

文章编号: 1671-6612 (2020) 04-399-07

跨季节土壤蓄热太阳能数值模拟研究

郭占全 苑中显 张琦

(北京工业大学环境与能源工程学院 北京 100124)

【摘要】 为减少太阳能利用所受的季节性限制,以太阳能跨季节蓄热为背景,土壤为蓄热介质,利用 ANSYS 软件对水平埋管与土壤的非稳态换热过程进行三维数值模拟。在流速、管径、土壤初始温度以及运行时间等条件相同的情况下,分别讨论埋管深度、管内流体温度、土壤热物性参数以及埋管间距对土壤蓄热效果的影响。结果表明:对于埋深为 1.5m、2.0m、2.5m 这三种工况,埋深 2.5m 的土壤蓄热量最大,埋深 1.5m 的蓄热量最小。对于流体温度为 60°C、70°C、80°C 这三种工况,温度为 80°C 的土壤蓄热量最大,60°C 的蓄热量最小。对于沙土、粘土、褐土和花岗岩这四种土壤,褐土是最有利于蓄热的,沙土是最不利的。对于埋管间距为 2.8m、3.2m、3.6m、4m 这四种工况,土壤蓄热量随埋管间距的增大而增大,管间距为 4m 的土壤蓄热量最大,2.8m 的蓄热量最小。

【关键词】 太阳能;水平埋管;数值模拟;土壤蓄热

中图分类号 TK02 文献标识码 A

Numerical Simulation of Solar Energy Storage in Trans-seasonal Soils

Guo Zhanquan Yuan Zhongxian Zhang Qi

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing, 100124)

【Abstract】 In order to reduce the seasonal limitation of solar energy utilization, this paper takes solar energy as a background of seasonal heat storage, and the soil is a heat storage medium. The ANSYS software is used to simulate the unsteady heat exchange process of horizontal buried pipe and soil. Under the conditions of the same flow rate, pipe diameter, initial soil temperature and running time, the effects of buried pipe depth, pipe fluid temperature, soil thermal property parameters and buried pipe spacing on soil heat storage were discussed. The results show that for the three working conditions of buried depth of 1.5m, 2.0m and 2.5m, the soil with a buried depth of 2.5m has the largest heat storage capacity and the minimum buried heat of 1.5m. For the three working conditions of fluid temperature of 60°C, 70°C, and 80°C, the temperature of the soil at 80°C is the largest, and the heat storage at 60°C is the smallest. For the four soils of sand, clay, cinnamon and granite, cinnamon is the most favorable for heat storage, and sand is the most unfavorable. For the four working conditions of buried pipe spacing of 2.8m, 3.2m, 3.6m and 4m, the soil heat storage increases with the increase of the buried pipe spacing. When the pipe spacing is 4m, the soil heat storage is the largest while 2.8m is the smallest.

【Keywords】 Solar energy; horizontal buried pipe; numerical simulation; soil heat storage

基金项目: 国家“973”项目 (NO.2015CB251303)

作者简介: 郭占全 (1993.10-), 男, 硕士, E-mail: 835884151@qq.com.

通讯作者: 苑中显 (1962.11-), 男, 博士, 教授, E-mail: zxyuan@bjut.edu.cn

收稿日期: 2019-11-06

0 引言

随着能源危机的出现,人们对新型能源的需要

更加迫切,太阳能作为一种新型能源受到越来越多的关注,有关太阳能的研究利用范围也在日益扩大。1956年,美国伊利诺伊大学的 Penrod 等人首次提出使用太阳能集热器与地埋管换热器协同运行的想法^[1],并提出了太阳能集热器和地埋管换热器的设计方法,此后,各国的学者相继开始了对太阳能跨季节蓄热系统的研究。太阳能跨季节蓄热系统能有效克服太阳能利用易受时间、气候等影响的缺点,可以将太阳资源丰富季节的热量储存到太阳资源不足的季节使用。我国太阳能资源丰富,年平均日照时数在 2200h 以上,辐射值为 1500 ~ 2300kWh/m²,气象条件适合太阳能的推广^[2]。将太阳能作为冬季供暖热源有其独特优点。对于这种系统应采用何种蓄热方式以及如何提高蓄热效率成为目前研究的一个重点。

对于土壤地埋管蓄热而言,由于其成本低,就地利用土壤,适用范围广泛,可大规模适用等优点,通常被人们大量采用。但是,国内外关于垂直地埋管蓄热的研究较多,而对于水平地埋管的研究相对较少。水平地埋管蓄热的研究主要集中在以下几个方面:水平地埋管与土壤耦合换热的传热模型,管内流体的温度,水平地埋管的铺设形式,水平地埋管的埋深,土壤的热物性参数以及回填材料的分析等对蓄热的影响。

本文建立了地下埋管换热器与周围土壤的计算流体力学数值模型。通过数值模拟分析地埋管的埋深、管内流体温度、土壤的热物性参数以及地埋管间距对地埋管周围土壤温度分布的影响,其次,由土壤温度的变化进一步得到土壤蓄热量的大小,最后讨论以上因素对太阳能跨季节土壤蓄热效果的影响。

1 物理模型的建立

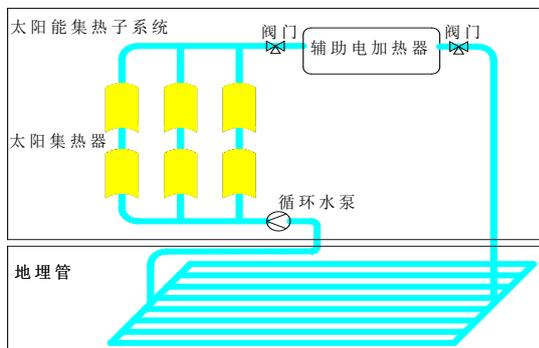


图 1 太阳能蓄热系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of solar energy heat storage system

图 1 为太阳能蓄热系统的示意图。在太阳光的照射下,低温水被太阳能集热器加热后成为高温水。由于高温水的温度远高于土壤的温度,因此高温水在水平埋管内流动与土壤进行换热,土壤的温度不断升高,从而太阳热能被蓄集在地下土壤。

2 水平地埋管与土壤耦合换热的数学模型

地埋管与土壤之间的换热是一个非稳态的过程,其传热过程复杂且影响因素众多。这些影响因素包括管内水的流动速度、材料的物性参数、土壤的热物性参数、回填密实度以及地下水迁移等问题。下面首先讨论单根地埋管工况。图 2 为单根地埋管的数值分析模型。

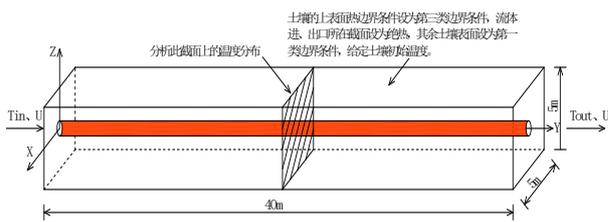


图 2 水平地埋管蓄热体模型图

Fig.2 Model diagram of horizontal buried pipe heat accumulator

为了便于计算分析,本文做以下简化^[3,4]:

- (1) 土壤为各项同性、均质的刚性含湿多孔介质体,在整个过程中土壤的热物性参数保持不变
- (2) 不考虑直管管壁与回填材料、回填材料与土壤之间的接触热阻;
- (3) 忽略土壤的热湿迁移耦合作用的影响;
- (4) 管内流体为不可压缩流体;

在上述简化条件下的控制方程如下:

连续性方程:

$$\text{div}(\rho \vec{U}) = 0 \tag{1}$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m³; \vec{U} 为流体的速度矢量,在三维直角坐标系中的分量分别为 u 、 v 、 w , m/s。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{U}) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{U}) = \text{div}(\mu \mathbf{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{U}) = \text{div}(\mu \mathbf{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

式中: μ 为流体的动力粘度, Pa·s; p 为流体

微元体上的压力, Pa。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U} T) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \mathbf{grad} T\right) \quad (5)$$

式中: T 为流体的温度, K; λ 为流体的导热系数, W/(m·K); c_p 为流体的定压比热容, J/(kg·K)。

对于管内的湍流流动, 本文采用工程中使用最为广泛的两方程模型中的 $k-\varepsilon$ 模型。 k 为单位质量流量湍流脉动动能, ε 为单位质量流量流体脉动动能的耗散率。计算区域的各边界条件已标注在图2中。其中上表面与大气之间的第三类边界条件, 将在后面第3.3小节中单独讨论。

3 数值求解方法

3.1 网格划分

本文以北京地区土壤为模拟对象, 通过查阅文献得到当地土壤的热导率、密度、比定压热容、热扩散率以及不同深度土壤的大致温度。表1为北京地区部分土壤及室外空气主要物性表。

表1 各土壤及空气的物性参数

Table 1 Physical parameters of soil and air

材料	密度 ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	定压比热 C_p ($\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$)	导热系数 λ ($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)	热扩散率 a ($10^{-5}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
褐土	2120	1975	2.44	0.0583
沙土	1500	700	1.9	0.181
粘土	1285	1200	0.8	0.0519
花岗岩	2640	811	3	0.140
室外空气	1.185	1005	0.023	1.93

模型中整个蓄热体由土壤和埋管两部分构成其网格划分, 见图3, 全部采用结构性网格划分。由于埋管尺寸相对于周围土壤蓄热体的尺寸小很多, 为平稳过渡, 需要在两者交界处进行网格加密处理。远离埋管的土壤受流体加热的影响较小, 那里的网格划分相对稀疏。

此外, 有研究表明, 水平埋管换热器的管长

存在最大长度^[5], 一旦超过该长度极限, 长度的再增加对蓄热性能的改善作用将变小。一般情况下, 埋管长度大约在100m范围内。本文取管长为40m, 采用PE管, 管直径为40mm, 壁厚3mm。

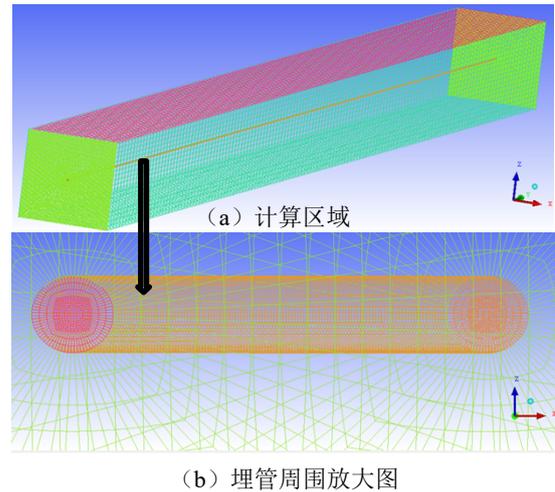


图3 蓄热体三维网格图及局部放大图

Fig.3 3d grid diagram of regenerator and partial enlarged view

3.2 求解方法

据 $Re = ud/\nu$ 的定义, 对于圆管内流体的流动, 当 Re 数大于10000后为旺盛湍流, 而 Re 数在2300~10000的范围为过渡期。在进行土壤蓄热时管内流体的流速不宜过大, 流速过大时, 流体在流动过程中不能充分换热, 土壤中的蓄热量受到限制的同时还会大幅增加循环水泵的能耗。

本文设置流体的流速为0.3m/s, 通过计算流体的 Re 数约为47000, 远远大于2300。采用ANSYS FLUENT进行求解, 管内传热介质的流动模型选择 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 采用非稳态计算方式, 动量方程与能量方程耦合求解。

3.3 计算条件

北京市供暖时间为11月15日至3月15日, 运行时间为整个非供暖季, 即3月16号到11月15号。选择3月16日0点时刻作为计算初始时间, 土壤初始温度^[6]按照下式计算:

$$T(y) = 12.9e^{-0.3D} \cos(0.3y - 4.13) + 287 \quad (6)$$

式中: D 为土壤深度, m; T 为土壤初始温度, K。

由于地表面长时间暴露在随时间不断变化的环境条件下, 地表面与大气之间的对流换热过程受

到室外温度、相对湿度、风速、风向以及太阳辐射等各种因素的影响，是一个复杂的动态过程。综合上述因素，张文武^[7]等在研究风速对土壤温度分布影响时，指出土壤表面的对流换热系数 h 与风速变化 V 之间的统计关系可以用下式表述。

$$h = 7.4875V + 5.8404 \quad (7)$$

其中， h 的单位为 $W/m^2 \cdot K$ ， V 为当地测点表面的风速， m/s 。

本文取北京地区地表年均风速为 $2.3m/s$ ^[8]，经过式 (7) 计算，得到地表与大气年平均对流换热系数 $h=20.9W/m^2 \cdot K$ 。

此外，为了使数值模拟的结果更接近实际，本文考虑了北京地区气温的年变化以及太阳日照时长的年变化对土壤蓄热效果的影响。利用 FLUENT 处理流动或传热问题时，模型的速度和温度等边界条件是不随时间变化的，难以实现动态模拟。而本文中埋管的进口流速是动态变化的，白天有太阳光照时，管内流体速度为 $0.3m/s$ ，对土壤进行流动蓄热。夜间无太阳光照时，管内流体速度为 0 ，不对土壤进行蓄热。此外，地表的气温一年四季内也是动态变化的。因此，需要借助 FLUENT 扩展功能中的用户自定义函数 (User Defined Function) 来解决。UDF 是用户使用 C 语言编写的扩展 FLUENT 程序代码，可加载到 FLUENT 求解器中，实现边界条件、物性参数和源项等条件的动态输入。

北京地区气温的年变化用余弦函数表示：

$$T(\tau) = 285 + 15 \cos[0.0172(\tau - 195)] \quad (8)$$

式中： τ 为时间，即距 1 月 1 日的天数。

北京地区的一天中的昼长可用下式表示：

$$T_d = \left(\frac{2}{15}\right) \arccos[-\tan \varphi \tan \delta] \quad (9)$$

式中： φ 为当地地理纬度； δ 为太阳赤纬。

其中太阳赤纬可由 Cooper 方程近似的进行计算：

$$\delta = 23.45 \sin\left(2\pi \times \frac{284 + \tau}{365}\right) \quad (10)$$

式中： τ 为时间，即距 1 月 1 日的天数。

计算机在进行模拟计算时得到的流体入口处平均速度随时间的变化如图 4。速度随时间呈现出周期性变化。

本文采用的数值算法是基于原始变量的 SIMPLE 方法，压力项采用 Second Order 方案离散，

动量方程和能量方程采用二阶迎风格式进行离散^[9]。土壤与埋管内水体采取耦合换热方式，避免了将壁面设置为恒壁温或恒热流边界条件的问题。

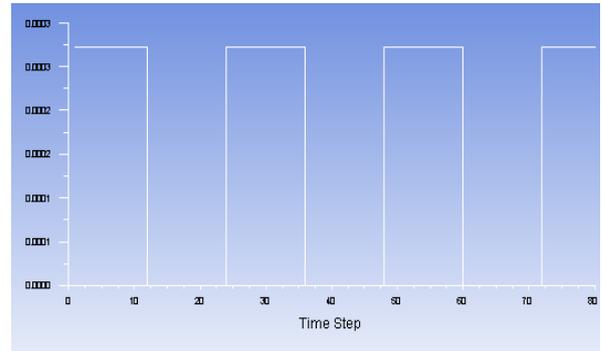


图 4 模拟计算时流体入口平均速度的变化

Fig.4 Change in average velocity of fluid inlet during simulation calculation

4 模拟结果及分析

4.1 不同埋管深度对土壤蓄热效果的影响

在工程实践中，水平埋管换热器的埋设深度 D 一般取 $1.5 \sim 3.0m$ ，处于大气影响范围内^[10]，但无论任何情况均应埋设在当地冻土层以下。北京地区的最大冻土深度为 $0.85m$ ^[11]。为了研究埋管深度对土壤蓄热效果的影响，本算例取流体的入口温度为 $353K$ ，土壤为褐土，对埋管深度为 $1.5m$ 、 $2.0m$ 、 $2.5m$ 这三种设计工况的单根埋管土壤蓄热系统进行模拟计算。系统蓄热结束时，分析上述图 2 中部所示截面的土壤温度场，绘制不同埋深下褐土土壤的温度在水平方向 (x) 的分布情况，如图 5 所示。

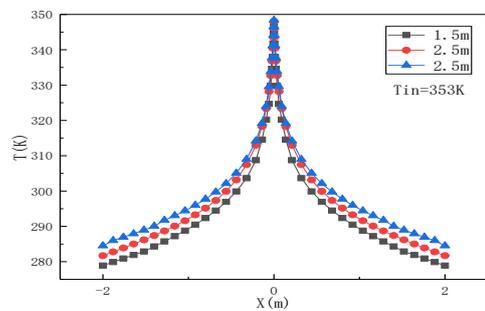


图 5 不同埋深下土壤在管长中段处 x 方向上的温度变化 ($y=20m$)

Fig.5 Temperature change of soil in the x -direction at the middle of the tube length under different buried depths

由图中埋管周围土壤的温度变化情况可以

看出: 不同埋深下土壤的温度存在差距, 分别对埋深为 1.5m、2.0m、2.5m 工况时管长中段处截面的土壤温度场用下式进行积分。

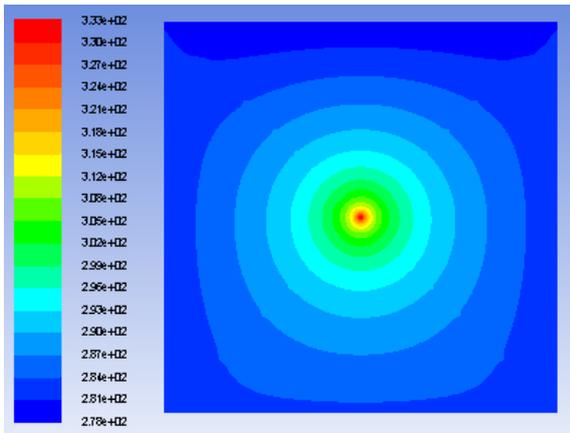
$$Q = \iint_{\Omega} 40(T_{x,z} - T) \rho C_p dx dz \quad (11)$$

式中: Q 为蓄热结束时土壤的蓄热量; $T_{x,z}$ 为截面处某点蓄热结束后的土壤温度; T 为截面处对应点的初始土壤温度; ρ 、 C_p 分别为土壤蓄热体的密度、定压比热。

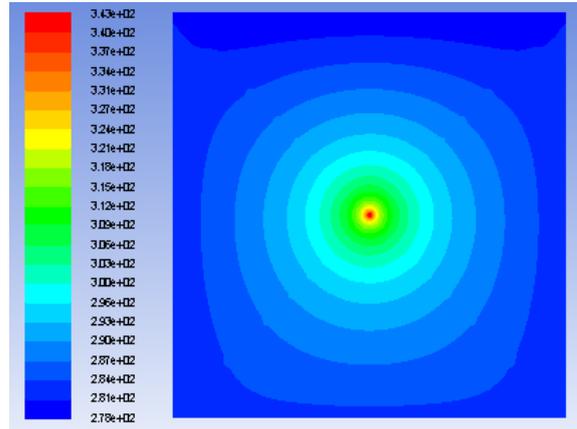
求得埋管深度为 1.5m、2.0m、2.5m 时土壤蓄热量分别为 14.28GJ、19.07GJ、22.59GJ。可以发现, 随着埋深增加, 土壤蓄热量逐渐增大, 蓄热效果越来越好。但随着埋管深度的增加, 施工和材料成本也会大幅增加。

4.2 不同管内流体温度对土壤蓄热效果的影响

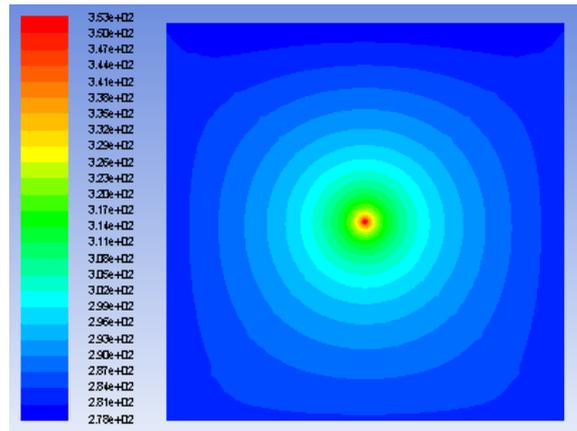
下面算例选取埋管深度 $D=2m$ 。通过改变流体的进口温度 T_{in} , 对地理埋深为 2m 的褐土土壤蓄热体的蓄热效果进行研究。当系统运行整个非供暖季结束时, 不同管内流体温度对应的管长中段处截面土壤的温度分布云图如下, \bar{T}_s 为截面土壤的平均温度。



(a) $T_{in}=333k$ ($\bar{T}_s=286K$)



(b) $T_{in}=343k$ ($\bar{T}_s=286.9K$)



(c) $T_{in}=353k$ ($\bar{T}_s=288K$)

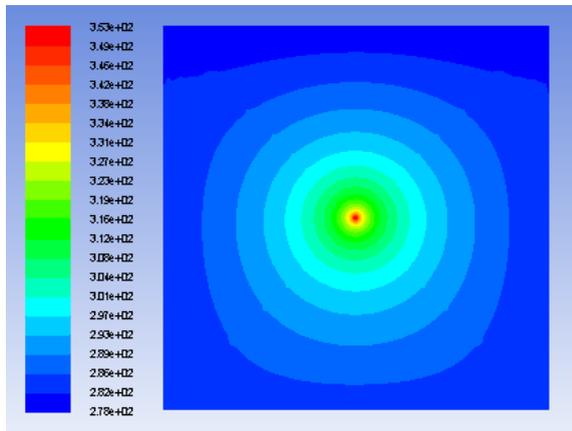
图 6 不同流体温度对应的截面处土壤温度分布云图

Fig.6 Soil temperature distribution cloud map at the cross section corresponding to different fluid temperatures

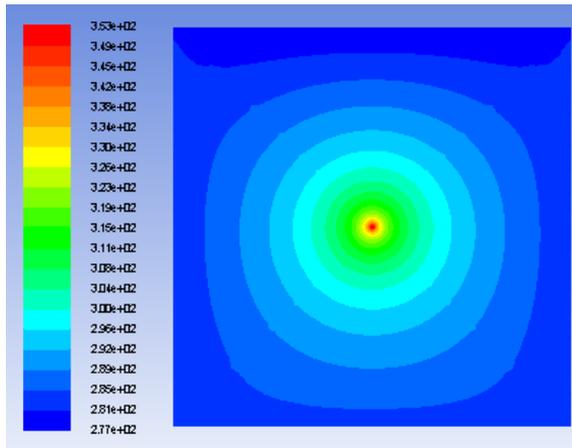
分别对上述三个截面的土壤温度场用公式(11)进行积分求解, 得到流体进口温度为 333K、343K 和 353K 时单根埋管的土壤蓄热量分别为 13.77GJ、16.08GJ、19.07GJ。从以上数据可以发现, 不同管内流体温度对太阳能跨季节土壤蓄热效果存在影响, 随着流体温度的升高, 换热温差增大, 流体的热流密度增大。到蓄热结束时, 土壤的蓄热量也逐渐增大, 土壤蓄热效果越来越好。

4.3 不同土壤的蓄热效果

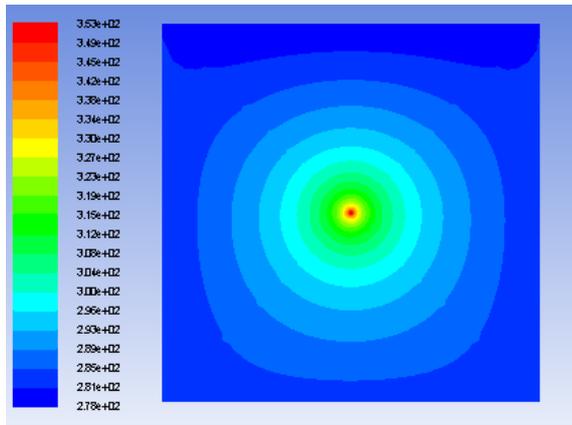
通过改变土壤的种类, 对地理埋深 $D=2m$, 流体进口温度为 353K 的土壤蓄热体的蓄热效果进行研究, 当系统运行整个非供暖季结束时, 得到管长中段处截面土壤的温度分布云图, 如图 7 所示。



(a) 花岗岩 ($\bar{T}_s = 287.4\text{K}$)



(b) 粘土 ($\bar{T}_s = 287.9\text{K}$)



(c) 沙土 ($\bar{T}_s = 287.5\text{K}$)

图7 不同土壤种类对应的截面处土壤温度分布云图
($D=2\text{m}$)

Fig.7 Soil temperature distribution cloud map at the cross section corresponding to different soil types

分别对上述三个管长中段处截面的土壤温度场用公式(11)进行积分求解。得到土壤类型分别

为沙土、粘土和花岗岩时单根埋管的土壤蓄热体的蓄热量分别为4.41GJ、6.97GJ、8.92GJ。虽然从图7看不出三种蓄热体温度上有多大差别,但是由于花岗岩的密度大大高于其他土壤(见表1),导致在相同蓄热期之后,其蓄热量也明显高于其他土壤。即使如此,与褐色土壤相比,其蓄热能力还是大为逊色。连同上述计算的褐色土壤,四种土壤蓄热量的对比图如图8所示。

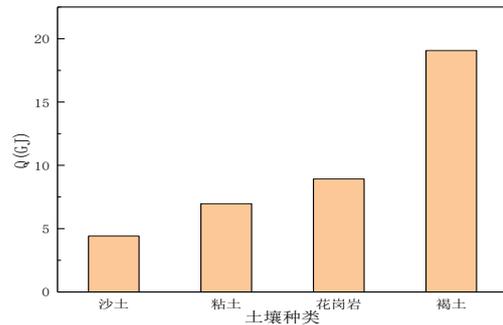


图8 不同土壤种类的土壤蓄热量

Fig.8 Soil heat storage of different soil types

由上述数据可知土壤类型对埋管换热性能及土壤温度变化有显著影响,导温系数高有利于土壤中热量的扩散,比热容高有利于降低土壤温度上升速率和幅度,密度高有利于土壤蓄热,褐色土是上述四种土壤中最有利于蓄热的土壤,而沙土是最不利的。

4.4 双埋管间距对土壤蓄热效果的影响

为了研究双埋管的太阳能蓄热效果,本文建立了双根水平埋管土壤蓄热体的数值模型,分别设置埋管间距为2.8m、3.2m、3.6m、4.0m四种情况,至蓄热结束时得到如下土壤温度分布云图。

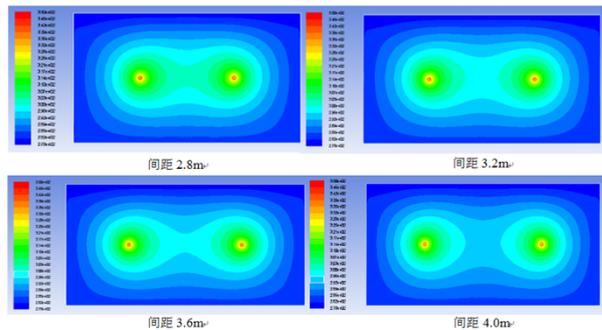


图9 不同埋管间距对应的土壤温度分布云图

Fig.9 Soil temperature distribution cloud map corresponding to different buried pipe spacing

同样对上述四个土壤温度场用公式(11)进行

积分。得到埋管间距分别为 2.8m、3.2m、3.6m、4.0m 时双根埋管的土壤蓄热体的蓄热量分别为 48.16GJ、50.06GJ、51.66GJ、52.20GJ, 如图 10 所示。

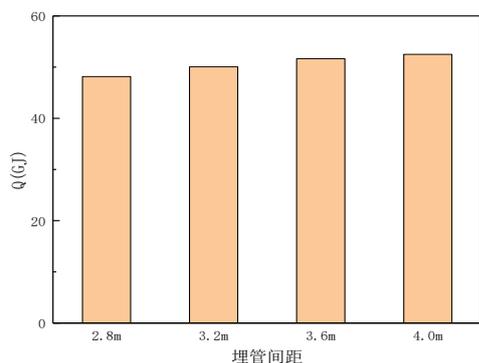


图 10 不同埋管间距的土壤蓄热量

Fig.10 Soil heat storage at different buried pipe spacings

以上数据可以充分证明埋管间距对土壤的蓄热量存在影响, 随着埋管间距的减小, 土壤埋管换热器的附加温变热阻增大, 温度场之间的相互干扰加强, 从而导致蓄热量减少。

5 结论

通过对埋管的数值模拟分析, 得到如下几点结论:

(1) 埋管深度对太阳能跨季节土壤蓄热效果存在影响。埋管深度增加, 使得蓄热体上表面受环境热干扰减小, 蓄热结束时土壤蓄热体的平均温度升高, 土壤的蓄热量增大。但随着深度的增加, 其蓄热量的增量越来越小, 此外, 深度增大会大幅增加系统的初投资, 因此, 埋管的深度不易取过大。

(2) 不同管内流体温度对太阳能跨季节土壤蓄热效果存在影响。随着流体温度的升高, 换热温差增大, 流体的热流密度增大, 到蓄热结束时, 土壤的蓄热量也增大。

(3) 土壤类型对埋管换热性能及土壤温度变化有显著影响。导热系数高有利于土壤中热量的扩散, 比热容高有利于降低土壤温度上升速率和幅度, 密度高有利于土壤蓄热, 褐土是上述四种土壤中最

有利于蓄热的土壤, 沙土是最不利的, 花岗岩和粘土介于两者之间。

(4) 埋管间距对太阳能跨季节土壤蓄热效果存在影响。随着埋管间距的逐渐减小, 温度场之间的相互干扰加强, 导致蓄热量的减少。适当增加埋管间距可以减小附加温变热阻, 使得传热性能提高, 从而使得土壤的蓄热量增加, 同时较大埋管间距蓄热的散失量要少, 土壤对蓄热热量的保持性好。

参考文献:

- [1] Pinel P, Cruickshank C A, Beausoleil-Morrison I, et al. A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2011,15(7):3341-3359.
- [2] 沈义. 我国太阳能的空间分布及地区开发利用综合潜力评价[D].兰州:兰州大学,2014.
- [3] 孙纯武, 张素云. 水平埋管换热器地热源热泵实验研究及传热模型[J]. *土木建筑与环境工程*, 2001,23(6):49-55.
- [4] 卿菁, 王勇. 不同埋深水平蛇形埋管换热器换热性能比较分析[J]. *制冷与空调*, 2015,(5):496-501.
- [5] W S Johnson. Seasonal Performance Evaluation of Two Horizontal-coil Ground-coupled Heat Pump Systems[J]. *ASHRAE Trans*, NT-87-19-4.
- [6] 王丽. 跨季节太阳能水箱蓄热供暖系统的计算与研究[D].北京:华北电力大学,2012.
- [7] 张文武. 城市不透水表面对流换热系数的实测和模拟研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [8] 杜吴鹏, 房小怡. 北京近年地表风速和大气混合层厚度变化特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2017,(6):149-156.
- [9] 熊莉芳, 林源, 李世武, 等. $k-\epsilon$ 湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用[J]. *工业加热*, 2007,36(4):13-15.
- [10] 曾召田, 赵艳林, 吕海波, 等. 气象波动对水平埋管换热器传热影响的数值模拟[J]. *太阳能学报*, 2018,(5):1179-1186.
- [11] 陈博, 李建平. 中国冻土的时空变化特征[C]. 中国气象学会年会“气候变化及其机理和模拟”分会场, 2006.