

加热过程间断的热响应试验数据处理方法研究

段新胜¹, 顾 湘², 李 鹏¹, 李杭哲¹, 郑 雨¹

(1. 中国地质大学工程学院, 武汉 430074; 2. 中国地质大学机械与电子信息学院, 武汉 430074)

摘 要: 岩土热响应试验过程会由于断电或仪器故障而间断,一般需等待地温恢复后复测,增加成本且延误工期。应用线热源理论和叠加原理,把间断的加热过程分解为每次开始加热后加热功率为正和间断后加热功率为负但绝对值相等的连续加热过程进行叠加,可得到最后一次加热试验期间埋管进出口平均水温与等效热响应试验时间之间的关系为线热源理论的解析解。给出等效热响应试验时间的计算方法并进行工程应用和方法验证。

关键词: 地源热泵; 换热器; 导热系数; 热阻; 数据处理; 埋管换热器; 岩土热响应试验

中图分类号: TK52

文献标识码: A

0 引 言

中国《地源热泵工程技术规范》^[1]规定,岩土热响应试验孔施工完成后需静置至少 48 h 才能进行岩土热响应试验,美国目的是等待施工过程中被扰动的地温得以恢复;ASHRAE(2014)^[2]规定,对于导热系数低($\lambda_s < 1.7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)和高($\lambda_s > 1.7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)的岩土体,热响应试验孔施工完成后要分别等待 5 d 和 3 d 再进行热响应试验,试验持续时间为 36~48 h,若试验过程遭遇中断,需等待地温恢复后才能复测,若先前已测试了 48 h,在导热系数低和高的地层需分别等待 14 d 和 10~12 d 后才能复测,如果先前测试时间短于 48 h,等待时间可按比例缩短。

在进行热响应试验时,遇到下列情况之一都会遭遇试验过程中断:1)市电(或现场供电系统)故障或电路检修;2)测试设备故障;3)人为误操作。如河南省三门峡市某工地共有 4 个试验孔,最后一个试验孔加热试验 16.28 h 后遭遇了 2 h 的断电事故,若等待地温恢复后复测,则需等待约 5 d^[2,3],项目工期不允许。因此,工程实际需研究热响应试验过程有间断的测试数据处理理论和方法。

1 理论研究

1.1 加热过程连续的热响应试验数据处理理论

岩土热响应试验需采集的数据主要有:加热试验前埋管深度范围内岩土体的初始平均温度、循环水流量、加热功率、埋管换热器的进出口水温。通常采用线热源理论进行热响应试验的数据处理,假定试验孔周围岩土体传热为纯导热方式,忽略热流的垂直分量,将从埋管试验孔到岩土体的热流模拟为从试验孔中心线到岩土体的水平径向热流,并假定岩土体为各向同性的均质体。当加热功率恒定且热响应试验持续时间满足式(1)要求后,埋管进出口平均水温与岩土体初始平均温度之差随加热时间变化可近似地用式(2)表示^[4-6]:

$$t > \frac{5r_b^2}{\alpha} = \frac{5r_b^2 C_v}{\lambda_s} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \theta_t - \theta_0 &= \frac{q_c}{4\pi\lambda_s} \left[\ln\left(\frac{4\alpha t}{r_b^2}\right) - \gamma \right] + q_c \times R_b \\ &= \frac{q_c}{4\pi\lambda_s} \ln(t) + q_c \left\{ R_b + \frac{1}{4\pi\lambda_s} \left[\ln\left(\frac{4\lambda_s}{C_v r_b^2}\right) - \gamma \right] \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, t ——从加热器开启开始计时的时间, s;
 r_b ——热交换试验孔半径, m; λ_s ——岩土体平均导热系数, W/(m·K); α ——岩土体的热扩散率, m²/s, $\alpha = \lambda_s / C_v$ (其中 C_v 为岩土体平均体积比热容, J/(m³·K)); θ_f ——U形地埋管进出口平均水温, °C;
 θ_0 ——岩土体初始平均温度, K(或°C); q_c ——单位长度热交换试验孔的加热功率, W/m; γ ——欧拉常数, 0.5772; R_b ——钻孔热阻, K/(m·W)。

式(2)可简写成地埋管进出口平均水温随 $\ln t$ 变化的线性方程:

$$\theta_f = K \ln t + b \quad (3)$$

$$\text{式中, } b = q_c \left\{ R_b + \frac{1}{4\pi\lambda_s} \left[\ln \left(\frac{4\lambda_s}{C_v r_b^2} \right) - \gamma \right] \right\} + \theta_0; K = \frac{q_c}{4\pi\lambda_s}。$$

依式(3), 可得式(4)和式(5):

$$\lambda_s = \frac{q_c}{4\pi K} \quad (4)$$

$$R_b = \frac{b - \theta_0}{q_c} - \frac{1}{4\pi\lambda_s} \left[\ln \left(\frac{4\lambda_s}{C_v r_b^2} \right) - \gamma \right] \quad (5)$$

根据热响应试验数据, 作 $\theta_f - \ln t$ 曲线, 获取其拟合直线的斜率 K 和截距 b , 即可按式(4)和式(5)分别求出岩土体平均导热系数和钻孔热阻。用式(5)计算钻孔热阻值的前提是能很好地估计岩土平均体积比热容 C_v (反之亦然)。

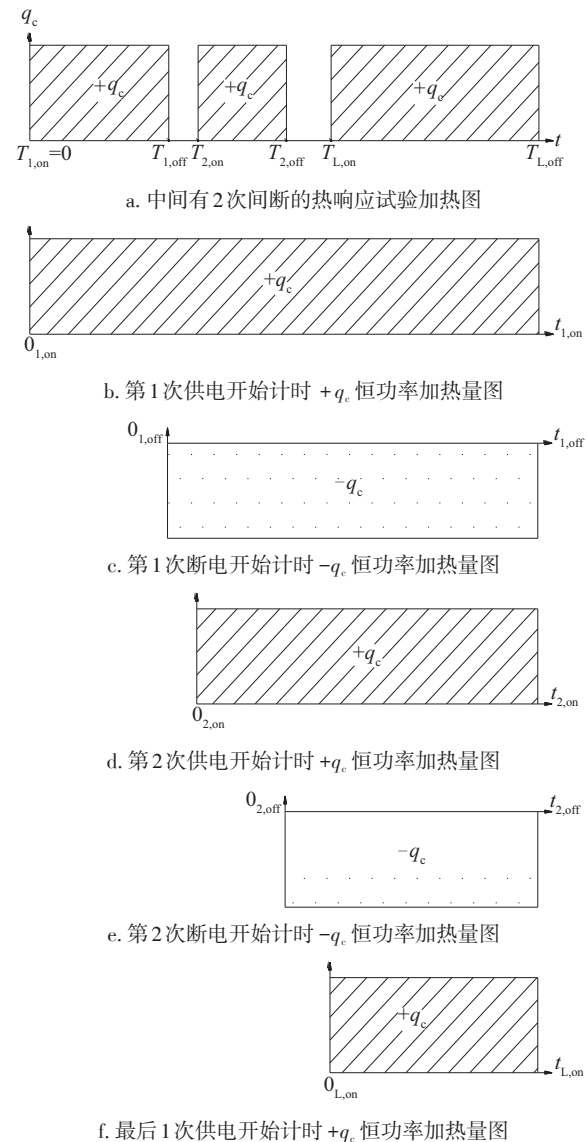
1.2 加热过程间断的热响应试验数据处理方法

用 GP-3 岩土热响应试验仪进行热响应试验时, 首先是开启循环水泵, 在不开加热器时将地埋管出口稳定水温作为岩土体初始平均温度, 然后开启加热器进行热响应试验, 仪器每 5 分钟自动记录 1 组数据并显示开机时间和已记录的数据组数。出现断电后再次恢复供电时, 仪器自动开启并显示新的开机时间和新记录的数据组数^[7]。

如图 1a 所示, 在以恒加热功率 q_c 进行地埋管岩土热响应试验时, 设加热过程有 2 次间断, 从第 1 次加热开始计时, $T_{1,\text{on}} = 0$ 时第 1 次开始加热, $T_{1,\text{off}}$ 时第 1 次断电, $T_{2,\text{on}}$ 时第 2 次开始加热, $T_{2,\text{off}}$ 时第 2 次断电, $T_{L,\text{on}}$ 时最后一次开始加热, $T_{L,\text{off}}$ 时试验结束, 总加热量以图 1a 中的阴影面积表示。

应用式(2)时要求热响应试验过程连续且加热

功率恒定, 显然图 1a 所示的加热形式(不连续)无法满足式(2)要求。但考察式(2)后会发现, 地埋管进出口平均水温与岩土体初始平均温度之差随加热时间的变化与单位长度试验孔加热量 q_c 之间的关系为线性关系, 可应用热流叠加原理, 即可把图 1a 所示的加热形式分解为图 1b~图 1f 这 5 种恒功率持续加热模型的叠加。图 1b 为从第 1 次供电开始计时到试验结束的 $+q_c$ 恒功率加热量图; 图 1c 为从第 1 次断电开始计时到试验结束的 $-q_c$ 恒功率加热量图; 图 1d 为从第 2 次供电开始计时到试验结束



注: 各图关系为 $a=b+c+d+e+f$

图 1 中间 2 次间断的热响应试验加热过程分解图

Fig. 1 Heating process decomposition diagram of thermal response test with two intermediate interruptions

的 $+q_c$ 恒功率加热量图;图 1e 为从第 2 次断电开始计时到试验结束的 $-q_c$ 恒功率加热量图;图 1f 为从最后一次供电开始计时到试验结束的 $+q_c$ 恒功率加热量图。

因此,中间有 2 次间断的现场热响应试验,其最后一次供电开始到试验结束前的任意时刻 t ,地埋管进出口平均水温与岩土体初始平均温度之差可按热流叠加原理和线热源理论模型,即式(2)计算为:

$$\begin{aligned} \theta_t - \theta_0 = & \frac{q_c}{4\pi\lambda_s} \left[\ln \left(\frac{4\lambda_s t_{1,on}}{C_V r_b^2} \right) - \gamma \right] + q_c \times R_b - \\ & \frac{q_c}{4\pi\lambda_s} \left[\ln \left(\frac{4\lambda_s t_{1,off}}{C_V r_b^2} \right) - \gamma \right] - q_c \times R_b + \\ & \frac{q_c}{4\pi\lambda_s} \left[\ln \left(\frac{4\lambda_s t_{2,on}}{C_V r_b^2} \right) - \gamma \right] + q_c \times R_b - \\ & \frac{q_c}{4\pi\lambda_s} \left[\ln \left(\frac{4\lambda_s t_{2,off}}{C_V r_b^2} \right) - \gamma \right] - q_c \times R_b + \\ & \frac{q_c}{4\pi\lambda_s} \left[\ln \left(\frac{4\lambda_s t_{L,on}}{C_V r_b^2} \right) - \gamma \right] + q_c \times R_b \end{aligned} \quad (6)$$

将式(6)进行整理得式(7):

$$\begin{aligned} \theta_t - \theta_0 = & \frac{q_c}{4\pi\lambda_s} \left[\ln \left(\frac{4\lambda_s t_{1,on} t_{2,on} \cdots t_{L,on}}{C_V r_b^2 t_{1,off} t_{2,off} \cdots t_{L,off}} \right) - \gamma \right] + q_c \times R_b \\ = & \frac{q_c}{4\pi\lambda_s} \ln \left(\frac{t_{1,on} t_{2,on} \cdots t_{L,on}}{t_{1,off} t_{2,off} \cdots t_{L,off}} \right) + \\ & q_c \times \left\{ R_b + \frac{1}{4\pi\lambda_s} \left[\ln \left(\frac{4\lambda_s}{C_V r_b^2} \right) - \gamma \right] \right\} \\ = & \frac{q_c}{4\pi\lambda_s} \ln(t_{eqv}) + q_c \times \left\{ R_b + \frac{1}{4\pi\lambda_s} \left[\ln \left(\frac{4\lambda_s}{C_V r_b^2} \right) - \gamma \right] \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $t_{1,on}$ ——第 1 次供电开始计时的时间; $t_{1,off}$ ——第 1 次断电开始计时的时间; $t_{2,on}$ ——第 2 次供电开始计时的时间; $t_{2,off}$ ——第 2 次断电开始计时的时间; $t_{L,on}$ ——最后一次供电开始计时的时间; t_{eqv} ——等效热响应试验时间。

等效热响应试验时间可表示为加热时间修正系数与最后一次加热试验时间的乘积,即:

$$t_{eqv} = \psi_t t_{L,on} = \frac{t_{1,on} t_{2,on} \cdots t_{L,on}}{t_{1,off} t_{2,off} \cdots t_{L,off}} t_{L,on} \quad (8)$$

式中, ψ_t ——加热试验时间修正系数, $\psi_t = (t_{1,on} t_{2,on} \cdots t_{L,on}) / (t_{1,off} t_{2,off} \cdots t_{L,off})$ 。

式(7)可简化为:

$$\theta_t = K \ln t_{eqv} + b \quad (9)$$

相比较,式(9)与式(3)形式相同,只是式(9)中的加热时间为等效热响应试验时间。

当热响应试验过程遇到 n 次断电时,等效热响应试验时间可表示为:

$$t_{eqv} = \psi_t t_{1,on} = [(t_{1,on} t_{2,on} \cdots t_{n,on}) / (t_{1,off} t_{2,off} \cdots t_{n,off})] t_{1,on} \quad (10)$$

式中, $t_{1,on}, t_{2,on}, \cdots, t_{n,on}$ ——分别为第 1 次、第 2 次…第 n 次供电开始计时的时间; $t_{1,off}, t_{2,off}, \cdots, t_{n,off}$ ——分别为第 1 次、第 2 次…第 n 次断电开始计时的时间。

由于在最后一次加热试验刚开始时,加热的热流还未完全传递到试验孔周围岩土层,故参考式(2)要求,等效热响应试验时间需满足式(11)要求,式(7)或式(9)才有效,即:

$$t_{eqv} > \frac{5r_b^2}{\alpha} = \frac{5r_b^2 C_V}{\lambda_s} \quad (11)$$

根据热响应试验数据,作 $\theta_t - \ln t_{eqv}$ 曲线,用其拟合直线的斜率 K 和截距 b ,按式(4)和式(5)即可分别求出岩土体平均导热系数和钻孔热阻。为了有较多数据绘制 $\theta_t - \ln t_{eqv}$ 曲线,要求等效热响应加热时间大于或等于 36 或 48 h,得到有代表性的地埋管进出口水温随等效热响应时间的变化曲线,充分反映岩土体条件(而非钻孔回填材料条件)。

2 应用和验证实例

河南省三门峡市某建筑工程项目的空调使用面积约 30000 m²,拟采用地埋管地源热泵系统供热、制冷,在现场施工了 4 个热响应试验孔(直径 150 mm、深度 120 m、埋设 De32 双 U 形 PE 管、用原浆和钻屑回填)。试验孔场地地层情况见表 1,地下水位埋深约 80 m。根据场地地层情况和所含地下水情况,采用类比法估算地埋管深度范围内岩土体的体积比热容为 $C_V = 2.4 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。用岩土热响应试验仪测量地埋管深度范围内岩土初始平均温度 17.87 ℃。

表 1 场地地层情况

Table 1 Strata in test field

深度/m	岩性描述
0.0~39.0	粉质粘土,黄褐色,粉粒含量偏高
39.0~40.0	卵石,粒径4~5 cm,最大18 cm,部分钙质胶结
40.0~44.0	粉质粘土
44.0~49.0	卵石,粒径4~5 cm,最大18 cm,含量占70%,粘土充填
48.0~80.0	粉细砂
80.0~82.0	钙质胶结卵石层
82.0~120.0	粘土

第 1~3 号试验孔试验进展都非常顺利,均持续加热试验有 48 h,第 4 号试验孔在试验过程中却遭遇了 2 次断电事故。如图 2 所示,在加热试验 977 min(16.28 h)后,第 1 次断电时长 121 min,原因是现场线路故障;第 2 次加热试验 85 min 后第 2 次断电,时长达 1006 min(16.77 h),原因是夜晚工地看场人员误关了电源总闸。加热量示意图见图 2,总试验时间(含中间断电时间)约 60 h。

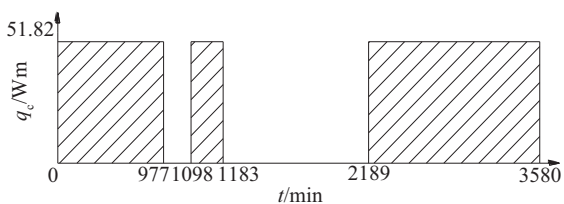


图 2 两次断电实例的加热量图

Fig. 2 Heating quantity diagram of test with two power outages

按上述方法对这个试验孔的数据进行数据处理如下:

第 1 步:按式(8)或式(10)用 Excel 软件计算最后一次加热试验不同时刻所对应的等效热响应试验时间,计算结果见图 3,图中横坐标为最后一次加热试验时间,纵坐标为对应的等效热响应试验时间,总等效热响应试验时间大于 36 h。

第 2 步:按式(11)计算出使式(7)和式(9)有效所需的最短等效热响应试验时间。试验孔直径为 150 mm,岩土体积比热容为 $C_v = 2.40 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$,可取 $\lambda_s = 1.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (导热系数取中等值),则当 $t_{\text{eqv}} \geq 5r_b^2 C_v / \lambda_s = 11.0 \text{ h}$,式(7)和式(9)有效。

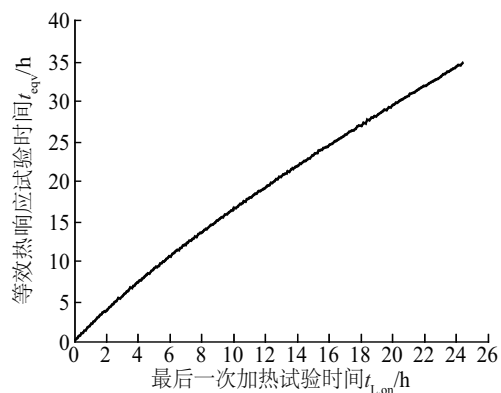
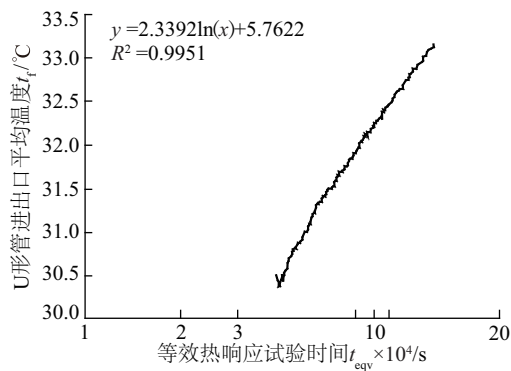


图 3 等效热响应试验时间计算结果

Fig. 3 Results of equivalent thermal response test time

第 3 步:绘制 $\theta_f - \ln t_{\text{eqv}}$ 关系曲线,舍弃等效热响应试验前 11 h 的数据,绘制的 $\theta_f - \ln t_{\text{eqv}}$ 关系曲线见图 4。图 4 实线为实测数据线,点划线为拟合直线,并附有拟合直线方程及相关系数。相关系数的平方 $R^2 = 0.9951$,说明实测数据与理论模型即式(9)非常吻合,实际存在 $\theta_f - \ln t_{\text{eqv}}$ 之间的线性关系。

图 4 等效热响应试验 $\theta_f - \ln t_{\text{eqv}}$ 关系曲线Fig. 4 $\theta_f - \ln t_{\text{eqv}}$ curve in equivalent heat response test

第 4 步:求岩土平均导热系数和钻孔热阻,并与其他试验孔的试验结果相比较。

根据图 4,将斜率 $K = 2.3392$,截距 $b = 5.7622$ 代入式(4)和式(5),得到第 4 号试验孔的岩土体平均导热系数 $\lambda_s = 1.763 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,钻孔热阻 $R_b = 0.134 \text{ K}/(\text{m} \cdot \text{W})$ 。

1~4 号试验孔的试验结果列于表 2。由 4 号试验孔获得的导热系数和钻孔热阻与其他试验孔无明显差异,且接近于各试验孔数据平均值。

表2 岩土体导热系数与钻孔热阻

Table 2 Thermal conductivities and thermal resistance of boreholes

试验孔编号	1	2	3	4	平均值
导热系数 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1.83	1.61	1.62	1.76	1.71
钻孔热阻 $R_b/(\text{K}\cdot\text{m}\cdot\text{W}^{-1})$	0.15	0.11	0.10	0.13	0.12

此外,式(7)或式(9)在不同地层条件下也得到应用。如:河南省郑州市某工业园项目,其地层条件为:0~10 m 粉土,10~15 m 粉砂、15~20 m 粘土、20~40 m 粘土夹砂砾石,40~80 m 粘土,80~85 m 粘土夹卵石,85~90 m 细砂,90~100 m 钙质胶结硬层,100~120 m 粘土,其第2个热响应试验孔试验过程中经历了4次断电事故:开始试验后1.08~1.52 h、14.97~15.23 h、21.02~21.82 h、26.57~27.52 h 断电,52.82 h 结束试验。

按上述方法获得的 $\theta_f - \ln(t_{\text{eq}})$ 关系曲线的拟合直线的相关系数达 $R^2=0.9884$,趋近于1;岩土平均导热系数和钻孔热阻分别为 $1.42 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $0.102 (\text{K}/\text{m}\cdot\text{W})$,与第1个试验过程连续的热响应试验孔的岩土平均导热系数 $1.47 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $0.091 \text{ K}/(\text{m}\cdot\text{W})$ 接近。

3 结 论

1)地埋管岩土热响应试验过程中如遭遇一次或多次中断事故则加热过程不连续,但可将不连续的加热过程分解为几个初始时间不同的连续加热过程,并设供电时加热功率为正值、断电时加热功率为负值,且绝对值相等。岩土对不连续加热过程的热响应等于其对几个初始时间不同的连续加热过程的热响应的叠加。

2)可用传统的线热源理论的解析解描述最后一次加热试验时地埋管进出口平均水温随等效热响应试验时间的变化。

3)等效热响应时间为最后一次加热试验时间乘以加热时间修正系数,而加热时间修正系数为最后一次加热试验前的每次供电开始计时的时间除

以相应的断电开始计时的时间所获得的商的连乘积。

4)理论和实例证明热响应试验过程中若遭遇中断事故,恢复供电后可继续进行热响应试验。

[参考文献]

- [1] GB 50366—2009, 地源热泵系统工程技术规范[S].
- [1] GB 50366—2009, Technical code for ground source heat pump system[S].
- [2] Kavanaugh S, Rafferty K. Geothermal heating and cooling design of ground-source heat pump systems[M]. Atlanta, US: ASHRAE, 2014.
- [3] 顾 湘, 段新胜, 李少华. 地埋管热响应试验孔地温恢复特性研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(9): 1688—1692.
- [3] Gu Xiang, Duan Xinsheng, Li Shaohua. Study on ground temperature recovery characteristics of thermal response test boreholes[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2014, 35(9): 1688—1692.
- [4] Banks D. An introduction to thermogeology: Ground source heating and cooling (2nd Ed.) [M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2012.
- [5] Gehlin S. Thermal response test- Method development and evaluation[D]. Luleå, Sweden: Luleå Institute of Technology, 2002.
- [6] 段新胜, 顾 湘, 林浩欣, 等. 热响应试验后的热恢复试验理论与应用研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(8): 2317—2322.
- [6] Duan Xinsheng, Gu Xiang, Lin Haoxin, et al. Theory and application study of thermal recovery test after thermal response test [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017, 38(8): 2317—2322.
- [7] 李新华, 段新胜, 段士强. 地埋管换热器热响应试验及数值模拟研究[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(4): 5—10.
- [7] Li Xinhua, Duan Xinsheng, Duan Shiqiang. Test and numerical simulation study on the thermal diffusion radius of ground heat exchanger [J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, 20(4): 5—10.

STUDY ON DATA PROCESSING METHOD FOR THERMAL RESPONSE TEST OF DISCONTINUOUS HEATING PROCESS

Duan Xinsheng¹, Gu Xiang², Li Peng¹, Li Hangzhe¹, Zheng Yu¹

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Faculty of Mechanical & Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Thermal response test (TRT) process may be interrupted due to power or instrument failure, and a waiting period is generally needed for soil temperature to recover before retest, which cause delay and cost. The intermittent heating process can be decomposed into several successive positive heating processes when power is on and the negative heating processes when power is off. After application of line source theory and principle of superposition, it is obtained that the relationship between the average inlet and outlet temperature of the fluid circulated in the buried pipe and the equivalent response test time is accord with the analytical solution of linear heat source theory. The method of calculating the equivalent thermal response test time and the data processing method are illustrated with an engineering example, and its accuracy and practicability are verified.

Keywords: ground source heat pumps; heat exchangers; heat conductivity; heat resistance; data processing; borehole heat exchangers; thermal response test (TRT)