

岩土热响应散热修正瞬态模拟及关键参数研究

王德敬¹, 马 凌², 陈惠民³, 赵 军², 王炳凤¹, 李思奇²

(1. 山东省地矿工程集团有限公司, 济南 250200; 2. 天津大学中低温热能高效利用教育部重点实验室, 天津 300350;
3. 山东省滨州市惠民县国土资源局, 滨州 251700)

摘 要: 提出一种带散热修正的埋管储热的 TRNSYS 瞬态计算模型, 考虑管道散热及地表空气对流散热损失; 在山东省滨州市进行实地热响应测试, 通过对实验测试井供回水温度的模拟, 验证模型准确性。同时, 模拟分析循环流量、加热功率等关键参数对岩土导热系数、钻孔热阻、延米换热量辨识精度的影响。研究表明, 测试持续时间对岩土导热系数辨识精度影响高达 24.88%, 其次分别是加热功率、初始舍弃时间、循环流量、回填材料导热系数。加热功率对延米换热量影响最高达 75.01%。

关键词: 热响应测试; TRNSYS; 散热修正; 埋管换热器; 热物性参数

中国分类号: TK521

文献标识码: A

0 引 言

热响应测试对地源热泵设计至关重要,《地源热泵工程技术规范(2009 版)》规定(后文简称《规定》):当地源热泵系统应用面积在 3000 m² 以上时,应至少设置 1 个测试孔进行岩土热响应测试。研究表明,若土壤导热系数测试结果存在 10% 的偏差,将使埋管换热器设计尺寸偏差达 4.5%~5.8%^[1];若埋管实际长度超过需要的 10%~33%,足以使地源热泵丧失经济优势^[2]。因此,如何准确获得土壤热物性参数是亟需突破的关键问题。

针对岩土热物性确定方法,国内外学者做了大量相关研究,Florides 等^[3]根据热响应测试分析 2 个影响辨识精度主要影响因素,即土壤温度变化及施加热流的变化;于明志等^[4]提出一种计算深层物性参数的传热分析模型;黄光勤等^[5]提出瞬态热流岩土热响应测试权重分析法,最优线热源权重值为 0.3;蔡颖玲等^[6]建立埋管换热的 DST 模型,验证包括测试时间等因素对岩土导热系数辨识结果的影响,未对模型进行散热修正,使辨识得到的延米换热量相对误差较大。

本文在上述研究基础上,结合文献[7]提出的散热修正方法,在 TRNSYS 中建立带散热修正的瞬

态热响应模型,并利用实验数据对模型进行验证。其次,分析包括加热功率在内的 5 项关键参数对热物性参数辨识精度影响规律,所得结论对地源热泵系统的设计具有一定参考价值。

1 模型理论分析

1.1 物理模型

实地热响应测试模型如图 1 所示,由于实验工况与线热源模型的理想传热条件存在差距,土壤表面并不能视为绝热边界,即环境温度的变化会影响土壤变温层温度波动,进而对恒温层和增温层产生热影响,因此按照文献[7]中提出散热修正方法,引入无量纲参数 η 进行散热修正,该参数对传热过程的修正主要体现在 2 部分:对管长为 D 的连接管道内部热流体周向热传导修正及对热阻为 R_a 的环境空气与管内流体的热对流修正,该参数对传热过程的修正主要体现在对埋管供回水温度的修正, η 的计算公式为:

$$\eta = \frac{D}{R_a c_p G} \quad (1)$$

$$T_{in} = T_{in}^* e^{-\eta} + T_a (1 - e^{-\eta}) \quad (2)$$

$$T_{out} = T_{out}^* e^{\eta} + T_a (1 - e^{\eta}) \quad (3)$$

收稿日期: 2017-04-17

基金项目: 山东省热响应测试关键参数研究

通信作者: 马 凌(1994—), 女, 博士研究生, 主要从事浅层地热能利用方面的研究。maling_tju@163.com

式中, D ——温度测点与埋管进出口点的连接管道长度, m; R_a ——循环流体与空气间的热阻, $(K \cdot m)/W$; c_p ——循环流量的定压比热容, $kJ/(kg \cdot K)$; G ——循环平均流量, kg/s 。 T_{in}^* ——加热器中测定的供水温度, K ; T_{out}^* ——加热器中测定的回水温度, K ; T_{in} ——实际供水温度, K ; T_{out} ——实际回水温度, K 。在理想情况下, $\eta = 0$ 。

根据能量守恒方程(4)计算埋管延米换热量:

$$q_1 H = c_p G (T_{in}^* - T_{out}^*) = Q_t \quad (4)$$

式中, H ——测试井深度, m; q_1 ——埋管延米换热量, W/m ; Q_t ——总换热量, W 。

进一步计算出埋管表面及地表向空气的散热量 $Q_{air}(t)$:

$$\frac{R_b(Q_t - Q_{air}(t))}{H} = T_i(t) - T_a(t) \quad (5)$$

式中, t ——时间, s; $T_a(t)$ ——环境温度随时间变化曲线, K ; $T_i(t)$ ——不同时间下管内流体平均温度, K ; R_b ——钻孔热阻, $(K \cdot m)/W$; $Q_{air}(t)$ ——不同时间下的空气散热损失, W 。

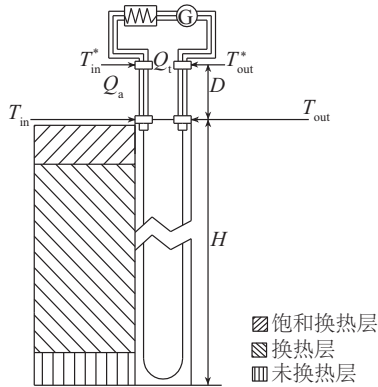


图1 实地热响应测试原理图

Fig. 1 Schematic of in-situ TRT to measure ground properties

1.2 参数求解的基本原理—直线斜率法

根据线热源模型^[7], t 时刻循环介质的平均温度为:

$$T_i(t) = T_0 + \frac{q_1}{4\pi\lambda_s} \ln(t) + q_1 \left[\frac{1}{4\pi\lambda_s} Ei\left(\frac{r_b^2}{4\alpha t}\right) + R_b \right] \quad (6)$$

式中, T_0 ——未受扰动的岩土初始温度, K ; λ_s ——岩土平均导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。其中指数积分为:

$$Ei(z) = \int_{-\infty}^z \frac{e^{-u}}{u} du + \gamma + \ln(-z) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^n}{n!n} \quad (7)$$

欧拉常数 $\gamma \approx 0.577216$ 。当 $z \geq 5$ 时, 近似有:

$$Ei(z) \approx \ln\left(\frac{1}{z}\right) - \gamma \quad (8)$$

近似公式(8)的误差不大于 2%^[8]。

当时间足够长 ($\alpha t/r_b^2 \geq 5$) 时, 式(6)可写为线性形式, 即:

$$T_i(t) = k \ln t + m \quad (9)$$

$$k = \frac{q_1}{4\pi\lambda_s} \quad (10)$$

$$m = T_0 + q_1 \left[R_b + \frac{1}{4\pi\lambda_s} \left(\ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - \gamma \right) \right] \quad (11)$$

在温度-时间坐标轴上可利用最小二乘法拟合出式(9), 从而可得直线斜率 k , 结合式(4)~式(6)及式(10)、式(11), 可计算出土壤总换热量、土壤的平均导热系数、钻孔热阻和土壤热扩散率等参数^[9]。除此之外, 其他计算方法还有双参数寻优或三参数寻优法^[9], 此处不再赘述。

2 TRNSYS 模型建立

利用 TRNSYS 软件模拟岩土热响应测试瞬态特性, 模型如图 2 所示。TRNSYS 是模块化的瞬态模拟程序, 所有的元件均由若干小模块组成, 各模块可以实现特定的功能。利用 TRNSYS 进行分析时, 只需建立若干模块间的逻辑联系, 再顺次调用模块即可。最后利用输出设备进行数据传输和分析。

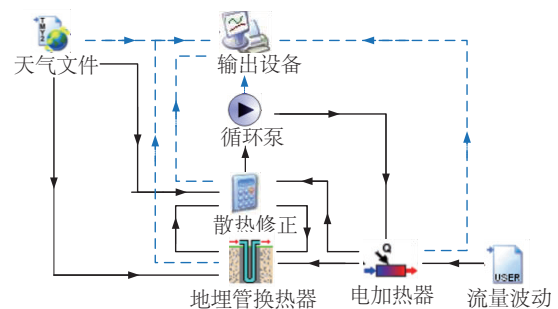


图2 TRNSYS模型结构

Fig. 2 Layout of proposed TRNSYS-based model

2.1 模型构建

模型中最重要的模块为 Type557a 竖直地埋管, 该模块的数值模型采用 Hellstrom 提出的地埋管储热模型^[10]。模型将土壤温度响应分为全局温度、局部温度和稳态热流温度 3 部分。全局温度和局部

温度用有限差分法计算,稳态热流温度由解析法计算,总温度响应是3个温度之和^[11]。

其他模块包括天气模块、计算器模块、电加热器模块等。此外,本系统对比实验工况进行流量修正,计算器模块实现散热修正,主要包括沿程管道散热及地表空气的对流换热量,加热器模块根据实际情况进行效率修正。

2.2 实地热响应测试概况

模拟计算的边界条件选取山东滨州赵桐村热响应测试的实际参数值,如表1所示。滨州市位于黄河下游,鲁西北平原东部,测试全区为第四系覆盖,厚度250~400 m,覆盖于明化镇组之上。根据水文地质条件的差异,滨州市浅层地下水被划为鲁西北平原松散岩类水文地质区。测试采用排热工况测试岩土热物性参数,回填材料为中粗砂,测试工作在钻井回填完成72 h后进行,此时岩土体温度已基本恢复至未受扰动时的自然状态,利用无功循环法测得土壤未扰动初始温度为17.32℃,实验测得土壤平均导热率为1.828 W/(m·K)。需要说明的是,岩土体初始温度实际上是岩土体沿钻孔深度方向上各处地温的积分平均数值。

表1 实验基本参数
Table 1 Basic parameter of in-situ TRT

| 参数 | 数值 |
|---|--------|
| 埋管类型 | 双U型 |
| 钻孔直径/mm | 150 |
| 埋深/m | 117 |
| 埋管外径/mm | 32 |
| 埋管内径/mm | 28 |
| 支管中心距/mm | 64 |
| 埋管材质 | PE |
| 蓄热体容积/m ³ | 1580.2 |
| U型管导热系数/W·(m·K) ⁻¹ | 1.5122 |
| 回填导热系数λ _g /W·(m·K) ⁻¹ | 2.00 |
| 基本循环流量 G/m ³ ·h ⁻¹ | 1.5 |
| 基本加热功率 P/kW | 6 |
| 基本舍弃时间 t _d /h | 12 |
| 基本测试时间 t _d /h | 48 |

2.3 散热修正及模型验证

根据文献[7]提出的散热修正方法,本文结合最小二乘法及空气横掠单管的对流换热理论,计算得到的散热修正系数 $\eta=0.004$ 。

为验证模型的准确性,本模拟根据土工试验测得的分层土壤热物性参数进行参数设置,预测埋管进出水温度及加热水箱进出水温度,并与实验数据进行对比分析。图3为未散热修正与散热修正后的模拟供回水温度与实验供回水温度对比图,未修正的供回水均温平均相对误差为6.76%,最大局部相对误差为7.83%,拟合曲线计算得到的导热系数与实验值相对误差为7.06%,延米换热量相对误差为11.24%;修正后供回水均温的平均相对误差为2.81%,最大局部相对误差为3.49%,拟合曲线计算得到的导热系数与实验值相对误差为5.38%,延米换热量相对误差为6.71%,修正后的模拟工况与实验结果拟合较好。

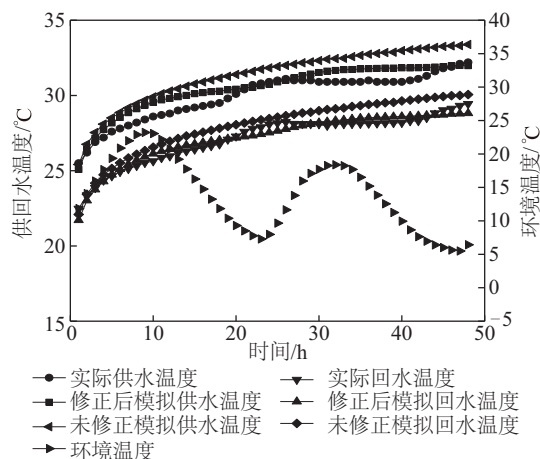


图3 实测温度与模拟温度对比
Fig. 3 Comparison of measured temperature and simulated temperature under same operation condition

3 关键参数对测试结果的影响

3.1 循环流量对测试结果的影响

首先分析不同循环流量对土壤导热系数 λ_s 、钻孔热阻 R_b 和延米换热量 q_l 的影响,需要注意的是,根据1.1节中的修正方法,当循环流量改变时,修正因子 η 需重新计算。在进行实地热响应测试时,《规定》要求埋管换热器流速不应低于0.2 m/s(本案例最低紊流流量约为1 m³/h),选取1.00~2.5 m³/h内

7 个流量等级进行模拟,结果如图 4 所示。

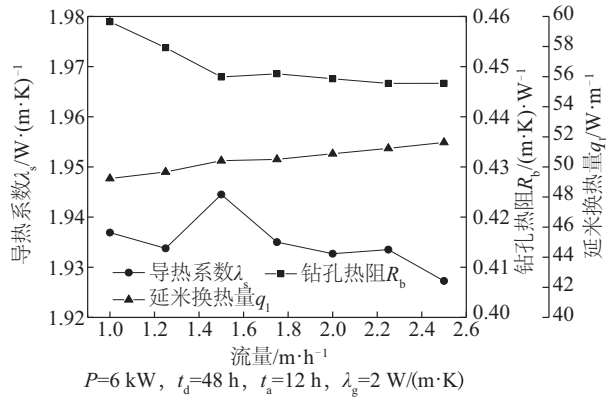


图4 循环流量对辨识结果的影响

Fig. 4 Influence of circulation flowrate on identified results

随着循环流量的增加,辨识所得 λ_s 整体变化幅度在 $0.02 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 之内,而 q_l 略有增加且 R_b 略有下降。在 $G=1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ (此时 $Re=21052$) 之后,循环流量引起的延米换热量增益逐渐下降。原因是管内流速的增加使得管内对流换热增强,对流热阻减小,但由于对流热阻份额较小,因此钻孔热阻的降低程度有限,随着流量增加,其提升程度也越来越不明显。循环流量对延米换热量的增强效果较小。因此,流量的增加并不能使土壤换热效果得到明显改善。

3.2 加热功率对测试结果的影响

在进行实地热响应测试时,《规定》要求必须保持加热器输入功率恒定,但并未规定功率的大小。美国采暖制冷与空调工程师学会(ASHRAE)推荐的加热功率应为每米钻孔 $50\sim 80 \text{ W}$,大致为实际 U 型管换热器峰值负荷值。模拟分析了 $4\sim 10 \text{ kW}$ 内 7 个不同加热功率下对辨识所得的土壤导热系数 λ_s , 钻孔热阻 R_b 和延米换热量 q_l 的影响,结果如图 5 所示。

随着加热功率的增加辨识所得的土壤导热系数持续降低,但更加接近实地热响应测试结果。层换热理论^[12]指出,U 型管与土壤换热主要分为饱和换热层、换热层和未换热层(见图 1)。其中,饱和换热层在运行一段时间后产生的土壤温度与进水管流体温度接近,此时不存在工程意义上的换热。在换热层,两者温差较大,存在大量的换热。而进入未换热层之后,又出现了热流体与高温土壤温度接近的情况,换热量大幅降低。因此,虽然供回水温差

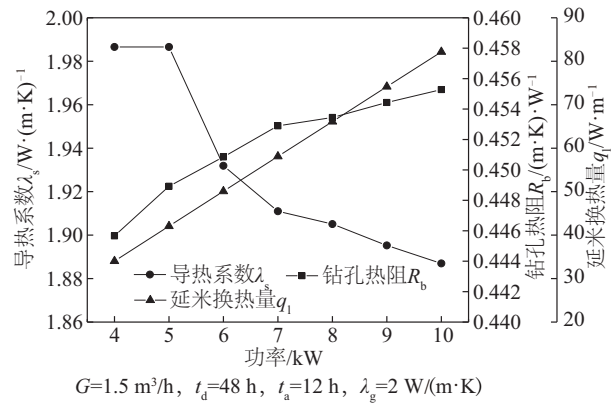


图5 加热功率对测试结果的影响

Fig. 5 Influence of injected heat power on identified results

增大,但由于有效换热的土壤体积减小,使得热阻增大,岩土平均导热系数下降。此外,延米换热量与负荷关联性强,故不应仅根据地理管延米换热量进行埋管选型,应综合考量土壤换热性能。

3.3 持续时间对测试结果的影响

在进行实地热响应测试时,《规定》要求持续加热时间不低于 48 h ,美国采暖制冷与空调工程师学会(ASHRAE)推荐的测试时间为 $36\sim 48 \text{ h}$ 。本文模拟了 $24\sim 96 \text{ h}$ 内 7 个持续时间对辨识所得结果的影响,结果如图 6 所示。

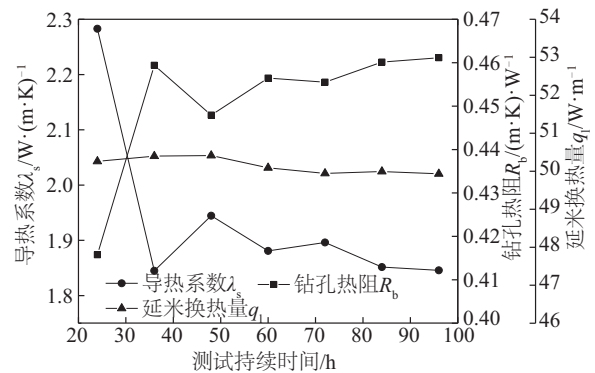


图6 持续时间对测试结果的影响

Fig. 6 Influence of duration on identified results

辨识所得岩土导热系数最大偏差发生在持续时间为 24 h 时,主要因为换热还未完全进入正规阶段,温度分布还受初始温度的影响。持续时间达 50 h 之后,钻孔内换热逐渐趋于稳定,延米换热量略有升高,钻孔热阻基本维持不变,岩土导热系数更加接近实验数据,验证了文献^[13, 14]提出的最

小测试时间至少应为 50 h 的结论。

3.4 初始舍弃时间对测试结果的影响

根据线热源理论的假设:1) $\alpha t/r_b^2 > 5$ (α 为岩土热扩散率, r_b 为钻孔半径);2) 钻孔内为稳态导热。测试初期,采集的数据显然不满足以上 2 点,因此必须舍弃初始小时的测量数据,但目前对该参数没有统一规定。以 96 h 的热响应测试为计算标准,通过对 12~48 h 内 7 个初始舍弃时间的进行模拟分析,结果如图 7 所示。

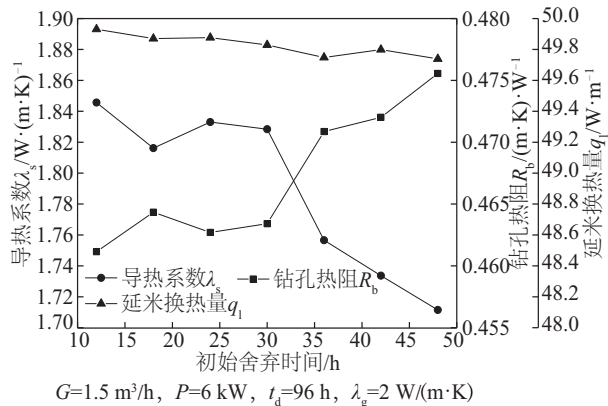


图 7 初始舍弃时间对测试结果的影响
Fig. 7 Influence of abandoned initial hours on identified results

当初始计算时间达到 30 h 及以上时,出现上述提到的饱和换热层,且随着时间的推移,饱和换热层范围增大,延米换热量略有下降,辨识得到的导热系数逐渐减小、钻孔热阻突然增大后又减小,原因是在 36~48 h 时出现上述提到的饱和换热层使得热阻突增,辨识得到的导热系数变小。因此,确定舍弃时间时,应避免非稳态区间,尽量在钻孔周围饱和换热层形成之前,大约选取 12~30 h 可得到较为准确的热物性参数。此外,该结果说明埋管设计时应当考虑负荷上限,也就是应当避免饱和换热层的扩大。当钻井数目已确定时,应当避免埋管间水力不均引起某支管负荷过高现象。

3.5 回填材料热阻对测试结果的影响

图 8 所示为 8 种不同回填材料对测试结果的影响曲线:回填材料导热率的增加可减小钻孔热阻,使得延米换热量略有增加,岩土导热系数的辨识结果比实验值高约 0.11 W/(m·K),但进一步增加回填材料导热系数,对钻孔整体换热能力的增强无太大的促进作用,即提高回填材料的导热系数对岩

土导热系数的提升是十分有限的,这与文献[6]所得到的结论基本一致。

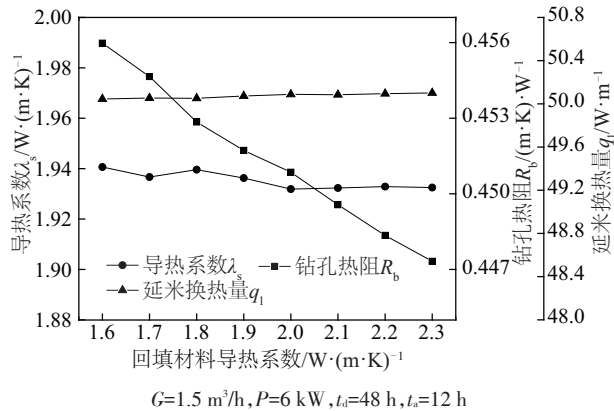


图 8 回填材料导热系数对测试结果的影响
Fig. 8 Influence of backfill materials on identified results

3.6 关键参数辨识精度影响分析

图 9 列出 5 项关键参数对辨识所得的土壤导热系数 λ_s 、钻孔热阻 R_b 和延米换热量 q_1 的影响。与实验工况相比,5 个关键参数中,加热功率对结果影响最大,其针对延米换热量的影响最高达到 75.01%,最低为 -27.52%;持续时间对土壤导热系数和钻孔热阻影响最大,最高分别为 24.88%和 -7.78%。综合比较 3 个指标来看,延米换热量最容易受到关键参数的影响,其次是钻孔热阻,辨识得到的导热系数在不同关键参数取值下的波动程度最小。

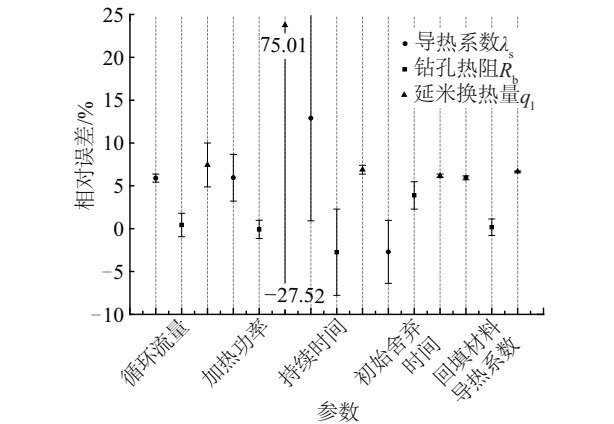


图 9 关键参数辨识精度影响分析
Fig. 9 Identified accuracy analysis of key parameters

4 结 论

1) 利用 TRNSYS 软件对山东滨州赵桐村实地

热响应测试进行模拟,得到带散热修正的瞬态热响应测试模型,根据埋管换热器供回水温度变化规律,验证了模型的准确性。模型修正后,供回水均温的平均相对误差及局部最大误差分别下降了 3.95%及 4.34%,导热系数、延米换热量与实验值相对误差分别下降 1.68%及 4.53%。

2)模拟测试循环流量、加热功率等 5 项关键参数对辨识所得土壤导热系数 λ_s 、钻孔热阻 R_b 和延米换热量 q_l 的影响,其影响作用大小依次是:持续时间、加热功率、初始舍弃时间、循环流量及回填材料导热系数。

3)在进行热响应测试时,必须保证管内流态为紊流,循环流量在 1.0~1.5 m³/h (相应 $Re=10000\sim 21052$),辨识得到的岩土导热系数增加,但循环流量增加使得换热强化的增益逐渐减小,且泵功耗大幅增加;加热功率不宜过大,可根据设计负荷选取且在每米钻孔 50~80 W 范围内,尽量避免形成饱和换热层削减土壤实际换热能力;持续时间应为 50~70 h 以保证测量精度;初始舍弃时间约为 12~30 h,若延长舍弃时间同时应更多的延长测试持续时间,应保证用于计算的数据达 36 h 及以上。

4)模拟发现饱和换热层会抑制埋管换热器与岩土换热,使辨识得到的岩土导热系数偏低,钻孔热阻偏大。因此,在进行埋管换热器设计时,需根据负荷大小合理设计埋管换热器,运行过程应避免水力失衡以减小饱和换热层的影响。

5)回填材料导热系数对钻孔整体换热能力影响程度较小,对岩土整体导热能力增大程度也有限,在工程应用中,应根据《规定》中附录 B 对回填材料的推荐取值,并结合实际负荷特性与土壤结构,可在原浆中加入 4%~6%的膨润土或 10%的混凝土等,且应保证回填材料导热系数略高于土壤导热系数。

[参考文献]

- [1] 张锦玲. 基于遗传算法的岩土热物性参数确定方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [1] Zhang Jinling. Studying of determination of the thermal properties of geotechnical parameters based on genetic algorithm[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009.
- [2] 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.
- [2] Zhao Fei. In-situ soil thermal response test and its data processing methods studies [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [3] Florides G, Kalogirou S. Ground heat exchangers- a review of systems, models and applications[J]. Renewable Energy, 2007, 32(15): 2461—2478.
- [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.
- [4] Yu Mingzhi, Peng Xiaofeng, Fang Zhaohong, et al. Line source method for measuring thermal properties of deep ground[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2006, 27(3): 279—283.
- [5] 黄光勤, 卢 军, 陈 鹏. 瞬态热流岩土热响应测试研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(10): 1787—1794.
- [5] Huang Guangqin, Lu Jun, Chen Peng. Thermal response test of transient heating flux soil[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2013, 34(10): 1787—1794.
- [6] 蔡颖玲, 张 华, 徐 辉, 等. 基于 TRNSYS 的岩土热响应测试及影响因素分析[J]. 暖通空调, 2016, 46(9): 135—140.
- [6] Cai Yingling, Zhang Hua, Xu Hui, et al. Soil thermal response test and analysis of influence factors based on TRNSYS[J]. Journal of HV & AC, 2016, 46(9): 135—140.
- [7] Bandos T V, Montero Á, de Córdoba P F, et al. Improving parameter estimates obtained from thermal response tests: Effect of ambient air temperature variations [J]. Geothermics, 2011, 40(2): 136—143.
- [8] 刁乃仁, 方肇洪. 埋管地源热泵技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006, 47—54.
- [8] Diao Nairen, Fang Zhaohong. Ground- coupled heat pump technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006, 47—54.
- [9] 王泮浩, 颜 亮, 冯琛琛, 等. 地源热泵岩土导热系数测试影响因素分析[J]. 制冷学报, 2012, 33(4): 16—22.
- [9] Wang Fenghao, Yan Liang, Feng Chenchen, et al. Analysis of influencing factors on soil thermal conductivity test in ground source heat pump[J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(4): 16—22.
- [10] Nordell B, Hellström G. High temperature solar heated seasonal storage system for low temperature heating of buildings[J]. Solar Energy, 2000, 69(6): 511—523.

- [11] 雷 飞, 胡平放, 黄素逸, 等. 地埋管换热器 G 函数插值法及应用[J]. 太阳能学报, 2013, 34(6): 1057—1062.
- [11] Lei Fei, Hu Pingfang, Huang Suyi, et al. Application of G-functions interpolation approach for geothermal heat exchangers[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2013, 34(6): 1057—1062.
- [12] 王 勇. 动态负荷下地源热泵性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [12] Wang Yong. The influence of dynamic load on ground source heat pump system performance[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [13] Austin W A, Yavuzturk C, Spitler J D. Development of an in- situ system for measuring ground thermal properties[J]. *Ashrae Transactions*, 1998, 106(1): 365—379.
- [14] Witte H J L, Gelder G J V, Spitler J D. In situ measurement of ground thermal conductivity: The dutch perspective[J]. *Ashrae Transactions*, 2002, 108(1): 263—272.

A THERMAL-DISSIPATION-CORRECTED TRANSIENT SIMULATION ON TRT AND KEY PARAMETERS STUDY

Wang Dejing¹, Ma Ling², Chen Huimin³, Zhao Jun², Wang Bingfeng¹, Li Siqi²

(1. Shandong Geo-Mineral Engineering Group Co., Ltd., Ji'nan 250200, China;

2. Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy, MOE, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

3. Huimin Bureau of Land Recourses, Binzhou 251700, China)

Abstract: Based on the duct ground heat storage model on TRNSYS software, a thermal-dissipation-corrected transient model which takes the heat dissipation from ground and testing tube surfaces into consideration is established. An experimental platform is built for in-situ thermal response test (in-situ TRT) in Shandong Province and the presented model is verified by in-situ TRT for similar inlet and outlet temperatures of borehole heat exchanger (BHE). Furthermore, the key parameters, such as injected heat power, circulation flowrate, etc. are analyzed to study the influences on identified soil thermal conductivity, borehole thermal resistance and heat flow per unit length. It is showed that test duration has largest 24.88% impact on identification precision of soil thermal conductivity, followed by injected heat power, abandoned initial time, the circulation flowrate and backfill material conductivity; The injected heat power has the biggest influence on heat flow per unit length of 75.01% than testing results.

Keywords: thermal response test; TRNSYS; thermal-dissipation-correction; borehole heat exchanger; thermophysical property