

doi: 10.11720/wtyht.2018.1505
郭文建.岩土热物性测试线热源计算误差分析[J].物探与化探,2018,42(4):851-856.http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1505
Guo W J.The error analysis of ground thermal properties based on linear heat source model[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2018,42(4):851-856.http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1505

岩土热物性测试线热源计算误差分析

郭 文 建

(山东省第五地质矿产勘查院,山东 泰安 271000)

摘 要:在垂直地埋管现场热物性测试中,计算岩土体综合热物性参数时一般采用线热源的简化解析式,求解综合热导率和钻孔热阻。这种方法在各种测试条件下会产生不同程度的误差。通过传热数值计算方法,研究了循环介质流量、加载功率、两次测试的间隔时间、测试设备性能、测试孔深度、回填材料热导率、岩土体中水渗流情况、地温梯度对综合热导率和钻孔热阻误差的影响。以传热数值计算结果为基础,提出了降低线热源计算误差的方法;根据测试条件选择相对合理的测试参数;对系统误差采用模型经验修正法予以消除,或改用完善的数值计算方法求解。

关键词:热物性测试;线热源;测试条件;误差分析

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2018)04-0851-06

0 前言

浅层地热资源具有分布广、资源储量大、可综合利用、稳定可靠等优点,从而成为市场潜力大、发展前景广、日益受到人们重视的较清洁的能源利用方式^[1-2]。地源热泵垂直地埋管方式占用地表面积相对较小,地下水水质不受污染,在我国应用较广泛。在浅层地热资源评价与工程应用中,垂直地埋管场地的岩土热物性参数的测试求取是一个关键环节,其参数的计算精度也影响着评价指标与工程设计。

设计中需要确定地下岩土体的热物性参数主要有岩土综合热导率与钻孔热阻。现场热物性测试是公认最为有效的方法,分为恒定热流测试与恒定供水温度测试两种方式。《地源热泵工程技术规范》^[3]推荐使用恒定热流测试方式。使用恒定热流测试方法求取岩土体综合参数时,常用线热源或柱热源模型计算^[4]。其中线热源方法计算简便,当测试时间较长时,与柱热源方法精度接近,工程使用较多。于明志^[5]、胡平放^[6]、吴晓寒^[7]等对线热源的

数据处理方程进行了介绍,由于现场测试条件不同,受各种因素影响,使用线热源会对测试数据的处理结果产生较大的误差。周亚素^[8]分析了影响测试结果的因素指出,测试工程的功率必须与实际使用达到一致,并保持较长的测试时间,才能保证测试结果准确。丁勇^[9]提出在恒定热流测试时,由于加载功率人为确定,由此带来了数据处理结果的误差变化。刘春雷^[10]在某一个实验场地进行不同仪器的重复试验,6台仪器测试时使用的参数也不相同,最后得到的地层热导率在 2.0~2.8 W/(m·℃)范围内。盛建军^[11]、韩斯东^[12]研究了在不同深度上进行分层测试的方法。曾召田^[13]、王华军^[14]、李蕾^[15]分析了地下水渗流情况下地下埋管的换热差别与测试数据误差。关鹏^[16]研究了不同岩土体初始温度的测试方法的比较。笔者在以往研究的基础上,对测试时的流体流量、加载功率、测试孔深度、回填材料热导率、地下水渗流、地温梯度、测试仪器性能等要素进行分析,通过传热数值计算,分解出各要素对测试结果的影响,并给出各种测试条件下应注意改善的参数情况。

1 计算模型参数

因影响因素较多,笔者只从理论数值方面逐个进行分析。为了显示某项参数改变造成的影响,将该参数扩展为一定范围内的一系列数据,而将其他各项参数置于一般的典型状态,通过三维数值传热模型进行模拟运行,模拟时间取 48~96 h,得到不同时间的进水、回水温度变化数值,再利用常规的线热源简化方法求解岩土热导率,就可以清楚地反映出不同参数变化时所求岩土热导率的偏差情况。计算结果符合非稳态导热计算收敛状态,具有明确的参照性^[17]。表 1 列出了使用的参数变化情况。

表 1 数值计算模型参数

项目	单位	典型数值	扩展	工程常用
钻孔直径	m	0.15		0.14~0.2
钻孔深度	m	100	20~200	50~120
管道外径	mm	32		25~32
管道内径	mm	26		20~26
管道形式		单 U		单 U\双 U
管间距	m	0.06		0.04~0.1
恒温层深度	m	5		5~20
地温梯度	℃/100m	4	2\4	2~6
地层综合热导率	W/(m·℃)	2		1~3
地层体积热容	MJ/(m ³ ·℃)	2		1.5~3
回填材料热导率	W/(m·℃)	2	1\2.8	1~3
回填材料体积热容	MJ/(m ³ ·℃)	2		1.5~3
管内流量	m ³ /h	1	0.5~2	0.5~2
恒加载功率(夏)	kW	3.5	1.75~7	2~7
恒加载功率(冬)	kW	-3.5	-1.75~-7	-2~-6

2 影响因素分析

2.1 流量

一般的岩土热物性测试装置均提供可变流量的控制方式。在不同测试中,操作者常将循环介质(水)的流量设置为与工程设计目标相近,这对于普通深度的测试孔影响较小,对于较深的测试孔,较小的流量设定会给最后的处理结果带来较大的误差。

如图 1 所示,地温梯度取 4℃/100 m,在吸热、放热功率均为 3.5 kW 时采用 3 种流量,0.5 m³/h、1.0 m³/h、2.0 m³/h。可见在设定岩土体综合热导率为 2.0 W/(m·℃) 的情况下,当测试孔为 100 m 以下时,3 种不同流量下通过常规线热源方式得到的岩土热导率数值在 1.99~2.01 W/(m·℃) 之间,其偏离误差较小,特别是在流量增大时误差变得更小。测试孔深度加大时,求得的岩土热导率误差就会逐渐加大,采用 0.5 m³/h 流量,至 200 m 时岩土热导率

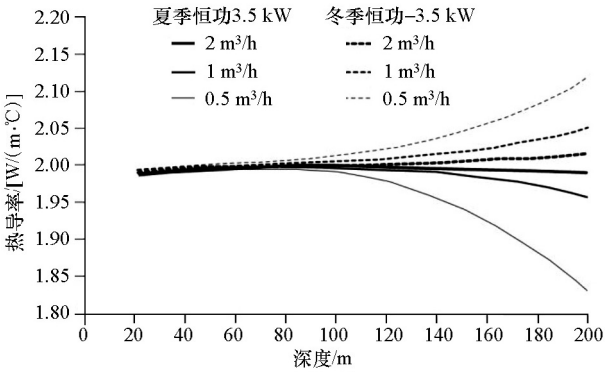


图 1 3 种流量在不同深度时的热导率

在 1.84~2.15 W/(m·℃) 之间;采用 2.0 m³/h 流量,其在 200 m 时的误差也会明显减小。这说明,深度较浅时,不必关注流量对测试精度的影响,当深度较大时,应相应提高介质流量进行测试,以降低误差数值。

在恒温带以下,由于地下岩土体温度一般是由上至下正向增加,所以当测试功率正负不同时,进回水的平均温度也产生了相反的变化,使得所求的地层岩土体热导率产生了相反的误差偏离。

在 3 种流量下,不同深度对求解钻孔热阻也有同样的影响。如图 2 所示,随流量不同,在深度加大时钻孔热阻数值逐渐加大,在流量小时钻孔热阻相对更大些。与图 1 不同,图 2 的钻孔热阻曲线与标准值(0.122℃·m/W) 的偏差在 100 m 左右时仍然较大,而热导率的数值曲线则在 150 m 以后才有较大的变化。

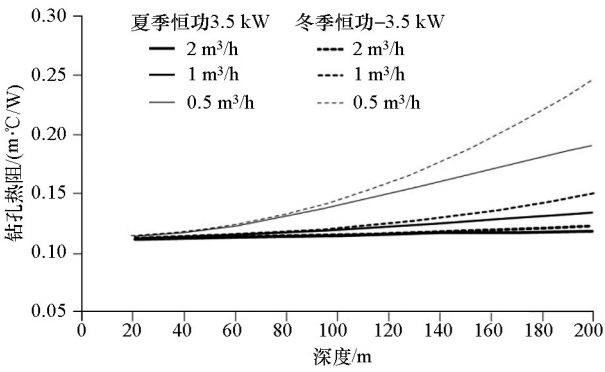


图 2 3 种流量在不同深度时的钻孔热阻

2.2 加载功率

按照线热源简化求解公式的原理分析^[5-7],测试加载功率的大小对测试结果是没有影响的。在经过三维数值模型计算后发现,不同的加载功率也会给求解的岩土热导率带来较大的偏差。使用冬季与夏季各 3 种功率输入模型,计算不同深度测试孔的热导率误差影响,结果见图 3。

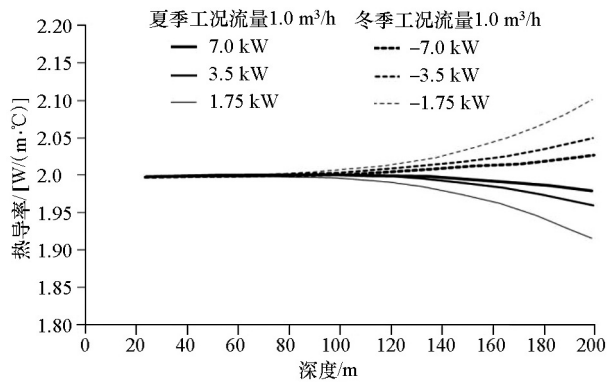


图3 6种加载功率在不同深度时的热导率

为了便于对比,图3与图1采用相同的纵向与横向比例,其中1.0 m³/h流量的3.5 kW与-3.5 kW的2条曲线是相同的。由图3可见,不同加载功率下,随深度增加,所求岩土综合热导率的误差随之增大,其增加幅度呈非线性状态,热导率误差值小于流量变化引起的误差值。

通过对流量、功率变化引起的数据处理结果偏差情况分析可知,在一般深度下测试时,应参照测试孔的换热功率经验值与设计机组的设计进出口温差来计算相应流量,而后采取合理的加载功率与介质流量参数对测试设备进行设定。当测试孔深度变化较大时,应使用平均延米换热功率的估计值与深度的乘积来得到测试加载功率,从而将测试误差控制在较小的范围内。

2.3 测试仪器水箱容量

由于恒定热流与恒定供水温度两种测试方法在目前均有较多的应用^[9],部分测试设备为了在恒温测试模式下得到较好的温度调节效果与稳定性,将加热或制冷输出的水箱予以加大,提高了热容量,减少了温度变化与波动。但增大水箱容量后,在环境温度与地下岩土体的平均温度偏差较大时,会给测试结果也带来一定的偏差,结果见图4。

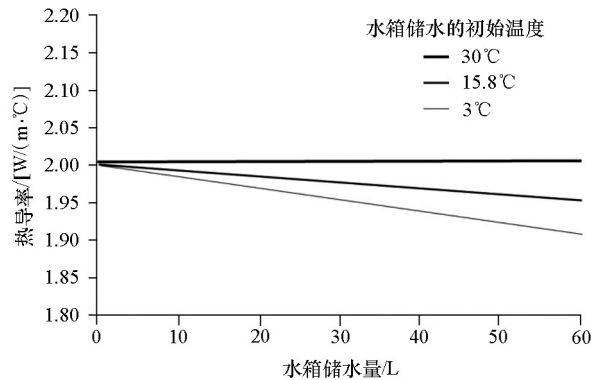


图4 3种储水温度在不同储水量时的热导率

图4中各曲线分别表示测试初期水箱内的3种水体温度(假设水体温度受气温影响较大,而受当时的无功循环影响较小),加载功率3.5 kW。可见,当测试初始阶段的水体温度与测试末期的进回水平均温度偏离越大,且水体容量越高时,测试结果偏差越大;当加载功率为-3.5 kW时,水体温度较低时,测试结果偏差最小。无论放热或吸热的加载工况测试,并非测试初始阶段的水体温度与岩土体平均温度接近时误差最小。

如果水体容量较大时,在测试的初始阶段,设定恒定的加载能量主要用来改变水箱内的水体温度,改变了进回水平均温度在测试期间上升或下降的趋势,对其采样时间取对数拟合后,相应斜率值产生一定的变化,所以求取的岩土体热导率也发生了变化。由此可见,在进行恒定热流测试时,应尽可能不选择使用水箱容量较大的设备,或设法使水箱内水体温度与测试末期的进回水平均温度保持接近一致。

2.4 重复测试的地温恢复时间

在以往研究中,对测试的过程时间、数据计算时舍去的初始时间作了分析^[4,6-8,10,18]。在对某一测试孔进行第一次测试后,停止一段时间后再进行另一次测试,停止的时间间隔对求解结果是有较大影响的。一般测试初期使用空载循环测量岩土体的平均温度,观测其在一定时间内的变化幅度,来判断地下岩土体是否温度恢复均衡。这种方法受温度测量仪表精度的影响较大。通过模型计算一次普通的吸热或放热测试后,而后模拟一段停止加载的温度恢复数据,再进行加载模拟,利用简化线热源求取第二次加载测试的岩土热导率。不同的停顿时间后的数据处理偏差情况见图5。

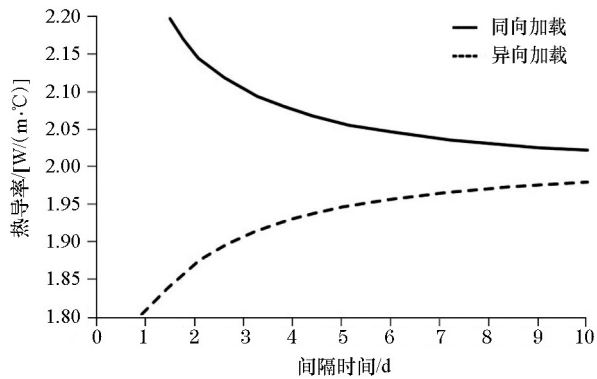


图5 重复试验方式在不同间隔时间的热导率

在进行吸热测试后停止,再次进行吸热测试,称之为同向加载试验,反之,在进行吸热测试后再进行放热测试,称之为异向加载试验。可见,在同向加载的第二次试验数据处理时,岩土热导率数值偏大,在

停顿时间较短时,原有设置的岩土热导率为 $2.0\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,经简化的线热源处理后得到的岩土热导率为 $2.2\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 以上;当进行异向加载测试后,得到的热导率数值偏小。在刘春雷^[10]的研究试验中,对一个测试孔连续 6 次进行热物性测试,每次间隔约为 3 d,地层温度恢复不够,易造成较大的误差。如期望第二次测试达到较高的精度,则停顿间隔时间应适当延长,一般停顿约 7~8 d 后,第二次测试的数据处理误差才可达到 2% 以下。

2.5 钻孔回填材料

《地源热泵工程技术规范》^[3]对钻孔热阻作了解析说明,其大小主要由回填材料热导率和换热管道形式决定。利用简化线热源求解钻孔热阻时,所得结果一般与文献解析方法相近,完全可满足工程需要。但是当钻孔内的回填材料自身的热导率与周围岩土体热导率的相差较大时,对求解得到的岩土体综合热导率数值会有影响。在图 6 中,设定周围岩土体平均热导率为 $2.0\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,当回填材料热导率为 $2.0\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 时,所得岩土体热导率数值也为 $2.0\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$;当回填材料热导率在 $1.2\sim 2.8\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 范围内变化时,所得岩土体热导率

数值在 $1.87\sim 2.03\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 之间。

简化线热源方法是将钻孔热阻与周边岩土体的热阻分隔开,并将钻孔内的传热视为稳态,而实际上在一般的短期测试中,钻孔内部在短时间内是处于非稳态传热的。在预估钻孔回填材料与周围岩土体热导率差别较大,特别是小于周围岩土体热导率时,应适当延长测试时间,才能提高测试精度。

2.6 分层测试

分层测试方法为在换热管内部间隔一定距离放置分布式光纤进行测温,在测试过程中,可以任意截取不同深度某一段相邻的两个测温点的数据,进行分层计算岩土体的热导率与钻孔热阻^[11~12]。该方法可以分辨不同深度地层热物性的差别,但是如果使用原有的线热源简化方法对不同深度各段进行数据处理时,则会带来较大的误差。如图 7,设定测试孔深度为 100 m,40~50 m 处岩土热导率为 $3.0\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,其余深度处均为 $2.0\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,总的输入功率为恒定值。通过三维数值模型,分段计算不同深度位置处的平均加载功率。计算结果(图 7)说明:随测试时间变化,不同深度各层的换热功率并非为恒定数值,并且地温梯度大时各层的换热功率差别更大。由于这种分层的功率变化,得到的各层热物性参数就出现较大的误差,其误差产生机理与加载停顿后重新加载一致。

在上述参数条件下,将 40~50 m 处岩土热导率回归置为 $2.0\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,利用简化线热源求取的不同深度岩土热导率。图 8 中 10 条曲线分别为一定深度测试孔均分 10 层后的各层的热导率取值,可见,随测试孔深度加大与地温梯度增大,这种误差也明显加大。所以,进行分层测试后进行数据求解时,必须使用较完善的计算程序或方法,或在一定范围内对求解结果进行修正补偿。

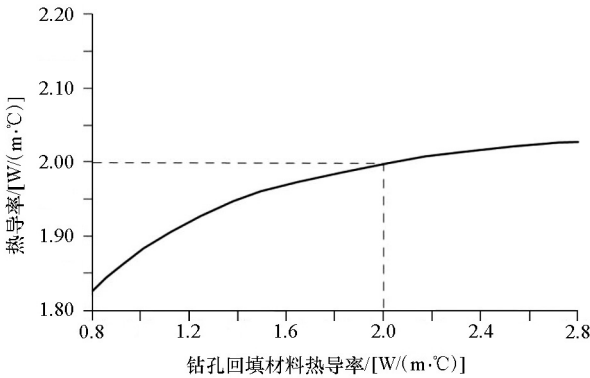


图 6 不同钻孔回填材料时的热导率

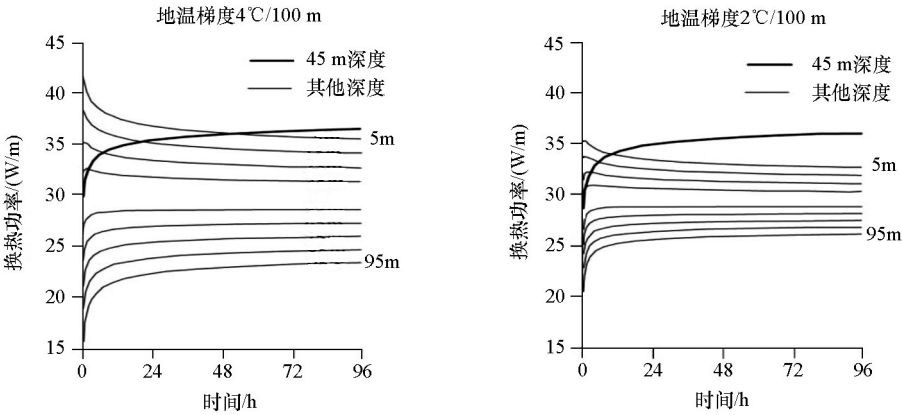


图 7 2 种地温梯度下各层的功率变化

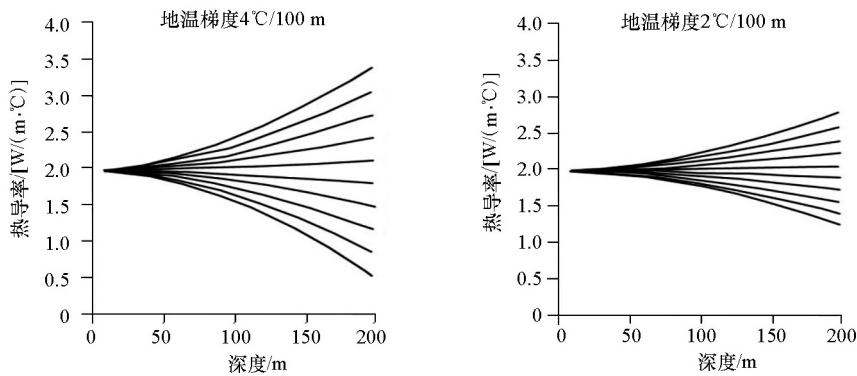


图 8 2 种地温梯度下不同深度测试孔的分层热导率

2.7 地下水渗流

线热源理论是以固体的热量传导为基础的,在实际工程中,均存在地下水的水平径流,随水力坡度和岩土体的渗透系数不同,渗流速度有较大差别。取水力坡度 1% 的环境下,当岩土体渗透系数由 0~0.0002 m/s 时,使用线热源简化方法求取岩土热导率。(一般中砂的渗透系数在 0.00001~0.0001 m/s 之间)

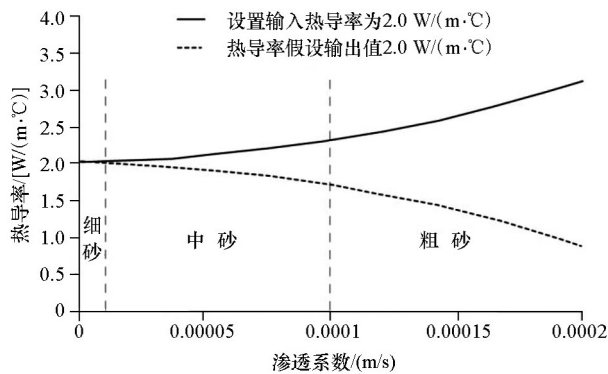


图 9 不同渗透系数时的热导率

图9中的实曲线表示当岩土体热导率设置为 2.0 W/(m·℃) 时,在不同渗透系数下利用线热源方法求解得到的岩土综合热导率数值结果。可见,在渗透系数较小时,求解数值仍接近 2.0 W/(m·℃),当渗透系数为 0.0002 m/s 时,所求解的热导率数值已大于 3.1 W/(m·℃)。

图 9 中虚曲线表示在不同渗透系数情况下,使用简化方法得到的岩土体综合热导率的数值仍然为 2.0 W/(m·℃),此时由于渗流对其有所影响,依靠数值模型计算了在排除渗流影响时岩土体原有的热导率数值。可见,当渗流存在时,原有较低的岩土热导率数值也会在测试结果中有大幅提高的现象。

地下水渗流速度受季节或其他因素改变时,其整个地源换热器的性能可能会受到不同的影响。即使地下水渗流长期稳定存在,其短时间的测试结果

也与长时间得地下换热器工程应用有较大的区别。按照同样的渗流模式进行长期模拟计算后发现,长时间内(如数月后)存在地下水渗流的换热器进回水平均温度变化小于无渗流状态,说明渗流状态下依据简化法求得岩土热综合参数后,可以适当减少埋管量,同样可以满足换热需求。

文献中对线热源处理时对舍去初始时间有不同的建议^[4-5,10,18],一般舍去 4~10 h。在对模拟数据进行不同舍弃初时间后发现:不存在渗流时,舍弃时间大小对最后处理结果影响极小,存在渗流时,不同的舍弃时间对结果影响较大。由此,通过延长测试时间并在数据处理时进行不同舍弃时间试算,或分为不同时间段处理,求解热导率后判别差别大小,可以鉴别是否存在较大的渗流影响。

3 主要结论

在一般的测试条件下,按照线热源简化方法求取的岩土体综合热导率与钻孔热阻误差较小,基本可满足工程设计需要。当测试条件与测试参数不能匹配时,按照线热源方法得到的岩土热物性参数误差变大。如较小的流量设定、加载功率偏小、水箱容量偏大、同一测试孔的第二次测试的时间间隔较小、钻孔回填材料的热导率与周围岩土体热导率的相差较大、不合理的分层测试方法、地下水渗流等因素均会给最终的求解结果带来较大的误差。

测试初期,根据测试条件选择相对合理的测试参数,可以将求解结果的误差控制在较低的范围内。当测试孔深度较大、地温梯度较大时,应相应加大测试加载功率与介质流量,选择使用水箱容量较小的测试仪器;在重复测试时,应延长停止时间,使地温恢复尽量达到均衡。对于回填材料热导率变化、分层测试、地下水渗流的影响,应注意鉴别,可视之为系统误差,采用模型经验修正法予以消除,或改用精

度更高的计算方法求解岩土热物性参数。

本文只给出了介质流量变化对求解地层热导率、钻孔热阻这两个参数的影响。因篇幅限制,对其他测试参数的变化对钻孔热阻的影响未能完全描述,但计算表明,测试参数的变化对求取钻孔热阻均有不同程度的影响。

参考文献:

[1] 郝雅玲,师谦友.西安市低碳旅游发展现状及策略研究[J].河南科学,2015,33(6):1025-1031.

[2] 刘丹丹,王大娟,陈思思.河南省城市生态系统健康状况评价[J].河南科学,2017,35(9):1518-1522.

[3] 中华人民共和国建设部.GB 50366-2009 地源热泵工程技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.

[4] 王泮浩,颜亮,冯琛琛,等.地源热泵岩土热响应测试影响因素分析[J].制冷技术,2012,32(2):1-6.

[5] 于明志,彭晓峰,方肇洪,等.基于线热源模型的地下岩土热物性测试方法[J].太阳能学报,2006,27(3):279-283.

[6] 胡平放,雷飞,孙启明,等.岩土热物性测试影响因素的研究[J].暖通空调,2009,39(3):123-127.

[7] 吴晓寒,王陈栋.地源热泵系统岩土热响应试验中的一些问题分析[A]//地温资源与地源热泵技术应用论文集(第四集)[C].北京:地质出版社,2011:194-199.

[8] 周亚素,雷鸣.现场测定土壤导热系数的影响因素分析[J].东

华大学学报:自然科学版,2009,35(4):472-477.

[9] 丁勇,黄听,贾宇.两种岩土热响应测试方法对比[A]//地温资源与地源热泵技术应用论文集(第四集)[C].北京:地质出版社,2011:160-165.

[10] 刘春雷,王贵玲,王婉丽,等.基于现场热响应测试方法的地下岩土热物性分析[J].吉林大学学报:地球科学版,2014,44(5):1602-1607.

[11] 盛建军,刘金祥,戴霖姗,等.基于热响应测试的分层土壤埋管换热器数值模拟研究[J].建筑节能,2012,42(281):45-48.

[12] 韩斯东,金光,毕文明,等.某地源热泵场地浅层土壤分层热物性响应实验[J].水文地质工程地质,2015,42(4):144-149.

[13] 曾召田,吕海波,赵艳林,等.地下水渗流对竖埋管换热器传热影响的数值模拟[J].太阳能学报,2015,36(12):3007-3014.

[14] 王华军,齐承英,杜红普,等.地下水渗流条件下埋地换热器传热性能的实验研究[J].太阳能学报,2010,31(12):1609-1613.

[15] 李蕾,丁海瑞,刘金祥,等.地下水渗流作用下埋管换热器动态设计研究[J].科学技术与工程,2016,16(18):248-254.

[16] 关鹏,段新胜.地源热泵岩土体初始温度确定方法的实例分析[J].科学技术与工程,2013,13(34):10250-10253.

[17] 陈海宏.一维非稳态导热问题收敛性傅里叶分析[J].河南科学,2016,34(2):187-194.

[18] 官燕玲,孟庆龙,江超,等.埋管地源热泵岩土热响应试验相关技术全尺寸三维数值分析[J].暖通空调,2012,42(11):138-142.

The error analysis of ground thermal properties based on linear heat source model

GUO Wen-Jian

(No. 5 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Tai'an 271000, China)

Abstract: In the in-situ test of ground thermal properties for vertical tubes, simplified analysis method is frequently applied to calculating the thermophysical parameters of rock and soil mass. Integrated thermal conductivity and borehole thermal resistance are worked out then. This method may result in different levels of error under variable test conditions. In this paper, based on the heat transfer numerical method, the authors studied the main factors that influence the thermal conductivity and the borehole thermal resistance accuracy, such as circulation medium flow rate, loading power, interval between two tests, performance of test equipment, depth of test holes, thermal conductivity of backfill material, seepage in rock and soil mass, and geothermal gradient. Based on the calculation results of heat transfer, the authors put forward methods for reducing the calculation error of linear heat source: Selecting relatively reasonable test parameters according to the test conditions, eliminating the system error by the model experience correction method or using improved numerical models.

Key words: ground thermal properties; linear heat source model; test condition; error analysis

(本文编辑:沈效群)