

DOI: 10.11779/CJGE20230203

# 冬季运行能量桩热力响应及系统性能监测与评价

孔纲强<sup>1,2</sup>, 陈 玉<sup>\*1</sup>, 杨 庆<sup>3</sup>

(1. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024;  
3. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 以湖北宜昌地区 25 m<sup>2</sup> 的建筑房间冬季供暖需求为应用场景, 构建由能量桩、集分水器、热泵机组、循环水泵等组成的地源热泵系统, 分析建筑房间实际冬季供暖需求条件下, 能量桩系统持续或间歇运行对能量桩热力响应及系统性能的影响规律, 并开展传统钻孔埋管地源热泵系统试验和空气源热泵系统试验进行对比分析。着重探讨实际运行条件下能量桩热力响应特性与传统 TPT 或 TRT 试验条件下获得结果之间的异同点, 监测能量桩系统的供暖效果、能效比 (COP)。持续运行试验对应桩顶出现最大温度降低值 3.78°C 及最大约束拉应力 0.70 MPa (约为完全约束应力上限值的 57.5%), 运行桩较非运行对角桩对应承台部位产生的实测应变值差值在顶部和底部分别为 19.98, 17.78  $\mu\epsilon$ 。实测能量桩系统 COP 约为 3.03, 较相关空气源热泵系统提高约 12.2%~21.2% (规范参考 COP 为 2.50~2.70)。能量桩系统较常规空气源热泵系统, 能提前约 2.5 h 到达预设温度, 具有更快的启动速度。

**关键词:** 能量桩; 间歇运行; 热力响应特性; 能效比 (COP); 现场试验

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)06-1309-09

作者简介: 孔纲强(1982— ), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事能源地下结构与工程等方面的教学与研究工作。  
E-mail: gqkong1@163.com。

## System monitoring and evaluation and thermo-mechanical characteristics of energy piles during winter operation

KONG Gangqiang<sup>1,2</sup>, CHEN Yu<sup>1</sup>, YANG Qing<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** To address the winter heating demand of a 25 m<sup>2</sup>-area building room in Yichang, Hubei Province, a ground source heat pump system coupled with energy piles (referred to as “energy pile system”) is constructed, which includes energy piles, a water collector and distributor, heat pump units and a circulating water pump. Under the actual continuous or intermittent operation of the energy pile system, the thermo-mechanical characteristics of energy piles and system performance are studied. The tests on the conventional borehole buried pipe-based ground source heat pump system and the air source heat pump system are conducted for comparison and analysis as well. The study focuses on the similarities and differences of thermo-mechanical characteristics of energy piles under actual operation and the traditional TRT or TPT test conditions, and the heating performances and COP of the energy pile system are monitored. Under the test conditions in this study, corresponding to the continuous tests, the maximum temperature reduction value of 3.78°C and the maximum thermally induced stress of 0.70 MPa (about 57.5% of the upper limit of the fully confining stress) occur at the pile top. The maximum observed strain differences between the operating piles and the non-operating piles corresponding to the cap structures at the upper and lower layer are 19.98  $\mu\epsilon$  and 17.78  $\mu\epsilon$ , respectively. The measured COP of the energy pile system is about 3.03, which is about 12.2%~21.2% higher than that of the related air source heat pump system (the normative reference COP is 2.50~2.70). The energy pile system has a faster start-up speed than the conventional air source heat pump, which reaches the preset temperature about 2.5 h earlier.

**Key words:** energy pile; intermittent operation; thermo-mechanical characteristic; coefficient of performance; field test

## 0 引言

能量桩兼具承担上部荷载及与周围土体进行热交

基金项目: 国家自然科学基金优青项目 (51922037)

收稿日期: 2023-03-08

\*通信作者 (E-mail: ctgu\_chenyu@163.com)

换的双重作用, 其与热泵机组结合使用而形成的新型地源热泵系统(或称能量桩系统), 能有效利用浅层地热能实现建(构)筑物的供暖或制冷需求。且具有高效率低排放的优点, 契合当前碳排放的政策, 一定程度上能缓解当前的能源问题<sup>[1-2]</sup>。

当前, 针对能量桩热力响应特性的测试, 既有研究主要集中于能量桩在人为输入变量条件下的热力学响应, 主要包括在进水口进行恒定功率加热 (TRT) 或者恒定温度加热 (TPT)<sup>[3-4]</sup>, 仅有少量关于能量桩系统服务于建筑物的现场实测报告<sup>[2, 5-7]</sup>。研究结果表明, 地源热泵系统 (GSHP) 的性能表现较常规的空气源热泵高, 但其实际运行能效与机理尚不清楚。能量桩系统在实际运行环境下, 桩身也会产生一定的热力响应行为, 其与模拟试验对应结果的差异及关联, 也缺乏相应的实测数据支撑和系统分析。

能量桩系统在实际服役过程中, 可能每天仅运行一段时间, 因而产生了间歇循环运行工况。相关学者针对能量桩, 对比研究了其分别处于持续加热和间歇循环加热等工况下的性能表现, 结果发现由于间歇循环运行工况下存在着土体温度恢复期, 使得能量桩表现出较持续运行工况下更高的换热效率及能效比 (COP)<sup>[8-10]</sup>。但是, 间歇运行模式因为频繁的启闭, 其能量消耗也更大<sup>[11]</sup>。部分热泵机组出于节能角度考虑, 内设有温度传感器, 当室内温度到达预设温度时, 机组将停止运行, 至再次超出预设温度一定范围时再次启动。因此, 该设定下能量桩系统的持续运行工况, 其不关机运行可视作不定频率的无规则间歇运行, 较持续运行一段时间, 然后主动人为停机的规则间歇工况, 二者的性能表现差异未知。同时, 能量桩的回填材料多为混凝土, 其抗压强度值明显高于抗拉强度值。供暖工况下, 能量桩桩身产生的热致拉应力对桩身影响, 较制冷工况下的热致压应力更应引起重视。

因此, 以湖北宜昌地区  $25\text{ m}^2$  的建筑房间作为能源需求侧, 以两根串联的能量桩为能源供给侧, 构建能量桩系统以满足既有建筑房间的热负荷需求。在冬季工况下, 开展能量桩系统 24 h 不关机持续运行 (H-24)、16 h 运行-8 h 停机 (H-16)、12 h 运行-12 h 停机 (H-12) 试验, 并开展传统钻孔埋管地源热泵系统短期 10 h 供暖 (BH-10) 及传统空气源热泵短期 10 h 供暖 (AC-10) 试验进行对比分析。探讨冬季真实运行环境下的能量桩的热力响应特性, 监测能量桩系统的运行性能, 初步揭示其供暖效果、COP 及经济性。研究结果可为能量桩系统的设计、构建及运行提供技术支撑。

## 1 现场试验概况

### 1.1 系统布置

现场试验位于湖北省宜昌市, 建筑主楼 15 层、副楼 5 层及架空层 4 层; 以一间位于 2 楼的实验室为热负荷需求端, 房间面积约为  $25\text{ m}^2$  (长  $5.25\text{ m} \times$  宽  $4.80\text{ m}$ )、层高  $4.0\text{ m}$  (中国一般民用建筑层高  $2.8\text{ m}$ )。由于层高相对更高, 单位面积的热负荷需求指数相应偏大。参考《民用建筑供暖通风与空气调节规范》(GB 50736—2012), 设计阶段热负荷指标约为  $200\text{ W/m}^2$ 。

系统由能量桩、集分水器、热泵机组(含外机、内机)、循环水泵、膨胀罐、控制器等设备组成, 相应的连接示意如图 1 所示。桩基地埋管连接集分水器, 且每组换热管采用独立阀门控制。换热管联通后设置一组总管作为系统的进/出口水管, 与热泵机组连接。选用 McQuay 生产的分体式热泵机组, 外机型号为 MWSC015DRP、内机型号为 MCC015WP、机组内的制冷剂为 A410a, 额定制冷/热量分别为  $3.60, 4.05\text{ kW}$ 。外机作用相当于压缩机、蒸发器和冷凝器的集成, 内机类似于风机作用; 膨胀罐等配套设备主要是为了消除管道受热膨胀可能引起的潜在风险。

### 1.2 含承台能量桩及测试元器件布设

含承台能量桩结构布置于建筑物后方的无荷载场地上, 该结构上覆  $3.0\text{ m}$  的回填土和  $0.20\text{ m}$  厚混凝土面层(图 1)。能量桩桩长  $18.0\text{ m}$ , 桩顶以下  $0\sim 4.5\text{ m}$  桩径  $1.0\text{ m}$ , 桩顶  $4.5\sim 18.0\text{ m}$  桩径  $0.8\text{ m}$ , 桩间距为  $3.80\text{ m}$ <sup>[3, 10]</sup>。桩 A 和桩 B 分别采用单 U 型和 W 型换热结构, 换热管为 PE 管, 外径  $25\text{ mm}$ 、壁厚  $2\text{ mm}$ 。在桩 A 内每隔  $3\text{ m}$  对称布置一组振弦式温度/应力传感器。承台结构为  $5.20\text{ m} \times 5.20\text{ m} \times 1.20\text{ m}$  (长  $\times$  宽  $\times$  高), 桩基和承台均由 C40 混凝土结构浇筑而成, 混凝土的弹性模量为  $32.5\text{ GPa}$ , 热膨胀系数取  $10\text{ }\mu\text{e/}^\circ\text{C}$ , 其抗压/拉强度标准值分别为  $26.8, 2.39\text{ MPa}$ 。作为运行桩的桩 A 和非运行的对角桩桩 C 对应的上部承台结构中, 分别布置有两层水平传感器, 其中顶层传感器距承台顶部  $0.25\text{ m}$ , 底层传感器距承台底部  $0.15\text{ m}$ 。

### 1.3 现场土性参数

桩周土体的基本物理力学参数指标见表 1 所示。桩周土体主要为黏土质砂和砂岩层。黏土质砂层中砾石以上颗粒含量在  $10\% \sim 15\%$ ; 表层土体松散, 土质不均匀, 杂有碎砖块、生活垃圾等杂物。砾石含量随深度的增加而增加, 约  $14.0\text{ m}$  深度处出现了薄卵石层, 约  $17.5\text{ m}$  深度处揭露砂岩层, 该岩层场区内均有分布, 厚度大且压缩性低, 适合作为桩基的持力层; 4 根桩基

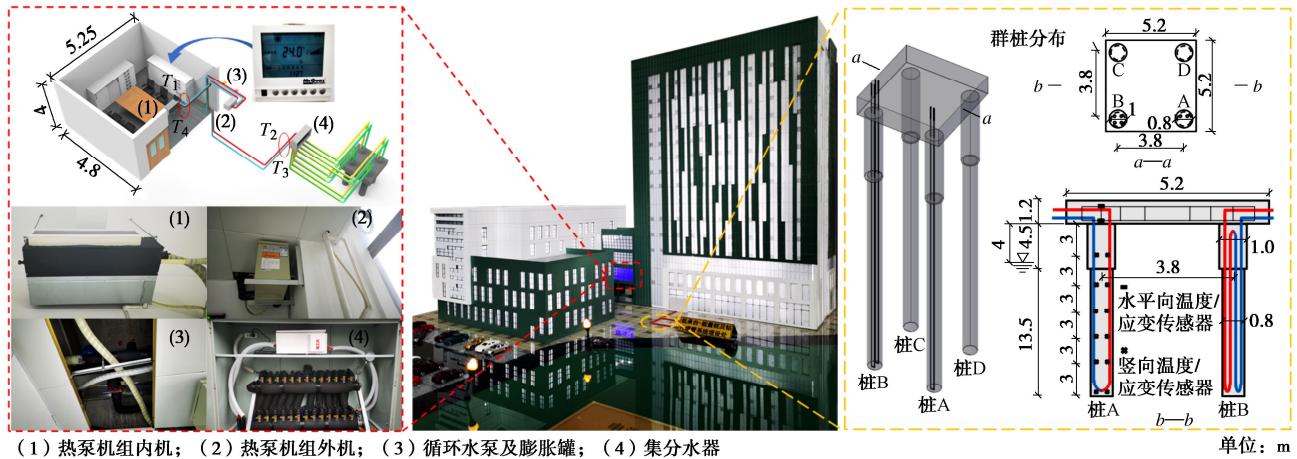


图 1 能量桩系统及测试器元件布置示意图

Fig. 1 Layout of energy pile system and sensors

均嵌入砂岩层中约 0.5 m 深度, 地层无渗流。基于 KD2-Pro 热导率仪, 可测得桩深 1, 5, 13, 17 m 处的土体热导率分别为 1.70, 1.85, 1.91, 1.83 W/m<sup>2</sup>·°C<sup>[3, 10]</sup>。

表 1 桩周土体物理性质和力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils around piles

深度/ m	重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	含水率/ %	压缩系数/ $\text{MPa}^{-1}$	黏聚力/ $\text{kPa}$	内摩擦 角/(°)
1	18.17	25.5	0.78	17.10	22.90
5	19.94	26.1	0.45	25.99	15.79
9	19.83	26.1	0.40	27.67	12.72
13	20.04	25.3	0.44	27.23	13.11
17	20.18	25.9	0.41	26.79	14.24

系统非运行期间,通过桩内埋设传感器的全年监测可得到温度沿桩深的分布规律。2018年—2021年不同季节桩身沿深度方向的温度分布规律如图2所示。四季的平均温度分别为 $19.4^{\circ}\text{C}$ , $21.2^{\circ}\text{C}$ , $22.1^{\circ}\text{C}$ , $21.0^{\circ}\text{C}$ 。受环境温度的影响,0~9.0 m桩身温度存在一定的波动,9.0 m以下桩身温度基本稳定在 $20.7^{\circ}\text{C}$ 左右。

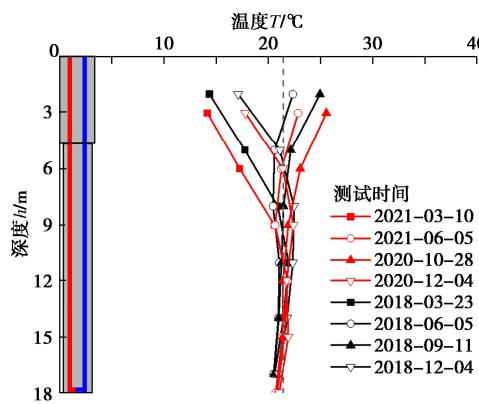


图 2 桩周土体季节性变化图

Fig. 2 Seasonal variation of soil temperature around pile

## 1.4 试验工况设计

结合《民用建筑供暖通风与空气调节规范：GB

50736—2012》及前期系列预试验,冬季工况设置室内控制温度为24°C,以达到人体最舒适区间。系统运行及试验工况设计见表2所示。

表 2 系统运行试验设计

Table 2 Field test schemes of system operation

序号	流速/ ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	运行模式	试验时间
H-24	0.85	24 h 持续供暖	11 d (2022.12.10—12.21)
H-16	0.85	16 h 供暖—8 h 停机	6 d (2022.02.24—03.02)
H-12	0.85	12 h 供暖—12 h 停机	6 d (2022.03.20—03.26)
BH-10	0.85	短期供暖	10 h (钻孔埋管 GSHP)
AC-10	—	短期供暖	10 h (空气源热泵)

试验工况主要包括能量桩系统持续供暖试验（H-24）、间歇供暖试验（H-16：机组运行 16 h、停机 8 h 为一次循环；H-12：机组运行 12 h、停机 12 h 为一次循环）等 3 种，并开展传统钻孔埋管地源热泵系统供暖试验（BH-10）和空气源热泵系统供暖试验（AC-10）进行对比分析。现场实测过程中，用户侧机组两端及地源侧集分水器处的进/出口水温、环境温度、室内温度改变量的记录频率为 10 min/次；系统耗电量记录频率为 1 h/次；桩身的温度/应力改变由数据采集仪每 30 min 自动更新并记录留存。

## 2 实际运行条件下含承台能量桩热力响应特性

## 2.1 桩身温度

能量桩系统实际运行工况下桩A温度改变量沿桩深方向的分布曲线如图3所示。3组不同试验工况下，桩身各部位的温度均出现了一定的降低，各部位的温

度降低值却并不均匀。桩身最大温度降低值出现于桩顶, 是能量桩吸收冷量及桩身上部受环境温度影响较大等综合作用的结果。在相同运行时间内, H-16 及 H-12 试验工况对应最大温度降低值分别为  $-1.49^{\circ}\text{C}$ ,  $-0.62^{\circ}\text{C}$ , 分别为 H-24 试验工况对应最大降低值  $-2.51^{\circ}\text{C}$  的 59.4%, 24.7%。桩身中部的土体热导率和含水率较其他部位要大, 吸收冷量后土体的热交换能力更大, 因此在桩身中部也出现了与桩端相当的温度降低值。

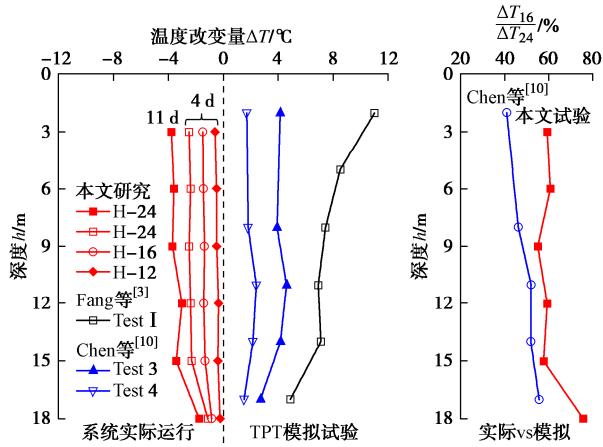


图 3 桩身温度改变量分布曲线图

Fig. 3 Distribution curves of temperature change along pile depth

在同一试验场地、建筑环控系统建成之前, Fang 等<sup>[3]</sup>及 Chen 等<sup>[10]</sup>开展了人为设定恒定输入功率(非真实运行条件下的功率)的 TPT 模拟试验, 获得的桩身温度改变量分布趋势与本文实际运行环境下相似。但是, Chen 等<sup>[10]</sup>是在秋季进行夏季的加热试验, 属于反季节模拟, 桩顶温度升幅一部分被土体上层环境温度影响, 导致最大的温度升幅出现于桩身中部; Fang 等<sup>[3]</sup>试验过程中承台上部未进行回填, 缺少回填土的保温作用, 在桩顶初始温度较低前提下, 对应温度升幅最大。由于桩端以岩石层作为持力层, 热耗散速率最大, 对应系统实际运行及 TPT 模拟等 6 组不同试验, 均出现了桩端产生最小温度改变量的现象, 一定程度上体现出模拟试验的可参考性。

以持续运行工况的桩身温度改变量为基准值, 对间歇运行工况的对应值进行归一化处理, 可进一步得到沿桩深方向的温度改变量占比分布曲线(图 3)。在同一试验场地, Chen 等<sup>[10]</sup>也分别开展了 24 h 加热的持续试验(Test 3)及 16 h 加热-8 h 恢复的间歇试验(Test 4), 但间歇循环试验对应的桩身温度改变量在持续试验中的占比最大值为 55.6%, 要小于本文能量桩系统的对应占比 75.7%。这是由于模拟过程中持续试验接近于系统运行的极限工况, 即未达到预设温度前机组保持运行阶段。在能量桩系统的实际运行过程

中, 由于内设温度传感器的控制, 在达到预设温度后存在着机组停机过程, 因此系统的持续运行更接近于模拟试验中一组不定频率无规则的间歇循环运行, 使得系统实际运行对应的桩身温度改变量更小, 进而提高了间歇循环运行对应的桩身温度改变值占比。

为进一步评判并比较间歇工况下土体的温度恢复能力, 引入量化指标平均温度恢复系数  $\bar{n}_T$ , 并给定其计算公式为

$$\bar{n}_T = \frac{\sum_{i=0}^n \left| \frac{T_{\text{ini}}(i+1) - T_{\text{end}}(i)}{T_{\text{end}}(i) - T_{\text{ini}}(i)} \right|}{n} \quad (1)$$

式中:  $T_{\text{ini}}(i)$ ,  $T_{\text{end}}(i)$  分别为第  $i$  次循环开始和结束时的桩身温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{\text{ini}}(i+1)$  为第  $i+1$  次循环开始时的桩身温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $n$  为试验持续时间 (d)。

由式(1)计算得到的不同工况下平均温度恢复系数  $\bar{n}_T$  沿桩深变化规律如图 4 所示。

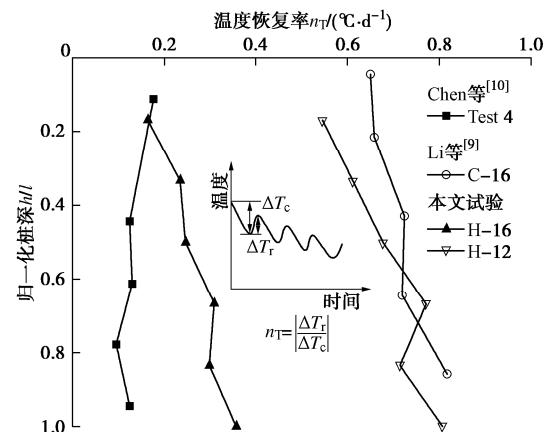


图 4 间歇运行工况对应 A 桩桩身温度恢复率

Fig. 4 Ratios of temperature recovery of pile A under intermittent operation

显然地, 间歇循环工况下恢复期更长,  $\bar{n}_T$  值越大。即 H-12 试验工况下桩身的平均  $\bar{n}_T$  值  $0.688^{\circ}\text{C}/\text{d}$  明显大于 H-16 工况下对应  $0.268^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。两种不同间歇工况下,  $\bar{n}_T$  均呈现出沿桩深逐渐增大的趋势。在桩身上部, 受环境温度季节性影响, 供暖工况对应的桩身经过制冷间歇循环后, 桩身降低的温度恢复较慢。随着桩身深入, 环境影响减弱, 土体经过冷循环后逐步向土体恒温区过渡, 进一步提高了  $\bar{n}_T$ 。桩端位于岩石层中, 温度耗散较快, 使得最大的  $\bar{n}_T$  均出现于桩端部分。和同类型的 16 h 工作-8 h 恢复的 TPT 模拟试验进行比较, H-16 试验工况下, 系统实际运行对应的  $\bar{n}_T$  处于 Chen 等<sup>[10]</sup>和 Li 等<sup>[9]</sup>实测结果范围内。Chen 等<sup>[10]</sup>夏季模拟试验属于反季节模拟, 桩身温度升幅及回落值均较小, 使得  $\bar{n}_T$  计算结果也较小。Li 等<sup>[9]</sup>试验桩基范围

内存在渗流, 一定程度上能更好的促进热量恢复。

## 2.2 桩身热致应力

假定桩体压缩量为负值, 相应的热致拉应力为正值, 以 H-24 持续工况为研究对象, 其自由应变、实测应变及约束应力<sup>[3]</sup>沿桩深方向的分布曲线如图 5 所示。其中, 埋设在 A 桩中桩深 12, 15 m 处的传感器出现故障, 未测得这两个位置处的应力应变相关值。

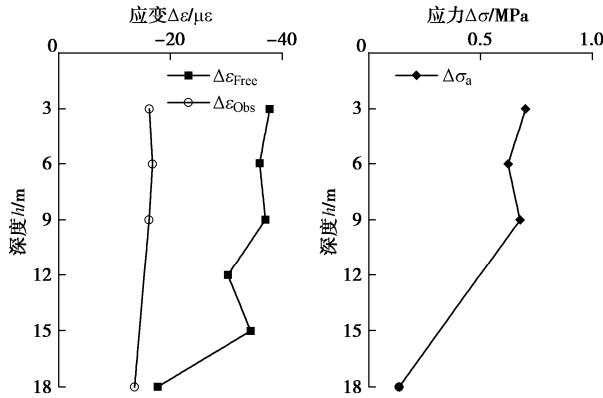


图 5 持续运行工况 A 桩对应温度及应变/力沿桩身分布曲线

Fig. 5 Distribution curves of temperature, stain and stress of pile A along pile depth in H-24 tests

由图 5 可知, 受环境温度影响, 桩顶出现最大温度降低值  $3.78^{\circ}\text{C}$ , 对应最大约束拉应力  $0.70 \text{ MPa}$  也出现于桩顶, 该值为 C40 混凝土抗拉强度标准值 ( $2.39 \text{ MPa}$ ) 的  $29.3\%$ , 处于安全裕度内, 一定程度上说明能量桩系统实际运行产生的附加拉应力不会影响其自身结构特性。约束应力沿桩深方向的变化规律同自由应变的变化趋势类似, 基于自由应变直接与桩身温度升幅相关, 表明约束应力与桩身温度升幅也存在着一定的相关性。桩身受冷后由两端向中部进行压缩变形, 因此最大实测应变出现于桩身中部, 实测值为  $16.81 \mu\text{e}$ 。桩端以岩土层为持力结构, 温度耗散速率较桩身其他部位要大, 使得桩端的温度回落、实测应变及约束应力值均最小。

本文实际运行条件及相关人为设定恒定输入进水温度的 TPT 模拟试验<sup>[3, 9, 10, 12-13]</sup>对应的热变形约束系数沿桩深方向分布规律如图 6 所示。热变形约束系数  $\alpha$  为桩身约束应变与温度改变量的比值, 实际运行及模拟试验对应的  $\alpha$  均小于混凝土的自由变形系数 ( $10 \mu\text{e}/^{\circ}\text{C}$ ), 表明桩周土体结构、桩顶及桩端约束对桩身的热变形产生了一定的约束, 也体现出模拟试验的可参考性。 $\alpha$  值越小, 对应的约束能力越强。能量桩系统实际运行条件下最大的  $\alpha$  值为  $5.73 \mu\text{e}/^{\circ}\text{C}$ , 出现于桩身中部, 说明桩身中部约束小于两侧。同时, 实际运行条件下桩顶  $\alpha$  值  $5.61 \mu\text{e}/^{\circ}\text{C}$  小于桩端对应值  $2.34 \mu\text{e}/^{\circ}\text{C}$ , 说明桩端约束强于桩顶, 该趋势与 Chen 等<sup>[10]</sup>和 Fang 等<sup>[3]</sup>在同一试验场地开展 TPT 模拟试验的结果一致。其

中, 桩顶约束来源于承台结构及上覆回填土, 桩端则位于岩石层。Li 等<sup>[9]</sup>和 Mccartney 等<sup>[12]</sup>桩顶均有筏板或承台结构, 也出现了较桩身中部更大的约束; You 等<sup>[13]</sup>桩顶无任何约束, 因此其对应  $\alpha$  值大于桩身中部, 模拟试验出现的分布趋势与本文实际运行环境下的实测结果一致。本文桩身各部分的  $\alpha$  值均小于模拟试验结果<sup>[3, 10]</sup>, 说明了实际运行条件较 TPT 模拟试验结果, 桩身受到的约束相对更强。

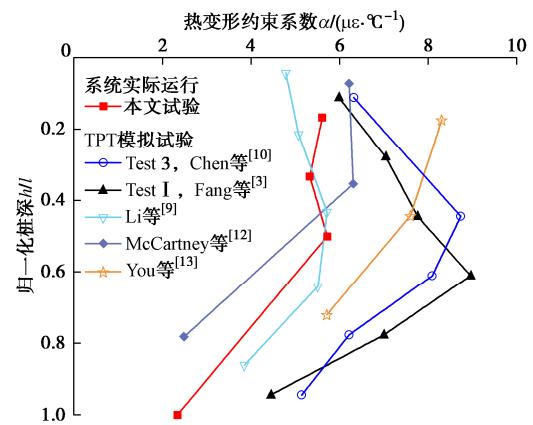


图 6 热变形约束系数沿桩深方向分布曲线

Fig. 6 Mobilized coefficients of thermal deformation along pile depth

A 桩沿桩深方向约束应力关于温度升幅的关系曲线如图 7 所示。

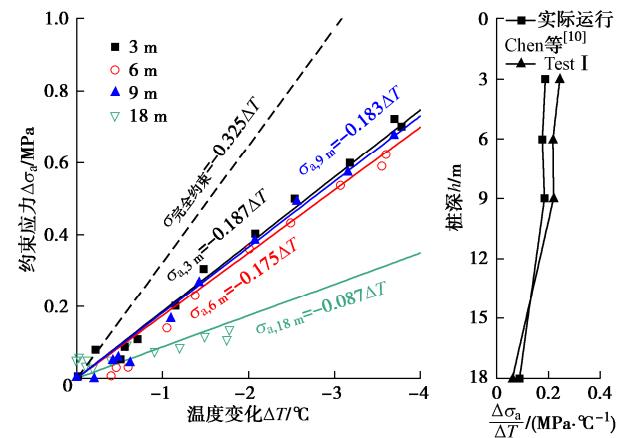


图 7 A 桩约束应力与温度变化量关系

Fig. 7 Distribution curves of thermally induced stress versus temperature change of pile A

桩顶出现最大的约束应力系数  $0.187 \text{ MPa}/^{\circ}\text{C}$ , 主要为环境温度、热泵机组运行及承台结构和上覆回填土的综合影响。桩身中部约束应力系数和桩顶相当, 为  $0.183 \text{ MPa}/^{\circ}\text{C}$ , 环境温度影响沿桩深方向逐渐减弱, 更多的约束来源于桩侧摩阻力的限制。桩端以岩石层为持力结构, 较大的热耗散率进一步降低了温度改变值, 减少了约束应力系数, 仅为  $0.087 \text{ MPa}/^{\circ}\text{C}$ 。Chen 等<sup>[10]</sup>在同一试验场地开展 TPT 的持续模拟试验, 约束

应力系数沿桩深分布规律与本文实际运行条件下一致, 且二者拟合结果相当。

若由于温度升幅产生的热膨胀变形被完全约束, 则拟合直线的斜率存在着上限, 对于本文试验条件下的拟合直线斜率上限值, 即完全约束应力系数为  $-0.325 \text{ MPa}/\text{C}$  (图 7)。H-24 试验工况下, 桩顶出现的最大约束应力为完全约束应力上限值的 57.5%, 说明在能量桩系统冬季实际运行过程中, 桩身产生的附加应力不会被完全约束, 该现象与目前已报道的部分制冷模拟试验<sup>[4, 9, 12, 14-15]</sup>一致 (图 8), 进一步证明了能量桩系统实际运行对桩身产生的结构特性影响较小。另一方面, 实际运行过程最大约束应力占比系数在目前已报道的模拟试验相关系数范围内, 体现出 TRT 及 TPT 等模拟试验的可参考性。

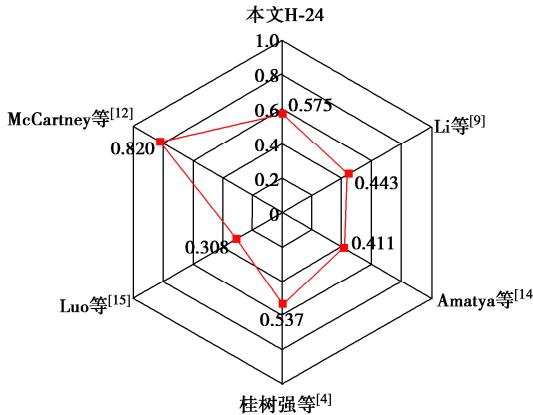


图 8 桩身约束应力占比完全约束雷达图

Fig. 8 Radar plot of pile restraint stress as a percentage of fully restrained

### 2.3 承台热力响应特性

承台结构中布设有两层传感器, 上层传感器可直接反映上覆 3 m 回填土的保温效应和约束作用; 下层传感器将直接体现能量桩运行桩的运行对承台结构的影响。运行桩 A 桩对应承台部位的温度和约束应力随时间变化曲线如图 9 所示。

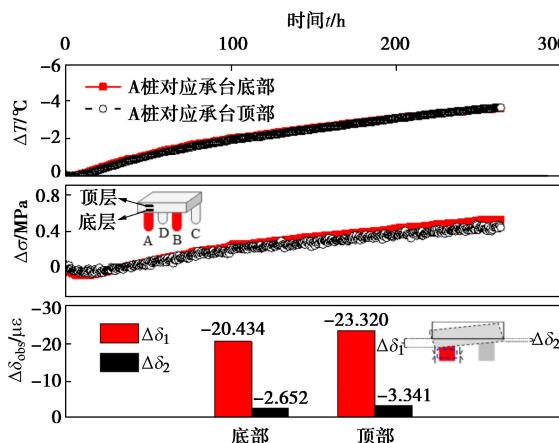


图 9 承台温度、应力及应变变化图

Fig. 9 Change of temperature, stress and strain of cap structures

H-24 试验工况下, A 桩对应承台部位温度降低值约为  $3.70^\circ\text{C}$ , 由此产生的附加拉应力约为  $0.50 \text{ MPa}$ 。承台顶部和底部的温度及应力变化曲线几乎重合; 即能量桩系统实际运行对邻近结构的影响, 与环境温度改变的作用几乎等效。

进一步的, 运行桩 A 桩较非运行对角桩 C 桩对应承台部位产生的实测应变差值在顶部和底部分别为  $19.98, 17.78 \mu\epsilon$ , 较小的实测应变差值也反映出能量桩系统的实际运行, 对其邻近结构产生的影响可以近似忽略。Murphy 等<sup>[16]</sup>通过对 8 根能量桩在加热和制冷下的热力学响应进行监测, 得到能量桩的运行对上部建筑物不会产生结构破坏, 与本文试验结果基本一致。

## 3 系统性能监测与评价

### 3.1 系统室温调节比较

能量桩系统持续运行与间歇运行条件下, 室内温度随时间变化如图 10 所示。3 组试验工况对应不同的环境温度, 为了消除环境温度因素的干扰, 引入温度改变率将其进行归一化处理:

$$T_{r-r} = \frac{T_r - T_a}{T_a} \quad . \quad (2)$$

式中:  $T_{r-r}$  为温度改变率;  $T_r$ ,  $T_a$  分别为室内温度及环境温度 ( $^\circ\text{C}$ )。

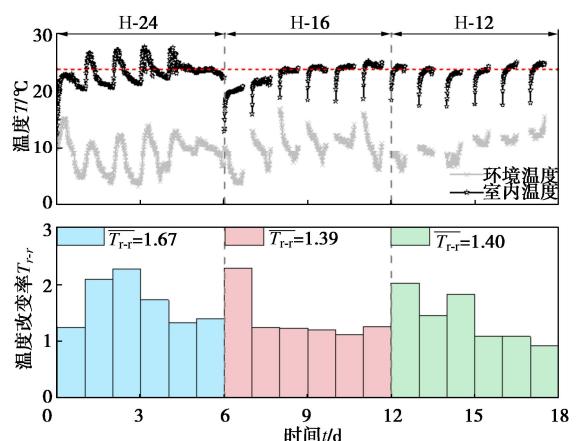


图 10 持续及间歇运行工况室内温度比较

Fig. 10 Comparison of room temperature under continuous and intermittent operations

由图 10 可知, H-16 和 H-12 试验条件下  $\overline{T_{r-r}}$  相当, 均约为 1.40, 略小于 H-24 试验对应值 1.67。主要是因为 H-24 试验开展于冬季, H-16 和 H-12 试验开展于春季, H-24 试验条件下温度调节范围相对更大。同时, 机组持续运行可频繁达到甚至超出预设温度值, 间歇运行工况开启时间受到人为控制, 在有限运行时间内机组可能还未达到预设温度, 二者共同作用使得更大

的  $\bar{T}_{\text{r,r}}$  对应出现于持续运行 H-24 工况。

H-24, BH-10 及 AC-10 等试验工况对应的室内温度变化如图 11 所示。本文选用的空气源热泵额定制热量 4.07 kW, 与热泵机组额定制热量相当, 且悬挂高度均为离地 3.20 m; 热泵机组对应连接 18.0 m 深度的两井钻孔, 换热管类型同样也为 U 型和 W 型。在试验进行 2 h 左右, H-24 和 BH-10 试验工况对应的室内温度均达到了预设温度值, 且逐渐趋向于稳定; AC-10 工况的对应值在试验 4.5 h 左右才达到相同的既定目标温度, 表明 GSHP 相较于空气源热泵有着更快的启动速度。进一步的, H-24 及 BH-10 试验工况下, 每小时耗电量均为 1.18 kW·h, 较 AC-10 工况对应值 1.40 kW·h 减少约 15.7%。能量桩和钻孔埋管不同连接方式下, 机组启动速度和每小时耗电量相当, 但能量桩不需要额外的钻孔费用, 能减少工期, 一定程度上更体现出能量桩的经济性优势。

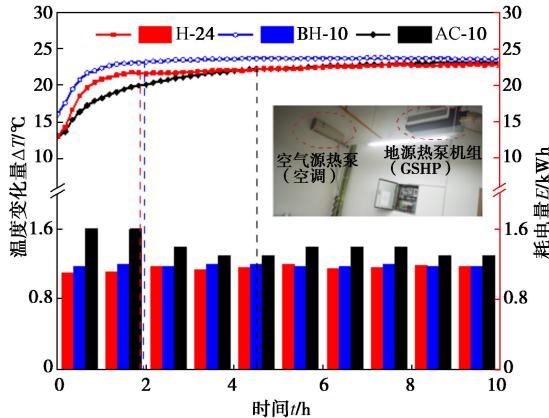


图 11 空气源热泵及地源热泵系统性能差异

Fig. 11 Performance differences between air conditioner and ground source heat pump

### 3.2 系统运行能效比 (COP)

为方便描述, 将用户侧热泵机组两端的进/出口水温标记为  $T_1/T_4$ ; 将地源侧进/出口水温标记为  $T_2/T_3$ (图 1)。H-24 试验工况对应的环境温度、室内温度及进/出水口温度随时间变化如图 12 所示; 由于试验期间昼夜温差、保温特性及换热液为湍流流动等影响, 温度变化曲线呈现一定的波动。为了更好的节省电能, 系统中选定的热泵机组存在着启停效应, 即当室内温度达到预设温度时, 机组将停止运行, 至室温再次升高超过预设温度时将再次启动。

由图 12 可知, 冬季工况下,  $T_1$  平均高出  $T_2$  约  $0.90^{\circ}\text{C}$ ,  $T_3$  平均高出  $T_4$  约  $0.30^{\circ}\text{C}$ 。后续试验分析过程中, 忽略系统传递过程中的热损失, 热泵机组改变的室内热量, 约等于能量桩系统运行过程中, 与桩周土体交换的热量; 以能量桩进出口侧的水温作为计算基准值, 来评测整个系统的换热效率及能效比 (COP)。

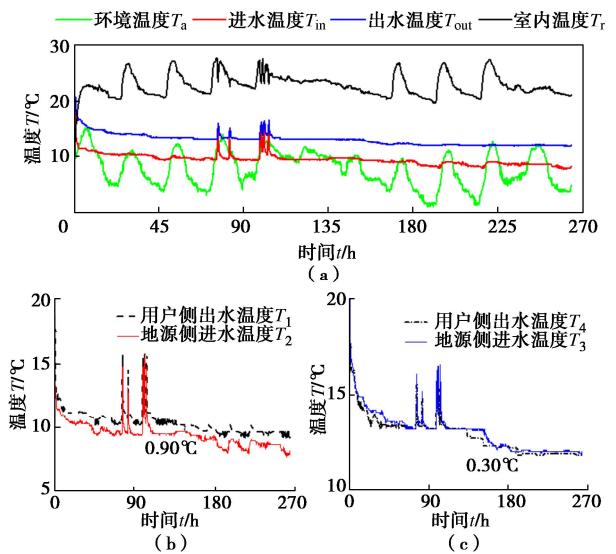


图 12 能量桩系统运行环境温度、室内温度及进/出水口温度随时间变化图

Fig. 12 Profile of ambient temperature, room temperature and inlet/outlet water temperature versus time under operation of energy pile system

能量桩系统运行能效比为换热效率与系统总耗电量的比值, 其具体计算公式为

$$\text{COP} = \frac{Q}{W_{\text{sys}}} \quad , \quad (3)$$

$$Q = |T_{\text{out}} - T_{\text{in}}| \cdot v \cdot \rho \cdot c \quad . \quad (4)$$

式中:  $Q$  为能量桩换热效率 (kW);  $W_{\text{sys}}$  为系统的总耗电量, 包括热泵机组和循环水泵;  $T_{\text{in}}$ ,  $T_{\text{out}}$  分别为地源侧进/出口水温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $v$  为换热液流量, 本试验取为  $0.85 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  $\rho$  为换热液的质量密度, 取  $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;  $c$  为换热液的比热容, 取  $4.2 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot {^{\circ}\text{C}}\text{)}$ 。

由式 (3), (4) 计算可得能量桩系统冬季的 COP 为 3.03, 小于制造商给定值 4.71。①制造商测试过程也为模拟试验, 仅考虑进/出水口温差及对应耗电量; 系统在实际运行过程中, 热泵机组内机在供暖工况下首先释放冷风, 待发动机完全工作后才会逐渐转为暖风, 这部分耗电量偏大; 且机组在停机后重启瞬间, 为了克服启动压缩机的扭力, 瞬时功耗较高, 进一步降低其 COP 值。②制造商对应的进口水温边界条件为  $20^{\circ}\text{C}$ , 而系统真实运行环境下的对应值为  $13.08^{\circ}\text{C}$ ; 在热泵机组允许进口水温阈值内, 冬季更高的进口水温能带走室内更多的冷量, 进一步加大了实际运行与额定值间的差别。

以建筑物能源需求及能量桩每延米的换热量为映射平面, COP 为高程的系统运行对比图如图 13 所示。

《房间空气调节器性能标准: GB/T 7725—2004》给定的空气源热泵相关 COP 规范值为  $2.50 \sim 2.70$ , 本文实测能量桩系统冬季运行 COP 值 3.03 较之提升

12.2%~21.2%，能较好的减少运营成本，缩短投资回收期，一定程度上体现出浅层地热能源的可利用性及优越性。但是，本文试验条件下实测的能量桩系统 COP 明显位于已报道相关地源热泵工程的拟合平面下方<sup>[2, 5-7]</sup>。这主要是由于实验室体量较小，选取的水泵已经为当前市面可提供的最小体型，但较系统而言仍属于“超配”，同型号的水泵能服务于(1.5~2.0)倍的系统体量房间。当前系统配备水泵冬季运行期间每小时耗电量约 0.43 kW·h，按照系统实际需求进行修正后的耗电量约为 0.24 kW·h，进一步修正后的冬季 COP 为 3.60。由图 13 可知，修正后本系统的性能表现点恰好位于拟合平面上，与当前已报道值相当。本文“适配”的能量桩热泵系统丰富了已有的系统 COP 实测数据库，可为相关能量桩热泵系统的设计提供参考。

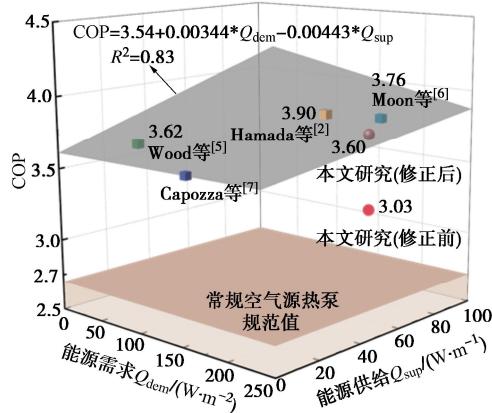


图 13 系统运行 COP 对比

Fig. 13 Comparison of COP of system with previous literature

### 3.3 持续/间歇运行 COP 对比

H-24, H-16 及 H-12 试验工况下的平均 COP 对比结果如图 14 所示。

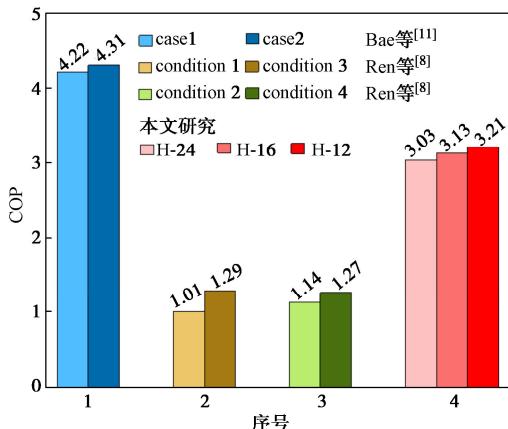


图 14 持续/间歇运行工况 COP 对比

Fig. 14 Comparison of COP under continuous/intermittent operation conditions

H-16, H-12 间歇循环运行工况对应的 COP 值分别为 3.13, 3.21，略高于 H-24 持续运行工况的对应值 3.03。这是由于间歇工况下存在着停机，机组有一定的缓冲时间，桩周土体也存在着回温阶段；持续运行的启停效应虽然也存在着停机时间，但机组内置传感器仍然持续运行，需要消耗部分电量，而且机组在停机后重启瞬时功耗较高，进一步降低其 COP 值。相似的试验现象也报道到于之前的文献<sup>[8, 11]</sup>：Ren 等<sup>[8]</sup>采用人为设定恒定输入进口水温的 TPT 试验方法，实测了微型钢管桩在不同运行模式下的性能差异，发现加热和制冷工况下，间歇循环运行的 COP 较持续运行分别提升约 27.7%, 11.4%。Bae 等<sup>[11]</sup>采用数值模拟的方法研究 GSHP，得到持续运行工况的 COP 值为 4.31，略高于 12 h 运行-12 h 停机工况对应值 4.22。

## 4 结 论

研究了实际冬季运行条件下含承台能量桩的热力响应特性，监测并评价了持续或间歇运行状态下能量桩系统的供暖效果与能效比，得到 4 点结论。

(1) 能量桩系统运行过程中，H-12, H-16 试验工况下桩身的平均温度恢复系数分别为 0.688, 0.268°C/d。H-24 试验工况下，桩顶出现最大温度降低值 3.78°C 及最大约束拉应力 0.70 MPa，为完全约束应力上限值的 57.5%。

(2) H-24 试验工况下，运行桩 A 桩较非运行对角桩 C 桩对应承台部位产生的实测应变值差值在顶部和底部分别为 19.98, 17.78 με。一定程度上反映出能量桩系统的实际运行，对其邻近结构产生的影响近似可以忽略。

(3) 能量桩系统较常规空气源热泵有着更快的启动速度，能提前约 2.5 h 到达预设温度；其每小时耗电量 1.18 kW·h 较空气源热泵系统对应值 1.40 kW·h 减少约 15.7%。

(4) 实测能量桩系统 COP 约为 3.03，较相关空气源热泵系统提高约 12.2%~21.2% (规范参考 COP 为 2.50~2.70)，略低于 H-16 和 H-12 间歇循环运行工况的对应 COP 值 (3.13 和 3.21)。

## 参考文献：

- [1] 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 Hanlong, KONG Gangqiang, NG W W C. Applications of energy piles and technical development of PCC energy piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 176-181. (in Chinese))

- [2] HAMADA Y, SAITO H, NAKAMURA M, et al. Field performance of an energy pile system for space heating[J]. Energy and Buildings, 2007, **39**(5): 517-524.
- [3] FANG J, KONG G, MENG Y, et al. Thermomechanical behavior of energy piles and interactions within energy pile-raft foundations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, **146**(9): 4020079.
- [4] 桂树强, 程晓辉. 能源桩换热过程中结构响应原位试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(6): 1087-1094. (GUI Shuqaing, CHENG Xiaohui. In-situ tests on structural responses of energy piles during heat exchanging process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(6): 1087-1094. (in Chinese))
- [5] WOOD C J, LIU H, RIFFAT S B. An investigation of the heat pump performance and ground temperature of a piled foundation heat exchanger system for a residential building[J]. Energy, 2010, **35**(12): 4932-4940.
- [6] MOON C E, CHOI J M. Heating performance characteristics of the ground source heat pump system with energy-piles and energy-slabs[J]. Energy, 2015, **81**(10): 27-32.
- [7] CAPOZZA A, ZARRELLA A, DE CARLI M. Long-term analysis of two GSHP systems using validated numerical models and proposals to optimize the operating parameters[J]. Energy and Buildings, 2015, **93**(2): 50-64.
- [8] REN L W, XU J, KONG G Q, et al. Field tests on thermal response characteristics of micro-steel-pipe pile under multiple temperature cycles[J]. Renewable Energy, 2020, **147**(9): 1098-1106.
- [9] LI R R, KONG G Q, CHEN Y H, et al. Thermomechanical behaviour of an energy pile-raft foundation under intermittent cooling operation[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2021, **28**(2): 100240.
- [10] CHEN Y, KONG G Q, MENG Y D, et al. Thermal mechanical behavior of energy piles with cap under embedded depth[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2023, **33**(1): 100425.
- [11] BAE S M, NAM Y. Economic and environmental analysis of ground source heat pump system according to operation methods[J]. Geothermics, 2022, **101**(2): 102373.
- [12] MCCARTNEY J, MURPHY K D. Strain distributions in full-scale energy foundations[J]. DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute, 2012, **6**(2): 26-38.
- [13] YOU S, CHENG X H, GUO H X, et al. Experimental study on structural response of CFG energy piles[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, **96**(11): 640-651.
- [14] AMATYA B L, SOGA K, BOURNE-WEBB P J, et al. Thermo-mechanical behaviour of energy piles[J]. Géotechnique, 2012, **62**(6): 503-519.
- [15] LUO J, ZHANG Q, ZHAO H F, et al. Thermal and thermomechanical performance of energy piles with double U-loop and spiral loop heat exchangers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, **145**(12): 4019101-4019109.
- [16] MURPHY K D, MCCARTNEY J S, HENRY K S. Evaluation of thermo-mechanical and thermal behavior of full-scale energy foundations[J]. Acta Geotechnica, 2015, **10**(2): 179-195.