

相变材料复合混凝土辐射楼板的非稳态传热特性研究

张亮月, 施志钢*, 张璐瑶, 王琪琪

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525)

摘要: 为提高混凝土楼板的蓄热性能, 控制室内温度的波动, 实现节能, 在埋构式楼板辐射供暖系统的基础上, 在楼板内部添加方形、圆柱形 2 种定形态的相变材料, 建立相变-混凝土供热末端的三维非稳态模型并进行数值求解, 通过实验进行验证, 深入分析间歇运行工况下混凝土及不同结构相变材料的蓄热和放热变化。结果表明, 与普通混凝土楼板相比, 间歇运行工况下, 添加相变材料的楼板在室内温度、峰值温度、维持室内处于舒适温度能力等方面有明显的提升, 而且添加方形相变材料的性能要优于添加圆柱形相变材料的性能。

关键词: 相变材料复合混凝土楼板; 非稳态数值模拟; 相变材料; 相变储能

中图分类号: TU831

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2025)03-0087-09

Study on the unsteady state heat transfer characteristics of phase change material composite concrete radiant floors

ZHANG Liangyue, SHI Zhigang*, ZHANG Luyao, WANG Qiqi

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: In order to improve the thermal storage performance of concrete floors, control indoor temperature fluctuations and achieve energy conservation, this study takes embedded floor radiation heating system as the research basis and adds two fixed forms of phase change materials, i. e., square and cylindrical, to the interior of the floor. A three-dimensional unsteady state model of the phase change-concrete heating terminal is established and numerically solved, and is verified through experiments. The heat storage and release changes of the concrete and the phase change materials with different structures are thoroughly analyzed during intermittent operation. The results show that compared with ordinary concrete floors, the floor added with phase change materials have significant improvements in indoor temperature, peak temperature and the ability to maintain comfortable indoor temperature during intermittent operation, and the performance of the floor added with square phase change materials is better than that added with cylindrical phase change materials.

Key words: phase change material composite concrete floor; unsteady state numerical simulation; phase change material; phase change energy storage

辐射供暖具有节能、环保、噪声低、热舒适性高等优点而得到广泛应用, 由于混凝土结构的蓄热性能,

收稿日期: 2023-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(52078257)

作者简介: 张亮月(1997—), 女, 山东青岛人。硕士, 研究方向为建筑节能。E-mail: viczhang01@163.com。

* 通信作者: 施志钢(1975—), 男, 山东青岛人。博士, 副教授, 主要从事可再生能源方面的研究。E-mail: shi_zhi_gang@163.com。

通过加装相变材料提高建筑结构的蓄热能力,实现结构储能一体化,具有广阔的应用前景。相变材料(Phase Change Material,PCM)在一定温度下具有释放相变潜热的能力,并且具备潜热值高、相变过程中温度稳定的特性,将PCM复合混凝土并结合峰谷电价进行间歇供暖,达到节能效果,已成为当下的研究热点。赵倩等^[1]提出一种高低温相变材料双层垂直布置的冬夏一体化辐射地板系统,并通过实验对其热响应进行了分析。周大设等^[2]将相变微胶囊悬浮液应用于地板辐射系统中并建立了三维稳态传热模型。闫全英等^[3]制备了添加相变材料的预制轻薄干式供暖地板,以提高储热功能。张春枝等^[4]提出了减少相变材料填充量的半层式的结构形式并进行了模拟分析。王鸿瑀等^[5]构建了新型对流-辐射式相变电供暖地板,研究了其室内温度调节效果和风电消纳效果。OUALI等^[6]研究了微囊化PCM砂浆中PCM的相变过程。HICHEM等^[7]通过实验与数值模拟研究了PCM填充普通砖改善建筑热导率,结果显示利用相变材料的特性能达到节能的目的。NEPOMUCENO等^[8]对掺入轻集料的相变材料水泥砂浆进行了实验评价,发现热响应随相变材料增加到一定限度,然后减小。

本文提出一种将不同形状的定形态相变材料^[9-12]埋构于混凝土楼板中的定形态相变材料-混凝土辐射楼板(以下简称PCM-混凝土楼板),既可以提高楼板的蓄热性能,又保留了埋构式楼板的优势,但混凝土楼板及内部的相变材料的蓄热、放热特性尚缺乏深入的理论研究。本文基于PCM-混凝土楼板设置了供暖系统,建立传热模型,通过实验研究和数值求解分析不同结构的PCM-混凝土楼板在不同工况下的传热特性^[13-14],为相变材料复合混凝土楼板供热系统在间歇工况下运行提供重要的设计依据。

1 实验研究

1.1 系统构成

如图1所示,实验系统主要由热源、循环系统、采暖末端和测试系统组成^[15]。热源采用制热量为7.5 kW、能效比为3.0的空气源热泵,产生的热水流经辅助加热功率为3.0 kW的电加热保温水箱,用于精确控温、缓冲,3种楼板模块并联连接。PCM-混凝土楼板浇筑模块如图2所示,参数取值见表1。

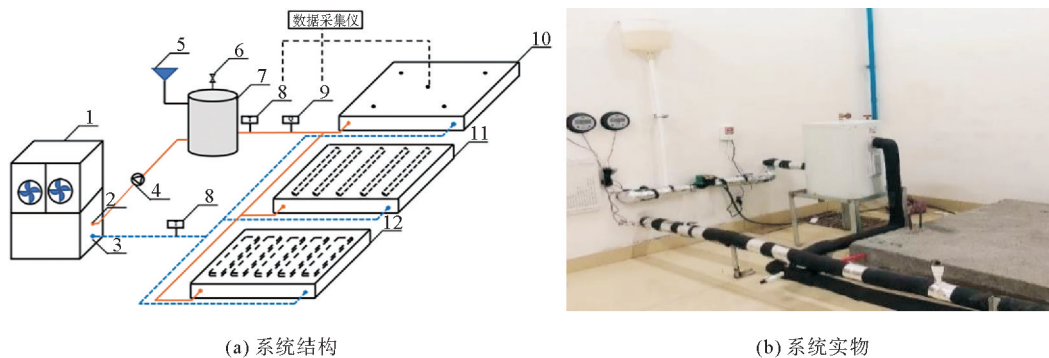


图1 PCM-混凝土楼板采暖系统

1—空气源热泵;2—进水口;3—出水口;4—循环水泵;5—补水漏斗;6—排气阀;7—电加热保温水箱;8—温度计;9—流量计;
10—纯混凝土辐射楼板;11—圆柱形排列PCM-混凝土楼板;12—方形排列PCM-混凝土楼板

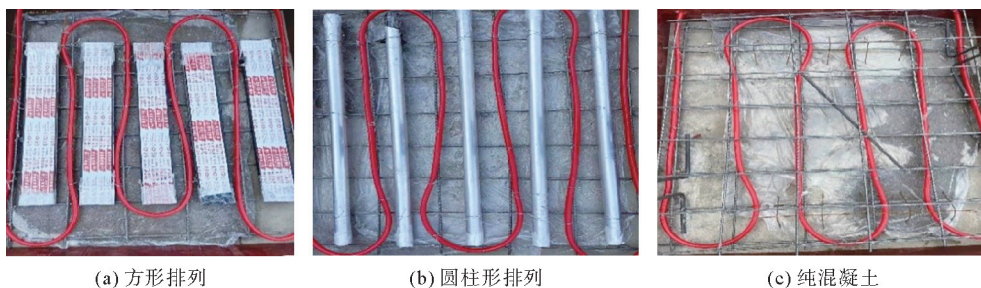


图2 PCM-混凝土楼板浇筑模块

表 1 PCM-混凝土楼板结构参数

名称	尺寸/mm	物性参数
混凝土楼板	1500×1200×140	$\rho=2360 \text{ kg/m}^3, \lambda=1.28 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
相变材料	—	$\rho=860 \text{ kg/m}^3, \lambda=0.63 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}, h=210 \text{ J/g}$
铝合金方管	125×25×1000($\delta=1.5$)	$\rho=2690 \text{ kg/m}^3, \lambda=201 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
铝合金圆管	$\phi 50 \times 1300(\delta=2)$	$\rho=2690 \text{ kg/m}^3, \lambda=201 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
耐热聚乙烯地暖管	$\phi 20(\delta=1)$	$\rho=940 \text{ kg/m}^3, \lambda=0.4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

注: δ 为壁厚; ϕ 为外径。

1.2 实验方案

为研究 PCM 对于供暖节能的作用,根据青岛地区的峰谷电价设计了一种间歇运行的供暖时间方案,见图 3,即在电价低的时段(3:00—15:00)开启系统 12 h 供暖并利用其中的 PCM 蓄热特性进行储能;在电价高的时段停止系统 12 h,利用混凝土的热惯性和 PCM 在凝固期间的放热性能供给热量,达到维持房间温度的效果。实验供水温度设置为 45 °C,采用 12 h-12 h 的间歇供暖工况,比较有无 PCM 以及不同形状的 PCM 在间歇运行工况下的蓄热和放热特性。

1.3 实验结果

供水温度 45 °C、12 h-12 h 间歇工况下实验的空气温度变化规律如图 4 所示,图示起点 3:00 为系统开启的起点,至 15:00 为系统开启运行 12 h 阶段,对应图 3 所示工况。

从整体上看,方形 PCM-混凝土楼板模块(简称方形模块)的室内空气温度最高,圆柱形 PCM-混凝土楼板模块(简称圆柱形模块)的次之,纯混凝土的最低。从 3 组模块上方空气温度超过 20 °C 的时长占全天 24 h 的比例来看,方形模块最高,达到 92%,圆柱形模块次之,达到 79%,纯混凝土模块最小,仅 71%。系统停止运行后的 12 h 内,方形模块整体温度为 3 组之中最高,圆柱形模块次之,纯混凝土模块最小。这是因为停止运行后,方形模块与圆柱形模块含有 PCM,在温度降低至凝固温度后会释放大量相变潜热维持楼板和空气温度,而不含 PCM 的纯混凝土模块仅靠显热热量维持温度,导致纯混凝土模块上方空气温度低于方形模块和圆柱形模块。对比方形模块和圆柱形模块,可以发现,方形模块上方的空气温度高于圆柱形模块,这是因为方形 PCM 的壁厚更薄、换热表面积更大、结构更利于传热,能更充分地释放出相变潜热。

2 PCM-混凝土楼板的非稳态数值模拟

通过 ANSYS 模拟比较不同结构相变储能楼板内部 PCM 在特定供水温度下的传热特性,分析 PCM 的蓄热和放热特性,揭示不同结构 PCM-混凝土楼板蓄热单元在蓄热和放热过程中内部 PCM 的变化规律。

2.1 物理模型及设置

对 2 组不同定形态的 PCM-混凝土楼板模块进行模拟,建立与实验尺寸 1:1 的模型,如图 5 所示。该模

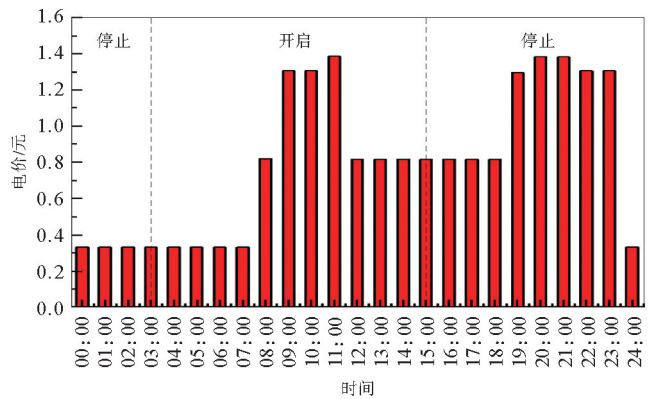


图 3 间歇供暖时间工况

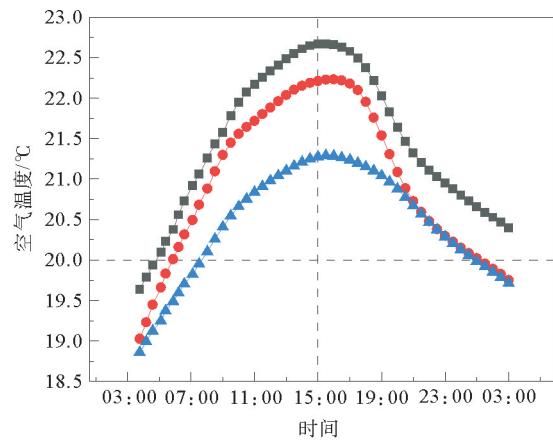


图 4 空气温度（供水温度为 45 °C）

—■— 方形模块；—●— 圆柱形模块；—▲— 纯混凝土模块

块整体为混凝土立方体,尺寸为 $1.50\text{ m} \times 1.20\text{ m} \times 0.14\text{ m}$,内部设有间距为 20 cm 的耐热聚乙烯地暖管,相同质量的 2 组相变材料分别灌注于方形铝管和圆柱形铝管中,制作成 2 种定型 PCM 单元。

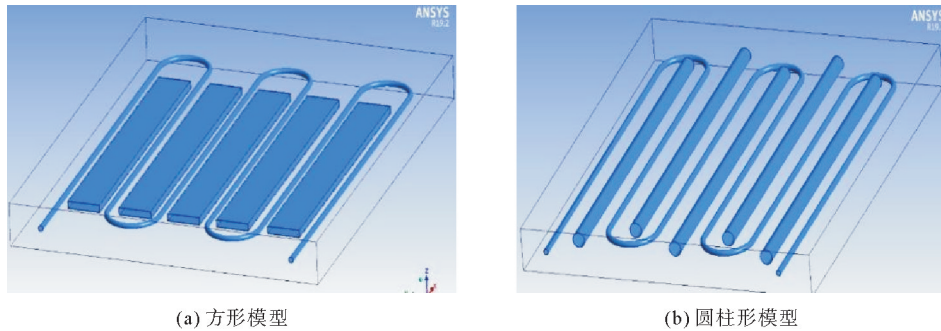


图 5 PCM-混凝土楼板模型

在 ANSYS 软件中导入方形和圆柱形 PCM-混凝土楼板模型,分别对 2 组模型进行 Fluent 流体仿真模拟。该模拟主要为了探究相同供水温度工况下相变材料的形状对传热的影响以及同种形状相变材料下供水温度对相变进程的影响。设置方形和圆柱形 2 种形状变量,设置 42 、 45 、 $51\text{ }^{\circ}\text{C}$ 3 种供水温度变量。每次 Fluent 流体仿真模拟的设置均为:时间项选择瞬态,打开重力项方程选项;启动能量方程和熔化凝固模型;流体流动采用紊流模型。

2.2 网格划分及网格独立性检验

图 6 为模拟前对方形和圆柱形 PCM-混凝土楼板的网格划分情况,为保证模拟仿真结果的准确性,需要对模型网格数量进行独立性验证,选择液相率作为网格独立性验证的参数。选择供水入口温度为 318 K ,对方形和圆柱形 PCM-混凝土楼板在不同网格数量下进行模拟。选取某一时刻的液相率进行对比,发现方形和圆柱形网格数量分别为 $541\ 174$ 、 $675\ 978$ 个后模拟数据值相同,如图 7 所示,因此认为此时模拟的真实性与网格的数量无关,取方形和圆柱形网格数量分别为 $541\ 174$ 、 $675\ 978$ 个进行仿真计算。

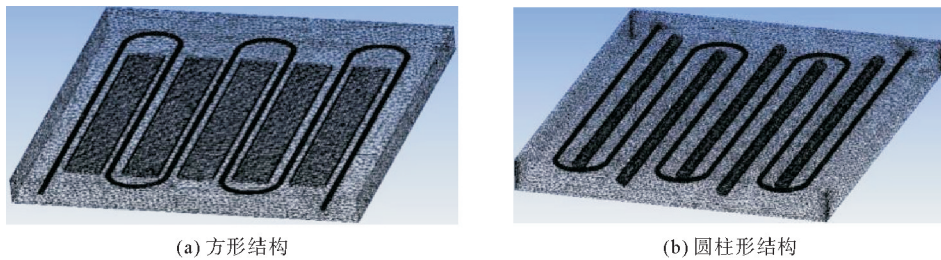


图 6 网格划分

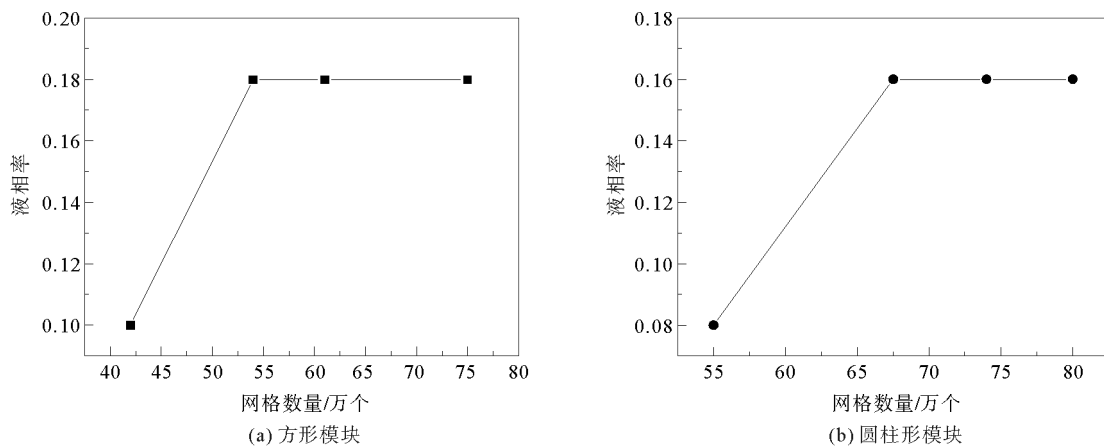


图 7 网格无关性检验

2.3 模拟模型验证

为了验证模型的准确性,在同工况下的实验和模型中选取同一位置作为参考点,对其模拟结果和实验数据进行对比分析,如图 8 所示,利用相对误差分析法对模拟结果进行定量分析。

$$E_{RM} = \max \left\{ \left| \frac{x_{sim} - x_{exm}}{x_{exm}} \right| \times 100\% \right\} \quad (1)$$

$$E_{RA} = \text{average} \left\{ \left| \frac{x_{sim} - x_{exm}}{x_{exm}} \right| \times 100\% \right\} \quad (2)$$

式中: E_{RM} 为最大相对误差; E_{RA} 为平均相对误差; x_{sim} 为模拟值; x_{exm} 为实验值。

根据式(1)、式(2)求得 $E_{RM} = 5\%$, $E_{RA} = 3\%$,均小于等于 5%,因此认为本论文建立的仿真模拟具有准确性和可信度。

3 模拟结果分析

3.1 PCM 形状对相变过程的影响

3.1.1 蓄热阶段

选取如图 9 所示的 PCM 结构中心点 1 作为参考点来研究 PCM 内部的传热情况,方形结构和圆柱形结构的蓄热阶段温度变化情况如图 10 所示,从温度和液相率两个方面来比较不同结构的传热特性,其中液相率的变化是相变反应发生情况的最直观反映。液相率为 0 时表示 PCM 完全没有熔化,而当液相率达到 1 时则说明 PCM 已经完全熔化为液相。

从温度方面来看(图 10),方形的温度比圆柱形的温度高,升温速度快,这是因为在相同 PCM 用量下,方形结构呈扁宽型,有利于热量的传递;而圆柱形由于热量从外到内传递需经过的 PCM 层较厚,再加上 PCM 导热系数低,所以圆柱形结构传热效果差。从液相率也可以看出,圆柱形结构中心点 3:00—15:00 内蓄热的液相率最终为 0.53,没有完全融化;而方形结构中心点 1 状态自 4:40 开始融化,经过 1.83 h 达到完全融化。

图 11、图 12 为 3:00—15:00 蓄热阶段内不同结构 PCM 的液相率云图,云图位置取 PCM 的整体横截面,蛇形红色部分为热水管截面,其余均匀排列部分为不同结构的 PCM。从图中可知方形结构整体液相率从 0 到 1 历时 13 800 s,且在同一时间内一整根 PCM 的液相率分布是均匀的,说明方形 PCM 传热均匀效果好。而圆柱形 PCM 5400 s 时靠近热水管弯头的圆柱侧端最开始融化,且在模拟设置的 12 h 蓄热阶段圆柱形结构并没有完全融化完。从云图的液相率分布来看,圆柱形结构传热不均匀,横向截面模拟结果呈外层向内层传递,纵向呈靠近热水弯管向远离热水弯管的方向传递。因为在实验和模拟设置的 12 h 蓄热时间内圆柱形 PCM 并没有完全融化,这也说明其吸收的潜热热量不及方形结构。

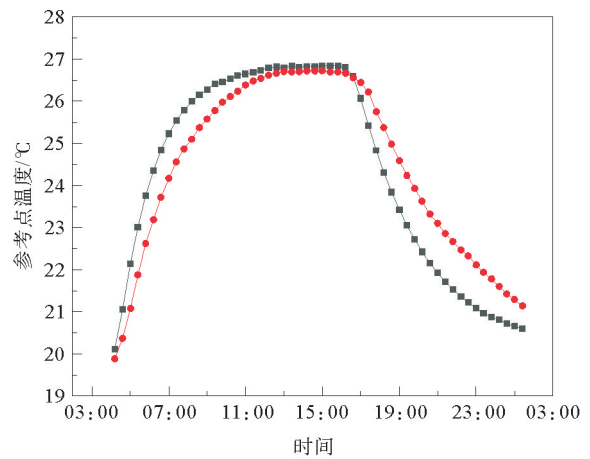


图8 模拟值与实验值对比

—■— 模拟; —●— 实验

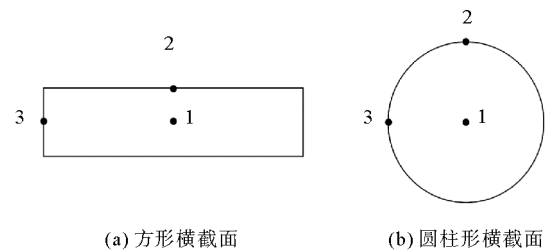


图9 模型参考点

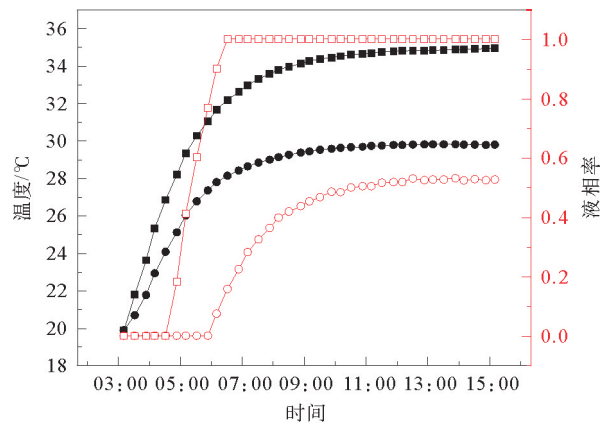


图10 蓄热阶段参考点 1 温度及液相率对比

—■— 方形温度; —●— 圆柱形温度; —□— 方形液相率; —○— 圆柱形液相率

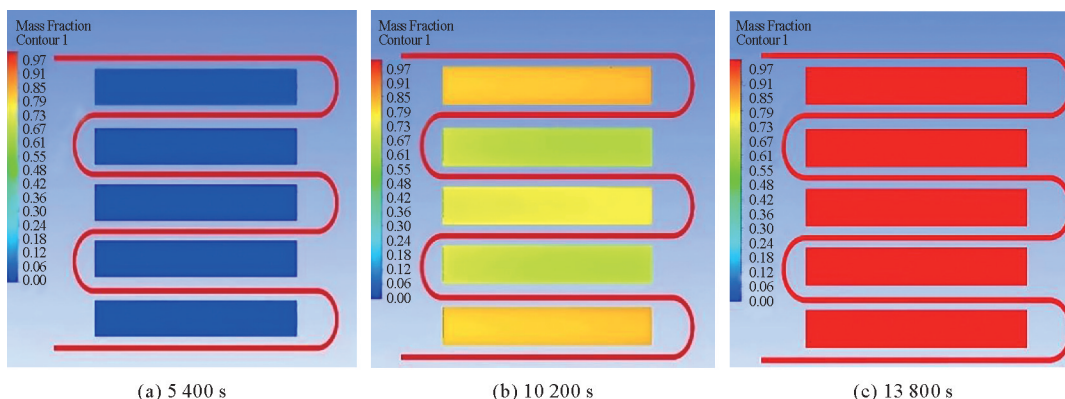


图 11 蓄热阶段方形结构 PCM 液相率变化

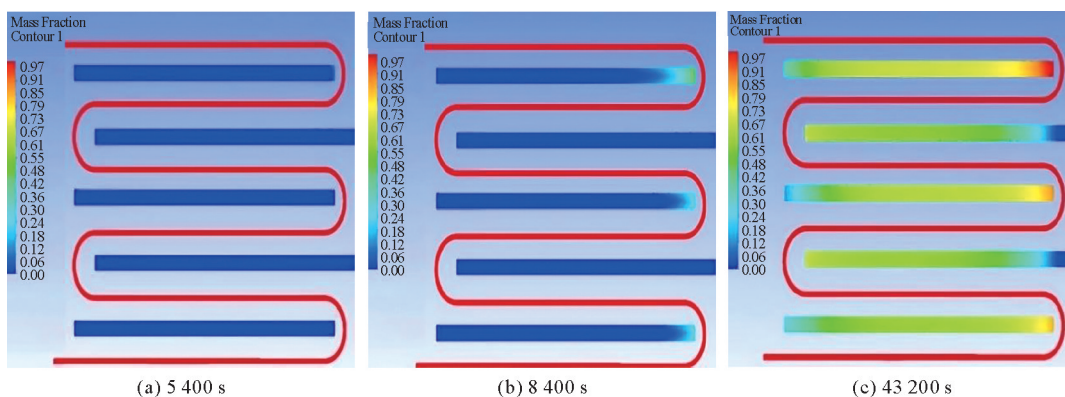


图 12 蓄热阶段圆柱形结构 PCM 液相率变化

3.1.2 放热阶段

图 13 为放热过程中方形结构和圆柱形结构 PCM 中心点温度及液相率随时间的变化,系统停运后,PCM 的温度下降,方形结构的下降速率高于圆柱形,说明方形相较于圆柱形能更好地将热量释放出来。方形结构从液相率 1 凝固至 0 经历时间要短于圆柱形从液相率 0.53 凝固至 0 的时间,同样说明方形结构的传热效果在放热阶段仍然优于圆柱形结构。

图 14、图 15 为 15:00—次日 3:00 放热阶段内不同结构 PCM 的液相率云图,从图中可以看出方形结构和圆柱形结构 PCM 的液相率分别在系统停止运行后 48 000 和 52 800 s 开始发生变化,说明系统停止大约 1~2 h 后,系统温度降低,通过换热使相变单元的最外层达到了凝固点,开始凝固,出现部分固态 PCM,相变单元开始释放相变潜热热量。

从图 14 可知方形结构整体液相率从 1 到 0 历时 3.5 h,放热阶段方形结构传热效果依然较好,纵向长度上液相率分布均匀。从图 15 可知,圆柱形结构 PCM 完全凝固时间为 79 800 s,即系统停止运行后 10.16 h,较方形完全凝固结束时间晚 5.3 h。这是因为圆柱形结构传热不均匀,热量的传递需要经过 PCM 的真实厚度,热阻比较大,导致凝固时间较长,从而使得楼板表面温度和空气温度不及方形结构。

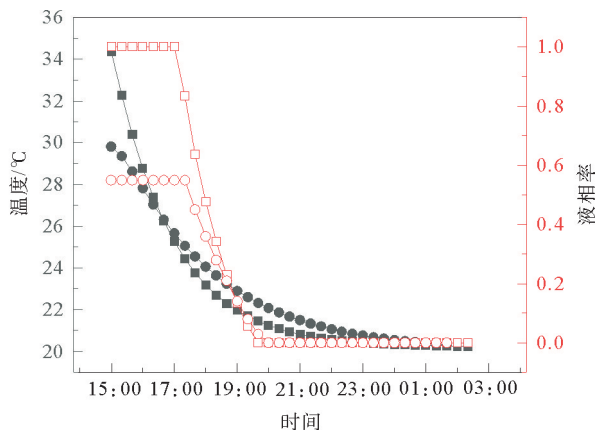


图 13 放热阶段参考点 1 温度及液相率对比
 —■— 方形温度; —●— 圆柱形温度; —□— 方形液相率; —○— 圆柱形液相率

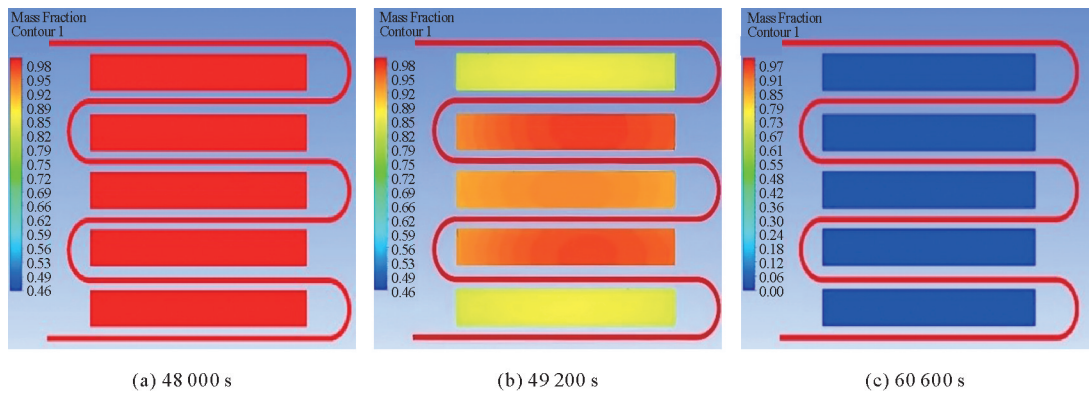


图 14 放热阶段方形结构 PCM 液相率变化

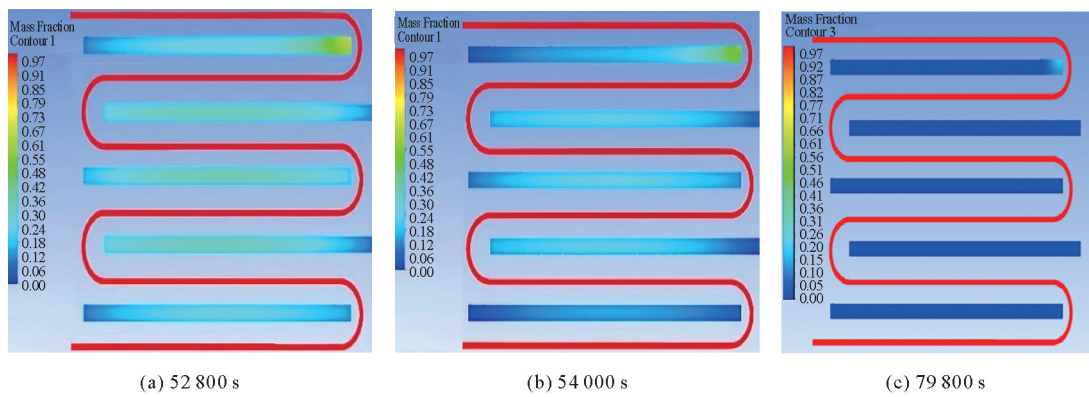


图 15 放热阶段圆柱形结构 PCM 液相率变化

3.2 供水温度对相变过程的影响

从 Fluent 仿真模拟的结果来看,45 °C 的水温下,方形 PCM 在蓄热过程中可以达到完全融化的效果,而圆柱形存在相变不完全的情况。由此可见,对于不同形状的 PCM,是否能在蓄热阶段完全融化受供水温度的影响。通过对方形 PCM 设置 42 和 45 °C 的供水温度,圆柱形设置 45 和 51 °C 的供水温度来研究供水温度对 PCM 融化进程的影响。

图 16 和图 17 分别为方形和圆柱形 PCM 中参考点 1 在不同供水温度下的温度和液相率变化趋势,由图可知 PCM 在蓄热过程中温度随着供水温度的增加而增加,供水温度越高,PCM 越早到达完全融化状

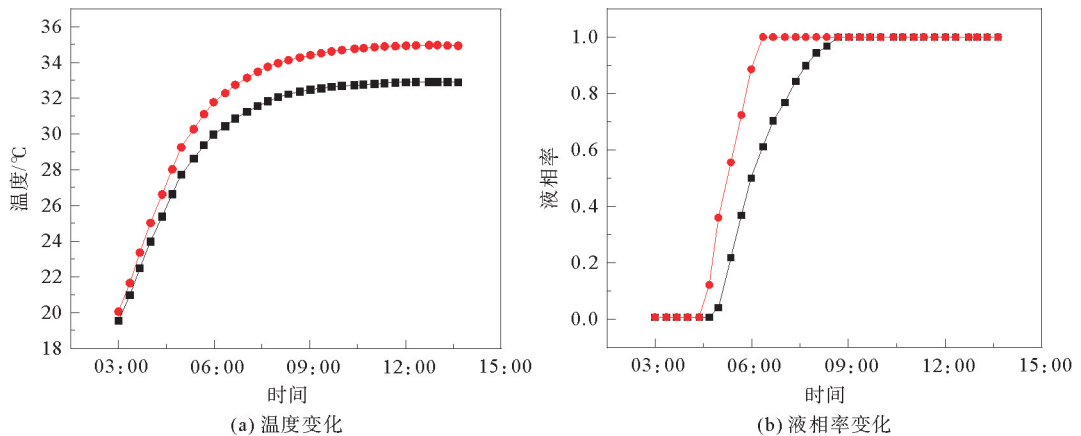


图16 不同供水温度下方形 PCM 参数变化

—■— 42 °C; —●— 45 °C

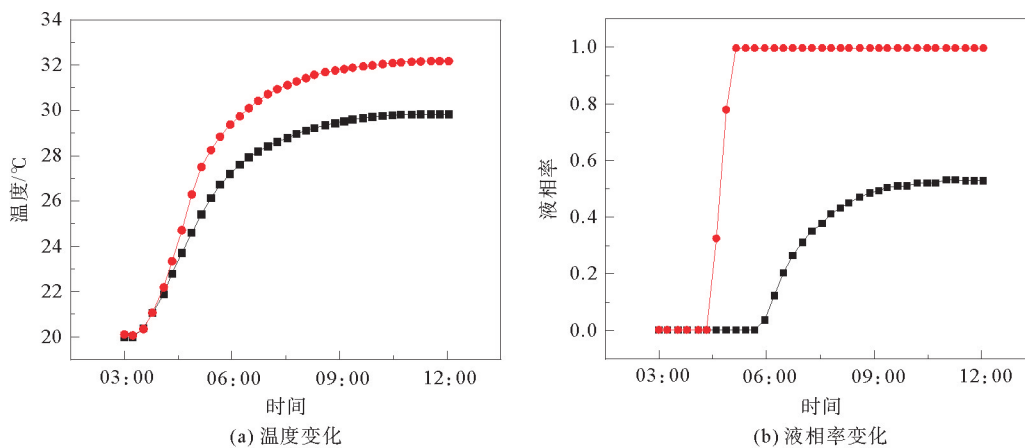


图17 不同供水温度下圆柱形 PCM 参数变化

—■— 45 °C; —●— 51 °C

态。对于方形 PCM, 搭配低温供水温度仍然可以在 12 h 内达到完全融化状态, 比圆柱形更具有节能优势。但是在 42 °C 下, 达到完全融化状态的进程慢于 45 °C, 液相率达到 1 的时间由 6:10 延迟至 8:40。而圆柱形 PCM 在供水温度提高至 51 °C 后, 可在系统启动的 3 h 内达到完全融化状态。

4 结论

本文开发了方形和圆柱形两种不同形状的定形相变材料模块, 基于此制作了相变材料复合混凝土 (PCM-混凝土) 辐射楼板, 设计并建立了 PCM-混凝土辐射供暖系统; 基于峰谷电价政策提出了分时段间歇供暖运行模式。通过实验以及数值模拟的方法研究了 PCM-混凝土楼板的传热特性以及内部方形和圆柱形定形态相变材料的具体传热过程。通过以上研究, 得出如下结论:

1) PCM 的添加可以提高混凝土辐射楼板的传热性能, 并且不同 PCM 形状排布结构对传热性能也有影响, 方形结构 PCM 的传热性能优于圆柱形结构。

2) 在相同工况下, 楼板上空气维持高温时间以及温度普遍为方形 PCM-混凝土模块最高, 圆柱形 PCM-混凝土模块次之, 纯混凝土模块最末。

3) 在供水温度对传热的影响上, 过低的供水温度 (如 45 °C) 会造成圆柱形结构的融化不完全, 而方形 PCM 仅在 42 °C 的供水温度下就能在系统启动后的 3.67 h 内达到完全融化状态, 因此, 方形相较于圆柱形可搭配更低的供水温度。

4) 供水温度影响 PCM 的融化过程, 供水温度越高, PCM 蓄热过程中融化启动时间、完全融化的时间越早, 融化经历时间越短。

参考文献 (References):

- [1] 赵倩, 严中俊, 秦迪, 等. 相变蓄能冷暖辐射地板系统热响应特性实验研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(8): 21-27.
ZHAO Qian, YAN Zhongjun, QIN Di, et al. An experimental study on thermal response of a PCM heating and cooling radiant floor system[J]. Building Science, 2020, 36(8): 21-27.
- [2] 周大设, 孙亮亮, 袁艳平, 等. 相变微胶囊悬浮液地板辐射供暖末端传热特性影响因素分析[J]. 中国科技论文, 2020, 15(10): 1162-1168.
ZHOU Dashe, SUN Liangliang, YUAN Yanping, et al. Study on influence heat transfer of the floor radiant heating terminal with microencapsulated phase change material slurries[J]. China Sciencepaper, 2020, 15(10): 1162-1168.
- [3] 闫全英, 刘莎, 王随林, 等. 定形相变储能式预制轻薄供暖地板的实验研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(8): 68-71.
YAN Quanying, LIU Sha, WANG Suilin, et al. Experimental study on prefabricated thin heating floor utilizing shape-stabilized PCM as thermal mass[J]. New Building Materials, 2017, 44(8): 68-71.
- [4] 张春枝, 周思童, 李涛, 等. 相变材料填充结构对地板辐射供暖热性能的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(11): 93-98.
ZHANG Chunzhi, ZHOU Sitong, LI Tao, et al. Study on effect of phase change material filling structure on heating performance of ra-

- diant floor heating[J]. *New Building Materials*,2021,48(11):93-98.
- [5] 王鸿珏,郭吉伟,朱琳,等. 新型对流-辐射式相变电供暖地板的需求响应特性研究[J]. *建筑科学*,2022,38(6):32-36.
WANG Hongjue, GUO Jiwei, ZHU Lin, et al. Study on the demand response characteristics of a new type of convection-radiation phase change electric heating floor[J]. *Building Science*,2022,38(6):32-36.
- [6] OUALI A E, RHAFIKI T E, KOUSKSOU T, et al. Heat transfer within mortar containing micro-encapsulated PCM; Numerical approach[J]. *Construction & Building Materials*,2019,210:422-433.
- [7] HICHEM N, NOUREDDINE S, NADIA S, et al. Experimental and numerical study of a usual brick filled with PCM to improve the thermal inertia of buildings[J]. *Energy Procedia*,2013,36:766-775.
- [8] NEPOMUCENO M, SILVA P D. Experimental evaluation of cement mortars with phase change material incorporated via lightweight expanded clay aggregate[J]. *Construction & Building Materials*,2014,63:89-96.
- [9] RAMAKRISHNAN S, WANG X M, SANJAYAN J, et al. Thermal performance assessment of phase change material integrated cementitious composites in buildings; Experimental and numerical approach[J]. *Applied Energy*,2017,207:654-664.
- [10] PARAMESHWARAN R, NARESH R, RAM V V, et al. Microencapsulated bio-based phase change material-micro concrete composite for thermal energy storage[J]. *Journal of Building Engineering*,2021,39:102-247.
- [11] 叶会文,王令,刘东. 相变微胶囊悬浮液在地板辐射采暖中应用的数值模拟研究[J]. *绿色建筑*,2016,8(5):63-66.
YE Huiwen, WANG Ling, LIU Dong. Simulation study on phase-change microcapsule suspension applied in floor radiant heating[J]. *Green Building*,2016,8(5):63-66.
- [12] 叶宏,葛新石,焦冬生. 带定形 PCM 的相变贮能式地板辐射采暖系统热性能的数值模拟[J]. *太阳能学报*,2002(4):482-487.
YE Hong, GE Xinshi, JIAO Dongsheng. Numerical simulation on the radiant floor heating system utilizing form-stable PCM as the thermal mass[J]. *Acta Energetica Solaria Sinica*,2002(4):482-487.
- [13] 林坤平,张寅平,狄洪发,等. 定形相变材料蓄热地板电采暖系统热性能[J]. *清华大学学报(自然科学版)*,2004,44(12):1618-1621.
LIN Kunping, ZHANG Yinping, DI Hongfa, et al. Thermal performance of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*,2004,44(12):1618-1621.
- [14] 邵索拉,张欢,由世俊,等. 带有蓄热型直接冷凝式加热板的空气源热泵系统性能研究[J]. *化工学报*,2020,71(8):3480-3489.
SHAO Suola, ZHANG Huan, YOU Shijun, et al. Performance investigation of air-source heat pump heating system with novel thermal storage refrigerant-heated panel[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*,2020,71(8):3480-3489.
- [15] 曾璟. 夏热冬冷地区蓄能型空气源热泵地板供暖系统的实验研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.
ZENG Jing. Experiments and analysis of the sensible heat storage air source heat pump for residential heating in hot summer and cold winter zone[D]. Changsha: Hunan University,2016.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)

(上接第 78 页)

- [15] CAO Q, LI X, XIE Z, et al. Compartmentation of microbial communities in structure and function for methane oxidation coupled to nitrification-denitrification[J]. *Bioresource Technology*,2021,341:125761.
- [16] BANSAL H. *Advances in omics and bioinformatics tools for phyllosphere studies*[M]. Hoboken: John Wiley and Sons, Ltd. ,2021.
- [17] ZHANG Y, SHI K, CUI H, et al. Efficient biodegradation of acetoacetanilide in hypersaline wastewater with a synthetic halotolerant bacterial consortium[J]. *Journal of Hazardous Materials*,2022,441:129926.
- [18] 李微,王贺,陈一鸣,等. 活性污泥法处理大蒜加工废水效能及菌群结构研究[J]. *中国给水排水*,2023,39(11):95-103.
LI Wei, WANG He, CHEN Yiming, et al. Performance and microbial community of activated sludge process for treatment of garlic processing wastewater[J]. *China Water and Wastewater*,2023,39(11):95-103.
- [19] SUN H, SHI W, CAI C, et al. Responses of microbial structures, functions, metabolic pathways and community interactions to different C/N ratios in aerobic nitrification[J]. *Bioresource Technology*,2020,311:123422.
- [20] 刘超,李奇,宋子洋,等. 低温下磁性载体 MBBR 系统微生物群落特征和功能预测分析[J]. *环境科学*,2023,44(2):889-899.
LIU Chao, LI Qi, SONG Ziyang, et al. Analysis of microbial community characteristics and function prediction of MBBR with magnetic biocarriers at low temperature[J]. *Environmental Science*,2023,44(2):889-899.
- [21] HUANG S, ZHANG B, ZHAO Z, et al. Metagenomic analysis reveals the responses of microbial communities and nitrogen metabolic pathways to polystyrene micro(nano)plastics in activated sludge systems[J]. *Water Research*,2023,241:120161.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)