

# 地质结构分层中地埋管换热特性研究

李明洪<sup>1</sup>, 李晓昭<sup>1</sup>, 王 斌<sup>1</sup>, 赵 鹏<sup>1</sup>, 董盛时<sup>1</sup>, 刘爱斌<sup>2</sup>

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023; 2. 江苏省地质矿产局第五地质大队, 徐州 221004)

**摘 要:** 依托徐州某工程场地, 分析分层地质结构体中地埋管的换热特征, 提出应考虑地层结构指导地埋管埋深, 并研究进水温度、循环水流速、运行方式与分层换热量的变化规律。结果表明, 地层分层研究在分析钻井埋管深度设计方面具有优势, 换热性能好的地层受循环介质温度、流速的影响变化最为显著; 间歇性运行能有效提高地层换热量, 换热性能好的地层增益效果佳。

**关键词:** 地源热泵; 地热能; 传热; 地埋管换热器; 热响应试验

**中国分类号:** TU831

**文献标志码:** A

## 0 引 言

地层分层换热特性是指导确定钻井深度和节约地源热泵系统初期投资的关键。在全球大力推行低碳经济的背景下, 发展清洁环保、能耗较低的地源热泵空调系统已是大势所趋。但阻碍这一新技术得以广泛运用的主要原因是其初期投资成本较传统空调系统偏高, 钻孔的投资成本占到整个地源热泵空调系统的 1/3~1/2<sup>[1]</sup>。目前对于确定打钻深度仍存在的问题是未考虑地埋管单位井深换热量随埋管深度变化的动态特征, 而地埋管换热器在不同的埋深下单位井深换热量差异较大<sup>[2]</sup>。因此换热器埋深必须根据分层换热量进行动态分析, 才能得到与负荷特征一致的合理深度。

以往对地埋管换热性能的研究忽略了岩土体热物性参数在深度方向的变化<sup>[3]</sup>, 将钻孔周围的地层视为均质体, 然而地层垂向变化对整个地埋管传热的影响是不容忽视的<sup>[4]</sup>, 因地下岩土体非单一均匀介质, 不同深度岩土体具有不同性质, 对地层进行分层模拟更接近地埋管实际的运行环境<sup>[5]</sup>。同时, 利用分层可有效避免热短路, 在有效管长内换热量达到最优<sup>[6]</sup>。在计算土壤中热作用距离时考虑地层分层特性, 可更准确研究土壤温度特性, 从而可有效避免管群设计中因管间距过小造成的热累积现象<sup>[7]</sup>。

虽然有部分学者对地埋管分层换热性能做过一些富有成效的工作, 但大多还是理论分析, 具有针对性的实际

应用分析甚少<sup>[8-9]</sup>。另外在工程应用方面, 传统热响应试验不能体现不同热物性地层在地埋管长度设计时的影响, 用分层换热量来指导地源热泵系统设计尚未普及, 且对于徐州地区地源热泵的分层换热性应用分析未见报道。本文针对徐州某典型地层 100 m 内土体分层的特点, 分析地下地质结构分层对地埋管分层换热性能的影响, 并定性分析进水温度、循环介质流速、运行方式对地埋管分层换热性能的影响。试验结果对指导确定钻孔的钻井深度, 地源热泵系统的优化运行具有参考价值。

## 1 地下结构分层及分层换热量

徐州市位于江苏北部, 地处苏豫皖鲁四省接壤处, 大地构造属于中朝准地台—淮河台坳—淮北台陷褶皱带—徐州—(宿县)弧形断褶带, 城市的建筑覆盖率较高区均处于第四纪厚度小于 100 m 区域, 地层岩性以灰岩为主。综合评价钻井成本和开发难度, 徐州地区具有良好的地埋管地源热泵开发利用条件<sup>[10]</sup>。

试验地点位于徐州市鼓楼区第二工程地质勘察院内。针对试验区地层结构, 自上而下大致可划分为 4 层: 第 1 层为杂填土, 表层 0.7 m 以上主要为砾及碎石, 其下成分以粉土夹碎石为主, 均匀性较差, 该层由于厚度较薄, 在实际试验中, 流过该层时循环介质的温差几乎为零, 故在分析地层轴向分层对地埋管换热性能时, 本文只考虑 0.7~100.0 m 的地层; 第 2 层以褐黄色黏土为主, 夹少量粉土, 干强度及韧性中-高等, 深度在地表以

收稿日期: 2017-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(41272314); 苏州科技计划项目(SYG201451); 欧盟 Marie-Curie 合作计划(FP7-IRSES-612665); 国家国际合作计划(2009DFA22680)

通信作者: 李晓昭(1968—), 男, 博士、教授, 主要从事岩土体热物理特性与地温能资源利用方面的研究。lixz@nju.edu.cn

下 0.70~9.85 m 处(地层 1);第 3 层深度划分在地表以下 9.85~52.60 m 处(地层 2),为薄层状构造灰岩,风化层度中等,其中 16.20~16.35 m 夹杂有灰色灰岩;第 4 层主要为青灰色弱-中风化灰岩,局部裂隙较为发育,深度为地表以下 52.6~100.0 m 处(地层 3)。地层分层结构如图 1 所示。

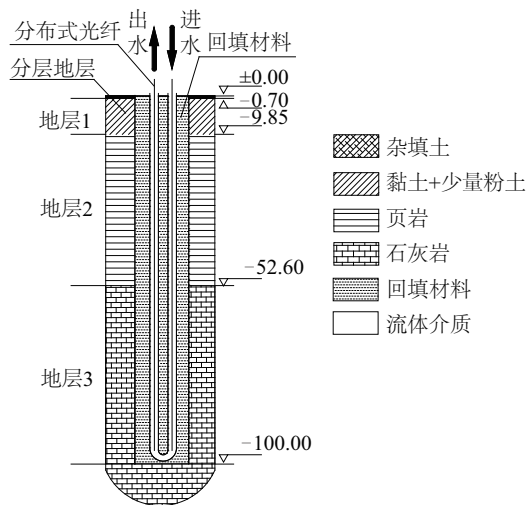


图 1 U 型竖直埋管孔地层结构图

Fig. 1 Structure diagram of U-shaped vertical buried pipe

为量化地埋管换热器分层换热性能,借鉴分层换热量的概念,定义为地层顶面以下与地层底面以下总换热量的差值<sup>[11]</sup>。如图 2 所示,第  $i$  层的分层换热量可表示为:

$$Q_i = cm[(T_{in,i} - T_{out,i}) - (T_{in,i+1} - T_{out,i+1})] \quad (1)$$

$$q_i = \frac{Q_i}{H_i} \quad (2)$$

式中,  $Q_i$  ——第  $i$  层换热量, W;  $c$  ——循环介质比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $m$  ——循环水质量流量,  $\text{kg/s}$ ;  $T_{in,i}$ 、 $T_{in,i+1}$  ——U 型地埋管进水支管水流在第  $i$  层顶面和底面的温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_{out,i}$ 、 $T_{out,i+1}$  ——U 型地埋管出水支管水流在第  $i$  层顶面和底面的温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $q_i$  ——第  $i$  层地层单位井深换热量, W;  $H_i$  ——第  $i$  层地层厚度, m。

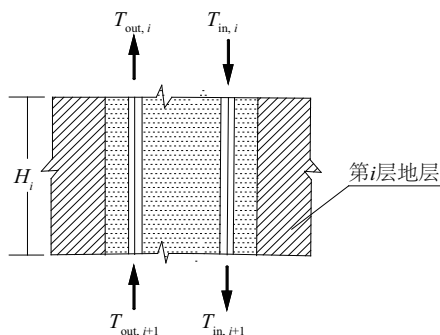


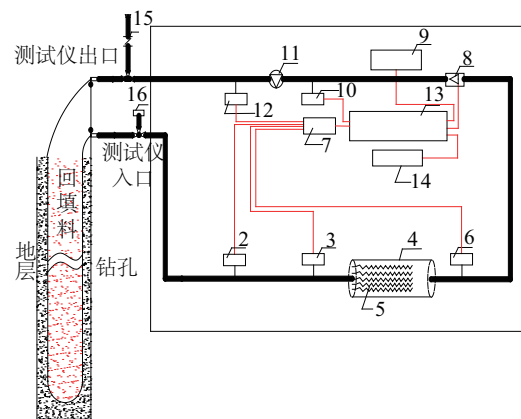
图 2 第  $i$  层地层结构示意图

Fig. 2 Stratigraphic structure of  $i$ -th layer

## 2 试验设计及试验结果

### 2.1 试验设计概况

试验孔于 2016 年 3 月完成,试验井深为 100 m,井口直径 110 mm,地埋管换热器采用垂直双 U 型管,材料为  $\Phi 25$  mm HDPE 管,底部采用地源热泵专用 U 型头,钻井采用砂土回填,土壤换热器中介质为水,保温材料采用厚度为 30 mm 的橡塑管,以减少水平管道散热。本次试验热响应测试装置采用本课题组自主研制的专业热响应测试仪,系统构造及原理如图 3 所示。为了监测地埋管轴向温度分布,在钻井中垂直双 U 型管中放入  $\Phi 5$  mm 分布式光纤传感器,每隔 0.2 m 设置一组温度测点,数据自动采集时间间隔为 60 s。



1. 三通阀 2. 进水温度传感器 3. 调压器 4. 加热水箱
5. 不锈钢加热器 6. 交流电接触器 7. 信息采集模块
8. 流量计 9. 触摸屏 10. 变频器 11. 循环水泵
12. 出水温度传感器 13. PLC 14. GSM 通讯模块
15. 补水回水阀 16. 排气阀

图 3 热响应设备系统构造及原理

Fig. 3 Principle and system of geothermal response test apparatus

### 2.2 地层分层换热量

在制冷工况下采用恒温法进行测试,保持进水温度为  $35^\circ\text{C}$ ,循环流量为  $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ,连续加热 48 h。

试验测得地层 1、地层 2、地层 3 的分层单位井深换热量分别为 35.6、43.99、55.54 W/m,室内实测的平均导热系数分别为 1.43、1.92、2.42  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。在该地质条件下,平均导热系数越高的地层其单位井深换热量越高。但地层分层换热量同时受到地质结构、水分迁移、地下水运移影响,地埋管换热器在地层中的换热是一种复杂的传热过程,室内测得的平均导热系数无法考虑地层的实际情况,因此现场热响应试验必不可少。徐州市鼓楼区地下岩土层虽自上而下传热性能由弱变强,下层

石灰岩换热性能最佳,但石灰岩硬度较高,钻进难度大。因此确定钻孔深度时应结合分层换热量和场地设备条件综合考虑。

### 2.3 地层分层时钻进深度分析

将地下岩土体视为均质体无法反映不同结构地层的换热性能,钻井深度需根据各层换热量动态分析而确定,试验区钻井深度和单位井深换热量关系如图 4 所示。由此可见,埋管单位井深换热量随钻井深度的变化而变化。传统热响应测试只能得到整个钻孔深度的平均单位井深换热量,而不能体现不同热物性地层在埋管换热中起到的作用。在该试验区地层条件下,由于地下岩土层自上而下换热性能由弱变强,故单位井深换热量随深度的增加而增加。但并非单位井深换热量都随钻井深度的增加而增加,因为在钻井深度方向上,埋管竖向岩土体的水文地质条件(地层各层岩土体性质、含水层位置、地下水流动方向等)各有差异,因而优劣换热层的不同分布,也会影响埋管深度的优化选取。因此,在钻孔埋管深度设计时,应考虑不同地层换热量差异,有必要进行地层分层热响应试验,为最佳的钻井深度提供指导。

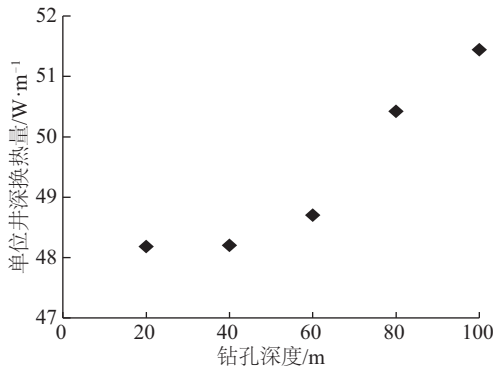


图 4 单位井深换热量随钻孔深度变化

Fig. 4 Unit borehole length heat exchange capacity with borehole depth

## 3 分层换热性能影响因素分析

在地埋管运行工况下,循环介质流量、循环介质温度、间歇运行方式随着负荷需求动态变化,在不同的运行条件下,不同地层条件的埋管换热器性能仍有优劣之分。研究运行因素对埋管分层换热特性的影响,对埋管合理开发深度的确定是必要的。

### 3.1 进水温度

在制冷工况下,埋管换热器进水口温度分别设置为 27、31、35、39 °C,流速均为 1.0 m/s,连续加热 48 h 后,测试结果如图 5 所示。

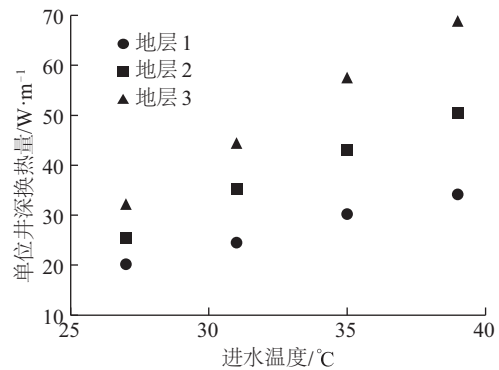


图 5 不同地层的单位井深换热量随进水温度的变化

Fig. 5 Unit borehole length heat exchange capacity with inlet temperature at different geological structure

由图 5 可知,随着进水温度改变,在不同地层中,单位井深换热量均呈近似线性的变化趋势,且单位温度变化换热量随着地层导热性越好而越高(地层 1<地层 2<地层 3)。这主要是由于埋管换热器流体温度与周围岩土体的传热温差越大,在流速相同的情况下,循环介质与周围换热层中温度差越大,使得埋管换热器的各层热交换量越大,而导热性越高的地层传热性能越好,单位温度变化换热量也就越高。但夏季进水温度越高,埋管换热器各层承担的换热量就越大,出水温度也随之增加,经过冷凝器之后,导致埋管换热器的进水温度持续升高,降低地源热泵系统能效比  $EER$ 。在地源热泵系统设计和运行中,应选择合适的进水温度,以保证热泵机组的高效运行。

### 3.2 循环水流速

保持进水口温度恒为 35 °C,流速分别设置为 0.6、0.8、1.0、1.2 m/s,均连续加热 48 h,各层的单位井深换热量及进出水口温差随着循环水流速的变化如图 6 所示。

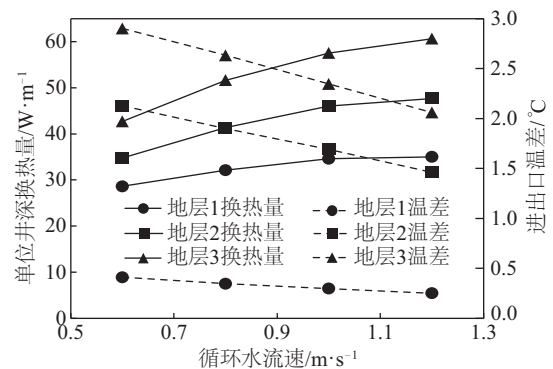


图 6 不同地层的单位井深换热量及进出水口温差随循环水流速的变化

Fig. 6 Unit borehole length heat exchange capacity and inlet and outlet temperature difference with different flow velocity at different geological structure



随着流速的增加,地层1、地层2、地层3的单位井深换热热量升高,升高幅度逐渐变缓,各分层地层的换热温差逐渐减小。这是由于对于确定的管径,地埋管换热器中循环水流速的大小对应循环介质的流量大小,循环介质流经各层的流量越大,各层换热量越高。与此同时,管内流速过高,循环介质在地埋管内停留的时间就越短,因而无法与周围换热层进行充分的热交换。这表明循环介质的流速选择并非越高越好,也不是越小越好;流量过小,各层地层换热量过低;而流量太大时,循环介质换热不充分,导致地埋管换热效率降低,同时增加水泵的功耗。

### 3.3 运行方式

为研究地埋管换热器在日循环控制机制下的运行情况,本次热响应试验启停时间各为12 h,时间比为1:1,在恒温35℃,流速为1.0 m/s时,各地层的单位井深换热热量如图7所示。

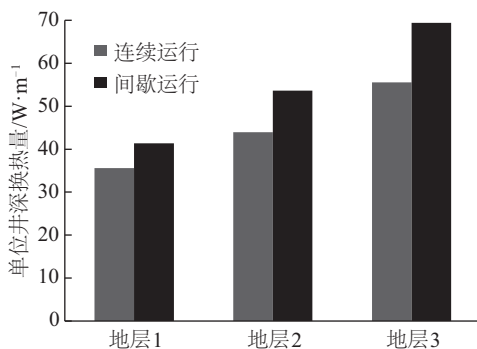


图7 间歇与连续运行下不同地层的单位井深换热热量

Fig. 7 Borehole heat exchange capacity with different operation mode at different geological structure

在间歇运行条件下,地层1、地层2、地层3的平均每延米换热量分别为41.3、53.63、69.44 W/m,与连续运行相比较分别提高了16.2%、21.9%、25.0%。这是由于在系统运行过程中,地埋管中循环介质向周围土壤进行(冷)热交换,随着时间的增加,土壤不断吸收储存热量使其温度升高(降低),严重时甚至产生热(或冷)堆积效应,使得地埋管换热器的换热效率大幅降低,在系统关闭运行时,地埋管换热器的周围土壤又向其邻近土壤进行换热,土壤温度更接近原始地温,利于下一周期地埋管换热器的排热,使得地埋管换热器换热性能显著提高。换热性能越好的地层,其热储能和热传导的性能更好,间歇性运行在该层中换热量增益效果最显著。

在实际设计过程中,应根据地源热泵空调系统负荷特征合理设置间歇性运行周期,最大限度地利用土壤储能和热传导的能力,以提高地埋管换热器的单位井深换

热量。

## 4 结论

1)徐州市鼓楼区地下岩土层自上而上传热性能具有由弱变强的规律,地下100 m以内单位井深换热热量随深度增加而增加。

2)单位井深换热热量随埋管深度动态变化,因而,在钻井埋管深度设计时,有必要进行地层层状换热性分析,以利用不同地质结构分层换热性能的差异,为最佳钻井深度提供参考。

3)换热性能好的地层受循环介质温度、流速的影响变化最为显著,只依据地层换热优劣作为地埋管开挖的指标是片面的,应结合实际工况因素变化的情况进行考虑。

4)间歇运行能有效提高地层换热量,换热性能好的地层增益效果佳。

由于地下结构具有复杂性,在实际工程中,应结合工程项目重要性和实际情况,掌握精确的地质结构、水文条件及岩土热物性,合理地进行地层层状划分。同时,在运行过程中,确定合理的运行参数,充分利用不同结构分层岩土层的换热性能,这对地源热泵经济性、设计质量和运行性能都有极其重要的意义。

### [参考文献]

- [1] 方亮,张方方,方肇洪.关于地埋管换热器热响应试验的讨论[J].建筑热能通风空调,2009,28(4):48-51.
- [2] 王勇,刘方,付祥钊.基于层换热理论的竖直地埋管换热器设计方法[J].暖通空调,2007,37(9):35-39.
- [3] MOGENSEN P. Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages [C]// Proceeding of International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice Stockholm, Stockholm, Sweden, 1983: 652-657.
- [4] SIGNORELLI S, BASSETTI S, PAHUD D, et al. Numerical evaluation of thermal response tests[J]. Geothermics, 2007, 36(2): 141-166.
- [5] 陈金华. 竖直双U地埋管换热器分层换热模型研究[D]. 重庆:重庆大学,2015.

- CHEN J H. A Study on layered heat transfer model of vertical double u-tube ground heat exchangers[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [6] 盛建军, 刘金祥, 戴霖珊, 等. 基于热响应测试的分层土壤埋管换热器数值模拟研究[J]. 建筑节能, 2014, 42(7): 45-48.
- SHENG J J, LIU J X, DAI L S, et al. Numerical simulation of ground heat exchanger in layer soil based on the thermal response test[J]. Building energy efficiency, 2014, 42(7): 45-48.
- [7] 张琳琳, 赵蕾, 杨柳. 分层土壤中竖直埋管换热器传热特性[J]. 化工学报, 2015, 66(12): 4836-4842.
- ZHANG L L, ZHAO L, YANG L. Heat transfer characteristics of vertical borehole heat exchanger in stratified soils [J]. CIESC journal, 2015, 66 (12) : 4836-4842.
- [8] 王泽生, 颜爱斌, 郭进京. 地下层状结构土体中埋管换热器的传热分析[J]. 太阳能学报. 2009, 30(2): 188-192.
- WANG Z S, YAN A B, GUO J J. Heat transfer analysis of underground heat exchange in multi-soul beds[J]. Acta energiae solaris sinica, 2009, 30(2): 188-192.
- [9] 霍侦侦. 竖直埋管换热器分层换热模型分层方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- HUO Z Z. Research on the tiered approach on layered heat transfer model of vertical ground heat exchanger [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016
- [10] 翟如伟, 刘爱斌, 景佳俊. 江苏徐州城市规划区浅层地温能研究[J]. 西部资源, 2017 (2): 97-103.
- ZHAI R W, LIU A B, JING J J. On shallow geothermal energy investigation in urban planning zone of Xuzhou in Jiangsu[J], Western resources, 2017(2): 97-103.
- [11] 杨卫波. 一种地下岩土分层热物性现场热响应测试方法: CN 102721722 A[P]. 2012.
- YANG W B. Field thermal response testing method for layered thermal physical properties of underground rock and soil: CN 102721722 A[P]. 2012.

## STUDY ON HEAT TRANSFER CHARACTERISTIC OF VERTICAL BOREHOLE HEAT EXCHANGER AT DIFFERENT GEOLOGICAL STRUCTURE

Li Minghong<sup>1</sup>, Li Xiaozhao<sup>1</sup>, Wang Bin<sup>1</sup>, Zhao Peng<sup>1</sup>, Dong Shenshi<sup>1</sup>, Liu Aibin<sup>2</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Jiangsu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources Fifth Geological Brigade, Xuzhou 221004, China)

**Abstract:** Based on an engineering site in Xuzhou, the heat transfer characteristic of buried pipes in stratified geological structures is analyzed in this paper, and this paper puts forward that the heat transfer difference of geological structure should be taken into account in the guidance of length of buried pipes. In addition, the discipline of inlet temperature, circulating water flow velocity and operating mode with borehole heat exchange capacity are analyzed. The results show that study on heat transfer characteristic in geological structure has some advantages in the analysis of drilling depth, the strata with good heat transfer performance is the most easy-affected by inlet water temperature and velocity of the circulating water, intermittent operation could effectively improve the heat transfer capacity of the buried pipes, and the geological structure with good heat transfer performance changes more significant.

**Keywords:** ground source heat pumps; geothermal energy; heat exchanger; ground heat exchanger; thermal response test