

DOI: 10.11779/CJGE201910016

高温后上海软黏土的土-水特性及微观机理试验研究

陈正发^{1, 2}, 朱合华^{*2}, 闫治国²

(1. 常州大学环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 土-水特征曲线(SWCC)是揭示非饱和土性状的主要本构关系,但对于100℃以上高温环境下软黏土的土-水特性研究很少。针对上海软黏土的常温(20℃)土样和105℃, 150℃和200℃等高温加热4 h后的土样,采用气相法研究了高温作用后上海软黏土的土-水特征曲线随温度的变化,同时,通过扫描电镜(SEM)试验研究了高温后软黏土的土-水特性随温度变化的微观机理。试验结果表明100℃以上高温环境下上海软黏土的土-水特征曲线随温度升高呈逐渐下降趋势,说明随温度升高软黏土的持水能力下降,吸力降低,进气值减小。分析各温度下土样的SEM图像发现,土的总孔隙数量减少,但少量孔隙的孔径增大,从微观特征上说明了土-水特性随温度升高的变化趋势和变化机理。说明,孔隙数量和孔隙结构随温度升高发生的变化是导致软黏土的土-水特性随温度升高而变化的根本原因。

关键词: 高温环境; 软黏土; 土-水特性; 微观特征

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)10-1914-07

作者简介: 陈正发(1971—),男,安徽蚌埠人,博士,副教授。主要从事隧道及地下建筑工程、岩土工程材料等方面的研究工作。E-mail: czf2002@126.com。

Experimental study on soil-water characteristics and micromechanism of Shanghai soft clay after high temperatures

CHEN Zheng-fa^{1, 2}, ZHU He-hua², YAN Zhi-guo²

(1. School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The soil-water characteristic curve (SWCC) is the main constitutive relation to reveal the properties of unsaturated soils. However, few researches on soil-water characteristics of unsaturated soils in high-temperature environment, especially over 100℃, have been reported. The SWCC of soft clay from Shanghai at high temperature is investigated using the vapor phase technique. Different temperatures (20℃, 105℃, 150℃ and 200℃) are adopted to dry the soft clay for 4 h before testing the SWCC. In addition, the microstructures of soft clay before and after high temperature are characterized by scanning electron microscopy (SEM). The results show that the SWCC of soft clay decreases gradually as temperature increases to >100℃. Similarly, the water-retaining capacity, suction force and intake value of soft clay decrease with the increase of temperature. These results are mainly attributed to the variation of the microstructure of soft clay according to the SEM results. The number of pores of soils decreases, while the pore size of a small number of pores increases at high temperature, which accounts for the variation mechanism of SWCC of soft clay at high temperature. In a word, the change of pore number and pore structure with the increase of temperature is the fundamental reason for the change of water characteristics of soft clay with the increase of temperature.

Key words: high-temperature environment; soft clay; soil-water characteristic; microcosmic characteristic

0 引言

土-水特征曲线SWCC (soil-water characteristic curve)的研究,起源于土壤学和土壤物理学。当时,主要研究天然状态下表层土壤的吸力变化和土壤的持水特性及水分运动特征,基质吸力值一般小于100 kPa。近年来,由于非饱和土力学理论在边坡稳定性评价以及降雨型滑坡预测等方面的广泛应用,对非饱和

土的土-水特征曲线进行了更加深入的研究。

目前,对土的土-水特征曲线的研究大都是针对恒温条件,在试验的基础上展开,通过对特定土体的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478345); 山东省自然科学基金项目(ZR2016DL08)

收稿日期: 2018-09-11

***通讯作者** (E-mail: zhuhehua@tongji.edu.cn)

试验得出特定条件下的土 - 水特征曲线, 然后通过归纳分析, 得出其数学表达式, 提出相应的模型。Gardner^[1]进行了土 - 水特征曲线研究, 在充分考虑空气进气值和残余含水率对土 - 水特征曲线形状影响的条件下, 提出了具有 2 个拟合参数的数学模型, 是最早开展这方面研究的学者之一。随后, 很多学者就非饱和土的土 - 水特征曲线方程进行了深入研究 (Brooks 等^[2]、Mckee 等^[3-4]、Bumb^[5]、Williams 等^[6]), 提出了不同的土 - 水特征曲线模型。由 Van Genuchten^[7]提出的土 - 水特征曲线方程, 是目前最常用的模型之一, 该模型的模拟效果得到了广泛认可。

Philip 等^[8]于 1957 年最先研究了温度对非饱和土的土 - 水特征曲线的影响, 该研究在假定温度变化只会影响表面张力变化的基础上, 基于 Laplace 方程给出了吸力随温度变化的表达式。随后, 很多学者针对温度变化对土的土 - 水特征曲线的影响, 开展了大量的试验研究, 比如 Chahal^[9]、Haridasan 等^[10]、Hopmans 等^[11]、She 等^[12]、Constantz^[13]、Bachman 等^[14]、王铁行等^[15]。研究表明: 由于温度变化所产生的非饱和土的吸力变化大大超出了 Philip 等方程的预测结果。这些研究结果说明, 温度对非饱和土吸力的影响, 不能简单归结为温度对表面张力的影响。Grant 等^[16]在研究温度对土的土 - 水特征曲线的影响时, 基于 Philip 等^[8]提出的吸力随温度变化的公式, 引入了温度对浸润系数的影响, 并通过试验结果对提出的修正公式进行了验证。他们的研究表明, 在同时考虑温度对表面张力和浸润系数的影响后, 试验结果与公式预测结果趋于一致。蔡国庆等^[17]基于 Van Genuchten^[7]提出的土 - 水特征曲线方程和 Grant 等^[16]关于非饱和土的土 - 水特征曲线温度效应的研究成果, 推导了反映非饱和土的土 - 水特征曲线随温度变化的方程。秦冰等^[18]通过试验研究了温度对高庙子膨润土 SWCC 的影响, 并基于吸附热力学理论, 建立了考虑温度影响的高庙子膨润土的持水模型。

由上述温度对土 - 水特征曲线的影响研究可以看出, 目前, 温度对土 - 水特征曲线的影响机理的研究还没有达成共识, 且研究均是针对 100℃ 以下温度环境, 对于 100℃ 以上高温作用后非饱和土的土 - 水特征曲线研究还很少。然而, 随着隧道等地下结构工程的发展, 地下结构火灾所引起的工程事故频发。当隧道等地下结构工程发生火灾时, 火灾会引起地下结构周围土体中温度场的变化, 相应的应力场、位移场、渗流场也都将发生变化, 而且这些变化相互影响, 又会给隧道等地下结构带来很大危害。因此, 研究隧道等地下结构周围土体, 在火灾高温环境后的土 - 水特性

随温度的变化情况有重要意义, 有必要对 100℃ 以上高温作用后非饱和土的土 - 水特性进行探讨。

论文针对火灾高温后隧道等地下结构周围土体的温度变化工况, 开展了 105℃, 150℃ 和 200℃ 3 个温度下恒温 4 h 后土样的土 - 水特征曲线随温度变化的试验研究, 并和室温 20℃ 风干 4 h 后的土样的土 - 水特征曲线进行对比研究, 同时, 基于扫描电镜试验对各温度土样进行了微观特征分析。通过上述研究, 旨在分析高温环境后, 温度对土 - 水特征曲线的影响规律和影响机理。

1 试验材料和试验方法

1.1 试验材料

本试验所用土料取自上海市闵行区一厂房工程, 场地位于长江三角洲入海口东南前缘, 其地貌属于上海地区四大地貌单元中的滨海平原类型。土料取自该场地地下 10 m, 为全新世 Q₄² 海相沉积物, 表面呈灰色的淤泥质黏土, 是上海地区地铁隧道工程经常穿越的主要土层。经试验测定, 该天然土样的基本物理性能指标如表 1 所示。

表 1 上海淤泥质黏土的基本物理性能指标

Table 1 Basic physical properties of mucky clay in Shanghai

含水率	相对密	重度	塑限	液限	孔隙比
w/%	度 d _s	γ/(kN·m ⁻³)	w _p /%	w _L /%	e
46.4	2.74	17.0	22.1	41.0	1.36

把所取天然土样进行晾干、粉碎后装入密闭的容器中。按照《土工试验方法标准》(GBT 50123—1999)^[19]方法制备饱和土样。制备后饱和土样的含水率 w=48.3%, 重度 γ=17.5 kN/m³, 放置在密闭的容器中备用。

1.2 土 - 水特性试验方法

土 - 水特征曲线往往是通过量测土体的不同含水率所对应的吸力来获得的。室内测定土 - 水特征曲线的试验方法, 常用的有滤纸法、渗析 (液相) 法与气相法等 (叶为民等^[20])。本试验选择气相法测定土中吸力, 以确定土样的土 - 水特征曲线。试验流程如图 1 所示。

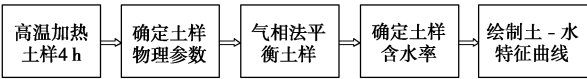


图 1 试验流程图

Fig. 1 Test process

试验土样是在自行研制的可控气压的多功能土样加热试验系统^[21]中进行加热。试验选取 105℃, 150℃ 和 200℃ 3 个温度下恒温 4 h 后的土样, 每个温度选

取 3 个土样，再选取 3 个室温土样作为高温后的对比土样，室温恒定在 20℃，室温下的土样自然风干 4 h。测定各土样的质量、体积并计算出相应土样的密度，然后再取各土样少许放入烘箱中烘干以测定各土样的含水率。需要说明的是，选取 105℃是考虑到土中自由水蒸发所需要的最低温度是 105℃；选取 150℃是考虑到土中结合水开始蒸发的温度是 120℃，为确保结合水的充分蒸发，同时也为了研究的可对比性；选取 200℃也是为了进行对比研究。各温度下土样的基本物理性能参数，其算术平均值如表 2 所示。

试验采用吸力不同的 K_2SO_4 、 KNO_3 、 NaCl 、 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ 、 MgCl_2 和 LiCl 等 6 种盐溶液，各盐溶液及其对应的蒸汽吸力如表 3 所示。

表 2 土的基本物理性能参数

Table 2 Basic physical property parameters of soil samples					
温度	参数				
	t/h	$w/\%$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	S_r
20℃	4	44.48	1.78	1.22	0.99
105℃	4	39.36	1.75	1.28	0.91
150℃	4	5.78	1.65	1.56	0.21
200℃	4	1.47	1.60	1.58	0.05

表 3 饱和盐溶液及与其对应的蒸汽吸力

Table 3 Saturated salt solutions and their vapor suctions						
饱和盐溶液	K_2SO_4	KNO_3	NaCl	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	MgCl_2	LiCl
吸力 /MPa	4.2	9.0	38	82	150	309



图 2 饱和盐溶液中进行水汽平衡的试样

Fig. 2 The sample in saturated salt solution for suction balance

试验过程中，首先，在中间放有陶土板的不同干燥皿中相应配置 6 种不同的饱和盐溶液；其次，取各温度下的土样 10 g 左右放入大小相同的小铝盒中，然后把小铝盒放入盛有饱和盐溶液的干燥皿中的陶土板上，密封干燥皿（如图 2 所示）静置 30 d，直至土样中的吸力达到平衡；最后，把吸力平衡后的土样取出，并放入恒温烘箱中烘干，测量吸力平衡后的土样的含

水率（准确至 0.01 g）。

1.3 扫描电镜（SEM）试验

按照常规扫描电镜试验步骤，对常温（20℃）土样，和 105℃，150℃和 200℃恒温 4 h 后的土样经冷却后室内风干备用。把各温度对应的风干土样，找具有代表性的部位用薄刀片在表面切割一条裂缝，然后用手掰开，选取具有代表性的部分作为样品。将样品贴在导电胶上进行真空干燥去除残留水分，然后对样品分别表面清洁、表面覆膜和 SEM 图像拍摄。

2 试验结果及分析

2.1 高温对软黏土的土 - 水特性的影响规律

试验测量的各温度下，经饱和盐溶液吸力平衡的土样的含水率如表 4 所示，表中含水率为两次平行试验的平均值，两次平行试验的误差均小于 1%。以温度为横坐标，以含水率为纵坐标绘制各吸力下含水率随温度变化曲线，如图 3 所示。以吸力为横坐标，以含水率为纵坐标，把各温度下的土样经吸力平衡后的含水率绘制到同一张半对数坐标系中，反应吸力和含水率之间关系的土 - 水特征曲线如图 4 所示。

表 4 经饱和盐溶液吸力平衡后的土样含水率

Table 4 Water content of soil samples after suction balance of saturated salt solutions (%)						
温度	吸力 s/MPa					
	4.2	9.0	38	82	150	309
20℃	13.25	8.31	3.76	2.62	1.99	1.68
105℃	12.15	7.63	3.36	2.30	1.75	1.33
150℃	8.15	5.78	2.73	2.02	1.55	1.21
200℃	7.79	5.44	2.49	1.75	1.35	1.07

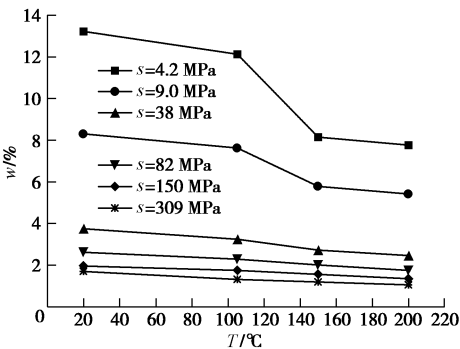


图 3 同一吸力下含水率随温度的变化趋势

Fig. 3 The change of moisture content with temperature

由图 3 可见，同一吸力下，随着温度增加土样的含水率降低，随着吸力增加，含水率的降低趋势减缓，即当吸力为 4.2 MPa 时，含水率随温度的升高而降低的最多，而当吸力为 309 MPa 时，含水率随温度的升高而降低的最少。同时，由图 3 还可以看出，当温度

由 105℃ 升高到 150℃ 时, 含水率降低的趋势最为显著, 而温度由 150℃ 升高到 200℃ 时, 含水率的降低趋势减缓。这一现象尤其以吸力小于 38 MPa 的 3 组曲线最为明显。同一吸力下, 土的含水率随温度的变化基本呈线性降低。这说明同一吸力下, 随着温度升高, 土的持水能力降低, 吸力越小土的持水能力降低越显著, 但当温度超过一定值时, 这种降低趋势趋缓。

由图 4 可看出, 在同一温度下, 随着吸力增加含水率降低, 随着温度增加, 土 - 水特征曲线总体下降, 这说明, 在同一含水率下, 土体的吸力随着温度升高而降低, 换言之, 在饱和度保持不变的情况下, 空气进入土体孔隙所需的吸力降低了, 即土的进气值减小了。同时, 也说明随着温度升高, 土的持水能力下降, 温度从 105℃ 到 150℃ 变化, 土的持水能力下降最为明显。随温度升高, 土的持水能力下降的现象和 100℃ 以下土体的土 - 水特征随温度的变化结果相似。对于 100℃ 以下, 温度对土体的持水能力的影响研究有很多, 如 Romero 等^[22]、Villar 等^[23]、Tang 等^[24]、Francois 等^[25]和叶为民等^[26]。这些研究, 使用不同的加热技术给不同类型的土体加热, 得到了土体的土 - 水特征曲线随温度的变化特征和本试验得到的结果相似。

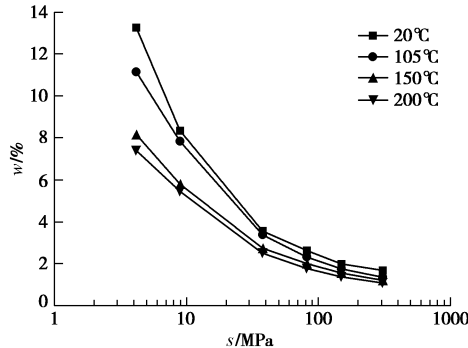


图 4 各温度下土样的土 - 水特征曲线

Fig. 4 Soil-water characteristic curves (SWCC)

图 5 是本试验结果 (图中实曲线) 和叶为民等^[26]的试验结果 (图中虚曲线) 的对比。叶为民等^[26]的研究对象是室温 (20℃) 条件下的上海软黏土, 试验方法也是气相法, 其变化趋势和本试验结果相同。不同点在于叶为民等^[26]的土 - 水特征曲线明显高于本试验得到的土 - 水特征曲线。分析原因, 尽管同是上海软黏土, 但毕竟不是同一种土样, 本试验中土样是取自上海市闵行区地下 10 m, 且常温土样是重塑后经风干 4 h 后的土样, 而叶为民等^[26]的土样取自上海市杨浦区地下 8 m 的自然土样。另一方面试验人员不同, 试验时间和试验条件不同都可能导致试验结果不同。但足以说明本试验结果的可靠性。

图 6 是本试验结果 (图中实曲线) 和 Ye 等^[27]的试验结果 (图中虚曲线) 的对比。Ye 等^[27]的研究对象是高压实高庙子膨润土。温度变化是 20℃、40℃ 和 80℃, 试验方法也是气相法测定各温度土样经饱和盐溶液吸力平衡后的土样含水率。和本试验的不同点在于 Ye 等^[27]的试验结果是不同温度下的吸力平衡, 而本试验结果是经历高温后室温条件下的吸力平衡。尽管试验条件不同, 但从两种试验结果的对比可以发现温度变化对土的土 - 水特性的影响很大。不管是经历 100℃ 以上高温作用后的上海软黏土样, 还是 100℃ 以下的膨润土样, 温度变化对土的土 - 水特性的影响趋势是相同的。随温度升高, 土的持水能力下降; 相同温度下, 随着吸力值的增大含水率逐渐降低。

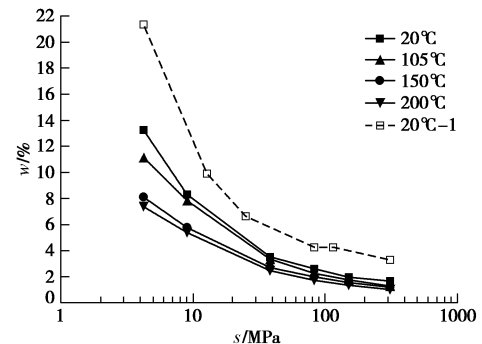


图 5 土 - 水特征曲线随温度变化的对比 (图中虚线数据来自于叶为民等^[26])

Fig. 5 Comparison between test results and those by Ye Weimin et al^[26] for SWCC

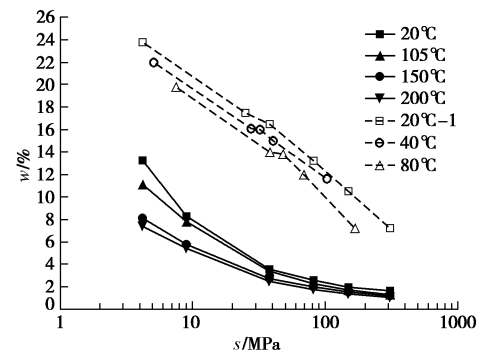


图 6 土 - 水特征曲线随温度变化的对比 (图中虚线数据来自于 Ye 等^[27])

Fig. 6 Comparison between test results and those by Ye et al^[27] for SWCC

2.2 高温后软黏土的微观特征

图 7 所示为各温度下放大倍数为 3000 时的 SEM 图像, 图中所示能更清楚地说明软黏土的固体颗粒和孔隙特征随温度的变化情况。

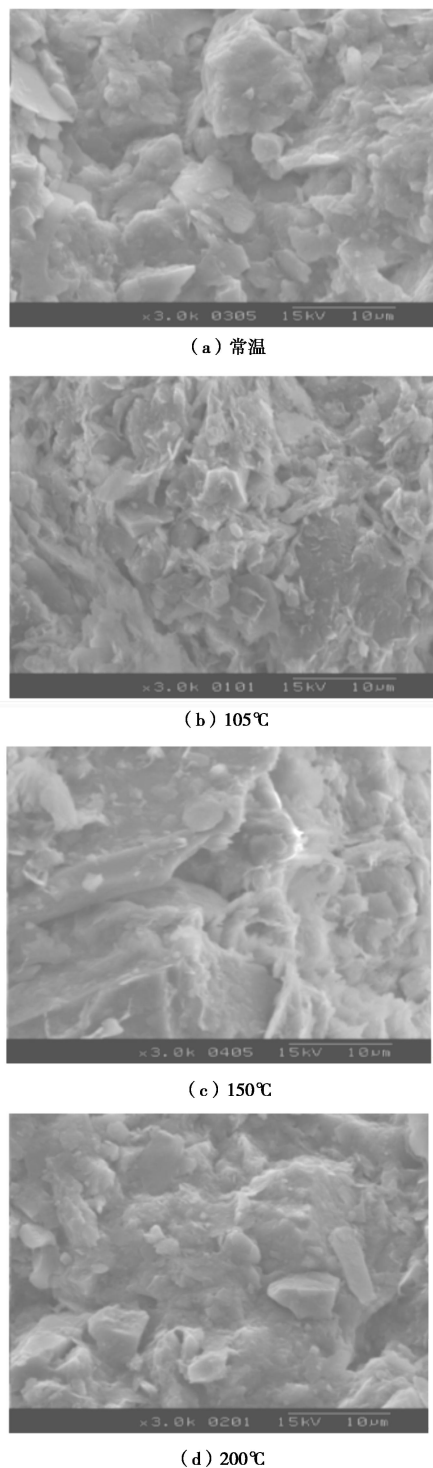


图7 放大倍数为3000时的SEM图像

Fig. 7 SEM images with a magnification of 3000

由图7(a)可以看出颗粒排列相对均匀,孔隙数量较多,随着温度升高从图7(b)的105℃到图7(d)的200℃土样的颗粒被压密硬化,出现了较大的颗粒团,孔隙数量减小,但孔径却在增大。因此,从土样的SEM图像的变化可以看出随着温度的升高土的密实度逐渐增加,土的孔隙数量大幅减小即孔隙度降低了,但局部少量孔隙的孔径却增大了,且孔隙之间的

连续性降低了。孔隙度降低说明软黏土样的含水率减小,即软黏土的持水能力降低;孔径增大,说明孔隙中水的弯液面增大,吸力降低,土的进气值减小了。SEM图像所表现出的特征变化恰好从微观上说明了上述软黏土随着温度升高土-水特征曲线的变化趋势即持水能力下降、吸力降低、进气值减小。

2.3 高温对软黏土的土-水特性的影响机理

从本质上说,土体的持水能力随温度升高而降低,主要是因为土体中各相之间及各相界面之间相互作用的物理机制引起的。温度对土体各相的影响可以分为短期效应和长期效应。对于短期效应而言,一方面温度升高会导致土体中各相的热膨胀及饱和度的升高;另一方面溶解在水中的空气溶解度会随温度而变化,当温度升高时水中的吸附气体被释放出来,从而引起土体饱和度的降低。对于长期效应而言,由SEM图像可以看出,在一定压力作用下(隧道周围土体处于一定的压力环境)土在加热过程中固体颗粒会由于压力的作用而被压密、硬化、团聚,于是孔隙数量大幅度减小;但同时,由于固体颗粒的压密、硬化、团聚会导致局部少量孔隙的孔径增大,孔径增大势必会引起固体颗粒的表面张力减小、吸力降低。换言之,在饱和度保持不变的情况下,空气进入土体孔隙所需的吸力降低了,即土的进气值减小了。进气值表征了引起土体内部最大孔隙中产生减饱和所必须的水、气压力差。此外,隧道火灾会引起隧道周围土体的温度超过100℃,当温度升高时会使得吸附水层的厚度减小,饱和度降低,而当温度超过105℃时土中的结晶水也开始逸出,土体的含水率会进一步降低,土体的持水能力也会进一步下降。因此,上海软黏土样在经历100℃以上高温环境作用后,在高吸力(大于4 MPa)范围内,土样出现了随温度升高持水能力下降,进气值减小的现象。

3 结 论

用气相控制法测定了常温(20℃)土样和100℃以上高温环境下作用4 h后土样的土-水特征曲线,并和已有对常温下土样的土-水特征曲线的研究作对比分析,同时,对比研究了各温度土样的SEM图像的微观特征随温度的变化情况,得出以下4点结论。

(1)同一吸力下,上海软黏土的含水率随温度的变化基本呈线性降低。这说明同一吸力下,随着温度升高,上海软黏土的持水能力降低,吸力越小土的持水能力降低越显著,但当温度超过一定值时,这种降低趋势趋缓。

(2) 同一温度下, 上海软黏土的含水率随着吸力增加而降低, 随着温度升高土 - 水特征曲线总体下降。这说明, 在同一含水率下, 上海软黏土的吸力随着温度升高而降低。同时也说明随着温度升高, 上海软黏土的持水能力下降。

(3) 通过和 Ye 等^[27]的试验结果进行对比研究发现, 上海软黏土在 100℃ 以上高温作用后的土 - 水特性和 100℃ 以下温度环境中的土 - 水特性随温度的变化趋势相同。

(4) 通过研究各温度土样的 SEM 图像, 发现随温度升高上海软黏土样的总孔隙数量减小, 孔隙的连续性降低, 少量孔隙的孔径增大。从微观特征上说明了随温度升高软黏土的土 - 水特性随温度的变化趋势, 并从机理上解释了上海软黏土随温度升高持水能力下降、吸力降低和进气值减小的原因。

参考文献:

- [1] GARDENER W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water-table[J]. Soil Science, 1958, **85**(4): 228 - 232.
- [2] BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic properties of porous medium-hydrology paper[R]. Fort Collins: Colorado State University, 1964.
- [3] MCKEE C R, BUMB A C. The importance of unsaturated flow parameters in designing a monitoring system for a hazardous wastes and environmental emergencies[C]// Proceeding of Hazardous Materials Control Research Institute National Conference. Houston, 1984: 50 - 58.
- [4] MCKEE C R, BUMB A C. Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of water and gas[J]. SPE Formation Evaluation, 1987, **2**(4): 599 - 608.
- [5] BUMB A C. Unsteady-state flow of methane and water in coalbeds[D]. Laramie: University of Wyoming, 1987.
- [6] WILLIAMS J, PREBBLE R E, WILLIAMS W T, et al. The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic[J]. Australian Journal of Soil Research, 1983, **21**(1): 15 - 32.
- [7] Van GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**(5): 892 - 898.
- [8] PHILIP J R, DE VRIES D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. Transactions, American Geophysical Union, 1957, **38**(2): 222 - 232.
- [9] CHAHAL R S. Effect of temperature and trapped air on matric suction[J]. Soil Science, 1965, **100**(4): 262 - 266.
- [10] HARIDASAN M, JENSEN R D. Effect of temperature on pressure head-water content relationship and conductivity of two soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1972, **36**: 703 - 708.
- [11] HOPMANS J W, DANE J H. Temperature dependence of soil water retention curves[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, **50**: 562 - 567.
- [12] SHE H Y, SLEEP B E. The effect of temperature on capillary pressure-saturation relationships for air-water and perchloroethylene-water systems[J]. Water Resources Research, 1998, **34**(10): 2587 - 2597.
- [13] CONSTANTZ J. Comparison of isothermal and isobaric water retention paths in nonswelling porous materials[J]. Water Resources Research, 1991, **27**(12): 3165 - 3170.
- [14] BACHMANN J, HORTON R, GRANT S A, et al. Temperature dependence of water retention curves for wettable and water-repellent soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, **66**: 44 - 52.
- [15] 王铁行, 卢靖, 岳彩坤. 考虑温度和密度影响的非饱和黄土土-水特征曲线研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(1): 1 - 5. (WANG Tie-xing, LU Jing, YUE Cai-kun. Soil-water characteristic curve for unsaturated loess considering temperature and density effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(1): 1 - 5. (in Chinese))
- [16] GRANT S A, SALEHZADEH A. Calculation of temperature effects on wetting coefficients of porous solids and their capillary pressure functions[J]. Water Resources Research, 1996, **32**(2): 261 - 270.
- [17] 蔡国庆, 赵成刚, 刘艳. 非饱和土土-水特征曲线的温度效应[J]. 岩土力学, 2010, **31**(4): 1055 - 1060. (CAI Guo-qing, ZHAO Cheng-gang, LIU Yan. Temperature effects on soil-water characteristic curve of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(4): 1055 - 1060. (in Chinese))
- [18] 秦冰, 陈正汉, 孙发鑫, 等. 高吸力下持水曲线的温度效应及其吸附热力学模型[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(10): 1877 - 1886. (QIN Bing, CHEN Zheng-han, SUN Fa-xin, et al. Temperature effect on water retention curve under high suction and its modeling based on thermodynamics of sorption[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(10): 1877 - 1886. (in Chinese))
- [19] GBT 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 1999. (GBT

- 50123—1999 Standard for soil test method[S]. 1999. (in Chinese))
- [20] 叶为民, 白云, 金麒, 等. 上海软土土水特征的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 260 - 263. (YE Wei-min, BAI Yun, JIN Qi, et al. Lab experimental study on soil-water characteristics of Shanghai soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 260 - 263. (in Chinese))
- [21] 陈正发, 朱合华, 闫治国, 等. 高温后上海软黏土的物理性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(5): 924 - 931. (CHEN Zheng-fa, ZHU He-hua, YAN Zhi-guo, et al. Experimental study on physical properties of Shanghai soft clay under high temperatures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(5): 924 - 931. (in Chinese))
- [22] ROMERO E, GENS A, LLORET A. Temperature effects on the hydraulic behaviour of an unsaturated clay[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2001, **19**(3/4): 311 - 332.
- [23] VILLAR M V, LLORET A. Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite[J]. Applied Clay Science, 2004, **26**(1/2/3/4): 337 - 350.
- [24] TANG A M, CUI Y J. Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX-80 clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, **42**(1): 287 - 296.
- [25] FRANCOIS B, LALLOUI L. ACMEG-TS, A constitutive model for unsaturated soils under non-isothermal conditions[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2008, **32**(16): 1955 - 1988.
- [26] 叶为民, 唐益群, 崔玉军. 室内吸力量测与上海软土土水特征[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(3): 347 - 349. (YE Wei-min, TANG Yi-qun, CUI Yu-jun. Measurement of soil suction in laboratory and soil-water characteristics of Shanghai soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(3): 347 - 349. (in Chinese))
- [27] YE W M, WAN M, CHEN B, et al. Effect of temperature on soil-water characteristics and hysteresis of compacted Gaomiaozi bentonite[J]. Journal of Central South University of Technology, 2009, **16**: 0821 - 0826.

标准摘录：信息与文献 参考文献著录规则（GB/T 7714—2015）术语和定义

1. 参考文献 reference

对一个信息资源或其中一部分进行准确和详细著录的数据，位于文末或文中的信息源。

2. 主要责任者 creator

主要负责创建信息资源的实体，即对信息资源的知识内容或艺术内容负主要责任的个人或团体。主要责任者包括著者、编者、学位论文撰写者、专利申请者或专利权人、报告撰写者、标准提出者、析出文献的著者等。

3. 专著 monograph

以单行本或多卷册（在限定的期限内出齐）形式出版的印刷型或非印刷型出版物，包括普通图书、古籍、学位论文、会议文集、汇编、标准、报告、多卷书、丛书等。

4. 连续出版物 serial

通常载有年卷期号或年月日顺序号，并计划无限期连续出版发行的印刷或非印刷形式的出版物。

5. 析出文献 contribution

从整个信息资源中析出的具有独立篇名的文献。

6. 电子资源 electronic resource

以数字方式将图、文、声、像等信息存储在磁、光、电介质上，通过计算机、网络或相关设备使用的记录有知识内容或

艺术内容的信息资源，包括电子公告、电子图书、电子期刊、数据库等。

7. 顺序编码编 numeric references method

一种引文文献的标注体系，即引文采用序号标注，参考文献表按引文的序号排序。

8. 著者-出版年制 first element and date method

一种引文参考文献的标注体系，即引文采用著者-出版年标注，参考文献表按著者字顺和出版年排序。

9. 合订题名 title of the individual works

由2种或2种以上的著作汇编而成的无总题名的文献中各部著作的题名。

10. 阅读型参考文献 reading reference

著者为撰写或编辑论著而阅读过的信息资源，或供读者进一步阅读的信息资源。

11. 引文参考文献 cited reference

著者为撰写或编辑论著而引用的信息资源。

12. 数字对象唯一标识符 digital object identifier; DOI

针对数字资源的全球唯一永久性标识符，具有对资源进行永久命名标志、动态解析链接的特性。