

回折型布置方式低温热水地板辐射换热器传热性能

蔺洁, 陈超, 李清清

(北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

摘要: 通过实验针对低温热水地板辐射换热器传热过程的主要影响因素展开研究,以北京地区某高校办公建筑为研究对象,选取其中4间按回字型方式布置地板辐射换热器的房间为实验比较对象,分析和研究了变化供水温度、管内流速等参数对不同管间距的地板辐射换热器传热性能的影响规律,比较了不同管间距对地板表面温度不均匀性的影响,给出了北京地区办公建筑供水温度、管内流速及管间距选用范围。

关键词: 辐射换热; 回折型布置; 管间距; 传热性能

中图分类号: TU 832

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2012)10-1570-06

Heat Transfer Properties of Hot Water Floor Heat Exchanger With a Two-pass Style System

LIN Jie, CHEN Chao, LI Qing-qing

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: This paper focuses on the effect of supply temperature, water flow velocity, and tube spacing on the hot water floor heat exchanger through experiments. The testing experiments were carried out in four rooms with the same two-pass style arrangement and different tube spacings in an office building in Beijing. Heat flow and floor surface temperature were analyzed and compared as the supply water temperature and water flow velocity were varied independently, and non-uniformity of floor surface temperature in different tube spacings was determined. The optimal ranges of supply water temperature, water flow velocity, and tube spacing for Beijing's office buildings were presented.

Key words: hot water floor heat exchanger; two-pass style; tube spacing; heat transfer properties

近年来,低温热水地板辐射供暖系统因其舒适性、节能性等特点,在我国得到了较大范围应用。由于以辐射换热为主的换热器的传热过程复杂且受多种因素影响,导致其在实际应用中尚存在一些亟待解决的问题^[1]。该项技术的应用基础研究可分为2个方面,一是从理论上进行研究,主要是根据地板构造结构特点建立传热方程,通过计算给出结果^[2-4];二是通过实验开展研究,早期的研究成果多在实验室完成^[5-7],其中地板辐射换热器对流散热量的计算方法至今沿用^[7]。尽管实验研究成本高且过程复杂,但是由于地板辐射换热器传热过程的复杂

性,完全依靠解析解或数值计算的方法^[8],都将影响结果的正确性,因而通过实验手段来认知地板辐射换热器的传热特性并以此来验证理论结果的正确性一直在进行。2001年,刘国丹^[9]通过对青岛某一民用住宅辐射供暖系统现场测试,研究其供暖特性参数。刘艳峰等^[10]、王英辉等^[11]、董重成等^[12]利用国际标准低温热水散热器实验台分别进行了地板辐射供暖系统的实验室研究。但由于实验条件限制,并未开展多工况条件下不同管间距地板辐射换热器供暖性能的实验研究,而这样的实验数据正是地板辐射换热器优化设计过程中非常重要的设计依据。

收稿日期: 2011-02-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978002); 新疆自治区科技支疆项目(201091115).

作者简介: 蔺洁(1965—),女,副教授,主要从事供热、供燃气、通风及空调工程方面的研究,E-mail: linjie@bjut.edu.cn.

本研究针对上述问题,通过所搭建的实尺寸多功能地板辐射换热器传热性能实验台,以回折型方式布置的、不同管间距 S 的地板辐射换热器传热性能为重点研究对象,进行了关于供水温度 $t_{\text{供}}$ 、管内流速 v 、室外气象条件等因素变化,对其地板表面温度及其不均匀率、地板表面发热量、房间实感温度、室内空气温度等参数的影响规律的研究,研究结果可为地板辐射换热器的优化设计提供重要参考依据。

1 实验台概况

1.1 实验台基本构造

多功能地板辐射换热器传热性能实验台建于北京某高校内一栋坐北朝南 2 层楼层高为 2.85 m 的办公建筑的第 2 层,建筑平面如图 1 所示。本研究重点实验房间为其中的 4 个房间,各房间建筑面积均为 3.2 m × 3.2 m,南向窗面积为 1.5 m × 1.5 m (单框双层中空塑钢玻璃窗)。实验房间的东、西邻室及楼下房间室内供暖条件同实验房间。

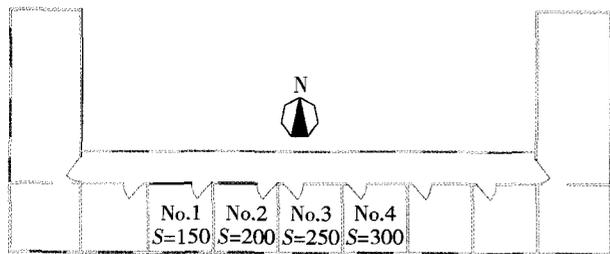


图 1 实尺寸实验台二层建筑平面
Fig. 1 General layout of the test room

1 ~ 4 号实验房间地板辐射换热器 S 依次为 150、200、250、300 mm,均为回折型布管方式(图 2)。地板层构造如图 3 所示,地板辐射换热器管采用外径 20 mm 的 PE-X 管,填充层厚度为 60 mm,地面层采用厚度 9 mm 的瓷砖,保温材料采用聚苯乙烯泡沫塑料,厚度为 25 mm,地板层主要构造参数见表 1。当流速 v 为 0.25、0.35、0.45 m/s 的情况下管内壁对流换热热阻值 R_{ng} 分别为 0.60×10^{-3} 、 0.46×10^{-3} 、 $0.38 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。

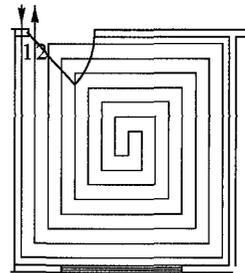


图 2 地板辐射换热器布管方式示意
Fig. 2 Schematic of two-pass style arrangement

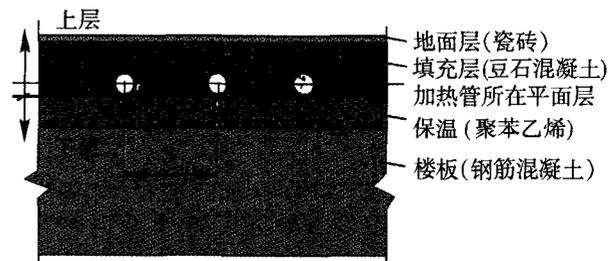


图 3 实验房间地板层构造
Fig. 3 Floor construction of the test room

表 1 实验房间地板构造参数

Table 1 Floor construction parameters of the test room

名称	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
S/mm	150	200	250	300
管长 L/m	59.91	50.18	35.96	30.52
换热面积 F/m^2	3.76	3.15	2.26	1.92
上层地板构造层热阻 $R_{\text{上}}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1})$	0.063	0.068	0.074	0.079
下层地板构造层热阻 $R_{\text{下}}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1})$	0.62			

1.2 测点布置

1) 实验房间温度测点。地板表面分别布置有 9 个测点(见图 4),以获取地板表面平均温度;房间的南外墙均匀布置 6 个测点,外窗均匀布置 3 个测点,东、西、北墙均为内墙,在墙体中心位置各布置 1 个测点,北门布置 1 个测点,除外墙点布置高度不同,

其余各点距地面高度都为 1.5 m;沿房间中心处高度方向布置了 7 个空气温度测点(图 5),并在距地面 1.5 m 处布置了 1 个黑球温度测点;走廊外墙壁及其空中布置有若干测点,用来测试北墙外壁面及走廊空气温度场分布。

2) 实验数据采集与处理。房间各温度测点通过

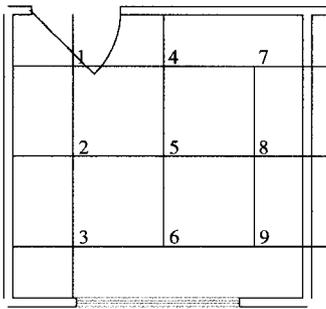


图4 实验房间地板表面上、下测点布置

Fig. 4 Floor surface test point arrangement

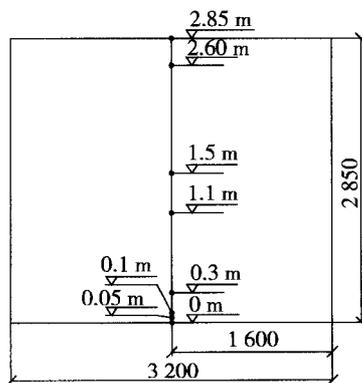


图5 实验房间空中测点布置

Fig. 5 Test point arrangement at the center of the room

已标定的铜-康铜热电偶和 Pt100 铂电阻连接于 Agilent 巡检仪上进行现场数据采集;各房间水流速度通过集、分水器各分支管阀门控制,流速通过 Flexim 超声波流量计测量,实验范围内测试精度为 ± 0.01 m/s.

本实验系统自带锅炉,为保证地板辐射换热器供水温度的稳定性,加装了一套温度控制器,控制精度为 ± 0.3 $^{\circ}\text{C}$.

1.3 实验方案及实验条件

本研究试图通过变化供水温度、管内流速等参数,把握不同管间距地板辐射换热器传热性能的变化规律.整个实验过程分为 2 种模式进行,实验期间为 2008—2010 年的冬季(11 月—3 月).

模式 1 改变地板辐射换热器 $t_{\text{供}}$, v 维持一定值.

$v = 0.30$ m/s, $t_{\text{供}}$ 分别为 28、32、36、40、44 $^{\circ}\text{C}$.

模式 2 改变 v , 地板辐射换热器 $t_{\text{供}}$ 维持一定值.

$t_{\text{供}} = 32$ $^{\circ}\text{C}$, v 分别为 0.17、0.22、0.27、0.32、0.37 m/s.

2 实验结果分析

2.1 供水温度 $t_{\text{供}}$ 变化的影响(模式 1, $v = 0.3$ m/s)

2.1.1 地板换热量

图 6 为地板辐射换热器总换热量在室外温度 1.6 $^{\circ}\text{C}$ 、室内温度 20 $^{\circ}\text{C}$ 条件下随 $t_{\text{供}}$ 变化情况.由图可见,随着 $t_{\text{供}}$ 升高,地板辐射换热器的换热量也随之增大;而且不同管间距的地板辐射换热器总换热量随 $t_{\text{供}}$ 变化规律较为一致,且 S 越小地板供热能力越强.例如, $t_{\text{供}}$ 为 38 $^{\circ}\text{C}$, S 为 150 mm 的地板辐射换热器的总换热量为 66 W/m^2 , S 为 300 mm 时,该值降为 43 W/m^2 ,相当于 S 每增加 50 mm,地板总换热量减小 7.7 W/m^2 左右.另外,虽然地板辐射换热器总换热量随 $t_{\text{供}}$ 升高而增大,但 S 不同,其增大幅度也不一样.例如, S 为 150 mm 的地板辐射换热器, $t_{\text{供}}$ 从 32 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 44 $^{\circ}\text{C}$,地板总换热量由 54 W/m^2 变为 91 W/m^2 ,增加幅度为 3.1 (W/m^2)/ $^{\circ}\text{C}$;同样条件下, S 为 300 mm 的地板辐射换热器的总换热量由 28 W/m^2 升高到 49 W/m^2 ,增加幅度仅为 1.8 (W/m^2)/ $^{\circ}\text{C}$.上述分析结果表明, $t_{\text{供}}$ 变化 1 $^{\circ}\text{C}$ 对地板辐射换热器散热量的影响大于 S 变化 10 mm 所产生的影响.

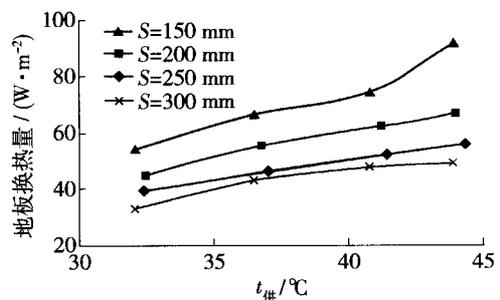
图6 地板总换热量随 $t_{\text{供}}$ 变化

Fig. 6 Heat flow with supply temperature and tube spacing

图 7 反映了地板辐射换热器对流、辐射换热量随 $t_{\text{供}}$ 的变化规律.由图可见,以辐射换热为主的 S 为 200 mm 的地板辐射换热器的辐射换热量约为对流换热量的 1.5~2.3 倍;另外,辐射换热量随 $t_{\text{供}}$ 变化近似呈线性关系,实验结果验证了把地板线性辐射换热系数简化为常数的结论.

2.1.2 地板表面平均温度

由表 1 可知, S 为 300 mm 的 No. 4 实验房间地板辐射换热器的换热面积仅为 S 为 150 mm 的 No. 1 房间的 1/2. 其影响不但反映在地板表面的传热能力方面,同时也反映在地板表面温度上.通过图 8

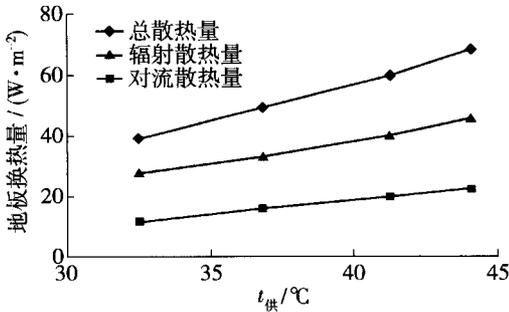


图 7 地板对流/辐射换热量随 $t_{供}$ 变化 ($S = 200 \text{ mm}$)

Fig. 7 Convection heat flow and radiation heat flow with supply temperature

可看到,地板表面平均温度也随 $t_{供}$ 呈线性变化,且 S 越小,斜率变化越大. 例如, S 为 200 mm 的地板辐射换热器,当 $t_{供}$ 从 28 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 44 $^{\circ}\text{C}$,地板表面平均温度从 22 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 30 $^{\circ}\text{C}$,升高幅度约 36%;而 S 变为 300 mm 时,地板表面平均温度从 21 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 27 $^{\circ}\text{C}$,升高幅度约 29%.

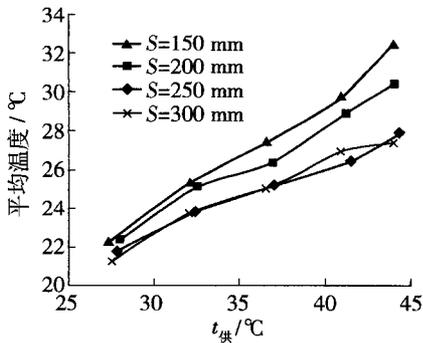


图 8 地板表面平均温度随 $t_{供}$ 变化

Fig. 8 Floor surface temperature with supply temperature and tube spacing

综合上述实验结果, $t_{供}$ 每升高 1 $^{\circ}\text{C}$,地板表面平均温度约升高 0.5 $^{\circ}\text{C}$, S 每变化 50 mm,地板表面温度约变化 1.5 $^{\circ}\text{C}$.

另外,由于人体舒适性要求,根据《地板辐射供暖技术规程》(JGJ142—2004),地板表面平均温度不超过 28 $^{\circ}\text{C}$,同时也限定了地板辐射换热器供热能力的上限. 由于地板表面平均温度为 28 $^{\circ}\text{C}$,当室外温度为 -1.6 $^{\circ}\text{C}$ 时,地板 $t_{供}$ 应控制在 38 $^{\circ}\text{C}$,供回水平均温度为 35 $^{\circ}\text{C}$ 左右;另根据实测数据得到,在 S 为 150 ~ 300 mm,北京地区在冬季采暖室外计算温度条件下 (-9 $^{\circ}\text{C}$),满足室内空气温度 16 $^{\circ}\text{C}$ 所需要 $t_{供}$ 约为 45 $^{\circ}\text{C}$,供回水平均温度约为 40 $^{\circ}\text{C}$.

2.1.3 地板表面温度均匀性

S 的不同也导致了地板表面温度均匀性的变化

(图 9). 由图可见,当 $t_{供}$ 一定,地板表面温度不均匀率随管间距增大而增大. 例如, $t_{供}$ 为 38 $^{\circ}\text{C}$ 时, S 为 200 mm 地板表面不均匀率为 4.8%; S 为 300 mm 时,该值增大到 8.3%,增加了近 1 倍. 另外,当 S 一定,地板表面温度不均匀率随着 $t_{供}$ 升高而增加. 不过当 $t_{供}$ 高于 40 $^{\circ}\text{C}$ 时,这种变化趋势已不明显. 这是因为两管之间温度分布呈二次曲线^[13],管上方温度最高、两管间存在的零热面处温度最低^[14];随着 $t_{供}$ 升高,地板表面最高与最低温度差值不断增加,同时两者之间传热速率也不断增加,当两者增加幅度相近时,不均匀率变化很小. 图中还显示, S 为 300 mm 的 No. 4 房间,当 $t_{供}$ 从 32 $^{\circ}\text{C}$ 增加到 44 $^{\circ}\text{C}$ 时,地板表面的不均匀率由 6% 增加到 10%;而 S 为 200 mm 的 No. 2 房间的地板不均匀率仅从 4% 变为 5%. 从地板的均匀性与舒适性考虑,建议采用的 S 为 200 mm.

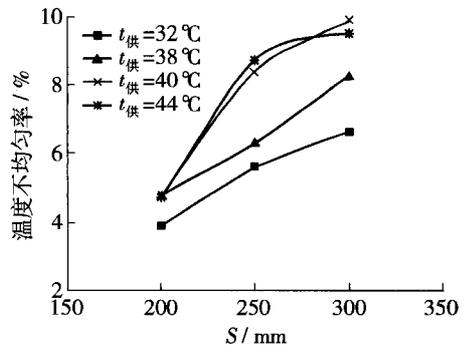


图 9 不同 S 地板表面温度不均匀率

Fig. 9 Floor surface temperature evenness with tube spacing

2.1.4 实感温度

实感温度也称黑球温度,是描述室内辐射换热状况的基本指标,它与地板表面平均温度及围护结构内表面温度有关. 图 10 给出了房间实感温度随 $t_{供}$ 的变化. 与图 8 比较可以看到,实感温度随 $t_{供}$ 的变化幅度小于地板表面平均温度变化幅度, $t_{供}$ 每升高 1 $^{\circ}\text{C}$,实感温度升高 0.1 ~ 0.3 $^{\circ}\text{C}$. 这表明周围环境对实感温度的影响也很大.

2.1.5 室内空气温度分布

图 11 表示沿房间垂直高度方向房间空气温度受 $t_{供}$ 变化影响的情况. 由图可知,在近距离地面处 0.3 m 及靠近屋顶处,空气温度变化较明显,而距地面 0.3 ~ 2.6 m 的区域室内空气温度场分布非常均匀,这种温度场分布非常适合人体的热舒适感需要.

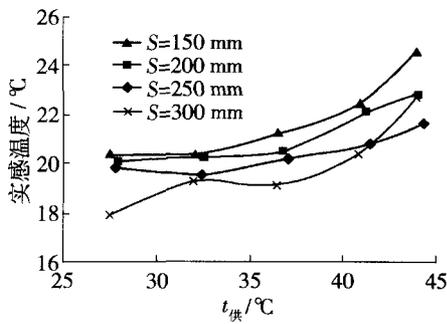


图 10 实感温度随 $t_{供}$ 的变化 ($S = 150 \text{ mm}$)

Fig. 10 Black globe temperature with supply temperature

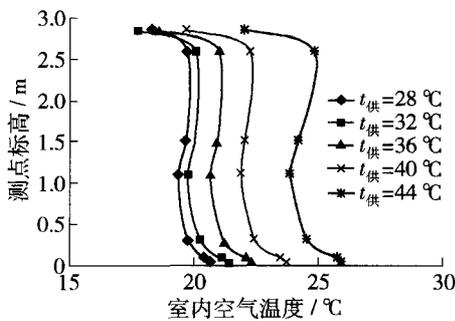


图 11 室内空气温度随 $t_{供}$ 的变化

Fig. 11 Air temperature distribution at the center of the room

2.2 管内流速变化的影响 (模式 2, $t_{供} = 32 \text{ °C}$)

由图 12、13 可知,地板单位面积换热量和地板表面平均温度随着 v 增加而增加,但增加幅度很小,这与文献[11]在温差小于 5 °C 时的测试结果相一致. 对比图 6 与图 12 可以看出,改变 $t_{供}$ 对地板供热能力的影响远大于改变管内水流速度产生的影响;同样,比较图 8 与图 13 也可以得到类似的结论. 显然,对于地板辐射换热器来说,其传热热阻主要是辐射换热管外部填充层的导热热阻,提高 v 虽然可以减少管内侧流体与管壁之间的对流换热热阻,但对降低地板辐射换热器整体的传热热阻作用有限,

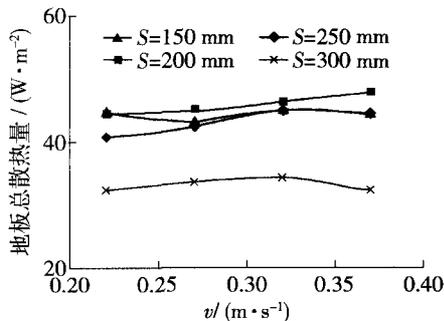


图 12 散热量随 v 的变化

Fig. 12 Heat flow with water flow and tube spacing

反而 v 过大将导致系统水侧流动阻力大大增加. 由图 12 ~ 14 可见,对于 $S = 200 \text{ mm}$ 的情况, v 从 0.22 m/s 提高到 0.37 m/s ,地板散热量增加 6.5 W/m^2 ,表面温度几乎不变,但系统水的流动阻力从 3 kPa 增加到 7.2 kPa ,增加 1.4 倍. 因此在进行地板辐射采暖设计时,应综合考虑散热量和能耗情况来确定合适的 S ,本研究结果推荐 S 为 $200 \sim 250 \text{ mm}$, v 限制在 $0.25 \sim 0.35 \text{ m/s}$.

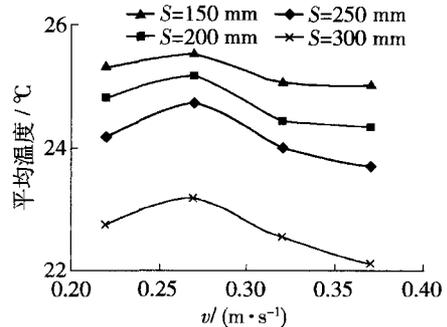


图 13 地板表面平均温度随 v 的变化

Fig. 13 Floor surface temperature with water flow and tube spacing

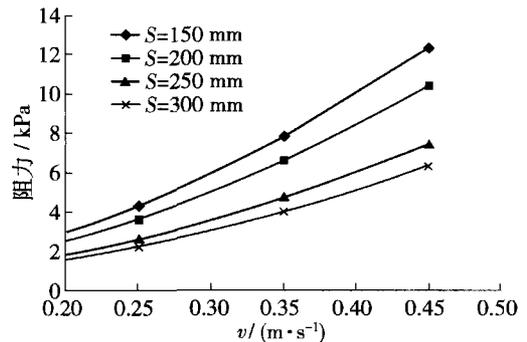


图 14 阻力损失随 v 的变化

Fig. 14 Resistance loss with water flow and tube spacing

3 结论

- 1) 供水温度变化 1 °C 对地板辐射换热器散热量的影响大于 S 变化 10 mm 所产生的影响. $t_{供}$ 每升高 1 °C ,地板表面平均温度约升高 0.5 °C , S 每变化 50 mm ,地板表面温度约变化 1.5 °C .
- 2) 从地板的均匀性与舒适性考虑,建议采用的 S 为 200 mm . 综合考虑 v 增加带来的能耗及增加的散热量,本研究结果推荐 S 为 $200 \sim 250 \text{ mm}$, v 在 $0.25 \sim 0.35 \text{ m/s}$.
- 3) 影响地板 $t_{供}$ 和供热能力的影响因素依次是: $t_{供}$ 影响最大,其次是 S ,然后是管内 v ;建议当需

要降低地板散热量时,尽量先通过改变地板加热管内水的流速(量)来实现,当需要提高地板散热量时,首选通过改变 $t_{供}$ 来提高地板散热量.

参考文献:

- [1] 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[J]. 暖通空调, 2002, 32(3): 99-102.
SUN De-xing, CHEN Hai-bo, ZHANG Ji-li. Some problems to be addressed in floor heating technology application[J]. HV&AC, 2002, 32(3): 99-102. (in Chinese)
- [2] HOGAN R E, BLACKWELL B F. Comparison of numerical model with ASHRAE designed procedure for warm-water concrete floor heating panels[J]. ASHRAE Trans, 1986, 92(1B): 589-601.
- [3] 凌继红,张于峰,董颖,等. 低温热水地板辐射供暖系统的理论研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(增刊): 145-148.
LING Ji-hong, ZHANG Yu-feng, DONG Ying, et al. Theoretical study on low temperature hot water floor panel heating system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(Supp): 145-148. (in Chinese)
- [4] KILKIS B I, ELTEZ M, SAGER S S. A simplified model for the design of radiant in-slab heating panels[J]. ASHRAE Trans, 1995, 101(1): 210-216.
- [5] SCHUTRUM L F, PARMELEE G V, HUMPHREYS C M. Heat exchanges in a floor panel heated room[J]. ASHAE Tran, 1953b, 59: 495-510.
- [6] SCHUTRUM L F, VOURIS J D. Effects of room size and non-uniformity of panel temperature on panel performance[J]. ASHAE Trans, 1954, 60: 455-468.
- [7] MIN T C, SCHUTRUM L F, PARMELEE G V, et al. Natural convection and radiation in a panel heated room[J]. ASHAE Trans, 1956, 62: 337-358.
- [8] 杨德伟,王振兴. 地板采暖传热过程分析[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(3): 472-474.
YANG De-wei, WANG Zhen-xing. The analysis of heat transfer process in floor heating [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(3): 472-474. (in Chinese)
- [9] 刘国丹. 民用住宅建筑低温辐射供暖特性参数的实验研究[J]. 暖通空调, 2001, 31(4): 1-3.
LIU Guo-dan. Experiment of the floor panel heating system in a residential building [J]. HV & AC, 2001, 31(4): 1-3. (in Chinese)
- [10] 刘艳峰,刘加平. 低温热水辐射地板传热测试研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2004, 36(2): 176-178.
LIU Yan-feng, LIU Jia-ping. Measurement and study on the heat transfer of embedded heat floor[J]. J Xi'an Univ of Arch & Tech: Natural Science Edition, 2004, 36(2): 176-178. (in Chinese)
- [11] 王英辉,涂光备,李建兴,等. 地板辐射供暖系统热工性能实验研究[J]. 暖通空调, 2004, 34(1): 11-14.
WANG Ying-hui, TU Guang-bei, LI Jian-xing, et al. Experiment of thermodynamic properties of floor panel heating systems[J]. HV&AC, 2004, 34(1): 11-14. (in Chinese)
- [12] 董重成,丁有虎,张宇霞. 低温热水地面辐射供暖加热管内流速对散热量影响研究[C]//全国暖通空调制冷2008年学术文集. 北京:中国建筑工业出版社, 2008: 26-28.
DONG Zhong-cheng, DING You-hu, ZHANG Yu-xia. Experiment study on heat transfer of the radiant floor heating system with flow[C]//HVAC & R 2008 National Academic Papers. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 26-28. (in Chinese)
- [13] 杨巍,张于峰,王荣光. 低温地板辐射供暖的传热模拟[J]. 暖通空调, 2001, 31(1): 73-75.
YANG Wei, ZHANG Yu-feng, WANG Rong-guang. Numerical study on heat transfer of the radiant floor heating system[J]. HV&AC, 2001, 31(1): 73-75. (in Chinese)
- [14] 朱家玲,苗常海. 地板辐射采暖空间温度场的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2005, 26(4): 493-496.
ZHU Jia-ling, MIAO Chang-hai. The numerical simulation and analysis of temperature field change in the floor radiation heating system[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2005, 26(4): 493-496. (in Chinese)

(责任编辑 杨开英)