

文章编号:1673-9469(2008)02-0044-04

# 辐射空调热特性探讨

孟莹,张子平,任晓芬,刘媛  
(河北工程大学 城建学院,河北 邯郸 056038)

**摘要:**通过试验测试与理论模型相结合,分析影响辐射供冷空调系统的几个重要因素:平均辐射温度、表面温度、供回水温度、室内设计温度、室外气象条件、围护结构类型、辐射面材料。并结合理论分析结果与实验数据找出各影响因素之间的关系,理论与实际计算的误差及原因,总结出各影响因素关系式。

**关键词:**辐射供冷;表面温度;平均辐射温度

**中图分类号:** TU831.3

**文献标识码:** A

## The thermal characteristic research of radiant cooling system

MENG Ying, ZHANG Zi-ping, REN Xiao-fen, LIU Yuan

(College of Urban Construction, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** Some important influent factors of radiant cooling system, which includes the mean radiant temperature, the surface temperature, the temperature of supply water, the design temperature of indoor, the outdoor temperature and the material of wall and the radiant material, were analyzed by combining experiment tests with physical models. The relationships of all factors were analyzed. The relation equations of some influent factors were gotten by analyzing diffidence between the predictive value and the test value.

**Key words:** radiant cooling; surface temperature; mean radiant temperature

辐射供冷系统是以高温冷水作为冷媒、低温热水作为热媒,通过预埋在混凝土中的均布水管对房间加热或降温,从而实现供冷供热的空调方式。辐射空调不同于传统的对流空调,它通过辐射散热和对流散热综合调节室内温度,辐射散热比例较大,末端热特性与普通空调系统不同。尤其最近几年,国内辐射供冷技术的优越性得到了社会各界的认同,这一技术的应用及研究在住宅小区、办公楼中的实际应用发展十分迅速,但是有关辐射供冷技术的研究,大部分只局限于末端传热过程以及热源方式的研究<sup>[1-3]</sup>,对辐射空调的控制方面研究很少<sup>[4]</sup>,本文针对系统的热特性过程进行物理模型与实验数据研究分析,找出系统的各影响因素的关系,为提出适合辐射空调的控制方式做准备。

### 1 实验模型

实验房间为南京市6层住宅小区2层,尺寸为

5m×3.5m×3.6m,一面外墙,采用PEX管作为辐射吊顶埋管,布管方式为S型,排管间距200mm,采用无保温吊顶埋管方式,结构如图1所示。

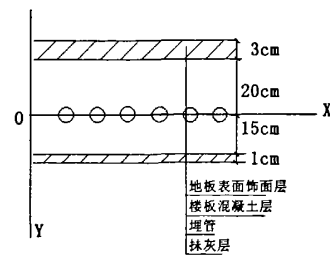


图1 埋管剖面及坐标

Fig.1 The ection of bury pipe and coordinate

### 2 数学分析

根据图1所示辐射面物理模型,建立传热过程数学模型,传热过程实际上是一个三维非稳态

收稿日期:2007-12-09

作者简介:孟莹(1982-),女,河南周口人,硕士研究生,从事辐射空调系统研究。

导热过程,其具体的求解非常复杂,为简化问题,将管与管之间的微弱导热忽略,把管与管视为一个平板,把这中心平面视为  $X = 0$  点,厚度为管子直径 200mm,温度  $t = t_g$ ,视室内温度为稳定值,这样就构造一维稳态导热方程  $\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0$

由于吊顶的向上部分有保温隔热材料,房间与隔壁房间温度视为保温绝热,则边界条件为

$$y = 0 \quad t = t_g$$

$$y = \delta \quad t = t_1$$

其中  $t_g$  为供回水温度平均值;  $t_1$  为吊顶表面温度。

对辐射表面,由于对流换热和辐射换热同时进行,且室内空气不以散热,吸收和再发射等形式参与辐射,因此对流换热和辐射换热可认为是相对独立的。本文用综合换热系统来代替对流换热和辐射换热之和。

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r$$

其中  $\alpha_c$  为对流换热系数,  $w/m^2 \cdot ^\circ C$ ;  $\alpha_r$  为辐射换热系数,  $w/m^2 \cdot ^\circ C$ 。

室内空气流速 0.3 - 1m/s,按层流的计算公式  $\phi = \alpha A \Delta t$

其中 A 是辐射面面积,  $m^2$ ;  $\Delta t$  为表面温度与室内温度的差,  $^\circ C$ 。

不考虑接触热阻时,辐射层第三类边界条件

$$-\lambda (\partial t / \partial y) |_{y=\delta} = \alpha (t_1 - t_n)$$

结合建筑物热平衡公式,可求解建筑物内空气的温度与表面温度。

根据导热对流方程及边界条件,可得供回水平均温度、辐射面温度、室内温度关系式为

$$t_l = t_g + \alpha \delta; t_n = t_l + \frac{\alpha_l}{\alpha}$$

从结论分析知:辐射面表面与室内温度存在着线性关系,这种关系由于 60% 以上是辐射作用,

它是电磁波的激活运动引起的,其换热时间极短,以光速传递,所以这种延迟作用可以忽略不计。且计算过程中假定是在稳定状态下,所以室内温度与表面温度无延迟同增送减,调节表面温度的大小等同于调节室内温度。

### 3 测试数据分析

对系统室内温度、供回水温度、辐射面温度的测量是使用 testo 公司生产的温湿度仪、红外线测温仪,流量温度测量仪,每两个小时测试一次,绘制图表如图 2 所示,室外温度变化无规律性,变化范围较大。

在室内温度、埋管间距、埋管管径和表面材料一定的情况下,将图 2 中数据分类整理,合并计算,通过最小二乘法对数据进行处理,得到近似直线,温度的变化也符合线性规律。计算得关系式

$$t_l = 0.74 t_g + 9.15$$

式中  $t_l$ —辐射面平均温度,  $^\circ C$ ;  $t_g$ —供回水平均温度,  $^\circ C$ 。

其中  $t_l = f(t_g)$  知其斜率为 0.74,与理论分析相差 16%。

对夏季的测试数据同样的方法进行处理,对其数据进行分析发现,供回水温度稳定运行与表面温度的变化无规律性,这种无律性与室外的变化相似。

供回水温度与表面温度的变化关系不能反应到某个具体参数的变化关系,因为供回水温度的变化在引起表面温度的变化时要有延迟时间,这种延迟时间因不同的材料而不同,所以直线及关系式所表示的为两者的变化关系,与热力学分析的结果一致,并定性的分析了这种结果的变化关系式,可以作为供回水温度设定值的参考。

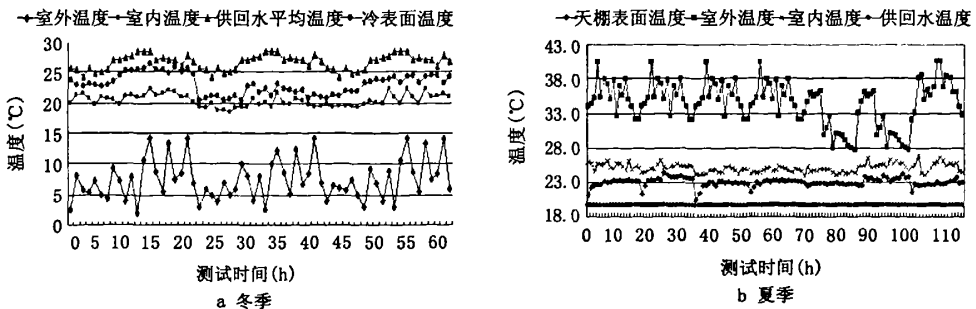


图2 各测点温度随时间变化关系  
Fig.2 The change of all research point temperature

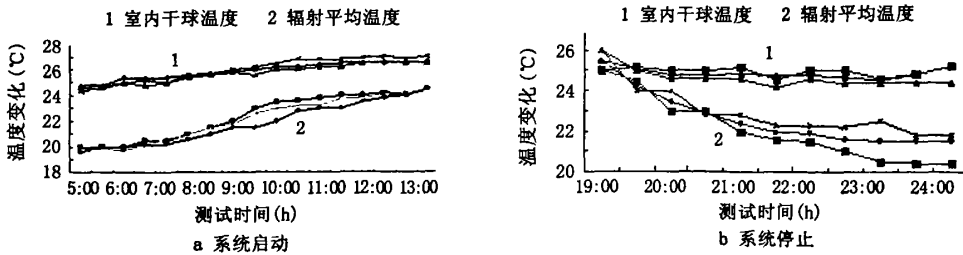


图3 室内温度和表面温度随时间的变化

Fig.3 The change of indoor temperature and the surface temperature by time

冬季表面温度与室内温度的处理关系式

$$t_n = 0.43 t_l + 10.39$$

式中  $t_n$ —室内干球温度,℃。其中  $t_n = f(t_l)$  知其斜率为 0.44,与理论分析相差 53%。

夏季辐射面温度与室内温度的关系式

$$t_n = 0.86 t_l + 5.3$$

其中  $t_n = f(t_l)$  知其斜率为 0.86,与理论分析相差 14%。

表面温度与室内温度的变化关系理论与实际分析误差很大,说明两者的实际关系存在着线性的立即反应关系,表面温度的增减表现为室内温度也有同样的增减关系,表面温度与室内温度的这种关系在辐射空调系统中,可以通过表面温度来反应和反馈室内温度的变化关系。在理论上,由于忽略其它因素的干扰,所以它的变化是理想化的,同样的表面辐射温度,室内温度升高较快。而实际上,传热中的热损失及其它不可逆因素,导致导热过程中热量不能全部传给室内,热辐射过程中家具及建筑其它墙面的吸收作用及热的损耗等。通过比较分析可以得出表面温度与室内温度的变化关系约为 0.4-0.5,地板供冷的冬季变化系数要高一点,约 0.6-0.65。

### 4 影响因素

#### 4.1 吊顶的蓄热与衰减

当室外气象条件偏离设计条件时,对系统的热源或流量进行调节,但在调节后,由于混凝土的滞后时间,辐射面平均温度不会马上起变化(含容量滞后和纯滞后),室温继续按热影响的方式发展,至滞后时间过后,系统的调节才会发生作用[5]。

系统的滞后时间与材料的蓄热系数有关,蓄热系数越大,热稳定性好,滞后时间长。在实施调节时,延迟时间因素不可忽视,这种调节必须具有预期性。

从图3所示辐射供冷系统的延迟性变化曲

线,从数据分析看来,对于普通的混凝土吊顶,系统从启动到稳定的时间需约 4h,对于地板供冷来说,不同的地板结构的延迟时间不同,对于混凝土结构+木地板来说,需要 5-6h 表面温度及室内温度才能稳定,对于地板砖来说,需要的时间会短一些。

由于建筑吊顶所用材料为混凝土,热容量大,对系统的供冷热量存在延迟和衰减。这种延迟作用在对流空调系统中是不可忽略的,但在辐射空调系统中,根据吊顶材料的不同,延迟与衰减的程序也不一样,但对系统的影响很大[6]。以上的分析是针对系统热稳定后,在升温或降温的条件下适用的。对系统刚启动或负荷变化很大的情况,需另加分析。

#### 4.2 室外温度

室外温度对室内热环境的影响主要有两部分:通过围护结构传入的热湿量和新风带入的热湿量。围护结构传热有两种:太阳直射和太阳热辐射。

外围护结构的热作用是周期性不稳定传热,它存在着衰减和延迟(如图4所示),衰减度和延迟时间与围护结构的导热系数、比热、密度有关,重型结构建筑物的衰减度大,延迟时间长[7]。从

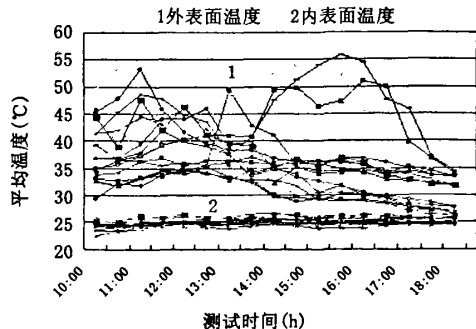


图4 外表面与内表面温度变化曲线

Fig.4 The change curve of out and in surface temperature of out wall

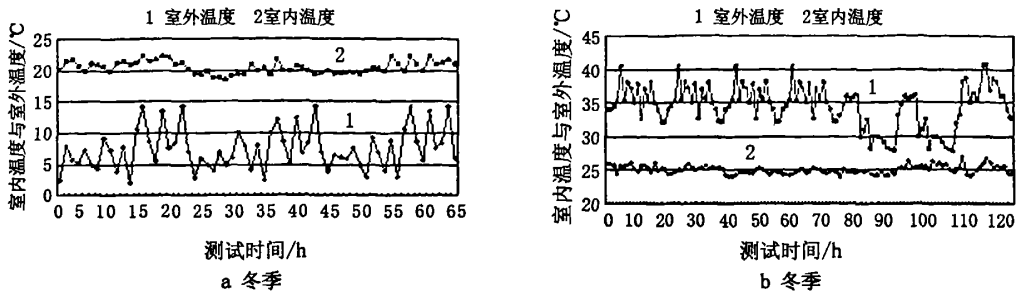


图5 室内外温度变化

Fig. 5 The change of outdoor and indoor temperature

图中看出,外墙表面温度变化无规律,主要是受到太阳直射的影响,对于图4所示的墙体结构的传热系统 $0.4w/m^2 \cdot k$ 来说,外墙的热扰动对室内的影响不是太大,只是随着时间的推移,外墙内表面温度有升高的趋势。但对于不保温墙体或传热系统大于 $0.7w/m^2 \cdot k$ 的墙体,室外干扰对室内的影响很大。

辐射空调系统受室外温度的影响很大,围护结构的类型也是影响室内温度的一个重要因素,因此在使用辐射吊顶或地板供冷系统时,墙体应加设保温层,窗体设双层低辐射,这才能更好利用发挥辐射吊顶的优势。

透过窗体的直射得热也具有不稳定性,且直射热的时间、大小不固定,它具有瞬时性,直接反映为室内温度升高<sup>[8]</sup>,可以通过自控措施消除,也可以通过在窗体上设反射膜、加窗帘等方式消除。

室外温度对室内的影响是综合效应,它受到墙体,室外温度等各方面影响,如图5(a)、(b)为冬夏季测试室外温度与室内温度变化关系曲线,室外温度与室内温度趋向于随着室外温度升高而升高,同时室内温度受供回水温度、新风温湿度、太阳直射等影响,室内温度呈波动状态。

将图5所示数据用EES软件处理,并处理数据,可得冬夏季室内温度与室外温度变化关系式

$$\text{冬季: } t_n = 0.25t_w + 19.78$$

$$\text{夏季: } t_n = 0.03t_w + 24.13$$

式中  $t_w$ —室外干球温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

南京地处北纬32度,东径118.8度,相对湿度较高,太阳直射度高,所以夏季室外温度对系统的影响不可忽视。

夏季室内温度的影响因素比冬季更复杂,尤其室外的天气情况对室内的影响更大。它包括很多方面,太阳直射会造成辐射面的温度快速的升

高,太阳高度角不同,对室内的影响也不同,太阳的辐射作用控制着室内的变化趋势等。所以在辐射系统中,太阳的辐射作用是不可忽略的,此图只反应温度的变化趋势,这种变化的延迟时间很长,太阳直射的不定期作用等,所以要从多种原因着手分析。

## 5 结语

对热稳定的辐射供冷系统来说,室内温度、辐射面平均温度与供回水平均温度存在着线性关系,可以通过这种线性关系来控制表面温度或供回水平均温度。而且室外温度对热舒适性的影响也不可忽略,在室内湿度进行控制的同时,应根据室外温度的变化补偿控制,在控制要求提出前,对系统运行参数测量与分析是控制成功的关键。

## 参考文献:

- [1] 闫全英,齐正新,王威.无保温楼板辐射供冷系统热过程的研究[J].建筑热能通风空调,2005,24(1):72-75.
- [2] 孙丽颖,马最良.冷却吊顶空调系统的适用性分析[J].哈尔滨商业大学学报,2004,20(5):13-17.
- [3] 狄洪发,王威,江亿.辐射吊顶的实验研究[J].暖通空调,2000,30(4):42-45.
- [4] 金梧凤,王荣光.地板辐射供暖系统控制方式[J].海外传真,2005,(7):67-71.
- [5] 苏夺,陆琼文.辐射空调及其发展方向[J].制冷空调电力机械,2003,93(24):165-172.
- [6] 郁文红,杨昭.辐射冷却技术与住宅空调[J].节能,2006,275:35-39.
- [7] 徐来福,金风云,苏华.冷却顶板/置换通风空调系统分析[J].建筑热能通风空调,2005,25(2):38-42.
- [8] 陈启,马一太.辐射吊顶板空调系统的优势[J].节能技术,2005,129(23):18-22.

(责任编辑 闫纯有)

作者: [孟莹](#), [张子平](#), [任晓芬](#), [刘媛](#), [MENG Ying](#), [ZHANG Zi-ping](#), [REN Xiao-fen](#), [LIU Yuan](#)  
作者单位: [河北工程大学, 城建学院, 河北, 邯郸, 056038](#)  
刊名: [河北工程大学学报\(自然科学版\)](#)   
英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)  
年, 卷(期): 2008, 25 (2)

## 参考文献(8条)

1. [闫全英;齐正新;王威](#) [无保温楼板辐射供冷系统热过程的研究](#)[期刊论文]-[建筑热能通风空调](#) 2005 (01)
2. [孙丽颖;马最良](#) [冷却吊顶空调系统的适用性分析](#)[期刊论文]-[哈尔滨商业大学学报\(自然科学版\)](#) 2004 (05)
3. [狄洪发;王威;江亿](#) [辐射吊顶的实验研究](#)[期刊论文]-[暖通空调](#) 2000 (04)
4. [金梧凤;王荣光](#) [地板辐射供暖系统控制方式](#) 2005 (07)
5. [苏夺;陆琼文](#) [辐射空调及其发展方向](#)[期刊论文]-[制冷空调与电力机械](#) 2003 (24)
6. [郁文红;杨昭](#) [辐射冷却技术与住宅空调](#)[期刊论文]-[节能](#) 2006 (6)
7. [徐来福;金风云;苏华](#) [冷却顶板/置换通风空调系统分析](#)[期刊论文]-[建筑热能通风空调](#) 2005 (02)
8. [陈启;马一太](#) [辐射吊顶板空调系统的优势](#)[期刊论文]-[节能技术](#) 2005 (23)

## 本文读者也读过(10条)

1. [汪琳琳](#) [辐射空调末端及CO<sub>2</sub>>热泵的研究](#)[学位论文]2007
2. [王少海](#) [棚板辐射空调在大型公共建筑中的应用](#)[期刊论文]-[科技资讯](#)2007 (34)
3. [解国珍;冯文斌;于丹](#) [空调房间特性动态仿真模拟](#)[会议论文]-
4. [隋学敏;张旭;SUI Xue-min;ZHANG Xu](#) [辐射空调末端的\(火用\)分析与评价](#)[期刊论文]-[流体机械](#)2010, 38 (4)
5. [王婧;陈振乾;施明恒](#) [房间空调系统的动态特性及控制分析](#)[会议论文]-2007
6. [余晓平;付祥钊](#) [室内设计温度对夏热冬冷地区新风冷热耗量的影响](#)[期刊论文]-[暖通空调](#)2003, 33 (2)
7. [黄奕运;张玲;HUANG Yi-yun;ZHANG Ling](#) [宁波东方明珠城高层住宅双向辐射供冷空调系统设计](#)[期刊论文]-[制冷空调与电力机械](#)2009, 30 (2)
8. [李延菲;任晓芬;张子平;郝庆;LI Yan-fei;REN Xiao-fen;ZHANG Zi-ping;HAO Qing](#) [土壤源热泵夏季运行特性的实验研究](#)[期刊论文]-[河北建筑科技学院学报\(自然科学版\)](#) 2006, 23 (4)
9. [隋学敏;张旭](#) [地板供冷系统运行工况及室内热环境分析](#)[会议论文]-2010
10. [王婧;施明恒;陈振乾](#) [房间空调系统动态特性及系统自动控制](#)[会议论文]-2007

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_hbjzkjxyxb200802012.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb200802012.aspx)