

文章编号:1008-1542(2019)06-0512-08

基于 Fluent 模拟的埋管周围 不同蓄热体温度场变化分析

施 跃¹, 张江水¹, 孙 涛¹, 庞雅静², 颜丽娟³

(1. 中央军事委员会机关事务管理总局, 北京 100082; 2. 河北科技大学发展规划与政策法规处, 河北石家庄 050018; 3. 河北科技大学建筑工程学院, 河北石家庄 050018)

摘 要:为研究埋管周围不同蓄热材料土壤温度场的分布情况, 选定黏土、砂层及砾石 3 种不同蓄热体, 利用 Gambit 建模软件建立简单的埋管模型, 选择距埋管中心间距不同的 5 个测点, 利用 Fluent 数值模拟软件进行蓄热体温度场仿真计算, 研究相同蓄热材料距埋管中心距离不同时以及不同蓄热材料距埋管中心间距相同时各测点温度的变化情况。结果表明, 埋管周围蓄热材料相同时, 土壤各测点温度变化趋势因测点的距离不同而不同, 且距离中心越近温度变化越明显; 埋管周围蓄热材料不同时, 相同测点温度变化趋势基本一致, 且每年取热完成以后的土壤温度升高, 但由于导热系数的不同引起每年蓄热及取热过程中温度、蓄热量和取热量的差异。研究结果可为太阳能耦合地源热泵系统埋管的工程设计提供理论参考。

关键词:储能技术; 埋管; 不同蓄热体; 数值模拟; 温度场

中图分类号:TK529 文献标志码:A doi:10.7535/hbkd.2019yx06008

Analysis of temperature field changes of different regenerators around buried pipes based on Fluent simulation

SHI Yue¹, ZHANG Jiangshui¹, SUN Tao¹, PANG Yajing², YAN Lijuan³

(1. Agency for Offices Administration, Central Military Commission, Beijing 100082, China; 2. Development Planning and Policy Regulation Division, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 3. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: In order to research the distribution of temperature field when the heat storage material is different, three heat retainers are selected, which are clay, sand and gravel. Gambit modeling software is used to establish a simple model, five

收稿日期:2019-10-20; 修回日期:2019-12-11; 责任编辑:张 军

基金项目:全军后勤科研计划课题(BY118B065, BY116B029); 河北省重点研发计划自筹项目(18274518); 石家庄市科学技术研究与发展计划项目(185230055A)

第一作者简介:施 跃(1971—), 男, 安徽寿县人, 工程师, 主要从事军队工程建设管理方面的研究。

通信作者:张江水博士。E-mail:lhmyth@163.com

施跃, 张江水, 孙涛, 等. 基于 Fluent 模拟的埋管周围不同蓄热体温度场变化分析 [J]. 河北科技大学学报, 2019, 40(6): 512-519.

SHI Yue, ZHANG Jiangshui, SUN Tao, et al. Analysis of temperature field changes of different regenerators around buried pipes based on Fluent simulation [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2019, 40(6): 512-519.

measuring points with different distance to the buried pipe center are selected, and the Fluent simulation software is used to carry out simulation calculation of temperature field of different heat retainers. The temperature variation at the five points is figured out when the distance to the buried pipe center is different while the heat storage material is same and when the distance to the buried pipe center is same while the heat storage materials are different. Finally, it is concluded that, with the same heat storage materials around the buried pipe, the temperature variation trend of each measuring point varies according to the distance to the buried pipe center, and the closer it is, the more obvious temperature variation is. With different heat storage materials around the buried pipe, the temperature variation trend at the same measuring point is basically same and the soil temperature rises every year after the heat taken process is completed. However, the difference in thermal conductivity causes the differences in temperature, heat storage and heat taken during the annual heat storage and heat taken process. The results can provide a theoretical reference for the design of the buried pipes of solar-coupled ground-source heat pump system.

Keywords: energy storage technology; buried pipe; different regenerators; numerical simulation; temperature field

现阶段,特别是在北方农村仍然有地区采用以燃煤为主的传统供暖方式。但是由于能源短缺形势的日益严峻,而人们对室内舒适度的要求日益增加,因此,各地区供暖方式正向节能减排方向转变^[1],利用地源热泵代替传统热源形式已经得到广泛认可。热泵作为一种利用少量高品位能源,把低品位热量提升成高品位热量的特殊设备而得到广泛应用^[2]。地源热泵也称为地热热泵,它是利用地源能(土壤、地下水、地表水、低温地热水等)实现供热、制冷及生活用热水供给的一种系统^[3],是节能减排的一种有效途径,也是国内地热能利用的新方向^[4]。

该设备在实际应用过程中存在一定问题,主要因为北方寒冷地区采暖期比较长^[5],每年冬季从地下提取的热量大于夏季回灌的热量^[6],即热量不均衡,长期使用会降低地下蓄热体温度,采暖效果较差^[7]。常规解决方法是采用辅助加热器加热,这在很大程度上限制了地源热泵系统节能环保优势的发挥^[8]。考虑到北方地区具有丰富的太阳能资源,可利用太阳能这一可再生的清洁能源在非采暖季向地下土壤补充热量^[9],既能解决地下温度场不平衡的问题,又可有效利用清洁能源,实现节能减排^[10]。

刘斯佳等^[11]利用有限长线热源模型,通过编程模拟计算得到埋管换热器运行 20 年后地下温度场的变化情况。主要研究冬夏季负荷不平衡时换热区域土壤温度的变化,并对诸如土壤导热系数、土壤体积比热、冬夏季负荷比等进行分析,得到当土壤导热系数或体积比热较大、冬夏季负荷比较小时,埋管换热器对抑制地下热/冷量累积效应可起到一定作用的结论。尹航^[12]利用 Gambit 和 Fluent 软件建立了埋管换热器传热的数学模型,针对实际工程的埋管几何结构参数和热响应试验参数,模拟了埋管换热器周围蓄热体的温度分布,得出实际运行时的换热量变化和运行周期内的运行效果,分析得出该系统合理的运行操作方法。程向明等^[13]比较了地源热泵系统地下换热器周围土壤温度场的主要影响因素,通过建立近边界与远端土壤传热模型,用数值计算结果和实测数据分析了地源热泵在连续运行 10 年期间不同工况对地下土壤温度场的影响,比较了系统在短期与长期连续运行时对土壤温度场影响的异同,得出了常年运行状况下土壤温度场的变化规律,对系统运行后期地下温度场的变化进行了预测。

笔者选定 3 种不同蓄热体,在距埋管中心不同距离处设置 5 个温度测点,应用数值模拟方法对每一种蓄热体情况进行为期 6 年的模拟计算,记录每一种情况下各测点温度场的变化情况,并进行比较,最终得出相应结论,为后期太阳能耦合地源热泵系统埋管工程中有关群置热屏方面的研究提供理论参考。

1 太阳能耦合地源热泵系统运行机理

1.1 太阳能耦合地源热泵系统组成

该系统充分利用太阳能,在春夏秋 3 个季节储存冬季建筑供暖需要的热量。主要包括集热器、蓄热及热用户 3 部分,如图 1 所示。

1.2 太阳能耦合地源热泵系统运行情况

1.2.1 非供暖季节运行情况

在非供暖季节,系统主要通过太阳能热水器收集太阳能加热罐中的热水以升高温度,达到一定温度后,通过埋管管道将热量转移到蓄热体中,以储存冬季供暖的热量。

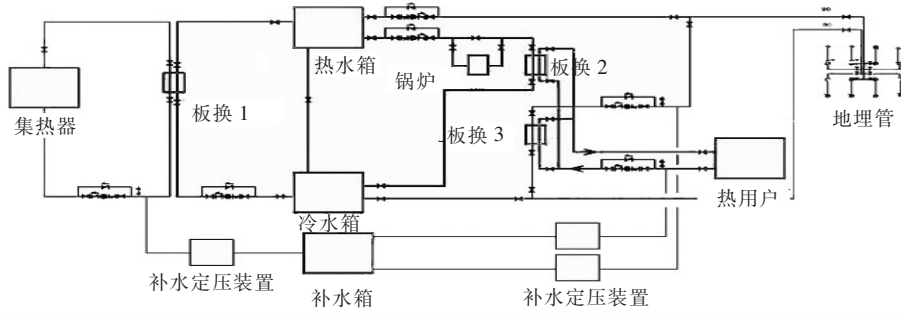


图1 太阳能耦合地源热泵系统流程图

Fig.1 Flow chart of solar coupled ground source heat pump system

1.2.2 供暖季节运行情况

白天太阳光照度较好时,太阳能热水器吸收的热量通过板式换热器1(简称板换1)加热水箱中的热水,加热后的热水直接通过板式换热器2(简称板换2)为用户供暖。在用户供暖需求较大时,存储在土壤中的热量可以通过板式换热器3(简称板换3)为用户供暖;白天光照度较差或者晚上无太阳光时,主要利用地埋管中储存的热量通过板式换热器3为用户供暖,不足的部分可用辅助热源通过板式换热器2为用户提供热量。

2 垂直U型管传热数学模型

2.1 初始条件

笔者采用线热源模型^[14],该模型可以将垂直地埋管看作一均匀的线热源,将钻孔外的蓄热体看作一个整体^[15]。假设该线热源沿深度方向单位长度的散热量为不变量,即具有固定的热流,可将管子周围的蓄热体看作是一个无限大的实体^[16],模型中无论哪一种蓄热体,地埋管建立情况一致,其中U型管管径为当量管径。具体建立时参数选择如表1所示。

表1 地埋管换热器模型尺寸

Tab.1 Model size of buried tube heat exchanger

U型管 间距/m	U型管 外径/mm	供回水管 间距/mm	U型管 深度/m	土壤 半径/m
3	32	100	20	10

具体模型及网格划分情况如图2所示。

笔者采取相同的模型,地埋管周围蓄热体分别选取黏土、砂层以及砾石,3种材质均可以作为蓄热体。不同材质的蓄热体物性参数如表2所示。

表2 不同蓄热体物性参数

Tab.2 Physical parameters of different regenerators

蓄热体	密度/(kg·m ⁻³)	比热容/(J·(kg·K) ⁻¹)	导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)
黏土(含水量15%)	1 925	1 298.70	1.5
砂层(含水量15%)	1 925	1 511.22	3.2
砾石	2 000	1 176.47	2.0
水	998.2	4 182.00	0.6

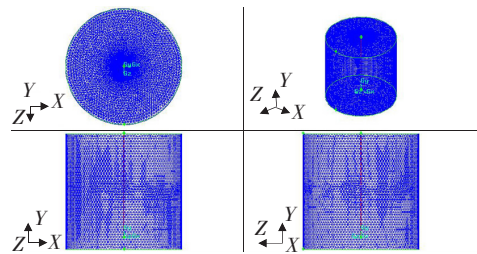


图2 模型及网格划分情况

Fig.2 Model and mesh generation

2.2 数学模型的建立

2.2.1 管内流体数学模型

数学模型的选择影响到计算结果的准确性,数值模拟中的数学模型选用的是标准的k-ε湍流模型。当模型用于解决湍流中的对流换热问题时,控制方程主要是k-ε方程和黏性系数方程^[17]。

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right] + \eta_t \frac{\partial u}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \epsilon, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial k}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{c_1 \epsilon}{k} \eta_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}. \quad (2)$$

2.2.2 三维导热偏微分方程

管壁中的传热是纯导热,土壤和回填材料是多孔介质,传热情况相对比较复杂,研究过程比较繁琐。传热耦合模型与纯导热模型相似,因此笔者视土壤和回填土为固体,其中的传热为纯导热。满足三维导热偏微分方程:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda_s}{\rho_s c_s} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

式中: ρ_s 为固体密度, kg/m^3 ; λ_s 为固体导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; c_s 为固体比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

2.2.3 线热源模型土壤中温度分布的确定

线热源模型土壤中温度分布方程如下:

$$\begin{cases} t(r, \tau) = t_0 + \frac{q_l}{4\pi\lambda} I\left(\frac{r^2}{4\alpha\tau}\right), \\ I(x) = \int_x^\infty \frac{e^{-s}}{s} ds, \end{cases} \quad (4)$$

式中: $t(r, \tau)$ 为土壤中任意一点的温度, $^\circ\text{C}$; t_0 为大地初始温度, $^\circ\text{C}$; q_l 为线热源提供的恒定热流, W/m ; λ 为土壤的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; α 为土壤的热扩散系数, m^2/s 。

2.2.4 地下温度场达到稳态温度所需时间的确定

非稳态传热的温度达到稳态温度的 0.98 倍时,即认为该处非稳态传热过程达到稳态,利用公式计算出系统达到稳态分布时所需要的时间,并模拟期间地下温度场的变化,以得到不同时刻不同蓄热体内部温度场分布状况,通过线性回归得到达到稳态所需时间的关系式^[18]:

$$F_0 = 3.8R + 0.29, \quad 0.001 \leq R \leq 0.75, \quad (5)$$

式中: $F_0 = \frac{\alpha\tau}{H^2}$, 为无量纲时间。其中 τ 为系统达到稳态所需时间, s ; H 为管长, m ; $R = \frac{r_0}{H}$, 为相对半径。其中 r_0 为管子半径, m 。

2.3 模拟过程

笔者研究了夏季和春秋过渡季节的蓄热过程以及冬季的取热过程,所有模型在储热时均利用太阳能加热蓄热水箱中的水,自动控制系统控制埋管入口水的温度为 90°C ,蓄热 5 880 h(245 d),蓄热过程中均加载 UDF 程序,便于对太阳光照的时间以及流体流速进行控制。考虑到早晚光照条件比较差等因素,设定每天有 6 h 充足光照时间,即每天保持 6 h 埋管与周围蓄热体换热,其余 18 h 为周围蓄热体内部传热的工况,蓄热过程中应控制光照时间和埋管入口水的流速。

在冬季,需向建筑物供热 2 928 h(122 d),通常采用 2 种方式,在光照条件比较好的情况下(每天 6 h),集热器直接吸收太阳能加热水箱中的热水,满足建筑物的供暖需求,其余 18 h 为取热时间,需要通过周围蓄热体中储存的热量为建筑物提供热量,供暖结束后的冷水与周围蓄热体进行热量交换,循环管中冷水被加热后为建筑物供暖,同样加载 UDF 程序对系统进行控制,如此循环。

计算过程中设定周围蓄热体初始温度为地下常温层温度 288.15 K,蓄热过程及取热过程中流体流速控制为 0.5 m/s,且取热时回水温度为 308 K。

3 模拟结果分析

在建立换热的物理模型时,给出如下假设:假设回填材料及周围蓄热体均匀分布,且热物性相同^[18-19];忽略埋管与回填材料、回填材料与周围蓄热体之间的接触热阻,且认为回填材料和周围蓄热体内部的导热为纯导热^[20];忽略因埋管换热器与周围蓄热体由于进行热交换而引起的周围蓄热体中水分的迁移现象^[21];地下水流动造成的换热影响忽略不计^[22];地表温度波动以及埋管周围蓄热体温度产生的影响忽略不计^[23],且认为周围蓄热体初始温度为年平均温度等,最终对得出的数据进行分析。

3.1 不同材质对温度的影响

模拟过程中在埋管周围设置不同的测点,通过比较过程中产生的数据对温度场进行分析,测点距埋管中心距离分别为 0.2,0.7,1.2,1.5 和 3.0 m。

3.1.1 材质为黏土时各测点温度变化情况

蓄热体为黏土时系统运行第 1 年和第 6 年的温度变化曲线如图 3 所示。在相同的时间内不同测点温度变化情况不同,但是每年的变化趋势基本一致,且在系统每年蓄热过程中,距埋管间距越近,温度变化越明显,而越远的位置变化越不明显,同样取热过程中仍然是距埋管较近的测点温度变化较明显,并且在第 1 年蓄热结束时距埋管中心为 3 m 的测点最高温度为 298 K,而第 6 年蓄热过程中该测点最高温度可达 303 K,其他距离的测点也是同样的变化趋势。说明由于蓄热体热量的累积,系统运行过程中土壤温度在逐年升高。同理,对比 6 年取热结束后各测点温度变化也得出同样的结论。从每一年蓄热到取热的过渡过程中,距埋管中心较近的位置温度迅速下降,而较远的位置则存在时间延迟,并且距离不同所需的延迟时间不同,距离越远延迟时间越长,并且在延迟的这段时间内,该处仍然是持续蓄热状态。

3.1.2 材质为砾石时各测点温度变化情况

蓄热体为砾石时系统运行 6 年的温度变化曲线如图 4 所示。变化趋势与蓄热材质为黏土时基本一致,但所能达到的最高温度不同,由图 4 可知距离埋管中心间距为 3 m 时,第 1 年蓄热过程结束所能达到的最高温度为 299 K,而第 6 年蓄热过程中该测点最高温度可达 305 K,其他距离的测点温度变化量也有所改变。黏土和砾石的主要区别在于砾石的导热系数更大,不同的导热系数对传热过程有极其重要的影响,导致砾石的蓄热最高温度更高。

3.1.3 材质为砂层时各测点温度变化情况

蓄热体为砂层时系统运行 6 年的温度变化曲线如图 5 所示。蓄热体为砂层时温度变化趋势与蓄热材质为另外 2 种时基本一致,并且砂层传热系数最大,对土壤蓄热有较好的促进作用,与前 2 种材质进行对比发现较大的不同发生在较远的测点,距离埋管中心为 3 m 的测点在第 1 年蓄热过程中能达到的最高温度为 300 K,在第 6 年蓄热过程中能达到的最高温度为 308 K,而蓄热材料为黏土时,该测点第 1 年最高温度为 298 K,第 6 年为 304 K;当蓄热材料为砾石时,该测点第 1 年最高温度为 299 K,第 6 年为 307 K。由此可以看出,蓄热体传热系数越大,蓄热结束蓄热体能达到的温度越高。

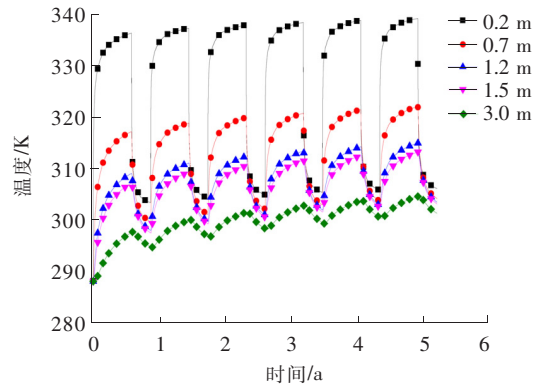


图 3 蓄热体为黏土时各测点 6 年的温度变化情况

Fig. 3 Six-years temperature change at each measurement point when the heat retainer consists of clay

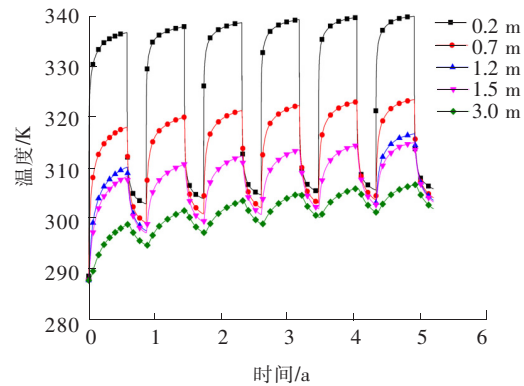


图 4 蓄热体为砾石时各测点 6 年的温度变化情况

Fig. 4 Six-years temperature change at each measurement point when the heat retainer consists of gravels

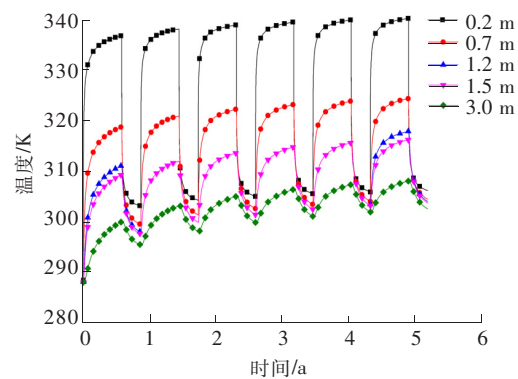


图 5 蓄热体为砂层时各测点 6 年的温度变化情况

Fig. 5 Six-years temperature change at each measurement point when the heat retainer consists of sand

3.2 每年取热完成后周围蓄热体温度变化情况

图 6 和图 7 给出了相同蓄热体在距地理管不同距离时测点的温度变化情况。

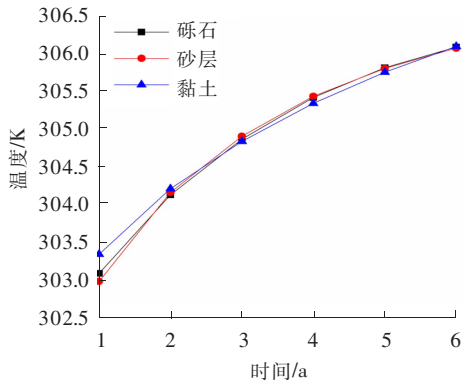


图 6 测点距埋管距离为 0.2 m

Fig.6 Distance from measuring point to buried pipe is 0.2 m

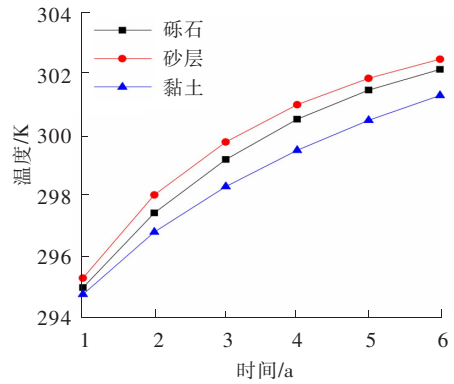


图 7 测点距埋管距离为 3.0 m

Fig.7 Distance from measuring point to buried pipe is 3.0 m

从图 6 和图 7 中可以看出:当测点距离埋管间距为 0.2 m 时,取热完成以后测点温度逐年升高,由于存在热量的累积,在第 1 年时导热系数小的黏土温度较高,后续 5 年 3 种材质取热结束后蓄热体温度基本相同。当测点距埋管间距为 3.0 m 时,随着土壤距埋管变远,导热系数的不同引起的温度差异更加明显。导热系数越大,每年取热完成以后蓄热体温度越高,导热系数越小,每年取热完成以后蓄热体温度越低。这主要是由于存在就近取热的问题,距埋管中心较远距离的蓄热体对系统取热贡献不大,并且在系统取热开始时该位置仍在蓄热状态,更远距离的土壤可作为整个系统正常运行的隔热层,所以防止隔热层的热量向外扩散也是该领域研究的重点。

3.3 热量与蓄热量的比较

取距管中心 3 m 测点为研究对象,图 8 和图 9 描述了 3 种不同蓄热材料每年取热量和蓄热量随时间的变化关系。可以看出,3 种蓄热材料变化趋势基本一致,且每年取热量逐渐增加,蓄热量逐渐降低。由于 3 种蓄热材料的导热系数不同导致蓄热量以及取热量的不同,且导热系数越大,每年的取热量越大,同时蓄热量也较大。图 10 描述了每年取热量和蓄热量比值随时间的变化情况。从图 10 可以看出,随着系统运行时间的延长,系统的取热蓄热比越来越大,即系统越来越稳定,效率越来越高,且蓄热材料导热系数越大的,对应系统的取热蓄热比越高,越有利于系统的稳定运行。

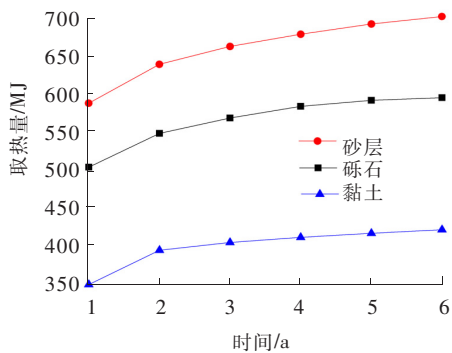


图 8 取热量随时间变化情况

Fig.8 Heat taken change every year

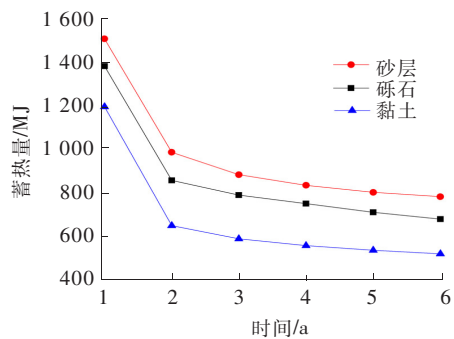


图 9 蓄热量随时间变化情况

Fig.9 Heat storage change every year

4 结 论

笔者选定3种不同的蓄热体,通过模拟不同材料蓄热体对埋管周围温度场的影响,得出不同导热系数蓄热体对温度场的影响,结果可为太阳能耦合地源热泵系统埋管的工程设计提供参考。所得结论如下。

1)埋管周围蓄热材料相同时,无论是蓄热还是取热过程,距埋管越近的测点温度变化越明显,越远的测点温度变化越不明显。

2)埋管周围蓄热材料相同时,在每年蓄热到取热的过渡过程中,距埋管较近的测点温度迅速降低,而较远的测点温度变化存在时间延迟,且距离越远延迟时间越长,从系统开始取热到该测点延迟的时间内,该处仍然保持蓄热状态。

3)距埋管较近的测点,即使蓄热体导热系数不同,温度变化也基本一致,距埋管较远的测点,因导热系数不同引起的温度差异就越大,且导热系数越大,每年取热完成以后,蓄热体温度越高,导热系数越小,每年取热完成以后蓄热体温度越低。

4)由于热量的累积,取热完成后,埋管周围的蓄热材料温度逐年升高,并且回填材料的材质和密实程度对整个埋管换热有着极其重要的影响。

5)取热量逐年增加,蓄热量逐年下降。蓄热材料的导热系数越大,每年的取热量和蓄热量越大,系统的取热蓄热比也越高,越有利于系统的稳定运行。

本研究所取蓄热材料的导热系数是参考河北省石家庄市土壤材质进行的,研究结果存在一定的局限性,在后期研究中可以对不同地区、不同蓄热体进行研究。

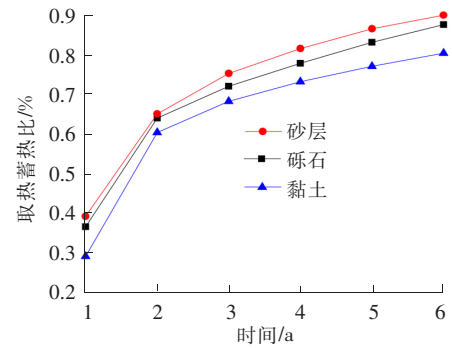


图 10 取热蓄热比随时间的变化情况

Fig.10 Ratio of heat taken to heat storage

参考文献/References:

- [1] 宋传志.试论节能减排技术在城市集中供热系统运行中的应用[J].中国高新区,2018(14):20.
- [2] YAN Xiaona, SHI Yuqi, GAO Neng, et al. Experimental investigation on a novel triple heat sources-driven absorption heat pump system [J]. Energy and Buildings, 2019,198(1):28-37.
- [3] LUO Jin, LUO Zequan, XIE Jihai, et al. Investigation of shallow geothermal potentials for different types of ground source heat pump systems (GSHP) of Wuhan city in China[J]. Renewable Energy, 2018, 118: 230-244.
- [4] 中华人民共和国建设部.建设部关于发展节能省地型住宅和公共建筑的指导意见[J].城市规划通讯,2005(12):1-3.
- [5] 韩利鹏. 二水草酸相变储能材料的耐受性研究[D].北京:中国科学院大学,2017.
HAN Lipeng. Investigation of the Durability of Oxalic Acid Dihydrate Phase Change Material[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences,2017.
- [6] ZHANG Wenke, ZHANG Linhua, CUI Ping, et al. The influence of groundwater seepage on the performance of ground source heat pump system with energy pile[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 162: 114217.
- [7] GUO Min, DIAO Nairen, MAN Yi, et al. Research and development of the hybrid ground-coupled heat pump technology in China[J]. Renewable Energy, 2016, 87(3): 1033-1044.
- [8] LIU Wenbo, XU Minghai. Research progress of pile heat exchangers in ground source heat pump system[J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 3775-3781.
- [9] THOMAS D G, BABU C S, GOPI S. Performance analysis of a latent heat thermal energy storage system for solar energy applications [J]. Procedia Technology, 2016, 24: 469-476.
- [10] 吴元友.新时代农村新能源建设及其节能减排意义[J].农村经济与科技,2017,28(24):14.
- [11] 刘斯佳,杨晓宇,张山.竖直埋管地源热泵地下温度场分析[J].区域供热,2019(2):138-141.
- [12] 尹航. 地源热泵系统土壤温度场模拟研究及案例[D].天津:天津大学,2018.
YIN Hang. Simulation on Soil Temperature Field and Practical Engineering Case Study of Ground Source Heat Pump System[D]. Tianjin: Tianjin University,2018.
- [13] 程向明,张玉瑾.地源热泵多年运行工况对土壤温度场的影响[J].苏州科技学院学报(自然科学版),2016,33(3):71-75.
CHENG Xiangming, ZHANG Yujin. Effect of a decade running ground source heat pump on soil temperature field[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology(Natural Science), 2016,33(3):71-75.
- [14] 孔祥日. 基于实验与CFD数值模拟的土壤源热泵埋管换热器换热效能优化研究[D].苏州:苏州大学,2017.

- KONG Xiangri. Experimental and Numerical Study on Thermal Performance of Heat Exchanger for Ground Source Heat Pump System [D]. Suzhou: Soochow University, 2017.
- [15] 张兵兵, 刘桂义, 魏建平, 等. 空气-土壤源双热源复合热泵性能分析[J]. 建筑热能通风空调, 2018, 37(7): 11-14.
ZHANG Bingbing, LIU Guiyi, WEI Jianping, et al. Performance analysis of air-ground source dual heat source compound heat pump[J]. Building Energy and Environment, 2018, 37(7): 11-14.
- [16] 程金明, 刘阳. 地下水流动对垂直埋管换热器土壤温度场分布的影响[J]. 太阳能学报, 2017, 38(10): 2798-2803.
CHENG Jinming, LIU Yang. Effect of groundwater flow on soil temperature field distribution around vertical buried pipe heat exchanger [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017, 38(10): 2798-2803.
- [17] GUSTAVSSON K, JUCHA J, NASO A, et al. Statistical model for the orientation of nonspherical particles settling in turbulence[J]. Physical Review Letters, 2017, 119(25): 254501.
- [18] 席加. 地源热泵长期运行能效及埋管上部地表换热特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
XI Jia. Research on the Long Term Operation of Ground Source Heat Pump and the Heat Transfer Characteristics on the Upper Surface [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [19] ELSHKAKI A, RECK B K, GRAEDEL T E. Anthropogenic nickel supply, demand, and associated energy and water use[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 125: 300-307.
- [20] 王佳. 机床固定结合面接触热阻的研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
WANG Jia. Research on Thermal Resistance of Machine Tools Fixed Interface[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [21] LIU Pengfei, HU Yongguang, JIANG Feng, et al. Influence of sloping tea fields on soil moisture migration[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(17): 565-569.
- [22] 朱勃森, 张杰. 地下水渗流对双 U 型埋管换热器的模拟研究[J]. 科技创新与应用, 2018(17): 47-48.
- [23] 于洋, 王岳人. 埋管换热器布置形式对土壤平均温度的影响[J]. 节能, 2016(7): 45-48.
YU Yang, WANG Yueren. The underground heat exchangers arrangement effect on the average temperature of the soil[J]. Energy Conservation, 2016(7): 45-48.

向本期载文的审稿专家致谢

本期《河北科技大学学报》共发表论文 13 篇。这些论文的发表是与有关专家的认真审读、细查资料、推敲分析、中肯评价分不开的。对此, 本编辑部特向这些专家表示敬意, 对他们的辛勤劳动表示感谢。本期载文的审稿专家名单如下(按姓名的汉语拼音顺序排列):

崔海亭 高月芬 郭 斌 郭瑞强 贺尔铭 金泰松 李大宇
李联友 李舒宏 李天平 李新福 刘 涛 娄嘉兴 陆春月
马红铝 秦旭达 曲大义 石 磊 史永堂 孙世宇 唐秋华
王华强 王 庆 徐凤霞 袁 涛 张宝华 张新光 张永才
赵晓朋 赵延治 郑宏宇

(本刊编辑部)