

文章编号:1673-9469(2010)01-0058-03

地源热泵土壤热物性测试与分析

赵进,王景刚,杜梅霞,高晓霞
(河北工程大学 城建学院,河北 邯郸 056038)

摘要:运用恒热流测试原理自主研发了岩土热物性测试仪,通过现场测试的方法,调整加热管的加热功率、埋管中循环水流量、埋管进出口水温随时间变化规律,利用线热源理论确定了地下岩土的热物性参数。实验表明,土壤初始温度的测量精度对于提高土壤的导热系数是至关重要的,在未扰动的土壤温度以及给定PE管材的条件下,测试时间为50小时左右时,土壤导热系数逐渐趋于稳定,收敛于 $3.109 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$,整个测试过程平均导热系数为 $3.489 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$,该结果为地源热泵系统的准确设计提供了依据。

关键词:土壤热物性;地源热泵;线源模型;导热系数
中图分类号: TU83 **文献标识码:** A

Testing and analysis on the soil thermal properties by ground source heat pump

ZHAO Jin, WANG Jing-gang, DU Mei-xia, GAO Xiao-xia
(College of Urban Construction, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: A ground thermal response testing system is developed independently on the principle of constant heating flux. Through the method of field testing, it's summed up that the relationship during the power of heating, flow rate of circulating water in the pipe and import and export water temperature of buried pipe. The thermal properties of soil are determined by the line source model. The results show that it is very important to improve the thermal conductivity for its original temperature. The thermal conductivity of the soil tends to be constant after 50 hours and converges to $3.109 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ under the condition of the undisturbed soil temperature and a given PE pipe. The soil thermal conductivity at the average of $3.489 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$. It is provided for ground source heat pump system for theoretical basis.

Key words: soil thermal properties thermal; ground source heat pump; line source model; conductivity

以土壤作为低温热源,并且采用地埋管方式的地源热泵与其它类型的热泵相比,有热源理想,环境影响小,运行及维修费用低廉,寿命长等优势^[1],但是岩土热物性参数不准确,导致设计的系统负荷与实际负荷不相匹配,使地下换热器的准确设计受到影响^[2],因此热物性是地埋管换热系统设计重要参数,对于具体工程而言,不同地层地质条件下某些地下岩土的热物性相差10倍之多^[3]。研究结果表明,当地下岩土的导热系数或导温系数发生10%的偏差,则设计的埋管偏差为4.5%~5.8%,环管的最高温度产生 1.1°C ~ 1.2°C 偏差,而最低温度的偏差也有 0.3°C ~ 0.4°C ,

制冷能力和制热能力有1%的变化^[4]。特别对于竖直埋管的土壤源热泵系统,埋管长度的偏差将导致钻孔总长度的变化,由于钻孔成本极高,从而导致系统的初投资远远偏离实际造价。可见,对于地下岩土的热物理性质的研究是非常必要的,该研究直接决定了土壤源热泵系统的经济性和实用性,如何确定热物性参数就成为一个迫切需要解决的问题,目前热物性的测定方法主要有稳态测试法、实验室取样测试法、现场测试法。本实验采用现场测试方法测出钻孔周围岩土体的热物性参数,得到的数据更符合工程实际,为地源热泵系统的准确设计提供了依据。

收稿日期:2010-01-12

作者简介:赵进(1983-),男,河北石家庄人,硕士研究生,从事供热、供燃气、通风及空调工程方面的研究。

1 实验装置与原理

1.1 实验装置

设计了土壤热泵实验系统,地下埋管系统有 2 眼埋管井,钻孔直径为 150mm,钻孔深度 120m,埋管换热器以水为循环介质,采用高密度聚乙烯塑料管(HDPE)U 型埋管换热器,直径分别为 25mm、32mm,实验台地下共布置了 52 个铠装 PT100 热电阻,用于测量 PE 管和测试井在不同深度的温度变化。本实验选择 32mm 的埋管进行试验,地上移动式测试车主要包括循环水箱、水泵、流量计、球阀、管道、数据采集模块、电脑等部件。其中循环水箱 1 个,体积为 0.2m³,水箱内的加热器功率调节范围为 0kW ~ 16.5kW,循环水泵 1 台,热电阻温度传感器 2 只,电磁流量计、电压表、电流表各 1 只。实验台需要采集温度、流量、加热功率等数据,测试地点距离土壤导热系数测定仪约为 2m 左右,水管全部用 1cm 厚的橡塑管保温。钻井水文地质资料分析表明,地下 30m 以上主要为粘土层,30 ~ 50m 处主要为卵石砾石层,地下 50m 处主要为砂土层,地下含水量丰富,土壤类型属文献分类标准^[5]中的重土饱和和潮湿型。

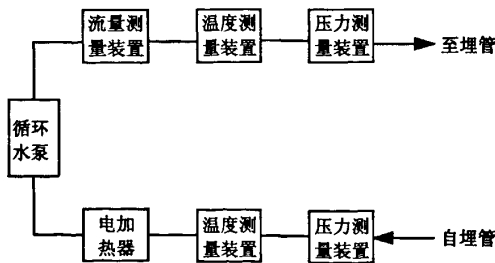


图1 土壤热物性测试原理
Fig.1 The principle of soil thermal properties testing

1.2 实验原理

恒热流测试法是在保持加热功率恒定的情况下测量地下土壤散热功率,当加热功率与土壤散热功率相等(相近)时,然后利用已知条件反解传热模型可以求出岩土导热系数。由图 1 可以看出,流体经过电加热器加热后,经循环水泵被送入到地下,由于加热后的流体温度高于地下土壤的温度,故热量通过管壁由流体向土壤放热,这样从地下再回到测试仪中的流体的温度就存在一定的变化,这就是地下土壤的温度响应。地下未扰动

的地层原始温度一般地埋管内注满水后静止 1d ~ 2d 后测试,测试装置在加热器突然运行前,使循环水泵连续运行 20min,每隔 1min 记录一次地埋管进出口水温,地埋管进口温度不断升高一直到与出口温度相等,如果水泵继续运行,会由于水泵的散热使进出口温度缓慢升高,则关闭水泵并将进出口温度相等时刻的温度近似等于地下无干扰地温^[6],并采用线热源模型 Ingersoll 方法对测试数据进行分析。

$$T_f = T_f + q_l \times \left[R_b + \frac{1}{4\pi\lambda_s} \times Ei \left(\frac{r^2}{4a\tau} \right) \right] \quad (1)$$

式中 T_f —循环流体的平均温度; T_f —无穷远处土壤温度; q_l —单位长度埋管的换热量; λ_s —周围岩土导热系数; R_b —钻孔传热热阻; τ —时间。

当 τ 为 τ_1 和 τ_2 时,循环流体的温度分别为 T_{f1} 和 T_{f2} ,代入上式并简化得出以下关系

$$T_{f2} - T_{f1} = \frac{q_l}{4\pi\lambda_s} (In\tau_2 - In\tau_1) \quad (2)$$

进而可以得出土壤的导热系数

$$\lambda_s = \frac{(In\tau_2 - In\tau_1) q_l}{(T_{f2} - T_{f1}) 4\pi} \quad (3)$$

令 $k = \frac{T_{f2} - T_{f1}}{In\tau_2 - In\tau_1}$ 为时间的温度对数值,当作为横坐标时, k 为循环流体的变化的斜率可以得出

$$\lambda_s = \frac{q_l}{4k\pi} = \frac{Q}{4\pi kH} \quad (4)$$

根据测试数据,利用自主开发的软件可以得出加热状态下环路平均温度 T_f 对应时间变化的曲线图计算出岩土热物性导热系数。

2 结果与分析

为了分析土壤初始温度对导热系数影响,系统连续运行 150 小时,分别计算 16℃, 16.5℃, 17℃, 17.5℃, 18℃, 18.5℃ 时的土壤导热系数。从图 2 可以看出,随着土壤初始温度的增加,土壤导热系数几乎直线上升,土壤初始温度对计算结果影响非常大,所以在测试时要尽可能提高土壤初始温度的测量精度。土壤初始温度每增加 1℃,土壤导热系数约增高 0.7W/(m·℃)。以实测土壤初始温度 16℃ 为基点,0.5℃ 测量偏差,导致土壤导热系数计算结果偏差可达 10% 以上。从图 3 可以看出前 20h 埋管进出口温度变化较大,连续运行 40h 后,温度变化率逐渐变小,50h 左右埋管进出口温差基本保持在 4.61℃ 左右。

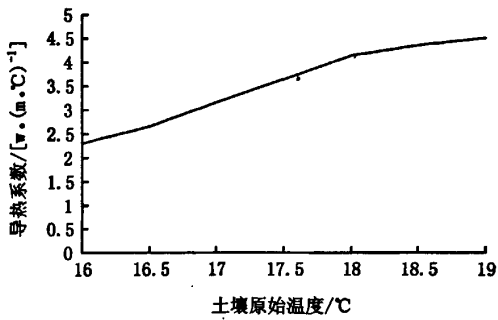


图2 导热系数与土壤原始温度关系

Fig.2 The relationship between thermal conductivity and original temperature of soil

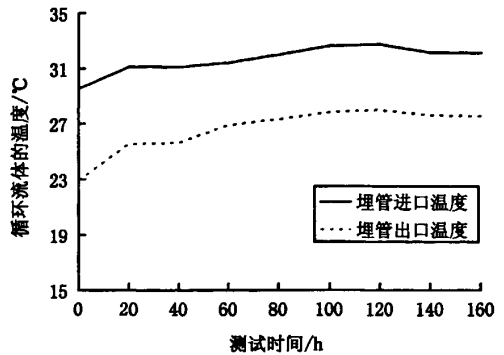


图3 循环流体温度与埋管进出口水温关系

Fig.3 The relationship between temperature of fluid and the pipe

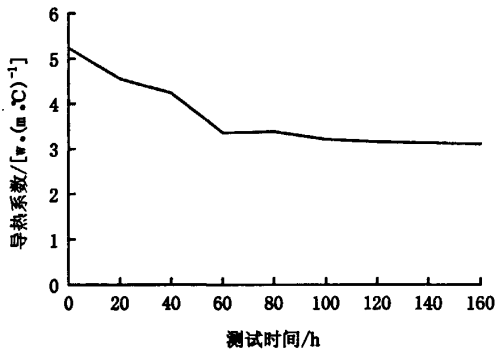


图4 导热系数与测试时间的关系

Fig.4 The relationship between thermal conductivity and testing time

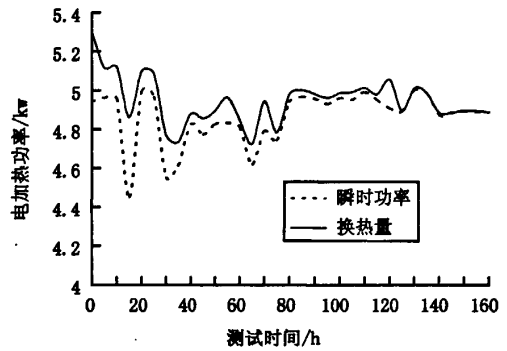


图5 功率与测试时间的关系

Fig.5 The relationship between electric power and testing time

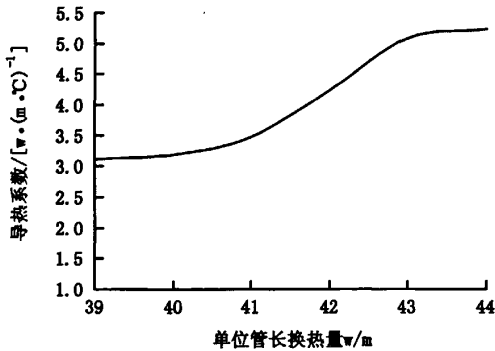


图6 导热系数与单位管长换热量的关系

Fig.6 The relationship between thermal conductivity and heating unit

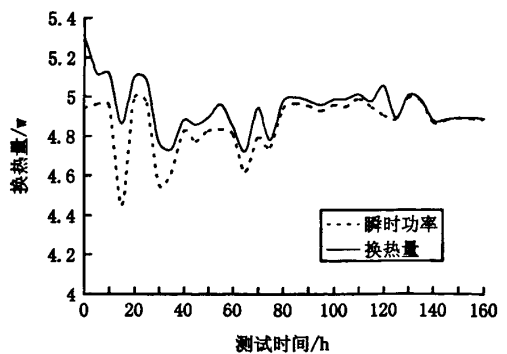


图7 换热量与测试时间关系

Fig.7 The relationship between heating and testing time

从图4可以看出,土壤导热系数在3.109~5.232之间变化,开始时有一些波动然后趋于稳定,随着测试时间的增加,到50小时左右时,土壤导热系数逐渐稳定,收敛于3.109W/(m·°C)。这主要是因为测试初期传热不稳定,但运行一段时

间后可认为达到准稳态。从图5可以看出,测得地下无干扰地温后,即可进行地埋管进出口温度的热响应测试,测试时间60h,这样既可以保证获得正确的导热系数,又可以避免测试时间过长。电加热器开启的功率为5kW,由于(下转第69页)

- [7] 傅金民, 董 钻. 大豆根系生长与产量的关系[J]. 大豆科学, 1987, 6(4): 261 - 279.
- [8] PANTALONE, V R, REBETZKE G J, BURTON W. Phenotypic evaluation of root traits in soybean and applicability to plant breeding[J]. *Crop Science*, 1996(36): 456 - 459.
- [9] 金 剑, 王光华, 刘晓冰. 东北黑土区高产大豆 R5 期根系分布特征[J]. 中国油料作物学, 2007, 29 (3): 266 - 271.
- [10] 王永军, 吴晓雷, 喻德跃, 等. 重组自交系群体的检测调正方法及其在大豆 NJRIKY 群体的应用[J]. 作物学报, 2004, 30(5): 413 - 418.
- [11] WANG S, BASTEN C J, ZENG Z B. Windows QTL cartographer 2.0[R]. North Carolina: U.S. Department of Statistics, 2004.
- [12] 刘 莹, 肖复明, 张孟臣. 冀南地区不同产量类型夏大豆根系性状的研究[J]. 大豆科学, 2009, 28(4): 665 - 669.
- [13] 李 话, 张大勇. 半干旱地区春小麦根系形态特征与生长冗余的研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(1): 26 - 30.
- [14] 蔡昆争, 骆世明, 段舜山. 水稻群体根系特征与地上部生长发育和产量的关系[J]. 华南农业大学学报, 2005, 26(2): 1 - 4.
- [15] MIGUE R. The vertical distribution of below ground biomass in grassland communities in relation to grazing regime and habitat characteristics[J]. *Journal of Vegetal Science*, 1995 (6): 63 - 72.
- [16] 田佩占. 大豆品种根系的生态类型研究[J]. 作物学报, 1984, 10(3): 173 - 177.
- [17] 刘 莹, 蔡祈明. 大豆根系形态及苗期耐旱根系性状的研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2009, 26(3): 81 - 84.
- [18] 刘 莹, 盖钧镒, 吕慧能. 大豆耐旱种质鉴定和相关根系性状的遗传与 QTL 定位[J]. 遗传学报, 2005, 32 (8): 855 - 863.

(责任编辑 马立)

(上接第 60 页)现场电流、电压的波动,实际电流和电压值通过电流表、电压表实时读取与记录,其平均值作为实际电加热功率。

从图 6 可以看出,土壤冬季热物性测试单位管长换热率在 39W/m ~ 44W/m 的范围内变化时,测得土壤导热系数在 3.109 ~ 5.232 范围变化。从图 7 可以看出,在前 50h 以内地层换热量和输入功率相差比较大,这是由于最初一段时间内,热量传递主要在井孔内进行,循环水温上升比较快,随着测试时间的增加,循环水温上升越来越慢,近似于稳态传热过程,吸热量与放热量逐渐趋于平衡。

3 结论

1)测量时间达到 50h 后,计算结果波动逐渐减小并趋于收敛。

2)未扰动土壤温度以及给定 PE 管材的条件下,平均导热系数为 3.489 W/(m·℃)。

3)土壤初始温度对计算结果影响非常大,所以在测试时要尽可能提高土壤初始温度的测量精度。

参考文献:

- [1] 江 亿. 我国建筑耗能状况及有效的节能途径[J]. 暖通空调, 2005, 35(5): 30 - 40.
- [2] 杨卫波. 基于解析法的地下岩土热物性现场测试方法的探讨[J]. 建筑科学, 2009, 25(8): 84 - 84.
- [3] HELLSTROM G. Ground heat storage - thermal analyses of duct storage system[D]. Sweden: University of Lund, 1991.
- [4] 王补宣. 多孔介质的传热传质[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1992, 32(增 1 期): 125 - 129.
- [5] 美国制冷空调工程师协会. 地源热泵工程技术指南[M]. 徐伟译. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.
- [6] 王书中, 由世俊, 张光平. 热响应测试在土壤热交换器设计中的应用[J]. 太阳能学报, 2007, 28(4): 405 - 410.

(责任编辑 马立)

作者: [赵进](#), [王景刚](#), [杜梅霞](#), [高晓霞](#), [ZHAO Jin](#), [WANG Jing-gang](#), [DU Mei-xia](#), [GAO Xiao-xia](#)
作者单位: [河北工程大学城建学院, 河北, 邯郸, 056038](#)
刊名: [河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)
年, 卷(期): 2010, 27(1)
被引用次数: 6次

参考文献(6条)

1. [江亿](#) [我国建筑耗能状况及有效的节能途径](#)[期刊论文]-[暖通空调](#) 2005(05)
2. [杨卫波](#) [基于解析法的地下岩土热物性现场测试方法的探讨](#)[期刊论文]-[建筑科学](#) 2009(08)
3. [HELLSTROM G](#) [Ground heat storage-thermal analyses of duct storage system](#) 1991
4. [王补宣](#) [多孔介质的传热传质](#) 1992(增1)
5. 美国制冷空调工程师协会; [徐伟](#) [地源热泵工程技术指南](#) 2001
6. [王书中](#); [由世俊](#); [张光平](#) [热响应测试在土壤热交换器设计中的应用](#)[期刊论文]-[太阳能学报](#) 2007(04)

本文读者也读过(10条)

1. [刘立芳](#), [王瑞华](#), [张亚庭](#), [丁良士](#) [土壤导热系数的现场测定](#)[会议论文]-2006
2. [宋欣阳](#) [用于地源热泵系统现场热响应测试的土壤热物性实验研究](#)[学位论文]2009
3. [于文俊](#), [唐志伟](#), [张宏宇](#) [地源热泵土壤热物性测试研究](#)[会议论文]-2008
4. [于文俊](#) [双工况地源热泵土壤热物性测试研究](#)[学位论文]2009
5. [赵军](#), [段征强](#), [宋著坤](#), [李丽梅](#), [Zhao Jun](#), [Duan Zhengqiang](#), [Song Zhukun](#), [Li Limei](#) [基于圆柱热源模型的现场测量地下岩土热物性方法](#)[期刊论文]-[太阳能学报](#)2006, 27(9)
6. [余斌](#), [颜亮](#), [王泮浩](#), [YU Bin](#), [YAN Liang](#), [WANG Feng-hao](#) [热电比拟法测定土壤热物性的实验研究](#)[期刊论文]-[制冷空调与电力机械](#)2009, 30(4)
7. [张玲](#), [黄奕云](#) [粉沙类土壤热物性数据的测定](#)[期刊论文]-[浙江建筑](#)2010, 27(2)
8. [姜黎](#), [蒋绿林](#), [王宏](#), [黄晓蕾](#), [Jiang Li](#), [Jiang Lvlin](#), [Wang Hong](#), [Huang Xiaolei](#) [地源热泵系统双U型埋管换热器的测试实验](#)[期刊论文]-[制冷学报](#)2010, 31(1)
9. [李翔](#), [唐志伟](#) [冬季工况土壤热物性实验研究](#)[会议论文]-2009
10. [颜亮](#), [王泮浩](#), [余斌](#), [Yan Liang](#), [Wang Fenghao](#), [Yu Bin](#) [地源热泵岩土热物性现场测试方法评价](#)[期刊论文]-[暖通空调](#)2011, 41(2)

引证文献(6条)

1. [吴菁菁](#), [丰威仙](#), [王则园](#), [程洪波](#), [俞维培](#), [徐国富](#) [地源热泵土壤导热率实验研究](#)[期刊论文]-[四川建材](#) 2011(3)
2. [刘九龙](#), [陈效文](#), [姚木生](#), [唐永香](#), [袁小飞](#), [李麟](#) [采用不同方式的埋管换热器热响应测试——以中新天津生态城公屋展示中心项目为例](#)[期刊论文]-[世界地质](#) 2012(4)
3. [李隆健](#), [鲍建镇](#), [廖全](#), [崔智智](#) [回填料对埋管换热器性能的影响](#)[期刊论文]-[土木建筑与环境工程](#) 2011(5)
4. [瞿成松](#), [陈海洋](#), [曹袁](#), [徐丹](#) [上海第四纪地层温度场分布特征与影响因素分析](#)[期刊论文]-[上海国土资源](#) 2013(3)
5. [李杨](#) [基于多孔介质理论的冻土水热迁移耦合模型推导](#)[期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2012(3)
6. [王景刚](#), [盛宏](#), [柳延超](#), [于海](#), [张春华](#) [影响埋管换热器侧换热量因素分析](#)[期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2012(1)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjkjxyxb201001015.aspx