

文章编号:1674-2869(2011)06-0065-03

# 岩土温度场对垂直地埋管换热影响的数值分析

万 兆<sup>1</sup>,管昌生<sup>1</sup>,胡平放<sup>2</sup>

(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:**模拟夏季制冷条件下地源热泵地埋管周围岩土层非稳态传热过程,分析了钻孔外岩土区域温度场热作用特性及影响因素.利用多层岩土传热模型,研究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,分析钻孔内回填土导热系数对换热器传热性能及周围岩土温度场的影响.模拟结果可为地源热泵地埋管换热器的动态模拟及设计提供参考.

**关键词:**地源热泵;非稳态传热;多层岩土模型;岩土温度场

**中图分类号:**TU111.1      **文献标识码:**A      **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2011.06.014

## 0 引 言

地热资源是指能够为人类经济开发和利用的地热能、地热流体及其有用部分.作为一种可再生能源,据估计,全世界地热资源总量约为  $1.45 \times 10^{26}$  J,相当于  $4\,948 \times 10^{12}$  t 标准煤<sup>[1]</sup>.在当今节能环保可持续发展大环境下,利用地热资源越来越受到工程界的重视,其应用也越来越广泛.地源热泵即为利用地热能的节能技术之一.

在地源热泵地埋管传热研究中,对换热器及温度场的研究产生了多种传热模型.李新国等人采用多孔介质计算软件对换热器周围土壤温度进行了模拟计算<sup>[2]</sup>.唐志伟等人利用有限容积法对单 U 型地埋管换热器的温度场和流场进行了数值模拟<sup>[3]</sup>.工程上,地源热泵地埋管通过回填材料与其周围多层热物性不同岩土进行传热,本文利用多层岩土模型对传热过程进行模拟研究<sup>[4-5]</sup>.本文重点研究地埋管周围岩土温度场分布特征及影响因素,有利于地埋管换热器换热性能的提高和运行的经济性<sup>[6]</sup>.

## 1 垂直 U 型埋管换热器物理模型

在工程实际中,地源热泵地埋管首先埋入钻孔中,通过回填材料与周围土壤接触.在竖直方向,地埋管向下钻穿过多个热物性不同的岩土层.物性相同岩土层设为同一地质分层,在岩土层分界面处温

度为连续分布.用当量管直径  $D_{eq} = \sqrt{n}D_0$  代替钻孔尺寸<sup>[7]</sup>,其中  $n$  是孔内埋管根数.根据以上假设,垂直 U 型埋管周围土壤温度场可视为轴对称圆柱传热模型.所建立的物理模型如图 1 所示.

图 1 中土壤 1 和土壤 2 分别代表不同热物性土壤分层.

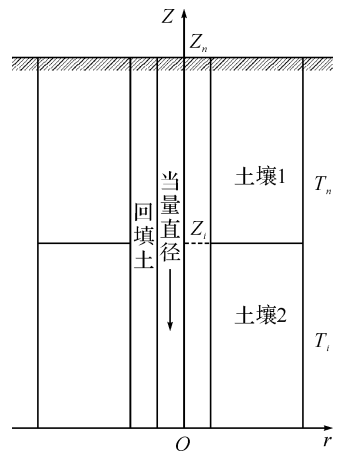


图 1 垂直 U 型埋管物理模型

Fig. 1 Physical model of vertical U - shaped buried tube

## 2 垂直 U 型埋管数学模型分析

### 2.1 地源热泵地埋管区域的传热

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,包括地埋管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.

收稿日期:2011-04-08  
基金项目:国家自然科学基金(编号 51078160)  
作者简介:万 兆 (1980-),男,湖北十堰人,博士研究生.研究方向:桥梁与隧道工程.  
指导老师:管昌生,男,博士,教授,博士生导师.研究方向:结构工程.

2.2 回填土及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,采用非稳态的传热模型.

对回填土内传热,二维轴对称非稳态传热温度场微分方程为:

$$\rho_h c_h \frac{\partial T_h}{\partial t} = \frac{\lambda_h}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_h \frac{\partial T_h}{\partial z} \right) \tag{1}$$

式(1)中: $\lambda_h$ 、 $\rho_h$ 、 $c_h$  分别为回填土壤的导热系数(W/m·℃)、密度(kg/m³)和比热(J/kg·℃); $r$ 为钻孔半径(m); $T_h$ 为土壤温度(℃); $t$ 为时间(s).

对各岩土层,其内部传热与回填土部分类似,区别在于由于模型上采用分层处理,故两个面接触部分需要连续.添加边界连续性条件如下:

$$z_i < z < z_{i+1} \tag{2}$$

$$T_i|_{z=z_{i+1}} = T_{i+1}|_{z=z_i} \tag{3}$$

式(2)~(3)中, $z$ 代表土壤分层编号.

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:

$$-\lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_{eq}} = \frac{q}{2\pi r_{eq}} \tag{4}$$

式(4)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为等温边界条件,地表边界条件为第三类边界条件.

3 传热模拟分析

3.1 热物性参数的确定

由某小区建设地质资料所得:地埋管拟开挖井深 40 m,埋管为聚乙烯管,管径 32 mm,壁厚 3 mm,导热系数 0.42 W/(m·℃).回填土及埋管区域土壤各项热物性参数如表 1 所示.

表 1 中砂质粘土和砂岩分别对应于图 1 中土壤 1 和 2 的热物性,深度 20 m 处即为两种热物性土壤的分界面.

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
回填土	1 450	1 046	0.65	
砂质粘土	1 780	1 380	1.72	0~20
砂岩	2 500	780	3.26	20~40

3.2 地埋管周围岩土温度场竖直方向上的分布

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 40℃,土壤初始温度 18℃,为夏

季制冷工况.回填土外径取钻孔直径 130 mm.

模拟结果显示,不同径向处地埋管周围区域岩土在竖直方向上温度变化趋势相近,即岩土温度在同热物性岩土层内几乎没有变化.由图 2 可以看出,岩土温度在接近埋管顶部区域发生变化,主要原因是地表处自然对流换热(取对流系数为 10 W/m²·℃)影响顶部土壤温度.表现在岩土温度分布图上,温度等温曲线发生弯曲.本文中如未特别标明,图中温度值都是绝对温度(K).

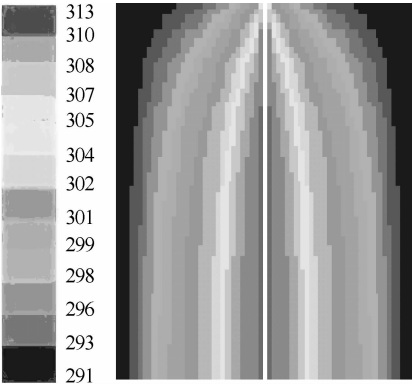


图 2 近地表区域岩土温度场分布

Fig. 2 Geotechnical temperature field near the surface

图 3 中采用六孔一组 U 型埋管,钻孔间距取 6 m,模拟运行 30 天后的地下温度场分布情况.图中显示为地埋管周围 20 m 深度处的岩土温度场,温度曲线发生连续性弯曲变化.

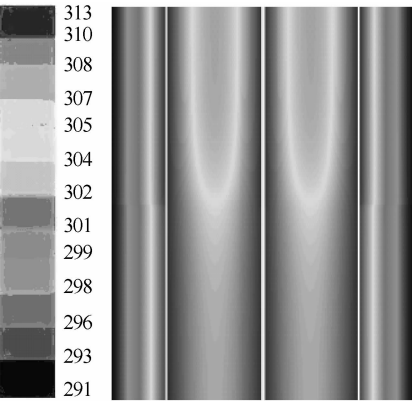


图 3 埋管周围 20 m 深度区域岩土温度场分布

Fig. 3 Geotechnical temperature field distribution of the 20 m depth

3.3 回填材料导热系数对换热器传热性能及周围岩土温度场的影响

回填材料是地埋管与周围土壤传热的桥梁,主要作用体现在热量的传递方面.导热系数作为表征热传递能力指标,对回填土的影响最大.从图 3 也可以看出,导热系数更高的第二层土壤,其竖向温度分布显示埋管间相互热作用更快,温度更高.

模拟采用三种回填材料,分别为土、水泥和某水泥基材料,密度皆为  $1\,450\text{ kg/m}^3$ ,比热容皆为  $1\,046\text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ;导热系数不同,分别为  $0.65\text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ 、 $0.97\text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ 和  $2.31\text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ . 三种热物参数下,系统运行 30 天后,19 m 深度处埋管周围岩土代表温度如图 4 所示.

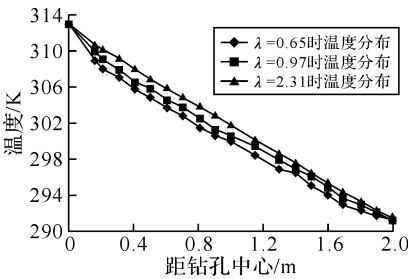


图 4 不同回填材料下岩土温度场分布

Fig. 4 Temperature distribution on the condition of different backfilled material

分析知埋管周围岩土温度场分布趋势相同,但是随回填土材料导热系数增大,埋管周围土壤温度增加更快,热交换性能进一步提高. 选择适当回填材料,有利于热泵系统换热器与周围岩土传热,提高系统换热性能.

3.4 埋管管间热堆积的岩土温度场

采用和图 3 相同工况下的六孔一组群管布置,钻孔间距取 5 m. 模拟分析热泵系统运行 1 年后的地下温度场分布情况. 各岩土层热物性参数使用表 1 所列. 模拟结果如图 5、图 6 所示,为俯视图效果.

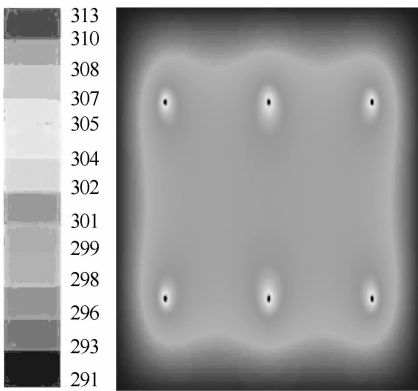


图 5 运行 6 个月埋管区域的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution after six-month operation

对比图 5 和图 6 可知,热泵运行 1 年后,地源热泵埋管周围岩土的温度比初始时升高,且温度增长趋势随系统运行时间加长而继续上升,表明地源热泵向周围岩土的排热量持续增加. 随热泵运行时间的推移,埋管间土壤内热堆积情况将越来越严重. 这一情况对埋管热泵夏季向土

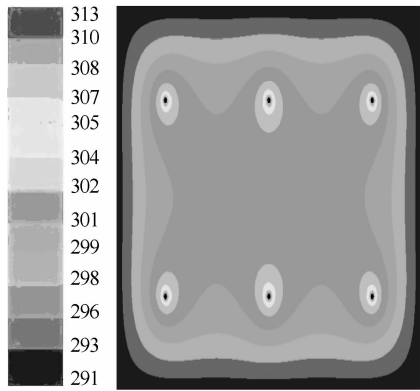


图 6 运行 1 年后埋管区域的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution after one-year operation

壤的热量释放产生不利影响.

4 结 语

地源热泵埋管换热器所在钻孔下穿经过热物性不同的多层岩土,换热器通过钻孔内回填材料与周围岩土介质接触. 本文利用多层岩土传热模型,模拟埋管与周围多层复杂岩土换热工况. 改变回填土导热系数,对不同钻孔深度周围岩土温度分布结果比较,U 型埋管周围岩土换热性能随土壤导热系数增大而增加. 利用多层传热模型对埋管周围土壤温度场研究,为对程实际中提高系统的换热性能及经济性有重大意义,也可为地源热泵技术应用与推广产生积极作用.

参考文献:

[1] 陈洪泳,殷琨,庄迎春. 地源热泵技术及其发展[J]. 世界地质,2002,(2):203-207.  
[2] 李新国,赵军,周倩. 埋地换热器理论模型与周围土壤温度数值模拟[J]. 太阳能学报,2004,25(4):492-496.  
[3] 唐志伟,时晓燕,黄俊惠,等. 地源热泵 U 型管地下换热器的数值模拟[J]. 北京工业大学学报,2006,32(1):62-66.  
[4] 管昌生,万兆,胡平放. 地源热泵埋管多层岩土温度场数值分析[J]. 武汉工程大学学报,2011,33(4):42-45.  
[5] 王勇,刘方,付祥钊. 基于层换热理论的竖直埋管换热器设计方法[J]. 暖通空调,2007,37(9):35-39.  
[6] 包强,邓启红,牛润卓. 回填材料对土壤热泵 U 型埋管换热器性能的影响[J]. 建筑热能通风空调,2007,26(4):64-67.  
[7] 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.