

# 土壤源热泵热响应测试研究进展及分析

孟庆龙, 官燕玲, 谷雅秀, 赵 凡, 韩文生

(长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 对土壤源热泵热响应实验的发展进行了综述和分析。回顾国内外热响应实验的发展, 简述热响应的概念和相关理论, 论述国内外研究现状及发展动态, 分析热响应测试结果的影响因素, 如采用闭环控制克服电网波动、稳定功率和流量, 并给出相应措施。最后给出目前存在的问题及发展方向。

**关键词:** 土壤源热泵 热响应测试 热源模型

**中图分类号:** TU111

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2015)01-0125-11

## Advances in thermal response test of ground-coupled heat pump

MENG Qinglong, GUAN Yanling, GU Yaxiu, ZHAO Fan, HAN Wensheng

(School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The development of ground source heat pump thermal response test is reviewed and analyzed. The brief thermal response concepts and theories are given, and the development of the experimental thermal response at home and abroad also is discussed. The influence factors on test results are listed, such as closed-loop control to overcome the power grid fluctuations and flow changes. The advantages and disadvantages of self-developed thermal response test device are shown. Finally, the current problems and future development direction are given.

**Key words:** ground-coupled heat pump; thermal response test; heat source model

建筑节能无疑已成为国家能源战略的一个重要组成部分。地源作为建筑空调的冷热源提供者之一, 为实现建筑节能提供了新的途径。浅层地表土壤热物性对地源热泵系统性能影响最大, 直接影响地源热泵系统的经济性和运行的可靠性, 是土壤源热泵系统设计和研究过程中最基本、最重要的参数。岩土热响应测试是测试岩土热物性的有效途径, 已成为当前地源热泵埋管换热器数量和长度设计的基础。利用现场热响应测试设备, 既可以为地源热泵系统提供准确的设计依据, 还可以建立地热利用的数据库, 为进行浅层地热资源调查提供数据依据。

热响应实验实际是人为加给土壤的激励 (或称谓阶跃响应<sup>[1]</sup>), 以此激发土壤热效应, 了解土壤热特性, 如热导率、热阻等。考虑制冷设备的复杂性及难度原因, 目前热响应实验多为模拟夏季工况, 对冬季工况模拟较少。因此重点分析浅层垂直环路土壤源热泵系统的释热热响应测试发展状况。

美国学者 Sanner B 对热响应实验平台发展进行了综述, 并给出多种热响应测试平台的实物图, 可参考有关文献<sup>[2-3]</sup>。Raymond 从水力学中抽水试验

角度对热响应测试进行了综述<sup>[4]</sup>, 指出目前热响应实验存在的问题, 并对测试结果进行了敏感性和不确定性分析。李敏对地源热泵系统的热响应测试的发展作了综述<sup>[5]</sup>。彭清元等给出了基于线热源理论的岩土热响应测试研究现状<sup>[6]</sup>; Gao, Q<sup>[7]</sup>论述了我国源热泵的发展现状以及与其他国家的差距, 指出存在的问题和未来发展方向, 研究了土壤源热泵系统设计方法。Javed, S 对钻孔进行建模和热特性评价<sup>[8-9]</sup>。

瑞典 Lulea University of Technology 大学的 Bo Nordell 教授和 Gehin 博士<sup>[10-11]</sup>是较早开展地埋管热响应研究的团队; 以美国俄克拉何马州立大学大学的建筑与环境热系统研究中心为代表的研究小组<sup>[12-14]</sup>对土壤源热泵热响应实验进行了系统的研究, J.D. Spitler 教授和 Richard A. Beier 博士为该课题组负责人; 德国 UBeG 公司研制开发了多种热响应测试设备, 已在多个国家和地区应用。目前国内也相继开展热响应测试工作, 主要有代表的学者: 山东建筑大学的方肇洪等<sup>[15-16]</sup>、长安大学官燕玲<sup>[17]</sup>、河北工业大学的王华军教<sup>[18-19]</sup>、华中科技大学的胡平放<sup>[20]</sup>以及吉林大学的王庆华<sup>[21]</sup>等。与热响应测试相



### 2.1.1 线热源模型

线源理论因其物理意义明确、计算简单方便等优点得到广泛应用。在热响应实验中这是一种最常用的模型,该模型假设热传导具有各向同性,假定土壤为温度均匀分布的无限大均匀介质,从零时刻启动无线长线热源(热汇)。其传热控制方程<sup>[46]</sup>、初始条件和边界条件分别为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\rho_s c_s}{\lambda_s} \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad \tau > 0 \quad (1)$$

$$T = T_0, \tau = 0 \quad (2)$$

$$-2\pi r \lambda_s \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = q_l, \tau > 0 \quad (3)$$

$$T = T_0, r \rightarrow \infty, \tau > 0 \quad (4)$$

解得地下温度场的分布为<sup>[47]</sup>:

$$T(r, \tau) - T_0 = (q_l / 2\pi\lambda_s) \int_X^\infty (e^{-\beta^2} / \beta) d\beta = (q_l / 2\pi\lambda_s) Ei(X) \quad (5)$$

式中:  $X = r / (2\sqrt{a\tau})$ ,  $T$  为距线热源中心  $r$  处的土壤温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_0$  为无穷远处未受扰动的土壤初始温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $q_l$  为线热源散热量,  $\text{W/m}$ ;  $r$  为距线热源中心的距离,  $\text{m}$ ;  $\lambda_s$  为土壤导热系数,  $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ ;  $a$  为土壤热扩散系数,  $a = \lambda_s / \rho_s c_s$ ;  $\rho_s$  为土壤密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $c_s$  为土壤比热,  $\text{J/(kg}\cdot^{\circ}\text{C)}$ ;  $\tau$  为从运行开始的时间,  $\text{s}$ 。

实际上,式(5)只有在线热源情况下才严格成立,但对于大多数热泵系统用的小管径埋管来说,经过一定时间后,误差可以忽略。对于大管径或只运行几天的系统来说,将产生误差。实际应用中用无量纲准则  $at/r^2 > 20$  作为小误差的准则。

将埋有管子并与岩土进行着热交换的埋管钻孔,近似地看作是置于半无限大介质中的有限长的线热源而进行传热分析。通过格林函数以及线性叠加原理进行分析,进而得到其理论分析解的表达式。

在线源模型的基础上,Beier<sup>[48]</sup>给出了称为“混合模型”构架。Lamarche<sup>[49]</sup>利用阶跃响应的思路给出一种新的有限长线源模型分析解。更进一步,可利用控制理论中的系统阶跃响应对地埋管换热系统进行热响应分析。Beier RA<sup>[50]</sup>提出一种分析模型。该模型可以降低由于使用进出口的平均温度近似流体温度而造成的误差。Bandos, T.V<sup>[51]</sup>对地下竖向温度变化对线源模型的精度影响进行了研究。曾和义<sup>[52-53]</sup>对热响应线源模型的应用进行了研究,这是我国在热响应测试方面较早的报道。

### 2.1.2 圆柱源模型

Kavanaugh<sup>[54]</sup>用圆柱热源模型求解了地埋管换热系统地下温度分布和传热问题。此方法所得到的解析解含有贝塞尔函数的无穷积分而使估值十分困难,实际应用建议如下的近似数值计算公式:

$$\theta(r, \tau) = \frac{q_l}{2k\pi r_0} \sum_j \frac{V_j}{\omega_j} \frac{K_0(\omega_j r)}{K_1(\omega_j r_0)} \quad (6)$$

式中:

$$\omega_j = \sqrt{\frac{j \ln 2}{a\tau}}$$

$$V_j = \sum_{k=\text{int}\left(\frac{j-1}{2}\right)}^{\min(j,5)} \frac{(-1)^{j-5} k^5 (2k)!}{(5-k)!(k-1)!k!(j-k)!(2k-j)!}$$

在线热源模型和圆柱源模型的基础上,已有很多学者对热响应测试中的解析模型做了进一步的研究。Oklahoma State University 大学的 Cenik Yavuzturk<sup>[44]</sup>对竖直地埋管换热器的模型进行了研究, Chiasson<sup>[45]</sup>给出地埋管换热器建模的研究进展。文献[49]中 Lamarche 给出线源和柱源模型的对比。为验证竖直钻孔的热特性模型以及热响应数据的准确度,Beier<sup>[55]</sup>利用实验的方法得到两组参考数据集,并用七个钻孔模型与一组热响应数据进行对比,以验证两组数据集。Gehlin<sup>[56]</sup>对四种地埋管热响应模型进行了对比。Lamarche<sup>[57]</sup>针对圆柱模型提出一种快速解方法。Shonder<sup>[58]</sup>提出一种基于一维数值传热模型的算法,利用参数估计技术由热响应实测数据估计土壤传热系数和钻孔热阻。Lamarche<sup>[59]</sup>提出一种基于任意响应因子的快速算法;西安交通大学的曹琦教授将地源热泵换热器进行了热电比拟分析<sup>[66]</sup>,这是一种以新思路和新角度的分析方法。Li Min<sup>[62]</sup>基于线源模型提出一种 G 函数模型,并成功用于热响应测试分析。王庆华<sup>[21]</sup>利用线源模型、柱源模型、数值模型和变热流模型对实验数据进行计算和比较,在测试孔深和测试时间足够的条件下,线源模型即可满足要求。

### 2.2 数值模拟

随着计算机软硬件技术的发展,数值模拟技术方兴未艾。数值模型能更真实的反映实际问题,接近实际工况。以上模型是对实际问题理想化了的模型,得到了模型的分析解,该解是对实际问题的近似。而最能逼近实际结果的方法之一是进行数值模拟,可以对不同工况结果进行预测。当然,应保证模拟结果的可靠性。众多国内外学者对地埋管地源热泵热响应实验进行了数值模拟<sup>[60-61]</sup>。

Choi<sup>[63]</sup>, Raymond<sup>[64]</sup>考虑了地下水流动和传热

模型, Signorelli<sup>[65]</sup>对热响应实验进行了数值模拟, Lamarche<sup>[59]</sup>为提高对土壤源热泵能量逐时数值计算速度,提出了一种 arbitrary response factors 快速计算算法. Bauer. D<sup>[67]</sup>对钻孔热交换器进行了三维动态数值模拟,采用了一种简化热阻和热容模型,提高了模拟的计算效率,该模型可利用参数估计方法对热响应实验数据进行评估.同时证明该暂态3D模型的可靠性. Raymond<sup>[68]</sup>利用2D数值模型进行模拟,获得钻孔内温度演变过程.发现停止供热后,钻孔的温度很快趋于均匀.地温的回复与测温传感器的位置关系不大.地温的回复和供热数据将有利于确定钻孔热阻. Bozzoli<sup>[69]</sup>提出两步参数估计过程方法.利用模拟和热响应数据修复灌浆和土壤的热传导率和体积热容.分两步:第一步 在最初暂态阶段重建灌浆的热传导率和体积热容.这两个值用于第二阶段.第二步在后面暂态阶段重建土壤的热传导率和体积热容.我国学者东南大学的乔卫来等<sup>[70]</sup>热响应实验也进行了数值模拟.刘俊等<sup>[71]</sup>对地源热泵桩基埋管传热性能进行了测试和数值模拟研究,并与热响应测试原理进行了对比.该模拟方法可为热响应模拟提供参考.

根据热电比拟, De Carli<sup>[72]</sup>为竖向地源热泵热交换器提出命名为计算容积阻性模型 CaRM (CApacity Resistance Model)的模型,并对该方法进行了改进<sup>[73]</sup>; Lamarche, L<sup>[74]</sup>建立了钻孔间二维和三维热阻模型,并与其他模型进行对比,以热响应数据进行了验证. Lee, C.K<sup>[75]</sup>利用隐式有限差分方程对地源热泵热交换器进行了三维数值模拟,而后又提出一种改进型三维数值模型,该模型可进行具有不同传热系数的多地层中(不考虑地下水的影响)的地源热泵热响应模型<sup>[76]</sup>. Marco<sup>[43]</sup>提出一种温度惩罚地源热泵换热器设计方法,该方法是ASHRAE标准<sup>[40]</sup>计算基础上的改进方法. Marcotte<sup>[77]</sup>利用三维数值模拟方法研究钻孔进出口温度与平均温度间的关系,认为钻孔进出口温度与平均温度间的一种p-线性关系. Nagendra K J<sup>[78]</sup>提出一种热响应测试中热传递系数在线估计的方法. Underwood C.P<sup>[79]</sup>利用HVACSIM+软件,采用脉冲响应法对英国地源热泵进行了10年期的能耗模拟.曲云霞<sup>[80]</sup>建立了地源热泵的数值模型,并进行了仿真研究.连小鑫<sup>[81]</sup>等采用Fluent软件对垂直U型地埋管三维非稳态热渗耦合换热进行了研究.分析了土壤热物性、管道流速、渗流速度以及回填材料的导热系数对地埋管的换热影响. Valentin Wagner<sup>[82]</sup>对热响应测试数

值模拟过程中影响模拟结果的各种因素进行了系统分析.王庆华<sup>[21]</sup>利用ANSYS有限元分析软件对测试过程中的土壤温度场进行了模拟,找出换热器的传热规律,确定了热作用半径. Gustafsson<sup>[83]</sup>针对地源热泵热响应测试进行了系统的数值模拟及分析,分别给出了冷热工况模拟结果,并根据自热对流数值模型确定了换热等效作用半径.作者所在的课题组对地埋管地源热泵岩土热响应试验相关技术进行了全尺寸三维数值分析<sup>[17, 84-85]</sup>.

### 3 变热流法

进行现场测试时,很有可能发生断电现象.而实际测试要求持续对地进行干扰加热,中间不能停止,否则实验要重新进行.而这样,要求地下温度恢复到未加热状态,造成实验成本增加.通常,进行48 h测试后,地温恢复到原始状态需要10到12 d左右.下次测试至少距离上次测试10~14 d,以使得钻孔全面恢复到原形<sup>[40-41]</sup>.因此需要,寻找一种计算方法,对发生功率变化时(包括中间停止加热),通过计算得到等效的加热时间. Richard A. Beie<sup>[86-87]</sup>和胡平放<sup>[88]</sup>利用叠加原理解决了这种变热流问题. Shonder<sup>[89]</sup>针对变功率(但没有考虑零功率的情况)开发了程序,该算法基于逆建模(Inverse modeling)的思想. Gustafsson<sup>[90]</sup>进行了碎石土质中地埋管换热器的变热流率的热响应测试,指出大的功率会得到大的传热系数,而钻孔热阻几乎不变. Liebel<sup>[91]</sup>研究了在变热流情况下,钻孔内浮力热对流对换热器的影响.

### 4 测试精度分析

#### 4.1 测量不确定性分析

##### 4.1.1 测试时长

测试的持续时间对于分析得出的土壤热特性的可靠性是一个重要因素<sup>[92-94]</sup>,在热响应测试装置起步之初就成为人们广泛研究与讨论的对象.

根据现场测试数据分析的经验, Austin<sup>[95]</sup>建议最小测试时长为50 h; Gelin 提出最小测试时长为60 h,推荐测试周期为72 h. Smith and Perry<sup>[96]</sup>则认为12~20 h就足够了.他们解释说,较短的测试周期得到保守的土壤热特性(比如,此情况下得到的热传导率较小),从而提供保守的设计参数,保证设计能够完成. Beier<sup>[48]</sup>提出,没有简单的规则来确定最小测试周期,需要根据钻孔和土壤特性来估计实际测试时长. ASHRAE 标准<sup>[40]</sup>规定至少为36~

48 h. Sanner B<sup>[2]</sup> 和 Spitler<sup>[12]</sup> 均建议至少 50 h. Raymond<sup>[4]</sup> 利用抽水试验原理提出测试时长应为使土壤温度变化达到特定半径为最佳. Javed S<sup>[97]</sup> 以实测方法对影响热响应测试精度的因素分析研究.

作者认为: 最佳测试时长以获得线性直线为最佳. 测量至约 30 h 后, 实时计算各参数并记录结果, 如果各参数 (岩土热导率和热阻) 变化范围在 $\pm 1\%$ 内, 再停止实验, 否则继续.

#### 4.1.2 电压波动影响

施工现场条件恶劣, 其他设施工作时, 存在其他电机、电力设施的干扰, 会影响电压稳定性, 导致加热热流不稳定. 在保证持续供电的前提下, 要保证电力电压的平稳. 要求输入功率稳定在平均值的 $\pm 1.5\%$ 内, 最大偏差不能超过 $\pm 10\%$ . 文献给出了输入功率在 $\pm 1\%$ 变化条件下对测量结果的影响定量信息. 热导率和热阻的最大偏差分别为 $\pm 1\%$ 和 $\pm 2\%$ .

另一方面, 电压波动会影响电机转速, 从而影响流体流量的变化. 而且, 电压波动对传感器测量精度也会造成影响, 作者认为: 解决此影响的途径有两个: 一是从硬件方面: 有必要增加稳压设备, 但如果制冷或加热设备功率较大 (超过 3 kW) 时, 稳压设备价格将会很高; 二是从软件方面, 开发闭环控制算法, 克服压力波动带来的影响. 实时测量流量和设备功率, 当流量或功率发送波动时, 通过控制响应的设备, 如变频器或可控硅来调节流量和功率, 使其维持需要的值.

#### 4.1.3 传感器测量精度

温度、流量、功率是实验设备关键的测量元件, 要求其测量精度必须达到标准. 测量误差将导致实验结果误差. 未进行严格标定的传感器、传感器的不正确安装以及周围的干扰 (如环境温度、电磁干扰等) 均会影响传感器的精度. 要保证设备能够保温绝热, U 型换热器出口至设备间的距离尽可能的短, 从而避免外界环境对温度的影响, 采用屏蔽导线, 阻止电磁干扰. 条件允许的话, 采用多个传感器对流体温度进行测量. 为此, Sharqawy<sup>[28]</sup> 给分别对温度、流量、功率的测量仪器对热响应测试结果影响的不确定性进行了定量分析.

#### 4.1.4 土壤初始温度的影响

实际上, 采用线性热源模型时, 土壤初始温度的不确定性对土壤热导率的测量不存在影响, 但影响热阻结果. 目前, 多位学者对土壤初始温度的影响进行了定量和定性分析. Saqib Javed<sup>[97]</sup> 给出了在

土壤温度相差 0.2 度时, 对热阻测量结果的影响. Gehlin, S<sup>[98]</sup> 对土壤初始温度测量方法进行了系统研究. 瑞典皇家理工学院 José Acuña<sup>[99]</sup> 中的热响应装置利用光纤温度传感器可对地下 260 m 深的温度进行分布式测量 (空间分辨率为 1 m 或 2 m). 该传感器沿钻孔外壁布置, 因此也可以测量实验中的地下温度实时变化情况. Kavanaugh<sup>[54]</sup> 进行热响应测试时对远离钻孔为 36 英寸范围内的土壤温度也进行了测量, 获得了热响应测试 12 h 与 48 h 后地下各点间的温度廓线及温差, 这些数据为分析埋管热特性提供了数据参考. 国内学者郑红旗<sup>[100]</sup> 对埋管回填材料与地源热泵地下温度场的进行了测试分析.

#### 4.1.5 固有输入参数的影响

土壤容积热容对热导率没有直接影响. 采用线源时, 土壤体积热容是估计热阻的间接输入参数.

外界环境温度对流体温度存在影响, 测量的流体温度存在环境温度的叠加影响因素. 为减少这种影响, 可对流体的进出温度进行修正, 公式如下:

热交换器的入口修正水温:

$$T_{w.in(corr)}(t) = T_{w.in}(t) + C_1(T_{w.in}(t) - T_{air.out}(t))$$

热交换器的出口修正水温:

$$T_{w.out(corr)}(t) = T_{w.out}(t) + C_2(T_{w.out}(t) - T_{air.out}(t))$$

#### 4.1.6 钻孔形状

钻孔深度影响加热功率 (导入热流量). 1% 的不确定会产生 1% 的误差. 钻孔半径影响土壤热阻. 3% 的不确定会产生 3%~4% 的误差. Saqib Javed<sup>[97]</sup> 认为 U 型管的特性和布局、填料的性能以及钻孔半径对土壤热阻有影响.

不同材料产生不同的热传导系数, 最新研究表明, 三孔型换热器比传统的 U 型管换热器具有更高的热传导率<sup>[101]</sup>, 但其造价相对较高<sup>[102]</sup>, 因此实际应用不常见.

#### 4.2 参数敏感性分析

针对以上不确定性因素, 分析各参数受不确定性因素影响的敏感性. 实际上, 越不敏感说明参数越稳定. Saqib Javed<sup>[97]</sup> 给出各种影响因素的敏感性分析定量信息. 实际上对热响应测试结果的影响因素较多. 利用水文抽水试验中的叠加原理可以解释环境温度对热响应的影响<sup>[92]</sup>. 水泵功率对地温影响可通过计算消除. 进行实验同时对室外环境温度进行实时测量, 有利于修正测量结果. 常桂钦<sup>[93]</sup> 通过数量级比较和参数估计法处理理论值和模拟值, 分析各参数间的相互影响. 得出结论: 岩土的单位体

积淀压热容对钻孔周围岩土热导率的影响较小, 钻孔周围岩土热导率对其他两个参数的影响较大. 而且, 环境温度和热虹吸效应对热响应测试结果也会产生影响, Bandos T.V<sup>[103]</sup> 对室外温度变化对热响应测试结果的影响进行了系统研究, 给出定量分析结果. Gehlin S<sup>[104]</sup> 研究了热虹吸效应对热响应测量结果的影响.

## 5 实例分析

作者自行开发了一套岩土热物性测试仪如图 2 所示. 该测试仪完全参照《规范》<sup>[39]</sup> 对现场热响应测试试验的要求设计的, 采用的仪器精度也完全满足规范的要求. 该测试仪可以实现通过实验仪器控制面板上的按钮对实验仪器的操作, 也可以通过计算机利用软件系统自动操作实验仪器. 所有模拟量输入和输出数据的实时采集、显示和记录, 数据采集周期和记录时间间隔可在 1 s 至 24 h (或更大) 范围内任意设定. 该试验平台中还配备有可控硅和变频器, 可实现地埋管内循环水流量 (0~2 m<sup>3</sup>/h) 和加热功率 (0~9 kW) 的自动无级调节. 系统增加了自动控制策略, 能够克服管路阻力、水泵特性及不可预测的干扰对地埋管内循环水流量的影响, 保证流量的恒定; 同时可以克服电网波动及加热器加热性能变化等对加热功率的影响, 在外界发生干扰时, 保证加热功率快速回到预定值. U 型地埋管进出口分别设置两个高精度温度传感器, 起到了冗余备份作用. 系统可实现设备连锁启停-安全保护-状态监测-上位管理 (数据实时处理与图形化显示) 等功能. 具有良好的人机界面, 可实现所有模拟量和数字量数据的在线采集和实时存储. 自行开发的热响应分析软件, 对测试数据可实时进行自动分析处理, 获得岩土热参数.

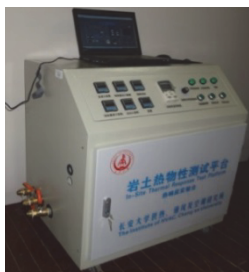


图 2 岩土热物性测试仪实物图

Fig.2 Photo of thermal response test equipment

## 6 讨论

实际上, 地源热泵热响应测试需要考虑诸多因素. 方亮<sup>[105]</sup> 对地埋管换热器热响应试验中采用的

“恒热流法”和“恒温法”进行了对比分析. 王雷岗<sup>[106]</sup> 从工程的角度分析了与热响应实验有关的几个地源热泵设计关键问题. 地下水对热响应测试结果也存在影响, 比如地下水流动的影响<sup>[107]</sup> 以及地下水位的影响<sup>[108-109]</sup> 利用数值模拟方法研究了地下水对热响应实验测试结果的影响, 并进行了定量分析比较, Wagner<sup>[110]</sup> 分析了地下水对热响应测试结果的影响因素. Julio Martos<sup>[111]</sup> 认为超过 25 m 时, 钻孔换热效率将会降低, 因此, 25 m 是最佳深度.

实际应用中, 发现现场条件恶劣, 电压不稳定, 而且常常出现停电现象. 因此, 备用发电机是必要的 (发电机的性能也是重要的, 影响频率变化和控制效果). 利用信息技术 (自动控制、计算机技术等) 改善热响应测试水平, 减少误差, 提高抗电压干扰的能力, 现场环境恶劣, 不便于人工长时间现场监控和操作设备, 无线技术如 Zigbee, GPRS 无线通信技术的采用, 为热响应测试带来了便利. 利用无线技术, 进行远程数据采集, 避免繁琐的布线, 可实现远程监控. 西班牙人 Julio Martos<sup>[111]</sup> 自制球形无线传感模块, 其内封装有 CC1010 无线射频芯片. 试验时将该球形传感器从 U 型管入口处塞入, 随着水流动, 传感器将由 U 型管出口处流出, 遍历整个 U 型管. 因此可获得整个实验过程的水温. 鉴于野外实验条件的不利因素的影响和限制, 将会有更多新型无线传感技术应用到热响应实验测试中<sup>[112][113]</sup>, 实现了数据远程访问和设备的远程控制, 节省财力人力. 近年来, 随着传感技术的发展, 越来越多的先进传感器应用到热响应实验台, 比如光纤传感器. Fujii, H<sup>[114]</sup> 采用光纤温度传感器进行地温测量, 这是目前最新技术的应用.

近年来关于地源热泵热响应测试出现了一些新的研究思路和研究方向: 水文水资源方向进行抽水实验研究和理论研究已经很成熟, 而热响应实验及理论研究还处于初级研究阶段, 两者具有共性. 因此, 可以借鉴抽水实验中理论来指导热响应实验. 现在已有学者对热泵热响应试验与水文地质学中的抽水试验进行了类比分析<sup>[4, 25]</sup>. 作者认为: 地下水流动与地热流间具有直接的数学相似性.

外加扰动以激励系统, 使原系统状态发生改变, 以获得系统固有特性. 这种思想类似于控制系统的系统辨识. 可将系统辨识理论引入到热响应测试中. 实际上, 热响应实验是给换热器一个阶跃干扰 (加热或制冷) 后, 土壤与换热器直接的阶跃响应. 可利用参数估计法对该“系统”进行阶跃响应参

数估计,在缩短实验时间的同时,获得所需参数(如钻孔热导率,换热器与大地间的热阻,等)。利用动态数据活动土壤特性,类似给控制系统增加阶跃激励,是系统发生阶跃响应,从而了解系统动态特性和静态特性,这种情况在控制系统中已研究多年。利用控制系统建模的思想进行土壤源热泵设计参数估计(热导率和热阻)。系统辨识是一种实验观测与理论分析相结合的方法。而这种结合之所以可能,正是因为它肯定了这样一个理论前提,即系统输入、输出数据中包含了系统结构的信息。实际上作者可以提供一个简单的思路,如热响应-阶跃响应-系统激励-参数辨识-电比拟-热阻-电阻。

另外,岩土热物理性质的随钻测量方法<sup>[83]</sup>将是热响应测试今后的一个研究方向。而且,进行孔群测试是热响应测试发展的必然趋势。

## 7 结论

对埋管地源热泵热响应测试相关报道进行了综述,指出目前热响应测试存在的问题及未来发展趋势。

土壤源热泵节能同时对环境基本没有污染是其最明显的优点之一,但需要占用较大土地资源,这在紧张和昂贵的土地面积的社会现状下(特别是我国),可以说这是其在某些场合特别是大城市不被广泛采用的原因之一。在人口密集的城市,用地紧张而无用地专门设置埋管换热器,成为应用地源热泵空调技术的一个障碍,解决此问题的一个途径是在尽量利用地裂带和绿化带,以及其他景观用地的地下空间。目前城市稀缺的土地资源和高昂的土地价格已成为土壤源热泵发展的主要瓶颈。合理利用闲置土地,如地裂带等,是发展该节能措施的途径之一。另外,较高的初投资也是阻碍地源热泵空调系统发展的另一原因。其节能效果在后期才能得以显现,因此广泛被认为“节能不省钱”。地源热泵的广泛推广离不开政府的大力支持。这种矛盾现象在欧美国家并不突出,因此欧美国家采用这种热泵方式较多,而且常常是家庭住户。水资源短缺(尤其我国西部)及水资源保护意识的加强,加上当前多个城市出现地面下沉现象,水源热泵的应用未来会受到限制。污水源热泵是目前研究和应用的热泵形式中较为受欢迎的。

地源热泵在建筑节能中的效益尤其明显,使其在近年来的应用得到了更大的发展,其对合理利用我国地热资源,减少其它能源消耗,保护环境等具

有重要的现实意义。然而,土壤源热泵受观念、空调技术与其它技术配合、对环境的影响、高初投资、安装维护和土壤特性地域性等因素的影响,其在我国的发展任重道远,而且,地源热泵技术在中国如火如荼地发展状况与热物性测试技术的发展是不相适宜的。作者在文中指出的土壤源热泵热响应测试技术方面存在的问题需要广大学者和工程技术人员来亟待解决的。

## 参考文献 Reference

- [1] YAVUZTURK C, SPITLER J.D. A Short Time Step Response Factor Model for Vertical Ground Loop Heat Exchangers[J].ASHRAE Transactions.1999,105(2): 475-485.
- [2] SANNER B, HELLSTROM G, SPITLER J. et al. 2005, Thermal response test –current status and world-wide application[C]//Proceedings World Geothermal Congress, Turkey: Antalya,2005, 4: 1-9.
- [3] SANNER B, MANDS E, SAUER M, et al. Technology, development status, and routine application of Thermal Response Test[C]//Proceedings European Geothermal Congress, Germany: Unterhaching, 2007,30 May-1 June: 1-6.
- [4] RAYMOND J, REN'E Therrien, Louis Gosselin et al. A review of thermal response test analysis using pumping test concepts [J]. GROUND WATER, 2011, 49(6):932-945.
- [5] 李敏, 余延顺.地源热泵系统的热响应测试的研究进展[J]. 制冷与空调, 2010, 10(2): 31-34, 3.  
LI Min, YU Yanshun. Research progress of thermal response test for GS HP system [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2010, 10(2): 31-34, 3.
- [6] 彭清元, 常桂钦, 崔文智, 等. 基于线热源理论的岩土热响应测试研究现状[J]. 节能, 2010(8):15-19.  
PENG Qingyuan, CHANG Guiqin, CUI Wenzhi, et al. Recent status of in situ thermal response test based on line source theory [J].Energy Conservation, 2010(8): 15-19.
- [7] GAO, Q, LI M, YU M, et al. Review of development from GSHP to UTES in China and other countries[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009,13(6/7):1383-1394.
- [8] JAVED S. Design of ground source heat pump systems – Thermal modelling and evaluation of boreholes. Building Services Engineering[D]. Goteborg (Sweden): Chalmers University of Technology, 2010.
- [9] JAVED S, FAHLÉN, P. Development and planned operation of a ground source heat pump test facility[J].Newsletter IEA heat pump centre, 2010, 28(1): 32-35.
- [10] GEHLIN S. A mobile equipment for thermal response test: testing and evaluation[D]. Lulea (Sweden): Lulea University of Technology, 1996.
- [11] GEHLIN S. Thermal response test in- situ measurements of thermal properties in hard rock. Division of Water Resources Engineering, Department of Environmental Engineering[D]. Lulea (Sweden): Lulea University of Technology, 1998, 37: 5-10.
- [12] SPITLER J.D, YAVUZTURK C, REES S.J. In Situ Measurement of Ground Thermal Properties[C]//

- Proceedings of Terrastock, Stuttgart, 2000, August 28-September 1: 165-170.
- [13] RICHARD A. BEIER José Acuña, PALNE Mogensen, et al. Vertical temperature profiles and borehole resistance in a U-tube borehole heat exchanger[J]. *Geothermics*, 2012, 44(10):23-32.
- [14] RICHARD A. BEIER José Acuña, PALNE Mogensen, et al. Borehole resistance and vertical temperature profiles in coaxial borehole heat exchangers[J]. *Applied Energy*, 2013, 102(2): 665-675.
- [15] 刁乃仁. 地热换热器的传热问题研究及其工程应用[D]. 北京: 清华大学, 2004.  
DIAO Nairen Heat transfer analyses of ground heat exchangers and their engineering applications[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.
- [16] 刁乃仁, 方肇洪. 地埋管地源热泵技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
DIAO Nairen, FANG Zhaohong. Ground-coupled heat pump technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [17] 官燕玲, 孟庆龙, 江超, 等. 地埋管地源热泵岩土热响应试验相关技术全尺寸三维数值分析[J]. *暖通空调*, 2012(11):138-142.  
GUAN Yanling, MENG Qinglong, JIANG Chao, et al. Three-dimensional numerical analysis of full size thermal response test of ground source heat pump [J]. *Journal of HV&AC*, 2012(11):138-142.
- [18] 王华军, 齐承英, 王恩宇, 等. 土壤热响应特性的一种改进实验装置[J]. *太阳能学报*, 2010,31(5): 615-619.  
WANG Huajun, QI Chengying, WANG Enyu, et al. Improved equipment of thermal response test of rock soils[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2010,31(5): 615-619.
- [19] WANG H, QI Chengying, DU Hongpu, et al. Improved method and case study of thermal response test for borehole heat exchangers of ground source heat pump system[J]. *Renewable Energy*, 2010. 35(3): 727-733.
- [20] 胡平放, 雷飞, 孙启明, 等. 岩土热物性测试影响因素的研究[J]. *暖通空调*, 2009,39 (3) : 123-127.  
HU Pingfang, LEI Fei, SUN Qiming, et al., Study on influence factors for thermo- physical property of soil [J]. *Journal of HV&AC*, 2009, 39 (3) : 123-127.
- [21] 王庆华. 浅层岩土体热物理性质原位测试仪的研制及传热数值模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2009.  
WANG Qinghua. Simulation of heat transfer and development of in-situ testing equipment of rock and soil thermophysical properties[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [22] 李晓东, 于明志, 方肇洪. 基于地源热泵的便携式岩土热物性测试仪及其方法, 中国专利申请号: 200610042581.0[P]. 2006.2.27.  
LI Xiaodong, YU Mingzhi, FANG Zhaohong. The method and portable soil thermal properties tester of ground source heat pump, Chinese patent application number: 200610042581[P]. 02006.2.27.
- [23] 连之伟, 于新, 李世刚, 等. 地源热泵用高精度土壤热物性测试仪, 中国发明专利申请号: 200810201626[P]. LIAN Zhiwei, YU Xin, LI Shigang, et al. High precision soil thermal physical property tester for ground source heat pump, Chinese p patent application number: 200810201626[P].
- [24] MOGENSEN P. Fluid to Duct Wall Heat Transfer in Duct System Heat Storages[C]//Proc. Int. Conf. on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice. Stockholm, Sweden, 1983, June 6-8: 652-657.
- [25] DAVID Banks. An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling[M]. New York: John Wiley Press, 2009.
- [26] AUSTIN WA. Development of an in situ system for measuring ground thermal properties[D]. Stillwater: Oklahoma State University, 1995.
- [27] ROTH P, GEORGIEV A, BUSO A. et al. First in situ determination of ground and borehole thermal properties in Latin America[J]. *Renewable Energy*, 2004, 29(12): 1947-1963.
- [28] SHARQAWY M.H., MOKHEIMER E.M, HABIB M.A, et al. Energy, exergy and uncertainty analyses of the thermal response test for a ground heat exchanger[J]. *International Journal of Energy Research*, 2009. 33(6): 582-592.
- [29] ESEN H., INALLI M. In-situ thermal response test for ground source heat pump system in Elazığ[J]. *Turkey. Energy and Buildings*, 2009. 41(4): 395-401.
- [30] Raymond, J.R, Therrien.R, Gosselin.L. A novel thermal response test using heating cables[C]//Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010: 1-10.
- [31] GEORGIEV A, GEORGIEV S, POPOV R. The Bulgarian Experience in the Thermal Response Tests[C]// Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 2010, April:1-725-29.
- [32] SARBU I, BURA H. Thermal tests on borehole heat exchangers for ground-coupled heat pump systems[J]. *International Journal of Energy& Environment*, 2011, 5(3): 385-393.
- [33] WITTE H J L, GELDER G J, SPITLER J D. In situ measurement of ground thermal conductivity: A Dutch perspective[J]. *ASHRAE Transactions*, 2002, 108: 263-272.
- [34] BOUKLI Hacene, AMARA M. S, SARI N. Chabane, Analysis of the first thermal response test in Algeria[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2012, 107(3): 1363-1369.
- [35] 黎雪梅, 高宝珠, 田光辉, 等. 天津中新生态城地源热泵原位热响应试验研究[J]. *地下水*, 2009, 31(4): 155-158.  
LI Xuemei, GAO Baozhu, TIAN Guanghui, et al, In situ thermal response test of Tianjin ecocity in ground source heat pump[J]. *Ground water*, 2009, 31 (4) : 155-158.
- [36] 施恂根, 苏华, 黄练红, 等. 岩土热响应测试系统的研究与开发[J]. *节能技术*, 2009, 27(4):383-387.  
SHI Xungen, SU Hua, HUANG Lianhong, et al. Research and development of the test system based on rock and soil thermal Response[J]. *Energy Conservation Technology*, 2009, 27(4):383-387.
- [37] 苏华, 施恂根. 绵阳烟厂岩土热响应测试[J]. *暖通空调*, 2009,39(12):102-106.  
SU Hua, SHI Xungen. Rock soil thermal response test for Mianyang cigarette factory[J]. *Journal of HV&AC*, 2009, 39(12):102-106.
- [38] 乔卫来, 陈九法, 薛琴, 等. 地埋管热响应测试及数据分析方法[J]. *流体机械*, 2010, 38 (6) : 60-63, 40.  
QIAO Weilai, CHEN Jiufa, XUE Qin, et al. In-situ Thermal response test and data analysis[J]. *Fluid machinery*, 2010, 38(6) :60-63, 40.

- [39] GB50366-2009. 地源热泵系统工程技术规范[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- GB50366-2009. Systems engineering technical specification for ground source heat pump[S].Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [40] ASHRAE, 2002. Methods for determining soil and rock formation thermal properties from field tests. ASHRAE Research Summary 1118-TRP. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
- [41] ASHRAE. 2007. Geothermal Energy. In ASHRAE Handbook. Heating, Ventilating, and Air-conditioning Applications, ed. ASHRAE. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
- [42] GUSTAFSSON A.M, WESTERLUND L, Heat extraction thermal response test in groundwater-filled borehole heat exchanger-Investigation of the borehole thermal resistance[J]. Renewable Energy, 2011. 36(9): 2388-2394
- [43] MARCO F. The temperature penalty approach to the design of borehole heat exchangers for heat pump applications[J]. Energy and Buildings, 2011. 43(6): 1473-1479.
- [44] CENK Yavuzturk. Modeling of vertical ground loop heat exchangers for ground source heat pump systems [D]. Stillwater: Oklahoma State University, 1999.
- [45] CHIASSON AD. Advances in modeling of ground-source heat pump systems[D].Stillwater: Oklahoma State University, 1999.
- [46] BEIER R A, SMITH M. D. Borehole Thermal Resistance From Line-Source Model of In-Situ Tests[J]. ASHRAE Transactions 2002, 108, Part 2: 212-219.
- [47] CARSLAW H.S. Introduction to the Mathematical Theory of the Conduction of Heat in Solids[M]. New York: Dover. 1945.
- [48] BEIER R. A, SMITH M. D. Minimum Duration of In-Situ Tests on Vertical Boreholes [J].ASHRAE Transactions, 2003, 109(Part 2): 475-486.
- [49] LAMARCHE L, BEAUCHAMP B. A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes[J]. Energy and Buildings, 2007,39(2): 188-198.
- [50] BEIER R.A. Vertical temperature profile in ground heat exchanger during in-situ test[J].Renewable Energy, 2011. 36(5): 1578-1587.
- [51] BANDOS T.V, MONTERO Á, FERNÁNDEZ E, et al. Finite line-source model for borehole heat exchangers: effect of vertical temperature variations[J].Geothermics, 2009. 38(2): 263-270.
- [52] 曾和义, 刁乃仁, 方肇洪. 地源热泵竖直埋管的有限长线热源模型 [J]. 热能动力工程, 2003a,18(3): 166-169,215.
- ZENG Heyi, DIAO Nairen, FANG Zhaohong. A model of finite length linear heat source for the vertical embedded pipe of a ground source heat pump[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. 2003, 18 (3): 166-169, 215.
- [53] 曾和义. U型竖直埋管地热换热器传热模型研究[D]. 济南: 山东建筑工程学院, 2003.
- ZENG Heyi. The Studies of the models for Vertical U-type Geothermal Heat Exchangers[D].Jinan: Shandong Jianzhu University, 2003.
- [54] KAVANAUGH S P. Field tests for ground thermal properties-methods and impact on ground-source heat pump design[J]. ASHRAE Transactions, 2000, 106: 851-855.
- [55] BEIER R.A., SMITH M.D, SPITLER J.D. Reference data sets for vertical borehole ground heat exchanger models and thermal response test analysis [J]. Geothermics, 2011. 40(1): 79-85.
- [56] GEHLIN S.E.A, HELLSTRÖM G. Comparison of four models for thermal response test evaluation[J]. ASHRAE Transactions; 2003; 109: 131-142.
- [57] LAMARCHE L, BEAUCHAMP B. New solutions for the short-time analysis of geothermal vertical boreholes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007. 50(7-8): 1408-1419.
- [58] SHONDER J.A, BECK J.V. Field test of a new method for determining soil formation thermal conductivity and borehole resistance[J].ASHRAE Transactions; 2000; 106: 843-850.
- [59] LAMARCHE L. A fast algorithm for the hourly simulations of ground-source heat pumps using arbitrary response factors[J].Renewable Energy, 2009. 34(10): 2252-2258.
- [60] RAYMOND J, LAMARCHE L. Development and numerical validation of a novel thermal response test with a low power source[J]. Geothermics, 2014, 51(7): 434-444.
- [61] ZHANG C, GUO ZJ, LIU YF, et al., A review on thermal response test of ground-coupled heat pump systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 40(12): 851-867.
- [62] LI Min, ALVIN C.K. Lai. New temperature response functions (G functions) for pile and borehole ground heat exchangers based on composite-medium line-source theory[J].Energy, 2012, 38(1): 255-263.
- [63] CHOI Jong Min, LEE Chulho, PARK Moonseo, et al.. Numerical simulation for thermal response test performance in closed-loop vertical ground heat exchanger[J]. Science China, 2011, 54(7): 1668-1673.
- [64] RAYMOND J, THERRIEN R, GOSSELIN L, et al. Numerical analysis of thermal response tests with a groundwater flow and heat transfer model[J].Renewable Energy, 2011, 36 (1) 315-324.
- [65] SIGNORELLI S, BASSETTI Simone, PAHUD Daniel, et al. Numerical evaluation of thermal response tests[J]. Geothermics, 2007. 36(2): 141-166.
- [66] 曹琦. 土壤源热泵单元埋管换热器热响应曲线热电比拟分析[J]. 工程建设与设计. 2007(9): 17-20.
- CAO Qi. Curve of cell ground heat exchanger by assimilating electricity for ground source heat pump system[J]. Engineering construction and design 2007(9): 17-20.
- [67] BAUER D, HEIDEMANN W, DIERSCH H.J.G. Transient 3D analysis of borehole heat exchanger modeling[J]. Geothermics, 2011, 40(4): 250-260
- [68] RAYMOND J, THERRIEN R, GOSSELIN L. Borehole temperature evolution during thermal response tests[J]. Geothermics, 2011c. 40(1): 69-78.
- [69] BOZZOLI F, PAGLIARINI G, RAINIERI S, et al. Estimation of soil and grout thermal properties through a TSPEP (two-step parameter estimation procedure) applied to TRT (thermal response test) data[J]. Energy, 2011. 36(2): 839-846.
- [70] 乔卫来, 陈九法, 薛琴, 等. 地埋管换热器热响应测试与模拟研究[J].建筑热能通风空调, 2010a, 29(1): 1-4, 12.
- QIAO Weilai, CHEN Jiufa XUE Qin, et al. Study on thermal response test and numeric Simulation for ground

- heat Exchanger[J]. *Building Energy & Environment*, 2010, 29(1):1-4, 12.
- [71] 刘俊, 张旭, 高军, 等. 地源热泵桩基埋管传热性能测试与数值模拟研究[J]. *太阳能学报*, 2009, 30(6): 727-731.  
LIU Jun, ZHANG Xu, GAO Jun, et al. Heat transfer performance test and numerical simulation of pipe-pipe ground source heat pump system[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2009, 30(6): 727-731.
- [72] DE CARLI M, TONON M, ZARRELLA A. et al., A computational capacity resistance model (CaRM) for vertical ground-coupled heat exchangers[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(7): 1537-1550.
- [73] ZARRELLA A, SCARPA M, DE CARLI M, Short time step analysis of vertical ground-coupled heat exchangers: The approach of CaRM[J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(9): 2357-2367.
- [74] LAMARCHE L, KAJL S, BEAUCHAMP B. A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems[J]. *Geothermics*, 2010, 39(2): 187-200.
- [75] LEE C K, LAM H N. Computer simulation of borehole ground heat exchangers for geothermal heat pump systems[J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(6): 1286-1296.
- [76] LEE C K. Effects of multiple ground layers on thermal response test analysis and ground-source heat pump simulation[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(12): 4405-4410.
- [77] MARCOTTE D, PASQUIER P. On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test [J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(11): 2407-2415.
- [78] NAGENDRA K J. Parameter estimation of ground thermal properties[D]. Stillwater: Oklahoma State University, 1999.
- [79] UNDERWOOD C.P, SPITLER J.D. Analysis of vertical ground loop heat exchangers applied to buildings in the UK[J]. *Building SERV ENG RES TECHNOL*, 2007, 28(2): 133-159.
- [80] 曲云霞. 地源热泵系统模型与仿真[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2004.  
QU Yunxia. Modeling and simulation for ground source heat pumps system[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2004.
- [81] 连小鑫, 刘金洋, 陈晓春, 等. 垂直U型地埋管换热器的数值模拟分析[J]. *太阳能学报*, 2012, 33(1): 48-55.  
LIAN Xiaoxin, LIU Jinyang, CHEN Xiaochun, et al., Simulation analysis of vertical U type ground numerical heat exchanger[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2012, 33(1):48-55.
- [82] VALENTIN Wagner, PETER Bayer, MARKUS Kübert. Numerical sensitivity study of thermal response tests[J]. *Renewable Energy*, 2012, 41(5): 245-253.
- [83] GUSTAFSSON A.M. Thermal response test: numerical simulations and analyses[D]. Scandinavia: Luleå University of Technology, 2006.
- [84] 江超. 土壤源热泵工程应用[D]. 西安:长安大学, 2011.  
JIANG Chao. Ground source heat pump engineering application[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [85] 张鑫. 垂直式地埋管换热理论及岩土热物性参数试验方法[D]. 西安:长安大学, 2012.6.  
ZHANG Xin. Vertical buried tube heat exchange theory and rock soil thermal test method of parameters[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [86] BEIER R A, SMITH M D. "Analyzing Interrupted In-Situ Tests on Vertical Boreholes,"[J]. *ASHRAE Transactions* 2005 Vol. 111, Part 1: 702-713.
- [87] BEIER R A. "Equivalent Time for Interrupted Tests on Borehole Heat Exchangers," [J]. *International Journal of Heating, Ventilating, Air-Conditioning and Refrigerating Research*, 2008, 14(3):489-505.
- [88] HU Pingfang, MENG Qingfeng, SUN Qiming. A method and case study of thermal response test with unstable heat rate[J]. *Energy and Buildings*, 2012, 48(5): 199-205.
- [89] SHONDER J A, BECK J V. A new method to determine the thermal properties of soil formations from in-situ field tests[R]. Oak Ridge National Laboratory (US) Report ORNL/TM-2000/97, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA. 2000a.
- [90] GUSTAFSSON A.M, WESTERLUND L. Multi-injection rate thermal response test in groundwater filled borehole heat exchanger[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(5):1061-1070.
- [91] HEIKO T. Liebel, SAQIB Javed, GUNNAR Vistnes. Multi-injection rate thermal response test with forced convection in a groundwater-filled borehole in hard rock[J]. *Renewable Energy*, 2012, 48(12): 263-268.
- [92] BEIER, R. A, SMITH M. D. "Removing Variable Heat Rate Effects from Borehole Tests,"[J]. *ASHRAE Transactions* 2003b, Vol. 109, Part 2: 463-474.
- [93] 常桂钦, 廖全, 彭清元, 等. 土壤源热泵岩土热物性测试的参数分析[J]. *煤气与热力*, 2011, 31(5): A05-10.  
CHANG Guiqin, LIAO Quan, PENG Qingyuan, et al. Analysis of parameters for soil thermo physical properties test around ground-source heat pump[J]. *CHANG GAS & HEAT*, 2011, 31(5):A05-10.
- [94] LIU Y. D, BEIER R. A. "Required duration for borehole test validated by field data"[J]. *ASHRAE Transactions*, 2009, 115(part2): 782-792.
- [95] AUSTIN W.A, YAVUZTURK C, SPITLER J.D. Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties[J]. *ASHRAE Transactions* 2000, 106(1): 365-79.
- [96] SMITH M, PERRY R. In-situ testing and thermal conductivity testing[C]//*Proceedings of the Geoexchange Technical Conference and Exposition*, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma, 1999 May 16-19.
- [97] JAVED S, SPITLER J D, FAHLÉN P. An Experimental Investigation of the Accuracy of Thermal Response Tests Used to Measure Ground Thermal Properties[J]. *ASHRAE Transactions*, 2011, 17(Part 1): 13-21.
- [98] GEHLIN S.E.A, NORDELL B. Determining undisturbed ground temperature for thermal response test[J]. *ASHRAE Transactions*; 2003d, 109: 151-156.
- [99] JOSÉ Acuña. Improvements of U-pipe Borehole Heat Exchangers[D]. KTH School of Industrial Engineering and Management, 2010.
- [100] 郑红旗, 祝合虎, 陈九法. 地埋管回填材料与地源热泵地下温度场的测试分析[J]. *流体机械*, 2009, 37(3):60-63.  
ZHENG Hongqi, ZHU Hehu, CHEN Jiufa. Experimental Investigation on Backfill Material and Soil Temperature profile for ground coupled heat pump system[J]. *FLU ID MACH INERY*, 2009, 37(3): 60-63.
- [101] LEE C, PARK M, MIN S, et al. Comparison of effective thermal conductivity in closed-loop vertical ground heat exchangers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(17-18): 3669-3676.
- [102] LEE C, PARK Moonseo, NGUYEN The-Bao, et al. Performance evaluation of closed-loop vertical ground

- heat exchangers by conducting in-situ thermal response tests[J]. *Renewable Energy*, 2012, 42 (6) : 77-83.
- [103] BANDOS T.V, MONTERO Á, FERNÁNDEZ de Córdoba P, et al. Improving parameter estimates obtained from thermal response tests: Effect of ambient air temperature variations[J]. *Geothermics*, 2011. 40(2): 136-143
- [104] GEHLIN, S.E.A, HELLSTRÖM G, NORDELL B, The influence of the thermo siphon effect on the thermal response test[J]. *Renewable Energy*, 2003b. 28(14): 2239-2254.
- [105] 方亮,张方方,方肇洪. 关于地埋管换热器热响应试验的讨论[J]. *建筑热能通风空调*, 2009, 28(4): 48-51.  
FAN Liang, ZHANG Fangfang, FANG Zhaohong. Comments on the thermal response test of the ground heat exchangers[J]. *Building Energy & Environment*, 2009, 28(4): 48-51.
- [106] 王雷岗,郑中援,马健,等. 地埋管地源热泵系统设计若干关键问题的研究[J]. *暖通空调*, 2011, 41(2): 41-44.  
WANG Leigang, ZHENG Zhongyuan, MA Jian, et al. Crucial issues in design of ground source heat pump systems with ground heat exchanger[J]. *Journal of HV&AC*, 2011, 41(2): 41-44.
- [107] KATSURA, T., K. Nagano, S. Hori, et al. Investigation of groundwater flow effect on the thermal response test result[C]//*Proceedings of 11th International Conference on Thermal Energy Storage; Effstock 2009, Stockholm, Sweden, June 14-17*.
- [108] BOZDA Ş, TURGUT B, PAKSOY H, et al. Ground water level influence on thermal response test in Adana, Turkey[J]. *International Journal of Energy Research*, 2008. 32(7): 629-633
- [109] GEHLIN S.E.A, HELLSTRÖM G., Influence on thermal response test by groundwater flow in vertical fractures in hard rock[J]. *Renewable Energy*, 2003a, 28(14): 2221-2238.
- [110] VALENTIN Wagner, PHILIPP Blum, MARKUS Kübert, et al. Analytical approach to groundwater-influenced thermal response tests of grouted borehole heat exchangers[J]. *Geothermics*, 2013, 46(4): 22-31.
- [111] JULIO Martos, ÁLVARO Montero, JOSÉ Torres, et al. Novel wireless sensor system for dynamic characterization of borehole heat exchangers[J]. *Sensors* 2011, 11(7): 7082-7094.
- [112] ERNST Rohner, LADISLAUS Rybach, ULRICH Schärli. a new small wireless instrument to determine ground thermal conductivity in-situ for borehole heat exchanger design[C]//*Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 2005:1-4*.
- [113] POPPEI J, SCHWARZ R, et al. Innovative improvements of thermal response test, final report[R]. Commissioned by Swiss Federal Office of Energy (BFE), 2008: 1-68.
- [114] FUJII H, OKUBO Hiroaki, NISHI Keita, et al. An improved thermal response test for U-tube ground heat exchanger based on optical fiber thermometers[J]. *Geothermics*, 2009, 38(4): 399-406.

(本文编辑 吴海西)

(上接第 124 页)

- [12] 李萍, 卜龙利, 李薛刚, 等. 某污水处理厂倒置 A<sup>2</sup>/O 工艺中制药类污染物的去除规律分析[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(4): 796-801.  
LI Ping, BO Longli, LI Xuegang, et al. Study on the removal mechanism of pharmaceutical pollutants in wastewater by the reversed A<sup>2</sup>/O process[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(4): 796-801.
- [13] 张爱涛, 卜龙利, 李薛刚, 等. 西安市某污水处理厂医药类污染物的分布与迁移转化规律[J]. *化工学报*, 2011, 62(12): 3518-3524.  
ZHANG Aitao, BO Longli, LI Xuegang, et al. Distribution and transformation regularity of pharmaceutical pollutants in a Xi'an sewage treatment works[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2011, 62(12): 3518-3524.
- [14] BO Longli, TARO U, WANG Xiaochang. Biodegradation of trace pharmaceutical substances in wastewater by a membrane bioreactor[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2009, 3(2): 236-240.
- [15] SUI Qian, HUANG Jun, DENG Shubo, et al. Occurrence and removal of pharmaceuticals, caffeine and DEET in wastewater treatment plants of Beijing, China[J]. *Water Research*, 2010, 44(2): 417-426.
- [16] 周宁娟. 典型 PPCPs 在给水处理系统中的变化规律及调控技术研究[D]. 上海: 东华大学, 2010.  
ZHOU Ningjuan. Study on removal and regulation techniques of typical PPCPs in water treatment system[D]. Shanghai: Dong Hua University, 2010.
- [17] ALEXANDER J T, HAI F I, AL-ABOUD T M. Chemical coagulation-based processes for trace organic contaminant removal: Current state and future potential[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 111: 195-207.
- [18] 乔铁军. 活性炭-超滤复合工艺去除水中典型 PPCPs 的效能与机理[D]. 北京: 清华大学, 2011.  
QIAO Tiejun. Performance and mechanism of typical pharmaceuticals and personal care products removal from water by the hybrid processes of granular activated carbon and ultra filtration[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [19] WESTERH P, YOON Y, SNYDER S, et al. Fate of endocrine-disruptor, pharmaceutical and personal care product chemicals during simulated drinking water treatment processes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(17): 6649-6663.
- [20] 商平, 刘涛利, 孔祥军. PAC 与 PFS 复合混凝/沉淀法预处理垃圾渗滤液[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(1): 65-67, 71.  
SHANG Ping, LIU Taoli, KONG Xiangjun. Pretreatment of landfill leachate using PAC, PFS coagulation and chemical precipitation[J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(1): 65-67, 71.
- [21] SNYDER S A, ADHAM S, REDDING A M, et al. Role of membranes and activated carbon in the removal of endocrine disruptors and pharmaceuticals[J]. *Desalination*, 2007, 202(1/3): 156-181.

(本文编辑 桂智刚)