



## 浅层地热能高效开发研究

戎慧敏, 周训, 王立志, 郑佳, 李启民

**Research on the efficient development of shallow geothermal energy: Experimental and numerical investigations on the heat transfer characteristics of the soil-cement energy pile**

RONG Huimin, ZHOU Xun, WANG Lizhi, ZHENG Jia, and LI Qimin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401024>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 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

#### 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

#### 分级循环动荷载下水泥土动力特性试验研究

An experimental study of the dynamic characteristics of cement soils subjected to staged cyclic loading

张振, 陈勇, 杨天亮, 叶观宝, 郑文强 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 89–96

#### 单轴压缩下红色砒砂岩水泥土的能量演化机制研究

Energy evolution mechanism of red Pisha-sandstone cement soil under uniaxial compression

耿凯强, 李晓丽 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 134–141

#### 热屏障井对地下水热泵换热影响模拟

Simulation study on the effect of thermal barrier well on the heat transfer of groundwater heat pump

肖锐, 黄坚, 王小清 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 190–198

#### 高含盐水泥土的力学特性及微观结构研究

Mechanical characteristics and microstructure of salt-rich cement-soil

邢皓枫, 张好, 李浩铭 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 102–109



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401024](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401024)

戎慧敏, 周训, 王立志, 等. 浅层地热能高效开发研究——水泥土能源桩传热特性试验与模拟 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(2): 229-237.

RONG Huimin, ZHOU Xun, WANG Lizhi, et al. Research on the efficient development of shallow geothermal energy: Experimental and numerical investigations on the heat transfer characteristics of the soil-cement energy pile[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(2): 229-237.

## 浅层地热能高效开发研究 ——水泥土能源桩传热特性试验与模拟

戎慧敏<sup>1,2</sup>, 周训<sup>1,2</sup>, 王立志<sup>2</sup>, 郑佳<sup>2</sup>, 李启民<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083;  
2. 自然资源部浅层地热能重点实验室, 北京 100195)

**摘要:** 土壤源热泵供热制冷系统是当前浅层地热能最主要的开发利用方式。为了解决土壤源热泵系统中传统地理管热效率低、占地面积大等瓶颈问题, 本研究提出了一种新方案: 将地理管与水泥土桩复合地基相耦合, 即一边钻进一边将水泥与原土在桩孔内现场搅拌成桩, 利用地基处理材料良好的热力特性提高埋管热效率。通过 COMSOL Multiphysics5.0 软件的数值模拟以及相似比为 1:2 的相似模型试验, 对比研究了地理管分别在水泥土桩和土壤的热传递机理, 探讨了温度场分布的时空变化规律, 初步建立了水泥土能源桩的计算方法。研究表明: 水泥土能源桩有效减小了能源桩传热系统中的最大热阻部分, 极大提高了能源桩的热效率; 在制冷或制热工况下, 水泥土能源桩单位孔深换热量比常规地理管分别提升了 22.88%~34.20% 和 21.20%~55.60%; 但是, 仅靠提高埋管内的流速并不能进一步提高水泥土能源桩的换热能力, 需要选择合适的流速与管径。水泥土能源桩系统这种建筑物绿色供热与制冷新模式, 充分发挥了土壤源热泵系统适用性广和水泥土桩环保降本等各自的主要优势, 为浅层地热能的高效开发提供了新的途径。

**关键词:** 地源热泵; 水泥土能源桩; 相似模型试验; 数值模拟; 传热机理

中图分类号: TK529

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)02-0229-09

## Research on the efficient development of shallow geothermal energy: Experimental and numerical investigations on the heat transfer characteristics of the soil-cement energy pile

RONG Huimin<sup>1,2</sup>, ZHOU Xun<sup>1,2</sup>, WANG Lizhi<sup>2</sup>, ZHENG Jia<sup>2</sup>, LI Qimin<sup>1,2</sup>

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Key Laboratory of Shallow Geothermal Energy, Beijing 100195, China)

**Abstract:** The heating and cooling system of ground-source heat pump is currently the most important development and utilization method of shallow geothermal resources. In order to solve the bottleneck problems of low thermodynamic efficiency and large footprint of the traditional ground heat exchanger in ground-source heat

收稿日期: 2024-01-11; 修訂日期: 2024-03-20

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

基金项目: 自然资源部浅层地热能重点实验室合作项目(KLSGE202302-01)

第一作者: 戎慧敏(1995—), 女, 硕士, 主要从事地热工程、地质工程等方面研究。E-mail: [1642138922@qq.com](mailto:1642138922@qq.com)

通讯作者: 李启民(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事地热工程、地质工程等方面研究。E-mail: [qiminli@163.com](mailto:qiminli@163.com)

pump system, this study proposes a new scheme of coupling the ground heat exchangers with the soil-cement pile composite foundation, a type of pile foundation where cement and the native soil are mixed on-site in the pile hole while drilling to form a pile, to improve the thermodynamic efficiency of the ground heat exchanger by utilizing the good thermodynamic properties of the ground treatment materials. By means of numerical simulation using COMSOL Multiphysics5.0 software and similarity model experiment with a similarity ratio of 1/2, the heat transfer mechanisms of the ground heat exchanger in the soil-cement pile and the soil are compared and studied, the spatio-temporal variation rules of temperature field distribution are discussed, and the calculation method of the soil-cement energy pile is established preliminarily. The research indicates that the soil-cement energy piles can effectively reduce the maximum thermal resistance in the heat transfer system of energy piles, greatly improving the thermodynamic efficiency of energy piles; the heat exchange unit length hole depth of the soil-cement energy pile is 22.88% ~ 34.20% and 21.20% ~ 55.60% higher than that of the ground heat exchanger in soil when cooling in summer and heating in winter, respectively; However, simply increasing the flow velocity inside the ground heat exchanger cannot further enhance the heat exchange capacity of the soil-cement energy piles, the effective methods are to choose the appropriate flow velocity and pipe diameter. This new model of green heating and cooling for buildings, the soil-cement energy pile system, fully leverages the main advantages of both the wide applicability of the ground-source heat pump systems and the environmental protection and cost reduction of the soil-cement piles, providing a theoretical basis and experimental support for the efficient development of shallow geothermal energy.

**Keywords:** ground-source heat pump; the soil-cement energy pile; similarity model experiment; numerical simulation; heat transfer characteristics

实现“碳达峰与碳中和”是我国在新发展阶段的一个重要目标<sup>[1]</sup>。在这场广泛而深刻的系统性变革中,可再生能源肩负着重要的历史使命。根据《中国建筑能耗研究报告》<sup>[2]</sup>,2020年我国建筑运行阶段能耗占全国能源消费总量的21.3%,建筑运行阶段碳排放占全国碳排放总量的21.7%,与2019年基本持平。因此,在建筑物供热、制冷以及照明等领域广泛采用可再生能源有着十分重要的意义<sup>[3~4]</sup>。

地热能是可再生能源,包括温泉、浅层地热能、地热流体及干热岩体中的地热能等<sup>[5~6]</sup>,具有存量巨大、来源稳定、运行经济等显著优势。地埋管土壤源热泵系统是一种利用浅层低品位地热能的闭合换热系统,受限条件少,对环境友好,可实现对建筑物三联供(采暖、制冷、生活热水),是目前浅层地热能的主要开发利用方式。但是,地埋管土壤源热泵系统存在2个主要问题:(1)与水源热泵系统相比较,地埋管土壤源热泵系统供暖与制冷的热效率都比较低,尤其是随着运行时间的延续其热效率还可能进一步降低<sup>[7]</sup>,经济性较差;(2)地理管理设场地大。所以,进一步深入开展地下能源结构研究十分必要。

国外对土壤源热泵地下能源结构的研究和应用略早于国内<sup>[8~9]</sup>。2014年Nicholson等<sup>[10]</sup>对英国伦敦

的铁路工程进行了地下能源结构设计,但仅局限于钢筋混凝土结构的试验及工程,理论探讨较少。我国的土壤源热泵系统研究更多关注回填材料的影响。尚少文等<sup>[11]</sup>利用Fluent软件模拟了土壤导热性能和埋管方式对换热温度场的影响;王恩琦等<sup>[12]</sup>研究了回填材料导热性能对地埋管换热量的影响。上述研究表明导热性能好的回填材料可增大地埋管的换热量,但同时也增加了工程造价。国内能源桩研究主要是针对钢筋混凝土能源桩的热响应问题,如,隋智力等<sup>[13]</sup>在钢筋混凝土能源桩内添加导热系数较高的石墨粉制备出石墨混凝土桩,研究表明,石墨混凝土试块导热系数呈上升趋势,但缺点是桩体的力学性能受到较大的影响。

结合前人的研究成果<sup>[14~16]</sup>,本课题组将地埋管土壤源热泵系统与水泥土桩复合地基相耦合,形成了一种新型的能源桩——水泥土能源桩。与混凝土材料不同,水泥土是将水泥与场地的原状地基土按一定比例配置而成的建筑材料。同样区别于混凝土桩及钢筋混凝土桩,水泥土桩是利用搅拌钻机在场地上一边钻进一边将水泥(或水泥浆)与场地的原状土进行搅拌形成水泥土桩体,具有就地取材、节约成本、保护环境等突出优点。水泥土搅拌桩复合地基适用于处

理软土、填土、黏性土、砂土、粉土等, 广泛应用于多层和小高层建(构)筑物的地基处理工程<sup>[17]</sup>。

本课题组进行了水泥土能源桩与土中地理管在夏季制冷和冬季供热 2 种工况下的相似模型对比试验, 建立了 2 种地理管传热三维数值模型, 对其热力学机理开展研究, 旨在借用水泥土地基处理材料良好的热力学性能提高地理管系统的热效率, 因地制宜地进行地基处理、地热、水暖空调等单位工程一体化设计, 利用各专业之间优势互补, 极大地节约地理管的占地面积, 产生一举多得的良好效果, 为实现“碳达峰、碳中和”做出贡献。

## 1 场地地基土测试

本次试验场地选择在中国地质大学(北京)校园内。课题组首先通过室内土工试验获取场地土的物理力学性质指标。室内试验采用液限塑限联合测定法, 采取天然土样 200 g, 将其制备成 3 份含水率( $w$ )不同的土样, 通过液塑限联合测定仪, 确定 3 份土样的圆锥入土深度, 绘制圆锥入土深度与含水率关系的双对数曲线。试验表明, 场地土的液限( $W_L$ )为 25.07, 塑限( $W_p$ )为 16.92, 塑性指数( $I_p$ )为 8.15。根据现行的国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)<sup>[18]</sup>的规定,  $I_p \leq 10$  且粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量不超过全重 50% 的土为粉土, 所以该场地土可定义为粉土。粉土在我国广泛分布, 特别是在北方地区, 具有很好的代表性。

场地土的天然含水率测定采用烘干法。用四分法采取天然土试样 4 份, 测定该粉土的平均含水率为 18.03%, 根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2009)<sup>[19]</sup>可知, 天然含水率小于 20% 的粉土处于稍湿状态。

## 2 相似模型试验

### 2.1 相似模型试验原理

本次能源桩相似模型试验主要是通过模型表现出实际工程中地理管的主要特征, 因此相似试验应满足流动相似, 要保证试验模型与原型在几何形状、运动状态及动力特征上满足一定的相似条件。根据雷诺准则, 为保持 2 个流动系统在黏滞力作用下相似, 流体的惯性力与黏滞力之比必须相等, 即雷诺数相等。本试验采用自来水作为管内流体, 模型与原型的流体密度、动力黏滞系数分别相同, 所以雷诺准则的相似条件可简化为:

$$\frac{v}{v_n} = \frac{l_n}{l} \quad (1)$$

式中:  $v$ 、 $v_n$ ——模型、原型的流速/(m·s<sup>-1</sup>);

$l$ 、 $l_n$ ——模型、原型的特征长度/m。

本相似试验的相似比取 1/2。原型桩直径为 600 mm, 原型地理管直径为 DN32, 原型流速为 0.1 m/s; 模型桩直径为 300 mm, 模型地理管直径为 DN16, 模型流速为 0.19 m/s。

### 2.2 相似模型试验准备

本次能源桩相似模型试验采用人工挖孔桩, 桩长 1.8 m, 桩径 300 mm(图 1), 其中一个桩孔内设置单 U 管并填埋原土(代号 YT), 另一个桩孔内设置单 U 管并填埋水泥土(代号 SNT)。在距地面 1.0 m 深处的桩周平面内设置了多点土壤温度记录仪(HZ-TJ1)的探头, 监测试验中在地理管内流体的影响下相同深度不同水平位置处的土壤温度。试验设置探针电子温度计, 监测夏季制冷和冬季制热 2 种工况下的地理管进、出口水温, 数据记录时间间隔为 15 min。

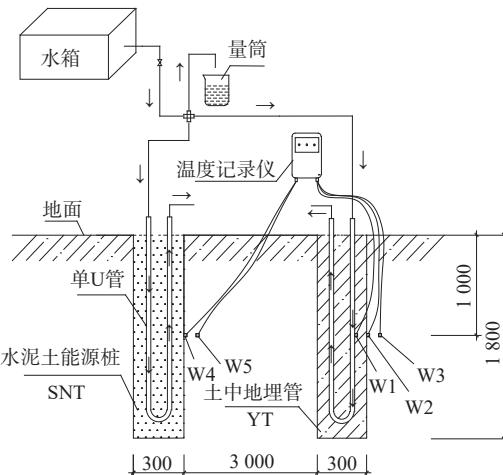


图 1 能源桩试验示意图 (单位: mm)

Fig. 1 Profile diagram of the energy pile test (Unit: mm)

注: W1 为土中地理管的管壁处温度测点; W2 为土中地理管的管壁外 100 mm 处(即桩壁处)土壤温度测点; W3 为土中地理管的管壁外 300 mm 处土壤温度测点; W4 为水泥土能源桩的桩壁处(地理管管壁外 120 mm)土壤温度测点; W5 为水泥土能源桩管壁外 300 mm 处土壤温度测点。

与大多数实际工程中的地源热泵系统一致, 相似试验的地理管采用聚乙烯塑料管(PE 管), 其外径为 16 mm, 内径 13.6 mm, 壁厚 1.2 mm。参考现行的行业标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)<sup>[20]</sup>, 水泥采用强度等级为 32.5 的普通硅酸盐水泥, 水泥土中的水泥掺入比取 20%, 水泥浆水灰比为 0.5。

### 2.3 相似模型试验监测

夏季制冷工况下的相似模型试验8 d。如图2(a)所示,流速为0.19 m/s时,土中地埋管(代号YT)出口温度高于水泥土能源桩(代号SNT)出口温度。证明水泥土作为回填材料的导热性要优于原土作为回填材料的导热性,温度较高的自来水进入水泥土能源桩后与温度较低的桩周土壤进行了较好的热量交换。

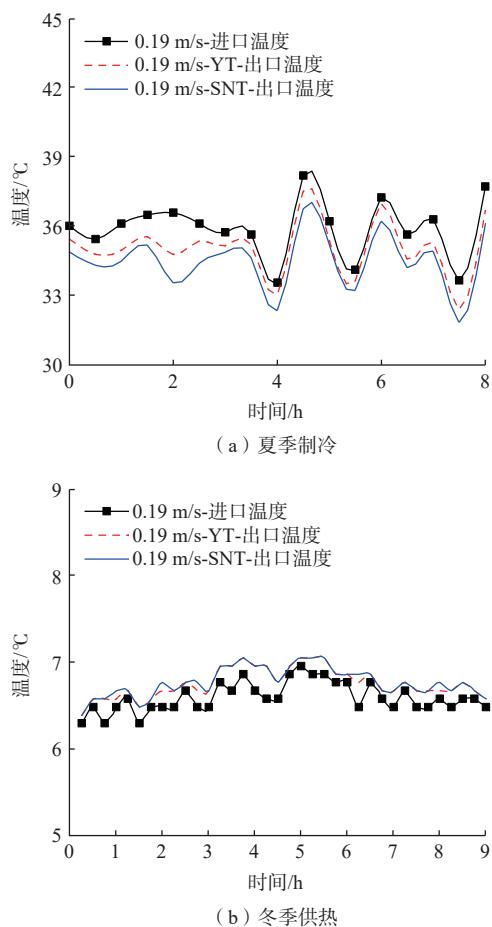


图2 夏季制冷和冬季供热时U形管进出口水温曲线

Fig. 2 Inlet and outlet temperature curves of the U-shaped pipes during summer cooling and winter heating

冬季制热工况下的相似模型试验进行11 d。图2(b)表示其中一天早8:00(图中表示为0 h)到晚17:00(图中表示为9 h)的试验结。U形管中水流速度保持0.19 m/s,土中地埋管出口温度始终低于水泥土能源桩出口温度,温度较低的自来水进入水泥土能源桩后与温度较高的桩周土壤进行了较好的热量交换。图2(b)土中地埋管与水泥土能源桩进出口水温整体随着时间的推移出现先增后减的趋势,但增减幅度不大,说明了冬季太阳辐射以及室外温度对进出水管的水温造成一定的影响。

### 2.4 能源桩单位孔深换热量

根据试验测试的能源桩进出口水温差,可计算夏季与冬季的试验中不同流速的土中地埋管与水泥土能源桩单位孔深换热量。由表1可知,夏季能源桩的单位孔深换热量要高于冬季能源桩的换热量,水泥土能源桩单位孔深换热量要优于土中地埋管的换热量,但不同流速下的水泥土单位孔深换热量与流速并不呈线性相关。在夏季制冷和冬季制热工况下,水泥土能源桩单位孔深换热量比土中地埋管分别提升了34.20%和25.00%~55.60%。

表1 相似模型试验的换热量

Table 1 Heat exchange of the similarity model experiment

工况	流速 /(m·s <sup>-1</sup> )	土中单U管 单位孔深换热量 /(W·m <sup>-1</sup> )	水泥土能源桩 单位孔深换 热量/(W·m <sup>-1</sup> )	单位孔深换 热量增量/%
夏季制冷	0.19	25.67	34.45	34.20
	0.15	4.19	5.90	40.81
	0.19	5.44	6.80	25.00
冬季制热	0.40	5.27	8.20	55.60
	0.50	3.97	5.91	48.87

由于本相似试验中管内循环流体为自来水,且管长与管内截面面积均为定值,所以影响能源桩单位孔深换热量的主要因素为管内循环流速和管内循环流体进出口水温差。其中,管内循环流体进出口水温差受进口水温、回填材料导热系数及初始土壤温度等因素共同影响。对于水泥土能源桩而言,当回填材料导热系数为定值时,进口水温与初始土壤温差越大时,单位孔深换热量也越大。

## 3 数值模拟分析

### 3.1 建模

本研究采用COMSOL Multiphysics5.0软件进行几何建模。几何模型与相似试验一致,模型尺寸和试验相同,主要材料热物性参数见表2。参考《地源热泵系统工程技术规范》(GB 50366—2005)(2009版)<sup>[21]</sup>,单U管内循环介质为自来水,夏季单U管内循环流速设置为0.10,0.19 m/s,冬季单U管内流速分别取0.10,0.15,0.19,0.40,0.50 m/s。

表2 主要材料热物性参数

Table 2 Main material thermophysical parameters

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
水	998.2	4 182	0.60
PE管	950.0	2 000	0.44
粉土	1 921.0	1 230	1.41
水泥土	2 026.0	1 403	1.55

### 3.2 模型验证

为验证该模型的正确性, 带入边界条件后, 将相似模型试验实测的进水温度带入数值模型中。夏季制冷工况下, 选取实测值的进口水温中位数  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$  带入数值模拟, 得出模拟运行过程中的土壤温度值, 与相似试验实测土壤温度值进行比较。夏季制冷工况下流速按  $0.19\text{ m/s}$  运行  $8\text{ h}$  后, 水泥土能源桩回填界面处(W4 测点)土壤温度实测值为  $24.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 模拟值为  $24.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 与其对应的水泥土能源桩管壁外  $300\text{ mm}$ (W5 测点)处土壤温度实测值为  $23.40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 模拟值为  $23.10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。另外, 冬季制热工况下流速按  $0.19\text{ m/s}$  运行  $9\text{ h}$  后, W4 测点处土壤温度实测值为  $9.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 模拟值为  $9.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 与其对应的 W5 测点处土壤温度实测值为  $10.40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 模拟值为  $10.57\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。总之, 地表下  $1.0\text{ m}$  深处水泥土能源桩不同界面相似试验实测温度值和模拟温度值的误差不超过  $1.7\%$ 。所以, 用 COMSOL Multiphysics5.0 软件建立的模型是合理的。

### 3.3 模拟传热分析

在上述模型的基础上, 通过瞬态模拟得到夏季制冷工况下流速为  $0.19\text{ m/s}$  时水泥土能源桩水平与垂直界面处的传热效果图(图 3), 其中 XY 截面为距离地表  $1.0\text{ m}$  深处水泥土能源桩的水平截面, XZ 截面为水泥土能源桩垂直截面。

通过水泥土能源桩 XY 截面和 XZ 截面上的传热温度图可知, 在夏季制冷系统运行开始时(即  $0\text{ h}$ ), XY 截面和 XZ 截面上的温度整体没有明显变化, 回填区域和土壤区域初始值为  $22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。系统运行到  $8\text{ h}$ , 单 U 管周围温度陡然升高, 以单 U 管进出口两支管为中心, 开始不断向周围回填区域与土壤进行热交换, 能源桩钻孔内部区域温度上升迅速, 其影响范围也逐渐扩大, XY 截面处管内最高温度可达  $32.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , XZ 截面处管内最高温度为  $32.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从模拟开始至结束的  $8\text{ h}$  内, XY 截面处管内温度升高了  $9.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; XZ 截面处管内温度升高了  $10.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 详见图 3(a) 和 图 3(b)。

夏季制冷工况下流速为  $0.19\text{ m/s}$  时水泥土能源桩桩壁和管壁外  $300\text{ mm}$  处土壤温度随时间的变化见图 3(c)。运行开始时 W4、W5 初始值为  $22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 随着时间的推移都呈递增趋势, 其中 W4 处温度在  $8\text{ h}$  后, 递增趋势开始减缓, W5 处温度在运行  $2\text{ h}$  内没有变化, 在  $4\text{ h}$  后温度开始逐渐呈线性递增。在运行  $24\text{ h}$  后, W4、W5 处土壤温度分别为  $25.98\text{, }23.95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

### 3.4 水平等值面分析

夏季制冷和冬季制热工况下不同流速运行  $24\text{ h}$

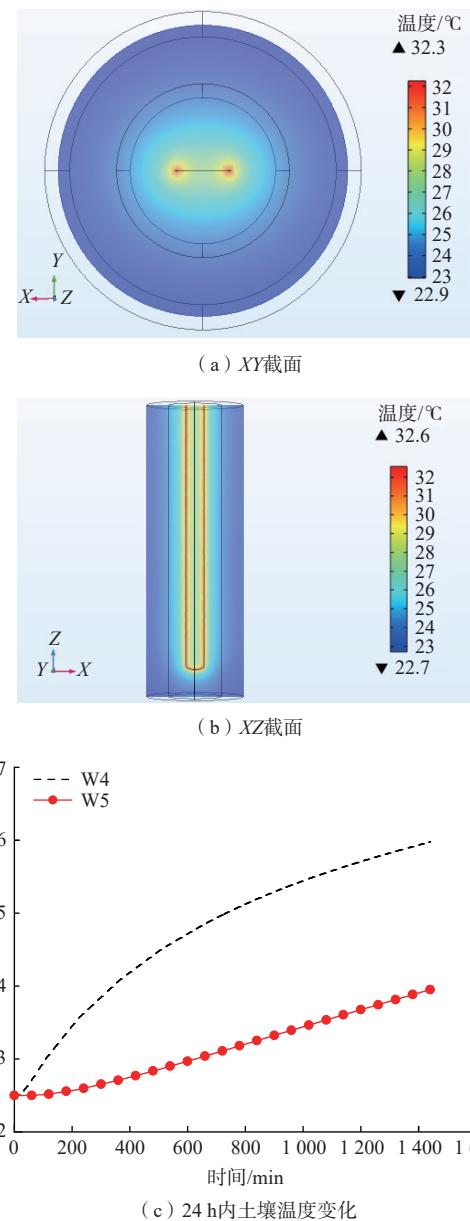


图 3 温度分布图

Fig. 3 The temperature distribution map

后水泥土能源桩 XY 水平等值面分布研究表明, 流速较小时(如  $0.10\text{, }0.19\text{ m/s}$ )水泥土能源桩 XY 水平等值面图呈现为横向“水滴型”, 见图 4(a)(b), 等值线弧度向单 U 管支管进水口处偏转, 进水口的等值线弧度大且影响范围广, 出水口等值线弧度小。流速较大时(如  $0.50\text{ m/s}$ )的水泥土能源桩 XY 水平等值面图呈现“腰圆型”, 图 4(c)(d), 等值线弧度向单 U 管两支管共同偏转。由此可知, 等值线分布范围与流速大小相关。当管内流速较低时, 会限制管内流体与岩土体热交换范围, 使得等值线向支管进水口处偏转; 随着流速增大, 管内流体与桩周土体的热交换范围变大, 导

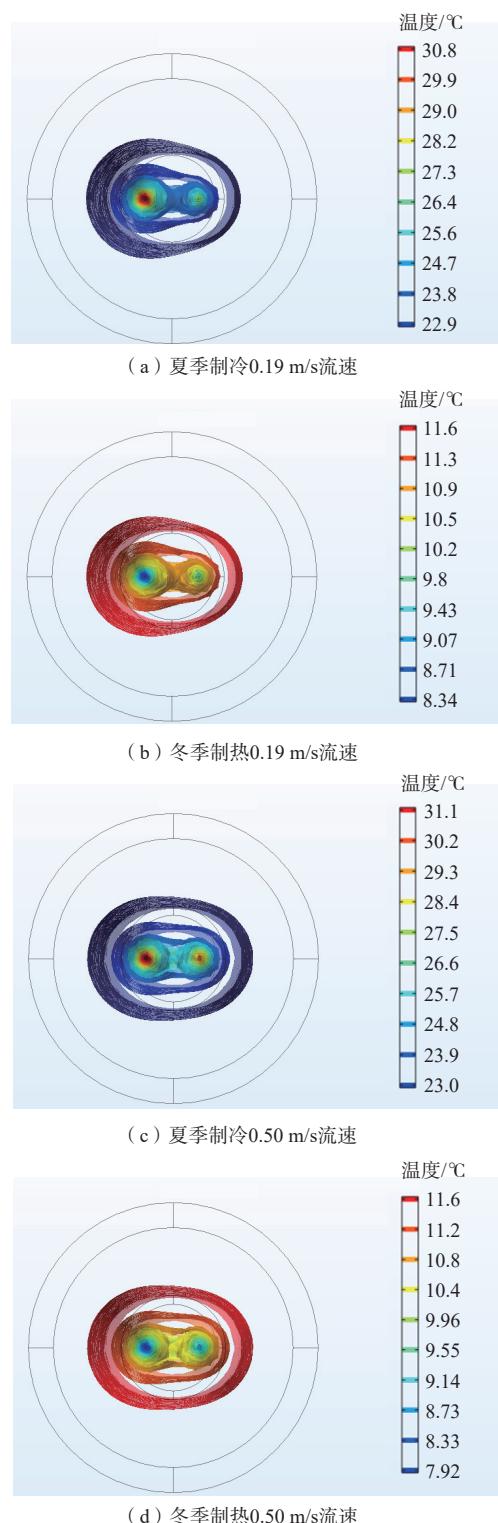


图4 夏季和冬季水泥土能源桩水平等值面温度分布图

Fig. 4 Contour map of surface temperature for the soil-cement energy piles during summer and winter heating

致等值线弧度向单U管两支管共同偏转。夏季制冷时,水泥土能源桩回填区域温度高,周边土壤温度低,在运行过程中水泥土能源桩不断向周围土壤散热。

冬季制热时,能源桩回填区域温度低,周边土壤温度高,在运行过程中周围土壤不断向水泥土能源桩传热。

## 4 讨论

### 4.1 流速影响

为了分析流速对能源桩换热量的影响,本研究模拟了冬季不同流速下水泥土能源桩与土中地理管在连续运行时的进出口水温差(图5)。模拟表明,冬季制热工况下,在0.10 m/s的流速下运行24 h后,水泥土能源桩进出口水温差为0.27 °C,土中地理管进出口水温差为0.22 °C。在0.50 m/s的流速下运行24 h后,水泥土能源桩进出口水温差为0.09 °C,土中地理管进出口水温差为0.07 °C。可见,冬季制热工况下,随着流速的提升,会缩减管内流体与管壁之间热交换时间,降低能源桩进出口水温差,且流速越大进出口水温差达到稳定状态的时间缩短。

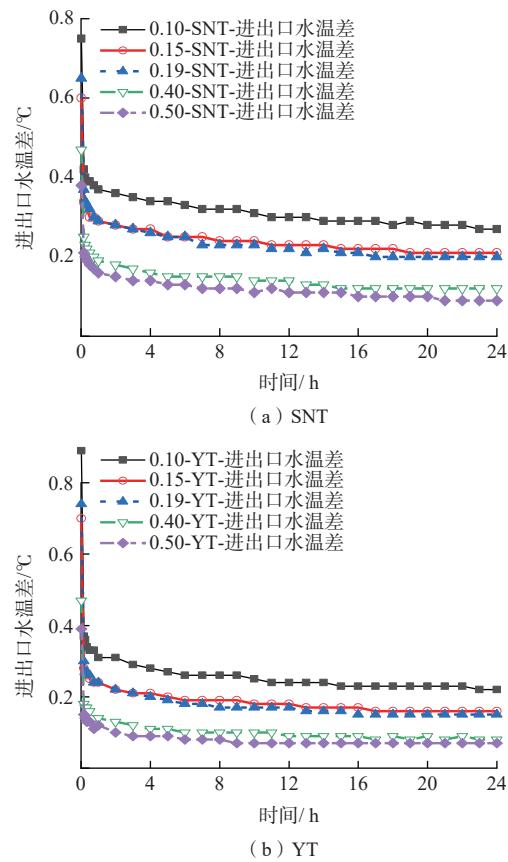


图5 冬季不同流速下的水泥土能源桩与土中地理管进出口水温差

Fig. 5 Water temperature difference at the inlet and outlet of soil-cement energy piles and ground heat exchanger in soil at different flow rates during winter

## 4.2 管径影响

为了进一步分析不同单U管的管径对水泥土能源桩换热量的影响,本研究分别模拟了夏季不同管径下水泥土能源桩的进出口的水温差,单U管参数见表3。其中,流速设置为0.10 m/s,夏季进口水温为33 °C,土壤初始温度为22.5 °C。

表3 管道参数  
Table 3 Pipe parameters

PE管规格	PE管外径/mm	PE管壁厚/mm	PE管内径/mm
DN15	20	2.3	15.4
DN20	25	2.3	20.4
DN25	32	2.7	26.6
DN32	40	3.0	34.0
DN40	50	3.7	42.6

数值模拟表明,随着夏季制冷系统连续运行时间的延长,水泥土能源桩进出口水温差在逐渐降低,换热量逐渐减小。在运行75 d后,不同管径单U管的水泥土能源桩进出口水温差都基本稳定(图6),单U管的管径越小进出口水温差越大。因此,选择合适的管径既可有效地提高水泥土能源桩换热能力,又能降低工程造价。

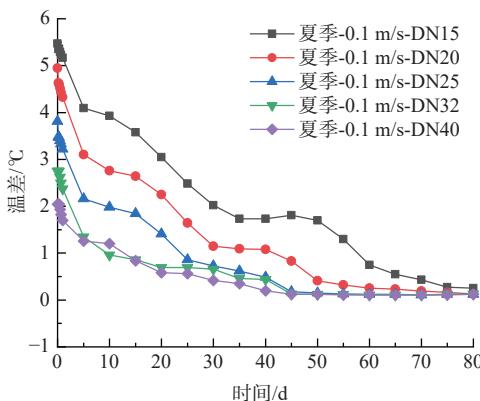


图6 夏季不同管径的水泥土能源桩进出口水温差

Fig. 6 Temperature difference at the inlet and outlet of cement soil energy piles with different diameters in summer

## 5 水泥土能源桩热力计算

水泥土能源桩的总热阻可分为钻孔内部热阻与钻孔外部热阻两部分。其中,钻孔内部热阻为单U管管壁对流传热热阻、单U管管壁导热热阻、水泥土回填区域(桩体)导热热阻三部分。钻孔外部热阻为土壤传热热阻。因此,水泥土能源桩传热可表示为:

$$Q = \frac{T - T_s}{R_0 + R_s} \quad (2)$$

式中: $Q$ —水泥土能源桩传热量/(W·m<sup>-1</sup>);

$T$ —水泥土能源桩管内流体平均水温/°C;

$T_s$ —钻孔外部土壤的平均温度/°C;

$R_0$ —水泥土能源桩钻孔内部热阻/(m·°C·W<sup>-1</sup>);

$R_s$ —水泥土能源桩钻孔外部土壤热阻/(m·°C·W<sup>-1</sup>)。

水泥土能源桩钻孔内部可视为由不同材料构成的多层圆筒壁,水泥土能源桩钻孔长度要远大于桩径,因此,可将水泥土能源桩钻孔内部导热问题简化为径向一维导热问题。根据传热学原理,水泥土能源桩钻孔内部热阻为:

$$R_0 = R_1 + R_2 + R_3 \quad (3)$$

式中: $R_0$ —水泥土能源桩钻孔内部热阻/(m·°C·W<sup>-1</sup>);

$R_1$ —单U管的管壁对流换热热阻/(m·°C·W<sup>-1</sup>);

$R_2$ —单U管的管壁导热热阻/(m·°C·W<sup>-1</sup>);

$R_3$ —水泥土桩导热热阻/(m·°C·W<sup>-1</sup>)。

由于水泥土能源桩钻孔内部区域狭小,传热过程比较复杂,因此可将钻孔内部单U管两个支管转化为一根管,其当量直径为 $d = \sqrt{2}d_i$ ,并代入式(3)可得:

$$R_0 = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\alpha d_i} + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln\left(\frac{d_2}{d_2 - \sqrt{2}\delta}\right) + \frac{1}{2\pi\lambda_1} \ln\frac{d_3}{\sqrt{2}d_2} \quad (4)$$

式中: $d_i$ —单U管的直径/m,其中 $d_i$ 为单U管内径,

$d_2$ 为单U管外径;

$\delta$ —单U管的壁厚/m;

$\alpha$ —管内流体对流换热系数/(W·m<sup>-2</sup>·°C<sup>-1</sup>);

$\lambda$ —单U管导热系数/(W·m<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>);

$\lambda_1$ —水泥土导热系数/(W·m<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>);

$d_3$ —水泥土桩直径/m。

钻孔外部土壤传热热阻与钻孔内部不同,影响范围要大,其传热热阻可表示为:

$$R_s = \frac{1}{2\pi\lambda_s} I\left(\frac{d_3}{4\sqrt{\alpha_0\tau}}\right) \quad (5)$$

式中: $\lambda_s$ —土壤平均导热系数/(W·m<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>);

$\alpha_0$ —土壤的热扩散率/(m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>);

$\tau$ —运行时间/s;

$I(u)$ —指数积分公式。

为了验证能源桩传热公式的准确性,将土中地理管、水泥土能源桩试验以及模拟数据代入式(2)(4)(5),分别得到土中地理管和水泥土能源桩单位孔深换热量(表4)。比较表4与表1的换热量,公式法计算结果与相似试验结果基本一致。

从相似模型试验到数值模拟再到传热公式计算可以发现,相似模型试验中地理管换热器连续工作时

表4 公式法计算能源桩单位孔深换热量

Table 4 Heat exchange per linear meter of the energy piles calculated with the equation method

工况	流速 (m·s <sup>-1</sup> )	土中单U管单位孔深换热量/(W·m <sup>-1</sup> )	水泥土能源桩单位孔深换热量/(W·m <sup>-1</sup> )	热量增量/%
夏季制冷	0.19	21.90	26.91	22.88
冬季制热	0.15 0.19	4.09 4.58	4.96 5.55	21.30 21.20

间偏短,导致试验数据存在一定误差,其换热量普遍偏大。这可能是由于在本研究中,夏季制冷试验间歇运行了8 d,冬季制热试验间歇运行了11 d,而北京地区实际的夏季制冷时间和冬季采暖时间都约为120 d。由于试验运行时间短且为间歇工况,有利于热量在桩内快速传递和地温的恢复,避免桩周热量的堆积,因而U形管中流体与岩土体之间的换热量随着时间的缩短而增大,单位时间内的换热量得到提升。

## 6 结论

本研究进行了土中地埋管与水泥土能源桩的相似模型对比试验,并进行了数值模拟分析。数值模拟结果与相似模型试验监测数据基本一致。以此为基础,研究了水泥土能源桩的传热特性以及换热量计算方法,得出以下结论:

(1)由于充分利用水泥土材料的良好传热性能,水泥土能源桩有效地减小了能源桩传热系统中的最大热阻,从而极大地提高了能源桩的热效率。

(2)试验与计算表明,夏季制冷工况下水泥土能源桩单位孔深换热量比土中地埋管提升22.88%~34.20%;冬季制热工况下水泥土能源桩单位孔深换热量比土中地埋管增大21.20%~55.60%。

(3)随着地埋管内循环介质流速的增加,水泥土能源桩与土中地埋管进出口水温差都在减小,仅靠提高管内流速并不能使能源桩获得更大的换热量。正确的方法是选择合适的流速与管径,有效地提高水泥土能源桩换热能力,进而降低工程造价。

本次相似模型试验运行时间较短,试验结论较实际工况存在一定误差。下一阶段的研究将在此基础上增加连续运行时间,加强地面上管道的绝热措施,并对水泥土能源桩承载力变化等力学性质进行研究。

## 参考文献 (References) :

- [1] 徐伟,倪江波,孙德宇,等.我国建筑碳达峰与碳中和目标分解与路径辨析[J].建筑科学,2021,37(10):1~8. [XU Wei, NI Jiangbo, SUN Deyu, et al. Research

on the target decomposition and path of building carbon peak and carbon neutrality in China[J]. Building Science, 2021, 37(10): 1~8. (in Chinese with English abstract) ]

- [2] 中国建筑节能协会能耗统计专业委员会.中国建筑能耗研究报告(2020)[R].北京:中国建筑工业出版社,2020: 19~36. [Committee of Building Energy Data, China Association of Building Energy Efficiency. Research report on building energy consumption in China (2020)[R]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020: 19~36. (in Chinese) ]
- [3] 冯国会,陈菲,常莎莎.近零能耗建筑围护结构多目标优化研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2023,39(4): 699~706. [FENG Guohui, CHEN Fei, CHANG Shasha. Multi-objective optimization of envelope structure for near zero energy building[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2023, 39(4): 699~706. (in Chinese with English abstract) ]
- [4] 郑江,高翔,张鑫.基于专利数据挖掘的情报分析研究——以能源桩领域为例[J].中国发明与专利,2021,18(3): 50~56. [ZHENG Jiang, GAO Xiang, ZHANG Xin. Analysis of patent information based on data mining[J]. China Invention & Patent, 2021, 18(3): 50~56. (in Chinese with English abstract) ]
- [5] 邹鹏飞,王彩会,杜建国,等.地热水系统采灌方案模拟优化研究——以苏北农村清洁能源供暖示范区为例[J].水文地质工程地质,2023,50(4): 59~72. [ZOU Pengfei, WANG Caihui, DU Jianguo, et al. A study of simulation and optimization of the production-reinjection scheme of a geothermal water system: A case study of the geothermal space heating demonstration area in northern Jiangsu countryside[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 59~72. (in Chinese with English abstract) ]
- [6] 文冬光,张二勇,王贵玲,等.干热岩勘查开发进展及展望[J].水文地质工程地质,2023,50(4): 1~13. [WEN Dongguang, ZHANG Eryong, WANG Guiling, et al. Progress and prospect of hot dry rock exploration and development[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 1~13. (in Chinese with English abstract) ]
- [7] 范惠文.地源热泵垂直埋管换热器换热效率下降因素分析[J].节能与环保,2021(1): 73~75. [FAN Huiwen. The effect factors of decreasing efficiency on vertical geothermal heat exchanger[J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2021(1): 73~75. (in Chinese with English abstract) ]

- [8] 吴晓澍, 茅革新. 能源桩技术的研究与工程应用进展综述[J]. 暖通空调, 2020, 50(12): 1–7. [ WU Xiaoshu, MAO Jinfeng. Review on research and engineering application of energy pile technology[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2020, 50(12): 1–7. (in Chinese with English abstract) ]
- [9] BRANDL H. Energy foundations and other thermo-active ground structures[J]. Géotechnique, 2006, 56(2): 81–122.
- [10] NICHOLSON D P, CHEN Q, DE SILVA M, et al. The design of thermal tunnel energy segments for Crossrail, UK[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability, 2014, 167(3): 118–134.
- [11] 尚少文, 刘金玉, 刘兵红, 等. 地埋管管群换热器温度场影响因素的模拟研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(3): 566–576. [ SHANG Shaowen, LIU Jinyu, LIU Binghong, et al. Ground-coupled groupHeat exchanger factors affecting temperature simulation[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2018, 34(3): 566–576. (in Chinese with English abstract) ]
- [12] 王恩琦, 黄体士, 张方方, 等. 回填材料对地源热泵系统换热效率的影响分析[J]. 制冷与空调(四川), 2019, 33(3): 240–244. [ WANG Enqi, HUANG Tishi, ZHANG Fangfang, et al. Analysis of the influence of backfilling material on the heat transfer efficiency of ground source heat pump system[J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2019, 33(3): 240–244. (in Chinese with English abstract) ]
- [13] 隋智力, 赵春雷, 李庆文, 等. 基于石墨混凝土的能源桩传热特性强化研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2021, 46(1): 83–88. [ SUI Zhili, ZHAO Chunlei, LI Qingwen, et al. Study on heat transfer enhancement of energy pile based on graphite concrete[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2021, 46(1): 83–88. (in Chinese with English abstract) ]
- [14] 陈红兵, 栾丹明, 褚赛, 等. 基于相变流体的热管式太阳能 PV/T 热电联供系统实验研究[J]. 可再生能源, 2017, 35(7): 984–989. [ CHEN Hongbing, LUAN Danming, CHU Sai, et al. Experimental study on the performance of a slurry PCM-based heat pipe solar PV/T cogeneration system[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(7): 984–989. (in Chinese with English abstract) ]
- [15] WANG Kaipeng, LI Qimin, CHENG Ke, et al. Experimental investigation on efficient heat collection of aboveground pipes[J]. Thermal Science, 2020, 24(2 Part B): 1445–1460.
- [16] GUO Pingye, HE Manchao, ZHENG Liange, et al. A geothermal recycling system for cooling and heating in deep mines[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 116: 833–839.
- [17] 詹永勤. 天津国家会展中心地坪地基设计分析[J]. 建筑科学, 2020, 36(增刊 2): 39–44. [ ZHAN Yongqin. Design and analysis of floor foundation for exhibition hall of Tianjin national convention and exhibition center[J]. Building Science, 2020, 36(Sup 2): 39–44. (in Chinese with English abstract) ]
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. [ Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of building foundation: GB 50007—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese) ]
- [19] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. [ Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for investigation of geotechnical engineering: GB 50021—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese) ]
- [20] 中国建筑科学研究院. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. [ China Academy of Building Research. Technical code for ground treatment of buildings: JGJ 79—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese) ]
- [21] 中华人民共和国建设部. 地源热泵系统工程技术规范: GB 50366—2005[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. [ Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical code for ground-source heat pump system: GB 50366—2005[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese) ]

编辑: 张若琳