

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.01.001



湿热地区毛细管地板供冷末端性能实测分析

刘猛,王旭弟

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室;国家级低碳绿色建筑联合研究中心,重庆 400045)

摘要:选取重庆某住宅卧室进行实测分析,在供水温度为20、18、16℃,室外天气为晴天、多云、阴天(雨)工况下,研究毛细管地板供冷房间温度、地板供冷量、地板结露特征。供水温度为20、18、16℃时,室内最高温度27.6℃,最大供冷量分别为23、33、32 W/m²。开始结露时间为10:30—14:50之间,其中80%区域开始结露的时段为11:00—13:00之间,室内气流涡旋区最早出现结露。供水温度为18℃时,除湿能明显改变地板结露现象;供水温度为16℃时,除湿能改变大部分地板结露现象,室内气流涡旋区仍为结露区,但结露时间延后1 h以上。地板结露区域与室内气流组织有关,毛细管铺设位置应避开房间气流漩涡区。

关键词:湿热地区;毛细管;地板供冷;室内温度;供冷量;结露

中图分类号:TU831.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)01-0001-06

Experimental analysis of terminal performance for floor cooling with capillary tubes in hot-humid area

Liu Meng, Wang Xudi

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

Abstract: Indoor temperature, cooling capacity and condensation characteristic of capillary tubes for floor cooling were specially investigated with 20℃, 18℃, 16℃ inlet water temperature. Experiment was carried out in a bedroom in Chongqing in sunny, cloudy and overcast weather condition. The results showed that the highest indoor temperature was 27.6℃, the maximum cooling capacity were 23 W/m², 33 W/m², 32 W/m² respectively. Adverse condition of condensation was happened between 10:30 to 14:50, among which 80% area started condense from 11:00 to 13:00. Indoor air eddy area was very easy to be condensed. The dehumidifier could reduce condensation dramatically with 18℃ inlet water, but eddy area was still condensed with 16℃ inlet water, The condensation area was related to indoor air distribution, the capillary tubes should be installed avoid air eddy area.

Keywords: hot-humid area; capillary tubes; floor cooling; cooling capacity; condensation

收稿日期:2016-08-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0700301, 2016YFC0700303)

作者简介:刘猛(1979-),男,教授,博士生导师,主要从事绿色建筑技术、建筑节能研究,(E-mail)liumeng2033@126.com.

Received:2016-08-25

Foundation item:China National Key R & D Program (No. 2016YFC0700301, 2016YFC0700303)

Author brief: Liu Meng (1979-), professor, doctoral supervisor, main research interests: green building and energy efficiency, (E-mail) liumeng2033@126.com.

毛细管辐射供冷具有较高的舒适性及节能性能,然而,在湿热地区应用受到很大限制,主要原因是空气湿度较大,壁面的露点温度较高,壁面容易结露进而供冷量受到很大限制。供水温度对供冷量有重大影响,辐射板与热源表面直接换热,供水温度可提高到 16℃以上^[1]。天津火车站采用地板供冷,地板温度在 23℃状况下的供冷量为 30 W/m²^[2]。实测供水温度 16℃时,金属板及石膏板的最大供冷量分别为 48、60 W/m²^[3]。供冷量是否足够,室温是一个表征量。有实验表明,当辐射地板供冷供水温度高于 12℃时,室内温度维持在 24.6~26.5℃^[4];辐射吊顶表面温度为 22℃时,房间温度为 24℃^[5]。

地板温度分布不均匀及房间气流组织的影响,导致局部区域存在结露风险。因此,辐射板空气边界层露点温度对结露有重要影响^[6],且对房间密封性有一定要求^[7]。沈阳夏季新风送风温度 18℃、含湿量 12.1 g/kg 即可减小室内相对湿度^[8]。在热湿地区采用转轮除湿机加辐射吊顶的空调方式,在转轮除湿机除湿量 0.89~2.673 kg/h、供水温度 6~10℃时,吊顶表面温度为 14~18℃,在相对湿度小于 70%时,或表面 18~20℃时吊顶表面不会结露^[9-10]。地板温度降低到露点温度时,并不会马上结露,有一定过冷度^[11]。通常辐射板除了地板外还有高性能混凝土冷墙^[12]、冷梁^[13]、天花板^[14]等,但冷吊顶比冷地板更易结露,冷吊顶的凝结速率为冷地板的 3.5 倍、冷墙壁的 1.25 倍^[15]。

对湿热地区毛细管地板供冷的测试分析有助于形成该技术在湿热地区推广应用的方法,因此,笔者采取实测分析方法,探讨湿热地区毛细管地板供冷在不同供水温度下能维持的室内温度大小、达到的供冷量状况及结露特征。

1 测试平台介绍

1.1 测点布置

选择重庆某住宅卧室,实验测点包括空间温湿度测点、地板温度测点、围护结构表面温度测点,所有参数均按照《民用建筑室内热湿环境评价标准》(GB/T 50785—2012)基本参数测量方法进行。空间测点包括竖向 0.6、1.1、1.7 m 温湿度测点各 3 组,按房间对角点分布。距地 0.1 m 温湿度测点 7 个。距地 1.1 m 黑球温度 3 组,按房间对角点分布。依据地板大小及标准布置 7 个地板测点(F1-F7)。

依据标准在北窗布置 1 个温度测点,北门布置 1 个温度测点,内墙 N1、N2 各布置 1 个测点,东墙依对角线布置 3 个测点,西墙依对角线布置 2 个测点,南向推拉门上布置 1 个测点,南墙布置 1 个测点,屋顶依对角线布置 3 个测点。

1.2 测试仪器

仪器精度及测量范围均按照《民用建筑室内热湿环境评价标准》(GB/T 50785—2012)测试仪器精度要求选用,见表 1。

表 1 实验仪器

Table 1 Experiment instruments

测试参数	仪器	精度	测量范围
黑球温度	黑球温度传感器	常温段±0.2℃	5~120℃
壁面及空间温度	铂电阻传感器 PT100	±0.1℃	-20~100℃
壁面温度	红外线测温仪 testo830-T2	±1.5℃	-30~+400℃
0.1 m 温湿度	温湿度传感器	温度:<±0.5℃ 湿度:<±3%	温度:-20~60℃ 湿度:0~100%
空间温湿度	Onset Hobo	温度:±0.21℃ 湿度:±2.5%	温度:0~50℃ 湿度:0~100%
除湿机	LEXY DH3100		额定功率 360 W 最大功率 440 W 风量 150 m ³ /h 除湿量 18~20 L/d
供水温度	铂电阻传感器	±0.1℃	-20~100℃
室外温湿度	太阳能气象站	温度:±0.1℃ 湿度:±3%	温度: -50~+80℃ 相对湿度: 0~100%

1.3 测试方案

测试主要从不同供水温度、不同室外天气状况及是否除湿几个因素分析供冷性能。选择冷水供水温度为 20、18、16℃。按照湿热地区夏季室外特点将室外天气分为晴天、多云天、阴(雨)天。测试期间供水温度及室外条件见表 2,所有数据均来自于实测。

表 2 实测工况列表
Table 2 List of field study condition

供水温度/℃	日期	室外天气	供冷期室外温度/℃			供冷期室外相对湿度/%	是否除湿
			最高	最低	平均		
20	7月18日	晴	32.8	27.6	31.1	60	否
	7月17日	多云	31.6	25.8	29.5	68	否
	7月21日	阴(雨)	28.8	26.7	27.6	86	否
18	7月29日	晴	33.2	28.2	31.3	60	否
	7月28日	多云	32.3	26.4	30.0	65	否
	8月5日	阴(雨)	30.0	22.0	26.2	76	否
	7月30日	晴	34.3	27.7	31.9	57	是
	8月30日	多云	30.8	25.4	28.6	68	是
	8月29日	阴(雨)	28.5	25.0	26.2	82	是
16	8月6日	晴	32.9	26.9	30.3	60	否
	9月3日	阴(雨)	32.0	25.7	29.7	68	否
	7月19日	多云	30.7	25.4	28.8	74	否
	8月13日	晴	33.6	27.4	31.5	72	是
	7月31日	多云	32.1	27.3	29.7	61	是
	9月1日	阴(雨)	30.5	25.6	28.1	72	是

2 室温及供冷量

毛细管地板供冷量的计算方法依据《辐射供暖供冷技术规程》(JGJ 142—2012)的规定,辐射面传热量的计算

$$q = q_f + q_d \quad (1)$$

其中

$$q_f = 5 \times 10^{-8} [(t_{pj} + 273)^4 - (t_{fj} + 273)^4] \quad (2)$$

式中: q 为辐射面单位面积传热量, W/m^2 ; q_f 为辐射面单位面积辐射传热量, W/m^2 ; q_d 为辐射面单位面积对流传热量, W/m^2 ; t_{pj} 为辐射面表面平均温度, $^{\circ}C$; t_{fj} 为室内非加热表面的面积加权平均温度, $^{\circ}C$; t_n 为室内空气温度, $^{\circ}C$ 。

$$q_d = 0.87(t_{pj} - t_n)^{1.25} \quad (3)$$

式中: t_n 为室内空气温度, $^{\circ}C$ 。

采用式(1)~(3)即可计算供冷量大小。图 1~3 分别为 20、18、16 $^{\circ}C$ 供水条件下的供冷量和室温对比,无论室外何种天气,运行期间地板供冷量可分为 3 个阶段:第 1 阶段(开机后 40~60 min)供冷量无明显变化,20、18、16 $^{\circ}C$ 在该阶段的持续时间为 40~60 min,供冷量为 5~10 W/m^2 之间。20 $^{\circ}C$ 供水条件下,室温为 25~26.8 $^{\circ}C$;18 $^{\circ}C$ 供水时室温为 24.8~26 $^{\circ}C$;16 $^{\circ}C$ 供水时室温为 25~25.8 $^{\circ}C$ 。第

2 阶段(上一阶段后持续 2~3 h),供水 20 $^{\circ}C$ 供冷量可增长到 17 W/m^2 ,室内温度最高为 26.5 $^{\circ}C$;供水 18 $^{\circ}C$ 及 16 $^{\circ}C$ 时供冷量可增长到 25 W/m^2 ,室内温度最高分别为 27.6、26.9 $^{\circ}C$;第 3 阶段(上一阶段到关机)供冷量达到最大,供水温度为 20、18、16 $^{\circ}C$ 时最大供冷能力 23、33、33 W/m^2 ,室温在该阶段达到最大且稳定,供水 20、18、16 $^{\circ}C$ 时维持的室温最高分别为 26.8、27.6、26.9 $^{\circ}C$ 。

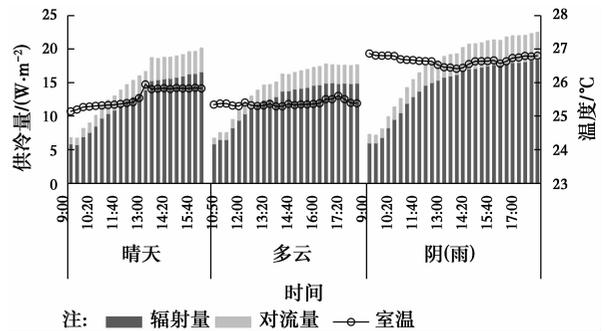


图 1 供水温度为 20 $^{\circ}C$ 时的供冷量

Fig. 1 Cooling capacity of 20 $^{\circ}C$ inlet water

图 4 所示为特征温差与供冷量之间地板供冷性能曲线,其中,最大供冷性能曲线为

$$Q = 3.406 2\Delta t + 1.192 8$$

式中: Q 为地板单位面积供冷量; Δt 为地板特征温差。

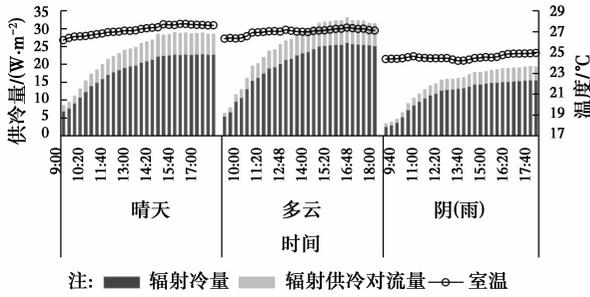


图 2 供水温度为 18 °C 时的供冷量

Fig. 2 Cooling capacity of 18 °C inlet water

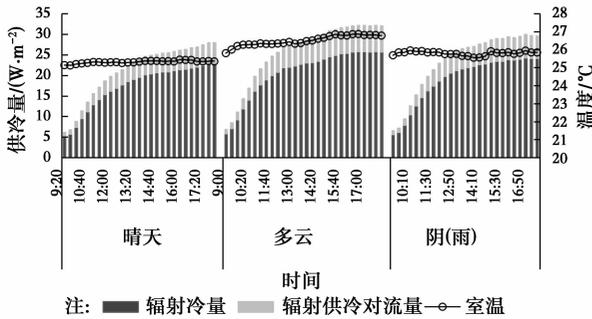
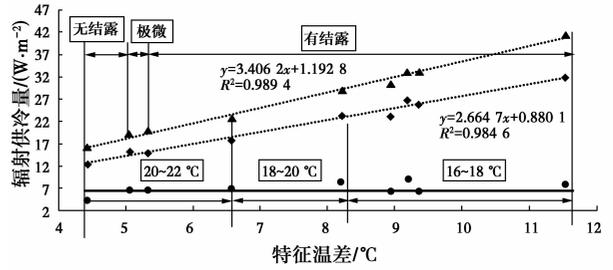


图 3 供水温度为 16 °C 时的供冷量

Fig. 3 Cooling capacity of 16 °C inlet water

供冷能力曲线显示,当供水温度为 20~22 °C 时,最大供冷量为 16.9~22 W/m²;供水温度为 18~20 °C 时,最大供冷量为 22~29 W/m²;供水温度为 16~18 °C 时,最大供冷量为 30~41 W/m²。

图 4 毛细管网地板供冷性能曲线
Fig. 4 Cooling capacity curve of floor cooling with capillary tubes

3 结露时空分布特征

将所有工况的结露状况汇总见表 3。非除湿工况下,所有供水温度下地板均会结露,结露严重程度各异;除湿工况下供水温度为 18 °C 的阴雨天有少量结露,供水温度为 16 °C 均会结露。出现结露现象的区域中开始结露时间集中在 10:30—14:50 之间,其中 80% 的区域开始结露时间段为 11:00—13:00。如图 5 所示,F1、F2、F3、F6(气流涡旋区)测点在所有结露区域中均会全部或部分出现,且为整个地板中最早出现结露的区域,其他区域开始结露时间均滞后甚至不会出现结露现象。

表 3 结露特征汇总

Table 3 Summary sheet of condensation characteristic

供水温度/°C	日期	室外天气	是否除湿	是否结露	开始结露时间	结露区域	最早结露区域
20	7月18日	晴	否	是	13:20—14:50	全部	3
	7月17日	多云	否	是	12:20—13:10	1、2、3	3
	7月21日	阴(雨)	否	是	12:00—12:40	1、2、3、5、6、7	1、2、3
18	7月29日	晴	否	是	13:50—14:10	2、3	2、3
	7月28日	多云	否	是	11:40—14:20	1、2、3、5、6、7	1、2、3、6
	8月5日	阴(雨)	否	是	10:30—13:30	全部	1、2、3、6
	7月30日	晴	是	否			
	8月30日	多云	是	否			
16	8月29日	阴(雨)	是	是	11:30—13:30	1、2、6	1、2、6
	8月6日	晴	否	是	12:10—12:30	1、2	2、3
	9月3日	阴(雨)	否	是	11:00—13:40	1、2、3、5、6、7	1、2、3、6
	7月19日	多云	否	是	10:50—12:20	全部	1、2、3、6
	8月13日	晴	是	是	11:40—13:50	1、2、3、5、6、7	1、2、3、6
	7月31日	多云	是	是	12:00—13:00	1、2、3	1、2、3
	9月1日	阴(雨)	是	是	13:20—14:20	1、2	1、2

4 结露因素分析

对数据分析后发现影响地板结露的因素主要有供水温度、室外天气、室内气流组织、是否进行除湿。

供水温度及室外天气的影响。如表 3 所示,当室外温度相似,供水温度降低时开始结露的时间也依次提前;同一供水温度下,室外温度降低,地板越早结露,地板温度为 20、18、16 °C 时,室外温度每降低 1 °C,结露时间提前 0.3、0.2 和 0.3 h。

气流组织的影响。实验房间朝向见图 5,图中箭头表示室内气流流向,实验房间门窗的气密性较差,会形成大约 1 次/h 的自然换气次数,重庆山地夏季风向为东北风,室外空气经门窗渗透进入房间,风速在 1 m/s 以下,风速较弱风压较小,较小的风压只会保证气流进入房门 3~4 m 的位置即形成气流涡旋,不会继续深入。因此,可将室外空气经门窗渗透进入房间 3~4 m 的地板区域确定为气流涡旋区。涡旋区携带室外高温空气且湿量集聚,导致该区域空气露点温度较高,遇到冷地板形成结露的条件,因此测点 1、2、3、6(气流涡旋区)区域最早结露。

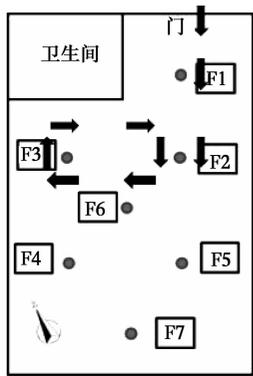


图 5 实验房间测点布置及夏季风向
Fig. 5 The wind orientation and test points layout of study room

是否除湿的影响。除湿采用开启除湿机的方式,图 6 和图 7 分别为供水 16 °C 及 18 °C 时除湿与非除湿工况对比。图中 FHT 为非除湿工况室外平均温度,HT 为除湿工况室外温度。供水 16 °C,除湿后部分区域开始结露时间延后,阴天测点 1、2、3 开始结露时间分别延迟 0.7、0.9、1.7 h,阴(雨)天测点 1、2 开始结露的时间分别延迟 3.1、2.6 h;除晴天室外超高温天气外,地板部分区域除湿后结露现象消失,如多云天测点 5、6、7,阴雨天测点 3、4、5、6、7。

供水温度为 18 °C 时,多云天除湿和非除湿工况室外温度相同,图中仅显示一种工况下的温度。除湿后只有阴(雨)天测点 1、2、6 有结露现象,且结露

时间较非除湿工况下分别延后 2.9、1、1.3 h。

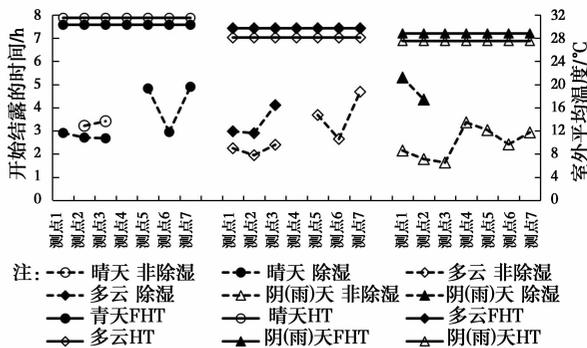


图 6 供水温度为 16 °C 除湿和非除湿工况结露时间地点对比
Fig. 6 Comparison of condensation in 16 °C inlet water condition

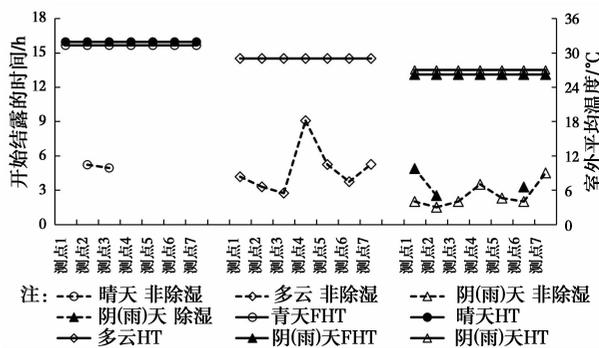


图 7 供水温度为 18 °C 除湿和非除湿工况结露时间地点对比
Fig. 7 Comparison of condensation in 18 °C inlet water condition

5 结论

1) 供水温度为 20 °C 时,最大供冷量为 23 W/m²,室温可维持在 25~27 °C 之间,最早结露时间为 11:40;供水温度为 18 °C 时,最大供冷量为 33 W/m²,室温可维持在 24.4~27.6 °C 之间,最早结露时间为 10:30;供水温度为 16 °C 时,最大供冷量为 33 W/m²,室温可维持在 25.1~26.9 °C 之间,最早结露时间为 10:40。所有供水温度下最早结露地点均为气流涡旋区。

2) 在同一供水温度下,室外温度越低,地板越早结露;当室外温度相似,供水温度降低时,开始结露的时间也依次提前。所有结露区域最早开始结露的时间集中在 10:30—14:00 之间,其中 80% 开始结露时间段在 11:00—13:00 之间。

3) 室内气流涡旋区为整个地板最早出现结露的区域,其他区域结露时间均滞后,甚至不会出现结露现象。

4) 室外温度过高,即使除湿机除湿也不能改变

地板结露。当供水温度较高,为 18 ℃时,除湿机除湿能明显改变地板结露现象;当供水温度降低到 16 ℃时,除湿机除湿能改变大部分地板结露现象,室内气流涡旋区为除湿工况下的结露区域,结露时间较非除湿延后 1 h 以上。

5) 湿热地区利用毛细管地板供冷方法:若无采取除湿措施,则供水温度不低于 20 ℃,若采取可靠除湿措施,则供水温度不低于 16 ℃,采用水温控制良好(±1 ℃)的机组,且尽可能利用墙面及吊顶多面供冷;提高围护结构的保温特性及房间的气密性;铺设位置应避开室外热风直接渗入房间的位置,或避开室内气流涡旋区。

参考文献:

- [1] 高志宏,刘晓华,江亿. 毛细管辐射供冷性能实验研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(1): 101-106.
GAO Z H, LIU X H, JIANG Y. Experiment study on cooling capacity of capillary-tube radiation air-condition [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2011, 32(1): 101-106. (in Chinese)
- [2] ZHAO K, LIU X, JIANG Y. Application of radiant floor cooling in large space buildings-A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 1083-1096.
- [3] 裴凤,陈华,金梧凤,等. 不同结构毛细管网辐射板供冷性能实验研究[J]. 低温与超导, 2013, 41(7): 58-63.
PEI F, CHEN H, JIN W F, et al. Experimental study of the cooling performance of different structure of capillary mats of radiant panel [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2013, 41(7): 58-63. (in Chinese)
- [4] 张叶,陈超,赵玉清,等. 既有办公建筑大堂地板辐射供冷供暖系统节能改造方案可行性研究[J]. 暖通空调, 2010, 40(3): 56-60.
ZHANG Y, CHEN C, ZHAO Y Q, et al. Feasibility analysis of energy efficiency reformation of an existing office building lobby with floor panel cooling and heating system [J]. HV & AC, 2010, 40(3): 56-60. (in Chinese)
- [5] 娄载强,杨冬,张云婷,等. 顶棚辐射供冷房间的温度分布探析[J]. 制冷技术, 2013(3): 59-60.
LOU Z Q, YANG Y, ZHANG Y T, et al. Analysis of temperature distribution of ceiling radiant cooling room [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2013(3): 59-60. (in Chinese)
- [6] JIN W, JIA L, WANG Q, et al. Study on condensation features of radiant cooling ceiling [J]. Procedia Engineering, 2015, 121: 1682-1688.
- [7] 黄伟,李继路,刘谨. 混凝土楼板辐射供冷空调系统在亚热带地区的适用性[J]. 暖通空调, 2012, 42(6): 45-47.
HUANG W, LI J L, LIU J. Applicability of concrete slab radiation cooling air condition system to subtropical zone [J]. HV & AC, 2012, 42(6): 45-47 (in Chinese)
- [8] LI G, SHE C, WU N, et al. The solution and simulation of the condensation problem of the capillary network system in the Children's Hospital of Shenyang in summer [J]. Procedia Engineering, 2015, 121: 1215-1221.
- [9] BINGHOOTH A S, ZAINAL Z A. Performance of desiccant dehumidification with hydronic radiant cooling system in hot humid climates [J]. Energy and Buildings, 2012, 51(4): 1-5.
- [10] 李严,李念平,严继光. 温度均匀分布辐射冷顶板的传热特性[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(5): 16-22.
LI Y, LI N P, YAN J G. Heat transfer characteristics of a new ceiling radiant cooling panel with uniform temperature distribution in the surface [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2014, 36(5): 16-22. (in Chinese)
- [11] 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(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(4): 5-10. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] MUSTAKALLIO P, BOLASHIKOV Z, KOSTOV K, et al. Thermal environment in simulated offices with convective and radiant cooling systems under cooling (summer) mode of operation [J]. Building and Environment, 2016, 100: 82-91.
- [14] SU L, LI N, ZHANG X, et al. Heat transfer and cooling characteristics of concrete ceiling radiant cooling panel [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 84: 170-179.
- [15] TANG H, LIU X, JIANG Y. Theoretical and experimental study of condensation rates on radiant cooling surfaces in humid air [J]. Building and Environment, 2016, 97: 1-10.