

土壤源热泵复合系统太阳能集热器面积的选择方法

高文龙, 官燕玲

(长安大学环境科学与工程学院, 西安 710054)

摘 要: 针对以太阳能集热系统恢复埋管周围岩土温度的土壤源热泵建筑供暖的复合系统, 研究该系统太阳能集热器面积的合理选择方法。在西安市气候条件下, 针对 10000 m² 的住宅建筑面积, 应用 TRNSYS 软件建立该复合系统的动态运行换热模型。根据太阳能集热系统是否在冬季联合供暖运行分 2 种工况进行多种条件的仿真计算, 得到对应不同岩土导热系数值的相对最佳集热器面积, 从而得到这 2 种工况的单位建筑面积相对最佳集热器面积与岩土导热系数的关系。

关键词: 土壤源热泵; 太阳能集热器; 复合系统; 埋管换热器; 岩土温度恢复

中图分类号: TU995.1

文献标识码: A

0 引 言

当土壤源热泵系统在每年冬季单取热运行进行建筑供暖时, 在其他季节中埋管周围的土壤温度场可能得不到有效恢复, 土壤的热平衡被破坏, 从而埋管的换热性能降低, 甚至导致系统不能正常运行。因此本文提出太阳能辅助土壤源热泵复合系统, 利用太阳能光热系统配合, 在采暖季时可作为补充能源以减小地埋管取热的负荷, 在非供暖季时作为土壤温度恢复的热源。对于该系统如何确定太阳集热器面积的大小, 以致使系统技术上可靠, 同时经济上合理, 是该类技术推广的核心问题。

近年来, 中外学者针对太阳能辅助土壤源热泵复合系统做了一些研究。文献[1]分析太阳能集热的蓄热温度、蓄热流量和蓄热水箱体积对蓄热效果和蓄热过程中耗电量的影响规律。文献[2]研究严寒地区由太阳能-地源热泵与城镇热网组成的互补供暖系统, 比较多种联合运行模式下的系统性能。文献[3]对比太阳能辅助地埋管地源热泵复合系统在过渡季利用太阳能进行土壤蓄热时 2 种运行模式下的蓄热系统的热利用效率, 并给出主要设备参数的确定方法。文献[4]仿真研究太阳能辅助土壤源热泵单供暖的埋管的换热工况。文献[5]使用 TRNSYS 软件, 针对寒冷地区太阳能辅助土壤源热

泵, 分析钻孔深度对热泵能效的影响, 并提出一种关于太阳能集热与埋管取热的控制策略。可看到, 以上相关研究对太阳能辅助土壤源热泵复合系统中太阳集热器面积大小的选取未给出相应方法。在现行规范^[6]中给出了完全由太阳能供热的集热面积计算公式, 显然该方法不适于太阳能只作为辅助能源的情况。

本文以西安地区为例, 针对只有建筑供暖负荷的太阳能辅助的土壤源热泵系统, 利用 TRNSYS 软件建立该复合系统的运行换热模型, 在此基础上研究该系统太阳集热器面积的合理选择方法。根据太阳能集热系统是否在冬季联合供暖运行分为 2 种工况, 以总费用最小为评价标准, 研究对应不同大小岩土导热系数值的相对最佳集热器面积, 以及这 2 种工况的单位建筑面积的相对最佳集热器面积与岩土导热系数的关系。

1 系统组成及运行工况

1.1 系统组成

系统组成见图 1, 主要包括以下部分: 太阳集热器、集热水箱、供暖用户、岩土侧埋管换热器、热泵机组、水泵 1(热源侧循环水泵)、水泵 2(用户侧循环水泵)、水泵 3(太阳能集热循环水泵)、水泵 4(岩

收稿日期: 2018-10-26

基金项目: 住房城乡建设部科学技术项目(2016-R1-004)

通信作者: 官燕玲(1957—), 女, 博士、教授、博士生导师, 主要从事室内热环境、建筑节能方面的研究。guanyl@chd.edu.cn

土侧蓄热循环水泵)。

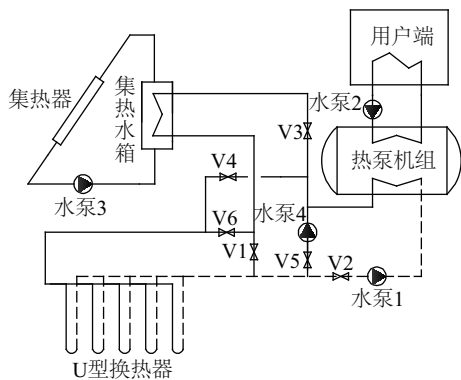


图1 太阳集热器辅助土壤源热泵复合系统原理图
Fig. 1 Schematic diagram of solar energy collector assisted ground source heat pump composite system

1.2 运行工况

太阳集热器主要作用是在非供暖季向地下补热恢复岩土温度,在供暖季也可选择联合供暖以减小土壤源热泵系统在地下的取热负荷。针对在冬季太阳能集热系统是否联合供暖可分为工况1和工况2。

工况1:在供暖期只开启土壤源热泵系统,不考

虑太阳能系统辅助供暖。在过渡季节开启太阳能集热系统,恢复埋管周围的岩土温度。

工况2:在供暖期同时开启土壤源热泵系统和太阳能辅助系统,将太阳能集热作为供暖热源的补充,此时,当集热水箱出水温度 $T \geq 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[7]时,可通过热泵机组独立用于建筑供暖,当温度 $T < 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,停止集热水箱对热泵机组的供热,单独采用地源热泵系统供暖,太阳能集热子系统独立循环继续集热。在过渡季节(蓄热期)开启太阳能集热系统,恢复埋管周围的岩土温度,此时,当蓄热水箱温度相比埋管周围岩土蓄热体实时平均温度大于等于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,开启太阳能供热气循环系统,对埋管进行蓄热;当其小于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,停止对埋管的蓄热,太阳能供热气循环系统闭式循环继续集热;当埋管周围岩土蓄热体实时平均温度大于等于管周围岩土蓄热体初始平均温度时,关闭太阳能供热气循环系统,停止对埋管的蓄热。

不同工况下系统的设备及阀门的工作状态见表1,其中, T 、 T_0 、 T_1 分别表示太阳能集热水箱的实时出水温度、岩土蓄热体初始平均温度和岩土蓄热体实时平均温度。

表1 2种工况下的设备及阀门工作状态

Table 1 Operating mode of equipment and valve under two working conditions

运行工况及运行条件		启动		关闭			
工况 1		供暖期		阀门 V2、V4,水泵 1,水泵 2,热泵机组		阀门 V1、V3、V5、V6,水泵 3、水泵 4	
工况 2	供暖期	$T\geqslant 16\text{ }^{\circ}\text{C}$		阀门 V1、V2、V3,水泵 1、水泵 2、水泵 3,热泵机组		阀门 V4、V5、V6,水泵 4	
		$T<16\text{ }^{\circ}\text{C}$		阀门 V2、V4,水泵 1、水泵 2、水泵 3,热泵机组		阀门 V1、V3、V5、V6,水泵 4	
		$T-T_1\geqslant 5\text{ }^{\circ}\text{C}$		阀门 V3、V5、V6,水泵 3、水泵 4		阀门 V1、V2、V4,水泵 1、水泵 2,热泵机组	
工况 1、 工况 2	蓄热期	$T-T_1<5\text{ }^{\circ}\text{C}$		水泵 3		阀门 V1、V2、V3、V4、V5、V6,水泵 1、水泵 2、水泵 4,热泵机组	
		$T_1\geqslant T_0$		热泵机组及所有阀门、水泵			

2 仿真模型的建立

2.1 系统模型

通过 TRNSYS 软件建立系统模型,主要模块有太阳集热器 Type538、集热水箱 Type4a、热泵机组 Type668、水泵 Type748、U型地埋管 Type557、用户负荷导入模块 Type682 和控制模块 Type14h、Type2b 以及计算器等。

2.2 太阳能集热器

平板太阳能集热器和真空管太阳能集热器是目前应用最广泛的太阳光-热转换装置。综合考虑,本文选用真空管集热器模型。

太阳辐照强度是太阳集热器最主要的工作参数,这里选择西安市全年动态太阳辐照强度等气象参数作为输入条件。

2.3 集热水箱

太阳能集热水箱的容积的确定与集热器面积、系统的类型有关。表 2 给出了不同类型的太阳能系统单位集热器面积所对应的集热水箱容积的选取范围^[6]。

表 2 太阳能集热水箱容积范围
Table 2 Volume range of solar collector tank

系统类型	小型太阳能 供热水系统	太阳能供暖系统	
		短期蓄热	季节蓄热
容积范围/L·m ⁻²	40~100	50~150	1400~2100

根据该范围,集热水箱容积指标取 65 L/m²。在仿真计算中,针对不同的集热器面积大小的选择,依据该集热水箱容积指标确定各相应的集热水箱容积。同时考虑到本文选择的热泵机组蒸发器流量要求大于 38.6 m³/h,并考虑 15%的安全系数,所以集热水箱最小容积为 45 m³。

2.4 集热器面积

集热器面积的合理选择是该项研究的主要任务。集热器面积大,所需的岩土温度恢复时间短,运行能耗可能会减小,但初投资相对要大一些;集热器面积小,所用的恢复时间长,有可能在有限时间内不能完成岩土温度恢复的任务。在该计算分析中要涉及不同面积大小条件的计算对比,计算面积的选择是将在整个非供暖季能够实现岩土平均温度恢复的集热器面积作为最小面积条件,以此逐步增大其面积,对工况 1 和工况 2 分别进行 6 个面积大小条件的计算。

2.5 热泵机组

热泵机组选取 EXLSR390.1,其额定制热量为 386.4 kW,额定功率为 71.9 kW。在 TRNSYS 软件中输入该热泵机组的性能参数,如热泵机组制热量与功率随进、出水温度的变化等。

2.6 地埋管换热器模型

在使用 TRNSYS 软件对该复合系统进行建模时,会用到 U 型地埋管换热器模块 Type557。这里通过在西安进行的原位岩土热响应实验数据对模块进行参数设置。

根据热响应实验条件,钻孔直径为 180 mm、埋管为 $\Phi 32 \times 3$ 单 U 型 PE 塑料管、埋深 120 m、回填料

为原土和细砂的混合物。岩土热响应实验得到埋管周围岩土的导热系数 λ 值和容积比热容 ρc 分别为 1.50 W/(m·K)和 2.78×10^6 J/(m³·℃)。

埋管数量按照土壤源热泵独立满足用户供暖、供冷的需求设计。土壤源热泵系统的设计需要依据全年建筑动态负荷,本文使用 DeST-h 软件对西安市 10000 m²的住宅建筑进行全年动态负荷计算,在考虑热泵机组能效比的基础上得出地埋管对岩土全年总取热量为 4.22×10^5 kWh、总放热量为 6.79×10^5 kWh。以取热为主,考虑全年埋管的取、放热量的平衡,对放热量进行削峰,如图 2 所示。最后,将削峰后全年埋管取、放热量平衡条件下所对应的建筑冷、热负荷导入地源热泵模拟计算软件“地热之星”,通过计算得到埋管的需求量。

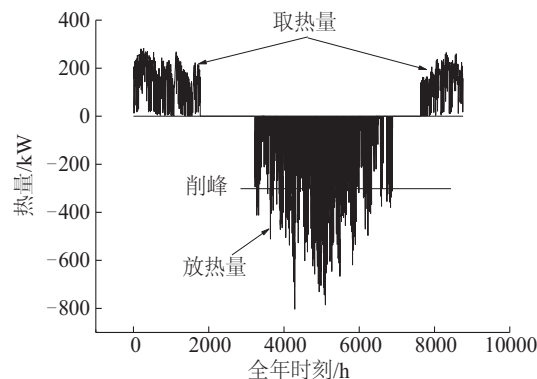


图 2 西安地区 10000 m²的住宅建筑进行
全年岩土取放热量

Fig. 2 Annual rock-soils capacity of residential
building area of 10000 m²

由于本文针对的是住宅建筑的供暖,只有热负荷,不存在冷负荷,因此计算中埋管的放热量是考虑由太阳能集热系统实现。

按照间距为 5 m 的方形埋管布阵,计算所需埋管深度为 120 m 的 U 型管埋管根数为 313 个。其中埋管间距、埋深和埋管数量将作为 TRNSYS 仿真系统的输入。U 型管模块 Type557 中埋管区域的蓄热岩土体的体积 V_r 按式(1)计算:

$$V_r = \pi \cdot m \cdot n \cdot (0.525 \cdot d)^2 \quad (1)$$

式中, m ——井数; n ——井深, m; d ——井中心距, m。将相关参数代入式(1),得到埋管周围岩土蓄热体的体积 8.13×10^5 m³。

2.7 水泵

考虑系统流量的变化,采用变频水泵。在选取水泵样本时,其额定流量根据最大负荷时的流量进行选取,扬程考虑 10%的安全系数。

1)热源侧循环水泵 1(见图 1),在考虑热泵机组能效比的基础上,动态取热量最大值 287 kW,对应的水泵 1 额定流量为 35.3 m³/h,额定扬程为 38.4 m。

2)用户侧循环水泵 2(见图 1),根据动态热负荷最大值为 352.7 kW,对应的水泵 2 额定流量为 60.7 m³/h,额定扬程为 45.6 m。

3)太阳能集热循环水泵 3(见图 1)的流量决定于太阳集热器面积,即不同集热器面积的系统工况,其所需的水泵性能参数不同。太阳能集热系统的设计流量按式(2)计算^[6]:

$$G_s = gA \quad (2)$$

式中, G_s ——太阳能集热系统的设计流量, m³/h;
 g ——太阳集热器单位面积流量, m³/(h·m²);
 A ——太阳能集热系统的集热器面积, m²。

其中,真空管太阳集热器的单位面积流量 $g = 0.035 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ 。如当集热器面积为 100 m²时,水泵 3 额定流量为 3.5 m³/h,扬程为 13.1 m。

4)岩土侧蓄热循环水泵 4(见图 1)的流率(m³/h)受集热水箱体积的影响,其数值上等于集热水箱的体积^[4]。例如,当集热水箱容积为 45 m³时,水泵 4 额定流量为 45 m³/h,扬程为 21.8 m。

2.8 模拟系统控制

本模拟系统的运行仿真通过 TRNSYS 软件中的控制模块来实现工况 1 和工况 2 的运行效果(见 1.2 节)。

工况 1 与工况 2 在蓄热期的系统模型控制方案相同,而在供暖期,工况 1 单独由土壤源热泵供暖,工况 2 在工况 1 的基础上增加太阳能辅助供暖,工况 2 的系统控制原理如图 3 所示。

3 模拟结果及分析

3.1 工况 1

3.1.1 设置最小集热器面积

计算中,先将岩土综合导热系数按 2.6 节中实

验条件设置为 1.50 W/(m·K)。

供暖期(西安地区为每年的 11 月 15 日~翌年 3 月 15 日),通过系统控制,完全由土壤源热泵循环系统进行供暖。

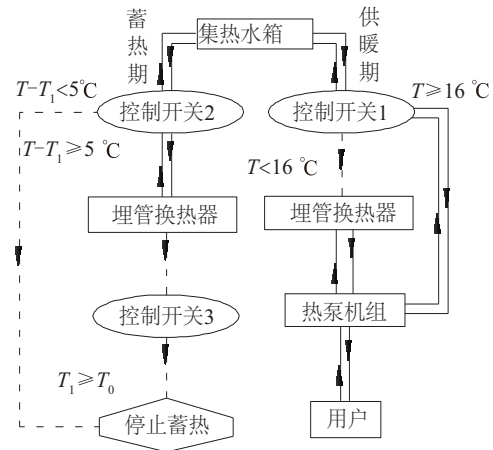


图3 工况2控制原理图

Fig. 3 Control schematic diagram of condition 2

经过一个供暖期的运行,埋管换热器从土壤中取热 $4.22 \times 10^5 \text{ kWh}$,计算得到埋管周围岩土体的平均温度由 16.24 ℃ 下降到 14.80 ℃。供暖期岩土体埋管周围的平均温度随时间的变化如图 4 所示。

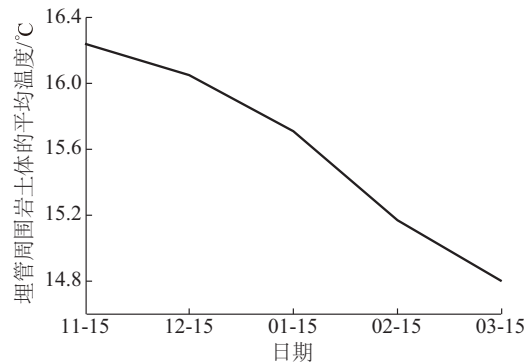


图4 供暖期岩土蓄热体平均温度变化

Fig. 4 Average temperature change of rock-soils during heating period

蓄热期(非供暖期),通过系统控制,利用太阳能光热系统对岩土侧埋管换热器进行加热,使埋管周围岩土体平均温度恢复到初始值。

这里,从供暖期结束后的第1天起(每年的3月16日)就开始蓄热,将整个非供暖期作为恢复期,集热器面积从 100 m² 开始递增,模拟的蓄热状况如表 3 所示。从表 3 可知,当集热器面积 ≥ 700 m² 时,

在非供暖期内可完成埋管周围岩土体温度恢复到 $16.24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的蓄热任务。因此 700 m^2 作为设置的最小集热面积。

表3 不同面积的集热器在非供暖期的蓄热状况

Table 3 Thermal storage status of collector with different area during non heating period

集热器面积/ m^2	100	200	...	700	800
蓄热状况	未完成	未完成	未完成	完成	完成

3.1.2 相对最佳集热器面积

在一定的集热面积条件下,太阳辐射强度大,则单位时间内能获得较大的集热量,即同样的集热量所需要的时间短。集热器面积的大小关系到初投资,集热运行时间关系到系统泵的能耗。相对最佳集热面积是指在满足岩土温度恢复的前提下,太阳集热器系统的初投资与整个复合系统运行费用的总和为最小时所对应的集热器面积。

如图5所示,西安市全年动态太阳辐照量呈抛物线变化,在5月1日~9月1日(每年的第2880~5832 h)为峰值区,总时数为2952 h(123 d)。

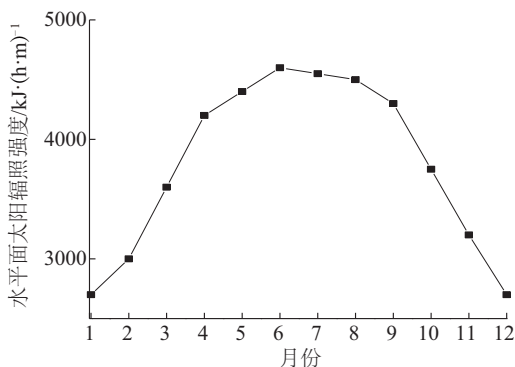


图5 西安全年太阳辐射强度

Fig. 5 Annual solar radiation intensity in Xi'an

在相对最佳集热器面积的分析计算中,对不同大小面积集热器的蓄热运行时间段的确定,均从太阳辐射峰值区开始向前后两侧对称延伸或缩短,从而模拟得到各集热器面积的合理蓄热运行时段,结果如图6所示。图6表明随着集热器面积的增大,蓄热所需时段逐渐减小,如集热器面积为 700 m^2 时所需蓄热时间为196 d,面积为 1200 m^2 则为75 d。

根据集热器样本,单位面积真空管集热器的初投资为 600 ¥/m^2 ,使用寿命平均为15 a。本文模拟

运行时间确定为15 a,每年非供暖季要将埋管周围岩土温度恢复到初始状态。另外关于电费,西安市居民生活用电的电价为 0.4983 ¥/kWh 。在此基础上,通过模拟来确定不同集热器面积下完成蓄热的运行耗功,以及供暖期的运行耗功,从而得到15 a的总运行费用,与初投资合计得到总投资。其中,关于运行费用,包括热泵机组和各水泵在15 a里的供暖期和蓄热期的总运行费用;关于初投资,考虑集热水箱与水泵的初投资费用远低于集热器初投资,因此仅计算太阳集热器的购买及安装费用。整理计算结果如图7所示。

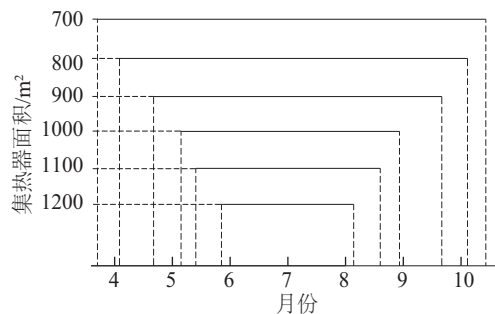


图6 各集热面积下的蓄热合理运行时段

Fig. 6 Reasonable operation period of heat storage under each collecting area

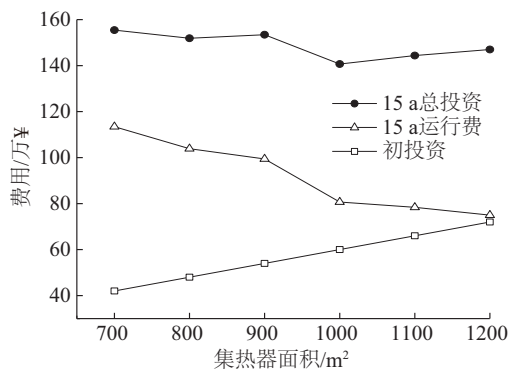


图7 投资费用与集热器面积的变化关系

Fig. 7 Relationship between investment cost and collector area

由图7看到,总费用最低的集热器面积为 1000 m^2 ,以此作为相对最佳集热器面积。当集热器面积在 $700\sim 900\text{ m}^2$ 和 $1100\sim 1400\text{ m}^2$ 之间时,总投资都高于集热面积 1000 m^2 的,且前者的总投资要略高于后者,并且后者总投资随集热面积的进一步增加基本呈线性缓慢增长。当集热器面积大于 1000 m^2 时,对比图6可发现,此时蓄热基本在

太阳辐射强度峰值区段(5月1日到9月1日)就可完成,在这里随着集热面积的增大,初投资增加,但运行费用减小,总投资缓慢增加,说明初投资增加的费用要大于运行减小的费用;当集热器面积小于 1000 m² 时,随着集热面积的增加,同样是初投资增加,运行费用减小,但总投资变化不明显,说明初投资增加的费用与运行减小的费用相当。

3.1.3 岩土导热系数与相对最佳集热面积的关系

埋管的换热性能与岩土综合导热系数有关,岩土导热系数越大,单位时间内埋管换热器与岩土的换热量就越多,即相同面积的集热器就可更快地完成蓄热任务,这说明相对最佳集热面积与岩土的导热系数有关。这里用同上的方法计算分析,对西安城区常见的岩土导热系数大小,分别计算得到所对应的相对最佳集热器面积,如表 4 所示。由表 4 可知,随着岩土导热系数的增加,相对最佳集热器面积在减小,如导热系数为 1.1 W/(m·K) 时,最佳集热器面积为 1080 m²,当导热系数为 2.5 W/(m·K) 时,相对最佳集热器面积减小为 890 m²。以上是针对 10000 m² 建筑面积的,下面提出单位建筑面积的相对最佳集热器面积与岩土导热系数之间的关系。

表 4 不同岩土导热系数下的相对最佳集热面积

Table 4 Relative optimum heat-collecting area under different thermal conductivity of rock and soil

岩土导热系数 $\alpha/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.5
最佳集热 面积/m ²	1080	1050	1000	980	950	930	920	890

相对最佳集热器面积与建筑面积的比值 A/S (即单位建筑面积相对最佳集热器面积)与岩土导热系数的关系,如图 8 所示。由图 8 可见随着岩土导热系数的增加,单位建筑面积相对最佳集热器面积随之接近线性减小。通过对结果的整理,可得到关系式(3):

$$A/S = 0.12 - 0.0133\alpha \quad (3)$$

式中, A ——集热器面积, m²; S ——建筑面积, m²; α ——岩土导热系数, W/(m·K)。

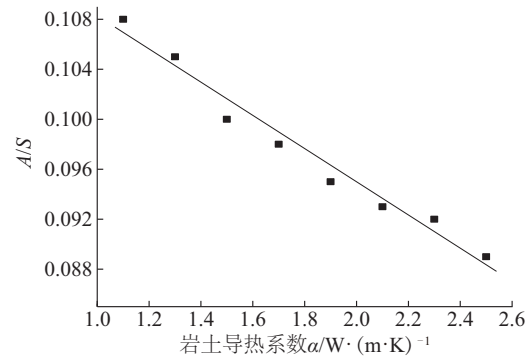


图 8 单位建筑面积的相对最佳集热器面积随岩土导热系数的变化

Fig. 8 Relative optimum collector area of unit building area varies with geothermal conductivity

3.2 工况 2

3.2.1 设置最小集热器面积

同上,计算中,先将岩土综合导热系数按 2.6 节中实验条件设置为 1.50 W/(m·K)。在供暖期,通过系统控制,由太阳能光热辅助土壤源热泵联合供暖。在蓄热期,通过系统控制,利用太阳能光热系统对岩土侧地埋管换热器进行加热以恢复岩土温度。工况 2 集热器面积分别设置为 100~700 m² 的 4 个面积大小时,经过一个供暖期的运行,埋管周围岩土体的平均温度随时间的变化如图 9 所示。由图 9 看到集热器面积的增加,岩土体实时平均温度相对提高,即温降减小。当集热器面积分为 100、700 m² 时,供暖期结束时岩土体的平均温度分别为 14.82、14.97 °C;可看到这 2 个值均比工况 1 的相应值 14.80 °C 要高,说明光热系统辅助供暖减小了从岩土中的取热量。

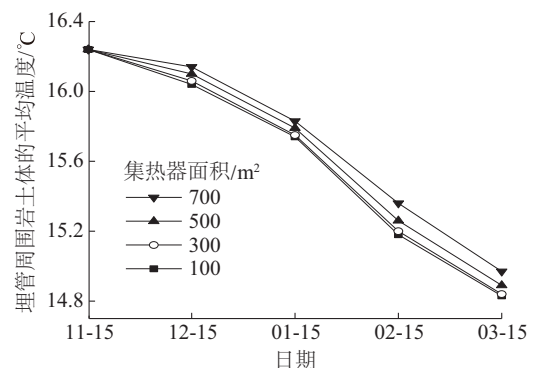


图 9 供暖期岩土蓄热体平均温度变化

Fig. 9 Average temperature change of rock-soils during heating period

由于工况 2 在供暖季有太阳能辅助供暖,所以设置最小集热器面积与工况 1 不同。用同上的方法分别计算得到集热器面积从 100 m²开始递增的蓄热状况,如表 5 所示。由表 5 可知,当集热器面积≥500 m²时,在非供暖期内可完成恢复岩土温度的任务。因此将 500 m²做为设置最小集热面积。

表 5 不同面积的集热器在非供暖期的蓄热情况					
Table 5 Thermal storage of different areas of collector during non heating period					
集热器面积/m ²	100	200	...	500	600
蓄热状况	未完成	未完成	未完成	完成	完成

3.2.2 相对最佳集热器面积

工况 2 中因为在供暖期引入太阳能光热系统辅助供暖,只有在太阳能供水温度 T 低于 16 ℃时才会开启土壤源热泵从岩土中取热供暖,所以相对于工况 1 其对岩土的温度会有所减少,因此在蓄热期使岩土恢复到初始温度的蓄热量也会相应减少。同样模拟分析不同大小集热器面积下的合理蓄热时段,结果如图 10 所示。

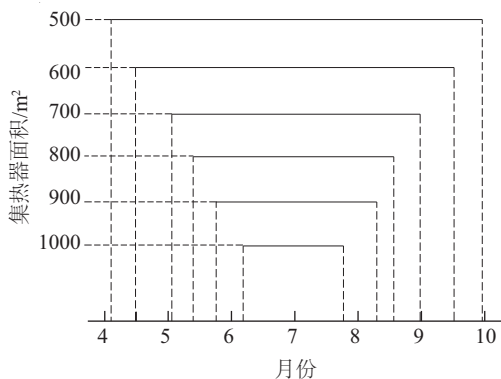


图 10 各集热面积下的蓄热合理运行时间段
Fig. 10 Reasonable operation period of heat storage under each collecting area

图 10 表明,同样,随着集热面积的增大,蓄热恢复时间减小,如面积为 500 m²时恢复时间为 176 d,面积为 1000 m²恢复时间只需 48 d。相比工况 1,相同面积的集热器运行中,蓄热运行时间明显缩短。根据模拟结果,按照 3.1.2 节中的方式,计算其 15 a 运行费用,结合太阳集热器初投资,从总投资上对不同集热面积的系统进行比较,结果如图 11 所示。

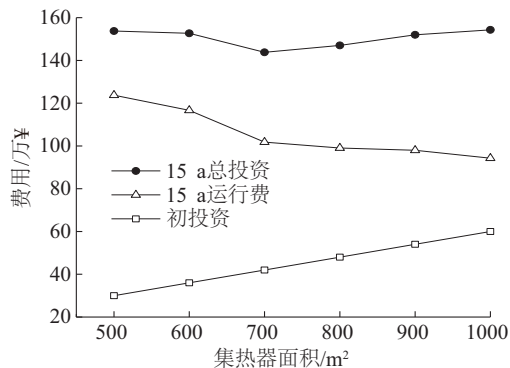


图 11 投资费用与集热器面积的变化关系
Fig. 11 Relationship between investment cost and collector area

由图 11 可看出,工况 2 的相对最佳集热面积为 700 m²,与工况 1 的相对最佳集热面积 1000 m²相比,初投资减少了 18 万 ¥,考虑 15 a 运行费用,总投资工况 2 比工况 1 多了约 3.1 万 ¥。另外,加入太阳能辅助供暖,每个供暖期岩土温度的降低幅度会低于工况 1,热泵机组的制热运行会比工况 1 更稳定。

3.2.3 岩土导热系数与相对最佳集热面积的关系

这里用同 3.1.3 节的方法计算分析,对西安城区常见的岩土导热系数大小,计算得到所对应的相对最佳集热器面积,如表 6 所示。由表 6 看到,随着岩土导热系数的增加,相对最佳集热器面积在减小,如导热系数为 1.1 W/(m·K)时,相对最佳集热器面积为 750 m²(工况 1 为 1080 m²),当导热系数为 2.5 W/(m·K)时,相对最佳集热器面积减小为 570 m²(工况 1 为 890 m²)。

表 6 不同岩土导热系数下的相对最佳集热面积								
Table 6 Relative optimum heat-collecting area under different thermal conductivity of rock and soil								
岩土导热系数 $\alpha'/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.5
最佳集热 面积/ m^2	750	735	700	670	640	615	595	570

单位建筑面积相对最佳集热器面积与岩土导热系数的关系见图 12,其相对最佳集热器面积的变化趋势与工况 1 相似,整理为线性关系式(4):

$$A/S = 0.09 - 0.0127\alpha' \quad (4)$$

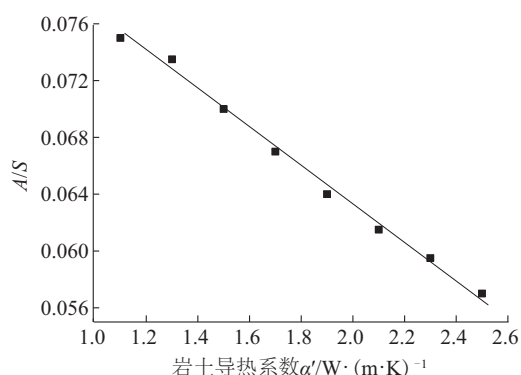


图12 单位建筑面积的相对最佳集热器面积随岩土导热系数的变化

Fig. 12 Relative optimum collector area of unit building area varies with geothermal conductivity

4 结 论

本文针对以太阳能集热恢复岩土温度的土壤源热泵建筑供暖的复合系统,研究该系统太阳集热器面积的合理选择方法。在西安市气候条件下,针对 10000 m² 的住宅建筑面积,应用 TRNSYS 软件建立了该复合系统的动态运行模型。根据太阳能集热系统是否在冬季联合供暖运行分为 2 种工况进行仿真计算,得到对应不同岩土导热系数的相对最佳集热器面积,以及这 2 种工况的单位建筑面积的相对最佳集热器面积与岩土导热系数的关系。得到以下结论:

1) 在西安地区,对于太阳能辅助土壤源热泵复合系统,在非供暖期太阳能集热系统的利用可以恢复埋管周围岩土的温度场。

2) 针对 10000 m² 的住宅建筑面积,在西安地区条件下,当岩土综合导热系数为 1.50 W/(m·K) 时,以集热器的初投资和 15 a 运行费用总和最低为标准,可以得到工况 1 和工况 2 的相对最佳真空管集热器面积分别约为 1000 和 700 m²。

3) 对于西安地区常见的岩土导热系数,对应工况 1 和工况 2 的单位建筑面积相对最佳集热器面积随岩土导热系数的增大均呈线性减小的趋势。

相同岩土导热系数下,工况 2 的单位建筑面积相对最佳集热器面积明显较工况 1 要小。

[参考文献]

- [1] 徐 飞, 季永明, 端木琳. 基于 TRNSYS 模拟的太阳能土壤耦合热泵跨季蓄热效果影响因素分析[J]. 建筑科学, 2016, 32(4): 30—34.
- [1] Xu Fei, Ji Yongming, Duanmu Lin. Influence factor analysis on thermal storage effect of the solar-soil source heat pump system based on TRNSYS simulation [J]. Building Science, 2016, 32(4): 30—34.
- [2] 郝 红, 职佳敏, 毛立功. 严寒地区太阳能-地源热泵与热网互补供暖运行方式研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(7): 976—982.
- [2] Hao Hong, Zhi Jiamin, Mao Ligong. Operation mode analysis of solar energy-ground source heat pump and heating network complementary in cold regions[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(7): 976—982.
- [3] 季永明, 端木琳. 太阳能辅助地埋管地源热泵复合系统过渡季运行模式[J]. 暖通空调, 2017, 47(10): 127—131.
- [3] Ji Yongming, Duanmu Lin. Operation modes of solar-assisted ground-source heat pump system in transition season[J]. HVAC, 2017, 47(10): 127—131.
- [4] Cimmino M, Eslami-Nejad P. A simulation model for solar assisted shallow ground heat exchangers in series arrangement[J]. Energy & Buildings, 2016, 157: 227—246.
- [5] Emmi G, Zarrella A, De Carli M, et al. An analysis of solar assisted ground source heat pumps in cold climates[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 106: 660—675.
- [6] GB 50495—2009, 太阳能供热采暖工程技术规范[S].
- [6] GB 50495—2009, Technical code for solar heating system[S].
- [7] 徐 伟. 中国地源热泵发展研究报告[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [7] Xu Wei. China ground source heat pump development report[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2013.

SELECTION METHOD OF SOLAR COLLECTOR AREA FOR GROUND SOURCE HEAT PUMP COMPOSITE SYSTEM

Gao Wenlong, Guan Yanling

(School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: For a solar-assisted ground source heat pump composite system with solar energy collector to restore rock-soils temperature around the buried pipe that used to supply heat in buildings, the reasonable selection method for the area of solar collectors in this system is studied. Under the climatic conditions of Xi'an, the dynamic heat transfer model of the composite systems is established by using TRNSYS software for the residential building area of 10000 m². According to whether the solar thermal system is running in the winter for combined heating, the simulation calculation is carried out in two working conditions, and the optimal collector area corresponding to the different thermal conductivity of rock-soils is obtained. Therefore, the relationship between the optimal collector area per unit building area and the thermal conductivity of rock-soils is obtained.

Keywords: ground source heat pumps; solar collectors; composite systems; ground heat exchanger; rock-soils temperature recovery