

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.05.020



# 双 U 型埋管能源桩桩周岩土体温度场分布特征试验研究

赵海丰<sup>1,2</sup>, 唐荣彬<sup>3</sup>, 桂树强<sup>1</sup>, 骆进<sup>2</sup>, 贾甲<sup>2</sup>

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 武汉 430010; 2. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 武汉 430074; 3. 武汉科技大学 资源与环境工程学院, 武汉 430080)

**摘要:**以信阳地区两根相邻的双 U 型埋管能源桩为研究对象,通过较长时间的 TRT 增温测试-地温恢复-TPT 制冷测试模拟了能源桩的间歇性运行状态,在能源桩桩壁和岩土体中埋设传感器实测获得了能源桩运行过程中的桩周岩土体温度场分布。研究结果显示,能源桩运行过程中的传热表现为三维传热特征,桩端岩土体的温度变化滞后于桩体中间区域岩土体,建议能源桩设计时在桩端部位适当增加埋管量,以提高能源桩的换热效率;测试结果显示在经过 172 h 的 TRT 测试并进行约 25 d 的地温恢复后,桩周岩土体温度整体升高了约 1 °C,验证了岩土体温度扩散的缓慢性及其具有良好的热储性,同时也预示了地源热泵运行过程中存在冷热失衡的可能性。

**关键词:**能源桩;双 U 型埋管;温度场;分布特征

**中图分类号:**TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)05-0157-07

## Experimental analysis of ground temperature distribution of double-U type energy piles

Zhao Haifeng<sup>1,2</sup>, Tang Rongbin<sup>3</sup>, Gui Shuqiang<sup>1</sup>, Luo Jin<sup>2</sup>, Jia Jia<sup>2</sup>

(1. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, P. R. China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, P. R. China; 3. Faculty

of Resources and Environmental Engineering Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430080, P. R. China)

**Abstract:** Two double U-type buried tube energy piles in Xinyang region were investigated. Long time TRT tests and temperature recovery-TPT test are conducted to simulate the operating state of energy piles under intermittent conditions. Sensors are prepared in the energy pile wall and soil, the distribution of temperature field during the operation of energy piles is measured. The research results show energy piles in the operating process of heat transfer performs three-dimensional characteristics, the soil temperature in pile end position changes lag to the middle region of the pile body. It is hence suggested that the increase of the buried pipe in pile end position could increase energy pile heat exchange efficiency. The test results show the temperature of the soil around the pile is increased about 1 °C after temperature recovery about 25

**收稿日期:**2016-03-09

**基金项目:**国家自然科学基金(41502238)。

**作者简介:**赵海丰(1983-),男,高级工程师,博士,主要从事浅层地热能开发利用及岩土工程研究,(E-mail)zhaohaifeng83@163.com。

**Received:**2016-03-09

**Foundation item:**National Natural Science Foundation of China (No. 41502238).

**Author brief:**Zhao Haifeng (1983-), senior engineer, PhD, main research interest: development and utilization of shallow geothermal energy, design and research of geotechnical engineering, (E-mail)zhaohaifeng83@163.com.

days after the 172 h TRT, verifying the slow conduction and good heat storage of the rock and soil body. At the same time, the importance of the cold and heat imbalance of the ground source heat pump system is also predicted.

**Keywords:** energy piles; double-U type tubes; temperature field; distribution characteristics

能源桩利用桩基(建筑桩基、基坑围护桩、CFG桩等)进行热交换,在能源桩制热时,热量向四周传播而造成岩土体温度升高,制冷时则造成周边岩土体温度降低<sup>[1-3]</sup>。周期性运行时,能源桩向岩土体释放的热量与抽取的热量应保持平衡,以保证能源桩的持续高效运行,当能源桩的冷热负荷不平衡时,在周期性运行过程中就会造成岩土体温度的升高或下降,进而降低能源桩的运行效率<sup>[4-6]</sup>。因而,通过现场试验分析能源桩周边的温度场分布特征,对研究能源桩的布置及运行效率有重要意义。目前,针对能源桩传热过程中周边岩土体温度场的研究较多,但主要为根据考虑桩径和埋管型式不同提出了各种传热模型,进而进行了大量的理论计算和数值模拟,并进行对比分析<sup>[6-14]</sup>。其主要缺点在于缺乏现场试验验证,难以检验计算温度场的正确性及数值模拟的合理性。

针对上述存在的问题,在河南省信阳地区开展了现场原位试验,选择了两根相邻的双U型埋管能源桩,通过 TRT 测试(172 h)-地温恢复(598 h)-TPT 测试(142 h)模拟能源桩的实际运行工况,在桩周和桩壁埋设传感器监测了整个测试过程中的桩周温度,较为系统地研究了能源桩运行过程中的桩周温度场分布特征,为指导能源桩设计提供了科学依据。

## 1 试验方案及数值模拟方法

### 1.1 试验工点所依托项目概况

试验所依托的建筑主体为信阳宋基产业物流园信息大厦,该项目位于信阳市城区西北侧,该工程为二类高层,占地面积 11 985 m<sup>2</sup>,地下建筑面积 10 016 m<sup>2</sup>,地上建筑面积 11 776 m<sup>2</sup>,采用地源热泵中央空调系统来满足商业部分(除地下车库)的夏季供冷与冬季供热。项目地源热泵冷热源系统的总热负荷为 2 181 kW,总冷负荷为 2 183 kW,选用 2 台高温地源热泵机组。

地埋换热器系统采用桩基埋管与钻孔埋管相结合的复合理管方式,其中地埋管井数量为 360 口,地埋管换热器采用 De25 双 U 并联型埋管,竖直钻孔

埋管方式,钻孔管径为 130 mm,钻孔有效深度为 100 m,埋管间距 4 m×4 m。桩基埋管换热器数量为 210 口,桩基均采用钻孔灌注桩,桩径 600 mm,桩基埋管型式采用 De25 双 U 并联型埋管,如图 1 所示。为了保证水力平衡,对钻孔埋管设置两组集分水器,对桩基埋管设置一组集分水器。

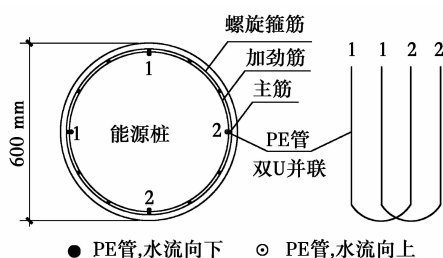


图 1 双 U 型并联埋管能源桩示意图

Fig. 1 Sketch map of Double U type pipe installation inside the energy piles

### 1.2 试验工点基本地质条件

试验工点所在处的地层主要为粉质粘土层和泥质粉砂岩层,粘土层上层为第四纪沉积,下层为第三纪沉积;泥质粉砂岩为白垩纪沉积形成,上层为强风化层,下层为中风化层。地层典型断面图如图 2 所示。

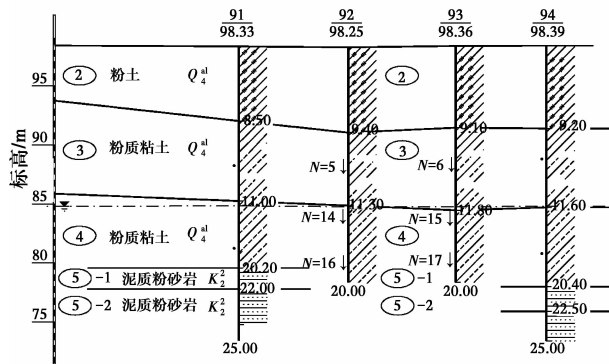


图 2 能源桩测试工点典型地质剖面图

Fig. 2 Geological profile in the testing point of the energy piles

地下水主要为赋存于填土中的上层滞水和粘性土层中的少量孔隙水。上层滞水水量较大,地下水

补给来源主要为大气降水、地表水,以蒸发及入渗形式排泄;粘性土层中的孔隙水,主要分布在粘性土层中和该层与泥质砂岩接触带中,以点状、片状分布,水量不大。

### 1.3 试验布置及试验过程

测试桩选择一四桩承台(其中同侧的两根桩为能源桩,分别定义为 1# 桩和 2# 桩)中的两根桩为试验对象,采用双 U 型并联埋管,沿钢筋笼内侧绑扎 De25HDPE 换热管,测试桩直径 600 mm,桩长 18.5 m,两桩间距 1.8 m。在两根试验桩的最外侧且靠近另外一根桩部位布设一组共 4 个应变传感器(可同时测试温度),在两根桩的中间部位布设一组温度传感器,温度传感器同样布设 4 个,传感器距离桩顶的距离分别为 3.0、8.0、13.0、18.0 m。位于桩体里的传感器通过绑扎的方式固定在钢筋笼上,然后浇筑混凝土;非桩体上的传感器均采用钻孔埋设,试验布置如图 3 所示。

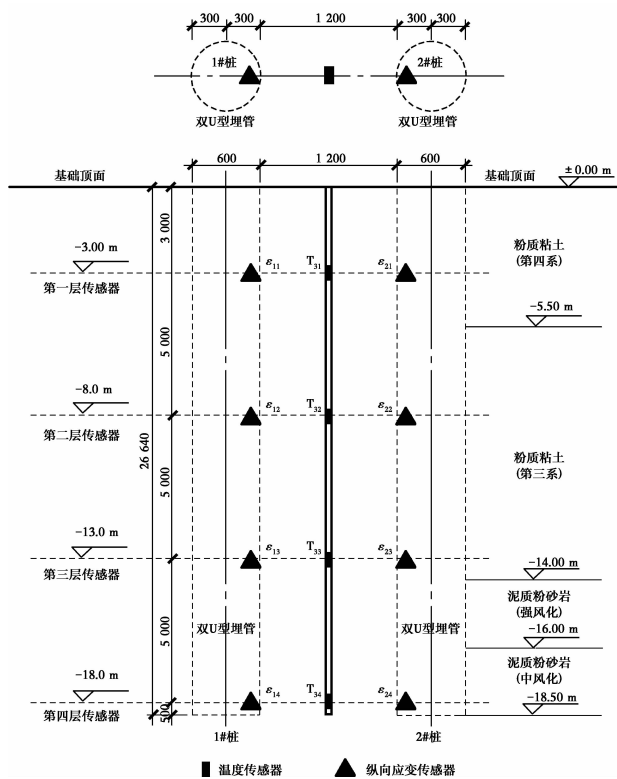


图 3 试验传感器布置图

Fig. 3 The setup of the sensors

能源桩热响应试验采用 TRT 法(恒热流法),冷响应试验采用 TPT 法(恒温法)。现场热(冷)响应测试仪采用清华大学研制的自动化岩土热响应测试仪,测试过程为首先对 1# 桩进行热响应测试 172 h,然后间隔 598 h,待地温恢复后再对双桩并联进行

冷响应测试 142 h。整个测试过程于 4 月 20 日—5 月 30 日之间完成,测试管内循环液流速为 0.8 m/s,TRT 测试的加热功率为 5 kW,TPT 测试的进口水温设定为 5 ℃。在试验过程中,每隔 5 min 自动采集进水口温度、出水口温度、流量、水泵功率、加热功率等参数,应变及温度自动采集仪每隔 30 min 采集数据一次。

### 1.4 桩壁及岩土体温度测试成果

图 4 为  $h=13$  m 处测试获得的桩壁温度及两桩之间土体温度随时间的变化曲线。图中,  $T_{12}$ 、 $T_{22}$  和  $T_{32}$  为 1# 测试、2# 测试桩和两桩中间(0.9 m 处)岩土体在深度 13 m 处的温度测试结果。

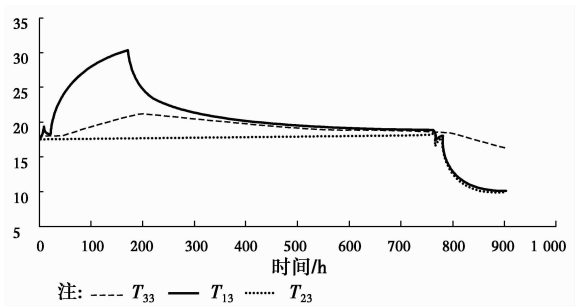


图 4 桩身温度随时间的变化曲线( $h=13.0$  m)

Fig. 4 The tested temperature with time of the energy pile in a depth of 13.0 m

### 1.5 数值模拟方法及验证

采用数值模拟软件 FEFLOW 6.0X 建立了实际尺寸的数值计算模型,计算岩土体区域范围为  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 20\text{ m}$ ,根据钻孔地质条件匹配相应的热物性参数,对埋管所在区域对网格进行加密处理,通过一维离散元模拟流体在管道中的流动<sup>[15-16]</sup>,数值模型如图 5 所示,热物性参数取值如表 1 所示。

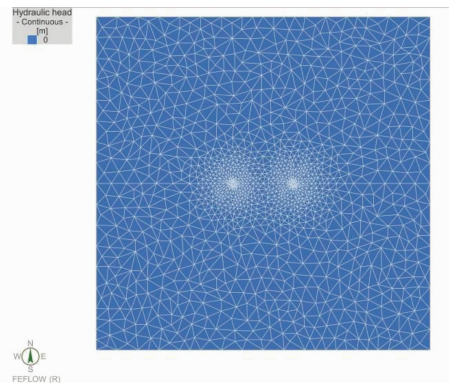


图 5 测试桩网格划分图( $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ )

Fig. 5 Mesh map of test piles in numerical modeling ( $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ )

表 1 能源桩热物性参数取值

Table 1 Thermo-physical properties of the energy piles

项目	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	导热系数/ ( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )	比热容/ ( $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K}^{-1})$ )
U 型管 (PE)	950	0.40	1 600
混凝土	2 500	2.22	3 800
岩土体	1 800	2.08	1 950
流体	1 000	0.65	4 200

为了验证数值模型和数值模拟方法的可靠性,分别对制热工况和制冷工况的传热过程进行了数值模拟,并将数值模拟结果与实测值进行了对比(图 6)。模拟值在前期(0~10 h)与实测值的平均偏差为  $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,此后平均偏差为  $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对误差随着时间的增加逐渐下降且误差值较小,验证了本文采用的数值模拟方法的可靠性。

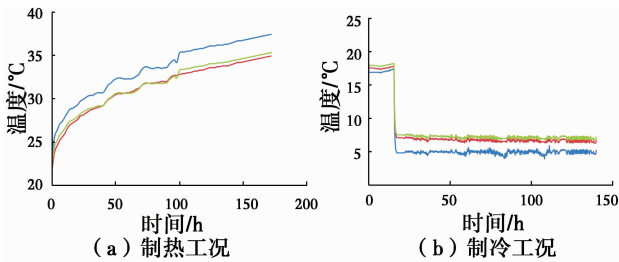


图 6 测试桩出口温度模拟值与实测值对比图

Fig. 6 Comparison of simulated and measured temperature of the tested energy pile

## 2 桩周横向温度场分布特征

图 7 给出了在不同时刻桩周温度场的分布图( $t=0\text{ h}$ :初始地温场; $t=172\text{ h}$ :热响应测试结束时; $t=200\text{ h}$ :地温恢复阶段; $t=762\text{ h}$ :地温恢复结束时; $t=904\text{ h}$ :冷响应测试结束时)。在  $t=0\text{ h}$  时,桩周为自然地温场,桩周温度与地温基本一致。在对 1# 桩制热过程中,能源桩桩壁温度逐渐升高,并向四周岩土体传递热量,随着时间的增加,温度场扩散范围逐渐变大,且温度随着距离的增加呈抛物线减小。制热过程结束后的地温恢复阶段,桩壁温度下降且速率最快,同时,因制热产生的热量进一步向周边岩土体扩散,温度场影响半径逐渐变大,在  $t=762\text{ h}$  地温恢复结束时,桩周温度基本恢复一致,各监测点的温度基本相同,但地温略高于初始地温场,平均温差约  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,验证了岩土体中温度的扩散是一

个缓慢的过程,因制热产生的热量并未消散,而是积累在桩周岩土体中,造成了桩周岩土体温度整体升高。在  $t=904\text{ h}$  双桩并联冷响应测试结束时,桩壁温度达到最低值,桩周温度随着距离的增加逐渐升高,在两桩中间位置的地温最高。

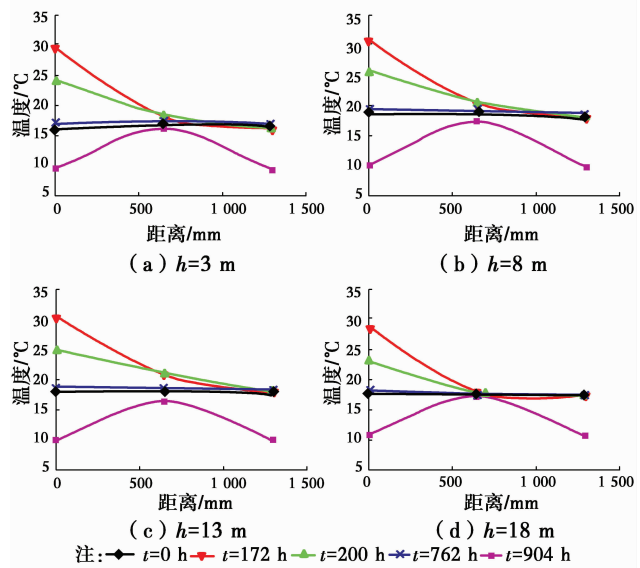


图 7 桩周横向温度场分布图

Fig. 7 Horizontal distribution of the ground temperature around the pile

测试成果显示能源桩换热过程中同时朝横向和纵向传热,受岩土体中温度梯度的影响,纵向传热主要表现在桩端部位,因而使得桩端温度相对桩体其他部位的温度存在差异,如图 8 所示。在制热结束时,桩顶和桩底截面的横向温度低于桩中间部位的横向温度;制冷结束时,桩顶和桩底截面的横向温度高于桩中间部位的横向温度;在地温自然恢复阶段,桩端横向地温恢复速率亦快于桩体其它部位,桩底地温基本恢复到原始地温。综上,受纵向传热的影响,桩端热扩散速率高于桩体中间部位。

通过 2.4 节建立的数值模型模拟了整个制热-地温恢复-制冷的传热过程,如图 9 所示。以  $h=13\text{ m}$  处为研究对象,在对 1# 桩制热时,桩壁温度最高,随着距离的增加温度逐渐下降,且随着时间的增加温度场影响范围逐渐扩大。在经过  $598\text{ h}$  地温恢复后进行双桩并联冷响应测试,在制冷结束时,1# 桩的温度场影响范围小于 2# 桩,主要原因在于 1# 桩在冷响应之前进行了热响应测试,虽然进行了长时间的地温恢复,但其地温仍然高于 2# 桩桩周的地温。通过进口水温数值模拟成果显示,在制冷时 1# 桩的出口水温比 2# 桩的出口水温高  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;根

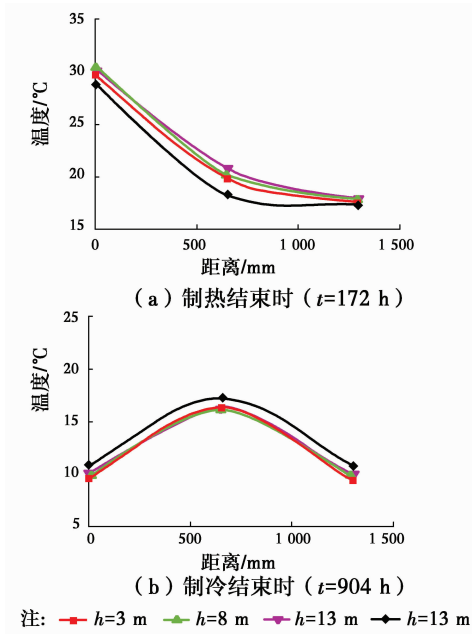


图 8 测试桩不同部位横向温度场分布对比图  
Fig. 8 Comparison of temperature with different distances to the energy piles in the ground

据图 6 的测试结果,在制冷测试结束时,1# 桩的桩壁平均温度亦比 2# 桩的桩壁温度高  $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,这与实测值亦较为一致。

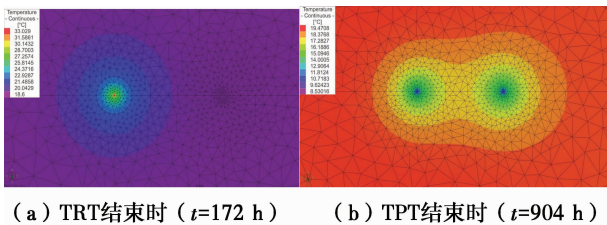


图 9 信息大厦双桩并联测试桩桩周横向温度场  
Fig. 9 Horizontal temperature field of two parallel connected energy piles in Xinxi building

图 10 给出了在制热和制冷结束时,  $h=13$  m 处桩周温度场模拟值与实测值的对比图。在测试范围内的模拟值与实测值表现为较好的一致性,制热时,在桩壁和两桩中间位置的温度相对误差分别为  $1.7\%$  和  $1.5\%$ ;制冷时,在桩壁和两桩中间位置的温度相对误差分别为  $3.2\%$  和  $1.8\%$ 。由于测试孔之间存在一定的距离,实测数据无法精确反应测试孔之间的温度场,而数值模拟成果可以计算任意位置点的温度,可较好的弥补实测成果的这一缺陷。

以两桩中心处的温度为研究对象( $0.9$  m 处),对  $h=13$  m 处的温度模拟值与实测值进行了对比,

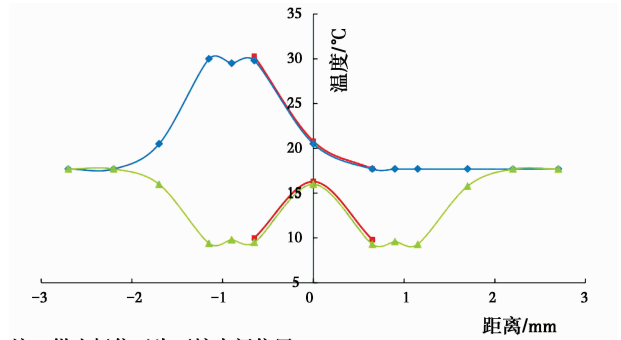


图 10 桩周横向温度场模拟值与实测值对比图 ( $h=13.0$  m)

Fig. 10 Comparison of simulated and measured temperature around the pile at depth of  $13.0$  m

如图 11 所示。受温度传播速率的影响,测试曲线在初期较为平缓,而后随着时间的增加温度逐渐上升或下降,温度变化速率与时间近似呈线性关系,实测值与模拟值表现为较好的一致性,两者的平均相对误差小于  $2.2\%$ 。

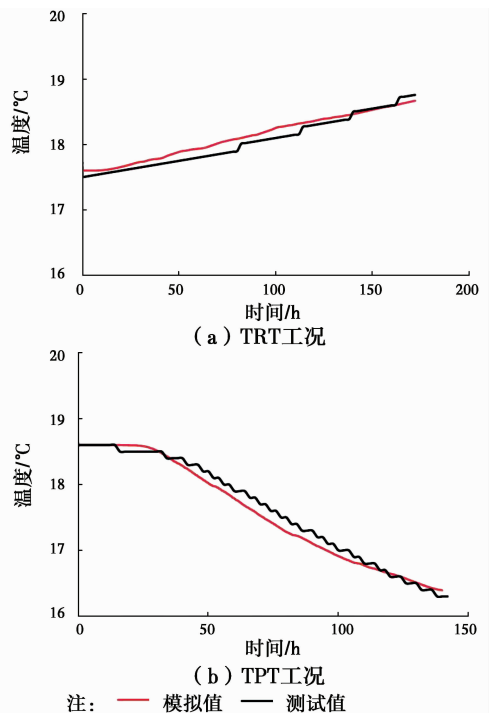


图 11 两桩中间点温度场模拟值与实测值对比图  
Fig. 11 Comparison of simulated and measured temperature in the middle of the two adjacent energy piles

### 3 桩周纵向温度场分布特征

图 12 给出了整个测试过程中 1# 桩、2# 桩及双桩中间位置( $0.9$  m 处)的纵向温度场。在初始阶

段, 桩周温度沿纵向基本一致, 与地温相同。在 1# 桩制热过程中, 桩壁温度及周边岩土体的温度逐渐上升, 受桩端纵向传热的影响, 桩端温度上升速率小于桩体中间区域, 在制热结束时, 桩底与桩中间部位的温差约  $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 在桩间岩土体中亦表现有相同的规律, 温差约  $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2# 测试桩受距离影响, 在制热过程中, 温度基本无变化。在地温恢复过程中, 桩端部位的地温恢复速率亦快于桩中间区域, 在恢复地温结束时, 桩端温度最为接近初始地温。在制冷时, 桩周纵向温度场表现与制热工况相反的规律, 桩端区域的温度下降速率慢于桩中间部位; 在制冷结束时, 桩中间区域和桩底的温差约  $-1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 两桩中间位置的温差约  $-0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。综上, 受能源桩运行时纵向传热的影响, 桩端温度上升或下降速率慢于桩体中间部位, 因而在桩周岩土体内产生了纵向的温度差。根据这一结论, 在布置能源桩埋管时, 在桩端部位适当加密埋管, 可以获得更好的换热效率。

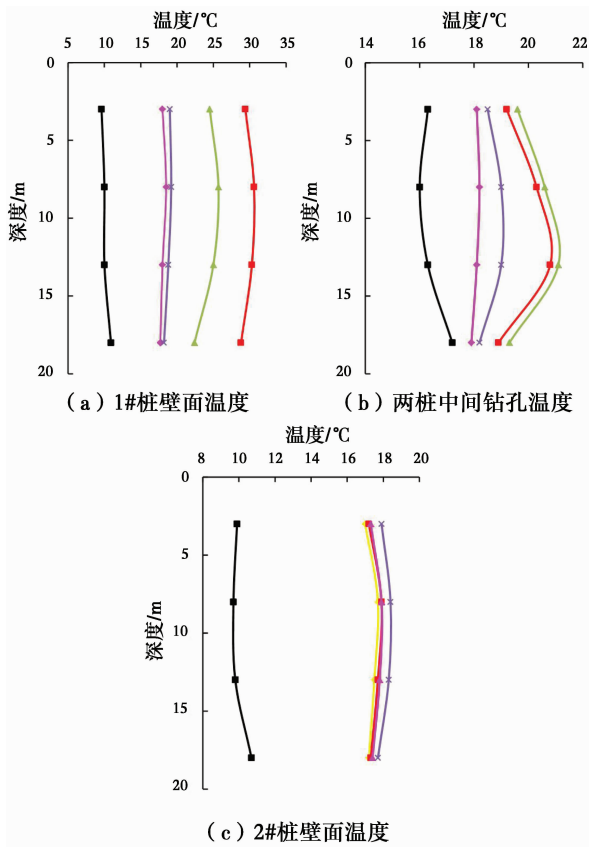


图 12 桩周纵向温度场分布图

Fig. 12 Vertical temperature distribution along the energy pile

图 13 和图 14 通过数值模拟分别给出了在制热和制冷结束时, 桩内及桩周温度场的分布图。在桩壁部位的温度始终最高(低), 而后向四周温度逐渐

下降(上升); 在桩体内部温度高于相同距离岩土体的温度, 主要原因在于混凝土的导热系数高于岩土体且能源桩的截面十分有限; 在整个热(冷)响应测试时间范围内, 温度的作用半径均小于  $1.0\text{ m}$ , 这与测试结果保持了一致性, 也验证了岩土体传热过程的缓慢性及能源桩运行过程中岩土体冷热平衡的重要性。

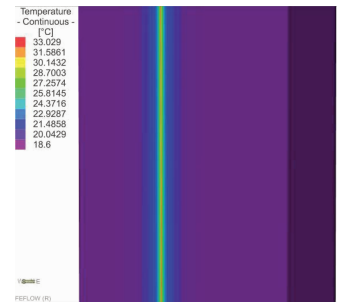


图 13 制热结束时的纵向温度场(局部放大图)  
Fig. 13 Vertical temperature distribution at the end of the heating period (Map Zoom-in)

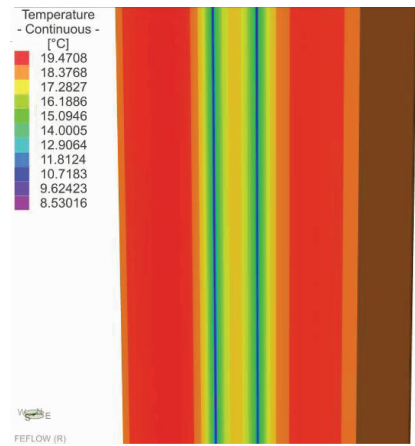


图 14 制冷结束时的纵向温度场(局部放大图)  
Fig. 14 Vertical temperature distribution at the end of the cooling period (Map Zoom-in)

## 4 结论

在信阳地区选择了两根能源桩, 进行了较长时间的 TRT 测试-地温恢复-TPT 测试模拟能源桩的实际运行状态测试, 获得了桩周岩土体的温度场分布特征。

1) 能源桩在制热(冷)时, 以能源桩桩壁为起点, 桩周温度场远离桩壁呈抛物线下降(上升), 桩周任意点的温度随时间近似呈线性变化。

2) 能源桩实际运行时, 在桩周岩土体中表现为三维传热特性, 桩周温度场在纵向方向上存在差异。

在制热工况时,表现为桩体中间区域岩土体的温度高且基本一致,而靠近桩端一定范围内的岩土体温度相对较低,且越靠近桩端,温度越低;在制冷时,桩周温度场具有相反的规律。综上,建议能源桩设计时在桩端区域适当增加埋管量以提高换热效率。

3)通过实测数据验证了岩土体温度扩散的缓慢性及其具有良好的热储性,在制热结束并进行长时间的地温恢复后,桩周岩土体温度升高了约 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,因制热产生的热量并未消散,而是积累在桩周岩土体中,造成了岩土体温度的升高,预示了地源热泵运行过程中存在冷热失衡的可能性。

### 参考文献:

- [1] BRANDL H. Energy foundations and other thermo-active ground structures [J]. Géotechnique, 2006, 56(2): 81-122.
- [2] BRANDL H. Thermo-active ground-source structures for heating and cooling [J]. Procedia Engineering, 2013(2): 9-18.
- [3] SARBU L, SEBARCHIEVICI C. General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings[J]. Energy and Buildings, 2014, 70: 441-454.
- [4] MORINO K, OKA T. Study on heat exchanged in soil by circulating water in a steel pile[J]. Energy and Buildings, 1994, 21(1): 65-78.
- [5] 方肇洪,刁乃仁. 地理管地源热泵技术(精)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
FANG Z H, DIAO L R. Application research on buried ground-source heat pump technology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [6] BOSE J E. Design and installations standards [J]. International Ground Source Heat Pump Association, Stillwater, 1991, (3): 22-25.
- [7] 桂树强,程晓辉,张志鹏. 地源热泵桩基与钻孔埋管换热器换热性能比较[J]. 土木建筑与环境工程, 2013(3): 151-156.  
GUI S Q, CHEN X H, ZHANG Z P. Comparative analysis of heat exchange performance of energy piles and borehole heat exchangers in GSHP system [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(3): 151-156. (in Chinese)
- [8] 曾和义,方肇洪. 双U型埋管地热换热器的传热模型[J]. 山东建筑工程学院学报, 2003(1): 11-17.  
ZENG H Y, FANG Z H. A heat transfer model for double U-tube geothermal heat exchangers [J]. Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering, 2003(1): 11-17. (in Chinese)
- [9] 方肇洪,刁乃仁,曾和义. 地热换热器的传热分析[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(4): 685-687.  
FANG Z H, DIAO L R, ZENG H Y. Heat transfer analysis of ground heat exchangers [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(4): 685-687. (in Chinese)
- [10] LALOU L. Advances in energy piles analyses [J]. Mitteilungen der Geotechnik Schweiz Publication de la Geotechnique Suisse, 2010: 23.
- [11] LIU X, LU S, HUGHES P, et al. A comparative study of the status of GSHP applications in the United States and China [J]. Renew Sust Energy Review, 2015, 48: 558-570.
- [12] OOKA R, SEKINE K, MUTSUMI, et al. Development of a ground source heat pump system with ground heat exchanger utilizing the cast-in place concrete pile foundations of a building [J]. EcoStock, 2007(8): 165-170.
- [13] YASUHIRO H, HISASHI S, AKOTO N, et al. Field performance of an energy pile system for space heating [J]. Energy and Buildings, 2007, 39(5): 517-524.
- [14] GO G H, LEE S R, YOON S, et al. Design of spiral coil PHC energy pile considering effective borehole [J]. Appl Energy, 2014, 125: 165-78.
- [15] DIERSCH H J G, BAUER D, HEIDEMANN W, et al. Finite element formulation for borehole heat exchangers in modeling geothermal heating systems by Feflow [J]. Wasy Software Feflow White Paper, 2010, 5: 5-96.
- [16] LUO J, ROHN J, BAYER M, et al. Analysis on performance of borehole heat exchanger in a layered subsurface [J]. Applied Energy, 2014, 123: 55-65.