

文章编号: 1671-6612 (2021) 04-519-08

低温电热辐射地板蓄传热特性研究

苏 蕾 余 涛

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 为探究发热元件为电热膜和发热电缆的低温电热辐射地板的蓄传热特性,建立了电热膜地板和发热电缆地板的二维非稳态传热数值计算模型,分析了发热元件埋深、供热强度、运行时间、发热电缆间距对地板蓄传热特性的影响。结果表明,发热元件埋深为2.0cm、7.5cm时,发热电缆地板的蓄热量分别是电热膜地板的4.2倍、1.2倍,埋深为13.0cm、15.0cm时,二者蓄热量相当,埋深较浅时,系统关闭时发热电缆地板表面热流明显大于电热膜地板,前者的蓄热性能更优。随着供热强度的增大、系统运行时间的增长、发热电缆间距的减小,地板上表面平均温度、地板蓄热量、放热量均呈增大趋势,但地板蓄热量占总供热量的比例却降低。

【关键词】 地板辐射供暖; 电热膜; 发热电缆; 温度分布; 蓄传热

中图分类号 TU832 文献标识码 A

Study on Heat Storage and Heat Transfer Characteristics of Low Temperature Electrically Heated Radiant Floor

Su Lei Yu Tao

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 In order to explore the heat storage and heat transfer characteristics of the floor under different kinds of heat source, a two-dimensional unsteady heat transfer numerical model of the low-temperature electrically heated radiant floors using the heating film and the heating cable was established. The effects of burying depth of heating element, heating intensity, running time and spacing of heating cable on the performances of heat storage and heat transfer of the floor are analyzed. Results show that when the heating element is buried at 2.0cm and 7.5cm, the heat storage capacity of the floor with heating cable is 4.2 times and 1.2 times that of the floor with heating film, respectively. When the heating element is buried at 13.0cm and 15.0cm, the difference is not obvious. When the buried depth is shallow, the heat storage performance of the floor with heating cable is better. With the increase of heating intensity, and system running time, and the decrease of heating cable spacing, the average surface temperature of the floor, heat storage and heat release of floor all increase, but the proportion of floor heat storage in the total heat supply decreases.

【Keywords】 radiant floor; heating film; heating cable; temperature distribution; heat storage and heat transfer

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2019YFG0316); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51708453)

作者简介: 苏蕾(1997.02-), 女, 硕士, E-mail: 1141925583@qq.com

通信作者: 余涛(1987.08-), 男, 博士, E-mail: yutao073@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2021-06-26

0 引言

地板辐射供暖系统在获得较高热舒适性的同时有一定的节能效应,越来越多地应用于冬季采暖^[1,2]。地面辐射供暖主要包括以低温热水为热媒的水地暖和以电热膜、发热电缆为发热元件的电地

暖。电地暖作为一种新型、清洁、舒适的供暖方式,逐渐得到推广应用^[3,4]。对于寒冷地区建筑而言,若采用水地暖则需考虑其防冻问题,而电地暖则避免了这一顾虑。此外,将电地暖与太阳能光伏发电技术相结合,可以更好的实现建筑节能^[5]。

目前关于电热地板采暖的研究多集中于经济性^[6]、发热方式^[7,8]、地板构造^[9,10]、室内热环境^[1,12]等方面,而关于地板蓄传热特性的研究通常是针对与相变材料相结合的供暖体系^[13,14],缺乏对常见热源形式下地板蓄传热过程的研究。

对于居住建筑而言,冬季夜间仍有供暖需求,日间蓄存在地板中的热量可供夜晚使用。本文依据行业相关标准^[15,16],分别建立电热膜地板以及发热电缆地板的二维非稳态传热模型,分析了发热元件埋深、供热功率、系统运行时间、发热电缆间距对地板全天蓄传热特性的具体影响,对居住建筑电采暖的应用具有一定的指导意义。

1 模型建立

1.1 物理模型

依据 JGJ142-2016 《地面辐射供暖技术规程》以及 JGJ319-2013 《低温辐射电热膜供暖应用技术规程》中的相关规定,选取尺寸为 2000mm×2000mm×180mm 的地板为研究对象,地板结构层剖面图如图 1 所示,各层材料及物性参数如表 1 所示。

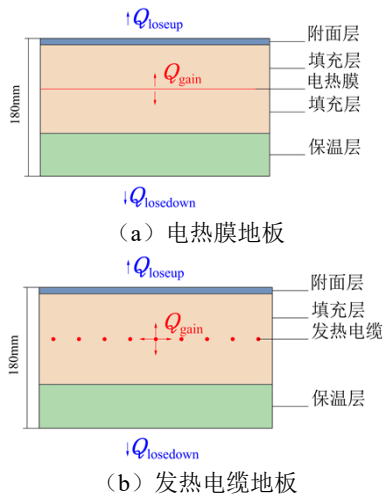


图 1 电热地板剖面图

Fig.1 Cross section of electric heating floor

表 1 电热地板各层材料热物性参数及几何参数

Table 1 Thermal properties and geometric properties of electric heating floor

结构	材料	厚度 mm	导热系数 W/(m·K)	密度 kg/m ³	比热 J/(kg·K)
填充层	豆石混凝土	150	1.51	2300	920
电热层	电热膜	1	—	—	—

电热层	发热电缆	1	—	—	—
保温层	挤塑板	30	0.03	35	1500

1.2 地板蓄传热过程分析

低温电热辐射地板运行时,电热膜、发热电缆向地板提供热量,该部分热量一部分储存在地板中,一部分通过地板表面向外界散出,如图 1 所示,则地板的蓄放热量可按式 (1) 或式 (2) 计算。

$$Q_{\text{storage}} = Q_{\text{gain}} - Q_{\text{lose}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{storage}} = \int_{t_1}^{t_2} q_{\text{gain}} dt - \int_{t_1}^{t_2} q_{\text{lose}} dt \quad (2)$$

$$Q_{\text{lose}} = Q_{\text{loseup}} + Q_{\text{loosedown}} \quad (3)$$

式中: Q_{storage} 是地板的蓄放热量, $Q_{\text{storage}} > 0$, 蓄热, $Q_{\text{storage}} < 0$, 放热, kJ; Q_{gain} 是电热膜、发热电缆供给地板的热量, kJ; Q_{lose} 是地板上表面的散热量 Q_{loseup} 和地板下表面的散热量 $Q_{\text{loosedown}}$ 之和, kJ; q_{gain} 是电热膜、发热电缆逐时向地板提供的热量, kW; q_{lose} 是地板逐时向外界散出的热量, kW。

1.3 数学模型

1.3.1 数学模型的建立及假设

对于发热电缆地板,选取两电缆间的地板结构作为基本传热单元,电热膜地板的基本传热单元宽度与发热电缆地板的相同。针对本文的研究,对模型做如下合理简化和假设:

(1) 地板内电热膜及发热电缆对称布置,且沿管线方向电热膜和发热电缆温度均匀分布,将电热地板的三维非稳态传热问题简化为地板剖面层的二维非稳态传热问题;

(2) 附面层厚度较薄,且其热物性参数与填充层差异较小,忽略不计;

(3) 地板各层材料紧密接触,忽略接触热阻;

(4) 电热膜相对地板厚度极薄,其厚度忽略;

(5) 发热电缆外包层相对地板厚度很薄,忽略不计。

1.3.2 导热微分方程

由能量守恒定律,得到电热地板各层的非稳态导热微分方程:

$$\frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_i \left(\frac{\partial^2 T_i(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i(x, y, \tau)}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

式中: α_i 为不同材料层的热扩散率, $\alpha_i = \lambda_i / \rho_i c_i$, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; λ_i 为不同材料层的导热率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{C})$; ρ_i 为不同材料层的密度, kg/m^3 ; c_i 为不同材料层的比

热容, J/(kg·°C)。

1.3.3 边界条件设置

(1) 地板上下表面均采用第三类边界条件, 表面综合对流换热系数取 $10\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ [17], 设置房间空气温度 16°C 到 20°C 之间正弦波动, 对应的函数表达式为:

$$t_a = 18 - 2\sin\left(\frac{2\pi}{86400}\tau\right) \quad (5)$$

式中: t_a 为房间内空气温度, $^\circ\text{C}$; τ 为时间, s。

(2) 两侧为绝热边界, 由于相邻计算区域的温度场对称分布, 可近似将计算区域的两侧面看成是绝热面。

(3) 发热体电热膜及电缆表面为变热流边界。

1.3.4 模型验证

本文采用 Fluent 软件进行数值模拟, 并进行了网格无关性验证。为了验证本文数值计算方法的正确性, 利用所建立的计算模型对文献[18]中的发热电缆地板进行数值模拟。文献中发热电缆铺设间距取 160mm , 自上而下各层热物性参数如表 2 所示。选取输入电压为 220V , 地板的供热强度为 $71.97\text{W}/\text{m}^2$ 时, 发热电缆表面平均温度与实验结果进行对比。由图 3 可知, 系统运行初期实验值与模拟值差异较大, 可能是实验初始状态下, 填充层材料温度不均匀分布所致。第 300min 之后, 发热电缆表面温度稳定在 65°C 左右, 且实验值和模拟值的差值小于 0.5°C 。此模拟说明了本文计算模型的正确性。

表 2 材料的几何参数及热物性参数

Table 2 Thermal properties and geometric properties of material

材料	厚度 mm	导热系数 W/(m·K)	密度 kg/m ³	比热 J/(kg·K)
地板砖	10	2.04	2000	817
水泥板	24	0.52	1400	840
发热电缆	1	-	-	-
挤塑板	50	30	0.03	35

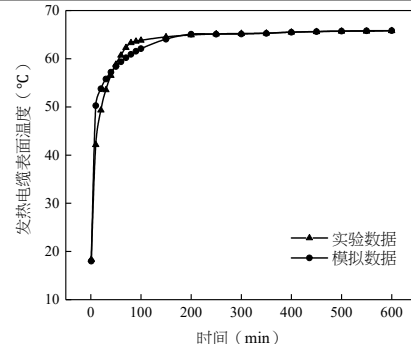


图 3 发热电缆表面温度

Fig.3 Surface temperature of heating cable

2 地板蓄传热特性及影响因素分析

本文通过改变发热元件埋深、系统供热量以及系统运行时间、发热电缆间距, 对电热膜和发热电缆两种低温电热辐射地板进行了数值模拟, 以探究各因素对地板蓄传热特性具体影响。计算在第 3 天已经达到稳定, 选取第 4 天的计算数据进行分析, 以地板上表面平均温度、地板蓄放热量、日间放热量、夜间放热量作为主要评价指标。

2.1 发热元件埋深对地板蓄传热特性的影响

2.1.1 温度分布

系统的运行时间为 $10:00\sim 20:00$, 由图 4 可知, 系统运行初期, 由于电热膜、发热电缆表面与混凝土的温差较大, 地板上表面的温度上升较快。随着时间的推移, 温差逐渐减小, 从而地板上表面的温升速率逐渐降低。发热元件埋深越深, 热量从发热元件表面传递到地板上表面所需要穿过的混凝土层越厚, 地板上表面到达最高平均温度的时间越迟。随着发热元件埋深的加深, 两种地板上表面平均温度的差值也越来越小。

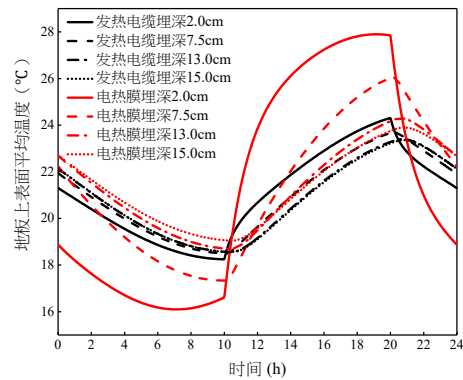


图 4 发热元件不同埋深时地板上表面平均温度

Fig.4 Upper surface average temperature of floor with different depths of heating elements

由图 5 可知, 发热元件埋深为 2.0cm 时, 系统运行期间, 电热膜地板上表面能快速均匀地达到较高的温度, 但是在系统关闭期间地板表面平均温度较低, 而相同情况下, 采用发热电缆, 能使地板表面平均温度最多升高 2.9°C。

2.1.2 蓄放热性能

由图 6 所示, 系统运行初期, 发热元件埋深较浅时, 电热膜蓄热量大于发热电缆, 但随后其蓄热速率快速下降, 后低于发热电缆地板, 埋深较深时, 二者的差异不明显。

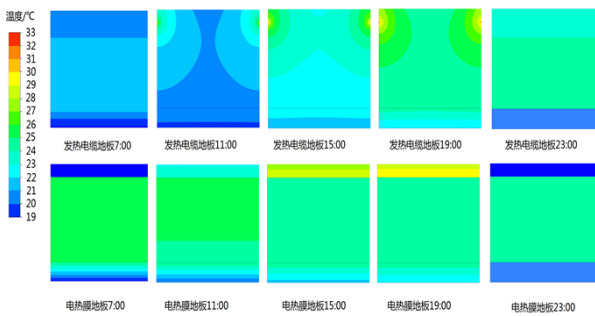


图 5 发热元件埋深为 2.0cm 时不同时刻地板的温度分布云图

Fig.5 Contours of floor temperature distribution at different times with heating elements depth of 2.0cm

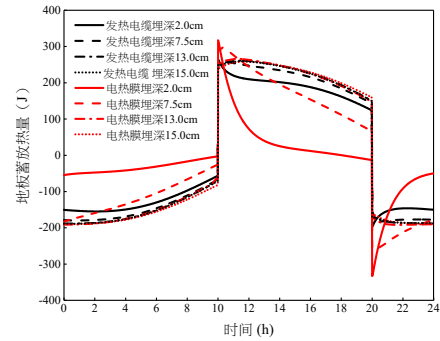


图 6 发热元件不同埋深时地板的蓄放热量

Fig.6 Heat storage of floor with different depths of heating elements

表 3 发热元件不同埋深时地板蓄放热量及其占比

Table 3 Floor heat storage and its proportion under different depths of heating elements

发热元件	埋深 cm	总供热量 kJ	蓄热量 kJ	蓄热量占比 %	运行期间放热量 kJ	运行期间放热量占比 %
电热膜	2.0	11520	1633.9	14.2%	9886.1	85.8%
	7.5	11520	6414.4	55.7%	5105.7	44.3%
	13.0	11520	8170.1	70.9%	3350.0	29.1%
	15.0	11520	8218.2	71.3%	3301.8	28.7%
发热电缆	2.0	11520	6814.5	59.2%	4705.6	40.8%
	7.5	11520	7816.5	67.9%	3703.5	32.1%
	13.0	11520	8163.2	70.9%	3356.8	29.1%
	15.0	11520	8172.1	70.9%	3347.9	29.1%

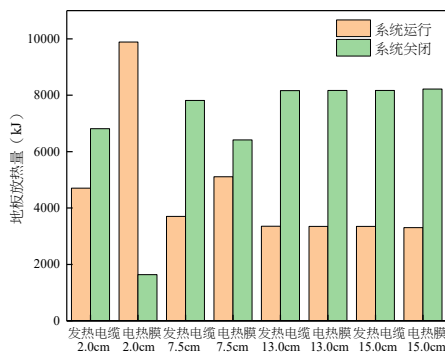


图 7 发热元件不同埋深时系统启闭期间地板放热量

Fig.7 Heat release of system on under different depths of heating elements

由表 3 可知, 随着发热元件埋深增加, 地板的

蓄热量不断增加, 埋深为 2.0cm、7.5cm 时, 发热电缆地板的蓄热量分别是电热膜地板的 4.2 倍、1.2 倍, 埋深为 13.0cm、15.0cm 时, 二者蓄热量相当。发热元件埋深较浅时, 电热膜向地板上表面快速传热, 较少的热量蓄存在地板中; 而发热电缆迅速激活其周围混凝土, 热量及时蓄集。类比于辐射供冷“核心层”^[19]的概念, 由于核心层热容的作用, 热量的传递存在滞后, 同一时刻发热电缆地板能蓄集较多的热量, 则在系统关闭期间地板的放热量也较大, 如图 7 所示。但当埋深达到一定深度, 地板的蓄放热主要取决于覆盖在发热元件表面的混凝土厚度。后文研究中选取发热元件埋深为 7.5cm 的工况进行分析。

2.2 供热强度对地板蓄传热特性的影响

2.2.1 温度分布

由图 8 可知, 地板上表面平均温度随着供热强度的增加而增加。系统的运行时间为 10:00~20:00, 运行初期, 供热强度越大, 发热元件表面与混凝土的温差越大, 地板上表面升温速率越快。相同供热强度下, 电热膜地板上表面温度变化的幅度大于发热电缆地板, 供热强度越大, 差异越明显。

2.2.2 蓄放热性能

随着供热强度增大, 地板蓄热量不断增大, 如图 9 所示; 系统关闭时, 地板放出的热量也增多, 如图 10 所示。而地板蓄热量占比却不断降低, 但降低的幅度随着供热强度的增大而逐渐减小, 如表 4 所示。

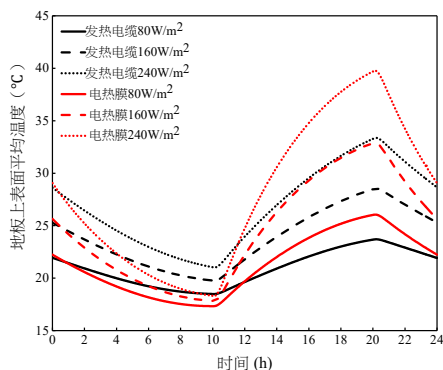


表 4 供热强度不同时地板蓄放热量及其占比

Table 4 Floor heat storage and its proportion under different heating powers

发热元件	供热强度 W/m ²	总供热量 kJ	蓄热量 kJ	蓄热量占比 %	运行期间放热量 kJ	运行期间放热量占比 %
电热膜	80	11520	6414.3	55.7%	5105.7	44.3%
	160	23040	11540.9	50.1%	11499.1	49.9%
	240	34560	16667.6	48.2%	17892.5	51.8%
发热电缆	80	11520	7816.5	67.9%	3703.5	32.1%
	160	23040	14069.0	61.1%	8971.0	38.9%
	240	34560	20317.5	58.8%	14242.5	41.2%

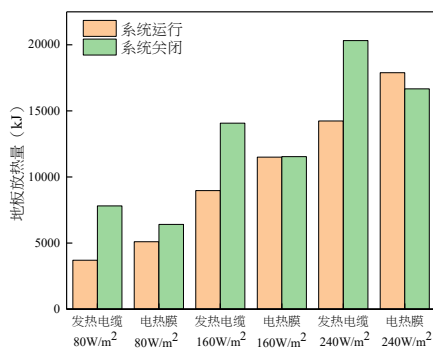


图 8 不同供热强度时地板上表面平均温度

Fig.8 Upper surface average temperature of floor at different heating powers

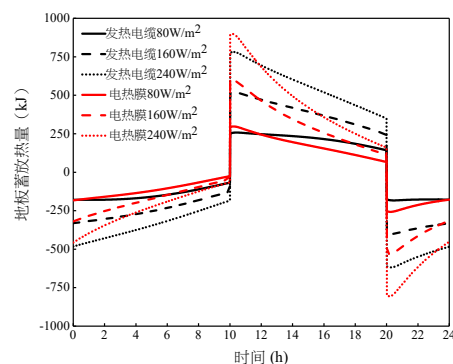


图 9 供热强度不同时地板的蓄放热量

Fig.9 Heat storage of floor under different heating powers

图 10 供热强度不同时系统启闭期间地板放热量

Fig.10 Heat release of system on and off under different heating powers

2.3 系统运行时间对地板蓄传热特性的影响

2.3.1 温度分布

由图 11 可知, 在系统运行阶段, 地板上表面平均温度增长趋势较为一致, 但系统运行的时间越短, 地板累积的热量越少, 地板较早地进入完全放热阶段, 则地板上表面所能达到的最高温度越低且

越早。

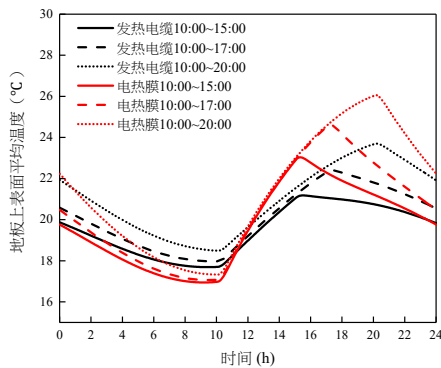


图 11 不同运行时间地板上表面平均温度

Fig.11 Upper surface average temperature of floor under different running schedules

2.3.2 蓄放热性能

在系统运行阶段，由于发热元件表面与其周围混凝土的温差随着时间的推移而越来越小，则地板的蓄热速率越来越慢，且各运行时长下，相同类型地板蓄热速率变化趋势几乎一致，如图 12 所示。

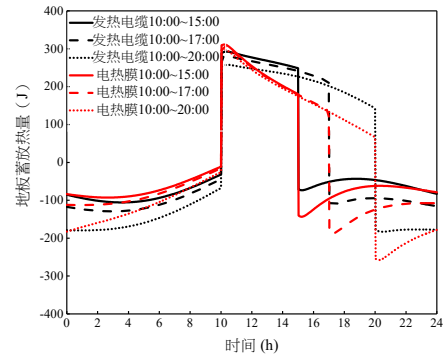


图 12 不同运行时间地板的蓄放热量

Fig.12 Heat storage of floor under different running schedules

由表 5 可知，系统运行的时间越长，地板的蓄热量越多但其占比却降低了，当系统运行时长从 5h 增至 10h，电热膜地板和发热电缆地板的蓄热量占比分别下降 20.4%、17.2%，这表明发热电缆周围的混凝土能更好的发挥其蓄热能力。

由图 13 可知，随着运行时间的增长，地板日间放热量和夜间放热量均呈增长趋势，且相同运行工况下，发热电缆地板的夜间放热量均大于电热膜地板。

表 5 不同运行时间地板蓄放热量及其占比

Table 5 Floor heat storage and its proportion under different running schedules

发热元件	运行时间 h	总供热量 kJ	蓄热量 kJ	蓄热量占比 %	运行期间放热量 kJ	运行期间放热量占比 %
电热膜	10:00~15:00	5760	4382.2	76.1%	1377.8	23.9%
	10:00~17:00	8064	5465.9	67.7%	2598.3	32.3%
	10:00~20:00	11520	6414.3	55.7%	5105.7	44.3%
发热电缆	10:00~15:00	5760	4903.2	85.1%	856.9	14.9%
	10:00~17:00	8064	6369.0	79.0%	1695.1	21.0%
	10:00~20:00	11520	7816.5	67.9%	3703.5	32.1%

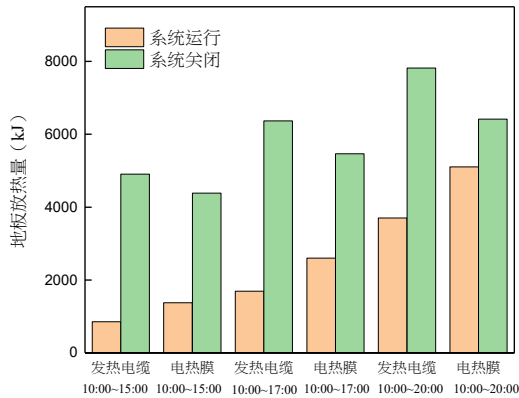


图 13 不同运行时间系统启闭期间地板放热量

Fig.13 Heat release of system on and off under different running schedules

2.4 发热电缆间距对地板蓄传热特性的影响

2.4.1 温度分布

选取系统的运行时间为 10:00~20:00, 由图 14 可知, 发热电缆间距越小, 则单位面积地板获得的热量越多, 从而地板上表面平均温度变化速率越快, 值越高。

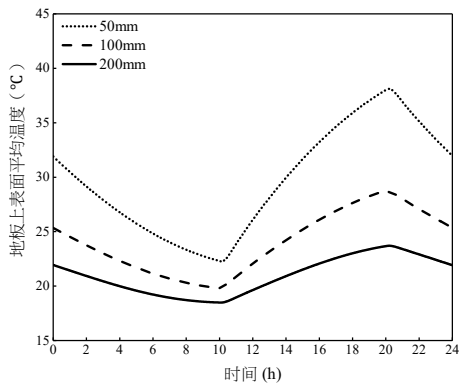


图 14 不同发热电缆间距地板上表面平均温度

Fig.14 Upper surface average temperature of floor under different spacing of heating cable

2.4.2 蓄放热性能

由图 15 可知, 发热电缆间距越小, 系统运行阶段, 同一时刻地板获得的热量越多, 地板蓄放热

速率越快, 蓄热量越多。

由表 6 可知, 随着发热电缆间距的减小, 地板的蓄热量占比却越来越小。系统关闭时, 地板释放系统运行期间储存的热量, 间距越小, 释放越多, 如图 16 所示。

由此可见, 缩小发热电缆间距, 虽然可以提高地板的总蓄热量, 但蓄热量的占比却降低了。

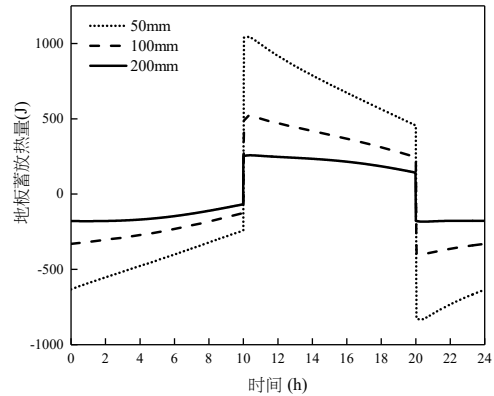


图 15 不同发热电缆间距地板蓄放热量

Fig.15 Heat storage of floor under different spacing of heating cable

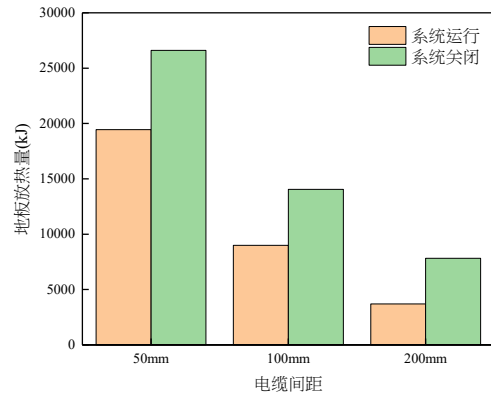


图 16 不同发热电缆间距系统启闭期间地板放热量

Fig.16 Heat release of system on and off under different spacing of heating cable

表 6 发热电缆间距不同时地板蓄放热量及其占比

Table 6 Floor heat storage and its proportion under different spacing of heating cable

间距 mm	总供热量 kJ	蓄热量 kJ	蓄热量占比%	运行期间放热量 kJ	运行期间放热量占比%
50	46080	26605.6	57.8%	19451.4	42.2%
100	23040	14054.8	61.1%	8985.2	38.9%
200	11520	7816.5	67.9%	3703.5	32.1%

3 结论

本文通过建立低温电热辐射地板二维非稳态传热模型,比较电热膜、发热电缆两种发热元件作用下地板的全天蓄传热特性,得到了以下结论。

(1) 发热元件埋深较浅时,电热膜地板表面温度响应迅速,而采用发热电缆作为发热元件能有效提高地板的日间蓄热量和夜间放热量,从而提高夜间地板表面温度。发热元件埋深到达一定深度,电热膜地板和发热电缆地板的蓄传热特性差异较小。

(2) 地板上表面平均温度、蓄热量、夜间放热量随着供热强度的增大、系统运行时间的加长、发热电缆间距的减小呈增大趋势,但蓄热量占比却随之降低,且电热膜地板的降低幅度高于发热电缆地板。

参考文献:

- [1] 马良栋,陶文铨,戴颖,等.室内低温地板辐射采暖的温度分布及湍流流动数值模拟[C].中国工程热物理学会2004年传热传质学学术会议,2004.
- [2] 亢燕铭,沈恒根,徐惠英,等.地板辐射供暖的节能效应分析[J].暖通空调,2001,(4):4-6.
- [3] Selvais G. Warming customers hearts and soles with electric floor heating[J]. National Floor Trends, 2004,6(12):52-54.
- [4] 楚军田,申连喜.水地暖与电地暖应用对比研究[J].建筑节能,2014,42(11):20-23.
- [5] 贾纪康,司鹏飞,戎向阳,等.直接受益窗与光伏驱动电热膜地板组合式供暖技术性能[J].暖通空调,2020,50(5):85-90.
- [6] 田禾,耿梓洋,袁建文.太阳能热泵—地板辐射采暖系统的节能性分析[J].甘肃科技,2013,29(18):110-113.
- [7] 张国刚,梁新华.电热膜采暖系统的应用及探讨[J].民营科技,2013,(8):58.
- [8] 曹体祥.低温辐射电热膜在供暖系统中的应用[J].应用能源技术,2011,(2):40-41.
- [9] 李思程.电热实木复合地板结构设计及其传热性能研究[D].北京:北京林业大学,2018.
- [10] 张海玲,赵太平.电热膜采暖的节能保温材料研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2015,36(6):109-112.
- [11] 李文,陈晨,刘载文,等.地热采暖房间升温过程有限元仿真[J].计算机仿真,2011,28(8):259-263.
- [12] 李贵燕,罗勇.电地暖温度场数值模拟及软件分析[J].建材与装饰,2018,(48):293-294.
- [13] Reza Barzin, John J J Chen, Brent R Young, et al. Application of PCM underfloor heating in combination with PCM wallboards for space heating using price based control system[J]. Applied Energy, 2015,148.
- [14] Lin K, Zhang Y, Xu X, et al. Modeling and simulation of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates[J]. Building and Environment, 2004,39(12):1427-1434.
- [15] JGJ142-2016,地面辐射供暖技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [16] GJ319-2013,低温辐射电热膜供暖应用技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [17] 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.
- [18] 贾晨.碳纤维发热线电地暖热工性能实验及模拟研究[D].天津:天津大学,2018.
- [19] Koschenz, Viktor Dorer. Interaction of an air system with concrete core conditioning[J]. Energy and Buildings, 1999,30(2): 139-145.
- [4] 杨冬兰.温和地区居住建筑冬季室内热环境及人体热

- 舒适研究[D].昆明:昆明理工大学,2018.
- [5] 国家统计局云南调查总队.云南调查年鉴(2019)[M].北京:中国统计出版社,2019:28.
- [6] 潘斗松,王志浩,邓诗涵,等.昆明市居住建筑能耗调研分析[J].暖通空调,2021,51(1):37-41.
- [7] 诺伯特·莱希纳.建筑师技术设计指南:采暖·降温·照明[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [8] 王崇杰,薛一冰.太阳能建筑设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [9] 韩志涛.空气源热泵常规除霜与蓄能除霜特性实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [10] GB 50495-2019, 太阳能供热采暖工程技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [11] 刘建波.太阳能集热器热性能研究[D].兰州:兰州理工大学,2014.
- [12] 付祥钊,樊燕.夏热冬冷地区供暖探讨[J].暖通空调,2013,43(6):78-81.
- [13] 张伟,朱家玲,苗常海.低温地板采暖与散热器采暖效果的对比分析[J].太阳能学报,2005,(3):10-13.