

# 基于点热源模型测试地下岩层热物性参数方法研究

山东建筑大学热能工程学院 孙宇飞\*

**摘 要** 研究表明,综合地热属性参数值设计的埋地管长度大于利用各岩层热性质参数设计的埋管长度。当地下土壤的导热系数或热扩散率发生 10% 的偏差时,地下埋管设计长度偏差为 4.5%~5.8%。点热源模型试验方法可用于测试各岩层的热力学性质,得到各岩层的参数值,为地埋管道系统设计的合理性提供依据和保证。

**关键词** 岩土热物性参数;导热系数;热扩散率;点热源模型测试法;岩土热物性测试

## Research on Method of Testing Thermal Property Parameters of Underground Rock Stratum Based on Point Heat Source Model

Sun Yufei

**Abstract** The research shows that the length of the buried pipe designed by the integrated geothermal attribute parameter value is larger than the length of the buried pipe designed by using the thermal property parameters of each rock layer. When the thermal conductivity or thermal diffusivity of the local soil is 10% deviation, the design deviation of the underground buried pipe is 4.5% to 5.8%. The point heat source model test method can be used to test the thermodynamic properties of each rock layer, obtain the parameter values of each rock layer, and provide basis and guarantee for the rationality of the design of the buried pipeline system.

**Keywords** Geothermal property parameter; Thermal conductivity; Thermal diffusivity; Point heat source model test method; Geothermal property test

### 0 引言

地源热泵作为一项具有对环境影响小、寿命长、无污染等优势的工程已有 100 多年的历史。1912 年,“地源热泵”在瑞士专利文献中被首次提出<sup>[1]</sup>,并于 40 年代首先在欧洲被大面积应用。从那时起,它在 20 世纪 70 年代的能源危机中得到了进一步发展和推广。自 20 世纪 80 年代以来,北美等国家开始研究和冷热泵和热泵<sup>[2]</sup>。在我国,地源热泵于近年才得到较快发展,但由于传热模型不完善、造价高等原因推广尚较为困难。目前,垂直 U 型埋管是主要的利用方式。

测试表明,在地层深度大于 10 m 处的温度不随环境温度的变化而变化<sup>[3]</sup>,因此,从浅层地表取热的地源热泵具有热源理想的优势。更为重要的是,地源热泵效能高于传统的电锅炉、燃料锅炉以及空调系统,无论从一次能利用率、节能效率等方面都具有巨大优势<sup>[4-5]</sup>。地源热泵的换热能力与岩土导热系数有着直接关系,而据 Kavanaugh 的研究显示,在地下

土壤的导热率或热扩散率发生 10% 的偏差时,地下埋管设计长度偏差为 4.5%~5.8%<sup>[6]</sup>。从而影响工程初投资。因此,热物理参数测试结果的准确性和速度尤为重要。

### 1 点热源模型

点热源测试法的基础是在无限大介质中存在一点形式的发热热源<sup>[13]</sup>,该模型如图 1 所示,热物性参数是根据点周围热源周围的温度变化计算出来的。

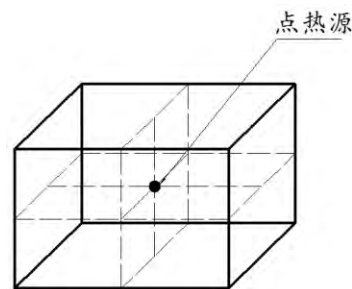


图 1 点热源物理模型

假设点源热源被各向同性介质包围,并且在该岩层中,点热源处于无限介质中,点热源散发出一定热量后,距离点热源  $r$  处的温度变化公式为<sup>[14]</sup>:

\* 孙宇飞,男,1993 年 7 月生,硕士研究生  
250101 山东省济南市临港开发区凤鸣路山东建筑大学新校区  
18340027139  
E-mail: 350423895@qq.com  
收稿日期: 2019-06-05

$$\theta = \frac{q}{\rho c_p (4\pi a \tau)^{3/2}} e^{-\frac{r^2}{4a\tau}} \tag{1}$$

式中： $\theta$  为距离点热源  $r$  处温度较初始温度上升值（℃）， $q$  为点热源瞬时发出的热量（W）， $a = k \cdot (\rho c_p)^{-1}$  为热扩散率（ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ）， $k$  为岩层导热系数值（ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ）， $\rho c_p$  为容积热容（ $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ）， $\tau$  为点热源瞬时发热后任一时刻（s）。对式（1）中时刻  $\tau$  在 0 到  $t$  时间内进行积分，可得到持续点热源散热  $t$  s 后距离点热源  $r$  处温度较初始温度上升值（℃）：

$$T(r,t) = \int_0^t \theta dt = \frac{Q}{4\pi \cdot r \cdot k} \cdot \text{erfc}\left(\frac{r}{2\sqrt{kt/(\rho c_p)}}\right) \tag{2}$$

式中： $Q$  为点热源的持续发热强度（ $\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$ ）。

2 测试方法

模拟点热源的发热装置可以通过镍铬合金线缠绕成小球形，并且镍铬合金在高温下具有高强度。不易变形，比未氧化的铁铬合金更耐腐蚀<sup>[15]</sup>；测温装置可采用热电偶。为了确保温度测量的准确性，在球形点热源装置的外侧周围安装了多个温度测量热电偶。根据待测岩石的深度钻孔，以满足点热源在各向同性介质中散热的假设。孔直径尽可能小，从而可以接近安装热电偶的点热源装置。将点热源装置和温度测量热电偶放置在孔的底端，并将热源加热装置的两根引线连接到直流电源。温度测量热电偶通向温度记录仪，可记录一定时间间隔的温度值。为了进一步确保测试条件接近假设，确保测试的准确性，正确回填钻孔，并使用钻井过程中提取的土壤回填土壤。

点热源装置由直流电源供电，点热源装置产生连续稳定的热流，热量传导到周围。温度测量热电偶连续测试记录仪记录点的温度，并定期记录温度数据。一般测试时间持续约 50 h，并且当热属性参数值达到稳定值时终止测试。具体测试示意图见图 2。

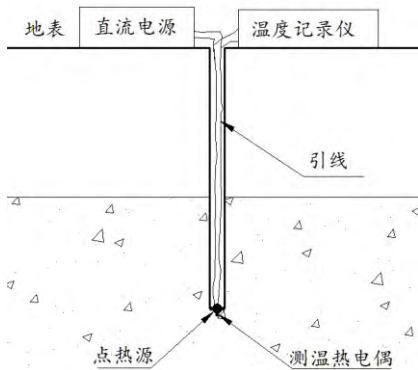


图 2 点热源测试示意图

3 计算方法

考虑到（2）式存在余误差函数，不利于进行线性变换，所以运用参数估计法<sup>[16]</sup>对地下岩土导热系数  $k$ 、容积比热  $\rho c_p$  进行计算。

根据实验和设备数据，确定热源点的连续加热功率  $Q$ ，因为温度测量热电偶安装在球形点热源的外面，将球形点热源的直径的一半作为  $r$  值，并且将多个热电偶温度测量值的平均值用作计算数据。通过使用参数估计方法，通过连续调节土工的导热率  $k$  和体积的比热，由数学模型计算的温度上升值与实际测量值之间的误差达到最小值。然后将相应的热性质参数值视为待测量的地热属性参数，参数估计法中目标函数<sup>[17]</sup>通常采用式（1）：

$$f = \sum_{i=1}^n (T_{cal,i} - T_{exp,i})^2 \tag{3}$$

式中： $T_{cal,i}$  为第  $i$  时刻由传热模型计算得到的地埋管内循环水平均温度，℃； $T_{exp,i}$  为第  $i$  时刻热响应实验测得的循环水平均温度，℃， $N$  为数据测量组数。

4 模拟验证

使用计算机编程，可以快速获得满足上述参数估计方法目标函数的热属性参数值，以确保找到全局范围内目标函数的最小值。穷举搜索方法<sup>[18]</sup>用于在热属性参数值的可能范围内找到目标函数值。文章采用模拟验证的方法，预先设定模拟点热源装置发热量  $Q$ 、距离  $r$ 、岩土导热系数  $k$ 、岩土容积比热  $\rho_s c_s$ ，并用以计算循环水温度值作为模拟的测量结果，然后基于穷举搜索法反推岩土热物性参数，通过设定值与运算值的对比得到计算结果的可靠性。文章设定两组模拟值，如表 1 所示，通过模拟 72h 条件下的测试数据，得到结果列于表 2。

表 1 设定参数

参数	$Q/[\text{W}]$	$r/[\text{m}]$	$k/[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	$\rho_s c_s \times 10^{-6}/[\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})]$
第一组	80	0.01	2.8	3.2
第二组	60	0.01	2.3	2.8

在实际测试中会存在测试误差，所以进一步将上述模拟测试结果添加幅度为 0.5℃ 的随机温度扰动，并将计算结果列于表 3。

通过表 2 中模拟验证的结果可以分析得到，基于点热源测试岩层热物性参数的方法可以准确找到设

表 2 程序运算得到的计算结果

设定参数组别	计算项目	$k/[W/(m \cdot K)]$	$\rho_s c_s \times 10^{-6}/[J/(m^3 \cdot K)]$	目标函数最小值 $f_{min}/[K^2]$
第一组	计算参数值	2.8	3.2	0.016
	相对误差 (%)	0	0	
第二组	计算参数值	2.3	2.8	0.012
	相对误差 (%)	0	0	

表 3 程序运算得到的计算结果 (添加温度扰动)

设定参数组别	计算项目	$k/[W/(m \cdot K)]$	$\rho_s c_s \times 10^{-6}/[J/(m^3 \cdot K)]$	目标函数最小值 $f_{min}/[K^2]$
第一组	计算参数值	2.8	3.2	33.35
	相对误差 (%)	0	0	
第二组	计算参数值	2.3	2.8	37.31
	相对误差 (%)	0	0	

定参数数值,且目标函数最小值较小,表 3 的计算结果可以分析得到,添加测温误差导致的温度扰动后,目标函数最小值增大,但依旧可以准确找到参数设定值,可靠性较高。但点热源运用于实际测试中的数据计算结果尚需进一步研究验证。

## 5 结论

在现代工程施工中,获取岩层的热物性参数值具有重要意义,而传统的几种测试方法虽然简单易行,但是,环境和测试设备等因素很多,导致结果可信度降低。以现场热响应试验方法为对照,基于线热源模型和柱热源模型的热响应试验方法只能得到地下岩土的综合热性能参数值。埋管设计长度增加,设计合理性差。减少地源热泵系统的初始投资。因此,点热源模型测试岩层热物性参数可以适用于未来的城市供热系统管道铺设、地源热泵系统设计应用、地铁和隧道施工建设等工程中。

点热源测试方案是基于点热源模型制作的,主要设备有模拟点热源发热的装置、测温装置、数据采集装置等,仪器设备简单,可操作性强。利用测温装置测试得到的温度值,通过软件编程计算即可得到较为准确的参数值,编程简单,结果可靠性较高。另外,点热源测试热物性方法的实施对于开拓研究采用其他热物性测试方法、建立其他热物性测试模型具有积极推动意义。

## 参考文献

- [1] 于晓菲.岩土热物性测试方法和软件开发[D].济南:山东建筑大学,2012

- [2] 杨文兵,丁云飞,官玲俊.热探针法测定含湿土壤的导热系数[J].制冷空调与电力机械,2010,31(3)
- [3] Austin. Development of an in situ system for measuring ground thermal properties[D]. Oklahoma State University, 1995
- [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,2004,30(5)
- [5] Ingersoll L R, Plass H J. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump[J]. ASHVE transactions, 1948, 47(7)
- [6] 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,2003,18(2)
- [7] Carslaw H S, Jaeger J C, Feshbach H. Conduction of heat in solids[J]. Physics Today, 1962, 15
- [8] 战国会,俞亚南.地源热泵有限长圆柱面和圆柱体热源模型[J].浙江大学学报:工学版,2011,45(6)
- [9] 余伟之,胡平放,雷飞,等.三维数值模型及其在地源热泵岩土热物性计算中的应用[J].制冷与空调,2013,13(9)
- [10] 杨卫波,施明恒.地源热泵中 U 型埋管传热过程的数值模拟[J].东南大学学报:自然科学版,2007,37(1)
- [11] 管昌生,万兆,胡平放.地源热泵地埋管多层岩土温度场的数值分析[J].武汉工程大学学报,2011,33(4)
- [12] Kavanaugh S P. Field tests for ground thermal properties-methods and impact on ground-source heat pump design [J]. ASHRAE Transactions, 2000, 106: 851
- [13] 李萍,张薇.MATLAB 在求解温度场中的应用[J].工业炉,2005,27(3)
- [14] 王欣,赵美英,万小鹏.利用热源温度场迭加法诊断持续点热源的强度及位置[J].宇航学报,2006,27(1)
- [15] P.艾克霍夫著,潘科炎、张永光等译:系统辨识——状态与系统参数估计[M].北京:科学出版社,1980
- [16] 贾文抖,范春利,孙丰瑞,等.基于红外测温的内部点热源的识别[J].红外与激光工程,2015,44(3)
- [17] Engle J A, Legault K R, Rosati J D. Sediment Budget Formulation Via Exhaustive Search Method[J]. Coastal Engineering Proceedings, 2012, 1(33): 121