

住宅用地板辐射供冷系统的实验分析

重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室 卢 军[★]

重庆大学 陈金花

深圳市建筑科学研究院 高殿策

重庆大学 丁 豪

摘要 针对夏热冬冷地区的气候特征,分别从室内温度场、湿度场、风速场以及地板换热等出发,比较了住宅用冷却地板单独供冷、风机盘管单独供冷及两者联合运行三种供冷方式。结果显示,冷却地板与风机盘管联合运行可以满足夏季供冷要求,而且克服了冷却地板易结露的缺陷,具有良好的舒适性和节能性。

关键词 地板辐射供冷 风机盘管 结露 舒适性

Experimental analysis on floor panel cooling systems in residential buildings

By Lu Jun[★], Chen Jinhua, Gao Diance and Ding Hao

Abstract For the climatic characteristics in hot summer and cold winter areas, from the aspects of indoor temperature field, humidity field, airflow velocity field and heat exchange from the floor, compares the three different cooling modes of floor panel cooling, fan coil cooling and the mode combining floor panel cooling with fan coil cooling. The results show that the combined mode can meet cooling requirement in summer and eliminate condensation on the floor, therefore it is good in comfort and energy efficiency.

Keywords floor panel cooling, fan coil, condensation, comfort

[★] Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing, China

①

0 引言

地板辐射供暖系统在欧洲的法国、德国、丹麦以及亚洲的韩国、日本等国研究已经比较成熟,在我国北方地区,也已经有相当多的住宅采用了地板辐射供暖系统,并取得了良好的效果。地板辐射供暖系统的舒适性也得到了普遍的认可^[1-2]。然而地板辐射系统用于夏季供冷(冷却地板)的研究在国内却鲜有报道,实际应用中也有少实例。本文通过具体实验,对冷却地板自身的规律和特性及应用可行性进行了分析与研究。

1 实验概况

1.1 实验住宅简介

实验地点位于重庆市沙坪坝区一高层住宅第 15 层单元套房内,建筑面积为 128 m²,建筑层高

①[☆] 卢军,男,1966 年 10 月生,博士,教授
400045 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室
(023) 65123777
E-mail: lujun66@vip.sina.com
收稿日期:2006-10-08
一次修回:2007-01-20
二次修回:2007-11-01

3.0 m, 属 3 室 2 厅典型住宅。住宅外墙体结构为 200 mm 厚加气混凝土, 两侧抹灰, 单层塑钢窗, 内墙为 150 mm 厚陶土空心砖。地板采用厚度为 12 mm 的聚苯板保温, 在聚苯板层的上面铺设水管, 水管选用的是 PEX 管, 管道外径 16 mm, 壁厚 2 mm, 地板盘管布置采用双回型, 最后, 在水泥砂浆层上面铺设地板装饰层。地板构造见图 1。

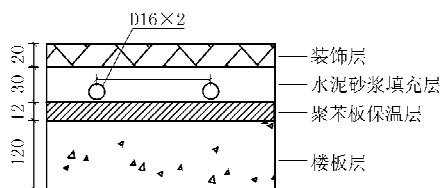


图 1 地板构造详图

1.2 辐射地板供冷系统

为避免结露, 将辐射地板系统的回水或者风机盘管的回水与地板供水相混合, 以此来达到供水要求。风机盘管主要用于为室内提供干燥新风去除室内湿负荷, 且在供冷高峰时刻起到辅助供冷的功效。图 2 即为满足上述要求的地板辐射水系统原理图, 采用空气源热泵作为其冷热源。

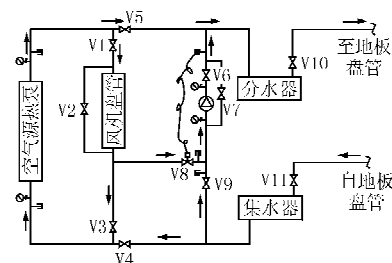


图 2 地板辐射供冷水系统原理图

1.3 测试方法及仪表

1) 水温测试

包括冷水机组进出水温、地板盘管进出水温、风机盘管进出水温。将温度计直接安装在管道上, 使温度计的触点接触管外壁, 读取的温度值为管外壁温度。在稳定传热情况下, 通过与热泵机组在室内的温控器上的读数相比较, 得出温度计读数高于实际值 0.4°C , 以此来修正温度计读数。温度计测量范围为 $0\sim 50^{\circ}\text{C}$, 精度为 0.1°C 。

2) 流量测试

包括冷水机组水量、地板盘管水量、风机盘管水量。冷水机组总出水回路、地板进水回路及风机盘管进水回路各设一个转子流量计, 测量范围分别为 $160\sim 1\,600\text{ L/h}$, $100\sim 1\,000\text{ L/h}$, $100\sim 1\,000$

L/h , 精度均为 1.0 级。

3) 压力测试

水泵进、出口管段上设压力表测试水泵扬程, 用于计算水泵每天实际耗电量, 采用 $0\sim 0.25\text{ MPa}$ 真空压力表。

4) 耗电量测试

用精密电度表(精度 2.0 级, 经重庆市电力局标定)测试冷水机组及循环水泵每天的累计耗电量。

5) 房间各点温度场测试

由于房间布置的测温点较多, 采用铜-康铜热电偶作温度传感器, 经与 0.1°C 的水银温度计比较, 得出绝对误差为 -0.4°C 。

温度测试值的显示采用多功能数据采集仪, 该装置共有采集通道 203 路, 通道检测速度(即两次数据的间隔时间) $\leq 0.1\text{ s}$, 对热电偶型传感器输入的分辨精度为 0.1°C 。

6) 速度场测试

采用热球风速仪, 测试范围为 $0.05\sim 30\text{ m/s}$, 测试误差 $\leq 3\%$ 。

本实验主要目的是测试冷却地板在夏季工况下的热舒适性及地板的运行特性等。

2 实验结果分析

实验分 3 种工况: 冷却地板单独运行、冷却地板与风机盘管联合运行及风机盘管单独运行, 在 3 种工况下分别对卧室的温度场、湿度场及速度场进行测试, 测点在地板表面、距地板 0.1 m , 1.0 m , 1.6 m , 2.4 m 处。测试时间选在 7~8 月, 3 种工况下的室外气温较为接近, 最高温度 38°C , 最低温度 25°C , 天气晴朗, 室外相对湿度为 $50\%\sim 72\%$, 测试房间气密性较好, 不考虑门窗渗透等室外气体渗入。

2.1 温度场分析

图 3 为 3 种工况下的温度梯度比较。从实验结果可以发现:

1) 3 种工况在距地板 0.1 m 处都存在较大温度梯度, 而在 $0.1\sim 2.4\text{ m}$ 温度梯度则相应小得多。如在联合运行方式下, 地板盘管供水温度为 18°C , 风机盘管供/回水温度为 $7^{\circ}\text{C}/12^{\circ}\text{C}$, 联合运行 3 h 后, 0.1 m 处空气温度比地板温度低 1.1°C , 温度梯度为 5°C/m , 而 $0.1\sim 2.4\text{ m}$ 平均温度梯度为 0.37°C/m 。

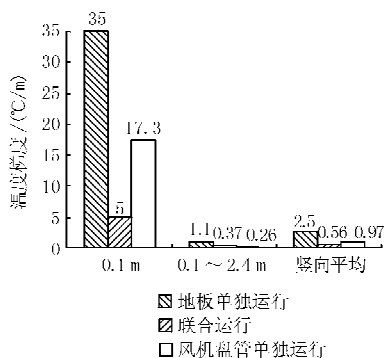


图3 3种运行工况下的竖向温度梯度比较

2) 在 0.1 m 处, 地板单独运行的温度梯度最大, 是风机盘管方式的 2 倍, 是联合运行方式的 7 倍。这是由于地板单独运行时, 下部空气遇冷沉积在地板表面附近, 而上部空气由于温度较高很难与下部空气进行对流换热, 从而造成下部温度梯度过大。当采用联合运行方式时, 风机盘管吹入室内的气流扰动了房间内的空气, 使上、下部的空气得以充分换热, 从而减小了竖向温度梯度。

3) 从竖向平均温度梯度来看, 3 种运行工况下的值都比较小, 其中地板单独运行方式是 2.5 °C/m, 而联合运行方式只有 0.56 °C/m, 完全符合舒适性标准。

4) 在联合运行中, 离地 0.1 m 处的空气温度要低于地板表面温度, 这是由于风机盘管的送风回流所致, 所以担心冷却地板引起下部温度过低是不必要的。

图 4~6 分别显示了 3 种运行工况下室内、外气温和地板表面温度随时间的变化。比较各自室内热环境, 可以发现:

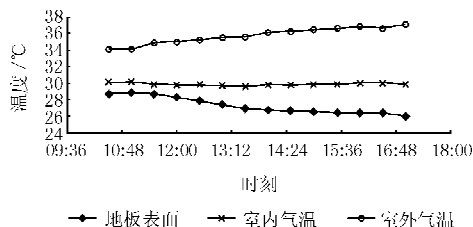


图4 地板单独运行工况下室内、外气温和地板表面温度随时间的变化

1) 冷却地板单独运行时, 室内气温高于地板表面温度, 并且室内气温变化平稳, 但是由于冷却地板的换热能力有限, 在室外气温达到 36 °C 时, 室内气温只能维持在 30 °C 左右, 很难达到舒适标准要求。

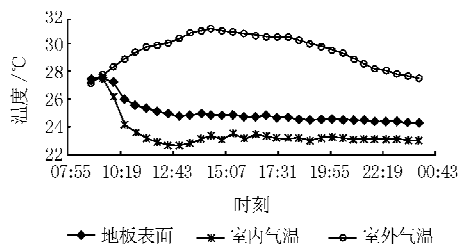


图5 风机盘管单独运行工况下室内、外气温和地板表面温度随时间的变化

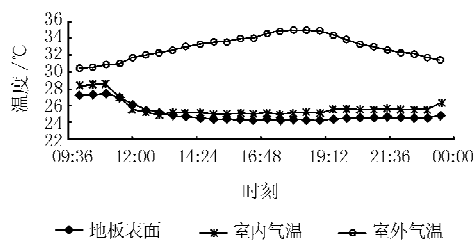


图6 联合运行工况下室内、外气温和地板表面温度随时间的变化

2) 风机盘管单独运行时, 室内气温低于地板表面温度, 并且室内降温效果非常明显, 在 28~31 °C 的室外气温条件下, 室内气温可以维持在 23 °C 左右, 基本能够满足降温的要求。但是由于风机盘管供水温度的上下波动造成了送风温度的不稳定, 室内气温波动较大, 且舒适性难以保障。

3) 联合运行方式刚好融合了前两种方式的优点。在降温效果上, 联合运行方式可以在最高室外气温 35 °C 情况下维持室内气温在 25 °C 左右, 并且地板表面温度也较低, 舒适性更强; 另外, 由于有冷却地板的参与, 室内气温受供水温度波动的影响较小, 稳定性有了较大的提高。

2.2 速度场分析

采用了热球风速仪对次卧室内速度场进行了测试。风机盘管的出风口位于房间的侧墙边, 距地约 2.7 m。图 7, 8 为 3 种工况下的测试结果。

由图 7 可以看出, 风机盘管运行方式下, 在距地 0.1 m 处风速较大, 达到 0.4 m/s, 1.0 m 处下

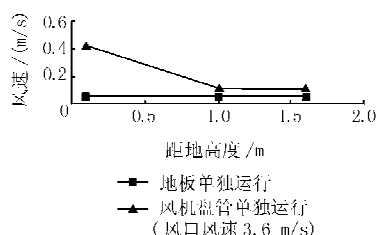


图7 地板单独运行与风机盘管单独运行的速度场分布

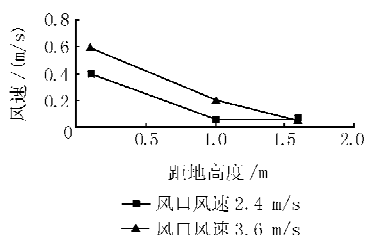


图8 联合运行速度场分布

降为 0.12 m/s, 1.6 m 处为 0.12 m/s, 即 1.0~1.6 m 高度内风速比较稳定。在地板单独运行时, 室内气流速度较小, 竖向气流速度梯度几乎为零; 而在风机盘管运行方式下, 其速度大小受风口出风速度的影响极大, 而且由于风口侧向出风, 属于射流方式, 因此地板表面附近是回流区, 风速较大, 1.0 m 及 1.6 m 处属于扩散区, 风速较小。由图 8 可以看出, 在联合运行方式下, 距地 0.1 m 处风速较大, 达到 0.4~0.6 m/s, 在 1.0 m 处为 0.06~0.2 m/s, 而在 1.6 m 处只有 0.06 m/s。另外, 随着风口风速的增加, 距地 0.1 m 和 1.0 m 处的风速也相应增大, 增幅 0.2 m/s 左右, 而 1.6 m 处的风速却非常稳定, 几乎未变。

2.3 房间湿环境分析

图 9, 10 分别显示了冷却地板单独运行和联合运行工况下室内空气相对湿度变化曲线。由于供

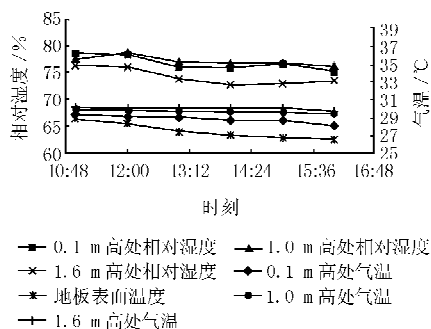


图9 冷却地板单独运行工况下室内竖向相对湿度及气温分布(未结露)

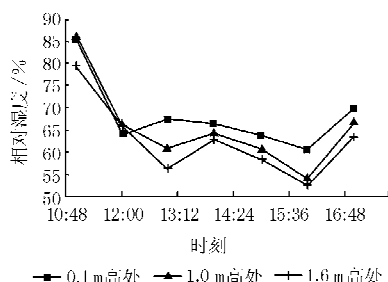


图10 联合运行工况下室内相对湿度分布(未结露)

水温度为 18℃ 左右, 因此实验中未出现结露现象。图中曲线是系统运行最初 6 h 的变化趋势。图 9 显示, 在系统运行之前室内各点相对湿度差异很小, 在 76.3%~78.7% 之间, 由 0.1~1.6 m 顺次降低。在竖向分布上, 1.6 m 处相对湿度值最低, 在 73% 左右; 1.0 m 与 0.1 m 处相对湿度相差无几, 都在 76% 左右。这些情况表明, 由于冷却地板本身不具备除湿功能, 它对降低室内空气的相对湿度以达到舒适标准几乎无能为力。

从图 10 可以看出, 在运行初期的 1 h 内, 3 个测点的相对湿度相差很小, 并且随时间均有较大幅度的降低, 0.1 m 处的空气相对湿度从 85.4% 迅速降到 64.3%。这主要是因为系统运行初期, 冷却地板还没有完全发挥作用, 室内空气的相对湿度主要受风机盘管的影响; 随着时间的推移, 冷却地板发挥作用, 由于风机盘管的除湿作用, 室内空气的含湿量是逐渐降低的, 因而平均相对湿度有降低的趋势。竖向相对湿度出现分层, 0.1 m 处相对湿度高于其余 2 个测点, 平均相对湿度在 60% 左右波动, 达到舒适度标准要求。

从温度场、湿度场及风速场分析可以得出结论, 冷却地板加风机盘管的联合运行方式有利于合理控制室内热、湿环境, 并有效解决单独采用地板供冷所产生的地板结露问题, 具有一般空调系统难以达到的舒适性。

3 地板表面的换热量

地板辐射供暖系统的传热过程可假定为如下 3 个阶段^[3-5]: 1) 工质水通过与管壁的对流换热把热量传给管外壁; 2) 管外壁通过热传导与其周围的地板结构层、覆盖层进行换热; 3) 地板表面通过对流与辐射与室内壁面、空气、人体进行换热。根据文献[6]的传热计算, 得出图 11 所示联合运行工况下地板换热量变化曲线。

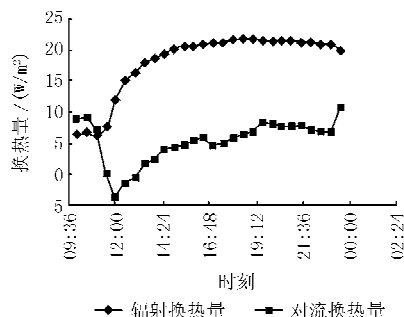


图11 联合运行工况下地板换热量

从系统开始运行起,地板辐射换热量由于地板表面温度不断降低而一路攀升,18:30 基本稳定在 22 W/m^2 ;而地板对流换热量则经历了一个先急剧减少,然后又持续增长的过程,最后在 6.6 W/m^2 附近上下波动,这个时候的辐射换热量占 76.9%,对流换热量占 23.1%。对流换热量在 11:30~13:00 出现负值,即该时段内空气温度低于地板表面温度,地板实质上在向空气放热,主要由于在系统运行初期风机盘管供水温度较低,造成出风温度比较低,因而室内气温较低。

通过测试地板表面温度、墙体表面温度、室内气温等参数以及辐射换热量与对流换热量的计算公式^[7-8],计算出地板表面的对流换热量和辐射换热量。3 种工况下地板表面的换热量见表 1。

表 1 3 种工况下地板表面换热量

	地板单独运行	风机盘管单独运行	联合运行
辐射换热量/(W/m^2)	33.2	3.9	22
对流换热量/(W/m^2)	21.2	-10	6.6
总换热量/(W/m^2)	54.2	-6.1	28.6
每 m 埋地盘管换热量/(W/m)	12.88	-1.45	6.8
辐射换热所占比例/%	61		76.9

在冷却地板单独运行时,其辐射换热量、对流换热量都是最大的,当加入风机盘管联合运行时,地板表面的换热能力被减弱了,但辐射换热的比例增加了。

风机盘管单独运行时,由于通过冷却空气来实现供冷,因而地板表面的辐射换热能力极低,几乎可以忽略,而地板表面的对流换热却是由地板传给空气热量,总的换热量也是地板放热。

(上接第 62 页)

充注率不同,热虹吸管的最佳倾角也不同,工程应用中应根据相应的充注率选择合适的倾角。

3.4 随着管排数的增加,热虹吸管换热器的温度效率逐渐升高。在实际应用中,管排数应以不少于 6 排为宜,以获得较高的温度效率。

3.5 随着迎面风速的增加,热虹吸管换热器的温度效率逐渐降低,而回收热量逐渐增大。迎面风速在 $2.6 \sim 3.25 \text{ m/s}$ 的范围内,可获得较为理想的总体能量回收效果。

参考文献:

[1] 钱以明. 高层建筑空调与节能[M]. 上海:同济大学

4 结论

单独冷却地板作为一种空调方式应用在住宅建筑中,只适用于热、湿负荷较小的空间区域,当热、湿负荷较大时很难达到舒适标准要求,必须增加辅助除湿设备。冷却地板与风机盘管空调系统联合运行方式可以克服冷却地板易结露的缺陷,并充分发挥冷却地板舒适性的优势。在两者联合运行的情况下,风机盘管系统具有除湿的功能并承担了部分室内显热负荷,室内完全能达到舒适标准要求。证明了即使在长江流域一带湿度较大的地区,地板辐射空调方式也值得应用与推广。

参考文献:

- [1] 胡松涛. 低温地板辐射采暖系统的实测与分析[C]//全国暖通空调制冷 2000 年学术年会论文集,2000:38-43
- [2] 付祥钊. 冷暖地板换热性能分析方法[J]. 暖通空调,2000,30(4):9-11
- [3] 章熙民,任泽霏,梅飞鸣. 传热学[M]. 3 版. 北京:中国建筑工业出版社,1993
- [4] 俞昌铭. 热传导及其数值分析[M]. 北京:清华大学出版社,1981
- [5] 彦启森,赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1986
- [6] 杨巍. 低温地板辐射采暖的传热模拟[C]//全国暖通空调制冷 2000 年学术年会论文集,2000:28-31
- [7] 田胜元,萧曰嵘. 实验设计与数据处理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1988
- [8] 刘炳文,许蔓舒. Visual Basic 程序设计教程[M]. 北京:清华大学出版社,2000

出版社,1990:432

- [2] 罗清海,汤广发,龚光彩,等. 热管技术在近室温工况条件下节能应用[J]. 建筑热能通风空调,2003,22(6):27-31
- [3] 鱼剑琳,张华,王宜义,等. 热管换热器在房间空调器上的应用[J]. 西安交通大学学报,1996,30(10):64-69
- [4] 贾代勇,袁印奎,杨家宝,等. 空调用冷热回收装置的实验研究[J]. 建筑热能通风空调,2002,21(6):1-3
- [5] 庄骏,张红. 热管技术及其工程应用[M]. 北京:化学工业出版社,2000:73-82