

文章编号:1671-6833(2011)02-0006-04

以制冷剂 R22 为工质的地板辐射采暖模拟与优化

魏新利, 张富强, 简士钊, 龚咪咪, 陈万仁

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘 要:以空气源热泵为热源,直接用 R22 作为工质进行地板辐射采暖。在实验验证数值模拟可靠性的基础上,运用 ANSYS 软件分别对地板表面材料(瓷砖、木地板、毛毯),管间距(100~300 mm),填充层厚度(25~50 mm)影响地板表面温度均匀性和散热量进行模拟。结果表明:地面装饰层的材料对地板温度的均匀性和地板表面的散热量有着重要的影响;随着管间距的增大,地板表面温度和散热量分布更加不均匀;而填充层的厚度对地板表面的温度和散热量影响较小。

关键词:空气源热泵;地板表面温度;散热量;数值模拟

中图分类号:TK124;TU832

文献标志码:A

0 引言

地板辐射采暖成为现在建筑物采暖的一种流行的方式。以空气源热泵为热源,直接用制冷剂 R22 作为工质进行地板辐射采暖具有显著节能效果^[1]。基于制冷剂为直接加热热媒,无需二次热媒,制冷剂直接在地板盘中冷凝相变传热,其传递热量为水的 10 倍、空气的 20 倍^[2],单位热媒传热效率高。文献[3~5]研究了地板辐射采暖间歇和连续运行的工况下采暖的运行状况。但对地板辐射采暖来说,地板表面材料、管间距、填充层厚度等结构参数对于优化系统结构、降低成本、节能具有重要意义^[6]。本课题组运用有限元软件 ANSYS 分别对地板表面材料、管间距、填充层厚度等参数的影响进行分析,对地板表面温度均匀性和散热量进行模拟,并与实验值进行对比,最后得到地板结构参数的优化。

1 地板散热量

地板辐射采暖结构剖面如图 1 所示。地面层分别为瓷砖、木地板、地毯;找平层为水泥砂浆,作用是地面平整;填充层为细石混凝土,具有蓄热功能;保温层为聚苯乙烯泡沫板,目的是防止热量向下传递;楼板结构层为钢筋混凝土,目的是支撑楼板。地板上表面散热量以辐射和对流方式传热。辐

射传热是将地板表面的热量辐射到房间的各个地方,对流传热是将热量通过空气的流动来传递到房间的各个地方。地板的散热量与室内空气温度、非加热表面温度、室内空气流速及其表面特性(如发射率)有关,可以近似等于对流和辐射两部分热量之和:

$$Q = Q^e + Q^r \quad (1)$$

式中: Q 为地板总的散热量, W/m^2 ; Q^e 为地板表面与空气的对流换热量, W/m^2 ; Q^r 为地板的辐射换热量, W/m^2 。

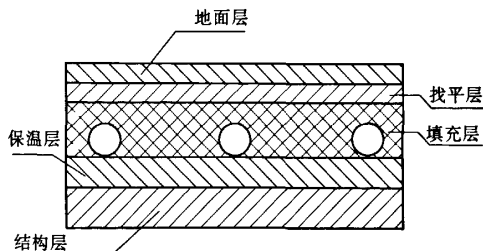


图 1 地板辐射采暖的结构剖面图

Fig. 1 The structure profile of radiant floor heating

2 地板供暖构造层内的传热模拟

地暖结构层中传热过程实际上是一个三维稳态导热过程,其具体的求解非常复杂。为简化问题,沿纵管方向截取微元段作为传热计算单元,如

收稿日期:2010-10-01;修订日期:2010-12-26

基金项目:河南省科技创新人才计划项目(0942005100177);郑州大学科技研究基金项目

作者简介:魏新利(1956-),男,河南辉县人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事化工过程技术与设备的研究开发, E-mail:xlwei@zzu.edu.cn.

图2所示, L 为管间距, a 为填充层厚度.由于沿管子轴线方向管壁的温度变化缓慢,沿管轴线方向的微弱导热可以忽略,这样就可以利用二维稳态的导热过程方程来求解该传热单元的温度分布和散热量.这个传热单元的二维稳态导热过程应满足以下微分方程:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

式中: t 表示地板的温度, $^{\circ}\text{C}$.

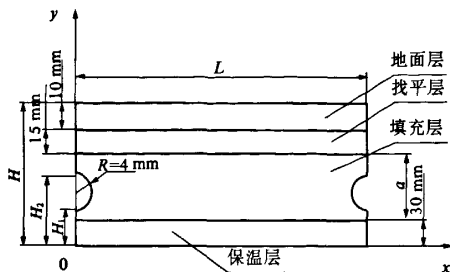


图2 地板辐射采暖的传热单元

Fig.2 Heat transfer unit of radiant floor heating

2.1 左右绝热边界

所取传热计算单元左右为对称结构,可以认为通过左右边界没有热量传递.因此,计算单元左右边界视为绝热边界,边界条件方程为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial y} &= 0 & (x=0, 0 < y < H) \\ \frac{\partial t}{\partial y} &= 0 & (x=L, 0 < y < H) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2.2 地板盘管管壁面边界

在地板盘管内,制冷剂冷凝换热,制冷剂 R22 与管内壁之间换热为有相变的对流换热,因此,地板盘管传热管壁面边界为第三类边界条件,可表示为:

$$-\lambda_p \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=\frac{L}{2}} = h_1 \cdot (t_{s=\frac{L}{2}} - t_{con}) \quad (4)$$

$$(0 \leq x \leq d/2, H_1 \leq y \leq H_2) \quad (5)$$

式中: λ_p 为传热管导热系数; t_{con} 为制冷剂冷凝温度; h_1 为制冷剂冷凝换热系数.文中空气源热泵采用 R22 为制冷剂,引入 R22 水平管内冷凝换热系数可采用下式计算^[1,7]:

$$h_1 = 0.455 \cdot \left(\frac{\beta}{q d_i} \right)^{1/3} \quad (6)$$

式中: d_i 为管内径; β 为制冷剂 R22 在冷凝温度下物性参数; q 为平均热流密度,可由下式得:

$$\beta = \frac{\lambda^3 \rho^2 \gamma}{\mu} \quad (7)$$

$$q = \frac{q_m \Delta h}{\pi d_i l} \quad (8)$$

$$q_m = \frac{q_v \eta_v}{v_1} \quad (9)$$

式中: $\lambda, \rho, \gamma, \mu$ 分别为制冷剂冷凝温度下的导热率、密度、潜热、动力黏度; Δh 为制冷剂管路进出口焓差; l 为地板传热管长; q_v 为管路制冷剂体积流量; η_v 为压缩机容积效率,取 0.99; v_1 为压缩机进气吸气比容.制冷剂的物性参数参见文献[1],冷凝温度为 29°C ,制冷剂的传热系数为 $1\,807.99 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[1].

2.3 地板表面复合换热边界

地板表面传热包括两方面:地表与空气的自然对流换热及地表与其它维护结构内表面及人体的辐射换热,为第三类边界条件,边界条件方程为:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial y} = h_{tot} \cdot (t_f - t_i) \quad (0 \leq x \leq L, y = H) \quad (10)$$

式中: t_f, t_i 分别为地表温度、室内空气温度; h_{tot} 为地表与室内空间的复合总换热系数,等于辐射换热系数 h_r 和对流换热系数 h_c 之和.

2.3.1 表面对流换热系数

地板上表面对流换热属于热面朝上的水平面对流换热.根据文献[8],得

$$\alpha_c = 0.54 \lambda \left(\frac{g \beta \Delta t}{\nu^2} \right)^{1/4} \left(\frac{\Delta t}{l} \right)^{1/4} \quad (11)$$

F. Alamdari 和 G. P. Hammond^[9]在 1983 年将上式修正为:

$$\alpha_c = 1.4 \left(\frac{\Delta t}{l} \right)^{1/4} + (1.63 \Delta t^{1/3})^{1/9} \quad (12)$$

式中: l 为定型尺寸,矩形地板取两个边长的平均值,一般住宅房间取 3~5 m; Δt 为地板表面与空气温度之差.

2.3.2 辐射换热系数

$$\alpha_r = \sigma \varepsilon \frac{T_d^4 - \text{AUST}^4}{t_d - t_a} \quad (13)$$

对于地板辐射供暖而言,地板温度 t_d 取 $24 \sim 29^{\circ}\text{C}$; t_a 取 $16 \sim 20^{\circ}\text{C}$; $T_d = 273 + t_d$; AUST 取 $289 \sim 291 \text{ K}$.通过计算,得到 h_{tot} 为 $10.31 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,这属于第三类边界条件.

以上公式给出了低温地板辐射供暖构造层的传热方程和边界条件,使用有限元软件 ANSYS 进行模拟.

3 数值模拟方法的实验验证

3.1 地板辐射采暖结构参数

地板辐射采暖结构中的保温层的厚度为 30 mm,地表面材料分别采用瓷砖、木地板、毛毯,填充层的厚度分别为 25,30,35,40,45,50 mm,管间距分

别为 100, 150, 200, 250, 300 mm; 填充层、找平层、保温层、瓷砖、地毯、木地板的导热系数分别为 1.28, 0.93, 0.046, 1.1, 0.036, 0.14 W/(m²·K)。

3.2 模拟方法的实验验证

表 1 为地表材料为瓷砖, 填充层厚度为 45 mm 时地表温度实验数据与模拟数据的对比结果。

表 1 实验数据与模拟数据的对比
Tab. 1 The comparison of experimental data and simulation data

管间距/mm	地表实验温度/ ^① ℃	地表模拟温度/℃	最大相对误差/%
100	26.5 ~ 27.2	24.8 ~ 24.9	8.5
150	24.1 ~ 25.1	24.1 ~ 24.3	3.2

由表 1 可见, 地板表面实测温度稍高于模拟值, 最大相对误差在 8.5% 以内, 这在工程上这是可以接受的。因此, 采用上述简化传热模型对地板辐射采暖构造层内的传热模拟结果是可靠的。

4 模拟结果与分析

4.1 地板表面材料对散热量的影响

图 3 分别给出了采用瓷砖、木地板和毛毯表

面时, 地板表面散热量与填充层厚度及管间距的变化情况。可以看出, 当填充层与管间距一定时, 瓷砖地面层地板的散热量最大, 木地板次之, 毛毯地面层地板的散热量最小。

因此, 采用地板采暖系统进行室内供暖时, 应避免采用毛毯装饰层, 而用瓷砖或大理石作为装饰层, 以达到室内采暖的最佳效果。

4.2 管间距对温度的影响

图 4 为填充层厚度 25 mm 时, 不同地板材料的表面散热量与管间距的变化。由图 4(a) 看出, 随着管间距的增大, 不同地板表面材料的散热量都减小。以瓷砖为例, 管间距为 100 mm 时, 地板表面的散热量比较均匀, 地板表面散热量的最大与最小值基本保持一致。当管间距增加到 300 mm 时, 地板表面散热量的最大与最小值的差值很大, 即地板表面散热量不均匀。

由图 4(b) 可以看出, 地板表面温度的变化规律与散热量基本一致。随着管间距的增加, 地板表面温度的最大与最小值的差值变大, 温度的分布不均匀, 地板采暖的舒适性降低。

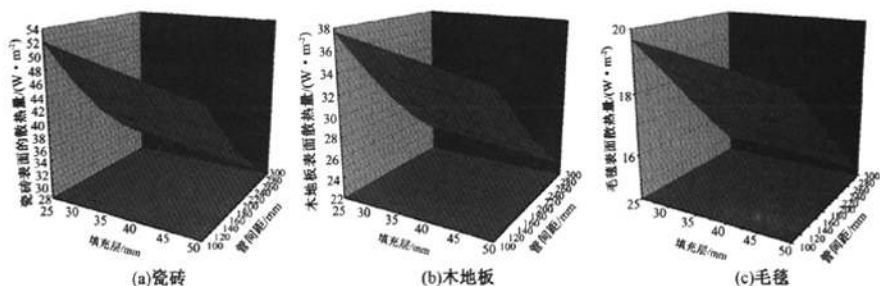


图 3 瓷砖、木地板、毛毯表面散热量与管间距及填充层厚度的关系
Fig. 3 The Ceramic tile, wood, board blanket surface heat load and the relationship of tube spacing and the thickness of filling layer

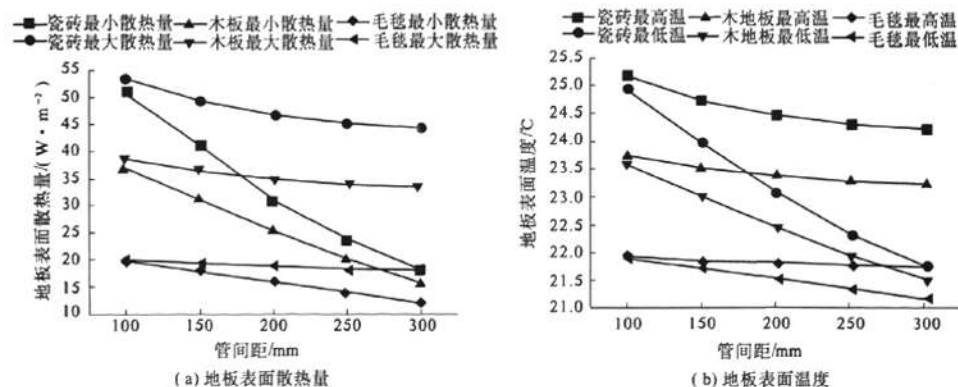


图 4 地板表面散热量和地板表面温度随管间距的变化
Fig. 4 The changes of floor surface heat and the floor surface temperature with tube spacing

4.3 填充层厚度对温度和散热量的影响

图5为管间距100 mm、150 mm时,不同材料地板表面温度与填充层厚度的变化关系。可以看出,随着填充层厚度的增加,地板表面温度趋于均匀,说明填充层的厚度对地板表面温度影响不大。

图6为管间距100 mm、150 mm时,不同材料地板表面散热量与填充层厚度的变化关系。由图可见,随着填充层厚度的增加,地板表面散热量趋于均匀;不同材料的地表散热量差别很大。

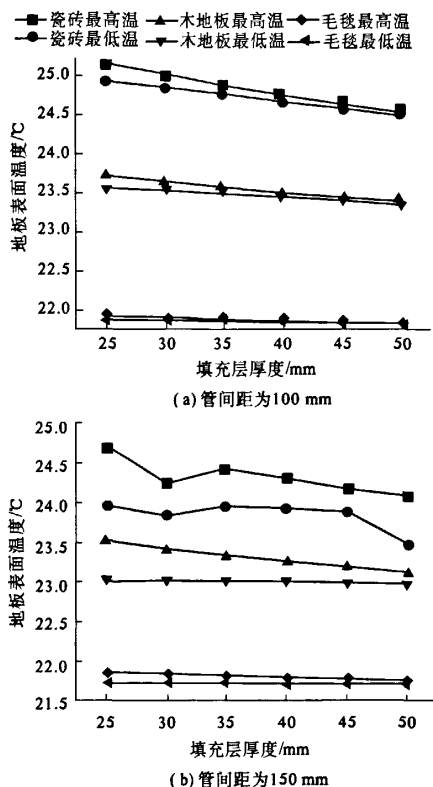


图5 管间距为100、150 mm,地板表面温度与填充层厚度的变化关系

Fig.5 The changes of surface temperature with filling layer in the distance of 100, 150 mm

5 结论

(1)在地板辐射采暖中,制冷剂 R22 工质优于水,从能量传递上说避免了热媒的二次传热和热量的损失。

(2)实验与模拟的结果对比后,验证了两者的结果基本符合。管间距为100、150 mm时,基本能满足设计的要求。显示了地表散热量和地表温度随着管间距和填充层的厚度之间的变化关系。采用制冷剂 R22 作为工质,为地板辐射采暖的结

构提供设计参考依据。

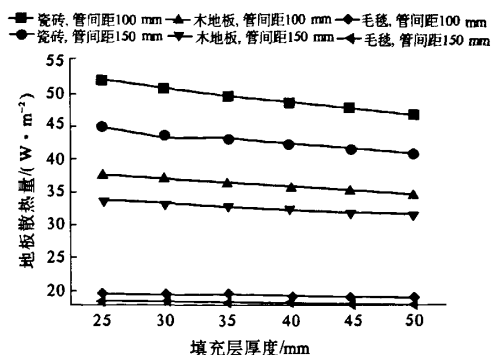


图6 管间距为100、150 mm,地板表面散热量与填充层厚度的变化关系

Fig.6 The changes of heat load with filling layer in the distance of 100, 150 mm

参考文献:

- [1] 曾章传. 空气源热泵直接地板辐射采暖能效及地板传热研究[D]. 郑州: 郑州大学化工与能源学院, 2010.
- [2] 叶盛, 陈汝东. 数码涡旋 VRV 空调系统节能因数的分析[J]. 应用能源技术, 2006(9): 17-20
- [3] 吴锦京, 卢纪富, 曾章传, 等. 空气源热泵直接地板采暖运行方式实验研究[J]. 暖通空调, 2010, 40(1): 71-74.
- [4] WEI Xin-li, ZENG Zhang-chuan, WU Jin-jing. An experimental study on direct radiant floor heating system with DSHP using R22 flow[C]//The International Symposium on Heating, Ventilating and Air Condition 2009, Nanjing, 2009: 1550-1557
- [5] WEI Xin-li, WU Jin-jing, ZENG Zhang-chuan. An experimental study on continuous and intermittent control for radiant floor heating system with DSHP[C]//The International Symposium on Heating, Ventilating and Air Condition 2009, Nanjing, 2009: 1542-1549.
- [6] SATTARI S, FARHANIEH B. A parametric study on radiant floor heating system performance [J]. Renewable Energy, 2006, 31: 1617-1626.
- [7] KAYGUSUZ K, AYHAN T. Exergy analysis of solar-assisted heat-pump systems for domestic heating [J]. Energy, 1993, 18(10): 1077-1085.
- [8] 章熙民, 陈泽霁, 梅飞鸣. 传热学[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [9] ALAMDARI F, HAMMOND G P. Improved data correlations for buoyancy-driven convection in rooms [J]. Building Services Engineering, Research and Technology, 1983, 4(3): 106-112.

(下转第50页)

- [3] 马魁文, 杨好志. 悬臂式堆料机臂架的优化设计[J]. 起重运输机械, 2007, (8): 61-65.
- [4] 黄正强. 风作用载荷计算公式及影响因素的探讨[J]. 武器工业, 1990, 3(31): 31-34.
- [5] 陈峰. 80吨履带式起重机臂架的有限元分析[D]. 吉林: 吉林大学机电学院, 2009: 49-60.
- [6] 邹汶, 刘理, 王艳. 圆形预均化堆场堆取料机的设计[J]. 新世纪水泥导报, 2005(3): 5-9.
- [7] 朱春华, 郭秀云, 王少雷. 基于Pro/E和ANSYS的挖掘机动臂有限元分析[J]. 煤矿机械, 2009, 30(4): 73-75.
- [8] 高继云. 悬臂式混匀堆料机机械部分改造[J]. 矿山机械, 2008, 36(10): 69-70.

Finite Element Analysis of Stockyard Stacker Boom

XIA Jian-fang, TU Xing

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to verify the rationality of the existing stacker boom of stockyard. The author uses ANSYS/APDL design parameters of language, establishes finite element parameterization model applicable to the analysis of boom's frame changes under different structure parameters as well as model analysis, and calculates the deflection and intensity of the boom under the most dangerous situation. The results show that the maximum stress is 203.976 MPa, the deflection and load carrying value for 38.139 mm, and all the source of vibration frequency avoided booms inherent frequency. Therefore, from the aspect of static intensity and dynamic rigidity of the boom's structure, the design of boom meets structure requirements.

Key words: stacker boom; APDL; deflection; intensity; harmonic analysis

(上接第9页)

Simulation and Optimization of Floor Radiation Heating Structures with Refrigerant R22 as Working

WEI Xin-li, ZHANG Fu-qiang, JIAN Shi-zhao, GONG Mi-mi, CHEN Wan-ren

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: By using air source heat pump as the heat source, R22 could be directly used as refrigerant to acquire heat by floor. Based on the initial experiments to test the reliability of value simulation, we simulate the situation about how surface material, tube spacing, fill layer thickness affect the temperature uniformity and heat dissipation of floor respectively by using the ANSYS software. Our investigation shows that: the material of floor surface could strongly influence the temperature uniformity and heat dissipation of floor; with the increase of tube spacing, temperature and heat dissipation of floor tend to be uneven; fill layer thickness could hardly influence the temperature and heat dissipation of floor. Our research could provide a new view to practical projects.

Key words: air source heat pump; temperature of the floor; heat dissipation; simulation