

现场岩土热物性参数的影响因素分析

石凯波, 王景刚, 鲍玲玲, 侯松宝, 曹辉
(河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 对邢台市一试验井分别进行3d和2d的热响应试验, 研究加热功率、测试时长、土壤初始温度对岩土热物性参数的影响。结果表明, 同一测试孔在不同的加热功率下的岩土热物性参数存在差异; 测试时长为48~64 h时测得的岩土热物性参数比较稳定; 土壤初始温度越高, 岩土热扩散系数越小。

关键字: 热响应试验; 加热功率; 测试时长; 土壤初始温度

中图分类号: TU831

文献标识码: A

Analysis of influence factors for in-situ thermophysical parameters of rock and soil

SHI Kaibo, WANG Jinggang, BAO Lingling, HOU Songbao, CAO Hui

(College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan, 056038, China)

Abstract: Based on the thermal response tests of 3-day and 2-day in a test well in Xingtai, the effects of heating power, testing time and initial soil temperature on the thermophysical parameters of rock and soil were studied. The results show that under the same test area, different heating powers have different results. The measured thermophysical parameters of rock and soil are relatively stable when test time vary from 48 to 64 hours. The higher the initial soil temperature is, the smaller thermal diffusion coefficient of rock and soil is.

Key words: thermal respond test; heating power; testing time; initial soil temperature

近年来, 随着能源形势的紧张, 可再生能源技术受到了广泛地关注和重视^[1]。地源热泵技术是一种可以利用浅层地热能的可再生能源技术, 而岩土热物性参数(导热系数和热扩散率)是影响地埋管换热器的重要参数^[2]。如果岩土热物性参数与实际情况发生10%的偏差, 则会对设计出的井深产生4.5%~5.8%的影响^[3]。所以, 准确确定岩土热物性参数对于指导土壤热交换器设计有一定的参考价值。目前, 现场热响应试验法是获得岩土热物性参数的主要方法^[4-5]。针对目前国内现场热响应试验受设置工况、操作步骤、季节等因素的影响且没有统一的规范, 故需要开展岩土热物性参数影响因素的分析研究。

1 单孔热响应试验

试验地点位于邢台南宫市。试验孔参数见表1。

1.1 地层结构

岩土的热物性参数与地层的密度、含水率、孔隙比、地下水渗流^[6-7]等因素有关。根据邢台地矿局提供的资料, 该地区地面以下150 m深度的土样主要以粘土、粉粘、粉土为主。含水率在14.2%~36.9%范围内, 密度在1.84~2.15 g/cm³范围内, 孔隙比在0.488~1.039范围内。

1.2 测试装置与流程

测量装置主要部件由功率可调的电加热器、循

表1 试验孔的相关情况
Tab.1 Relevant information of the test boreholes

测试孔编号	功率 /W	埋管深度 /m	埋管导热系数 / $(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	钻孔半径 /m	埋管内外径 /m	埋管形式	回填材料
孔1#	3 000 4 500	120	0.44	0.16	0.026/0.032	双U并联	原浆回填

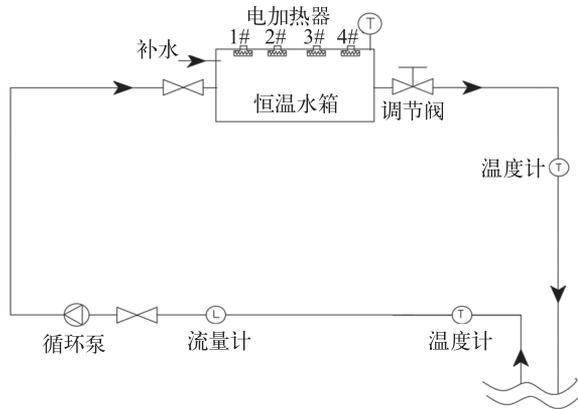


图1 试验测试装置示意图

Fig.1 The testing device diagram

环水泵、加热水箱、温度测量装置、流量测量装置、信号变送装置、数据采集与处理装置等构成(图1)。测量装置中的管路与埋管换热器地下回路相接,循环水泵驱动流体在回路中循环流动,流体经过加热器加热后流经地下回路与地下岩土进行换热。

测量装置中的管路与埋管换热器,在地埋管内注满循环水,保持电加热器处于关闭状态,开启循环水泵,使地埋管的进出口水温达到稳定。此时,地埋管的进出口水温的平均值即为大地初始温度。启动相应功率的电加热器并保持功率恒定,持续加热直到地埋管进出口温度基本稳定,并稳定一段时间。测试结束后先关闭电加热器,再关闭循环水泵。

1.3 数据处理方法

根据文献^[8-9]介绍的方法,采用线热源模型处理试验数据。U型管内流体平均温度与测试时间变化关系式可表示为

$$T_f = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \ln\tau + \left\{ \frac{Q}{4\pi\lambda H} \left[\ln\left(\frac{4\alpha}{r_b^2}\right) - \gamma \right] + \frac{Q}{H} R_b + T_0 \right\} \quad (1)$$

$$R_b = R_f + R_p + R_g \quad (2)$$

流体与U型管壁的对流换热热阻:

$$R_f = \frac{1}{\pi d_i h} \quad (3)$$

U型管的导热热阻:

$$R_p = \frac{1}{2\pi\lambda_p} \ln \frac{d_o\sqrt{n}}{d_o\sqrt{n} - (d_o - d_i)} \quad (4)$$

U型管外壁与钻孔壁之间的导热热阻:

$$R_g = \frac{1}{2\pi\lambda_p} \ln \frac{d_b}{d_o\sqrt{n}} \quad (5)$$

流体与型管壁间的对流换热系数为:

$$h = 0.023 \frac{\lambda_l}{d_i} Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad (6)$$

式中: T_f —地埋管进出口平均水温, $^{\circ}\text{C}$; Q —加热功率, W; λ —土壤的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$; H —钻孔深度, m; α —土壤的热扩散率, (m^2/s) ; r_b 为钻孔的半径, m; γ 为欧拉常数, 取 0.577 2; R_b —U型管内流体与钻孔壁间的总传热热阻, $(\text{K}\cdot\text{m})/\text{W}$; λ_p 、 λ_b 分别为U型管和回填料的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; λ_l 流体的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; T_0 —土壤初始温度, $^{\circ}\text{C}$; d_i 、 d_o 分别为型管的内、外径, m; n 是钻孔内型管的管数, 对于单U型管 $n=2$, 对于双U型管 $n=4$ 。

该模型可简化为: $T_f = m \ln(\tau) + b$ (7)

其中:

$$m = \frac{Q}{4\pi\lambda H}, \quad b = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \left[\ln\left(\frac{4\alpha}{r_b^2}\right) - \gamma \right] + \frac{Q}{H} R_b + T_0 \quad (8)$$

由式(8)可得岩土导热系数和容积比热容的计算式:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi\lambda H}, \quad \alpha = \frac{r_b^2}{4} e^{4\pi\lambda \left[(b - T_0) \frac{Q}{H} - R_b \right] + \gamma} \quad (9)$$

2 试验结果分析

2.1 土壤初始温度测试

考虑到钻孔以及回填等过程对土壤初始温度的扰动作用,本次试验中在土壤初始温度完全恢复后才开始进行相关试验工作。下管并回填完毕后,让埋管内的水静止 48 h 后,开启循环水泵,待地埋管

进出口温度逐渐趋于稳定,并记录地埋管的进、出口温度,取其两者平均后的温度为地层原始温度。本次试验测得的土壤初始温度为 17.2℃,如图 2。

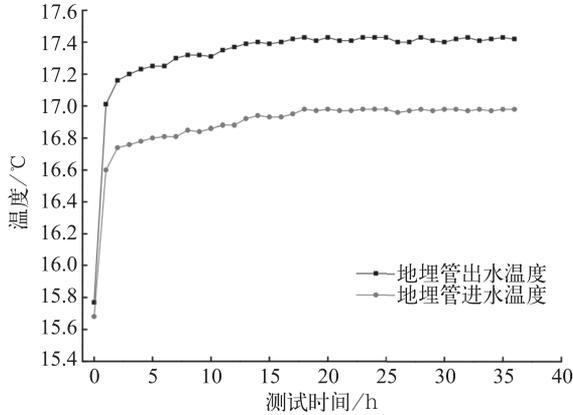


图 2 孔 1# 土壤初始温度变化曲线
Fig.2 Soil initial temperature of well 1#

2.2 加热功率对岩土热物性参数的影响

分别以表 1 的加热功率对邢台地区的测试孔进行热响应试验,由于测试初期不稳定,舍弃前 6 个小时测得的数据,利用加热 6 h 后的测试数据对两个恒定功率进出口水平均温度与时间进行对数拟合,图 3 为流体平均温度在这两个工况下与时间的对数关系曲线。现场热响应试验热物性参数结果见表 2。

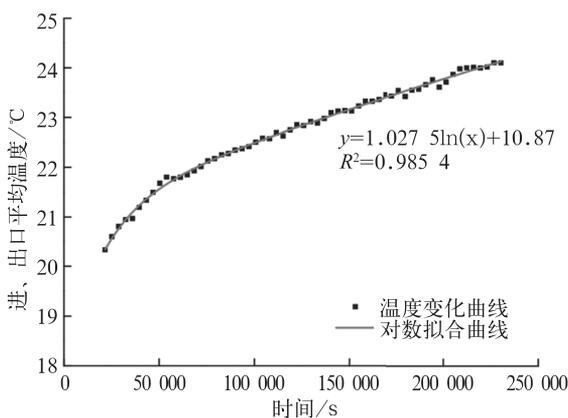
现场热响应试验结果对比显示,较大功率计算出的岩土热物性参数越大。这与 Witte^[10]在建立地下水渗流条件下进行热响应测试,得出在地下无渗流水时,不同功率有地下水渗流条件时,随着加热功率的增大,得出的岩土热物性参数也逐渐增大。根据邢台地矿局提供的资料,该地区含水率在 14.2% ~ 36.9% 范围内,地下水流速一般为 1.0 ~ 1.3 cm/d。对比分析可得出在有地下水渗流地区宜采用不同的功率进行测试,取不同功率测试出的参数平均值作为该地区的岩土热物性参数结果,以减小地下水渗流带来的影响。

2.3 不同功率测试时长对岩土热物性参数的影响

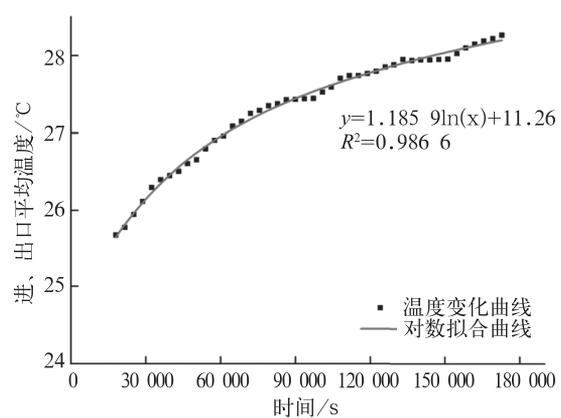
以 8 h 为间隔选择不同的测量时间对现场热响应试验得出的试验结果进行数值拟合,根据公式 (9) 计算出导热系数和热扩散系数,其结果如图 4 所示。当加热功率为 3 kW 时,在开始的 48 h 内,导热系数和热扩散系数呈现递减的趋势,且递减趋势明显,在 48 h 之后岩土热物性参数逐渐趋于稳定。当加热功率为 4.5 kW 时,在开始的 32 h 内,岩土热物性参数递减趋势明显,之后,岩土热物性参数趋于稳定。由此可见,加热功率越大,使现场热响应试验达到稳定时间越短。因此建议现场热响应试验的测试时

表 2 孔 1# 的现场热响应试验结果
Tab.2 In-situ thermal response of well 1#

测试孔编号	加热功率 /W	拟合公式	导热系数 / $(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	热扩散系数 / $(\times 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1})$
孔 1	3 000		1.94	0.664
	4 500		2.52	0.811



(a) 加热功率 3 kW



(b) 加热功率 4.5 kW

图 3 孔 1# 流体平均温度与时间的对数关系曲线

Fig.3 Curves of fluid average temperature to logarithmic time of well 1#

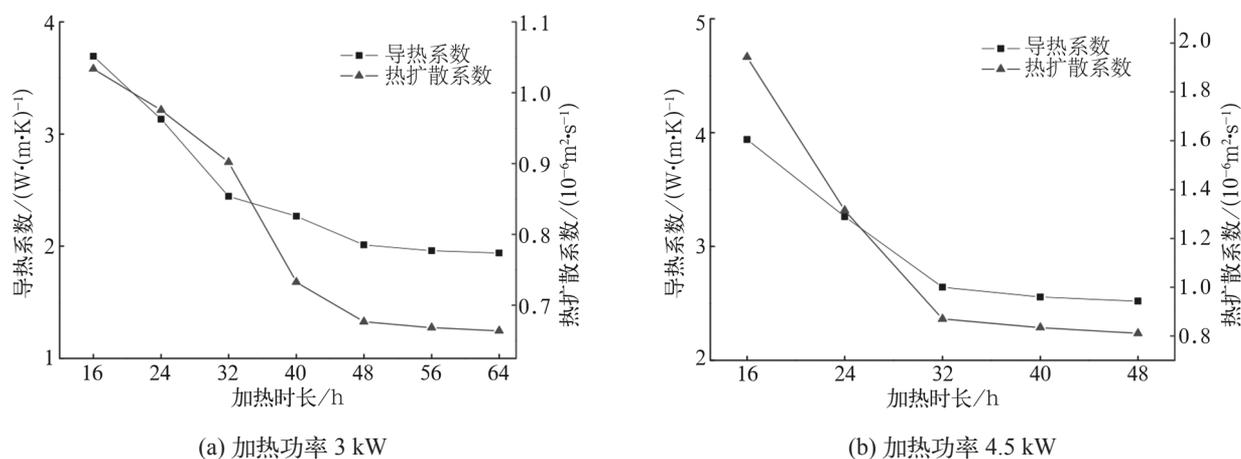


图 4 孔 1# 加热时长对热物性参数的影响
Fig.4 Influence of heating length on thermophysical parameters of well 1#

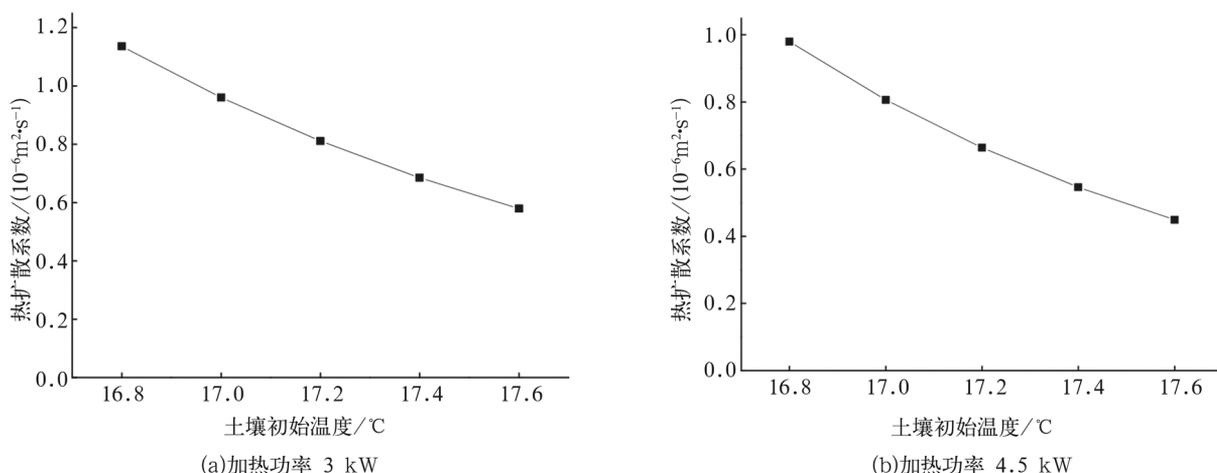


图 5 孔 1# 热扩散系数随土壤初始温度变化
Fig.5 Influence of initial temperature to thermal diffusion coefficient of well 1#

间控制在 48 ~ 64 h 范围为宜。

2.4 土壤初始温度对岩土热物性参数的影响

本文采用线热源模型处理试验数据，由式 (9) 可知，导热系数与土壤初始温度取值无关。当土壤初始温度测量出现误差时，导热系数数值不变，热扩散系数会发生相应的改变。对孔 1# 进行误差分析，其土壤初始温度为 17.2°C，3 kW 计算出的导热系数为 1.94 W/(m·K)，4.5 kW 计算出的导热系数为 2.5 W/(m·K)，其他参数不变，分别令土壤初始温度为 16.8°C、17°C、17.2°C、17.4°C、17.6°C。运用公式 (9) 计算出两个功率下热扩散系数与土壤初始温度关系曲线如图 5。

由图 5 可以看出，热扩散系数随着土壤初始温度的升高而减小。通过公式 (9) 计算可以看出土壤初始温度发生 0.2°C 偏差时，则会对热扩散系数产生 20% 的影响。因此，利用线热源模型计算岩土热扩

散系数时，需要准确测量土壤初始温度。

3 结论

1) 在现场热响应试验中，同一测试孔在不同加热功率数据结果对比中，较大功率得出的岩土热物性参数数值较高，这主要是由于地下水渗流的缘故，对于地下有流动水的地区，适合采用不同加热功率测试，取其平均值作为最终的岩土热物性参数。

2) 热扩散系数随着土壤初始温度测量值的升高而减小，且计算出土壤初始温度每偏差 0.2°C，热扩散系数会发生 20% 偏差。

3) 现场热响应试验测试起始阶段，岩土热物性参数随测试时间的增长呈现减少的趋势，较大加热功率减小的更为明显。且加热功率越大，岩土热物性参数达到稳定的时间越短。

(下转第 79 页)

然气学报, 2006, 28(4): 236-238.

- [4]姚素平, 张科. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积有机相[J]. 石油与天然气地质, 2009(1): 74-84.
- [5]王守则, 郑孟林, 张发. 鄂尔多斯盆地中、新生代后期改造[J]. 世界地质, 2005, 24(4): 356-362.
- [6]赵俊兴, 陈洪德, 傅锁堂. 等. 鄂尔多斯盆地侏罗系层序地层与盆地充填演化耦合关系[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2007(5): 511-518.
- [7]孟祥超, 韦学锐, 韩维哲. 等. 差异压实作用中的同沉积小断层成因探讨 - 以高台子地区扶杨油层为例[J]. 大庆石油地质与开发, 2007(6): 20-23.
- [8]关德范. 差异压实、构造、油气[J]. 大庆石油学院报, 1982(1): 17-25.
- [9]裘亦楠, 王衡鉴, 曹文富. 差异压实与大油气田[J]. 石油勘探与开发, 1981(1): 4-15.
- [10]陆明德, 郭占谦, 杨开清. 松辽盆地宋芳屯油田的差异压实古背斜及其找油意义[J]. 地球科学, 1986(3): 243-250.
- [11]王定一, 刘池阳, 姜传书. 恢复地层当初沉积厚度方法的探讨及在研究压实构造中的初步应用[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 1978(1): 12-22.
- [12]谢丛姣, 刘明生, 杨俊红. 微构造与油气聚集关系初探[J]. 断块油气田, 2001(4): 4-7.
- [13]李兴国. 油层微型构造对油井生产的控制作用[J]. 石油勘探与开发, 1987, 14(2): 53-59.

(责任编辑 王利君)

(上接第 69 页)

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.
- [2]刁乃仁, 方肇洪. 埋管式地源热泵技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [3]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.
- [4]于明志, 方肇洪. 现场测量深层岩土热物性方法[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(3): 354-356.
- [5]王书中, 由世俊, 张光平. 热响应测试在土壤热交换器设计中的应用[J]. 太阳能学报, 2007, 28(4): 405-410.
- [6]郑强, 晋华, 刘虎, 等. 孔隙率与含水率对砂质土样导热系数的影响[J]. 水电能源科学, 2015, 33(12): 125-128.
- [7]刘虎, 晋华, 邢述彦, 等. 地下水渗流对地埋管换热器周围温度场的影响[J]. 水电能源科学, 2012, 30(12): 117-119.
- [8]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.
- [9]BOTH 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.
- [10]WITTE H J L, VAN GELDER A J. Geothermal response tests using controlled multi power level heating and cooling pulses: quantifying groundwater effects on heat transport around a borehole heat exchange[C]//Proc. the Tenth International Conference on Thermal Energy Storage. New Jersey: Pomona NJ, 2006: 37-46.

(责任编辑 王利君)