

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.01.012

## 外置双U型静钻根植工法能源桩换热性能研究\*

娄扬<sup>1,2</sup>, 方鹏飞<sup>3,4</sup>, 张日红<sup>5</sup>, 谢新宇<sup>1</sup>, 王忠瑾<sup>3,4</sup>, 赖欣<sup>3</sup>,  
何广<sup>2</sup>, 赵嵩<sup>1</sup>

(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 重庆交通大学, 重庆 400074; 3. 浙大宁波理工学院, 浙江 宁波 315100; 4. 浙江大学宁波研究院, 浙江 宁波 315100; 5. 中淳高科桩业股份有限公司, 浙江 宁波 315145)

**摘要:** 为探究外置双U型静钻根植工法能源桩换热性能, 通过现场热响应试验, 利用热源理论初步分析其岩土综合导热系数, 建立三维传热数值模型并进行验证。利用三维传热数值模型分析换热管间距及其导热系数、换热液流速和桩周水泥土导热系数等因素对该新型桩换热性能的影响。分析结果表明, 试桩区域岩土综合导热系数为 $1.64 \text{ W}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ 。提高换热管间距、换热管导热系数、换热液流速和桩周水泥土导热系数均能提高能源桩的换热性能, 但当换热管间距大于 $0.25 \text{ m}$ , 换热液流速达到紊流态, 换热管和桩周水泥土导热系数高于岩土综合导热系数后, 提高上述参数对能源桩换热性能的提高贡献不大。

**关键词:** 能源桩; 静钻根植工法; 换热性能; 热响应试验; 岩土综合导热系数

**中图分类号:** TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)01-0100-10

## Heat Transfer Performance Analysis of Static Drill Rooted Geothermal Energy Piles with External Double U-tubes

LOU Yang<sup>1,2</sup>, FANG Pengfei<sup>3,4</sup>, ZHANG Rihong<sup>5</sup>, XIE Xinyu<sup>1</sup>, WANG ZhongJin<sup>3,4</sup>, LAI Xin<sup>3</sup>,  
HE Guang<sup>2</sup>, ZHAO Song<sup>1</sup>

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. NingboTech University, Ningbo 315100, China; 4. Ningbo Research Institute, Zhejiang University, Ningbo 315100, China; 5. ZCONE High-tech Pile Industry Co., Ltd., Ningbo 315145, China)

**Abstract:** In order to explore the heat transfer performance of the Static Drill Rooted Energy Pile (SDREP), an equivalent thermal conductivity of the ground was investigated by using heat source theory based on the field thermal response test. A three-dimensional heat transfer numerical model of the energy pile was established and verified, and the influences of the tube spacing and its thermal conductivity, the fluid velocity, and the thermal conductivity of cement-soil around the pile on the heat transfer performance of the SDREP were analyzed. The results show that the ground equivalent thermal conductivity is  $1.64 \text{ W}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ . The heat transfer performance of the energy pile can be improved by increasing the spacing of the heat exchange pipe and its thermal conductivity, the fluid velocity,

\* 收稿日期: 2018-12-25; 修回日期: 2019-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51708496)、浙江省自然科学基金项目(LY16E080010)资助

作者简介: 娄扬(1994—), 男, 博士研究生。主要从事地热能源桩方面的研究。E-mail: nhxx1994@hotmail.com

通讯作者: 方鹏飞(1975—), 男, 副教授, 博士。主要从事桩基工程方面的研究。E-mail: fpf@nit.zju.edu.cn

and the thermal conductivity of soil-cement around the pile. However, when the tube spacing is over 0.25 m, the fluid velocity reaching a turbulent state, or the thermal conductivity of tube and cement-soil is higher than that of the ground, there is little contribution to improve the heat transfer performance of the energy pile.

**Keywords:** geothermal energy pile; static drill rooted method; heat transfer performance; thermal response test; ground equivalent thermal conductivity

## 引言

近年来,随着人民生活水平的提高,空调等供暖制冷设备走进了千家万户,但是随之而来的是建筑能耗的急剧增加,已占社会总能耗的25%~30%<sup>[1]</sup>。在寻找新的高效节能、无污染的供暖制冷技术过程中,地源热泵技术进入了人们的视线。地源热泵技术利用地表以下200 m深度范围内的岩土体温度在无干扰时常年保持恒定的特性,在冬天,地表气温低而地下温度高,从土层提取热量,通过热泵和压缩机给建筑供暖;在夏天,地表气温高而土层温度低,将建筑物的热量转换到地下,这样就实现夏天制冷而冬天供热。

能源桩将桩基础与热交换管相结合,不但可以承担上部建筑的荷载,而且桩内有热交换液,可利用浅层地热能给建筑或基础设施制冷和供热<sup>[2]</sup>。由于将热交换器埋设在桩基础中,节省了额外的钻孔费用,不需占据大量的室外面积,节省了地下空间,而且施工质量易保证,具有显著的经济和社会效益<sup>[3]</sup>。该技术已在欧洲得到较广泛应用<sup>[4-5]</sup>,近几年国内也逐渐开展相关的研究与应用工作。

静钻根植工法能源桩的载体是使用静钻根植技术的预应力高强度混凝土管桩(简称PHC桩),这是一种由PHC桩和桩周水泥土共同抵抗荷载的新型复合桩。该桩与钻孔灌注能源桩相比,有较高的承载力、更低的造价、更少的泥浆排放量;与一般预制能源桩相比,可避免挤土效应,无需取土植管,保证导热管质量<sup>[6-8]</sup>。

岩土综合导热系数是能源桩换热系统的重要参数,对整个换热系统的设计、运行效果以及投资成本起控制作用<sup>[9]</sup>。目前工程上应用较多的岩土热响应试验法能较为准确地估算岩土综合导热系数<sup>[10]</sup>。国内外学者利用试验和数值分析等方

法<sup>[11-15]</sup>,针对传统地埋管换热器,研究了岩土比热容、钻孔深度、不同埋管形式和管材、地下水位、测试时间、季节等因素对地埋管换热器换热性能的影响。但国内外对静钻根植工法能源桩换热性能的研究非常少。

本文基于静钻根植工法能源桩现场热响应试验,利用热源理论对岩土综合导热系数进行分析;建立三维数值传热模型,研究静钻根植工法能源桩换热性能的影响因素及其影响规律。

## 1 静钻根植工法能源桩施工简介

静钻根植工法能源桩是一种新型能源桩,它是通过螺旋钻钻孔、喷浆搅拌形成水泥土后,将预制管桩和换热管绑扎后放入钻孔中形成的组合型桩基,如图1所示,具体的施工步骤如下:

(1)钻孔:根据具体的地质条件和设计意图,确定钻孔的直径、深度与位置,使用特殊螺旋钻机土成孔并对孔壁进行修整。

(2)注浆:待钻孔修整完毕注入水泥浆,同时反复升降钻机进行搅拌,保证钻孔内水泥浆均匀后拔出钻杆。

(3)植桩:预先在第一节预制管桩底部位置固定钢套箍,对U型换热管路内注水。拔出钻杆后将预制管桩吊起到钻孔上空0.5 m左右,在U型换热管的底端与套箍进行固定连接后,缓慢将预制管桩沉入钻孔水泥浆中。随着预制桩下沉,换热管同桩体沉入水泥土中。

(4)固定换热管:将第一节预制管桩沉入水泥浆5 m左右,利用钢丝对换热管与桩身进行绑扎固定,随后每隔5 m左右进行固定。

(5)接桩:第一节预制管桩绝大部分沉入水泥土后,固定其桩头,通过端板焊接的方式进行连接。按照(4)中方式依次对换热管进行固定,直至基桩施工完毕。

(6)封口:利用盖子对换热管路进行封闭,防止

异物进入堵塞管路。

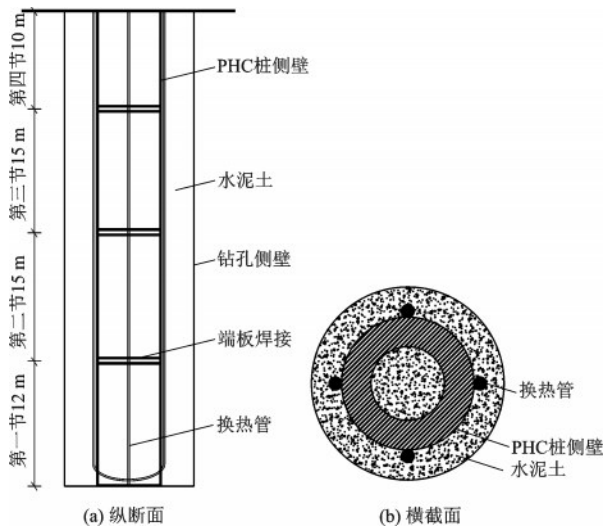


图1 静钻根植工法能源桩示意

Fig.1 Schematic diagram of static drill rooted energy pile

## 2 能源桩热响应试验

### 2.1 工程概况

能源桩试验工程位于浙江省宁波市。工程包括地下一层停车场和地上五层框架结构。试桩采用工程桩,PHC桩直径为500 mm,桩长52 m。试桩分4节,从上到下依次为10、15、15、12 m,使用静钻根植工法施工。试验场地的基本物理力学指标见表1。

### 2.2 现场热响应试验

#### 2.2.1 试验设备

热响应试验采用MCGS岩土热响应试验仪,试

验系统由保温层、温度传感器、流量传感器、水泵、加热器、水箱、数据采集仪等组成,如图2所示。

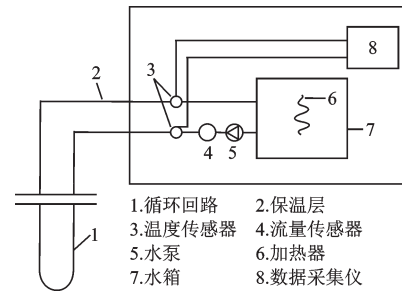


图2 岩土热响应试验设备示意

Fig.2 Schematic diagram of testing equipment

#### 2.2.2 试验参数

选择一根能源桩进行热响应试验,其参数见表2。其中,试桩采用工程桩,桩顶标高位于地下室板底(地表下6 m)。因此,试验时能源桩实际换热垂直深度为58 m。试桩换热管采用桩外侧埋管形式,布置方式如图1所示。

#### 2.2.3 试验过程

通过水泵将导热液吸入水箱,经过水箱加热器加热后流入能源桩,与地下深处的岩土热交换后返回水箱。进水口和出水口设有温度传感器和流量传感器,最终通过数据采集仪,对温度和流量进行采集、显示并保存。

根据《地源热泵系统工程技术规范》<sup>[16]</sup>的要求和工程实际情况,试验将换热液流速控制在0.53 m/s左右,直到进、出口水温趋于一致后,将水温作为初始岩土温度 $T_0$ , $T_0=20.71\text{ }^\circ\text{C}$ 。然后开启加热器并保持3 kW左右的功率加热(实测平均值为2.87 kW),持续运行48 h,使进、出口水温基本稳定。

表1 土的基本物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil

土层类别	深度/m	重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	含水量/ %	导热系数/ ( $\text{W}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ )	比热容/ ( $\text{J}(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ )	压缩模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^\circ$ )
②淤泥质黏土	0~8	17.2	51.0	1.11	1 840	2.28	10.4	8.3
⑤-1黏土	8~15	19.0	32.7	1.26	1 670	6.99	37.8	16.9
⑤-2粉质黏土	15~20	18.8	33.5	1.43	1 620	4.46	24.4	14.2
⑥-1粉质黏土	20~37	18.7	34.9	1.44	1 620	4.41	19.8	13.3
⑥-3黏土	37~45	18.3	37.9	1.52	1 730	5.28	24.3	13.3
⑥-4粉质黏土	45~52	19.1	31.9	1.63	1 620	6.65	26.7	16.9
⑦-1粉质黏土	52~57	19.2	30.4	1.71	1 620	8.28	42.0	16.8
⑦-3粉质黏土	57~60	19.4	30.0	1.74	1 620	8.22	42.9	17.0

表2 试验参数

Table 2 Test parameters

名称	试桩
埋管形式	外置双U并联
预制管桩外/内径	500/300 mm
钻孔直径	650 mm
垂直深度	58 m
回填材料	混凝土
换热管材料	PE100
换热管型号	DN32
换热管导热系数	0.42 W/(m·K)

### 2.3 试验结果分析

#### 2.3.1 循环水温

如图3所示,换热器进、出水温度在开始加热的10 h内温度上升很快,进水温度从20.71℃上升至26.09℃,出水温度从20.71℃上升至24.64℃;10 h后两者上升速度减缓,逐渐稳定,在24 h后两者温度基本保持稳定。试验开始48 h后,进、出水温度分别稳定在28.55℃和27.36℃,水温差在1℃左右。

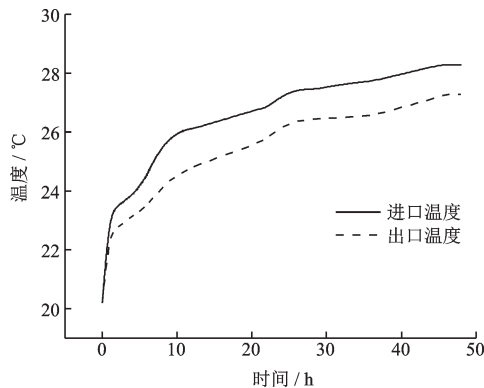


图3 试桩进出水温变化曲线

Fig.3 Water temperature response curves for the inlet and outlet of the test pile

#### 2.3.2 试验结果及分析

根据热源分析理论,对试验结果进行分析<sup>[17-18]</sup>。设进水温度为 $T_{in}$ ,出水温度为 $T_{out}$ ,进出口的平均水温为 $\bar{T}$ 。建立平均水温与时间对数的关系,拟合曲线求出 $k$ 值,利用式(1)得到岩土综合导热系数 $\lambda_0$ 。拟合结果如图4所示,分析结果见表3。

$$\bar{T} = k \ln(t) + b \quad (1)$$

式中, $k = \frac{Q}{4\pi\lambda H}$ ;  $Q$ 为加热功率, W;  $k$ 为拟合曲线斜率;  $H$ 为垂直换热长度, m;  $\lambda$ 为岩土综合导热系数,  $W/(m \cdot K)^{-1}$ 。

表3 分析结果

Table 3 Analysis results

名称	分析结果
加热功率 $Q$	2 870 W
垂直换热长度 $H$	58 m
拟合曲线斜率 $k$	2.399 1
岩土综合导热系数 $\lambda$	1.64 W/(m·K)

由图4可以发现,由于前期水温波动较大,根据上海市《地源热泵系统技术规程》<sup>[19]</sup>的建议,舍去不稳定的数据。由表1可知,试桩所在场地土层以黏土和粉质黏土为主,重度在19 kN/m<sup>3</sup>左右,且含水量都超过30%,属于高含水量致密黏土,其岩土综合导热系数为1.4~1.9 W/(m·K)<sup>[16]</sup>。宁波市城区岩土综合导热系数为1.5~1.7 W/(m·K)<sup>[20]</sup>。可见岩土综合导热系数1.64 W/(m·K)在合理区间内。

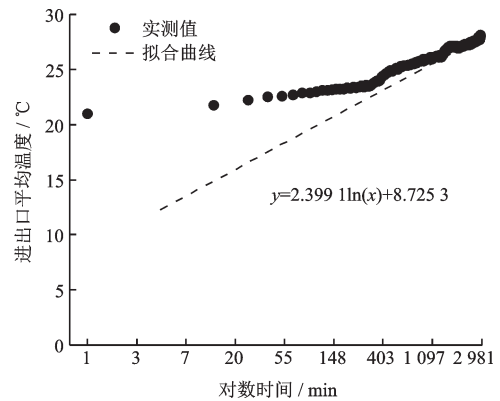


图4 进出口平均水温拟合曲线

Fig.4 Average water temperature fitting curve for the inlet and outlet

## 3 数值计算模型

### 3.1 假设条件

由于能源桩传热过程实际上是一个复杂的三维非稳态传热过程,模型作如下假设:

(1)忽略地表温度变化对土体的温度影响;(2)初始温度相同,且初始温度沿深度分布均匀,不随深度改变而变化;(3)土体的热物性参数为常数,不随温度改变而变化;(4)桩周水泥土分布均匀且其热物性参数为常数;(5)忽略地下水渗流的影响。

### 3.2 模型尺寸与边界条件

采用有限元软件 COMSOL Multiphysics 建立

三维有限元模型,计算区域为10 m×60 m。土体半径为5 m,高度为60 m(模型运算结果表明足以消除边界条件影响);桩外径0.5 m,内径0.3 m,长度52 m的圆环体;桩芯水泥土为长52 m,直径0.3 m的圆柱。桩周水泥土层为长52 m,内径0.5 m,外径为0.65 m的圆环柱。桩周水泥土层上方设长度6 m,直径0.65 m的圆柱体,模拟桩顶到地表6 m将换热管覆盖的地下室混凝土。土体模型按照现场土层的分层和水泥土层设置。根据表1的土层分布情况,将模型土层分成8层,如图5所示。

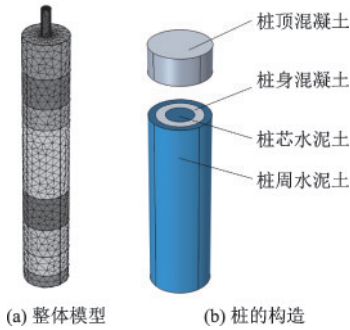


图5 能源桩三维数值模型

Fig.5 3D numerical model for the energy pile

土体与桩的传热过程采用固体传热模块进行模拟,结合现场热响应试验,初始条件为 $t=0$  s,  $T_0=20.71$  °C。固体传热边界为绝热边界条件,桩与岩土体之间的界面耦合(几何连续、热流密度连续)。各材料热物性系数见表1和表4<sup>[20-24]</sup>。

表4 模型参数

Table 4 Model parameters

材料	重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	导热系数/ (W(m·K) <sup>-1</sup> )	比热/ (J(kg·K) <sup>-1</sup> )
混凝土	25	1.72	920
水	10	0.60	4 200
水泥土	19	1.70	1 900

换热管的传热过程采用非等温管道流模块进行模拟,初始条件为 $t=0$  s,  $T_m=20.71$  °C,  $P=101\ 325$  Pa。非等温管道流的入口为定速度边界条件 $u=0.53$  m/s;出口为热流出边界条件。管道流的加热功率与现场试验相同,为2.87 kW。设置壁传热边界条件,管壁厚3 mm,采用换热管实际导热系数0.42 W/(m·K),管壁外部温度使用固体温度(固体传热模块温度),从而实现固体传热和非等温管

道流在边界上的温度耦合。换热管间距为0.3 m。模型采用线单元对换热管部分进行网格划分,单元尺寸约为0.1 m,采用自由四面体单元对剩余部分(桩体和岩土体部分)进行网格划分。模型的模拟运行时间为48 h。

### 3.3 控制方程

能源桩与周围土体的换热过程可分为钻孔内传热过程和钻孔外传热过程,其中包括桩与换热管、桩与土体间的传热。在这个过程中,换热管中的热交换是对流换热;桩与换热管、桩与桩周水泥土、水泥土与土体热交换是热传导。

对于对流换热问题,本文利用非等温管道流模块进行求解。管道流是将三维管道流问题简化为三维曲线,极大地提高计算效率,管道内的流体热平衡方程可以表示为<sup>[25]</sup>:

$$\rho A C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho A C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot A \lambda \Delta T + Q + Q_p + f_D \frac{\rho A}{2d_h} |u|^3 + Q_{wall} \quad (2)$$

式中, $\rho$ 为流体密度,kg/m<sup>3</sup>;A为管横截面积,m<sup>2</sup>;C<sub>p</sub>为比热,J/(kg·K);u为流体切线流速,m/s;T为流体温度,K;Q为热源,W/m;f<sub>D</sub> $\rho A |u|^3 / 2d_h$ 为因粘性剪切耗散的摩擦热,W/m;f<sub>D</sub>为达西摩擦系数;d<sub>h</sub>为水力直径,m;Q<sub>wall</sub>为管壁热交换的热量,W/m;Q<sub>p</sub>为压力做功,W/m。

管道内流体动量与连续性方程为:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla u = -\nabla p - f_D \frac{\rho A}{2d_h} u |u|^2 + F \quad (3)$$

$$\frac{\partial A \rho}{\partial t} + \nabla (A \rho u) = 0 \quad (4)$$

式中,F为体积力项,kN/m<sup>3</sup>。

对于热传导问题,本文采用固体传热模块进行计算,其控制方程在傅里叶定律基础上建立:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q = Q \quad (5)$$

$$q = -k \nabla T \quad (6)$$

式中, $\rho$ 为固体密度,kg/m<sup>3</sup>;C<sub>p</sub>为固体比热,J/(kg·K);T为固体温度,K;q为热流密度,W/m<sup>2</sup>;k为固体导热系数,W(m·K)<sup>-1</sup>;Q为热源,W/m<sup>3</sup>。

### 3.4 模型验证

数值传热模型与试验实测值的对比如图6所

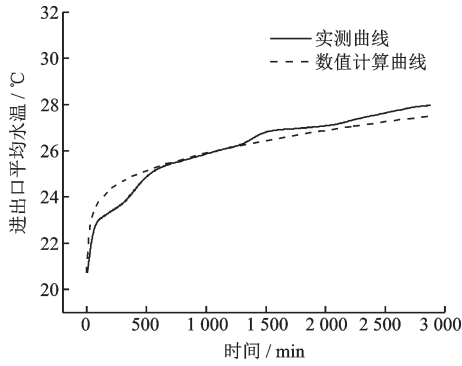


图6 进出口平均水温变化曲线

Fig.6 Average water temperature curves for the inlet and outlet

示。图6表示进出口平均水温随时间的变化,可以发现在试验前12 h,两者存在较大差异,可能因为在现场试验前期,供电不稳定,实际功率在2.1~3.6 kW波动,而数值计算采用的功率恒定。同时可以发现在12 h后,温度变化趋于稳定,两者吻合较好,表明三维传热数值模型能有效模拟静钻根植工法能源桩的传热过程。

## 4 能源桩换热性能分析

### 4.1 换热管间距的影响

静钻根植工法能源桩换热管的埋设方式与传统的钻孔埋管换热器不同。传统埋管换热器的钻孔孔径一般为110~130 mm,换热管的间距被钻孔孔径限制。而静钻根植工法能源桩采用桩外侧埋管方式,将换热管固定于预制管桩外侧壁,在钻孔后换热管随着预制管桩沉入地下。预制管桩的直径为500 mm,而钻孔直径为650 mm。由于其直径远大于传统钻孔,换热管的埋设间距也较大。U型换热管的两管靠的越近,它们之间的热阻就会越小,会出现热短路现象,出水管温度会受进水管温度影响。为了探究管间距对能源桩换热性能的影响,本文讨论了6种管间距 $D$ (分别为0.1、0.15、0.2、0.25、0.3、0.35 m)对能源桩换热性能的影响。从图7可以发现,随着间距的增加,进出口平均水温逐渐降低,同时进出口平均水温的下降趋势随着间距的增加而减缓。

图8表示管间距 $D$ 与48 h时进出口平均水温温差变化关系。以管间距 $D=0.1$  m时的48 h进出口水温为对照,当 $D=0.15$  m时,温度相比 $D=0.1$  m

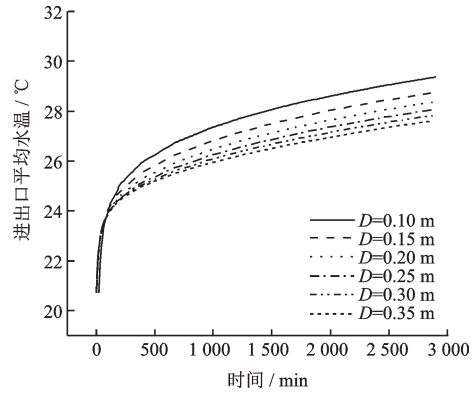


图7 不同管间距进出口平均水温变化曲线

Fig.7 Average water temperature response curves for the inlet and outlet with different pipe spacing

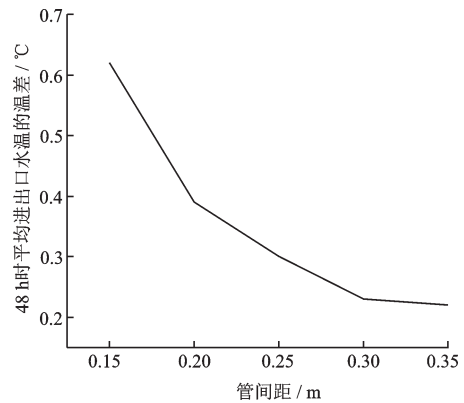


图8 不同管间距进出口平均水温的温差变化

Fig.8 Average water temperature difference for the inlet and outlet of different pipe spacing

时下降0.62 °C;  $D=0.20$  m时,相比于 $D=0.15$  m,温度下降0.39 °C。随着管间距 $D$ 逐渐增加,水温变化梯度也逐渐减小, $D=0.1$  m与 $D=0.15$  m的温差为0.62 °C;  $D=0.3$  m与 $D=0.35$  m的温差为0.22 °C。

上述现象反映了管间距较小的情况下,进水管与出水管的温度相互影响,存在热短路现象;随着管间距的不断增大,进水管和出水管的相互影响逐渐减小,热短路现象逐渐消失,能源桩换热效率逐步提高,但提高的趋势逐渐减缓。

### 4.2 换热液流速的影响

换热管与换热液以对流换热形式进行热交换,换热液在换热管内的流速会影响管壁与换热液的对流换热系数,从而影响换热效率。液体处于紊流状态下的换热能力远大于层流状态<sup>[26]</sup>。为探究换热液流速对能源桩换热性能的影响,利用数值模

型, U型管内液体流速  $u$  分别取 0.05 m/s(层流态)、0.1 m/s(混合态)以及处于紊流态的 0.2、0.3、0.4、0.5 m/s 进行研究。

计算结果如图 9、10 所示。从图 9 可以看到进出口平均水温随换热液流速的增加而下降,更准确的说是随着雷诺数  $Re$  的增长而下降。此外,当换热液处于非紊流状态,试验初期水温上升的速度远高于处于紊流状态的流速。这是因为流速越慢,换热液在水箱里加热的时间就越长,吸收的热量就越多。

但是从图 10 可以发现,随着流速的增加,平均水温下降趋势会逐渐变缓,最终趋于平稳。可以认为当换热液处于非紊流状态( $u < 0.3$  m/s)时,提高流速可以有效地提高换热效率;当换热液流速处于紊流状态时,过多地提高流速对能源桩的换热效率提升不明显。

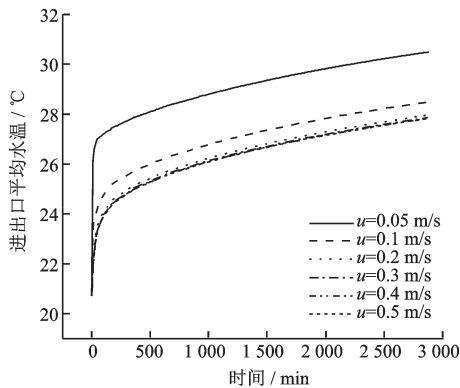


图 9 不同流速进出口平均水温变化曲线

Fig.9 Average water temperature response curves for the inlet and outlet with different flow rates

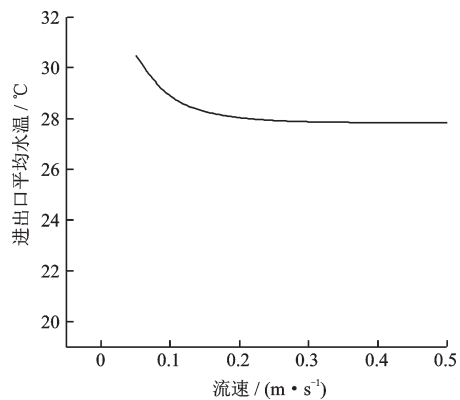


图 10 48 h 时换热液流速与进出口平均水温的关系

Fig.10 Relationship between the fluid velocities and the average water temperature of inlet and outlet at 48 h

### 4.3 换热管导热系数的影响

热量通过导热液传向换热管,再由换热管向外传导,所以换热管的换热性能直接影响能源桩的换热性能。将换热管导热系数  $k_1$  分别取为 0.1、0.21、0.42、0.84、1.68、3.36 W/(m·K),图 11 给出了不同换热管导热系数进出口水温与时间的关系。从图 11 可以看出,随着换热管导热系数  $k_1$  的增大,进出口平均水温逐渐降低,能源桩的换热效率逐渐提高。但随着导热系数  $k_1$  增大,进出口平均水温降低的趋势越来越小, $k_1=1.68$  W/(m·K)和  $k_1=3.36$  W/(m·K) 的两条曲线基本重合。

图 12 表明,当导热系数  $k_1 > 1$  W/(m·K),提高导热系数对提高能源桩换热效率的贡献越来越小。这是因为当导热系数  $k_1$  逐渐增大,甚至大于岩土综

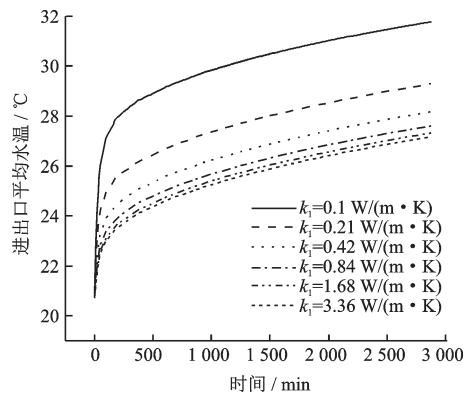


图 11 不同换热管导热系数进出口平均水温变化曲线

Fig.11 Average water temperature response curves for the inlet and outlet with different pipe thermal conductivities

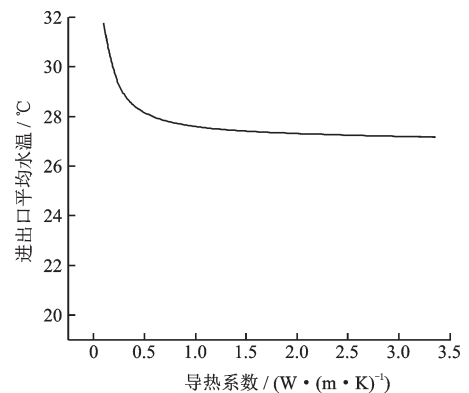


图 12 48 h 时换热管导热系数与进出口平均水温的关系

Fig.12 Relationship between the pipe thermal conductivities and the average water temperature for inlet and outlet at 48 h

合导热系数 $\lambda$ 后,传热速率的快慢主要由岩土综合导热系数 $\lambda$ 确定。

#### 4.4 桩周水泥土导热系数的影响

静钻根植工法能源桩与其它能源桩主要区别在于其桩周存在水泥土,在能量传递的过程中,桩周水泥土对整个传热过程有一定影响。已有研究指出水泥土的导热系数与水泥掺入量有关<sup>[21]</sup>,且给出了水泥土的导热系数 $1.685\sim 1.818\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。为了探究桩周水泥土的导热系数对能源桩换热性能的影响,分别取桩周水泥土的导热系数 $k_2$ 为 $1.3\sim 2.1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,得到不同时刻换热管进出口循环水温上升随桩周水泥土导热系数的变化,如图13所示。从图13可以发现,随着桩周水泥土的导热系数提高,进出口平均水温逐步下降,能源桩的换热效率逐渐提高,即能源桩的换热效率随着桩周水泥土导热系数的提高而提高。

图14表现了桩周水泥土导热系数与48h时进出口平均水温温差变化的关系。与图8类似,当 $k_2=1.4\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时,48h进出口平均水温相比 $k_2=1.3\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 下降 $0.26\text{ }^\circ\text{C}$ ;当 $k_2=1.5\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时,相比 $k_2=1.4\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 下降 $0.23\text{ }^\circ\text{C}$ 。随着水泥土导热系数的增大,48h时的最终进出口平均水温变化梯度不断减小。当水泥土导热系数 $k_2>1.7\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,能源桩换热性能提高的效果逐渐下降。当水泥土导热系数 $k_2$ 小于岩土综合导热系数 $\lambda$ 时,热量在水泥土中传导速度小于岩土体吸收的速度,此时提高 $k_2$ 可以使热量更快地传导到桩周岩土体中,从而提高能源桩换热性能。而当 $k_2>\lambda$ 时,热量在水泥土中传导速度快于岩土体吸收的速度,此时继续提高 $k_2$ ,

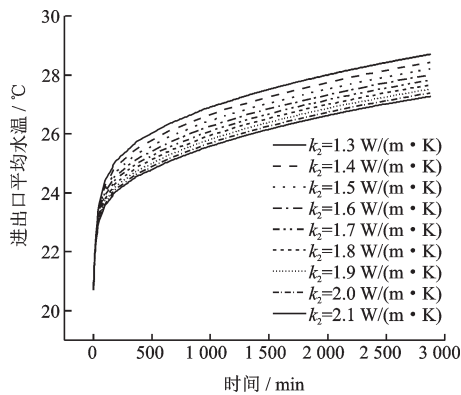


图13 不同水泥土导热系数进出口平均水温变化曲线

Fig.13 Average water temperature response curves for the inlet and outlet with different cement soil thermal conductivities

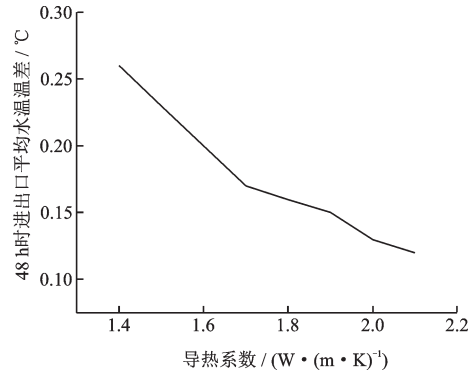


图14 不同水泥土导热系数48h时进出口平均水温的温差  
Fig.14 Average water temperature difference for the inlet and outlet with different cement soil thermal conductivities at 48 h

提高能源桩换热性能的效果逐渐下降。

## 5 结 论

(1)通过能源桩现场热响应试验,得出岩土综合导热系数为 $1.64\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。同时建立了三维传热数值模型,并将计算值与实测值进行对比,证明该模型是有效的。

(2)随着管间距的增加,热短路现象逐渐消失,能源桩换热性能逐渐提高,建议换热管间距保持在 $0.25\text{ m}$ 以上。

(3)当换热液处于非紊流状态时,提高流速对能源桩的换热性能提高明显。但当换热液已处于紊流状态时,继续提高流速对能源桩换热性能提高贡献不大,建议流速保持在紊流状态即可。

(4)当换热管和桩周水泥土导热系数较小时,提高两者的导热系数对能源桩的换热性能提高明显。但当两者导热系数大于岩土综合导热系数后,继续提高两者导热系数对提升能源桩换热性能影响很小。

### 参考文献:

[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 C Ch, Cao Sh D, Wang W. An introduction to energy geotechnical engineering [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(3): 419-424. (in Chinese)

[2] Batini N, Loria A F R, Conti P, et al. Energy and geotechnical behaviour of energy piles for different design

- solutions[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 86 (1): 199-213.
- [3] 李翔宇,郭红仙,程晓辉. 能源桩温度分布的试验与数值研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(4): 102-110.  
Li X Y, Guo H X, Cheng X H. Experimental and numerical study on temperature distribution in energy piles [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49 (4) : 102-110. (in Chinese)
- [4] Moel M D, Bach P M, Bouazza A, et al. Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14: 2683-2696.
- [5] Suryatriyastuti M E, Mroueh H, Brulon S. Understanding the temperature-induced mechanical behavior of energy pile foundations[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16: 3344-3354.
- [6] 周佳锦,龚晓南,王奎华,等. 静钻根植竹节桩抗拔承载性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 570-576.  
Zhou J J, Gong X N, Wang K H, et al. Behavior of the static drill rooted nodular piles under tension [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37 (3): 570-576. (in Chinese)
- [7] 周佳锦,龚晓南,王奎华,等. 层状地基中静钻根植竹节桩单桩沉降计算[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 109-116.  
Zhou J J, Gong X N, Wang K H, et al. A simplified approach to calculating settlement of a single pre-bored grouting planted nodular pile in layered soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(1) : 109-116. (in Chinese)
- [8] 王忠瑾,张日红,王奎华,等. 能源载体条件下静钻根植桩承载特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(1): 11-18.  
Wang Zh J, Zhang R H, Wang K H, et al. Bearing characteristic of static drill rooted pile considering condition of energy carrier [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(1) : 11-18. (in Chinese)
- [9] Kavanaugh S P. Field tests for ground thermal properties methods and impact on ground source heat pump design [J]. ASHRAE Transactions, 1992, 98 (9) : 607-615.
- [10] 周亚素. 土壤导热系数的现场测试方法[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2008, 34(4): 482-485.  
Zhou Y S. In site testing method of ground thermal conductivity [J]. Journal of Donghua University (Nautical Science), 2008, 34(4) : 482-485. (in Chinese)
- [11] Austin W A. Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties[D]. Stillwater, Oklahoma: Oklahoma State University, 1998.
- [12] Sanner B, Choi B Y. Ground source heat pump research in South Korea [C] //Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey: [s. n.] , 2005: 24-29.
- [13] 王华军,王恩宇,赵军. 地源热泵地下热响应实验的季节效应分析[J]. 暖通空调, 2009, 39(2): 14-18.  
Wang H J, Wang E Y, Zhao J. Seasonal effect on in-situ thermal response tests for ground- source heat pump [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2009, 39 (2): 14-18. (in Chinese)
- [14] 洪顺军,杜卫,刘永红,等. 地源热泵地理管换热器传热特性影响因素分析[J]. 制冷与空调, 2016, 30(4): 441-445.  
Hong Sh J, Du W, Liu Y H, et al. Analysis of influence factors on heat transfer characteristics of ground heat exchanger for GSHP [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2016, 30(4): 441-445. (in Chinese)
- [15] 王泮浩,颜亮,王琛琛,等. 地源热泵岩土导热系数测试影响因素分析[J]. 制冷学报, 2012, 33(4): 16-22.  
Wang F H, Yan L, Wang Ch Ch, et al. Analysis of influencing factors on soil thermal conductivity test in ground source heat pump [J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(4): 16-22. (in Chinese)
- [16] 地源热泵系统工程技术规范: GB 50366—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
Technical code for ground-source heat pump system: GB 50366—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [17] Ingersoll L R, Zobel O J, Ingersoll A C. Heat conduction with engineering, geological and other applications [M]. New Delhi: Oxford & IBH Publishing Co., 1954.
- [18] Roland W, Christoph C. Evaluating thermal response test using parameter estimation for thermal conductivity and thermal capacity[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2005, 2: 349-356.
- [19] 地源热泵系统技术规程: DG/TJ08-2119—2013[S]. 上海: 同济大学出版社, 2013.  
Technical specification for ground-source heat pump system: DG/TJ08-2119—2013 [S]. Shanghai: Tongji University Press, 2013. (in Chinese)
- [20] 宁波市地源热泵系统建筑应用技术导则: 2015甬SS-02[S]. 宁波: [s.n.], 2015.  
Technical guidelines for building application of ground source heat pump system of Ningbo: 2015 Yong SS-02

- [S]. Ningbo: [s.n.], 2015. (in Chinese)
- [21] 鲍旭明, 邓岳保, 李语默, 等. 宁波软土及其水泥改良土的导热系数测试分析[J]. 浙江建筑, 2016, 33(8): 9-12.  
Bao X M, Deng Y B, Li Y M, et al. Testing and analysis on the thermal conductivity for the mollisol and improved soil by concrete in ningbo[J]. Zhejiang Construction, 2016, 33(8): 9-12. (in Chinese)
- [22] 王许诺, 杨平, 彭玉龙. 水泥土冻结温度及热物性参数试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(6): 96-100.  
Wang X N, Yang P, Peng Y L. Test research to freezing point and the thermal physical parameters of freezing cement soil[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(6): 96-100. (in Chinese)
- [23] 赵云. 宁波软土的热物性和热固结特性研究[D]. 南昌: 江西理工大学, 2018.  
Zhao Y. An investigation on the thermal and thermo-consolidation behaviour of ningbo soft soil [D]. Nan-chang: Jiangxi University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [24] 高平, 张延军, 方静涛, 等. 浅层岩土室内、外热物性测试的相关性[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(1): 259-267.  
Gao P, Zhang Y J, Fang J T, et al. Correlation of shallow layer rock and soil thermal physical tests in laboratory and field[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(1): 259-267. (in Chinese)
- [25] Mikhail V L. Modeling of oil product and gas pipeline transportation [M]. U. S: Wiley-VCH, Weinheim, 2008.
- [26] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
Yang Sh M, Tao W Q. Heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)



(上接第 90 页)

- [10] 王协群, 张俊峰, 邹维列, 等. 格栅-土界面抗剪强度模型及其影响因素[J]. 土木工程学报, 2013, 46(4): 133-141.  
Wang X Q, Zhang J F, Zou W L, et al. A shear strength model of geogrid-soil interface and its influence factors [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(4): 133-141. (in Chinese)
- [11] Konami T, Imaizumi S, Takahashi S. Elastic considerations of field pull-out tests of polymer strip reinforcement [C] //International Symposium on Earth Reinforcement (IS KYUSHU 96). Fukuoka, Japan: Earth Reinforcement, 1996: 57-62.
- [12] Abramento M. Analysis of pullout tests for planar reinforcements in soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(6): 476-485.
- [13] Sobhi S, Wu J T H. An interface pullout formula for extensible sheet reinforcement[J]. Geosynthetics International, 1996, 3(5): 565-582.
- [14] 刘续, 唐晓武, 申昊, 等. 加筋土结构中筋材拉拔力的分布规律研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 800-804.  
Liu X, Tang X W, Shen H, et al. Stress distribution of reinforcement of reinforced soil structures under drawing force[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 800-804. (in Chinese)
- [15] 易富, 杜常博, 张利阳. 金尾矿与土工格栅界面摩擦特性的试验[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(6): 2217-2221.  
Yi F, Du Ch B, Zhang L Y. Experimental study on the interface friction characteristics between the gold tailings and the geogrid[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(6): 2217-2221. (in Chinese)