

文章编号: 2095-1922(2011)05-0931-05

地源热泵地埋管换热器热响应测试分析

李慧星 李国柱 陈其针 付永亮 张 剑

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院 辽宁 沈阳 110168)

摘 要: 目的 获得可靠的岩土综合导热系数,为地源热泵地埋管换热器提供正确的设计参数. 方法 以沈阳近郊低山丘陵地区某地源热泵工程为例,基于岩土热响应的原理,建立了现场测试岩土导热系数的方法,阐述了热响应测试的理论基础,利用线热源模型分析和计算了测试数据. 结果 该低山丘陵地区的岩土具有较好的导热能力,两处测井的岩土导热系数分别为 $2.12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $2.33 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;与推荐的相似岩土导热系数比较显示,测试结果在合理范围. 结论 岩土导热系数是正确设计地埋管换热器的先决条件,现场岩土热响应测试可以获得可靠的岩土综合导热系数;经过分析计算,测试地点的岩土综合导热系数为 $2.23 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,具有良好的热传导能力;测试和分析方法可为相似工程提供应用借鉴.

关键词: 地源热泵系统;地埋管换热器;热响应测试;导热系数

中图分类号: TK124; TK529

文献标志码: A

Analysis of Thermal Response Test for Borehole Heat Exchangers of Ground Source Heat Pump System

LI Huixing LI Guozhu CHEN Qizhen FU Yongliang ZHANG Jian

(School of Municipal and Environment Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The paper aims to measure a reliable ground thermal conductivity to provide a basic parameter for proper designs of borehole heat exchangers. Taking a Ground Source Heat Pump (GSHP) project which is constructed in a hilly region of Shenyang suburbs as an example, based on the principle of soil thermal responses, the research sets up an in-situ testing method for the ground thermal conductivity, and reviews the theory behind the thermal response test. Moreover, it analyses and calculates the test data using the line-source model. The results show that this hilly region has a better heat capacity, and the ground thermal conductivity of the two pilot boreholes are $2.12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ and $2.33 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Compared with the recommend values of similar rock-soil, test results indicate that the test values are reliable. The ground thermal conductivity is a prerequisite for correct designs of borehole heat exchangers. The in-situ thermal response test can obtain a reliable ground thermal conductivity. The average ground thermal conductivity of the test site is $2.23 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Based on the thermal response test for borehole heat exchangers of GSHP in the hilly region, this research provides a reference for similar practices.

Key words: ground source heat pump system; borehole heat exchangers; thermal response test; thermal conductivity

收稿日期: 2011-05-09

基金项目: 国家十二五科技支撑计划(2011BAJ05B02)

作者简介: 李慧星(1964—),女,副教授,主要从事建筑节能方向及建筑环境质量保障技术研究.

随着社会的发展,能源和能耗已经成为广泛关注的问题,可再生能源的利用也越来越受到重视^[1]。地源热泵系统通过输入少量高品位能源来实现低品位热能向高品位热能转移,是一种可以高效利用浅层地热能的可再生能源技术。文献[2]将常州地区某办公楼地源热泵系统与传统风冷热泵系统、冷水机组+燃气锅炉系统进行经济性比较,得出地源热泵系统不仅能够有效节约能耗,而且具有极大的经济性价值,同时还具有重大环保、减排的社会意义。作为可再生能源利用的重要技术途径之一,地源热泵系统自上世纪80年代后期开始在世界范围内应用^[3]。截至2010年10月底,地源热泵系统在我国学校、医院等公共建筑领域应用面积已超过一亿 m^2 。随着节能减排力度的加大,同时作为重要的建筑节能技术,十二五期间国家将强化推广地源热泵^[4]。

岩土热物性是影响地源热泵系统设计、运行及投资的重要因素。如果岩土导热系数有10%的偏差,设计出的井深至少会有5%的影响^[5]。现场进行岩土热响应测试能够准确获得岩土热物性^[6]。热响应测试得到的岩土导热系数受测试时间、进出水温度、回填料物性参数等因素影响^[7-10]外,还与测试地点周边水文地质条件密切相关。Gehlin^[11]等和Raymond^[12]等人讨论了地下水渗流对地埋管换热器周围岩土换热性能的影响,结果表明,即使存在较少的地下渗流水,也可使岩土的导热能力得到强化。《地源热泵系统工程技术规范》GB50366-2009规定^[13],在地源热泵系统方案设计前,应对工程场区内岩土体地质条件进行勘察;当地埋管地源热泵系统的应用面积在3 000~5 000 m^2 时,宜进行岩土热响应试验;当应用建筑面积大于等于5 000 m^2 时,应进行岩土热响应试验。因此,进行岩土热响应测试获得岩土导热系数,是正确设计地源热泵地埋管换热器的先决条件。

国外在地源热泵地埋管换热器热响应测试的理论和应用方面发展较为成熟。热响应测试于1983年由Mogensen^[14]首先提出,Eklöf^[15]等利用

无限长线热源理论研制了第一台移动热响应测试设备,Austin^[16]等在1998年建立了测试岩土热物性的装置,并利用数值方法得到了岩土的综合导热系数。国内对热响应测试的关注始于2000年,其理论研究与发展趋势与国外相似^[17]。虽然取得了较多的研究成果,但仍存在缺乏足够实际工程经验积累的问题。笔者根据沈阳低山丘陵地区某地源热泵实际工程,将热响应测试的理论应用到实际,阐述了热响应测试的理论基础;建立了现场进行热响应测试的设备;同时基于经典的线热源理论对测试数据进行了整理和分析,得到了该地源热泵工程区域的岩土综合导热系数;与相近岩土的导热系数对比分析显示,热响应测试的结果合理可靠;测试和分析过程能够为相似工程提供应用借鉴,测得的数据能够为相似岩土区域提供参考。

1 地埋管换热器的热响应测试

1.1 工程概况

测试地点位于沈阳近郊,周边为低山丘陵地势。测试前对场区内多处位置进行了现场地质勘查,表1给出了地下深度及对应的地质构造。

表1 测试地点地质构造

Table 1 Geologic structure of test site

地下深度/m	地质构造
0~7	黄土
7~10	风化岩
11~18	红页岩
18~68	灰岩
68~100	片麻岩

1.2 测试井布置

选择两处测试井并进行岩土热响应测试,分别记为1#井和2#井。测试井直径均为150 mm,有效深度均为100 m。地埋管材为PE管,PE管外径为32 mm,内径为26 mm。埋管类型均采用双U并联自然竖直下管。表2给出了1#井和2#井测试井的参数。

表2 测试井参数

Table 2 Parameters of pilot borehole

测试井	埋管形式	井口直径/mm	垂直深度/m	安装方法	回填料
1#	双U并联	150	100	自然竖直下管	打井原土回填
2#	双U并联	150	100	自然竖直下管	打井原土回填

1.3 测试装置与测试流程

测试装置主要由功率可调的加热水箱、循环水泵、温度传感器、流量计、自动控制系统、计算机、信号数据线、电源线等组成。

测试装置与地埋管连接, 构成闭式水循环: 循环水泵为动力源, 循环水流入水箱, 经电加热器加热后流入地埋管换热器, 与岩土热交换后返回水箱。水温由温度传感器采集, 流量由流量计测量, 最终通过自动控制系统将进、出水温度和流量实时显示并输出保存至计算机。测试装置组成及工作流程如图 1 所示。

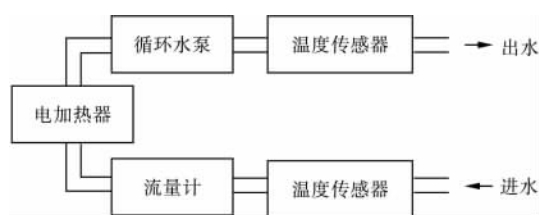
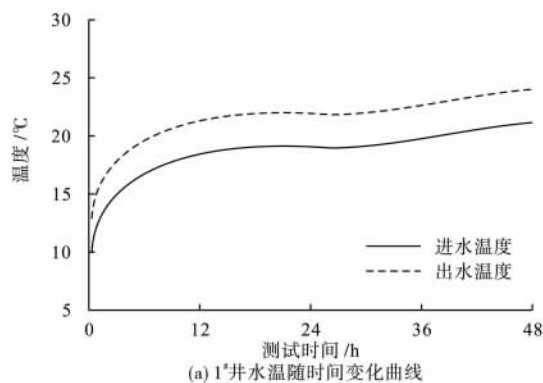


图 1 测试装置组成及工作流程

Fig. 1 Test apparatus configuration and its workflow

地埋管与测试仪器连接, 向测试系统注满水, 排出系统内空气。启动水泵进行检查, 确保测试系统无漏水, 同时排出残留空气。启动电加热器并保



(a) 1#井水温随时间变化曲线

持加热功率恒定, 对水箱内循环水持续加热, 最终测试系统进出水温度基本稳定。

2 数据分析

2.1 数据采集

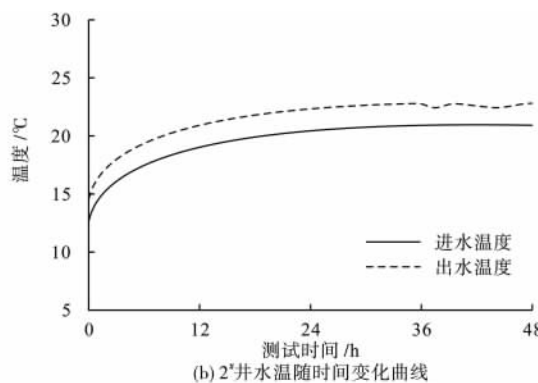
此次测试中, 电加热器功率恒定为 6 kW。开启电加热器, 对水箱内的水持续加热, 测试时间不少于 48 h。自动控制系统数据记录时间间隔为 1 min。表 3 为自动控制系统自动存储并输出的数据示例。

表 3 自控系统存储、输出数据示例

Table 3 Examples of test data stored and outputted by automatic control system

测试时间	进水温度/℃	出水温度/℃	流量/(m ³ ·h ⁻¹)
2010-10-22 7:26	20.87	22.73	1.82
2010-10-22 7:27	20.87	22.73	1.82
2010-10-22 7:28	20.88	22.74	1.82
2010-10-22 7:29	20.88	22.73	1.82
2010-10-22 7:30	20.88	22.75	1.82

图 2 为 1#井和 2#井的进、出口水温随时间变化曲线。



(b) 2#井水温随时间变化曲线

图 2 测试井进、出口水温随时间变化曲线

Fig. 2 Inlet and outlet water temperature response curves of two boreholes

图 2(a) 所示 1#井进、出水温度在开始加热后升温较快, 在开始加热的 0.5 h 内, 进、出水温度从 10℃ 分别升至 12℃ 和 16℃。经过 2 h 后, 进、出水温度分别升至 15℃ 和 18℃; 在后来的 6 h 中, 温度升至 17℃ 和 20℃, 最终稳定在 20℃ 和 23℃ 左右, 温差在 2.9℃ 左右, 达到稳定状态。

图 2(b) 所示的 2#井进、出水温度变化趋势与 1#井类似, 最终进、出水温差稳定在 2℃ 左右。

2.2 计算理论依据

根据文献 [18-22], 实验数据处理采用简单

明了并且具有合适精度的线热源模型。其计算式为

$$t_f = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \ln(t) + \left[\frac{Q}{H} \left(\frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln\left(\frac{4\alpha}{r_b^2}\right) - \gamma \right) - R_b \right) + t_{sur} \right] \quad (1)$$

式中: t_f 为平均温度, ℃; Q 加热功率, W; λ 为导热系数, W/(m·K); H 为有效井深, m; t 为测试时间, s; α 为热量扩散率, m²/s; R_b 为钻孔导热热阻, K/W; γ 为欧拉系数, 取 0.577 2; r_b 为钻井半径, m; t_{sur} 为岩土初始温度, ℃。

线热源模型可简化为

$$t_f = k \ln(t) + b. \quad (2)$$

其中: k 与 b 为常数, 即 $k = \frac{Q}{4\pi\lambda H}$, (3)

$$b = \left[\frac{Q}{H} \left(\frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln\left(\frac{4\alpha}{r_b^2}\right) - \gamma \right) - R_b \right) + t_{sur} \right]. \quad (4)$$

由式(3), 得最终岩土导热系数计算式:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi k H}. \quad (5)$$

式中: λ 为岩土导热系数, $W/(m \cdot K)$; Q 为加热功率, W ; H 为井深, m ; k 为地理管进出水平均温度与时间对数拟合曲线的斜率。

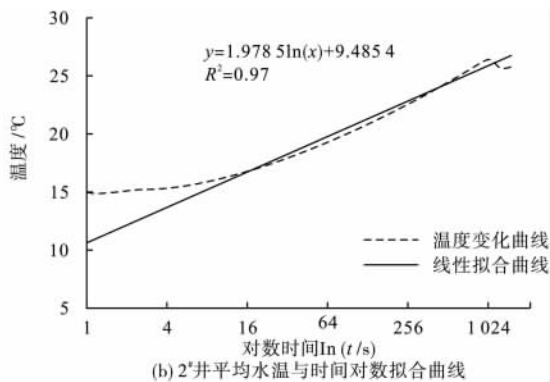
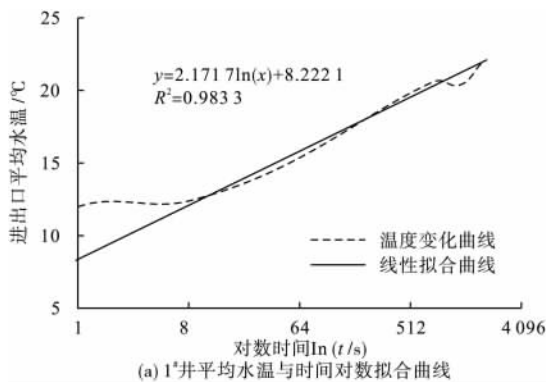


图3 平均水温与时间对数拟合曲线

Fig. 3 Regression curve of mean water temperature to logarithm time

将加热量、拟合曲线 k 值和测试井深等参数代入式(5), 同时根据工程经验计算出岩土的导热系数 λ 。1#井和2#井的基础数据及岩土导热系数结果见表4。

表4 1#井和2#井基础数据及岩土导热系数

Table 4 Basic parameters and ground thermal conductivity of two boreholes

测试井	Q/W	H/m	k	$\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
1#	6 000	100	2.171 7	2.12
2#	6 000	100	1.978 5	2.33

2.4 数据分析

根据已知岩土热物性参数^[13], 结合现场地质勘查和工程经验分析, 测试地点岩土导热系数在 $1.4 \sim 3.5 W/(m \cdot K)$ 。根据现场热响应测试结果, 1#井岩土导热系数为 $2.12 W/(m \cdot K)$, 2#井岩土导热系数为 $2.33 W/(m \cdot K)$, 岩土导热系数在合理范围。

3 结论

(1) 岩土导热系数是正确设计地理管换热器

2.3 数据整理与计算

整理测试数据, 得出地理管进出水的平均温度, 即:

$$t_f = \frac{t_i + t_o}{2}. \quad (6)$$

式中: t_i 为地理管进水温度, $^{\circ}C$; t_o 为地理管出水温度, $^{\circ}C$ 。

对进出水平均温度与时间进行对数拟合, 得到拟合曲线的斜率, 即式(5)中 k 值。1#井和2#井的 k 值分别为 2.171 7 和 1.978 5, 拟合结果见图3。

的重要参数, 现场进行岩土热响应测试可以准确获得岩土的综合导热系数。

(2) 使用线热源模型对测试数据整理分析的结果与相近土壤、岩石的导热系数进行比较, 得出两处测点的岩土导热系数在合理范围; 测试地点岩土的综合导热系数为 $2.23 W/(m \cdot K)$, 该工程区域的岩土具有良好的热传导能力; 测试和分析方法可为相似工程提供应用借鉴。

参考文献:

- [1] 韩芳. 我国可再生能源发展现状和前景展望[J]. 可再生能源 2010 28(4): 137-140.
(Han Fang. Development status and prospect of renewable energy in China[J]. Renewable Energy Resources 2010 28(4): 137-140.)
- [2] 罗迎宾, 梁路军, 季柳金. 地源热泵在建筑节能领域的应用[J]. 建筑节能 2008(9): 56-58.
(Luo Yingbin, Liang Lujun, Ji Liujin. Application of ground-source heat pump in the field of building energy efficiency[J]. Building Energy Efficiency 2008(9): 56-58.)
- [3] Sanner B, Hellstrom G, Spitler J, et al. Thermal re-

- sponse test-current status and world-wide application [C]//Proceedings World Geothermal Congress. Antalya ,Turkey 2005: 24 - 29.
- [4] 佚名. “十二五”期间国家将强化推广地源热泵[J]. 中国建设信息供热制冷 2010(12): 52.
(Anonymous. China's strengthening the promotion of ground source heat pump during “Twelfth Five-Year Plan” period[J]. China Construction Heating & Refrigeration 2010(12): 52.)
- [5] Kavanaugh S P. Field tests for ground thermal properties-methods and impact on ground-source heat pump design [J]. ASHRAE Transactions ,2000 ,106 (1): 851 - 855.
- [6] 周亚素. 土壤导热系数的现场测试方法[J]. 东华大学学报: 自然科学版 2008 34(4): 482 - 485.
(Zhou Yasu. In-sit testing method of ground thermal conductivity [J]. Journal of Donghua University: Natural Science 2008 34(4): 482 - 485.)
- [7] 胡平放, 雷飞, 孙启明, 等. 岩土热物性测试影响因素的研究[J]. 暖通空调 2009 39(3): 123 - 127.
(Hu Pingfang ,Lei Fei ,Sun Qiming ,et al. Study on influence factors for thermo-physical property of soil [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning ,2009 , 39(3): 123 - 127.)
- [8] 高青, 余传辉, 马纯强, 等. 地下土壤导热系数确定中影响因素分析[J]. 太阳能学报 2008 29(5): 581 - 585.
(Gao Qing ,Yu Chuanhui ,Ma Chunqiang ,et al. Analysis of influence factors on determining the ground thermal conductivity [J]. Acta Energiae Solaris Sinica 2008 29(5): 581 - 585.)
- [9] 张晓明, 吴建坤, 魏凌敏. 垂直 U 型管换热器周围土壤温度场的数值模拟[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版 2011 27(1): 111 - 114.
(Zhang Xiaoming ,Wu Jiankun ,Wei Lingmin. Numerical simulation on soil temperature field around vertical U-tube heat exchangers [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science ,2011 ,27 (1): 111 - 114.)
- [10] 周亚素, 雷鸣. 现场测定土壤导热系数的影响因素分析[J]. 东华大学学报: 自然科学版 2009 35(4): 472 - 477.
(Zhou Yasu ,Lei Ming. Influence factors analysis on in-situ test of ground thermal conductivity [J]. Journal of Donghua University: Natural Science 2009 35 (4): 472 - 477.)
- [11] Gehlin S ,Hellstrom G. Influence on thermal response test by groundwater flow in vertical fractures in hard rock [J]. Renewable Energy 2003 28(14): 2221 - 2238.
- [12] Raymond J ,Therrien R ,Gosselin L ,et al. Numerical analysis of thermal response tests with a groundwater flow and heat transfer model [J]. Renewable Energy 2011 36(1): 315 - 324.
- [13] 中国建筑科学研究院. GB50366 - 2009 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.
(China Academy of Building Research. GB50366 - 2009 technical code for ground-source heat pump system [S]. Beijing: China Architecture & Building Press 2009.)
- [14] Mogensen P. Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages [C]//Proceedings of the International Conference on Surface Heat Storage in Theory and Practice. Stockholm ,Sweden ,1983: 652 - 657.
- [15] Eklof C. TED-a mobile equipment for thermal response test [D]. Sweden: Lule University of Technology ,1996.
- [16] Austin W. Development of an in situ system for measuring ground thermal properties [D]. Oklahoma State University ,1998.
- [17] 李敏, 余延顺. 地源热泵系统的热响应测试的研究进展[J]. 制冷与空调 2010 10(1): 31 - 34.
(Li Min ,Yu Yanshun. Research progress of thermal response test for GSHP system [J]. Refrigeration and Air-Conditioning 2010 10(1): 31 - 34.)
- [18] Katsura T ,Nagano K ,Takeda S ,et al. Development of a design and performance prediction tool for the ground source heat pump system [J]. Apply Thermal Engineering 2006 26: 1578 - 1592.
- [19] Roth P ,Georgiev A ,Busso A ,et al. First in situ determination of ground and borehole thermal properties in Latin America [J]. Renewable Energy 2004 , 29(12): 1947 - 1963.
- [20] Gehlin S. Thermal response test-in-site measurements of thermal properties in hard rock [D]. Licentiate Thesis ,Sweden: Lulea University of Technology. Department of Environmental Engineering. Division of Water Resources Engineering ,1998.
- [21] 乔卫来, 陈九法, 薛琴, 等. 地埋管换热器热响应测试与模拟研究[J]. 建筑热能通风空调 2010 29(1): 1 - 4.
(Qiao Weilai ,Chen Jiufa ,Xue Qin ,et al. Study on thermal response test and numeric simulation for ground heat exchanger [J]. Building Energy & Environment 2010 29(1): 1 - 4.)
- [22] Wagner R ,Clauser C. Evaluating thermal response tests using parameter estimation for thermal conductivity and thermal capacity [J]. Journal of Geophysics and Engineering 2005(4): 349 - 356.