

文章编号:1007-2993(2019)01-0028-04

# 竖直埋管热响应试验与适宜性评价

童欣 刘媛 阎波

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司,湖北武汉 430010)

**【摘要】** 以武汉某项目为例,分别采用恒热流法(R1孔:3 kW、6 kW)和恒温法(R2孔:进水温度 30 °C、35 °C)对竖直双 U 型埋管试验孔进行热响应试验。在介绍了项目地质情况、试验原理及试验设计的基础上,进行现场试验及结果分析与比较,并结合场地的水文地质条件以及岩土体可钻性,分析了竖直埋管地源热泵系统在本地区的适应性,其结果可为地源热泵优化设计提供参考。

**【关键词】** 热响应试验;恒热流法;恒温法;竖直双 U 型埋管;适宜性

**【中图分类号】** P 314.2

**【文献标识码】** A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2019.01.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Thermal Response Tests and Suitability Assessment of Vertical Buried Pipe

Tong Xin Liu Yuan Yan Bo

(Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd, Wuhan 430010, China)

**【Abstract】** Taking the ground source heat pump engineering project in Wuhan as an example, the thermal response tests were carried out of double U type vertical buried pipe using two methods for analysis and comparison, which were constant heat-flux method and constant temperature method separately. There were two boreholes (R1, R2). R1 was tested by the constant heat-flux method, and the heat fluxes are 6 kW and 3 kW. R2 was tested by the constant temperature method, and the inlet temperature are 30 °C and 35 °C. We discussed and analyzed the result of the tests based on introducing the geological condition of the project, the principle and design of the test. Combined with the hydro-geological conditions and drillability of rock and soil, we analyzed the suitability of vertical buried pipe ground-source heat pump system in this area and the study could provide useful references for the optimum design.

**【Key words】** the thermal response tests; constant heat-flux method; constant temperature method; double U type vertical buried pipe; suitability

### 0 引言

近年来,浅层地热资源开发利用蓬勃发展,这种可再生的清洁能源广泛应用于建筑空调系统。其中,埋管地源热泵系统的应用广受关注,尤其是竖直双 U 型埋管,它具有占地面积小、可用范围广、换热量大、性能稳定等优点,广泛应用于工程实际中<sup>[1]</sup>。埋管换热系统的换热能力对于热泵系统节能效益至关重要,这主要反映在的岩土体热物性参数上,尤其是埋管换热器深度范围内导热系数和

比热容。研究表明,导热系数或导温系数 10 % 的误差将导致 4.5 % ~ 5.0 % 的埋管设计长度误差<sup>[2]</sup>,因此准确获取热物性参数对于勘察评价和工程设计起着决定性作用。常用的岩土体热物性参数确定方法包括:查找地质手册法、采样室内试验法、现场岩土热响应试验法<sup>[3]</sup>。第三种方法充分考虑现场环境,准确性较高,因此成为普遍使用的测量热物性的方法<sup>[4]</sup>。实践表明,恒热流法是一种有效的热响应实验手段,试验台向埋管换热器提供恒定热

作者简介:童欣,女,1990年生,汉族,湖北武汉人,工学硕士,工程师,主要从事岩土工程勘察工作。

E-mail: xintong626@126.com

流,通过温度的变化规律,确定岩土体的各热物性参数。恒温法是近年来我国提出的新方法,它是采用热泵建立稳定的埋管换热器运行工况,从而确定每延米埋管换热器的换热能力的方法。两种方法各有侧重,且针对每种测试方法的研究应用也较为成熟。

为了更真实地获得埋管换热器换热性能,结合武汉某地块地源热泵项目,采用恒热流法与恒温法进行现场热响应试验,获取岩土热物性参数,并对该场地埋管地源热泵系统适宜性进行评价,以期地为地源热泵系统的优化设计提供参考。

### 1 项目概况

该项目位于武汉市某地区,属亚热带大陆性季风气候,具有四季分明、气候温和、雨量充沛的气候特征。项目所处地貌单元为长江冲洪积二级阶地,地势整体上较平坦,根据本次勘察钻探揭露,场区地层自上而下分别为:素填土(0~1.4 m)、粉质黏土(1.4~26.3 m)、粉细砂(26.3~38.0 m)、砾砂(38.0~40.0 m)、细中砂(40.0~58.2 m)、含卵砾石细砂(58.2~77.2 m)以及泥质粉砂岩(77.2~110.9 m)。地下水类型主要为上层滞水及孔隙承压水,上层滞水赋存于填土层中,孔隙承压水赋存于砂、砾石层中,主要接受大气降水和地表水渗透补给,水量与周边排泄条件密切相关。

### 2 试验原理及设计

#### 2.1 试验原理

本项目采用了恒热流法和恒温法两种测试方法:

1)恒热流模拟试验是向埋管换热器提供恒定热流,通过监测埋管换热器的进、出水温度的变化和流量数据,对数据分析处理计算后得到岩土体的平均导热系数。IGSHPA 线源模型是目前普遍采用的主要计算模型,其表达式为:

$$T_i(t) = \frac{q_1}{4\pi\lambda} \cdot \left( \ln\left(\frac{4a\tau}{r^2}\right) - \gamma \right) + q \cdot R_b + T_0 \quad (1)$$

式中:  $T_i(t)$  为进出水平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $q_1$  为单位延米换热量,  $\text{W}/\text{m}$ ;  $\lambda$  为岩土体导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $a$  为注浆料导温系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ , 细砂为  $1.1166 \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $r$  为钻孔半径,  $\text{m}$ ;  $\tau$  为加热时间,  $\text{s}$ ;  $\gamma$  为常数,  $0.5772$ ;  $R_b$  为钻孔内热阻,  $\text{m} \cdot \text{K}/\text{W}$ ;  $T_0$  为地层初始温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

将埋管换热器进出水平均温度与时间的试验数据做成对数拟合曲线图,得到:

$$T_i(t) = k \cdot \ln(t) + m \quad (2)$$

进而根据曲线斜率  $k$ , 求出导热系数  $\lambda$ 。

$$k = \frac{q_1}{4\pi\lambda} \quad (3)$$

根据式(1)、式(3)得到测试孔热阻:

$$R_b = \frac{m - T_0}{q_1} - \frac{1}{4\pi\lambda} \left[ \ln\left(\frac{4a}{r^2}\right) - \gamma \right]$$

2)恒温法是采用热泵维持恒定进水温度,建立稳定的埋管换热器运行工况,根据  $Q = C \cdot m \cdot \Delta T$  的关系式,结合供回水温度温差数据,确定每延米埋管换热器的换热能力<sup>[5]</sup>。

#### 2.2 试验设计

本项目选取双 U 管竖直埋管方式进行试验,设计两个测试孔 R1 和 R2,其中 R1 孔取芯并记录岩层情况,R2 孔不取芯。成孔后,R1 孔随 U 型管埋设温度探头对场地岩土层温度进行监测,共设置温度探头 10 组,埋设间距为 10 m,测试孔及埋管相关参数见表 1、表 2。

表 1 试验孔与埋管相关参数

孔号	R1	R2
钻孔工艺	旋转钻机	旋转钻机
成孔深度/m	110.9	110.5
埋管长度/m	105	105
埋管方式	双 U	
回填料	细砂	
PE 管材	管径/mm	25×2.3
	材质	HDPE100
	保温材料	壁厚 25 mm 的橡塑保温
测温探头	型号	Pt1000

表 2 地温探头监测数据

埋深/m	15	25	35	45	55
温度/ $^{\circ}\text{C}$	17.6	17.9	18.2	18.5	18.7
埋深/m	65	75	85	95	105
温度/ $^{\circ}\text{C}$	18.8	18.9	19.2	19.5	19.6

经测定,岩土初始平均温度为  $18.89 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

### 3 试验结果与数据分析

#### 3.1 岩土体初始平均温度

为避免钻孔施工对岩土初始温度的影响,在钻孔施工、下管回填密实静置 72 h 后进行岩土热响应测试工作。首先对 R1、R2 采用无功循环法测试岩土初始平均温度,在只启动循环水泵的情况下,监测进出口水温的变化<sup>[6]</sup>。进而结合 R1 孔地温探头监测数据综合分析,得到本地层岩土体平均初始温度为  $18.63 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,如表 3 所示。

表 3 岩土初始平均温度  $^{\circ}\text{C}$

测温探头	R1	R2	平均值
18.69	18.60	18.60	18.63

### 3.2 恒热流法

对R1孔进行恒热流法试验,加热功率设定为3 kW与6 kW,每个稳定工况的测试时间为48 h,设定流量为 $1.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 。采用IGSHPA线源模型,将地埋管换热器进出水平均温度与时间的试验数据做成对数拟合曲线图。如图1、图2所示,恒热流法中的供回水平均温度随时间呈缓慢增加的趋势,通过对数拟合曲线得到斜率系数 $k$ ,反推出岩土体导热系数 $\lambda$ :当恒定热流为3 kW时, $\lambda=2.017 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ , $R_b=0.158 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$ ;当恒定热流为6 kW时, $\lambda=3.766 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ , $R_b=0.183 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$ ;加热量由3 kW增至6 kW,岩土体导热系数随之变大。

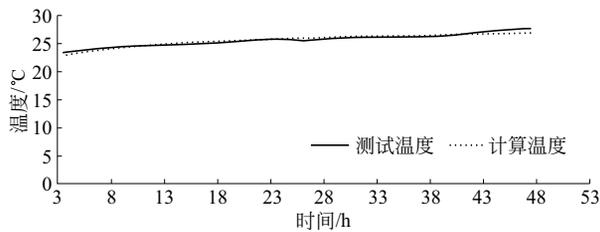


图1 3 kW 恒定热流测试结果与计算结果对比图

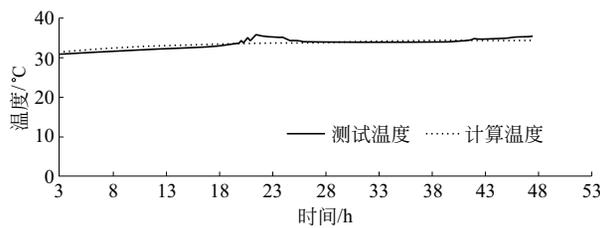


图2 6 kW 恒定热流测试结果与计算结果对比图

综合以上计算结果,该场地地层平均导热系数为 $2.89 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,综合热阻为 $0.171 (\text{m}\cdot\text{K})/\text{W}$ 。

### 3.3 恒温法

R2孔采用恒温法进行夏季运行工况测试,进水温度设置为 $30^\circ\text{C}$ 、 $35^\circ\text{C}$ ,每个稳定温度的测试时间为48 h,设定流量为 $1.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

图3、图4给出了在不同工况下进出水温度变化的情况。从中可以看出,在测试开始运行至729 min后,地埋管换热器出水温度达到稳定工况,且随着时间的增加,进出口温度、流量基本为持平的状态,故729 min后为有效数据。在此时间段内,地埋管测试孔的进水温度均值 $30^\circ\text{C}$ ,出水温度均值 $25.5^\circ\text{C}$ ,进出水温差 $4.5^\circ\text{C}$ ,流量平均值 $1.3 \text{ m}^3/\text{h}$ ,通过计算可得出每延米地埋管测试孔换热量为 $61.47 \text{ W}/\text{m}$ 。同理,进水温度 $35^\circ\text{C}$ 时,出水温度均值 $29.9^\circ\text{C}$ ,出水温度均值 $5.1^\circ\text{C}$ ,每延米地埋管测试孔换热量为

$69.67 \text{ W}/\text{m}$ 。(见表4)随着进水温度的升高,单位孔深的换热量增大,其主要原因是在夏季工况下,地埋管进水温度与岩土体初始温度温差增大,导致流体与岩土体换热加快,换热效果增强。

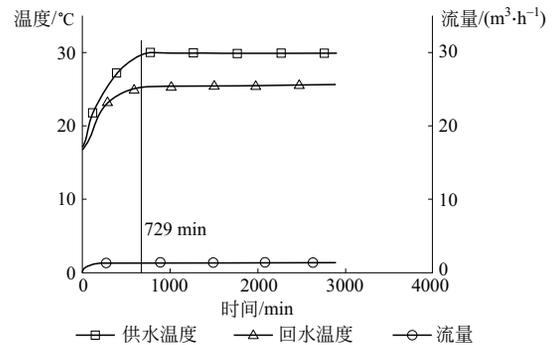


图3  $30^\circ\text{C}$  工况进出水温度曲线

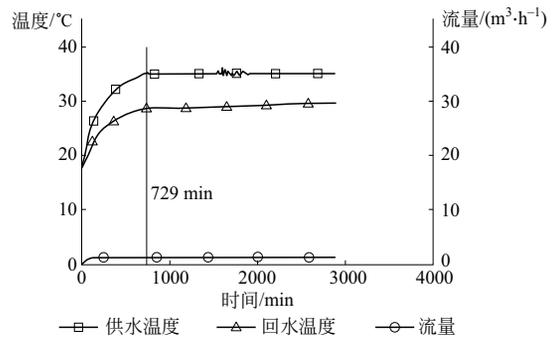


图4  $35^\circ\text{C}$  工况进出水温度曲线

### 3.4 对比分析

恒热流法与恒温法的热响应试验的结果见表3,R1孔夏季工况平均温度为 $32.5^\circ\text{C}$ (供回水温度 $35\sim 30^\circ\text{C}$ )时释热能力为 $62.8 \text{ W}/\text{m}$ ,介于R2孔 $30\sim 35^\circ\text{C}$ 工况之间,两种测试方法获得的地下换热量基本一致。两者在数据分析上各有侧重,恒热流法是国际上运用最为广泛的试验方法,有较为成熟的数据处理模型,根据温度场,直接获取岩土体的平均导热系数。恒温法可直接确定每延米地埋管换热器的换热能力,其计算模型简单,能更真实的反应地埋管的换热性能<sup>[7]</sup>。二者各有优势,在实际工程应用中,建议采用两种方法综合分析。

## 4 适宜性评价

对于地埋管地源热泵的适宜性分区主要考虑岩土体热物性、水文地质条件以及岩土体可钻性。

### 4.1 岩土体热物性

1) 热响应试验孔105 m以下浅地层平均初始温度为 $18.63^\circ\text{C}$ ,与武汉地区年均气温相近,可作为场地岩土体初始平均温度的参考。

表4 R1孔和R2孔测试结果一览表

试验工况	初始温度	导热系数	热阻	流量	
3 kW	18.6 °C	2.017 W/(m·K)	0.158 (m·K)/W	1.3 m <sup>3</sup> /h	
6 kW	18.6 °C	3.766 W/(m·K)	0.183 (m·K)/W	1.3 m <sup>3</sup> /h	
试验工况	初始温度	进水温度	出水温度	流量	换热量
30 °C 排热	18.6 °C	30.0 °C	25.5 °C	1.3 m <sup>3</sup> /h	61.47 W/m
35 °C 排热	18.6 °C	35.0 °C	29.9 °C	1.3 m <sup>3</sup> /h	69.67 W/m

2) 由恒热流法得出: 地层平均热传导系数为: 2.89 W/(m·K), 综合热阻为 0.171 (m·K)/W。本工程地点测试埋管散热能力, 取热能力均较好, 适宜采用埋管地源热泵系统作为空调系统的冷热源。

#### 4.2 水文地质条件

场地上覆地层以第四系黏性土及粉细砂(局

部含砾)为主, 第四系厚度达 77.2 m, 局部含卵砾石细砂土, 卵石层总厚度 < 5 m。本场地含有丰富的地下水, 孔隙承压水赋存于砂、砾石层中, 含水层厚度为 50.9 m, 短时间内的换热效果也较好。根据竖直埋管地源热泵系统适宜性分区主要指标<sup>[8]</sup>(见表 5), 该场地为竖直埋管地源热泵系统较适宜性区。

表5 竖直埋管地源热泵系统适宜性分级

适宜性等级	分级指标(地表以下 200 m 范围内)			综合评判标准
	第四系厚度/m	卵石层总厚度/m	含水层总厚度/m	
适宜	>100	<5	>30	3 项指标均应满足
较适宜	<30 或 50~100	5~10	10~30	
不适宜	30~50	>10	<10	至少 2 项指标满足

#### 4.3 岩土体可钻性

场地上覆第四系土层厚度大, 卵石层较薄, 下伏基岩为泥质粉砂岩, 岩土体可钻性较好, 后期施工建议采用旋转钻引孔、潜孔钻成孔的综合施工工艺。

整体而言, 本工程场地为埋管较适宜地区。

#### 5 结语

针对武汉某地区地源热泵项目, 分别采用恒热流法和恒温法对竖直双 U 型埋管试验孔进行现场热响应试验, 获取了该场地的岩土热物性参数。结合场地的水文地质条件以及岩土体可钻性, 得出该场地为竖直埋管地源热泵系统较适宜区, 可为该区合理应用地源热泵技术提供参考。

#### 参 考 文 献

- [1] 王瑞华, 张亚庭, 王 普. 土壤源热泵中土壤导热系数测定系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(2): 171-172.
- [2] Kavanaugh S P. Field tests for ground thermal properties-methods and impact on ground-south heat

pumps[J]. ASHRAE Transactions, 1998, 104(2): 347-355.

- [3] 任耿祥, 裴成玉, 杨鸿钧. 岩土热响应试验在埋管地源热泵系统设计中的应用[J]. 港工技术, 2014, 51(3): 72-75.
- [4] 孟庆龙, 官燕玲. 土壤源热泵热响应测试研究进展及分析[J]. 西安建筑科技大学学报, 2015(1): 125-135.
- [5] 张 磊, 刘玉旺, 王 京. 两种埋管换热器热响应实验方法的比较[J]. 制冷与空调, 2011, 5(3): 277-280.
- [6] 黄旺来, 余跃进, 夏学鹰, 等. 苏州某地源热泵项目竖直埋管岩土热响应试验与分析[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2016, 16(4): 41-45.
- [7] 王继林. 基于恒温法与恒热流法的土壤热响应测试研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [8] 徐 伟, 邹 瑜, 徐宏庆, 等. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范技术指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 468-474.

收稿日期: 2018-05-02