

【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】 · 能源地下结构与工程专辑, 策划: 崔宏志 ·

制冷工况下PHC能源桩的换热性能分析

唐 皓¹, 韦 彬¹, 张国柱², 操子明²

1) 深圳市综合交通与市政工程设计研究总院有限公司, 广东深圳 518003; 2) 东南大学岩土工程研究所, 江苏南京 211189

摘 要: 为研究不同因素对预制高强混凝土 (precast high-strength concrete, PHC) 能源桩换热性能的影响, 建立PHC能源桩三维数值仿真分析模型, 分析不同注浆回填材料导热系数、热交换管入口温度、桩体导热系数和PHC桩回填直径对PHC能源桩换热性能的影响. 结果表明, PHC能源桩的换热量随注浆回填材料导热系数的增加而增大; 制冷工况下, 提高热交换管的入口温度有利于提升PHC能源桩的换热量; 桩体导热系数的增加会提高PHC能源桩的换热性能; PHC能源桩的换热量随着PHC桩回填直径的增加而逐渐提高. 通过田口法分析了不同因素对PHC能源桩换热性能的影响, 热交换管入口温度的影响最大, 其次是注浆回填材料导热系数和PHC桩回填直径, 桩体导热系数的影响最小. 研究结果可为PHC能源桩的工程设计和应用提供技术支撑和指导.

关键词: 岩土工程; 桩基础; PHC能源桩; 换热性能; 制冷工况; 田口法

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2022.01051

Analysis of the heat exchange performance of PHC energy pile under cooling condition

TANG Hao¹, WEI Bin¹, ZHANG Guozhu², and CAO Ziming²

1) Shenzhen Transportation & Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Shenzhen 518003, Guangdong Province, P. R. China

2) Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu Province, P. R. China

Abstract: To investigate the influence sequence of different factors on the heat exchange performance of precast high-strength concrete (PHC) energy pile, a three-dimensional numerical simulation model of PHC energy pile was established and the effects of various thermal conductivities of grout backfill material, inlet temperatures of heat exchange pipe, thermal conductivities and backfill diameters of PHC pile on the heat exchange performance of PHC energy pile were analyzed. The results show that the heat exchange amount of PHC energy pile increases with the increase of the thermal conductivity of grout backfill material. In the cooling condition, increasing the inlet temperature of heat exchange pipe is beneficial to improving the heat exchange amount of PHC energy pile. Increase of thermal conductivity of PHC pile can enhance the heat exchange behavior of PHC energy pile. Moreover, the heat exchange amount of PHC energy pile gradually increases with increasing backfill diameter of PHC pile. On this basis, the Taguchi method was used to analyze the influence sequence of four different factors on the heat exchange performance of PHC energy pile. The impact of the inlet temperature of heat exchange pipe is the greatest, followed

Received: 2021-10-12; **Accepted:** 2021-11-30

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51778138, 51978162)

Corresponding author: Associate professor ZHANG Guozhu. E-mail: zhanggz@seu.edu.cn

Citation: TANG Hao, WEI Bin, ZHANG Guozhu, et al. Analysis of the heat exchange performance of PHC energy pile under cooling condition [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2022, 39(1): 51-58. (in Chinese)



by the thermal conductivity of grout backfill material and backfill diameter of PHC pile, and the impact of thermal conductivity of PHC pile is the least. The results can provide a technical support and guidance for the design and application of the PHC energy piles in practical engineering.

Key words: geotechnical engineering; pile foundation; precast high-strength concrete energy pile; heat exchange performance; cooling condition; Taguchi method

随着经济的快速发展, 各行业领域对能源需求量也在急剧上升. 传统的化石能源的储量有限, 而且会造成环境污染等问题. 因此, 可再生清洁能源的开发和利用显得尤为重要. 浅层地热能作为一种可再生能源, 具有分布广泛、储量大、清洁无污染以及可持续等优点^[1-2]. 地源热泵 (ground source heat pump, GSHP) 是开发利用浅层地热能最常见的技术. 目前, 越来越多的研究者将 GSHP 技术应用于地基能源桩、地下连续墙、隧道和其他地下能源结构, 并取得了良好的效果^[3-7].

目前, 能源桩是地下能源结构中研究较多和应用较为广泛的形式之一. 能源桩基础既可作为承重结构, 又可作为地热能系统的换热构件, 备受国内外学者关注^[6, 8-10]. 预制高强混凝土 (precast high-strength concrete, PHC) 能源桩具有施工便捷、制作简单和成本较低等优势, 而且 PHC 桩体内留有足够的空间可以安装热交换管, 可以回填不同的材料来优化能源桩的换热性能^[11-14], PHC 能源桩结构如图 1. PARK 等^[11-12]通过现场试验和数值模拟研究了管型、运行模式和地下水流对 PHC 能源桩的传热性能及热阻的影响, 并分析了桩体周围温度的变化. GUO 等^[13]通过现场试验分析了 PHC 能源桩周围土体的温度变化和恢复趋势, 以及桩身温度的变化特征. ZHANG 等^[14]分析了 PHC 桩回填土的热物性、地基土初始地温和地基土体导热性对 PHC 能源桩长期换热性能的影响. 但目前对 PHC 能源桩换热性能

的不同影响因素的综合分析和评价的研究较少. 在 PHC 能源桩应用之前, 需要对不同影响因素进行综合分析和评价, 来优化 PHC 能源桩的换热性能.

本研究基于验证的数值传热模型, 分析了注浆回填材料导热系数、热交换管的入口温度、桩体导热系数和 PHC 桩回填直径对 PHC 能源桩换热性能的影响. 基于田口法分析不同因素对 PHC 能源桩换热性能的影响, 为 PHC 能源桩的设计、性能优化和应用提供技术支撑.

1 模型建立

1.1 模型假设

PHC 能源桩与桩基础周围土体间的换热是一个复杂的非稳态过程. 为了简化传热过程的计算, 假设: ① 地基土体、桩体内换热管、桩体材料以及回填材料均为各向同性的物质, 且物性参数不受温度变化影响; ② 回填材料与 PHC 桩体的内表面的接触边界满足连续性条件; ③ PHC 桩体与地基土体的接触边界满足连续性条件; ④ 基于现场地质勘察结果, PHC 能源桩安装的位置地下水流较弱, 因此, 模型中忽略地下水对流换热的影响.

1.2 控制方程

根据上述的基本假设, 数值模型中 PHC 能源桩和地基土体间的传热过程可表述为

$$\rho_i c_{p,i} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \nabla \cdot (k_i \nabla \theta_i) + Q_i \quad (1)$$

其中, ρ_i 为固体材料的密度, 如桩体、地基土体和注浆回填材料; $c_{p,i}$ 为固体材料的比热容; k_i 为固体材料的导热系数; θ_i 为固体材料的温度; t 为时间; Q_i 为一般热源项.

PHC 能源桩内的注浆回填材料和桩体间的传热过程属于固体传热, 同样可以采用式(1)表述.

热交换管内不可压缩流体的连续性、动量和能量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{u}_f) = 0 \quad (2)$$

$$\rho_f \frac{\partial \mathbf{u}_f}{\partial t} = -\nabla p_f - \frac{1}{2} f_D \frac{\rho_f}{d_h} |\mathbf{u}_f| \mathbf{u}_f \quad (3)$$

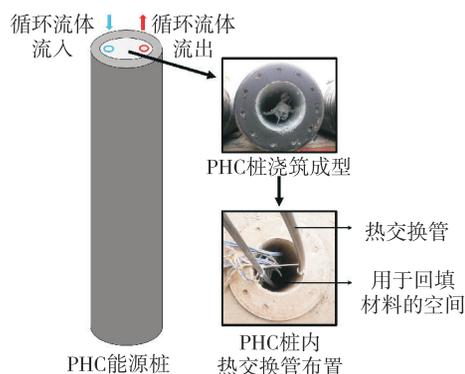


图 1 PHC 能源桩结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PHC energy pile

$$\rho_f A c_{p,f} \frac{\partial \theta_f}{\partial t} + \rho_f A c_{p,f} \mathbf{u}_f \nabla \theta_f = \nabla \cdot (A k_f \nabla \theta_f) + \frac{1}{2} f_D \frac{\rho_f A}{d_h} |\mathbf{u}_f|^3 + q_{\text{wall}} \quad (4)$$

其中, ρ_f 为热交换管内流体的密度; $c_{p,f}$ 为流体的比热容; k_f 为流体的导热系数; θ_f 为流体的温度; \mathbf{u}_f 为流体的流速; p_f 为流体的压强; f_D 为循环流体的达西摩擦系数; d_h 为水力直径; A 为换热管的横截面积; q_{wall} 为管壁热源项。

热交换管壁的换热过程可以表示为

$$q_{\text{wall}} = h_e (\theta_{\text{ext}} - \theta_f) \quad (5)$$

其中, h_e 为有效传热系数; θ_{ext} 为热交换管外侧温度。

有效传热系数 (h_e) 为

$$h_e = \frac{2\pi}{\frac{1}{d_{p,\text{in}} h_{\text{int}}} + \frac{1}{k_p} \ln \left(\frac{d_{p,\text{out}}}{d_{p,\text{in}}} \right)} \quad (6)$$

其中, k_p 为热交换管外侧温度; h_{int} 为热交换管的内膜传热系数; $d_{p,\text{in}}$ 为管的内直径; $d_{p,\text{out}}$ 为管的外直径。

热交换管的内膜传热系数 h_{int} 为

$$h_{\text{int}} = \text{Nu} \frac{k_f}{d_h} \quad (7)$$

其中, Nu 为努塞尔特数, 单位为 1。

1.3 数值模型及初始、边界条件

利用有限元模拟软件 COMSOL, 结合 PHC 能源桩现场试验条件^[13-14], 建立了地基基础与 PHC 能源桩的三维几何模型。为尽可能减小假定的边界条件对数值模拟结果的影响, 应考虑扩大地基模型的计算区域。基于 SANI 等^[9, 15]的研究结果, 对不同种类地基土砂土、粉土和黏土的温度影响半径分别为 6、5 和 4 m。此外, MA 等^[16]研究发现, 在数值模型中, 当地基的下边界和能源桩的底部之间的净距离大于 10 m, 底部边界条件的设定对整个地基的温度变化的影响在一定程度上可以忽略不计。因此, 地基数值模型的计算区域设置为半径 10 m、深度 50 m, PHC 能源桩位于地基模型的正中心位置, 如图 2。根据 PHC 能源桩试验现场地质条件状况, 模型中地基的土层分为 6 层(图 2), 每层土体的热物性质与现场试验测得的数据保持一致。

数值模型的初始地温与实测数据一致, 将地基模型的侧边界和底部边界设置为绝热边界, 并将地基模型的上部边界设为对流换热边界。

初始地温条件为

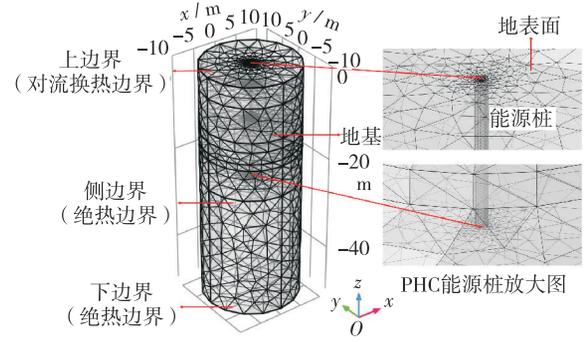


图 2 PHC 能源桩和地基模型和网格划分

Fig. 2 Schematic diagram and mesh for the model of PHC energy pile and foundation

$$\theta_{\text{ground}}|_{t=0} = \theta_0|_{t=0} \quad (8)$$

地基的上部边界条件为

$$q_{\text{upper}}|_{z=0} = h(\theta_{\text{ground}} - \theta_{\text{air}}) \quad (9)$$

地基的侧边界和底部边界条件为

$$\frac{\partial \theta_{\text{ground}}}{\partial r}|_{r=10} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \theta_{\text{ground}}}{\partial z}|_{z=50} = 0 \quad (11)$$

其中, θ_{ground} 为地基土体的温度; θ_0 为地基土体的初始温度; h 为对流换热系数; θ_{air} 为地表的环境温度; q_{upper} 为地基上部边界对流换热通量。

1.4 模型验证

PHC 能源桩内回填注浆材料的传热机理与钻孔内回填注浆材料的传热机理相似, 因此本研究中数值模型的有效性可以用唐志伟等^[17]研究的垂直钻孔中回填注浆材料的试验结果来验证。材料性质、几何参数和运行条件的设置与唐志伟等^[17]的试验条件保持一致。当热交换管的入口温度一定时, 出口温度的试验值和模拟值的对比结果如图 3。出口温度的模拟值和试验值的偏差均小于 6%, 因此, 回填注浆材料的 PHC 能源桩的模型是可靠的。

2 数值模拟结果与分析

利用上述验证的数值模型进行 PHC 能源桩换热性能的参数分析, 地基土体的热物性能、初始地温与 PHC 能源桩现场试验实测值保持一致^[13-14], 地基土体的热物性参数见表 1。采用恒温法进行制冷工况下的能源桩换热性能研究, 热交换管内的流体流量设定为 0.5 m³/h。数值模拟中 PHC、高密度聚乙烯管和管内流体(水)的热物性质见表 2。模拟计算的不同条件见表 3。

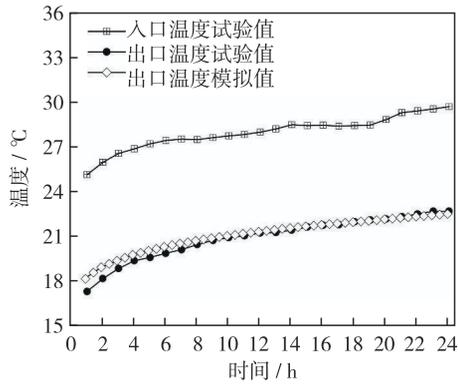


图3 回填注浆材料的传热模型的试验值和模拟值对比图

Fig. 3 Comparison between experimental and simulated values for the grout material backfilled heat transfer model

表1 土体的热物性质

Table 1 Thermophysical properties of soil

土层	分布深度/m	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/ (g·m ⁻³)
黏土	1.8~4.3	1.37	885	1.89
淤泥质粉质黏土	4.3~11.5	1.15	877	1.74
黏土	11.5~13.5	1.54	918	1.97
黏土	13.5~16.0	1.71	934	1.97
黏土	16.0~17.4	1.35	843	1.95
粉质黏土	17.4~24.0	1.30	775	1.99

表2 PHC 能源桩模型不同材料的热物性质

Table 2 Thermophysical properties of different materials used in PHC energy pile model

材料	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)
PHC	1.78	800	2490
高密度聚乙烯管	0.42	2 300	957
水	$k_f^{[18]}$	$C_{p,f}^{[18]}$	$\rho_f^{[18]}$

可采用热交换率 q 评价 PHC 能源桩的换热性能,

$$q = mc_{p,f}(\theta_{in} - \theta_{out}) \quad (12)$$

其中, m 为管内循环流体的流量; $c_{p,f}$ 为管内循环流体的比热容; θ_{in} 为管内流体的入口温度; θ_{out} 为管内流体的出口温度.

PHC 能源桩的总换热量为

<http://journal.szu.edu.cn>

表3 模拟计算的不同条件

Table 3 Different conditions in the simulated calculation

参数	数值
注浆回填材料导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	1.0、1.4 和 1.8
入口温度/°C	30、32 和 34
桩体的导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	1.38、1.78 和 2.18
PHC 桩回填直径/m	0.20、0.28 和 0.36

$$Q = \int_0^t q(t) dt \quad (13)$$

2.1 注浆回填材料导热系数的影响

在研究注浆回填材料导热系数的影响时,热交换管的入口温度为 32 °C,桩体导热系数为 1.78 W/(m·K),PHC 桩回填直径为 0.28 m.图 4 为注浆回填材料不同的导热系数对 PHC 能源桩的换热性能的影响.从图 4(a)可见,PHC 能源桩的热交换率随着时间的增加而逐渐减小,热交换率降低的幅度逐渐变缓.PHC 能源桩的热交换率随着注浆回填材料导热系数的增加而明显增大.如图 4(b)所示,当注浆回填材料的导热系数为 1 W/(m·K)时,PHC 能源桩 7 d 的总换热量为 65.53 kW·h,随着注浆回填材料的导热系数增加到 1.4 W/(m·K)和 1.8 W/(m·K),PHC 能源桩 7 d 的总换热量增加了 16.5% 和 28.4%.由于注浆回填材料导热系数的提高有利于加快 PHC 桩体和地基土体之间的热交换过程,桩体和土体之间的传热速率明显增加.因此,提高 PHC 桩注浆回填材料的导热系数可以有效地提升 PHC 能源桩的换热效率.

2.2 入口温度的影响

在研究入口温度的影响时,注浆回填材料导热系数为 1.4 W/(m·K),桩体导热系数为 1.78 W/(m·K),PHC 桩回填直径为 0.28 m.图 5 为热交换管的入口温度对 PHC 能源桩的换热性能的影响.从图 5(a)可见,在制冷工况条件下,PHC 能源桩的热交换率随着入口温度的增加而逐渐增大.图 5(b)为不同入口温度条件下 PHC 能源桩 7 d 总换热量对比图.当热交换管的入口温度为 30 °C 时,PHC 能源桩 7 d 的总换热量 65.64 kW·h,当热交换管的入口温度增加了 2 °C 和 4 °C,PHC 能源桩 7 d 的总换热量增加了 16.3% 和 32.6%.增大热交换管的入口温度即增加了其与地温之间的温差,当传热热阻相同条件下,温差越大的情况下热量传递越多.因此,在制冷工

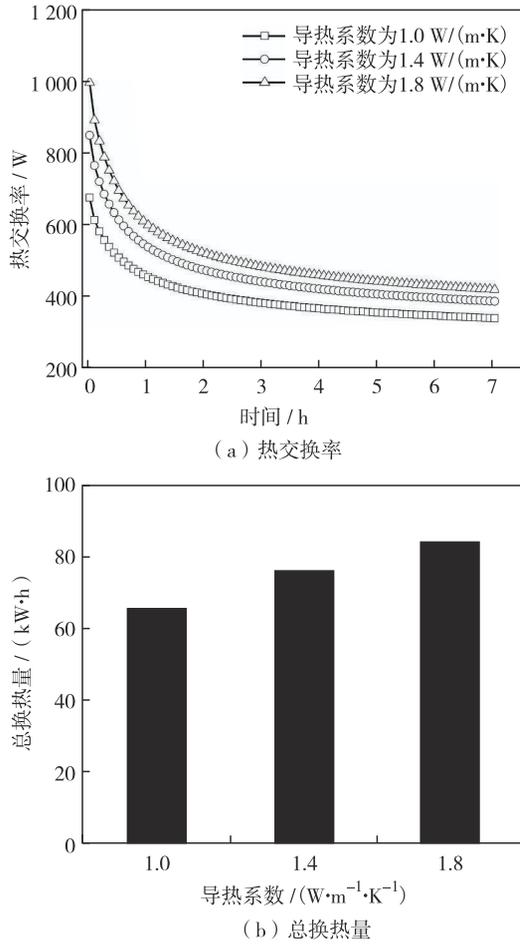


图 4 注浆回填材料导热系数对 PHC 能源桩换热性能的影响

Fig. 4 Effect of thermal conductivity of grout backfill material on the heat exchange performance of PHC energy pile

况下, 提高热交换管的入口温度有利于提高 PHC 能源桩的换热性能.

2.3 桩体导热系数的影响

当进行桩体导热系数的参数分析时, 注浆回填材料导热系数为 1.4 W/(m·K), 热交换管的入口温度为 32 °C, PHC 桩回填直径为 0.28 m. 图 6 为桩体导热系数对 PHC 能源桩的换热性能的影响. 从图 6 (a) 可以发现, 桩体导热系数越大, PHC 能源桩的热交换率也越高, 但是桩体导热系数的增加对 PHC 能源桩换热性能的提高幅度相对较小. 如图 6(b) 所示, 当桩体导热系数从 1.38 W/(m·K) 提高到 2.18 W/(m·K), PHC 能源桩 7 d 的总换热量提升了 7.0%. 随着桩体材料的导热性逐渐增加, 更多的热量和地基土体之间发生了热传递, 从而提高了 PHC 能源桩的换热性能.

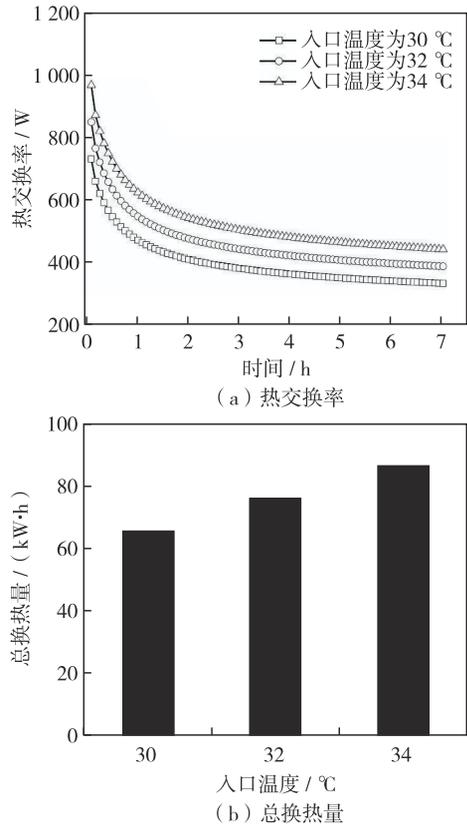


图 5 入口温度对 PHC 能源桩换热性能的影响

Fig. 5 Effect of inlet temperature on the heat exchange performance of PHC energy pile

2.4 PHC 桩回填直径的影响

在分析 PHC 桩回填直径的影响时, 注浆回填材料导热系数为 1.4 W/(m·K), 热交换管的入口温度为 32 °C, 桩体导热系数为 1.78 W/(m·K). 图 7(a) 为不同 PHC 桩回填直径的条件下, PHC 能源桩的热交换率随时间的变化关系. PHC 能源桩的热交换率随 PHC 桩回填直径的增大而提高. 如图 7(b), 当 PHC 桩回填直径从 0.20 m 增加到 0.36 m, PHC 能源桩 7 d 的总换热量提升了 12.1%. 随着 PHC 桩回填直径的增加, PHC 桩内的注浆回填材料也在逐渐增多, 在注浆回填材料导热性和其他变量均保持一致时, 相同时间内更多量的注浆材料会参与桩体与地基间的热传递, 提高 PHC 能源桩的换热效率. 因此, 增加 PHC 桩回填直径是有利于提高 PHC 能源桩的换热性能.

3 敏感性分析

为了准确分析以上 4 种参数对 PHC 能源桩换热性能影响的先后顺序, 本研究采用了田口 (Taguchi)

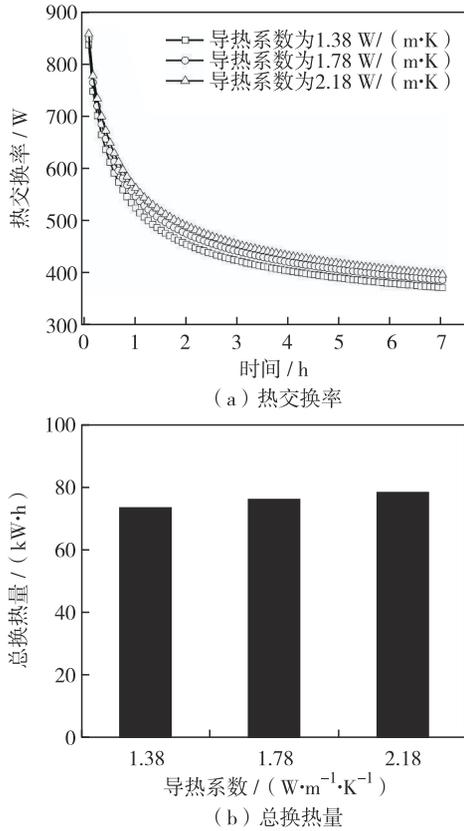


图6 桩体导热系数对PHC能源桩换热性能的影响
 Fig. 6 Effect of thermal conductivity of PHC pile on the heat exchange performance of PHC energy pile

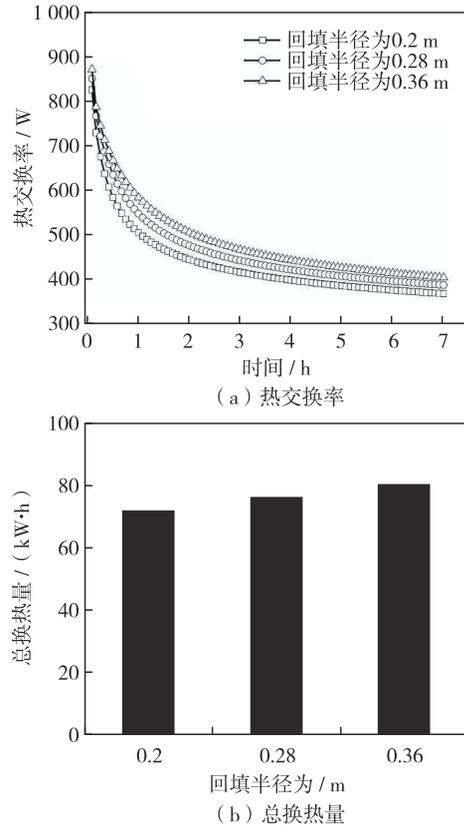


图7 PHC桩回填直径对PHC能源桩换热性能的影响
 Fig. 7 Effect of backfill diameter of PHC pile on the heat exchange performance of PHC energy pile

法. 田口法是一种利用标准正交矩阵来形成实验矩阵的实验优化方法, 利用正交矩阵, 可以从最少的实验次数中获得最大的信息量, 并能找到各参数的最佳水平以及各参数的影响顺序^[19-20]. 为了衡量产品质量指标(即PHC能源桩的换热量)的稳定性, 选取信噪比作为评价指标^[19-20]. 根据不同要求的特征值, 信噪比分为望大特征或望小特征. 本研究采用PHC能源桩7 d的总换热量作为质量特征值, 因此, 选取信噪比的望大特征, 计算公式为

$$\eta = -10\lg\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2}\right) \quad (13)$$

其中, η 为信噪比; n 为每组试验的重复次数; Y_i 为第 i 次试验的响应值, 即为第 i 次试验的总换热量值.

基于前文的分析, 4因素3水平的正交表设计方案见表4. 4个不同的因素分别为注浆回填材料导热系数、入口温度、桩体导热系数和PHC桩回填直径. 每个因素包括3个水平, 见表4. 通过数值模拟计算不同设计方案对应的PHC能源桩总换热量, 总换热量对应的信噪比同时也计算出来, 如表4. 表5

为不同控制因素每个水平的信噪比均值、控制因素的最优水平和不同控制因素的影响排列顺序. 通过选择信噪比最高的控制因素水平, 可确定最佳控制因素水平组合, 最优控制因素水平组合为: 注浆回填材料导热系数为 1.8 W/(m·K), 入口温度为 34 °C, 桩体的导热系数为 2.18 W/(m·K), PHC桩回填直径为 0.36 m. 4个不同影响因素对PHC能源桩总换热量的影响先后顺序排列为: 热交换管的入口温度、注浆回填材料导热系数、PHC桩回填直径和桩体的导热系数. 根据以上分析可知, 在PHC能源桩设计过程中, 需要按照不同因素对换热性能影响的主次关系来对PHC能源桩进行合理优化, 使得能源桩性能得到提升, 获得更高的换热效率, 以满足实际工程的需求.

4 结 论

通过建立PHC能源桩三维数值仿真模型去研究不同因素对PHC能源桩换热性能的影响, 并基于田口法分析了这些影响因素的排列顺序, 可知:

表4 正交设计方案
Table 4 Orthogonal test design scheme

编号	注浆回填材料导热系数/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	入口温度/ $^{\circ}C$	桩体导热系数/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	PHC桩回填 直径/m	总换热量/ $kW \cdot h$	信噪比
1	1.0	30	1.38	0.20	50.874	34.134
2	1.0	32	1.78	0.28	65.531	36.326
3	1.0	34	2.18	0.36	79.630	38.013
4	1.4	30	1.78	0.36	69.079	36.778
5	1.4	32	2.18	0.20	74.368	37.423
6	1.4	34	1.38	0.28	83.660	38.447
7	1.8	30	2.18	0.28	74.494	37.447
8	1.8	32	1.38	0.36	86.551	38.761
9	1.8	34	1.78	0.20	89.435	39.031

表5 总换热量的响应表
Table 5 Response table of total heat exchange amount

水平	注浆回填材料导热系数/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)		入口温度/ $^{\circ}C$		桩体导热系数/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)		PHC桩回填直径/m	
	总换热量	信噪比	总换热量	信噪比	总换热量	信噪比	总换热量	信噪比
1	65.345	36.158	64.816	36.120	73.695	37.114	71.559	36.863
2	75.702	37.549	75.483	37.504	74.682	37.378	74.562	37.407
3	83.493	38.413	84.242	38.497	76.164	37.628	78.420	37.851
最优水平	水平3		水平3		水平3		水平3	
最大和最小信噪比之差	2.255		2.377		0.514		0.988	
排序	2		1		4		3	

1) 建立回填注浆材料的PHC能源桩的传热模型, 并通过试验数据验证了该数值模型的有效性, 试验值和模拟值的偏差均小于6%。

2) 提高注浆回填材料的导热系数有利于提高PHC能源桩的传热性能。当注浆回填材料的导热系数为 $1 W/(m \cdot K)$ 时, PHC能源桩7 d的总换热量 $65.53 kW \cdot h$, 当注浆回填材料的导热系数增加了 $0.4 W/(m \cdot K)$ 和 $0.8 W/(m \cdot K)$, PHC能源桩7 d的总换热量分别增加了16.5%和28.4%。

3) 制冷工况下, 提高热交换管的入口温度可以有效提升PHC能源桩的换热效率。当入口温度从 $30^{\circ}C$ 分别增加到 $32^{\circ}C$ 和 $34^{\circ}C$, PHC能源桩7 d的总换热量分别增加了16.3%和32.6%。

4) 提高PHC桩体导热系数同样可提升能源桩的换热效率, 当桩体导热系数从 $1.38 W/(m \cdot K)$ 增加到 $2.18 W/(m \cdot K)$, PHC能源桩7 d的总换热量增加了7.0%。

5) PHC桩回填直径越大, PHC能源桩的换热量越高。当PHC桩回填直径从 $0.20 m$ 增加到 $0.36 m$, 7 d PHC能源桩的总换热量增加了12.1%。

6) 基于田口法分析不同因素对PHC能源桩的总换热量的影响先后顺序, 发现热交换管的入口温度的影响最大, 其次是注浆回填材料导热系数和PHC桩回填直径, 最后是桩体的导热系数。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778138, 51978162)

作者简介: 唐 皓 (1975—), 深圳市综合交通与市政工程设计研究总院有限公司高级工程师。研究方向: 路桥设计、工程咨询及地下工程建设。E-mail: 68087585@qq.com

引 文: 唐 皓, 韦 彬, 张国柱, 等. 制冷工况下PHC能源桩的换热性能分析[J]. 深圳大学学报理工版, 2022, 39(01): 51-58.

参考文献/References:

- [1] RYBACH L. Geothermal energy: sustainability and the environment [J]. Geothermics, 2003, 32(4/5/6): 463-470.
- [2] SHORTALL R, DAVIDSDOTTIR B, AXELSSON G. Geothermal energy for sustainable development: a review of sustainability impacts and assessment frameworks [J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2015, 44: 391-406.
- [3] 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 Caichu, CAO Shiding, WANG Wei. An introduction to energy geotechnical engineering [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(3): 419-424. (in Chinese)
- [4] BRANDL H. Energy foundations and other thermo-active ground structures [J]. Géotechnique, 2006, 56(2): 81-122.
- [5] ADAM D, MARKIEWICZ R. Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers [J]. Géotechnique, 2009, 59(3): 229-236.
- [6] 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, WU Hongwei. Applications of energy piles and technical development of PCC energy piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 176-181. (in Chinese)
- [7] ZHANG Guozhu, XIA Caichu, SUN Meng. A new model and analytical solution for the heat conduction of tunnel lining ground heat exchangers [J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 88: 59-66.
- [8] REN Lianwei, XU Jian, KONG Gangqiang, et al. Field tests on thermal response characteristics of micro-steel-pipe pile under multiple temperature cycles [J]. Renewable Energy, 2020, 147: 1098-1106.
- [9] SANI A K, SINGH R M. Response of unsaturated soils to heating of geothermal energy pile [J]. Renewable Energy, 2020, 147: 2618-2632.
- [10] YOU Shuang, CHENG Xiaohui, GUO Hongxian, et al. In-situ experimental study of heat exchange capacity of CFG pile geothermal exchangers [J]. Energy and Buildings, 2014, 79: 23-31.
- [11] PARK H, LEE S, YOON S, et al. Evaluation of thermal response and performance of PHC energy pile: field experiments and numerical simulation [J]. Applied Energy, 2013, 103: 12-24.
- [12] GO G H, LEE S R, YOON S, et al. Design of spiral coil PHC energy pile considering effective borehole thermal resistance and groundwater advection effects [J]. Applied Energy, 2014, 125: 165-178.
- [13] GUO Yimu, ZHANG Guozhu, LIU Songyu. Investigation on the thermal response of full-scale PHC energy pile and ground temperature in multi-layer strata [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 143: 836-848.
- [14] ZHANG Guozhu, CAO Ziming, LIU Yiping, et al. Field test and numerical simulation on the long-term thermal response of PHC energy pile in layered foundation [J]. Sensors, 2021, 21(11): 3873.
- [15] PERON H, KNELLWOLF C, LALOUI L. A method for the geotechnical design of heat exchanger piles [J]. Geotechnical Special Publication, 2011(211): 470-479.
- [16] MA Qijie, WANG Peijun. Underground solar energy storage via energy piles [J]. Applied Energy, 2020, 261: 114361.
- [17] 唐志伟, 金楠, 闫桂兰. 地源热泵地中换热器的非稳态传热数值研究[J]. 可再生能源, 2008, 26(1): 55-58.
- TANG Zhiwei, JIN Nan, YAN Guilan. Numerical study on unsteady heat transfer of underground heat exchanger of GCHP [J]. Renewable Energy Resources, 2008, 26(1): 55-58. (in Chinese)
- [18] COMSOL. Multiphysics user's guide [M]. Stockholm, Sweden: COMSOL, 2020.
- [19] ESEN H, TURGUT E. Optimization of operating parameters of a ground coupled heat pump system by Taguchi method [J]. Energy and Buildings, 2015, 107: 329-334.
- [20] LIN Wenyue, MA Zhenjun, COOPER P, et al. Thermal performance investigation and optimization of buildings with integrated phase change materials and solar photovoltaic thermal collectors [J]. Energy and Buildings, 2016, 116: 562-573.

【中文责编：坪梓；英文编辑：之聿】