

汶泗河冲洪积扇松散层现场热响应 试验数据分析及应用

——以兖州市南郊试验场为例

史启朋

(山东省鲁南地质工程勘察院, 山东 兖州 272100)

摘要:现场热响应试验是获取岩土体热物性参数的主要方法之一,可为试验场区地源热泵工程埋管换热器类型及长度的选择,浅层地热能评价和开发利用提供基础数据。该文系统介绍了现场热响应试验的目地任务、试验装置、原理、内容和步骤,数据处理方法,并以位于汶泗河冲洪积扇中上流地区的兖州市南郊试验场松散层现场热响应试验为例,介绍了试验场区水文地质条件,试验过程、试验数据分析及应用。

关键词:热响应试验;单孔换热量;平均热导率;热扩散系数;汶泗河;兖州市

中图分类号:P641.8

文献标识码:B

通过现场热响应试验,确定场地岩土体初始平均温度、不同工况下单孔换热量、岩土体平均热导率和热扩散系数,为该地区地源热泵埋管换热器类型及长度的选择,浅层地热能评价和开发利用提供岩土体的热物性参数^[1,2]。

1 试验方法

1.1 试验装置和原理

1.1.1 试验装置

试验设备是由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。该仪器由主机和辅机2部分组成,主机由循环泵、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,可独立完成无负荷循环试验、加热恒功率试验。辅机由制冷压缩机、风冷器等组成,与主机串联完成制冷恒温度试验。

1.1.2 实验原理

试验时先将试验设备的进(出)水口分别与待测U型埋管的(进)出水口相连接,试验主机与辅机串联,组成闭合回路,向回路中注入自来水当传热介质。通过启动管道循环水泵,驱动回路流体开始

循环,待系统进出水口温差保持恒定后,开始对回路中的传热介质加热(冷)负荷,随着U型管(进)出水口温度的不断升高(降低),其热(冷)量通过U型管管壁逐渐释放到地下岩土体中,同时岩土体温度逐渐升高(降低),最终管内流体温度和管外岩土体温度达到动态热平衡状态,试验原理见图1。依据不同负荷的试验数据结合室内岩样热物性指标的分析结果,按照线热源理论的线模型,最终求得试验孔岩土体的初始平均温度、单孔换热量、平均热导率 λ 和热扩散系数 a 。

1.2 试验内容及试验步骤

1.2.1 试验内容

现场热响应试验内容有^[3]:平均初始温度测试;小功率(恒热流)加热测试;大功率(恒热流)加热测试;取热工况制冷恒温度测试。

1.2.2 试验步骤

现场热响应试验是在试验孔的钻探成孔、下入PE32U型埋管、孔内压力测试、回填砾料、再次试压和管口密封至少48h后进行的,试验步骤如下:

(1)将热响应测试仪主机与埋管相连接,主机与辅机串联,组成一个闭合回路,向回路内注入干

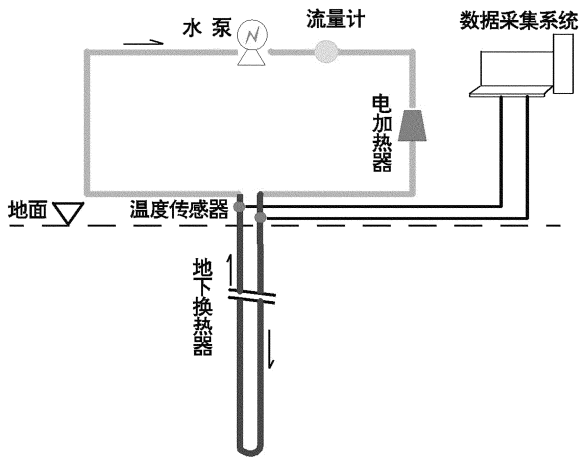


图1 试验原理图

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。

(2)进行无负荷循环测试,获取地层初始平均温度。要求温度(变化幅度小于 0.5℃)流量(波动范围在 ±5%)稳定后,观测时间不小于 24 h。

(3)进行小负荷 4 kW 测试,记录试验孔进出水口温度和传热介质的流量,温度(变化幅度小于 1℃)流量(波动范围在 ±5%)稳定后,观测时间不小于 24 h。小负荷进行完成后停止加热,进行无负荷循环,继续观测回路的进出水口温度,至温度稳定(变化幅度小于 0.5℃)为止,观测时间不小于 12 h。

(4)在小负荷 4 kW 测试结束后,将电加热器功率调节到大负荷 8 kW 并保持稳定,按小负荷测试的步骤进行测试。

(5)制冷恒温度试验,先进行制预热,设定预热时间,然后设定制冷最低温度为 7℃,记录试验孔进出水口温度和传热介质的流量,温度(变化幅度小于 1℃)流量(波动范围在 ±5%)稳定后,观测时间不小于 24 h。制冷恒温度进行完成后,进行无负荷循环,继续观测回路的进出水口温度,至温度稳定(变化幅度小于 0.5℃)为止,观测时间不小于 12 h。以上各阶段的测试,管内传热介质流速不应低于 0.2 m/s,数据记录频率为 1 次/min。

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

2 试验数据处理方法

2.1 试验所得数据

通过现场热响应试验可获得地埋管换热器的进

出水口温度、流量及电加热器加热功率等数据系列。

2.2 数据计算方法

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:基于线热源理论的线模型和基于圆柱热源理论的柱模型。该次测试所用的设备均采用了线热源理论数学模型。

根据线热源理论^[4],流入与流出地埋管的水温平均值计算式为:

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

式中: T_f —地埋管内流体平均温度(取入口与出口的平均值)(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_o —岩土远处未受扰动的温度(K)。

公式(1)可整理简化为:

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

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

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

单孔换热量计算公式:

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

式中: Q —地埋管每小时产生的热量 kW; G —地埋管循环水流量 m³/h; Δt —地埋管进出水口温差℃。

$$C = \lambda / a \quad (6)$$

式中: C —岩土体体积比热容。

由(2)~(6)式可计算出单孔换热量、岩土体的平均热导率 λ 和热扩散系数 a 。

3 实例

3.1 实验场地水文地质条件

实验场地位于兖州市南郊,属于汶泗河冲洪积扇的中东部^[5],场地地层岩性 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。场地含水砂层总厚度为 12 m,地下水水位埋深为 5.622 m,井孔单位涌水量为 210.84 m³/d·m。实验孔孔深 100

m,孔径 φ180 mm,下入 PE32 双 U 管^①。

3.2 数据计算结果

3.2.1 无负荷循环测试数据计算

一般浅层岩土体在垂向上可以划分为变温带、恒温带和增温带。在热响应测试中,不开启加热或制冷装置,仅开启循环主水泵。刚开始测试时,地理管进水口温度反映仪器水箱中循环水的温度,温度值较高(夏季),出水口温度反映变温带的温度,温度值较低。经过一段时间后,地理管换热器的进出水口温度将逐渐趋于稳定(温度变化小于 0.5℃)。此状态下地理管进出水口平均水温通常被认为“岩土体初始平均温度”。岩土体温度历时过程见图 2,岩土体初始平均温度测试结果为 17.09℃。

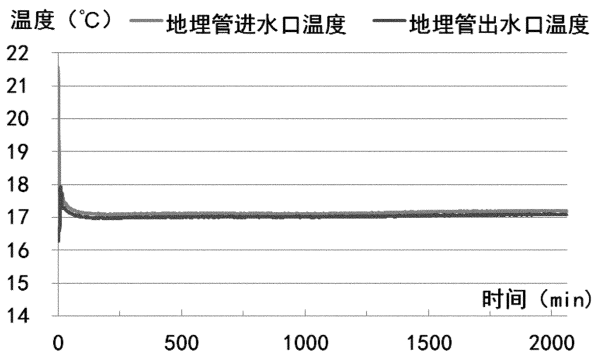


图2 岩土体初始平均温度测试结果图

3.2.2 加热 4 kW 数据分析

加热 4 kW 后,系统开始运行时地理管和岩土层的温差比较大,传热较快,进出口水温也在逐渐升高,地理管和岩土体的温差减小,传热变慢,使得进出口水温上升变慢,地理管和岩土体的换热量逐渐趋于稳定状态。小功率加热下温度-时间曲线测试结果如图 3 所示。

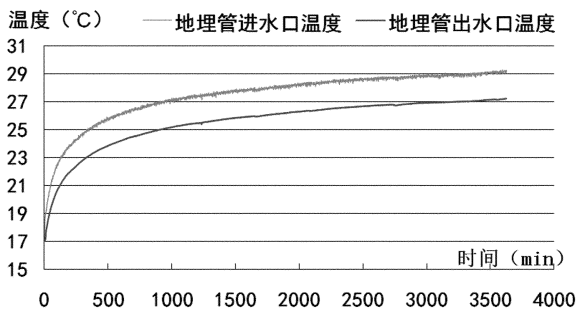


图3 加热 4 kW 时进出口水温度随时间的变化图

根据小功率加热数据可绘制 T_f (进出口平均温度)随 $\ln t$ 的变化曲线,并选择加热 4 kW 测试换热稳定状态下(20 ~ 60 h)的数据进行线性拟合(图

4)。

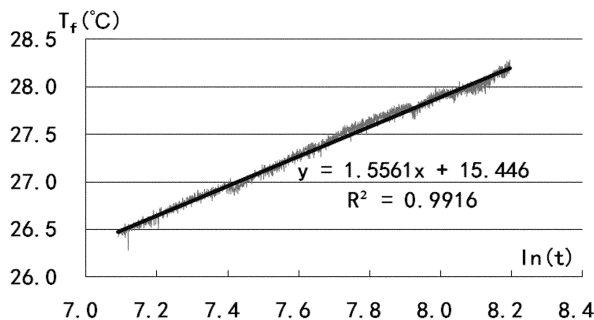


图4 4kW 拟合图(20 ~ 60h)

得到拟合方程如下:

$$y = 1.556x + 15.44 \quad R^2 = 0.9916 \quad (7)$$

由公式(2)和(7)可得到 K 值为 1.556,根据公式(5)和选取试验孔加热 4 kW 稳定段 20 ~ 60 h 的试验数据,可计算单孔换热量为 3.77 kW。将 K, Q 和 H 代入公式(3)得到岩土体平均热导率为:

$$\lambda = \frac{Q}{4kH\pi} = 1.93W/(m \cdot k)$$

根据该次钻孔取样分析资料,试验孔岩土体的体积比热容按地层厚度加权平均值为 $C = 2.73 \times 10^6 J/(m^3 \cdot K)$,由公式(6)计算岩土体热扩散系数为: $a = \lambda/C = 0.707 \times 10^{-6} m^2/s$ 。

3.2.3 加热 8 kW 数据分析

在完成加热功率 4kW 测试后停止加热,并按要求继续观测回路进出水口温度,至温度稳定(变化幅度小于 0.5℃)至少 12 h 后,将电加热器功率调到 8 kW 开始做加热大功率测试,测试温度稳定后观测时间不小于 24 h,利用所获取的数据绘制进出口水温随时间变化曲线图(图 5)和线性拟合图(图 6)。

由加热 8 kW 计算单孔换热量为 8.57 kW,岩土体平均热导率 λ 为 2.02W/(m · k),热扩散系数 a 为 $0.741 \times 10^{-6} m^2/s$ 。

3.2.4 制冷恒温度数据分析

在完成加热 8 kW 测试后停止加热,并按要求继续观测回路进出水口温度,至温度稳定(变化幅度小于 0.5℃)至少 12 h 后,将仪器调至制冷恒温度模式,先进行制冷预热,然后将制冷温度设定 7℃左右,开始做制冷恒温度测试,温度稳定后观测时间不

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

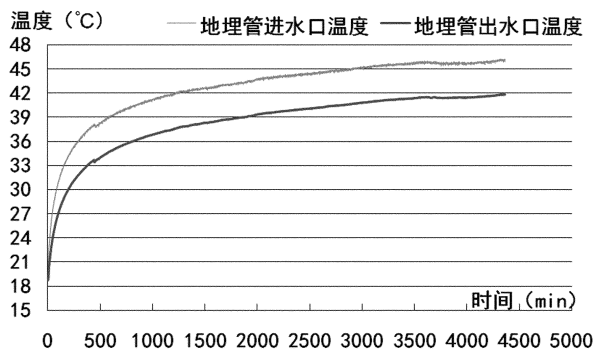


图5 加热 8 kW 时供/回水温度随时间的变化图

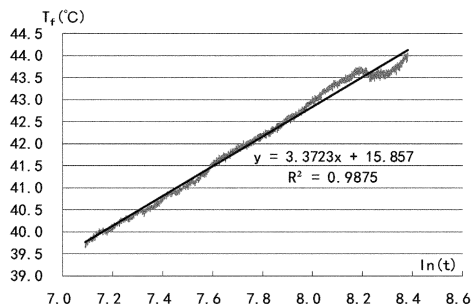


图6 8 kW 拟合图(20~73 h)

小于 24 h, 利用所获取的数据绘制进出水口温度随时间变化曲线图(图 7)。由图可以看出, 在测试前 0~7 h 内, 进出水口温度持续降低, 当温度达到设定温度值后, 进水温度开始在设定值上下波动 ($\pm 0.2^{\circ}\text{C}$), 出水温度则继续降低, 但降低的速率越来越低, 最终达到稳定状态。选择制冷恒温测试数据稳定段 24~48 h 数据, 由公式(5)可计算试验孔单孔取热量为 2.34 kW。

4 试验结果及应用

Analysis and Application of Thermal Response Test Data in Loose Layers of Wensi River Alluvial Fan

—Setting Proving Ground in South Yanzhou District as an Example

SHI Qipeng

(Lunan Geo-engineering Exploration Institute, Shandong Yanzhou 272100, China)

Abstract: Field thermal response test is one of the main method to obtain thermal parameters of rock and soil. It can provide basic data for selecting type and length of ground heat exchanger instrument in heat pump project area of in testing ground source field, and evaluating shallow geothermal energy development and utilization. In this paper, task, test equipment, principles, contents, procedures and data processing method of field thermal test have been introduced comprehensively. Taking thermal response test in loose layers in south district of Yanzhou city in upper reach of in Wensi River Alluvial fan area as an example, hydrogeological conditions, test procedures, test data analysis and application of test field have been introduced.

Key words: Thermal response test; hole heat exchange; average thermal conductivity; thermal diffusivity

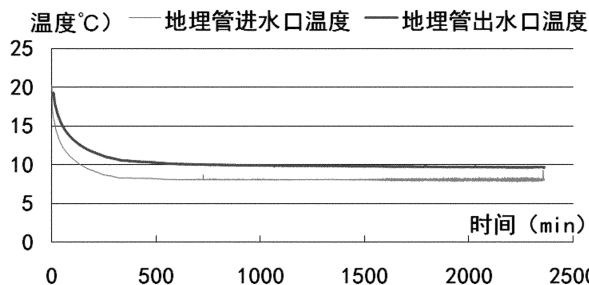


图7 取热测试工况下的温度-时间曲线图

该次现场热响应试验测试结果为:①试验场地岩土体初始平均温度为 17.09°C ;②加热 4 kw 和 8kw 测试计算单孔换热量 Q 为 3.77 kW 和 8.57kw, 岩土体综合热导率 λ 为 $1.93 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ 和 $2.02 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$, 热扩散系数 a 为 $0.707 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $0.741 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$;③单孔取热量为 2.34kw。以上试验结果可在相同水文地质单元或地层岩性相似地区, 进行地源热泵工程地理管换热器类型的选用, 浅层地热能评价和开发利用工作中得到广泛的应用。

参考文献:

- [1] GB/T50366-2005. 地源热泵系统工程技术规范(2009年版)[S].
- [2] 孟祥瑞, 孙友宏, 王庆华, 等. 大广高速公路双辽服务区地源热泵系统地层热物性原位测试[J]. 探矿工程, 2011, 38(1): 47-50.
- [3] DZ/T0225-2009. 浅层地热能勘查评价规范[S].
- [4] 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.
- [5] 康凤新, 徐军祥, 张中祥. 山东省地下水资源及其潜力评价[J]. 山东国土资源, 2010, 26(8): 4-5.