

Heat Transfer Characteristics of Buried Pipe Heat Exchanger in Bedrock Region based on CFD Numerical Simulation

Yuanyan Zhang

Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400000, China

Abstract: In view of the actual engineering geotechnical stratification, the software FLUENT was used to establish the homogeneous model and the heterogeneous model, and the rock-soil mass temperature distribution around the buried pipe heat exchanger was compared between the two models. The results showed that: The axial temperature distribution of the homogeneous model is uniformly distributed, while the excess temperature of the borehole wall surface of the heterogeneous model is related to the thermal conductivity of the rock-soil layer. The influence radius of the homogeneous model and the heterogeneous model should be determined by the influence radius of the layer with larger thermal conductivity in the geotechnical layer. After the shutdown, the temperature around the rock and soil layer of the homogeneous model recovered quickly, and the temperature recovery rate around the rock and soil layer of the heterogeneous model was related to the thermal physical parameters of the layered rock and soil, ignoring the stratification may lead to local thermal accumulation.

Keywords: Homogeneous model; Heterogeneous model; Excess temperature; Rate of temperature recovery

基于 CFD 数值模拟的基岩地区地埋管换热器传热特性

张远艳

重庆交通大学, 重庆, 400000

摘要: 针对实际工程岩土体分层, 利用 FLUENT 软件建立均质模型和非均质模型, 对比两种模型地埋管换热器周围岩土体温度分布, 结果表明; 均质模型轴向温度分布呈均匀分布, 而非均质模型钻孔壁面过余温度跟岩土层导热系数有关, 导热系数较大的岩土层钻孔壁面过余温度较低; 均质模型与非均质模型影响半径应以岩土层中导热系数较大层的影响半径来确定管间距; 停机后均质模型岩土层周围温度恢复较快, 非均质模型岩土层周围温度恢复速率与分层岩土体热物性参数有关, 忽略分层可能导致局部热堆积。

关键词: 均质模型; 非均质模型; 过余温度; 温度恢复速率

1 引言

地源热泵作为一种以地下浅层地温能为冷热源的一种系统, 在近二三十年得到了广泛应用及发展。目前地埋管换热器模型大多数都假设岩土体为均匀介质, 忽略了实际工程中, 地埋管周围的土壤分层, 导致假设模型和实际情况差距较大, 得到的结果也不够精确。陈金华[1]测研究得出土壤各层内热物性存在一定差异, 各分层热阻变化幅度高达 20%, 说明模型分层的必要性, 并通过实测和模拟, 提出适用于实际工程的简化分层换热模型。薛迪迪[2]通过实际项目对地埋管周围岩土体温度进行监测, 分析不同岩土温

度场恢复规律, 利用 FLUENT 软件对地埋管换热器建立分层换热模型, 结果发现地埋管周围岩土体温度受轴向分层影响较大, 忽略分层可能导致局部换热失效。王楠[4]等建立岩土体分层换热模型, 分析均质模型、导热系数从大到小、导热系数从小到大分布的三种换热模型, 模拟结果表明导热系数较大的岩土位于上层有利于地埋管换热, 均质模型不能真实反映土壤周围温度分布。

因此有必要针对岩土体分层对地埋管换热器周围土壤温度场分布进行研究。本文研究综合考虑土壤的分层特性, 利用 CFD 软件对比分析均质模型和非均质模型土壤周围温度变化。

2 地质条件

此次研究以重庆某可再生能源建筑地源热泵系统为例，分析地埋管换热器周围土壤温度变化。通过对工程场区内岩土地质条件进行勘察和岩土热响应测

试，对钻孔岩土进行热物性参数测试，得到项目处钻孔岩土层分布及其热物性参数如表 1 所示：

Table 1. Thermophysical parameters of rock and soil layers
表 1. 岩土层热物性参数

岩土层	密度 ρ (kg/m ³)	比热容 C_p (J/(kg·K))	导热系数 λ (W/(m·K))	材料成分	深度 m
soil-1	2020	1142.5	1.4645	粉质粘土	6
soil-2	2608	868.5	1.996	泥岩	17
soil-3	2592	1069	2.974	砂岩	43
soil-4	2578	841.4	1.834	泥岩	73
soil-5	2535	1069	2.654	砂岩	90
soil-6	2587	852	1.924	泥岩	100
ave	25747	957	2.26		

3 数值模型

3.1 几何模型及网格划分

地埋管换热器包括循环流体、地埋管、回填材料、土壤四部分，循环流体在 U 型管内流动，通过

管壁与回填材料以及周围土壤进行耦合换热。本文建立竖直单 U 型地埋管换热器，由于模型具有对称性，采用 Gambit 软件进行几何建模及网格划分，只建立一半模型进行数值模拟，模型几何参数见表 2。

Table 2. Geometric parameters of vertical single u-type buried pipe heat exchanger model m
表 2. 竖直单 U 型地埋管换热器模型的几何参数 m

名称	长度/m
管内径 d_i	0.026
管外径 d_o	0.032
埋管支管间距 D	0.064
钻孔直径	0.13
影响半径	3
钻井深度	103

为了使模型与实际工程更为接近，将 U 型管在轴向按照实际岩土体构造进行分层。由于模型较长，平面与垂直方向的几何尺寸相差较大，垂直方向上节点为 1m，水平面上土壤的网格划分如图 1，回填材料的网格划分如图 2，U 型管横截面的网格划分的网格划分如图 3。由于 U 型地埋管的几何形状及管内流体与土壤间耦合传热过程的复杂型，对模型作如下假设和简化：

忽略地表大气与土壤间的换热，假设地表面为绝热边界条件。

忽略土壤中地下水的影响，认为埋管与土壤之间为纯导热。

忽略回填材料与地埋管管壁、周围岩土体之间的接触热阻，认为回填材料与地埋管管壁以及周围岩土体之间接触良好。

忽略 U 型管底部弯管段与周围的传热，假设弯管段外壁面和底部为绝热边界条件。

假设岩土体各层岩土体之间的导热系数、比热容、热扩散率等参数保持均匀不变，岩土体初始温度相同。

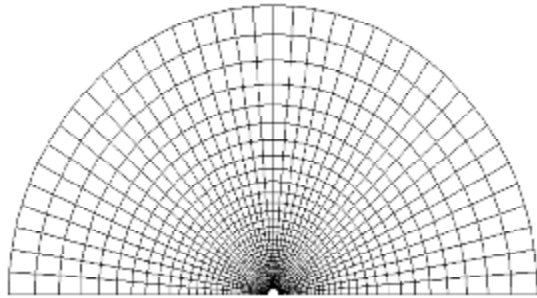


Figure 1. Grid schematic diagram of soil
图 1. 土壤网格划分

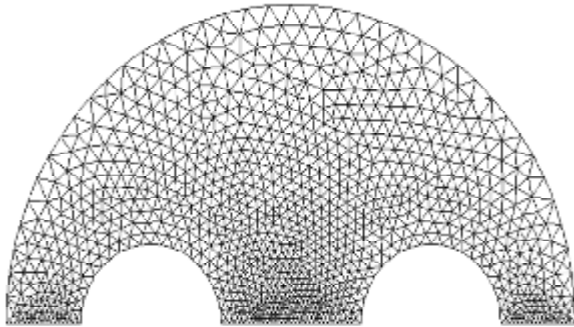


Figure 2. Grid schematic diagram of backfill materials
图 2. 回填材料网格

3.2 数学模型的建立

在 CFD 模拟时，对管内流体的流动选用标准 k-ε 模型，管壁面采用标准壁面函数法进行处理，由于把土壤和回填料都处理为均质、各向同性的固体，因此在土壤和回填料中仅仅为导热。若忽略土壤和回填料内的内热源，则其内的导热控制方程同样具体形式如公式所示[5]：

$$\frac{\partial(rT)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{C_p} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{C_p} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{C_p} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

其中：C_p为比热容，λ为导热系数，T为温度。

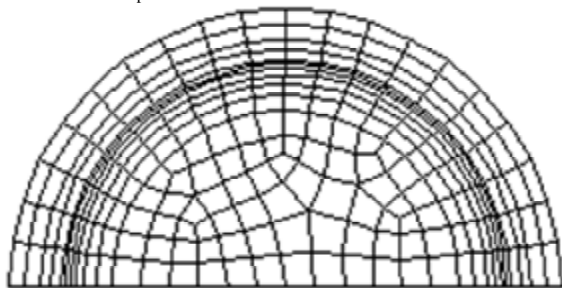


Figure 3. Grid schematic diagram of U-shape
图 3. U 型管横截面网格

3.3 初始及边界条件

3.3.1 初始条件

冬、夏季制热/冷工况：系统初始时，地埋管与回填材料、土壤处于平衡状态，即管内流体、管壁、回填材料和土壤的温度均为初始温度 20℃。

3.3.2 边界条件

U 型管进口采用定流速 V₀、定水温边界条件，出口采用质量出口边界条件，土壤最外层定义为绝热边界条件。流体与 U 型管、U 型管与回填材料，以及回填材料与土壤的接触面组成耦合面，通过能量方程将流体的流动和回填材料、土壤间的传热耦合起来进行计算。

4 均质与非均质模型对比分析

4.1 地埋管周围土壤轴向温度分布

图 4 为均质模型和非均质模型运行 10d 后钻孔壁面过余温度分布曲线。从图中可以看出，均质模型钻孔壁面过余温度分布均匀，在 0m 时为 8.86℃，在 100m 处钻孔壁面过余温度 8.52℃，非均质模型各层钻孔壁面过余温度分别为 10.3、9.45、8.0、9.4、8.1、9.0℃，第一层钻孔壁面过余温度最大，是因为第一层土壤导热系数较小，运行 10d 土壤温度扩散较其他层慢导致钻孔壁面温度过余温度较大；而第三层、第五层土壤导热系数较大，钻孔壁面温度较其它层小；第二层、第四层、第六层土壤导热系数相差不多，钻孔壁面过余温度也差不多。与均质模型相比，非均质模型钻孔过余温度最大为 10.3℃，与均质模型相差 1.8℃，说明不同岩土层热物性不同周围土壤温度场存在显著差异，而均质模型不能反映岩土体轴向温度非均匀的特点，忽略岩土体分层可能导致局部热堆积。

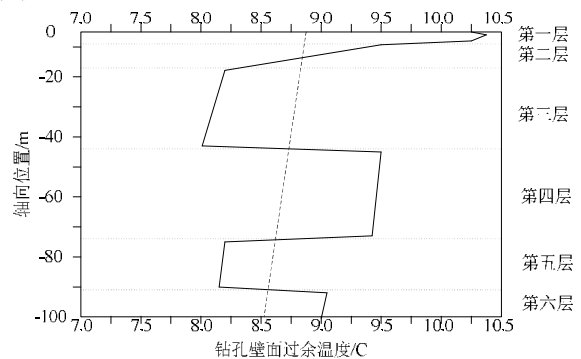


Figure 4. Excess surface temperature of borehole wall
图 4. 钻孔壁面过余温度

4.2 地埋管周围土壤径向温度分布

图 5 为地埋管换热器运行 10d 后，在 30m 深度处，径向位置温度分布图。从图中可以看出，两种模型土壤温度沿径向逐渐减小，在 0~0.1m 范围内土壤温度下降幅度较大，非均质模型径向位置温度 0.1m 处土壤温度大于均质模型土壤温度。均质模型热影响半径为 1.98m，非均质模型热影响半径为 2.2m，非均质模型影响半径大于均质模型。在实际工程中，影响半径应按照非均质模型分层土壤中影响半径最大的设计管间距。

4.3 停机运行温度恢复

通过模拟均质和非均质模型连续运行 8 小时，监测非均质模型的六个岩土层（5m、10m、30m、60m、80m、95m）钻孔壁面处的过余温度，随着热泵机组工作运行，均质和非均质模型的钻孔壁面温度升高，其中均质模型的钻孔壁面温度与非均质模型在 30m、80m 处的钻孔壁面过余温度相近。其中非均质模型 5m 处由于土壤导热系数较小，钻孔壁面过余温度较大，运行到第 8 小时时，钻孔壁面过余温度达到 8.933℃，10m、60m、95m 代表第二、四、六层，这三层土壤导热系数相差较小，运行 8 小时后 10m 处的钻孔壁面过余温度略大于 60m 和 80m 处；80m 处由于土壤导热系数较大，钻孔壁面过余温度升高 5.902，较 5m、10m、30m、60m、95m 处都低。

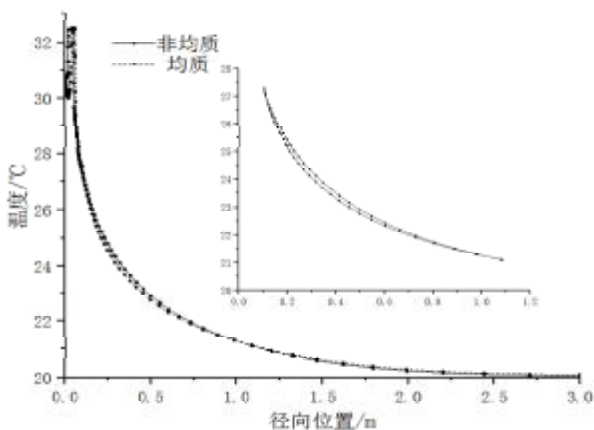


Figure 5. Radial temperature of soil
图 5. 土壤径向温度

当热泵机组停止工作运行后，钻孔壁面过余温度在停机运行前 4 小时恢复较快。非均质模型 30m 处

钻孔壁面温度恢复较快，均质模型与非均质模型在 80m 处温度恢复速率相同，非均质模型在 10m、60m、95m 温度恢复速率相同，5m 处温度恢复速率较慢，在停机运行 18 小时后钻孔壁面过余温度仍大于其他土壤层。忽略土壤分层，可能导致局部热堆积。当热泵机组停机运行工作后，大约经过 14 小时，土壤温度恢复速率趋于平缓，因此在地源热泵系统实际运行中，建议地源热泵系统间歇时间控制在 14 小时以上。

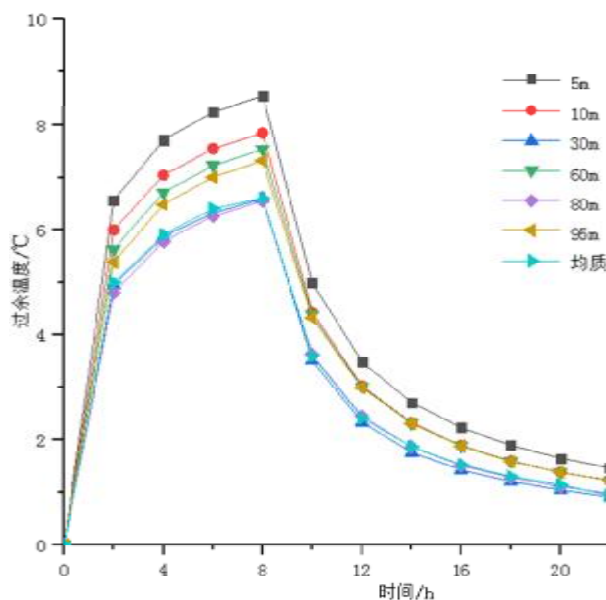


Figure 6. Radial temperature of soil
图 6. 钻孔壁面温度恢复

5 结论

均质模型不能反映不同土壤层轴向位置土壤温度分布情况，均质模型在轴向位置土壤温度分布均匀，非均质模型轴向位置温度与土壤层的热物性参数有关，导热系数较大的土壤层，土壤层过余温度较小，导热系数较小的土壤层对应的轴向位置温度较大；

均质模型的影响半径大于非均质模型，实际工程中，影响半径应按照非均质模型分层土壤中影响半径最大的设计。

土壤温度恢复与土壤热物性参数有关，均质模型土壤层沿轴向深度不变，而非均质模型在轴向经过不同土壤层，不同土壤层温度恢复速率存在差异，导热系数较大的土壤层温度恢复较快，忽略土壤分层，可能导致局部热堆积。

References (参考文献)

- [1] Chen J.H. A Study on Layered Heat Transfer Model of Vertical Double U-Tube Ground Heat Exchangers. ChongQing University, 2015.
陈金华. 垂直双 U 地理管换热器分层换热模型研究. 重庆大学, 2015.
- [2] Xue D.D. Research on Temperture Recovery Characteristics Influenced by Layered Rock-soil Body Around the Single U-tube. Taiyuan University of Technology, 2015.
薛迪迪. 岩土体分层结构对单 U 管换热器周围温度场恢复的影响研究. 太原理工大学, 2015.
- [3] Study on the Thermal and Physical Characteristics of Rock and Soil under Different Stratigraphic Conditions in the Main Urban Planning Area of ChongQing. Geological Team of Nanjiang Hydrogeology Engineering, ChongQing Geological Survey Bureau. 2012
重庆市主城规划区不同地层条件下岩土体热物性特征研究. 重庆市地勘局南江水文地质工程地质队, 2012.
- [4] Wang N., Yang X.F., Zhuang C.L. Numerical Simulation Analysis of Borehole Heat Exchanger in Layered Rock-Soil. Journal of Weapons and Equipment Engineering, 2017, 04, 194-197.
王楠, 杨小凤, 庄春龙. 岩土分层对地理管换热器传热影响的数值模拟. 兵器装备工程学报, 2017, 04, 194-197.
- [5] Yang Shiming. Heat transfer. Advanced education press, 1987:217.