

室内低温地板辐射采暖的温度分布 及湍流流动数值模拟

马良栋¹ 陶文铨¹ 戴颖² 孙德兴²

(1. 动力工程多相流国家重点实验室, 西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049;
2. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要 采用 $k-\varepsilon$ 模型和壁面函数法耦合辐射模型对低温地板辐射采暖房间进行了数值模拟, 通过分析室内温度分布特征及流动特性, 得出了室内空气温度分布随室内高度的变化关系、围护结构表面温度及热流的分布特性, 数值结果表明了在室内主流区域空气温度分布均匀, 其温差在 1°C 左右, 从而说明了低温地板辐射采暖舒适性的原因, 数值模拟结果也表明了辐射在地板采暖中的重要性, 辐射热流达到了总热流的 $50\% \sim 60\%$ 。

关键词 低温地板辐射采暖; 湍流; 数值模拟

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2005)03-0501-03

NUMERICAL SIMULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION AND TURBULENT FLOW IN THE RADIANT FLOOR HEATING ROOM

MA Liang-Dong¹ TAO Wen-Quan¹ DAI Ying² SUN De-Xing²

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, School of Energy & Power Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract This paper investigates turbulent air convection coupled with thermal radiation in the radiant floor heating room by numerical simulation. The $k-\varepsilon$ two-equation turbulent model is used in the numerical simulation of in-room air flow field and temperature distribution. According to the analysis of temperature distribution of air in the room's vertical direction and the wall surfaces temperature and heat flux distribution characteristics, the result show that except the boundary layer part along the wall, air temperature of the room are more or less uniform with 1°C difference, and this is the reason why radiant floor heating can cause to a good comfort. The numerical simulation results show also that the radiant heat transfer is very important in the floor heating room. It is $50 \sim 60$ percent of total thermal flux.

Key words the radiant floor heating room; turbulence; numerical simulation

1 引言

地板辐射采暖是一种利用建筑物内部地面进行供暖的系统, 该系统具有节能、舒适、不占建筑面积以及环保等优点。随着建筑节能意识及节能水平的提高, 地板辐射采暖系统在我国北方地区得到了日益广泛的应用。近年来我国学者对该系统进行了系统的数值分析及试验研究^[1~4]。本文通过数值模拟的方法, 说明了地板采暖舒适性的原因, 为工程设

计提供了理论依据。

2 数理模型与计算方法

2.1 对流数学模型

房间几何模型如图 1 所示, 外墙壁厚为 δ_w , 房间高 $H = 2.8 \text{ m}$, 长 $L = 4 \text{ m}$ 外墙壁受到对流换热的影响, 内墙壁受到自然对流换热及其他表面的辐射的相互作用。计算做如下假设: (1) 流动为二维、稳态、湍流; (2) 地板表面为均匀热流边界条件。二

收稿日期: 2005-01-19; 修订日期: 2005-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50476046, 50425620)

作者简介: 马良栋 (1976-), 男, 陕西镇巴人, 博士研究生, 主要从事强化传热及湍流数值模拟的研究。

维湍流的数学模型见文献 [5]，近壁区采用壁面函数法。

2.2 辐射数学模型

内墙表面之间的辐射按固体表面间辐射换热的代数算法，有

$$q_r(I) = \frac{\epsilon(I)}{1 - \epsilon(I)} [E_b(I) - J(I)] \quad (1)$$

$$J(I) = \epsilon(I)\sigma_0 T^4(I) + [1 - \epsilon(I)] \sum_J x_{IJ} J(J) \quad (2)$$

计算辐射换热 q_r 时，为节省计算时间并且达到一定的计算精度，采用图 2 所示的辐射计算单元 [6]，每个单元温度的计算公式为：

$$T_I^4 = \frac{1}{A_I} \left(\sum_{i \in I} A_i T_i^4 \right) \quad (3)$$

式中 I 为辐射计算单元数， i 为对流网格划分在该辐射计算单元内的网格单元数。

在求解了辐射方程之后，则对流问题计算单元的净辐射热流密度为：

$$q_{r,i} = q_{r,I} + e_i - e_I \quad (4)$$

其中： $e = \epsilon\sigma T^4$ ，房间墙壁发射率为 0.8，顶棚发射率为 0.9，地面发射率取为 0.6。

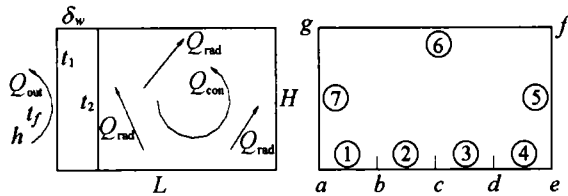


图 1 房间几何模型 图 2 辐射单元的划分

2.3 计算方法与边界条件

为简化计算，通过外墙的导热当作一维平板导热来处理，在此做法下，通过给定的周围流体温度 t_f 及换热系数 h 来推出外墙内壁温度 t_2 。从而将外墙内壁按给定温度的边界条件处理，这样计算区域不包括墙壁的厚度在内。

$$t_2 = \frac{t_f \delta_e / \lambda_e + (1/h + \delta_w / \lambda_w)(t_p + q_{red} \delta_e / \lambda_e)}{1/h + \delta_w / \lambda_w + \delta_e / \lambda_e} \quad (5)$$

式中 δ_e 为离开壁面第一个内节点到壁面的距离， λ_e 为空气的导热系数， t_p 为离开壁面第一个内节点的温度。能量方程的边界条件在顶棚及内墙处为绝热条件，地板处 $q_{con} = q_{in} - q_r$ 。对于速度在壁面 $u = v = 0$ 。 k 方程和 ϵ 的边界条件按壁面函

数法处理。耦合方程求解采用 SIMPLET^[7] 算法，代数方程的求解采用 BASIS^[8] 求解方法。迭代计算收敛标准为要求在内节点上的连续性方程余量的代数和 (R_{sum}) 与参考质量流量 q_m 的比值 R_{sum}/q_m 小于 10^{-7} 。

3 计算结果分析

本文假设计算以哈尔滨地区为对象，图 3 和图 4 给出了地板加热量 $q = 90 \text{ W/m}^2$ 时室内温度场和流场分布。从图 3 可以看出，室内大部分区域温度分布均匀，房间靠近内墙处温度高于靠近外墙处。整个房间内，空气温度分布均匀。从图 4 可以看出，计算区域内，仅在壁面附近较薄的边界层内速度较高，而在房间内部的大部分区域，速度很低。这样的温度及速度分布对室内舒适性有重要的影响。

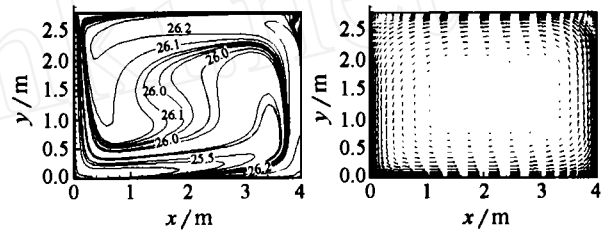


图 3 室内温度场分布 (°C) 图 4 室内流场分布

图 5 给出了沿室内高度方向，在不同截面处的温度分布，从图中可以看出在室内任何截面上沿高度方向温度分布均匀，温度梯度较小，只是在地板表面温度较高。图 5 的计算值基本符合人体的舒适性要求 [2]，这也就是低温地板采暖为什么具有舒适性的原因。

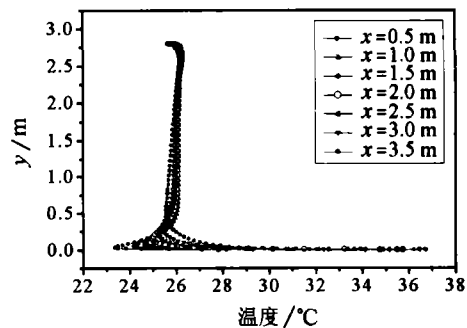


图 5 房间内的温度纵向分布

图 6 给出了围护结构表面的温度分布。从图 6 中可以看出，地板的温度变化比顶棚剧烈，在靠近外墙的一侧，温度较低，沿房间长度方向变化很快。但是对于顶棚只是在靠近外墙处有剧烈的温度变化，在房间内部温度变化较低。房间的外墙和内墙

的温度沿高度方向温度变化较大，特别在靠近地板附近。对于外墙壁，在没有保温的情况下，靠近地板外墙壁的温度也许低于露点温度，导致出现“结露”现象，对墙壁造成污染，要尽量避免。图 7 给出了围护结构表面辐射净热流的分布，同图 6 相比，两者的分布趋势是一致的，说明壁面的温度分布取决于围护结构各表面之间辐射的作用。

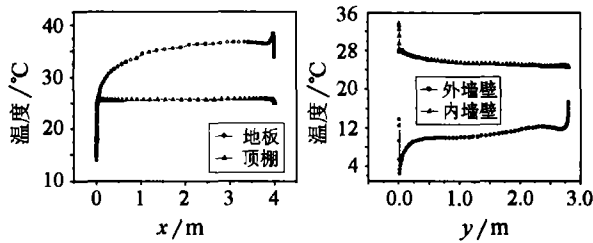


图 6 房间围护结构表面的温度分布

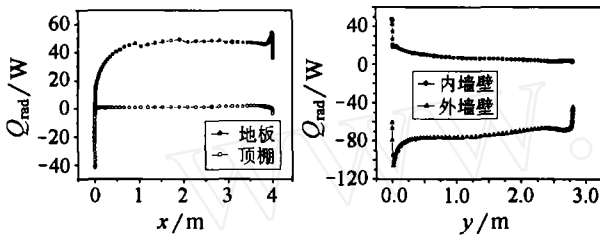


图 7 房间围护结构表面的辐射净热流分布

表 1 给出了在外墙没有保温的作用下房间围护结构的平均温度及室内平均温度随热流的变化，这时房间外墙的温度较低，而且辐射换热量占总热量的 53% 左右，与工程计算中取辐射换热量为总热量的 50% 较为接近。但是保温时，围护结构的平均传热系数不得超过 0.93 W/(m²·°C) 计算，情况大有改变，见表 2 所示，这时外墙壁的温度较高，且辐射换热量增加，达到 58% 左右。

表 1 无保温情况下围护结构平均温度及室内平均温度随热流的变化

Q (W/m ²)	顶棚平均温度 (°C)	地板平均温度 (°C)	外壁冷墙平均温度 (°C)	内墙平均温度 (°C)	室内平均温度 (°C)	Q _{con} (W)	Q _{rad} (W)	辐射率
100	30.2	40.2	14	30.2	30.5	183	217	54%
90	25.7	34.9	11	25.6	25.9	166	194	51%
80	21.1	29.6	8	21.1	21.4	150	170	53%
70	17.2	24.9	4.4	17.2	17.4	135	145	53%

表 2 保温情况下围护结构平均温度及室内平均温度随热流的变化

Q (W/m ²)	顶棚平均温度 (°C)	地板平均温度 (°C)	外壁冷墙平均温度 (°C)	内墙平均温度 (°C)	室内平均温度 (°C)	Q _{con} (W)	Q _{rad} (W)	辐射率
90	36.3	45.2	22.5	36.0	36.4	149	211	59%
80	31.7	39.9	18.8	31.5	31.8	135	185	58%

5 结 论

通过对低温地板采暖房间的湍流数值模拟，可以得出以下结论：

(1) 低温地板采暖房间温度出现分层分布，沿竖直方向，温度梯度较低，满足人体舒适时的室内温度高度曲线，从理论上说明了地板采暖给人舒适感的原因。

(2) 围护结构的表面平均温度取决于辐射的作用，在没有保温的情况下，辐射量占总热量的 53% 左右，这时外墙壁的温度较低，会出现低于露点温度的情况，但是在外墙壁保温时，辐射量增加，达到 58%，这时外墙壁的温度高于露点温度。

参 考 文 献

- [1] 杨巍. 低温地板辐射采暖的传热模拟. 暖通空调 HV&AC, 2001, 31(1): 73-75
- [2] 张焯. 低温地板辐射采暖的可行性分析. 能源研究与利用, 2002, 15(5): 33-36
- [3] 胡松涛, 于慧俐, 李绪泉, 宗立华. 地板辐射供暖系统运行工况动态仿真. 暖通空调, HV&AC, 1999, 29(4): 15-17
- [4] 孙德兴, 陈海波, 张吉礼. 低温热水供暖技术推广中尚需研究解决的问题. 暖通空调 HV&AC, 2002, 32(3): 99-102
- [5] Barakos G, Mitsoulis E. Natural Convection Flow in a Square Cavity Revisited: Laminar and Turbulent Models with Wall Function. Int. J. of Numer. Methods Fluids, 1994, 18(7): 685-719
- [6] Cheng X, Muller U. Turbulent Natural Convection Coupled with Thermal Radiation in Large Vertical Channels with Asymmetric Heating. Int. J. Heat Mass Transfer, 1998, 41(12): 1681-1692
- [7] 陶文铨. 数值传热学. 第 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001. 162-165
- [8] Kim Charn-Jung, Ro Sung-Tack. A Block-Correction Aided Strongly Implicit Solver for the Five-Point Formulation of Elliptic Differential Equations. Int. J. Heat Mass Transfer, 1995, 38(6): 999-1008