

DOI: 10.11779/CJGE2022S2037

# 温度静力触探的室内模型试验研究

莫品强<sup>1,2</sup>, 胡静<sup>1</sup>, 胡裕琛<sup>1,2</sup>, 马丹阳<sup>1,2</sup>, 任志文<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 为满足浅层地温能资源勘查与能源地下结构等领域的精确设计和高质量发展要求, 提出了能够精确、高效获取土层力学和热物性参数的新型温度静力触探测试 (T-CPT) 技术, 并介绍了一种 CUMT 加热型温度静力触探装置和测试流程。考虑到现场原位试验结果的影响因素复杂, 为探究单一因素对温度静力触探试验的影响规律并分析其贯入-传热机理, 设计了一系列 T-CPT 室内模型试验方案。通过 T-CPT 室内模型试验, 研究了探头加热时间和贯入深度对 T-CPT 加热效率和热物性参数解译的影响以及土样密度和含水率对探头贯入锥尖阻力的影响规律。试验结果表明, 试验中加热时间在 120 s 左右时, 探头的加热效率最佳; 当探头贯入较大深度时, 土体更密实, 反演的导热系数也更大; 此外, 密度越高的土体贯入阻力增大, 而含水率升高会适当降低贯入阻力。

**关键词:** 温度静力触探; 热物性参数; 模型试验; 地热能

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S2-0169-04

**作者简介:** 莫品强(1988—), 男, 浙江乐清人, 副教授, 博士生导师, 主要从事土力学与基础工程领域的教学与研究。

E-mail: pinqiang.mo@cumt.edu.cn

## Physical modelling of thermal-cone penetration tests

MO Pin-qiang<sup>1,2</sup>, HU Jing<sup>1</sup>, HU Yu-chen<sup>1,2</sup>, MA Dan-yang<sup>1,2</sup>, REN Zhi-wen<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to meet the requirements of precise design and high-quality development of shallow geothermal exploration and geothermal applications, a new in-situ testing technology is proposed for accurate and efficient estimations of both mechanics and thermal properties of soil layers by introducing the thermal-cone penetration tests (T-CPT). A CUMT type of heating T-CPT equipment and its testing method are then introduced. Considering the complex in-situ condition, a series of physical model tests are conducted to investigate the influences of heating time, penetration depth, soil density and moisture content on the thermal and mechanical responses, and therefore to look insights into the penetration and heat transfer mechanisms. The results of physical modelling indicate that 120s of heating time can reach the best heating efficiency of the probe, and the penetration at a larger depth with denser soil leads to a larger thermal conductivity after the back calculation. Additionally, the soil with larger relative density shows higher penetration resistance, whereas the increase of moisture content appears to decrease the penetration resistance.

**Key words:** thermal-cone penetration test; thermal parameter; model test; geothermal energy

## 0 引言

中国地热资源禀赋良好、潜力巨大, 可在中国未来能源结构中发挥重要作用<sup>[1]</sup>; 浅层地温能是一种近乎可无限开发利用的可再生清洁能源, 其中地源热泵技术可为建筑物提供供暖和制冷, 是一种绿色低碳节能技术<sup>[2]</sup>; 能源桩结合了地下热交换管与桩基础的优势, 有效利用了浅层地温能<sup>[3]</sup>。然而, 现有的浅层地温能资源勘查精度低, 缺乏系统的勘查技术体系, 勘查评价滞后造成地热能市场供需矛盾日益突出<sup>[1]</sup>; 如何精确高效地获得土层的热物性参数, 仍是高质量开

发浅层地温能所面临的主要难题。

热响应试验是目前广泛应用的原位测试土体热物性参数的方法, 但是它测试时间长、成本高, 且精确度低<sup>[4]</sup>。相比之下, 温度静力触探 (thermal-cone penetration test, T-CPT) 作为一种新型原位测试技术, 可同时获取土层的力学参数和热物性参数, 为土体力学性能、温度分布及换热能力评估提供数据, 直接服

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目 (52178374); 中国博士后科学基金特别资助项目 (2020T130699)

**收稿日期:** 2022-12-01

\*通信作者 (E-mail: TB22220013A41@cumt.edu.cn)

务于能源桩的优化设计和浅层地温能高效开发<sup>[5]</sup>。

本文通过系列温度静力触探室内模型试验,研究了加热时间和贯入深度对 T-CPT 热物性参数解译的影响以及含水率和密实度对锥尖阻力的影响,探究了单一因素的影响规律并分析了 T-CPT 贯入-传热机理。

## 1 模型试验系统

### 1.1 试验仪器与测试方法

本研究引入了一种新型温度静力触探测试技术,如图 1(a)所示,即在传统 CPT 探头摩擦套筒后面安装加热元件和温度传感器。图 1(b)给出了 T-CPT 测试技术操作流程。本试验的探头主体设备包括 CUMT 加热型温度探头、加热型双桥温度静力触探探头、探杆和导线。为了模拟半无限空间环境,减少边界效应,试验采用 1 m(长)×1 m(宽)×1 m(高)的组装模型箱。

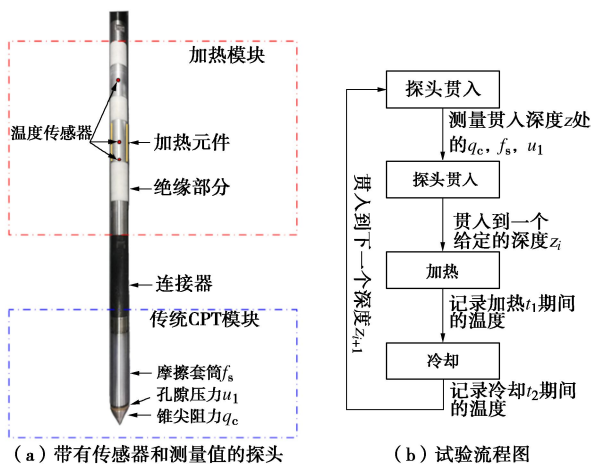


图 1 T-CPT 探头示意图

Fig. 1 Schematic of T-CPT

### 1.2 土样基本物理参数

试验砂土取自徐州,其最小干密度和最大干密度分别为 1.35, 1.59 g/cm<sup>3</sup>。采用筛分法测得颗粒级配如图 2 所示。其中,  $d_{60}=0.61$ ,  $d_{30}=0.4$ ,  $d_{10}=0.25$ , 不均匀系数  $C_u=2.44$ , 曲率系数  $C_v=1.05$ , 为匀粒土。

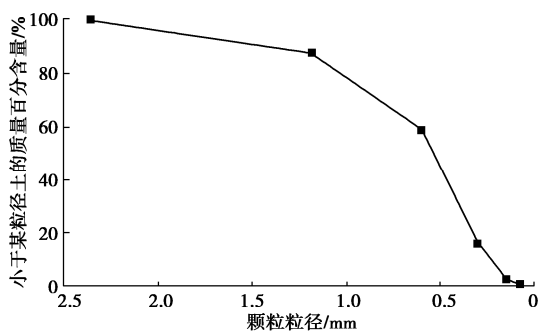


图 2 颗粒大小分布曲线

Fig. 2 Distribution curve of particle size

## 2 模型试验设计

### 2.1 温度静力触探试验方法

为研究探头加热时间、贯入深度对试验结果的影响,本试验共进行 12 次 T-CPT 测试,其中探头测温的深度  $h$  分别为 10R, 20R, 30R,  $R$  的大小为探头的外半径值。

试验步骤如下:首先将土样分层填入模型箱,在 3 个测试深度处预设温度传感器。连接好数据采集设备后,探头以 2 cm/s 的速度贯入土体,直至探头加热元件到达指定深度处停止。静置 30 min 后,启动探头内加热元件运行相应时间,随后等待土体温度消散至初始温度。

### 2.2 不同影响因素下的锥尖阻力分析方案及步骤

为研究土体的密实度和含水率对 T-CPT 测试锥尖阻力的影响,采用人工夯实和喷壶层层喷水的方法得到 3 种密实度和两种含水率的试样。贯入步骤与 2.1 节一致,探头贯入至 0.6 m 后停止试验。

## 3 结果分析

### 3.1 室内加热-散热试验结果分析

依据图 3 所示,在不同加热时长下,探头具有相同的加热散热趋势,而散热时长  $t_{cool}$  与加热时长  $t_{heat}$  比值却不相同。加热时长由 60, 120, 300 s 增至 600 s,该比值依次为 10.2, 8.0, 5.2, 4.0, 这说明加热时间越长、温差越大,热量在土体中的消散速度就越快。

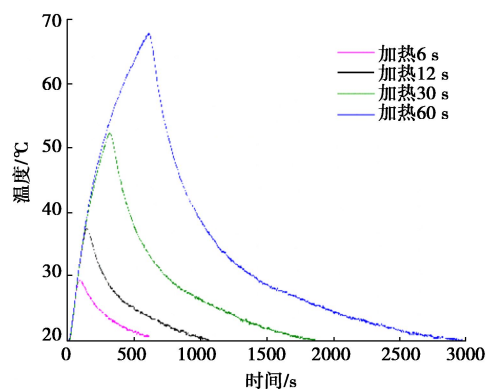


图 3  $h=10R$  处温度  $T_1$  随时间的变化

Fig. 3 Variation of temperature at  $h=10R$  with time

为研究加热时长与加热段的探头平均温升速率的关系(见图 4),计算出不同加热时间下的平均温升速率分别为  $v_{60s}=0.118$  °C/s,  $v_{120s}=0.134$  °C/s,  $v_{300s}=0.107$  °C/s,  $v_{600s}=0.079$  °C/s,可以看出加热时间在 120~300 s 内时,平均温升速率会达到峰值,此时升温效率处于较高水平。其中,加热时间为 0~2 s 时出现的曲线波动由于测试时间极短引起,可不予考虑。

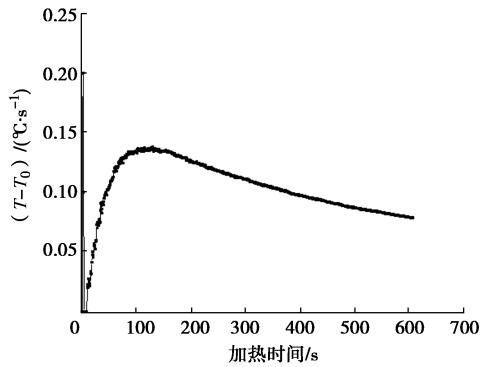


图 4 加热速率随加热时间的变化

Fig. 4 Variation of heating rate with heating time

图 5 (a), 5 (b) 分别显示了加热时间为 60, 120 s 时不同贯入深度下的探头温度变化曲线。由图 5 可知,  $h=10R$  处的温升高于  $h=20R$  和  $h=30R$  处的温升。这是由于下层土样的密实度和含水率更高, 因此其热量耗散速率高于上层土样, 导致在对探头的加热过程中, 有部分热量消散到土体中。而在图 5 (c), 5 (d) 中,  $h=20R$  深度处的温升落后于另外两个深度处的温升, 这种偏差可能是多种因素作用下的结果。

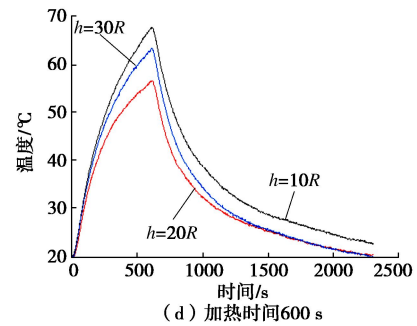
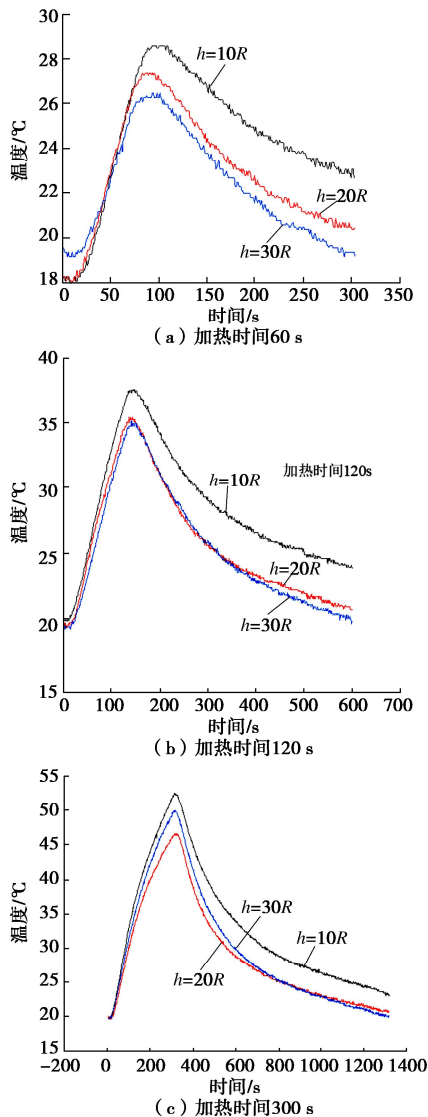


图 5 不同深度处的温度变化

Fig. 5 Variation of temperature at different depths

采用 Mo 等<sup>[6]</sup>的方法得到不同加热时间下反演的土体导热系数值, 结果如图 6 所示。其中, 计算得到的导热系数均大于土体取样测得的值, 这是由于取样的土体部分受到了扰动, 土颗粒之间接触不紧密进而引起传热能力下降。图 6 中土层深度为  $h=30R$  处的土体导热系数高于深度  $h=10R$ 、 $h=20R$  处的导热系数。在各深度处的导热系数随着加热时长的增大有所降低, 这是由于后面进行的加热-散热测试难免会受到前面测试的温度扰动, 土体的平均初始温度场略有升高, 因此计算得到的导热系数会略微下降。根据试验结果可知, 通过温度静力触探试验能够获得加-散热过程中桩-土温度响应规律, 同时根据探头温度数据能够反演出较为准确的土体导热系数。

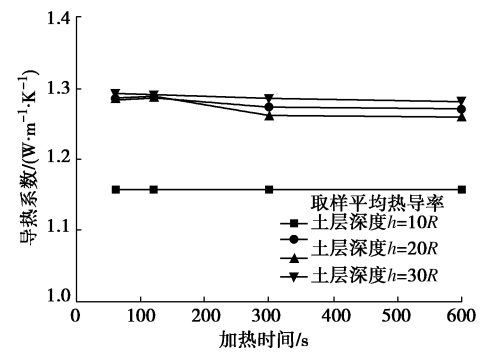


图 6 土样导热系数结果

Fig. 6 Results of thermal conductivity of soil samples

### 3.2 不同影响因素下的锥尖阻力分析

图 7 (a) 给出了不同密实度土样在贯入过程中的锥尖阻力值  $q_c$  随贯入深度的变化曲线。从图中可以发现, 中等密实土和密实土中的  $q_c$  值明显大于松散土样中的  $q_c$  值, 即贯入时土样越密实获得的锥尖阻力值越大。

图 7 (b) 中给出的是土样含水率饱和的锥尖阻力曲线, 与图 7 (a) 中土样含水率较低的锥尖阻力相比, 在贯入深度为 0~400 mm 阶段时, 饱和砂土  $q_c$  比干砂的  $q_c$  减少了 400~620 kPa。而在贯入深度为 400~600 mm 阶段时, 两者却相差无几, 这是由于加水后土样

静置的时间过短, 下层土体的含水率变化很小。

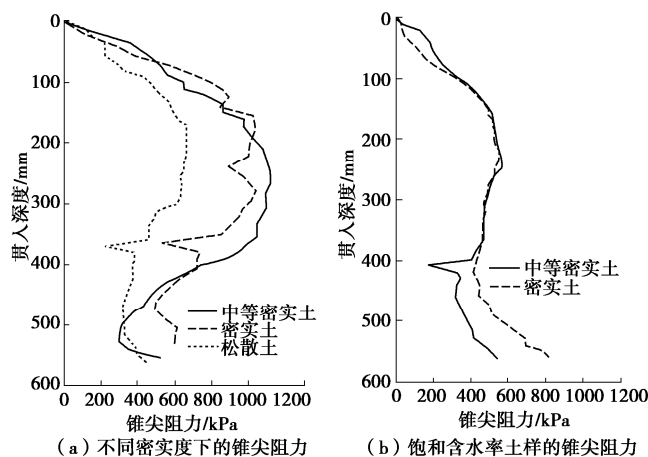


图 7 锥尖阻力随贯入深度的变化

Fig. 7 Variation of cone resistance with penetration depth

## 4 结 论

本文介绍了一种温度静力触探室内试验系统, 基于此分析了探头加热时间和不同土层深度对桩土传热的影响, 得到了加-散热过程中土体的温度响应, 验证了温度静力触探技术测试土体导热系数的可行性。此外, 还探究了不同密实度和含水率土样影响下探头锥尖阻力的变化规律。

(1) 加热时间越长土体散热越快, 而加热时间过长就会造成加热效率上的损耗。试验结果表明, 随着加热时长的增大, 探头对土体的加热效率是先增大后减小的, 并在 120 s 左右达到峰值。

(2) 在不同深度处的试验土样, 取样测得的土体热特性差异较小; 而试验土样的物理力学特性对试验温度响应具有一定的影响。结果表明, 贯入深度越大, 反演的导热系数值会略高。

(3) 试验土样越密实, 锥尖阻力值  $q_c$  越大; 而含水率越大,  $q_c$  则越小, 且  $q_c$  随贯入深度变化的曲线波动幅度也越小。

## 参考文献:

- [1] 王贵玲, 刘彦广, 朱 喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 1 - 9. (WANG Gui-ling, LIU Yan-guang, ZHU Xi, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1 - 9. (in Chinese))
- [2] 陈跃康. 新型绿色清洁能源浅层地温能[J]. 地球, 2020(2): 12 - 17. (CHEN Yue-kang. Shallow geothermal energy of new green clean energy[J]. Earth, 2020(2): 12 - 17. (in Chinese))
- [3] 刘汉龙, 孔纲强, 吴宏伟. 能量桩工程应用研究进展及 PCC 能量桩技术开发[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 176 - 181. (LIU Han-long, KONG Gang-qiang, CHARLES W W N. Applications of energy piles and technical development of PCC energy piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 176 - 181. (in Chinese))
- [4] LUTENEGGER A J, LALLY M J. In situ measurement of thermal conductivity in a soft clay[C]// Int Conf on In-Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories. Bandung, 2001.
- [5] 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): 354 - 361. (LIU Song-yu, GUO Yi-mu, ZHANG Guo-zhu, et al. Development and application of heat conduction CPT probe[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(2): 354 - 361. (in Chinese))
- [6] MO P Q, MA D Y, ZHU Q Y, et al. Interpretation of heating and cooling data from thermal cone penetration test using a 1D numerical model and a PSO algorithm[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 130: 103908.

(编校: 胡海霞)