DOI: 10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2023.05.009

预钻孔热探头测试设备的研制与测试

刘益平1,陈华治2,张 勇1

(1.中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司,江苏南京 211102;2.中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司,北京 100120)

摘要:近年来,浅层地热资源开发利用取得较大发展,浅层岩土体热物性参数的快速准确获取是高效利用浅层 地热能的重要前提。为完善浅层地热能勘察原位测试设备,基于旁压仪和地埋管换热器工作原理,研制开发 预钻孔热探头测试设备,该设备包括热传导探头、压力控制系统、温度控制系统、一体化转换控制装置和同 轴导压管连接管路。建立热传导探头三维传热数值仿真分析模型,基于温度消散原理,提出预钻孔热探头的 岩土体导热系数测试方法。分别开展干燥和饱和状态下标准砂的预钻孔热探头室内模型试验和导热测试仪对 比试验,预钻孔热探头的测试结果为0.495 W/(m·℃)和0.833 W/(m·℃),导热测试仪测试结果为0.458 W/(m·℃) 和0.807 W/(m·℃),两种方法测试相对误差分别为8.1%和3.2%,验证预钻孔热探头测试设备和温度消散原 理测试岩土体导热系数的可靠性。该原位测试设备不但可以用于地热勘察中地层的导热系数测试,也可用于 岩体地下工程中围岩的导热系数测试,具有广阔应用前景。 关键词:浅层地热能;预钻孔热探头;原位测试;导热系数

中图分类号: P642 文献标志码: A 文章编号: 1671-9913(2023)05-44-08

Development and Test of Pre-drilling Thermal Probe in-site Test Equipment

LIU Yiping¹, CHEN Huazhi², ZHANG Yong¹

(1. China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing 211102, China;
 2. North China Power Engineering Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China)

Abstract: In recent years, the development and utilization of shallow geothermal resources have made great progress. The rapid and accurate acquisition of thermal physical parameters of rock and soil is an important prerequisite for the efficient utilization of shallow geothermal energy. In order to improve the in-situ testing equipment for shallow geothermal energy exploration, based on the working principle of pressuremeter and ground heat exchanger, a pre-drilling thermal probe insite test equipment is developed. The test equipment includes thermal probe, pressure control system, temperature control system, integrated conversion control device and coaxial pressure pipe connecting pipeline. A three-dimensional heat transfer numerical simulation model of thermal probe is established. Based on the principle of temperature dissipation, a test method for the thermal conductivity of rock and soil with pre-drilling thermal probe is proposed. The thermal conductivity of dry sand and saturated sand measured by the pre-drilling thermal probe is 0.495 W/m \cdot °C and 0.833 W/m \cdot °C , respectively, and that of dry sand and saturated sand measured by thermal conductivity tester is 0.458 W/m \cdot °C and 0.807 W/m \cdot °C , respectively. The relative errors of the two methods are 8.1% and 3.2%, respectively, the reliability of the pre-drilled thermal probe test equipment can be used not only for thermal conductivity test of strata in geothermal energy exploration, but also for thermal conductivity test of surrounding rock in underground rock engineering, and has a broad application prospect. **Keywords:** shallow geothermal energy; pre-drilling thermal probe; in-situ test; thermal conductivity

^{*} 收稿日期: 2023-02-16

第一作者简介:刘益平(1982一),男,硕士,高级工程师,主要从事岩土勘察与设计、浅层地热开发与利用等工作。

基金项目: 浅层地热测试评估与应用关键技术研究,中国能源建设集团规划设计有限公司科研项目(GSKJ2-G01-2021)。

0 引言

浅层地热能被普遍认为是一种清洁环保、 节能经济的可再生能源,具有储量丰富、分布 广泛、稳定可靠等特点^[1-2]。浅层地热能主要 依靠地源热泵技术,用于建筑冬季供暖和夏季 制冷^[3-5]。据调查,我国浅层地热能资源储量 相当于 7×10¹² kg标准煤,可用于 3.2×10¹¹ m² 建筑供暖和制冷^[6]。然而,浅层地热资源禀赋 存在较大的区域差异,其开发利用仍存在较大 空间。

浅层岩土体热物性参数的快速准确获取是 高效利用浅层地热能的重要前提。目前岩土体 导热系数测试的方法主要分为室内试验和现场 原位测试。室内试验方法包含热线法^[7]、热带法^[8] 和热平板法^[9],其原理是测量时样品的温度随 时间发生变化, 通过测量温度变化来推导导热 系数:现场原位测试方法包含 TCT 热探头试验、 热探针试验和岩土热响应试验。TCT (热锥耗 散试验)热探头由装有热电偶的锥穿透计组成, 试验时将 TCT 热探头推入地面, 土的摩擦产生 热量增加锥的温度,停止锥入后土体温度衰减 为时间的函数,分析温度衰减的数据可算出土 体导热系数^[10]。热探针试验的原理是向岩土体 内插入加热探针,监测岩土体温度随时间的变 化,从而推导岩土体的热物性参数^[11]。岩土热 响应试验是利用加热设备向垂直地埋管换热器 中输入热量或冷量,监测热交换器中传热循环 介质的入口、出口温度和流速,利用传热模型 反演岩土的热物性参数^[12]。

室内试验具有快捷方便、测试成本低等优 点,但室内试验试样制备破坏了岩土体的原有 结构和状态,所得的热物性参数无法如实反映 岩土体的传热特性,其测试精度有限;热探针 测试能准确反映土层条件对其热物性的影响, 但其测试深度有限,并且无法应用于坚硬岩土 体的热物性测试;岩土热响应试验可以准确反 映施工现场的地质条件,能够得到较准确的土 壤平均热传导系数和钻孔热阻等,但热响应试 验无法获得指定深度处岩土体的热物性参数, 只能获得综合热物性参数,并且测试效率较低。

在岩土工程勘察旁压仪的基础上,开发热 传导探头、温控系统、压力系统、换热和压力 一体化转化装置等,研制出预钻孔热探头地热 勘察测试设备。建立热传导探头三维传热数值 仿真分析模型,基于温度消散原理,提出预钻 孔热探头的岩土体导热系数测试方法。分别开 展干燥和饱和状态下标准砂的预钻孔热探头室 内模型试验和导热测试仪对比试验,验证预钻 孔热探头测试岩土体导热系数的可靠性。

1 预钻孔热探头测试设备研发

预钻孔热探头测试设备及其工作原理图如 图1所示。该设备包括热传导探头、一体化转 换控制装置、压力系统和控温系统,热传导探 头通过同轴导压管与一体化转换控制装置连接, 压力系统和控温系统分别通过压力管与一体化 转换控制装置连接。



(a) 预钻孔热探头测试设备

(b)预钻孔热探头测试设备工作原理图

注: 1-循环水泵; 2-分流回水管; 3-抽水管; 4-循环进水管; 5-加压管; 6-循环回水管; 7-恒温水箱; 8-循环水箱; 9-热传导探头; 10-热探头回水 管; 11-热探头进水管; 12-温度传感器; 13-导线; 14-数据采集器; 15-同轴导压管; 16-一体化转换控制装置; 17-气源管; 18-高压气瓶。

图1 预钻孔热探头测试设备及其工作原理

热探头的加压膨胀特性借鉴了旁压仪探头的工作原理^[13],在现有旁压仪的基础上进行改造。由于空气导热系数仅 0.002 59 W/(m・℃), 是很好的保温隔热材料,在 PM-b 型旁压仪探 头基础上,在其空腔内壁增加了一个腔内填充 空气的保温腔结构,同时循环液体进水管包含 在此保温腔结构内。改造后的探头内可注入循 环传热介质,通过压力控制系统,传热介质可 循环流动。并且,由于保温腔的保温作用,预 钻孔热探头测试设备在测试时可保证温度不受 中空腔内环境温度的影响,从而提高测试过程 的稳定性和测试结果的准确性。

热传导探头整体呈圆柱形状,高度为 500 mm,外径为88 mm。热传导探头由内向外 依次为中空腔、内侧不锈钢层、热探头回水管、 保温填充物、外侧不锈钢层、热探头进水管、 特制弹性膜。热传导探头及其结构示意和传热 原理图如图2所示。



(a) 热传导探头及其结构示意图

(b) 热探头传热原理图

注: 1-热探头回水管; 2-热探头进水管; 3-管靴; 4-压紧螺母; 5-端护套; 6-螺母; 7-内压环; 8-外压环; 9-特制弹性膜; 10-外侧不锈钢 层; 11-保温空气层; 12-内侧不锈钢层; 13-中空腔。

图2 热传导探头及其结构示意和传热原理图

一体化转换控制装置集成为一体化控制箱, 包含目测管、精密压力表、阀门和接口。一体化 转换控制装置通过连接在接口处的管道分别与循 环水泵、热探头、循环水箱和高压气源连接。热 探头传热包括探头周围岩土体的热传导、探头内 循环流体对流传热和空腔内的气体对流传热。

测试前需预先钻孔,钻孔孔径宜为110 mm。 测试时,恒温热水(温度不宜低于60℃)经循 环管路流过热传导探头,弹性膜在水压作用下 径向膨胀,从而使热传导探头与坚硬岩土体紧 密接触并加热周围岩土体。加热1000 s,达到 相应温度后,管路热水停止循环,进入温度消 散阶段。数据采集仪记录加热及消散全过程的 温度变化,然后通过对温度变化数据进行后处 理得到岩土体导热系数。

2 数值模拟法求解导热系数

2.1 数值仿真模型

为简化数值模型,采用了如下基本假设条

件:①土体的热物性参数恒定;②不考虑地下 水流动的影响;③空腔内的空气热对流为层流。

采用数值模拟软件 COMSOL Multiphysics 建立热传导探头和周围岩土体的传热三维数值 模型。模型采用固体和流体传热模块,在该模 块中分别设置固体和流体,进行流体流动和传 热的耦合计算。

数值模型整体尺寸为600 mm×600 mm ×600 mm,外侧为周围岩土体,内侧为热探头。 岩土体外围边界为等温边界,温度设为20℃。 热传导探头近似多层圆柱体,由外向内依次为 橡皮膜、循环液体、保温空气层和中空腔。循 环液体初始温度与周围环境一致为20℃。热探 头进出水管连接循环液体主体,是循环液体流 入流出的通路。热探头进水管流速为0.5 m/s, 流入液体温度60℃,通过流入液体为热传导探 头提供热量。中空轴内为泥浆材料,模拟在现 场测试时的实际情况。 由于热传导探头的尺寸较小,为避免部分边 界由于尺寸过小翻转,同时为提高模拟计算精度, 数值模型的网格划分选用细化。通过网格划分, 该数值模型共有 199 190 个四面体网格单元。所 述热探头及其周围土体数值模型如图 3 所示。



(d) 整体模型俯视图

注: 1-进水口导管; 2-出水口导管; 3-橡皮膜; 4-循环液体; 5-保 温空气层; 6-测试时中空腔内的泥浆。

图3 热探头及其周围土体数值模型

2.2 模型参数

模拟计算用到的材料热物性参数见表1所 列。其中,橡皮膜的热物性参数由生产厂家提 供,水及空气的热物性参数为20℃时软件内置 参数,泥浆的参数为取样测定值。

表1 材料热物性参数

材料	导热系数 /W/(m・℃)	密度 /(kg/m ³)	热容 /J/(kg・℃)
橡皮膜	0.20	1 200	1 700
岩土体	0.50~2.60	2 000	800
水	0.65	1 000	4 200
空气	0.002 59	1.205	1 005
泥浆	1.00	1 500	1 500

2.3 模拟计算导热系数

2.3.1 模拟计算

模拟1000s时热传导探头和周围岩土体的温度分布如图4所示。可以看出,循环液体在循环流动过程中不断向周围岩土体传递热量,使周围岩土体温度上升。流动加热1000s后,因热探头循环加热而温度上升的土体受影响范围在100mm左右。

2.3.2 温度消散原理

由于土壤中热量消散和水分迁移问题受到 同一类型的方程控制^[14-15],受孔隙水压力消散 试验 (PWP)^[16] 的启发,可以模仿水力消散曲线 求解热消散过程中土壤的热物性参数^[10],利用 温度消散原理求解岩土体的导热系数。本文借 鉴 GHASSAN^[10] 提出的原位测试 (Thermal Cone Dissipation Test, TCT) 求解土体热物性参数的 理论方法,推导出适用于预钻孔热探头测试设 备的岩土导热系数求解方法如式 (1) 所示。

$$\lambda \approx \frac{1}{(A \times t_c)^B} \tag{1}$$

式中: λ 为导热系数, W/(m·℃); t_c 为温度消 散量占温度完全消散量 T_{total} 的比例为 C% 时对 应的时间, s; C 为常数; A、B 为待确定拟合 参数。





t可由温度衰减双曲线方程求出:

$$T_0 - T = \frac{t}{d + et} \tag{2}$$

或

$$F(T, t) = \frac{t}{T_0 - T} = d + et$$
(3)

$$T_0 - T_f = \frac{1}{e} \tag{4}$$

式中: *F* 为温度和时间的函数; *T*₀ 为消散初始 温度, ℃,即温度曲线上的最高温度,*T*₀ 可以 从温度曲线中直接取得; *T* 为消散开始 *t* 时间后 的温度, ℃; *T*_f 为消散最终温度, ℃; *d* 和 *e* 为 常数,由线性拟合获得。

将岩土体温度消散过程中温度随时间变化的数据代入式(3)中,得到*F*(*T*,*t*)与时间的关系曲线,将该曲线进行直线拟合可得到拟合直线的截距和斜率,分别对应参数*d*和*e*。

联立式(2)和(4)可得:

$$C\% \times \frac{1}{e} = \frac{t}{d+et}$$
 (5)
 $\# + C\% = \frac{T_0 - T}{T_c - T_c}$ (6)

由式(5)可求出岩土体温度消散过程中温 度消散量占温度完全消散量 *T*_{total} 的比例为10%、 20%、30%、40%和50%所对应的时间 *t*₁₀、*t*₂₀、 *t*₃₀、*t*₄₀和*t*₅₀,将求解的*t*_c表达式汇总见表2所列。

将参数 d 和 e 代入表 2 中可直接求出 t_c 值。 使用数值模拟方法,设定不同岩土体的导 热系数,进行温度消散模拟。利用式 (2) ~式 (6) 依次求出不同导热系数 λ 对应的 t_c,依次取 t_c 为 t_{10} 、 t_{20} 、 t_{30} 、 t_{40} 和 t_{50} 。将多个 λ - t_c 的数据点 连接可绘制出 λ - t_c 关系曲线,利用式(8)拟合 该曲线,即可得到参数A和B,从而求出基于 温度消散原理的导热系数求解经验公式。

在实际应用中,只需测试温度消散至 C%时对应的时间 t_c,即可通过代入经验公式或查表的方式得出所测岩土体导热系数。

表2 t_{10} 、 t_{20} 、 t_{30} 、 t_{40} 和 t_{50} 计算表达式

t_C	<i>t</i> ₁₀	t ₂₀	t ₃₀	t_{40}	t ₅₀
表达式	$\frac{d}{9e}$	$\frac{d}{4e}$	$\frac{3d}{7e}$	$\frac{2d}{3e}$	$\frac{d}{e}$

2.3.3 经验公式拟合

利用 2.1 节中建立的传热数值模型模拟热 探头周围岩土体被加热和温度消散过程。数 值模拟分为 2 个过程:①循环液体循环流动 并与周围岩土体传热,在接触界面设置温度探 针,以探针温度表征周围岩土体温度,当加热 1 000 s 后停止循环加热;②周围岩土体温度消 散过程。

设定周围岩土体导热系数分别为 0.5、0.8、 1.1、1.4、1.7、2.0、2.3 和 2.6 W/(m・℃), 依 次进行数值模拟计算。将所得温度一时间关系 数据经式 (3) 拟合处理,即可得到拟合直线的 截距 d 和斜率 e, 再将 d 和 e 代入表 3 中即可 得出已消散温度占温度完全消散量 T_{total} 的比例 为 10%、20%、30%、40% 和 50% 所 对 应 的 时间 t_{10} 、 t_{20} 、 t_{30} 、 t_{40} 和 t_{50} ,将结果汇总见表 3 所列。

设定导热系数 λ/W/(m・℃)	$t_{10}/{\rm s}$	$t_{20} / { m s}$	<i>t</i> ₃₀ /s	<i>t</i> ₄₀ /s	$t_{50}/{\rm s}$
0.5	653.9	1 471.2	2 522.1	3 923.2	5 884.8
0.8	429.5	966.4	1 656.8	2 577.2	3 865.8
1.1	330.2	742.9	1 273.6	1 981.2	2 971.7
1.4	269.7	606.9	1 040.4	1 618.3	2 427.5
1.7	229.0	515.3	883.3	1 374.0	2 061.0
2.0	187.4	421.7	722.9	1 124.5	1 686.7
2.3	169.7	381.8	654.5	1 018.2	1 527.2
2.6	144.5	325.0	557.2	866.7	1 300.1

表3 不同导热系数岩土体温度消散对应tc值

将表 3 中导热系数 λ 为纵坐标, t_c 为横坐标进行绘图,得到含 8 个 λ - t_c 数据点的点图,将点图用式 (1) 代入拟合,即可得出式中的参数 A 和 B,从而可得出 t_{10} 、 t_{20} 、 t_{30} 、 t_{40} 和 t_{50} 所对应的经验公式,不同消散时间下的拟合曲线如图 5 所示。



(b) 温度消散20%



2.3.4 经验公式验证与选用

对同一导热系数的岩土体,采用不同消散 时间对应的经验公式来反算其导热系数,验证 经验公式的可靠性,验证结果见表4所列。

使用温度消散 10%、20%、30%、40% 和 50% 的数据进行拟合,可得到不同的经验公 式,见表 5所列。而对同一属性的岩土体而言, 使用这些不同经验公式进行反算都能得到几乎 一致的导热系数,即选用不同消散时间对应的 经验公式对导热系数计算没有影响。综合考虑 测试时长和数据稳定性,统一应用 t₂₀进行求解。

设定 导热 系数	t ₁₀ 经验 公式 反算	t ₂₀ 经验 公式 反算	t ₃₀ 经验 公式 反算	t ₄₀ 经验 公式 反算	t ₅₀ 经验 公式 反算
0.5	0.552	0.547	0.550	0.549	0.550
0.8	0.856	0.849	0.852	0.852	0.852
1.1	1.126	1.116	1.121	1.121	1.121
1.4	1.390	1.378	1.384	1.384	1.384
1.7	1.649	1.635	1.641	1.641	1.642
2.0	2.032	2.015	2.023	2.023	2.024
2.3	2.254	2.235	2.244	2.244	2.244
2.6	2.665	2.644	2.654	2.654	2.655

表4 不同消散时间下的导热系数

表5 不同tc对应的经验公式拟合

温度消散C% 所需时间t _c /s	t_{10}	t_{20}	<i>t</i> ₃₀	t_{40}	<i>t</i> ₅₀
对应经验公式	$\lambda = \frac{477}{t_{10}^{1.043}}$	$\lambda = \frac{1102}{t_{20}^{1.043}}$	$\lambda = \frac{1941}{t_{30}^{1.043}}$	$\lambda = \frac{3\ 077}{t_{40}^{1.043}}$	$\lambda = \frac{4\ 698}{t_{50}^{1.043}}$

3 室内模型试验验证

为验证研发的预钻孔热探头测试设备的 适用性,开展室内模型试验测试标准砂的导热 系数。

3.1 模型试验方案

模型试验原理图如图 6 所示。将预钻孔热 探头测试设备放入试验箱中部圆筒,再将 ISO 标准砂放入试验箱内框,最后在试验箱外框填 充恒温循环水。恒温水浴 1 内的循环液体加热 至 60 ℃。恒温水浴 2 设定温度为 20 ℃。室内 试验将分别测试 ISO 标准砂在干砂状态和饱和 砂状态 2 种工况下的导热系数。数据采集间隔 为 2 s。



图6 室内试验原理图

3.2 室内试验装置和材料

设计制作一个外尺寸为100 cm×100 cm× 60 cm 室内测试用的试验箱。试验箱整体呈方形 箱体结构,采用 1.5 mm 厚的 304 不锈钢板材制 成;由内向外依次为圆筒、内框和外框。圆筒 内径为110 mm,高度60 cm,用于放置热传导 探头并约束热传导探头弹性膜在径向方向的过 度膨胀;内框尺寸为60 cm×60 cm、圆 筒位于内框的正中间,内框中填充被测试的岩 土材料;外框尺寸为试验箱外尺寸,外框内充 满液体,并通过两个开孔与循环恒温水箱连接, 使得外框内为循环恒温液体,保证进行综合导 热系数测试时外界温度变化不会影响试验结果。

使用某公司生产的中国 ISO 标准砂作为导热 系数测试的试验材料。粒径为 0.08 ~ 2.00 mm, 密度为 1 390 kg/m³。

3.3 室内试验结果对比

进行导热系数测试室内对比试验,使用测试仪器为 Hotdisk 2500S 导热测试仪。测试样

品为2袋各300g的松散状态下的ISO标准砂。 2袋样品分为1号和2号,对1号样品测试其在 干砂状态下的导热系数,对2号样品测试其在 饱和状态下的导热系数,2组测试工况均在室温 条件下进行。测试标准为ISO22007-2标准。

由预钻孔热探头测试的干砂及饱和砂导热 系数测试过程中测点的温度随时间变化的情况 如图 7 所示。



图7 预钻孔热探头测试的温度和时间关系曲线

为验证上述模拟所得经验公式的可靠性, 取干砂和饱和砂温度消散 30 min 的测点数据按 式 (3) 进行拟合, 拟合结果如图 8 所示。



图8 温度消散拟合曲线

由图 8 可得, 干砂温度消散 30 min 对应 的拟合参数 d=161.96, e=0.025, 从而可求出 t_{20} 为 1 619.6 s, 将 t_{20} 代入图 8 对应经验公式中 可求出干砂导热系数 $\lambda=0.495$ W/(m · ℃)。饱和 砂温度消散 30 min 对应的拟合参数 d=145.62, e=0.037, 从而可求出 t_{20} 为 983.9 s, 将 t_{20} 代入图 8 对应经验公式中求出导热系数 λ=0.833 W/(m・℃)。 干砂及饱和砂工况下导热系数测试的数据处理 结果见表 6 所列。

表6 干砂及饱和砂的预钻孔热探头测试数据处理结果

工况	消散时长/min	d	е	$t_{20}/{\rm s}$	$\lambda/W/(m \cdot ^{\circ}C)$
干砂	30	161.96	0.025	1 619.6	0.495
饱和砂	30	145.62	0.037	983.9	0.833

将预钻孔热探头测试设备室内试验的测试 结果与 Hotdisk 2500S 导热测试仪的对比测试结 果汇总于表 7 中。分析表 7 可知,在干砂工况下, 预钻孔热探头测试设备的导热系数测试结果与 Hotdisk 2500S 导热测试仪测试结果相对误差为 8.1 %,在饱和砂工况下相对误差为 3.2 %。

表7 不同测试方法下的砂土导热系数对比结果

工况	预钻孔热探头 测试λ/W/(m・℃)	Hotdisk 2500S 測试 λ/W/(m・℃)	相对误差
干砂	0.495	0.458	8.1%
饱和砂	0.833	0.807	3.2%

预钻孔热探头测试设备的导热系数测试结 果与 Hotdisk 2500S 导热测试仪结果吻合较好, 验证了预钻孔热探头测试设备和温度消散原理 测试岩土体导热系数的可靠性。

4 结论

研制开发了预钻孔热探头测试设备,开展 了室内模型试验及对比试验,验证其测试结果 的可靠性。具体研究结论如下:

 1)基于旁压仪和地埋管换热器工作原理, 研制开发了预钻孔热探头测试设备,该设备包括 热传导探头、一体化转换控制装置、压力控制系 统和温度控制系统。热传导探头通过同轴导压管 与一体化转换控制装置连接,压力系统和控温系 统分别通过压力管与一体化转换控制装置连接。

2) 基于温度消散原理给出了岩土体导热系数的具体求解方法。使用温度消散原理得出计算导热系数的经验公式,在实际测试时依据温度消散数据获得 t_c,再代入对应经验公式或经验公式曲线,即可快速确定所测试岩土体的导热系数。

3)利用预钻孔热探头测试设备和 Hotdisk 2500S 导热测试仪分别测试中国 ISO 标 (下转第78页) 灭火系统,管道布置方式优先采用顺坡给水方 式,选用 ZSTWB/SL-S225-50-120 型动态传输 皮带喷头。

参考文献

- [1] 袁建磊,张雪庆,贺向阳,等. 电厂输煤系统消防 给水方式探讨[J]. 给水排水,2009(2): 83-85.
- [2] 周乃兵,曹立坤.石油化工企业封闭式输煤钢结构
 栈桥水消防系统选型[J].工业用水与废水,2012,
 43(4): 82-84.
- [3] 任翔青.煤化工中封闭式输煤栈桥水消防系统的探 讨[J].科技创新与生产力,2016(11):81-83.

(编辑 刘旭)

(上接第51页)

准砂在干燥和饱和状态下的导热系数。预钻 孔热探头的测试结果为0.495 W/(m・℃)和 0.833 W/(m・℃), Hotdisk 2500S 导热测试仪 测试结果为0.458 W/(m・℃)和0.807 W/(m・℃), 两种方法测试相对误差分别为8.1%和3.2%, 验证了预钻孔热探头测试设备和温度消散原 理测试岩土体导热系数的可靠性。

参考文献

- [1] 江强强, 焦玉勇, 骆进, 等. 能源桩传热与承载特性研究现状及展望 [J]. 岩石力学, 2019, 40(9): 3351-3362.
- [2] 郭彤荔. 浅析世界能源供需格局及中国能源清洁 化策略 [J]. 能源与节能, 2019, 11(170): 25-28.
- [3] SANTAMARTA J C, GARCÍA-GIL A, EXPÓSITO M D C, et al. The clean energy transition of heating and cooling in touristic infrastructures using shallow geothermal energy in the Canary Islands[J]. Renewable Energy, 2021(171): 505-515.
- [4] LEAT, WANGL, WANGY, et al. Measurement investigation on the feasibility of shallow geothermal energy for heating and cooling applied in agricultural greenhouses of Shouguang City: Ground temperature profiles and geothermal potential[J]. Information Processing in Agriculture, 2021, 8(2): 251-269.
- [5] 曾召田,赵艳林,吕海波,等.制热工况下地 埋管周围土壤的热湿迁移试验研究[J].岩土工 程学报,2017,39(S1):145-150.
- [6] XU Y-S, WANG X-W, SHEN S-L, et al. Distribution characteristics and utilization of shallow geothermal energy in China[J]. Energy and Buildings, 2020, 229: 110479.

- [7] H. Z, Y.X. M, X. W, et al. Numerical study of the influence of thermal radiation on measuring semi-transparent thermal insulation material with hot wire method[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, 121(6): 105120.
- [8] JANNOT Y, DEGIOVANNI A, FéLIX V, et al. Measurement of the thermal conductivity of thin insulating anisotropic material with a stationary hot strip method[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(3): 35705-35713.
- [9] 曾悠兵. 导热系数测定仪若干关键技术研究 [D]. 天津:天津大学,2010.
- [10] AKROUCH G A, BRIAUD J-L, SANCHEZ M, et al. Thermal Cone Test to Determine Soil Thermal Properties[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(3): 04015085.
- [11]张涛,刘松玉,张楠,等.土体热传导性能及 其热导率模型研究[J].建筑材料学报,2019, 22(1):72-80.
- [13]程伟峰,蔡永生.旁压仪及旁压试验的发展历程[C].2016年全国工程勘察学术大会论文集,太原:中华人民共和国住房和城乡建设部,2016:73-79.
- [14] 刘松玉,郭易木,张国柱,等.热传导CPT探
 头的研发与应用[J].岩土工程学报,2020,42(2):160-167.
- [15] F R M, H A K. Numerical Analysis of T-Bar Penetration in Soft Clay[J]. International Journal of Geomechanics, 2006, 6(6): 411-420.
- [16] TERZAGHI K T. Theoretical Soil Mechanics[M]. Theoretical Soil Mechanics, 1943.

(编辑 卢靖冉)