



基于反应系数法的内嵌加肋管混凝土 辐射地板等效热阻传热模型

柴建源,马景辉,冉科呈,李兴宇,陶 盛
(浙江理工大学建筑工程学院,杭州 310018)

摘 要: 为探究内嵌加肋管混凝土辐射地板在间歇运行工况下的热响应特性,根据其传热过程,采用反应系数法建立了内嵌加肋管混凝土辐射地板等效热阻传热模型,并通过模型的模拟值与实验值对比验证等效热阻传热模型的准确性。实验结果表明:利用无肋圆管等效内嵌加肋管混凝土辐射地板内部传热时,当温度离散间隔取 0.5 h,上表面温度、核心层温度模拟值与实验值的相对误差均小于 4%;蓄释热能力模拟值与实验值的相对误差均小于 10%。该内嵌加肋管等效热阻传热模型具有较高的精度,能较好地再现内嵌加肋管混凝土辐射地板的动态传热过程。该研究通过反应系数法,用线性方程组对内嵌加肋管混凝土辐射地板的复杂传热过程进行描述,计算快捷,有助于内嵌加肋管混凝土辐射地板在工程上的应用推广。

关键词: 内嵌加肋管;混凝土辐射地板;热性能;反应系数法;等效热阻传热模型

中图分类号: TU111.48

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2025) 01-0080-08

引文格式: 柴建源,马景辉,冉科呈,等. 基于反应系数法的内嵌加肋管混凝土辐射地板等效热阻传热模型[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2025,53(1):80-87.

Reference Format: CHAI Jianyuan, MA Jinghui, RAN Kecheng, et al. An equivalent thermal resistance heat transfer model for concrete radiant floors with embedded ribbed tubes based on the reaction coefficient method[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2025, 53(1): 80-87.

An equivalent thermal resistance heat transfer model for concrete radiant floors with embedded ribbed tubes based on the reaction coefficient method

CHAI Jianyuan, MA Jinghui, RAN Kecheng, LI Xingyu, TAO Sheng

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To investigate the thermal response characteristics of concrete radiant floors with embedded ribbed tubes under intermittent operating conditions, an equivalent thermal resistance heat transfer model for concrete radiant floors with embedded ribbed tubes was established by the reaction coefficient method according to the heat transfer process, and the accuracy of the equivalent thermal resistance heat transfer model was verified by comparing the simulated values of the model with the experimental values. The experimental results show that for the concrete radiant floors with embedded ribbed tubes using the ribless round tube equivalently, when the temperature discrete interval was 0.5 h, the relative error between the simulated and experimental values of the upper surface temperature and the core layer temperature was less than 4%, and the relative error between the simulated and experimental values of the heat storage and release capacity was less than 10%. The equivalent thermal resistance heat transfer model for concrete radiant floors with embedded ribbed tubes has high accuracy and can better reproduce the dynamic heat transfer process of concrete radiant floors with embedded ribbed tubes. The study describes the complex

收稿日期: 2024-04-13 网络出版日期: 2024-09-13

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52206029)

作者简介: 柴建源(1998—),男,河南信阳人,硕士研究生,主要从事辐射冷暖房方面的研究。

通信作者: 马景辉, E-mail: mzh58@hotmail.com

heat transfer process of concrete radiant floors with embedded ribbed tubes with a system of linear equations by the reaction coefficient method, which is quick to calculate and helps to promote the application of concrete radiant floors with embedded ribbed tubes in engineering.

Key words: embedded ribbed tubes; concrete radiant floor; thermal characteristics; reaction coefficient method; equivalent thermal resistance heat transfer model

0 引言

室内热环境作为工作和生活的主要空间,人们对其品质的要求也越来越高。混凝土辐射供暖系统运行时在竖直方向上的室内温差小,空气温度稳定,人体热感觉舒适,因而应用越来越广泛^[1-2]。作为供暖系统的末端,混凝土辐射地板的蓄释热性能直接影响室内温度的响应及人体的热舒适。

近年来,为了更好地利用混凝土辐射地板末端的蓄热能力,学者们进行了积极的探索。范鹏等^[3]对相变围护结构进行了数值模拟,发现加入相变材料能够使围护结构表面热流在蓄热时下降,释热时上升,从而提升了室内的热稳定性。刘洁等^[4]对相变混凝土辐射地板进行了实验研究,结果表明相变混凝土辐射地板在供暖时能抑制室内温度波动,降低建筑能耗。同时,相变混凝土辐射地板在间歇运行时,可延长室内环境处于舒适区间的时间^[5-6]。然而,添加相变材料往往也会导致施工难度增加,因此需要考虑相变温度与气候环境的相互耦合^[7]。Oravec 等^[8]发现,采用在管道之间嵌入金属肋片的方式,可以在成本基本不变的情况下增加混凝土辐射地板的有效热容量。杨艺真^[9]也对加肋混凝土辐射地板进行了实验研究,结果表明与无肋混凝土辐射地板相比,加肋混凝土辐射地板蓄热性能提升了 1.15 倍。

由于混凝土辐射地板传热末端热容量大,会直接参与室内环境调控,因此辐射地板内部传热过程复杂,计算困难。目前,常见的混凝土辐射地板传热模型可以分为数值模型与简化模型。在数值模型方面,Jin 等^[10]利用 ANSYS 对不同层组装结构的地板辐射供暖系统进行了模拟研究,结果表明高导热性的核心储热材料能显著优化混凝土辐射地板热性能;Wang 等^[11]利用有限元法模拟了不同材料的辐射地板热性能,结果表明混凝土的导热系数对蓄热量的影响最为显著;王培等^[12]利用 CFD 软件 Fluent 得到了混凝土辐射地板表面温度分布与供水盘管长度之间的关系,确定了盘管长度合理的取值范围,以保证地板表面温度的均匀性。在简化模

型方面,匡德睿等^[13]利用热阻分析法建立了有覆盖物时的混凝土辐射地板传热模型,比较了不同覆盖率下辐射地板热阻增量,为进一步分析室内得热提供依据;Chen 等^[14]采用状态空间法建立了内置热源的混凝土辐射地板三维传热模型,利用 RC 传热模型对状态空间模型进行解析,以便后续系统优化;Wang 等^[15]利用分离变量法估算了典型混凝土辐射地板运行时的温度分布,通过实验验证了该简化模型在预测多层复合地板热性能时的准确性和有效性;Ma 等^[16]基于有限差分法建立了混凝土辐射地板的简化模型,通过比较不同结构的辐射地板蓄释热性能,提出了优化辐射地板蓄释热性能的方法。

现有的混凝土辐射地板传热模型研究主要是为了探索混凝土内部的温度分布规律,多利用专业工具进行模拟计算,计算过程复杂。对于内嵌加肋管混凝土辐射地板,由于增加了肋片与内部混凝土之间的导热,使得相关传热计算更为困难。同时工程上更关注辐射地板表面的温度与热流,因此亟需一种便于计算的内嵌加肋管混凝土辐射地板传热模型。在温度边界条件动态变化时,反应系数法可以用线性方程描述辐射地板传热过程,并直接求得表面的热流密度和温度,计算更为直观简单。

本文根据内嵌加肋管混凝土辐射地板内部的传热过程,采用反应系数法构建其等效热阻传热模型,对比不同时间间隔下的辐射地板温度值模拟精度,并从辐射末端温度和蓄释热能力的角度对模型进行验证,从而为后续优化设计奠定一定的基础,以促进内嵌加肋管混凝土辐射地板在工程上的应用推广。

1 内嵌加肋管混凝土辐射地板传热模型

1.1 普通混凝土辐射地板传热过程

混凝土辐射地板热容量大,内部传热复杂;为方便分析其传热过程,本文利用 Koschenz 等^[17]提出的“核心层”概念,将原混凝土辐射地板内部的三维非稳态传热简化为二维传热。普通混凝土辐射地板内部传热原理示意图如图 1 所示,其中: q_c 表示供

水管与核心层之间的热流密度, W/m^2 ; q_u 表示核心层向上层混凝土传热热流密度, W/m^2 ; q_l 表示核心层向下层混凝土传热热流密度, W/m^2 ; T_c 表示核心层温度, $^{\circ}C$; T_1 表示辐射地板上表面温度, $^{\circ}C$; T_2 表示辐射地板下表面温度, $^{\circ}C$; L 表示管间距, m ; R_1 、 R_2 和 R_3 分别表示混凝土和保温材料的热阻, K/W ; C_1 、 C_2 和 C_3 分别表示混凝土和保温材料的热容, J/K 。普通混凝土辐射地板内部传热可以分为3部分:供水管与核心层传热、核心层与上层混凝土传热和核心层与下层混凝土传热。其中核心层传热最为复杂, Tian 等^[18]通过研究辐射地板内部温度分布, 近似将 $1/4$ 管间距处(C点)的温度视作核心层温度, 以便于模拟计算。内嵌加肋管混凝土辐射地板由于内嵌金属肋片, 混凝土内部传热更加复杂, 为构建传热模型, 需对其核心层传热进行分析。

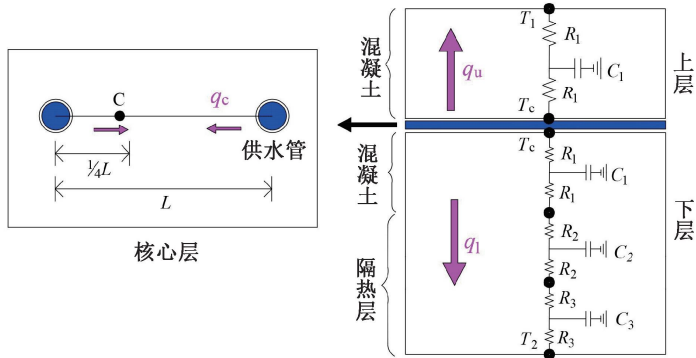


图1 普通混凝土辐射地板内部传热原理示意图

1.2 内嵌加肋管混凝土辐射地板核心层传热过程

内嵌加肋管混凝土辐射地板核心计算层传热原理示意图如图2所示, 其中: η_{up} 表示核心计算层上部假想肋片处的肋片效率; η_{low} 表示肋片处的假想肋片效率; η_{fin} 表示金属肋片处的肋片效率; d_1 和 d_2 分别表示供水管内径和外径, m ; T_w 、 T_p 、 T_c 和 T_f 分别表示供水温度、管外壁温度、核心层温度和肋片平均温度, $^{\circ}C$; 等效供水管为假想无肋圆管, 其传热等效内嵌加肋管的传热。与普通混凝土辐射地板相比, 内嵌加肋管混凝土辐射地板核心计算层厚度增加了一半肋高^[16]。为计算肋片对传热的影响, 将核心计算层处传热分为上部、下部及肋片处3部分传热。同时假设核心计算层热容均匀分布在上下两层混凝土中, 只考虑其导热热阻。

假设供水管道之间存在假想肋片, 供水管道通过该肋片与周围混凝土传热。采用肋片效率法, 将肋片与周围混凝土的换热看作假想肋片内部有一负热源。因此, 供水管壁与周围混凝土的二维传热可以简化为一维传热。

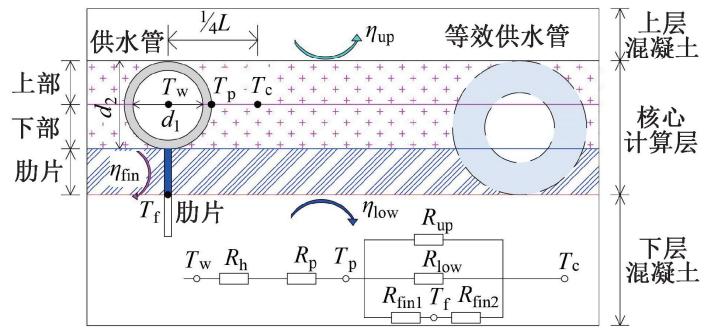


图2 内嵌加肋管混凝土辐射地板核心计算层传热原理示意图

管内水对流换热热阻 R_h (单位 K/W), 可用式(1)计算:

$$R_h = \frac{1}{h \times \pi \times d_1 \times l} \quad (1)$$

其中: h 为供水管内水的对流传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; l 为计算段供水管长度, m 。

供水管导热热阻 R_p (单位 K/W), 可用式(2)计算:

$$R_p = \frac{\ln(d_2/d_1)}{2 \times \pi \times \lambda_p \times l} \quad (2)$$

其中: λ_p 为供水管导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。

管壁距离圆心处平均距离 L_d (单位 m), 可用式(3)计算:

$$L_d = \frac{\pi \times d_2}{8} \quad (3)$$

肋片效率^[19]:

$$\begin{cases} \eta = \tanh(m \times H_f) / (m \times H_f), \\ m = \sqrt{h_f \times U / (\lambda_f \times A)}, \\ h_f = \lambda_c / (D + \delta_f) \end{cases} \quad (4)$$

其中: η 为假想肋片效率; m 为代数式, $1/m$; H_f 为假想肋片高度, m ; h_f 为假想肋片与周围混凝土传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; U 为假想肋片周长, m ; λ_f 为假想肋片导热系数, $W/(m \cdot K)$; A 为假想肋片截面积, m^2 ; λ_c 为混凝土导热系数, $W/(m \cdot K)$; D 为 $1/2$ 混凝土厚度, m ; δ_f 为 $1/2$ 假想肋片厚度, m 。

1.2.1 核心计算层上部传热

上半管壁与核心计算层导热热阻 R_{up} (单位 K/W), 可用式(5)计算:

$$R_{up} = \frac{R_c}{\eta_{up}} = \frac{L - 4 \times L_d}{2 \times \lambda_c \times d_2 \times l \times \eta_{up}} \quad (5)$$

其中: R_c 为上部管壁到核心温度点的传热热阻, K/W 。

1.2.2 核心计算层下部传热

由于核心计算层温度相等, 核心计算层下部导

热热阻为管壁到核心温度点的导热热阻。导热热阻可用式(6)计算:

$$R_{\text{low}} = R_c = \frac{L - 4 \times L_d}{2 \times \lambda_c \times d_2 \times l} \quad (6)$$

其中: R_{low} 为下半管壁与核心计算层的导热热阻, K/W。

1.2.3 肋片处传热

a) 管壁到金属肋片平均温度处热阻 R_{fin1} (单位 K/W), 可用式(7)计算:

$$R_{\text{fin1}} = \frac{H_F}{\lambda_F \times l \times \delta_F \times \eta_F} \quad (7)$$

其中: H_F 为 1/2 金属肋片高度, m; λ_F 为金属肋片导热系数, W/(m·K); δ_F 为金属肋片厚度, m; η_F 为金属肋片的肋片效率, 计算方法参考式(4), 将假想肋片的物性参数换为金属肋片。此时 D 为 1/4 管间距, m; δ_f 为 1/2 金属肋片厚度, m。

b) 肋片与核心计算层导热热阻 R_{fin2} (单位 K/W), 可用式(8)计算:

$$R_{\text{fin2}} = \frac{R_c}{\eta_{\text{low}}} = \frac{L}{2 \times \lambda_c \times d_2 \times l \times \eta_{\text{low}}} \quad (8)$$

内嵌加肋管核心计算层的总热阻 R (单位 K/W), 可用式(9)计算:

$$R = R_h + R_p + \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{up}}} + \frac{1}{R_{\text{low}}} + \frac{1}{R_{\text{fin1}} + R_{\text{fin2}}}} \quad (9)$$

1.3 等效无肋混凝土辐射地板核心层传热过程

等效热阻简化后的无肋辐射地板核心层传热原理示意图如图 3 所示, 其中: η'_{up} 为无肋圆管上部假想肋片的肋片效率; η'_{low} 为无肋圆管下部假想肋片的肋片效率; d'_2 为无肋圆管外径, m; T'_p 为等效无肋圆管外壁温, °C。等效无肋圆管混凝土辐射地板, 其供水管内径等于原内径, 外径为原核心计算层厚度, 除核心计算层外其余结构保持不变。此时, 等效无肋圆管核心计算层处的传热过程为管内壁到管外壁, 管外壁再到核心温度计算点处的传热, 分为上部和下部。

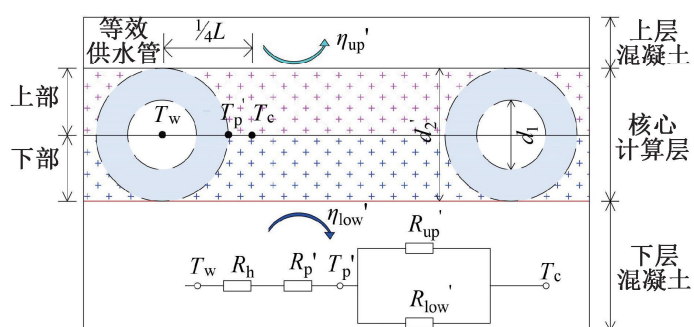


图 3 等效无肋混凝土辐射地板核心层传热原理示意图

等效圆管管壁导热热阻 R'_p (单位 K/W), 可用式(10)计算:

$$R'_p = \frac{1}{2 \times \pi \times \lambda'_p \times l} \ln \frac{d'_2}{d_1} \quad (10)$$

其中: λ'_p 为等效无肋圆管的导热系数, W/(m·K)。

等效圆管管壁距离圆心处的平均距离 L'_d (单位 m), 可用式(11)计算:

$$L'_d = \frac{\pi \times d'^2_2}{8} \quad (11)$$

1.3.1 等效圆管核心计算层上部传热

上半管外壁与核心计算层导热热阻 R'_{up} (单位 K/W), 可用式(12)计算:

$$R'_{\text{up}} = \frac{R_c}{\eta'_{\text{up}}} = \frac{L - 4 \times L'_d}{2 \times \lambda_c \times d'_2 \times l \times \eta'_{\text{up}}} \quad (12)$$

1.3.2 等效圆管核心计算层下部传热

下半管外壁与核心计算层导热热阻 R'_{low} (单位 K/W), 可用式(13)计算:

$$R'_{\text{low}} = \frac{R_c}{\eta'_{\text{low}}} = \frac{L - 4 \times L'_d}{2 \times \lambda_c \times d'_2 \times l \times \eta'_{\text{low}}} \quad (13)$$

等效圆管核心计算层的总热阻 R' (单位 K/W), 可用式(14)计算:

$$R' = R_h + R'_p + \frac{1}{\frac{1}{R'_{\text{up}}} + \frac{1}{R'_{\text{low}}}} \quad (14)$$

令式(9)与式(14)等式右边相等, 可解得等效圆管的导热系数 λ'_p 。

1.4 内嵌加肋管混凝土辐射地板传热量

在混凝土辐射地板中, 以上层混凝土为例, 已知结构参数可以得到混凝土层的吸热反应系数 $X(j)$ 和传热反应系数 $Y(j)$, 可用式(15)——(16)计算:

$$\begin{cases} X(0) = k + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i}{\Delta\tau} (1 - e^{s_i \times \Delta\tau}), j = 0; \\ X(j) = - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i}{\Delta\tau} (1 - e^{s_i \times \Delta\tau})^2 e^{(j-1) \times s_i \times \Delta\tau}, j \geq 1 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} Y(0) = k + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{B_i}{\Delta\tau} (1 - e^{s_i \times \Delta\tau}), j = 0; \\ Y(j) = - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{B_i}{\Delta\tau} (1 - e^{s_i \times \Delta\tau})^2 e^{(j-1) \times s_i \times \Delta\tau}, j \geq 1 \end{cases} \quad (16)$$

其中: $A_i = -\frac{A(s_i)}{s_i^2 \times B'(s_i)}$; $B_i = -\frac{1}{s_i^2 \times B'(-s_i)}$; s_i 为传递矩阵中 $B(s)$ 的根值; $\Delta\tau$ 为利用单位三角波函数离散温度边界条件时的时间间隔, h; k 为上

层混凝土的传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

采用反应系数法计算热流时,若已知前一时刻的热流密度,可以使用公比法简化计算,但需要对反应系数进行修正,修正公式为:

$$\begin{cases} Y_0(0) = Y(0), j = 0; \\ Y_0(j) = Y(j) - C_1 \times Y(j-1), j \geq 1 \end{cases} \quad (17)$$

其中: $C_1 = \exp(s_1 \times \Delta\tau)$ 。

吸热反应系数 $X(j)$ 修正同上式,若扰量作用在混凝土内侧,则 n 时刻混凝土外侧的热流密度 Q_n (单位 W/m^2),可用式(18)计算:

$$Q_n = \sum_{j=0}^m (Y_0(j) \times t_i(n-j \times \Delta\tau) - X_0(j) \times t_o(n-j \times \Delta\tau)) + C_1 \times Q_{n-1} \quad (18)$$

其中: t_i 、 t_o 分别为混凝土内、外侧温度, $^\circ C$; Q_{n-1} 为前一时刻的热流密度, W/m^2 。对于混凝土辐射地板而言, m 一般取 16 项,混凝土越厚时,应取的项数越大。

在计算内嵌加肋管混凝土辐射地板传热时,整个系统传热可以分为 3 个部分:核心计算层处传热、核心计算层与上层混凝土传热、核心计算层与下层混凝土传热,任意时刻以上每个部分可以写为:

a) 上层混凝土下边界:

$$\begin{aligned} q_{cl}(n) = & \sum_{j=0}^{m_1} (X_0^1(j) \times t_c(n-j \times \Delta\tau) - \\ & Y_0^1(j) \times t_1(n-j \times \Delta\tau)) + C_1 \times q_{cl}(n-1) \end{aligned} \quad (19)$$

其中: $q_{cl}(n)$ 为上层混凝土下表面处的热流密度, W/m^2 ; $X_0^1(j)$ 、 $Y_0^1(j)$ 分别为上层混凝土吸热与传热反应系数, $W/(m^2 \cdot K)$; t_c 、 t_1 分为辐射地板核心计算层、上表面温度, $^\circ C$; $q_{cl}(n-1)$ 为上层混凝土下表面前一时刻的热流密度, W/m^2 。

b) 下层混凝土上边界:

$$\begin{aligned} q_{c2}(n) = & \sum_{j=0}^{m_2} (X_0^2(j) \times t_c(n-j \times \Delta\tau) - \\ & Y_0^2(j) \times t_2(n-j \times \Delta\tau)) + C_2 \times q_{c2}(n-1) \end{aligned} \quad (20)$$

其中: $q_{c2}(n)$ 为下层混凝土上表面处的热流密度, W/m^2 ; $X_0^2(j)$ 、 $Y_0^2(j)$ 分别为下层混凝土吸热与传热反应系数, $W/(m^2 \cdot K)$; t_2 为保温层外侧环境温度, $^\circ C$; $q_{c2}(n-1)$ 为下层混凝土上表面前一时刻的热流密度, W/m^2 。

c) 核心计算层:

$$q_{oc} = (t_o - t_c) \times k_c \quad (21)$$

其中: q_{oc} 为供水管与核心温度计算点的热流密度, W/m^2 ; t_o 为供水温度, $^\circ C$; k_c 为供水管与核心温度计算点的传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

由节点处能量守恒可得到:

$$q_{c1} + q_{c2} = q_{oc} \quad (22)$$

将 t_o 、 t_1 、 t_2 及相应的吸热反应系数、传热反应系数代入式(22),可得任意时刻核心计算层温度 t_c 。将温度参数(t_o 、 t_1 、 t_2 、 t_c)代入式(19)~(21),可得任意时刻辐射地板上、下板表面和核心计算层的热流密度。

2 内嵌加肋管混凝土辐射地板等效热阻传热模型实验

2.1 实验方案

2.1.1 实验装置

内嵌加肋管混凝土辐射地板热性能实验装置如图 4 所示。实验在密闭性良好的室内环境中进行,内嵌加肋管混凝土辐射地板试块尺寸为 $1050.0 \text{ mm} \times 1050.0 \text{ mm} \times 120.0 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高)。实验装置由恒温冷热源系统、保温水箱、水泵、流量计、混凝土辐射地板试验块、供回水管道和数据采集设备组成。为防止室内气流对实验结果的干扰,在混凝土试块上加一个由宣纸构成的保护罩。

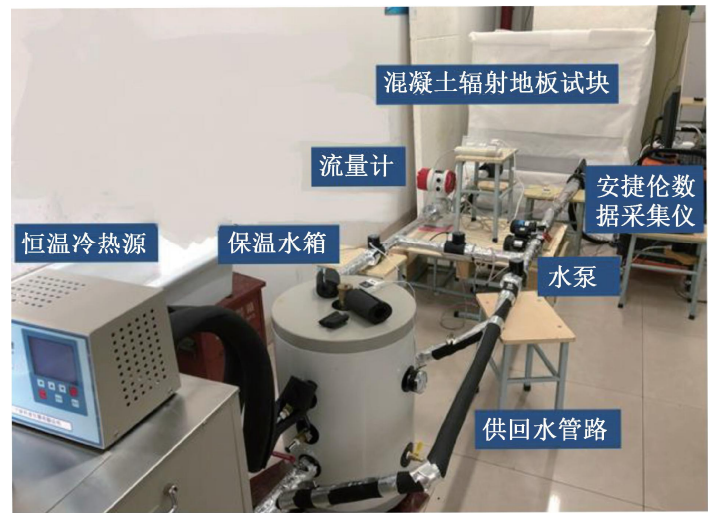


图 4 内嵌加肋管混凝土辐射地板热性能实验装置照片

2.1.2 内嵌加肋管混凝土辐射地板试块概况和测点分布

内嵌加肋管混凝土辐射地板试块结构如图 5 所示,其中:内嵌管间距为 150.0 mm ;除上表面外,其余面用 25.0 mm 厚的橡塑板和 50.0 mm 厚的挤塑聚苯板进行保温。与普通混凝土辐射地板相比内嵌加肋管混凝土辐射地板试块供水管上贴合肋高为 40.0 mm ,肋厚为 2.0 mm 的金属肋片,指向下表面。

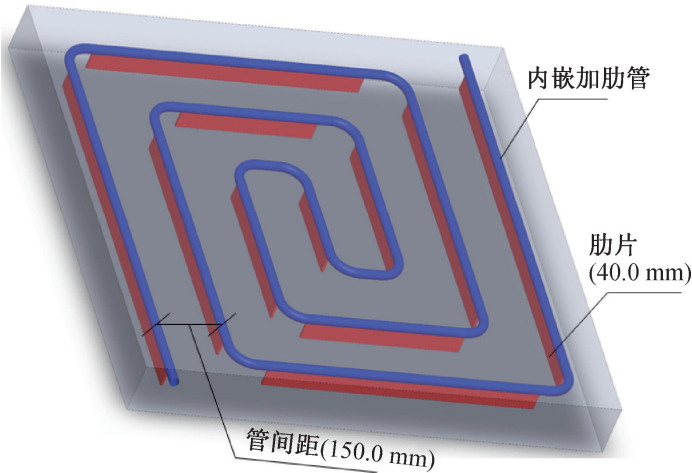
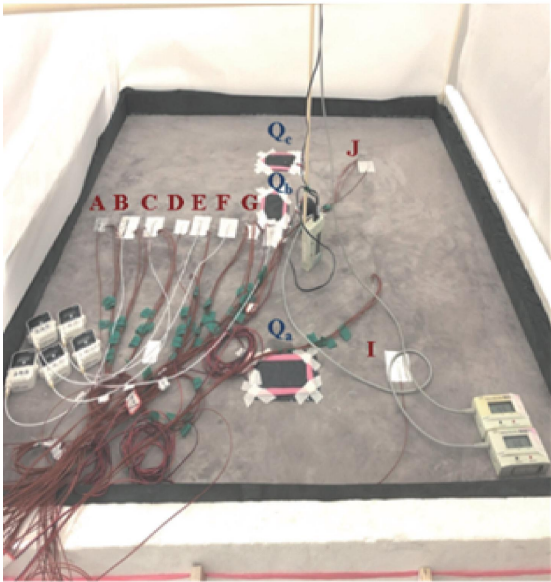
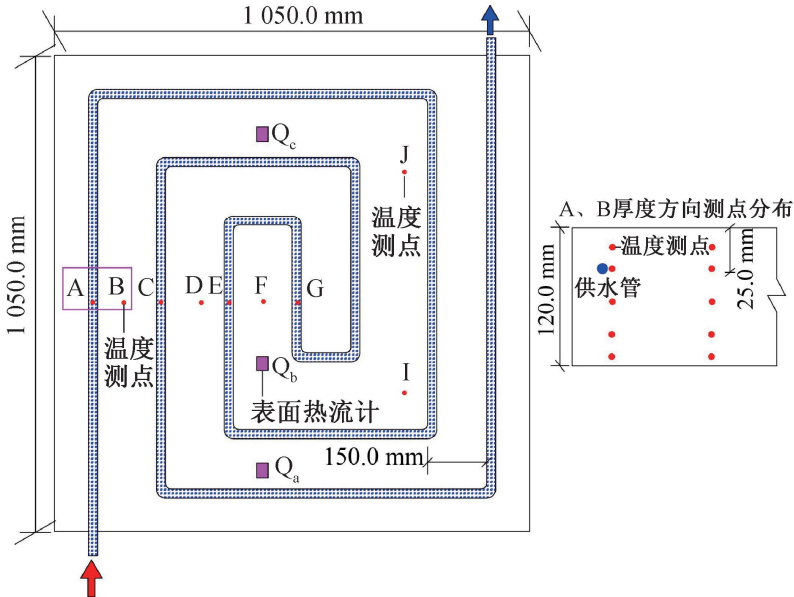


图 5 内嵌加肋管混凝土辐射地板试块结构示意图

由于混凝土试块的对称性,在其上表面共设置 9 个温度测点(A—I),试块内部预埋 54 个测试精度



(a) 测点实物照片



(b) 测点分布示意图

图 6 试块测点分布图

混凝土辐射地板的热响应性能可以通过辐射地板供暖末端的温度变化来反映。选择辐射地板核心计算层温度、上表面温度和蓄释热能力作为目标参数,将模型结果与实验值进行验证。实验中,总供热量由供回水温差、流量、比热容(4.18 kJ/(kg·K))相乘计算,散热量为上下表面热流计测量值,因此,蓄热量可以通过总热量与散热量之差来计算。

2.2 实验结果及分析

2.2.1 辐射地板末端温度值分析

将基于反应系数的等效热阻辐射地板传热模型在 30.0℃供水温度下,环境温度 16.5℃,供水流量 6 L/min,启停间隔为 6.0 h。该实验工况下,等效无肋圆管导热系数 $\lambda'_p=0.852\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,将内嵌

±0.1℃的 T 型热电偶,其中除表面热电偶外其余热电偶距离上表面依次为 12.5、25.0、57.5、82.5 mm 和 107.5 mm。同时,在上表面设置 3 个表面热流计测点(Q_a 、 Q_b 、 Q_c),罩内放置空气温度计,测点分布图如图 6 所示。

2.1.3 实验边界条件

实验边界条件为:各层混凝土的物理参数如密度(2500 kg/m³)、比热容(920 J/(kg·K))、导热系数(1.28 W/(m²·K))、试块厚度(120.0 mm)等。管道的物理参数为管径(20.0 mm)、埋深(25.0 mm)、管道导热系数(0.45 W/(m²·K))等。3 个节点温度分别是上下层辐射地板表面的空气边界层温度和供水温度。辐射地板表面综合传热系数(7.2 W/(m²·K)由实验值计算得到,且实验过程中变化不大。

加肋管混凝土辐射地板试块模拟值与测点的实验值进行验证。

当反应系数的离散间隔为 0.5 h 时,模拟值与实验值的对比结果如图 7 所示。其中核心温度为试块 25.0 mm 深度处的测点平均温度,上表面温度是上表面测点的平均温度。在供水初期(0~6.0 h)由于供水温度与外界环境温度的不稳定性,模拟值与实验值之间的相对误差较大。试块核心温度与上表面温度最大相对误差在第一个供水周期的前 2.0 h 内,分别达到 0.68℃(2.75%)和 0.76℃(3.41%)。3.0 h 后,试块温度的模拟值与实验值的相对误差均保持在 0.70℃(3.00%)以内,且两者的变化趋势呈现一致性。

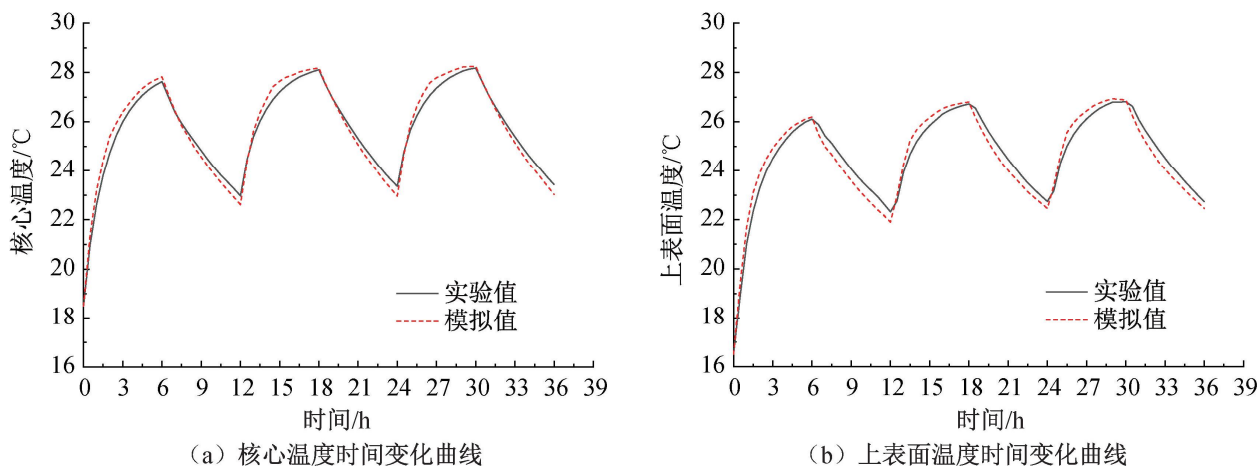


图7 离散间隔 0.5 h 模拟值与实验值时间变化曲线

当反应系数的离散间隔设定为 1.0 h 时,模拟值与实验值的对比结果如图 8 所示。对于核心温度而言,在第三个传热周期即 25.0~36.0 h 内,核心温度的模拟值出现较大波动。在第 25.0 h 时,核心温度的模拟值与实验值之间的相对误差达到 1.02 °C (4.12%)。上表面温度的模拟值和实验值之间的最

大相对误差出现在第 13.0 h 处,误差值为 1.06 °C (6.47%)。与 0.5 h 的离散间隔相比,1.0 h 离散间隔的情况下,模拟值与实验值之间的相对误差更大,且波动更为显著。原因是 1.0 h 离散间隔下的吸热和传热反应系数数值波动较大,导致计算的相对误差更大。

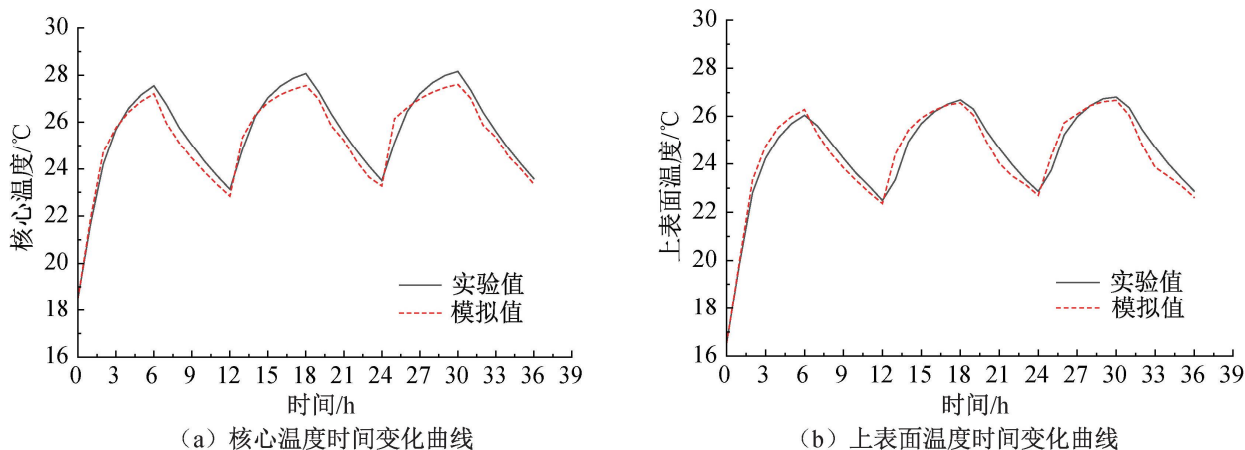


图8 离散间隔 1.0 h 模拟值与实验值时间变化曲线

2.2.2 辐射地板末端蓄释热能力分析

在 30.0 °C 供水工况和 0.5 h 离散间隔下,对内嵌加肋管混凝土辐射地板试块蓄释热能力的模拟值与实验值进行对比分析,其中试块蓄释热能力分别用第二运行周期启动阶段 12.0~18.0 h 的逐时平均蓄释热能力表示。

试块蓄释热能力模拟值与实验值的对比结果如图 9 所示。由图可知:蓄热能力模拟值和实验值的最大相对误差在 4.0 h 时,相差 12.32 W/m² (9.23%);释热能力模拟值和实验值的最大相对误差在 5.0 h 时,为 5.20 W/m² (9.47%),原因可能是实验中辐射地板上表面的对流换热系数发生改变,而模拟时认为表面对流换热系数不变,导致了较大的误差。两项指标的最大相对误差均未超过 10.00%。这一结果表明,该模型可以较为准确地模拟实验过程。

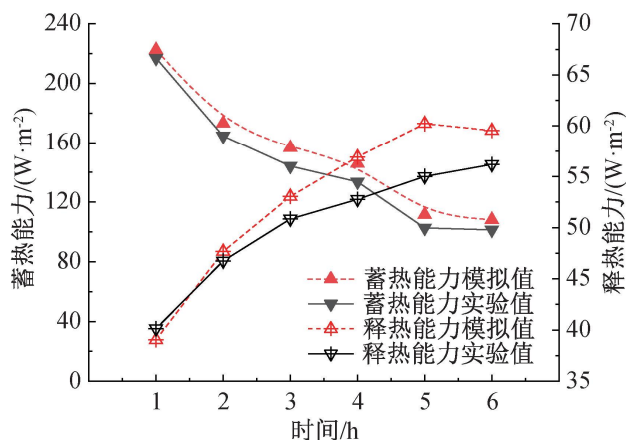


图9 蓄释热能力模拟值与实验值时间变化曲线

3 结 论

本文通过分析内嵌加肋管混凝土辐射地板传热过程,建立了基于反应系数法的内嵌加肋管混凝土辐射地板等效热阻传热模型,并将模型的模拟结果

与实验数据进行对比,验证了该模型的有效性,所得主要结论如下:

a)根据内嵌加肋管混凝土辐射地板的内部传热过程,推导出内嵌加肋管等效热阻的计算方法。采用该方法能够求解出不同结构内嵌加肋管混凝土辐射地板的等效热阻,便于分析其传热特性,简化计算。

b)在不同的反应系数离散间隔下,辐射地板温度值的模拟结果与实验结果变化趋势大致相同,但模拟的精度有所差异。其中离散间隔为 0.5 h 的模拟结果优于离散间隔为 1.0 h 的模拟结果。

c)根据实验结果从辐射末端温度与蓄释热能力的角度对传热模型进行了验证,结果显示辐射末端温度的模拟精度要高于蓄释热能力,表明该等效热阻传热模型能很好地复现实验结果,满足实际的工程需求。

本文通过实验验证了内嵌加肋管等效热阻传热模型的有效性,通过反应系数法用线性方程组来描述其传热过程,计算直观、快捷,有助于内嵌加肋管混凝土辐射地板在工程上的推广应用。然而,本文仅对比了内嵌加肋管混凝土辐射地板在供暖工况下的实验结果,并未考虑供冷工况,关于内嵌加肋管混凝土辐射地板系统的室内温热环境变化特性及节能效果有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 梁浩宇,贾捷,周轩,等. 用于热泵采暖的强制对流散热器多参数耦合优化[J]. 太阳能学报,2023,44(10):107-112.
- [2] Xu Y, Sun B B, Liu L J, et al. The numerical simulation of radiant floor cooling and heating system with double phase change energy storage and the thermal performance[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 40: 102635.
- [3] 范鹏,马立. 复合相变墙体供暖特性数值模拟研究[J]. 区域供热,2023(4):25-31.
- [4] 刘洁,杨英英,李爱征,等. 用于地板辐射采暖的多元水合盐复合相变砂浆的制备及性能研究[J]. 储能科学与技术,2023,12(12):3655-3662.
- [5] 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.
- [6] Sun W C, Zhang Y X, Ling Z Y, et al. Experimental investigation on the thermal performance of double-layer PCM radiant floor system containing two types of inorganic composite PCMs[J]. Energy and Buildings, 2020, 211: 109806.
- [7] 成鑫磊,穆锐,孙涛,等. 固液相变材料的封装制备及在建筑领域的研究进展[J]. 材料导报,2024,38(5):73-87.
- [8] Oravec J, Šikula O, Krajčík M, et al. A comparative study on the applicability of six radiant floor, wall, and ceiling heating systems based on thermal performance analysis[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 36: 102133.
- [9] 杨艺真. 混凝土辐射地板蓄热强化及热工性能研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2021: 31-40.
- [10] Jin X, Yang J C, Li M, et al. Experimental and numerical study on the thermal energy storage performance of a novel phase-change material for radiant floor heating systems [J]. Building and Environment, 2022, 223: 109491.
- [11] Wang Y D, Xu G Q. Numerical simulation of thermal storage performance of different concrete floors [J]. Sustainability, 2022, 14(19): 12833.
- [12] 王培,施志钢,张亮月,等. 基于 Fluent 的埋管式辐射地板传热及供冷能力研究[J]. 青岛理工大学学报, 2023, 44(2):154-160.
- [13] 匡德睿,张维政,王晓龙,等. 覆盖物对供暖地板传热阻的影响[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2022,39(1):64-68.
- [14] Chen Q, Li N, Feng W. Model predictive control optimization for rapid response and energy efficiency based on the state-space model of a radiant floor heating system[J]. Energy and Buildings, 2021, 238: 110832.
- [15] Wang X L, Zhang W K, Li Q Q, et al. An analytical method to estimate temperature distribution of typical radiant floor cooling systems with internal heat radiation [J]. Energy Exploration and Exploitation, 2021, 39(4):1283-1305.
- [16] Ma J H, Yang Y Z, Zheng X, et al. Impact on heat storage performance of concrete radiant floor with finned water supply pipes[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 103351.
- [17] Koschenz M, Dorer V. Interaction of an air system with concrete core conditioning[J]. Energy and Buildings, 1999, 30(2): 139-145.
- [18] Tian Z, Duan B D, Niu X L, et al. Establishment and experimental validation of a dynamic heat transfer model for concrete radiant cooling slab based on reaction coefficient method[J]. Energy and Buildings, 2014, 82: 330-340.
- [19] 章熙民. 传热学[M]. 6 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 43-49.

(责任编辑:康 锋)