重庆村镇毛细管地板辐射供暖性能实测研究

杨 昶，王 燕，刘 猛

（重庆大学城市建设与环境工程学院，三峡库区生态环境教育部重点实验室，重庆 400045）

摘要：考虑重庆村镇建筑围护结构特征，现场实测了解不同供水温度工况（35，40，45℃）的毛细管网地板辐射和强风模式下不同设定温度（22，18，26℃）的传统空调供热房间室内温度场的分布情况。对比几种典型供热方式下的室内温度分布特点，结果表明，毛细管地板辐射系统供暖的热舒适性高于空调供暖，垂直温差小于 4℃；关机后室内温度衰减缓慢，5 h 下降值仅为 1～4℃；在同类围护结构性能条件下，供水温度 40℃时各平面都能达到室内供暖设计温度最低标准。

关键词：通风与空调工程；毛细管辐射供暖；村镇；现场实测；热舒适性

中图分类号：TU832.1+6　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1674-2850(2016)14-1462-07

Performance analysis on capillary radiant heating systems in the village of Chongqing

YANG Chang, WANG Yan, LIU Meng

(*Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering*, *Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-environment MOE*, *Chongqing University*, *Chongqing* 400045, *China*)

Abstract: Taking enclosure structure characteristics of Chongqing rural building into account, temperature distributions of indoor heating are learned through the field measurement, whose operation conditions are different water supply temperatures (35, 40, 45℃) of the capillary floor radiant and wind patterns under different set temperatures (22, 18, 26℃) of the traditional air conditioning. A comparison of several typical heating characteristics of the indoor thermal distribution shows that the thermal comfort of capillary floor radiant heating system is higher than air conditioning, whose vertical temperature difference is less than 4℃. Indoor temperature attenuates slowly after shutdown, getting only 1-4℃ decline after 5 h. Under the condition of similar enclosure structure performance, every plane can achieve minimum standards for design temperature of indoor heating when the water supply temperature is 40℃.

Key words: ventilation and air conditioning engineering; capillary radiant heating; villages; field measurement; thermal comfort

0 引言

重庆是位于我国西南部的山区城市，近年来，我国积极推动社会主义新农村建设、统筹城乡发展等经济战略性举措，促进了重庆村镇地区建设的发展。

根据重庆市气象局 2015 年最新数据，重庆市冬季年平均气温 7.9℃，而村镇的冬季温度较重庆主城温度低，二者冬季平均温差为 2℃；相对湿度整体围绕 80%波动，在全国属高湿区。此外，重庆村镇建筑围护结构材料落后，常用建材导热系数大，保温效果差，又无额外保温措施，导致冬季不供暖时，村

基金项目：重庆大学大学生科研训练计划（0219001104108）

作者简介：杨昶（1994—），女，本科生，主要研究方向：建筑节能技术与工程

通信联系人：刘猛，教授，主要研究方向：绿色建筑技术适宜性、建筑能源高效利用技术. E-mail: liumeng2033@126.com

镇住宅室内、外温差不大，室内温度均值 8.83℃，低于预防医学给出的人体“冷耐受”下限温度 11℃[1]，因此冬季采暖是非常有必要的。

李丹等[2]通过实地调研得知，重庆地区 86%的居民使用独立供暖设施，其中传统式家用空调居多，电加热器次之。但这些供暖方式普遍存在耗能大、舒适性偏低且安全保障性低等缺点。毛细管网辐射供暖采用辐射供热和自然对流换热的方式对室内进行供暖，可以利用低品位热源节能，具有节省空间、热舒适性好、噪声低、安全耐用的优点，符合重庆村镇地区能源特征和经济结构，具有较大的适用性。

在毛细管低温热水辐射供暖运行特性、辐射供暖热舒适性等方面，国内外已有一系列的研究。高艳娜等[3]通过分析成都地区某住宅楼中空气源热泵+毛细管地板辐射采暖系统冬季运行工况，得出地板温度随供回水温度的变化规律，并从一般热舒适性指标和局部热舒适性指标对室内热舒适性进行了评价。陈文龙[4]对南京的一栋二层别墅进行了“毛细管辐射+置换新风”供热实测，得出了大空间室内温度均匀，能达到恒温室内允许的±0.5℃波动范围的结论。ZHOU等[5]实测了不同热惰性材料（沙和相变材料）和供热管道（PE 线圈和毛细管网）正交组合的低温辐射系统供热性能，比较发现毛细管网系统可以在较短时间内提供均匀、舒适的室内温度。SHIN 等[6]分析了毛细管网地板辐射供热时的热流量、最大及最小地板温度与设计参数如供回水温度、房间的围护结构、管道布置形式之间的关系。

在上述研究中，保温性能较好的城镇建筑多被作为研究对象，而关于保温性能较差的房屋围护结构将如何影响室温分布的研究仍然匮乏，因此本文将基于重庆村镇的冬季气候特征，通过现场实测，研究村镇建筑毛细管供暖辐射的温度场分布特征和热舒适性，并辅以家用空调供热系统作为比较。

1 实验环境与测点布置

重庆市永川区村镇主要建筑形式为 1～4 层独栋楼房，二层居多，超过 50%. 外窗多由铝合金窗框和普通透明玻璃制成，外门多为木门，墙体材料多采用 240 mm 红心黏土砖，而且外墙未设置保温层，屋顶以坡屋顶为主；本实验以某二层住宅建筑为研究对象，对空气源热泵结合毛细管地板辐射供暖系统的实际运行状况进行测试，比较分析不同供水温度下系统的供暖效果与房间温度分布。图 1 为系统示意图。

该住宅是典型的农村二层住宅建筑，实验房间位于建筑第二层南端，图 2 为毛细管地板供暖测试房间平面图。

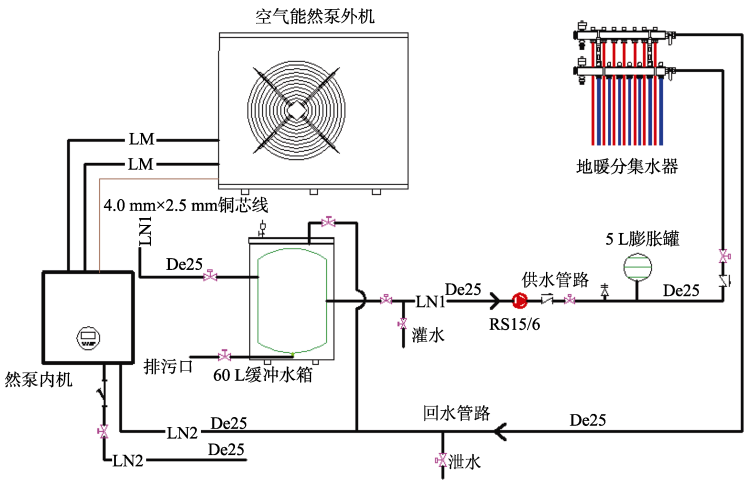


图 1 空气源热泵毛细管辐射供暖系统图

Fig. 1 Diagram of air source heat pumps capillary tube radiation heating system

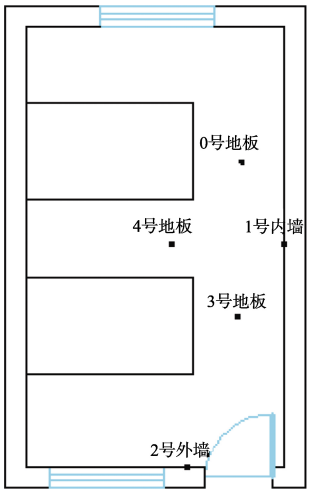


图2 毛细管地板辐射供暖测试房间平面图

Fig. 2 Floor plan of capillary floor radiant heating test room

房间大小为 6 m×4 m×3 m，温度测点平面布置如下：

1）地板表面温度平面有 3 个，内外墙平面各 1 个，如图 2 所示；由温度传感器 DED-PT100-TP 进行实时监测，数据自动记录间隔为 15 min.

2)房间中央垂直温度平面有 4 个，高度分别为 0.1，0.6，1.1，1.7 m，由室内温湿度传感器 DED-H138800 进行实时监测，数据自动记录间隔为 15 min.

测试于冬季（2015 年 1 月）进行。测试时关闭门窗，记录全天室内地板表面温度、壁面温度、室内垂直温度。测试工况如表 1 所示，实验所用测试仪器及其精度如表 2 所示。

表 1 测试工况

Tab. 1 Test conditions

工况	供水温度/℃	开机时间	关机时间	运行时长/h
一	35	20：00	次日 6：00	10
二	40	20：00	次日 6：00	10
三	45	20：00	次日 6：00	10

表 2 实验测试仪器及其精度表

Tab. 2 Test equipment and precision tables

名称	型号	参数	测量范围	精度
铂电阻温度传感器	DED-PT100-TP	温度	−20.0～100.0℃	0.1℃
室内温湿度传感器	DED-H138800	温度，湿度	0～50℃/10%～99%	±3%/±3%
热量表	HFRB-C DN25	温度，流量	1.00～99.00℃/0.07～7.00 m³/h	0.01℃/0.01 m³/h

为进一步分析毛细管地板辐射系统的供暖效果与房间温度分布，选取相似室外温度条件下同村同朝向及同类围护结构的建筑中某一配备壁挂式冷暖空调的房间进行对比测试。

2 结果分析

2.1 启动阶段

2.1.1 启动时间

由于重庆地区冬季平均温度 7.9℃，因此每个工况选取室外气温较为接近的 2 d 进行分析。图 3～图 5 是供水温度为 35～45℃工况某日测试期间的温度变化曲线图。

人体在室内主要为坐姿，因此选取一般人的坐姿高度 1.1 m 平面为基准，以各工况达到文献[7]～[9]规定的供暖设计最低值 16℃的时间作为启动时间，具体如图 6 所示。

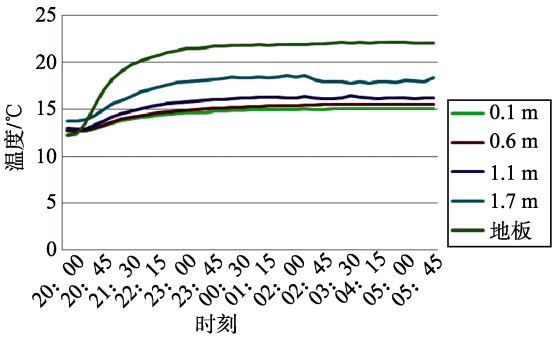


图 3 供水温度 35℃工况室内空气温度变化情况

Fig. 3 Temperature variation of indoor air temperature when the water supply temperature is 35℃

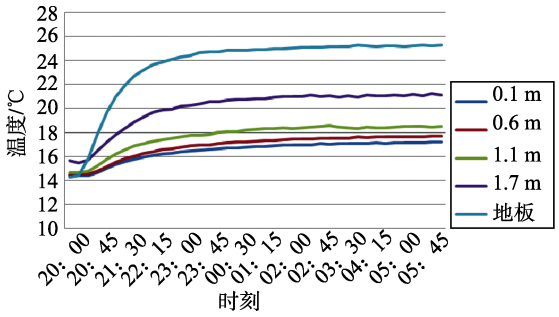


图 4 供水温度 40℃工况室内空气温度变化情况

Fig. 4 Temperature variation of indoor air temperature when the water supply temperature is 40℃

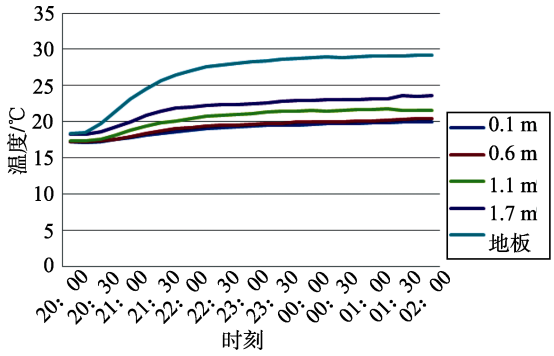


图 5 供水温度 45℃工况室内空气温度变化情况

Fig. 5 Temperature variation of indoor air temperature when the water supply temperature is 45℃

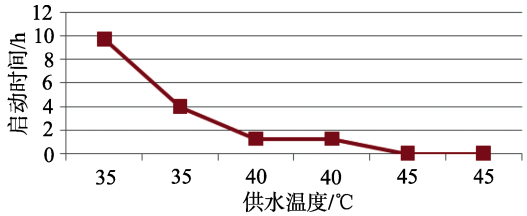


图 6 不同工况下启动时间

Fig. 6 Startup time under different operation conditions

供水温度为 35℃的工况 2 d 的启动时间相差较大，这是因为此时为供暖测试初期，围护结构的蓄热性对启动时间有较大影响，故以同工况第二天的数据为准，下同。由图 7 可知，供水温度越高，从开机到有一定供暖效果的时间越短。供暖一定天数后，供水温度为 45℃时，关机后至第二天开机前，室内都能维持较好的供暖效果。

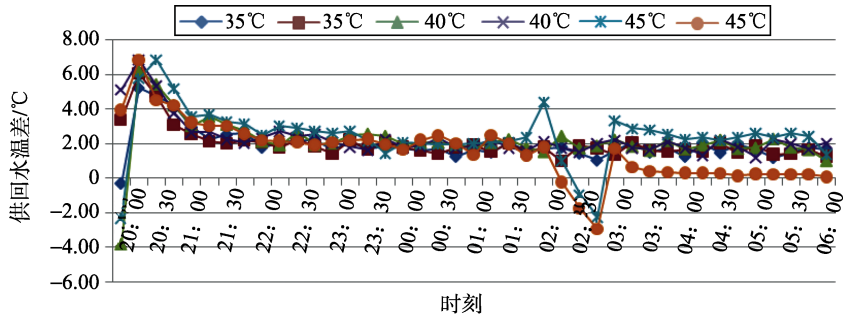


图 7 各工况供回水温差变化情况

Fig. 7 Temperature difference of supply and return water under different operation conditions

启动阶段，供回水温差快速升高，一段时间后逐渐降低，供水温度为 35，40，45℃时的平均供回水温差分别为 1.70，1.95，2.21℃. 开机约 1.5 h 后，供回水温差基本上在 1.0～2.5℃之间波动，说明系统已经稳定，因此推荐需要供暖的房间至少提前 1.5 h 开机。

由图 8 可知，供水温度越高，地板温度达到稳定的时间越短，设定供水温度从 35℃提高至 45℃，稳定时间缩短了 1/3 以上。因此，刚开机时可将供水温度设定高一些，一定时间后降至设计温度所需的供水温度，这样能使使用者尽快感受到供热效果。

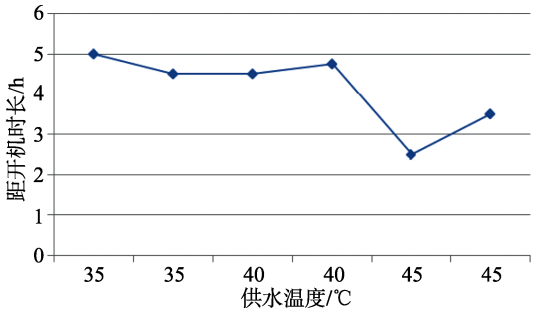


图 8 不同工况地板温度达到稳定的时间

Fig. 8 Stable time of floor temperature under different operation conditions

2.1.2 室内各平面温升速率

由于毛细管地板供暖工况的末端温度变化情况相似，因此以某日温度为 40℃时的情况为例分析室内各平面温升速率，如图 9 所示。

前 0.5 h，房间内各平面温升极其缓慢甚至略有下降，而地板表面温度已经开始迅速上升，而且一直保持最大。随后，各平面温度逐步上升，平面位置越高，温升速率越快。20：45 后温升速率逐渐减缓，22：00 之后，温升速率都处于较低的水平，温度逐渐平稳。

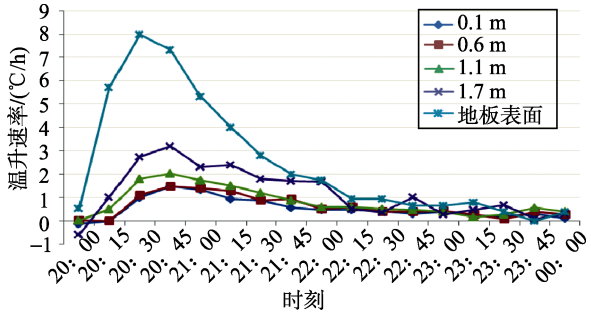


图 9 供水温度 40℃的工况下温升速率变化情况

Fig. 9 Changes of the temperature rise rate when the water supply temperature is 40℃

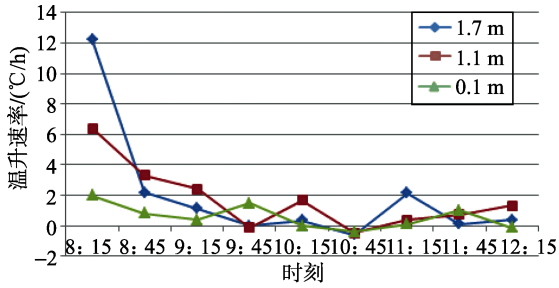


图 10 空调设定温度 22℃工况下温升速率变化情况

Fig. 10 Changes of the temperature rise rate when air conditioning setting temperature is 22℃

选取提供相等室内平均温度的空调供暖的实验结果作为对比，如图 10 所示，可知启动阶段空调供暖比毛细管系统供暖的温升速率快，周期短。空调开启 30 min 后，室内温度的增长速率迅速降低，或者因间歇停机而温度下降，而毛细管供热系统开机后大约 2 h 温升速率才降至较低水平。

2.2 稳定阶段

由图 11、图 12 可知，毛细管地暖末端温度随高度变化的总体情况是随高度增加，温度升高，且房间上部的温差大于房间下部。供水温度为 35，40，45℃时，0.1～1.7 m 的温度均值分别为 14.85～18.02℃，16.82～20.74℃，19.51～22.68℃．空调工况是设定温度越高，整体温差越大。

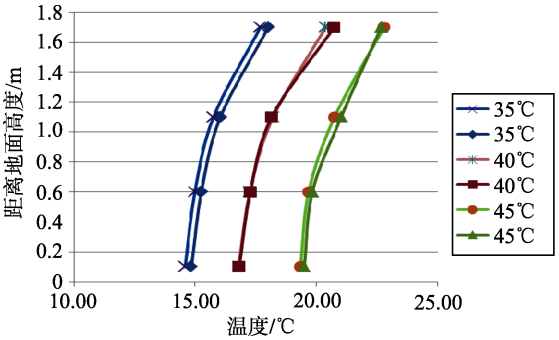


图 11 毛细管网供暖工况平面温度垂直分布

Fig. 11 Vertical distribution of planar temperature under capillary heating condition

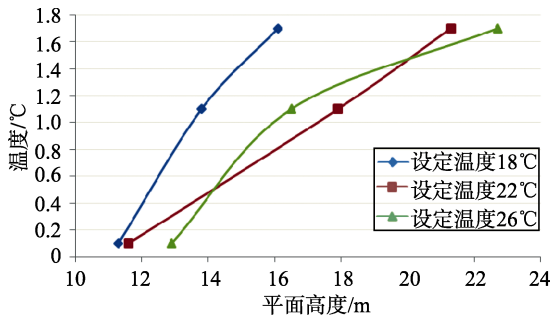


图 12 空调供暖工况平面温度垂直分布

Fig. 12 Vertical distribution of planar temperature under air conditioning heating condition

陈文龙[4]在南京一栋二层别墅进行的“毛细管辐射+置换新风”供热实测结果表明，在地板毛细管供回水平均温度为 32.77/31.39℃时，距地面 1.1 m 处的温度能够达到 20～21℃，而相似供水条件下，本实验距地面 1.1 m 处的气温只能达到 16℃左右。这说明围护结构的性能对供暖效果的影响较大。

毛细管末端 1.7 m 与 0.1 m 处最大温差为 3.91℃，空调房间为 9.9℃，由于冷热空气密度差产生的浮升力作用，毛细管地暖末端同空调房间一样呈现“上热下冷”的态势，但是垂直温度差小于空调房间，人体局部性热感不适将大大改善。空调设定温度为18℃时，垂直温差为 4.8℃，但此工况为间歇运行，房

间上部温度波动大，因此平均温差偏小。

2.3 停机阶段

由于毛细管地板供暖工况的末端温度衰减情况相似，因此以某日温度为40℃时的情况为例分析室内各平面温度衰减速率，如图 13 所示。

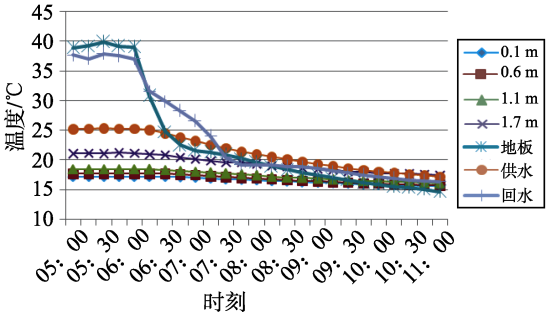


图 13 供水温度 40℃工况下温度衰减情况

Fig. 13 Degradation of temperature when the water supply temperature is 40℃

关机后前 0.5 h，供回水温度开始下降，其他各平面温度基本不变甚至略有上升。随后各处温度都开始逐渐降低，供水温度为 40℃时，关机后 5 h 内距地面 1.7 m 处平均温降速率为 0.75℃/h，0.1 m 处为 0.33℃/h，5 h 后距地面 1.1 m 处的温度才降至 16℃，说明关机后 5 h 内都可维持一定的供热效果。各工况关机后 5 h 内，房间温度平均下降速率为 0.37～0.49℃/h. 由于水温下降很快，关机后约 0.5 h，供水温度就会降至地板表面温度以下，反而开始吸收地板的热量，使回水温度高于供水温度，同时使地板降温速率加快。

由于没有空调关机后的测试数据，因此无法与毛细管系统比较，但是空调设定温度 18℃工况是间歇运行的，停机后房间温度迅速下降，1.7 m 平面 0.5 h 温降达到了 3.8℃，与毛细管系统关机后 5 h 的温降相当。

3 结论

1）毛细管地板辐射供暖系统，供水温度为 35，40，45℃时，1.1 m 平面达到 16℃的时间分别为 4，1.25，0 h.

2）毛细管地板辐射供暖系统，供水温度为 35，40，45℃时，0.1～1.7 m 的温度均值分别为 14.85～18.02℃，16.82～20.74℃，19.51～22.68℃. 居民在室内大部分时间为坐姿，但是空调供暖房间 1.1 m 以下的空间基本达不到供暖设计最低值 16℃，而毛细管地板辐射供暖当供水温度为 40℃时各平面温度都能达到 16℃以上，平均温度超过 18℃.

3）同样的供热条件下，本文的实测结果比南京某别墅内测试 1.1 m 平面温度低 4～5℃，说明围护结构性能对于供暖效果有较大影响。

4）系统停机后，毛细管地板辐射供暖的房间气温 5 h 内平均下降速率为 0.37～0.49℃/h，停机后毛细管房间可在较长时间内维持一定的供暖效果。

5）毛细管地板辐射供暖系统，供水温度为 35，40，45℃时，房间 0.1～1.7 m 之间的最大垂直温差小于 4℃，而空调供暖房间的垂直温差接近 10℃，表明毛细管地板辐射供暖的舒适性高于空调供暖。

[参考文献] (References)

[1] 刘猛，粟珩，张会福. 重庆中海拔村镇住宅毛细管供暖性能实测分析[J]. 土木建筑与环境工程，2014（增）：75-78.
LIU M, SU H, ZHANG H F. Capillary floor radiant heating system of rural residential building in Chongqing[J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2014(Suppl.): 75-78. (in Chinese)

[2] 李丹，张华玲. 南方供暖需求现状及技术分析[J]. 制冷与空调，2013，27（6）：622-625.
LI D, ZHANG H L. The demand status and technology analysis of southern heating[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2013, 27(6): 622-625. (in Chinese)

[3] 高艳娜，全柏铭，徐龙，等. 成都地区毛细管采暖系统运行特性与热舒适性分析[J]. 制冷与空调，2014，28（2）：107-111.
GAO Y N, QUAN B M, XU L, et al. Analysis of thermal comfort and operating performance of capillary-tube air conditioning heating systems in Chengdu city[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2014, 28(2): 107-111. (in Chinese)

[4] 陈文龙. 南京地区毛细管辐射供热室内热舒适研究[D]. 南京：南京工业大学，2012.
CHEN W L. The indoor thermal comfort research of radiation heating in Nanjing[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2012. (in Chinese)

[5] ZHOU G B, HE J. Thermal performance of a radiant floor heating system with different heat storage materials and heating pipes[J]. Applied Energy, 2014, 138: 648-660.

[6] SHIN M S, RHEE K N, RYU S R, et al. Design of radiant floor heating panel in view of floor surface temperatures[J]. Building and Environment, 2015, 92: 559-577.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50736—2012 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People’s Republic of China. GB 50736—2012 Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012. (in Chinese)

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50096—2011 住宅设计规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People’s Republic of China. GB 50096—2011 Design code for residential buildings[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011. (in Chinese)

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50368—2005 住宅建筑规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2005.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People’s Republic of China. GB 50368—2005 Residential building code[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2005. (in Chinese)