

# 大广高速公路双辽服务区地源热泵系统 地层热物性原位测试

孟祥瑞<sup>1</sup>, 孙友宏<sup>1</sup>, 王庆华<sup>1</sup>, 关晓琳<sup>1</sup>, 吕喜禄<sup>2</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林省高速公路建设局, 吉林 长春 130022)

**摘要:**利用地层热物性原位测试仪可以准确地测量地层热物性参数。概述了浅层岩土体热物性原位测试仪的原理、结构组成、特点、测试方法及数据处理方法。利用 Ingersoll 简化模型算得共需 498 口 100 m 换热井才能满足双辽服务区的冬季供暖需要。

**关键词:**热物性参数;原位测试仪;Ingersoll 简化模型;地源热泵

**中图分类号:**P634;TU833<sup>+</sup>.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2011)01-0047-04

**In-Situ Testing of Thermophysical Properties of Ground Thermal Pump in Shuangliao Highway Service Station/MENG Xiang-rui<sup>1</sup>, SUN You-hong<sup>1</sup>, WANG Qing-hua<sup>1</sup>, GUAN Xiao-lin<sup>1</sup>, LÜ Xi-lu<sup>2</sup>** (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Jilin Province Highway Construction Bureau, Changchun Jilin 130022, China)

**Abstract:** The in-situ testing instrument for ground thermophysical properties can be used to measure accurately the ground thermophysical parameters. This paper describes the in-situ testing instrument in terms of its principle, structure and components, characteristics, testing method and data processing. With the Ingersoll simplified model, it is found that a total of 498 geothermal wells with depth of 100m are needed to meet the heating requirement in Shuangliao Service Station.

**Key words:** thermophysical parameters; in-situ testing instrument; Ingersoll simplified model; ground thermal pump

## 0 引言

地源热泵地下换热器类型及长度的选择需首先确定土壤的热物性参数。目前国内多用查表法来确定土壤的热物性参数,即通过施工现场钻孔取样,根据采集的样品确定岩土类型,然后从岩土热物性参数表中查取对应的参数。但该参数还受密度、温度、湿度等条件的影响,条件不同即使是同种类型的土壤也具有不同的热物性参数,故仅凭经验估计并不能很好的选择土壤的热物性系数。而通过现场热响应测试法可以准确地反映出施工现场的土壤的热物性参数,使地源热泵地下换热器类型及长度的选择更加合理。

## 1 工程概况

大广高速公路双辽服务区内的主建筑包括东区综合楼、西区综合楼、加油站、汽车修理所等,总建筑面积为 11437 m<sup>2</sup>。由于该地区冬季气温低,冬季供暖所需负荷大于夏季制冷所需负荷,且该地平均原

始地温低,热泵夏季制冷的效果好,故本文只对取热工况测试进行分析。

测试钻孔深度为 100 m、孔径 200 mm,该井采用原浆回填,其基本地层条件如下:0~3 m 为粘土;4~50 m 为砂岩;51~58 m 为黑色泥岩;59~63 m 为砂岩;64~71 m 为红色泥岩;72~79 m 为三花岩;80~84 m 为黑色泥岩;85~90 m 为青绿色泥岩;91~100 m 为砂岩。

## 2 地层热物性原位测试的原理

将钻孔中的 U 形管换热器与测试仪管道入口端 A 和出口端 B 相连,形成一个闭合回路(见图 1)。利用水泵驱动管路中的液体循环,以热泵和加热器作为热源或以热泵为冷源对液体加热或制冷,并利用加热器或电动三通分流阀对输入或提取的热量进行控制,保证输入地下或从地下提取的热量恒定。测试仪将采集连续运行数十小时以上的埋管换热器的进出口流体温度、流体流量值、热泵制热或制

收稿日期:2010-10-15

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项经费资助项目(200811066)

作者简介:孟祥瑞(1985-),男(汉族),吉林四平人,吉林大学在读硕士,地质工程专业,从事地热能及其相关领域的研究工作,吉林省长春市吉林大学朝阳校区四舍 546 室, mxr198501@126.com;孙友宏(1965-),男(汉族),江苏人,吉林大学建设工程学院院长、教授、博士生导师,地质工程专业,博士,研究方向为钻探新技术及新能源勘探开发,吉林省长春市西民主大街 6 号。

冷量、电加热器制热量等数据,采用参数估计法结合 MATLAB 软件编制程序可反推地层平均热传导系数和钻孔热阻等土壤的热物性参数。

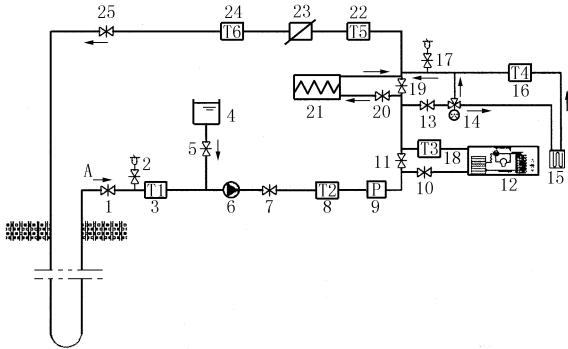


图1 地层热物性原位测试仪原理及流程图

1,5,10,11,13,17,19,20,25—球阀;2,17—排气阀;3,8,16,18,22,24—温度传感器;4—补水水箱;6—水泵;7—单向阀;9—压力传感器;12—热泵;15—冷凝器;21—加热器;23—电磁流量计

### 3 地层热物性原位测试仪

本工程采用吉林大学绿色能源实验室研制的地层热物性原位测试仪进行测试。

#### 3.1 测试仪的技术指标

测试仪主要是由水泵、热泵、电动三通分流阀、冷凝器、加热器、补水水箱、温度传感器、压力传感器、电磁流量计等构成。其主要技术指标如下:

- (1) 温度:采用铂电阻温度传感器,量程为  $-20 \sim 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,输出  $4 \sim 20 \text{ mA}$  电流信号,精度为 A 级;
- (2) 压力:采用压力变送器,量程为  $0 \sim 0.6 \text{ MPa}$ ,输出  $4 \sim 20 \text{ mA}$  电流信号,误差  $\leq \pm 0.2\%$ ;
- (3) 流量:采用电磁流量计,量程为  $0 \sim 3.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,输出  $4 \sim 20 \text{ mA}$  电流信号,误差  $\leq \pm 0.2\%$ 。

#### 3.2 测试仪特点

(1) 该测试仪为车载式的测试设备,可以方便地运达到不同测试现场。

(2) 该测试仪有 3 种工作状态,可以自由切换各状态以适应不同工况:状态 I 为只使用电加热器;状态 II 为热泵与电加热器联合工作;状态 III 为热泵与电动三通调节阀联合工作。

(3) 该测试仪不仅可以进行储热工况下的测试,也可以进行取热工况下的测试。

(4) 该测试仪在使用热泵时,采用电加热器或电动三通调节阀进行辅助调节,保证输入或提取的热量恒定,以便更好的直接利用线源模型或柱源模型来分析计算土壤的热物性参数。

### 4 测试过程

在使用原位测试仪时首先要在选定的测试位置上钻出一个符合设计要求的钻孔,向其中下入热交换器,之后回填,然后将测试仪与热交换器相连,进行测试。

#### 4.1 钻孔施工

在地源热泵换热井的施工过程中需特别注意对钻孔垂直度的控制,在  $100 \text{ m}$  深度内其井斜不应大于  $1^{\circ}$ 。如孔斜过大,可能会导致相邻的两个换热管底部间距过小,从而影响换热效果。

#### 4.2 下管

在下管前,需先对待用的 U 形管进行试压试验,确保 U 形管无泄漏。在下管的过程中为防止 U 形管两管间接触太紧产生换热器的“热短路”现象,可以每隔  $2 \sim 4 \text{ m}$  安装一个隔离器。

#### 4.3 回填

回填方法的选择一般取决于施工的特点、对回填密实度的要求以及回填费用。现有的回填方法主要有注水沉砂法、注浆法及原浆回填法。其中用注浆法回填的井密实度最好,但由于使用了大量的注浆材料,回填费用也较高,一般用于少量的实验井的施工。用原浆回填法回填的井密实度也较好,且不需要回填材料,回填费用较低,一般用于大量的群井施工。

#### 4.4 原位测试

由于钻井时对原始地温产生扰动,故需待地温恢复接近到原始状态时才能开始测试试验,这个期限不应小于  $48 \text{ h}$ 。

##### 4.4.1 原始地温的确定

将温度传感器慢慢地下到充满水的 U 形管中,每隔一定距离测定不同深度的水温,这些温度的平均值就可近似认为是周围土壤的无干扰地温。

##### 4.4.2 储热(取热)测试

钻孔中的 U 形管换热器与测试仪管道入口端和出口端相连,组成一个小型的地源热泵系统。测试时可选择热泵制冷或供暖运行模式连续运行数十小时以上,采集埋管换热器的进出口流体温度、流体流量值、热泵制热或制冷量、电加热器制热量等数据。由于采用电动三通分流调节阀或电加热器,可以保证输入地下或从地下提取的热量恒定,可方便地利用传热学理论中的恒热流传热模型。

##### 4.4.3 数据的处理

采用参数估计法结合恒热流状态的线源模型或柱源模型,应用 MATLAB 软件编制程序计算钻孔周围

岩土体的平均热物性参数。参数估计法计算公式为:

$$f = \sum_i^n (T_{cal,i} - T_{exp,i})^2$$

式中:  $T_{cal,i}$ ——第  $i$  时刻由传热模型计算出的管内流体平均温度;  $T_{exp,i}$ ——第  $i$  时刻实际测量的管内流体平均温度。

将通过传热模型得到的结果与实际测量的结果进行对比,使方差和取得最小值时计算出的热物性参数就是所求的结果。

### 5 测试数据及处理

#### 5.1 原始地温的测定

测试选择测温点的间距为 2 m, 测试点温度随深度变化曲线如图 2 所示。算得该地的原始地温为 9 °C。

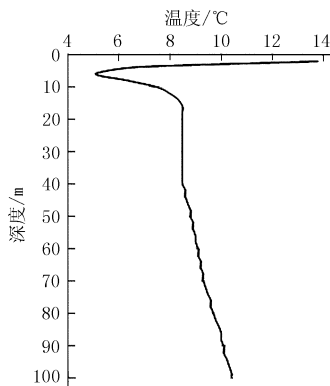


图2 测试点温度随深度变化曲线

#### 5.2 制热测试数据

岩土体热物性测试要求测试时间一般为 36 ~ 48 h, 本次制热试验进行 50 h, 满足要求。本次测试采用热泵作为主要冷源, 电动三通调节阀进行辅助调节, 保证输入或提取的热量恒定。测试从 5 h 后, 温差基本稳定于 -2.5 °C, 输入钻孔的热量基本保持在 2.8 kW 左右。循环流体温度及输入钻孔热量随时间变化如图 3、图 4 所示。

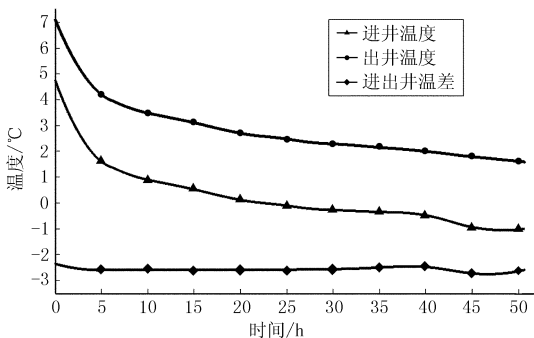


图3 循环流体温度随时间变化曲线

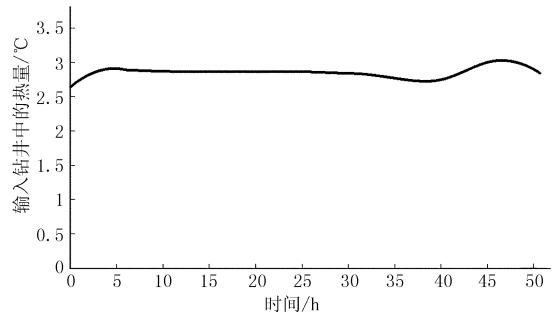


图4 输入钻孔的热量随时间变化曲线

#### 5.3 制热测试数据的处理

测试结束后采用线源模型和柱源模型结合 MATLAB 软件对循环流体的进、出井平均温度进行拟合, 循环流体实际平均温度及拟合平均温度随时间变化如图 5 所示。用线源模型求得的地层平均热传导系数和钻孔热阻分别是: 地层平均热传导系数  $\lambda = 2.093 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{°C})$ , 钻孔热阻  $R = 0.324 (\text{m} \cdot \text{°C})/\text{W}$ 。用柱源模型求得的地层平均热传导系数和钻孔热阻参数分别是: 地层平均热传导系数  $\lambda = 1.676 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{°C})$ , 钻孔热阻  $R = 0.356 (\text{m} \cdot \text{°C})/\text{W}$ 。用线源模型和柱源模型求得的热传导系数相对误差为 19.9%, 钻孔热阻相对误差为 9.9%。造成误差的主要原因是本测试并没有实测土壤的比热容值, 只是根据取出的土样进行估测, 结果可能与实际情况差别很大。而土壤的比热容等参数对柱源模型计算结果的影响又较大, 影响了柱源模型的计算精度。

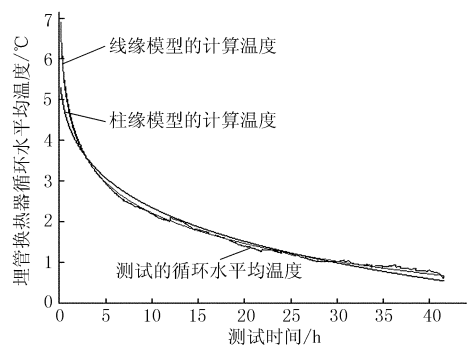


图5 循环流体拟合平均温度随时间变化曲线

### 6 埋管换热器管长的简化计算

由于本工程尚未进行实时负荷模拟, 无法利用地源热泵系统工程技术规范中推荐的算法进行计算。本文仅利用经验估算方法及 Ingersoll 简化模型算法对埋管换热器管长进行估算。

该建筑设计的冬季制热总负荷  $Q_{总}$  为 1444 kW, 所选热泵制热  $cop$  值为 3.5, 故算得埋管换热量  $Q$

为:

$$Q = Q_{\text{总}} \left(1 - \frac{1}{\text{cop}}\right) = 1032 \text{ kW}$$

### 6.1 经验估算法

该方法首先根据建筑物的峰值冷(热)负荷确定埋管换热器的吸(放)热量,然后根据实验确定单位管长或单位埋管深度的吸(放)热量即可求出所需埋管换热器的长度。

$$L = Q/q$$

式中: $L$ ——埋管换热器的总长度,m; $Q$ ——埋管换热器的总换热量,W; $q$ ——单位管长换热量的峰值,W/m。

为测量测试井的峰值换热量的峰值,在50 h取热测试结束后关闭加热器,进行8 h热泵全功率输入试验,50 h后循环流体温度随时间变化见图6。由图6可知进、出井温差最后稳定于 $-2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,又本测试设定流量为 $0.95\text{ m}^3/\text{h}$ ,测试井深100 m,故可计算出 $q$ 为 $30\text{ W/m}$ 。前面已算出埋管换热器的总换热量 $Q$ 为 $1032\text{ kW}$ ,推得埋管换热器总长度为:

$$L = (1032 \times 1000) / 30 = 34400 \text{ m}$$

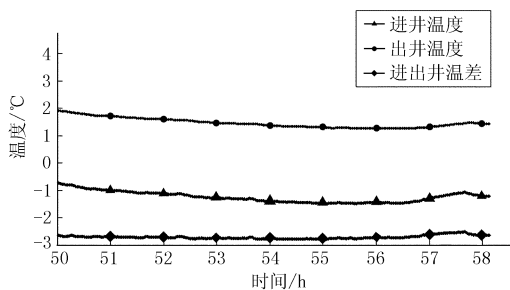


图6 50 h后循环流体温度随时间变化曲线

### 6.2 Ingersoll 简化模型计算法

该方法是基于 Ingersoll 模型的一种计算方法。该模型在 Kelvin 线源模型理论的基础上,假定在起始时,介质有均匀一致的温度,并加入了一无限长的具有恒定热速率的线源。方程的表达式如下:

$$Q = (t_w - t_0)L/R$$

式中: $Q$ ——钻孔吸热量,W; $t_w$ ——管内流体温差的平均值, $t_w = \frac{t_{\text{出井温度}} - t_{\text{进井温度}}}{2}$ , $^{\circ}\text{C}$ ; $t_0$ ——原始地

温, $^{\circ}\text{C}$ ; $L$ ——埋管换热器的总长度,m; $R$ ——钻孔热阻, $(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{W}$ ,这里的热阻值取线源模型与柱源模型拟合值的平均值。

推得:

$$L = \frac{Q \cdot R}{t_w - t_0} = \frac{-1032 \times 1000 \times 0.34}{1.25 - 9} = 45274 \text{ m}$$

### 6.3 钻孔数的确定

为了保证埋管换热器的效果,取两种方法中 $L$ 值较大的 Ingersoll 简化模型算得的 $L$ 值。考虑埋管之间长期运行的相互影响,将设计值 $L$ 乘上一个安全系数 $n$ ,这里 $n$ 取1.1,算得共需长度49801 m。故共需100 m 换热井498口。

## 7 结论

(1)本工程采用地层热物性原位测试仪进行测试。该测试仪在使用热泵时,采用电加热器或电动三通调节阀进行辅助调节,保证输入或提取的热量恒定,以便更好的直接利用线源模型和柱源模型来分析计算土层的热传导系数和钻孔热阻,使地源热泵地下换热器类型及长度的选择更加合理。

(2)本次制热试验进行50 h,满足岩土体热物性测试所要求的时间。测试结束后采用线源模型和柱源模型结合 MATLAB 软件对循环流体的平均温度分别进行拟合,求出钻孔周围岩石的导热系数和热阻。拟合结果的准确性主要取决于土壤的比热容等参数的选取。

(3)利用 Ingersoll 简化模型算得共需498口100 m 换热井才能满足双辽服务区冬季供暖的需要。

## 参考文献:

- [1] ABU - HAMDEH. Thermal Properties of Soils as Affected by Density and Water Content[J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(1): 97 - 102.
- [2] 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]. 吉林长春: 吉林大学, 2009.
- [3] 孙友宏, 王庆华, 陈昌富, 等. 地层热物性原位测试方法及仪器[J]. 中国建设信息供热制冷, 2008, (11): 31 - 33
- [4] 李晓东, 于明志, 李雨桐. 基于地源热泵的便携式岩土热物性测试仪的研制与应用[J]. 电子技术应用, 2004, (5): 28 - 29.
- [5] 李安宁, 孙友宏, 彭新明. 北京地区地热井钻探技术[J]. 探矿工程, 2001, (5): 36 - 37.
- [6] 潘东懿, 汤振清, 吴绍清, 等. 地热井深孔钻进工艺研究[J]. 山东煤炭科技, 2006, (4): 59.
- [7] 陈昌富, 吴晓寒, 王陈栋. 埋管地源热泵系统及存在问题分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(10): 42 - 48.
- [8] 邹瑜, 徐伟, 冯小梅. 国家标准《地源热泵系统工程技术规范》(GB 50366 - 2005)设计要点解析[A]. 中国城市经济学会. 首届中国地源热泵技术城市级应用高层论坛论文集[C]. 北京: 2006. 50 - 61.
- [9] Kavanagh SP, Rafferty K. Ground-source Heat Pump of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings, ASHRAE, 1997.
- [10] 魏紫娟. 土壤源热泵套管式垂直埋地换热器的传热研究[D]. 四川南充: 西南交通大学, 2005.