

文章编号: 2095-0411 (2011) 03-0037-04

# 土壤源热泵垂直钻孔群间热干扰数值模拟分析<sup>\*</sup>

黄晓蕾<sup>1</sup>, 蒋绿林<sup>2</sup>, 王艳霞<sup>2</sup>, 陆 鹏<sup>3</sup>, 李 明<sup>3</sup>

(1. 常州卓越新能源工程技术有限公司, 江苏 常州 213016; 2. 常州大学 石油工程学院, 江苏 常州 213016;  
3. 常州市大成房地产开发有限公司, 江苏 常州 213016)

**摘要:** 通过建立物理、数学模型, 利用 Matlab 中的 PDE 工具箱求解埋管周围的温度场分布状况, 分别得出单个埋管在不同的时间段连续运行工况下的土壤温度场。再应用叠加原理得出钻孔管群的温度场, 分析埋管的间距为 3m、4m 和 5m 时钻孔群间的热干扰及不同的孔间距、运行时间等因素造成埋管出口水温度的变化。随着运行时间的增加, 钻孔中心温度逐渐升高, 钻孔热作用半径逐渐增大, 但是钻孔间距较大时, 钻孔中心温度的变化很缓慢, 说明钻孔热作用半径基本在 3m 以内。综合实际工程情况, 钻孔间距取 4.5m。

**关键词:** 土壤源热泵; 传热过程; 热干扰; 孔间距

**中图分类号:** TK11+3

**文献标识码:** A

## Numerical Analysis of Thermal Disturbance around Ground Source Vertical Multi—Pipes

HUANG Xiao—lei<sup>1</sup>, JIANG Lv—lin<sup>2</sup>, WANG Yan—xia<sup>2</sup>, LU Peng<sup>3</sup>, LI Ming<sup>3</sup>

(1. Changzhou Zhuoyue New Energy Engineering and Technology Ltd, Changzhou 213016, China;  
2. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China;  
3. Changzhou Dacheng Real Estate Exploitation Ltd, Changzhou 213016, China)

**Abstract:** This study uses the PDE tool in the Matlab software to solve and get the temperature field around the bore, and then analyzes the temperature field and heat transmission through the superposition principle around multi—pipes in some conditions, the time when the disturbance happens, the gap and result in the vertical multi—pipes; Analyzes the water temperature change of pipe outlet because of different bore spacing, run—time factors, etc. As the running time increased, core temperature and bore thermal effect radius increased gradually, but the bore center temperature changed slowly when there was larger gap. It proved that the role of borehole heat was in the 3m radius of the basic less. In the actual a situation, drilling spacing can be 4.5m

**key words:** ground source heat pump system; heating transmission; thermal disturbance; gap of vertical multi—pipes

土壤源热泵系统利用地下埋管中的液体与土壤进行换热, 夏季向土壤中排热, 冬季从土壤中取

热, 充分利用了土壤环境的稳定性, 夏季比空气温度低, 冬季比空气温度高这些特点, 是高效节能、

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2009-11-17

作者简介: 黄晓蕾 (1985—), 女, 江苏扬州人, 硕士; 通讯联系人: 蒋绿林。

绿色环保的供暖和空调制冷技术。

地下埋管换热性能的好坏,将直接影响机组的性能和系统的稳定性。本文重点分析地下垂直埋管的温度场,研究长期运行状况下垂直埋管的换热能力,空群间的热干扰,并针对分析得到问题,提出解决方案。

## 1 垂直 U 型埋管热交换器模型

土壤内传热是一个复杂的过程,它是一个有源传热过程,有时伴随着热湿迁移等现象<sup>[1]</sup>。本文采用简化模型,把 U 型埋管简化成圆柱等效管,其当量半径为:

$$r_{eq} = \sqrt{2} r_1 \quad (1)$$

对于垂直埋管地下传热这样复杂的过程本文做以下假设:①实验地区土壤性质均匀,回填土与周围土壤性质一致;②管内流体在同截面处流速相同;③岩土热物性在实验温度范围内不发生变化;④不考虑由于温度变化导致的热湿迁移;⑤传热过程属于中心对称分布。

## 2 传热微分方程

### 2.1 传热控制方程

等效管外壁与钻孔壁之间回填土的传热微分方程:

$$\frac{\partial t_\tau}{\partial \tau} = \frac{\lambda_g}{\rho_g c_g} \left( \frac{\partial^2 t_\tau}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_\tau}{\partial r} \right) \quad (r_{eq} \leq r \leq r_b) \quad (2)$$

钻孔外土壤的传热微分方程:

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

式中的  $\lambda_g$ 、 $\rho_g$ 、 $c_g$  分别为回填材料的导热系数 ( $W/(m \cdot k)$ ), 密度 ( $kg/m^3$ ) 和比热容 ( $J/(kg \cdot k)$ ),  $\rho_s$ 、 $c_s$  为土壤的导热系数,  $r_b$ 、 $r_{eq}$  为当量半径,  $t_\tau$  和  $t$  分别为回填材料和土壤的温度,  $^\circ C$ ,  $\tau$  为时间 ( $s$ )。

采用 Matlab 中 PDE 工具箱,对求解区域进行离散化,并通过工具箱中自带的程序对其数值计算,进行垂直 U 型埋管换热器周围土壤温度场和埋管内流体温度的动态模拟。图 1 为单孔和钻孔群间的网格系统图。

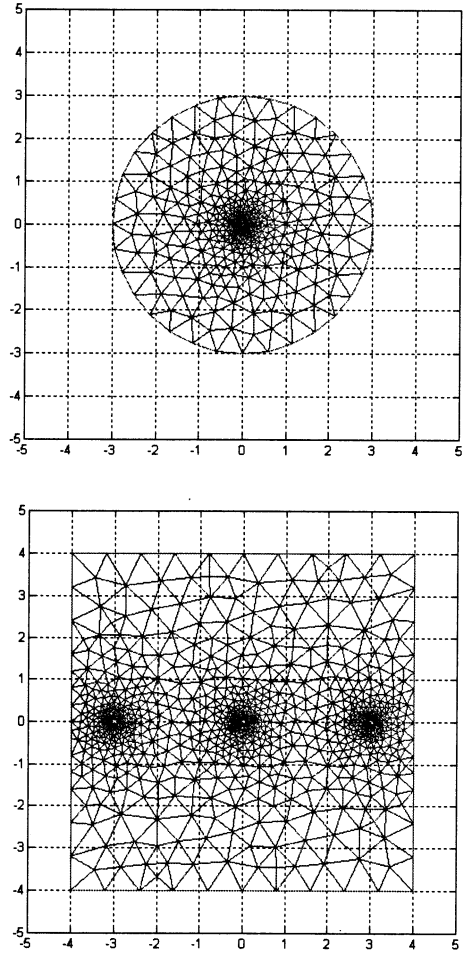


图 1 钻孔网格离散化

Fig. 1 Borehole discretization

### 2.2 初始条件和物性参数

根据现有的热响应测试,土壤初始温度为  $19.2^\circ C$ ,导热系数  $2.25 W/(m \cdot k)$ ,密度  $1600 (kg/m^3)$ ,比热容  $1645 (J/kg \cdot k)$ 。地源热泵的设计与施工主要还是借助国外经验<sup>[2]</sup>,打井数量按照简单的  $40-60 W/m$  井深 (单 U),  $80-100 W/m$  井深 (双 U) 进行估算。

### 2.3 边界条件

等效管外壁为第二类 (纽曼) 边界条件,土壤源热泵运行时,

$$-\lambda_g \frac{\partial t_\tau}{\partial r} \bigg|_{r=r_{eq}} = \frac{q}{2\pi r_{eq}} \quad (4)$$

式中的  $q$  为单位长度钻孔散热量 (单位  $W/m$ )。

当热泵停止运行时,

$$-\lambda_g \frac{\partial t_\tau}{\partial r} \bigg|_{r=r_{eq}} = 0 \quad (5)$$

钻孔外土壤的远边界为绝热边界条件,

$$-\lambda_s \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=\infty} = 0 \tag{6}$$

$$-\lambda_s \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=\infty} = 0 \tag{7}$$

### 3 钻孔群间的热干扰

对线型并联的埋管布置方式进行模拟，考虑单个钻孔  $q_i$  孔的柱状对称性，采用叠加原理<sup>[3]</sup>，令  $(W/m)$  表示钻孔  $i$  的平均热流量，则：

$$q_i = q_i(t), t > 0 \tag{8}$$

首先考虑一种特殊的热过程，即只有钻孔  $i$  的热流量，没有来自其它钻孔的热流量的影响 ( $q_j = 0, j \neq i$ )，而这些钻孔可以看作是不受干扰的土壤的一部分。假设土壤的初始温度为零，这个特殊的热过程围绕钻孔是柱状对称的，则钻孔周围土壤的温度：

$$t_i = t_i(r_i, t) \tag{9}$$

其中， $r_i$  是到钻孔  $i$  的径向距离。  
由叠加原理可以得到具有  $N$  个垂直钻孔的系统的土壤温度为：

$$t(x, y, t) = t_{om} + \sum_{i=1}^N t_i(r_i, t) \tag{10}$$

钻孔  $i$  的平均壁温为：

$$t_{b,i}(t) = t_{om} + t_i(r_b, t) + \sum_{j \neq i} t_j \tag{11}$$

其中， $\sum_{j \neq i} t_j$  表示其他钻孔 ( $j \neq i$ ) 对钻孔  $i$  的壁温所引起的总的温度变化。

#### 3.1 管间距对土壤温度场分布的影响

先设定钻孔间距为 3m，钻孔和单个钻孔模型一样，钻孔半径为 150mm。输入相关参数进行模拟计算，得到热泵运行不同时间的周围土壤温度场分布，及中心钻孔温度变化情况。

由模拟的数值解可以得到，中心埋管周围土壤的温升要比其他埋管周围的温升要高。随着机组的持续运行，埋管将热量源源不断地输送给土壤，其热作用半径在慢慢地变大。由于埋管的位置关系，各周围埋管的热作用区域最先开始与中心管相重叠。由于各埋管同时向中心埋管周围的土壤散热，导致其温升要高于其他埋管周围土壤的温升。因为温差是传热的动力，所以中心埋管周围土壤的温升加剧直接影响中心埋管的换热。连续运行 2 个月，可以看到钻孔壁的温度已经到达 32℃。图 2 是钻孔间距 3m 运行 63d 土壤温度场分布状况。

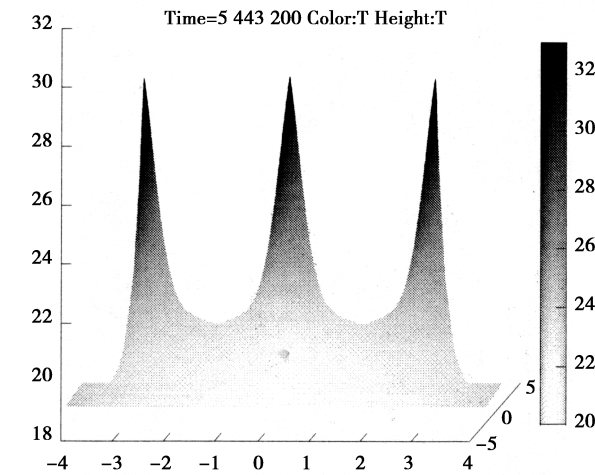


图 2 钻孔间距 3 m 土壤温度场分布

Fig. 2 Temperature field of a space of three meters

工程中钻孔间距是埋管换热中一个很重要的因素，钻孔间距过小会造成钻孔间热干扰，影响埋管换热，最终影响机组性能<sup>[4]</sup>。增大钻孔间距可以减少钻孔热干扰，提高埋管换热效果，但是埋管占地面积增大，这在城市人多地少的环境下是不可行的。所以确定合理的钻孔间距，既可以减少钻孔间的热干扰，又可以尽量节省埋管占地面积。图 3、图 4 是钻孔间距分别 4m 和 5m 运行 63d 土壤温度场分布状况。从图中可以看出，钻孔间距 4m 时，连续运行 63d，钻孔壁温度达到 28℃，钻孔间热干扰明显下降，到了 5m 时，基本和单个钻孔运行情况一样。

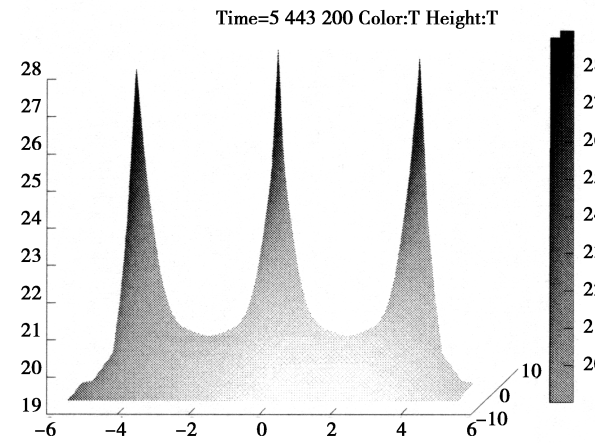


图 3 钻孔间距 4 m 土壤温度场分布

Fig. 3 Temperature field of a space of four meters

#### 3.2 运行时间对钻孔中心温度的影响

下面以两钻孔中心温度数值解的变化来分析埋管热干扰的时间的作用。图 5 为不同钻孔间距在运行 63d 时两钻孔中心温度的变化情况。图 6 以时间

为横轴，分析部同埋管间距热干扰的开始时间。

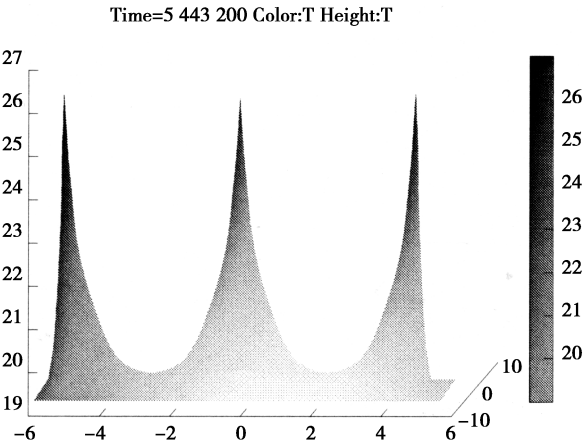


图 4 钻孔间距 5 m 土壤温度场分布

Fig. 4 Temperature field of a space of five meters

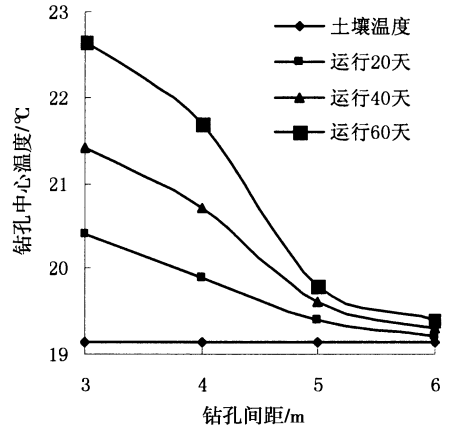


图 5 钻孔中心温度随钻孔间距的变化

Fig. 5 Variation of center temperature with bore gap

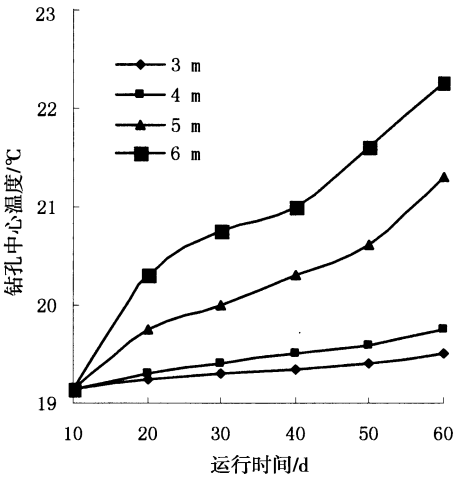


图 6 钻孔中心温度随运行时间的变化

Fig. 6 Variation of center temperature with runtime

从图 5 可以很明显地看出，随着钻孔间距的加

大，两钻孔中心温度逐渐减少，说明埋管间的热干扰逐渐减少。到钻孔间距为 5m 时，运行到 60d，两钻孔中心温度基本上也没有太大的变化，钻孔间距 6m 时，两钻孔中心温度基本上没有变化，都接近原始土壤温度。由图 6 可以看出，运行 10d 时，不同钻孔间距的中心温度基本一样，说明此时钻孔间还没有开始热干扰，随着运行时间的增大，两钻孔中心温度逐渐升高，钻孔热作用半径逐渐增大，但是钻孔间距 5m、6m 时，钻孔中心温度的变化很缓慢，说明钻孔热作用半径随着时间的变化，基本在 3m 之内。

工程考虑到占地面积的影响因素，而且一般建筑物不会一直连续运行，机组停机过程中，土壤温度场会得到一定程度的恢复，钻孔间的热干扰不会像连续运行这样严重，所以工程中钻孔间距一般取为 4.5m。

4 小 结

本文通过建立地下埋管与土壤换热的物理、数学模型，用 Matlab 中 PDE 工具箱对方程进行了数值求解，建立钻孔群的换热模型，模拟钻孔间相互干扰的土壤温度分布状况。埋管在运行初期，热作用半径较小，换热性能好，能保证较高的机组能效比，但随着运行时间的增加，埋管周围热量的不断蓄积，换热性能降低，埋管出口温度升高，严重影响机组性能系数。增加钻孔间距可有效改善这一情况。但工程中受占地面积等因素的影响，及使用过程中的实际情况，机组会间歇运行。在机组停机过程中，土壤温度场会得到一定的程度的恢复，所以工程中钻孔间距一般取为 4.5m。

参考文献：

[1] Bemier, Mechel, David R. Uncertainty in the design length calculation for vertical ground heat exchanger [J]. Ashrae Transactions, 2002, 108 (1): 939-943.

[2] Mogensen P. Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storage [C]. Berlin: Proc Int Conf On Subsurface Heat Storage in Theory and Practice Stockholm, 1983.

[3] 航青. 传热与传质分析 [M]. 北京: 北京科学出版社, 1983: 179-180.

[4] 王艳霞. 土壤源热泵系统地下垂直埋管换热器热干扰的研究 [D]. 常州: 江苏工业学院, 2009.