

预制轻薄相变供暖地板热工性能的研究

闫全英 刘 莎*

(北京建筑大学环境与能源工程学院,北京市供热供燃气通风及空调工程重点实验室,北京 100044)

摘 要 将定形相变材料加入到预制定位板中制备了一种预制轻薄相变供暖地板,考察了不同供回水温度下相变地板的热工性能,同时利用 ANSYS 软件对其进行数值模拟,得出地板表面温度、热流密度随不同供回水温度的变化规律及拟合关系式,对比分析实验值和模拟值,计算得出误差率及平均修正系数;对该相变供暖地板进行间歇供暖的数值模拟,考察在不同间歇时间下地板表面平均温度和平均热流的变化情况,为相变辐射采暖在实际工程中的应用提供参考。

关键词 相变供暖地板,地板表面温度,热流密度,数值模拟

Study on thermal performance of prefabricated thin phase change heating floor

Yan Quanying Liu Sha

(Beijing Municipality Key Laboratory of Heating, Gas Supply, Ventilating and Air Conditioning Engineering, Beijing University of Engineering and Architecture, Beijing 100044)

Abstract A kind of prefabricated thin phase change heating floor was prepared by adding the shape-stabilized phase change material (PCM) into the prefabricated positioning plate, its thermal performance at different average temperature of supply and return water was tested. The numerical simulation was carried out by ANSYS software. The variation law and fitting relationship of surface temperature and heat flux with different average temperature of supply and return water were obtained. By comparing the experimental and simulated values, the error rate and the average correction factor were calculated. The average temperature and the average heat flux of floor surface under different intermittent time were obtained by simulating the phase change heating floor for intermittent heating. The results can provide reference for the application of phase change radiation heating in practical engineering.

Key words phase change heating floor, floor surface temperature, heat flux density, numerical simulation

建筑节能已成为当前研究的热点问题,采用相变材料(PCM)与建筑围护结构结合,在节能的同时还可提高室内热舒适性,已有众多国内外研究人员致力于将 PCM 添加到建筑围护结构中,并采用数值模拟和实验测试相结合的方法对其传热过程进行对比研究。

Cerón 等^[1]选取相变温度为 20℃ 的石蜡链烷烃作为 PCM,制得相变复合地板,并对相变复合地板进行了实验测试和数值模拟;Royon 等^[2]将装有 PCM 的圆柱形空腔安装在地面和天花板上,在相同的边界条件下用数值模拟和实验方法对装入圆柱形空腔中的 PCM 比例进行了研究;Karim 等^[3]将含有 85% 石蜡的复合相变材料添加到空心混凝土地

板中,并通过实验和模拟对比研究了 PCM 的最佳含量;Delgado 等^[4]建立了一个基于有限差分格式的 PCM 地板辐射模型,并对地板辐射板中的二维传热进行了模拟;闫全英等^[5]建立了相变房间和普通房间模型,用 ANSYS 数值模拟了在典型气象年房间内壁温度和热流的变化情况;冯国会等^[6]选用化学性质稳定的癸酸为 PCM,建立了相变地板的二维传热模型,应用 ANSYS 有限元软件对相变地板的蓄放热过程进行数值模拟;杨华等^[7]用 Fluent 软件对相变地板蓄热房间的空气温度分布情况进行模拟计算;李建等^[8]用 Matlab 软件对电加热相变地板供暖模型进行了模拟计算,通过实验对模拟结果进行了对比。雷栋等^[9]通过工程实测试验验证了相变蓄

基金项目:北京市自然科学基金(3122012);北京市教委科技创新能力提升计划项目(PXM2016-014210-000016)

作者简介:闫全英(1970-),女,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事相变材料储能的研究。

联系人:刘莎。

热式太阳能地板辐射采暖的应用可行性;朱婷婷等^[10]采用 Fluent 软件对装有 PCM 的低温辐射供暖二维方腔模型进行了数值模拟,并研究了 PCM 导热系数和相变温度对方腔内温度分布的影响。

本研究建立了一种新型预制轻薄相变地板辐射供暖系统,分别通过实验和数值模拟方法对该系统在不同供回水温度下的传热过程进行了对比研究分析,得出地板表面温度和热流随供回水温度的变化规律,并以实验值修正模拟值得平均修正系数,同时研究了该相变地板在间歇供暖期间的热工性能,研究结果可为相变地板的使用提供参考和依据。

1 预制轻薄相变供暖地板的实验研究

1.1 实验系统及实验条件

实验房间位于北京建筑大学实验二号楼 306 地板辐射采暖实验室,朝北,房间尺寸为 6m×2.8m×2.6m(长×宽×高),房间结构为普通的钢筋混凝土结构。与房间紧临的楼上、楼下和东侧房间均为装有普通散热器采暖的实验室,西侧是卫生间。房间内东、西墙均为内墙,北墙上有一面尺寸为 1.74m×1.62m 的单层钢窗,与外界环境直接接触,南墙为单层玻璃门,将实验房间与操作间隔开。实验室按面积等分为南北两个区域,北边靠窗户区域敷设普通预制轻薄地板,另一边敷设加入 PCM 的预制轻薄地板。

本实验系统的工作流程为:电加热棒加热蒸馏水使其温度升高,热水在增压泵的作用下通过 Y 型过滤器和分水器,蒸馏水在分水器的作用下进入地板环路,在地面散热后进入集水器,再流经 Y 型过滤器返回开式水箱,如此不停循环往复。具体流程见图 1。

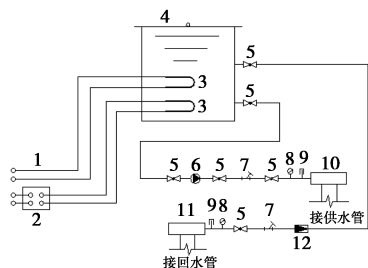


图 1 实验系统原理图

(1:电源;2:变压器;3:电加热棒;4:开式水箱;5:球阀;
6:增压泵;7:Y 型过滤器;8:压力表;9:铂电阻热电偶;
10:分水器;11:集水器;12:电磁流量计)

之前对普通地板和相变地板进行对比分析的研究成果已展现出相变地板具有普通地板无法比拟的

优越性,在此基础上,本实验测试条件为:供回水平均温度分别为 35、40、45、50 和 55℃,供回水温差为 5℃,分别在 5 种工况下进行加热 3h—稳定供热 8h—停止供热 8h 的实验测试,假定相变地板模型的初始温度为 20℃,对以上 5 种工况进行数值模拟,并与实测结果进行对比分析。加热水管采用“双回字形”铺设方式,管间距为 150mm,直径为 14mm。

1.2 预制轻薄相变供暖地板的构造

根据本课题组之前的研究成果,将 PCM(48# 固体石蜡-液体石蜡)与高密度聚乙烯按 7:3 的质量比在钢制容器中进行混合,将其置于温度为 140℃ 的电炉中进行加热,加热时间设定为 40min,加热完成后取出用玻璃棒不断搅拌,待容器中的混合物中无明显液体流动时,再将钢制容器放入电炉中加热,搅拌,反复多次,直至定形相变材料混合均匀,最后将混合均匀的定形相变材料倒入预先做好的定位板通道中,自然冷却、凝固后,含有定形相变材料的定位板即制备完成。地板层具体构造见图 2。

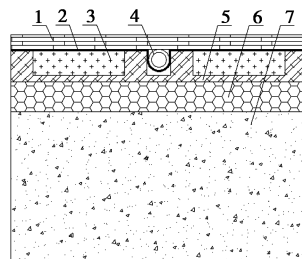


图 2 预制轻薄相变地板构造示意图

[1:木地板层(10mm);2:导热铝板(0.5mm);3:定形相变材料层(16.5mm);4:耐热聚乙烯(PE-RT)加热管(14/10mm);5:定位板(21/4.5mm);6:聚苯乙烯泡沫塑料板(20mm);7:楼板(110mm)]

1.3 仪器与设备

本实验在测试工程中所使用的仪器与设备见表 1。

表 1 仪器与设备

序号	名称	型号	精度及量程	作用
1	循环水泵	15WBX0.6-10	0.6m ³ /h	提供循环动力
2	变压器	TDGC2-2	0.1V	调节供回水温度
3	电磁流量计	7ME5038-2AA12-1AA0	0.0001m ³ /h	测试系统水流量
4	铂电阻温度传感器	PT100	0.1℃	测试供回水温度
5	红外热像仪	TH9100	0~250℃	找准地板表面管顶、管间位置
6	Agilent 数据采集仪	34970A	-100~400℃	记录测点温度
7	断水自控蒸馏水器	DZ-20	0.02m ³ /h	制作蒸馏水
8	压力表	MC03820348	0.001MPa	测试系统压力
9	多点热流计	HFM-215	10~3000W/m ²	测试地板表面热流密度

1.4 实验测点布置

本实验系统分别将相变地板和普通地板均分成 4 个区域,每个区域内选取管顶和管间布置温度测点。其中,墙体、窗户围护结构上测点的布置选取围护结构的面对角线;室内空气测点布置在房间中部,距地面分别为 0.15、0.45、0.75、1.05、1.35、1.65、2.00 和 2.60m(屋顶)处;多点热流计共有 5 个测点,分布布置在测试地板的东、西、南、北和中 5 个位置;楼下房间的测点在普通地板下方和相变地板下方的屋顶各布置一个,楼室内温度测点选取在距离地面 0.75m 处;在分水器的上游和集水器的下游各布置一个压力测点和一个温度测点。具体的室内测点布置见图 3。

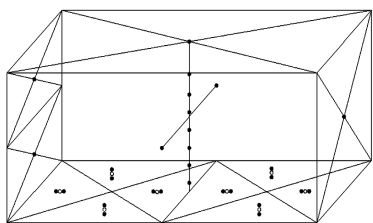


图 3 房间模型中测点分布情况图

2 预制轻薄相变地板的数值模拟

建立预制轻薄相变地板供暖系统的数学模型,利用 ANSYS 软件对各个时段不同工况下的蓄、放热情况进行数值模拟,研究地板表面温度、热流密度的变化规律,并将模拟值与实验值进行对比。模拟过程为便于计算,特做如下假设:(1)各层材料均各向同性,其物性参数均为常数;(2)楼板下表面绝热;(3)忽略各层材料间接触热阻及沿管长方向的温度降;(4)定形相变材料的相变温度恒定;(5)忽略空气夹角内的辐射换热,视为纯导热过程。数学模型见图 4。

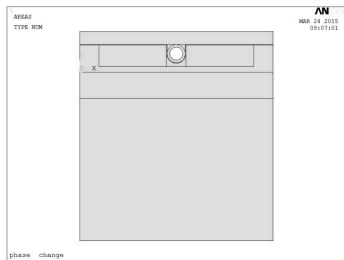


图 4 数学模型示意图

边界条件分别为地板上表面、相变地板模型两侧边界绝热和水管内壁,这三者都为第一类边界条件。

其中地板上表面可用式(1)表示:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \bigg|_{d_j} = \alpha_1 (t_{d_j} - t_n) \quad (1)$$

式中, λ 为导热系数, $W/(m \cdot K)$; T 为温度, $^{\circ}C$; n 为阶数; $\frac{\partial T}{\partial n}$ 为 T 的 n 阶导数; α_1 为地板上表面等效对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; t_{d_j} 为地板表面平均温度, $^{\circ}C$; t_n 为室内空气平均温度, $^{\circ}C$, 取实验工况稳定阶段的平均值。

其中, α_1 可用式(2)表示:

$$\alpha_1 = \frac{q_c + q_r}{t_{p_j} - t_n} = \frac{2.13 \times (t_{p_j} - t_n)^{1.31} + 4.98 \times 10^{-8} (T_{p_j}^4 - T_{f_j}^4)}{t_{p_j} - t_n} \quad (2)$$

式中, q_c 为对流换热的热流密度, $J/(m^2 \cdot s)$; q_r 为辐射换热热流密度, $J/(m^2 \cdot s)$; t_{p_j} 为加热表面平均温度, $^{\circ}C$; T_{p_j} 为加热表面开式温度, $T_{p_j} = t_{p_j} + 273$, K ; T_{f_j} 为加热表面加权平均开式温度, $T_{f_j} = t_{f_j} + 273$, K 。

相变地板模型两侧边界绝热用式(3)表示:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \bigg|_{x=0, x=0.15} = 0 \quad (3)$$

水管内壁为第一类边界条件用式(4)表示:

$$T_{nb} = T_{sh}(\tau) \quad (4)$$

式中, T_{nb} 为水管内壁温度, $^{\circ}C$; T_{sh} 为给定温度, $^{\circ}C$ 。

实验中供回水平均温度取水管内壁温度。

3 实验结果与模拟结果对比分析

在本实验测试条件下利用 ANSYS 分别模拟温差为 $5^{\circ}C$ 的 5 种工况下在这 19h 中相变地板的蓄、放热情况,并与实测值进行对比分析。实验结果与模拟结果见图 5。

由图可知,无论供回水平均温度为多少,地板表面温度与表面热流的实验值与模拟值随时间的变化趋势相同,对于地板表面温度,实验值与模拟值的误差率在 12.5% 之内,表面热流的误差率除个别点外均在 15% 以内。在加热阶段,实测的地板表面温度和地板表面热流与模拟结果的吻合程度较高;在稳定阶段,热流模拟值比实验值偏大且都呈上升趋势,体现了定形相变材料的蓄热性,热流模拟值和实验值的差值随供回水平均温度的升高而增大,模拟的地板表面温度值与实验值接近。在冷却阶段,模拟的热流值下降很快,最终低于实验值,模拟的地板表面温度值与实验值接近。

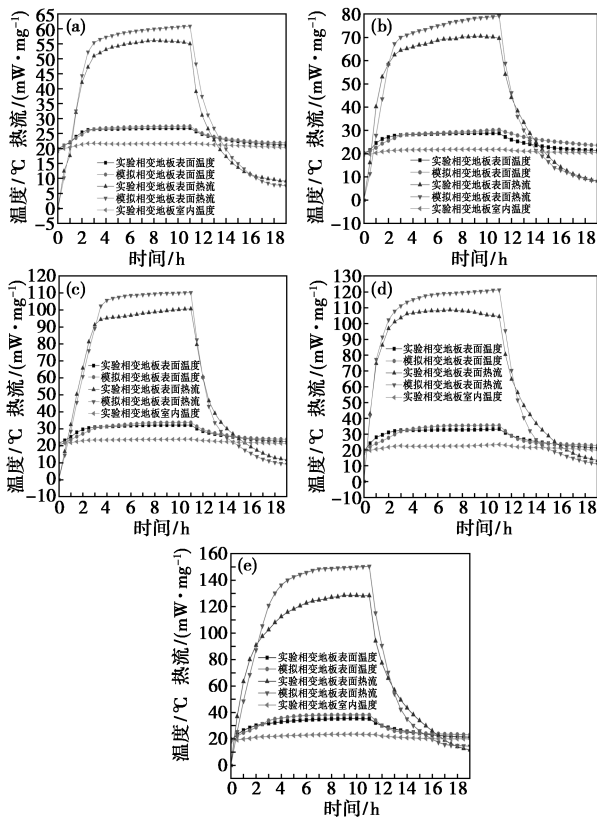


图 5 不同温度下相变地板表面温度与热流的分布情况图

[(a) 35℃; (b) 40℃; (c) 45℃; (d) 50℃; (e) 50℃]

将实验与模拟中稳定阶段的数据取平均值, 研究相变地板表面平均温度、热流密度随供回水平均温度的变化规律, 并将相变地板表面温度、热流密度

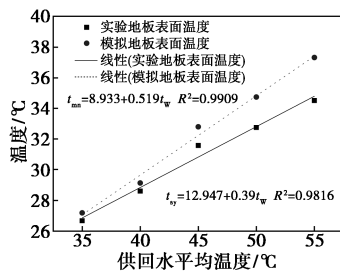


图 6 不同供回水温度下相变地板表面温度实验及模拟结果对比图

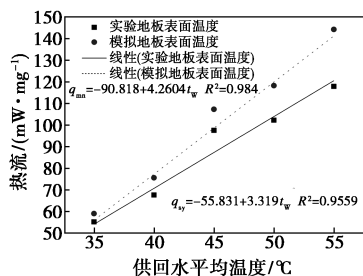


图 7 不同供回水温度下相变地板表面热流实验及模拟结果对比图

与供回水平均温度进行拟合, 其拟合关系式分别见图 6 和图 7。

由图可知, 相变地板表面温度和热流随供回水平均温度的增大而增大, 其变化规律近似线性, 可用线性公式进行拟合。以实验值为准, 对模拟值进行修正, 可得到地板表面平均温度、地板表面向上热流在不同工况下的平均修正系数, 预制轻薄相变供暖系统模拟值大部分要大于实验值, 因此修正系数小于 1, 计算得到地板表面平均温度的修正系数为 0.954, 地板表面向上热流的修正系数为 0.863。

4 间歇供暖的数值模拟

为了更好地研究相变地板的蓄、放热性能, 对预制轻薄相变供暖地板做了间歇供暖的数值模拟。模拟相变地板在间歇供暖时间为 1、2 和 3h 的情况下, 连续供暖 12h, 考察地板表面温度和热流的变化情况。模拟条件假设: (1) 模型初始温度为 20℃, 水管中通以 40℃ 的热水; (2) 室内空气温度为 20℃, 地板表面对流换热系数 $h = 9.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; (3) 在停止加热, 冷却 1h 后, 水管温度降到 20℃; (4) 当重新加热时, 水管温度能立刻达到 40℃。各工况下室内平均温度和平均热流随时间间隔的变化情况见图 8。

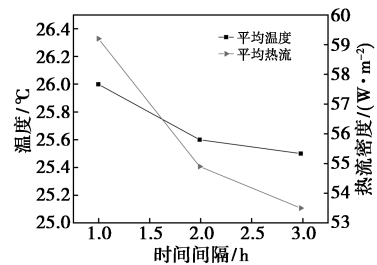


图 8 各工况下室内平均温度和平均热流随时间间隔的变化情况图

由图可知, 随着供暖时间间隔的增长, 地板表面平均温度和平均热流都越来越小, 平均温度和平均热流的变化率也越来越小, 说明停止供暖后, 相变材料开始向室内放热。

5 结论

(1) 通过对不同工况下相变地板的实验测试和数值模拟的逐时对比分析, 表明实验值和模拟值吻合较好, 相变地板表面温度误差率均小于 12.5%, 热流误差率均在 15% 以内。并把模拟数值与实验数值拟合成曲线, 发现模拟值比较偏大, 计算得温度和热流在不同工况下的平均修正系数分别为 0.954、0.863。

(2)对相变地板进行了间歇供暖分别为 1、2 和 3h 的模拟,得到了间歇时间越短,地板表面平均温度和平均热流越大的结论。且在停止供暖后,随着间歇时间增长,温度和热流变化率减小,体现了相变材料蓄热性能。

(3)由于实验值测试工况有限,而利用 ANSYS 软件可以模拟任意工况下的系统传热性能,从而为实际工程设计提供数据支持。

参考文献

- [1] Cerón I, Neila J, Khayet M. Eeperimental tile with phase change materials (PCM) for building use[J]. Energy and Building, 2011, 43(8): 1869-1874.
- [2] Royon L, Karim L, Bontemps A. Optimization of PCM embedded in a floor panel developed for thermal management of the lightweight envelope of buildings[J]. Energy and Buildings, 2014, 82(9): 385-390.
- [3] Royon L, Karim L, Bontemps A. Thermal energy storage and release of a new component with PCM for integration in floors for thermal management of buildings[J]. Energy and Buildings, 2013, 63(10): 29-35.
- [4] Mazo J, Delgado M, Marin J M, et al. Modeling a radiant floor system with phase change material (PCM) integrated into a building simulation tool: analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump[J]. Energy and Buildings, 2012, 47(5): 458-466.
- [5] 闫全英,王小,岳立航.被动式相变房间传热性能的数值模拟[J].新型建筑材料, 2015, 42(4): 22-25.
- [6] 冯国会,崔洁,黄凯良,等.相变储能地板采暖系统蓄放热性能模拟[J].沈阳建筑大学学报, 2012, 28(3): 529-532.
- [7] 杨华,张康,闫运忠,等.相变蓄热地板采暖房间室内空气温度场模拟与分析[J].河北工业大学学报, 2009, 38(2): 96.
- [8] 李建,何嘉鹏,徐明立.相变储能石膏板应用于地板供暖系统的节能效果及热舒适性分析[J].建筑科学, 2012, 28(4): 92-94.
- [9] 雷栋,蒋小芬.相变蓄热式太阳能地板辐射采暖应用探讨[J].建筑热能通风空调, 2016, 35(10): 77-79.
- [10] 朱婷婷,赵明,陈昊,等.相变储能地板辐射供暖系统蓄热性能数值模拟[J].暖通空调, 2015, 45(9): 70-75.

收稿日期: 2017-03-06

(上接第 239 页)

- [6] 聂建华,陈志国,郑大锋,等.3D 打印用羟基丙烯酸共聚树脂柔韧性粉末材料的制备[J].合成树脂及塑料, 2014, 31(4): 21-24.
- [7] Benjamin M Wu, Qrel Michael J Cima. Effects of solvent-particle interaction kinetics on microstructure formation during three-dimensional printing[J]. Polymer Engineering and Science, 1999, 39(2): 249-260.
- [8] 聂建华,陈泽成,林跃华.真空镀铝薄膜清漆用水溶性丙烯酸树脂的研制[J].电镀与涂饰, 2012, 31(11): 58-61.
- [9] 聂建华,林跃华,陈泽成.真空镀铝薄膜防护用聚丙烯酸酯树脂微乳液的研制[J].电镀与涂饰, 2013, 32(4): 64-68.
- [10] 刘继涛,皮丕辉,文秀芳,等.水性发用聚丙烯酸定型树脂的合成及性能[J].日用化学工业, 2009, 39(5): 328-331.
- [11] 聂建华,周志盛,霍泽荣,等.弹性产品用聚酰胺树脂打印通用型粉末材料及黏结溶液的研究[J].塑料工业, 2014, 42(1): 122-125.
- [12] Jintamai Suwanprateeb. Improvement in mechanical properties of three-dimensional printing parts made from natural polymers reinforced by acrylate resin f or biomedical applications: a double infiltration approach [J]. Polymer International, 2006, 55(1): 57-62.
- [13] Patirupanusara P, Suwanpreuk W, Rubkumintara T, et al. Effect of binder content on the material properties of polymethyl methacrylate fabricated by three dimensional printing technique[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 207(1/2/3): 40-45.

收稿日期: 2017-03-15

修稿日期: 2018-04-05

美国突破锂电池电解质界面成分提高电池寿命预测能力

根据美国能源部阿贡国家实验室在《Nature Catalysis》研究指出,研究团队已突破性地得出电极与液态电解质之间的固体电解质界面化学成分。

长久以来科学家都致力于破解锂离子电池 SEI,但只知道电池充电时形成会形成 SEI,在石墨电极上产生千分之毫米厚的薄膜,而该薄膜可保护界面发生有害反应,同时让锂离子在电极跟电解质之间穿梭,因此对于锂离子电池来说,性能良好的 SEI 为必要条件。Strmcnik 指出,电池效率与寿命取决于 SEI 品质,假如科学家可以

找出其化学性质与独立成分规则,即可借由 SEI 提升电池效率。

实验和计算结果指出,电池充电过程中会产生氟化氢电化学反应,从电解质转变成固态氟化锂并生成氢气,这类反应高度依赖石墨、石墨烯和金属等电极材料,证明电池催化剂的重要性。

该团队也同时研发新型检测氟化氢浓度方式,由于氟化氢是由湿气与锂盐(LiPF₆)形成的有害物质,该检测方法在 SEI 未来科学研究居关键地位。(新型)