碳晶电热板采暖系统测试模拟及温控调节

谭羽非[1]，国丽荣[1,2]，陈家新[1]，张海桥[1]

（1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院，150090 哈尔滨；2. 东北林业大学 土木工程学院，150040 哈尔滨）

摘 要：为了使新型碳晶板地热电采暖系统能在民用采暖领域更广泛地应用，更好地发挥其清洁、调控方便等优点，通过实验测试和模拟研究相结合的方法，测试和模拟分析了采用碳晶电热板系统的标准实验小室的动态加热过程；并利用经实验验证的模拟模型，对北京市某房间内碳晶电热板系统24 h温控调节过程进行数值模拟，提出了合理的温控控制因素和调节方案，确定了温控装置的温度限值以实现温控过程，为该电采暖系统的节能运行，提供了技术支撑.

关键词：碳晶电热板；电采暖系统；实验测试；非稳态模拟；温控调节

中图分类号：TU832.1 **文献标志码**：A **文章编号**：0367－6234(2012)06－0070－04

Testing and simulation of carbon-crystal electrothermal panel heating system and analysis of the temperature regulation

TAN Yu-fei[1], GUO Li-rong[1,2], CHEN Jia-xin[1], ZHANG Hai-qiao[1]

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;
2. School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, 150040 Harbin, China)

Abstract: Carbon-crystal panel (CCP), a new style floor electric heating system with characteristic of cleanliness and easily-regulation, is being applied more and more in civil heating field in our country. With the methodology combining experimental test and simulation research, the transient heating process of the standard experiment room installed with CCP system was analyzed in detail. The 24-hour temperature control process was simulated in some room in Beijing, and a reasonable scheme of temperature control was put forward, which provided a technical support for the energy-saving operation of this new kind electric heating system.

Key words: carbon-crystal panel; electric heating system; experimental testing; transient simulation; temperature control

近年来一种新型碳晶板地热电采暖系统，以其清洁、调控方便等特点，在我国电力充足、供暖期短、铺设集中、供热对环境破坏大的经济发达地区得到广泛应用[1]. 目前对碳晶板电采暖系统动态调节运行的研究在我国还属空白. 本文通过实验测试和模拟研究相结合的方法，测试和模拟了标准实验小室内碳晶电热板系统的动态加热过程，并针对北京市某房间碳晶电热板系统24 h温控调节过程进行了模拟，提出了合理的温控调节方案，为该电采暖系统的节能运行，提供了技术支撑与依据.

1 实验测试

标准温控闭式测试小室[2]的地面尺寸为(3.93 ± 0.2) m × (3.93 ± 0.2) m，高度(2.8 ± 0.2) m，围护结构是用送回风道组成的夹层构成，通过夹层的风冷系统可对小室的温湿度进行控制和调节. 碳晶电热板每块功率为110 W，实验小室内一共敷设16块，总标定功率为1 760 W. 每块碳晶板串联连接，在碳晶板上面放置水泥板，水泥板长为1.2 m，宽为2.44 m，厚度为8 mm. 实验小室情况和系统布置情况可见图1.

收稿日期：2011－09－19.
作者简介：谭羽非(1966—)，女，教授，博士生导师.
通信作者：谭羽非，tanyufei2002@163.com.

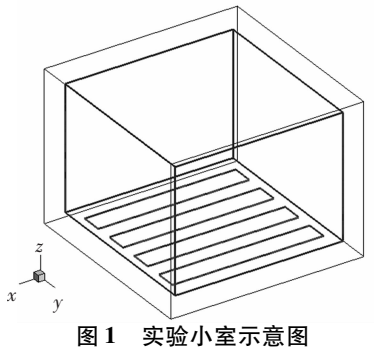


图 1　实验小室示意图

在小室中部标高分别为 0.008、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m 等 7 个位置布置温度测点[1]. 传感器采用铜 - 康铜热电偶，经过测量误差为 ±0.5 ℃的标准水银温度计标定，室内各温度测点连接至 BES-01 温度采集记录器.

2　数学模型及求解

2.1　模型建立

假设:1)地板表面向下认为近似绝热;2)小室内气体视为不可压气体，满足 Boussinesq 假设. 建立控制方程组如下[3].

连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho \vec{U}) = 0. \tag{1}$$

式中:ρ 为流体密度，kg/m^3; $\vec{U}$ 为速度矢量，m/s.

动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + X_i. \tag{2}$$

式中:p 为流体静压，Pa;τ_{ij} 为应力张量，$\tau_{ij} = \left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i}\delta_{ij}$，N/m^2;$\mu$ 为流体的动力学粘滞系数，N·s·m^{-2};X_i 为 i 分量的源项;δ_{ij} 为克罗内克符号，当 $i = j$ 时，$\delta_{ij} = 1$，$i \neq j$ 时，$\delta_{ij} = 0$.

不可压缩流体能量方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathrm{div}(\vec{U}T) = \mathrm{div}\left(\frac{\lambda}{\rho c_p}\mathrm{grad}T\right) + \frac{S_\mathrm{T}}{\rho}. \tag{3}$$

式中:λ 为流体的导热系数，W·m^2·K;S_T 为源项，本文将源项作为边界条件的形式输入.

k 湍流动能输运方程为

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \rho\varepsilon. \tag{4}$$

ε 湍流动能耗散率输运方程为

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k}\right] + \frac{c_i \varepsilon}{k} u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \tag{5}$$

式中:k 为湍流动能;ε 为湍流动能耗散率.

DTRM 模型辐射模型为

$$\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}s} + aI = \frac{a\sigma T^4}{\pi}. \tag{6}$$

式中:a 为气体辐射吸收系数;I 为辐射强度;s 为热源项;T 为当地气体温度，K;σ 为斯蒂文 - 波尔兹曼常数，$\sigma = 5.672 \times 10^{-8}$ W/(m^2·K^4). 在 DTRM 模型中，对式(6)从边界出发沿辐射形成积分.

2.2　边界初始条件

初始条件设置为均匀的 284 K 初始温度，地板向下背部设为绝热，其他 5 个面是夹层钢制墙板围护结构，取导热系数为 49.8 W/(m·K)，发射率为 0.7;地面水泥板导热系数为 0.756 W/(m·K)，发射率为 0.8. 碳晶电热板通电升温按实测温升数据拟合出式(7)的函数关系为

$$T = -0.008\,2t^4 + 0.207t^3 - 1.888\,2t^2 + 7.988\,9t + 297.828. \tag{7}$$

式中:t 为时间，s.

2.3　数学模型的离散求解

采用控制容积离散法对式(1)~(6)进行离散，压力和速度采用二阶非稳态隐式求解，压力亚松弛因子设置为 0.3，采用 Fluent Inc 公司的 Fluent 6.3.26软件进行了模拟计算[4].

3　实验与模拟结果的比较与分析

测试和模拟过程均以小室中点位置的气温为控制条件，当该点温度升至 18 ℃时计算停止.

不同标高处温度分布对比. 图 2 是室内升温达 18 ℃时，实验数据和模拟结果的对比验证，图中可见，实验数据和模拟结果均呈现出靠近地板和吊顶壁面位置气温高于中间空气的趋势. 其中，标高为 1.5 ~ 2.5 m，两者的绝对温度差值在 0.3 K以内，标高 1.5 m 以内两者绝对温度差值在 0.8 K以内.

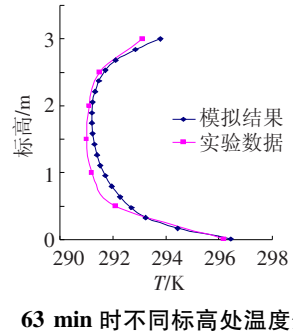


图 2　63 min 时不同标高处温度分布

中心点温度随时间变化的对比. 图 3 是中心点温升在 11 ~ 18 ℃随时间的变化曲线，图中可见

实验测试温升时间为 3 960 s(66 min),数值模拟 3 870 s(63 min),误差为 4.5%. 在 900 s 以前,实验测试和模拟结果都显示较快温升趋势,随后温升相对平缓,在整个加热阶段内,两者除在个别位置的温度绝对差值达 0.8 K,其他位置差值均在 0.5 K 以内,温升趋势吻合度很高.

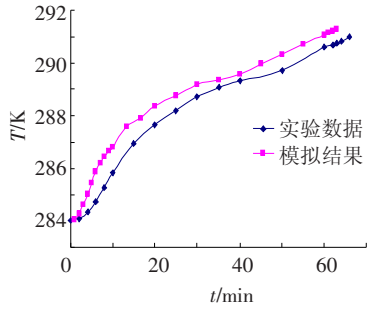


图 3 小室中心点处温度随时间变化

4 实际算例的实验模拟

取北京地区某建筑中间层 4 m × 4 m × 3 m 的房间,围护结构为一面外墙,在外墙上外窗距地平面 1.2 m,其他面围护结构均为内墙,不参与有效传热. 外围护结构参数见表 1. 室内地板均匀布置 16 块碳晶电热板,每块额定功率为 110 W. 碳晶电热板上面敷设 8 mm 水泥板.

为保证房间温度场在 18 ℃左右,最低不低于 16 ℃,本文以标高 1.5 m 处平面的面积平均温度 T_p 值为控制碳晶电热板启停的控制因素[6],即

$$T_p = \frac{\int_A T\mathrm{d}A}{A}. \tag{8}$$

式中:A 为面积,m^2.

表 1 外围护结构基本参数

围护结构	长度/m	宽度/m	厚度/mm	传热系数/(W·m^{-2}·K^{-1})	外表面换热系数/(W·m^{-2}·K^{-1})	内表面发射率
外墙	4	3.0	370	0.417	23	0.7
外窗	2	1.5	18	2.559	23	0.7

建立控制原则为

$$\begin{cases} T_p \leqslant 289\ \text{K}, \text{设备开启}; \\ T_p \geqslant 291\ \text{K}, \text{设备关闭}. \end{cases}$$

房间外墙和外窗设置第 3 类边界条件,地板、内墙和吊顶设置绝热条件,内表面发射率为 0.8;表面水泥板以及碳晶电热板的升温条件设置同第 1 节设置,碳晶板降温函数为

$$T = 0.127\ 2t^2 - 3.140\ 1t + 313.137. \tag{9}$$

式中:t 为时间,s.

外墙和外窗第 3 类边界条件的外部流体参数按照北京地区 11 月 15 日的实际室外气象参数[5],利用 Fluent UDF 模块编程,求解步长的设置为:升温初 10 min 内,步长取 6 s,降温初 13 min 内,步长为 6 s,其他阶段步长取为 30 s. 在 11 ~ 18 ℃,对 T_p 进行 0 - 1 启闭控制,一昼夜内温度升降见表 2. 房间内中心点温度和 T_p 变化情况可见图 4.

表 2 房间 T_p 升降情况(周期为 24 h)

耗时/min	T_p/K	
	升温阶段	降温阶段
1	72	103
2	61	76
3	55	83
4	56	93
5	55	109
6	49	113
7	50	103
8	50	92
9	56	93
10	53	18

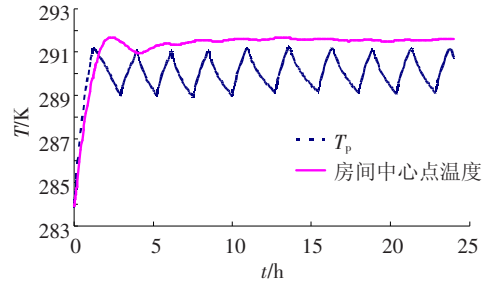


图 4 房间温度变化曲线

在整个模拟时间内,室内(除外窗附近区域)温度均维持在 18 ℃以上,满足冬季室内采暖温度,而且工作区内温度梯度不大. 由此可知,采用控制 T_p 的 0 - 1 启停动态调节是满足工作区内温度场要求的.

对于实时温控调节房间,房间内温度场分布很大程度地受到温控器位置和设置的影响[6]. 模拟计算结果证实了碳晶板调节以 T_p 为控制因素,整个工作区内绝大部分区域的温度不低于291 K,但是在实际运行调节时温控器无法获得高度 1.5 m处的面积平均温度. 因此需要在房间内合适位置布置温控器,并设定温控器上下限以保证采用温控器进行调节的过程与控制 T_p 运行工况相仿,从而达到合理的温度场,图 5 为模拟时间为 35 940 s时,在 $x = 0$、$y = 15$ m 处形成的平面温度场. 对于温控器位置的选择须保证:1)依墙壁安装,安装位置方便人员控制;2)该位置的温度波动情况在波动时间相位上能够反应 T_p 的波动情况,尽量避免较大的时间滞后从而产生控制偏差,

影响室内温度场[7].

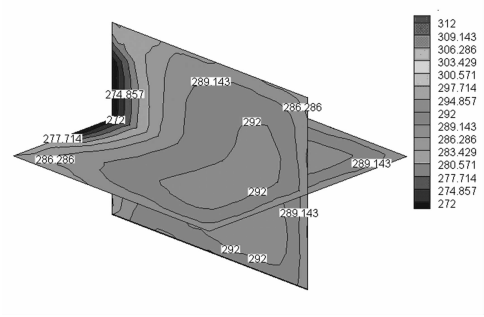


图 5　典型时刻 $x=0$ 和 $z=1.5$ m 平面温度场

通过对室内墙壁多处位置进行筛选，最终在外墙和一面内墙上一共选中了 6 个满足要求的温控点位置. 图 6 中展现了这 6 个位置以及 T_p 在前两个启停周期内的温度波动情况. 这 6 个测点的坐标位置分别为：a_1(2，－1.5,1.5)、a_2(2，－0.5,1.5)、a_3(2,1.3,1.5)、b_1(0,2,0.5)、b_2(0，2,0.25)、b_3(0,2,0.75). 根据模拟结果，这 6 个位置布置温控器的温度限值见表 3.

表 3　各位置温控装置的上下限

测点	T/ K	
	上限	下限
a_1	297.70	287.59
a_2	295.65	287.19
a_3	293.11	285.76
b_1	295.43	283.65
b_2	294.05	283.43
b_3	291.72	282.75

图 6 为前两个启停周期内 6 个位置的温度波动情况，可以看出，这 6 个位置温度波动与 T_p 的波动在时间上的滞后很小，因此如果根据不同位置分别设置各自的温度上下限来调节碳晶板设备的启停，则运行工况将十分接近由 T_p 控制碳晶板启停的运行工况.

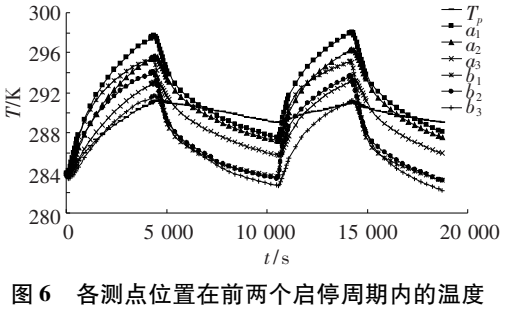


图 6　各测点位置在前两个启停周期内的温度

5　结　论

1）对碳晶板地热电采暖系统进行了实测和模拟研究，结果表明两者数据吻合度很高，证实了模拟结果的可信性，以及标准 $k-\varepsilon$ 方程湍流模型及 DTRM 辐射模型应用于碳晶电热板动态热工过程的适用性.

2）模拟预测了北京市冬季某房间采用碳晶电热板系统进行 24 h 采暖的非稳态过程. 通过分析和研究，确定了以高度为 1.5 m 平面的面积平均温度 T_p 为控制因素，对碳晶电热板进行 0－1 启停控制可以保证房间工作区内的温度场满足采暖需求，室内温度均保证在 291 K 以上.

3）通过选定 6 个不同温控位置，安装温控器并设置上下限进行调节，则运行工况能实现与控制 T_p 工况相同效果.

参考文献：

[1] 付玉. 碳晶电热板用于室内局部辐射采暖的研究[J]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2010：5－10.

[2] 谭羽非，赵登科. 碳纤维电热板地板辐射供暖系统热工性能测试[J]. 煤气与热力，2008，28(5)：26－28.

[3] 李廷贤，刘艳华，董淑萍，等. 电加热辐射地板传热特性的实验研究[J]. 建筑热能通风空调，2006，25(3)：8－11.

[4] 韩占忠，王敬，兰小平. FIUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京：北京理工大学出版社，2004.

[5] 中国气象局气象信息中心气象资料室. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2004.

[6] HASAN A，KURNITSKI J，JOKIRANTA K. A combined low temperature water heating system consisting of radiators and floor heating [J]. Energy and Buildings，2009，41(5)：470－479.

[7] BOJIĆ M，DJORDJEVIĆ S，MALESEVIĆ J，*et al*. A simulation appraisal of a switch of district to electric heating due to increased heat efficiency in an office building[J]. Energy and Buildings，2012，50：324－330.

（编辑　魏希柱）