

光纤测温技术在地温场监测中的应用

宋帅良,王永刚,王华锋,路小慧,马哲民,王乐

(山东省鲁南地质工程勘察院,山东 兖州 272100)

摘要: 换热功率计算通常采取热响应试验的方式,仅仅通过热响应试验方式无法直观反映地下不同介质换热性能的差异,光纤测温系统恰恰能弥补这种不足。光纤测温监测与热响应试验相结合这种新技术的应用,在黄泛平原尚属首次,论文通过热响应试验期间的光时域光纤监测,取得了翔实数据的基础上,对比分析了不同岩土层介质的换热性能,采取了光纤地温测量这种新型监测手段,对换热试验前及试验期间地温场变化进行了监测,对合理利用浅层地温能这种新能源提供了参数支持。

关键词: 热响应试验;地源热泵;地温恢复;渗流

中图分类号: P612;P548

文献标识码: B

引文格式: 宋帅良,王永刚,王华锋,等.光纤测温技术在地温场监测中的应用[J].山东国土资源,2018,34(3):56-59. SONG Shuailiang, WANG Yonggang, WANG Huafeng, etc. Application of Optical Fiber Temperature Measuring Technique in Monitoring Ground Temperature Field[J]. Shandong Land and Resources, 2018, 34(3): 56-59.

岩土体介质的不同不仅影响地温场的形态,同时对浅层地温能资源量评价和工程设计起着决定性的作用,掌握区域岩土体的热物性参数及换热性能,是保障热泵能否在该区域高效稳定运行的关键^[1-2]。笔者在菏泽市进行地温资源勘查评价和动态监测与热响应试验相结合,取得了较好的效果,总结了规律,为下一步更好地利用浅层地温能这种清洁能源提供一些参考^[3-9]。

1 分布式光纤测温技术原理

分布式光纤测温系统^[10]是一种时域分布式温度监测系统,它以光纤中的拉曼散射原理为技术基础,结合光时域反射技术(OTDR),实现连续测量光纤沿线任一点所处的温度。DTS(Distributed Temperature Sensing)是一种分布式光纤测温系统,能测量光纤沿线上任一点的温度信息并精确定位。DTS技术是基于拉曼散射光中斯托克斯光和反斯托克斯光光强比的热敏感性来确定光缆温度,即光纤温度是光强比值的函数。DTS解调仪通过确定这2种光光强的比值来计算温度,而反斯托克斯光的光强与散射位置处的温度呈现函数对应关系。温

度计算如式(1)所示:

$$R(T) = \frac{I_F}{I_S} = \left(\frac{\nu_F}{\nu_S}\right)^4 e^{-\frac{h\nu}{KT}} \quad (1)$$

式中: $R(T)$ 为温度函数; I_F 为反斯托克斯光强; I_S 为斯托克斯光强; ν_S 为斯托克斯光中心频率; ν_F 为反斯托克斯光中心频率; S 为光波在真空中传播速度; ν 为拉曼漂移量; K 为玻尔兹曼常数; h 为普朗克常数; T 为绝对温度。

该次监测系统采用苏州南智传感科技有限公司开发的NZS-FBG-A03型便携式光纤光栅解调仪。尤其适用于工程现场移动采集光纤光栅波长信息,该系统集成光纤光栅波长和光谱数据采集,存储与显示功能于一体,具有操作简便、界面简洁、响应快速等特点。具体参数见表1。

黄泛平原区第四系厚,各岩土层含水率较高,孔隙比较小,地下水渗透速度较快,含水层渗透性能较好,是良好的地源热泵应用载体。以该次选用HD2孔为例,该孔含水层位分为浅层孔隙淡水含水岩组和中层孔隙咸水含水岩组。

浅层孔隙淡水含水岩组水位埋深3~6 m,单位出水量一般在200~500 m³/(d·m)(降深6 m)。

收稿日期:2017-09-11;修订日期:2017-12-11;编辑:陶卫卫

作者简介:宋帅良(1987—),男,山东兖州人,工程师,主要从事地热地质、水文地质、工程地质、环境地质;E-mail:399483296@qq.com

表 1 NZS-FBG-A03 性能特点及技术参数

通道数	2
波长范围(nm)	1527~1567
波长分辨率(pm)	1
重复性(pm)	±2
解调速率(Hz)	1
动态范围(dB)	45
通道光谱	可查询
光学接口类型	FC/APC
每通道最大 FBG 数量	30

水化学类型多以 $\text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型或 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} - \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型为主,矿化度多小于 1 g/L。

中层孔隙咸水含水岩组顶板埋深约为 57 m,含水层顶、底板以粉质粘土、粘土为主要隔水层,与上层淡水含水层间基本无水力联系。含水层岩性以粉细砂为主,富水性弱,一般单位涌水量小于 $500 \text{ m}^3/\text{d}$ 。该层水矿化度一般在 2~5 g/L 之间,水化学类型主要为 $\text{SO}_4 - \text{K} \cdot \text{Na}$ 型或 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 - \text{Na}$ 型。

2 地质环境条件与试验背景

该次试验位于菏泽市牡丹区境内,选取地源热泵应用工程周边 HD2 孔作为试验孔,该孔主要岩性为淤泥粉土、淤泥粘土、粉土、粘土、细砂等。该次试验将热响应试验^[11]与光纤地温监测相结合^[12-15],试验安装如图 1 所示。

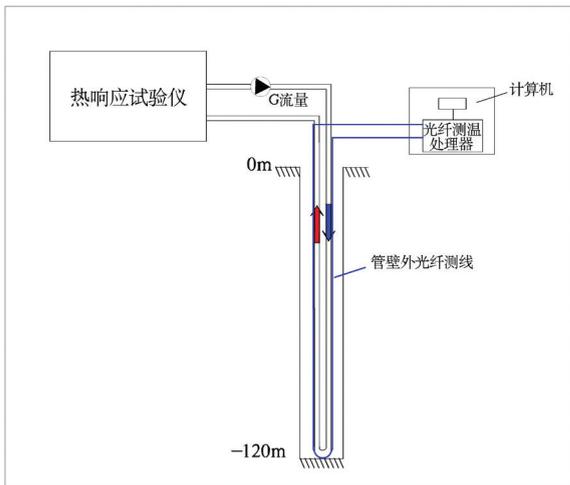


图 1 试验装置安装示意图

3 光纤监测测温系统与热响应试验联合试验研究

在 HD2 试验孔进行热响应试验的同时通过光纤测温系统对地温变化进行了监测(表 2),发现土体岩性的不同以及地下水流场变化的不同对地温的

传导有直接的影响,其试验期间温度变化曲线如图 2、图 3 所示。

表 2 HD2 孔各深度岩性对比

序号	层底深度 m	岩土名称	序号	层底深度 m	岩土名称
1	5.80	粉土	13	47.0	粉砂
2	9.00	粘土	14	53.9	粘土
3	13.0	粘土	15	56.5	粉砂
4	15.6	粉质粘土	17	71.0	粘土
5	17.3	细砂	18	78.1	粉砂
7	23.4	粉质粘土	19	83.6	粉质粘土
8	29.2	粉质粘土	20	93.4	粉砂
9	35.2	粘土	21	101	粘土
10	39.3	粘土	22	104	粉质粘土
11	41.7	粉砂	24	114	粉质粘土
12	44.8	粘土	25	120	粘土

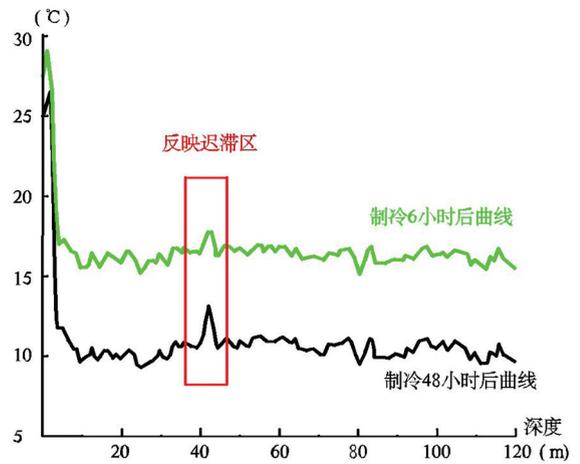


图 2 制冷工况深度-温度曲线

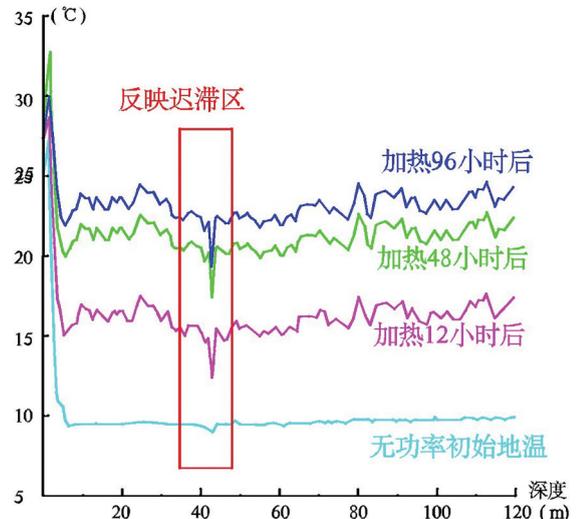


图 3 制热工况深度-温度曲线

图 2、图 3 是计算机对光纤监测测温系统监测到的地下不同介质温度差异的图像处理结果。针对该种试验过程中的明显异常反应现象进行研究分析,对比各深度岩性表,发现该层位为粉砂,含水率较高,此外水是热的不良导体,但水在含水层中的流动性较强。最终得出,在热响应试验过程中,地下水渗流速度较快的粉砂等含水层对附加的热负荷或冷负荷反映较为迟滞,为地下水的流动带走了 U 型管向地下传输的热能,使得该层升温或降温较为迟滞^[16-18]。

4 不同介质加热升温能力—停止加热恢复温度分析

试验针对不同岩性土层在热响应试验期间的温度变化利用光纤进行了监测,在 120 m 深的钻孔中,选取了具有代表性的 6 种土,即 3 m 处的粉土、16 m 处的粉质粘土、18 m 处的细砂、40 m 处的粘土、42 m 处的粉砂和 80 m 处的粉砂,各层升温速度如图 4 所示。

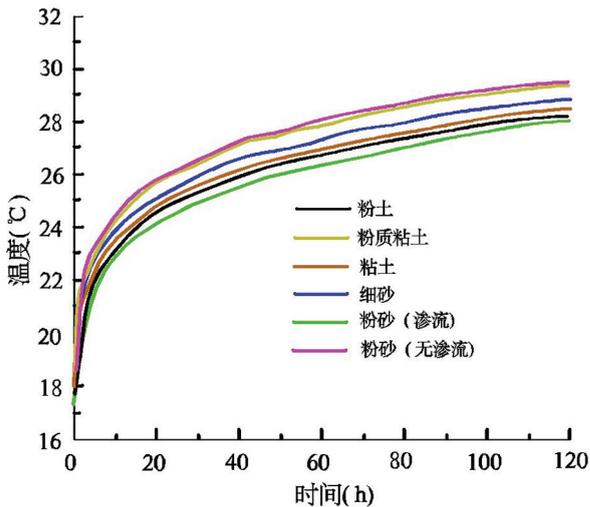


图 4 各岩性开启制热后地温升温能力曲线

可以看到,不同类型土的升温时程曲线光滑,升温速率逐渐减小,并逐渐趋于稳定,其规律完全符合线性热源在恒功率加热条件下的升温变化。时程曲线斜率变化能够较好地反映各土层导热系数的高低。其中 42 m 处的粉砂具有渗流,根据上文分析,渗流导致了热能传导扩散,在加热工况时,温度影响范围更广,而温度差变化较小。

从图 5 中同样可以看到,与升温过程类似,降温时程曲线也非常光滑,不同导热系数土层时程曲线特征明显。42 m 处的粉砂具有渗流,在制冷工况

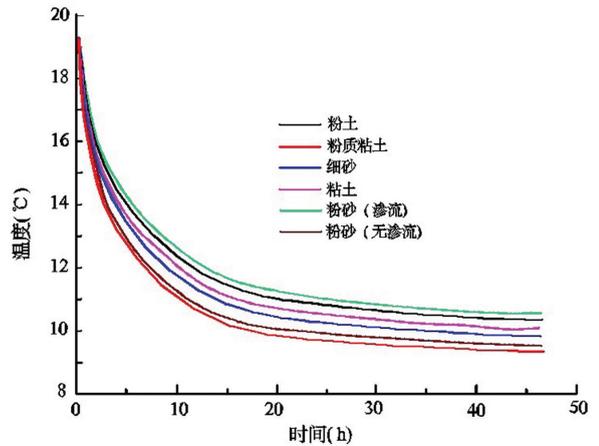


图 5 各岩性关闭制热后地温恢复能力曲线

时,降温比其他地层慢。

通过研究发现,有渗流的粉砂区温度恢复最快,其次是无明显渗流的粉砂、细砂区,而比较致密的粘土、粉质粘土恢复能力较慢,这同顾湘^[19]在地理管热响应试验孔地温恢复特性研究中提到的观点是相吻合的。

5 结论

热响应试验是检验浅层地温能开发应用模拟地层热传导性能的可靠性较强的试验方式,能够较精确地测定地源热泵运行期间对地温场造成的影响。

光时域光纤测温系统能够较好地将监测数据反应至计算机终端,可直接了解地温的变化情况,精确到不同深度每一点,是地温场温度变化监测的好方式。

将热响应试验与光时域光纤测温相结合,能够更直观地反映出不同时间段不同地层导热性能的差异,更精确地计算出不同地层的换热能力,取得的数据对浅层地温能的开发具有指导意义。

参考文献:

- [1] 浅层地热能勘查评价规范 DZ/T0225-2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [2] 於仲义,胡平放,袁旭东.土壤源热泵埋地管换热实验研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版),2008,25(3):157-161.
- [3] 王秉忱.我国浅层地温能开发现状与发展趋势[J]. 供热制冷,2011(12):50.
- [4] 闫岩,汪旭,杨锐,等.我国浅层地温能开发利用应注意的一些问题及对策建议[J]. 西部资源,2014(6):201-204.
- [5] 刘刚,杨亚宾,马淑杰.山东省鲁北地区浅层地热能资源评价[J]. 山东国土资源,2014,30(1):47-57.

- [6] 孙文广,冷旭勇,王飞,等.郓城县浅层地热能勘查评价[J].山东国土资源,2015,33(1):36-39.
- [7] 周亚醒.鲁西地区浅层地温能地热地质条件与开发利用适宜性评价[J].山东国土资源,2015,31(8):45-49.
- [8] 胡波,黎逢良,谭秀全.泗河冲洪积扇松散岩土体地温场自恢复能力研究[J].山东国土资源,2017,33(7):55-59.
- [9] 李志恒,卢建荣,杜凤林,等.德州市浅层地温能资源潜力评价[J].山东国土资源,2017,33(5):42-46.
- [10] 分布式光纤温度测量装置[S]. CN. U. 204575216. 2015.08.19
- [11] Mogensen P. Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages[A]//Proceeding of the international conference on subsurface heat storage in theory and practice[C]. Stockholm Sweden,1983:652-657.
- [12] 张晓力,廉小亲.地源热泵远程监测系统及数据处理与分析[J].可再生能源,2010,28(3):126-129.
- [13] 刘杰.浅层地热能开发利用地质环境影响与监测系统建设研究[J].山东国土资源,2018,34(1):49-55.
- [14] 耿毅男.浅层地温能监测系统设计[J].中国煤炭工业,2016(9):50-51.
- [15] 何潇楠.浅层地温能开发利用动态监测网建设[J].科技创新与应用,2015(15):257.
- [16] Ingersoll L R, Plass H J Theory of the ground pipe heat source for the heat puillp[J]. Heating Piping & Air Conditioning 1948(6):119-122.
- [17] 朱常春,刘佩贵,周蜜.水文地质参数对浅层地温能的影响分析[J].地下水,2014,36(5):26-28.
- [18] 赵新卓.流体流量对竖直埋管深度的影响[J].山东国土资源,2017,33(10):62-68.
- [19] 顾湘,段新胜,李少华.埋管热响应试验孔地温恢复特性研究[J].太阳能学报,2014(9):63-69.

Application of Optical Fiber Temperature Measuring Technique in Monitoring Ground Temperature Field

SONG Shuailiang, WANG Yonggang, WANG Huafeng, LU Xiaohui, MA Zhemin, WANG Le
(Lunan Geo - engineering Exploration Institute, Shandong Yanzhou 272100, China)

Abstract: Thermal response test is usually used in heat power calculation. Only thermal response test can not directly reflect the differences on the heat exchange performance of different media. Optical fiber temperature measuring system can make up the shortage. The combination of optical fiber temperature monitoring and thermal response test is firstly used in the Yellowish plain. In this paper, detailed data has been obtained through optical time domain (OTD) fiber optics detection during the TRT. Based on detailed data, the heat transfer performance of different rock soil layers has been compared and analyzed. Ground temperature changes before and during the heat exchange test have been monitored by using the new monitoring. It will provide the parameter support for rational utilization of shallow geothermal energy.

Key words: Thermal Response Test (TRT); Ground Source Heat Pump (GSHP); Ground Temperature Restoration; seepage