

严寒地区太阳能-地源热泵与热网 互补的运行模式

郝红, 耿佳敏, 姚俊彬

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究严寒地区太阳能-地源热泵与热网互补供热系统的运行特性, 确定更适合严寒地区的运行模式. 方法 建立一套地埋管与两套地埋管两种模式的太阳能-地源热泵与热网互补供热系统; 并对这两种模式下的运行特性进行分析比较. 以 TRNSYS 瞬时模拟软件为平台, 建立互补供热系统的仿真模型, 对系统性能进行了仿真模拟. 结果 两套管时循环水的进出口平均温差为 3.5°C , 一套管时循环水的进出口平均温差为 3.3°C , 两套管高于一套管 0.2°C ; 两套管的最大换热效率比一套管高 35.5% , 蓄热量高出 89.5% ; 两套管的土壤蓄热体温度年变化量为 0.17°C , 一套管为 0.66°C ; 系统运行十年后, 两套管土壤蓄热体的温度从 12°C 下降到 10.3°C , 一套管从 12°C 下降到了 5.4°C . 结论 两套地埋管的运行模式更加适合严寒地区互补供热系统的长年运行.

关键词 太阳能; 地源热泵; 热网; 互补供热; 系统性能

中图分类号 TU995.1

文献标志码 A

The Running Mode of the Solar Energy and Ground Source Heat Pump and Heating Network in Cold Regions

HAO Hong, ZHI Jiamin, YAO Junbin

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The operating characteristics of the solar-ground source heat pump and the heating network complementary system in cold area are studied to determine the suitable operation mode for the cold area. Two types of solar-ground source heat pump and heating network complementary heating system are established; one set of buried pipe and two sets of buried pipes, then the operation characteristics of the two modes are analyzed and compared. Based on the TRNSYS simulation software, the simulation model of the complementary heating system is established, and the system performance is simulated. The average temperature difference between the inlet and the outlet of

收稿日期: 2016-02-10

基金项目: 国家十二科技支撑计划项目(2011BAJ05B02); 辽宁省教育厅基金项目(LJZ2016024)

作者简介: 郝红(1977—), 女, 副教授, 博士, 主要从事热网节能及新能源利用研究.

the circulating water of two sets of buried pipes is $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, and that of one set of buried pipe is $3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, so the two sets of buried pipes is $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ higher than the one set of buried pipe; the highest heat transfer efficiency of the two sets of buried pipes is 35.5% higher than that of the one set of buried pipe, and the heat storage capacity is 89.5% higher; The annual change in temperature of soil regenerator of the two sets of buried pipes is $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$, while the one set of buried pipe is $0.66\text{ }^{\circ}\text{C}$, after ten years of operation, the temperature of soil regenerator of the two sets of buried pipes decreases from $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $10.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, while the one set of buried pipe decreases from $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $5.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. The operation mode of two sets of buried pipes is more suitable for the long-term operation of the complementary heating system in the cold area.

Key words: solar energy; ground source heat pump; heating network; complementary heating; the system performance

我国严寒地区热网供热大量使用的化石能源会污染环境^[1]. 太阳能是新能源中利用率最高的能源,但其具有不稳定性^[2-4]. 土壤源热泵系统虽然高效节能而且环保,但系统投资大,且在长期连续运行状态下,会造成机组性能降低,甚至不能正常运行^[5-8]. 1953年, Jordan 和 Therkeld 第一次提出了太阳能与热泵联合系统的优越性,这两类系统联合运行不仅能提高太阳能集热器的利用效率还能提升热泵的供热性能^[9-12]. 将太阳能、土

壤源热泵与既有的城市热网系统结合起来可以解决由于冷热负荷不均产生的热平衡问题^[13-15]. 笔者通过对互补供热系统分别在一套和两套地埋管模式下的模拟,确定了更加适合严寒地区的互补运行模式.

1 互补供热系统的运行模式

太阳能-地源热泵与热网互补供热的运行模式主要有两种:一套地埋管系统和两套地埋管系统(见图1).

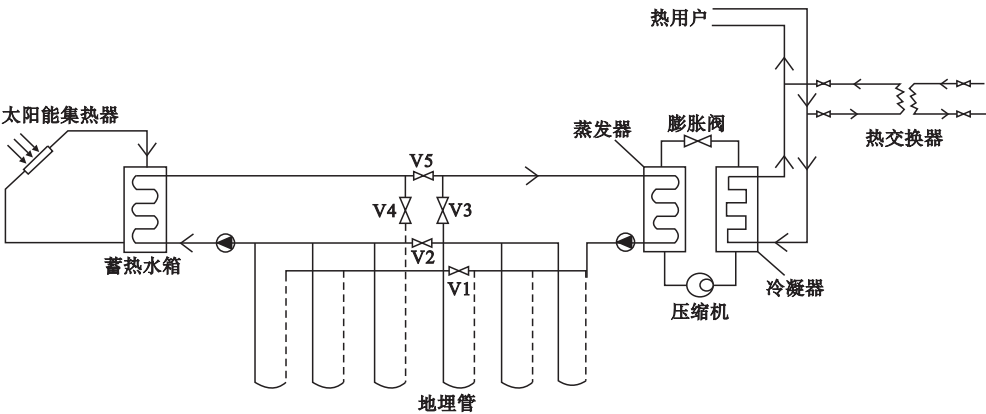


图1 互补系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of complementary system

从图1可以看出,互补供热系统主要由太阳能集热系统、地埋管换热系统、热泵机组和热网组成. 系统的运行模式分为两种:一套地埋管和两套地埋管.

一套地埋管的运行模式下,供暖季时将阀门V1、V2及V5开启,阀门V3、V4关闭,循环流体在流经地埋管之后进入蓄热水箱进

行换热,最后进入热泵的蒸发器端被蒸发器中的制冷剂所利用,最后回到地埋管中,如此形成一个循环. 热泵机组中,蒸发器将地埋管换热器中的循环流体中的热量吸收,将制冷剂转化为干饱和蒸汽,再进入压缩机被压缩,温度升高,压力变大,而后进入冷凝器冷凝成饱和液体,同时释放热量,实现供暖. 而制冷

剂通过膨胀阀,节流降压后继续进入蒸发器,一个吸热放热的过程就完成了,循环往复为用户供热.制冷季时,阀门的开启状态与供暖季一致,循环流体先流进的不是蒸发器而是冷凝器,把热用户的热量带给地埋管,并将热量储存到地下.

两套地埋管的运行模式下,供暖季时,阀门开启状态以及循环流体的流动与一套地埋管时是一致的.但制冷季时,将阀门 V3、V4 开启,V1、V2 以及 V5 关闭,一部分循环流体流入一套地埋管内,向蓄热体内的土壤释放热量后,通过阀门 V3,直接流向冷凝器.而余下的循环流体在经过地埋管之后,流向太阳能系统中的蓄热水箱进行换热,而后经过阀门 V4 返回到地埋管中,从而与蓄热体内的土壤进行换热,储存热量,便于来年冬季取热.

2 互补供热系统中主要部件的选型设计

笔者选取属于严寒地区 II 区,位于沈阳的一栋四层的办公建筑,建筑物的全年最大热负荷为 127.14 kW,最大冷负荷为 49.11 kW,全年热负荷总量为 3.7×10^5 MJ.系统设计采用太阳能辅助热源与土壤源热泵系统以及热网联合供热,建立太阳能-地源热泵与热网的互补供热系统,并根据负荷对此系统进行设备选型计算.按照《太阳能供热采暖工程技术规范》(GB50495—2009)的附录,太阳能集热系统的太阳能保证率取 35%,土壤源热泵系统承担的建筑物负荷为 65%^[16].系统弥补热网系统不能满足供暖要求的不足,

实现了热网系统的建筑节能改造.

2.1 太阳能集热系统的选型设计

(1) 太阳能集热器

笔者主要研究平板式太阳能集热器^[17].太阳能集热系统所需集热器总面积 A_{cl} 为

$$A_{cl} = \frac{Qf}{J_i \eta_{cd} (1 - \eta_L)} \tag{1}$$

式中: Q 为建筑平均每天耗热量,取 $28\,549\text{ W}^{[18]}$; J_i 当地集热器采光面上采暖期的日均太阳辐照量,取 $15.000\text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; f 为太阳能保证率,取 0.2; η_{cd} 为基于采光面积的平板型集热器平均集热效率,取 35%; η_L 为管路及储热装置热损失率,取 30%^[19].

计算得太阳能集热器总面积为 325 m^2 .

(2) 蓄热水箱

太阳能系统类型不同,选取的蓄热水箱容积范围也不同.由文献[18]可知此系统对应的蓄热冰箱容积范围为 $40 \sim 100\text{ L}/\text{m}^2$.

太阳能集热系统的水箱容积 $V_{集}$ 为

$$V_{集} = A_{cl} \times B_1 \tag{2}$$

式中: B_1 为单位采光面积平均每日的产热水量,取 $60\text{ L}/\text{m}^2$.

将太阳能集热器总面积 $A_{cl} = 325\text{ m}^2$ 和 B_1 的数值代入式(2)中,太阳能集热系统的水箱容积 $V_{集}$ 计算值为 19.5 m^3 ,该系统的蓄热水箱容积取整数确定为 20 m^3 .

2.2 热泵机组的选型设计

地源热泵设计热负荷按照最大热负荷的 65% 选取,即 82.64 kW .笔者选用蓝德空调公司生产的水源热泵机组,机组型号为 GSHP-C0138D,具体参数如表 1 所示.

表 1 水源热泵机组参数

Table 1 Parameters of water source heat pump

名义制热量/kW	名义制冷量/kW	制热时蒸发器侧水流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	制热时冷凝器侧水流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	制热输入功率/kW	制冷输入功率/kW	蒸发器压力损失/kPa	冷凝器压力损失/kPa
94	82	12	23	35.9	26.8	≤25	≤70

2.3 地埋管的选型设计

笔者将地埋管换热器管材采用高密度聚

乙烯(PE)管;管内流动介质为 25% 的乙二醇水溶液;埋管钻孔直径为 80 mm,采用原土

作为埋管与钻孔缝隙间的回填材料. 采用垂直单 U 形管, 埋设方式为深埋, 深度为 100 m^[20], 联接方式是并联同程式^[21]. 根据《地源热泵系统工程技术规范》(GB50366—2005), 地埋管换热器长度按照较大的冬季热负荷进行设计, 计算得到竖直埋管换热器所需埋管总长度为 5 600 m, 所需钻孔数量为 28 个.

2.4 热网系统的设计

热网只有在太阳能和地源热泵联合供热仍达不到用户要求, 也就是换热器的入口温度低于用户要求时才会运行. 在最不利的情

况下, 热网会承担 35% 的热负荷. 在 TRN-SYS 软件中选取板式换热器中的逆流式换热器模块, 该模块是一个依赖于有效最小热容的热交换器. 只要输入换热器的 UA 值和入口条件, 该模块会自动确定最小热容, 然后计算出有效值.

3 建立系统仿真模型

以 TRNSYS 瞬时模拟软件为平台, 建立太阳能-地源热泵与热网互补供暖系统仿真模型, 图 2 和图 3 是互补供暖系统的一套地埋管运行模式和两套地埋管运行模式.

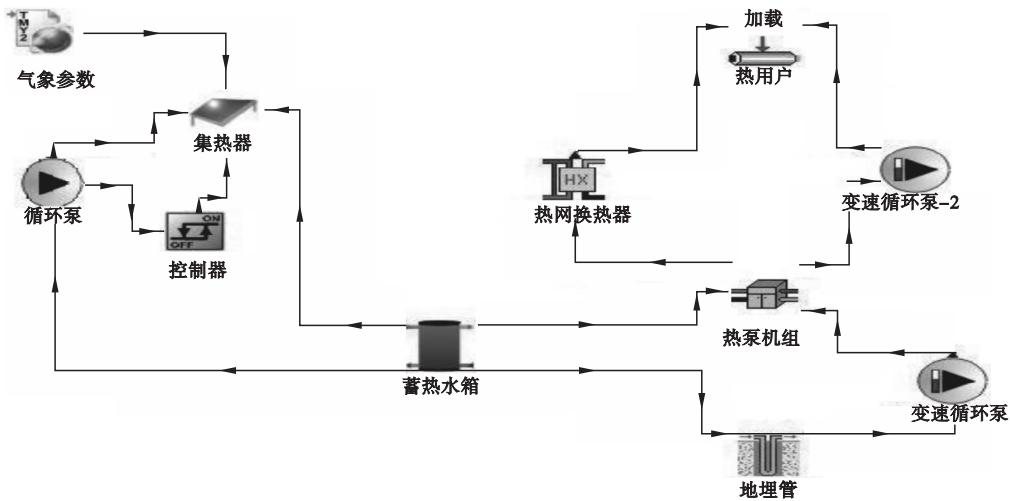


图 2 一套管系统运行模型图

Fig. 2 The model of the complementary system with one set of buried pipe

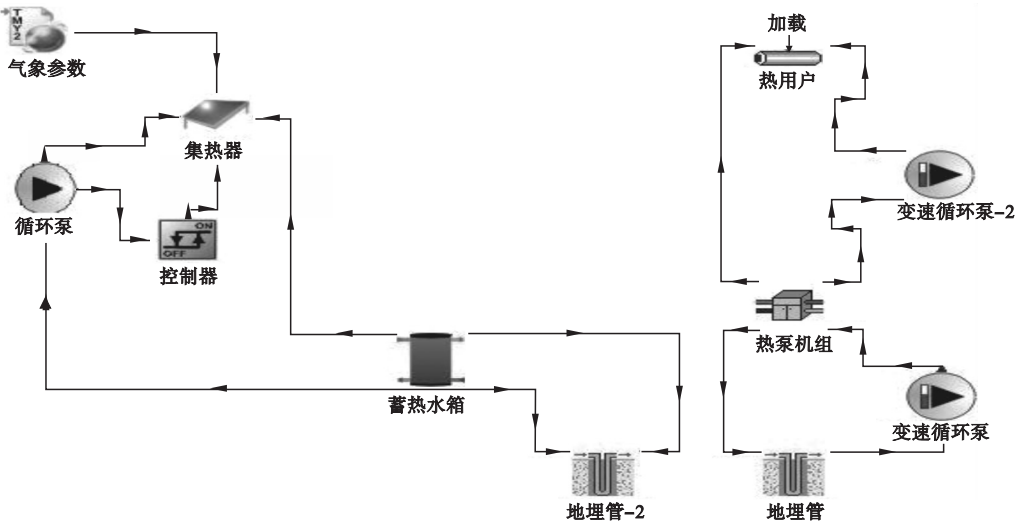


图 3 两套管系统运行模型图

Fig. 3 The model of the complementary system with two sets of buried pipes

4 模拟结果分析

由于供暖季时一套地埋管和两套地埋管的阀门开启状态和循环流体的流动是一致的,因此笔者主要通过制冷季时的一些参数模拟结果来对两种运行模式进行对比分析.主要参数包括:地埋管的进出口温度,土壤的蓄热量以及蓄热体的温度,运行时间为一年和运行时间为十年.

4.1 地埋管进出口温度

(1)一套地埋管模式地埋管进出口温度

图4为制冷季只包含一套地埋管的互补供热系统的埋管入口温度和出口温度随运行时间的变化情况.

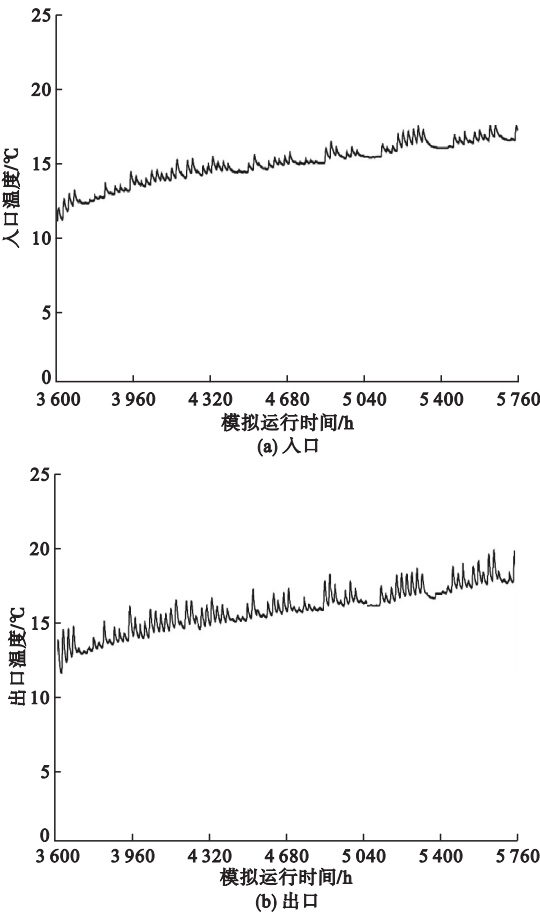


图4 制冷季一套地埋管入口和出口温度随运行时间的变化情况

Fig. 4 The change varies with running time of the inlet and outlet temperature of the one buried pipe in the refrigeration period

从图4可以看出,循环水在流经地埋管的入口水温在16.3~22.3℃变化,平均温度18.9℃;出口水温在12.7~18.5℃变化,平均水温为14.6℃.地埋管循环水的进出口平均温差为3.3℃.而且,随着时间的推移,循环水的水温都在升高,在制冷季的后期,进出口温差开始逐渐减小.

(2)两套地埋管模式地埋管进出口温度

图5为两套地埋管系统的地源热泵系统中,地埋管的进出口温度随时间的变化情况.

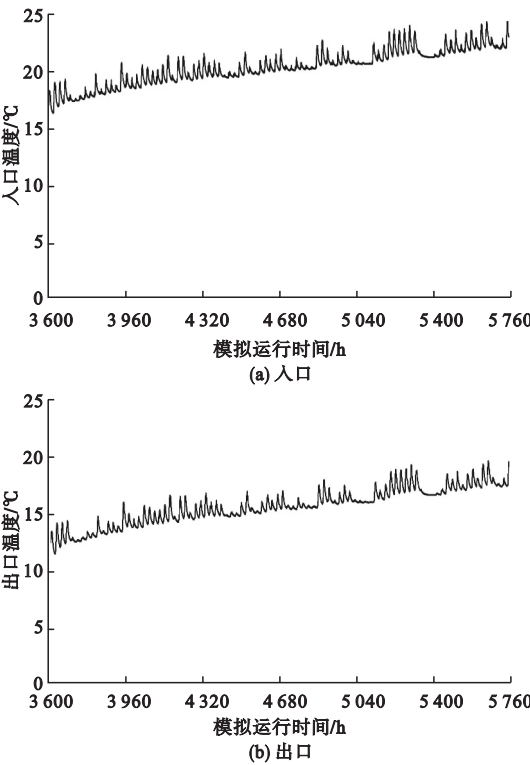


图5 制冷季两套地埋管入口和出口温度随运行时间的变化情况

Fig. 5 The change varies with running time of the inlet and outlet temperature of the two buried pipes in the refrigeration period

从图5中可以看出,流经地埋管的入口处水温在16.2~23.4℃变化,平均温度为20.1℃;出口处的水温在12.8~16.7℃变化,平均水温为15.2℃.循环流体流经地埋管的进出口温差为3.5℃.与只有一套管的

地源热泵系统相比,两套管系统的地埋管进出口温度稍高于一套管系统.

4.2 土壤蓄热量

制冷季一套地埋管系统的与两套地埋管系统土壤蓄热量两种模式下土壤的蓄热量如图6和图7所示.由图6可以看出,一套地埋管的_{最大}换热效率可达62 MJ/h,在整个制冷季内,地埋管向土壤的蓄热量可达 1.9×10^5 MJ.由图7可以看出,两套地埋管的_{最大}换热效率可达84 MJ/h,整个制冷季的蓄热量为 3.6×10^5 MJ.对比可知,两套管系统的蓄热量要多于一套管系统,且两套管系统的土壤蓄热量的数值变化很大.

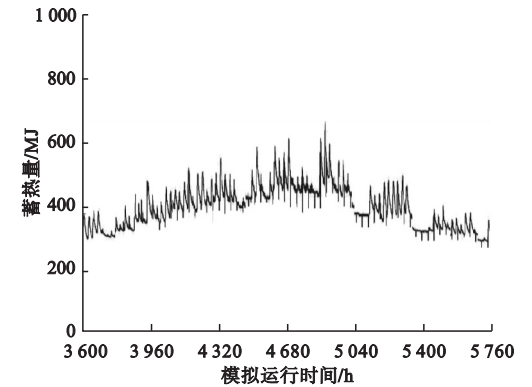


图6 制冷季一套地埋管系统的土壤蓄热量
Fig.6 The soil heat storage of the one buried pipe in the refrigeration period

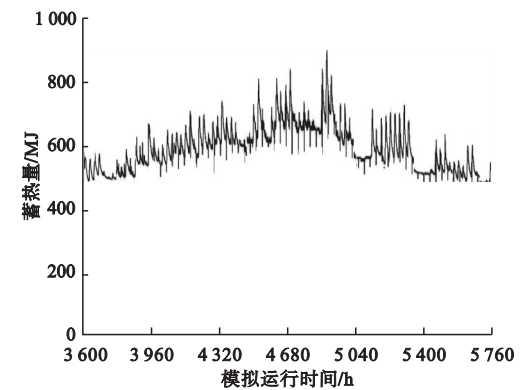


图7 制冷季两套地埋管系统的土壤蓄热量
Fig.7 The soil heat storage of the two buried pipes in the refrigeration period

4.3 两种模式中蓄热体的温度

一套地埋管和两套地埋管的互补供热系

统在运行时间为一年时的土壤温度随时间的变化情况如图8和图9所示.从图8中可以看出,只有一套地埋管时,在供热季,土壤的温度逐步下降,最低温度为8.23℃,过度季的时候温度有所回升,但是升高的幅度很小,可以达到8.72℃,等到了制冷季,土壤的温度上升趋势又会变得更加明显,制冷季结束后,土壤温度可以达到9.34℃.当有两套地埋管时,在供暖季的时候,土壤的温度一直在下降,供暖结束时,土壤温度为8.23℃,过渡季节温度稍有回升,恢复到8.72℃,在制冷季,土壤的温度上升要更快,而且土壤温度能更高,最后能达到9.87℃.

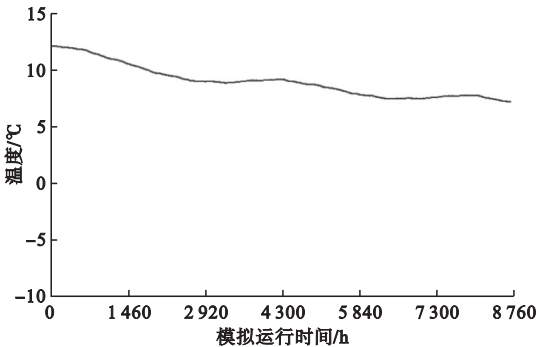


图8 一套地埋管时的土壤温度变化曲线
Fig.8 Soil temperature change curve under the situation with one buried pipe system

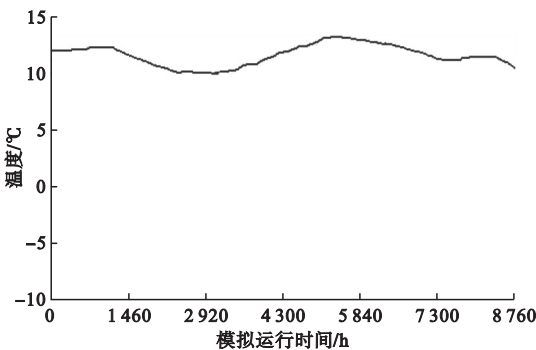


图9 两套地埋管时的土壤温度变化曲线
Fig.9 Soil temperature change curve under the situation with two buried pipe system

由于在制冷季的时候,热泵将热用户的热量转移到地埋管中,地埋管再向土壤放热,所以土壤温度的上升趋势也越来越明显,包含两套地埋管的地源热泵系统的蓄热体温度

更加稳定,年变化量仅为 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$. 相较于一套管系统的年温差 $0.66\text{ }^{\circ}\text{C}$,两套管模式更加适合互补供能系统的长年运行.

一套地埋管的地源热泵系统和两套地埋管的系统在运行十年后蓄热体的温度变化分别如图 10 和图 11 所示. 从图 10 可以看出,一套管系统运行十年后,土壤温度从 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降到 $5.4\text{ }^{\circ}\text{C}$;而两套管系统运行十年后土壤蓄热体的温度从 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降到了 $10.3\text{ }^{\circ}\text{C}$. 对比可知,虽然整体温度都是下降的趋势,但是相对于只有一套地埋管的系统来说,两套管的系统温度下降的速度变慢,幅度也在变小.

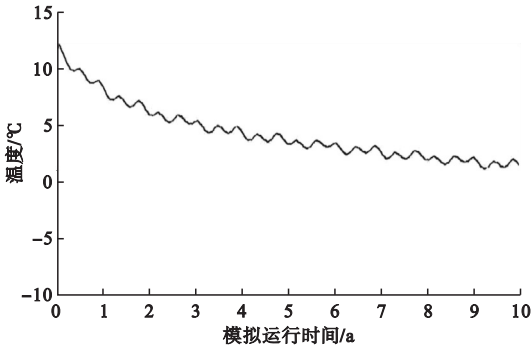


图 10 一套管系统十年内土壤的温度变化

Fig. 10 Change of the ground temperature of one buried pipe system in ten years

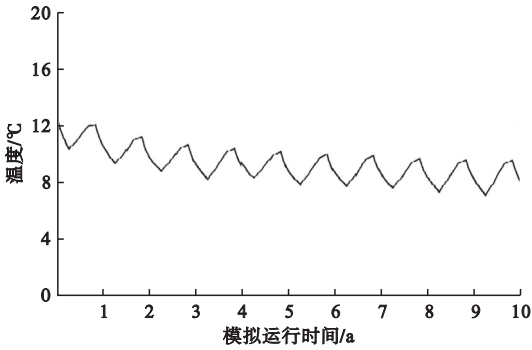


图 11 两套管系统十年内土壤的温度变化

Fig. 11 Change of the ground temperature of two buried pipe system in ten years

5 结 论

(1)地源热泵机组中,只有一套地埋管时,循环水的进出口平均温差为 $3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;有两套管时,循环流体流经地埋管的进出口温差

为 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,两套管系统的地埋管进出口温度高于一套管系统 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

(2)两套地埋管系统的最大换热效率要比一套管系统高 35.5% ;在整个制冷季中,两套管系统的蓄热量要比一套管系统的高出 89.5% ,且两套管系统的土壤蓄热量的数值变化很大.

(3)包含有两套地埋管的地源热泵系统的蓄热体温度更加稳定,相较于一套管系统的年温差 $0.66\text{ }^{\circ}\text{C}$,年变化量仅为 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$,而且在运行十年后,两套管系统的土壤温度下降幅度要远远低于一套管系统,所以两套地埋管的运行模式更加适合互补供热系统的长年运行.

参考文献

[1] 刘飞. 城市供热系统能耗及碳排放研究[D]. 沈阳:东北大学,2012.
(LIU Fei. Study of urban heating system of carbon emissions and energy consumption [D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.)

[2] NAST M. Renewable energies heat act and government grants in Germany[J]. Renewable energy,2010(35): 1852 – 1856.

[3] 王静. 太阳能和空气源热泵联合采暖探讨[J]. 科技风,2014(2):105.
(WANG Jing. Study on the combined heating system of solar energy and air source heat pump[J]. Technology wind,2014(2):105)

[4] 袁静珍. 太阳能集热器的分类及特点[J]. 硅谷,2013(7):178 – 179.
(YUAN Jingzhen. Classification and characteristics of solar collectors [J]. Silicon valley, 2013(7):178 – 179.)

[5] PAPADOPOULOS A M, OXIZIDIS S, PANDRITSAS G. Energy, economic and environmental performance of heating systems in Greek buildings [J]. Energy and buildings, 2012(40):224 – 230.

[6] 梁凤. 基于 TRNSYS 平台的太阳能 – 土壤源热泵热水系统的模拟研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.
(LIANG Feng. The simulation study of solar energy-ground source heat pump hot water system based on TRNSYS platform [D]. Changsha: Hunan University, 2014.)

- [7] 尹航,丁雅靓.耦合热泵技术的地热能利用研究[J]. 建筑工程技术与设计,2014(31):1082.
(YIN Hang, DING Yaliang. Research on geo-thermal energy utilization of coupled heat pump technology[J]. Building engineering technology and design, 2014(31):1082.)
- [8] 陈保存.地源热泵的节能机理[J]. 城市建设理论研究,2013(23):107.
(CHEN Baocun. Energy - saving mechanism of ground source heat pump[J]. Urban construction theory research, 2013(23):107.)
- [9] KADIR B. Evaluation of the performance of a ground-source heat-pump system with series GHE(ground heat exchanger) in the cold climate region[J]. Energy, 2010(35):3088 - 3096.
- [10] KASPAR T E, TEET-ANDRUS K, ALO M, et al. The application of the ground source and air-to-water heat pumps in cold climate areas[J]. Smart grid and renewable energy, 2013, 4(7):473 - 481.
- [11] 刘光远. 太阳能-土壤源热泵复合系统的研究现状[J]. 建筑热能通风空调, 2013(6):31 - 34.
(LIU Guangyuan. Research status of solar-ground source heat pump system[J]. Building heat ventilation air conditioning, 2013(6):31 - 34.)
- [12] ANDREW D C, CENK Y. Assessment of the viability of hybrid geothermal heat pump systems with solar thermal collectors[C]. America: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, 2013.
- [13] OZGENER O, HEPBASLI A. Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system[J]. Energy and buildings, 2015, 37(1):101 - 110.
- [14] STOJANOVIC B, AKANDER J. Build-up and long-term performance test of a full-scale solar-assisted heat pump system for residential heating in nordic climatic conditions[J]. Applied thermal engineering, 2010(30):188 - 195.
- [15] GUO Zhaojun, LAI Xuejiang, JIANG Yantao. Control parameters selection of solar energy and heat pump cocoon drying equipment[J]. Asia-pacific conference, 2011(2):144 - 146.
- [16] 倪龙,唐青松,李安民,等.带辅助热源的地源热泵设计负荷比分析[J]. 制冷学报, 2010, 31(5):18 - 23.
(NI Long, TANG Qingsong, LI Anmin, et al. Analysis on design heating load ratio of ground source heat pump with auxiliary heat source[J]. Journal of refrigeration, 2010, 31(5):18 - 23.)
- [17] 王伟.空气源热泵与太阳能热水系统集成设计探讨[J]. 制冷与空调, 2011(5):438 - 442.
(WANG Wei. The discussion of air source heat pump and solar energy hot water system integration design[J]. Refrigeration and air conditioning, 2011(5):438 - 442.)
- [18] 毛立功.严寒地区太阳能-地源热泵及热网联合供暖的运行策略研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2015.
(MAO Ligong. Operation mode analysis of solar energy-ground source heat pump and heating network in cold regions[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2015.)
- [19] 中国建筑科学研究院. 太阳能供热采暖工程技术规范:GB 50495—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
(China Academy of Building Research. Solar heating engineering and technical specification:GB 50495—2009[S]. Beijing: China architecture and building press, 2009.)
- [20] 姚灵峰,蔡龙俊.地源热泵热平衡问题的研究及工程应用[J]. 节能技术, 2009(2):142.
(YAO Lingfeng, CAI Longjun. Research of heat balance problem of ground source heat pump and engineering application[J]. Energy saving technology, 2009(2):142.)
- [21] 郝红,薛翔远.太阳能-地源热泵与热网互补供热系统运行特性[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014, 30(6):1068 - 1076.
(HAO hong, XUE Xiangyuan. Run characteristics of the complementary heating system with solar energy-ground source heat pump and heating network[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014, 30(6):1068 - 1076.)