

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.02.016



冬季供暖工况下混凝土辐射顶板传热特性

李敬, 李念平, 孙亚芬, 苏林, 张絮涵

(湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

摘要:针对冬季供暖工况下混凝土辐射顶板的传热问题,建立顶板辐射供暖的简化数学模型,利用 MATLAB 软件计算其供热量,并通过该顶板辐射供暖的热工特性实验验证模型的合理性。研究表明:顶板温度计算值与实验结果的误差在 5.01% 以内,供热量计算值与实验结果的误差在 5.15% 左右。通过对实验和计算结果的分析发现:在定流量稳态工况下,顶板温度随供水温度的增大呈指数性增大,随换热盘管间距的增大而减小。

关键词:辐射供暖;传热;供热量;数学模型;实验验证

中图分类号: TU832.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)02-0118-07

Heat transfer characteristics of concrete radiant heating ceiling in winter

Li Jing, Li Nianping, Sun Yafen, Su Lin, Zhang Xuhan

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China)

Abstract: A simplified mathematical model was established to calculate the heating transfer capacity through MATLAB program. Compared with the results of thermal performance test, the mathematical model was reasonable with a maximum error less than 5.15%. According to the results of model and experiment, in the constant flow condition, heating capacity of the ceiling increases as the temperature increases, meanwhile heating capacity decreases as the heat exchange coil spacing increases.

Keywords: ceiling radiant heating panel; heat transfer; heating capacity; mathematic model; experimental validation

辐射板空调系统以其节能、环保、低噪声^[1]、房间无明显吹风感^[2]、热舒适性高^[3]及节省建筑空间等优点逐渐成为人们新的选择,与传统空调相比可节省全年能耗 30% 以上^[4]。2002 年美国能源部将其作为未来最有优势的 15 项暖通空调节能技术之

—^[5]。现代空调技术起源于欧洲,20 世纪 70 年代瑞士率先推出用于低温地板辐射采暖的交联聚乙烯管材,大大促进了辐射采暖空调的发展^[6],20 世纪 80 年代末,低温地板采暖技术已经被广泛应用于住宅以及商场、饭店等民用及公共建筑,20 世纪 90 年

收稿日期: 2015-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(51578220)

作者简介: 李敬(1988-),女,主要从事辐射空调方式研究,(E-mail)1239887878@qq.com。

李念平(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)linianping@126.com。

Received: 2015-08-29

Foundation item: National Science Foundation of China(No. 51578220)

Author brief: Li Jing (1988-), main research interest: radiant air condition, (E-mail)1239887878@qq.com.

Li Nianping (corresponding author), professor, doctor supervisor, (E-mail)linianping@126.com.

代初鲁诺·凯勒教授设计的混凝土顶板辐射采暖制冷成功运行,使建筑集供冷采暖为一体技术得以实现,减少了设备占有建筑空间和设备初投资。目前,可采用加隔热保温层等措施来降低混凝土背面的热损失,降低建筑结构内外温差。如果是高层建筑,对每一层的室内来讲,相当于地面和顶面双层供暖,混凝土楼板具有较大蓄热能力,较低的供水温度就可满足人体热舒适要求,因此,混凝土辐射板供暖逐步得到应用。2013年李严在长沙万国城,做了混凝土顶板双面辐射供暖传热的模拟研究^[7]。与此同时,学者们也致力于辐射板换热量的研究,Davie等^[8]提出辐射换热平均辐射温度模型,Maloney等^[9]提出辐射供暖计算模型等。

目前,研究主要集中在夏季工况混凝土顶板供冷上,而对冬季工况混凝土顶板辐射供暖传热性能较少,不利于实现建筑混凝土顶板辐射供暖制冷一体化。

笔者首先建立简化数学模型,利用MATLAB软件计算混凝土顶板换热量,然后通过实验对模型进行验证,同时研究不同管间距时室内温度的垂直分布、换热量等顶板辐射特性。

1 混凝土顶板传热数学模型

1.1 模型假设

为了方便求解,对混凝土顶板的传热做出以下简化^[10]:

- 1) 在稳态工况下分析所有传热过程。
- 2) 由于辐射顶板埋管上设有保温层,故可忽略顶板背面的传热,即辐射板为单面传热。
- 3) 换热盘管内的热媒均为均匀流动。
- 4) 在模型中,假设水温沿单位管长无变化,忽略沿管轴线方向导热;混凝土顶板表面的温度分布符合肋片温度分布规律,埋管导热可看为等截面直肋的导热。

如图1所示,顶板表面温度分布符合肋片温度分布规律,管顶混凝土顶板表面温度最高(t_{\max}),将其视为肋基,两管道之间表面温度最低(t_{\min}),将管道之间 $2W$ 区域视为肋片。由于混凝土辐射顶板中管道一般采用等间距平行布置,可近似认为两管之间对称。

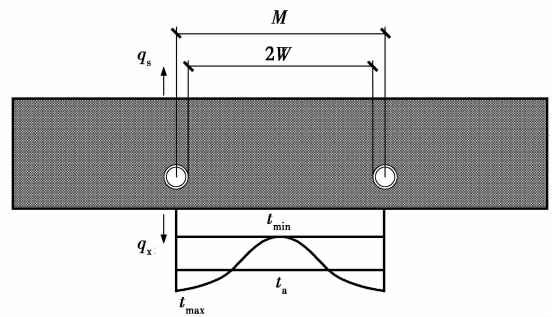


图1 顶板辐射采暖平面肋片模型

Fig1 Model for concrete radiant ceiling

1.2 混凝土顶板换热

顶板换热方式包括对流换热和辐射换热,其中辐射换热一般占总换热量的50%以上^[11],为方便计算,本文采用简化计算方法——平面肋片法^[12]。肋基部分的换热量为

$$q_{x1} = \alpha_d(t_{\max} - t_a) + \alpha_r(t_{\max} - \text{AUST}) \quad (1)$$

化简为

$$q_{x1} = \alpha_1(t_{\max} - t_a) \quad (2)$$

其中

$$\text{AUST} = \frac{\sum_{j=1}^n A_j \epsilon_j T_j}{\sum_{j=1}^n A_j \epsilon_j} \quad (3)$$

式中: α_1 为混凝土顶板总换热量系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$;AUST为非供暖壁面的表面加权平均温度,K; A_j 为房间除顶板以外其他表面的面积, m^2 ; T_j 为房间除顶板以外其他表面的温度,K; ϵ_j 为房间除顶板以外其他表面的发射率。

肋片部分的导热微分方程为

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - \frac{\alpha U(t - t_a)}{\lambda A_L} = 0 \quad (4)$$

边界条件为

$$x = 0, t = t_{\max}; x = W, \frac{dt}{dx} = 0$$

式中: U 为换热肋片界面周长且 $U=L$; A_L 为肋片截面面积, m^2 ; $A_L=L \cdot \delta$; λ 为混凝土辐射顶板结构的导热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; L 、 δ 为肋片的宽度和厚度,m。

对式(4)进行求解,得到肋片表面的温度分布 t_x :

$$t_x = t_a + (t_{\max} - t_a) \frac{\text{ch}[m(W-x)]}{\text{ch}(mW)} \quad (5)$$

其中

$$m = \sqrt{\frac{\alpha U}{\lambda A}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \delta}} \quad (6)$$

当肋片为多层结构时

$$m = \sqrt{\frac{\alpha}{\sum \lambda_i \delta_i}} \quad (7)$$

以上假定顶板传热的温度场是一维传热,而实际辐射顶板内温度场是二维温度场,必须考虑沿顶板厚度方向的温度变化。因此,Kilki 等^[13]提出等效热导,认为管轴线以下的顶板结构等效为热导为 $2 \sum \lambda_i \delta_i$ 故将(7)修正为

$$m = \sqrt{\frac{\alpha}{2 \sum \lambda_i \delta_i}} \quad (8)$$

对公式(5)积分,得到肋片平均温度

$$t_m = \frac{1}{W} \int_0^W \left[t_a + (t_{\max} - t_a) \frac{\text{ch}[m(w-x)]}{\text{ch}(mW)} \right] dx \quad (9)$$

计算得

$$t_m = t_a + (t_{\max} - t_a) \frac{\text{th}(mW)}{mW} \quad (10)$$

故肋片下表面的换热量:

$$q_{x2} = \alpha(t_m - t_a) = \alpha(t_{\max} - t_a) \frac{\text{th}(mW)}{mW} \quad (11)$$

得到

$$q = q_{x1} + q_{x2} \quad (12)$$

其中

$$\eta = \frac{\text{th}(mW)}{mW}$$

则

$$q_{x2} = \alpha(t_{\max} - t_a) \eta \quad (13)$$

故在管间距为 M 的混凝土顶板的散热量为

$$q \times M = \alpha(t_{\max} - t_a)(2W\eta + d_w) \quad (14)$$

当对流换热量与辐射换热量分别计算时:

$$q \times M = \alpha_d(t_{\max} - t_a)(2W\eta_d + d_w) + \alpha_f(t_{\max} - t_a)(2W\eta_f + d_w) \quad (15)$$

式中: η_d 为对流换热肋片效率; η_f 为辐射换热下的肋片效率。其中肋基温度 t_{\max} 计算式如下:

$$t_{\max} = t_g - q \sum_2^n \left[\frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{\delta_1 + 0.5d_w}{\lambda_1} \right] \quad (16)$$

t_g 为管道外表面温度可以近似计算为

$$t_g = t_s - q \cdot \frac{M}{\pi} \left[\frac{1}{\alpha_n \cdot d_n} + \frac{1}{2\lambda_g} \ln\left(\frac{d_w}{d_n}\right) + \frac{R_f}{d_w} \right] \quad (17)$$

式中: t_g 为管道平均水温, $^{\circ}\text{C}$; d_n 为管道内径,m。

对肋基的计算公式(16)有一个假设前提:混凝

土顶板传热是一维的,实际上混凝土辐射板传热是二维的,水平方向和竖直方向的导热会引起混凝土辐射板表面温度降低不可忽略,所以对肋基温度进行修正,引入水平传热修正系数 K ,公式(16)变为

$$t_{\max} = t_g - q \cdot k \cdot \sum_{i=2}^n \left[\frac{\delta_i}{\lambda_i} + (\delta_1 + 0.5d_w)/\lambda_1 \right] \quad (18)$$

对于混凝土结构:

$$K = 1 + 2M - d \quad (19)$$

式中: M 为管间距,m; d 为管道的埋管深,m。

联立式(1)~(19)要求换热量还需要已知对流换热系数和辐射换热系数 α_d, α_f 。

1.3 对流换热系数与辐射换热系数的求解

在供暖的工况下,辐射顶板温度高于室内空气及各个墙体的温度,故可认为混凝土辐射板面是热流朝下^[14],因此

$$Nu = 0.58 (Gr \cdot Pr)^{1/5} \quad (20)$$

其中

$$Nu = \frac{\alpha_d \cdot L}{\lambda}, Gr = \frac{g\beta(t_p - t_a)}{v^2}, Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (21)$$

代入(20)整理后得

$$\alpha_d = 0.58\lambda \left(\frac{g\beta}{v^2} Pr \right)^{1/5} \left(\frac{\Delta t}{L} \right)^{1/5} \quad (22)$$

对于 20°C 的空气, $\lambda = 0.0257 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; $\nu = 15.11 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; $\beta = 0.00343$; $Pr = 0.713$ 。代入式(22)得

$$\alpha_d = 0.6 \left(\frac{\Delta t}{L} \right)^{1/5} \quad (23)$$

Alamdari 和 Hammond 1983 年将上式修正为

$$\alpha_d = 0.6 \left(\frac{\Delta t}{L} \right)^{1/5} + (1.63\Delta t^{1/3})^{1/9} \quad (24)$$

式中: L 为定型尺寸,对于顶板表面取其表面两个边长的平均值,m; Δt 为顶板与室内空气之差, $^{\circ}\text{C}$ 。

对于辐射换热系数本文采用 ASHRAE 给出平均辐射温度的计算方法,即将辐射板之外的室内各个表面假想为一表面,辐射板和该假想表面之间的换热量和实际情况下的换热量相同,因此辐射顶板的辐射换热量可看作由两表面围成的封闭空间模型计算得到:

$$q_f = \sigma \cdot \epsilon \cdot (T_p^4 - \text{AUST}^4) \quad (25)$$

式中: σ 为蒂芬-玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_p 为供暖辐射板表面的温度,K。

将式(25)线性化为

$$q_f = \alpha_f \theta (t_p - t_a) = \alpha_f (t_p - t_a) \quad (26)$$

$$\theta = \frac{T_p^4 - \text{AUST}^4}{t_p - t_a} \quad (27)$$

即

$$\alpha_f = \varepsilon \frac{T_p^4 - AUST^4}{t_p - t_a} \quad (28)$$

联立(1)~(28),用 MATLAB 软件编程求解,在已知供水温度、建筑物结构内表面及室内空气温度等条件下求得混凝土顶板辐射供热换热量。

2 混凝土辐射顶板热工特性实验

2.1 实验搭建

实验对象为位于长沙的一间混凝土顶板辐射供暖热工实验室如图 2^[15]所示。该实验室主要为测试混凝土顶板热工性能而设计,可创造一个可控且不受外界干扰的实验环境。为模拟住宅混凝土顶板辐射供热环境该试验室分为上下两层,其中一层尺寸为(长×宽×高)1 560 mm×1 560 mm×1 510 mm,西外窗尺寸 720 mm×510 mm,仅供实验人员进出试验室,实验中小窗采用挤塑聚苯板密封。混凝土顶板构造层包括混凝土层及换热盘管如图 3 所示。为防止室外温湿度对实验室的干扰,顶板设置 20 mm 厚的挤塑苯板,墙体设置 200 mm 厚的低导热系数的加气混凝土砌块,地板底部设置 200 mm 厚的低导热系数的加气混凝土砌块,实验室各物性参数见表 1。为研究不同管间距对顶板辐射换热量的影响,实验室顶部采用 150/300 mm 两种间距换热盘管如图 4,换热盘管距混凝土顶板下表面距离 40 mm。

表 1 各材料物性参数

Table 1 Physical parameters for the materials

名称	导热系数 K/[W·(m ⁻² ·K ⁻¹)]	管径或厚度 D/mm	发射率
混凝土板	1.74	120	0.87
加气混凝土砌块	0.1	200	0.95
地面	0.03	270	0.93
PE-X 管	0.43	DN20	
挤塑聚苯板	0.03	20	

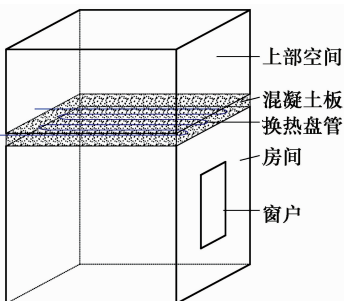


图 2 混凝土顶板辐射供暖试验室示意图

Fig 2 Concrete ceiling radiant heating test rig

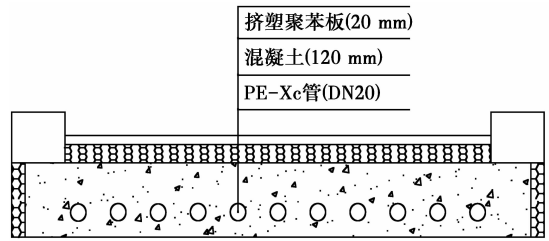


图 3 混凝土顶板结构图

Fig 3 The picture for concrete ceiling structure

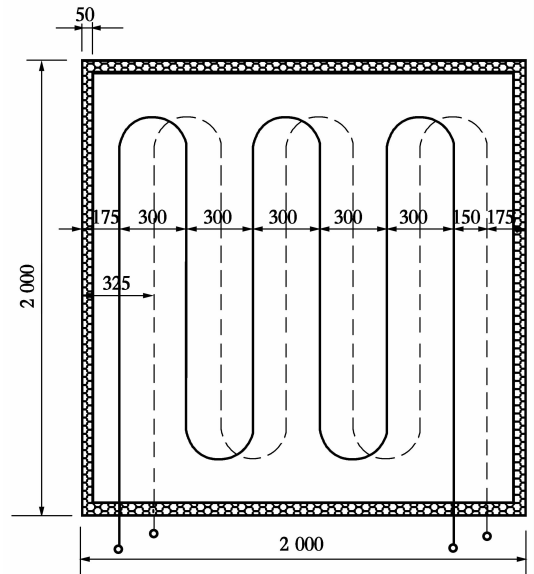


图 4 换热盘管分布图

Fig 4 Distribution for heat-transferring coil

2.2 测量参数及仪器

实验测试参数主要包括供回水温度、供水流量、室内空气温度和相对湿度、混凝土顶板温度、各个非供暖围护结构的温度、室外空气温度及顶板换热量等。实验每隔 30 s 采集一次数据,为减少实验误差,采取多点测量连续记录取平均值的方法。混凝土顶板和地板各布置 5 个点,墙体布置 3 个点,测点分布如图 5 和图 6 所示;在试验台中间距地面分别为 0.4、0.8、1.2、1.4 m 的位置处布置 4 个温度测量点,实验所用的测量仪器如表 2 所示。

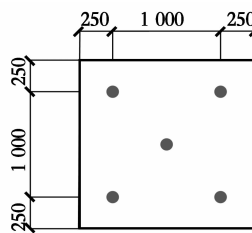


图 5 顶板和地板测点分布图

Fig 5 The measuring point distribution of ceiling and floor

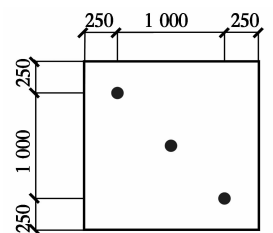


图 6 各围护结构测点分布图

Fig 6 The measuring point distribution of retaining structures

表 2 实验用仪器设备

Table 2 Instruments and equipment of the experiment

测量内容	仪器名称	型号	量程	精度/%
流量	超声波流量计	P204 便携式	0~280 m ³ ·h ⁻¹	±1
室外温度湿度	温湿度记录仪	Thermo Recorder TR-72Ui	10%~95%RH	±5
热流密度	热流密度计	SK-FHRL1810W	0~100 W·m ⁻²	±5
室内温度采集	温度传感器	W/PB-231	-200~500 °C	±3
室内温度采集	无纸记录仪	EN880 系列		

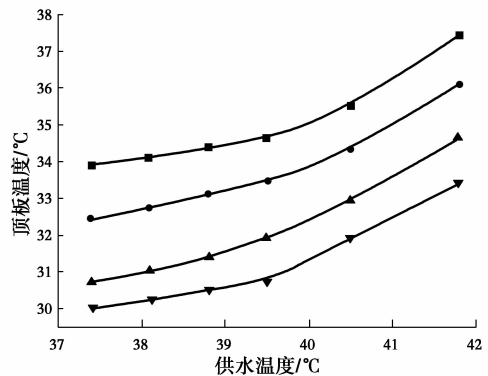
2.3 实验内容

该实验水系统采用定流量变温度控制方法,通过控制供回水温度来调节混凝土顶板表面温度。试验中,为避免流量变化对顶板供热量影响,热媒流量设定为 0.40 m³/h。改变供回水温度使辐射顶板温度在 30.4~37.5 °C 之间变化。稳态工况下每 30 s 记录一组数据,得到顶板辐射供暖工况下的热工参数,求出混凝土顶板辐射换热量,验证上述数学模型的正确性。

3 数学模型验证及实验分析

1)从表 3 和图 7 中可以看出,混凝土顶板温度传热模型的验证包括 2 个方面,针对模型中的未知量:顶板下表面平均温度和顶板单位面积供热量可测量得到。表 3 为 6 种供水温度工况下,2 种不同换热盘管间距实验测量值与数学模型计算值对比,从表中可以看出模型供热量的计算误差在 5.15% 之内,顶板温度的误差小于 5.01%,因此,计算模型基本与实验相吻合。由于实验过程中试验台并不是

完全与外界隔绝,且热媒沿换热盘管方向温度降低,因此,混凝土顶板辐射供热数学模型的供热量小于实验值,在相同工况下,150 mm 的换热盘管间距顶板温度比 300 mm 换热盘管间距大,随着供水温度增大,顶板温度呈指数增大。



注: ■—测量值(管间距150 mm) ●—计算值(管间距150 mm)
▲—测量值(管间距300 mm) ▼—计算值(管间距300 mm)

图 7 顶板温度测量值与计算值对比图

Fig 7 Measured values and calculated values comparison chart for the ceiling temperature

表 3 数学模型计算值与实验测量值的误差表

Table 3 The error for mathematic model calculation value and experiment value

供水温度/°C	序号 (150 mm)	顶板温度测量值与计算值误差/%	顶板供热量测量值与计算值误差/%	序号 (300 mm)	顶板温度测量值与计算值误差/%	顶板供热量测量值与计算值误差/%
37.4	1	5.01	4.99	1	1.32	4.66
38.1	2	4.1	5.15	2	2.58	3.76
38.8	3	3.78	4.35	3	4.39	3.68
39.5	4	3.47	4.03	4	3.76	3.86
40.5	5	3.38	3.98	5	3.04	3.77
41.8	6	3.48	3.81	6	3.47	4.31

注:150 mm 和 300 mm 均指换热盘管间距

2)从图 8 可看出,在供水温度相同的情况下,管间距越小,顶板换热量越大,顶板温度分布越均匀,

更容易达到室内的设计温度,增加房间舒适性。如果要求较大的管间距,可以通过提高供水温度温度

来满足房间温度要求,但是这样不仅增加供热系统的能耗,还由于顶板温度分布不均匀造成室内舒适性降低。

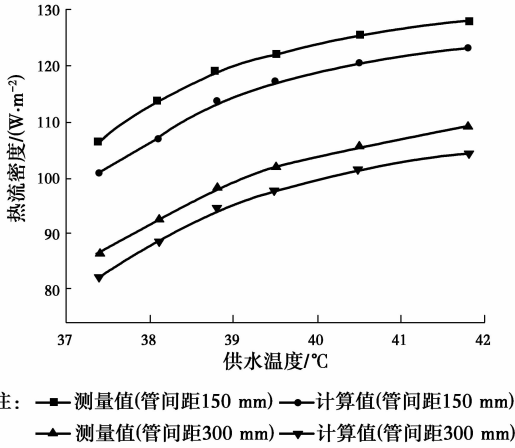


图 8 热流密度测量值与计算值对比

Fig 8 Measured values and calculated values comparison chart

3)从图 9 可看出,室内空气温度随着高度升高而升高,且随着高度增加温差变化率逐渐增大,供水温度在 37.5~41.5 °C 时 0.4 与 1.2 m 处室内空气温度差在 3 °C 左右。

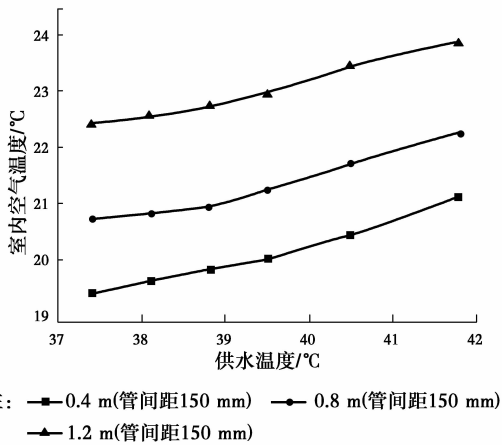


图 9 室内空气温度垂直分布

Fig 9 Vertical distribution of indoor air temperature for the heat flux density

4 实际工况分析

选取长沙某典型住宅楼,房间的结构参数为(长×宽×高)4.5×3.1×3 m,用平面肋片法对其采暖工况下辐射顶板换热量进行计算^[7]。计算结果表明:平面肋片法计算得换热量与测量值的误差为 7.66%。实验结论如下:1)地板表面和 2.5 m 处最大垂直温差为 1 °C,1.2 m 处空气的温度与地板附

近空气温度的垂直温差最大仅为 0.7 °C,远低于 ASHRAE 的规定,如图 11 所示。2)室内空气与室外空气相对湿度的变化曲线如图 12 所示,随着室外相对湿度的变化,室内相对湿度维持在 40%左右,室内相对湿度随温度变化较小,克服了传统散热器取暖时室内过于干燥造成的舒适性和健康的问题。

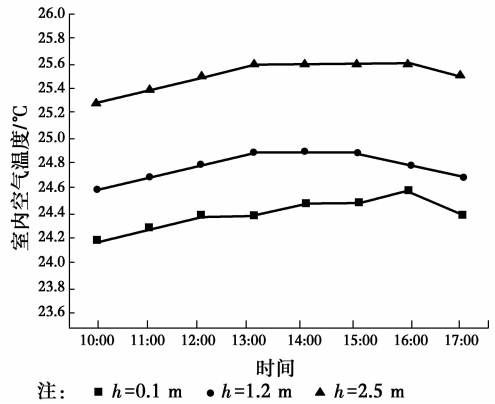


图 11 室内空气随高度变化图

Fig 11 Changes for indoor air temperature

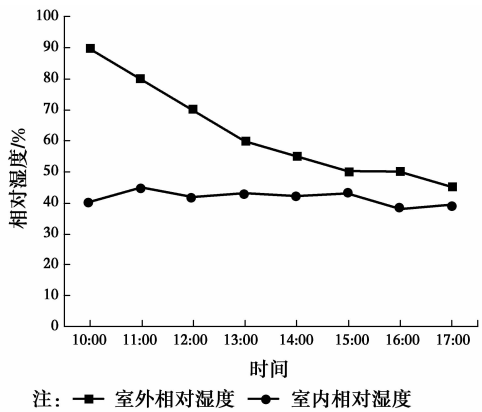


图 12 相对湿度变化

Fig 12 Changes for relative humidity

5 结 论

1)针对顶板辐射供暖换热量计算问题,建立简化平面肋片法模型,理想实验条件下模型计算值与实验测量值误差在 5.15%以内,实际工况实验下模型计算值与实验测量值误差在 7.66%左右,满足系统设计要求。

2)混凝土顶板辐射采暖在供水温度一定的条件下,随着盘管间距的增加,混凝土顶板表面温度和热流密度都会降低。

3)实验得知:供水温度在 37.5 °C~41.5 °C 时,0.4 m 与 1.2 m 处室内空气温度差在 3 °C 左右。

参考文献:

- [1] 王子介. 低温辐射供暖和辐射制冷[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
WANG Z J. Low-temperature radiant heating and radiant cooling [M]. Beijing: Mechanical Industry. (in Chinese)
- [2] REES S J, HAVES P. An experimental study of air flow and temperature distribution in a room with displacement ventilation and a chilled ceiling [J]. Building and Environment, 2013,59:358-368.
- [3] ANDRÉS-CHICOTE M, TEJERO-GONZÁLEZ A, VELASCO-GÓMEZ E, et al. Experimental study on the cooling capacity of a radiant cooled ceiling system[J]. Energy and Buildings, 2012,54:207-214.
- [4] 宣永梅, 王海亮, 黄翔. 地板辐射与置换通风空调系统运行参数[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(6): 115-119.
XUAN Y M, WANG H L, HUANG X. Operational parameters of hybrid radiation cooling floor and displacement ventilation air conditioning system [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012,34(6):115-119. (in Chinese)
- [5] 寿青云. 辐射供冷空调方式能耗与控制的研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
SHOU Q Y. The research for radiation cooling and air conditioning [D]. Shanghai: Tongji University, 2009. (in Chinese)
- [6] MIRIEL J, SERRES L, TROMBE A. Radiant ceiling panel heating-cooling systems: experimental and simulated study of the performance, thermal comfort and energy consumptions [J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(16):1861-1866.
- [7] 李严. 混凝土顶板辐射空调系统换热特性研究[D]. 长沙:湖南大学,2013.
LI Y. The research on heat transfer characteristics of concrete ceiling radiant air-conditioning system. [D]. Changsha University,2013. (in Chinese)
- [8] DAVIE M. On the basis of environmental procedures [J]. Building and Environment, 2001, 13(1):20-24.
- [9] MALONEY D. Development of irradiant heating systems model forblast[J]. Building and Environment, 1988,88(24):1795-1808.
- [10] 马玉奇,刘学来,李永安,等. 冷却顶板空调系统的分析计算[C]// 中国制冷学会 2007 学术年会论文,2007: 342-346.
MA Y Q, LIU X L, LI Y A, et al. The analysis and calculation of ceiling radiant panel air conditioning system [C]. Chinese Refrigeration Association, 2007: 342-346. (in Chinese)
- [11] SUI X E, ZHANG X. Effects of radiant terminal and air supply terminal devices on energy consumption of cooling load sharing rate in residential buildings[J]. Energy and Buildings, 2012, 49(10):499-508.
- [12] 刘艳峰. 地板供暖设计与运行基础理论研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学,2004.
LIU Y F. Study on Basic theory of designing and running control imbed pipe floor heating [D]. Xi'an University of Architecture and Technology, 2004. (in Chinese)
- [13] KILKIS B. Enhancement of heat pump performance using radiant floor heating systems [J]. ASM,1992,28: 119-129.
- [14] 章熙民,任泽霏,梅飞鸣,等. 传热学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007, 169-170.
ZHANG X M, REN Z P, MEI F M, et al. Heat transfer[M]. Beijing: Chinese Building Industry Press, 2007,169-170.
- [15] SU L, LI N P, ZHANG X H. Heat transfer and cooling characteristics of concrete ceiling radiant cooling panel [J]. Applied Thermal Engineering, 2015,32(9): 211-221.
- [16] 朱颖心,彦启森. 建筑环境学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009,104-105.
ZHU Y X, YAN Q S. Building environment [M]. Beijing: Chinese Building Industry Press, 2009, 104-105.

(编辑 胡玲)