

地源热泵地下热响应实验的季节效应分析

河北工业大学 王华军[☆] 王恩宇
天津大学 赵 军

摘要 以双 U 形地埋管换热器为例,进行了 3 个不同季节的地下热响应换热实验。实验结果表明,在地埋管换热器地下热响应实验中存在着季节效应。在相同加热功率的情况下,冬季单井换热量略高于夏季,此差异主要与土壤初始温度、土壤导热系数的季节性变化有关系。不同季节下,钻孔过程对于土壤初始温度的扰动作用也不一样。在大规模地源热泵系统的优化设计过程中,建议充分考虑上述季节效应的影响。

关键词 地源热泵 热响应实验 季节效应

Seasonal effect on in-situ thermal response tests for ground-source heat pump

By Wang Huajun[★], Wang Enyu and Zhao Jun

Abstract Taking the double-U type ground heat exchanger (GHE) as example, performs in-situ thermal response tests in three different seasons, and the results show that there does exist the seasonal effect. For the same heating power, the thermal performance of GHE in winter is better than that in summer, where the difference is mainly caused by the seasonal variation of the initial temperature and thermal conductivity of the ground. Besides, the disturbance of the boring process on the initial ground temperature is different with the seasonal variation. Suggests that the above seasonal effect should be taken into full consideration during the design of large-scale ground-source heat pump systems.

Keywords ground-source heat pump, in-situ thermal response test, seasonal effect

★ Hebei University of Technology, Tianjin, China

①

0 引言

近年来,地源热泵作为一项绿色节能技术,已成为暖通空调行业倍受关注的热门课题。地下热响应实验作为地源热泵系统的重要设计依据,已经得到了研究和设计人员的普遍重视。《地源热泵系统工程技术规范》(GB 50366—2005)中虽无明确要求必须进行地下热响应实验,但涉及了与地下热响应实验相关的岩土体热物性参数(如导热系数等)的现场测定方法,具有一定的实际指导意义^[1-2]。从目前情况看,在大型地源热泵工程建设之前进行地下热响应实验已经成为一种趋势,甚至一些研究机构和企业还专门设计了用于地下热响应实验的测试装置(测试车)。

2006—2007 年,在天津市建设管理委员会的

支持下,笔者对天津市地源热泵应用情况进行了大规模调研。此次普查共涉及了 120 多个地源热泵项目。结果表明,截至 2007 年 6 月,天津市已经累计推广地源热泵项目建筑面积为 120 万 m²,其中也反映出了不少问题。图 1 是 52 个有代表性的地源热泵系统的单井换热量调查结果,其中地埋管换热器为双 U 形,深度为 100 m。可以看出,单井换热量的差异很大,在 56~122 W/m 范围内变化。实际上,天津地区的浅层地质特点相对比较一致,

①☆ 王华军,男,1975 年 8 月生,博士,副教授
300401 河北工业大学能源环境学院
(022) 60204525
E-mail: huajunwang@126.com
收稿日期:2007-09-27
修回日期:2007-11-23

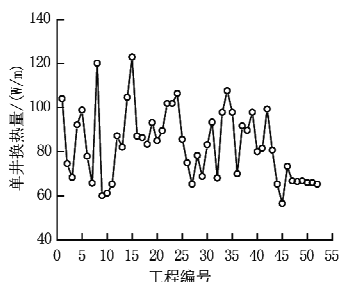


图1 单井换热量调查结果

城区差异很小,这一点与北京地区大不相同。调查过程中还发现,各个单井热响应实验的测试季节、数据表述方法也都存在很大差异。为了进一步研究上述因素对单井换热量的影响,本文以某一双U形地埋管换热器为例,进行了3个不同季节的地下热响应换热实验,旨在为地源热泵系统的优化设计提供一定的参考依据。

1 单井热响应实验

1.1 系统简介

实验地点为天津市河西区某医院内。图2给出了实验系统的示意图,主要由地埋管换热器、循环水泵、电加热装置、数据采集仪等组成。其中,地埋管换热器为双U形高密度聚乙烯管(HDPE),规格为DN32;钻孔深度为120 m,直径为240 mm,回填材料为原土(黏土、细砂以及少量淤泥)。电加热系统为可调节式,范围为0~15 kW。数据采集系统主要包括1个LWGY-40涡轮流量计(0.5级)和2个温度传感器(Pt1000铂电阻,精度为0.1℃)。根据误差分析,系统的最大相对误差为1%(温度)和2.9%(流量)。共计进行了3次地下热响应实验,时间分别为2006年8月、2006年11月、2007年2月,计作测试1、测试2和测试3。

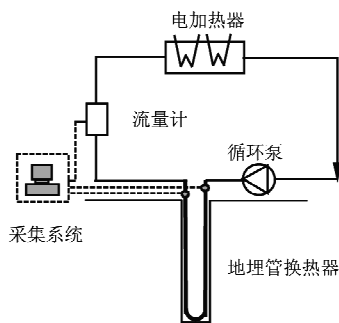


图2 单井实验系统示意图

1.2 数据处理

目前,单井地下热响应实验主要是基于土壤在

外界热激励条件下的温度变化过程描述,并利用求导热反问题方法获得土壤平均导热系数。

根据测试的管内流量和温差,可得地埋管换热器内流体的实际换热量:

$$Q = Mc_p(t_j - t_c) \quad (1)$$

式中 M 为流量, kg/s; c_p 为流体的比热容, J/(kg·℃); t_j 和 t_c 分别为流体进、出口温度,℃。

根据圆柱热源理论^[3],无限大各向同性介质内竖直U形地埋管换热器稳态传热解可表述为

$$t_w - t_\infty = \frac{Q}{H} \frac{G(Fo, p)}{\lambda_s} \quad (2)$$

式中 t_w 为钻孔壁温,℃; t_∞ 为远边界土壤温度,℃; Q 为传热量, W; H 为钻孔深度, m; λ_s 为土壤平均导热系数, W/(m·K); $G(Fo, p)$ 为 G 函数, 其中, p 为土壤计算点至钻孔中心距离与钻孔半径之比, Fo 为傅里叶(Fourier)数。

$$Fo = \frac{4\alpha\tau}{d^2} \quad (3)$$

式中 α 为热扩散系数, m²/s; d 为钻孔直径, m; τ 为运行时间, s。

$G(Fo, p)$ 通常为较复杂的多阶 Bessel 函数, 文献[3]给出了一些特征解, 足以满足工程应用精度要求。例如, 当 $p=1, 2$ 和 5 时, G 分别为

$$\begin{aligned} G &= 10^{-0.89129+0.36081 \cdot \lg Fo - 0.05508 \cdot \lg^2 Fo + 3.596 \times 10^{-3} \cdot \lg^3 Fo} \\ G &= 10^{-1.4541+0.8933 \cdot \lg Fo - 0.31193 \cdot \lg^2 Fo + 0.06119 \times 10^{-3} \cdot \lg^3 Fo} \\ G &= 10^{-3.007+2.25606 \cdot \lg Fo - 0.7928 \cdot \lg^2 Fo + 0.134293 \times 10^{-3} \cdot \lg^3 Fo} \end{aligned} \quad (4)$$

若进一步考虑流体侧换热过程, 流体温度变化可表述为

$$t_f = t_w + \frac{Q}{H} \left[\frac{G(Fo, 1)}{\lambda} + R \right] \quad (5)$$

$$R = R_{co} + R_{pi} + R_{fi} \quad (6)$$

式(5), (6)中 t_f 为地埋管内流体平均温度,℃; R 为钻孔井壁至管内流体的换热热阻, (m·K)/W; R_{co} , R_{pi} 和 R_{fi} 分别为管内流体换热热阻、管壁导热热阻以及回填区导热热阻, (m·K)/W, 具体计算见文献[4]。

根据 Austin 提出的参数估计原则^[5], 通过传热模型得到的流体平均温度与实际测量得到的流体平均温度进行对比, 当方差和 f 取得最小值时, 对应的物性参数即可视为土壤的平均热物性数值。

f 的计算公式为

$$f = \sum_{i=1}^N (T_{\text{cal},i} - T_{\text{exp},i})^2 \quad (7)$$

式中 $T_{\text{cal},i}$ 和 $T_{\text{exp},i}$ 分别为地埋管内流体平均温度的理论计算值和实测数值。

2 测试结果分析

2.1 单井换热量的表述

图 3 给出了测试 2 中,加热功率为 7.5 kW 时的流体温度、换热量等参数的实际变化情况。在地下热响应实验中,单井换热量通常是指地埋管换热器与土壤之间换热达到相对稳定状态时,单位钻孔深度的实际传热量。对于不同的土壤地质条件,达到相对稳定的时间通常是不同的,需要实验者根据现场温度变化情况确定。从天津地区开展地下热响应实验的情况来看,加热时间不短于 48 h。从图 3 可以看出,尽管换热趋于相对稳定状态,但管内换热量仍存在 3%~5% 范围内的上下波动,其中加热装置调节过程的滞后是一个主要原因,这已经成为目前单井换热实验装置的一个通病。除了改进实验装置本身之外,通常还可以采用以下方法消除或削弱上述不利影响:1) 保证足够长的测试时间;2) 进行多组工况实验,建议不少于 3 组。

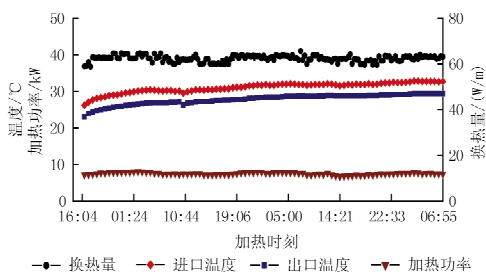


图 3 单井测试 2 中的参数变化情况

图 4 给出了不同加热工况下,稳定单井换热量随加热功率的变化情况。可以看出,二者呈线性变化关系。需要说明的是,从理论上讲,上述曲线应该是经过坐标原点的直线,但在实验过程中,由于

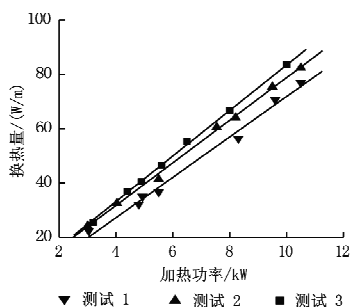


图 4 不同加热功率下的单井换热量

测量误差、加热滞后以及各种损耗等因素的影响,数据偏离了原点,但线性关系保持不变。图 4 表明,不同加热功率下的单井换热量是不一样的,因此,在地下热响应实验中表述单井换热量时,需要同时给出对应的加热功率。

另一方面,在不同加热工况下,地埋管换热器的稳定进、出口温度也是不相同的。地埋管换热器的进出口温度涉及到热泵机组的运行效率问题,这是地源热泵系统优化设计的必要条件之一。在京津地区,地埋管换热器的设计进、出口温度经常取 35 °C/30 °C(夏季)和 3 °C/8 °C(冬季)。以此为标准,图 4 中测试 3 的单井换热量约为 66.72 W/m,对应的加热功率为 8 kW,进口温度最终稳定在 35.02 °C。若加热功率提高至 10 kW,此时的进口温度将稳定在 40 °C,单井换热量增加为 88.56 W/m。

因此,结合上述两方面因素,笔者认为,对于单井热响应实验而言,单独谈单井换热量是不够的,必须同时给出其测试条件,即对应的加热功率或地埋管换热器进、出口温度。否则,单井换热量数据之间就会缺乏可比性,甚至引起一定程度上的误导,这也是本文在实际调研中发现“单井换热量差异很大”的一个主要原因。

2.2 单井换热量的季节影响

在上述的地下热响应实验中,通过比较相同加热功率下的单井换热量,可以看出其中存在着一定程度的季节差异。图 4 表明,测试 3(冬季)的单井换热量曲线整体上略高于测试 1(夏季)和测试 2(秋季)的单井换热量曲线。

表 1 以加热功率为 8 kW 的工况为例,汇总了 3 次测试的实验结果。可以看出,就单井换热量而

表 1 实验结果汇总

	测试 1	测试 2	测试 3	平均值	最大偏差/%
土壤平均初始温度/°C	16.5	15.5	14.2	15.40	16.20
导热系数/(W/(m·K))	1.45	1.61	1.64	1.57	13.10
换热量/(W/m)	56.98	63.14	66.72	62.28	17.09

言,测试 3(冬季)结果为 66.72 W/m,而测试 1(夏季)结果为 56.98 W/m,二者相对偏差达 17.09%,即使考虑 3.07% 的测量误差(包括仪器误差、管路散热等),上述相对偏差仍有 14.02%。对于目前比较流行的大面积地源热泵系统工程而言,此偏差足以引起较大的设计方案变化,进而直接影响到系统的建设成本与运行效果。因此,在地下热响应测

试结果分析和使用过程中,应当充分考虑上述的季节差异。从安全角度出发,建议尽量选取夏季热响应实验结果。若受实验时间限制,只能在冬季进行地下热响应实验,则应该对结果进行一定的修正。

土壤初始温度是地下热响应实验的一个重要内容,也是造成上述季节效应的主要原因。土壤初始温度受区域位置、大气环境以及太阳辐射等多种因素的影响。在地源热泵中,通常可以根据深度不同,将土壤划分为 3 个区:表层区、恒温区和深层区。表层区为深度在 1~20 m 范围内的土壤,温度随地表气象条件的短期变化非常明显;恒温区指深度在 20~30 m 的土壤,温度几乎不受外界因素影响,略高于年平均空气温度;深层区是深度在 30~150 m 范围内的土壤,其温度呈线性增加趋势,增幅约为 0.015~0.025 °C/m(天津地区)。不同深度的土壤温度变化可采用 Baggs 模型进行计算,详见文献[6],这里不再赘述。对于地下热响应实验而言,土壤初始温度实际上是在整个钻孔深度范围内的积分平均数值,因此表层区土壤温度的季节变化势必引起土壤初始温度的变化。

图 5 模拟了天津地区不同深度的土壤温度变化情况。可以看出,在表层区,随着深度增加,土壤温度峰值存在不同程度的滞后现象。土壤最高和最低温度分别出现在 8~9 月和 2~3 月,这与表 1 中土壤温度的测试结果是一致的。其中测试 1 和测试 3 的土壤平均初始温度分别为 16.5 °C 和 14.2 °C,相对偏差为 16.20%。因此,即使流体温度和加热功率相同,不同季节地下热响应实验中的“流体-土壤”之间的换热温差也不一致,从而导致了不同的单井换热量。

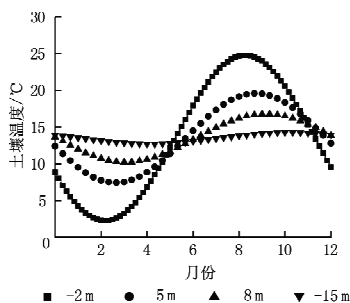


图 5 不同深度的土壤温度变化

图 6 给出了土壤导热系数的实验结果。可以看出,上述季节效应还表现在土壤导热系数的变化上。与测试 1 相比,测试 2 和测试 3 中的土壤导热

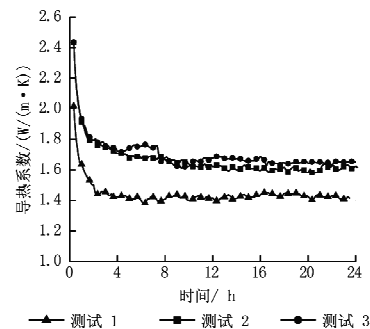


图 6 导热系数的实验结果

系数略微偏大,最大相对偏差为 13.10%。土壤导热系数的季节性变化规律与单井换热量相同,但与土壤初始温度相反,这也在一定程度上解释了测试 3 中单井换热量偏大的另一主要原因。

土壤导热系数的季节性变化与土壤湿分迁移也有一定关系。通常情况下夏季土壤会干燥一些,而冬季则相对湿润。因此,冬季条件下的单井热响应实验会趋于强化,而夏季则被削弱。当然,对于不同的土壤类型与饱和情况,上述湿分的影响是不完全相同的,有关实验数据将另文报道。但从目前的实验结果看,土壤湿分迁移对地埋管换热器的传热性能影响不大,至少在天津地区情况如此。因此,对于实际工程应用,在考虑地下热响应实验的季节差异时,可以忽略土壤湿分迁移的影响。

图 7 以测试 3 为例,给出了单井热响应实验数据分析过程中,土壤初始温度对导热系数的影响。可以看出,若土壤初始温度出现测量偏差,会在很大程度上影响土壤导热系数的准确性,这与文献[7]的结论是基本一致的。因此,在实际测试中,由于钻孔过程往往会引起地温的局部变化,所以钻孔刚完毕时不宜直接进行换热实验,而应该等待土壤温度恢复至原来状态后,再进行下一步实验。

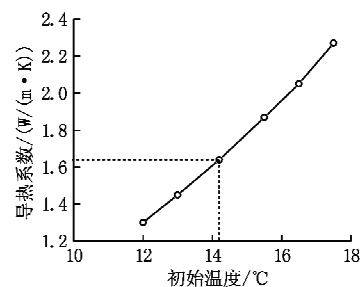


图 7 土壤初始温度对导热系数的影响

为了进一步说明此问题,图 8 给出了笔者在唐山市曹妃甸工业区中一个 160 m 深测试井所作的土

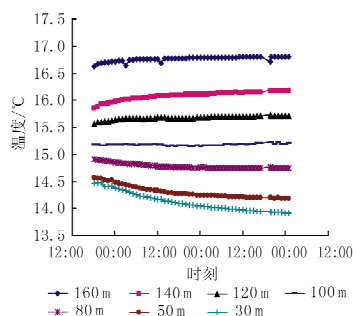


图 8 钻孔完成后土壤温度恢复实验结果

壤温度恢复性实验的结果,测试时间为 2007 年 10 月。数据记录从钻孔成孔、下管完成后 2 h 开始进行,所有传感器均为 Pt1000 型铂电阻。可以看出,不同深度处的土壤温度的恢复过程是有差异的。通常,除了受钻孔机械热量影响外,钻孔过程对土壤初始温度的扰动主要受浆液(地表水)温度的影响。在该实验中,浆液的平均温度为 15.3 °C,正好与 100 m 深的土壤温度接近,所以浆液与该深度地层的传热并不明显,即扰动作用较小。对于 20~100 m 深的土壤,由于初始温度低于浆液温度,所以钻孔过程中温度会有所升高,而且深度越小,温升越大(30, 50, 80 m 处的温升分别约为 0.5, 0.3 和 0.2 °C)。对于 100 m 以下的土壤,由于初始温度较高,故钻孔过程中出现了温度降低的情况。但是,考虑到浆液温度会随着钻孔季节而变化,对于夏季情况,浆液温度高于土壤温度,因此钻孔过程会使得恒温层和深层土壤的温度都有所升高。为了避免这种季节效应对土壤初始温度的扰动作用的影响,建议钻孔完成后土壤温度恢复时间越长越好,且不能少于 48 h。

3 结论

3.1 在地埋管换热器地下热响应实验中,存在着季节效应。实验结果表明,在相同加热功率的情况

下,冬季单井换热量略高于夏季,此差异主要与土壤初始温度、土壤导热系数的季节性变化有关系,而湿度变化的影响基本可以忽略。在地源热泵系统(尤其是大面积工程)的优化设计过程中,应该充分考虑上述季节效应的影响。此外,不同季节下,钻孔过程对于土壤初始温度的扰动作用也不一样,建议钻孔完成后保证足够长的土壤温度恢复时间。

3.2 就地下热响应实验结果而言,建议在提供单井换热量数据时,还要给出其对应的加热功率或地埋管换热器进、出口温度,以增强不同实验数据之间的可比性,更好地服务于系统优化设计。从安全角度出发,建议实际地源热泵工程应尽量选取夏季热响应实验的结果。

参考文献:

- [1] Sanner B, Burkhard W. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe[J]. Geothermics, 2003, 32(12): 579-588
- [2] Kavanaugh S P. Field tests for ground thermal properties—methods and impact on ground-source heat pumps[G]// ASHRAE Trans, 1998, 104(2): 347-355
- [3] Ingersoll L R, Plass H J. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump [J]. Heating, Piping & Air Conditioning, 1948, 20(7): 119-122
- [4] 王华军,赵军. 混合式地源热泵系统的控制策略研究[J]. 暖通空调, 2007, 37(9): 141-144
- [5] Austin. Development of an in situ system for measuring ground thermal properties[D]. Oklahoma: Oklahoma State University, 1995
- [6] 王华军,魏晋. 一种基于塔式结构的地源热泵系统设计方法[J]. 暖通空调, 2006, 36(11): 70-75
- [7] 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

(上接第 4 页)

联矩阵和基本回路矩阵。该方法在平面网络的基础上,结合供热管网的特点,引入热源信息矩阵和热用户信息矩阵,实现了包括管路、热源支路和热用户支路在内的空间网络的拓扑关系识别。通过算例验证了该方法的正确性和实用性。该方法为多热源环状热网的水力工况分析和非对称热网的计算提供了实现的手段。

参考文献:

- [1] 孙宗宇. 热水网路水力计算软件的开发与研究[D].

哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2002

- [2] 曹立明,魏兵,周强. 图论及其在计算机科学中的应用[M]. 北京:中国矿业大学出版社, 1995
- [3] 王晓霞. 多热源环状热水管网故障工况及可靠性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2004
- [4] 王晓霞,周志刚,邹平华. 多热源多环空间热网的水力工况模拟与分析方法[J]. 暖通空调, 2004, 34(11): 131-134
- [5] 周志刚,邹平华,王晓霞. 基于阻抗辨识的复杂空间热网仿真研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(10): 19-24
- [6] 徐俊明. 图论及其应用[M]. 合肥:中国科技大学出版社, 1998