地板辐射供暖系统热工性能实验研究

天津大学 王英辉☆ 涂光备 李建兴 刘树森 宗 杰 袁哲宁
李 江 黄保民

摘要 基于对采用 PP-B 管材、等密度双回型铺设方式的低温地板辐射供暖系统的实验研究，得到该系统散热量与流量及供水温度关系的热工特性曲线，发现随着流量的增加，散热量对管路内平均流速的变化率呈减小趋势。通过与传统柱型散热器热工特性对比及实验数据拟合，给出了供水温度为 30～60 ℃、水系统流量为 0.03～0.60 m^3/h 时，该系统散热量的计算公式，并验证了公式的有效性。

关键词 地板辐射供暖 热工性能 散热量 水流量 计算对数温差 计算公式

Experiment of thermodynamic properties of floor panel heating systems

By Wang Yinghui★, Tu Guangbei, Li Jianxing, Liu Shusen, Zong Jie, Yuan Zhening, Li Jiang and Huang Baomin

Abstract Based on the experimental study on the equal spacing and two-pass style system with PP-B pipes, obtains the curves reflecting the relation between the heat release, water flow rate and water supply temperature, and finds that the larger water flow rate is, the less variation of heat release with mean water flow velocity in the pipes is. Through the thermodynamic properties comparison with those of traditional column radiators and experimental data fitting, provides the calculation formula of the heat release with an applying range that water supply temperature is 30～60 ℃ and water flow rate is 0.03～0.60 cubic metre per hour, verifying validity of the formula.

Keywords floor panel heating, thermodynamic properties, heat release, water flow rate, calculating logarithmic temperature difference, calculation formula

★ Tianjin University, Tianjin, China

①

尽管地板辐射供暖方式几十年前就在我国出现，但只是在近些年才大量应用于住宅建筑中[1]。当前，对其热工特性和供热基本规律的认识不够完善和成熟。为此，在天津大学环科院地板辐射供暖系统实验小室(4 000 cm×2 960 cm×3 000 cm)进行了实验研究，希望获得主要热工参数的变化规律，在此基础上回归出系统散热量与计算温差和流量的数学关系(计算公式)。

1 实验系统及实验内容

1.1 实验系统说明

本低温地板辐射供暖实验系统由热工参数测量系统、温度控制系统及地板辐射供暖系统构成。实验装置平面示意图见图 1。

1.1.1 参数测量系统

由 DANFOSS 智能化热力参数测量仪完成供

①☆ 王英辉，男，1978 年 8 月生，工学学士，在读硕士研究生
300072 天津大学 0316＃信箱
(022) 27408006
收稿日期：2002－09－05
一次修回：2003－01－27
二次修回：2003－10－26

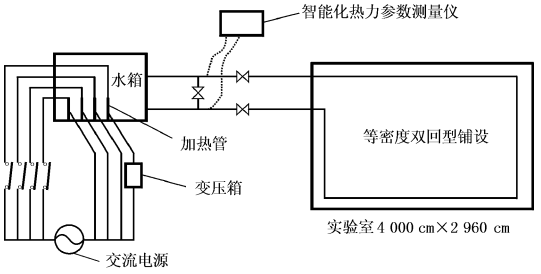


图 1 实验装置平面示意图

回水温度、水系统瞬时流量和水系统散热量的测量。室内外温度通过标准水银温度计测量,同时采用红外线温度测量仪测量地板表面和围护结构的温度值,供实验参考。

1.1.2 温度控制系统

由 4 组电加热管(每组热功率 2 kW)、1 个变压箱、1 个 220 V 交流电源组成,电路连接采用铜线。

1.1.3 地板辐射供暖系统

由保温水箱(热源)、流量调节阀(3 个)、嵌段共聚聚丙烯(PP-B)管束(外管径为 20 mm(0.789 in))组成,管束排列和埋设方式具有一定的代表性(见图 2,3)。

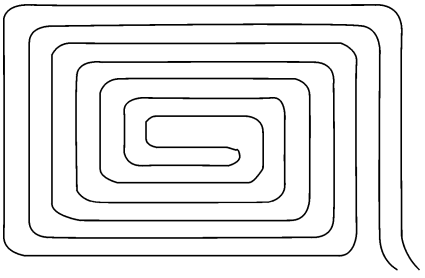


图 2 PP-B 管铺设图

图 3 中,剖面从下到上各部分依次为基础地面、聚苯乙烯保温层、铝箔、卵石混凝土、找平层、地板面。

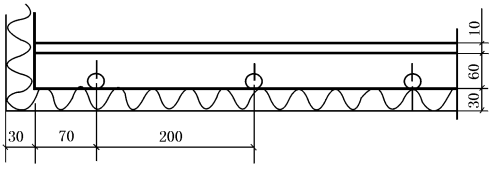


图 3 地板辐射供暖地面做法剖面图

1.2 实验内容

1.2.1 实验数据采集方案

采用定供水温度变流量法[2]:通过选定供水温度,调节系统流量至选定值。待系统稳定(稳定时间一般为 1 h)后,读取其他测量参数数据。

1.2.2 选定数据分布

供水温度:65,55,50,45,40,35,30 ℃

流量:0.03, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.45, 0.60 m^3/h

2 数据测量结果

2.1 部分数据(见表 1,2)

表 1 供水温度 65 ℃ 测量结果

供水温度/℃	回水温度/℃	供回水温差/℃	系统流量/(m^3/h)	散热量/kW	室内气温/℃	室外气温/℃
65.3	35.5	29.8	0.031	1.072	21.0	1.9
65.9	37.0	28.9	0.050	1.633	20.6	1
65.6	44.1	21.5	0.100	2.494	20.6	1
65.0	47.8	17.2	0.152	2.993	20.7	0
65.0	49.9	15.1	0.200	3.522	21.0	-1
64.9	52.1	12.8	0.304	4.424	21.1	-1
64.9	54.8	10.1	0.450	5.146	21.6	-1
65.2	56.8	8.4	0.599	5.628	21.9	-1

表 2 供水温度 30 ℃ 测量结果

供水温度/℃	回水温度/℃	供回水温差/℃	系统流量/(m^3/h)	散热量/kW	室内气温/℃	室外气温/℃
30.2	20.4	9.8	0.030	0.350	14.0	-0.2
30.1	20.7	9.4	0.050	0.547	14.0	-1
30.1	22.7	7.4	0.100	0.871	13.8	-0.6
30.0	24.0	6.0	0.151	1.060	13.6	-0.8
30.1	25.1	5.0	0.199	1.152	13.6	-1.2
30.1	25.8	4.3	0.299	1.483	13.6	-1
30.1	27.0	3.1	0.450	1.564	13.8	-1
30.0	27.5	2.5	0.600	1.679	13.8	-0.7

2.2 地板辐射供暖系统流量—散热量关系图(见图 4)

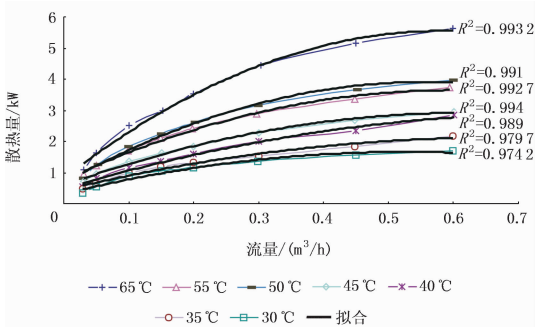


图 4 地板辐射供暖系统流量—散热量实验测量与数据拟合曲线图

从图 4 中可以看出,水系统流量为 0.03~0.6 m^3/h 时,随着流量(管路平均流速)的增加,系统散热量对流量(管路平均流速)的变化率将逐渐减小。

图 5 是柱型散热器流量—散热量关系图。对比图 4 与图 5,可以看到地板辐射与柱型散热器的热工特性相似,即系统的散热量是计算对数温差和系统流量的函数。

3 数据分析

3.1 数据的拟合

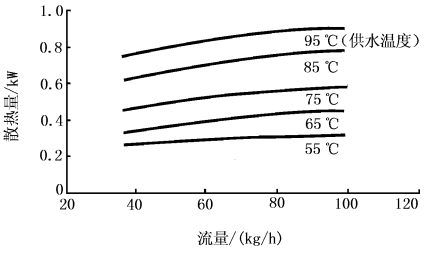
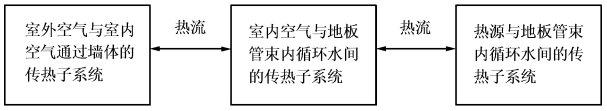


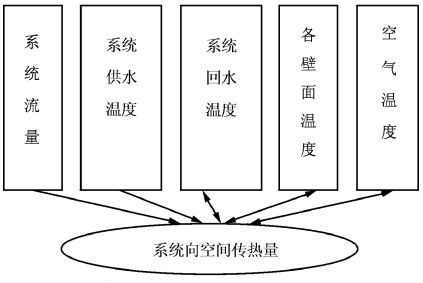
图 5 柱型散热器流量—散热量关系图[3]

3.1.1 数据拟合所采用的系统模型

将地板辐射供暖系统划分为 3 个子系统：



本文研究的是室内空气与地板管束内循环水间的传热子系统，在给定实验条件(围护结构与地板铺设方式)下，其传热模型如下：



与散热器供暖系统不同，由于地板辐射供暖系统中辐射传热量占总传热量的比例比散热器供暖系统的大[4~5]，因此各壁面温度应作为室内空气得热量的影响因素之一。下面通过引入室内平均辐射温度来讨论各壁面温度对室内空气得热量的影响程度。对于层高小于 4 m 的建筑，室内平均辐射温度 t_{mr} 的近似计算方法如下[6~7]：

$$t_{mr}=\frac{\sum_{j=1}^{n}t_jA_j}{\sum_{j=1}^{n}A_j} \tag{1}$$

式中 t_j 为房间中壁面 j 的平均温度；A_j 为房间中壁面 j 的面积。

t_{mr} 对人体的热舒适性影响很大，当室内气流速度较小时，热舒适温度 t_c 可表示为：

$$t_c=a\,t_{n,c}+b\,t_{mr} \tag{2}$$

式中 $t_{n,c}$ 为室内实测空气温度；a，b 为常数，其具体数值由实验确定，本文取 $a=b=0.5$。

结合实验数据，计算室内平均辐射温度，结果表明，室内平均辐射温度低于室内空气实测温度 0.3～2.7 ℃，二者平均相差 1.6 ℃，我们取定 $t_{mr}=t_{n,c}-1.6$ ℃。

最终将影响系统传热量的因素综合为两个：系统流量和系统供回水与室内热舒适温度的对数平均温差。

3.1.2 地板辐射供暖系统散热量计算公式

应用非线性三元两因素回归方法，在不同标准供水温度下，选取 56 组测量数据得到供水温度为 30～65 ℃、水系统流量为 0.03～0.60 m^3/h 时等密度双回型铺设方式的低温地板辐射供暖系统热工特性计算公式(管间距为 200 mm，外管径为 20 mm(0.789 in)，埋深为 60 mm，管材为 PP-B(嵌段共聚聚丙烯管))[4]：

$$q=a_0+a_1G^{k_1}+a_2\Delta t^{k_2}+a_3G^{k_3}\Delta t^{k_4} \tag{3}$$

式中 q 为系统的单位面积散热量，W/m^2；a_0，a_1，a_2，a_3，k_1，k_2，k_3，k_4 由实验确定，$a_0=5.38$，$a_1=-1.14\times10^{-7}$，$a_2=9.89\times10^{-2}$，$a_3=0.18$，$k_1=3.01$，$k_2=1.83$，$k_3=0.55$，$k_4=1.1$；G 为系统流量，kg/h；Δt 为计算对数温差，$\Delta t=(t_g-t_h)/\ln[(t_g-t_c)/(t_h-t_c)]$，其中 t_g，t_h 为供、回水温度，℃，t_c 为热舒适温度，由式(2)计算。

3.2 误差分析

通过回归分析得到式(3)的有效性指标：

相关系数＝0.991；

剩余标准误差＝11.51 W/m^2；

最大误差＝15.87 W/m^2；

平均误差＝6.09 W/m^2；

平均相对误差＝5.6%。

因此，可初步验证式(3)的有效性。

3.3 由式(3)所绘直观图(见图 6，7)

4 实验结果与讨论

4.1 获得了不同供水温度下地板辐射供暖系统流量—散热量关系图，此种低温地板辐射供暖水系统流量为 0.03～0.6 m^3/h 时，随着流量的增加，系统散热量对管路内平均流速的变化率将逐渐减小，即当管路内平均流速较大时，系统的量调节能力变弱。通过与柱型散热器的对比分析，获得了供水温度为 30～65 ℃，水系统流量为 0.03～0.60 m^3/h 时，等密度双回型铺设方式的低温地板辐射供暖系统热工特性计算公式，并验证了公式的有效性。为此种低温地板辐射供暖系统的设计计算及系统的调节和控制提供了依据。

4.2 今后应对各种典型铺设形式的地板辐射供暖系统进行实测，同时扩大流量测量范围，获得低温地板辐射供暖系统的较全面的数据，重新拟合测量数据，简化计算公式的同时保证计算公式的有效性。

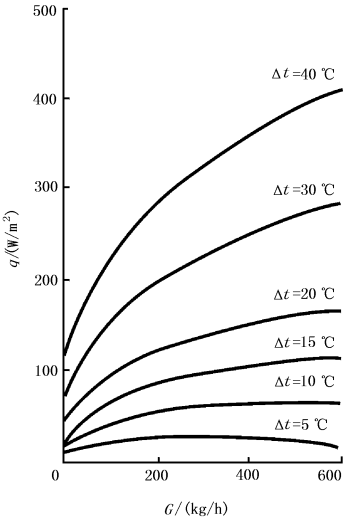


图 6 流量—散热量关系图

4.3 由于地板辐射供暖系统中，系统以辐射方式散出的热量比传统散热器供暖系统的要大，因此，低温地板辐射供暖系统与传统散热器系统的传热计算在质的相似性中，存在着不同传热方式之间的散热量分布的量的显著差异。所以，建立标准低温地板辐射供暖系统实验台，开展多种形式低温地板辐射供暖系统的热工特性的实验研究有其自身的特殊意义。

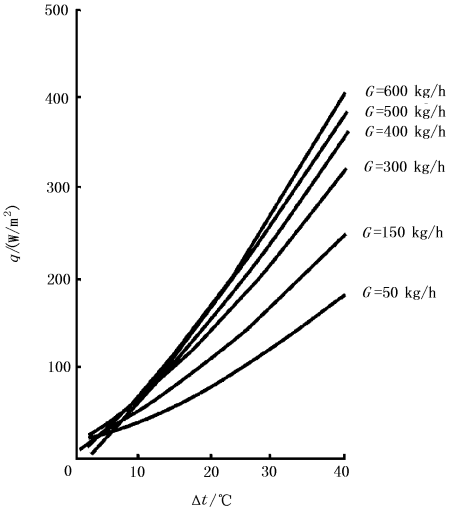


图 7 计算对数温差—散热量关系图

参考文献

1 王荣光. 低温地板辐射采暖. 煤气与热力，1999，19(4)：53－55

2 孙祥泰，张双喜，王大恩，等. 热管散热器热工性能实验. 青岛建筑工程学院学报，1993，14(2)：20－24

3 张双喜，孙祥泰. 钢制柱式热管散热器的研究. 青岛建筑工程学院学报，1994，15(1)：39－41

4 宗立华. 塑料埋管地板辐射供暖的热性能分析. 暖通空调，2000，30(1)：6－8

5 张旭，陈文良. 常用供暖散热器辐射—对流放热量比例的实验研究. 暖通空调，1994，24(6)：13－15

6 孙德兴，陈海波，张吉礼. 低温热水地板辐射采暖地面散热量的分析与计算. 见：全国暖通空调制冷 2002 年学术年会文集. 北京：中国建筑工业出版社，2002. 5－8

7 张志刚，李秀华. 地板辐射供暖对围护结构保温的要求. 建筑热能通风空调，2001(1)：20－22

·会讯·

上海能源与环境国际学术会议

由上海理工大学与美国乔治华盛顿大学联合举办的第 3 届能源与环境国际学术会议于 2003 年 12 月 11～13 日在上海理工大学召开。

能源是维持国民经济发展的重要物质基础和根本保证，它与材料和信息构成现代社会繁荣和发展的三大支柱，国家能源安全问题也是确保国家安全和发展的关键要素之一。

本次会议的宗旨是：在能源需求不断增长和缓和气候变化的前提下，寻求适宜的能源与环境技术来保障能源供应，以实现能源与环境协调发展；为国内外学者提供学术交流平台，共同为 21 世纪的能源与环境科技发展出谋划策。会议的主题是缓和气候变化影响，防止大气环境污染，保障充足能源供给，发展洁净能源技术。

会议共录用论文 325 篇，国外论文 66 篇，国内论文 259 篇，涉及 26 个国家和国内 46 所高校，6 个国家级研究所和 3 个企事业单位。会议就气候变化、能源和环境政策与规划；可再生能源技术进展；分散和分布式电力系统；与能源和环境相关的热科学和技术进展；新型动力设备和系统技术；洁净能源与燃烧技术；能源储存技术的进展；城市环境能源技术；能源与环境工程监测技术的进展；制冷、空调与低温技术进展，包括替代制冷剂的应用、制冷技术进展、蓄冷空调技术进展、低温技术进展；建筑节能技术；废弃物流技术的进展等十几个专题展开学术讨论和交流。会议正式出版了精装论文集两大册，会议论文将全部被 Ei 和 ISTP 收录。来自 16 个国家和地区的 220 名代表参加了此次会议。本次会议的召开必将有力地推动能源与环境科技的发展。

（本刊特约通讯员 吴延鹏）

·简讯·

中国社会科学院、内蒙古考古研究所的考古专家于 2003 年 10 月 8 日在内蒙古兴隆洼文化遗址考古时发现了 4 000 年前古人类取暖用的火墙。火墙高 30 cm，宽 20 cm，长约 2 m，已被烧成了褐红色。从火墙一端点燃柴草时，从另一端仍可顺畅地冒出烟来。考古专家说，这是迄今为止发现的东北地区保存最完好的新石器时代的取暖设施。新华网、内蒙古新闻网等网站对此进行了报道，ASHRAE Journal 2003 年第 11 期也有相关报道，但将发现时间误为 2003 年 10 月 14 日。

（本刊）