

重庆夏季低温辐射供冷地源热泵空调系统试验研究

重庆大学 黄 忠[☆] 刘宪英 丁 勇 孙纯武

摘要 介绍了重庆地区夏季低温辐射供冷地源热泵空调系统的试验装置、测试仪表、测点布置、测试数据及其处理方法,从系统运行试验、防凝露、节能性、室内布置的遮挡、系统调节等方面对测试结果进行了分析讨论。

关键词 低温辐射供冷 地源热泵 防凝露 夏季工况

Experimental study of a ground-source heat pump air conditioning system with low temperature radiant cooling in Chongqing

By Huang Zhong[★], Liu Xianying, Ding Yong and Sun Chunwu

Abstract Presents the experiment devices, test instruments, arrangements of measuring points, test data and the processing method for the system. Discusses the test results from the aspects of operating test, anti-condensation, energy efficiency, interior sheltering and system regulating.

Keywords low temperature radiant cooling, ground-source heat pump, anti-condensation, summer condition

★ Chongqing University, Chongqing, China

①

0 引言

近年来,低温辐射供暖地源热泵系统得到了广泛运用。实践证明,这种系统具有显著的节能环保效果。随着人民生活水平的提高,冬季供暖、夏季空调已被越来越多的人接受。将低温辐射供暖地源热泵系统用于夏季供冷,可以一套系统兼顾冬、夏两季室内环境要求,节约投资。本文对重庆夏季低温辐射供冷地源热泵空调系统的试验研究进行了介绍,并对该系统的有关问题进行了讨论。

1 试验系统简介

试验地点位于重庆市沙坪坝。试验装置始建于1998年8月。埋管包括5组15根深10m的竖埋套管式换热器,间距1.5m,错排布置,每组3根套管式换热器为串联连接。组间为并联连接,各组可通过阀门控制切换。本试验只开启左侧3组埋管。最大设计水流量为1800 L/h。

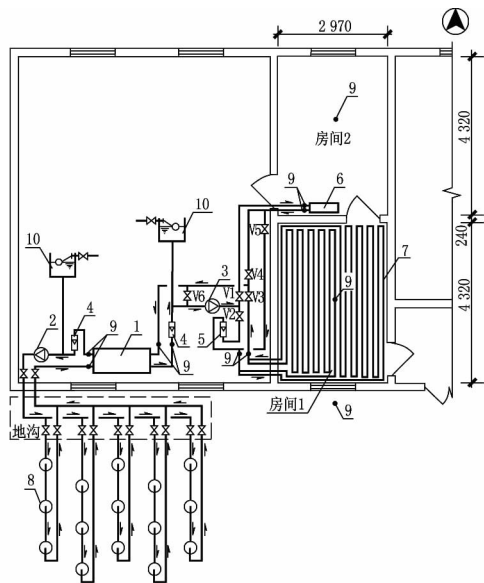
冷热源设备为自制水-水热泵机组。压缩机为往复式封闭压缩机,名义工况制冷量为2960 W;换热器为0.7 m² 套管式换热器;机组及管道均采用聚乙烯泡沫板保温;埋管侧及用户侧各采用1台KQL15-80立式离心水泵,扬程8 m,流量1.5 m³/h。

用户侧空调系统设在20世纪70年代建造的建筑内,由2个房间组成。房间1与房间2尺寸相同,均为4.32 m×2.97 m×2.5 m(长×宽×高)。墙体为240 mm厚黏土实心砖,普通木门窗;楼板为200 mm厚普通混凝土预制圆孔板。

房间1采用2组并联辐射地板盘管,平行布置;

①☆ 黄忠,男,1949年1月生,大学,副教授
400045 重庆大学城市建设与环境工程学院
(023) 65311773
E-mail: hz65311773@163.com
收稿日期:2008-02-27

房间 2 采用 1 台立式明装风机盘管(GFP-2 型,风量为 260/340/410 m³/h,名义制冷量为 2 050 W,名义制热量为 3 480 W)。通过开启或关闭阀门 V1,V2,V3,V4,V5,可使房间 1,2 并联或串联。本试验开启阀门 V1,V3,V5,关闭 V2,V4,使流经风机盘管的冷水升温后,再进入辐射地板盘管,避免夏季因水温过低导致结露。运行中,还可以通过调节旁通阀 V6 改变水温。试验系统流程如图 1 所示。



1 自制水-热泵机组 2 地埋管侧水泵 3 用户侧水泵 4 转子流量计(1 600 L/h)
5 转子流量计(400 L/h) 6 立式风机盘管 7 辐射地板盘管 8 地下套管式换热器
9 热电偶测点 10 膨胀水箱

图 1 低温辐射供冷地源热泵试验系统流程图

低温辐射地板的构造从下到上依次为三合土地面层、水泥膨胀珍珠岩保温层、埋管层(水泥砂浆、抹灰)、地砖层。埋管间距为 150 mm,采用外径 16 mm 的 UPVC 管。埋管总长度为 80 m。地板构造如图 2 所示。

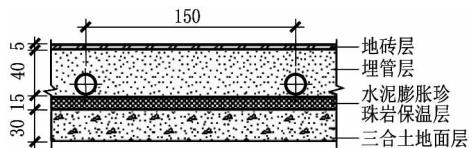


图 2 地板构造图

测试时由室内温度控制器控制压缩机的启停,2 台水泵与压缩机联锁,室内温度传感器设定值设定在 25 ℃左右。

空调房间未设机械新风系统,新风靠门窗缝隙渗透。

2 测试仪表及测点布置

本次测试时间为 7 月 11 日~8 月 27 日,试验按供回水温度、流量不同分为 5 个工况。每个工况连续稳定运行 6 d 以上,测试时试验系统处于稳定运行状态。测试内容及仪表精度见表 1。

表 1 试验系统测试内容、仪表及精度

	测试仪表	仪表参数
水温测试	WP-L80 型多路巡回测量显示仪(带打印),采用铜-康铜热电偶作温度传感器	WP-L80 显示仪精度为满量程的 0.2%,铜-康铜热电偶精度 ± 0.2 ℃
流量测试	LZB-40 型转子流量计	量程 160~1 600 L/h、精度 1.0 级
压缩机和水泵耗电量测试	DD 28 型单相标准电度表(累计压缩机和水泵耗电量) D26-W 型功率表(监测压缩机和水泵瞬时功率)	精度 0.5 级 精度 0.5 级
运行时间测试	电子钟(串联于控制回路中)	

水温及流量测点如图 1 所示。耗电量和运行时间由连接于压缩机、水泵控制回路中的精密电度表和电子钟测量。室内、外温度均采用铜-康铜热电偶测量,室内温度测点布置在房间 1,2 中高度 1.5 m 处,室外温度测点设在房间 1 窗户外。

3 测试数据

系统各工况经调试运行稳定后,每 4 h 自动测试打印一次水温及室内、外空气温度。另外,为了补正因系统停机而产生自动测试数据错误,每天还人工读取 4 次上述温度数据。温度测试数据以自动测试为主,人工读数仅用于系统停机时自动数据修正。其他数据测试亦在人工读数时进行,以人工读数为准。测试数据按日取平均值。系统各工况运行的室内外日平均气温、供回水温度、流量、耗电量及日平均运行时间如图 3~8 所示。夏季长期运行各工况日平均测试数据汇总见表 2。

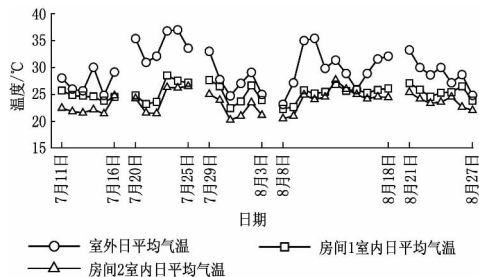


图 3 室外日平均气温、房间 1 及房间 2 室内日平均气温

4 数据处理及处理结果

4.1 数据处理方法

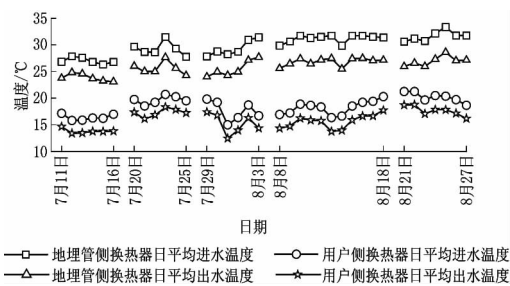


图 4 热泵机组地埋管侧换热器及用户侧换热器日平均进、出水温度

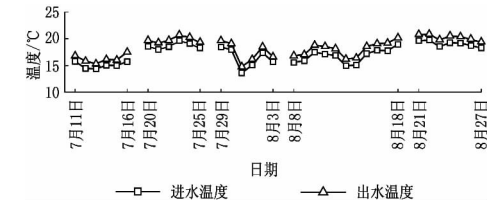


图 5 房间 1 辐射地板盘管日平均进、出水温度

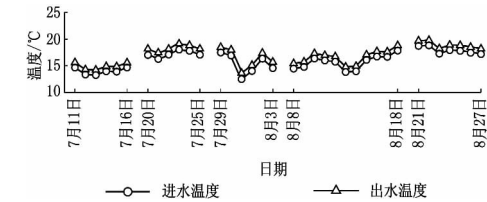


图 6 房间 2 风机盘管换热器日平均进、出水温度

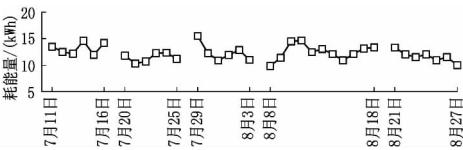


图 7 压缩机及水泵的日平均耗能量

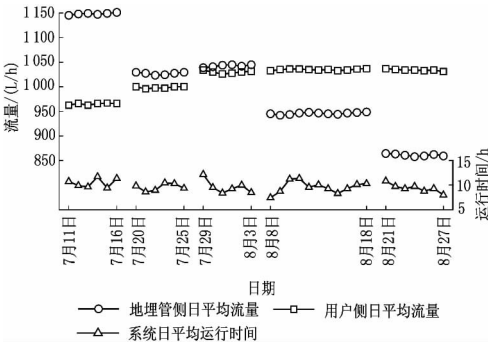


图 8 系统日平均运行时间、地埋管侧及用户侧日平均流量

4.1.1 换热器(包括水-水热泵机组、风机盘管及辐射地板盘管)日平均换热量 $Q^{[1-2]}$

$$Q = W\rho c_p \Delta t h \tag{1}$$

式中 W 为换热器的日平均水流量, m^3/h ; ρ 为换热器进、出水密度的算术平均值, kg/m^3 ; c_p 为换热器、进出水比定压热容的算术平均值, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot$

表 2 夏季长期运行各工况日平均测试数据汇总表

		工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
		7 月 11~16 日	7 月 20~25 日	7 月 29 日~8 月 3 日	8 月 8~18 日	8 月 21~27 日
地埋管侧换热器	日平均进水温度/ $^{\circ}\text{C}$	27.02	29.21	29.30	31.18	31.63
	日平均出水温度/ $^{\circ}\text{C}$	23.89	25.56	25.50	26.86	26.94
	日平均水流量/ (L/h)	1 148.33	1 027.50	1 042.50	946.36	861.43
热泵机组用户侧换热器	日平均进水温度/ $^{\circ}\text{C}$	16.36	19.70	17.61	18.19	20.18
	日平均出水温度/ $^{\circ}\text{C}$	13.86	17.20	15.19	15.57	17.63
	日平均水流量/ (L/h)	965.00	997.50	1 030.83	1 035.00	1 035.00
风机盘管(房间 2)	日平均进水温度/ $^{\circ}\text{C}$	14.01	17.32	15.32	15.69	17.75
	日平均出水温度/ $^{\circ}\text{C}$	14.92	18.28	16.21	16.66	18.72
	日平均水流量/ (L/h)	965.00	997.50	1 030.83	1 035.00	1 035.00
辐射地板盘管(房间 1)	日平均进水温度/ $^{\circ}\text{C}$	15.05	18.41	16.34	16.79	18.85
	日平均出水温度/ $^{\circ}\text{C}$	16.20	19.58	17.47	18.09	20.06
	日平均水流量/ (L/h)	965.00	997.50	1 030.83	1 035.00	1 035.00
压缩机和水泵日平均耗电量/ (kWh)		13.15	11.40	12.42	12.50	11.65
系统日平均运行时间/ h		10.46	9.55	9.63	9.60	9.38
室外日平均温度/ $^{\circ}\text{C}$		27.35	34.23	27.61	29.94	28.94
房间 2 室内日平均温度/ $^{\circ}\text{C}$		22.39	24.24	22.49	24.27	23.69
房间 1 室内日平均温度/ $^{\circ}\text{C}$		24.74	25.66	25.17	25.19	25.53
房间 1 地板凝露情况		较严重	无	存在	存在	无

$^{\circ}\text{C}$); Δt 为换热器日平均进、出水温差, $^{\circ}\text{C}$; h 为系

统日平均运行时间, h 。

由式(1)可计算出室外地埋管侧换热器日平均换热量 Q_1 , 用户侧换热器日平均换热量 Q_2 , 地板盘管日平均换热量 Q_3 及风机盘管日平均换热量 Q_4 。

4.1.2 用户侧系统管路及其他日平均热损失量 Q_5

$$Q_5 = Q_2 - Q_3 - Q_4 \tag{2}$$

4.1.3 用户侧系统热损失率 θ

$$\theta = \frac{Q_5}{Q_2} \times 100\% \tag{3}$$

4.1.4 低温辐射供冷地源热泵试验系统制冷能效比 EER

$$EER = \frac{Q_2}{P_{in}} \times 100\% \tag{4}$$

式中 P_{in} 为低温辐射供冷地源热泵试验系统的日平均耗电量(即压缩机和水泵の日平均耗电量), kWh。

4.1.5 测试热平衡偏差 Δ

$$\Delta = \frac{Q_1 - Q_2 - P_{in}}{Q_1} \times 100\% \tag{5}$$

4.2 测试结果(见表 3)

测试结果热平衡平均偏差为 5.69%, 测试结果可信。

表 3 夏季各工况运行测试结果

	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	平均值
地埋管侧换热器日平均换热量/(kWh)	43.71	41.10	44.06	45.33	43.77	43.59
用户侧换热器日平均换热量/(kWh)	29.32	27.69	27.82	30.28	28.73	28.77
房间 2 风机盘管日平均换热量/(kWh)	10.73	10.60	10.27	11.16	10.91	10.73
房间 1 辐射地板盘管日平均换热量/(kWh)	13.42	12.94	13.03	14.95	13.63	13.59
用户侧日平均管路及其他热损失量/(kWh)	5.17	4.15	4.52	4.17	4.19	4.44
试验系统日平均耗电量/(kWh)	13.15	11.40	12.42	13.11	11.65	12.35
用户侧日平均热损失率/%	17.63	14.99	16.25	13.77	14.58	15.44
日平均测试热平衡偏差/%	2.84	4.89	8.67	4.28	7.75	5.69
能效比 EER	2.23	2.43	2.24	2.31	2.47	2.34

5 分析讨论

5.1 系统运行试验分析

影响系统能效比的主要因素是辐射地板盘管进水温度和地埋管侧换热器出水温度。辐射地板盘管进水温度影响机组的蒸发温度;地埋管侧出水温度影响机组的冷凝温度。辐射地板盘管进水温度较高,机组的蒸发温度升高;地埋管侧出水温度较低,机组的冷凝温度降低,则机组的制冷量增大,耗功量减少,能效比提高,如工况 2,5。反之,则能效比降低。

本次试验是地源热泵机组用户侧出水先进入风机盘管,然后再进入辐射地板盘管,如果是把地源热泵机组用户侧出水直接接入辐射地板盘管,则系统能效比与辐射地板盘管进水温度的关系更为直接和明显。工况 1 处于系统运行初期,地温较低,故地埋管侧出水温度较低,但由于辐射地板盘管进水温度也较低,故能效比较小。工况 4,5 表明,系统长期运行后,地埋管侧出水温度将升高并趋于稳定,对能效比的影响也就相对减弱,所以地埋管侧出水温度对能效比的影响是相对稳定和有限的。而在整个夏季运行期内,需要根据房间空气

露点温度变化调节辐射地板盘管进水温度,因此在整个夏季运行期间辐射地板盘管进水温度对系统能效比的影响相对较强。

影响系统凝露的主要因素是辐射地板盘管的进水温度。进水温度升高,地板表面温度也会随之升高,当地板表面温度高于房间空气露点温度,凝露就会消失。因此,进水温度较高的工况 2,5 未发生凝露现象。

工况 5 在系统长期运行趋于稳定后,能效比较大($EER=2.47$),且无凝露现象,室内日平均温度亦在舒适性空调标准范围内,因此可以认为工况 5 是本系统的最佳工况。

按工况 5 近似计算空调房间 1 单位地板日平均供冷量 $q=13.63\text{ kWh}\div9.38\text{ h}\div(4.32\text{ m}\times2.97\text{ m})\times1\,000\text{ W/kW}=113.3\text{ W/m}^2$,经计算地板向下传热占供冷量 q 的 12.3%左右,则空调房间 1 单位地板向室内日平均供冷量 $q_1=113.3\text{ W/m}^2\times(1-0.123)=99.4\text{ W/m}^2$ 。

试验时空调房间除围护结构及渗透新风负荷外,只有测试仪表、照明和 1~2 名测试人员,空调房间 2 有 1 台 BCD-235 型电冰箱,房间冷负荷较

小。如果房间冷负荷较大,则需采取其他辅助供冷措施。

5.2 防凝露分析

在北方较干燥地区,采用已有的低温辐射供暖地源热泵系统进行夏季供冷,一般不会出现严重的地板凝露问题,但也不排除在某些湿度大的时候(如雨天前)出现地板凝露。在湿度较大的重庆地区,辐射地板供冷系统的凝露问题就变得十分突出,在本试验的 5 个工况中,就有 3 个工况出现凝露。

地板凝露过程涉及的因素是多方面的,地板表面温度低于室内空气露点温度是发生凝露的必要条件;而要使地板表面出现凝露还需具备充分条件,即地板表面温度与室内露点温度相比降低到一个足够的过冷温度。而这个过冷温度的大小又与地板表面的性质、粗糙程度以及空气中其他杂质有关。因此,同一个低温辐射供冷系统,在相同的露点温度和表面温度,不同的时间和地点,就可能发生也可能不发生凝露。但只要能将地板表面温度调节到不低于室内露点温度,就完全能够避免凝露现象发生。所以适当提高地板盘管的进水温度,就能有效解决凝露问题。试验结果表明,在重庆地区地板盘管的进水温度保持在 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,室内地板表面就不会出现凝露。

虽然提高地板盘管进水温度可以解决凝露问题,但在湿度较大的地区,随室内温度的降低,室内的相对湿度也会随之升高,难以达到室内相对湿度 $40\%\sim 60\%$ 的空调房间舒适性标准。因此,在湿度较大的地区宜采用除湿与地板供冷联合运行方式。

5.3 系统的节能性分析

系统运行试验数据表明,尽管室外气温波动较大,地埋管侧换热器出水温度则相对平稳,表明地源热泵优于空气源热泵。由工况 2,5 可见,地板盘管供水温度在 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,较一般空调供水温度高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,而室内日平均气温仍能保持在 $25\sim 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于辐射地板供冷系统的蒸发温度比一般空调系统高,因此低温辐射供冷地源热泵空调系统较一般空调系统节能。但由于本试验装置使用自制的热泵机组,采用较陈旧的往复式压缩机,故运行能效比偏低。若采用新型的涡旋式压缩机热泵机组,其运行能效比会有所提高。另外,系统的保温较差,热损失较大,若加以改善后,系统的节能性也

会有所提高。

5.4 室内布置的遮挡影响

由于冷空气的密度较大,辐射地板供冷产生的冷空气主要集中在地板表面。若室内无扰动空气的装置,室内空气几乎处于静止状态,因此空气对流引起的换热量很小,绝大部分的传热为辐射传热。与低温辐射供暖相比,辐射地板供冷时室内布置的遮挡影响更为强烈。若遮挡部分的地板内埋有地板盘管,还会因局部地表温度过低,在遮挡部分底部凝露、发霉,损坏室内布置。因此,采用低温辐射供冷系统,应在设计和施工中充分考虑室内布置的遮挡影响,并采取措施,适当提高室内空气的流动速度,以减轻室内布置的遮挡影响。

5.5 低温辐射供冷系统的调节

为了防止凝露,要求系统有较好的调控性能,能适应室内空气露点温度的变化。特别是在湿度较大的区域,即使采用了风机盘管除湿(或新风除湿)与低温辐射供冷联合运行方式,仍然需要系统具有较好的调控性能,才能避免地板凝露发生。这是在湿度较大区域采用低温辐射供冷系统必须重视的问题。

6 结语

夏季低温辐射供冷地源热泵试验系统测试结果表明,当地埋管侧换热器水量在 860 L/h 左右,地板盘管供水平均温度为 $18.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,系统能效比最高($EER=2.47$),且地板无凝露现象,是该系统的最佳运行工况。

为了防止地板凝露,地板表面温度应调节到不低于室内空气露点温度。在湿度较大地区,建议采用除湿与地板供冷联合运行方式。

重庆地区采用辐射地板供冷系统,地板盘管进水温度高于 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$,可避免地板凝露。在室内冷负荷较小时,可单独采用地板供冷;室内冷负荷较大时,则需采取其他辅助供冷措施。

夏季采用低温辐射供冷系统,应注意考虑采取提高室内空气流动速度的措施和加强系统调控性能。

参考文献:

- [1] 刘宪英,丁勇,胡鸣明. 浅埋竖管换热器地源热泵夏季供冷试验研究[J]. 暖通空调,2000,30(4):1-4
- [2] 章熙民,任泽霁,梅飞鸣. 传热学[M]. 新 1 版. 北京:中国建筑工业出版社,1993