SGCHPS 土壤热平衡及系统热量利用

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：为解决严寒地区建筑物热负荷远大于冷负荷而导致的太阳能-土壤源热泵系统（SGCHPS）供热性能逐年下降、以至于无法使用的问题，提出依靠太阳能季节性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，进行了为期3 a的蓄热、供热、供冷长期实验. 实验结果表明：在保证供热供冷效果的基础上，土壤温度呈现日周期和年周期变化，土壤保持了以年为周期的热平衡；太阳能在冬季供热量中占85%；在供冷季同时进行蓄热和供冷的2组土壤换热器（GHE）可根据换热功率分配其比例. 土壤蓄热解决了严寒地区建筑物冷热负荷不平衡的问题，使系统能长期高效运行，并实现了全年太阳能的利用，节约了大量的常规能源.

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；土壤热平衡

中图分类号：TU832；TK511 **文献标志码**：A **文章编号**：0367－6234（2012）02－0106－06

Soil heat balance and heat utilization of system 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: In severe cold zone, building's heating load is much bigger than cooling load. Heating performance of solar-ground coupled heat pump system (SGCHPS) declines year after year and even can't afford the heating load. In order to solve this problem, a method of depending on solar seasonal heat storage in soil was put forward to maintain soil heat balance and increase system efficiency. Relying on a demonstration project of solar-ground coupled heat pump for heating and cooling in severe cold zone, long-term experiment on heat storage, heating and cooling of 3 years was carried out. On the basis of ensuring heating and cooling effect, the experimental results showed that the soil temperature changed daily and annually. And the soil maintained heat balance in an annual cycle. Solar energy accounted for 85% of the total heat supply in winter. In the cooling season, the ratio of ground heat exchanger (GHE) for heat storage and cooling can be distributed according to heat transfer rates. Heat storage in soil solved the imbalance of heating and cooling loads in severe cold zone. The system could operate efficiently for a long period. Solar energy of the whole year was utilized, which saved a lot of conventional energy.

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

太阳能-土壤源热泵系统（Solar-ground coupled heat pump system，SGCHPS）是一种新型节能环保的供热供冷系统. 而对于建筑物热负荷大于冷负荷的地区，SGCHPS长期运行会导致土壤温度逐年降低，土壤热量以年为周期不平衡，从而使系统供热性能逐年下降. 针对这种情况，可以采用季节性太阳能土壤蓄热来解决. 国外在这方面有类似研究，主要集中于大型集中供热或区域供热工程[1-4]、各种蓄热形式[5-7]、利用夏季储存的太阳能进行冬季供热[8]等方面；国内在这方面则主

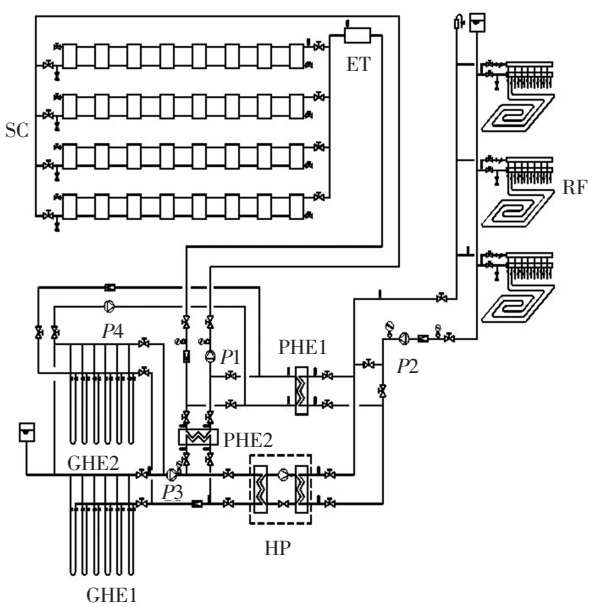
收稿日期：2011－07－07.
基金项目：黑龙江省科技攻关项目（GC06A316）.
作者简介：吕 超（1982—），男，博士研究生；
郑茂余（1950—），男，教授，博士生导师.

要还是理论、模拟和小型实验研究[9-11]. 目前,对于独立建筑供热的应用还比较少,特别是严寒地区,热负荷很大,不仅要考虑夏季的蓄热,还应利用过渡季节进行长期蓄热.

本文以严寒地区太阳能-土壤源热泵供热供冷示范工程为平台,对严寒地区独立建筑进行了为期 3 年的季节性太阳能土壤蓄热、供热、供冷长期实验. 文献[12]介绍了实验系统的组成、运行原理,分析了系统的实际供热供冷效果,本文在此基础上将对系统运行下土壤温度的变化规律以及系统热量的利用等问题进行了深入分析.

1　实验系统

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. 太阳能集热器正南方向布置,倾角为 60°. 热泵机组额定输入功率为 3.7 kW. 辐射地板内盘管采用耐热聚乙烯(PE-RT)管. 土壤换热器(Ground heat exchanger, GHE)由 12 根垂直单 U 型管组成,管材为高密度聚乙烯(HDPE)管,深 50 m,布置在建筑物正下方 12 口换热井中,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,图中 GHE1 为蓄热井,GHE2 为供冷井. 在建筑物边界外设 1 口观测井,用于观测土壤温度的变化.



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

实验系统将春、夏、秋三季的太阳能利用太阳能集热器和 GHE 蓄存到土壤之中,在冬季用土壤源热泵将热量取出对建筑进行供热,而太阳能也能够在冬季晴好的白天进行直接供热,这就实现了利用全年的太阳能. 由于冬季取热使土壤温度降低,这使得土壤可以在夏季作为自然冷源进行直接供冷.

实验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. 系统 3 年中各阶段的运行时间见表 1[12]. 实际上在 2008 年 4 月份开始蓄热前,系统已经进行了短期的供热实验.

实验中 SGCHPS 初步选定以下 4 种运行模式,并实现了自动控制. 模式 1:太阳能土壤蓄热;模式 2:太阳能直接供热;模式 3:土壤源热泵供热;模式 4:土壤冷源直接供冷.

表 1　系统 3 年各运行季时间

运行季	起止日期	t/ 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

2　土壤温度变化规律分析

2.1　土壤温度短期变化规律

图 2 和图 3 给出了蓄热季和供热季典型日土壤逐时温度变化. 可以看出,换热井内的土壤温度波动较大,呈周期性变化. 在蓄热时,随太阳辐射和室外温度的波动,蓄热模式运行时土壤温度升高较快;停止运行后由于土壤向周围传热,温度逐渐降低,直到再次蓄热开始之前恢复到一个相对稳定的温度. 在连续晴天的情况下,土壤每天经历“恢复—吸热—恢复”的过程后,温度会有小幅升高;在遇到阴天或太阳辐射不强时,由于井内土壤温度依然较高,会继续向周围土壤传热,当蓄热量小于向周围扩散的传热量时,土壤温度就会下降.

在供热季,换热井内的土壤温度也呈现周期性的变化. 当热泵运行时,需要从土壤中取热,这时土壤温度就会降低;直到太阳能可以直接供热时,热泵停止运行,这时土壤温度很低,周围土壤会向井内土壤传热,温度得以升高,直到再次取热之前恢复到一个相对稳定的温度. 在供热季长期

运行的情况下,土壤每天经历“放热—恢复—放热”的过程,土壤温度会缓慢降低. 而热泵的间歇运行也能使土壤温度得到一定恢复,不至于使土壤温度下降过快.

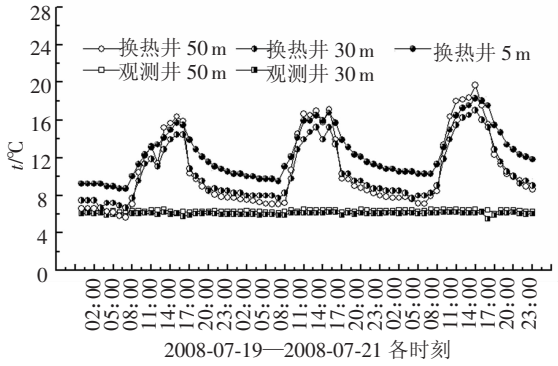


图 2 蓄热季典型日土壤温度逐时变化

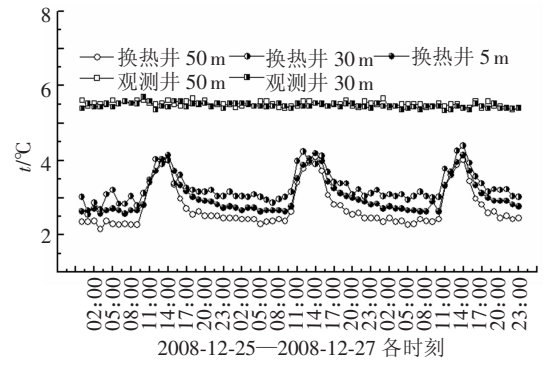


图 3 供热季典型日土壤温度逐时变化

在蓄热季和供热季,观测井的温度在短期内都比较平稳,这是因为换热井的热流对观测井的影响不是很大,短期内土壤温度不会有太大变化.

2.2 土壤温度长期变化规律

上面揭示了土壤温度在短时间内的变化特点,而要把握土壤温度的长期变化规律,则要通过观察土壤在经历完整的“蓄热—取热”过程后以年为周期的温度变化. 图 4、5 分别给出了第 1 年换热井和观测井内土壤温度以年为周期的变化规律. 由于实验室建设原因,从 2008 年 6 月 7 日才开始对土壤温度进行逐时监测. 如前所述,换热井内每天的土壤温度波动较大,需要观察其在不受蓄热取热影响时的土壤温度,即以每天恢复后的土壤温度作为长期观测值. 在蓄热阶段取每天 6:00作为观测时间点,在取热阶段取每天 14:00 作为观测时间点,据此作出换热井内土壤逐日温度的全年变化曲线. 而观测井的土壤温度每天变化不大,所以可以取每天的平均温度来作出其全年变化曲线.

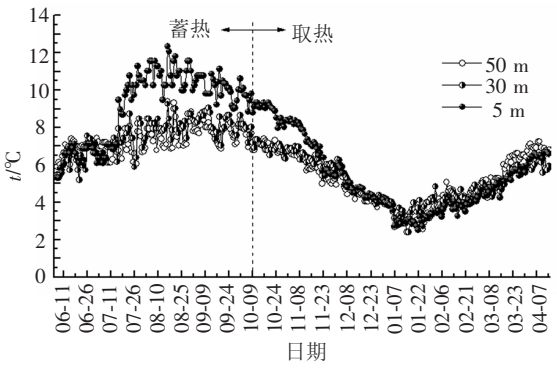


图 4 换热井土壤逐日温度变化

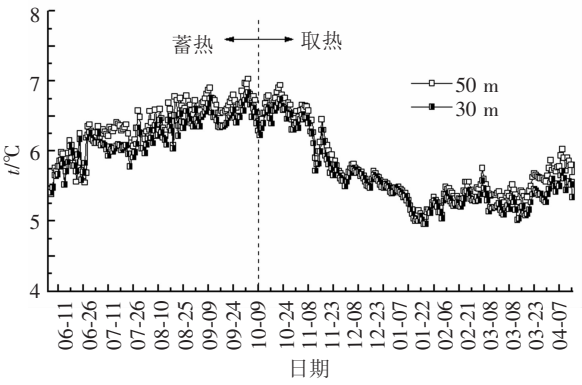


图 5 观测井深层土壤日平均温度变化

从图中可以看出,土壤温度呈现出以年为周期的接近于正弦规律的变化. 在蓄热阶段,温度逐渐升高;在取热阶段,温度先逐渐降低,再缓慢升高. 对于换热井,温度最高值出现在 2008 年 8 月 16 日,50、30、5 m 深处的温度分别为 9.40、9.25、12.33 ℃;温度最低值出现在 2009 年 1 月 16 日,50、30、5 m 深处的温度分别为 3.07、2.39、3.02 ℃. 对于观测井,温度最高值出现在 2008 年 10 月 3 日,50、30 m 深处的温度分别为 7.03、6.84 ℃;温度最低值出现在 2009 年 1 月 17 日,50、30 m 深处的温度分别为 5.06、4.96 ℃. 可以看出两者的变化规律基本一致,观测井要比换热井的变化稍微滞后一些,而且温度变化幅度也要小一些,这说明热流传递到观测井需要一定的时间,而且蓄热和取热过程对换热井的影响也要更大一些. 换热井内 5 m 深处的土壤温度在蓄热中期相对深层土壤温度要高,这是由于浅层土壤受外界环境的影响较大,特别是在天气达到最热的这一阶段. 温度最低值之所以出现在 1 月中旬,是因为在这以后热泵的运行时间逐渐缩短,取热量也逐渐减少,而此时换热井内较低的土壤温度会使周围土壤向井内的传热量很大,当取热量小于周围土壤向井内的传热量时,换热井内的土壤温度就会缓慢回升.

2.3　土壤温度年周期性变化比较

在进行蓄热实验之前,系统进行了短期供热实验. 由于土壤初始温度较低,约为 5.4 ℃,随着热泵的不断取热,土壤温度逐渐降低,使得在蓄热之前,土壤温度已经下降很多(深层土壤约 4 ℃左右). 而这对于蓄热也是有利的,因为温度越低越容易续存更多的热量,这样也会减少热量向周围的扩散损失.

表 2、3 分别列出了系统周期性"蓄热—取热"运行 3 a 的换热井和观测井深层土壤温度变化情况,所给出的时间点分别是蓄热的起始时间(4 月)和取热的起始时间(10 月). 由表中数据可以看出,蓄热后土壤的温度都明显升高,达到比较高的水平,虽然在取热阶段温度会有所下降,但从以年为周期的总体变化来看,第 1 年和第 3 年土壤温度还是有小幅升高的,说明蓄热达到了预期的目的,改善了无蓄热运行时土壤温度逐年下降的情况,土壤温度的升高也提高了热泵运行时的蒸发温度,有利于热泵高效地运行. 而第 2 年土壤温度略有下降,是因为当年的冬季比较寒冷,热泵供热量较大,从土壤中取出的热量也较大,这些在本文第 3 节中进行了说明. 这一因素导致了土壤温度有所下降,但其下降幅度不大,没有超过第 1 年和第 3 年总的温度上升幅度(观测井 30 m 深是例外,但观测井在 2008 年 6 月 7 日建成测试时的温度已经比 4 月份开始蓄热时上升了很多),所以不会造成供热情况变差的后果. 另外,观测井的温度变化幅度也同样比换热井的要小一些. 从 3 年总的温度数据来看,土壤的年周期温变不大,所以基本保持了以年为周期的热平衡.

表 2　换热井深层土壤年周期温度及其变化　　℃

日期	温度		蓄热后温变		取热后温变		年周期温变	
	30 m	50 m	30 m	50 m	30 m	50 m	30 m	50 m
2008-04-18	3.34	4.26						
2008-10-10	7.64	7.24	4.30	2.98				
2009-04-16	5.44	5.92			−2.20	−1.32	2.10	1.66
2009-10-14	7.39	6.89	1.95	0.96				
2010-04-17	5.06	5.28			−2.33	−1.61	−0.38	−0.64
2010-10-11	8.11	6.82	3.05	1.54				
2011-04-15	5.45	5.50			−2.66	−1.32	0.39	0.22

表 3　观测井深层土壤年周期温度及其变化　　℃

日期	温度		蓄热后温变		取热后温变		年周期温变	
	30 m	50 m	30 m	50 m	30 m	50 m	30 m	50 m
2008-06-07	5.11	5.33						
2008-10-10	6.61	6.54	1.50	1.21				
2009-04-16	5.54	5.65			−1.06	−0.89	0.43	0.32
2009-10-14	6.14	6.42	0.60	0.78				
2010-04-17	4.83	4.98			−1.31	−1.44	−0.71	−0.67
2010-10-11	5.78	5.62	0.95	0.64				
2011-04-15	5.00	5.39			−0.78	−0.23	0.17	0.41

3　系统热量利用分析

设 Q_{hp} 为热泵供热量,Q_{so} 为太阳能供热量,Q_{st} 为太阳能蓄热量,Q_{co} 为供冷排热量,Q_{ex} 为热泵取热量,Q_{he} 为总供热量,Q_{in} 为输入土壤总热量;W_{hp} 为热泵供热耗电量,W_{cp} 为热泵供热循环水泵耗电量,W_{so} 为太阳能供热耗电量,W_{st} 为太阳能蓄热耗电量,W_{co} 为供冷耗电量,W_{he} 为供热总耗电量,W_a 为年耗电量;τ_{hp} 为热泵供热运行时间,h;τ_{so} 为太阳能供热运行时间,h;τ_{st} 为太阳能蓄热运行时间,h;τ_{co} 为供冷运行时间,h;q_{ex} 为单位埋深取热功率,q_{st} 为单位埋深蓄热功率,q_{cs} 为供冷季蓄热井单位埋深蓄热功率,q_{cc} 为供冷季供冷井单位埋深排热功率,q_{in} 为单位埋深输入热量平均功率;t_{ho} 为供热季室外平均温度,t_{co} 为供冷季室外平均温度,t_{so} 为蓄热季室外平均温度;I_h 为供热季日均太阳总辐照量,I_s 为蓄热季日均太阳总辐照量. 表 4 ~ 9 分别给出了系统运行 3 a 的各

种参数. 因为运行时间、耗电量和热量的大小趋势是一致的,所以这里着重比较 3 a 的热量关系. 第 2 年的室外温度最低,所以在供热季需要的供热量最大,在供冷季需要的供冷量最小. 太阳辐射量直接影响太阳能集热器的供热和蓄热能力,可以看出第 2 年和第 3 年的日均太阳总辐照量明显小于第 1 年,所以太阳能供热量和蓄热量也相对较小;太阳能集热器的供热和蓄热能力也跟室外温度有关,当室外温度较低时,会增大集热器向环境的散热量,所以供热量和蓄热量也会相应减少. 而太阳能供热量的减少就会使热泵的供热量增加. 当室外温度较高时,结果恰恰相反. 表中 3 a 数据的比较结果完全吻合这些规律.

表 4 系统 3 a 运行热量参数 GJ

年次	Q_{hp}	Q_{so}	Q_{st}	Q_{co}	Q_{ex}	Q_{he}	Q_{in}
第 1 年	72.55	71.79	70.76	5.52	55.65	144.34	76.28
第 2 年	82.90	65.02	64.83	5.10	63.25	147.91	69.93
第 3 年	75.89	70.43	69.02	5.31	58.43	146.32	74.33

表 5 系统 3 a 运行耗电量参数 kW · h

年次	W_{hp}	W_{cp}	W_{so}	W_{st}	W_{co}	W_{he}	W_a
第 1 年	4 697.2	742.7	676.8	498.7	71.9	6 116.7	6 687.3
第 2 年	5 457.7	864.2	622.4	460.4	67.1	6 944.2	7 471.7
第 3 年	4 848.5	766.9	659.3	482.9	68.5	6 274.6	6 826.0

表 6 系统 3 a 运行时间参数 h

年次	τ_{hp}	τ_{so}	τ_{st}	τ_{co}
第 1 年	1 878	1 387	1 234	256
第 2 年	2 182	1 275	1 139	239
第 3 年	1 938	1 351	1 195	244

表 7 系统 3 a 运行的单位埋深换热功率 W · m^{-1}

年次	q_{ex}	q_{st}	q_{cs}	q_{cc}	q_{in}
第 1 年	13.72	24.86	63.12	19.97	23.70
第 2 年	13.42	24.67	62.64	19.77	23.49
第 3 年	13.96	25.04	63.58	20.14	23.91

表 8 系统 3 a 运行室外温度参数 ℃

年次	t_{ho}	t_{co}	t_{so}
第 1 年	−5.93	23.73	19.08
第 2 年	−9.75	22.45	17.99
第 3 年	−8.00	22.68	19.13

表 9 系统 3 a 运行太阳总辐照量参数 MJ · m^{-2}

年次	I_h	I_s
第 1 年	8.56	17.20
第 2 年	8.29	16.99
第 3 年	8.08	16.83

前面通过分析土壤的年周期温变,得出了土壤保持了以年为周期的热平衡,则实际向土壤输入的热量与从土壤中取出的热量在长期上应该大致相等. 由于蓄热时间周期较长,必然会有一定的热损失. 如前所述,系统在蓄热前进行了短期从土壤中取热实验,这样有利于之后的蓄热,可以使向周围土壤扩散的热损失率不至于过高. 从表 4 中可以看出,3 a 的总取热量为 177.33 GJ,3 a 的输入土壤总热量为 220.54 GJ,两者之比为0.8,则可认为热损失率为 20%. 另外可以看出,系统的供冷排热量很小,不到取热量的 10%,这说明向土壤蓄热是十分必要的. 这样,热泵取热量除了利用系统自身的供冷排热量之外,利用的基本都是蓄存的太阳能,再加上冬季太阳能直接供热提供的热量,那么冬季供热量中约有 85% 是来自于太阳能.

单位埋深换热功率可以反映出 GHE 吸收和释放热量的能力. 取热时的 q_{ex} 接近 14 W/m,相对较低,这与严寒地区土壤温度偏低有关. 蓄热时的 q_{st} 接近 25 W/m;供冷季蓄热井和供冷井的 q_{cs} 和 q_{cc} 分别为 63 W/m 和 20 W/m 左右. 而综合考虑以上太阳能蓄热和供冷排热的输入热量,平均功率 q_{in} 接近 24 W/m.

在夏季供冷时,GHE 分为 2 组同时进行蓄热和供冷. 由表中数据可以看出,太阳能蓄热功率要大于供冷排热功率,这就必然会导致蓄热井周围的土壤温度要高于供冷井周围的土壤温度,图 6 给出的夏季典型日(2010 年 8 月 17 日)不同深度蓄热井、供冷井及所有井周围土壤的平均温度也很好地反映了这一点.

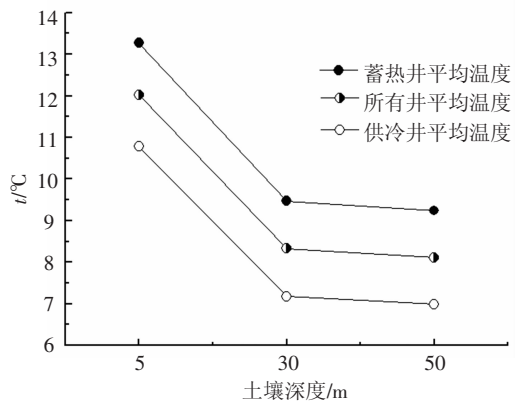


图 6 蓄热和供冷同时进行时土壤温度的比较

从 q_{cs} 和 q_{cc} 的数值也可以看出,供冷季蓄热功率与排热功率的比值大概接近 3∶1. 由此可以将 2 组 GHE 的比例优化为 3∶1,即蓄热 9 根,供冷 3 根,这样更有利于换热器的高效利用和土壤温

度的均衡.

4　结　论

1)在蓄热和取热的影响下,土壤温度在短期(日)和长期(年)均呈现出周期性的变化. 相对于换热井,观测井所受的影响程度要小一些且稍显滞后. 在冬季供热时,太阳能和热泵交替供热的形式也使得热泵可以间歇运行,这令土壤温度得到一定的恢复,不至于使温度下降过快.

2)由于进行了太阳能季节性土壤蓄热,即使在冬季大量取热的情况下,也能保证蓄热量和取热量的基本平衡,保持了严寒地区(如哈尔滨)土壤温度以年为周期的相对平稳,有利于系统长期高效的运行.

3)土壤保持了以年为周期的热平衡,作为一个廉价的蓄热取热载体,实现了严寒地区太阳能的移季利用. 太阳能作为建筑物的供热来源,在冬季供热量中占 85% ,节约了大量的常规能源.

4)在供冷季同时进行蓄热和供冷时,2 组 GHE 周围的土壤温度会因为太阳能蓄热功率和供冷排热功率的不同而不同,可根据换热功率分配 2 组 GHE 的比例.

参考文献:

[1] SCHMIDT T, MANGOLD D, MÜLLER-STEINHAGEN H. Central solar heating plants with seasonal storage in Germany [J]. Solar Energy, 2004, 76(1/2/3): 165 – 174.

[2] PAHUD D. Central solar heating plants with seasonal duct storage and short-term water storage: design guidelines obtained by dynamic system simulations [J]. Solar Energy, 2000, 69(6): 495 – 509.

[3] FISCH M N, GUIGAS M, DALENBÄCK J O. A review of large-scale solar heating system in Europe [J]. Solar Energy, 1998, 63(6): 355 – 366.

[4] LUND P D. Computational simulation of district solar heating systems with seasonal thermal energy storage [J]. Solar Energy, 1986, 36(5): 397 – 408.

[5] YUMRUTAS R, KUNDUZ M, AYHAN T. Investigation of thermal performance of a ground coupled heat pump system with a cylindrical energy storage tank [J]. International Journal of Energy Research, 2003, 27(11): 1051 – 1066.

[6] BADESCU V. Model of a thermal energy storage device integrated into a solar assisted heat pump system for space heating [J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(10): 1589 – 1604.

[7] UCAR A, INALLI M. A finite element model of solar heating system with underground storage [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2008, 47(12): 1639 – 1646.

[8] 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.

[9] 马文麒, 李申生. 太阳池和池下土壤的跨季度蓄热[J]. 太阳能学报, 1984, 5(4): 358 – 367.

[10] 韩敏霞. 太阳能土壤跨季节蓄热-地源热泵组合理论与实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.

[11] 赵军, 曲航, 崔俊奎, 等. 跨季节蓄热太阳能集中供热系统的仿真分析[J]. 太阳能学报, 2008, 29(2): 214 – 219.

[12] 吕超, 郑茂余. SGCHPS 土壤蓄热供热供冷效果分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(12): 104 – 108.

(编辑　魏希柱)