

SGCHPS 土壤蓄热供热供冷效果分析

吕超, 郑茂余

(哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨, lvchao-929@163.com)

摘要: 为减少建筑供热供冷能耗, 实现严寒地区太阳能-土壤源热泵系统(SGCHPS)对建筑进行长期稳定的供热供冷, 提出依靠季节性太阳能土壤蓄热来维持土壤热平衡、提高系统效率的方法. 以严寒地区太阳能-土壤源热泵供热供冷示范工程为平台, 根据建筑负荷确定系统配置, 并选定4种模式交替运行, 进行了3年的长期实验. 实验结果表明: 季节性蓄热 SGCHPS 能够使房间达到室内设计温度, 供热保证率和供冷保证率分别为 92.0% 和 84.1%; 热泵能效比为 4 以上, 含蓄热能耗的全年供热能效比达到 6 左右, 而供冷能效比达到 20 以上. 该系统保持长期稳定运行, 能够满足严寒地区(如哈尔滨)独立建筑的供热供冷需求, 季节性太阳能土壤蓄热充分利用了全年的太阳能, 提高了系统效率, 节能效果显著.

关键词: 太阳能-土壤源热泵系统(SGCHPS); 长期实验; 供热; 供冷; 土壤蓄热

中图分类号: TU832; TK511

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)12-0104-05

Effect analysis on heat storage in soil, heating and cooling for SGCHPS

LÜ Chao, ZHENG Mao-yu

(School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology,
150090 Harbin, China, lvchao-929@163.com)

Abstract: To reduce energy consumption of buildings on heating and cooling, and to achieve long-term stable heating and cooling using solar-ground coupled heat pump system (SGCHPS) in severe cold zone, a method of depending on seasonal solar heat storage in soil was put forward to maintain soil heat balance and increase system efficiency. Long-term experiment of 3 years was carried out relying on a demonstration project of solar-ground coupled heat pump for heating and cooling in severe cold zone. The system configurations were determined according to the building load, and 4 modes were selected to operate alternately. The experimental results showed that SGCHPS with seasonal heat storage could make the room achieve indoor air design temperature, and the guaranteed rate of heating and cooling were 92.0% and 84.1%, respectively. The energy efficiency ratio (R_{EE}) of heat pump was more than 4, the annual heating EER including the power consumption of heat storage was about 6, and the cooling EER was more than 20. The system operated stably for a long period, and could meet the heating and cooling demands of a detached house in severe cold zone (e.g. Harbin). Seasonal heat storage took full advantage of solar energy of the whole year, and increased system efficiency. The energy-saving effect was remarkable.

Key words: solar-ground coupled heat pump system (SGCHPS); long-term experiment; heating; cooling; heat storage in soil

太阳能-土壤源热泵系统(Solar-ground cou-

pled heat pump system, SGCHPS)是一种新型的供热供冷系统, 以太阳能和浅层地热能作为复合热源, 而浅层地热能也主要来自于太阳辐射^[1]. 太阳能集热器和土壤换热器(Ground heat exchanger, GHE)的有机结合, 不仅提高了系统的灵活性, 而且弥补了单一热源热泵供热量不足的缺点.

收稿日期: 2011-04-20.

基金项目: 黑龙江省科技攻关项目(GC06A316).

作者简介: 吕超(1982—), 男, 博士研究生;

郑茂余(1950—), 男, 教授, 博士生导师.

SGCHPS 被认为是 21 世纪一项最具有发展前途的、具有节能和环保意义的空调技术。

为使 SGCHPS 能够长期高效地运行,就需要保持地下土壤以年为周期的热平衡.特别是对于冬夏负荷不平衡地区,向土壤中补充热量或冷量(辅助热源或冷源)是非常重要的.在严寒地区,建筑物的热负荷远大于冷负荷,即使复合热源也很难满足供热要求,这时就需要补热.在 SGCHPS 现有装置的基础上,可利用季节性太阳能土壤蓄热把除冬季外收集的太阳能通过 GHE 蓄存在土壤之中,冬季再用热泵将热量从土壤中取出进行供热.在夏季,由于土壤温度较低,可以作为冷源直接对建筑进行供冷.目前,这方面的研究主要还是集中于理论^[2-4]、模拟^[5-7]和小型实验研究^[8-10]等方面,缺乏长期系统性的实验研究.本文以实际的示范工程为平台,对严寒地区独立建筑进行了为期3年的蓄热、供热、供冷长期实验,得到了大量反映系统性能的实验数据,通过整理和分析得出的结果,可为今后此领域的研究提供重要的参考依据.本文主要介绍实验系统的组成和运行原理,并分析系统的供热供冷效果,而土壤热平衡和系统热量利用等问题将在后续文章中继续阐述.

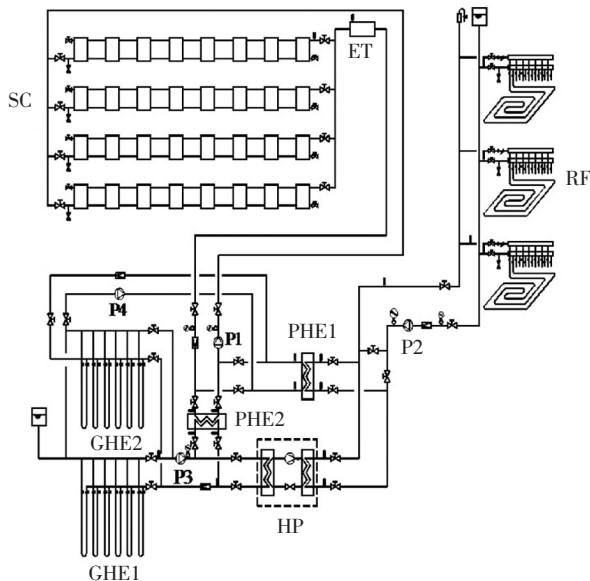
1 示范工程与实验系统

2007年秋季,严寒地区太阳能-土壤源热泵供热供冷示范工程在哈尔滨市松北区(北纬 $45^{\circ}45'$,东经 $126^{\circ}46'$)建成.示范楼共3层外加阁楼,为独立式住宅,占地面积 165 m^2 ,供热供冷面积为 496 m^2 ,外墙、屋顶和地面分别采用 150 mm 、 150 mm 和 30 mm 苯板保温,外窗采用铝塑复合三玻节能窗.

SGCHPS 在夏季由于冷负荷较小,一部分 GHE 直接供冷,另一部分 GHE 进行太阳能土壤蓄热;春、秋过渡季节也同样利用太阳能集热器进行太阳能土壤蓄热.这样土壤源热泵就可以利用 1 年 3 季储存到土壤中的热量在冬季对建筑物进行供热,实现太阳能的多季利用.而太阳能也能够 在冬季部分时间进行直接供热,这样就做到了利用全年的太阳能.

SGCHPS 主要由 4 个子系统组成,分别为太阳能集热系统、热泵机组、地下土壤换热系统和地板辐射供热供冷系统,如图 1 所示.太阳能集热器采用自行研制的高效平板型太阳能集热器,安装于屋顶,正南方向布置,倾角为 60° ,冬季为防止太阳能集热器和连接管道内结冰,循环流体采用防冻液(乙二醇水溶液),其他季节循环流体采用

水.热泵机组额定输入功率为 3.7 kW,制冷剂为 R22.辐射地板内盘管采用耐热聚乙烯(PE-RT)管,直径为 20 mm,循环流体为水.GHE 由 12 根垂直单 U 型管组成,管材为高密度聚乙烯(HDPE)管,直径为 32 mm,深 50 m,布置在建筑物正下方,换热井钻孔直径为 0.1 m,GHE 和钻孔之间的填充材料为沙土,间距和排列形式如图 2 所示.GHE 分 2 组并联连接,6 根一组,在夏季供冷时也可同时进行蓄热.位于建筑物边界以外的钻孔为观测井,用于观测土壤温度的变化.为防止冬季热泵取热时蒸发温度过低导致的 GHE 和连接管道内结冰,循环流体采用防冻液(乙二醇水溶液).



SC—太阳能集热器;GHE1, GHE2—土壤换热器;HP—热泵;
RF—辐射地板;PHE1, PHE2—板式换热器;ET—膨胀水箱;P1,
P2, P3, P4—循环泵.

图 1 系统原理图

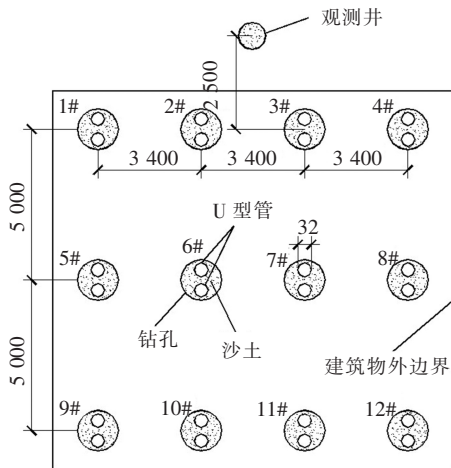


图2 GHE 的布置平面图(mm)

实验测量的主要参数为温度、流量、耗电量以及太阳辐照度等,测量仪器分别为铜-康铜热电

偶、流量计、电度表、净全辐射表等.其中,各项温度通过多路巡检显示控制仪进行逐时采集.系统管路中流体的温度测点均贴于管壁外,并做保温处理,温度计算时考虑管壁热阻进行修正.室内温度测点在每层阳面和阴面房间中部各布置 1 个,取所有测点的平均值;室外温度测点置于百叶箱内,并在建筑周边不同位置布置 2 个,取其平均值.土壤温度的测点设置于多个深度的土壤之中,换热井内设 5、10、20、30、40、50 m 共 6 个温度测点,观测井内设 5、30、50 m 共 3 个温度测点,且土壤中热电偶的测头处涂有防腐材料.

2 SGCHPS 运行模式及控制

系统进行了以年为周期的蓄热、供热、供冷实验,已连续运行 3 年,效果良好.系统 3 年各运行季时间见表 1.而在 2008 年 4 月份开始蓄热前,系统已经进行了短期的供热实验.

表 1 系统 3 年各运行季时间

运行季	起止日期	时间/d
蓄热季	2008-04-18—2008-10-09	175
	2009-04-16—2009-10-13	181
	2010-04-17—2010-10-10	177
供热季	2008-10-10—2009-04-15	188
	2009-10-14—2010-04-16	185
	2010-10-11—2011-04-15	187
供冷季	2008-07-15—2008-08-27	44
	2009-07-14—2009-08-29	47
	2010-07-17—2010-08-28	43

SGCHPS 可以根据不同需要实现多种运行模式,本实验中初步选定以下 4 种,并实现系统自动控制运行.模式 1:太阳能土壤蓄热(太阳能环路 P1—SC—ET—PHE2 与土壤环路 PHE2—GHE—P3 运行);模式 2:太阳能直接供热(太阳能环路 P1—SC—ET—PHE1 与辐射地板环路 PHE1—RF—P2 运行);模式 3:土壤源热泵供热(土壤环路 GHE—P3—HP 与辐射地板环路 HP—RF—P2 运行);模式 4:土壤冷源直接供冷(土壤环路 GHE2—P4—PHE1 与辐射地板环路 PHE1—RF—P2).

实验中各子系统的启停均由温度传感器、电磁阀通过太阳能集热器出口管外壁温度 t_{sco} 和室内温度 t_i 进行控制,具体的控制方法为

蓄热季:

$$\begin{cases} \text{当 } t_{sco} \geq t_{sc} \text{ 时,启时模式 1,} \\ \text{当 } t_{sco} < t_{sc} \text{ 时,停止蓄热.} \end{cases}$$

供热季:

$$\begin{cases} \text{当 } t_{sco} \geq t_{sc} \text{ 时,启时模式 2,} \\ \text{当 } t_{sco} < t_{sc} \text{ 时,} \begin{cases} \text{当 } t_i > t_{hi} \text{ 时,停止供热,} \\ \text{当 } t_i < t_{hl} \text{ 时,启动模式 3.} \end{cases} \end{cases}$$

供冷季:

$$\begin{cases} \text{当 } t_i > t_{cu} \text{ 时,启动模式 4,} \\ \text{当 } t_i < t_{ci} \text{ 时,停止供冷.} \end{cases}$$

其中: t_{sc} 为太阳能集热器出口管外壁控制温度,在蓄热季的 6—8 月设为 30 ℃,在蓄热季的其他时间设为 25 ℃,在供热季设为 24 ℃; t_{hi} 为供热季室内温度控制下限,设为 18 ℃; t_{hu} 为供热季室内温度控制上限,设为 20 ℃; t_{ci} 为供冷季室内温度控制下限,设为 24 ℃; t_{cu} 为供冷季室内温度控制上限,设为 26 ℃.

一般认为,在供热季室内温度高于控制下限(18 ℃),在供冷季室内温度低于控制上限(26 ℃),即为满足供热和供冷的要求.将此温度作为室内设计温度,可以计算出供热保证率和供冷保证率(满足要求的时间与总时间的比值).

3 实验结果与分析

3.1 整年蓄热、供热、供冷效果分析

土壤蓄热的目的是为了冬季能够更好地向室内供热,所以可以通过考察实际的供热供冷效果来判断系统运行方式的合理性.这里主要针对第 1 年的运行数据进行宏观分析.

由于太阳能直接供热时太阳辐射强度呈现日周期性变化,会导致载热流体的温度波动较大,所以这里不做具体分析.而热泵供热时流体温度比较稳定,蒸发器的进出口流体平均温度分别为 4.46、0.73 ℃,冷凝器进出口流体平均温度分别为 23.04、27.05 ℃.土壤源热泵系统和辐射地板末端装置的结合充分发挥了低温供热的节能效果.

土壤冷源直接供冷时,PHE1 的 GHE2 侧进出口流体平均温度分别为 12.82、19.06 ℃,地板侧进出口流体平均温度分别为 21.53、15.94 ℃,两侧的进出口温差分别为 6.24、5.59 ℃,换热温差较大,可见土壤温度较低.为了避免地板表面出现结露,地板供回水管之间加旁通管以控制供水温度不致过低,而混水后 19.43 ℃ 的供水温度也符合辐射地板高温供冷的特点.

图 3 给出了供热季室内外日平均温度的变化曲线.由图可以看出,室内温度呈现出两端高、中间低、其余时间较平稳的变化趋势.这是由于室外气温的变化,二是由于系统的供热能力大小和

控制策略的选择.在供热初期和末期,基本是太阳能直接供热,室内温度波动较大,由于室温没有控制模式 2 的运行,太阳能供热量大于热负荷才导致了室温普遍偏高.在供热中期,由于严寒地区土壤温度过低,导致了热泵蒸发温度过低,热泵的实际运行工况偏离名义工况,令制热量在最冷月不能满足建筑物的热负荷,导致室温低于控制下限.在整个供热季,供热保证率为 74.5%.

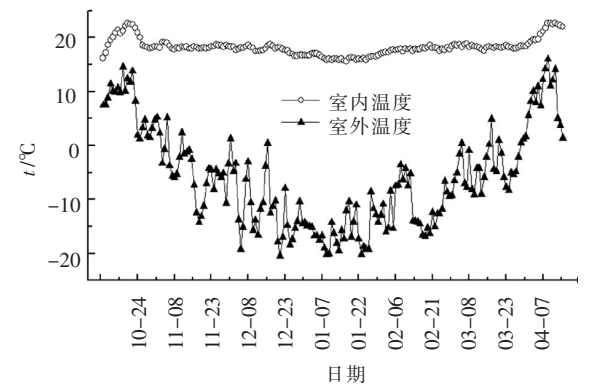


图 3 供热季室内外日平均温度

图 4 给出了供冷季室内外日平均温度的变化曲线.由图可以看出,室外温度在这一阶段波动比较大,而室内温度控制得相对较平稳,而且供冷保证率达到了 100%.

本实验建筑暂时无人居住,仅供实验用,也就是说室内没有来自人员、照明、设备等带来的热

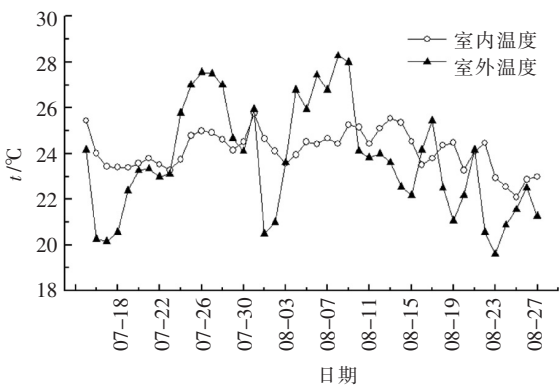


图 4 供冷季室内外日平均温度

量,这也会导致无论冬季还是夏季,室内温度都会偏低,所以应将室内设计温度适当调低,才更具合理性.另外,系统末端装置为辐射地板,其供热的效果及舒适性要优于供冷.所以可将供热季室内设计温度调低 1.5℃,即为 16.5℃;将供冷季室内设计温度调低 1℃,即为 25℃.这时的供热保证率和供冷保证率分别为 92.0%和 84.1%.

3.2 3 年供热供冷效果分析

表 2 列出了 3 年供热供冷季室内外的平均温度.可以看出,虽然各年的室外温度有所波动,但供热季室内平均温度均高于室内设计温度 16.5℃,供冷季室内平均温度均低于室内设计温度 25℃,说明本系统可以满足在哈尔滨这种严寒地区独立建筑的供热供冷需求.

表 2 3 年供热供冷季室内外平均温度

年度	平均温度/℃			
	供冷季室外	供冷季室内	供热季室外	供热季室内
2008—2009	-5.93	18.25	23.73	24.39
2009—2010	-9.75	18.18	22.45	24.16
2010—2011	-8.00	18.15	22.68	24.26

性能系数(COP)和能效比(R_{EE})的概念本质是一样的,为避免表述混乱,本文统一将这一概念命名为能效比,用符号 ε 表示.其作为一项重要的指标可以用来评价系统的效率和节能效果,热泵及系统的能效比计算公式为

$$\varepsilon = \frac{Q}{0.003\ 6W}, \tag{1}$$

$$Q = \sum_{i=1}^{\tau} \rho V c_p \Delta t \times 10^{-6}. \tag{2}$$

式中: Q 为热量或冷量, GJ; W 为耗电量, kWh; ρ 为载热流体的密度, kg/m³; V 为载热流体的体积流量, m³/h; c_p 为载热流体的定压比热, kJ/(kg·K); Δt 为进出口载热流体的逐时温差,℃; τ 为运行时间, h, 以整数计.

表 3 列出了系统 3 年各项能效比,即热泵供热能效比 ε_{hp} 、热泵供热系统能效比 ε_{hs} 、太阳能供热能效比 ε_{so} 、总供热能效比 ε_{he} 、含蓄热能耗的全年供热能效比 ε_{ah} 、太阳能土壤蓄热能效比 ε_{st} 和供冷能效比 ε_{co} .其中, ε_{hp} 达到了 4.3 左右,这也高于文献[11]中的能效比,说明季节性太阳能土壤蓄热和供冷排热提高了土壤温度,有利于冬季热泵高效运行.而只有循环水泵运行的系统能效比更高,特别是 ε_{st} 已接近 40,意味着只用很少的能量就能换取大量的可利用能源,这使得综合利用太阳能和土壤源热泵的 ε_{ah} 也能达到 6 左右.同时,由于冬季取热(相当于蓄冷)后土壤温度很低,土壤可以作为冷源直接供冷,不用启动制冷机, ε_{co} 可达 20 以上.

表 3 系统 3 年各项能效比

年度	ε_{hp}	ε_{hs}	ε_{so}	ε_{he}	ε_{ah}	ε_{st}	ε_{co}
2008—2009	4.29	3.70	29.46	6.55	6.06	39.41	21.33
2009—2010	4.22	3.64	29.02	5.92	5.55	39.11	21.12
2010—2011	4.35	3.75	29.68	6.48	6.01	39.70	21.53

4 结 论

1)在常规 SGCHPS 的基础上,通过增加季节性太阳能土壤蓄热的方法,维持土壤热平衡、提高系统效率.经过 3 年的长期系统性实验,发现季节性蓄热 SGCHPS 保持长期稳定运行,可以满足严寒地区(如哈尔滨)独立建筑的供热供冷需求.在考虑到建筑物没有内热源的热量及辐射地板的特点时,该系统供热供冷能够达到室内设计温度,供热保证率和供冷保证率分别为 92.0%和 84.1%.

2)季节性蓄热 SGCHPS 运行效率很高,热泵能效比为 4 以上,含蓄热能耗的全年供热能效比达到 6 左右,而供冷能效比可高达 20 以上.

3)季节性蓄热 SGCHPS 以土壤为载体,充分利用了全年的太阳能,其低品位能源的特点与供热的需求匹配良好,节能效果明显.

参考文献:

[1] 刁乃仁,方肇洪. 地埋管地源热泵技术[M]. 北京:高等教育出版社,2006: 83-84.

[2] ZHENG Maoyu, WANG Dongmei, ZHI Yansheng. The study of heating and cooling technique with solar energy in severe cold area [C]//Proceedings of the International Conference on Energy and the Environment. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2003: 186-191.

[3] UCAR A, INALLI M. Thermal and economic comparisons of solar heating systems with seasonal storage used in building heating [J]. Renewable Energy, 2008, 33(12): 2532-2539.

[4] 崔俊奎,赵军,李新国,等. 跨季节蓄热地源热泵地下蓄热特性的理论研究[J]. 太阳能学报,2008, 29(8): 920-926.

[5] LUND P D, ÖSTMAN M B. A numerical model for seasonal storage of solar heat in the ground by vertical pipes [J]. Solar Energy, 1985, 34(4/5): 351-366.

[6] OLSZEWSKI P. The possibility of using the ground as a seasonal heat storage; the numerical study [C]//Proceedings of the ASME Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference. Charlotte: American Society of Mechanical Engineers, 2004: 437-441.

[7] 韩宗伟,郑茂余,孔凡红. 严寒地区太阳能-季节性土壤蓄热热泵供暖系统的模拟研究[J]. 太阳能学报,2008, 29(5): 574-580.

[8] OZGENER O, HEPBASLI A. Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system [J]. Energy and Buildings, 2005, 37(1): 101-110.

[9] 杨卫波,施明恒,陈振乾. 太阳能-U 形埋管土壤蓄热特性数值模拟与实验验证[J]. 东南大学学报:自然科学版,2008, 38(4): 651-656.

[10] 王侃宏,李永,候立泉,等. 太阳能-土壤复合式地源热泵供暖的实验研究[J]. 暖通空调,2008, 38(2): 13-17.

[11] TRILLAT-BERDAL V, SOUYRI B, FRAISSE G. Experimental study of a ground-coupled heat pump combined with thermal solar collectors [J]. Energy and Buildings, 2006, 38(12): 1477-1484.

(编辑 魏希柱)