浙江理工大学学报，第 51 卷，第 4 期，2024 年 7 月
Journal of Zhejiang Sci-Tech University
DOI：10.3969/j.issn.1673-3851(n).2024.04.011

饱和砂土地基中碳化硅能源桩的传热特性测试与分析

金坤铨[1]，王忠瑾[2]，刘开富[1]，谢新宇[3]，方鹏飞[2]，徐　啸[3]
（1.浙江理工大学建筑工程学院，杭州 310018；2.浙大宁波理工学院土木建筑工程学院，宁波 315100；
3.浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心，杭州 310058）

摘　要：采用标准试块测试与模型试验，对碳化硅能源桩的传热特性进行研究。通过桩基混凝土试块导热系数和力学性能测试，确定碳化硅能源桩的桩身材料配合比；通过饱和砂土地基中能源桩高温释热工况模型试验，分析饱和砂土地基中碳化硅能源桩的传热性能以及轴向和径向温度分布及变化规律。结果表明：碳化硅代砂率达到16.0%时，桩基混凝土试块的导热系数、抗压强度以及抗折强度会分别提升 64.1%、19.9%和 11.4%，该代砂率下的碳化硅能源桩桩身材料配合比为最佳配合比。碳化硅能源桩的最高温度出现在桩体中部。相较于普通能源桩，碳化硅能源桩具有更高的桩体温度、温度增长速率和换热功率，表现出更优的传热性能。在碳化硅能源桩进行热循环时，桩土间的热量传递效率自桩身向外沿径向递减；热循环后，桩周土体呈现热量堆积现象，且这种现象随着接近桩身区域而逐渐增强。研究结果可为碳化硅能源桩的设计及其在饱和砂土地基中的应用提供试验依据。

关键词：能源桩；碳化硅；导热系数；传热特性；模型试验

中图分类号：TU473.1　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673-3851 (2024) 04-0518-11

引文格式：金坤铨，王忠瑾，刘开富，等. 饱和砂土地基中碳化硅能源桩的传热特性测试与分析[J]. 浙江理工大学学报(自然科学)，2024，51(4)：518-528.

Reference Format：JIN Kunquan，WANG Zhongjin，LIU Kaifu，et al. Test and analysis of heat transfer characteristics of silicon carbide energy piles in saturated sandy soil foundations[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University，2024，51(4)：518-528.

Test and analysis of heat transfer characteristics of silicon carbide energy piles in saturated sandy soil foundations

JIN Kunquan[1]，*WANG Zhongjin*[2]，*LIU Kaifu*[1]，*XIE Xinyu*[3]，*FANG Pengfei*[2]，*XU Xiao*[3]
(1. School of Civil Engineering and Architecture，Zhejiang Sci-Tech University，Hangzhou 310018，China；2. School of Civil Engineering，NingboTech University，Ningbo 315100，China；3. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering，Zhejiang University，Hangzhou 310058，China)

Abstract：Based on standardized specimen blocks and model experimental tests，heat transfer characteristics of silicon carbide energy piles were investigated. The pile body material ratio of silicon carbide energy piles was determined through the test of thermal conductivity and mechanical properties of pile concrete specimen. Through the high-temperature heat release working condition model test of energy piles in saturated sand foundations，the heat transfer performance of silicon carbide energy piles in saturated sand foundations，as well as the axial-radial temperature distribution and change rule were analyzed. The results show that the thermal conductivity compressive strength and flexural strength of the

收稿日期：2023－12－28　　网络出版日期：2024－04－12
基金项目：宁波市青年科技创新领军人才项目(2023QL018)；国家自然科学基金项目(51708496)
作者简介：金坤铨(1997—　)，男，浙江诸暨人，硕士研究生，主要从事能源地下工程方面的研究。
通信作者：王忠瑾，E-mail：zhongjin_wang@zju.edu.cn

concrete specimen of pile base are increased by 64.1%, 19.9% and 11.4%, respectively when the sand substitution rate of silicon carbide reaches 16.0%, and the ratio of this sand substitution rate is the optimal ratio for the material of the pile body of silicon carbide energy piles. The highest temperature of the silicon carbide energy piles occurs in the middle of the pile body. Compared with ordinary energy piles, the silicon carbide energy piles have higher pile body temperatures, temperature growth rates, and heat transfer power, and show better heat transfer performance. The heat transfer efficiency between pile and soil decreases radially from the pile body to the outside during thermal cycling of the silicon carbide energy piles; after thermal cycling, the soil around the pile shows the phenomenon of heat accumulation, and this phenomenon is gradually strengthened with the approach to the pile body region. The results of the study are expected to provide a test basis for the design and application of silicon carbide energy piles in saturated sandy soil foundations.

Key words: energy pile; silicon carbide; thermal conductivity; heat transfer characteristics; model test

0　引　言

目前,中国正在大力发展可再生能源,其中浅层地热能是一种可直接利用的再生能源,储量大且分布较广。能源桩技术是一种在桩基础内埋设换热管的新型绿色建筑技术[1],也是浅层地热能利用的新途径。能源桩既能承载又可进行浅层地热交换,但在地热交换过程中,桩体承受额外的温度应力,这可能导致桩体变形,进而影响整体结构的稳定性。为确保能源桩的安全运行并优化其热交换效率,关于能源桩承载特性与传热特性的研究受到广泛关注[2]。在能源桩承载特性方面,许多研究通过原位试验、模型试验以及理论分析等方法研究了热力耦合作用下的能源桩受荷特性,为能源桩的结构设计提供了重要参考;这些研究结果表明,能源桩的承载特性同桩身约束及温度变化密切相关[3-7]。

关于能源桩传热特性的研究,主要集中在桩土温度的变化规律探究以及能源桩换热效率分析等方面。能源桩的换热过程涉及换热液、换热管、桩基混凝土和桩周土体。许多研究人员分析了换热管布置对换热效率的影响。如刘汉龙等[8]、Lyu 等[9]、Chen 等[10]和娄扬等[11]通过模型试验与数值分析研究了几种特殊埋管形式下能源桩的传热特性,结果均表明合理优化换热管布置能够提升能源桩的传热效率。但在能源桩实际应用工程中,当桩周土体导热系数与管内换热液温度较高时,导热系数较小的混凝土就成为提升浅层地热交换效率的瓶颈。另外,桩基混凝土材料的选择和改性对提升能源桩的热交换效率起着关键作用。许多学者发现,在混凝土中加入一些高导热系数的掺合料,能够提高其传热效果。如 Kong 等[12]将石墨粉添加到混凝土中,混凝土导热系数得到大幅度提升,但该研究没有对石墨混凝土进行力学性能测试。在 Kong 等[12]的基础上,Li 等[13]对石墨混凝土与碳化硅混凝土进行了多次传热和力学性能测试,发现石墨的掺入会明显降低试块抗压强度,这也表明碳化硅混凝土具有优越的性能。石墨的掺入可以改善混凝土的导热性能,但通常以降低其力学性能为代价;针对这一状况,许多人员进行了不同研究。如赵嵩颖等[14]和 Chang 等[15]分别将玄武岩纤维与钢纤维加入石墨混凝土中,研究表明掺入纤维可以增加石墨混凝土抗压强度。Elkezza 等[16]研发了一种新型石墨粉并制备成混凝土,在合理的掺量控制范围内没有降低试块抗压强度。尽管这些研究[14-16]改善了石墨混凝土性能,但高昂的造价限制了这些方法在实际工程的应用。许多学者发现,掺入具有较好热物性的碳化硅后不会降低混凝土的力学性能。如尹雅等[17]在 Li 等[13]的基础上对碳化硅混凝土进行热力学测试和热成像试验,结果表明碳化硅混凝土具有优良的导热与力学性能。Zhang 等[18]将碳化硅应用于单组分地质聚合物复合材料,并分析了该材料的应用前景。尽管这些研究[17-18]已证实碳化硅在高导热建筑材料应用上具有一定的潜力,但都停留在材料性能方面的研究。碳化硅能源桩在运行工况中的传热机理与性能表现尚不明确,相关模型试验研究较少,难以为工程应用提供参考。此外,关于碳化硅能源桩轴向温度分布的研究对评估由温度变化引起的应力分布和结构稳定性具有重要作用,但此项研究尚未深入;多数能源桩模型试验进行的释热工况为低温释热(30～40 ℃),模拟夏季室内热量转移至地下土体,但关于高温释热工况下能源桩传热性能的研究也较为缺乏。

本文设计了桩基混凝土导热系数和力学性能测试与饱和砂土地基中能源桩高温释热工况模型试验,在确定碳化硅能源桩的桩身材料配合比后,研究

碳化硅能源桩的传热特性,以期为碳化硅能源桩的设计与实际工程应用提供试验依据。

1 桩基混凝土试块导热系数和力学性能测试

1.1 桩基混凝土试块配合比设计

桩基混凝土采用水泥胶砂,设计强度为 M30。配合比设计思路为:将碳化硅颗粒视为细骨料,每次把不同含量的碳化硅颗粒以等体积代替砂的方法添加到水泥胶砂中,并保证碳化硅的粒径(46 目)与砂的粒径(40～60 目)基本一致。本次测试所用碳化硅颗粒与细骨料用砂照片如图 1 所示。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),测得细砂密度为 1.43 g/cm^3,含水率 1.6%;碳化硅颗粒的密度为 1.64 g/cm^3。桩基混凝土试块配合比设计见表 1。

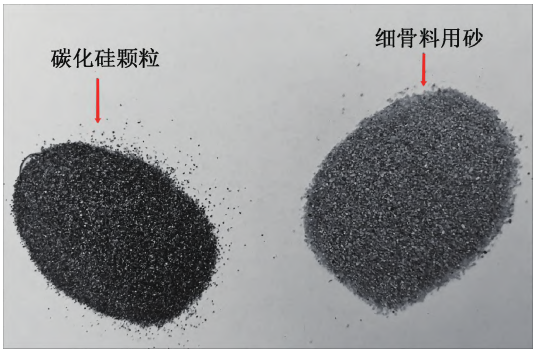


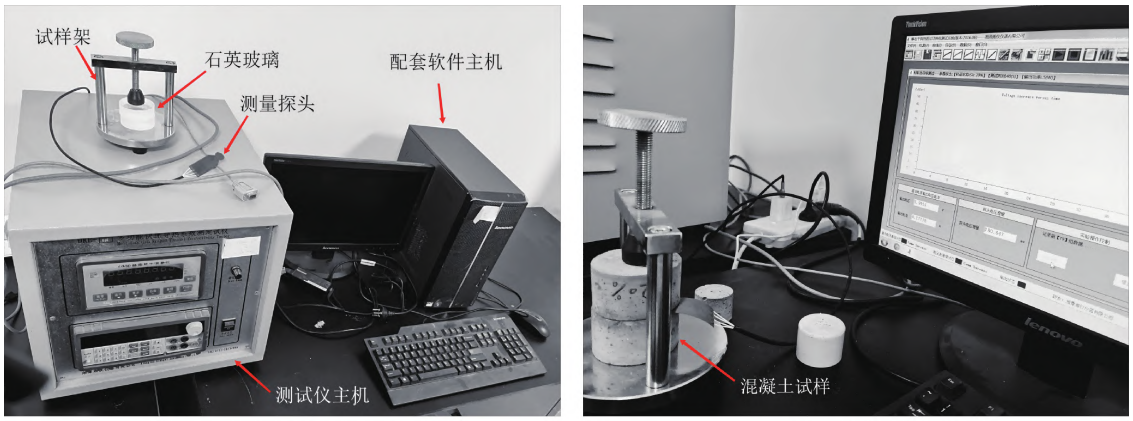
图 1 碳化硅颗粒与细骨料用砂照片

表 1 桩基混凝土试块配合比设计表

配合比序号	碳化硅代砂率/%	混凝土组分/g				
		水泥	砂	水	减水剂	碳化硅
1	0	450.0	1215.0	247.5	2.0	0
2	4.0	450.0	1166.4	247.5	2.0	55.7
3	8.0	450.0	1117.8	247.5	2.0	111.5
4	12.0	450.0	1069.2	247.5	2.0	167.2
5	16.0	450.0	1020.6	247.5	2.0	222.9
6	20.0	450.0	972.0	247.5	2.0	278.7

1.2 桩基混凝土试块导热系数测试

采用 DRE－Ⅲ多功能导热系数测试仪进行桩基混凝土试块导热系数的测定,该测试仪及测试现场照片如图 2 所示。测量探头材料为金属镍,适用温度为－50.0 ～150.0 ℃。采用石英玻璃与有机玻璃进行设备标定,再进行试块导热系数测试。按照表 1 的配合比制作 6 组不同碳化硅含量的混凝土试样,每组 4 个试样,共 24 个试样。试样直径为 8 cm,厚度为 5 cm。每组 4 个试样测定 1 次导热系数,并取平均值作为该组试样的导热系数。



(a) DRE-Ⅲ多功能导热系数测试仪 (b) 导热系数测试现场

图 2 导热系数测试仪及测试现场照片

根据试样测试结果,绘制桩基混凝土的导热系数拟合曲线。导热系数拟合曲线如图 3 所示,其中导热系数 1—导热系数 4 为每组 4 个试样的测定结果。导热系数平均值随碳化硅代砂率变化的拟合曲线可用公式表示为:

$$y = 0.055x + 1.217 \tag{1}$$

其中:x 为碳化硅代砂率,%;y 为相对应的导热系数,W/(m·K)。由图 3 可知,随着碳化硅代砂率的增加,桩基混凝土试块的导热系数逐渐提升。拟合曲线表明,试块的导热系数随碳化硅代砂率呈线性

变化,这与文献[17]得到的规律一致。当碳化硅代砂率为 16.0%时,混凝土导热系数提升 64.0%,达到 2.078 W/(m·K)。当碳化硅代砂率为 20.0%时,混凝土导热系数提升 85.0%,达到 2.344 W/(m·K)。

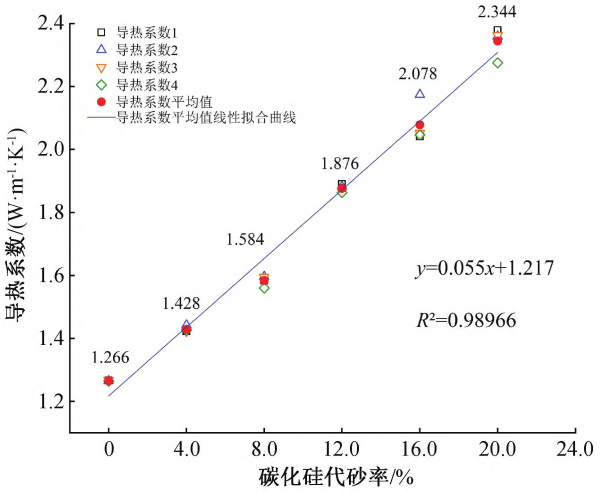


图 3　桩基混凝土的导热系数拟合曲线

1.3　桩基混凝土试块力学性能测试

桩基混凝土试块为水泥胶砂,其力学性能测试按照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—2021),将不同碳化硅掺量的桩基混凝土试块,放入恒温恒湿养护室中分别养护 7 d 和 28 d,再分别进行 7 d 和 28 d 龄期的抗压强度和抗折强度测试。对每种配合比的 3 组试块取平均值,如强度值超过或低于平均值的 10.0%,剔除后再取平均值作为强度试验结果。对于抗压强度测定值,如有 2 个或 2 个以上超出或低于平均值的 10.0%,则此组试块作废。

将抗折试验结果,绘制成桩基混凝土试块养护 7 d 和 28 d 后的抗折强度曲线,如图 4 所示。由图 4 可知,碳化硅掺入能略微提升 7 d 龄期试块的抗折强度,并显著提升 28 d 龄期试块的抗折强度。两种龄期试块的抗折强度随碳化硅代砂率的增加先上升后下降,形成一个峰值。7 d 龄期试块的抗折强度在碳化硅代砂率为 16.0% 时达到峰值,为 4.83 MPa,增幅为 9.8%;28 d 龄期试块的抗折强度在碳化硅代砂率为 8.0% 时达到最高,为 7.40 MPa,增幅达到 20.7%。

图 5(a)—(f)为碳化硅代砂率 0～20.0%时的混凝土试块断裂面照片。在未掺入碳化硅时,试块无明显孔隙。当碳化硅代砂率为 4.0%时,试块断裂面可观察到细小孔隙。随着碳化硅掺量增至 8.0%和 12.0%时,试块断裂面孔隙明显减少。当碳化硅代砂率为 16.0%时,混凝土试块的断裂面孔隙仍较少,且细骨料颗粒均匀分布。然而,当碳化硅代砂率提升至 20.0%时,试块断裂面的孔隙数量增加。由于固定粒径的碳化硅过量掺入导致骨料颗粒级配不均[19],从而产生较多的孔隙,并导致抗折强度与抗压强度下降。

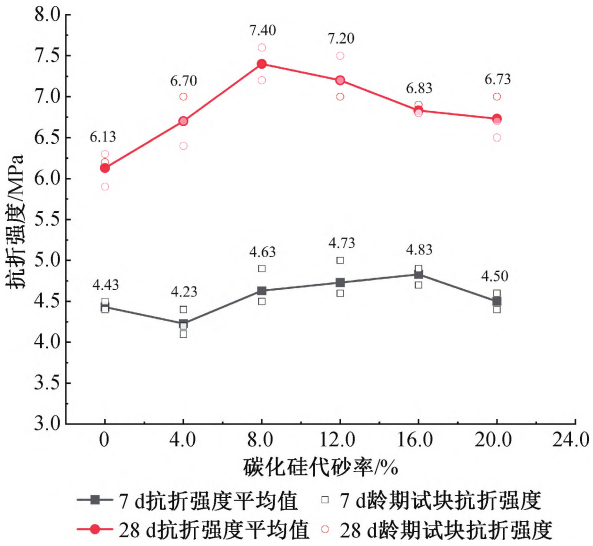


图 4　桩基混凝土试块养护 7 d 和 28 d 后的抗折强度曲线

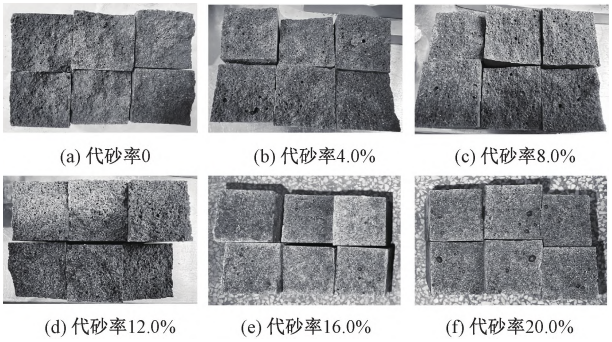


图 5　不同碳化硅代砂率的混凝土试块断裂面照片

根据抗压试验结果绘制桩基混凝土试块养护 7 d 和 28 d 后的抗压强度曲线,如图 6 所示。由图 6 可知,7 d 和 28 d 龄期试块的抗压强度随着碳化硅代砂率的增加,先升至峰值再继续降低。不同龄期试块的抗压强度表现出显著的差异,这表明随着养护时间延长,碳化硅掺入对抗压强度的提升效果更加显著。当碳化硅代砂率为 4.0%和 8.0%时,两种龄期试块的抗压强度无明显增幅。这可能是由于碳化硅代替砂的量较少,在混凝土中呈分散状态,不足以显著改变试块的强度。当碳化硅代砂率为 16.0%时,7 d 和 28 d 龄期试块的抗压强度达到各自峰值,分别为 22.00 MPa 和 37.67 MPa,增幅分别为 18.4%和 19.9%。这一现象的产生得益于碳化硅本身具有高硬度和颗粒棱角分明的特性。

与圆形颗粒的砂相比,碳化硅可提供较高的机械咬合力,与水泥具有更强的黏结能力。因此适量掺入碳化硅可以显著提高试块抗压强度。然而,当碳化硅代砂率达到 20.0%时,抗压强度出现下降的趋势。

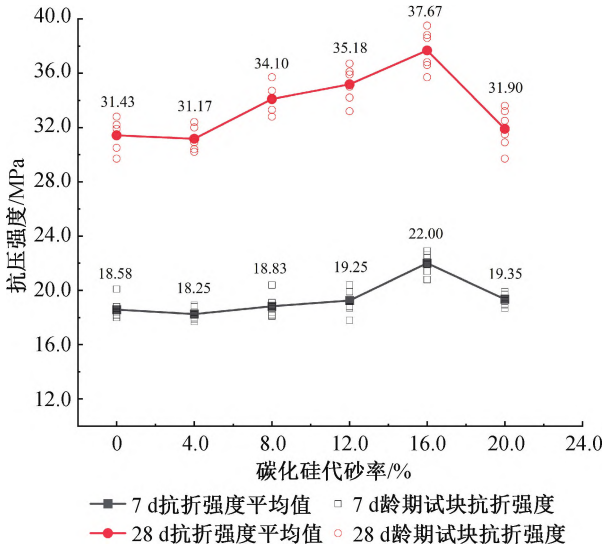


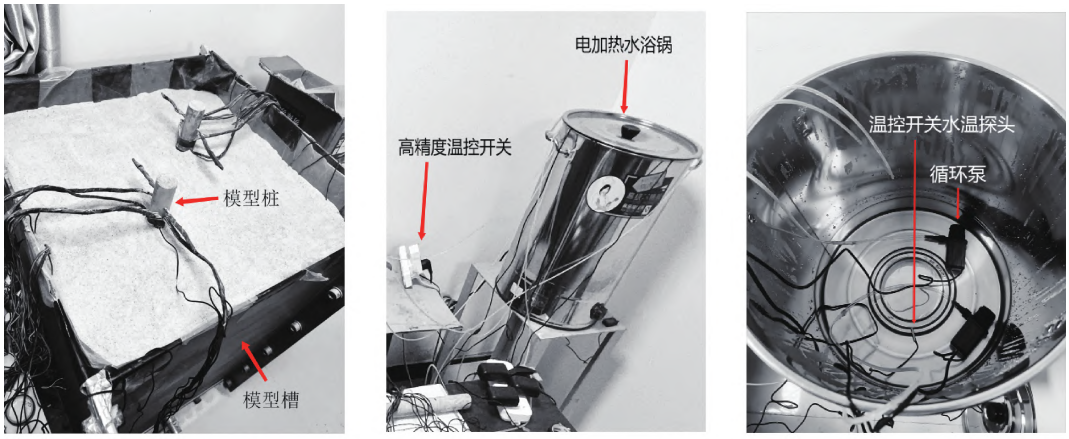
图 6 桩基混凝土试块养护 7 d 和 28 d 后的抗压强度曲线

由于能源桩主要具有结构承载与地热交换双重功能,在设计碳化硅能源桩的配合比时优先考虑桩基混凝土 28 d 龄期抗压强度与导热系数两项性能。因此,本文选择表 1 中第 5 组配合比(碳化硅代砂率为 16.0%)制备碳化硅能源桩,相较于普通混凝土,该碳化硅能源桩的抗折强度、抗压强度、导热系数分别提升了 11.4%、19.9%和 64.1%。

2 饱和砂土地基中能源桩高温释热工况模型试验设计

2.1 模型试验系统

模型试验系统主要由模型槽与模型桩、循环加热系统、测量采集系统组成,试验系统实拍图如图 7(a)—(b)所示。模型槽由大小为 600 mm×600 mm×1100 mm,模型槽底面与侧面布置防水膜。循环加热系统包括电加热水浴锅、高精度温控开关和循环泵,用于水温与流量的控制,实现升温工况。采集系统主要为数显温度传感器,用来记录桩体与土体温度参数的变化。



(a) 模型槽与模型桩 (b) 循环加热系统

图 7 模型试验系统实拍图

2.2 模型桩与地基制备

本次试验有普通能源桩与碳化硅能源桩 2 根模型桩。模型桩为预制水泥胶砂桩,模型桩桩长 L 为 900 mm,桩径 D 为 36 mm,长径比 1∶25,相似比 1∶20,设计埋深 H 为 800 mm,桩身采用 M30 水泥胶砂;桩内布置螺旋型换热铜管作为换热管,铜管外径为 3 mm,内径为 2 mm。普通桩各组材料质量配合比为 $m_{水泥}:m_{细骨料}:m_{水}=1.00:2.70:0.55$。碳化硅能源桩是在普通能源桩的基础上,用 46 目碳化硅颗粒代替 16.0%体积的砂制备。两根桩均采用 PVC 管模板预制成水泥胶砂桩,养护 28 d 成型。试验中 2 根桩的传感器数量与位置布置均相同。为了减少边界效应的影响,模型桩中心距离模型槽边距离为 220 mm,2 根桩中心间距为 226 mm,均满足不小于 6D 的要求。模型桩与传感器平面布置如图 8 所示。

本次试验采用宁波地区的天然砂制备成饱和砂土地基,其密度为 1.53 g/cm^3,最大干密度为 1.67 g/cm^3。对地基用土进行颗粒筛分试验与导热系数测定,地基所用砂土颗粒级配曲线如图 9 所示,不均匀系数 C_u 为 3.9,曲率系数 C_c 为 1.1。砂土的初始导热系数为 1.120 W/(m·K),而在加水饱和后的导热系数增至 2.040 W/(m·K)。地基的设计填土深度 1000 mm,分 5 层填筑,每层虚高

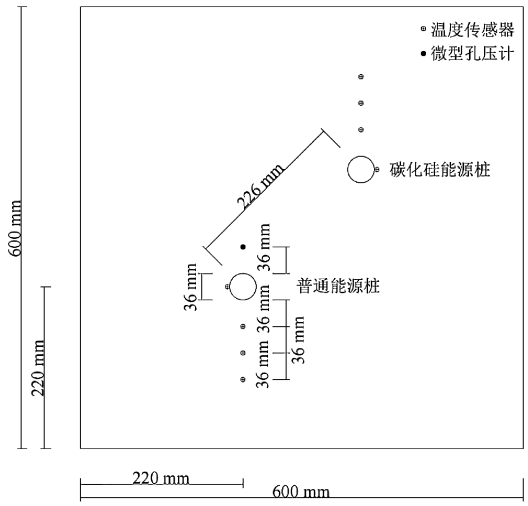


图 8　模型桩与传感器平面布置示意图

300 mm,人工夯实后为 200 mm,用刮尺与水平尺控制每层平整,每层刮平后再填筑下一层。在持力层完成填筑后,将模型桩预埋入地基中,模型桩预埋深为 800 mm。待地基填筑完成后,使水缓慢均匀地流入模型箱。水没过土体表面时,停止加水,并静置 2 d 使土体饱和。在此期间,通过桩底的孔隙水压力计,观察模型箱土体的饱和状态。地基砂土饱和过程中孔隙水压力变化曲线如图 10 所示,从图中可以看出:在加水 24.0 h 后,砂土地基基本已经达到饱和状态;在饱和的 24.0 h 内,砂土地基底部的孔压无明显变化,可认为砂土已经处于完全饱和状态。

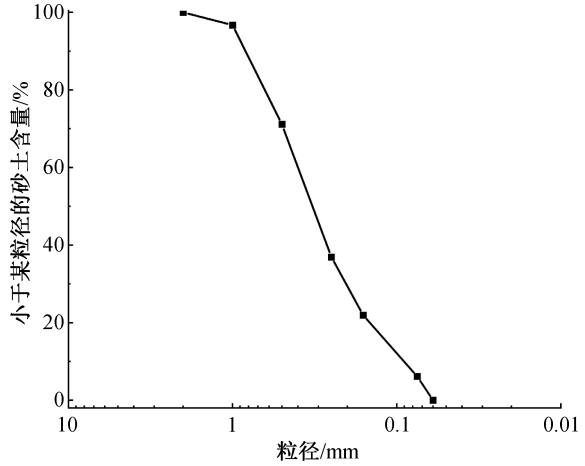


图 9　地基所用砂土颗粒级配曲线

2.3　传感器布置

试验中 2 根预制模型桩的传感器数量与位置布置均相同,桩的埋深为 800 mm,测点布置如图 11(a)—(b)所示。普通能源桩身从下而上每隔 140 mm 均匀布置 6 个温度传感器 T1—T6,其中 T1 为桩底部温度传感器,T6 为桩上部的温度传感器;碳化硅能源桩以同样方式布置 6 个温度传感器 ST1—ST6。在砂土地基分层填筑时,在模型桩旁按照埋深 190、470 mm 和 750 mm 分别布置 3 组传感器,每组为 3 个温度传感器,即离桩中轴线 1.5D、2.5D 和 3.5D 处布置传感器 T7—T15。碳化硅能源桩以相同的方式布置 3 组传感器 ST7—ST15。在进出水口绑扎 2 个温度传感器 T16 和 T17,用于测量进出水口温度。在桩底布置 1 个孔隙水压力传感器 P1,用于确保地基砂土饱和状态。

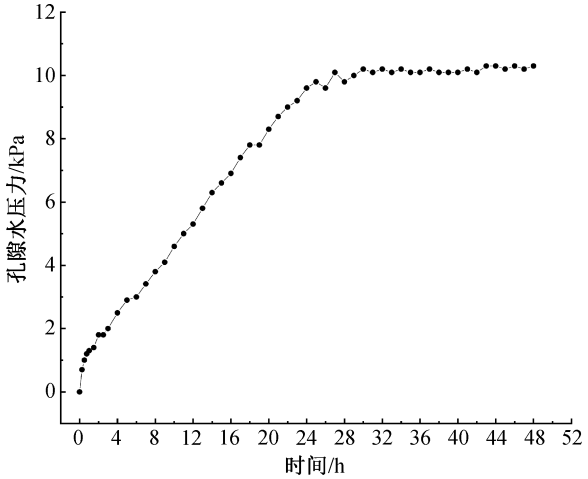


图 10　地基砂土饱和过程中孔隙水压力变化曲线

2.4　试验工况

在试验过程中,为确保环境条件的稳定性,使用恒温设备将室内温度维持在 28.0 ℃,以减少环境温度变化对试验结果的影响。试验过程中使用 2 个水泵同时进行水循环加热,换热管通水温度为 60.0 ℃,模拟能源桩高温释热工况。此外,利用高精度温控开关保持水浴锅温度稳定。

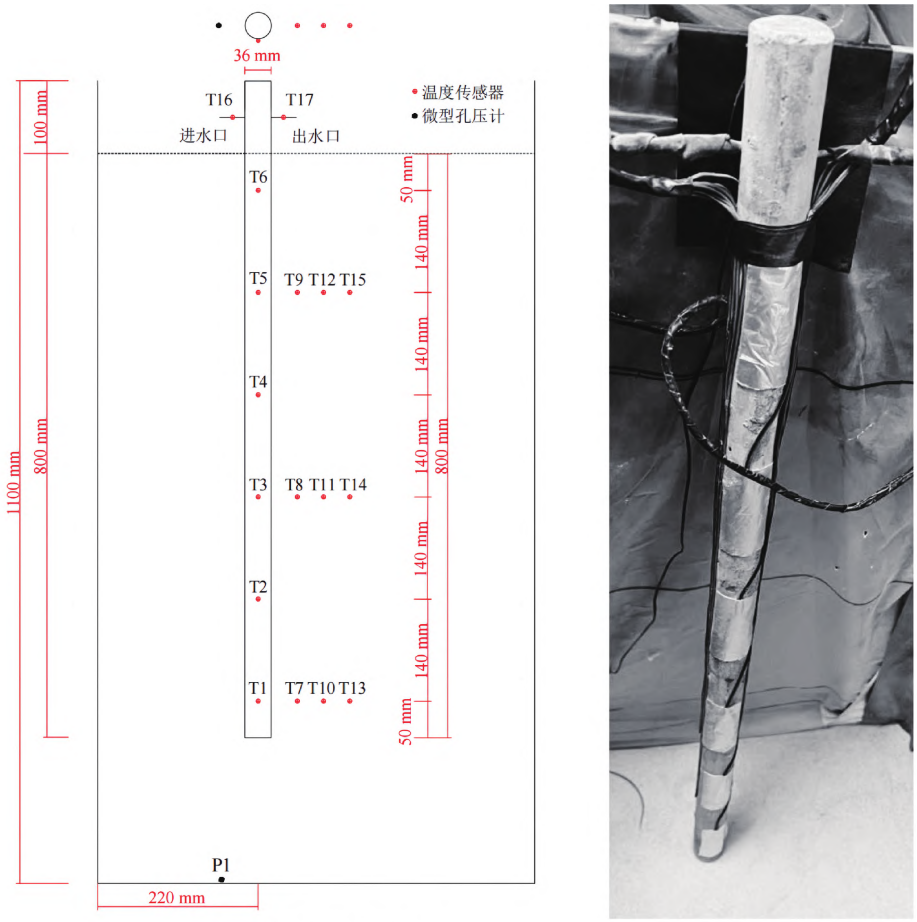
本试验共进行 3 次高温热循环,只进行热循环,不施加结构荷载。单次循环时间为 24.0 h,加热时间为 8.0 h,随后进行自然降温 16.0 h,使桩体进行自然降温至室温。降温结束后,开始下一循环。

数据采集时长为 12.0 h,记录通水加热的 8.0 h 与自然降温的前 4.0 h。数据采集间隔根据温度变化快慢情况制定,在刚开始通水和刚结束通水的第 1 个小时内,每隔 15 min 采集 1 次,第 2 个小时内每隔 0.5 h 采集 1 次,其余时间每隔 1.0 h 采集 1 次。

3　模型试验结果分析

3.1　桩体换热功率

3 次热循环过程中碳化硅能源桩与普通能源桩的进出水口温度变化曲线如图 12 所示。单次循环



(a) 传感器测点布置示意图 (b) 传感器布置现场照片

图 11 传感器测点布置示意图和现场照片

时间为 24.0 h,加热时间为 8.0 h。随后停止通水,进行自然降温 16.0 h,自然降温阶段不记录进出水口温度。在单次热循环过程中,随着进水口与桩身温度差值减小,进出水口温差值逐渐减小。在 3 次热循环过程中,普通能源桩进出水口温差最大值为 6.7 ℃,碳化硅能源桩温差最大值为 7.6 ℃。

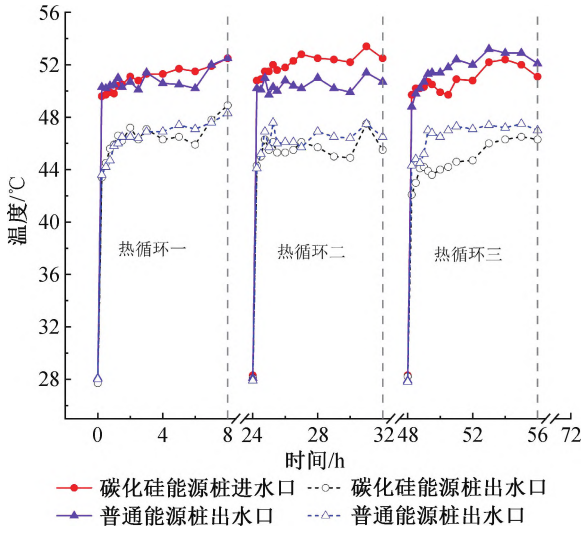


图 12 热循环过程中两种能源桩的进出水口温度变化曲线

通过所记录的进出口水温,计算出两种能源桩的桩体换热功率,计算公式为:

$$Q = \Delta T \rho_w v c_w \tag{2}$$

其中:Q 为能源桩的桩体换热功率,kW;ΔT 为进出口水温温差,℃;ρ_w 为水的密度,kg/m^3,取 1×10^3 kg/m^3;v 为水循环流速,m^3/h,取 0.48 m^3/h;c_w 为水的比热容,J/kg,取 4.2×10^3 J/kg。

按式(2)计算 3 次热循环过程中进出口水温差值,并绘制成热循环过程中碳化硅能源桩与普通能源桩桩体的换热功率变化曲线,如图 13 所示。在通水加热初期,进出水口温差较大,导致能源桩的换热功率在这一阶段呈现出较高的峰值;当通水加热的持续进行至 6.0 h 后,可观察到能源桩换热功率出现波动,这是由于进出水口温度受环境温度影响所致。在两种能源桩热循环过程中,碳化硅能源桩的桩体换热功率高于普通能源桩换热功率。换热功率的提升意味着能源桩系统能更有效地进行热交换,能源桩系统在达到相同的供暖或制冷效果下所需的能源桩数量有望减少,进而降低了工程建设和运维成本。

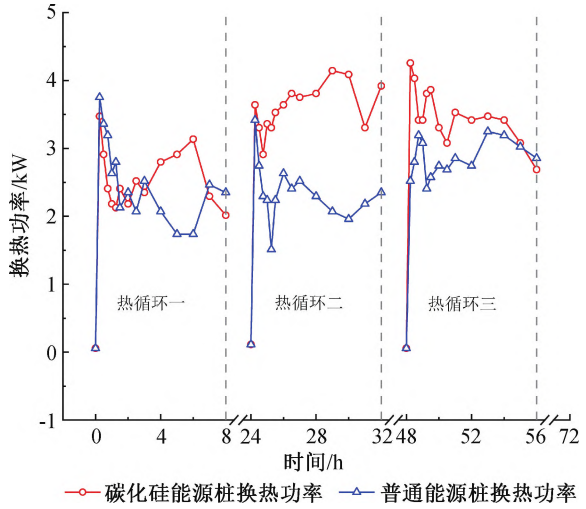


图 13　热循环过程中两种能源桩桩体的换热功率变化曲线

3.2　桩身轴向温度分布及变化规律

选取 3 次热循环的峰值时刻(8.0、32.0 h 和 56.0 h)绘制能源桩桩身轴向 6 处(T1—T6)的温度分布曲线,如图 14 所示。桩身不同位置的温度分布不均,这是由于桩身沿深度方向的热扩散所致。普通能源桩与碳化硅能源桩在升温峰值时均呈现出中部温度最高,桩身上部温度次之,桩身下部温度最低的特点。这是由于升温时,靠近土体表面的位置与模型箱底部,所受到的环境温度对其影响较大,砂土地基在饱和后导热系数增大,加快了与周围环境的热交换;换热管进水口位置在桩体上部,热循环时,桩身上部换热管中的水温最高。

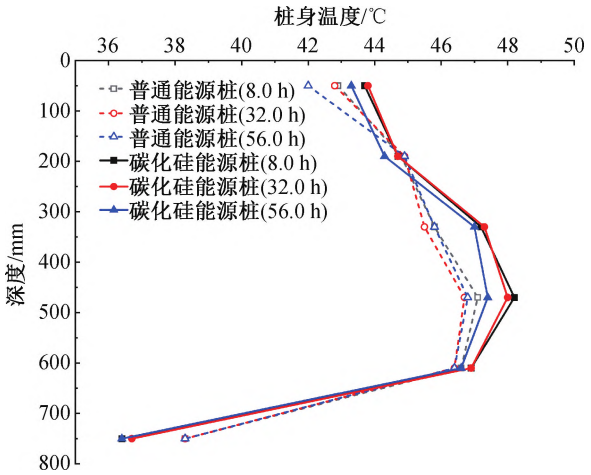


图 14　热循环峰值时刻两种能源桩桩身轴向温度分布曲线

根据普通能源桩桩身 T1—T6 处与碳化硅能源桩桩身 ST1—ST6 处共 12 个温度传感器所测得的数据,绘制出 3 次热循环过程中两种能源桩身轴向温度变化曲线,如图 15 所示。从图 15 可知,在升温阶段,两种能源桩桩身温度随着时间逐渐增大,最终趋于稳定;在自然降温阶段,桩身温度则随着时间逐渐减小,最终趋于稳定。升温和自然降温前 4.0 h 内桩身温度的变化速率较快。在 3 次热循环过程中,碳化硅能源桩的桩体 ST2—ST6 处温度均高于普通能源桩 T2—T6 处;碳化硅能源桩的桩体 ST1 处温度低于普通能源桩 T1 处。

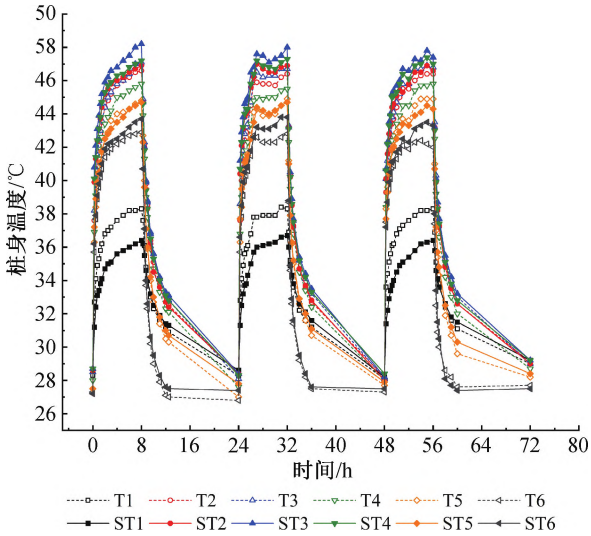


图 15　两种能源桩桩身轴向温度变化曲线

以第 1 次热循环中升温为例,普通能源桩 T1—T6 等 6 处温度峰值分别为 38.3、46.6、47.1、45.8、44.8 ℃ 和 42.9 ℃。相比之下,碳化硅能源桩 ST1—ST6 等 6 处温度峰值分别为 36.4、46.9、48.2、47.2、44.7 ℃ 和 43.7 ℃。普通能源桩桩身 T1—T6 处温度升高分别为 10.0、18.0、18.6、17.8、17.3 ℃ 和 15.6 ℃。而碳化硅能源桩桩身 ST1—ST6 处温度升高分别为 7.8、18.3、19.5、18.5、17.2 ℃和 16.5 ℃。在 3 次热循环过程中,桩体升温峰值最高处及升温变化幅度最大处均为桩中部 T3 温度。碳化硅能源桩 ST3 处最高温度分别为 48.2、48.0 ℃和 47.4 ℃;普通能源桩 T3 处最高温度为 47.1、46.7 ℃ 和 46.8 ℃,两者最大相差了 1.3 ℃。这表明碳化硅能源桩桩身的传热性能优于普通能源桩。

3.3　桩身温度增长速率

碳化硅的掺入提升了桩基混凝土试块的导热系数。以第 1 次热循环为例,展示碳化硅应用于模型桩中的实际效果,绘制普通能源桩和碳化硅能源桩 T3 处温度变化曲线,如图 16 所示,进行两种桩身温度增长速率的对比。碳化硅能源桩从 28.5 ℃升温至 44.4 ℃需要 1.3 h,而普通能源桩则需要 2.0 h。随着加热时间增加,两种桩体传热速率差距逐渐增大。两种桩从 28.5 ℃升温至 46.0 ℃所需时间分别为 2.5 h 和 5.0 h;从 28.5 ℃升温至 46.4 ℃所需时

间分别为 3.0 h 和 6.0 h;从 28.5 ℃升温至 47.0 ℃所需时间分别为 5.0 h 和 7.0 h。上述数据表明,碳化硅能源桩的温度增长速率快于普通能源桩,其传热性能优于普通能源桩。能源桩的热交换效率与其桩体的导热系数密切相关。高导热系数的桩基混凝土能够实现更快速的热量传递,使得能源桩在单位时间内传递更多的热量,有助于提高能源桩系统的整体能效。

3.4 桩土径向温度分布及变化规律

图 17(a)—(f)为普通能源桩和碳化硅能源桩在不同埋深(埋深 190、470 mm 和 750 mm)处不同位置(距桩中轴线 0.5D、1.5D、2.5D 和 3.5D)的径向温度随时间变化曲线。由图 17 可知,土体的温度变化规律与桩身温度变化规律相似,呈周期性变化。土体的轴向温度分布与桩身温度分布相似,这是因为温度从桩身径向传递至桩周土体中,而不同深度的土体所传递的热量有所差异;还可能是因为外部环境温度远低于热循环温度,土体下部靠近模型箱底,与土体上部相同,和四周环境接触较多,受环境温度影响较大。通过观察发现,距桩轴线 1.5D 处土体温度变化明显大于 2.5D 处土体,3.5D 处土体温度变化幅度最小,这一现象揭示了碳化硅能源桩桩土间热量传递效率沿着径向递减的规律。在实际工程中,为了确保地下土体的均匀受热并有效控制热传播范围,需精确计算并合理设置碳化硅能源桩的布置间距。

由图 17(a)—(b)可知,在埋深 190 mm 处,两种能源桩距各自桩轴线 1.5D 和 2.5D 处的土体温度相近。然而,在距桩轴线 3.5D 处,碳化硅能源桩周围的土体温度明显高于普通能源桩周围的土温度,这表明在相同的时间内碳化硅桩身的热量能够更快地传递较远处的桩周土中,碳化硅能源桩具有更佳的传热效果。由图 17(c)—(d)可知,在埋深

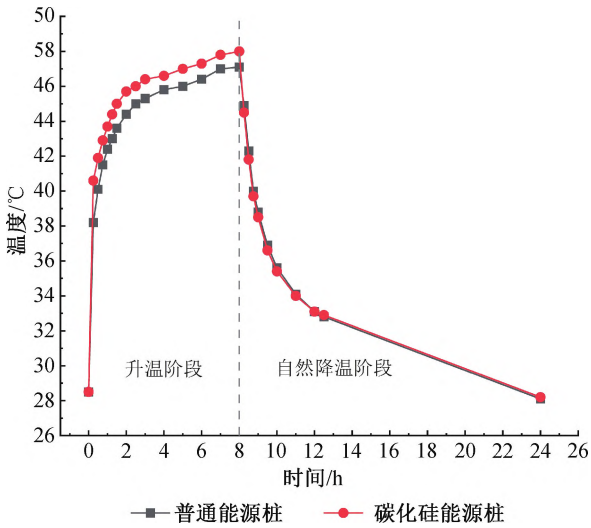
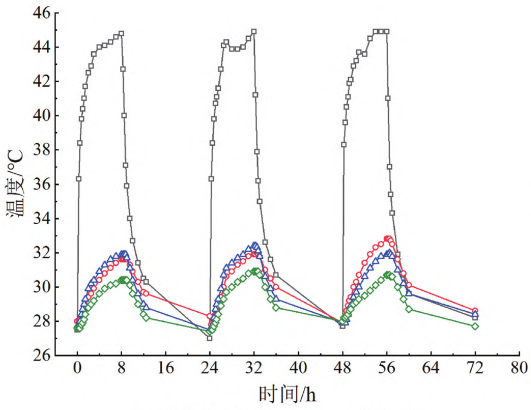


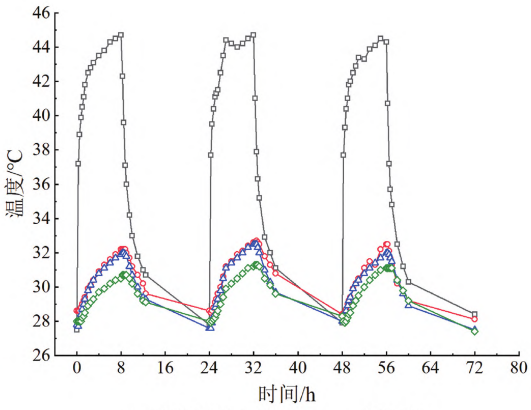
图 16 T3 处两种能源桩温度变化曲线

470 mm 处,碳化硅能源桩的桩土温度均高于普通能源桩的桩土温度。由图 17(e)—(f)可知,在埋深 750 mm 处,碳化硅能源桩桩身及 1.5D 处桩周土的温度均低于普通能源桩桩身及 1.5D 桩周土的温度。碳化硅能源桩 2.5D 和 3.5D 处桩周土的温度却高于普通能源桩桩周土的温度,这表明碳化硅能源桩周围热量更快地向四周土体扩散。靠近桩身 1.5D 处土体的热量更快的传向 2.5D 以及更远处。这是由于在饱和砂土地基中,土体含水率较高,土粒间产生“水桥”效应,孔隙内充满着水,空气传导的部分热量转为由导热系数更大的水分传递[20],使得土体导热系数提高,提升了能源桩周围土体的热传导速率,热量向四周土体更快扩散。

当停止加热进入自然降温阶段后,相较于距桩轴线 1.5D 处土体的降温速率,2.5D 处土体的降温速率较为缓慢。这是因为土体在不同位置的散热存在着延迟性,在散热的过程中,土体的热量从 1.5D 向 2.5D 传递。经过热循环后,土体温度较初始温度均有所上升,土体出现热量堆积现象。越靠近桩



(a) 普通能源桩(190 mm埋深处)



(b) 碳化硅能源桩(190 mm埋深处)

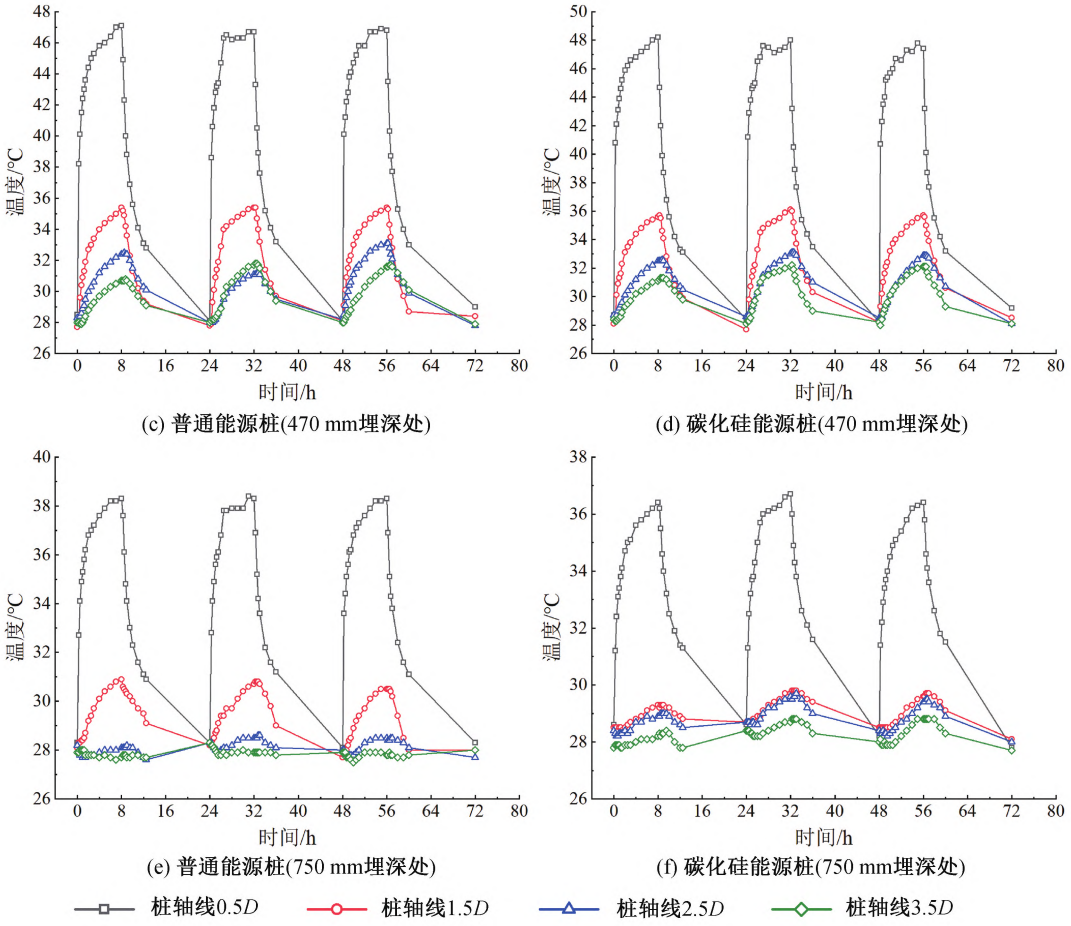


图 17　普通能源桩与碳化硅能源桩不同埋深处径向温度变化曲线

身,土体热量堆积越严重,其中 T8 处与 ST8 处最明显,T8 上升 0.7 ℃,ST8 上升 0.4 ℃。因此,在能源桩实际释热工况运行中,为了避免邻近桩身的土体热量堆积和温度上升,进而导致较高的温度应力,对实际工程运行造成不利影响,应合理控制间歇比。

4　结　论

本文通过桩基混凝土试块导热系数及力学性能测试,确定了碳化硅能源桩的桩身材料配合比;通过饱和砂土地基中能源桩高温释热工况模型试验,分析了碳化硅能源桩的传热特性。主要得到以下结论:

a)碳化硅的掺入可以提升桩基混凝土试块的导热系数、抗压强度以及抗折强度。碳化硅代砂率达到 16.0%时,桩基混凝土试块的导热系数、抗压强度以及抗折强度分别提升 64.1%、19.9% 和 11.4%,此代砂率下的碳化硅能源桩桩身材料配合比为最佳配合比。

b)碳化硅能源桩最高温度出现在桩中部,其次为桩上部,最小处为桩端部。

c)相较于普通能源桩,碳化硅能源桩的传热性能优越,具有更高的桩体换热功率、桩身温度与温度增长速率。

d)在碳化硅能源桩进行热循环时,桩土间的热量传递效率沿着径向递减。热循环过后,桩周土体呈现热量堆积现象,且这种现象随着接近桩身区域而逐渐增强。在能源桩实际运行中应控制间歇比,减少因温度所产生的应力对桩身的影响。

参考文献:

[1] 江强强,焦玉勇,骆进,等. 能源桩传热与承载特性研究现状及展望[J]. 岩土力学,2019,40(9):3351-3362.

[2] 谢金利,覃英宏,李颖鹏,等. 能源桩传热特性与热-力响应研究综述[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2023,45(1):155-166.

[3] 方鹏飞,高翔,娄扬,等. 夏季工况下正常服役地热能源桩承载性能原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(5):1032-1042.

[4] Liu K N, Wang Z J, Fang P F, et al. A new method for analyzing the thermomechanical behavior and the null

point movement of energy piles[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 165: 105867.

[5] 任连伟，任军洋，孔纲强，等. 冷热循环下 PHC 能量桩热力响应和承载性能现场试验[J]. 岩土力学，2021，42(2)：529-536.

[6] 李富远，王忠瑾，谢新宇，等. 静钻根植能源桩承载特性模型试验研究[J]. 岩土力学，2020，41(10)：3307-3316.

[7] 汤炀，刘干斌，郑明飞，等. 饱和粉土中相变能源桩热力响应模型试验研究[J]. 岩土力学，2022，43(S2)：282-290.

[8] 刘汉龙，吴迪，孔纲强，等. 预埋与绑扎埋管形式能量桩传热特性研究[J]. 岩土力学，2017，38(2)：333-340.

[9] Lyu W D, Pu H F, Xiao H L, et al. Thermal performance of energy pile with deeply penetrating 1-U-shape heat exchanger [J]. Geothermics, 2021, 91: 102023.

[10] Chen Z, Yao J W, Pan P, et al. Research on the heat exchange characteristics of the deeply buried pipe type of energy pile [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 27: 101268.

[11] 娄扬，方鹏飞，张日红，等. 外置双 U 型静钻根植工法能源桩换热性能研究[J]. 防灾减灾工程学报，2021，41(1)：100-109.

[12] Kong L P, Qiao L, Xiao Y Y, et al. A study on heat transfer characteristics and pile group influence of enhanced heat transfer energy piles[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 24: 100768.

[13] Li Q W, Yin Y, Kong L P, et al. Enhancing heat transfer in the heat exchange medium of energy piles [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 40: 102375.

[14] 赵嵩颖，王梦娜，陈雷. 能量桩桩基混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土，2023(3)：154-157.

[15] Chang H, Wang H Q, Shen F Q, et al. Experimental study of the thermodynamic properties of high thermal conductivity energy pile [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 70: 106349.

[16] Omar E, Mostafa M, Amir K. Performance of thermally enhanced geo-energy piles and walls [J]. Geothermics, 2022, 98: 102274.

[17] 尹雅，李庆文，乔兰，等. SiC 对能源桩混凝土传热与力学性能的影响[J]. 材料导报，2023，37(10)：128-132.

[18] Zhang L F, Wang Y F, Ding B Y, et al. Study on the mechanical and thermal properties of one-part geopolymer composite for high performance in energy piles [J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 19: e02230.

[19] 邢福燕，刘洋，杨文杰，等. 砂子细度及级配对新拌混凝土性能的影响研究[J]. 混凝土，2015(1)：118-121.

[20] 刘晨晖，周东，吴恒. 土壤热导率的温度效应试验和预测研究[J]. 岩土工程学报，2011，33(12)：1877-1886.

(责任编辑:康 锋)