

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0949

# 能源桩传热与承载特性研究现状及展望

江强强<sup>1,2</sup>, 焦玉勇<sup>1,3</sup>, 骆进<sup>3</sup>, 王浩<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 能源桩是一种在传递上部结构荷载的同时获取浅层地热能的新技术, 给桩基结构的设计及安全服役提出了新的挑战。从能源桩实际应用的角度, 围绕能源桩传热性能和承载性能两个关键科学问题, 从 4 个方面综述目前的研究现状: (1) 能源桩的热传递研究; (2) 能源桩的结构响应特征; (3) 能源桩的承载变形特性; (4) 能源桩的荷载传递机制。在此基础上, 对当前能源桩传热模型的适用性、热交换作用下能源单桩及群桩的承载特性以及长期运行条件下的承载性能及结构安全性进行了讨论, 最后对能源桩工程下一步研究进行了展望。分析成果对于保证结构安全, 合理开发浅层地能具有重要意义。

**关键词:** 浅层地热; 能源桩; 热传递; 承载特性; 研究现状

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2019)09-3351-13

## Review and prospect on heat transfer and bearing performance of energy piles

JIANG Qiang-qiang<sup>1,2</sup>, JIAO Yu-yong<sup>1,3</sup>, LUO Jin<sup>3</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** Energy pile is a relatively new foundation technology for extracting the shallow geothermal energy from surrounding rock and soil mass when transferring the load of the upper building, which poses a new challenge for the design and safety service of pile foundations. In the view of the practical application of energy piles, this paper focuses on two key scientific issues of heat transfer performance and bearing performance of energy piles. The main research problems related to energy piles are introduced from the following four types of research: heat transfer of energy piles, structural response characteristics of energy piles, bearing performance of energy piles, and load transfer mechanism of energy piles. On this basis, the applicability of current heat transfer model of energy piles, the bearing characteristics of single pile and pile groups under heat exchange, bearing performance and structural safety under long-term operating conditions are discussed. Finally, future research on energy pile engineering is prospected. The analysis results are significant for ensuring structural safety and developing the shallow ground energy rationally.

**Keywords:** shallow geothermal energy; energy piles; heat transfer; bearing performance; research status

## 1 引 言

为积极应对气候变化、生态环境恶化以及能源危机等问题, 加快开发利用绿色、清洁、可再生能源已成为国际社会的普遍共识和一致行动。地热能被普遍认为是一种绿色低碳、节能环保的可再生能源, 同时具有储量大、分布广、清洁环保、稳定可靠等特点, 是一种现实可行且极具竞争力的清洁能

源。基于地源热泵技术, 浅层地热能的开发利用早已实现, 并在欧洲、加拿大、日本等许多发达国家得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。其通过深埋于建筑物周围的管路系统, 利用热泵技术, 以输入少量高位电能实现低位地热能与高位热能间的转移, 完成建筑物与浅层地热能间的热交换。但工程实践中该项技术因钻孔难度大、占地面积大等原因导致投资成本大幅增加, 限制了其进一步推广, 影响了浅层地热能开发利用

收稿日期: 2018-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(No.51479191); 国家重点基础研究发展计划(973项目)(No.2014CB046904)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51479191) and the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2014CB046904).

第一作者简介: 江强强, 男, 1992年生, 博士研究生, 主要从事能源桩技术相关方面的研究工作。E-mail: jiangqiangqiang123@126.com

通讯作者: 焦玉勇, 男, 1968年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与科研工作。E-mail: yyjiao@cug.edu.cn

的发展进程。基于此,长期以来研究者们均力图通过技术创新开发一种新型的埋管技术,并以此发展出一种简便、经济、高效的浅层地热能开发利用新技术。

1980年,奥地利学者首次提出了桩埋管技术,即将热泵系统中的换热器置于建筑桩基内以替代传统的钻孔埋管换热器,并在澳大利亚实现了首次应用<sup>[1]</sup>。随后,Laloui等<sup>[4]</sup>正式提出能源桩(energy piles)概念,并给出了施工工艺及现场测试结果,图1为能源桩基的示意图。能源桩是在满足常规桩基承载性能的同时利用桩体作为载体以实现与浅层地热能的热交换,并充分利用桩基础的预成孔、桩体更大的换热截面及混凝土良好的导热性等特点降低投资成本,提高传热性能,节约地下空间资源,达到一举多得的目的。近年来,随着能源桩技术逐渐应用于各类高层建筑、地铁车站及路桥工程等大型结构物,基于对结构安全的考虑,能源桩在热交换过程中桩体力学特性和变形承载性能受到了广泛关注,成为了新的研究热点。在能源桩运行过程中,因桩-土间的热交换作用使桩体与桩周土体的温度场、物理力学特性发生变化,同时,桩体产生温度应力使桩的受力特性和荷载传递规律也发生变化,给桩基结构设计提出了新的挑战。

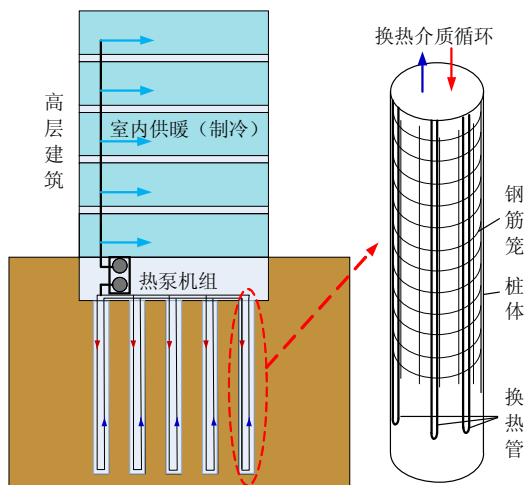


图1 能源桩基示意图

Fig.1 Schematic of energy pile system

多年来,国内外学者基于现场测试、室内试验、理论分析及数值模拟等不同途径对能源桩热-力学工程特性进行了系统研究,已经取得了一定的研究成果并进行了有效的实践应用,而国内这方面的研究还相对较少,仅清华大学、重庆大学、河海大学和中国科学院等少数科研单位进行了相关课题研

究,制约了能源桩技术在国内的发展与应用。基于此,本文围绕能源桩传热性能与承载性能两个关键科学问题,主要对能源桩传热特性、传热模型、桩周土体热性质以及运行过程中结构响应特征、变形承载特性、荷载传递机制等研究进展进行系统综述,并对研究中亟待解决的热点和难点问题进行了探讨,以期推动国内能源桩技术的研究工作。

## 2 能源桩技术主要的研究现状

作为耦合换热和承载双重功能的能源桩,其关键在于运行过程中桩体的换热性能和承载特性变化。围绕着两方面的科学问题,近年来,国内外诸多专家学者进行了许多的现场原位测试、室内模型试验、理论研究等研究工作,取得了诸多的成果。为此,笔者选择其中具有代表性的研究工作进行归纳总结,供以后的研究者借鉴。

### 2.1 能源桩热传递研究

#### 2.1.1 传热特性

能源桩的热传递过程涉及到循环液体、换热器、桩体和桩周土体4种不同热媒介质,加之传热过程又受到诸多因素影响,使能源桩系统的传热特性十分复杂。一般地,冬季采暖,能源桩通过循环换热流体从周围土层中获取热量;相反,夏季制冷,则将多余热量经桩体散失到周围土层中,可见,桩体运行模式控制着其传热特性。Morino等<sup>[5]</sup>率先开展了能源桩现场热响应测试工作,测试了桩体运行过程中周围土层温度变化情况,桩体取热过程中沿桩径方向一定范围内土层温度呈“漏斗状”分布,该范围以外土层保持初始地温,同时,随取热时间增长,土层温度“漏斗”范围逐渐扩大。刘俊等<sup>[6]</sup>基于能量守恒和线热源理论推导出能源桩在土体中热作用半径经验公式为 $r_{\infty} = 3.46\sqrt{\alpha\tau}$ ,其中 $\alpha$ 为周围土体的热扩散系数, $\tau$ 为换热时间,即某段时间内,桩体 $r_{\infty}$ 半径范围内的土体散热量等于桩体吸热量,超过该范围土体温度保持初始地温不变。

与传统钻孔埋管换热器相比,能源桩截面尺寸更大,换热器的埋设形式较为多样,常见的有并联双U、并联3-U、W型及螺旋型等,但埋管数量越多,即意味着运行过程中换热管间热交换作用也会更显著,能源桩的传热分析需要考虑热干扰效应<sup>[7]</sup>,同时桩体桩径大,桩体热容影响也不可忽略。如Bourne-Webb等<sup>[8]</sup>的现场测试研究表明,沿桩深和桩径方向桩体温度变化不均,如0.6m直径的能源桩,桩芯与桩壁温差可达5℃以上,说明桩体内部的热传递过程对整体传热特性有着不可忽视的影

响。

实际工程应用中, 能源桩多以桩群形式出现, 其传热过程更趋复杂, 不仅存在桩体-土体间的热量传递, 还需考虑桩体间热交换的影响。Loria 等<sup>[9]</sup>对群桩内能源桩加热 ( $\Delta T = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 测试到周围常规桩体温度存在明显升高现象 ( $\Delta T = +2\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 且温度增幅与桩间距呈负相关。赵军等<sup>[10]</sup>则提出了“热屏障”概念对能源群桩换热特性进行了研究, 即因桩群排热量过大造成土体局部区域产生热量聚集, 形成一个温度相对较高的区域, 会妨碍桩体与土体间正常热交换作用。

岩土体热性质也是影响桩-土间热传递作用的重要因素。如桩周土体热扩散系数大, 则土体对桩体的温度响应更敏感, 达到稳态传热的时间也就更短, 桩体换热性能更好。Goode 等<sup>[11]</sup>通过测试砂土和黏土内能源桩及土体温度响应特征, 分析了土层热传导性质对能源桩传热特性的影响。Akrouch 等<sup>[12]</sup>通过改变土体含水率, 测试了砂土饱和程度对能源桩热传导过程的影响, 指出随砂土饱和度增加, 桩体换热性能显著提升, 饱和砂土内桩体换热效率比干燥条件下高出 40%以上。此外, Go 等<sup>[13]</sup>研究了地下水渗流对能源桩传热特性的影响, 在无渗流时的土壤温度场是近于中心对称的, 在渗流作用下土壤温度场将产生偏移, 且偏移程度取决于地下水渗流速度。Fan 等<sup>[14]</sup>研究指出: 地下水渗流增加了系统冷损失, 于夏季蓄冷不利; 但渗流增强了桩周土体的温度恢复, 有助于冬季吸热。

另外, 还有学者<sup>[15-16]</sup>分析了桩径、换热器管径、液体流速、加热时长、进水口温度等对能源桩传热特和换热效果的影响。总之, 能源桩传热过程受到诸多因素共同影响, 其传热特性是多种因素作用下的综合表现。

### 2.1.2 传热模型

热量在土体中传播的方式主要有 3 种: 热传导、热对流和热辐射。通常情况下, 热量在浅层土体中传播多以热传导为主, 仅在渗透性强且存在地下水渗流的土中, 热对流可能起主导作用。因此, 能源桩传热问题研究也主要是针对热传导过程。基于此, 国内外研究者建立多种能源桩传热模型, 当前常用的主要有线热源、圆柱热源和线圈热源等 3 类传热理论模型。

Ingersoll 等<sup>[17]</sup>最早将 Kelvin 线热源理论应用于埋管换热器的传热分析, 提出了无限长线热源模型。该模型也应用于分析能源桩传热问题, 其将桩内换热器视为无限大介质中均匀发热的无限长线热

源, 在给定的初始温度场及恒热流边界条件下利用格林函数法给出了能源桩传热问题的解析解。由于此模型计算简便, 至今仍为埋管或能源桩布管设计广泛采用。Zeng 等<sup>[18]</sup>则采用虚拟热源法给出了有限长线热源模型的数学解答, 更好地描述了有限桩长的实际情况, 进一步改进了能源桩传热理论分析。Man 等<sup>[19]</sup>为考虑桩体较大的几何尺寸和热容特性, 建立了有限长圆柱热源模型。与其他模型相比, 该模型预测能源桩热传递过程精度较高。Go 等<sup>[20]</sup>则提出“等效热阻”的概念以考虑能源桩周岩土体热物性的非均一性, 并引入“移动热源”以描述地下水渗流的影响, 大大提高了圆柱热源模型实际适用性。Li 等<sup>[21]</sup>则针对桩体通常内布设螺旋形换热器的情况, 建立了能源桩有限长螺旋线圈热源模型, 丰富了能源桩热传递过程的理论模型。

除此之外, 一些学者还应用数值方法建立了能源桩的数值传热模型。Lei<sup>[22]</sup>采用二维双极圆柱坐标系将三维瞬态传热问题转化为二维瞬态传热问题, 并以不同差分格式对换热器传热进行分析。Li 等<sup>[23]</sup>采用非结构有限体积法建立了单 U 型换热器能源桩的三维数值模型, 并以 Delaunay 三角形化方法刻画 U 型换热器复杂几何外形, 进行了能源桩三维传热模拟。最近的模型分析则更关注相互耦合的热传递作用, 如 Nam 等<sup>[24]</sup>以有限元法为基础建立了三维 U 型埋管能源桩的数值模型, 模拟了考虑地表边界与空气间热对流及地下水渗流情况的能源桩热能量传递过程。Thornton 等<sup>[25]</sup>还提出埋管储热模型(DST 模型), 以分析密集布置的桩群组成的地下热储季节性储热引起的地温变化。

### 2.1.3 热交换对桩周土体热性质的影响

土体作为固、液、气三相物质组成的复杂介质, 其热性质是各相物质的综合体现, 与各相物质成分、含量等密切相关, 如含水率、矿物成分、密实度等。实际上, 桩-土间热传递过程势必引起土体水分迁移、土体含水率变化, 改变土的热性质; 反过来, 桩周土体热性质变化又会影响到桩-土间的热传递过程。可见, 其传热过程是一个典型的水-热耦合过程。在桩-土传热问题研究中, 热传导系数是土体最重要的热性质。

含水率是影响土体热传导系数的一个重要因素。根据前人的研究<sup>[26-27]</sup>, 处于干燥状态的土体, 因空气极低的导热系数(仅为水热传导系数的 1/23 左右)以及土颗粒和空气界面之间较大的接触热阻, 阻碍了土颗粒和孔隙之间的热能量传递, 因此其热传导系数较小。土由干燥状态转变为湿润状态时,

因水具有良好的导热特性，其热传导系数随含水率增加将大幅度提高<sup>[28-29]</sup>。但进一步研究表明，土热传导系数并不一直与含水率成单调递增的关系，如 Sepaskhah 等<sup>[30]</sup>研究表明，仅当土体饱和度在 22%~50% 范围内，热传导系数才随含水率增加而显著增大。Momose<sup>[31]</sup>和刘晨晖<sup>[32]</sup>等研究认为含水率对土热传导系数的影响存在明显的界限含水率，如图 2 所示。随着含水率的增加，土由干燥状态刚刚进入湿润状态时(小于  $\theta_1$ )，其导热系数大幅度增长，随后增长速率逐渐减小并在某一含水率下达到峰值 ( $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ )；之后，随着含水率的增加，导热系数略有减小并稳定于某一特定值。

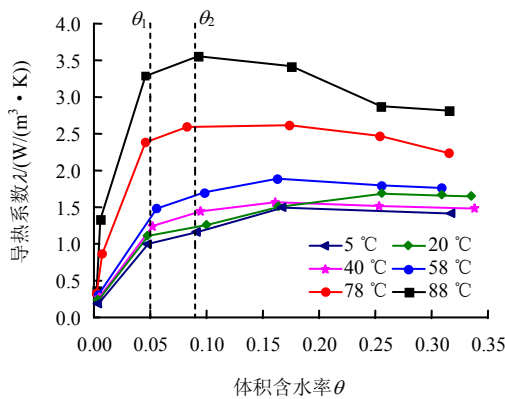


图 2 土导热系数随含水率的变化<sup>[32]</sup>  
Fig.2 Variation of soil thermal conductivity with water content<sup>[32]</sup>

### 2.2 能源桩结构响应特征

能源桩在换热过程中引起桩体温度变化，产生热胀冷缩变形，然而桩周岩土体和上部结构又构成桩体在温度荷载下不能自由变形的约束条件，使桩体内产生附加温度应力，从而改变了桩体应力-应变分布和受力特性。

Laloui 等<sup>[33]</sup>在瑞士首先开展了有关能源桩结构响应的原位测试工作，其测试桩桩径为 0.88 m，桩长为 25.8 m，桩端持力层为砂岩，其测试了温度-结构荷载耦合作用下桩体的应力-应变特征。测试发现，仅温度荷载 ( $\Delta T = +21\text{ }^\circ\text{C}$ ) 下桩身温度应变分布不均，表现为桩顶向桩端逐渐减小，但一次加热-制冷循环后应变基本恢复，表现为热弹性；同时，受桩周土体约束，桩体内产生较大附加温度应力，在桩身中、下部此应力可达 2 MPa 以上，超过了上部结构荷载作用时桩体内的最大应力(1 MPa)。Bourne-Webb 等<sup>[8]</sup>也开展了类似的测试工作，其测试桩桩径为 0.6 m，桩长为 23 m，桩身范围内土层

主要为伦敦黏土，Bourne-Webb 等<sup>[8]</sup>特别注意在制冷工况下 ( $T = -6\text{ }^\circ\text{C}$ )，桩身中部产生的温度应力(拉)超过了结构荷载作用桩身轴向应力(压)，使该部位处于为受拉状态；此外，因温度荷载值较大 ( $T = -6\sim+56\text{ }^\circ\text{C}$ )，桩体产生了不可恢复的附加应变。Amatya 等<sup>[34]</sup>在总结上述能源桩原位测试成果的基础上，提出了荷载-温度耦合作用下的能源桩结构响应的理想分析模型，如图 3 所示。加热状态下，温度荷载在桩身范围内产生较大的附加应力使桩体承受更大的压缩荷载，且桩侧摩阻力表现为桩身上部减小、下部增大；而制冷条件下，温度荷载在桩身范围内产生的附加拉伸应变和应力足以使桩体中下部分处于受拉状态，此外，桩身上部桩侧摩阻力增加，下部减小。

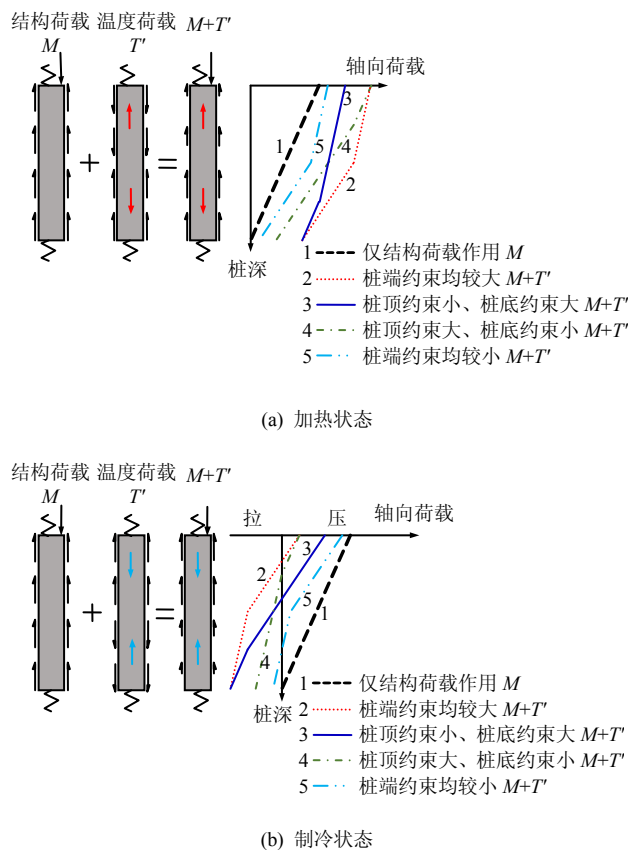


图 3 温度-结构荷载作用下能源桩力学响应模式<sup>[34]</sup>  
Fig.3 Mechanical response mode of energy piles during thermo-mechanical loading<sup>[34]</sup>

为进一步探讨桩端约束条件对能源桩结构响应特征的影响，Mc Cartney 等<sup>[35]</sup>测试端承型能源桩在运行过程中的应变分布特征，在桩体加热和制冷条件下桩身附加应变均表现为桩顶最大，而桩底最小，与 Amatya 模型一致，并指出桩端约束程度决定着桩身应变分布形式。路宏伟等<sup>[36]</sup>则通过现场测试对

摩擦型能源桩的结构响应特征进行了研究, 桩体在加热和制冷条件下, 桩身附加应变分布呈中间小、两端大, 与端承型能源桩应变分布具有明显的差异。Murphy 等<sup>[37]</sup>则对一根运行两年多的能源桩结构响应进行了长期持续监测, 运行初期桩身轴向温度附加应变表现为可恢复的热弹性变形; 之后, 桩身产生热塑性变形, 并具有持续增长的趋势。上述研究均是基于能源单桩开展的结构响应研究。为分析能源群桩结构响应特征, Mimouni 等<sup>[38]</sup>基于原位测试研究了由4根能源桩和筏板组成的群桩体系在单桩加热方式的结构响应, 受筏板约束作用群桩内加热桩与非加热桩具有完全相反的响应规律, 即加热条件下加热桩桩身应力增加, 非加热桩应力减小, 制冷条件则相反, 揭示了能源群桩与单桩存在着不一样的结构响应特征。

由于能源桩结构响应的原位测试工作试验周期长、成本高、测试难度大, 且试验场地地质条件各异, 试验结果代表性不足, 模型试验方法已成为能源桩结构响应研究的有益补充。Stewart 等<sup>[39]</sup>对设置在非饱和黏土层内端承型能源桩进行了室内离心机模型试验, 获得了与原位测试较为一致的应力-应变分布规律, 验证了能源桩模型试验的有效性。Goode 等<sup>[11]</sup>利用模型试验综合分析了土层性质、桩端约束条件及温度荷载对能源桩结构响应影响规律, 并认为桩-土相互作用是桩体结构响应的内在本质。Liu 等<sup>[40]</sup>开展了绑扎和预埋两种不同埋管方法的能源桩缩尺模型试验, 测试表明两种埋管形式的能源桩在加热及制冷条件下的结构响应基本一致, 应力-应变分布及量值差异很小。黄旭等<sup>[41]</sup>则对新型桩基础技术现浇混凝土大直径管桩(PCC桩)型能源桩在不同温度荷载的结构响应规律进行了测试研究。重庆大学刘汉龙教授的研究团队<sup>[42-45]</sup>开展了一系列能源桩室内缩尺模型试验研究, 针对桩侧土体压实度、埋管形式、施工方法及温度循环次数等因素对桩体结构响应特征的影响进行测试分析, 加深了对能源桩结构响应规律的认识。

### 2.3 能源桩的承载变形特性

对于能源桩, 工程上除关注其换热效率外, 更重视桩体在温度循环变化条件下的承载变形特性。由上述能源桩换热过程中的结构响应特征可以看出, 温度荷载使桩体应力-应变特征、受力特性与常规桩基存在着显著差别, 且热交换作用对桩侧岩土体及桩-土界面力学性质也会产生一定的影响, 使得桩体的承载变形问题变得尤为复杂。例如, Wang 等<sup>[46]</sup>对石英砂和硅粉内模型桩加热试验均揭

示桩体极限承载力降低, 且降幅可达50%以上。然而, NG 等<sup>[47]</sup>的试验却得到与 Wang 完全相反的结果, 其设置于砂土内的模型桩经加热后极限承载力不减反增, 且桩体承载力随温度升高近线性增长。此外, Goode 等<sup>[11]</sup>研究表明, 热交换作用对能源桩承载力的影响与桩周土体类型有关, 加热使黏土层内桩体的承载力增加, 而对砂土层内桩体承载力则基本无影响。由此可见, 桩周土体及桩土界面热力学性质是影响热交换过程中桩体承载力的关键因素。

#### 2.3.1 热交换作用下桩侧土体热力学特性

研究者们很早就注意到土体温度变化而引起其力学性质发生改变这一现象, 并对两者关系进行了深入研究。已有的研究<sup>[48]</sup>表明, 温度对土体热力学特性的影响规律明显受控于土体的应力历史, 如图4所示。一般地, 对于正常固结或轻微超固结的土体, 由于土的压缩系数较大, 加热诱致的超静孔隙水压力在消散过程使土体发生固结, 土颗粒相互位移、挤密, 使土体产生不可逆的收缩变形, 且收缩量远大于矿物颗粒和水的膨胀量, 表现为体积收缩; 而对于高超固结比的土体, 由于土体孔隙比和压缩系数本身较小, 加热引起孔隙水的排出作用可忽略不计, 土体体积变化主要是由于孔隙水和土颗粒热膨胀引起的, 多表现为可逆变形。当然, 不同性质土体在温度荷载下的力学行为也可能有所不同。Abuelnaga 等<sup>[49]</sup>试验揭示对正常固结黏土, 温度引起的体积收缩变形随塑性指数增大而增大。Demars 等<sup>[50]</sup>研究也表明, 同样的温度荷载下砂土和黏性土表现出不同的变形特性, 正常固结黏性土受热体积收缩, 而砂土在加热过程中体积基本无变化。此外, Hueckel 等<sup>[51]</sup>还对温度循环荷载条件下饱和黏性土体体积应变特性进行了试验研究, 分析了冷热循环反复作用下土体体应变变化规律。

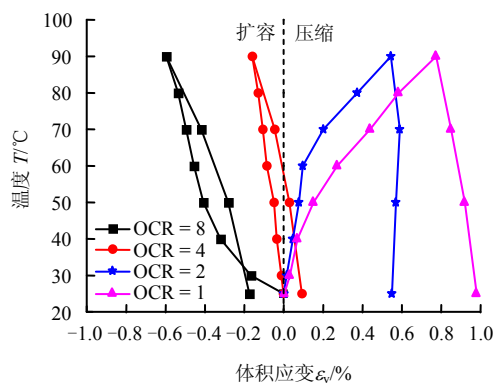


图4 温度对不同超固结比土体变形特性的影响<sup>[48]</sup>  
Fig.4 Effect of temperature on deformation characteristics of soils under different consolidation ratios<sup>[48]</sup>

另一方面, 温度变化对土体的强度特性还产生一定影响。如对于正常固结黏性土, 加热引起土体的固结作用使土颗粒趋于密实, 土体孔隙比减小, 抗剪强度增加。而对于低渗透性土体, 加热过程引起的超静孔隙水压力不易消散, 因而加热使土体强度衰减。但实际上, 温度对土体强度的影响远比此更为复杂。就温度荷载下土体排水剪切强度而言, 研究者就得出完全不一致的结论, 如 Abuelnaga 等<sup>[52]</sup>试验得到饱和高岭土样剪切强度随温度升高而逐渐增大, Hueckel 等<sup>[53]</sup>对饱和伊利石土样的试验却发现剪切强度随温度升高而逐渐降低。

### 2.3.2 热交换作用下桩-土界面力学特性

因温度变化引起桩周土体力学性质发生改变, 从而会影响到桩-土界面的力学特性。针对桩-土界面的力学特性, 已有的研究大多限于常温条件下, 对温度变化情况下桩-土界面的力学特性研究相对较少。Xiao 等<sup>[54]</sup>的研究发现, 由于温度荷载下土体产生热固结, 混凝土-土界面抗剪强度随温度升高而增加。Murphy 等<sup>[55]</sup>设计了一种原位桩孔混凝土-土接触面剪切力学特性的试验设备, 通过耦合温控装置, 对原位条件下温度对混凝土-土界面的剪切力学特性的影响进行了分析研究。Donna 等<sup>[56]</sup>基于直剪试验探究了温度(20~60℃)对不同类型土体与混凝土的界面剪切力学特性的影响。对于混凝土-黏土界面, 得出了与 Xiao 等<sup>[54]</sup>类似的结论, 但其也注意到温度对混凝土-砂土界面抗剪强度基本无影响。

另一方面, 温度变化引起热性质差异的桩体和土体产生不同程度的热胀冷缩变形, 使桩周土体对桩体约束程度发生改变, 从而导致桩-土界面法向接触应力变化。如加热状态下, 桩体侧向膨胀使桩周土体对其约束程度增大, 增加了桩-土界面法向接触应力, 使桩侧摩阻力增加, 进而影响桩体的承载力, 制冷桩体则与之相反。Kramer 等<sup>[57]</sup>通过缩尺模型试验研究表明, 温度升高使桩-砂土界面法向接触应力增加是桩体承载力增长的主要原因。显然, 温度对桩-土界面法向接触应力的变化还与土体渗透特性有关。Fuentes 等<sup>[58]</sup>研究认为, 对于高压缩性、低渗透性的正常固结黏性土, 加热引起的超静孔隙水压力及土体体积收缩变形会在较大程度上减小桩-土界面有效法向接触应力。

除此之外, 温度升高或降低还会引起热膨胀系数差异的桩体与土体沿接触界面发生剪切错动, 且因能源桩温度周期性循环变化的特点。实际上, 桩-土界面相当于承受温度变化引起的双向循环剪切作

用。已有研究表明, 双向循环剪切作用不仅使接触面附近土体体积收缩导致法向应力减小, 而且塑性变形的累积使界面附近土体内部结构发生了改变, 两者均会对桩-土界面的力学特性产生较大影响。Ng 等<sup>[59]</sup>研究表明, 由温度引起的双向循环剪切作用使界面附近土体剪缩, 桩-土界面法向接触应力减小, 进而使界面剪切强度减小。

综上所述, 热交换作用对土体及桩-土界面强度、变形等存在显著的影响, 一是这些力学特性随温度本身的变化, 二是温度变化引起的热湿迁移及剪切作用对这些力学特性的改变。

### 2.3.3 热交换作用下桩体承载特性

对于能源桩运行过程中, 桩-土热交换作用对桩体承载特性的影响始终是研究者关注的核心问题。Wang 等<sup>[60]</sup>利用桩基承载力自平衡技术测试得到密实砂土层内桩体在加热-制冷温度循环前后桩侧摩阻力并未产生显著影响, 说明单次加热-制冷温度循环作用下, 能源桩变形表现为热弹性, 桩-土界面未发生塑性变形, 与 Murphy 等<sup>[37]</sup>的现场监测成果一致。Kalanditou 等<sup>[61]</sup>基于缩尺模型试验发现温度循环条件下能源桩热弹性变形特性仅在一定条件下成立, 即上部结构荷载较小时, 温度循环下桩体热变形为可恢复的弹性变形, 而当荷载大于某一限值时, 温度循环使桩体产生不可恢复的沉降变形, 表现为热弹塑性。Yavari 等<sup>[62]</sup>也得到了类似的研究结论, 且上部结构荷载越大, 温度循环引起的桩体不可恢复沉降变形值也越大。Ng 等<sup>[63]</sup>则研究了荷载一定条件时多次温度循环下桩体沉降变形特征, 其累积沉降呈现明显的“棘轮效应”, 即温度循环作用导致桩-土体系塑性变形不断累积发展, 对桩体长期承载性能存在较大影响。Kalanditou 等<sup>[61]</sup>研究也指出, 温度循环后桩体荷载-沉降曲线曲率变大, 即温度循环作用弱化了桩的承载性能, 使桩体极限承载力降低, 对桩体的长期承载性能不利。Ng 等<sup>[59]</sup>将温度变化引起桩体周期性的隆起-收缩变化等效为桩周土承受循环剪切作用, 揭示了桩-土接触应力随桩体温度循环而逐渐衰减, 使桩侧摩阻力减小, 不断弱化桩基的承载性能。Pasten 等<sup>[64]</sup>基于荷载传递法分析了能源桩在温度循环下的长期位移沉降特征, 研究表明随温度循环次数增加, 桩体沉降量不断增长, 但沉降速率逐渐减小, 最终沉降趋于稳定; 同时比较了摩擦型与端承型能源桩在温度循环下的长期沉降变形差异。此外, Ng 等<sup>[65]</sup>还模拟分析了不同超固结比(OCR)的桩周土体以及不同桩体施工工艺(压入型、灌注型)对温度循

环作用下桩体长期变形沉降特性的影响。

## 2.4 能源桩的荷载传递机制

在桩基工程中，桩-土相互作用及荷载传递机制相当复杂，能源桩更因耦合温度效应而使其荷载传递过程成为困扰业内专家的一大难题。目前，国内外利用荷载传递法对能源桩荷载传递机制研究较少，即使有些研究也是基于许多的简化假设条件下进行的。Amatya 等<sup>[34]</sup>在该方面做了一系列研究工作，取得了丰硕的成果。假定桩周岩土体为均质各向同性体，温度荷载引起的桩体侧壁约束均匀分布（不随桩深变化），结构荷载作用下引起的桩侧摩阻力均匀分布，且中性点位于桩深中间位置，得到仅温度荷载下桩体的轴向荷载与桩侧摩阻力的分布情况，如图 5(a)、5(b)所示。加热条件下，桩体膨胀变形使桩体上半部分相对桩侧岩土体向上运动，摩阻力表现为负值，桩体下半部分则相对桩侧岩土体向下运动，摩阻力为正值；制冷条件下桩体的轴向荷载与桩侧摩阻力特征正好与加热情况相反。为深入研究温度和结构荷载耦合作用下桩体荷载传递问题，将桩体结构荷载简化为仅由桩侧摩阻力承担，且沿桩身方向摩阻力不变，则桩身轴向荷载沿深度线性分布，如图 5(c)、5(d)虚线所示，已有研究表明，这样的简化处理多数情况下是可以接受的。由图 5(c)可看出，加热使桩体产生了附加应力，桩体

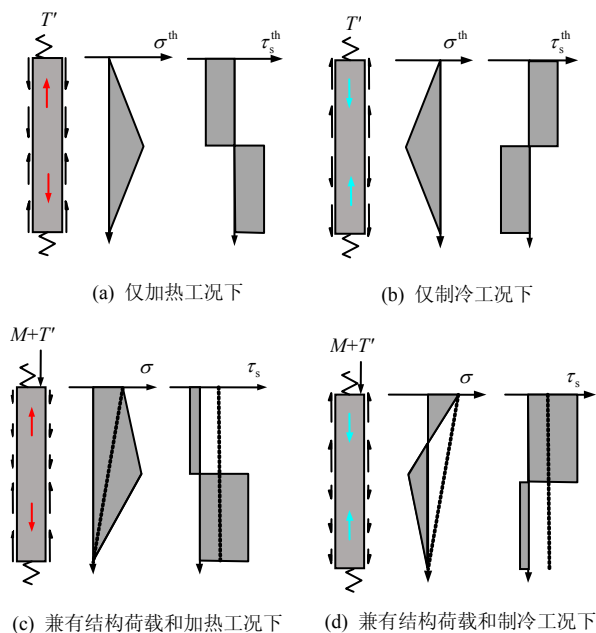
所需承担荷载水平增加，而桩体上部桩侧摩阻力减小为负值，下部摩阻力增加，桩体荷载主要由桩体下半部分承担，变形为荷载向桩体下部逐渐传递的趋势。图 5(d)则主要反映制冷条件下桩体应力变化与荷载传递特征，制冷使荷载水平降低，甚至可能使桩体下部处于拉应力状态。此外，桩体桩侧摩阻力上部增加，下部减小，荷载主要由上部桩侧岩土体承担。

温度荷载与结构荷载对桩体的轴向荷载及桩侧摩阻力并不是单独作用的。Knellwolf 等<sup>[66]</sup>在传统桩基荷载传递法基础上，根据摩阻力中性点的静力平衡条件，建立了桩体与土体之间相互作用的荷载传递方程。通过将桩体简化为热线弹性体，建立温度变化与桩体温度附加应力的函数关系，推导了结构荷载和温度荷载联合作用时桩身荷载、桩侧摩阻力、桩身位移的计算模型，通过已有的原位测试成果验证了以上分析模型的正确性。Pasten 等<sup>[64]</sup>则对 Knellwolf 等<sup>[66]</sup>的计算模型进行了改进，根据桩-土界面剪应力与其相对位移呈线性函数关系的力学模型建立了三折线型的弹塑性函数关系，并考虑土体热塑性和温度循环作用的影响，推导了温度循环荷载下桩-土刚度退化的荷载传递函数，分析了循环温度荷载作用下能源桩的荷载传递问题，为研究能源桩长期承载性能奠定了坚实的基础。Suryatriyastuti 等<sup>[67]</sup>提出一种考虑加热-制冷双向温度循环加载条件下桩-土界面的应变硬化-软化、循环退化等特性的荷载传递函数，分析了能源桩长期承载特性。费康等<sup>[68]</sup>建立了考虑温度循环效应的桩-土界面剪切刚度劣化模型，对不同运行工况下能源桩桩顶位移发展趋势进行了分析。

## 3 讨论

### 3.1 能源桩传热模型适用性评价

当前能源桩传热理论模型基本是借鉴钻孔地埋管换热器，即以线热源和圆柱热源模型为主，以轴对称作为前提，忽略桩体内部的传热影响，计算岩土温度的穿透与衰减范围。但与钻孔埋管换热器传热相比，能源桩传热分析有其特殊性，主要可体现为：①能源桩桩长短，桩身较大范围内受地表温度影响显著；②桩径大，换热器埋管数量更多、布管形式更多样，且桩体内换热管间热干扰效应更显著；③桩体几何尺寸更大，需考虑桩体内传热影响；④能源桩每延米换热量大，对桩侧岩土体热性质影响不可忽略。由此可见，无论从几何特性还是桩体热传递过程来看，能源桩的传热分析与钻孔埋管换



注： $\sigma$ 为桩轴向应力； $\tau_s$ 为桩侧摩阻力

$\sigma^{\text{th}}$ 为温度荷载下桩轴向附加应力； $\tau_s^{\text{th}}$ 为温度荷载下桩侧附加摩阻力

图5 温度-结构荷载作用下桩轴向荷载与摩阻力分布<sup>[34]</sup>  
Fig.5 Distributions of axial stress and side resistance of piles during thermo-mechanical loading<sup>[34]</sup>

热器有相当大的差别。表1列出了能源桩主要传热模型及其适用性。因此,如何根据能源桩的结构和传热特点,建立能反映能源桩桩-土间热能量传递特点和桩身温度变化的传热模型,是目前能源桩技术研究中亟待解决的重要课题。

表1 当前能源桩主要传热模型适用性评价  
Table 1 Applicability evaluation of main heat transfer model of energy piles

模型方法	主要优点	主要缺点	适用条件
线热源	公式简单计算 简便	忽略能源桩径向尺寸、内部传热特性,未考虑换热器布管形式	能源桩热流一定且系统长时间运行条件下
圆柱热源	能够考虑能源桩、换热器的几何形态及热阻特性	忽略能源桩径向传热及各换热管间热干扰效应	桩径较小、布设换热器少且长期运行条件下
螺旋线圈热源	可分析桩体内局部瞬态传热	忽略桩体与土体热性质差异	桩体内布置螺旋型换热管的情形

### 3.2 热交换对桩体承载特性的影响

根据能源桩的运行特点,热交换过程引起桩体及桩周土体温度升高或者降低,而温度的变化使桩体受力特性、土体及桩-土界面力学特性发生改变,从而影响桩体的承载特性。然而,目前对于热交换作用对能源桩承载特性的影响规律尚无定论,特别是加热过程中桩基承载力变化规律。本文分析了桩体加热对其承载力的作用,可以归结4个方面的作用:①加热引起桩侧摩阻力的重分布使桩身下部剪应力增大,当桩-土界面剪应力达到抗剪强度后,产生塑性变形,使桩体产生附加沉降,容许承载力降低<sup>[61]</sup>;②对于渗透性差的土体,桩体受热径向膨胀将引起饱和土体内产生较高的超静孔隙水压力,使桩-土界面有效接触应力减小,桩侧摩阻力减小,容许承载力降低<sup>[58]</sup>;③桩体受热径向膨胀,而土体的约束作用引起桩体产生径向附加应力,使桩-土界面接触应力增加,桩侧摩阻力增大,容许承载力增加<sup>[47]</sup>;④此外,因热固结效应改善了土体<sup>[52]</sup>和桩-土界面的力学性质<sup>[54]</sup>,使桩侧摩阻力和桩端阻力增加,对桩体承载能力的影响也不容忽视。显然,加热桩体引起其承载力变化是以上4种作用的综合结果,但在加热过程究竟以上述哪种作用为主需具体情况具体分析。例如, Kalantidou 等<sup>[61]</sup>试验中上部结构荷载较小时,温度循环下桩体热变形为弹性变形;而当荷载大于某一限值时温度循环使桩体产生不可恢复的沉降变形。其主要原因是荷载较小时,桩侧剪应力较小,加热引起的桩侧下部剪应力增加也未使超过其抗剪强度,桩-土界面未产生剪切错

动;而随着上部荷载增加,桩侧剪应力逐渐增大,再叠加加热引起的剪应力重分布作用使局部产生剪切位移。

### 3.3 热交换下群桩的承载特性

在实际工程应用中,能源桩往往是与常规桩基组成群桩布置在基础下,此时换热过程中能源桩力学响应可能将影响到整个群桩的承载特性。对一个由能源桩、常规桩及筏板组成的群桩体系,如图6所示,温度荷载作用下能源桩桩体发生变形,桩顶将产生位移,受桩-土-桩及桩-筏板-桩相互作用,将引起能源桩周围桩体受力和变形特性发生改变,即导致群桩荷载和沉降重新分布。以加热状态为例,在加热初期,能源桩桩顶产生向上的位移,抬升上部筏板,使与筏板相连的常规桩体受拉拔作用,桩顶也产生向上的位移,表现为能源桩所承担荷载增加,而常规桩荷载减小;随加热过程继续,桩周土体和常规桩体温度也逐渐升高,常规桩桩顶向上位移增大,缩小了与能源桩桩顶位移差异,使承担荷载有所增加,但小于初始荷载水平,也即加热桩荷载稍高于初始荷载。Suryatriyastuti 等<sup>[69]</sup>也验证了筏板约束下群桩内能源桩与常规桩具有完全相反的力学响应规律,即加热条件下能源桩承担荷载增加,常规桩承担荷载减小;制冷条件下能源桩承担荷载减小,而常规桩承担荷载增加。能源桩热交换引起群桩内荷载重分布的情况使某些桩荷载大幅增加,给结构安全带来较大的不确定性。

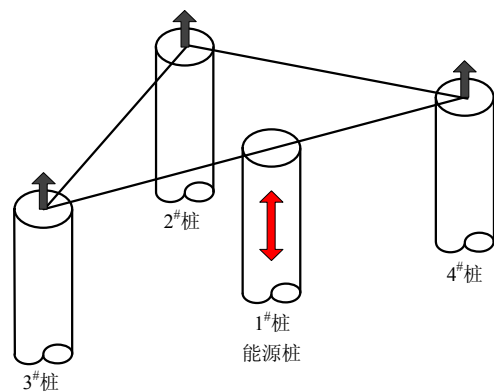


图6 能源群桩示意图<sup>[9]</sup>  
Fig.6 Sketch map of energy piles<sup>[9]</sup>

此外,对于能源桩与常规桩间以弱连接或不连接等方式组成的群桩体系,换热过程还引起能源桩与常规桩间产生差异性位移,可能会导致上部结构发生不均匀位移现象,进而影响结构的安全性。这在 Murphy 等<sup>[70]</sup>的试验里得到了证实。能源桩热交换引起群桩荷载重分布及桩间差异性位移是桩基设



计不可忽视的问题。

### 3.4 能源桩的长期承载性能

随着能源桩的长期运行，桩体及周围岩土体温度季节性地循环变化，引起热膨胀系数差异的桩-土界面发生双向循环剪切错动。在双向循环剪切作用下界面附近土体产生剪应变使土颗粒破碎及重排列，宏观上表现为颗粒定向排列及土体体积收缩，引起桩侧土体刚度和桩侧侧阻退化。基于此，对于能源桩基，尤其是摩擦桩，长期的运行将导致桩侧摩阻力的循环退化，从而使更大范围内的桩侧摩阻力发挥，引起额外的沉降变形，造成桩基承载性能的退化。同时，热交换作用还会引起桩体轴向荷载的循环变化，使桩端土体也相当于承受竖向循环荷载作用。在此循环作用下，桩端土体周而复始地经历着加卸载过程，不断地产生累积的塑性变形，也会进一步增大桩体的沉降变形，弱化桩体的承载性能。

桩-土间热能量传递过程的循环变化引起的水分迁移还可能导致桩侧土体经历干湿循环作用。在此过程中，桩侧土体可能发生不可逆的细微结构破坏，宏观表现出一定的软化特性，易导致桩基的承载力下降，造成承载特性的退化。

除此之外，能源桩温度周期性变化作用对群桩荷载重分布的影响也不容忽视，能源桩加热-制冷循环作用使桩体沉降位移不断发展，造成群桩内能源桩承担荷载不断减小，常规桩承担荷载不断增加，极端情况下甚至可能导致常规桩失效。

尽管目前对能源桩长期承载特性的研究尚开展较少，但从本文的分析中可以看出，能源桩的承载性能随温度循环作用逐渐退化，甚至在桩体服役期内就可能出现失效的情况。因而，如何保证桩体在服役期内具备稳定的承载性能对于能源桩工程具有重要意义。

## 4 结论与展望

能源桩作为一种新的桩基结构型式，同时具备传递上部结构荷载及进行地热能利用的双重功能，符合当前节能减排、绿色建筑的要求和标准，值得推广应用。在国内，虽然能源桩技术目前仅在少数工程中进行了探索性的应用，但随着对建筑能耗要求的提高，利用能源桩技术开发浅层地热能不可否认是未来绿色建筑发展的重要方向。本文以能源桩传热性能和承载性能两个关键问题为主线，对能源桩热能量传递特性、热-力耦合作用下能源桩的结构响应特征、承载变形特性、荷载传递机制等内容

进行了总结和分析，在此基础上提出了一些自己的看法。

(1) 因较大的换热截面和混凝土良好的导热特性，能源桩具有较高的换热效率。作为一种耦合承载作用的换热构件，桩体较大的几何尺寸与多样的换热器布设形式使桩体内的热传递过程不可忽略；此外，对能源桩传热分析时，换热过程中岩土介质因热湿迁移效应引起的热性质变化也应予以考虑。

(2) 热交换作用引起桩体产生温度应变，在桩周岩土体和上部结构的约束作用下，又使桩体内产生附加应力，使桩体的应力-应变重分布，导致桩侧局部剪应力增加。对于桩侧土体抗剪强度较低的情况，当重分布剪应力达到其抗剪强度后，会产生塑性变形，可能造成桩体承载性能弱化。

(3) 换热过程中，桩周土体各组分温度变化和水分迁移会对土体变形、强度等力学特性产生影响，但目前对于该问题还缺乏比较系统和一致的看法。因此，需开展热湿迁移过程对土体力学性状影响的系列试验研究，从土的本质特性入手，对土的结构特性、矿物组成成分、应力历史和含水率等方面进行综合考察，以正确评估热交换作用对桩周土体力学性状的影响。

(4) 与常温土-结构接触面相比，温度变化条件下土-结构接触面更具独特的力学特性。开展冷-冷温度循环荷载下混凝土-土接触面剪切力学特性试验研究，建立考虑热-水-力耦合的桩-土接触面力学模型，是分析能源桩基在换热过程中承载性能变化的关键环节。

(5) 群桩内桩-筏-桩及桩-土-桩间相互作用使能源桩在换热过程中的结构响应会影响到邻近桩基及整个桩群体系荷载分配且增加桩间位移差，如何评价以及如何控制能源桩运行引起的群桩荷载重分布及桩间差异性位移对桩群乃至上部结构安全性的影响是目前亟待解决的难题。同时，建立能源群桩的热-力学响应模型，揭示桩-筏-桩及桩-土-桩间热-力相互作用也是研究的重点和难点问题。

(6) 能源桩持续运行条件下引起桩-土界面双向循环剪切错动、桩端土体循环加卸载、桩侧土体干湿循环作用及群桩热-力效应等会使桩基的长期承载性能退化，在分析能源桩长期承载特性的过程中如何将这一些弱化效应予以综合考虑，以及对长时间运行下桩基承载性能的退化又如何给予控制，是今后能源桩技术研究的重要课题。

### 参考文献

[1] BRANDL H. Energy foundations and other thermo-active

- ground structures[J]. *Géotechnique*, 2006, 56(2): 81—122.
- [2] CHOUDHARY R, SOGA K, ZHANG Y. Shallow geothermal energy application with GSHPs at city scale: study on the city of Westminster[J]. *Géotechnique Letters*, 2014, 4(April-June): 125—131.
- [3] HAMADA Y, SAITOH H, NAKAMURA M. Field performance of an energy pile system for space heating[J]. *Energy and Buildings*, 2007, 39(5): 517—524.
- [4] LALOUI L, MORENI M, VULLIET L. Behavior of a dual-purpose pile as foundation and heat exchanger[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, 40(5): 213—225.
- [5] MORINO K, OKA T. Study on heat exchanged in soil by circulating water in a steel pile[J]. *Energy and Buildings*, 1994, 21(1): 65—78.
- [6] 刘俊, 张旭, 高军, 等. 地源热泵桩基埋管传热性能测试与数值模拟研究[J]. *太阳能学报*, 2009, 30(6): 727—731.  
LIU Jun, ZHANG Xu, GAO Jun, et al. Heat transfer performance test and numerical simulation of pile-pipe ground source heat pump system[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2009, 30(6): 727—731.
- [7] 陈忠购, 赵石娆, 张正威. 内置并联U形埋管能量桩的换热性能研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(5): 238—243.  
CHEN Zhong-gou, ZHAO Shi-rao, ZHANG Zheng-wei. Heat transfer analysis of energy piles with parallel connected U-tubes[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(5): 238—243.
- [8] BOURNE-WEBB P, AMATYA B, SOGA K, et al. Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles[J]. *Géotechnique*, 2009, 59(3): 237—248.
- [9] LORIA A F R, LALOUI L. Thermally induced group effects among energy piles[J]. *Géotechnique*, 2016, 66(12): 1—20.
- [10] 赵军, 王华军. 密集型桩埋换热器管群周围土壤换热特性的数值模拟[J]. *暖通空调*, 2006, 36(2): 11—14.  
ZHAO Jun, WANG Hua-jun. Numerical simulation on heat transfer characteristics of soil around compact pile buried underground heat exchangers[J]. *Heating Ventilating and Air Conditioning*, 2006, 36(2): 11—14.
- [11] GOODE J C I, MCCARTNEY J S. Centrifuge modeling of end-restraint effects in energy foundations[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141(8): 04015034.
- [12] AKROUCH G A, SÁNCHEZ M, BRIAUD J L. Effect of the unsaturated soil condition on the thermal efficiency of energy piles[C]//Proceedings of the International Foundations Congress and Equipment Expo. 2015. San Antonio: the Geo-Institute of ASCE, 2015.
- [13] 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(2): 165—178.
- [14] FAN R, JIANG Y Q, YAO Y, et al. A study on the performance of a geothermal heat exchanger under coupled heat conduction and groundwater advection[J]. *Energy*, 2007, 32(11): 2199—2209.
- [15] 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: 199—213.
- [16] 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 Xiang-yu, GUO Hong-xian, CHENG Xiao-hui. Experimental and numerical study on temperature distribution in energy piles[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(4): 102—110.
- [17] INGERSOLL L R, ZOBEL O J, INGERSOLL A C. Heat conduction with engineering geo-logical and other applications[M]. Madison: University of Wisconsin Press, 1954.
- [18] ZENG H Y, DIAO N R, FANG Z H. A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers[J]. *Heat Transfer—Asian Research*, 2002, 31(7): 558—567.
- [19] MAN Y, YANG H, DIAO N, et al. A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(13—14): 2593—2601.
- [20] GO G H, LEE S R, KANG H B, et al. A novel hybrid design algorithm for spiral coil energy piles that considers groundwater advection[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 78: 196—208.
- [21] LI M, LAI A C K. Heat-source solutions to heat conduction in anisotropic media with application to pile and borehole ground heat exchangers[J]. *Applied Energy*, 2012, 96(3): 451—458.
- [22] LEI T K. Development of a computational model for a ground-coupled heat exchanger[J]. *ASHRAE*

- Transactions**, 1993, 99(1): 149—159.
- [23] LI Z, ZHENG M. Development of a numerical model for the simulation of vertical U-tube ground heat exchangers[J]. **Applied Thermal Engineering**, 2009, 29(5—6): 920—924.
- [24] NAM Y, OOKA R, HWANG S. Development of a numerical model to predict heat exchange rates for a ground-source heat pump system[J]. **Energy and Buildings**, 2008, 40(12): 2133—2140.
- [25] THORNTON J W, MCDOWELL T P, SHONDER J A, et al. Residential vertical geothermal heat pump system models: calibration to data[J]. **ASHRAE Transactions**, 1997, 103(2): 660—674.
- [26] STEPHAN K, LAESECKE A. The thermal conductivity of fluid air[J]. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, 1985, 14(1): 227—234.
- [27] RAMIRES M, CASTRO C, NAGASAKA Y, et al. Standard reference data for the thermal conductivity of water[J]. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, 1995, 24(3): 1377—1381.
- [28] LU S, REN T S, GONG Y S, et al. An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 2007, 71(1): 8—14.
- [29] RUBIO C M. An approach to make more technical thermal properties measure in porous media[J]. **Applied Ecology and Environmental Research**, 2014, 2(2): 60—65.
- [30] SEPASKHAH A R, BOERSMA L. Thermal conductivity of soils as a function of temperature and water content[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1979, 43(3): 439—444.
- [31] MOMOSE T, KASUBUCHI T. Effect of reduced air pressure on soil thermal conductivity over a wide range of water content and temperature[J]. **European Journal of Soil Science**, 2002, 53(4): 599—606.
- [32] 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.  
LIU Chen-hui, ZHOU Dong, WU Heng. Measurement and prediction of temperature effects of thermal conductivity of soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(12): 1877—1886.
- [33] LALOUI L, NUTH M, VULLIET L. Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2005, 30(8): 763—781.
- [34] AMATYA B L, SOGA K, BOURNE-WEBB P J. Thermo-mechanical behaviour of energy piles[J]. **Géotechnique**, 2012, 62(6): 503—519.
- [35] MC CARTNEY J S, 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.
- [36] 路宏伟, 蒋刚, 王昊, 等. 摩擦型能源桩荷载-温度现场联合测试与承载性状分析[J]. **岩土工程学报**, 2017, 39(2): 334—342.  
LU Hong-wei, JIANG Gang, WANG Hao, et al. In-situ tests and thermo-mechanical bearing characteristics of friction geothermal energy piles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(2): 334—342.
- [37] MURPHY K D, MC CARTNEY J S. Seasonal response of energy foundations during building operation[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2014, 33(2): 1—14.
- [38] MIMOUNI T, LALOUI L. Behaviour of a group of energy piles[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2015, 52: 1913—1929.
- [39] STEWART M A, MCCARTNEY J S. Centrifuge modeling of soil-structure interaction in energy foundations[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2014, 140(4): 04013044.
- [40] LIU H, WANG C, KONG G, et al. Model tests on thermo-mechanical behavior of an improved energy pile[J]. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 2018, 22(18): 1257—1272.
- [41] 黄旭, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 循环温度场作用下PCC能量桩热力学特性模型试验研究[J]. **岩土力学**, 2015, 36(3): 667—673.  
HUANG Xu, KONG Gang-qiang, LIU Han-long, et al. Experimental research on thermomechanical characteristics of PCC energy pile under cyclic temperature field[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 667—673.
- [42] 刘汉龙, 王成龙, 孔纲强, 等. 不同压实度下能量桩的热力学效应[J]. **中国科技论文**, 2016, 11(13): 1511—1515.  
LIU Han-long, WANG Cheng-long, KONG Gang-qiang, et al. Thermal-mechanical characteristics of energy pile under different degrees of compaction[J]. **China Science Paper**, 2016, 11(13): 1511—1515.

- [43] 刘汉龙, 王成龙, 孔纲强, 等. U 型、W 型和螺旋型埋管形式能量桩热力学特性对比模型试验[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 441—447.  
LIU Han-long, WANG Cheng-long, KONG Gang-qiang, et al. Comparative model test on thermo-mechanical characteristics of energy pile with U-shape, W-shape and spiral-shape[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Suppl.1): 441—447.
- [44] 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.  
LIU Han-long, WU Di, KONG Gang-qiang, et al. Thermal response of energy piles with embedded tube and tied tube[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(2): 333—340.
- [45] 孔纲强, 王成龙, 刘汉龙, 等. 多次温度循环对能量桩桩顶位移影响分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 958—964.  
KONG Gang-qiang, WANG Cheng-long, LIU Han-long, et al. Analysis of pile head displacement of energy pile under repeated temperature cycling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(4): 958—964.
- [46] WANG B, BOUAZZA A, HABERFIELD C. Preliminary observations from laboratory scale model geothermal pile subjected to thermal-mechanical loading[C]//Proceedings of Geo-Frontiers 2011. Dallas: the Geo-Institute of ASCE, 2011.
- [47] NG C W W, SHI C, GUNAWAN A, et al. Centrifuge modelling of heating effects on energy pile performance in[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2015, 52(8): 1045—1057.
- [48] TOWHATA I, KUNTIWATTANAKU P, SEKO I, et al. Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests[J]. **Soils and Foundations**, 1993, 33(4): 170—183.
- [49] ABUELNAGA A N M, BERGADO D T B T, BOUAZZA A B, et al. Volume change behaviour of saturated clays under drained heating condition[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2007, 44(8): 942—956.
- [50] DEMARS K R, CHARLES R D. Soil volume changes induced by temperature cycling[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1982, 19(2): 188—194.
- [51] HUECKEL T, PELLEGRINI R, DEL OLMO C. A constitutive study of thermo-elasto-plasticity of deep carbonatic clays[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2015, 22(7): 549—574.
- [52] ABUELNAGA H M, BERGADO D T, LIM B F. Effect of temperature on shear strength and yielding behavior of soft Bangkok clay[J]. **Soils and Foundations**, 2007, 47(3): 423—436.
- [53] HUECKEL T, BORSETTO M. Thermoplasticity of saturated soils and shales: constitutive equations[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1990, 116(12): 1765—1777.
- [54] XIAO S, SULEIMAN M T, MC CARTNEY J S. Shear behavior of silty soil and soil-structure interface under temperature effects[C]//Proceedings of the 2014 Geo-Congress. Atlanta: the Geo-Institute of ASCE, 2014.
- [55] MURPHY K D, MC CARTNEY J S. Thermal borehole shear device[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2014, 37(6): 1—16.
- [56] DONNA A D, FERRARI A, LALOUI L. Experimental investigations of the soil-concrete interface: physical mechanical, cyclic mobilization and behaviour at different temperatures[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2016, 53(4): 659—672.
- [57] KRAMER C A, BASU P. Performance of a model geothermal pile in sand[C]//International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. Perth: the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014.
- [58] FUENTES R, PINYOL N, ALONSO E. Effect of temperature induced excess porewater pressures on the shaft bearing capacity of geothermal piles[J]. **Geomechanics for Energy and the Environment**, 2016, 8: 30—37.
- [59] NG C W W, MA Q J, GUNAWAN A. Horizontal stress change of energy piles subjected to thermal cycles in sand[J]. **Computers and Geotechnics**, 2016, 78: 54—61.
- [60] WANG B, BOUAZZA A, RAO M S, et al. Posttemperature effects on shaft capacity of a full-scale geothermal energy pile[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2015, 141(4): 04014125.
- [61] KALANDITOU A, TANG A M, PEREIRA J M, et al. Preliminary study on the mechanical behaviour of heat exchanger pile in physical model[J]. **Géotechnique**, 2012, 62(11): 1047—1051.
- [62] YAVARI N, TANG A M, PEREIRA J M, et al. Mechanical behaviour of a small-scale energy pile in saturated clay[J]. **Géotechnique**, 2016, 66(11): 1—10.

- WEI Hong. Experimental study on impact force of debris flow faucet on dam body[J]. **China Railway Science**, 1996, 17(3): 50–62.
- [26] 王秀丽, 黄兆升. 冲击荷载下泥石流拦挡坝动力响应分析[J]. **中国地质灾害与防治学报**, 2013, 24(4): 61–65.
- WANG Xiu-li, HUANG Zhao-sheng. Analysis of dynamic response of debris flow dams under impact load[J]. **Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2013, 24(4): 61–65.
- [27] 何思明, 李新城, 吴永. 考虑弹塑性变形的泥石流大块石冲击力计算[J]. **岩石力学与工程学报**, 2007, 26(8): 1664–1669.
- HE Si-ming, LI Xin-po, WU Yong. Calculation of impact force of mudstone flow considering elastoplastic deformation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(8): 1664–1669.
- [28] 徐林荣, 陈舒阳, 曹禄来. 泥石流危害桥隧工程易损性评价[J]. **岩土力学**, 2014, 35(9): 2642–2650.
- XU Lin-rong, CHEN Shu-yang, CAO Lu-lai. Debris flow hazards assessment of bridge and tunnel engineering vulnerability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(9): 2642–2650.
- [29] PITMAN E B, LE L. A two-fluid model for avalanche and debris flows[J]. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, 2005, 363(1832): 1573–1601.
- [30] 倪晋仁, 王光谦. 泥石流的结构两相流模型, I: 理论[J]. **地理学报**, 1998, 53(1): 1–7.
- NI Jin-ren, WANG Guang-qian. Two-phase flow model of debris flow, I: theory[J]. **Journal of Geographical Sciences**, 1998, 53(1): 1–7.
- [31] 倪晋仁, 王光谦, 熊育武. 泥石流的结构两相流模型 II: 应用[J]. **地理学报**, 1998, 53(1): 77–85.
- NI Jin-ren, WANG Guang-qian, XIONG Yu-wu. Two-phase flow model of debris flow, II: application[J]. **Journal of Geographical Sciences**, 1998, 53(1): 77–85.
- [32] 陈洪凯, 唐红梅. 泥石流两相冲击力及冲击时间计算方法[J]. **中国公路学报**, 2006, 19(3): 19–23.
- CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei. Two-phase impact force and impact time calculation method for debris flows[J]. **China Journal of Highway Engineering**, 2006, 19(3): 19–23.
- [33] HÜBL J, HOLZINGER G. Entwicklung von Grundlagen zur Dimensionierung Kronenöffener Bauwerke für die Geschiebemanagement in Wildbachen: Kleinmassstabliche Modellversuche zur Wirkung von Murbrechern[R]. [S. l.]: Institute of Mountain Risk Engineering, 2003.
- HÜBL J, HOLZINGER G. Development of principles for the dimensioning of crown-open structures for the management of debris in Wildbachs: small-scale model experiments on the effectiveness of mortar crushers[R]. [S. l.]: Institute of Mountain Risk Engineering, 2003.
- [34] CUI P, ZENG C, LEI Y. Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow[J]. **Earth Surface Processes and Landforms**, 2015, 40(12): 1644–1655.

---

上接第 3362 页

- [63] NG C W W, SHI C, GUNAWAN A, et al. Centrifuge modelling of energy piles subjected to heating and cooling cycles in clay[J]. **Geotechnique Letters**, 2014, 4: 310–316.
- [64] PASTEN C, SANTAMARINA J C. Thermally induced long-term displacement of thermo-active piles[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2014, 140(5): 70–75.
- [65] NG C W W, GUNAWAN A, SHI C, et al. Centrifuge modelling of displacement and replacement energy piles constructed in saturated sand: a comparative study[J]. **Geotechnique Letters**, 2016, 6(1): 1–5.
- [66] KNELLWOLF C, PÉRON H, LALOUÏ L. Geotechnical analysis of heat exchanger piles[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2011, 137(10): 890–902.
- [67] SURYATRIYASTUTI M E, MROUEH H, BURLON S. A load transfer approach for studying the cyclic behavior of thermo-active piles[J]. **Computers and Geotechnics**, 2014, 55: 378–391.
- [68] 费康, 戴迪, 洪伟. 能量桩单桩工作特性简化分析方法[J]. **岩土力学**, 2019, 40(1): 70–80.
- FEI Kang, DAI Di, HONG Wei. A simplified method for working performance analysis of single energy piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(1): 70–80.
- [69] SURYATRIYASTUTI M E, BURLON S, MROUEH H. On the understanding of cyclic interaction mechanisms in an energy pile group[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2016, 40(1): 3–24.
- [70] MURPHY K D, MC CARTNEY J S, HENRY K S. Evaluation of thermo-mechanical and thermal behavior of full-scale energy foundations[J]. **Acta Geotechnica**, 2013, 10(2): 179–195.