

局部铺设热水盘管墙体辐射系统模拟 及铺设面积对热舒适的影响

赵玉倩, 徐斌

(中国科学技术大学热科学和能源工程系, 安徽合肥 230027)

摘要:针对墙体辐射供暖系统进行了模拟计算, 提出局部铺设热水盘管的构想. 利用 Fluent 进行模拟计算, 分析了非稳态下的墙体热流密度、平均温度和温度场分布, 并对不同铺设面积的居室热舒适性进行了分析. 计算结果表明, 在进出水温差为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、热水流量是 $0.3\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 且管间距为 250 mm 的前提下, 局部铺设墙体热水盘管的铺设面积占全部铺设的 $2/3$ 时, 室内便能达到人体热舒适要求, 此时平均期望满意度 (PMV) 为 -0.28 , 期望不满意度 (PPD) 为 7% ; 局部铺设的铺设面积占全部铺设的 $5/6$ 时, 室内热环境最舒适, PMV 为 $+0.14$, PPD 为 5% ; 当全部铺设时热舒适度反而下降了, 此时 PMV 为 $+0.5$, PPD 为 10% . 局部铺设相对于整面铺设可节约材料, 并在保证人体热舒适的前提下有效节能.

关键词: 墙体辐射供暖; 局部铺设; 全部铺设; 热舒适; 节能

中图分类号: TU832.1+3 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2015.08.009

引用格式: Zhao Yuqian, Xu Bin. Simulation of thermal-radiating wall with hot water coils partly paved and the influence of installed area size on thermal comfort[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2015, 45(8):674-682.

赵玉倩, 徐斌. 局部铺设热水盘管墙体辐射系统模拟及铺设面积对热舒适的影响[J]. 中国科学技术大学学报, 2015, 45(8):674-682.

Simulation of thermal-radiating wall with hot water coils partly paved and the influence of installed area size on thermal comfort

ZHAO Yuqian, XU Bin

(Department of Thermal science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: The wall radiating heating system was studied, and a conception of hot water coils partly paved in the wall is presented. A heat transfer model was established to simulate the thermal performance of the wall by Fluent. The average heat flux, temperature and temperature distribution of the thermal-radiating wall under unsteady conditions were analyzed. The influence of installed area size on indoor thermal comfort was also analyzed. The results show that when the temperature difference between inlet and outlet water is $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, rate of flow is $0.3\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, tube spacing is 250 mm, and the area of partly paved coils is $2/3$ of the fully paved area, PMV(predicted mean vote) is -0.28 , PPD(predicted percentage of dissatisfied)

收稿日期:2015-05-12;修回日期:2015-07-04

基金项目:安徽省高校省级优秀青年人才基金重点项目(2013SQRL002ZD)资助.

作者简介:赵玉倩,女,1988年生,硕士生.研究方向:建筑节能、建筑热物理. E-mail: zhaoyq@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:徐斌,博士/讲师. E-mail: binxu@ustc.edu.cn

is 7%, the values are in the range of thermal comfort; when the proportion reaches to 5/6, PMV is +0.14 and PPD is 5%, the indoor thermal environment is the most comfortable; while when the wall is fully paved, PMV is +0.5 and PPD is 10%, indoor thermal comfort is reduced. The wall with hot water coil partly paved can economize on materials in comparison with a fully paved wall, and it can save energy effectively while delivering thermal comfort.

Key words: wall radiating heating; partly paved; fully paved; thermal comfort; energy conservation

0 引言

低温辐射采暖是指温度不高于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热水,在埋置于地板、墙壁或天花板内的盘管系统内循环流动,加热整个地板/墙壁/天花板,通过加热面以辐射和自然对流方式均匀地对室内进行加热的供暖方式。

目前,地板辐射采暖因节能、舒适且符合人的生理需求等优点得到了广泛地应用和发展。但在使用过程中,仍存在以下缺点:埋管减少了建筑的有效利用层高;地板表面覆盖层增加了传热热阻等。为了解决这些问题,墙体辐射供暖系统应运而生,大量学者对此展开了研究工作。Oxizidis 等^[1]采用实验方法研究了液体辐射建筑表面的特点,并比较了辐射系统和对流系统在节能和热舒适方面达到的效果。Tyagi 等^[2]对建筑制冷采暖的方法进行了综合论述,并介绍了 PCM (phase change material) 墙板、PCM 百叶窗等系统的热性能。Seyam 等^[3]对电加热板不同大小和位置对室内和墙上温度分布的影响进行了数值模拟和实验验证。林坤平等^[4]建立了分析相变墙房间热性能的理论模型,并通过数值方法模拟和研究了相变墙房间在我国不同气候地区的使用效果。王昭俊^[5]对相变墙体传热理论与应用现状进行了分析。闫全英等^[6]研究了普通热水辐射墙板添加相变材料之后的传热性能,并建立了试验系统,测试了辐射供暖相变墙板和普通墙板在间歇供暖过程中的传热性能。

但是,已有研究中墙体辐射供暖热水盘管多是铺设在整面墙壁上,材料消耗较多。据此,本文提出了在满足人体热舒适的前提下,只在墙体局部铺设热水盘管的构想,在墙体传热过程分析的基础上,建立了局部铺设盘管辐射墙体的传热模型并用 Fluent 进行模拟计算,分析了非稳态下的墙体热流密度、平均温度和温度场分布,并对不同铺设面积下的居室热舒适性进行了分析。

1 墙体的传热模型

1.1 物理模型

热水盘管可以铺设在采暖房间的内墙或外墙内部。如果铺设在外墙,则要考虑围护结构受外界气象条件的影响,为防止热量散失需铺设保温层等,情况比较复杂。铺设在内墙,可以使两相邻房间同时采暖,不用铺设保温层,既降低了成本,又减少了工序。在本文设计中,将盘管铺设在标准内部房间(房间位于楼层之中,被周围相邻房间夹在中间,东、西、北、南墙均为内墙)的东、西墙,在墙体内部的铺设位置及排管方式如图 1 所示。

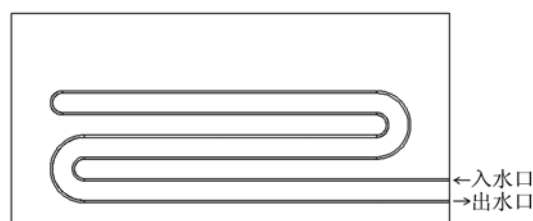


图 1 热辐射墙体盘管铺设方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coils installation in the thermal-radiating wall

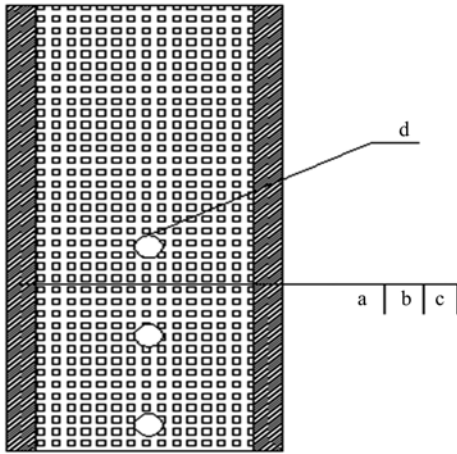
热辐射墙体结构由水泥砂浆找平层、普通砖层和热水盘管组成,如图 2 所示。

1.2 数学模型

为简化分析,作如下假设:

- ① 由于盘管长度远远大于墙壁厚度和盘管间距,忽略盘管轴向流体的导热;
- ② 墙体各材料间紧密接触,管壁与砖层之间完美贴合,忽略接触热阻;
- ③ 室内空气按集总热容法处理。
- ④ 墙的上下表面铺设绝热层,可视为绝热边界。

经过上述简化,建立二维热辐射墙体辐射供暖系统的数学模型。取如图 3、图 4 所示最上层供、回水盘管与普通墙体相接触的高 500 mm 的区域,作为研究对象。



a. 水泥砂浆找平层; b. 普通砖层; c. 水泥砂浆找平层; d. 加热盘管

图 2 热辐射墙体结构剖面图

Fig. 2 Cross-section diagram of the thermal-radiating wall

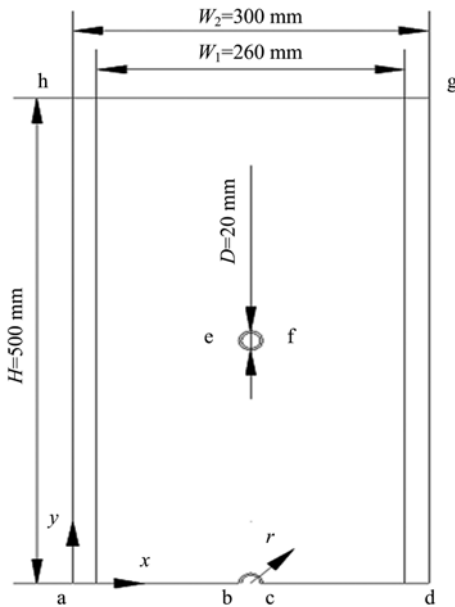


图 3 铺设热水盘管热辐射墙体的传热单元

Fig. 3 Heat transfer unit of the thermal-radiating wall



图 4 铺设热水盘管热辐射墙体的传热单元立体图

Fig. 4 Graphic model of the representative section of the thermal-radiating wall

1.3 墙体内部导热方程

盘管中热水的热量在墙体内部传导的过程近似看作二维、无内热源、非稳态导热, 热量只沿着墙体厚度 x 方向和墙体高度 y 方向上传导.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中, T/K 为温度; $\alpha/(m^2 \cdot s^{-1})$ 为墙体的热扩散系数; t/s 为时间.

1.4 边界条件

由热辐射墙体的物理模型可以看出, 墙体结构层的热量传递有以下边界: 墙体左右两个主要散热表面与室内空气及其他表面进行对流和辐射换热; 管内热水与管壁之间进行受迫对流换热; 墙体的上下表面为绝热边界.

(I) 热辐射墙体的散热表面

热辐射墙体的两侧面积是墙体的主要加热面, 该加热面与室内环境主要通过对流和辐射来进行换热. 通过墙面总的换热量是对流和辐射的换热量之和. 公式^[7]为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0 \text{ 或 } x=W_2} = q_{cv} + q_r \quad (2)$$

$$q_{cv} = 2.42 \times \frac{|(T_w - T_{ia})|^{0.32} (T_w - T_{ia})}{H'^{0.05}} \quad (3)$$

$$q_r = 5 \times 10^{-8} [(T_w)^4 - (AUST)^4] \quad (4)$$

式中, $\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ 为热辐射墙体的热导率; $q_{cv}/(W \cdot m^{-2})$ 为热辐射墙体表面的对流换热量; $q_r/(W \cdot m^{-2})$ 为热辐射墙体表面的辐射换热量; T_w/K 为热辐射墙体表面平均温度; T_{ia}/K 为室内空气温度; H'/m 为热辐射表面的高度; $AUST/K$ 为室内非加热面表面的加权平均温度.

(II) 盘管内表面边界

$$-\lambda_p \frac{\partial T}{\partial r} = h(T_p - T_f), (x, y \in bc, ef) \quad (5)$$

式中, $\lambda_p/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ 为盘管的导热系数; $h/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$ 为盘管内热水与管内壁之间的对流换热系数; T_p/K 为盘管管壁温度; T_f/K 为盘管内流体温度; r 为径向.

其中, 盘管内热水与管内壁之间的对流换热系数 h 需要通过计算得出. 首先判断管内流体是属于层流状态还是湍流状态. 定性温度取供回水的平均温度, 特征长度为盘管内径:

$$Re = \frac{ud}{\nu} \quad (6)$$

式中, Re 为雷诺数; $u/(m \cdot s^{-1})$ 为盘管内水速度

度; d/m 为盘管内径; $\nu/(m^2 \cdot s^{-1})$ 为水的运动黏度。

根据《辐射供暖供冷技术规程》^[8] 的规定,热水管道无坡度铺设时,为了能顺利排空盘管中的空气,不让气体浮升聚集,加热管水流速不宜低于 $0.25 m \cdot s^{-1}$,而本文设计的管内热水流速为 $0.4 m \cdot s^{-1}$,此时 $Re=10\ 997$,盘管内的流体处于紊流区,管内流体与管内壁之间的换热属于管内受迫对流传热,管内壁向管外壁的传热属于导热。

对于管内湍流受迫对流换热,对流换热系数 h 的计算公式^[9]为

$$Nu = 0.023Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad (7)$$

$$h = \frac{\lambda_f \cdot Nu}{d} \quad (8)$$

式中, Nu 为努赛尔数; Pr 为定性温度下的普朗特数; $\lambda_f/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ 为水的热导率。

(III) 热辐射墙体的上下绝热边界

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0 \text{ 或 } y=H_0} = 0 \quad (9)$$

式中, H_0/m 为热辐射墙的高度。

1.5 初始条件

$$T(t = 0) = T_0 \quad (10)$$

2 计算与分析

2.1 参数设置

墙体高宽厚尺寸为 $3\ 000\ mm \times 3\ 000\ mm \times 300\ mm$,墙体结构见图 2,各结构层基本参数为:水泥砂浆找平层 $20\ mm$,普通砖层 $260\ mm$,盘管间距为 $250\ mm$,盘管内径是 $16\ mm$,管壁厚 $2\ mm$.相邻房间均采暖且设计温度都是 $20\ ^\circ C$,热水流量是 $0.3\ m^3 \cdot h^{-1}$,取供、回水温度为 $50、45\ ^\circ C$,墙体下半部分铺设热水盘管.墙体各层的物性参数如表 1 所示,模拟计算中墙体选用如图 3 所示的结构。

表 1 材料热物性参数表

Tab. 1 The thermophysical parameters of materials

材料名称	热导率 λ $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	密度 ρ $/(kg \cdot m^{-3})$	比热 c_p $/(kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$
红砖	0.81	1800	0.92
水泥砂浆	0.93	1700	0.84
盘管塑料	0.4	920	2.3

余龙等^[10]建立了低温热水有源相变辐射墙体数学模型,并搭建了该墙体供暖系统的实验室,将实验结果和模拟结果进行对比分析,验证了数值模型的可靠性. Zhou 等^[11]和 Jin 等^[12]取出两相邻盘管

间的地板作为研究对象,对地板辐射采暖进行了模拟计算,模拟结果和实验结果都比较吻合。

为了更好地体现局部铺设热水盘管墙体的热辐射供暖特性,本文同时对整面墙都铺设热水盘管的墙体按照同样的方式进行了模拟计算,并进行对比分析.在同样的条件下,全部铺设热水盘管墙体由于加热管长,散入到室内的热流量大,因此室内温度比局部铺设热水盘管墙体的高,为了使二者室内温度相同且稳定不变,引入了空调来控制实现,使模拟时只有局部铺设和全部铺设一个变量。

2.2 墙体表面平均温度

图 5 为墙体表面平均温度在传热过程中随时间的变化曲线.由图可知,开始加热后的 $10\ h$ 内,墙体表面温度急剧上升,曲线斜率很大,随后,墙体表面温度上升缓慢,并最终达到稳定.这是因为,开始加热时,热水温度与墙体初始温度相差很大,传热速率大.全部铺设热水盘管的墙体比局部铺设热水盘管的墙体温升快,并且在 $27\ h$ 时达到稳定,最终墙体表面温度是 $24.3\ ^\circ C$;局部铺设热水盘管墙体在 $33\ h$ 时达到稳定,最终温度是 $22.2\ ^\circ C$,最终温差为 $2.1\ ^\circ C$.全部铺设热水盘管墙体和局部铺设热水盘管墙体有同样的散热面积,即整面墙,但全铺墙体的盘管多于局部铺设墙体,使得后者不仅向室内空气散热,同时向墙体没有铺设盘管的上半部分导热,而全铺墙体的热量则更多地散热到空气中。

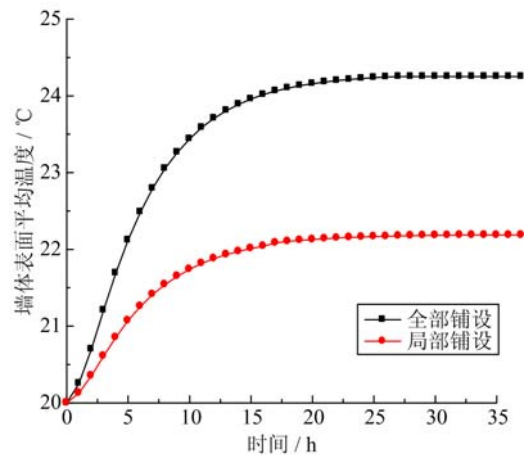


图 5 墙体表面平均温度随时间的变化曲线

Fig. 5 Conversion diagram of surface average temperature of the thermal-radiating wall

2.3 墙体表面平均热流密度

由图 6 可知,全部铺设达到稳态时的热流密度为 $64.6\ W \cdot m^{-2}$,局部铺设达到稳态时的热流密度

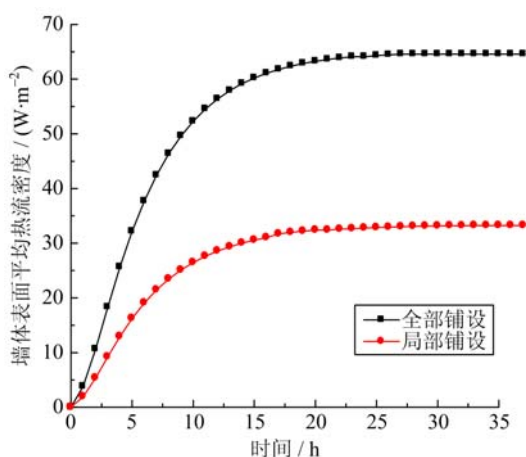


图 6 墙体表面平均热流密度随时间的变化曲线

Fig. 6 Conversion diagram of surface heat flux of the thermal-radiating wall

为 $33.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 二者相差 $31.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. 这是因为, 在室内设计温度是 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 并保持不变的前提下, 局部铺设的墙体表面温度低于全部铺设的墙体表面温度, 前者墙体表面温度与室内温度的温差要小于后者, 所以局部铺设的墙体表面平均热流密度小于全部铺设.

2.4 墙体内部温度分布

图 7 是局部铺设热水盘管辐射墙体传热单元在传热过程中不同时间点墙体内部的温度分布. 由图可知, 温度分布左右对称, 传热稳定后, 墙体两侧散热面上最高温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 最低温度为 $22 \text{ }^\circ\text{C}$. 图 8 是整面墙全部铺设热水盘管时辐射墙体传热单元在传热过程中不同时间点墙体内部的温度分布, 传热稳定后, 两侧散热面上的温度为 $24 \text{ }^\circ\text{C}$.

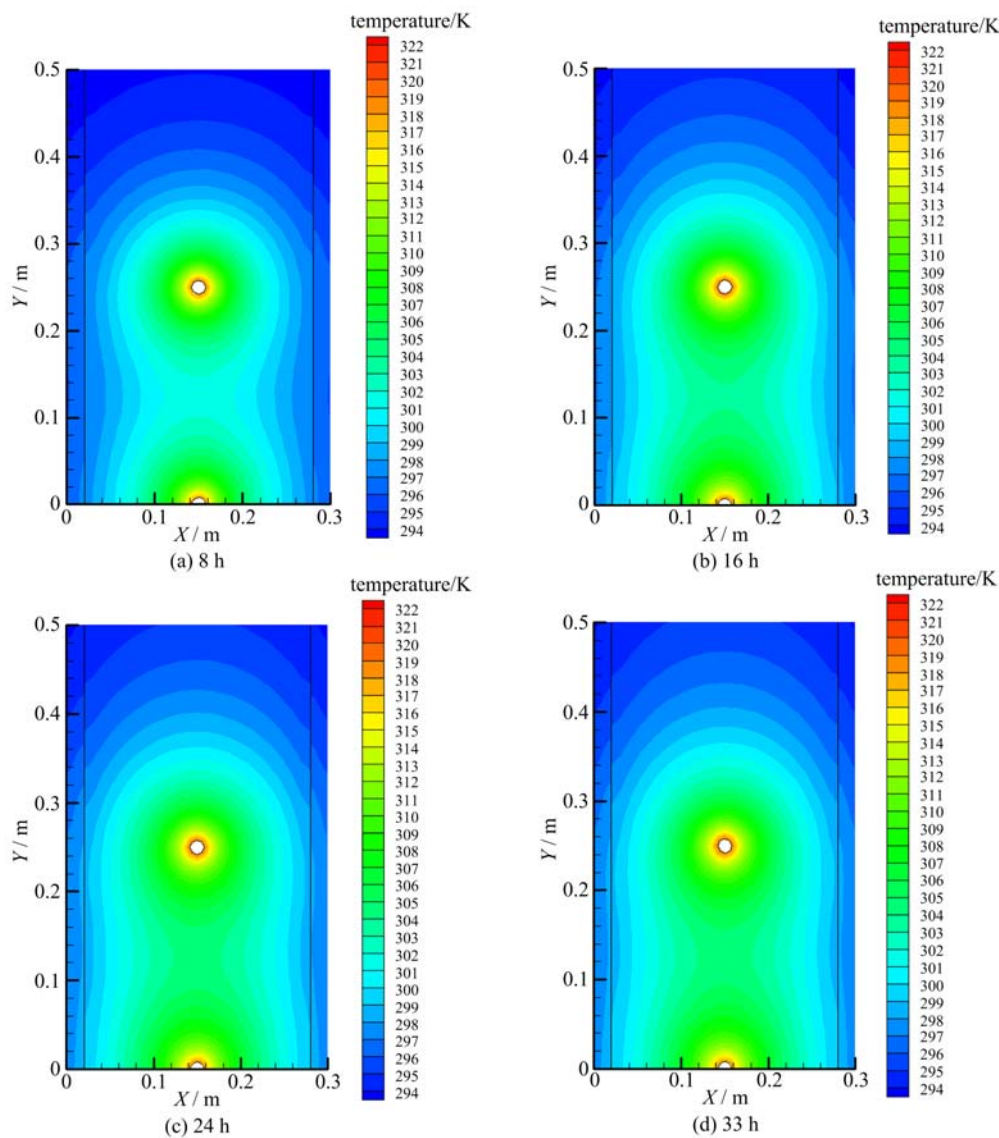


图 7 不同时间局部铺设热水盘管墙体内部的温度分布

Fig. 7 Inner temperature of the hot water partly paved wall at different time

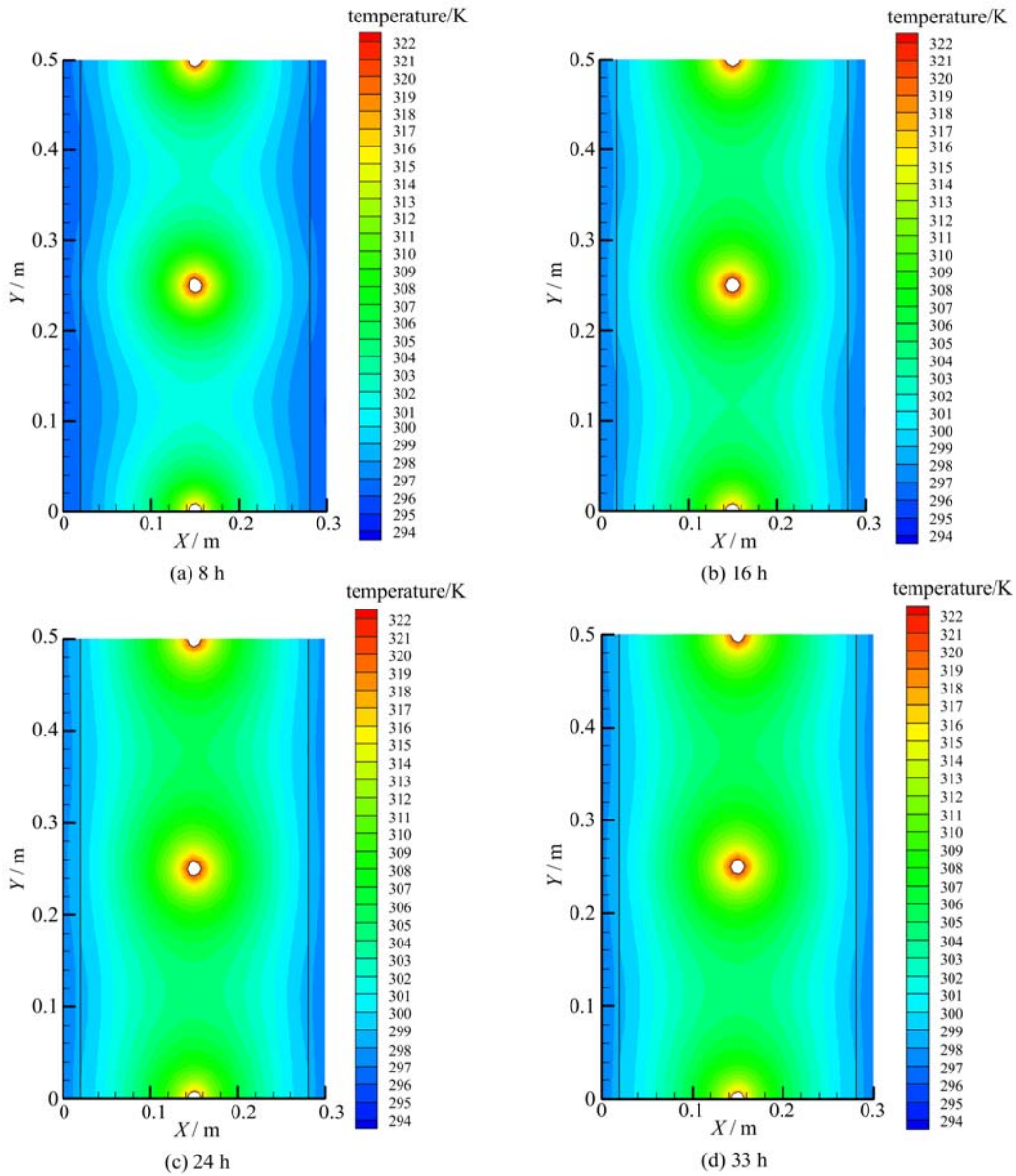


图 8 不同时间全部铺设热水盘管墙体温度分布

Fig. 8 Inner temperature of the hot water completely paved wall at different time

3 热舒适分析

热舒适是一个包含了生理、物理、心理及其他因素的认知过程. 美国 ASHRAE Standard55-1992 中对热舒适的定义为^[13]:热舒适是人热环境感到满意的意识状态. 现行标准中, 使用 Fanger 教授的 PMV-PPD 模型预测评价环境热舒适程度^[13]. 平均期望满意度(predicted mean vote, PMV)的公式^[14]如下:

$$PMV = [0.303 \cdot \exp(-0.036 \cdot M) + 0.028] \cdot \{(M - W) - 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot$$

$$[5733 - 6.99 \cdot (M - W) - p_a] - 0.42 \cdot [(M - W) - 58.15] - 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_{in}) - 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_d \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_{in})\} \quad (11)$$

式中

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028 \cdot (M - W) - I_d \cdot \{3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_d \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_{in})\}$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38 \cdot |t_{cl} - t_{ia}|^{0.25}, & \text{当 } 2.38 \cdot |t_{cl} - t_{ia}|^{0.25} > 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \text{ 时} \\ 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}}, & \text{当 } 2.38 \cdot |t_{cl} - t_{ia}|^{0.25} < 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \text{ 时} \end{cases}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290 l_d, & \text{当 } l_d \leq 0.078 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \text{ 时} \\ 1.05 + 0.645 l_d, & \text{当 } l_d > 0.078 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \text{ 时} \end{cases}$$

其中, $M/(W \cdot m^{-2})$ 是代谢速率; $W/(W \cdot m^{-2})$ 是有效机械功率; $I_{cl}/(m^2 \cdot K \cdot W^{-1})$ 是衣物隔热指数; f_{cl} 是衣物面积因子; $t_{ia}/^\circ\text{C}$ 是空气温度; $\bar{t}_r/^\circ\text{C}$ 是平均辐射温度; $v_{ar}/(m \cdot s^{-1})$ 是相对空气流速; p_a/Pa 是部分水蒸气压; $h_c/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$ 是对流换热系数; $t_{cl}/^\circ\text{C}$ 是衣物的表面温度.

热舒适的判断是一个主观的过程, PMV 只是一个平均数, 不能完全反映所有人对环境的满意程度. Fanger^[14] 在统计数据 and PMV 的基础上, 提出了期望不满意度 (predicted percentage of dissatisfied, PPD) 的概念. 用来衡量在某个 PMV 值时人们对环境的不满意状况.

基于 PMV 的 PPD 计算公式如下:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2) \quad (12)$$

国际标准 ISO7730^[13] 推荐的热舒适范围为 $PPD \leq 10\%$, $-0.5 < PMV < +0.5$. 影响人员热舒适的参数有 6 个, 即: 室内空气温度、室内平均辐射温度、空气流速、空气中水蒸气分压力、衣着和新陈代谢率.

室内平均辐射温度是假想的黑色包围体均匀表面的均匀温度, 人在该包围体中的辐射换热量等同于实际非均匀空间的换热量. 当室内表面发射率较高 (通常为 0.9) 时, 可近似认为各表面是黑表面, 根据文献[8], 平均辐射温度等于房间围护结构内表面的面积加权平均温度, 即

$$\bar{t}_r = \frac{A_1 t_1 + A_2 t_2 + \dots + A_n t_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (13)$$

式中, $\bar{t}_r/^\circ\text{C}$ 为平均辐射温度; t_1, t_2, \dots, t_n 为室内各表面温度, 单位为 $^\circ\text{C}$; A_1, A_2, \dots, A_n 为室内各表面面积, 单位为 m^2 .

在本次模拟中, 由于只能计算设定室温下热辐射墙体的表面温度, 不能计算地板、天花板等的温度, 无

法分析室内热舒适, 因此建立了二维稳态的局部铺设热水盘管墙体辐射供暖房间模型, 如图 9 所示.

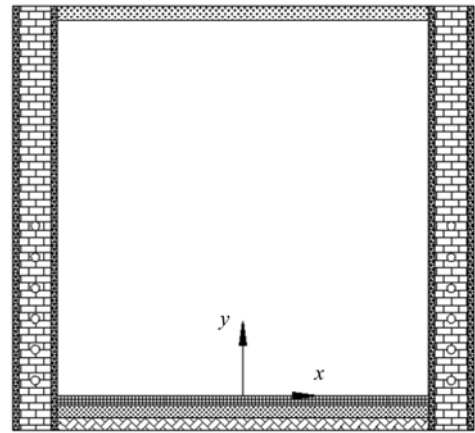


图 9 局部铺设热水盘管墙体辐射供暖房间的示意图
Fig. 9 Schematic diagram of the radiant heating room with hot water coil partly paved wall

由于房间是左右对称的, 取如图 10 所示房间的右半部分作为研究对象.

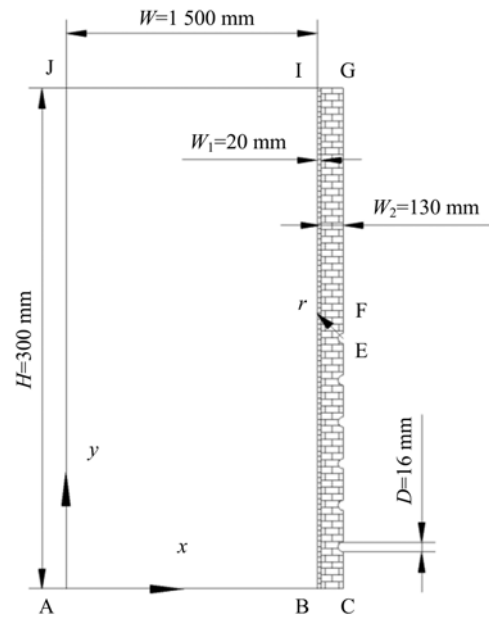


图 10 局部铺设热水盘管墙体辐射供暖房间计算模型几何示意图

Fig. 10 Geometry schematic diagram of the calculation model of the radiant heating room

控制方程包括连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程. 用于计算各边界和室内空气的温度.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (14)$$

$$\rho \left\{ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right\} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right\} \quad (15)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta (T - T_{in}) \quad (16)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_0 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (17)$$

式中, $u/(m \cdot s^{-1})$ 和 $v/(m \cdot s^{-1})$ 分别代表气流平均速度的 x 和 y 分量; $\rho/(kg \cdot m^{-3})$ 代表空气密度; $\beta/(K^{-1})$ 代表容积热膨胀系数; $g/(m \cdot s^{-2})$ 代表重力加速度; p/Pa 代表压力; $\mu/(N \cdot s \cdot m^{-2})$ 代表流体黏度; $\alpha_0/(m^2 \cdot s^{-1})$ 代表空气的热扩散系数。

由局部铺设热水盘管墙体辐射供暖房间的物理模型可以看出, 房间的热量传递有以下边界: 天花板和地板与室内空气及其他表面分别进行对流和辐射换热; 管内热水和管壁之间进行受迫对流换热; 墙体的上下表面为绝热边界; 房间中间即 AJ 边界和墙体中间的 GC 边界为对称边界。

通过天花板和地板表面总的换热量是对流和辐射的换热量之和:

$$Q_c = h_c A_c (T_c - T_{in}) + \sum_{j \neq c} (T_j - T_c) / R_{j-c}, \quad (0 \leq x \leq 1500, y = 3000) \quad (18)$$

$$Q_f = h_f A_f (T_f - T_{in}) + \sum_{j \neq f} (T_j - T_f) / R_{j-f}, \quad (0 \leq x \leq 1500, y = 0) \quad (19)$$

式中, Q_c/W 和 Q_f/W 分别为天花板和地板的总换热量; $h_c/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$ 和 $h_f/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$ 为天花板和地板与空气的对流换热系数; A_c/m^2 和 A_f/m^2 分别为对应的表面积; T_{in}/K 为室温; T_c/K 和 T_f/K 为天花板和地板的表面温度; T_j/K 为围护结构各表面的温度; $R_{j-c}/(K \cdot W^{-1})$ 和 $R_{j-f}/(K \cdot W^{-1})$ 分别为其余表面与天花板、地板之间的辐射热阻。

盘管内表面和墙体绝热边界与局部铺设热水盘管墙体模型中的边界条件相同。

求得东墙、西墙的表面温度是 $21.2 \text{ }^\circ\text{C}$, 天花板表面温度是 $18.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 地板的表面温度是 $16.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 南墙、北墙表面温度近似取天花板和地板表面温度的平均值 $17.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[15], 求得室内温度是 $20.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 因此平均辐射温度为 $18.7 \text{ }^\circ\text{C}$; 全部铺设热水盘管墙体房间模型中, 求得东墙、西墙的表面温度是 $28.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 天花板表面温度是 $23.8 \text{ }^\circ\text{C}$, 地板的表面温度是 $20.6 \text{ }^\circ\text{C}$, 南墙、北墙表面温度近似取天花板和地板表面温度的平均值 $22.2 \text{ }^\circ\text{C}$, 求得室内温度是

$25.8 \text{ }^\circ\text{C}$, 因此平均辐射温度为 $24.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。参数设置按冬季人的一般方便着装(长裤、长袖衬衫毛衣、长内裤毛裤、夹克、长裤、长袜、厚底鞋), 衣服每平方米总热阻约为 1 clo ($1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$), 坐着休息时人体代谢产热率约为 1 met ($1 \text{ met} = 58.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), 人体活动需热率为 0 , 空气流速约为 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 相对湿度为 50% 。

在进出水温差为 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、热水流量是 $0.3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 、管间距是 250 mm 的前提下, 局部铺设的盘管铺设面积占全部铺设墙体的 $1/2$ 时, PMV 为 -0.97 , PPD 为 25% , 不在热舒适范围; 整面墙壁上均铺满热水管的情况下, 平均辐射温度是 $21.4 \text{ }^\circ\text{C}$, 此时的 PMV 为 $+0.5$, PPD 为 10% , 在热舒适范围边界。本文对热水盘管不同的铺设面积进行了模拟, 计算结果如表 2 所示, 局部铺设的盘管铺设面积占全部铺设的 $2/3$ 时, 室内便能达到人体热舒适要求, 局部铺设的铺设面积占全部铺设的 $5/6$ 时室内热环境最舒适。局部铺设盘管低温热水墙体相比全部铺设可以节省材料、降低成本。结合水温和铺设方案的参数分析结果将在后续工作中给出。

表 2 热舒适性与铺设面积的关系

Tab. 2 Influence of laying area of the thermal-radiating wall on thermal comfort

热舒适性	1/2	2/3	5/6	1
PMV	-0.97	-0.28	+0.14	+0.5
PPD	25%	7%	5%	10%
是否在热舒适范围	否	是	是	是

在前面的模拟中所建立的墙体的物理模型结构为左右对称, 即盘管铺设在墙体的中心位置, 此结构是一种特殊结构。在实际应用中, 盘管铺设的位置有多样, 可以根据实际需要来安排。例如文献[1]中墙体的布管方式, 根据相邻房间所需负荷, 确定盘管距左右面的距离及铺设的高度或在墙体中添加相变材料等。局部铺设热水盘管墙体可以和地板辐射供暖系统、暖气管等结合使用, 提高热舒适度。

4 结论

本文对热辐射墙体中局部铺设热水盘管的传热过程进行了模拟, 对局部铺设热水盘管墙体和全部铺设热水盘管墙体进行了对比分析, 同时对不同的铺设面积进行了热舒适度分析, 得出了以下结论:

(I) 全部铺设热水盘管的墙体比局部铺设热水盘管的墙体温升快, 达到稳态时所需时间短, 最终

温度比局部铺设墙体高 $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. 全部铺设热水盘管墙体的热流密度比局部铺设热水盘管墙体高 $31.23\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. 说明全部铺设热水盘管的墙体可以向室内提供更多的热量.

(II) 温度和热流密度随时间的变化趋势大致相同, 开始时曲线斜率很大, 10 h 后墙体表面温度和热流密度上升缓慢, 并最终达到稳定.

(III) 当局部铺设热水盘管墙体的盘管铺设面积占全部铺设的 $1/2$ 时, 室内并不能满足人体热舒适要求, 该比例增加到 $2/3$ 时才能达到热舒适范围, 该比例为 $5/6$ 时室内热环境最舒适, 而全部铺设时, 室内处在热舒适范围边界. 对热舒适要求不同的地区, 可以根据实际要求来增减热水盘管的铺设面积. 局部铺设盘管低温热水墙体相比全部铺设可以节省材料, 并在保证人体热舒适的前提下有效节能.

参考文献 (References)

- [1] Oxizidis S, Papadopoulos A M. Performance of radiant cooling surfaces with respect to energy consumption and thermal comfort[J]. *Energy and Buildings*, 2013, 57: 199-209.
- [2] Tyagi V V, Buddhi D. PCM thermal storage in buildings: A state of art [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11(6): 146-166.
- [3] Seyam S, Huzayyin A, El-Batsh H, et al. Experimental and numerical investigation of the radiant panel heating system using scale room model [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 82: 130-141.
- [4] Lin Kunping, Zhang Yinping, Jiang Yi. Simulation and evaluation on the thermal performance of PCM wallboard rooms located in various climate regions of China in summer [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2003, 1(24): 46-52.
林坤平, 张寅平, 江亿. 我国不同气候地区夏季相变墙房间热性能模拟和评价 [J]. *太阳能学报*, 2003, 1(24): 46-52.
- [5] Wang Zhaojun. Review of the study on phase change walling material heat transfer theory and application [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2008, 38(11): 34-40.
王昭俊. 相变储能墙体材料传热理论与应用研究综述 [J]. *暖通空调*, 2008, 38(11): 34-40.
- [6] Yan Quanying, Ruan Zhenbang, Huo Ran. Study on effect of addition of PCM (phase-change material) on heat-transfer property of hot water heating wallboard [J]. *Building Science*, 2013, 29(12): 35-38.
闫全英, 阮振邦, 霍冉. 添加相变材料对热水供暖墙板传热性能的影响研究 [J]. *建筑科学*, 2013, 29(12): 35-38.
- [7] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 492-498.
- [8] 中国建筑科学研究院. JGJ142-2012, 辐射供暖供冷技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [9] 英克鲁佩勒 F P, 德维特 D P, 伯格曼 T L, 等. 传热和传质基本原理 [M]. 葛新石, 叶宏, 译. 第 6 版. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [10] 余龙. 太阳能低温热水相变墙体辐射供暖系统研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [11] Zhou G B, He J. Thermal performance of a radiant floor heating system with different heat storage materials and heating pipes [J]. *Applied Energy*, 2015, 138: 648-660.
- [12] Jin X, Zhang X, Luo Y, et al. Numerical simulation of radiant floor cooling system: The effects of thermal resistance of pipe and water velocity on the performance [J]. *Building and Environment*, 2010, 45(11): 2545-2552.
- [13] ISO7730. Moderate Thermal Environment - Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort [S]. Geneva: International Standard Organization, 1984.
- [14] Fanger P O. Thermal Comfort [M]. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970: 110-114.
- [15] Khorasanizadeh H, Sheikhzadeh G A, Azemati A A, et al. Numerical study of air flow and heat transfer in a two-dimensional enclosure with floor heating [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 78: 98-104.