

文章编号:1674-2869(2011)04-0042-04

地源热泵地埋管多层岩土温度场的数值分析

管昌生¹, 万 兆¹, 胡平放²

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070;
2. 华中科技大学环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要:将地埋管周围同物性岩土分层,模拟地源热泵地埋管夏季制冷条件下各岩土层非稳态传热过程;与一般传热模型模拟结果对比,分析钻孔外岩土区域温度场热作用特性.利用多层岩土传热模型,研究了距钻孔一定距离处岩土温度场分布随运行时间的变化规律,以及进口流体速度、土壤热物参数对地埋管周围岩土温度场分布的影响.计算结果可为地源热泵地埋管换热器的动态模拟、优化设计提供参考.

关键词:U 型埋管;地源热泵;非稳态传热;多层岩土温度场;数值模拟

中图分类号:TU111.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2011.04.011

0 引 言

利用地下土壤蕴藏的丰富地热能源,是走可持续发展能源道路的一个重要方向.有研究表明^[1]:土壤能削减和延迟地表温度波的传递,在地表 5 m 以下地温约等于当地年平均气温.在地源热泵垂直地埋管的研究中,传热分析产生了多种不同的传热模型^[2-5].地埋管下穿通过多层热物性不同岩土层,其温度场分布对热泵系统传热有很大影响,需建立多层岩土非稳态传热模型并进行分析与研究.

本文从一般传热模型入手,分别对单一土层模型和多层岩土模型中地埋管周围岩土层传热进行数值模拟分析与对比,研究地源热泵钻孔内地埋管周围土壤非稳态传热温度场分布规律.并利用多层岩土传热模型,对岩土层热物性对地源热泵地埋管换热性能及埋管周围土壤温度分布影响加以对比分析^[6-7].

1 垂直 U 型埋管计算模型分析

在工程实际中,竖直地埋管一般会下钻穿过多个热物性不同的岩土层.为简化计算,物性相同岩土层设为同一地质分层,于是各个岩土层之间最重要的区别就是岩石与土壤的分界面^[8].地埋管在各个物性相同土层内传热为非稳态复杂传热过程,包括管内液体与管内壁间的对流传热,管壁的导热,管壁与回填材料之间的传热,回填材料的

导热,回填材料与土壤传热以及土壤的导热.

1.1 简单模型

对于地源热泵地埋管周围岩土层温度场分布研究,在相同热物性岩土层内的传热分析,一般采用如下传热模型:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda_s}{\rho_s c_s} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (r_{eq} \leq r \leq r_b) \quad (1)$$

式(1)中: λ_s 、 ρ_s 、 c_s 为土壤的导热系数(W/m·℃)、密度(kg/m³)和比热(J/kg·℃); r_{eq} 为等效管外径(m); r_b 为钻孔半径(m); T 为对应土层的土壤温度(℃); τ 为时间(s).

1.2 多层岩土传热数学模型

地源热泵埋管周围土壤看做无限大的传热介质,初始温度均匀,各层岩土热物性为常数.埋管简化为线热源,深度方向传热不考虑,用当量管直径 $D_{eq} = \sqrt{n}D_0$ 代替钻孔尺寸^[9],其中 n 是孔内埋管根数.模型分层示意图如图 1 所示.

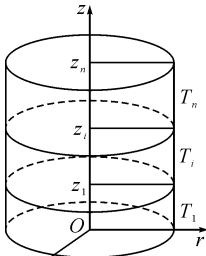


图 1 模型分层图

Fig. 1 Model stratification figure

采用非稳态的传热模型.对每一岩土层,二维

轴对称非稳态传热温度场微分方程为:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) \tag{2}$$

$$(r_{eq} \leq r \leq r_b \quad i=1,2,\cdots n) \tag{3}$$

$$z_i < z < z_{i+1} \tag{4}$$

$$T_i|_{z=z_{i+1}} = T_{i+1}|_{z=z_i} \tag{5}$$

式(2)~(4)中: λ_i 、 ρ_i 、 c_i 分别为对应岩土层内土壤的导热系数(W/m·℃)、密度(kg/m³)和比热(J/kg·℃); r_{eq} 为等效管外径(m); r_b 为钻孔半径(m); T_i 为对应土层的土壤温度(℃); τ 为时间(s).

对应于各岩土层,分别将各项岩土物性参数不同值代入上式进行模拟分析.其他各项边界条件相同.等效外壁为第二类边界条件.当热泵运行时:

$$-\lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} |_{r=r_{eq}} = \frac{q}{2\pi r_{eq}} \tag{6}$$

式(5)中: q 为单位面积地下埋管与岩土材料的换热量,钻孔外土壤的远边界条件设为绝热.

2 有限元算法

考虑几何与物理模型,得到传热模型有限元计算公式,其矩阵形式为:

$$[K]^e \{T\}^e + [N]^e \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\}^e = \{p\}^e \tag{7}$$

所有单元的整体合成,得

$$\sum_e ([K]^e \{T\}^e + [N]^e \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\}^e - \{p\}^e) = 0 \tag{7a}$$

或

$$[K] \{T\} + [N] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} = \{p\} \tag{7b}$$

式(6)~(7)中:[**K**]为传热系统的刚度矩阵,{**T**}为系统的节点温度列阵,{**P**}为系统负荷及边界条件列阵,{**T**}={ T_1, T_2, \cdots, T_k }, T_k 为节点温度变量.

在求解非稳态温度场时,用差分法将 $\frac{\partial T}{\partial t}$ 在时间节点处展开,在节点(x_i, y_j, t_k)处,记为(i, j, k),则有

$$\left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\}_k = \frac{T(i, j, k + \Delta t) - T(i, j, t_k)}{\Delta t} \tag{8}$$

代入(7a)式得在节点 处的温度场有限元方程:

$$[N]T(i, j, t_k + \Delta k) = ([N] - \Delta t[K])T(i, j, t_k) + \Delta t\{p\} \tag{9}$$

由此可逐步求出各个时刻的温度场.

3 计算机模拟方法

某小区工程总建筑面积 38 000 m²,节能措施采用地源热泵空调.埋管开挖井深 50 m,埋管为聚乙烯管,管径 32 mm,壁厚 3 mm,导热系数 0.42 W/(m·℃),根据武汉年平均土壤温度数据,拟定设计管内流体初始温度 38℃,土壤初始温度 20℃,为夏季制冷工况.

本例使用多层岩土传热分析方法,为研究方便,模型采用三种典型土壤分层.模拟从上到下总深度 50 m 的三层岩土分别为粘土、砂土和砂岩,层厚分别为 20 m、15 m、15 m.同时,为了对比分析,未作分层处理的一般传热模型,采用的是砂土的各种物性带入模型.本例中所用的三种土壤物性条件如表 1 所示.

表 1 土壤热物性参数
Table 1 Soil thermal physical parameters

土质	密度/ (kg/m³)	比热/ (J/kg·℃)	导热系数/ (W/m·℃)	土层深度/ m
粘土	1 500	2 300	1.0	0~20
砂土	2 050	1 000	2.1	20~35
砂岩	2 680	780	3.2	35~50

4 计算结果及分析

热泵系统运行过程中,埋管区域土壤温度场分布是土壤源热泵系统优化设计的关键.对于一般传热模型,由地表到埋管底部周围岩土层温度分布沿竖直方向均匀分布.

4.1 多层温度场分布

将表 1 中三种岩土热物参数代入多层模型,在热泵连续运行 20 天工况下,研究地源热泵埋管周围岩土层温度场分布.分层模型温度场在竖向分布产生明显变化,在不同岩层交界处(即岩土热物性发生变化处,本例为距地表 20 m 和 35 m 处),等温线发生弯曲.表现在模拟结果图中,同一土层内温度分布趋势同一般模型类似,为均匀平滑直线,但是在拐点处曲线发生弯曲变化,如图 2、3 所示.

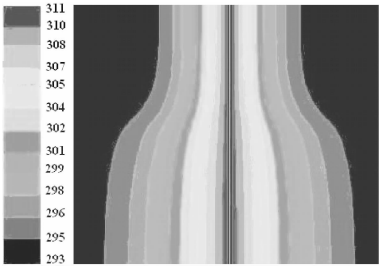


图 2 多层模型 20 m 深处温度场分布

Fig. 2 Temperature field of model 20 m depths

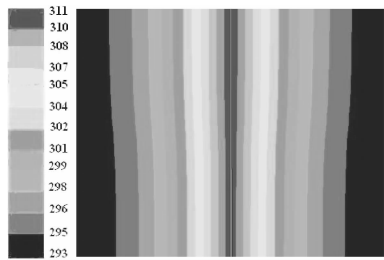


图 3 多层模型 35 m 深处温度场分布

Fig. 3 Temperature field of model 35 m depths

图 2、3 分别代表距离地表 20 m 和 35 m 处及上下, 埋管周围岩层温度场土壤温度场竖直方向分布。图中温度数值为绝对温度(单位为 K)。

4.2 两种模型温度模拟结果比较

一般传热模型里任一距地表深度处土层温度分布相同, 选取 28 m 深处作为代表温度数据; 多层模型下, 三种土层温度结果各不相同。20 m 深处为粘土和砂土分层深度, 选取上下各 1 m 处, 即 19 m 深处和 21 m 处, 作为代表深度。

以上三处深度温度分布曲线对比如图 4 所示。三条曲线不重合, 代表两种模型下不同岩土层温度分布不同。21 m 和 28 m 代表深度处土层热物性相同而温度分布曲线不重合, 说明多层模型考虑到不同物性土层之间传热影响, 温度分布产生相应变化, 更符合工程实际。

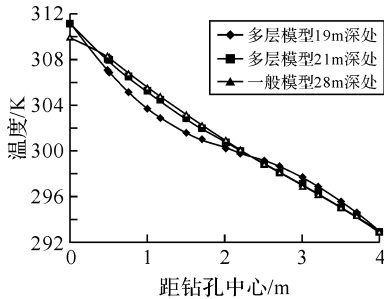


图 4 三种代表深度处温度场分布

Fig. 4 Emperature field distribution of three representative depths

4.3 两种模型热物参数模拟结果对比

改变土层热物参数导热系数, 在两种模型中对比各个热物参数对温度分布及热泵系统传热性能影响。热泵连续运行 20 天工况, 以距地表 18 m 深度处土壤(本例为粘土层)为例, 改变土壤导热系数(λ), 分别选取 $\lambda=1$ 和 $\lambda=2$, 在相同入水流速下, 土壤温度场径向分布对比如图 5、6 所示。

分析可知提高埋管周围土壤(回填材料同理)导热系数, 土壤温度增幅提高, 即在同样运行时间内, 换热效率增大, 同时也使得热作用半径增大。

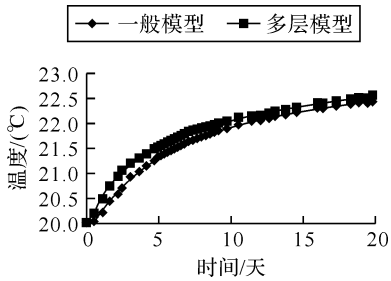


图 5 土壤导热系数 $\lambda=1$ 工况

Fig. 5 Soil coefficient of thermal conductivity $\lambda=1$

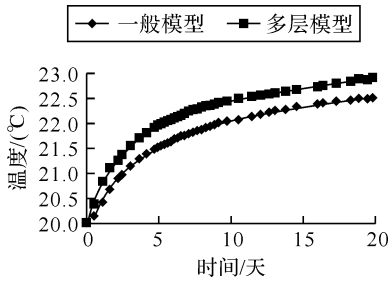


图 6 土壤导热系数 $\lambda=2$ 工况

Fig. 6 Soil coefficient of thermal conductivity $\lambda=2$

5 结 语

地源热泵换热系统钻孔经过热物性不同的多层岩土, 埋管在钻孔周围岩土层传热分布十分复杂。本文提出传热多层模型, 模拟埋管与周围多层复杂岩土换热工况, 模拟结果表明该模型符合工程精度要求。对不同钻孔深度周围岩土温度分布的比较结果表明, U 型埋管周围岩土传热随介质导热系数增大而增加, 合适的土壤构造有利于增强热泵系统换热能力, 提高系统的换热效率及经济性。利用多层模型对埋管周围土壤温度场研究, 在工程实际中可以有效减小换热器埋管长度, 降低地源热泵初投资, 保证系统稳定高效运行, 为地源热泵技术应用与推广产生积极作用。

参考文献:

[1] Steve Kavanaugh. Ground source heat pumps[J]. ASHRAE, 1998(40): 3136.
[2] 管昌生, 刘卓栋, 陈绪义. 地源热泵埋管可靠性设计方法研究[J]. 节能, 2008(10): 29-33.
[3] 曾和义, 刁乃仁, 方肇洪. 地源热泵垂直埋管的有限长线源模型[J]. 热能动力工程, 2003, 18(104): 166-170.
[4] 赵军, 张春雷, 李新国, 等. U 型管埋地换热器三维传热模型及实验对比分析[J]. 太阳能学报, 2006, 27(1): 63-66.
[5] Hikmet Esen, Mustafa Inalli, Mehmet Esen. Numerical and experimental analysis of a horizontal ground-coupled heat pump system[J]. Building and

Environment,2007,42:1126-1134.

[6] 吕丽霞,李素芬,李亮,等.土壤源热泵地下垂直换热埋管周围非稳态温度场的数值模拟[J].节能,2005(6):6-9.

[7] 李新国,赵军,周倩.U型垂直埋管换热器管群周围土壤温度数值模拟[J].太阳能学报,2007,25(5):703-707.

[8] Piechowski M. Heat and mass transfer model of a ground heat exchanger: validation and sensitivity analysis [J]. International Journal of Energy Research,1998(22):965-979.

[9] Yian GU, Dennis L, O'Neal. Modeling the effect of backfills on U-tube ground coil performance [J]. ASHRAE Transactions,1998,104(2):356-365.

Numerical analysis on multilayer geotechnical temperature field of GSHP buried tube

GUAN Chang-sheng¹, WAN Zhao¹, HU Ping-fang²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Layering buried tube around with physical geotechnical properties, simulate ground source heat pump (GSHP) buried tube unsteady heat transfer process, which is on summer refrigeration conditions. With general heat transfer model simulation results contrast, analysis drilling outside temperature field hot effect characteristic. Use multilayer geotechnical heat transfer model and a certain distance away from drilling in geotechnical temperature field distribution with running time change rule, and importing flow velocity, soil thermal physical parameters on buried tube around the influence of geotechnical temperature field distribution. Calculation results provide ground source heat pump ground heat exchanger dynamic simulation, optimization design for reference.

Key words: U buried tube; GSHP; unsteady heat transfer; temperature field; numerical simulation

本文编辑: 龚晓宁



(上接第 41 页)

Study on Daye Iron Mine collapse monitoring based on multi-source

QIU Dan-dan¹, LI Xian-fu¹

(School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In recent years, much collapse occurred around iron mining and neighborhood along with the progress of underground mine work which become threat to work and life. Therefore, the collapse of Daye mine was monitored by using multi-source information (include multi-temporal RS data, topographic map, underground mining distribution map and so on), and the range of collapse was extracted by applying dynamic monitoring and fuzzy Integral based on multi-classifier, which provides the basis of governance in the next step.

Key words: collapse; monitor; multi-source; multi-temporal; Daye Iron Mine

本文编辑: 龚晓宁