

苏州某地源热泵项目竖直地埋管 岩土热响应试验与分析

黄旺来,余跃进,夏学鹰,陆勇祥

(南京师范大学能源与机械工程学院,江苏 南京 210042)

[摘要] 以苏州地区某地块项目地源热泵工程为依据,采用恒热流方法对现场单 U 和双 U 型地埋管分别进行了岩土热响应试验. 通过该试验获得了该项目现场地质情况和岩土体热物性参数,同时计算出各种工况下地埋管换热性能并进行分析,得出该地区的地下土壤平均导热系数为 $2.02 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,双 U 型地埋管换热器比单 U 型地埋管换热器的换热性能约高 15%.

[关键词] 单 U 型竖直地埋管,双 U 型竖直地埋管,恒定热流法,岩土热物性,换热性能

[中图分类号] TK523 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2016)04-0040-06

Geotechnical Thermal Response Experiment and Analysis of Vertical Buried Pipe of Ground-Source Heat Pumps Project in Suzhou

Huang Wanglai, Yu Yuejin, Xia Xueying, Lu Yongxiang

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: This paper uses the constant heat flux method for thermal response test of single U and double U type buried pipe respectively which is based on ground source heat pump engineering project in Suzhou. Through this experiment, the geological condition of the project and the thermal physical parameters of rock and soil are obtained. At the same time, the performance of the ground heat exchanger under various operating conditions are calculated and analyzed. It is concluded that the average thermal conductivity of the soil in this area is $2.02 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, and that the heat exchanger performance of double U pipes is about 15% higher than that of single U pipes.

Key words: single U type vertical buried pipe, double U type vertical buried pipe, constant heat flux method, thermal properties of the rock-soil, heat transfer performance

近年来,随着我国经济水平的不断提高,用空调系统对室内环境进行冷热调节已经成为普遍的需求. 目前在国内大力推行节能减排的形势下,地源热泵作为一项节能环保、热稳定好、安全可靠的空调技术,发展迅速^[1]. 但是由于不同地区的地质、气候等条件存在很大的差异,设计人员只能参考某种岩土导热系数,导致设计系统不规范,机组与地埋管换热器不匹配,给地源热泵系统的长期稳定运行埋下了很多隐患,增加了系统的能源消耗^[2]. 地源热泵系统换热效果的关键在于地埋管的换热性能及岩土热物性准确测量. 而影响地埋管换热性能的因素主要有:埋管形式、间距、孔深、回填材料、岩土热物性以及管内流体流速、换热温差等^[3]. 故应针对不同地区的实际工程进行地埋管岩土热响应试验与分析,为该地区的地源热泵系统的工程设计提供技术数据.

1 试验原理及系统介绍

1.1 岩土热响应试验原理

岩土热响应试验系统^[4]是一个闭式的循环系统,它直接将传感器直接安装在地下埋管换热器上,综合考虑了深度方向及水平方向各种因素的影响,通过地下埋管换热器与周围岩土之间的热交换,并记录相

收稿日期:2016-07-28.

通讯联系人:余跃进,教授,研究方向:地源热泵技术. E-mail:dlkj@njnu.edu.cn

关温度数据,根据收集数据进行分析从而得到岩土导热系数等热物性参数.

1.2 热响应试验系统介绍

将仪器的循环管路与试验孔内的 HDPE 管路连接成闭合环路,通过仪器内的循环水泵驱动环路内的换热介质的循环,电加热器持续加热换热介质,为试验孔内的地埋管提供恒定的热流,并记录地埋管内换热介质的进出口温度、流量、压力和电加热器的功率等数据,用于后期计算分析岩土热物性参数和地埋管换热器的取放热量参考值. 图 1 为岩土热响应试验系统原理图.

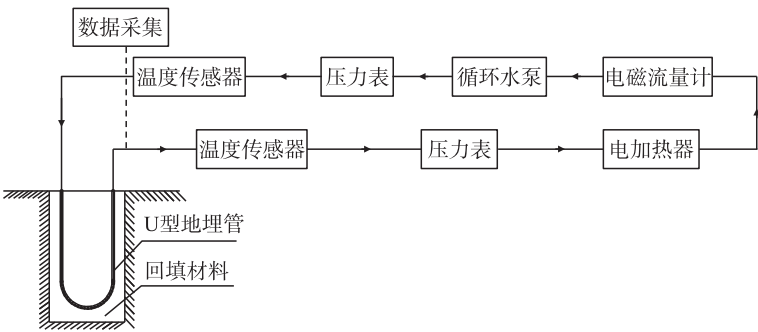


图 1 岩土热响应试验系统原理图
Fig. 1 Schematic diagram of the geotechnical thermal response test system

2 试验方法及步骤

2.1 试验钻孔

根据该项目相关规范的要求,钻探试验孔两口,两口钻孔分别采用单 U 和双 U 型埋管形式,见图 2. 深度均为 100 m,其中在一口井的钻进过程中进行取芯并记录岩层情况. 试验孔和地埋管安装参数见表 1.

2.2 试验方法

采用恒定热流法进行岩土热响应试验,并记录地埋管换热介质进出口温度及流量等数据,再利用反算法得出岩土热物性参数,最后根据适当的传热模型模拟地下岩土以及地埋管回路在一定时间内的温度变化,并相应地采用相关软件或按设计规范计算得到该地区的地源热泵系统每延米的换热量参考值和所需钻孔的总长度^[5].

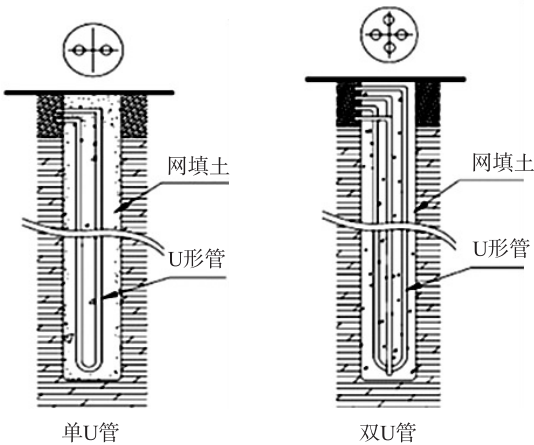


图 2 单、双 U 埋管示意图
Fig. 2 Schematic diagram of single and double U buried pipes

表 1 试验孔和地埋管安装参数
Table 1 Installation parameters of test hole and pipe

埋管形式		单 U	双 U
试验孔	孔数	1	1
	有效深度 (m)	100	
	单孔下管全长 (m)	200	400
	回填	人工原浆回填,上部黄沙补充	
	安装方法	机械自重下管	
PE 管材	钻孔直径 (mm) (钻机钻头口径)	135 ~ 150	
	外径 (mm)	32	25
	壁厚 (mm)	3.0	2.3
	材质	高密度聚乙烯	
连接管段	供水管段长度 (m)	1.0	
	回水管段长度 (m)	1.0	
	连接管段全长 (m)	2.0	
	保温材料	25 mm 厚橡塑保温材料	

2.3 试验步骤

首先,在将要埋设地下换热器的现场钻井,按要求在垂直 U 型管上布置热电阻,再把这个垂直 U 型管埋到钻井中,在垂直 U 型管周围埋回填材料. 然后测量土壤的初始平均温度. 在加热器先不启动的情况下,让试验装置水泵启动循环 30 min 左右,观察流体进出口温度的变化情况,当出口温度稳定时可认为是该地下土壤初始平均温度. 然后开始进行土壤热物性试验,保证加热功率恒定并连续运行 48 h,通过线热源模型和拟合曲线分析计算土壤的导热系数、比热容、钻孔热阻等. 最后进行地埋管换热器换热性能的试验,通过改变加热功率和循环水的流量,保证地埋管进出口水温相对恒定,并由此测量地埋管换热器的放热量和取热量^[6].

3 地质概况

该项目在苏州市某地区,所处地区地貌类型属长江三角洲冲积平原,为河流冲积,其微地貌为荒地,整体地形平坦. 在钻井 100 m 范围内其中素填土厚约 2.0 m,粉质粘土、粘土、砂质粉土和粉砂层分布.

地下水主要为松散岩类孔隙水,孔隙水主要贮存于钻孔浅层的各个地层中,水量较丰富,其补给来源主要为大气降水、地表水、区域水系. 排泄方式为水平渗流及地面蒸发等.

从钻探过程中可以看出,该项目地质结构较简单,主要构成粉质粘土、粉土及粉砂层. 总体钻孔难度一般,注意护壁,以防塌孔. 钻井深度可取 100 m,最终埋管深度的选择还需要综合考虑建筑负荷、埋管面积、单位埋管换热量等因素.

综上所述,评定该项目地源热泵钻孔实施的难度为一般,建议施工中采用普通旋扭式钻机进行施工.

4 计算理论模型

本次测试的理论模型是线热源模型^[7]. 通常将大地看成是一块半无限大的介质,把与大地进行热交换的钻井看成是位于此半无限大介质其中的一个线形热源,沿长度方向传热量忽略不计,此换热过程是一个非稳态过程,基本公式为:

$$T_f - T_g = \frac{Q_1}{2\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta, \quad (1)$$

式中, T_f 为供回水管的理论平均温度, T_g 为岩土初始平均温度, r 为线热源半径, t 为传热时间, Q_1 为单位长度钻孔换热量, λ 为岩土的导热系数, a 为岩土的导温系数.

当运行较长时间后, $\frac{r^2}{4at}$ 变得很小, 式(1)可近似表示为式(2).

$$T_f - T_g = Q_1 R + \frac{Q}{4\pi\lambda H} \left[\ln\left(\frac{4a}{r}\right) - C \right] + \frac{Q}{4\pi\lambda H} \ln t, \quad (2)$$

式中, R 为循环液与钻孔间的总换热热阻, Q 为钻孔的总换热量, 且 $Q = Q_1 H$, H 为钻孔深度, C 为欧拉常数, $C = 0.577 2$.

钻孔的换热量:

$$Q = MC_p(t_j - t_c), \quad (3)$$

式中, M 为循环液的质量流量, C_p 为循环液的定压比热容, t_j 为循环液的进口温度, t_c 为循环液的出口温度.

当散热率不变时, 式(2)为单变量 $\ln t$ 等式, 可简化为 $y = kx + b$ 形式, 且

$$k = \frac{Q}{4\pi\lambda H}, \quad (4)$$

$$b = Q_1 R + \frac{Q_1}{4\pi\lambda H} \left[\ln\left(\frac{4a}{r}\right) - C \right]. \quad (5)$$

由式(4)可得岩土导热系数计算式为:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi k H}, \quad (6)$$

式中, k 为地埋管换热器进出口平均水温与时间对数拟合曲线的斜率。

5 试验结果与数据分析

5.1 岩土初始平均温度

岩土初始平均温度的试验方法为采用单水泵无加热功率循环,记录地埋管进出口温度,待稳定后取进出口温度的平均值作为岩土体初始温度^[8]。

试验装置仅开启水泵启动循环,系统无加热功率循环,观察地埋管进出口水温度,由图 3、图 4 可知,分别在前 30 min 内、前 10 min 内,进出口温度波动较大,之后随着循环的进行,地埋管进出水温度稳定,此时进出口平均温度可认为是该地的岩土初始平均温度。在此实测单 U 型地埋管换热器岩土体初始平均温度为 18.5 °C,双 U 型地埋管换热器岩土体平均温度为 18.9 °C,在此取两者平均温度 18.7 °C 为该项目岩土体初始温度值,此温度与当地全年平均气温相当,可代表项目所在地以及周围区域的岩土初始平均温度状况,对地埋管地源热泵系统的冬季取热与夏季散热均较有利。

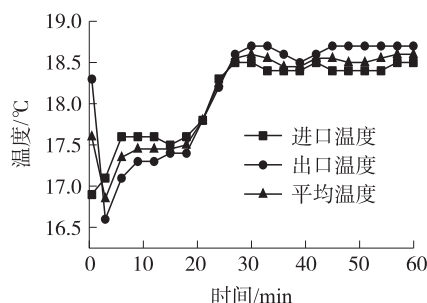


图 3 单 U 型地埋管换热器岩土初始平均温度

Fig. 3 The geotechnical initial average temperature of single U type buried pipe heat exchanger

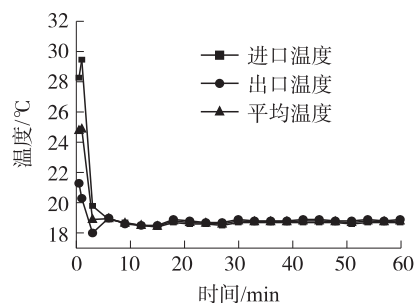


图 4 双 U 型地埋管换热器岩土初始平均温度

Fig. 4 The geotechnical initial average temperature of double U type buried pipe heat exchanger

5.2 岩土体热物性参数

根据单、双 U 型地埋管换热器放热工况下实测的进出口水温数据,采用最小二乘法绘制拟合曲线,如图 5-6 所示,横坐标为时间的对数值,纵坐标为地埋管进出水平均温度相对岩土体初始温度的温升,根据该曲线线性拟合得到斜率,根据线热源模型反推出岩土体的导热系数。在曲线上取线性变化的数据段对其拟合分别得到单 U 试验井地埋管拟合线的斜率为 2.12,单 U 试验井地埋管拟合线的斜率为 2.42。根据线热源模型可以得到单、双 U 型地埋管换热器的土壤导热系数分别为 1.97 W/(m·K) 和 2.07 W/(m·K)。由于双 U 型地埋管增加了传热面积,导致传热热阻降低,因此双 U 型比单 U 型地埋管导热系数较高。

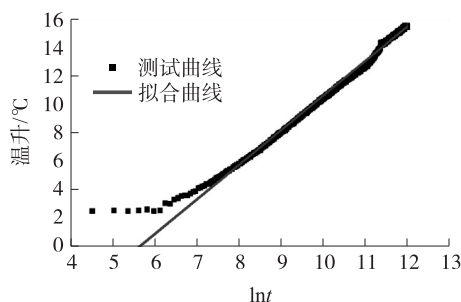


图 5 单 U 型地埋管换热器试验结果与理论拟合图

Fig. 5 Experimental results and theoretical fitting of single U type ground heat exchanger

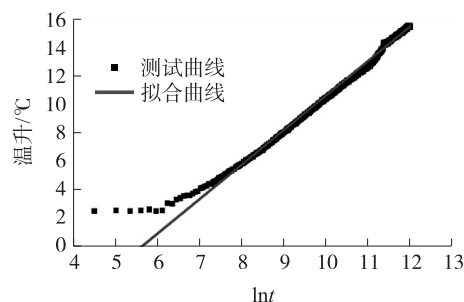


图 6 双 U 型地埋管换热器试验结果与理论拟合图

Fig. 6 Experimental results and theoretical fitting of double U type ground heat exchanger

根据线热源模型和图 5-6 的拟合曲线,将实验数据进行分析计算得到岩土热物性参数见表 2。

由表 2 计算结果可知该项目的岩土平均导热系数为 2.02 W/(m·K),适宜采用地埋管地源热泵系统作为空调系统的冷热源。

表 2 岩土热物性参数分析计算
Table 2 Analysis and calculation of geotechnical thermo-physical parameters

埋管形式	单 U	双 U	埋管形式	单 U	双 U
钻孔深度(m)	100	100	导热系数(W/(m·K))	1.97	2.07
试验时单位延米加热量(W/m)	52.58	63.05	平均导热系数(W/(m·K))	2.02	2.02
拟合斜率	2.12	2.42	体积热容(kJ/(m³·K))	2 633	2 766
钻孔热阻((m·K)/W)	0.092 7	0.042 8			

5.3 单、双 U 型地埋管换热性能试验及分析

地埋管换热器的热阻和分为钻孔内热阻和钻孔外热阻两部分,钻孔内热阻由循环液热阻、PE 管热阻、回填料热阻三部分,主要影响因素有循环液的流速、回填料的导热系数;钻孔外热阻的主要影响因素有岩土体的热物性参数、制冷制热时间、制冷制热运行份额等,这些影响因素对地埋管换热性能的影响不可忽略. 对该地块项目现场的单、双 U 井分别进行了放热性能和取热性能试验^[9]. 单、双 U 型地埋管换热器内换热介质进出口温度和平均温度变化如图 7-8 所示.

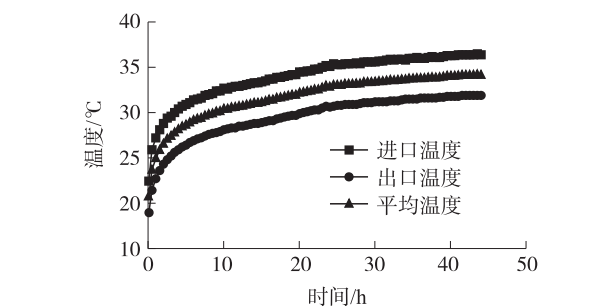


图 7 单 U 型地埋管换热介质进出口温度和平均温度
Fig. 7 Inlet and outlet temperature and average temperature of heat exchange medium of single U type buried pipe

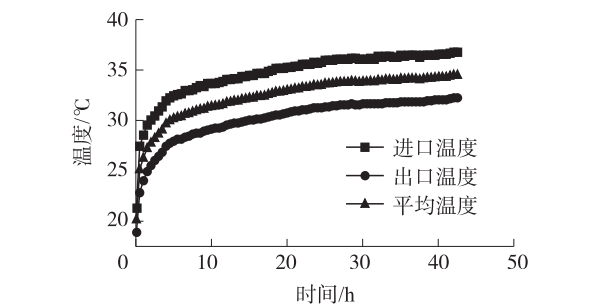


图 8 双 U 型地埋管换热介质进出口温度和平均温度
Fig. 8 Inlet and outlet temperature and average temperature of heat exchange medium of double U type buried pipe

从图 7 和图 8 可以看出,在试验开始时,竖直 U 型地埋管内换热介质进出口温度上升得较快,因为此阶段岩土的温度处于初始平均温度,与地埋管内换热介质的温差小,向周围岩土散热量较小,而电加热功率保持恒定,导致换热介质的温升较快,而随着换热的继续进行,地埋管与周围岩土的温度逐步趋向稳定,此时地埋管进出口温差保持稳定,满足试验要求的恒定热流条件,也说明该地埋管换热器的换热能力是较稳定的^[8]. 由测试数据分析计算得到单、双 U 试验井的结果如表 3 所示. 得出单 U 试验井地埋管在夏季放热工况下,稳态时管内平均流速约为 0.52 m/s,单位延米的放热量为 56.48 W/m,单位延米的取热量为 37.22 W/m. 双 U 试验井地埋管在供水温度 35 ℃测试工况下,稳态时管内平均流速约为 0.51 m/s,单位延米的放热量为 65.34 W/m,单位延米的取热量为 43.13 W/m.

根据实际试验情况,并参考单双 U 井单孔地埋管换热器放热量得到该项目单孔地埋管换热器的换热能力值,分别给出该项目单、双 U 型地埋管换热器相关数据如表 3 所示.

表 3 地埋管换热器换热量试验结果
Table 3 The ground heat exchanger heat transfer test results

埋管形式	循环水流量/(m³/h)	循环水流速/(m/s)	埋管深度/m	每延米放热量/(W/m)	每延米取热量/(W/m)
单 U	1.0	0.52	100	56.48	37.22
双 U	1.2	0.51	100	65.34	43.13

6 结语

- (1)通过对苏州某地块项目单 U 和双 U 型地埋管换热器的热响应试验,测得该项目岩土体初始温度值为 18.7 ℃,此温度与当地全年平均气温相当,可代表项目所在地以及周围区域的岩土初始平均温度状况,对地埋管地源热泵系统的冬季取热与夏季散热均较有利.
- (2)根据试验结果对比分析,分析得到该地区的地下土壤平均导热系数为 2.02 W/(m·K),双 U 型地埋管换热器比单 U 型地埋管换热器换热性能约提高 15%. 考虑该项目地埋管占地面积、钻孔经济性,建议该项目采用双 U 型地埋管换热器.

[参考文献] (References)

- [1] LEE C, LAM H. Developing multiple regression models from the manufacturer's ground-source heat pump catalogue data[J]. Renewable energy, 2016(95):413-421.
- [2] 武瞳, 刘钰莹, 董喆, 等. 地源热泵的研究与应用现状[J]. 制冷技术, 2014(4):71-75.
WU T, LIU Y Y, DONG Z, et al. The research and application of ground source heat pump[J]. Refrigeration technology, 2014(4):71-75. (in Chinese)
- [3] 司子辉. 岩土热物性测试影响因素的研究[J]. 暖通空调, 2014, (5):114-118.
SI Z H. Study on the influencing factors of thermal physical properties of rock and soil[J]. HVAC, 2014(5):114-118. (in Chinese)
- [4] 孟庆龙, 官燕玲. 土壤源热泵热响应测试研究进展及分析[J]. 西安建筑科技大学学报, 2015(1):125-135.
MENG Q L, GUAN Y L. Research progress and analysis of thermal response test of soil source heat pump[J]. Journal of Xi'an university of architecture and technology, 2015(1):125-135. (in Chinese)
- [5] GB 50366—2005 地源热泵系统工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
GB 50366—2005 Code for GSHP systems engineering technical[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [6] 陈海洋. 地源热泵 U 形竖直地埋管热响应试验及分析[J]. 暖通空调, 2012(4):76-78.
CHEN H Y. Thermal response test and analysis of U-type vertical pipe of GSHP[J]. HVAC, 2012(4):76-78. (in Chinese)
- [7] 张景欣, 彭冬根. 基于线热源模型的垂直 U 型埋管换热器的换热分析[J]. 流体机械, 2015(4):75-79.
ZHANG J X, PENG D G. Analysis of heat transfer of vertical U type heat exchanger based on line heat source model[J]. Fluid machinery, 2015(4):75-79. (in Chinese)
- [8] 王华军, 齐承英. 地下热响应实验中土壤初始温度的探讨[J]. 暖通空调, 2010, 40(1):95-98.
WANG H J, QI C Y. Discussion on the initial ground temperature during thermal response test[J]. HVAC, 2010, 40(1):95-98. (in Chinese)
- [9] 丁永昌, 刁乃仁. 不同气候区岩土热物性测试分析[J]. 节能, 2015(9):71-73.
DING Y C, DIAO N R. Test and analysis of thermal physical properties of rock and soil in different climatic zones[J]. Energy conservation, 2015(9):71-73. (in Chinese)

[责任编辑: 陈 庆]