

文章编号: 1673-9469 (2017) 04-0074-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.04.017

基于探针法与热响应法的岩土热物性测试对比分析

李玲, 巩娜, 王景刚, 鲍玲玲, 曹辉
(河北工程大学能源与环境工程学院, 河北邯郸 056038)

摘要: 通过对 Hot Disk 测试仪测得岩土热物性参数与现场热响应法测试结果的对比, 发现在实验室里测得的导热系数与现场热响应测得的导热系数差别较大, 在进行地源热泵设计与选型时, 应进行现场热响应试验确定在加热或冷却功率下测得的土壤导热系数, 以此作为选型依据。

关键词: 探针法; 热响应法; 岩土热物性; 地源热泵

中图分类号: TU83

文献标识码: A

A comparative analysis of geothermal thermal property tests based on probe method and thermal response method

LI ling, GONG Na, WANG Jinggang, BAO Lingling, CAO Hui

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

Abstract: After the comparison between the thermal property parameters of the Hot Disk tester and the obtained test results of the field thermal response, it is found that the thermal conductivity measured in the laboratory is significantly different from the thermal conductivity of the field. During the design and selection of the ground source heat pump, the thermal conductivity of soil measured under heating or cooling power should be determined, which can be the selection basis.

Key words: Probe method; Thermal response method; Thermal properties of rock and soil; Ground source heat pump

随着科学技术的不断发展和生活水平的不断提高, 人们对生活质量的要求日益增加, 暖通空调行业的能耗也在不断地增加, 能源紧缺和环境恶化等问题引起了人们的高度重视。太阳能、风能、地热能、潮汐能、生物质能等可再生能源日益引起人们的关注。浅层地热能具有分布范围广泛、温度稳定、资源丰富的优点, 在我国京津冀地区利用广泛^[1]。岩土的热物性测试主要有现场热响应法和探针法。线热源模型、柱面热源模型计算广泛用于工程实例中分析测试数据, 但在建立时进行了适当简化设定^[2-3], 故需要开展岩土热物性参数影响的进一步研究。探针法测量材料导热系数是基于线热源理论^[3]。本文通过邯郸地区某地源热泵工程的测试井, 分别利用探针法和现场热响应法测试了岩土的热物性参数, 对两种方法测试结果进行了对比分析, 以期岩土导热系数的测量提供参考。

1 探针法测试

1.1 测试原理

探头同时作为热源和温度传感器, 在探头输出功率恒定的直流电时, 探头被加热, 电阻值随时间变化的关系为

$$R(t) = R_0 [1 + a\Delta T_i + \overline{a\Delta T(\tau)}] \quad (1)$$

式中: R_0 为探头被加热前的初始电阻; a 为电阻温度系数 (TRC); ΔT_i 为覆盖探头材料 (镍) 绝缘薄层的温度差分; $\Delta T(\tau)$ 为探头的平均温升 (假设探头和被测样品完全接触)。

探头和样品温度升高曲线见图 1, 可看出 ΔT_i 在经过时间 Δt_i 后变为常数, Δt_i 可近似表达为 $\Delta t_i \approx d^2/\alpha_i$, 其中 d 为绝缘层厚度, α_i 为绝缘层热扩散系数。由于 d 值非常小, 所以 Δt_i 也极小, 且在测试结果中做了修正。

收稿日期: 2017-08-05

特约专稿

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目 (E2015402139); 河北省教育厅科学技术处资助项目 (QN2014064)

作者简介: 李玲 (1993-), 女, 陕西宝鸡人, 硕士, 从事地源热泵理论技术方面的研究。

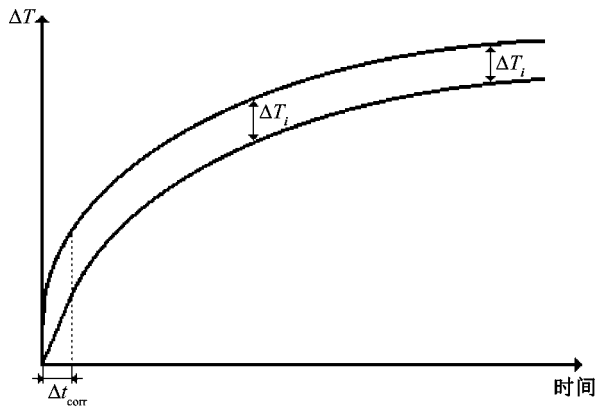


图 1 探头和样品温度升高曲线
Fig.1 Sensor and sample temperature increase curves.

$\overline{\Delta T(\tau)}$ 随时间变化的关系可表示为

$$\overline{\Delta T(\tau)} = \frac{Q}{\lambda r \sqrt{\pi^3}} D(\tau) \quad (2)$$

式中： Q 为经过 Δt_i 后探头释放的总热量； r 为探头的半径； D 为测试样的导热系数； $D(\tau)$ 为无因次时间函数，且

$$\tau = \frac{\sqrt{\alpha t}}{r} = \sqrt{\frac{t}{\theta}} \quad (3)$$

式中： α 为被测样品的热扩散系数； t 为测试时间； θ 为特征测量时间 ($\theta=r^2/\alpha$)。

将 (2) 式代入 (1) 式，并假设 $R^*=R_0(1+a\Delta T_i)$ 和 $k = \frac{R_0 a Q}{\lambda r \sqrt{\pi^3}}$ ，则可得

$$R(t) = R^* + kD(\tau) \quad (4)$$

将测得的电阻值 $R(t)$ 对 $D(\tau)$ 作图应得到一条直线，截距是 R^* ，斜率是 k 。通过反复选择不同的测试参数来变换特征时间 θ 拟合，使 $R(t)$ 对 $D(\tau)$ 的线性相关达到最大。此时，导热系数 λ 可由直线的斜率计算得出 k ，热扩散系数可由 $\alpha=r^2/\theta$ 得到，两者的比值得到体积比热。

1.2 测试装置

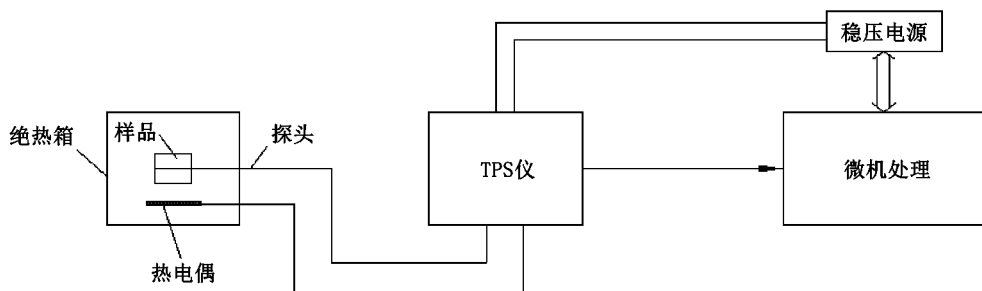


图 2 测量系统示意图
Fig.2 Measurement system

本次测试采用瑞典生产的 Hot Disk 测试仪。Hot Disk 探头由可导电的双螺旋结构绕线组成。此绕线采用的是光刻的金属箔 (镍丝)，被夹在两绝缘薄层之间。当进行热导测试时，平面的 Hot Disk 探头放置在两片样品之间——接触探头的是样品的一个平面。

Hot Disk 热常数分析仪使用高灵敏度的组件可以测量热导率在 0.01~500 W/mk 的材料。系统探测的温度精度优于 0.1 mk，安装地点应保证绝热、远离震动、湿度恒定。探头被夹在两块样品中间，测量前待测样品和探针应该被保存在恒定的外界温度中足够长的时间达到热平衡状态，来避免实验前以及实验中的温度漂移。样品安装应该使 Hot Disk 探头置于这个螺钉的中心位置。将一个小的金属片放置于样品顶部可以保证单轴的压力。首先连接电源线到 TPS 仪器，然后连接电脑，最后是连接总线。测量系统示意图如图 2 所示。

1.3 实验

将邯邢地区两个试验孔刚出土的岩土样品切成小圆柱块，按出土深度编号，用铁盒装好并密封，各收集 30 组，妥善运至河北工程大学能源与环境工程学院实验楼，在实验室内将每组样品进行切块。样品要求：样品直径至少要是探头直径的两倍，厚度至少与探头的半径相同；样品表面处理光滑，以保证与探头接触无缝隙，无气泡，防止温度升高，损坏探头。为了使测试结果准确，将 Hot Disk 测试仪预热 60 min，对每组样品进行三次重复测试，取三次平均值。

采用的系统型号为 TPS2200，结合电脑中的 Hot Disk 分析仪软件对送检岩土样品进行测试，得到了岩土样品热物性参数 (表 1)。依据邢台地矿局给出的检测报告，可知该地源热泵测试工程地下内岩土的主要构成为粉质粘土和粘土。由于地源

热泵的选型设计需要土壤的平均热物性参数, 分别取样品的平均值。

2 热响应试验

2.1 测试原理

现场热响应试验的主要依据为:《地源热泵系统工程技术规范》GB50366-2009和《浅层地热能勘查评价规范》DZ/T0225-2009;主要原理是热反应原理。这种方法测试出的岩土导热系数并非仅仅反应岩土的导热性能,它还包含了岩土的不同组分、水渗流等其他因素的影响,是一个综合的岩土导热系数。

2.2 测试装置

测试系统主要由电加热器、循环水泵、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。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。图3为现场热响应试验装置原理图。

2.3 实验

地源热泵测试工程现场两个深度为150m的试验孔,分别编号为ZK1和ZK2(表2、表3)。井径

表1 测试井热物性参数表

Tab.1 Thermophysical parameters of test well

测试井编号	导热系数 $\lambda/(W \cdot m \cdot K^{-1})$	容积比热容 $c_p \rho/(MJ \cdot m^{-3} \cdot K)$	热扩散系数 $\alpha/(mm^2 \cdot s^{-1})$
ZK1	1.485	2.754	0.549
ZK2	1.498	2.698	0.557

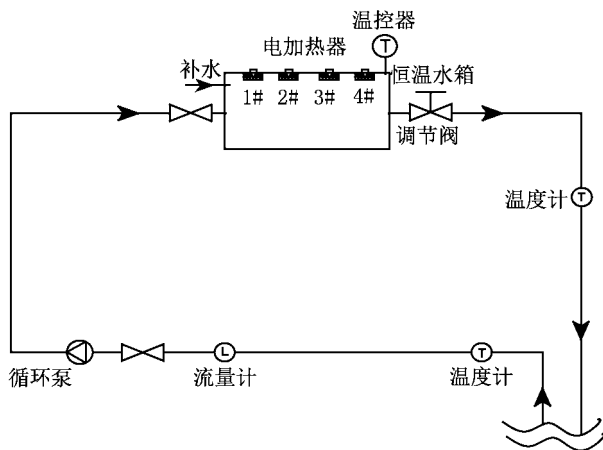


图3 测试装置原理图
Fig.3 Test device schematic

160 mm,埋管形式都是双U型,管内外径分别为26、32 mm。考虑到钻孔以及回填等过程对岩土初始温度的扰动作用,钻孔回填完毕后,放置72 h后开始进行相关试验工作,准备好测试仪器,在关闭电加热器的条件下,启动循环水泵,整个试验过程选同一流量,运行稳定后观察到流量为1.26~1.3 m³/h,从数据采集系统中可读取地埋管进、回水水温。

恒定加热的功率下,流入、流出地埋管的水的平均温度测试时间变化的关系式如下^[4]:

$$T_f = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \ln(\tau) + \left[\frac{Q}{H} \left(\frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln \left(\frac{4\alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right) + R_b \right) + T_0 \right] \quad (5)$$

式中: T_f 为地埋管进出口平均水温,℃; Q 为加热功率, W; λ 为土壤的导热系数, W/(m·K); H 为钻孔深度, m; α 为土壤的热扩散率, (m²/s); r_b 为钻孔的半径, m; γ 为欧拉常数,取0.577 2; R_b 为U型管内流体与钻孔壁间的总传热热阻, (K·m)/W; T_0 为土壤初始温度,℃; n 是钻孔内型管的管数,对于单U型管 $n=2$,对于双U型管 $n=4$ 。

T_f 随 $\ln(\tau)$ 呈线性规律变化,可将上式简化为一个线性的关系式:

$$y = mx + b \quad (6)$$

式中: $y = T_f = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$,表示地埋管中循环流体的平均温度;

$m = \frac{Q}{4\pi\lambda H}$,表示公式线性化后的斜率;

$x = \ln(\tau)$,表示公式线性化后的自变量; b 表示公式变形后的截距。

根据埋管进回水的平均温度在不同测试时刻随时间变化的对数拟合曲线,数据拟合后得到线性关系式,并结合单位井深换热热量即可得到岩土的导热系数。表4和表5分别为测试井1和测试井2所测得的埋管进回水的平均温度随时间变化的对数拟合结果及公式。表6为计算所得的导热系数。

3 分析与讨论

对比表1、表6的导热系数,发现实验室测得导热系数数值小于现场热响应试验测得结果。表6表明现场热响应测试时不同加热功率会对导热系数产生影响。依据邢台地矿局给出的检测报告,可知该地源热泵测试工程地下内岩土的主要构成为粉质粘土和粘土。含水率范围为14.2%~36.9%,密度范

表 2 ZK1 测试条件表
Tab.2 Test conditions for ZK1

参数	数值	数值	参数
钻孔深度 / 井径	120 m/160 mm	埋管材质	HDPE-100 De32
埋管深度 / 直径	120 m/32 mm	地层成果	钻进、返浆判断地层
埋管形式	双 U 型	埋管回填材料	原浆回填
埋管内 / 外径	26 mm /32 mm	地层平均温度	17.20℃
埋管内流量	1.30 m ³ /h	埋管内流速	0.680 5 m/s

表 3 ZK2 测试条件表
Tab.3 Test conditions for ZK2

参数	数值	数值	参数
钻孔深度 / 井径	100 m/160 mm	埋管材质	HDPE-100 De32
埋管深度 / 直径	100 m/32 mm	地层成果	钻进、返浆判断地层
埋管形式	双 U 型	埋管回填材料	原浆回填
埋管内 / 外径	26 mm /32 mm	地层平均温度	18.00℃
埋管内流量	1.72 m ³ /h	埋管内流速	0.900 3 m/s

表 4 ZK1 拟合公式
Tab.4 Fitting formula of ZK1

测试时长 /h	拟合函数
低功率 3 kW	60 $T_f=0.861 7 \ln\tau+12.774$
高功率 4.5kW	40 $T_f=1.142 9 \ln\tau+11.762 3$

表 5 ZK2 拟合公式
Tab.5 Fitting formula of ZK2

测试时长 /h	拟合函数
低功率 4.5 kW	60 $T_f=1.684\ln\tau+8.722 4$
高功率 8.5kW	55 $T_f=2.597 8\ln\tau+6.302 1$

表 6 测试结果
Tab.6 Test result

测试井编号	导热系数 /($W \cdot (m \cdot K)^{-1}$)	
	低功率	高功率
ZK1	2.309	2.611
ZK2	2.126	2.604

围为在 1.84 ~ 2.15 g/cm³ 范围内，孔隙比范围为 0.488 ~ 1.039。岩土的热物性参数与地层的密度、含水率、孔隙比等因素有关^[5-7]。

4 结论

实验室测得导热系数值稳定，偏差在 0.9%。与

现场热响应试验结果对比发现，Hot Disk 仪器测试结果小于现场测试结果。在进行地源热泵设计与选型时，应进行现场热响应试验确定在加热或冷却功率下测得的土壤导热系数，以此作为选型依据。

参考文献：

- [1] 王小毅, 李汉明. 地热能的利用与发展前景 [J]. 能源研究与利用, 2013(3): 44-48.
- [2] 吴迪, 于明志, 蔡正燕, 等. 岩土热物性参数测试方法及传热模型研究进展 [J]. 煤气与热力, 2017(1): 1-7.
- [3] CARSLAW H S. Conduction of heat in solid[M]. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1959.
- [4] 赵飞. 现场岩土热响应测试及数据处理分析方法研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [5] 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.
- [6] 石凯波, 王景刚, 鲍玲玲, 等. 现场岩土热物性参数的影响因素分拆 [J]. 河北工程大学学报; 自然科学版, 2017, 34(2): 66-69
- [7] 皇甫红旺, 晋华. 含水率对土壤热物性参数影响的试验研究 [J]. 节水灌溉, 2016(10): 55-58.