

## 基于主动加热型分布式温度感测光缆的土体导热系数测量方法

姚俊成, 刘洁, 王金路, 孙梦雅, 方可, 施斌

### A study of soil thermal conductivity measurement based on the actively heated distributed temperature sensing cable

YAO Juncheng, LIU Jie, WANG Jinlu, SUN Mengya, FANG Ke, and SHI Bin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202111076>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于微地震数据的增强型地热储层参数及采热的数值模拟研究

A study of numerical simulations for enhanced geothermal reservoir parameters and thermal extraction based on microseismic data

马子涵, 邢会林, 靳国栋, 谭玉阳, 闫伟超, 李四海 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 190-199

#### 昆仑山地区冻融土导热系数试验测试与预测模型研究

Research on experimental tests and prediction models of thermal conductivity of freezing-thawing soil in the Kunlun Mountains

刘志云, 张伟, 王伟, 崔福庆 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 105-113

#### 基于遗传算法-支持向量机的滑坡渗透系数反演

Estimation of hydraulic conductivity of landslides based on support vector machine method optimized with genetic algorithm

胡鹏, 文章, 胡新丽, 张玉明 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 160-168

#### 桩埋管参数对渗流下能量桩热-力耦合特性的影响

Effects of the pile buried pipe parameters on the thermal-mechanical coupling characteristics of energy pile under the groundwater seepage

杨卫波, 张来军, 汪峰 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 176-185

#### 深圳“12.20”渣土场远程流化滑坡动力过程分析

Dynamics process simulation of long run-out catastrophic landfill flowslide on December 20 th, 2015 in Shenzhen, China

高杨, 卫童瑶, 李滨, 贺凯, 刘铮, 王学良 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 129-129

#### 东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟

Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China

张晨阳, 张泰丽, 张明, 孙强, 伍剑波, 王赫生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 42-50



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202111076

姚俊成, 刘洁, 王金路, 等. 基于主动加热型分布式温度感测光缆的土体导热系数测量方法 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 179-188.

YAO Juncheng, LIU Jie, WANG Jinlu, *et al.* A study of soil thermal conductivity measurement based on the actively heated distributed temperature sensing cable[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 179-188.

## 基于主动加热型分布式温度感测光缆的 土体导热系数测量方法

姚俊成<sup>1</sup>, 刘洁<sup>1</sup>, 王金路<sup>2</sup>, 孙梦雅<sup>1</sup>, 方可<sup>1</sup>, 施斌<sup>1</sup>  
(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023;  
2. 阜阳市地质环境监测中心, 安徽阜阳 236000)

**摘要:** 主动加热型分布式温度感测技术(AH-DTS)可通过植入土体中的光缆实现不同层位土体导热系数的分布式连续测量, 但 AH-DTS 光缆导热系数测量方法的准确性和敏感性有待进一步研究。通过室内试验, 对比了碳纤维加热感测光缆(CFHC)和铜网加热感测光缆(CMHC)的热响应过程, 通过数值模拟验证了光缆结构对导热系数测量结果的影响。研究结果表明: (1)CFHC 和 CMHC 的热响应过程可通过微分法分为光缆内部传热、纤-土过渡以及土体稳定传热 3 个阶段, 光缆结构差异导致传热速率不同, 使得 CFHC 导热系数测量初始时刻比 CMHC 提前 100 s; (2)光缆尺寸与比热容差异下 CFHC 的升温值更高, 相同测温精度 CFHC 的导热系数测量结果较 CMHC 更加稳定准确; (3)增大加热功率或延长加热时间均会提高 CFHC 和 CMHC 测量土体导热系数的准确性。研究成果为该技术的进一步完善和推广提供了重要依据。

**关键词:** 土体导热系数; AH-DTS; 光缆结构; 热响应过程; 数值模拟

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)01-0179-10

## A study of soil thermal conductivity measurement based on the actively heated distributed temperature sensing cable

YAO Juncheng<sup>1</sup>, LIU Jie<sup>1</sup>, WANG Jinlu<sup>2</sup>, SUN Mengya<sup>1</sup>, FANG Ke<sup>1</sup>, SHI Bin<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

2. Fuyang Geo-environmental Monitoring Center, Fuyang, Anhui 236000, China)

**Abstract:** The actively heated distributed temperature sensing technology (AH-DTS) can realize distributed continuous measurement of the soil thermal conductivity in different layers through optical cables implanted in the soil. However, the accuracy and sensitivity of soil thermal conductivity measurement by AH-DTS method need to be further studied. Through designing indoor tests with the loess, the aim of this study is to compare the thermal response process and the soil thermal conductivity measured by carbon fiber heated cable (CFHC) and copper-mesh heated cable (CMHC) under different heating strategies. The numerical simulation is used to furtherly verify the influence of the optical cable structure on the thermal conductivity measurement results. The results show that

收稿日期: 2021-11-27; 修订日期: 2022-01-10

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42030701); 国家重大科研仪器研制项目(41427801)

第一作者: 姚俊成(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程及光纤监测技术等方面研究。E-mail: [yaojc@smail.nju.edu.cn](mailto:yaojc@smail.nju.edu.cn)

通讯作者: 刘洁(1998-), 女, 博士研究生, 主要从事工程地质和环境岩土工程方面的研究。E-mail: [dz1929013@smail.nju.edu.cn](mailto:dz1929013@smail.nju.edu.cn)

the thermal response process of CFHC and CMHC can be divided into three stages: Internal heat transfer of optical cable, fiber-soil transition and stable heat transfer of soil. The difference in optical cable structure will lead to different heat transfer rates, which makes the initial time of thermal conductivity measurement of CFHC 100 s earlier than that of CMHC. The temperature rise value of CFHC is higher under the difference of optical cable size and specific heat capacity. The thermal conductivity measurement result of CFHC is more stable and accurate than CMHC under the same DTS temperature measurement accuracy. Increasing the heating power or increasing the heating time will improve the accuracy of the soil thermal conductivity measurement by CFHC and CMHC. The research results provide an important basis for further improvement and promotion of this technology.

**Keywords:** soil thermal conductivity; AH-DTS; optical cable structure; thermal response process; numerical simulation

土体导热系数是土体热物性计算中的一项重要指标,影响土体传热过程中的温度分布以及热量传递<sup>[1-2]</sup>。土体原位导热系数的获取,对地热能利用中掌握区域内地层传热能力的空间分布、避免冷热需求不均衡导致的运行效率下降、提高浅层地温能的利用率等起到关键作用<sup>[3-6]</sup>。因此,土体导热系数全分布式原位测量具有重要意义。

目前,国内外学者针对土体导热系数原位测试方法开展了大量研究工作<sup>[7-11]</sup>,主要包括热探针法和热响应测试法(thermal response test, TRT)。热探针法是点式测量,可以通过探针获取不同的热学性能参数,如导热系数、热扩散率、比热容等<sup>[12]</sup>,但受传感器长度限制,只能对表层土体进行测量;热响应测试法需一定的传热模型反演才可得到岩土体综合热物性参数值<sup>[13]</sup>,一般采用线性热源模型反演土体综合导热系数<sup>[14]</sup>,但传统热响应测试时间长,测试过程复杂,且每次测试仅可得一个土体综合导热系数,无法得到不同土层的导热系数。

随着分布式温度传感技术(distributed temperature sensing, DTS)的兴起,主动加热型分布式温度感测技术(AH-DTS)可通过植入土体中的光缆实现不同层位土体导热系数的分布式连续测量,并得到快速发展。AH-DTS法将主动加热光缆作为热源,DTS测量光纤沿线的土体温度分布变化,再基于线性热源模型计算得到土体的导热系数。因此,AH-DTS法可在不同深度上对导热系数进行时间空间连续性测量,从而精细反演出各层土体的导热系数。肖衡林等<sup>[15]</sup>将TRT法与DTS技术相结合,研究了含水率对土的有效导热系数的影响;海那尔·别克吐尔逊等<sup>[16]</sup>通过室内热响应模型试验,设计了多层土有效导热系数AH-DTS测定方法,该方法比传统的热响应测试方法具有时间短、安装简单、加热均匀等优点。此外,AH-DTS导热系

数测量技术还被用于计算岩土体的水分场分布<sup>[17-18]</sup>,通过岩土体导热系数对其他参量进行预测估算,如曹鼎峰等<sup>[19]</sup>提出了一种基于AH-DTS的分布式含水率测定方法;胡优等<sup>[20]</sup>用AH-DTS光缆对土体含水率进行测试,发现基于导热系数法的含水率计算方法精度最高;Simon等<sup>[21]</sup>通过AH-DTS光缆直接测量非均质流场,得到土体导热系数和地下水通量的估计值。由此可知,AH-DTS技术在土体导热系数测试方面具有很大的应用前景。

目前,AH-DTS法中光缆的现场安装工艺已相对成熟<sup>[22-24]</sup>,而测量的准确性主要取决于加热方案及光缆类型选择。针对不同的监测距离,目前AH-DTS光缆主要分为2类,碳纤维加热感测光缆(carbon fiber heated cable, CFHC)和铜网加热感测光缆(copper-mesh heated cable, CMHC),2种光缆的适用条件有所不同。CFHC加热电阻的阻值大,所需电压大,耐腐蚀性强,适用于短距离(<500 m)、小尺度的特殊场地,如盐碱地、酸性土和交通不便地区;CMHC的加热电阻阻值小,更适用于长距离、大面积测试。Cao等<sup>[25]</sup>利用CFHC进行现场原位测试,验证了土体含水率分布式测量的可行性;Zhang等<sup>[26]</sup>利用布设在现场的CMHC实现了岩土体导热系数的准确、精细化获取,测试结果与常规手段相比误差不足5%,且能获得复杂地层的导热系数分布。但是,这2种AH-DTS光缆导热系数测量的准确性和敏感性的对比仍未开展过系统的研究。因此,十分有必要对土体导热系数AH-DTS测量法开展研究。

本文通过室内模型试验,研究了CFHC和CMHC 2种光缆的热响应过程,比较了其在不同加热方案下导热系数测量的准确性和敏感性,并利用数值模拟对不同光缆结构的传热过程进行了分析,为AH-DTS法测量土体导热系数提供技术支撑。

## 1 土体导热系数 AH-DTS 法测量原理

### 1.1 DTS 测温原理

DTS 是一种基于拉曼散射效应测量温度并通过光的时域反射技术来定位的温度传感器, 其测温原理是: 一定能量的脉冲泵浦光注入光纤后会产生两束背向拉曼散射光, 其中, 波长大于入射光的斯托克斯散射光不受温度影响, 而波长小于入射光的反斯托克斯散射光有很强的温度依赖性。因此, 可以根据斯托克斯与反斯托克斯的光强比计算温度, 从而可实现沿光纤长度方向上的温度分布式测量。光纤上任意一点的温度值可表示为<sup>[27]</sup>:

$$T(z) = \frac{\Delta E/k}{\ln C - \ln R(z) + \Delta \alpha z} \quad (1)$$

式中:  $T(z)$ ——绝对温度/K;

$R(z)$ ——斯托克斯与反斯托克斯的光强比;

$\Delta E$ ——驱动拉曼散射的分子能态的差值/J;

$k$ ——玻尔兹曼常数/( $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ );

$\Delta \alpha$ ——斯托克斯与反斯托克斯背向散射光损失系数之差;

$z$ ——到 DTS 光源的距离/m;

$C$ ——与入射光的波长、频率、背向拉曼散射光、仪器的光子探测器有关的可校准参数。

### 1.2 AH-DTS 法测量原理

Ingersoll 等<sup>[28]</sup>在 Kelvin 线热源理论的基础上, 提出线性热源模型以求解地下岩土导热系数, 该模型为热响应试验的基本模型。AH-DTS 光缆可视为理想线性热源, 其在二维空间中的传热模式如图 1 所示, 加热电阻丝作为热源发热, 光纤作为感知部件测量温度, 加热电阻丝产生的热量=向光缆内部传递的热量  $Q_1$ +向光缆外部传递的热量  $Q_2$ 。根据传热模型理论结合边界条件模拟瞬态热传导问题进行求解, AH-DTS 测得的温度值  $T(t)$  满足下列关系<sup>[29-30]</sup>:

$$T(t) = \frac{Q}{4\pi\lambda} \left[ \ln t + 4\pi R\lambda + \ln \left( \frac{4K}{a^2c} \right) \right] + T_0 \quad (2)$$

式中:  $T(t)$ ——加热时间  $t$  时刻对应的传感器温度/ $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_0$ ——初始土体温度/ $^{\circ}\text{C}$ ;

$Q$ ——单位长度的加热功率/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ );

$\lambda$ ——土体的导热系数/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );

$R$ ——单位长度上光缆与土体的接触热阻/( $\text{W}^{-1} \cdot \text{m} \cdot \text{K}^{-1}$ );

$K$ ——土体的热扩散系数/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ );

$a$ ——传感器的外径/m;

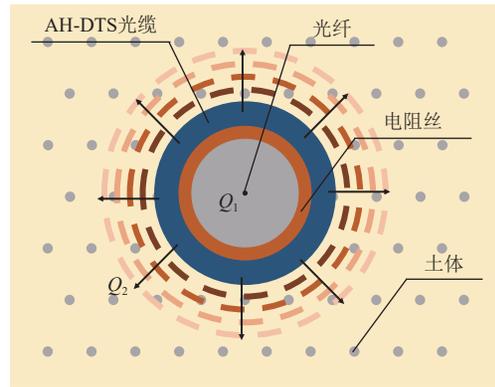


图 1 AH-DTS 法原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the AH-DTS method

$c$ ——常数,  $c = \exp(\gamma) = 1.7811$ ,  $\gamma$  为欧拉常数。

对式(2)进行一步转化, 即可得到温升值  $\Delta T$  与时间对数  $\ln t$  满足下式所列方程:

$$\Delta T = T(t) - T_0 = \frac{Q}{4\pi\lambda} \left[ \ln t + 4\pi R\lambda + \ln \left( \frac{4K}{a^2c} \right) \right] \quad (3)$$

式中:  $\Delta T$ ——温升值/ $^{\circ}\text{C}$ 。

由式(3)可以看出, 线性热源在恒定加热功率下释放热流, 土体的温度随时间增加,  $\Delta T$  与  $\ln t$  成简单的线性关系, 其斜率  $k$  的表达式为:

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

在式(4)中, 仅有导热系数  $\lambda$  为未知量。因此, 土体导热系数的计算公式为:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi k} \quad (5)$$

综上, 通过 AH-DTS 技术测得温升值从而测量出土体的导热系数。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 2 种加热光缆导热系数测量试验

为探究不同 AH-DTS 加热光缆导热系数测量的准确性和敏感性, 分别针对 CFHC 与 CMHC 设计了室内模型试验, 分析其热响应过程, 从而计算不同加热条件下的土体导热系数。

#### 2.1.1 试验材料

本次试验的土样为取自陕西省延安市的黄土, 其基本物理性质如表 1 所示。首先, 将土样放入  $105^{\circ}\text{C}$  的烘箱 24 h 烘干水分, 接着向烘干土样加入 20% 的水并搅拌均匀, 然后将土样密封后静置 24 h 以上, 以保证土水混合均匀, 最终得到含水率为 20.09% 的黄土试样, 与取样黄土剖面的平均原位含水率 20.29% 接

表 1 黄土的基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of the test soil

参数	原位含水率	塑限	液限	塑性指数
测量值	20.29%	17%	27%	10

近,具有较强的代表性。

本次试验中使用的 CFHC 和 CMHC 2 种光缆结构如图 2 所示。CFHC 由光缆护套、碳纤维加热电阻丝、光纤护套及光纤纤芯等 4 个部分组成,其光缆外径为 4.20 mm,碳纤维加热电阻丝阻值为 18 Ω/m; CMHC 由光缆护套、铜网加热电阻丝、铠装、光纤护套及光纤纤芯等 5 个部分组成,其光缆外径为 5.25 mm,铜网加热电阻丝阻值为 0.018 Ω/m。2 种 AH-DTS 光缆的结构中均含有光缆护套、光纤护套以及光纤纤芯,主要差异包括光缆外径尺寸以及加热的电阻丝材质不同。此外,CMHC 比 CFHC 多一层厚度为 0.60 mm 的铠管结构,该结构用于增强光缆的鲁棒性。



图 2 CFHC 与 CMHC 光缆结构图  
Fig. 2 Structure of CFHC and CMHC

2.1.2 试验装置及方法

本次试验装置如图 3 所示。在 2 m×0.25 m×0.25 m 的亚克力模型箱内分层填入待测土样,干密度为 1.398 g/cm<sup>3</sup>。光缆沿模型箱轴向布设于土体中部,并从两侧中心位置的预制孔穿出,用电线分别连接两侧孔处的 DTS 光缆,并将电线另一端连接至直流电源以提供稳定的电压,AH-DTS 光缆通过跳线连接至 DTS 解调仪。本次试验使用的 DTS 测温精度为±0.1 °C,空

间分辨率为 1 m,采样间隔为 15 s,并通过恒温水浴槽进行温度校准<sup>[27]</sup>,以弥补光损耗产生的温度误差。此外,在光缆的同一高度处安装时域反射(time domain reflectometry, TDR)传感器,用于判断在测试过程中黄土含水率是否发生变化。

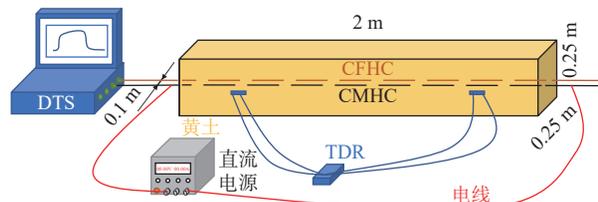


图 3 试验装置结构示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of the test device structure

在测试过程中,先将 CMHC 的电线连接至直流电源,在 25, 20, 15, 10, 5 W/m 功率条件下加热 20 min。加热结束后待土体充分冷却,然后加热 CFHC,由于碳纤维电阻值比铜网大,故在相同电压下,CFHC 单位长度上加热功率相对小,因此 CFHC 的加热功率分别为 15, 12.5, 10, 7.5, 5 W/m,加热时间为 20 min。

2.2 数值模拟

为了进一步研究光缆结构对导热系数测定的影响,利用 COMSOL 软件对本次模型试验进行数值模拟。模型假设土体均质并且满足各向同性,故可将问题简化为二维平面模型<sup>[31]</sup>。该模型主体部分为 0.25 m×0.25 m 的二维矩形区域,AH-DTS 光缆位于模型的中心(图 4)。2 个模型中各个部件尺寸及材料与实际模型试验使用的光缆一致。CFHC 和 CMHC 光缆的外部(光缆护套)被建模为域的内部边界,位于光纤纤芯处的测温点用于模拟实际的测温过程,在得到该点的温度时程曲线后,即可根据数值模拟结果计算出周围土体的导热系数。CFHC 模型被划分为含 33 556 个域单元和 564 个边界元的极精细网格,CMHC 模型被划分为含 33 080 个域单元和 604 个边界元的极精细网格。

3 结果与讨论

3.1 热响应过程

图 5 为不同加热功率下黄土的温度时程曲线。由于模型箱尺寸为 2 m×0.25 m×0.25 m, DTS 的空间分辨率为 1 m,因此该次试验有 2 个有效测温点,对 2 个测温点所测值取平均值作为有效温度,有效温度减去初始温度为温升值。

由图 5 可知,CFHC 与 CMHC 的热响应过程均可分为 3 个阶段,第 I 阶段为光缆内部传热阶段,该阶

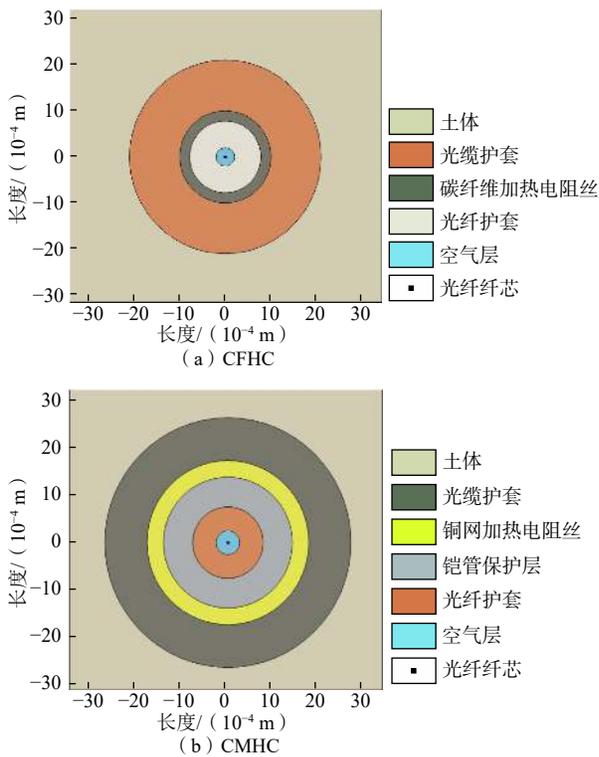


图4 CFHC和CMHC数值模拟模型结构图

Fig. 4 Diagrams showing the numerical simulation model structure of CFHC and CMHC

段温度增长较快,主要表现为光缆内部结构吸收加热电阻丝的热量;第Ⅱ阶段为纤-土过渡阶段,该阶段升温速率逐渐下降,但温度仍处于稳定上升的过程中,这表示热量从光缆结构向周围土体进行传热;第Ⅲ阶段为土体稳定传热阶段,该阶段光缆内部热量传递逐渐趋于平衡,热量主要在周围土体中稳定传热,光缆结构温度也处于稳定状态。根据温度时程曲线,不同光缆的最大温升值随着加热功率的增大等比例增大,而热响应过程阶段划分不随加热功率的变化发生显著改变。

现有研究对主动加热型传感器的升温过程进行了阶段划分,但未给出阶段划分依据<sup>[32-33]</sup>。为此,为了验证上述阶段划分的可靠性,作者进一步分析了 $\Delta T$ 随 $\ln t$ 的变化率,即 $d\Delta T/d\ln t$ 。图6为CFHC和CMHC在不同加热功率的 $d\Delta T/d\ln t-t$ 图像,通过微分法得到的 $d\Delta T/d\ln t$ 值,即为式(4)中斜率 $k$ 。依据 $d\Delta T/d\ln t$ 的变化趋势对温度阶段进行划分,以CFHC为例,如图6(a)所示,其温度阶段划分结果如下:第Ⅰ阶段为0~300 s,  $d\Delta T/d\ln t$ 值呈现快速上升趋势,  $d\Delta T/d\ln t$ 值越大,代表实测导热系数小,且由于光缆导热系数比土体小,因此热量主要在光缆内部传递;第Ⅱ阶段为300~

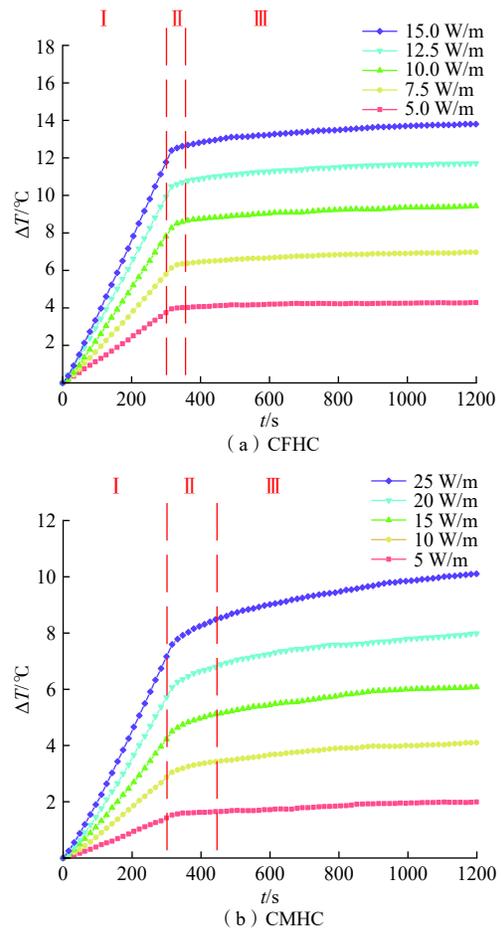


图5 CFHC与CMHC温度时程曲线

Fig. 5 Curves of temperature rise of CFHC and CMHC

350 s,  $d\Delta T/d\ln t$ 呈骤减趋势,代表实测导热系数增大,因此热量开始传递至土体,该阶段为纤-土过渡阶段;第Ⅲ阶段为350~1200 s,  $d\Delta T/d\ln t$ 值逐渐趋于平稳,代表实测的导热系数变化较小,说明热量主要在土体内部稳定传递。因此,第Ⅲ阶段开始时刻为土体导热系数测量的有效时刻,该阶段测得导热系数为土体导热系数。

同样地,CMHC的升温过程也可分3个阶段,见图5(b)与图6(b)。第Ⅰ阶段为0~300 s,第Ⅱ阶段为300~450 s,第Ⅲ阶段为450~1200 s。与CFHC相比,CMHC第Ⅲ阶段开始时刻为450 s,其第Ⅱ阶段的持续时间比CFHC长100 s。原因是CMHC的直径较CFHC大,热量传递至土体所需时间更长,且CMHC内部有铠管保护层,传热接触关系更复杂,因此需要更多的时间用于光缆内部的能量传递。

综上,使用AH-DTS法计算土体导热系数时,需用第Ⅲ阶段的温度时程曲线,CFHC和CMHC的导热系数计算初始时刻分别为350 s和450 s。

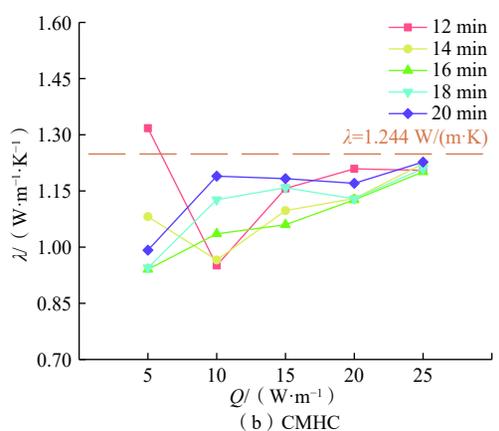
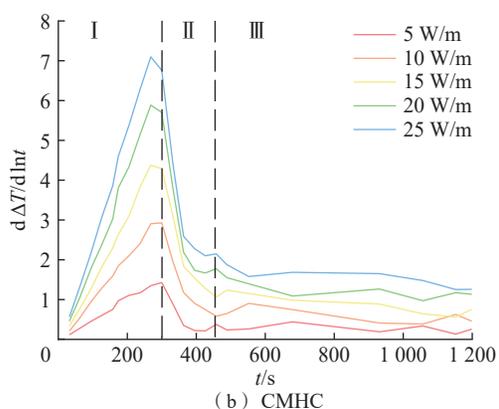
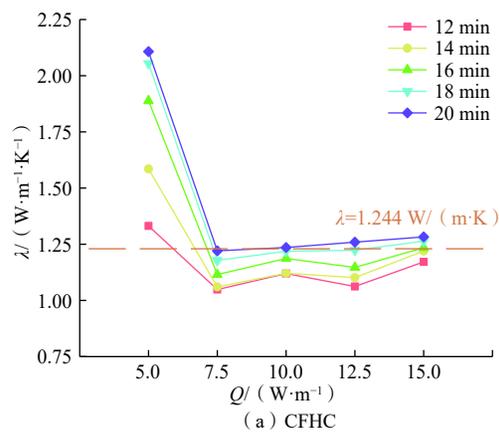
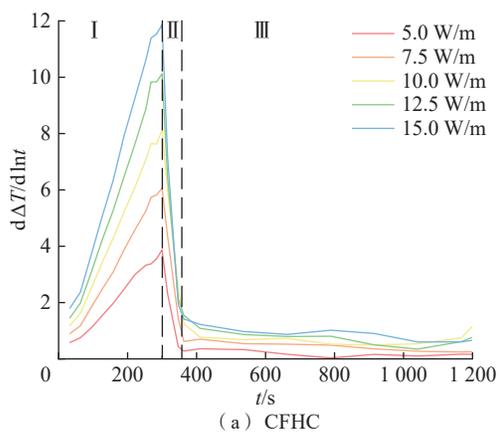


图 6 不同加热功率下 CFHC 与 CMHC 的  $d\Delta T/d\ln t-t$  图像  
 Fig. 6 Charts of  $d\Delta T/d\ln t-t$  of CFHC and CMHC under different heating power

图 7 不同加热功率和不同加热时间下 CFHC 和 CMHC 的导热系数测量结果  
 Fig. 7 Thermal conductivity of CFHC and CMHC under different heating power and heating times

3.2 不同加热方案下的导热系数测量结果

试验过程中, TDR 传感器的监测数据稳定, 可认为整个测试过程中含水率未发生变化。在试验结束后, 基于平板法利用导热测试仪(HC-110 型)测得的试验土样的导热系数为  $1.244 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

根据式(5)以及温度时程曲线中  $\Delta T$  与  $\ln t$  的关系, 得出 CFHC 和 CMHC 在不同加热方案下的导热系数测量结果(图 7)。

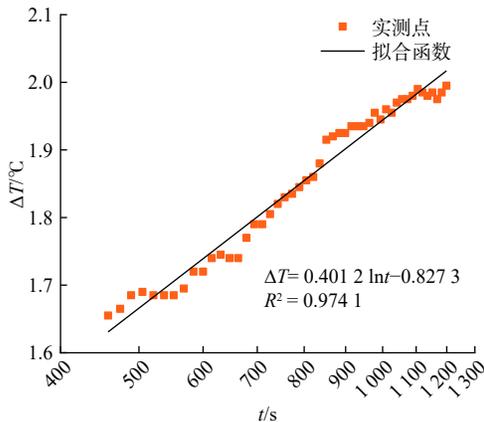
由图 7 可以看出, CFHC 和 CMHC 2 种光缆在加热功率较大时, 测量结果偏差更小, 而小加热功率下导热系数计算值偏差大, 分析原因如下:  $5 \text{ W}/\text{m}$  的 CMHC 线性拟合时, 如图 8(a)所示, 相关系数( $R^2$ )为  $0.974 1$ , 稳定升温段 ( $450 \sim 1 200 \text{ s}$ )  $\Delta T$  仅为  $0.34 \text{ }^\circ\text{C}$ , 温度受 DTS 本身存在系统误差(测温精度为  $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ )影响而产生波动, 结果误差较大; 当加热功率增大到  $25 \text{ W}/\text{m}$  后, 稳定升温段  $\Delta T$  增加至  $1.56 \text{ }^\circ\text{C}$ , 如图 8(b)所示,  $R^2$  为  $0.998 7$ , 测量结果精确性得到显著提升。表 2 为不同功率下 CMHC 的  $\Delta T-\ln t$  曲线拟合结果, 当加热时间较短时, 由于温升值较小, 易受到测温精度的影响产生

波动,  $R^2$  较低, 相对误差较大, 进而影响导热系数的测量结果。在不考虑系统误差较大的  $5 \text{ W}/\text{m}$  加热功率的前提下, CFHC 的加热时间达到  $16 \text{ min}$ , CMHC 的加热时间达到  $18 \text{ min}$  时, 不同加热功率下的导热系数计算平均值与真实值之间相对误差小于  $\pm 0.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

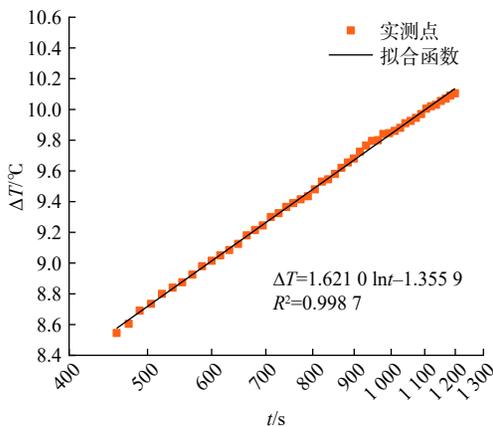
综上, 加热方案对导热系数的测量结果存在一定的影响, 且不同光缆结构的加热方案对测量结果影响不尽相同。当加热时间短、加热功率小时, 结果受测温精度影响更易产生波动; 随加热功率、加热时间增加, 准确性得到提升, 测量结果也趋于稳定。

3.3 光缆结构对导热系数测定的影响

根据图 7 中 2 种光缆的结果对比, 剔除相对误差较大的  $5 \text{ W}/\text{m}$  加热功率的测量结果, 统计得 CFHC 的均方根误差(RMSE)为  $0.089 4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , CMHC 的 RMSE 为  $0.132 2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 主要原因为 CFHC 和 CMHC 在结构与材料上的差异, CFHC 的碳纤维电阻丝紧贴光纤护套, 而 CMHC 的铜网电阻丝与光缆护套间隔一层铠管, 结构与材料上的差异导致热响应过程不同。此



(a) CMHC, 5 W/m



(b) CMHC, 25 W/m

图 8 5 W/m 与 25 W/m 加热功率下 CMHC 的拟合曲线

Fig. 8 Fitted curves of CMHC under the heating power of 5 W/m and 25 W/m

表 2 不同加热功率 Q 下 CMHC 的 ΔT-ln t 曲线拟合结果

Table 2 ΔT-ln t fitted results of CMHC under different heating power

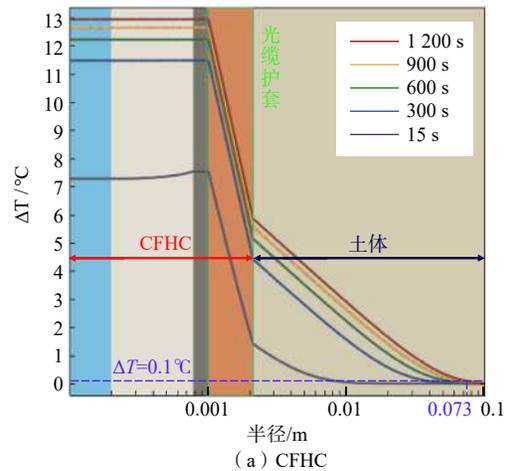
$Q/(W \cdot m^{-1})$	$k$	$R^2$	$\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	相对误差/( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
5	0.401 2	0.974 1	0.991 7	-0.252 3
10	0.669 0	0.977 5	1.189 5	-0.054 5
15	1.009 2	0.982 7	1.182 8	-0.061 2
20	1.359 8	0.993 9	1.170 4	-0.073 6
25	1.621 0	0.998 7	1.227 3	-0.016 7

外, 根据微分法的阶段划分结果(图 6), CFHC 的纤-土过渡阶段比 CMHC 短 100 s, 热量可更快传递至土体, 故导热系数有效段时间更长, 数据规律性更好, 进而使得 CFHC 测量结果更精准。

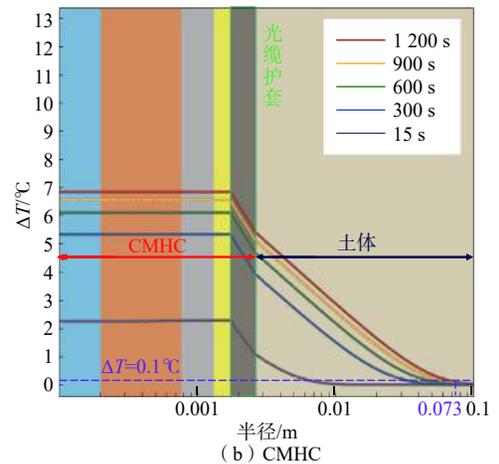
图 9 为数值模拟结果下 CFHC 和 CMHC 光缆内部及土体温度分布, 其中热源的加热功率均为 15 W/m。当加热时间大于 300 s 后, CFHC 和 CMHC 在加热电阻丝以内的光缆结构部分可视为等温体; 在光缆护套内部,  $\Delta T$  随半径增大而降低, 由于 CFHC 的光缆护套更厚, 其  $\Delta T$  随半径下降得更多; 在光缆与土体的分界

面处, 2 种光缆的温度分布出现明显转折点, 原因为光缆外侧护套与土体的导热系数不同, 且不同材料接触面处存在接触热阻。对比 CFHC 和 CMHC 的土体温度分布发现, CFHC 光缆内部的等温体温度高于 CMHC, 而土体中的温度分布相同, 原因在于: CFHC 的光缆护套比 CMHC 厚, 故 CFHC 高等温体在向光缆护套传输能量时比 CMHC 消耗能量更多, 随后才能将能量进一步传递到土体中。因此, 在等温体温度和护套厚度 2 个因素共同影响下, CFHC 和 CMHC 光缆外侧土体温度分布相同。

在数值模拟和室内试验中, 同一加热功率下 CFHC 比 CMHC 的温升值高, 主要原因是 CMHC 结构内部包括铠管, 铠管的比热容比光缆护套大, 加热电阻丝以内的光缆结构部分可视为等温体, CMHC 的等温体比热容相对更大, 升高相同的温度 CMHC 需要更多的能量。CFHC 与 CMHC 的土体温度分布一致, 土体中传递热量相同, 同一加热功率加热时 CFHC 和



(a) CFHC



(b) CMHC

图 9 15 W/m 加热功率 CFHC 和 CMHC 径向温度分布

Fig. 9 Radial temperature profiles of CFHC and CMHC under the heating power of 15 W/m

CMHC 光缆内部吸收热量相同。由于 CMHC 比热容更大, CMHC 的温升值更低, CFHC 的温升值更高, 在相同测温精度条件下, CFHC 导热系数的测量结果更加精确。因此, 不同种类的光缆结构是影响热响应试验结果的主要因素。

定义土体升高  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上的区域为热源的影响范围, 影响范围内到光缆中心距离最大值为影响半径 ( $r$ )。CFHC 和 CMHC 在不同功率下的影响半径变化趋势如图 10 所示, CFHC 和 CMHC 在相同功率下影响半径相同, 且影响半径均随加热功率增大而增大, 但随加热功率增大, 影响半径的增大速率逐渐变缓, 加热功率与影响半径之间不呈线性关系。因此, 热源影响范围只受热源加热功率大小影响, 光缆结构对热量传递范围影响很小。

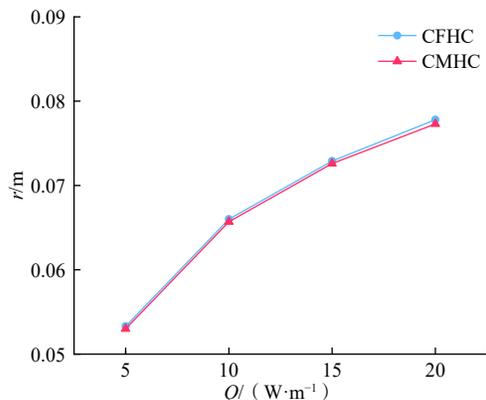


图 10 不同加热功率下 CFHC 和 CMHC 的影响半径变化趋势  
Fig. 10 Influence radius of CFHC and CMHC under different heating power

综上, 光缆结构对主动加热过程中影响半径的影响较小, 但对导热系数测量结果的精确性存在一定的影响, 2 种加热光缆中 CFHC 的测量结果更加精准, 主要包括以下原因: CFHC 热量稳定传递到土体所需的时间更短, 有效时间段更长, 数据规律性更好, 结果更精确; 光缆尺寸的差异与材料比热容的差异导致 CFHC 的升温值更高, 相同测温精度下 CFHC 的导热系数测量结果更精确。

## 4 结论

(1) 依据温度时程曲线与微分法, 将热响应过程划分为三个阶段: 分别为光缆内部传热阶段 (I)、纤-土过渡阶段 (II) 以及土体稳定传热阶段 (III), 光缆结构差异会造成温度阶段划分不同, CFHC 的第 III 阶段开始时刻比 CMHC 提前 100 s, CFHC 和 CMHC 的导热系数测量初始时间分别为 350 s 和 450 s。

(2) 室内试验与数值模拟结果表明, 光缆结构是影响导热系数测试结果准确性和灵敏性的重要因素。CFHC 的  $RMSE$  为  $0.0894\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , CMHC 的  $RMSE$  为  $0.1322\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。由于光缆尺寸与材料比热容的差异, 相同 DTS 测温精度下 CFHC 导热系数测量结果更稳定准确。

(3) AH-DTS 光缆热源影响半径不受光缆结构影响, 但会随加热功率与加热时间增加而增大。随着加热时间延长、加热功率增大, 土体导热系数测量的准确性提高, 但加热方案对不同光缆结构导热系数测量结果的影响不尽相同。

## 参考文献 (References):

- [1] 夏才初, 曹诗定, 王伟. 能源地下工程的概念、应用与前景展望[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(3): 419 - 424. [XIA Caichu, CAO Shiding, WANG Wei. An introduction to energy geotechnical engineering [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(3): 419 - 424. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 周殷康, 阎长虹, 郑军, 等. 双孔隙压实膨润土的细观导热模型[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(7): 1352 - 1359. [ZHOU Yinkang, YAN Changhong, ZHENG Jun, et al. Mesoscale model for thermal conductivity of compacted dual-porosity bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(7): 1352 - 1359. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 于明志, 彭晓峰, 方肇洪. 用于现场测量深层岩土导热系数的简化方法[J]. 热能动力工程, 2003, 18(5): 512 - 514. [YU Mingzhi, PENG Xiaofeng, FANG Zhaohong. A simplified method for on-site measurement of the thermal conductivity of deep-layer rock soil[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2003, 18(5): 512 - 514. (in Chinese with English abstract)]
- [4] BOURNE-WEBB P J, AMATYA B L, SOGA K. A framework for understanding energy pile behavior[J]. ICE Proceedings of Geotechnical Engineering, 2012, 166(2): 170 - 177.
- [5] AMATYA B L, SOGA K, BOURNE-WEBB P J, et al. Thermo-mechanical behaviour of energy piles[J]. Géotechnique, 2012, 62(6): 503 - 519.
- [6] 唐盼盼, 徐洁, 卢永洪. 含水率及温度影响非饱和土导热系数的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(4): 678 - 683. [TANG Panpan, XU Jie, LU

- Yonghong. Experimental study on effects of water content and temperature on thermal conductivity of unsaturated soils[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(4): 678 – 683. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] MILUN S, KILIC T, BEGO O. Measurement of soil thermal properties by spherical probe[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2005, 54(3): 1219 – 1226.
- [ 8 ] 程文龙, 马然, 宋嘉梁. 基于随机近似热探针方法的土壤热物性高精度测量系统[J]. *流体机械*, 2013, 41(8): 63 – 66. [ CHENG Wenlong, MA Ran, SONG Jialiang. Measurement apparatus of soil thermal properties by stochastic approximation thermal probe method with high accuracy[J]. *Fluid Machinery*, 2013, 41(8): 63 – 66. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] ACUA J, PALM B. Distributed thermal response tests on pipe-in-pipe borehole heat exchangers[J]. *Applied Energy*, 2013, 109: 312 – 320.
- [ 10 ] SPITLER J D, GEHLIN S E A. Thermal response testing for ground source heat pump systems— An historical review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 1125 – 1137.
- [ 11 ] 桑宏伟, 张春光, 刘洋, 等. 基于DTS的土体分布式导热系数测试方法[J]. *地下空间与工程学报*, 2020, 16(2): 540 – 546. [ SANG Hongwei, ZHANG Chunguang, LIU Yang, et al. Testing method of distributed thermal conductivity of soil based on DTS[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(2): 540 – 546. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] XU Yunshan, ZENG Zhaotian, SUN Dean, et al. Comparative study on thermal properties of undisturbed and compacted lateritic soils subjected to drying and wetting[J]. *Engineering Geology*, 2020, 277: 105800.
- [ 13 ] MOGENSEN P. Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages[C]//Proceedings of The International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice. Sweden: Swedish Council for Building Research, 1983: 652-657.
- [ 14 ] 郭红仙, 孟嘉伟, 祝振南. 能源隧道热响应试验数值分析与适用性评价[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(4): 572 – 578. [ GUO Hongxian, MENG Jiawei, ZHU Zhennan. Numerical analysis and applicability evaluation of thermal response test in energy tunnels[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(4): 572 – 578. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 肖衡林, 蔡德所, 何俊. 基于分布式光纤传感技术的岩土体导热系数测定方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(4): 819 – 826. [ XIAO Henglin, CAI Desuo, HE Jun. Measuring method of geomaterial thermal conductivity based on distributed optical fiber sensing technology[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(4): 819 – 826. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 海那尔·别克吐尔逊, 施斌, 曹鼎峰, 等. 基于DTS技术的多层土有效导热系数测量方法[J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38(2): 282 – 288. [ HAINAR Bieketuexun, SHI Bin, CAO Dingfeng, et al. Effective thermal conductivity measurement for multilayered soil using DTS technology[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2018, 38(2): 282 – 288. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] SOURBEER J J, LOHEIDE S P I. Obstacles to long-term soil moisture monitoring with heated distributed temperature sensing[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(7): 1017 – 1035.
- [ 18 ] 程伟, 孙梦雅, 徐洪兵, 等. 基于AHFO-FBG的黄土含水率不同率定方法对比分析[J/OL]. *工程地质学报*. (2021-06-22)[2021-08-08]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2021-0037>. [ CHENG Wei, SUN Mengya, XU Hongbing, et al. Comparative analysis of different measuring methods of loess moisture content based on AHFO-FBG method[J/OL]. *Journal of Engineering Geology*.(2021-06-22)[2021-08-08].(in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] 曹鼎峰, 施斌, 顾凯, 等. 土的含水率AHFO法测量中分段函数模型建立[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(6): 41 – 47. [ CAO Dingfeng, SHI Bin, GU Kai, et al. Establishment of the piecewise function model in the process of soil moisture monitoring with the AHFO method[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(6): 41 – 47. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] 胡优, 李敏, 任姮焯, 等. 基于加热光纤分布式温度传感器的土壤含水率测定方法[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(10): 42 – 49. [ HU You, LI Min, REN Hengye, et al. Measurement of soil water content using distributed temperature sensor with heated fiber optics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(10): 42 – 49. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 21 ] SIMON N, BOUR O, LAVENANT N, et al. Numerical

- and experimental validation of the applicability of active-DTS experiments to estimate thermal conductivity and groundwater flux in porous media[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(1): 1 – 27.
- [22] SAYDE C, GREGORY C, GIL-RODRIGUEZ M, et al. Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(6): 2840 – 2849.
- [23] STRIEGL A M, LOHEIDE S P I. Heated distributed temperature sensing for field scale soil moisture monitoring[J]. *Groundwater*, 2012, 50(3): 340 – 347.
- [24] BENSE V F, READ T, BOUR O, et al. Distributed temperature sensing as a downhole tool in hydrogeology[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(12): 9259 – 9273.
- [25] CAO Dingfeng, SHI Bin, ZHU Honghu, et al. A distributed measurement method for in-situ soil moisture content by using carbon-fiber heated cable[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 7(6): 700 – 707.
- [26] ZHANG Bo, GU Kai, SHI Bin, et al. Actively heated fiber optics based thermal response test: A field demonstration [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 134: 110336.
- [27] HAUSNER M B, SUÁREZ F, GLANDER K E, et al. Calibrating single-ended fiber-optic Raman spectra distributed temperature sensing data[J]. *Sensors*, 2011, 11(11): 10859 – 10879.
- [28] INGERSOLL L R, PLASS H J. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump[J]. *ASHVE Transactions*, 1948, 47: 339 – 348.
- [29] CIOCCA F, LUNATI I, VAN DE GIESEN N, et al. Heated optical fiber for distributed soil-moisture measurements: A lysimeter experiment[J]. *Vadose Zone Journal*, 2012, 11(4): 1 – 10.
- [30] 郭君仪, 孙梦雅, 施斌, 等. 不同环境温度下土体含水率主动加热光纤法监测试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(12): 4137 – 4144. [ GUO Junyi, SUN Mengya, SHI Bin, et al. Experimental study of water content in soils monitored with active heated fiber optic method at different ambient temperatures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(12): 4137 – 4144. (in Chinese with English abstract) ]
- [31] BENÍTEZ-BUELGA J, RODRÍGUEZ-SINOBAS L, SÁNCHEZ CALVO R, et al. Calibration of soil moisture sensing with subsurface heated fiber optics using numerical simulation[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(4): 2985 – 2995.
- [32] SUN Mengya, SHI Bin, ZHANG Dan, et al. Study on calibration model of soil water content based on actively heated fiber-optic FBG method in the in-situ test[J]. *Measurement*, 2020, 165: 108176.
- [33] 刘洁, 孙梦雅, 施斌, 等. 基于主动加热型FBG的土体干密度原位测量方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(2): 390 – 396. [ LIU Jie, SUN Mengya, SHI Bin, et al. Feasibility study on actively heated FBG methods for dry density measurement[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(2): 390 – 396. (in Chinese with English abstract) ]

编辑: 宗 爽