



土体热力学性质试验研究进展

刘红^{1,2}, 陈怡馨¹, 刘汉龙^{2,3*}, 孙增春³, 肖杨^{2,3}

1. 内江师范学院建筑工程学院, 内江 641112;

2. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;

3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045

* E-mail: cehliu@hhu.edu.cn

收稿日期: 2022-06-07; 接受日期: 2022-09-16; 网络版发表日期: 2023-03-21

山地城镇建设与新技术教育部重点实验室开放基金(编号: LNTCCMA-20220107)、国家自然科学基金(批准号: U52008213)和内江师范学院大学生创新创业训练计划(编号: 202110640023)资助项目

摘要 浅层地热能是地热资源的一部分, 也是在当今技术经济条件下, 具备开发利用价值的地球内部的热能资源, 且在我国分布广、储量大, 再生迅速, 利用价值高. 利用地源热泵技术, 可将浅层地热能中的“冷源”或“热源”引入结构物中, 从而调节结构物的温度, 达到冬暖夏凉的效果, 减少碳排放. 已有研究表明, 目前我国浅层地热能开发现状是单级浅层地热能开发利用不充分, 浅层地热能的多级利用及其与太阳能等其他清洁能源融合开发严重滞后. 该种现状主要是目前我国对结构物、土体、结构物与土体接触面之间的热力学性质认识不全所致. 本文总结了近年来国内外土体热力学性质的试验研究进展, 着重对温控试验的加热机理、不同类型的温控试验过程、温控试验的影响因素等方面的研究进行系统介绍, 并对后续土体热力学性质的试验研究趋势进行展望.

关键词 浅层地热能, 温控试验, 接触面, 热力学性质

1 引言

2021年12月, 中国碳核算数据库(CEADs)统计近50年(1959~2019年)世界各国CO₂排放量, 从统计的数据可知, 我国CO₂排放量已跃居世界首位, 且2019年我国年CO₂排放量约占全球当年CO₂排放总量的28%^[1]. 2020年9月, 随着我国“双碳”目标的提出, 开发清洁能源, 减少化石能源消耗, 减少碳排放, 建立现代能源体系成为我国能源发展的主要方向, 也逐渐成为全世界关注的重点问题^[2~4]. 作为清洁能源中的一种——地热能, 具有清洁、高效、稳定、安全等优势, 且我国地热

资源(即蕴藏在地球内部的天然热能)非常丰富^[5~7], 因此, 对于地热能的开发利用, 前景可期, 且潜力巨大^[8]. 地热能的开发利用在“双碳”目标战略中占据着重要的地位^[9], 对于地热资源的研究也将成为今后国内外关注的一个热点课题^[10].

目前, 我国对地热能的开发利用主要集中于南方制冷、北方取暖、温泉疗养、温室大棚和水产养殖等最直接的利用方式. 虽然我国地热发电起步较早(1970年广东), 但发展相对缓慢, 技术不成熟, 整个地热能的利用效率相对较低^[11~13]. 如此局面是由于在进行地热能开发过程中, 工程师们直接利用已有的工程技术和

引用格式: 刘红, 陈怡馨, 刘汉龙, 等. 土体热力学性质试验研究进展. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 1-14

Liu H, Chen Y X, Liu H L, et al. Experimental progress research on the thermomechanical properties of soils (in Chinese). Sci Sin Tech, 2024, 54: 1-14, doi: 10.1360/SST-2022-0197

经验进行开发, 却忽略了温度对土体力学性质的影响问题, 缺少对地热能的研究、装备的研发和不同技术之间的融合研究^[14~16]。此外, 近年来, 在核废料的处理^[17,18]、高温隧洞^[19~21]、高压电缆^[22~24]、能源桩^[25~27]、高速公路^[28~30]、软土地基^[31~33]以及储能结构^[34~37]的设计和施工过程中, 温度对岩土体力学性质的影响也逐渐成为一个不能被忽视的关键性问题之一。

本文基于近年来国内外对土体的热力学效应的试验研究, 结合笔者的部分研究成果, 综述了温控试验的热力学机理、试验过程以及影响因素等方面的主要进展, 并分析了目前温控试验中仍需进一步取得突破的方向。通过梳理已有文献中的温控试验方法和试验数据, 探究温度对土体的力学性质影响, 从而针对地热资源开发过程中可能出现的力学问题和地质灾害, 事先提出预警和解决方案, 则可以很大程度上增强工程师们开发地热资源的信心和成功概率, 从而逐步实现我国“双碳”目标。

2 温控三轴试验加热方法与变形机理

2.1 加热方法

早期, 研究者在进行室内温控三轴试验之前, 通常需要进行一系列的校订试验^[38,39], 即在试样中心插入一个热电偶, 用于测定试样在加热过程中的温度, 同时记录该试样达到该目标温度所经历的时间。在之后的室内温控三轴试验中, 直接对试样加热该记录的时间, 则认为该试样温度达到目标值。这种测量方法, 对于不同的加热速率、排水条件、土体类型等, 试样加热至目标值的时间有所不同, 因此, 在试验之前, 需要进行大量的校订试验, 试验效率大大降低。此外, 利用加热时间来等效换算温度的方法也不太合理, 因为土体从0℃加热至25℃, 假如需要35 min, 但从25℃加热至50℃, 虽然温度变化量相同, 都是加热25℃, 但需要的时间不一定为35 min, 可能大于, 也可能小于。

随着温控技术的进步, 通过大量的校订试验发现, 对于小尺寸的试样, 当试样外壁水中的温度达到目标值, 且稳定一段时间后, 试样内部的温度也同样达到该目标值且保持稳定。因此, 对于类似于常规三轴试样尺寸的室内温控试验而言, 研究者们常常直接将稳定后试样外壁水中热电偶测得的温度作为试样的实际

温度。该方法不需要校订试验, 试验效率大大提高, 且试验数据可靠, 能够满足温控试验要求, 逐渐成为目前室内温控试验的主流方向^[40~42]。但随着试验要求的不断提高, 考虑尺度效应, 室内温控试验中的试样尺寸越来越大, 就三轴试样而言, 从最开始的39.1 mm×80 mm^[43], 到后面的50 mm×100 mm^[44~46], 再到61.8 mm×125 mm。随着尺寸的增大, 当试样外壁水中温度达到目标温度且保持稳定时, 试样内部的实际温度未必达到目标温度, 在试样外壁和内部之间容易形成温度梯度, 试样内部温度是低于外壁测量温度的, 试样的温度分布不均匀, 从而影响温控试验结果的准确性, 造成不可忽略的误差。

为了避免这种误差, 也有研究者提出, 可以将室内温控试验中的实心圆柱形试样, 特别是较大尺寸的实心试样, 将试样内部挖空, 形成空心圆柱形试样, 并在空心试样内壁和外壁水中均布置热电偶。在进行室内温控试验时, 分别测量试样内壁和外壁的温度, 当两侧温度相等时, 表明该试样的内部温度相同, 整个试样的温度分布均匀。虽然空心圆柱形试样通常用于更为复杂的应力环境, 但从几何形状上来说, 空心圆柱形试样, 可以在其内壁和外壁同时进行加热或温度循环, 并使两侧温度相等, 因此, 试样能够达到更为均匀的温度环境, 测得的温度更能代表土体实际温度, 从而提高试验研究的精度^[47~49]。

2.2 热变形计算机理

进行室内温控三轴试验时, 在加热过程中, 随着温度的增加, 试样内部的温度也随之增加, 紧挨着试样的配件, 如透水石、传力杆、排水管等, 其温度也随之增加, 因此, 在加热过程中也会发生相应的膨胀或压缩变形, 从而影响试样实际热变形的测定^[50]。因此, 在进行室内温控三轴试验之前, 需利用同尺寸的不锈钢试样, 开展一系列的温控循环试验, 分别测量不锈钢试样在加热和降温两个阶段, 其轴向和体积变形量, 并将经历温控循环后(加热和降温), 该变形量的不可逆部分作为温控试验系统的误差(如图1所示), 可由 ΔV_{de} 表示^[51]。此外, 在温控试验过程中, 试样内部的孔隙水和土体颗粒也会随着温度的变化发生一定的膨胀或压缩变形, 分别由 ΔV_w 和 ΔV_s 表示^[48]。由此可见, 在研究饱和和三轴试样实际发生的热变形时, 不仅需要考虑温控试验系统的误差(ΔV_{de}), 还要考虑三轴试样内部的误差

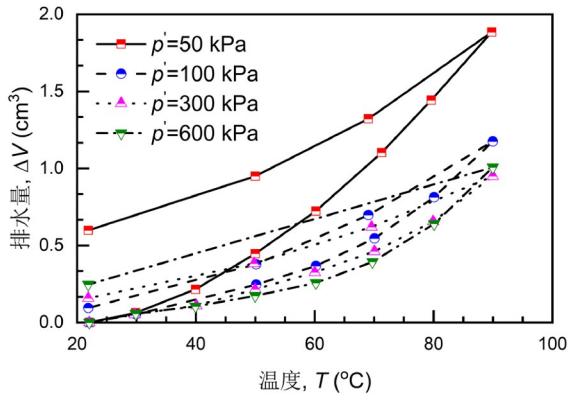


图 1 (网络版彩图) 温度循环过程中整个排水系统的体积变形^[51]. Copyright©2005, ASTM

Figure 1 (Color online) Volume change of the whole drainage system during the heating and cooling cycle^[51]. Copyright©2005, ASTM.

(ΔV_w 和 ΔV_s).

因此, 随着温度的变化, 饱和试样产生的体积变形量为整个系统的排水量减去试验系统的热变形量, 同时减去试样内部的热变形量, 具体可表示为^[48]

$$\Delta V = \Delta V_{dr} - \Delta V_{de} - \Delta V_w - \Delta V_s, \quad (1)$$

式中, ΔV 为试样的实际热体积变形量; ΔV_{dr} 为温度变化过程中, 整个系统的排水量, 可由反压体积控制器直接测量得到; ΔV_{de} 为温控试验系统误差; ΔV_w 和 ΔV_s 分别为试样内部孔隙水和土体颗粒的热变形量, 即试样内部误差.

在排水加热过程中, 饱和三轴试样的实际体积热应变为^[47]

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_c} \times 100\%, \quad (2)$$

式中, ε_v 为试样由温度变化引起的实际体积热应变; V_c 为试样加热前的初始体积, 即试样进行力学固结后的体积.

3 温控试验类型研究

3.1 温控一维固结试验

在常规杠杆式或磅秤式固结仪的压力盒与环刀之间设置环形加热管和热电偶, 通过水浴控制干燥或饱和状态下的试样温度, 并记录温控过程中, 该试样的竖向变形, 从而研究试样的固结特性随温度的变化规律.

Kosar^[52]对于疏松和密实两种状态下的干燥石英

砂, 开展轴向应力为 50 kPa, 且轴向应力保持不变时, 温度从 20°C 加热至 200°C 的温控固结试验. 研究发现, 当温度为 20°C~50°C 时, 两种密实状态下的石英砂的热体积压缩变形分别为 0.06% 和 0.4%, 均表现出体积压缩现象. 当温度高于 50°C 时, 两种密实状态下的石英砂均表现出热膨胀现象. 在该温控固结试验中, 环刀为不锈钢材料, 其热膨胀系数大约是石英砂热膨胀系数的 1.6 倍^[53]. 因此, 在加热过程中, 环刀的热体积变形远大于石英砂的热体积变形, 环刀对试样的约束作用减少, 环刀和石英砂之间将产生应力重分布现象, 从而导致测量得到的体积变形不能真实地反映石英砂的热变形特性. Abuel-Naga 等人^[40]发现饱和黏土的轴向变形随温度的增加而线性增加, 随轴向应力的增加而减少(如图 2(a) 所示), 环刀的热膨胀变形随温度的增加呈线性增加的趋势, 且斜率大致为不锈钢的热膨胀系数(如图 2(b) 所示).

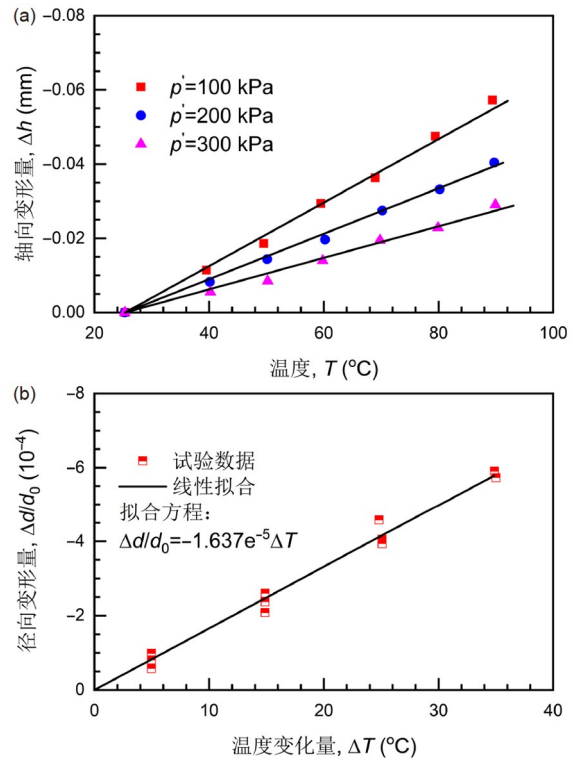


图 2 (网络版彩图) 固结温控试验中饱和土体的热变形量^[40]. Copyright©2006, ASCE. (a) 轴向变形量; (b) 环刀径向变形量

Figure 2 (Color online) Thermal deformation of saturated soil in the temperature-controlled oedometer test^[40]. Copyright©2006, ASCE. (a) Thermal vertical dilatation; (b) thermal diametrical expansion of oedometer ring.

3.2 温控直剪试验

利用常规应变控制式四联直剪仪进行直剪试验时, 由于透水石的水平刚度、表面粗糙度与实际工程中的混凝土桩相近, 因此, 透水石常用于模拟桩-土接触面. 通过对该直剪试验系统进行加热或温度循环, 可以研究在不同温度作用下, 不同饱和土体与桩基之间接触面的热力学特性. 温控方式主要有以下两种: (1) 水浴法^[54]. 制样并在一定压力下固结完成后, 在剪切盒外侧注水, 使上下两个剪切盒均静置于水中, 随后, 使用加热仪按一定速率对水进行加热, 同时使用温度传感器测量水浴中的温度, 以水浴温度代替透水石(接触面)和土体的实际温度. (2) 恒温箱法^[55]. 试验前, 将整个仪器放置于恒温箱中, 并设置恒温箱的初始温度; 随后, 在恒温箱中制样、饱和、固结后, 压力保持不变, 开启恒温箱的控温功能, 将温度设为目标温度, 并保持一定时间不变(时间长短与土样类型有关), 确保透水石(接触面)和土样实际温度均达到目标值; 最后, 温度保持不变, 在排水条件下, 在不同法向应力作用下, 对试样进行剪切, 直至发生破坏为止.

李春红等人^[54]针对南京河西地区的黏土、粉土和砂土, 采用水浴的加热方法, 通过开展能源桩-黏土、能源桩-粉土和能源桩-砂土的温控直剪试验, 研究桩-土接触面的摩擦特性. 研究发现, 不同含水率的黏土、粉土和砂土的抗剪强度变化较大, 但桩-土(黏土、粉土和砂土)接触面的抗剪强度随含水率的增加而变化较小, 随桩体温度的增加而有小幅度的减少. 李春红等人^[55]针对重庆地区红黏土, 采用恒温箱的加热方法, 开展桩-红黏土接触面的温控直剪试验, 发现接触面的剪切强度小于土体剪切强度, 法向应力越大, 差值越明显, 温度越高, 土体剪切强度越大, 内摩擦角随之增加, 而黏聚力则随之减少.

3.3 常规温控静三轴试验

实心三轴试样制备安装后, 经过二氧化碳、无气水和反压饱和几种方法, 三轴试样的 B 值大于98%, 达到饱和状态. 随后, 在排水条件下, 施加一定的围压, 试样进行力学固结. 然后, 围压保持不变, 打开温度控制系统, 以一定速率添加目标温度, 试样进行热固结过程. 最后, 温度保持不变, 在排水或不排水条件下, 试样进行剪切过程, 直至试样发生剪切破坏为止

止^[56-58].

Demar和Charles^[38]通过饱和海砂的常规温控三轴压缩试验, 发现温度循环后, 饱和海砂的永久体积变形与有效应力无关, 并且经过温度循环后(温度增加和降低两个过程), 砂土未发现可监测的热体积变形. 其原因主要为: (1) 由于当时试验仪器和技术的限制, 在加热和降温过程中, 当温度达到稳定状态时, 热电偶测量得到的温度实测值与目标温度值之间仍然存在很大的误差($\pm 2^\circ\text{C}$); (2) 加热速率非常快, 高达 $0.7^\circ\text{C}/\text{min}$, 但由于砂土本身对温度不够敏感, 当加热速率过快时, 饱和砂土可能还来不及发生反应(体积变形), 温控过程就已经结束了.

Ng等人^[50]针对疏松($D_r=20\%$)、中密($D_r=70\%$)和密实($D_r=90\%$)三种密实状态下的饱和砂土(Toyoura sand)^[59,60], 开展了50和200 kPa两种应力状态下的温控三轴试验. 研究发现, 在排水加热条件下, 当温度从 23°C 增加至 35°C 时, 疏松($D_r=20\%$)和中等密实($D_r=70\%$)饱和砂土呈压缩状态, 体积变形分别为0.15%和0.05%. 当温度从 35°C 增至 50°C 时, 松砂、中等密实饱和砂土均呈现热膨胀现象, 体积变形约为 -0.05% . 对于密实饱和砂土($D_r=90\%$), 当温度从 23°C 增加至 50°C 时, 饱和砂土仅呈现热膨胀现象, 体积热膨胀变形约为 -0.1% (如图3(a)所示). 此外, 对于松砂($D_r=20\%$), 在整个加热过程中($23^\circ\text{C}\sim 50^\circ\text{C}$), 当有效应力为50 kPa时, 试样呈热膨胀现象, 且体积变形为 -0.02% , 但当有效应力为200 kPa时, 该试样呈热压缩现象, 且体积变形为0.1%(如图3(b)所示). 这表明, 饱和砂土试样的热体积变形除了与相对密实度和温度有关之外, 还和有效应力大小有关.

3.4 温控动三轴试验

常规动三轴, 即对于饱和土体的温控动三轴试验步骤包括力学固结、热固结和剪切三个过程. 前面两个试验过程(力学固结和热固结)与常规温控静三轴试验一样, 不同的是第三个剪切过程. 饱和三轴试样热固结过后, 温度保持不变, 在排水条件下, 增加轴向应力, 从而设置循环荷载的初始偏应力, 随后, 设置频率、振幅、循环次数等参数, 关闭排水阀门, 进行循环加卸载剪切过程. 对于非饱和土体的温控动三轴试验, 则在常规动三轴(饱和土体)温控试验过程中, 在力学固结之后, 热固结之前, 增加一个设置基质吸力过程^[61,62].

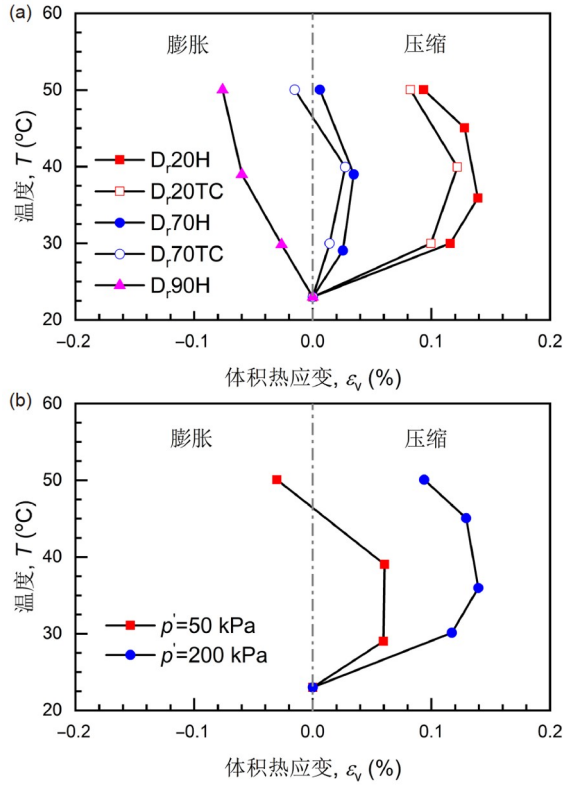


图 3 (网络版彩图)常规静三轴温控试验中饱和砂土的体积热应变^[50]. Copyright©2016, ICE Publishing. (a) $p' = 200$ kPa; (b) $D_r = 20\%$

Figure 3 (Color online) Thermal volumetric strains of saturated sand during the temperature-controlled triaxial test^[50]. Copyright©2016, ICE Publishing. (a) $p' = 200$ kPa; (b) $D_r = 20\%$.

Hailemariam和Wuttke^[63]发现,随着循环次数的增加,饱和土体的轴向循环应变和累积塑性应变均有明显的增加,且大部分的累积塑性应变出现在前100次循环中,随着温度的增加,在每次循环过程中,有小部分的循环应变是可恢复的弹性变形。Zhou^[64]通过试验研究发现,当基质吸力一定时,土体的累积塑性变形随着温度的增加而增加,且加热温度为60℃时,循环过程中产生的累积塑性变形为常温(20℃)时的2倍。当温度保持不变时,土体的累积塑性应变随着基质吸力的增加而显著减少,且基质吸力为0 kPa时,循环过程中产生的累积塑性变形为基质吸力为60 kPa的4倍。当基质吸力和温度都保持不变时,土体的累积塑性变形随着循环偏应力的增加而增加。

3.5 温控空心扭剪三轴试验

在温控空心扭剪三轴试验中,饱和试样需经历力

学固结、热固结和剪切三个阶段,试验过程与常规温控静三轴试验类似,只是在整个试验过程中,三轴试样均采用空心圆柱形,即外径100 mm,内径60 mm,高200 mm。在整个试验过程中,虽然未用到空心圆柱试验仪实现扭剪、主应力旋转等复杂的应力路径,仍然进行常规静三轴试验类似的应力路径,主要是为了利用空心圆柱的几何形状。在温控试验过程中,在空心试样的内外两侧均布置温度传感器,加热时,始终使空心圆柱三轴试样内外两侧的监测温度和目标温度保持一致,从而保证试样内部温度更为均匀,不存在温度梯度的现象,使试验所得数据更为可靠。

Liu等人^[47~49]通过加工GCTS空心圆柱试验仪,对于密实饱和福建砂($D_r = 90\%$),开展了不同有效应力(50, 100和200 kPa)和温度(25℃, 35℃, 45℃和55℃)作用下的温控三轴剪切试验。研究发现,在排水加热过程中,饱和密实砂土的轴向变形和体积变形随着温度的增加而线性增加,且均为负值,整个饱和密实砂土发生各向同性的热膨胀现象。整个砂土试样的热膨胀系数与土体颗粒的热膨胀系数处于同一个量级,说明对于密实砂土而言,其体积变形主要由土体颗粒决定。密实状态下的饱和砂土试样,在温度作用下,其轴向和体积变形特性仅与温度大小有关,与有效应力水平无关^[48](如图4(a)所示)。

此外,在不排水剪切过程中,峰值状态下的偏应力随着有效应力的增加而增加,随着温度的增加而线性减少。峰值状态下的孔隙水压力变化情况可由下列式子表示:

$$\Delta u = \frac{\Delta q}{3[1 + n(m_w/m_s)]}, \quad (3)$$

式中, Δu 为不排水剪切过程中产生的孔隙水压力变化量, Δq 为偏应力变化量, n 为孔隙率, m_w 和 m_s 分别为三轴试样内部孔隙水和土体颗粒的体积压缩系数。

对于密实状态下的饱和砂土而言,尤其是相对密度高达90%,经历热固结过程后,试样的孔隙比变化较小,对应的孔隙率 n 可认为随着温度不发生相应变化。在大气压作用下,水的体积模量随着温度的增加而增加^[65],相应的体积压缩系数 m_w 随着温度的增加而呈减少的趋势。土体颗粒的体积压缩系数 m_s 与温度无关,不随温度变化而发生相应变化^[66]。

从式(3)可以看出,随着温度的增加,峰值偏应力

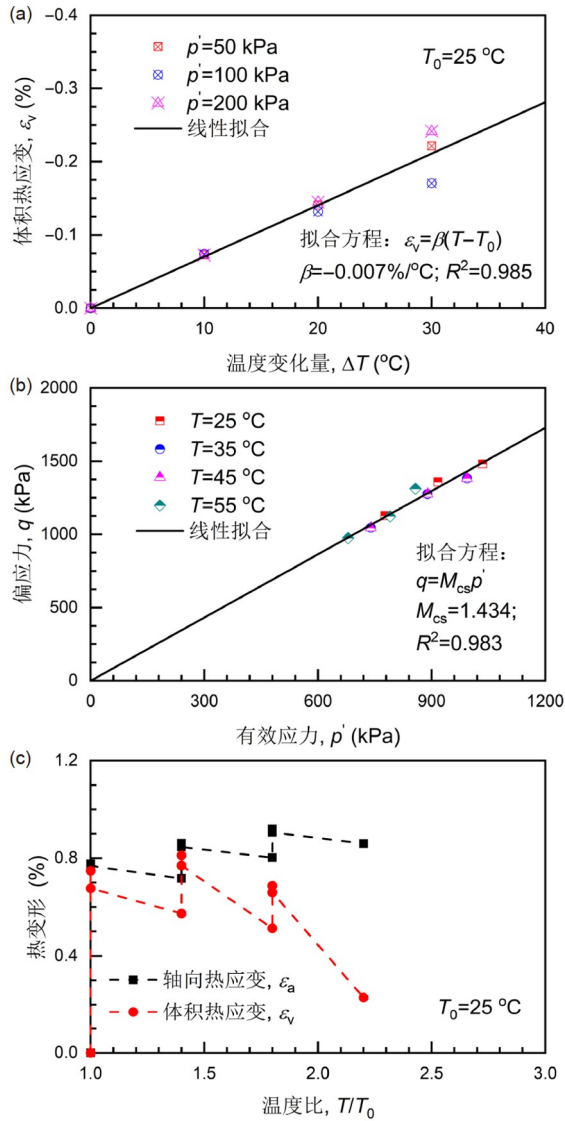


图4 (网络版彩图)常规空心扭剪温控试验中饱和砂土的应力变形特性。(a) 热固结过程中试样的体积热应变^[48], Copyright©2018, ASTM。(b) 不排水剪切过程中试样在 p' - q 平面内的临界状态线^[47], Copyright©2018, Elsevier。(c) 加卸载过程中试样的热变形^[49], Copyright©2020, EDP Sciences

Figure 4 (Color online) Stress and strain behaviors of saturated sand during the temperature-controlled hollow triaxial test. (a) Thermal volumetric strain of specimen during heating ^[48]; Copyright©2018, ASTM. (b) Critical state line of specimen in p' - q plane during undrained shearing ^[47]; Copyright©2018, Elsevier. (c) Thermal deformation of specimen during the loading-unloading-heating phase ^[49]. Copyright©2020, EDP Sciences.

Δq 增加, 孔隙率 n 不变, 水的体积压缩系数 m_w 减少, 土体颗粒的体积压缩系数 m_s 不变, 因此, 峰值状态下的孔隙水压力随着温度的增加呈增加的趋势。另外, 随着温度的增加, 在 p' - q 平面(如图4(b)所示)和 e - $(p'/p_a)^{0.5}$ 平面

内的临界状态线(CSL)未发现明显的变化^[47]。

Liu等人^[49]针对疏松状态下的饱和福建砂($D_r = 10\%$), 开展了一系列力学加卸载和排水加热的温控三轴压缩试验, 研究加卸载过程和温度对饱和砂土的体积变形的影响。研究发现, 在力学卸载和排水加热过程中, 饱和砂土均呈现膨胀现象, 在力学加载过程中, 饱和砂土呈现压缩现象。由于力学卸载和排水加热过程中的膨胀体积变形小于力学加载过程中的压缩体积变形, 因此, 饱和砂土整体上呈现压缩现象(如图4(c)所示)。

3.6 温控真三轴试验

对于室内温控试验, 目前常用的还是常规三轴试验, 也就是假三轴试验, 即 $\sigma_2 = \sigma_3$, 研究岩土体在各向同性条件下的热力学特性^[66]。但在实际工程中, 由于土体构造的不均匀性, 使得土体具有各向异性, 每个方向的受力不同, 即 $\sigma_2 \neq \sigma_3$, 一种研究土体各向异性非常有效的方法便是开展真三轴试验^[67-69]。不少研究者也证实, 真三轴试验所获得的同一岩土体的强度指标通常大于常规三轴试验所得到的结果。

制样、安装并饱和后, 在排水条件下, 先施加小主应力 σ_3 , 使试样处于三向相等的应力状态, 此时 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, 随后, 小主应力 σ_3 保持不变, 依次施加中主应力 σ_2 和大主应力 σ_1 , 在此过程中, 中主应力比 $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 始终保持不变。待试样固结完成后, 再增加温度, 进行热固结阶段。最后, 温度保持不变, 在排水或不排水条件下, 在应力或应变控制作用下, 进行剪切阶段, 直至试样发生剪切破坏为止。

潘旋^[70]发现, 当温度为 $-5^\circ\text{C} \sim -15^\circ\text{C}$ 时, 钙质黏土的应变呈硬化现象, 且随着温度的降低, 硬化现象愈加明显, 土体的强度增加。Shanina^[71]针对不同饱和度的粉土, 开展最小主应力与最大主应力比值($K = \sigma_3 / \sigma_1$)分别为1.0, 0.7和0.5温控真三轴试验。通过试验数据发现, 不同 K 值的粉土所产生的热轴向应变均为正值, 试样轴向发生体积压缩变形。随着应力比值 K 的减少, 大主应力方向(z)的热轴向应变呈增加的趋势, 但在小主应力方向(x 和 y)上的热轴向应变则呈现减少的趋势。对于各向同性试样而言($K = 1.0$), 在 x, y, z 三个方向产生的热轴向应变相差不大, 但对于各向异性试样而言, 特别是 $K = 0.5$ 时, z 方向发生明显的热轴向变形, 而 x 和 y 方向由温度变化而产生的热轴向应变较小, 可忽略不计。

4 影响因素研究

在温控过程中, 由于土体内部孔隙水和土体颗粒之间的热膨胀系数不同, 且孔隙水的热膨胀系数大于土体颗粒的热膨胀系数. 因此, 在排水条件下, 将导致孔隙水被排出, 试样发生体积变形. 在不排水条件下, 将导致超孔隙水压力发生. 温控结束, 紧接着进行的排水或不排水条件下的剪切过程, 试样的强度又将发生变化. 大量试验研究表明, 加热速率^[72,73]、饱和度^[74~79]、应力历史^[80,81]、排水条件^[82,83]、各向异性^[84~87]等因素将会显著影响土体的热力学性质, 即变形和强度两大特性的宏观响应.

4.1 加热速率

当排水阀门关闭时, 即不排水条件下, 饱和土体进行加热过程, 饱和土体中的颗粒和孔隙水将随着温度的增加而产生膨胀现象, 且膨胀速率和加热速率一致. 同时, 由于土体颗粒和孔隙水的热膨胀系数不一致, 且孔隙水的热膨胀系数远大于土体颗粒的热膨胀系数, 所以孔隙水的热膨胀体积将大于土体颗粒的热膨胀体积, 在排水阀门关闭的情况下, 饱和土体内部将产生超孔隙水压力^[73]. 当开启排水阀门时, 该超孔隙水压力消散, 孔隙水被排出, 饱和土体逐渐发生热固结现象. 该超孔隙水压力的消散, 即热固结过程, 和加热速率有关(如图5所示).

Vega等人^[72]发现, 当加热速率较慢时, 超孔隙水压力将按一定的速率进行消散, 即孔隙水被排出, 饱和土

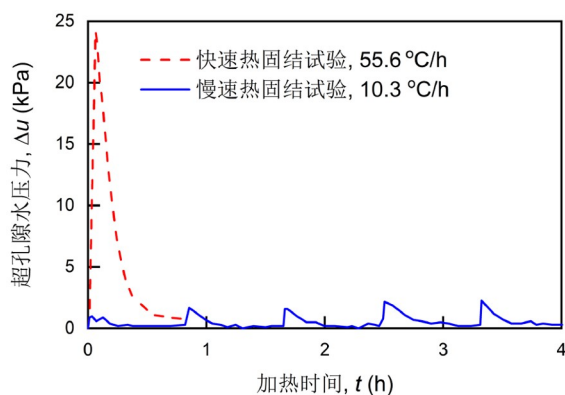


图5 (网络版彩图)不同加热速率下饱和试样的超孔隙水压力特性^[73]. Copyright©2013, ProQuest LLC

Figure 5 (Color online) Pore water pressure of saturated specimen at different heating rates^[73]. Copyright©2013, ProQuest LLC.

体的体积减小, 发生热固结作用. 当加热速率较快时, 土体颗粒和孔隙水的热膨胀过程将快于超孔隙水压力的消散过程, 在排水条件下, 饱和土体内仍然会形成瞬时的超孔隙水压力, 随后才会发生热固结过程. 虽然在两种加热速率(快和慢)作用下, 饱和土体均会产生热固结过程, 土体都将在温度的作用下产生体积变形, 但由于快加热速率情况下, 瞬时超孔隙水压力的出现, 将使热固结过程中的体积变形大于慢加热速率情况下产生的热体积变形. 因此, 为了避免试验过程中, 出现瞬时超孔隙水压力, 影响饱和土体热固结过程中的体积变形, 研究者们通常选择较慢的加热速率进行温控试验研究^[44].

4.2 饱和程度

通过非饱和土体的温控试验, 不少研究者发现, 当温度保持不变时, 随着吸力的增加, 土体的正常固结线(NCL)上移至较高有效应力处; 当吸力保持不变时, 随着温度的增加, 土体的NCL下移至较低有效应力处. 此外, 压缩曲线和回弹曲线的斜率均与吸力和温度无关^[77~79](如图6所示).

非饱和土体的压缩性和导热系数与含水率、基质吸力和温度有关^[87~89]. 随含水率的增加, 非饱和土体颗粒表面形成一层水膜, 颗粒之间的有效接触面积增加, 导热性能增加. 当基质吸力小于进气值时, 土体基本上处于饱和状态, 导热系数无明显变化; 当基质吸力大于土体的进气值时, 土体中同时由颗粒、孔隙水和气体三相组成, 随着基质吸力的增加, 气体逐渐进入土体, 且分布连续, 土颗粒表面的水化膜不连续, 有效接触面积减少, 从而导热系数减少, 随着基质吸力的不断增加, 水化膜减少直至消失, 因此, 导热系数进一步减少直至趋于稳定. 随着温度的增加, 非饱和土体的导热系数呈线性增加, 但增加的幅度较小, 可忽略不计.

4.3 应力历史

为了使温控试验结果更接近于实际工程, 不少研究者针对不同种类的土体, 制样并饱和完成后, 先在排水条件下加载至一定应力值, 即力学加载; 随后, 卸载至某一应力值, 即力学卸载, 从而饱和土体形成一定的超固结比(OCR), 用来模拟实际工程中具有不同应力历史的土体; 然后, 在排水条件下加热至目标值, 即

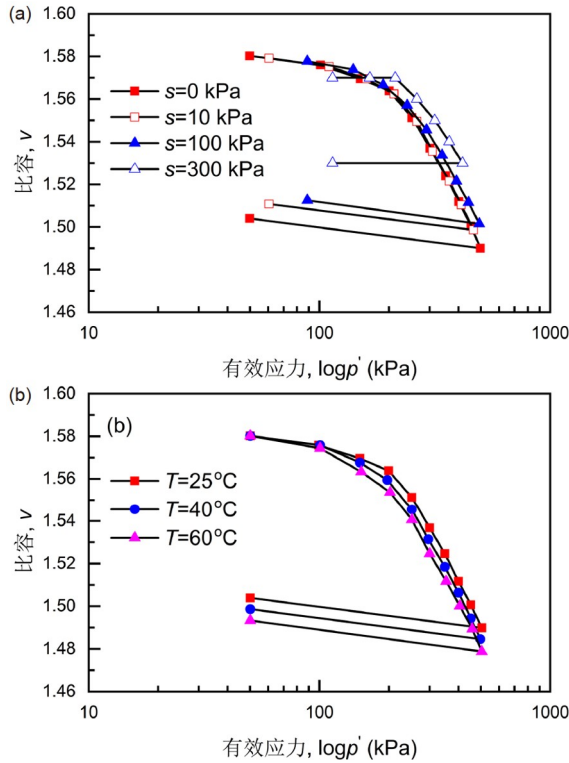


图6 (网络版彩图)非饱和岩土体的NCL随吸力和温度的变化特性^[79]. Copyright©2009, ICE Publishing. (a) $T=25^{\circ}\text{C}$; (b) $s=0\text{ kPa}$

Figure 6 (Color online) NCL for unsaturated soil under different suction and temperature states ^[79]. Copyright©2009, ICE Publishing. (a) $T=25^{\circ}\text{C}$; (b) $s=0\text{ kPa}$.

热固结; 最后, 温度保持不变, 进行剪切过程, 直至试样发生剪切破坏为止. 对于正常固结土体($\text{OCR}=1$)而言, 没有力学卸载过程, 随着温度的增加, 土体呈现体积压缩现象. 对于轻微超固结土体($\text{OCR}=1.5$ 或 $\text{OCR}=2$)而言, 即力学卸载至较高应力值, 力学加卸载结束后的应力值差距不大, 土体的体积变形类似于正常固结土($\text{OCR}=1$), 仍呈现体积压缩现象, 但其热体积压缩变形量将低于正常固结土体. 对于严重超固结土体($\text{OCR}=12$)而言, 即力学卸载至较低应力值, 力学加卸载结束后的应力值差距较大, 随着温度的增加, 土体呈现热膨胀现象^[44](如图7所示). 因此, 可以说饱和土体的热体积变形与其应力历史有关, 即与超固结比有关, 并且随着超固结比的增加, 土体的热膨胀现象逐渐增加, 从正常固结状态下的热压缩变形逐渐向热膨胀变形过渡^[90].

先期固结应力, 即区分屈服前弹性变形和屈服后

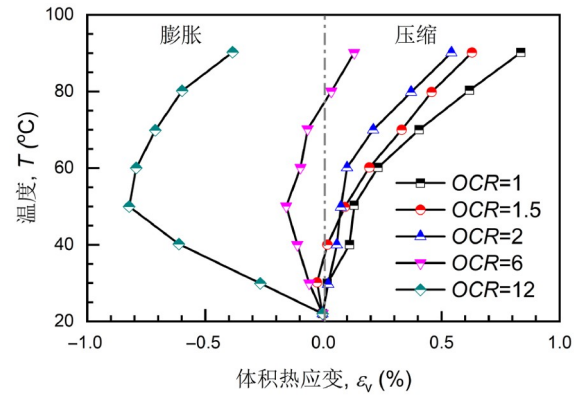


图7 (网络版彩图)饱和土体的体积热变形随超固结比的变化特性^[44]. Copyright©2004, John Wiley & Sons, Ltd.

Figure 7 (Color online) Thermal volumetric strains of saturated soil undergoing different stress histories ^[44]. Copyright©2004, John Wiley & Sons, Ltd.

塑性变形的伪弹性极限, 常用压缩曲线上两段线性部分的交点应力来表示, 也与温度有关, 并且随着温度的增加而呈对数^[91]或指数^[92,93]形式减少. 不同温度作用下, 饱和岩土体的NCL的斜率不变, 但随着温度的增加, 土体呈现出更高的压缩性, 孔隙比降低, 整个NCL下移.

4.4 排水条件

常规室内温控试验主要包括力学加载、加热和剪切三个过程, 其中力学加载在排水条件下进行, 即力学固结过程, 加热和剪切两个过程可在排水和不排水两种条件下进行. 在不排水条件下, 进行加热过程, 由于试样内部土体颗粒和孔隙水的热膨胀系数不同, 将产生超孔隙水压力^[79], 且随着温度的增加而增加, 从而导致土体的有效应力和弹性膨胀减少^[40]. 在排水条件下, 进行加热过程, 由于排水阀门已开, 孔隙水将排出, 试样发生体积变形, 且随着超固结比的增加, 逐渐从热压缩过渡成热膨胀变形^[94]. 对于饱和砂土而言, 排水加热过程中, 产生的体积变形与其密实度有关, 且随着密实度的增加, 体积变形逐渐从热压缩转变成热膨胀^[50].

在不排水条件下, 进行剪切过程, 土体的峰值剪切强度随着有效应力的增加而增加, 随着温度的增加而减少. 在不排水剪切过程中, 形成的孔隙水压力随着温度的增加而增加^[83]. 此外, 不排水剪切过程中的强度, 除了与有效应力和温度有关外, 还与加热过程中

的排水条件有关. 由于不排水加热过程中, 土体内部形成超孔隙水压力, 因此, 紧接着的不排水剪切过程中形成的强度(UU)将低于排水加热后的不排水剪切强度值. 在排水条件下, 进行剪切过程(DD), 随着有效应力的增加, 土体在峰值状态下的剪切强度也随之增加. 随着温度的增加, 土体的剪切强度和初始剪切模量均增加. 此外, 在剪切过程中, 不管排水阀门是开启还是关闭, 土体的有效摩擦角^[95]、压缩系数(C_c 和 C_s)^[47]、临界状态线^[44]等性质与温度无关, 并不随着温度的变化而发生相应变化.

4.5 各向异性

土体由于其颗粒形状不规则、排列方式不统一等特性, 导致其结构形式、构造分布在长期的沉积过程中不均匀、不一致, 从而引起其力学性质各向异性, 即原生各向异性^[96-100]. 土体在沉积过程中, 由于外力的作用, 结合本身结构的不均匀性, 导致土体竖向和水平向的应力不同, 颗粒组构发生改变, 从而引起其力学性质各向异性, 即应力诱导各向异性^[101-103]. 在室内试验中, 常用原状土体分析原生各向异性特征, 常用重塑土体, 通过施加不同的径向、环向和轴向应力, 或主应力旋转等方式, 研究应力诱导各向异性特征.

在排水加热或温度循环过程中, 不同 K 值的饱和土体均产生热压缩体积变形, 该体积变形包含弹性和塑性两个部分. 其中, 就热压缩体积应变塑性部分而言, 各向同性土体($K=1.0$)约等于各向异性土体($K=0.9/0.7/0.5$)的2倍. 当温度为 65°C 时, 随着 K 值的减少, 土体的总体积变形(压缩)也减少, 但减少的数值较小^[104].

5 结论

本文系统总结了近年来土体热力学性质的试验研究进展, 着重介绍了温控试验的加热机理、试验过程和影响因素等, 以促进对土体温控试验领域更全面深入的了解.

通过大量的温控试验可知, 黏性土的体积变形和抗剪强度与温度大小和应力历史(OCR)有关. 当OCR一定时, 黏性土的体积变形和抗剪强度均随着温度的增加呈增加的趋势, 但当轴向应变处于大应变, 试样位于临界状态时, 试样的抗剪强度与温度大小无关; 当温度一定时, 随着OCR的增加, 黏性土的体积变形

逐渐从压缩变形转变为膨胀变形, 抗剪强度逐渐降低, 试样逐渐由剪缩转变为剪胀. 该类土体热力学性质, 可通过加热, 使土体颗粒之间的排水通道变大, 排水量增加, 从而加速固结过程, 同时, 可通过升高温度来提升软土强度, 因此, 可用于软土地基真空预压排水固结等实际工程中.

类似地, 无黏性土的体积变形与温度大小和相对密实度有关, 当相对密实度一定时, 无黏性土的体积变形随着温度的增加而增加, 抗剪强度随着温度的增加而减少; 当温度一定时, 随着相对密实度的增加, 无黏性土的体积变形逐渐从压缩变形过渡成膨胀变形. 该类土体热力学性质, 阐述了跨越寒区和酷暑区的高速公路的路基路面结构的竖向变形、体积变形以及剪切强度等特性随温度的变化规律, 为该类高速公路的设计与施工提供了有力的依据.

尽管近年来国内外学者针对土体的热力学特性进行了大量研究, 并取得了一些研究成果, 但仍存在一些难题, 就土体的热力学机理而言, 笔者认为以下几个方面是未来进行试验研究的重要趋势.

(1) 就土质而言, 目前温控试验的研究重点还是黏土、粉土、砂土等单一土体的热力学性质, 而对于实际工程中较为常见的粉质黏土、粉砂、黏土-膨润土等几种不同单一土体的组合, 其热力学机理方面的研究相对较少, 导致室内温控试验研究结果与实际工程中的监测数据差异较大. 因此, 在今后的土体温控试验方面, 建议针对不同单一土体的混合物进行, 着重研究不同配合比、各向异性、考虑中主应力、主应力旋转等复杂应力路径下的温控试验, 充分认识土体的热力学机理.

(2) 目前已开展的温控试验主要还是室内的静、动、扭剪等温控三轴试验, 研究土体自身的热力学性质, 以及利用温控直剪试验研究能源结构物与土体的接触面性质. 但对于同时具有能源结构物和土体的模型试验研究较少, 特别是足尺的现场热响应试验研究就更少. 因此, 在今后的试验研究方面, 由室内的温控试验研究土体的热力学机理, 由缩尺的模型试验分别研究能源结构物和土体的热力学性质, 以及能源结构物和土体之间的相互作用, 同时与足尺的现场热响应试验监测结果进行对比分析, 找出差距及其原因, 并将相关结论更好地应用于实际能源工程的设计与施工中.

参考文献

- 1 Yu G R, Hao T X, Zhu J X. Discussion on action strategies of China's carbon peak and carbon neutrality (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2022, 37: 423–434 [于贵瑞, 郝天象, 朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨. 中国科学院院刊, 2022, 37: 423–434]
- 2 Li Z, Zhang D J, Pan L Y, et al. Low-carbon transition of China's energy sector and suggestions with the "Carbon-Peak and Carbon-Neutrality" target (in Chinese). *J Chin Soc Power Eng*, 2021, 41: 905–971 [李政, 张东杰, 潘玲颖, 等. “双碳”目标下我国能源低碳转型路径及建议. 动力工程学报, 2021, 41: 905–971]
- 3 Liu Y H, Li Y H, Wang W T. Challenges, opportunities and actions for China to achieve the targets of carbon peak and carbon neutrality (in Chinese). *China Popul Resour Environ*, 2021, 31: 1–5 [刘燕华, 李宇航, 王文涛. 中国实现“双碳”目标的挑战、机遇与行动. 中国人口·资源与环境, 2021, 31: 1–5]
- 4 Zhu H X, Wang Y, Ru J, et al. Thoughts on regional path of promoting comprehensive demonstration of low-carbon energy technology under “dual carbon” goals (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2022, 37: 559–566 [朱汉雄, 王一, 茹加, 等. “双碳”目标下推动能源技术区域综合示范的路径思考. 中国科学院院刊, 2022, 37: 559–566]
- 5 Cai M F, Duo J, Chen X S, et al. Development strategy for co-mining of the deep mineral and geothermal resources (in Chinese). *Chin J Eng*, 2021, 23: 43–51 [蔡美峰, 多吉, 陈湘生, 等. 深部矿产和地热资源共采战略研究. 中国工程科学, 2021, 23: 43–51]
- 6 Liu R C, Ren Z L, Ye H Q, et al. Potential evaluation of geothermal resources: Exemplifying some municipalities and key strata in Ordos Basin as a study case (in Chinese). *Geol Bull China*, 2021, 40: 565–576 [刘润川, 任战利, 叶汉青, 等. 地热资源潜力评价——以鄂尔多斯盆地部分地级市和重点层位为例. 地质通报, 2021, 40: 565–576]
- 7 Zhou Z Y, Liu S L, Liu J X. Study on the characteristics and development strategies of geothermal resources in China (in Chinese). *J Nat Resour*, 2015, 30: 1210–1221 [周总瑛, 刘世良, 刘金侠. 中国地热资源特点与发展对策. 自然资源学报, 2015, 30: 1210–1221]
- 8 National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Land and Resources. The 13th five-year plan for geothermal energy development and utilization (in Chinese). Beijing, 2017 [国家发展和改革委员会, 国家能源局, 国土资源部. 地热能开发利用“十三五”规划. 北京, 2017]
- 9 Jia Y Y, Chang Q, Wang Y W, et al. Geothermal energy development amid carbon peak and neutrality in China (in Chinese). *Green Petrol Petrochem*, 2021, 6: 5–9 [贾艳雨, 常青, 王俞文, 等. 我国地热能开发利用现状及双碳背景下的发展趋势. 石油石化绿色低碳, 2021, 6: 5–9]
- 10 Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation. Cambridge, USA: Cambridge, 2012
- 11 Ma B, Jia L X, Yu Y, et al. The development and utilization of geothermal energy in the world (in Chinese). *Geol China*, 2021, 48: 1734–1747 [马冰, 贾凌霄, 于洋, 等. 世界地热能开发利用现状与展望. 中国地质, 2021, 48: 1734–1747]
- 12 Pang Z H, Hu S B, Wang J Y. A roadmap to geothermal energy development in China (in Chinese). *Sci Tech Rev*, 2012, 30: 18–24 [庞忠和, 胡圣标, 汪集旻. 中国地热能发展路线图. 科技导报, 2012, 30: 18–24]
- 13 Wang W Z, Shao D Y, Chen X K, et al. Development and utilization of the shallow and middle-deep geothermal energy in China (in Chinese). *Hydropower New Energy*, 2022, 36: 21–25 [王文中, 邵东云, 程新科, 等. 中国浅层和中深层地热能的开发和利用. 水电与新能源, 2022, 36: 21–25]
- 14 Fang Y, Zhang W Y, Cao J W, et al. Analysis on the current situation and development trend of energy resources in China (in Chinese). *Conservat Utilization Mineral Resour*, 2018, 4: 34–47 [方圆, 张万益, 曹佳文, 等. 我国能源资源现状与发展趋势. 矿产保护与利用, 2018, 4: 34–47]
- 15 Xu Q H, Gong Y L, Luo C, et al. Research progress on hybrid solar-geothermal power generation (in Chinese). *Adv New Renew Energy*, 2016, 4: 404–410 [徐琼辉, 龚宇烈, 骆超, 等. 太阳能-地热能联合发电系统研究进展. 新能源进展, 2016, 4: 404–410]
- 16 Zhou Z Z. Engineering technology of geothermal power generation (in Chinese). *J Power Eng*, 2009, 29: 1160–1174 [周支柱. 地热能发电的工程技术. 动力工程, 2009, 29: 1160–1174]
- 17 Yoon S, Lee G J, Go G H. Linear thermal expansion behavior of compacted bentonite buffer materials. *Case Studies Thermal Eng*, 2022, 32: 101889
- 18 Gens A, Sánchez M, Guimarães L D N, et al. A full-scale in situ heating test for high-level nuclear waste disposal: Observations, analysis and interpretation. *Géotechnique*, 2009, 59: 377–399

- 19 Qian Q H. Underground space utilization helps develop green buildings and green cities (in Chinese). *Tunnel Construct*, 2019, 39: 1737–1747 [钱七虎. 利用地下空间助力发展绿色建筑与绿色城市. *隧道建设*, 2019, 39: 1737–1747]
- 20 Liu N F, Li N, Yu C H, et al. Analysis of mechanical characteristics for high-temperature diversion tunnel of Bulunkou hydropower station (in Chinese). *Hydro-Sci Eng*, 2014, 4: 14–21 [刘乃飞, 李宁, 余春海, 等. 布仑口水电站高温引水发电隧洞受力特性研究. *水利水运工程学报*, 2014, 4: 14–21]
- 21 Zuo J P, Zhou H W, Fang Y, et al. Experimental research on fracture characteristics of double-notched Beishan granite under thermal-mechanical coupling effects (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2012, 31: 738–745 [左建平, 周宏伟, 方园, 等. 含双缺口北山花岗岩的热力耦合断裂特性试验研究. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31: 738–745]
- 22 Garrido C, Otero A F, Cidras J. Theoretical model to calculate steady-state and transient ampacity and temperature in buried cables. *IEEE Trans Power Deliver*, 2003, 18: 667–678
- 23 Ocloń P. The effect of soil thermal conductivity and cable ampacity on the thermal performance and material costs of underground transmission line. *Energy*, 2021, 231: 120803
- 24 Sun G, Chen Z, Liu Z. Analytical and experimental investigation of thermal expansion mechanism of steel cables. *J Mater Civ Eng*, 2011, 23: 1017–1027
- 25 Abdelaziz S, Ozudogru T Y. Non-uniform thermal strains and stresses in energy piles. *Environ Geotech*, 2016, 3: 237–252
- 26 Wang C, Liu H, Kong G, et al. Model tests of energy piles with and without a vertical load. *Environ Geotech*, 2016, 3: 203–213
- 27 Faizal M, Bouazza A, McCartney J S. Thermal resistance analysis of an energy pile and adjacent soil using radial temperature gradients. *Renew Energy*, 2022, 190: 1066–1077
- 28 Kertesz R, Sansalone J. Hydrologic transport of thermal energy from pavement. *J Environ Eng*, 2014, 140: 04014028
- 29 Croll J G A. The role of thermal ratcheting in pavement failures. *P I Civil Eng-Transp*, 2009, 162: 127–140
- 30 Hu Z, Zhu M, He W, et al. Experimental study and performance evaluation of a ground heat exchanger with different intermittent ratios and soil thermal properties. *Geothermics*, 2022, 102: 102402
- 31 Abuelnaga H, Bergado D, Chaiprakaikeow S. Innovative thermal technique for enhancing the performance of prefabricated vertical drain during the preloading process. *Geotext Geomembranes*, 2006, 24: 359–370
- 32 Pothiraksanon C, Bergado D T, Abuel-Naga H M. Full-scale embankment consolidation test using prefabricated vertical thermal drains. *Soils Found*, 2010, 50: 599–608
- 33 Coccia C J R, McCartney J S. Impact of heat exchange on the thermo-hydro-mechanical response of reinforced embankments. In: *Proceedings of Geocongress 2013*, ASCE, 2013. 343–352
- 34 Wang H, Zheng X, Zhang J L. Benefit analysis of integrated energy systems using geothermal energy-stored in buildings (in Chinese). *Build Energy Efficiency*, 2019, 47: 60–80 [王含, 郑新, 张金龙. 储能式地热能综合能源系统效益分析. *建筑节能*, 2019, 47: 60–80]
- 35 Bourne-Webb P, Burlon S, Javed S, et al. Analysis and design methods for energy geostructures. *Renew Sustain Energy Rev*, 2016, 65: 402–419
- 36 Brandl H. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 2006, 56: 81–122
- 37 Laloui L, Di Donna A. Understanding the behaviour of energy geo-structures. *P I Civil Eng-Civil Eng*, 2011, 164: 184–191
- 38 Demars K R, Charles R D. Soil volume changes induced by temperature cycling. *Can Geotech J*, 1982, 19: 188–194
- 39 Lingnau B E, Graham J, Yarechewski D, et al. Effects of temperature on strength and compressibility of sand-bentonite buffer. *Eng Geol*, 1996, 41: 103–115
- 40 Abuel-Naga H M, Bergado D T, Ramana G V, et al. Experimental evaluation of engineering behavior of soft bangkok clay under elevated temperature. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2006, 132: 902–910
- 41 Bai B, Guo L, Han S. Pore pressure and consolidation of saturated silty clay induced by progressively heating/cooling. *Mech Mater*, 2014, 75: 84–94
- 42 Soleimanbeigi A, Edil T B, Benson C H. Effect of temperature on geotechnical properties of recycled asphalt shingle mixtures. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2015, 141: 04014097
- 43 De Bruyn D, Thimus J F. The influence of temperature on mechanical characteristics of Boom clay: The results of an initial laboratory programme. *Eng Geol*, 1996, 41: 117–126
- 44 Cekerevac C, Laloui L. Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay. *Int J Numer Anal Meth Geomech*, 2004, 28: 209–228

- 45 Delage P, Sultan N, Cui Y J. On the thermal consolidation of boom clay. *Can Geotech J*, 2000, 37: 343–354
- 46 Romero E, Villar M V, Lloret A. Thermo-hydro-mechanical behaviour of two heavily overconsolidated clays. *Eng Geol*, 2005, 81: 255–268
- 47 Liu H, Liu H, Xiao Y, et al. Effects of temperature on the shear strength of saturated sand. *Soils Found*, 2018, 58: 1326–1338
- 48 Liu H, Liu H, Xiao Y, et al. Influence of temperature on the volume change behavior of saturated sand. *Geotech Test J*, 2018, 41: 20160308
- 49 Liu H, McCartney J S, Xiao Y. Thermal volume changes of saturated sand during loading-unloading-heating phase. *E3S Web Conf*, 2020, 205: 08002
- 50 Ng C W W, Wang S H, Zhou C. Volume change behaviour of saturated sand under thermal cycles. *Géotech Lett*, 2016, 6: 124–131
- 51 Cekerevac C, Laloui L, Vulliet L, et al. A novel triaxial apparatus for thermo-mechanical testing of soils. *Geotech Test J*, 2005, 28: 12311
- 52 Kosar K M. The effect of heated foundations on soil sand. Dissertation for Master's Degree. Edmonton: The University of Alberta, 1983
- 53 Agar J G, Morgenstern N R, Scott J D. Thermal expansion and pore pressure generation in oil sands. *Can Geotech J*, 1986, 23: 327–333
- 54 Li C H, Kong G Q, Che P, et al. Laboratory experimental on interface mechanical properties of energy pile-soil (in Chinese). *Build Energy Efficiency*, 44: 99–105 [李春红, 孔纲强, 车平, 等. 能量桩桩-土接触面力学特性室内试验研究. *建筑节能*, 2016, 44: 99–105]
- 55 Li C H, Kong G Q, Liu H L, et al. Study of temperature-controlled pile-red clay interface tests and stress-strain relationship (in Chinese). *China Civil Eng J*, 2019, 52: 89–94 [李春红, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 桩-红黏土接触面温控测试及应力-应变关系研究. *土木工程学报*, 2019, 52: 89–94]
- 56 Burghignoli A, Desideri A, Miliziano S. A laboratory study on the thermomechanical behaviour of clayey soils. *Can Geotech J*, 2000, 37: 764–780
- 57 Coccia C J R, McCartney J S. Thermal volume change of poorly draining soils I: Critical assessment of volume change mechanisms. *Comput Geotech*, 2016, 80: 26–40
- 58 Favero V, Ferrari A, Laloui L. Thermo-mechanical volume change behaviour of opalinus clay. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2016, 90: 15–25
- 59 Banimahd M, Yasrobi S S, Woodward P K. Artificial neural network for stress-strain behavior of sandy soils: Knowledge based verification. *Comput Geotech*, 2005, 32: 377–386
- 60 Li X S. A sand model with state-dependent dilatancy. *Géotechnique*, 2002, 52: 173–186
- 61 Zhou C, Ng C W W. Effects of temperature and suction on plastic deformation of unsaturated silt under cyclic loads. *J Mater Civ Eng*, 2016, 28: 04016170
- 62 Alsherif N A, McCartney J S. Yielding of silt at high temperature and suction magnitudes. *Geotech Geol Eng*, 2015, 34: 501–514
- 63 Hailemariam H, Wuttke F. Cyclic mechanical behavior of two sandy soils used as heat storage media. *Energies*, 2020, 13: 3835
- 64 Zhou C. Experimental study and constitutive modelling of cyclic behaviour at small strains of unsaturated silt at various temperatures. Dissertation for Doctoral Degree. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2014
- 65 Dorsey E N. Properties of ordinary water-substance. New York: Reinhold Publishing Corp, 1940. Table 105, 243
- 66 Campanella R G, Mitchell J K. Influence of temperature variations on soil behavior. *J Soil Mech Found Div*, 1968, 94: 709–734
- 67 Dai J Q, Su Z J, Zhao M C, et al. True triaxial tests and strength characteristics of silty clay (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2016, 37: 2534–2546 [代金秋, 苏仲杰, 赵明超, 等. 粉质黏土的真三轴试验及强度特性研究. *岩土力学*, 2016, 37: 2534–2546]
- 68 Mao H R, Wang Y J, Shi J H, et al. The research of Wenzhou clay in undrained true triaxial test (in Chinese). *Sci Tech Eng*, 2016, 16: 49–55 [毛浩然, 王亚军, 施佳豪, 等. 温州软黏土不排水真三轴试验的研究. *科学技术与工程*, 2016, 16: 49–55]
- 69 Shao S J, Xu P, Wang Q, et al. True triaxial tests on anisotropic strength characteristics of loess (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2014, 36: 1614–1623 [邵生俊, 许萍, 王强, 等. 黄土各向异性强度特性的真三轴试验研究. *岩土工程学报*, 2014, 36: 1614–1623]
- 70 Pan X. True triaxial test on stress-strain characteristics of frozen calcareous clay (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2020 [潘旋. 冻结钙质黏土应力-应变特性的真三轴试验研究. 硕士学位论文. 淮南: 安徽理工大学, 2020]
- 71 Shanina M. Assessment of anisotropy effects on the thermal volume change of unsaturated bonny silt using a thermo-hydro-mechanical true-triaxial cell. Dissertation for Doctoral Degree. Colorado: University of Colorado, 2015
- 72 Vega A, Coccia C J R, Tawati A E, et al. Impact of the rate of heating on the thermal consolidation of saturated silt. In: *Geo-Congress 2012*. Oakland, 2012
- 73 Vega A. Impact of temperature cycles on the thermal consolidation of saturated silt under different stress states. Dissertation for Master's Degree. Colorado: University of Colorado, 2012

- 74 Archer A. Climate change impact on unsaturated embankments considering temperature and humidity: Centrifuge modelling. Dissertation for Doctoral Degree. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2019
- 75 Laloui L, Péron H, Geiser F, et al. Advances in volume measurement in unsaturated soil triaxial tests. *Soils Found*, 2006, 46: 341–349
- 76 Ng C W W, Zhou C. Cyclic behaviour of an unsaturated silt at various suctions and temperatures. *Géotechnique*, 2014, 64: 709–720
- 77 Nouveau M, Grandjean G, Leroy P, et al. Electrical and thermal behavior of unsaturated soils: Experimental results. *J Appl Geophys*, 2016, 128: 115–122
- 78 Thota S K. Temperature effects on unsaturated soils: Constitutive relationships and emerging geotechnical applications. Dissertation for Doctoral Degree. Mississippi: Mississippi State University, 2020
- 79 Uchaipichat A, Khalili N. Experimental investigation of thermo-hydro-mechanical behaviour of an unsaturated silt. *Géotechnique*, 2009, 59: 339–353
- 80 Baldi G, Hueckel T, Pellegrini R. Thermal volume changes of the mineral-water system in low-porosity clay soils. *Can Geotech J*, 1988, 25: 807–825
- 81 Coccia C J R, McCartney J S. Thermal volume change of poorly draining soils II: Model development and experimental validation. *Comput Geotech*, 2016, 80: 16–25
- 82 Takai A, Ghaaoowd I, McCartney J S, et al. Impact of drainage conditions on the thermal volume change of soft clay. In: Geo-Chicago 2016. Chicago, 2016
- 83 Kuntiwattanukul P, Towhata I, Ohishi K, et al. Temperature effects on undrained shear characteristics of clay. *Soils Found*, 1995, 35: 147–162
- 84 Wang J, Zhang F, Yang Z J. Anisotropy in small-strain shear modulus of permafrost at rising temperatures. *Cold Regions Sci Tech*, 2019, 160: 1–12
- 85 Wu S, Yu Z, Kang J, et al. Research on the anisotropy of thermal conductivity of rocks in Songliao basin, China. *Renew Energy*, 2021, 179: 593–603
- 86 Lu Y N, Li X P, Han Y H. Mechanical characteristics of anisotropic sandstone under freeze-thaw cycles (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2020, 42: 889–898 [路亚妮, 李新平, 韩燕华. 各向异性砂岩冻融力学特性研究. 冰川冻土, 2020, 42: 889–898]
- 87 Yao J. Thermal conductivity of unsaturated soils. Dissertation for Doctoral Degree. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2018
- 88 François B, Salager S, Youssoufi M S E, et al. Compression tests on a sandy silt at different suction and temperature levels. In: GSP 157 Computer Applications in Geotechnical Engineering, GeoDenver07, 2007. 1–10
- 89 Salager S, François B, Youssoufi M S E, et al. Experimental investigations of temperature and suction effects on compressibility and pre-consolidation pressure of a sandy silt. *Soils Found*, 2008, 48: 453–466
- 90 Sultan N, Delage P, Cui Y J. Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay. *Eng Geol*, 2002, 64: 135–145
- 91 Laloui L, Cekerevac C. Thermo-plasticity of clays. *Comput Geotech*, 2003, 30: 649–660
- 92 Liu H, Chen Q M, Lu L, et al. Temperature-dependent non-associated elastic-plastic constitutive model for saturated clay (in Chinese). *J Civil Environ Eng*, 2020, 42: 53–59 [刘红, 陈琴梅, 卢黎, 等. 考虑温度影响的非关联弹塑性饱和黏土本构模型. 土木与环境工程学报, 2020, 42: 53–59]
- 93 Moritz L. Geotechnical properties of clay at elevated temperatures. Technical Report. Linköping: Swedish Geotechnical Institute, Report No. 47, 1995
- 94 Graham J, Tanaka N, Crilly T, et al. Modified cam-clay modelling of temperature effects in clays. *Can Geotech J*, 2001, 38: 608–621
- 95 Laloui L, Cekerevac C, Vulliet L. Thermo-mechanical modelling of the behaviour of MC clay. In: 10th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics. Tucson, 2001. 829–835
- 96 Wu Z X, Chen J Y, Yin Z Y. Finite element simulation of simple shear tests considering inherent anisotropy (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2021, 43: 1157–1165 [吴则祥, 陈佳莹, 尹振宇. 考虑砂土初始各向异性的单剪试验模拟分析. 岩土工程学报, 2021, 43: 1157–1165]
- 97 Ma W J, Qin Y, Wang C D, et al. Experimental study on anisotropy of saturated coral sand under complex stress conditions (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2022, 44: 576–583 [马维嘉, 秦悠, 王常德, 等. 复杂应力条件下饱和珊瑚砂各向异性试验研究. 岩土工程学报, 2022, 44: 576–583]
- 98 Liao A J, Meng L B, Li T F, et al. Experimental study on anisotropic layered sandstone under the thermal-mechanical action (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2019, 38: 2593–2602 [廖安杰, 孟陆波, 李天赋, 等. 热-力作用下层状砂岩各向异性三轴压缩试验研究. 岩石力学与工程学报, 2019, 38: 2593–2602]

- 99 Wang L Q, Zhao C, Hu X Y, et al. Strength and structural anisotropy of loess (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2021, 43: 25–29 [王丽琴, 赵聪, 胡向阳, 等. 黄土强度及结构的各向异性研究. *岩土工程学报*, 2021, 43: 25–29]
- 100 Shen Y, Liang H, Ge H Y, et al. Fixed-axis shear characteristics of anisotropic calcareous sand under variation of principal stress axes (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2020, 42: 22–26 [沈扬, 梁晖, 葛华阳, 等. 主应力轴变化下各向异性钙质砂的定轴剪切特性. *岩土工程学报*, 2020, 42: 22–26]
- 101 El Shamy U, De Leon O, Wells R. Discrete element method study on effect of shear-induced anisotropy on thermal conductivity of granular soils. *Int J Geomech*, 2013, 13: 57–64
- 102 Liu X, Zhou A, Li J, et al. Shear-induced anisotropy in granular materials under various saturation states. *Comput Geotech*, 2022, 143: 104606
- 103 Qi Y, Tang X J, Li X Q. Stress-induced anisotropy of coarse-grained soil by true triaxial tests based on PFC (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2015, 37: 2292–2300 [齐阳, 唐新军, 李晓庆. 粗粒土应力诱发各向异性真三轴试验颗粒流模拟研究. *岩土工程学报*, 2015, 37: 2292–2300]
- 104 Coccia C J R. Impact of stress-induced anisotropy on thermal volume change in saturated soils. Dissertation for Master's Degree. Colorado: University of Colorado, 2011

Experimental progress research on the thermomechanical properties of soils

LIU Hong^{1,2}, CHEN YiXin¹, LIU HanLong^{2,3}, SUN ZengChun³ & XIAO Yang^{2,3}

¹ School of Architectural Engineering, Neijiang Normal University, Neijiang 641112, China;

² Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

³ School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China

Shallow geothermal energy, which is one part of the geothermal resources, is the geothermal energy resource in the earth's interior with the value of development and utilization under the present technical and economic conditions. In addition, this energy has a wide distribution, large reserves, rapid regeneration, and high utilization value in China. Using ground source heat pump technology, the “Cold source” or “Heat source” of the shallow geothermal energy can be introduced into the structure to adjust the structure's temperature. Moreover, the structure can be warm in winter and cool in summer, and the carbon emissions can be reduced at the same time. Previous studies have shown that the exploitation and utilization of single-stage shallow geothermal energy are not enough, otherwise the multi-stage utilization of shallow geothermal energy and its integration with other clean energy such as solar energy are seriously lagging behind. This current situation is mainly due to the incomplete understanding of the thermodynamic properties of structures, soils, and the interface between structures and soils. In this paper, recent experimental research progress on the thermodynamic properties of soils is summarized. The heating mechanism, experimental process, and the influencing factors of temperature-controlled tests are systematically introduced, and future research trends concerning the experimental research on the thermodynamic properties of soils are predicted.

shallow geothermal energy, temperature-controlled test, interface, thermodynamic properties

doi: [10.1360/SST-2022-0197](https://doi.org/10.1360/SST-2022-0197)