

环境地质

鲁西地区不同岩性地层热响应试验结果浅析

史启朋, 吴晓华, 姜福红, 李霖, 宋帅良, 吴延明, 孟甲

(山东省鲁南地质工程勘察院, 山东 兖州 272100)

摘要:为研究埋管换热器在不同岩性地层的换热情况,在鲁西黄河冲洪积平原、山前冲洪积平原和低山丘陵区进行了以粉土、粉质粘土、细砂、粘土、粉质粘土、中粗砂、灰岩和花岗岩为研究对象的热响应试验,初步试验结果表明:每延米换热量(W/m)和平均热导率($W/m \cdot k$)花岗岩>灰岩>粉质粘土、中粗砂>粉土、粉细砂。在岩溶地下水富水性强,径流速度快的地段灰岩平均热导率>花岗岩。此项研究结果可为不同岩性地层浅层地温能开发利用工程埋管换热器类型的选择,浅层地温能评价和开发利用提供基础数据。

关键词:热响应试验;每延米换热量;平均热导率;鲁西地区

中图分类号:P314 **文献标识码:**B

引文格式:史启朋,吴晓华,姜福红,等.鲁西地区不同岩性地层热响应试验结果浅析[J].山东国土资源,2018,34(2):35-40.SHI Qipeng, WU Xiaohua, JIANG Fuhong, etc. Primary Study on Thermal Response Test Results in Different Lithologic Strata in Luxi Area[J].Shandong Land and Resources, 2018,34(2):35-40.

0 引言

近年来随着地源热泵技术的成熟及国家对环境保护工作的重视,浅层地温能这种清洁环保的可再生能源在现代城市建筑中得到了广泛的应用^[1-2],2007年底全国利用浅层地温能供暖制冷的建筑面积8000万 m^2 ,2012年4月底超过2.4亿 m^2 ,2014年底达到3.6亿 m^2 。浅层地温能开发利用在快速发展的同时,也存在着工程设计参数不足和监督管理机制不健全等制约因素^[3-4]。

为研究岩土体热物性参数特征,李少华等^[5]对嘉兴市一试验孔分别进行连续15d和6.25d的岩土热响应试验,研究了测试时间、舍弃初始时间、加热功率对埋管深度范围内岩土体导热系数测试的影响;毕文明等^[6]在室内搭建了一套埋管换热器综合微缩实验台,开展了干砂、饱和砂及饱和砂在不同渗流速度下换热参数研究;韩斯东等^[7]引入分布式光纤测温系统,进行了试验场区岩土体分层热物性测试,取得了一定的研究成果。这些研究仅局限于特定的岩土层,目前缺少不同水文地质单元,不同岩

土体热物性参数参数的对比试验研究。

因此,进行不同水文地质单元,不同岩土体热响应对比试验,求取热物性参数^[8-9],对指导类似地区浅层地温能开发利用工程应用,合理利用浅层地温能资源具有重要意义。

1 地热地质概况

1.1 区域地热地质条件

鲁西地区主要分布黄河冲洪积平原、山前冲洪积平原和中低山丘陵等水文地质单元^[10-11],各水文地质单元地热地质条件如下:

(1)黄河冲洪积平原。位于京杭运河以西地区,地貌类型为冲洪积平原及冲湖积平原,第四系较发育,由东向西厚度逐渐增加,最大厚度大于300m,下伏新近纪碎屑岩。恒温带埋深20~25m,温度15.5~16.0℃。大地热流值为56.0~79.0 mW/m^2 ,地温梯度为2.5~4.0℃/hm,埋深100m处平均地温17.0~19.0℃。含水岩组颗粒较细,岩性为粉土、粉质粘土、细砂—粉细砂。含水层厚度15.25~52.09m,渗透系数2~3m/d。

收稿日期:2017-04-17;修订日期:2017-09-22;编辑:王敏

基金项目:山东省地质勘查项目,山东省浅层地温能调查评价(鲁国土资字[2015]482号)

作者简介:史启朋(1979—),男,陕西兴平人,高级工程师,主要从事水工环地质工作;E-mail:shiqipeng@163.com

(2)山前冲洪积平原。位于京杭运河以东的山前平原地区,地貌类型为冲洪积平原,第四系平均厚度在150 m左右,下伏新近纪、石炭-二叠纪和奥陶纪地层。恒温带埋深为23~30 m,温度16.3℃左右。大地热流值为52.0~68.0 mW/m²,地温梯度为1.20~3.0℃/100m,埋深100 m处平均地温16~18℃。含水岩组颗粒较粗,岩性主要为粉质粘土、粘土、中粗砂。含水层平均厚度32 m左右,井孔单位涌水量大于500 m³/d·m。

(3)中低山丘陵区。位于泰安—莱芜—枣庄—临沂一带基岩山区,地貌类型以丘陵山地为主,其次为山间平原与山前冲积平原。地层岩性以寒武—奥陶纪碳酸盐岩及太古宇花岗岩、变质岩为主,区内第四系不发育,厚度普遍小于30 m。恒温带埋深受地层岩性的影响,碳酸盐岩发育区约25 m,太古宇花

岗岩、变质岩发育区约22 m,温度12.0~13.5℃。大地热流值为35.0~60.0 mW/m²,地温梯度为2.5~4.3℃/hm,埋深100 m处平均地温15~18℃。地下水类型以碳酸盐岩岩溶裂隙水及花岗岩、变质岩裂隙水为主,在山间平原及山前冲积平原区分布有松散岩类孔隙水。

1.2 试验场地水文地质条件

RS2和RS3试验孔位于黄河冲洪积平原区,地层岩性主要为粉土、粉质粘土、粉细砂等;RS4孔位于山前冲洪积平原,地层岩性以粘土、粉质粘土、中砂为主;RS6、RS7和K13孔位于中低山丘陵区,RS6孔地层岩性为花岗岩;RS7和K13地层岩性为粉质粘土、灰岩,RS7孔位于羊庄盆地岩溶水径流排泄区,裂隙岩溶发育,地下水流径流速度较快^{①②}[12],各试验孔水文地质条件见表1。

表1 试验孔地层水文地质条件

试验孔编号	试验场地层岩性	水文地质单元	水位埋深(m)	孔深(m)	孔径(mm)	下管类型	回填砾料
RS2	0~18.0 m,24.89~30.24 m,36.50~38.90 m为粉土、粉质粘土;18.0~24.89 m,30.24~36.50 m,38.90~46.70 m为粉细砂;46.70~120.90 m为粉质粘土、粘土	黄河冲洪积平原	3.762	120.9	180	双U	中粗砂
RS3	0~5.3 m,5.9~9.1 m,11.2~24.6 m为粉土、粉质粘土;5.3~5.9 m,9.1~11.2 m,40.1~45.4 m,51.72~56.14 m为粉细砂;24.6~40.1 m,45.4~51.72 m,56.14~120.5 m为粘土、粉质粘土		2.609	120.5	180	双U	中粗砂
RS4	0~4.6 m,6.5~12.5 m,16.5~40.2 m,44.5~92.6 m,94.4~100 m,为粘土、粉质粘土;4.6~6.5 m,12.5~16.5 m,40.2~44.5 m,92.6~94.4 m为细砂、中粗砂	山前冲洪积平原	5.622	100.5	180	双U	中粗砂
RS6	0~70 m花岗岩	中低山丘陵区	13.410	70.0	180	双U	中粗砂
RS7	0~8.6 m粉质粘土,8.60~16.13 m砂砾石,16.13~100.15 m灰岩、泥灰岩		9.504	100.0	180	双U	中粗砂
K13	0~11.6 m粉质粘土,11.60~14.90 m含砾石粘土,14.90~120.9 m灰岩、泥灰岩		—	120.5	130	双U	中粗砂

2 试验设备及场地工程布置

2.1 试验设备

该次热响应试验采用天津地热勘查开发设计院生产的FTPT1-1型地层热响应测试仪进行。该仪器由主机循环泵、电加热器、水箱、温度和流量测试组件、控制与记录组件、电源控制、管道等部件组成,可完成无负荷循环试验、加热恒功率等试验。

2.2 场地工程布置

RS2试验孔位于菏泽市鄆城县鄆城镇,孔径180 mm,下管类型PE32双U,下置深度120.9 m,回填料为中粗砂,场地浅层地下水位埋深3.762 m。RS3试验孔位于菏泽市成武县成武镇,孔径

180 mm,下管类型PE32双U,下置水深度120.5 m,场地浅层地下水位埋深2.609 m。RS2和RS3试验孔目的层位为黄河冲洪积平原粉土、粉质粘土及粉细砂等。

RS4试验孔位于济宁兖州兴隆庄镇,孔径180 mm,下管类型PE32双U,下置深度100.5 m,回填料为中粗砂,场地浅层地下水位埋深5.622 m。试验孔目的层位为汶泗河冲洪积平原粉质粘土、粘土及中粗砂等。

① 山东省鲁南地质工程勘察院,山东省浅层地热能调查评价(鲁西)报告,2012年。

② 山东省鲁南地质工程勘察院,临沂、枣庄、济宁、菏泽、泰安市浅层地热能调查评价报告,2016年。

RS6 试验孔位于济宁泗水泗张镇,孔径 180 mm,下管类型 PE32 双 U,下置深度 70.0 m,回填料为中粗砂,场地浅层地下水位埋深 13.410 m。试验孔目的层位为花岗岩。

RS7 试验孔位于枣庄滕州羊庄镇,孔径 180 mm,下管类型 PE32 双 U,下置深度 100.0 m,回填料为中粗砂,场地浅层地下水位埋深 9.504 m。试验孔目的层位为灰岩、泥灰岩。K13 试验孔位于济南市高新区港沟街道办事处,孔径 180 mm,下管类型 PE32 双 U,下置深度 120.5 m,回填料为中粗砂,试验孔目的层位为灰岩、泥灰岩。

3 工艺流程及参数的影响因素分析

3.1 试验工艺流程

(1) 该次热响应试验是在试验孔钻探成孔, PE32 双 U 地埋管打压测试,下管、回填砾料,再次试压和管口密封静止 48 h 后进行。以 RS4 孔的岩性地层为例,试验工艺流程详见图 1。

(2) 试验时将热响应测试仪主机与地埋管相连接,组成一个闭合回路,向回路内注入干净的自来水,接入三项五线 380 V 电源,开启主机水泵让系统循环,检查系统是否漏水。

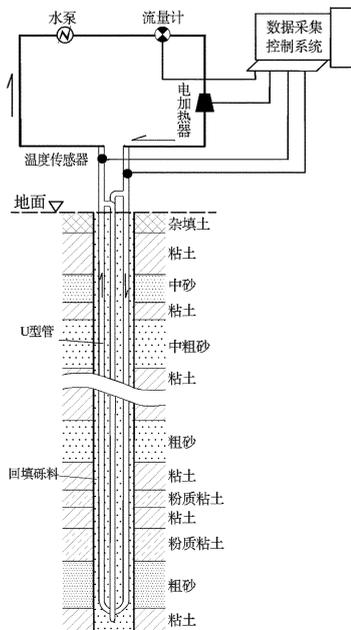


图 1 热响应试验工艺流程图

保持恒定(波动范围在 $\pm 5\%$),换热管内传热介质流速不应低于 0.2 m/s,实时记录回路中传热介质的流量和温度,数据采集频率为 1 次/min。地埋管换热器出水温度 1 h 内变化小于 1℃后,观测时间不少于 24 h 后试验结束。

(4) 测试结束后,先关闭电加热器和水泵,再关闭系统,断开电源,将系统与地埋管连接断开,排干净系统内的水,封闭地埋管的管口。

3.2 热物性参数的影响因素分析

不同岩土体热物性参数大小及影响因素与测试设备仪表的精度、测试方法、数据分析模型、回填材料、岩土体类型和地下水径流条件等相关。

测试设备中的温度传感器、流量计、功率计等精度和可靠性是影响试验数据准确性的重要因素;稳定热流或稳定工况测试方法,获取的试验数据差别较大;线热源理论模型或圆柱热源理论模型分析数据,得到的结果各有不同;回填材料对地埋管换热器换热性能也有着显著的影响,回填材料是多孔介质,孔隙之间空气的导热率最小,因此,回填材料颗粒愈大,孔隙度愈小,导热率愈大。反之,回填料颗粒愈小,孔隙愈大,导热率愈小。

另外,岩石地层的导热性越强,所处地下水径流循环速度越快,试验孔岩土体热物性参数值就越大。

该次开展的 6 组热响应试验采用的测试仪器,测试方法及数据分析模型相同,回填料均为中粗砂,颗粒大,导热率大,且各孔回填料粒径基本相同,可有效避免或减少因测试设备、测试方法、数据分析模型、回填材料的不同对试验结果带来的影响,得到岩土体真实的热物性参数。

4 试验方法及结果分析

4.1 试验方法

国内外针对岩土体热物性测试和地埋管换热器换热特性测试做了大量理论研究及试验工作,目前常用的测试方法是由 Mogensen 提出的热响应方法 (TRT)。这种方法是对测试孔中的 U 型管施加一个恒定的热流,通过获取热流的加热功率,U 型管进出口流体温度及流量等参数,计算岩土体热物性参数。地埋管换热器的热响应特性试验在理论上可以归结为在一定热流边界条件下的非稳态传热问题。其数学解析主要有 2 种模型:①基于线热源理论的

(3) 进行加热 4 kW 测试,加热负荷和流量基本

线模型;②基于圆柱热源理论的柱模型。该次试验所用设备设计和计算方法均采用 Hart 和 Couvillion 建立的线热源理论数学模型^[13-15],根据该理论模型,地理管换热器进出水口平均温度值计算公式为:

$$T_f = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \left(\ln \frac{4at}{r^2} - r \right) + \frac{Q}{H} R_b + T_0 \quad (1)$$

式中: T_f —随时间变化的地理管换热器进出水口平均温度(k); Q —单孔换热量(W); H —垂直埋管深度(m); λ —岩土体平均热导率[W/(m·k)]; a —热扩散系数(m²/s); t —测试时间(s); r —钻孔半径(m); γ —欧拉常数(取 0.5772); R_b —钻孔热阻(m·k/W); T_0 —地层初始温度(k)。

公式(1)可写为线性形式,即:

$$T_f = k \ln t + m \quad (2)$$

$$k = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \quad (3)$$

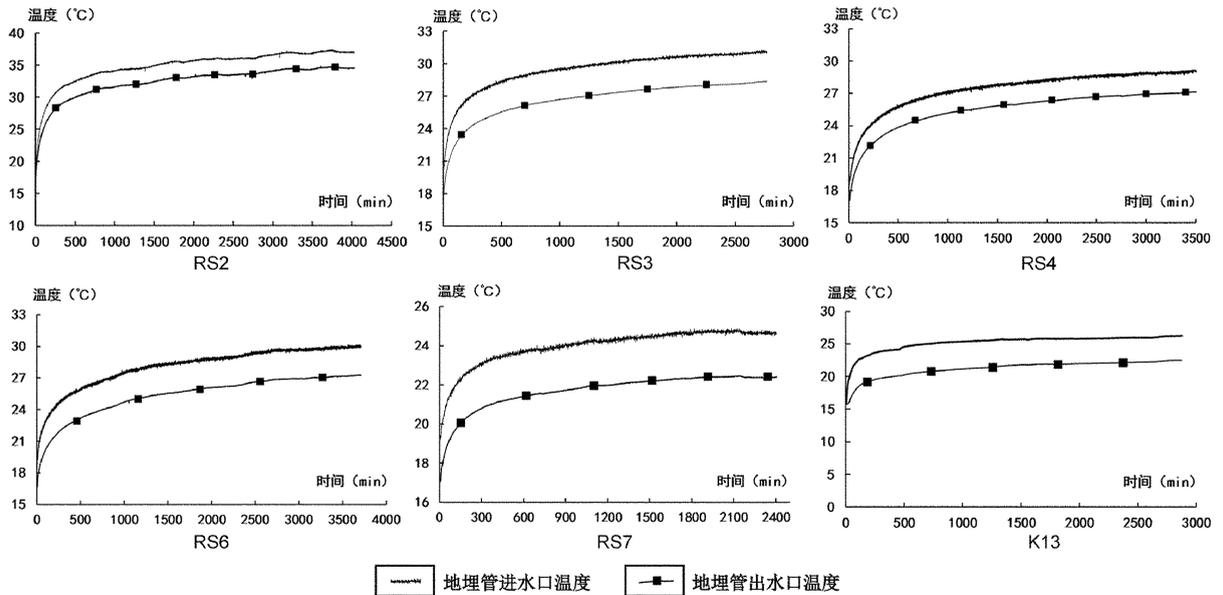


图 2 试验孔进出水口温度随时间变化曲线图

根据加热 4 kW 测试数据绘制 T_f (进出水口平均温度)随 $\ln t$ 的变化曲线,并选择测试换热稳定状态下的数据进行线性拟合,拟合图及拟合方程式见图 3。每延米换热量(W/m)和平均热导率(W/m·k)计算结果见表 2。

通过对试验孔地质条件和试验测试结果综合分析,初步试验结果表明:每延米换热量(W/m)和平均热导率(W/m·k)花岗岩>灰岩>粉质粘土、中粗

$$m = \frac{Q}{H} \left[\frac{1}{4\pi\lambda} \ln \frac{4a}{r^2} - r \right] + R_b + T_0 \quad (4)$$

单孔换热量计算公式:

$$Q = G \times \Delta t / 0.86 \quad (5)$$

式中: Q —地理管每小时产生的热量 kW; G —地理管循环水流量(m³/h); Δt —地理管进出水口温差(°C)。

根据各试验孔的测试数据,绘制 T_f 随 $\ln t$ 变化曲线,求取其斜率(k),由(2)~(5)式可计算岩土体的平均热导率 λ 和每延米换热量。

4.2 试验结果

热响应试验加热功率均为 4 kW,试验孔地理管换热器进出水口温度随时间变化情况见图 2。

砂>粉土、粉细砂。在岩溶地下水富水性强,径流速度快的地段灰岩平均热导率>花岗岩。热导率现场试验结果与同类岩石样品试验室测定结果大小规律基本一致。

4.3 试验结果分析

根据该次试验测试结果和试验孔处水文地质条件,试验孔每延米换热量和平均热导率存在如下特点:

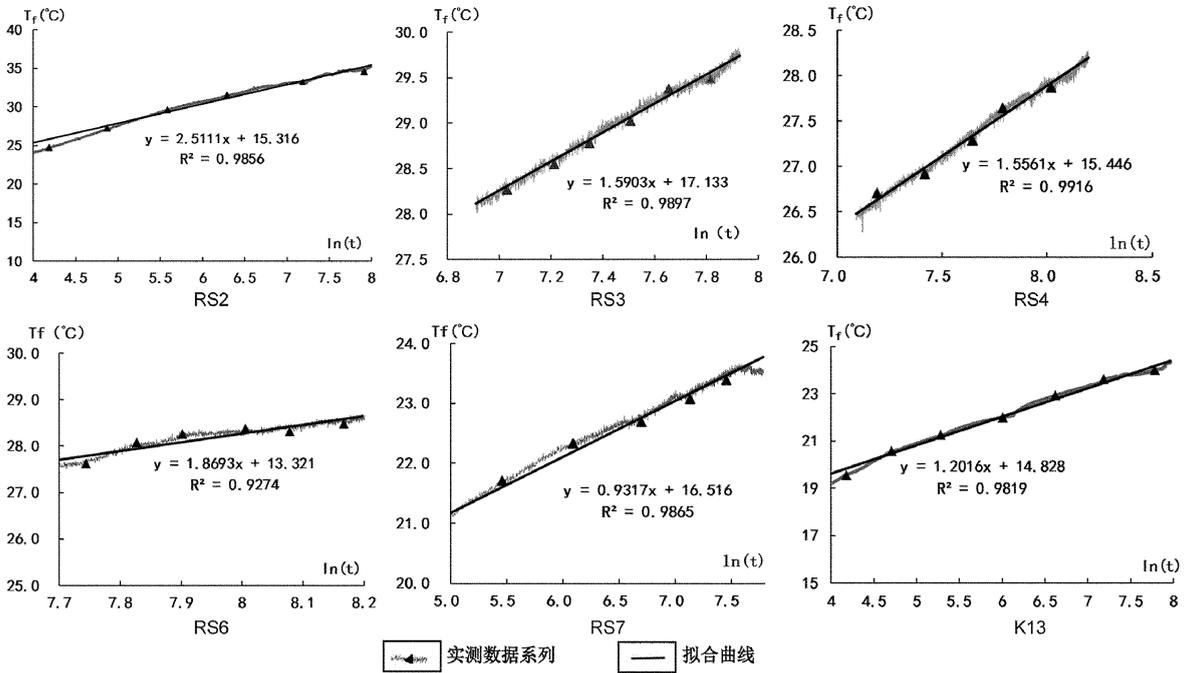


图3 试验孔拟合曲线图

表2 每延米换热量、平均热导率计算结果

孔号	下管深度 (m)	进出水口平均温差 ($^{\circ}\text{C}$)	U型管内平均流量 (m^3/h)	K 值	换热量 (kW)	每延米换热量 (W/m)	平均热导率 ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{k}$)
RS2	120.9	2.45	1.52	2.5181	4.33	36.08	1.13
RS3	120.5	2.77	1.38	1.5903	4.44	36.85	1.85
RS4	100.0	1.93	1.68	1.5561	3.77	37.70	1.93
RS6	70.0	2.73	1.37	1.8693	4.35	62.14	2.65
RS7	101.0	2.27	1.70	0.9317	4.49	44.46	3.80
K13	120.5	3.97	1.01	1.2016	4.66	38.67	2.56

(1) 第四系山前冲积平原粉质粘土、中粗砂地层每延米换热量和平均热导率大于黄河冲洪积平原粉土、粉细砂地层。

(2) 低山丘陵区基岩每延米换热量和平均热导率均大于第四纪松散层,花岗岩大于灰岩。

(3) 相同水文地质单元,地下水富水性强、径流速度快的地段,钻孔每延米换热量和平均热导率大。

5 结论及建议

(1) 鲁西黄河冲积平原粉土、粉质粘土、细砂地层,山前冲洪积平原粉质粘土、粘土、中细砂地层,中低山丘陵灰岩和花岗岩地层,平均每延米换热量分别为 $36.47 \text{ W}/\text{m}$, $37.70 \text{ W}/\text{m}$, 41.57 和 $62.14 \text{ W}/\text{m}$; 平均热导率分别为 $1.49 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{k}$, $1.93 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{k}$, $3.18 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{k}$ 和 $2.65 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{k}$ 。

(2) 每延米换热量和平均热导率第四系山前冲洪积平原粗颗粒的粉质粘土、中粗砂大于黄河冲洪积平原细颗粒的粉土、粉细砂;花岗岩大于灰岩,灰岩大于第四系松散层。热导率现场试验结果与同类岩石样品试验室测定结果大小规律基本一致,现场热响应试验测试结果可靠性强。

(3) 相同水文地质单元,地下水富水性强、径流速度快的试验孔每延米换热量和平均热导率大。

鲁西地区不同岩性地层热响应试验结果,可为该区浅层地温能开发利用工程设计、浅层地温能调查评价和开发利用提供基础数据。

参考文献:

[1] 周华慧,王景刚,余军.地源热泵岩土热响应现场测试及分析[J].制冷与空调,2012,12(2):57-60.

- [2] 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):55-60.
- [3] 王秉沈,田廷山,赵继昌,等.我国地温资源开发与地源热泵技术应用、发展及存在问题[J].地热能,2009(1):23-26.
- [4] 刘春雷,王贵玲,王婉丽,等.基于现场热响应测试方法的地下岩土热物性分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(5):1602-1608.
- [5] 李少华,秦祥熙,牛定辉,等.现场热响应试验测定导热系数的影响因素分析[J].暖通空调,2015,45(12):49-52.
- [6] 毕文明,岳丽燕,韩再生,等.埋管换热器性能综合微缩试验研究[J].水文地质工程地质,2014,41(1):144-148.
- [7] 韩斯,金光,毕文明,等.某地源热泵场浅层土壤分层热物性响应试验[J].水文地质工程地质,2015,42(4):144-149.
- [8] 中华人民共和国建设部.地源热泵系统工程技术规范(2009年版)(GB/T50366-2005)[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [9] 史启朋.汶泗河冲积扇松散层现场热响应试验数据分析及应用[J].山东国土资源,2014,30(2):54-57.
- [10] 朱友强,刘桂仪,佟光玉,等.山东省浅层地温能开发与应用实例[A]//地温能资源与地源热泵技术应用论文集[C].北京:地质出版社,2011:3-8.
- [11] 周亚醒.鲁西地区浅层地温能地热地质条件与开发利用适性评价[J].山东国土资源,2015,31(8):45-49.
- [12] 李传谟,康凤新.岩溶水资源及增源增采模型[M].济南:山东科学技术出版社,1999:22-33.
- [13] 刁乃仁.地热换热器的传热问题研究及其工程应用[D].北京:清华大学,2005:16-69.
- [14] 毕文明,郭艳春,王琳.埋管地源热泵系统岩土体热物性参数研究[A]//地温能资源与地源热泵技术应用论文集[C].北京:地质出版社,2009:105-111.
- [15] 于明志,彭晓峰,方肇洪,等.基于线热源模型的地下岩土热物性测试方法[J].太阳能学报,2006,27(3):279-283.

Primary Study on Thermal Response Test Results in Different Lithologic Strata in Luxi Area

SHI Qipeng, WU Xiaohua, JIANG Fuhong, LI Lin, SONG Shuailiang, WU Yanming, MENG Jia
(Lunan Geo-engineering Exploration Institute, Shandong Yanzhou 272100, China)

Abstract: in order to study heat transfer of buried pipe in different strata of the heat exchanger, regarding silt, silty clay and fine sand, clay, silty clay, sand, limestone and granite as the research object, thermal response test has been carried out in the Yellow River alluvial plain, the piedmont alluvial plain and hilly area in Luxi region. As showed by the preliminary test results, as to per meter heat transfer (W/m) and the average thermal conductivity ($W/m \cdot k$), the largest is granite hole, followed by limestone hole and silty clay, sand hole, and the minimum is silt and fine sand hole. In the karst groundwater enrichment strong and runoff area, the average thermal conductivity of limestone hole is larger than it in the granite hole. This study can provide basic data for buried tube heat exchanger type selection of ground shallow geothermal energy development and utilization project in different strata, shallow geothermal energy evaluation and development and utilization.

Key words: Thermal response test; per meter heat transfer; average thermal conductivity; Luxi area