

文章编号: 1671-6612 (2021) 04-527-05

太阳辐射影响下地板辐射供暖传热特性研究

陈 辰 雷 波

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘 要】 我国青藏高原地区冬季太阳辐射强烈, 通过透明围护结构直射室内地面, 会影响辐射供暖地板的传热性能。基于高寒地区地板辐射供暖系统设计参数, 建立双回型辐射供暖地板结构层模型进行 CFD 数值模拟, 计算了不同供水温度、热水流速及太阳辐射情况下的地面温度和热水供热量, 分析表明: 太阳辐射造成地面温度升高、热水供热量减少较为明显, 但基本不会改变供水温度和热水流速本身对地面温度和热水供热量的影响规律; 室内太阳直射区和非直射区地面平均温差高达 5.6°C, 针对太阳辐射强度不同的区域需进行“分区设计”。

【关键词】 太阳辐射; 地板辐射供暖; 数值模拟; 传热特性

中图分类号 TU833/TU832 文献标识码 A

Study on Heat Transfer Characteristics of Floor Radiant Heating Under the Influence of Solar Radiation

Chen Chen Lei Bo

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

【Abstract】 In the Qinghai-Tibet Plateau region of China, the solar radiation is strong in winter, and the heat transfer performance of the radiant heating floor will be affected when the solar radiation radiates directly into the indoor floor through the transparent envelope. Based on the design parameters of the radiant floor heating system in alpine area, this paper established a double-loop radiant heating floor structure model for CFD numerical simulation and calculated the floor temperature and heat supply of hot water under different water supply temperatures, flow rates and solar radiation conditions. Analysis shows: solar radiation can rise the ground temperature and decrease the heat supply of hot water significantly, but it will basically not change the influence law of the water supply temperature and water flow rate on the floor temperature and hot water heat supply; the average temperature difference between the indoor direct and non-direct sunlight areas is as high as 5.6°C, and the areas with different solar radiation intensity needs to be "zoned design".

【Keywords】 solar radiation; radiant floor heating; numerical simulation; heat transfer characteristics

作者简介: 陈 辰 (1996.9-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 18200361678@163.com

通信作者: 雷 波 (1961.5-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: leibo@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2021-06-26

0 引言

地板辐射系统由于其舒适性和节能性, 越来越广泛地应用于大空间建筑^[1], 但大面积透明围护结构导致太阳辐射对其室内环境的影响较大。目前关于太阳辐射对地板辐射供暖系统的影响研究较多, 但主要针对室内温度和系统性能^{[2],[3]}。

然而, 青藏高原地区冬季太阳辐射也很强烈, 其地板辐射供暖也面临高强度太阳辐射的影响。2016 年 Mohamed^[4]建立了一个带窗房间模型, 通过调整窗户位置、朝向等参数, 证实太阳斑在采暖地板上的位移会导致辐射区过热, 影响室内热舒适; 2020 年 Chihebedine^[5]搭建了一个 5m² 的地板

辐射供暖实验房间, 采用电热膜模拟太阳光斑, 通过调整电热膜位置和作用时间, 测试系统的动态响应规律。

为了进一步了解太阳辐射对辐射地板内部传热特性的影响, 本文参考高寒地区地板辐射供暖系统设计参数建立辐射供暖地板结构层模型, 通过 CFD 数值模拟, 研究太阳辐射对辐射地板传热特性产生的影响, 并总结作用规律。

1 传热过程分析

1.1 地板辐射供暖传热过程

地板辐射供暖传热过程包括地板内部传热过程和室内空间传热过程两部分^[6]。完整的传热过程如图 1 所示。

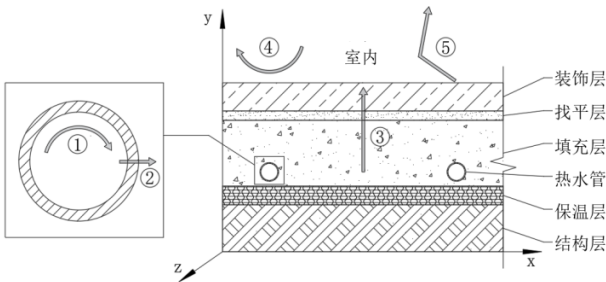


图 1 地板辐射供暖传热过程示意图

Fig.1 The schematic diagram of the heat transfer process of floor radiant heating

of floor radiant heating

地板内部: ①热水在地理盘中以对流换热形式与管内壁进行换热, ②加热后的管内壁通过导热换热给管外壁, ③管外壁再导热至填充层、找平层和装饰层。

室内空间: ④地板上表面与室内空气自然对流换热, ⑤地板上表面与室内其他表面辐射换热。本文将室内空间的传热过程简化为地板上表面的边界条件, 其传热过程简化如下:

地板上表面对流换热量 Q_c 的计算式为:

$$Q_c = h_c A_s (t_s - t_a) \quad (1)$$

式中: h_c 为地板上表面对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; A_s 为地板上表面面积, m^2 ; t_s 为地板上表面温度, $^{\circ}C$; t_a 为室内空气温度, $^{\circ}C$ 。

地板上表面辐射换热量 Q_r 的计算式为:

$$Q_r = \sigma A_s \sum_{i=1}^5 F_{\varepsilon_{s-i}} (T_s^4 - T_i^4) \quad (2)$$

式中: σ 为黑体辐射常数, $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$; $F_{\varepsilon_{s-i}}$ 为地板上表面与室内其他表面辐射换热的辐射系数; T_s 为地板上表面温度, K ; T_i 为室内其他表面温度, K 。

为了便于对地板上表面的自然对流换热与辐射换热进行综合描述, 引入非辐射面平均辐射温度 AUST 和等效对流换热系数 h_r , 得到等效对流换热量 Q_r 的计算式为:

$$Q_r = h_r A_s (t_s - AUST) \quad (3)$$

$$AUST = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^5 (F_{s-i} t_i^4)} \quad (4)$$

为了分析地板上表面向室内传递的总热量特性, 引入操作温度 t_{op} 和综合对流换热系数 h_t , 得到综合对流换热量 Q_{c+r} 的计算式为:

$$Q_{c+r} = h_t A_s (t_s - t_{op}) \quad (5)$$

$$t_{op} = \frac{h_c t_a + h_r AUST}{h_c + h_r} \quad (6)$$

1.2 太阳辐射影响分析

太阳辐射通过透明围护结构直射室内地面, 其中部分被地面吸收, 原理如图 2 所示。

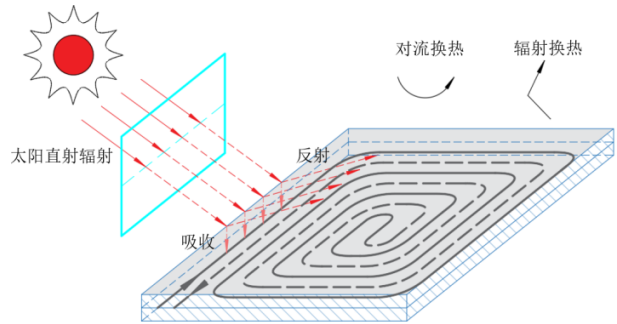


图 2 太阳直射辐射对室内环境的影响示意图

Fig.2 The schematic diagram of the influence of direct solar radiation on indoor environment

这部分被地面吸收的太阳辐射, 直接影响辐射供暖地板的传热特性, 因此本文通过 CFD 稳态计算, 研究被吸收的太阳辐射对传热产生的影响。被地面吸收的太阳辐射强度的简化计算过程如下:

到达竖直壁面外侧的太阳辐射强度 I_{out} 的计算式^[7]为:

$$I_{out} = I_{dir} \cos \theta + I_{dif} \quad (7)$$

式中: I_{dir} 为法向太阳直射辐射强度, W/m^2 ;

I_{dif} 为太阳散射辐射强度, W/m^2 ; θ 是竖直壁面的法线与太阳光线的夹角。

经透明围护结构进入室内的太阳辐射 I_m 的计算式为:

$$I_m = \bar{\tau} I_{out} \quad (8)$$

式中: $\bar{\tau}$ 为透明围护结构综合透过率, 双层玻璃结构取 0.6。

室内地面吸收的太阳辐射强度 I_i 的计算式为:

$$I_i = \alpha I_m \quad (9)$$

式中: α 为地板上表面太阳辐射吸收率, 饰面砖地板取 0.5。

2 数值计算模型建立

2.1 物理模型及网格划分

地板辐射供暖系统埋管的方式不同, 会导致地板表面温度分布的均匀度不同。对于双回型布置, 经过板面中心点的任何一个剖面均是高温管相间隔布置, 板面温度场比较均匀一致^[8], 实际工程中对于大面积区域常采用双回型布管方式, 故本文主要就双回型布管方式的传热特性进行分析。

根据辐射供暖地板的一般构造建立地板内部模型, 模型尺寸在 x, y, z 方向上为 $4m \times 4m \times 150mm$, 埋管间距 250mm, 各构造层的具体热物性参数如表 1 所示, 利用 Design Modeler 软件建立地板物理模型如图 3 所示。

表 1 辐射供暖地板各构造层参数

Table 1 The parameters of each structural layer of radiant heating floor

构造层	材料	厚度 (mm)	导热系数 [W/(m·K)]
装饰层	花岗岩	30	3.49
找平层	水泥砂浆	20	0.93
填充层	碎石混凝土	70	1.51
热水管	PE-RT	$\phi 20 \times 2$	0.40
保温层	聚乙烯泡沫塑料	30	0.047

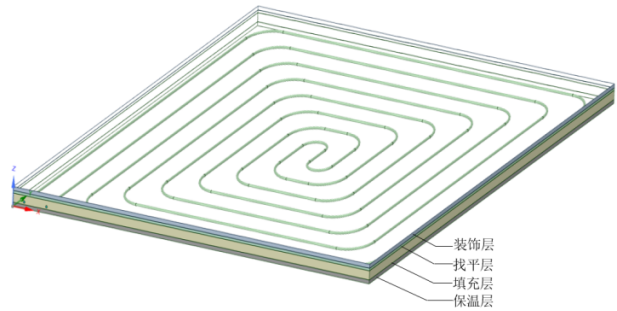


图 3 双回型辐射供暖地板模型

Fig.3 The model of double-loop radiant heating floor

基于本模型中的盘管细长且弯曲的几何特性, 对于热水、盘管和填充层采用非结构化网格, 其余各构造层采用结构化网格, 利用 ANSYS Mesh 进行网格划分, 网格划分的局部侧视图如图 4 所示。

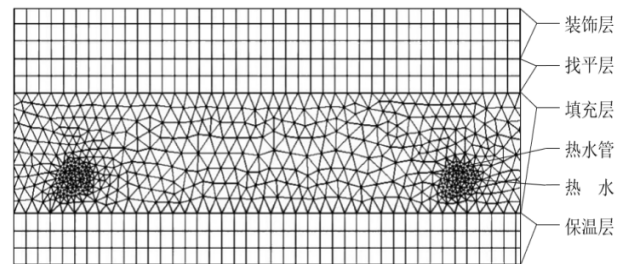


图 4 辐射供暖地板网格划分局部侧视图

Fig.4 The partial side view of the grid division of radiant heating floor

2.2 求解方法及边界条件

本文对辐射供暖地板传热特性的研究采用基于有限容积法的 Fluent 软件进行, 循环热水在埋管中的流动为不可压缩粘性湍流, 湍流模型选用可实现的 $k-\epsilon$ 两方程模型, 采用压力-速度耦合的 couple 算法进行求解, 并采用二阶离散格式提高解的精确性。

模型中热水进口采用速度入口边界, 热水出口采用自由出流边界, 地板上表面采用对流边界, 综合换热系数根据室内空间温度场模拟结果带入公式 (1) ~ (6) 计算为 $9.65 W/(m^2 \cdot K)$, 流体温度取 $16^\circ C$, 地板下表面及四周壁面采用绝热边界。

本文将被地面吸收的太阳辐射简化为地板上表面极薄面层内的体热源, 被吸收的太阳辐射强度根据公式 (7) ~ (9) 进行计算, 得到青藏高原地区供暖季室内地面吸收的太阳辐射强度不超过 $250 W/m^2$, 故本文主要对 $200 W/m^2$ 以下的辐射强度

进行模拟计算。

3 数值计算结果与分析

本文根据青藏高原地区太阳辐射强度及《辐射供暖供冷技术规程》(JGJ142-2012)相关规定,选取适宜的参数取值范围,计算供水温度 t_i 、热水流速 v_i 、太阳辐射强度 I_i 及太阳直射面积占比 k 对地面温度 t_s 和热水供热量 q_s 的影响。太阳直射面积占比 k 的含义如图5所示。

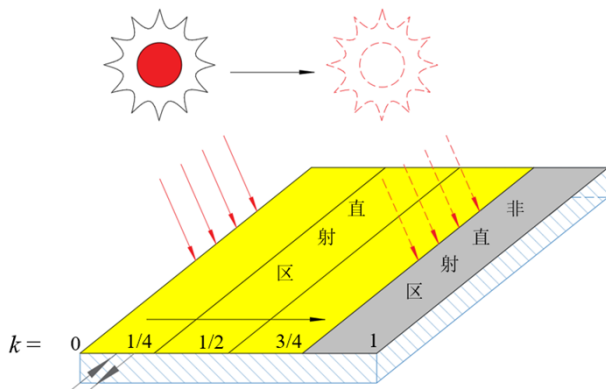


图5 太阳直射面积占比示意图

Fig.5 The schematic diagram of the proportion of direct sunlight area

3.1 供水温度的影响

在 $v_i=0.4\text{m/s}$ 、 $k=1$ 工况下,改变 t_i ,对比 $I_i=0$ 和 100W/m^2 下 t_s 和 q_s 的变化规律,计算结果如图6所示。

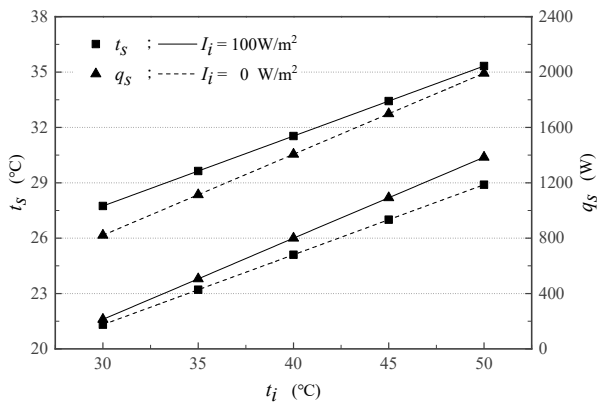


图6 供水温度的影响

Fig.6 The influence of water supply temperature

$I_i=0\text{W/m}^2$ 情况下,地面温度 t_s 和热水供热量 q_s 与供水温度 t_i 成正比;对比 $I_i=100\text{W/m}^2$ 下的各参数变化规律,直线斜率保持不变,说明太阳辐射

不会造成供水温度的影响规律改变; 100W/m^2 强度的太阳辐射,造成地面温度升高约 6.4°C ,热水供热量减少约 607W ,说明太阳辐射强度的影响较为显著,下文进一步探究其影响规律。

3.2 热水流速的影响

在 $t_i=40^\circ\text{C}$ 、 $k=1$ 工况下,改变 v_i ,对比 $I_i=0$ 和 100W/m^2 下 t_s 和 q_s 的变化规律,计算结果如图7所示。

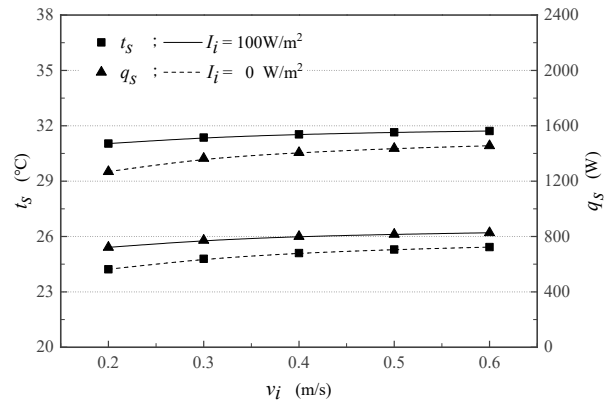


图7 热水流速的影响

Fig.7 The influence of hot water velocity

$I_i=0\text{W/m}^2$ 情况下,地面温度 t_s 和热水供热量 q_s 随着热水流速 v_i 的增大而略有增加;对比 $I_i=100\text{W/m}^2$ 下的各参数变化规律,曲线增长幅度略有减缓,说明太阳辐射会造成热水流速的影响减小。

热水流速的改变对地面温度和热水供热量的影响较之供水温度十分微小,且随着流速的增加逐渐趋于稳定,说明流速增大到一定程度时,热水在管内的对流换热量不再增加。

3.3 太阳辐射强度的影响

在 $t_i=40^\circ\text{C}$ 、 $v_i=0.4\text{m/s}$ 、 $k=1$ 工况下,改变 I_i ,计算结果如图8所示。

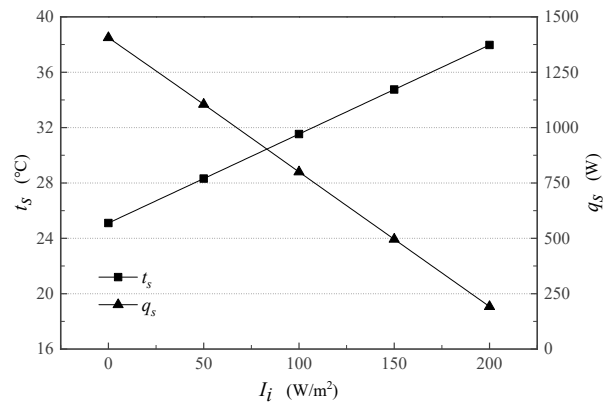
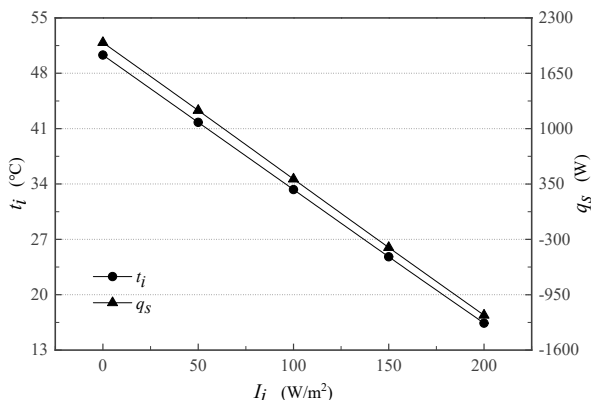


图 8 太阳辐射强度的影响

Fig.8 The influence of solar radiation intensity

地面温度 t_s 与太阳辐射强度 I_i 成正比, 热水供热量 q_s 与太阳辐射强度 I_i 成反比。随着太阳辐射增强, 地面温度不断升高, 可通过调节供水温度 t_i 来适应太阳辐射强度的变化, 控制地板表面温度在舒适度要求范围内 ($\leq 29^\circ\text{C}$), 规律如图 9 所示。

图 9 地面温度 $t_s=29^\circ\text{C}$ 工况规律总结Fig.9 The summary of working conditions of $t_s=29^\circ\text{C}$

供水温度 t_i 和热水供热量 q_s 均与太阳辐射强度 I_i 成反比; 随着太阳辐射增强, 降低供水温度能有效控制地面温度, 当太阳辐射强度增大到一定程度时, 热水供热量出现负值, 此时供热系统无需运行地面温度也能满足要求。

3.4 太阳直射面积的影响

在 $t_i=40^\circ\text{C}$ 、 $v_i=0.4\text{m}/\text{s}$ 、 $I_i=100\text{W}/\text{m}^2$ 工况下, 改变 k , 计算结果如图 10 所示。

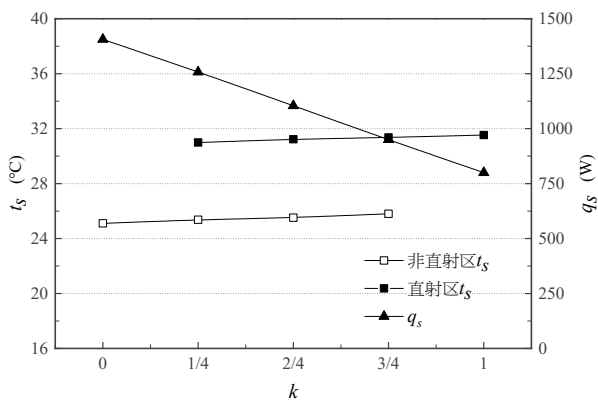


图 10 太阳直射面积的影响

Fig.10 The influence of the size of direct sunlight area

地面温度 t_s 与太阳直射面积占比 k 成正比, 热水供热量 q_s 与太阳直射面积占比 k 成反比; 随着直射面积的增加, 不仅直射区地面温度升高, 非直射

区的温度也受到影响随之升高, 且直射区与非直射区地面温度的变化率相同, 两区域地面平均温差约 5.6°C , 对室内环境的热舒适性会产生较大影响。

为了减小直射区与非直射区的温差, 使地面温度较为均匀, 需适当降低直射区的地面温度, 因此本文提出对直射区和非直射区进行“分区设计”的理念, 在室内长期受到太阳直射的区域通过减小供水温度、缩短供水时间等策略, 使直射区地面温度与非直射区均匀一致, 保证室内环境的热舒适性。

4 结论

(1) 太阳辐射造成地面温度升高、热水供热量减少较为明显, 但基本不会改变供水温度和热水流速本身对地面温度和热水供热量的影响规律; 随着太阳辐射增强, 降低供水温度能够有效维持地面温度在舒适度要求范围内。

(2) 室内太阳直射区和非直射区地面平均温差高达 5.6°C , 针对太阳辐射强度不同的区域需进行“分区设计”, “分区”采用不同的供水参数维持地面温度均匀一致, 保证室内环境的热舒适性。

参考文献:

- [1] 马友才, 张银安, 刘华斌, 等. 新建铁路客运站房暖通空调设计综述[J]. 暖通空调, 2009, 39(3): 1-9.
- [2] Kang Zhao, Xiaohua Liu, Yi Jiang. Application of radiant floor cooling in a large open space building with high-intensity solar radiation[J]. Energy & Buildings, 2013, 66: 246-257.
- [3] Kang Zhao, Xiaohua Liu, Yi Jiang. On-site measured performance of a radiant floor cooling/heating system in Xi'an Xian-yang International Airport[J]. Solar Energy, 2014, 108: 274-286.
- [4] Mohamed-Hichem Benzaama, Mohammed Lachi, Chadi Maalouf, et al. Study of the effect of sun patch on the transient thermal behaviour of a heating floor in Algeria[J]. Energy & Buildings, 2016, 133(1): 257-270.
- [5] Chihebedine Beji, Abdelatif Merabtine, Salim Mokraoui, et al. Experimental study on the effects of direct sun radiation on the dynamic thermal behavior of a floor-heating system[J]. Solar Energy, 2020, 204: 1-12.
- [6] 朱珂. 辐射供暖地板表面综合传热系数的理论计算探究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.

-
- [7] 陆舜瑶. 夏热冬冷地区遮阳对玻璃幕墙建筑室内热环境的影响机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2019: 20-22.
- [8] 周兴红. 低温地板辐射采暖数值模拟及其性能分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2004: 6-7.