切相关。3 种敷设方式辐射壁面逐时温度如图 11 所示,由图 11 可知:

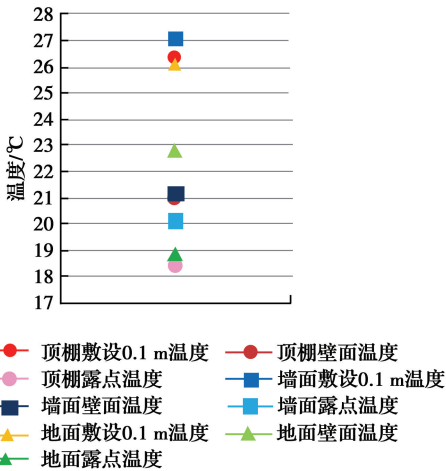


图 10 3 种工况露点温度

Fig. 10 The temperature dew point temperature of 3 conditions

1) 毛细管网敷设构造越薄,辐射壁面热响应时间越快,辐射壁面温度也越低。顶棚、墙面、地面敷设构造厚度依次递增,热响应时间依次递增,辐射壁面平均温度也依次递增,分别为 20.96、21.14、22.76 °C。

2) 顶棚、墙面、地面 3 种敷设方式辐射壁面平均温度均满足《辐射供暖供冷技术规程》(JGJ 142—2012)中的规定。具体要求值见表 4。

3) 常规地盘管地面上部敷设构造厚度较厚,不宜用于毛细管网地面,为缩短地面辐射热响应时间,降低辐射壁面温度,可降低毛细管网地面敷设构造厚度。

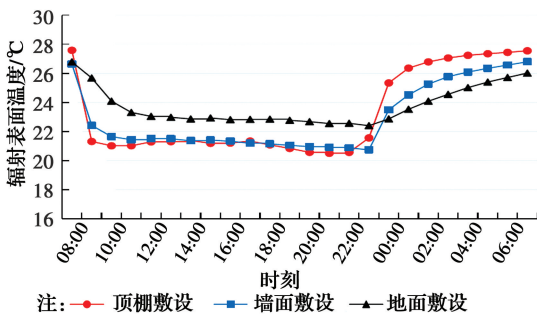


图 11 3 种工况辐射壁面温度

Fig. 11 Radiation surface temperature in 3 conditions

表 4 辐射供冷壁面平均温度

Table 4 Radiant cooling surface average temperature

敷设位置	平均温度下限值/°C
人员经常停留地面	19
人员短期停留地面	19
墙面	17
顶棚	17

3 种敷设方式辐射壁面热成像仪图如图 12 所示,由图 12 可见:

1) 3 种敷设方式辐射壁面温度分布均匀,仅在毛细管网拼接处出现较小温升。

2) 3 种敷设方式辐射壁面温度热成像仪监测数据与热电偶监测数据相差较小,顶棚、墙面、地面辐射壁面温度依次递增。

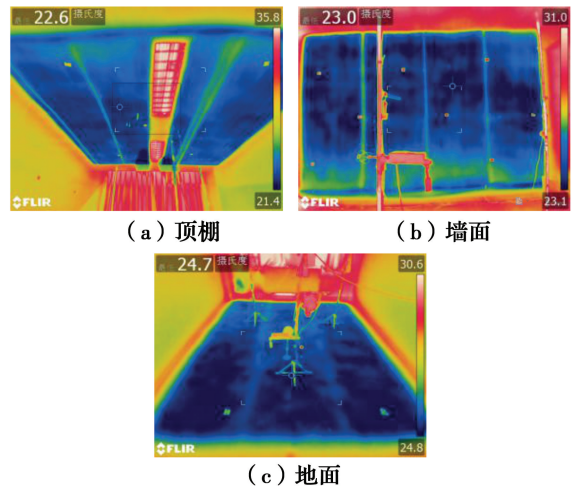


图 12 3 种工况辐射壁面热成像图片

Fig. 12 The radiation surface thermal imaging of 3 conditions

2.6 围护结构壁面温度

3 种敷设方式围护结构壁面温度分布如图 13 所示,由图 13 可知:

1) 3 种敷设方式外墙温度高于其他壁面温度,由于外墙未做保温,故受室外温度影响较大。

2) 墙面、地面敷设毛细管网供冷时,顶棚壁面温度较高。主要原因是热空气在房间上部堆积,减弱顶棚壁面降温。

3) 3 种敷设方式辐射角系数对壁面温度的影响较小。

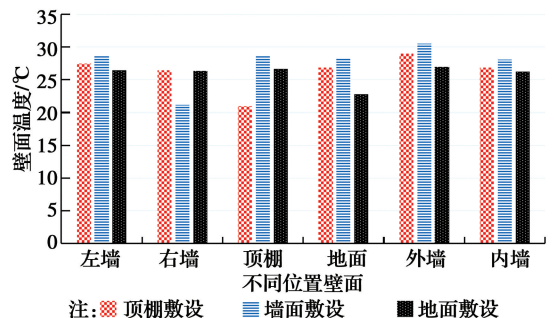


图 13 3 种工况围护结构壁面温度

Fig. 13 The surface temperature of building envelope of 3 conditions

2.7 空间垂直温度分析

3种敷设方式垂直温度分布如图14所示,站姿高差为0.1~1.7 m,坐姿高差为0.1~1.1 m。由图14可知:

1)3种敷设方式供冷时,顶棚敷设垂直温差最小,且有“头凉脚暖”的感觉,舒适度最好。

2)3种敷设方式供冷时,坐姿或站姿纵向温差均小于1℃,满足ISO 7730^[18]推荐的小于2℃(A级)的温差。

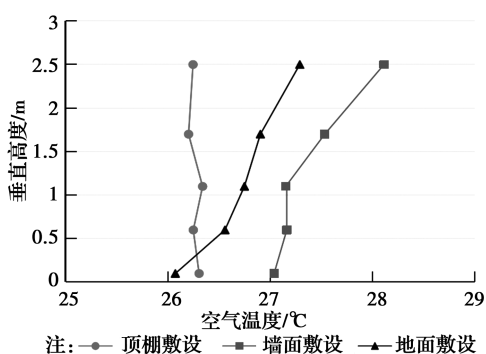


图14 3种工况垂直温度分布

Fig. 14 Vertical temperature distribution of 3 conditions

根据热舒适标准ISO 7730^[18]推荐的公式(1)计算3种工况站姿垂直不满意率,计算结果见表5。顶棚敷设供冷时垂直不满意率最小。

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(5.76 - 0.856\Delta t_{a,y})} \quad (1)$$

式中, $\Delta t_{a,y}$ 为头部与脚踝之间的温差。

表5 3种工况室内垂直不满意率

Table 5 The indoor vertical disapproval rating of 3 conditions

顶棚	墙面	地面
29	48	64

2.8 空间水平温度分析

室内空间水平温度分析分别选取a、b、c、d、e距地1.1 m处温度。3种敷设方式水平温度分布如图15所示,可知:

1)墙面敷设毛细管网供冷时,水平温度分布最不均匀。为减弱单面墙供冷造成的水平温度分布不均匀,可对两面墙同时敷设。

2)顶棚、墙面敷设毛细管网供冷时,d点的温度出现温升的主要原因是该点位于门口,实验记录人员进出房间时将内走廊热量带入房间造成。

2.9 PMV、PPD分析

热舒适预测评价指标采用Fanger教授提出的

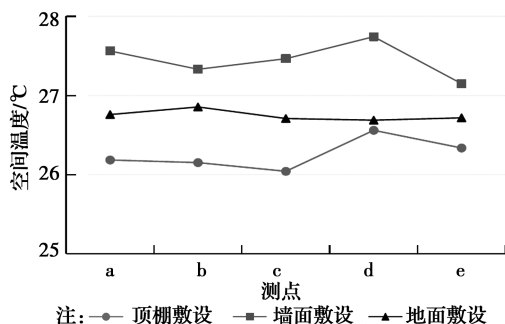


图15 3种工况水平温度分布

Fig. 15 Horizontal temperature distribution of 3 conditions

预计平均热感觉指数PMV与预计不满意者百分数PPD^[19]。PMV和PPD的表达式见式(2)和式(3)。

$$PMV = [0.303 \exp(-0.036M) + 0.0275] \{M - W - 3.05[5.733 - 0.007(M - W) - p_a] - 0.42(M - W - 58.2) - 0.0173M(5.86 - p_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)\} = f(M, W, I_{cl}, t_a, p_a, v_a, t_r) \quad (2)$$

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)] PD = \frac{100}{1 + \exp(5.76 - 0.856\Delta t_{a,y})} \quad (3)$$

式中: W 为机械效率,夏季人员机械效率较低,该实验机械效率取0; M 为能量代谢,met,实验期间实验状况记录人员处于静坐状态,相应新陈代谢 ≤ 1.2 met,实验中能量代谢取值 $M = 1.0$ met = 58.2 W/m²; p_a 为水蒸气分压力,Pa,根据实验实测室内相对湿度计算得出; I_{cl} 为服装热阻,clo,实验记录人员身着短袖连衣裙,服装热阻取值0.35 clo; v_a 为风速,m/s,实验期间室内风速微弱,因此风速取值0.1 m/s; T_a 为空气温度,℃,取实验实测值; T_r 为平均辐射温度,℃。

$$T_r = \frac{T_1 A_1 + T_2 A_2 + \dots + T_N A_N}{A_1 + A_2 + \dots + A_N}$$

式中: T_1, T_2, \dots, T_N 为围护结构壁面温度,℃; A_1, A_2, \dots, A_N 为围护结构壁面面积,m²;

辐射供冷时,室内空气温湿度、平均辐射温度为影响热舒适的主要参数,即 $PMV = f(t_a, P_a, t_r)$ 。

3种敷设方式时,室内PMV、PPD分布如图16~图17所示,由图16、图17可知:

1)顶棚、墙面、地面3种敷设方式供冷稳定时,PMV依次为-0.27、0.32、-0.2,PPD依次为7.06%、7.47%、6.34%。

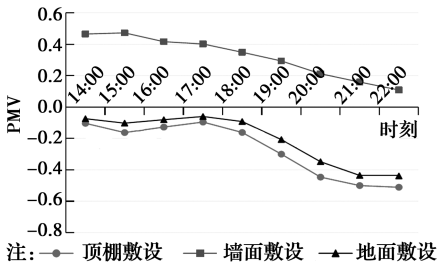


图 16 3 种工况室内 PMV

Fig. 16 The indoor PMV of 3 conditions

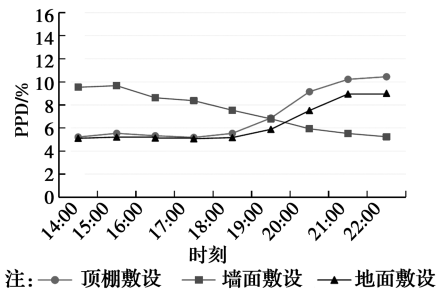


图 17 3 种工况室内 PPD

Fig. 17 The indoor PPD of 3 conditions

2) 3 种敷设方式供冷稳定阶段时,室内 PMV、PPD 均满足《民用建筑室内热湿环境评价标准》(GB/T 50785—2012) I 级热舒适评价指标 $-0.5 \leq PMV \leq 0.5$, $PPD \leq 10\%$ 。

3) 3 种敷设方式墙面辐射供冷时,室内舒适度最差。单面墙辐射供冷时,被降温的冷空气沿墙面上下沉,在右墙下侧积聚,冷空气横向传递效果较差。因此,墙面辐射供冷若想达到顶棚,可通过增大毛细管网敷设面积、降低供水温度或增大管内流速等途径实现。

3 结论

通过对比分析夏季毛细管网供冷室内环境,得出以下结论:

1) 毛细管网供水温度设定为 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,3 种敷设方式辐射供冷室内人员活动区平均温度均满足 $\leq 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的要求。供冷稳定阶段,顶棚、墙面、地面人员活动区平均温度依次为 26.27 、 27.22 、 $26.57\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2) 毛细管网敷设构造越薄,辐射壁面热响应时间越短,辐射壁面温度也越低。顶棚、墙面、地面敷设构造厚度依次递增,热响应时间依次递增,辐射壁面平均温度也依次递增,依次为 20.96 、 21.14 、 $22.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3) 顶棚敷设毛细管网供冷时,纵向温差明显低于墙面、地面,舒适度更高。3 种敷设方式纵向均小

于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 满足 ISO 7730 推荐的小于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (A 级) 温差。

4) 顶棚、地面敷设毛细管网供冷时,室内水平效果接近,优于墙面。墙面敷设毛细管网供冷时,水平温度分布最不均匀。为减弱单面墙供冷造成水平温度分布不均匀,可对两面墙同时敷设。

5) 3 种敷设方式室内预计平均热感觉指数 PMV, 预计不满意者百分数 PPD 均满足《民用建筑室内热湿环境评价标准》(GB/T 50785—2012) I 级热舒适评价指标 $-0.5 \leq PMV \leq 0.5$ 、 $PPD \leq 10\%$, 供冷稳定阶段,顶棚、墙面、地面 PMV 依次为 -0.27 、 0.32 、 -0.2 , PPD 依次为 7.06% 、 7.47% 、 6.34% 。

参考文献:

- [1] HØSEGGEN R, MATHISEN H M, HANSEN S O. The effect of suspended ceilings on energy performance and thermal comfort [J]. Energy and Buildings, 2009, 41(2): 234-245.
- [2] MIKESKA T, SVENDSEN S. Dynamic behavior of radiant cooling system based on capillary tubes in walls made of high performance concrete [J]. Energy and Buildings, 2015, 108: 92-100.
- [3] KEBLAWI A, GHADDAR N, GHALI K. Model-based optimal supervisory control of chilled ceiling displacement ventilation system [J]. Energy and Buildings, 2011, 43(6): 1359-1370.
- [4] LEE K G, HONG W H. Thermal-environment characteristics and comfort of combined radiant-floor (Korean heating system ondol) and convective cooling system [J]. Journal of Central South University, 2013, 20 (12): 3589-3603.
- [5] EUSEBIO Z E, CONCECAON, MANUELA J R, et al. Evaluation of thermal comfort conditions in a classroom equipped with radiant cooling systems and subjected to uniform convective environment [J]. Applied Mathematical Modeling, 2011, 35 (3): 1292-1305.
- [6] KYU N R, KWANG W K. A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment [J]. Building and Environment, 2015, 91: 166-190.
- [7] 李昊,高珊,贾甲,等.毛细管辐射供冷系统性能的试验及数值模拟研究 [J]. 制冷技术, 2014, 34(4): 18-22. (in Chinese)

- LI J, GAO S, JIA J, et al. Experimental and numerical simulation study on the performance of capillary radiation cooling system [J]. *Journal of Refrigeration Technology*, 2014, 34(4): 18-22.
- [8] 朱备, 翟晓强, 尹亚领, 等. 毛细管辐射供冷的换热及结露特性的实验研究[J]. *制冷技术*, 2013, 33(4): 5-10.
- ZHU B, ZHAI X Q, YIN Y L, et al. Experimental investigation of heat transfer and dew performances of capillary radiant cooling [J]. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 2013, 33(4): 5-10. (in Chinese)
- [9] 谢东, 王赟, 廖买利, 等. 基于不同管径毛细管辐射顶板供冷性能模拟 [J]. *建筑热能通风空调*, 2016, 35(11): 1-4, 48.
- XIE D, WANG Y, LIAO M L, et al. Numerical modeling of cooling performance for capillary ceiling radiant cooling panel based on pipe diameters [J]. *Building Energy & Environment*, 2016, 35(11): 1-4, 48. (in Chinese)
- [10] 王赟, 谢东, 莫顺权, 等. 毛细管辐射冷却顶板供冷性能的数值模拟研究 [J]. *制冷与空调*, 2016, 30(3): 287-290, 294.
- WANG Y, XIE D, MO S Q, et al. Numerical modeling on cooling performance of capillary ceiling radiant cooling panel [J]. *Refrigeration & Air Conditioning*, 2016, 30(3): 287-290, 294. (in Chinese)
- [11] 张金明. 壁面辐射供冷与独立新风复合空调的数值模拟研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2015.
- ZHANG J M. The numerical simulation research of the wall radiant cooling air conditioning system with independent fresh air [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [12] 刘猛, 王旭弟. 湿热地区毛细管地板供冷末端性能实测分析[J]. *土木建筑与环境工程*, 2017, 39(1): 1-6.
- LIU M, WANG X D. Experimental analysis of terminal performance for floor cooling with capillary tubes in hot-humid area [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2017, 39(1): 1-6. (in Chinese)
- [13] 李妍, 许彬, 贾军华, 等. 毛细管网抹灰安装供冷能力分析 [J]. *暖通空调*, 2017, 47(1): 97-102.
- LI Y, XU B, JIA J H, et al. Cooling capacity analysis of capillary network with plasterer paving [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2017, 47(1): 97-102. (in Chinese)
- [14] 陈金华, 杨雯芳, 沈雪莲, 等. 不同供水工况毛细管网地板辐射供暖实验研究 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(11): 205-212.
- CHEN J H, YANG W F, SHEN X L, et al. Experimental research on capillary floor radiant heating in different water supply temperature [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(11): 205-212. (in Chinese)
- [15] 陈露, 廖胜明. 三种方式辐射供冷室内热环境对比分析[J]. *建筑热能通风空调*, 2010, 29(3): 53-56.
- CHEN L, LIAO S M. Three approaches to the comparative study of indoor thermal environment for radiant cooling system [J]. *Building Energy & Environment*, 2010, 29(3): 53-56. (in Chinese)
- [16] 梁秋锦. 毛细管网不同敷设方式供冷性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- LIANG Q J. Study on cooling performance with capillary different laying ways [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [17] 陈金华, 梁秋锦, 李楠, 等. 毛细管网供暖室内环境对比实验研究 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2018, 40(2): 88-94.
- CHEN J H, LIANG Q J, LI N, et al. Comparative experimental analysis of capillary radiant heating on indoor environment [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2018, 40(2): 88-94. (in Chinese)
- [18] Ergonomics of the thermal environment-Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria: ISO 7730 [S].
- [19] 民用建筑供暖通风及空气调节设计规范: GB 50736—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Regulations on the design of heating ventilation and air conditioning for civil buildings: GB 50736-2012 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012. (in Chinese)