

# 一种用于饱和土的热固结试验装置及其应用

白冰, 陈星欣

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 介绍一种用于饱和土圆柱形试样的热固结试验的温控固结压力室系统, 可用来测定变化温度荷载和外力荷载耦合作用下试样的热固结变形量。该试验装置压力室内温度可在  $17^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$  范围内变化, 同时可承受较高的等向周围固结压力 ( $0\sim 3\text{ MPa}$ )。分析了该试验装置的基本原理和测试方法。此外, 针对一种典型的黏性土, 研究了温度诱致的饱和黏性土的热固结变化规律, 对试样的温度演化过程、孔隙水压力变化以及热体积应变的测定等问题进行了分析。

**关键词:** 温度效应; 饱和土; 热固结; 试验装置; 压力室

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)06-0896-05

**作者简介:** 白冰(1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事复杂环境条件下岩土介质力学特性的研究。E-mail: baibing66@263.net.

## Test apparatus for thermal consolidation of saturated soils and its application

BAI Bing, CHEN Xing-xin

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** A test apparatus for the thermal consolidation of saturated soils is presented. It can be used to study the thermo-mechanical characteristics under combined thermal loading and mechanical loading. This apparatus accommodates variable thermal loading ranging from  $17^{\circ}\text{C}$  to  $100^{\circ}\text{C}$  and high confining pressure with a range of  $0\sim 3\text{ MPa}$ . The related experimental procedures are also discussed. For a typical saturated soil, the evolutions of temperature, pore pressure, thermal volumetric deformation induced by the thermal loading are analyzed.

**Key words:** temperature effect; saturated soil; thermal consolidation; test apparatus; confining chamber

## 0 引言

温度荷载作用下黏性土热力学特性的研究在地热资源开发、热能储存、核废料处置等领域有广泛的应用前景<sup>[1]</sup>。其中, 室内试验是研究热力学特性的基本手段之一。Tidfors 等<sup>[2]</sup>采用一个放置于可控制温度的水槽中的侧限固结压缩仪对天然软黏土进行不同温度等温条件下的室内试验, 加热温度达到  $55^{\circ}\text{C}$ 。Towhata<sup>[3]</sup>也采用类似的装置和加热原理进行饱和黏性土的热固结试验, 其试样直径为  $6\text{ cm}$ , 厚度为  $2\text{ cm}$ , 加热温度可达  $90^{\circ}\text{C}$ 。Abuel 等<sup>[4]</sup>通过在常规侧限固结压力室的外侧缠绕电热线圈的方法来达到测定温度变化过程中饱和土样体积变形的目的, 其温度可达到  $100^{\circ}\text{C}$ 。这类热固结试验装置主要是将常规侧限固结压缩仪加以改进, 主要针对饱和土的压缩和固结特性(如对先期固结压力大小和蠕变特性的影响研究), 而大多数仪器又只能进行升温后不同温度下的等温固结试验。

Hueckel 等<sup>[5]</sup>研制了一种可控制温度的三轴试验仪, 并就饱和黏性土在加热过程中的体积应变进行了

试验, 其温度控制范围为  $18^{\circ}\text{C}\sim 115^{\circ}\text{C}$ 。Bruyn 等<sup>[6]</sup>和 Cekerevac 等<sup>[7]</sup>所研制的一类温度控制三轴仪是通过放置在压力室内的水(或硅油)中的加热线圈(如铜螺旋管)来对试样进行加热, 其最高温度可达到  $80^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$ 。Delage 等<sup>[8]</sup>改进了 GDS 三轴仪, 采用缠绕于压力室外围的线圈进行加热, 压力室内的温度可以达到  $100^{\circ}\text{C}$ 。Abuel 等<sup>[9]</sup>将常规三轴系统进行改进, 同样通过在压力室外的电阻丝加热的方法对试样施加温度荷载。Wiebe 等<sup>[10]</sup>研制的温控三轴仪的压力室为金色铝材料, 并用缠绕于压力室外的两条硅油带加热, 同时将压力室置于一个便于保温的大的绝热罩内。

Blatz 等<sup>[11]</sup>将三轴系统置于可控制温度的实验室内(温度波动范围为  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ )来达到控制试验土样温度的目的, 该装置可进行高吸力水平的非饱和土试验, 但其缺点是进行高温试验时, 由于室内温度很高, 工作环境比较恶劣。陈正汉等<sup>[12]</sup>将常规三轴仪的台架与

基金项目: 国家自然科学基金项目(50879003)

收稿日期: 2010-04-01

压力室置于一个电热恒温箱内, 实现了温控三轴仪的试验要求(试样直径为 3.91 cm, 高度为 8 cm), 并针对典型非饱和膨胀土进行温度对其变形和强度以及土-水特征曲线影响的研究。Tang 等<sup>[13]</sup>研制了一个可同时控制吸力(范围为 1~500 MPa)和温度(范围为 20℃~80℃)的适用于非饱和和膨胀土的等向固结压力室, 试样的直径为 8 cm, 高度为 1 cm。

实际上, 当采用常规固结三轴仪进行不同温度下的固结试验时, 一般无法根据需要对试样进行温度升高或降低过程中热固结特性的试验。参考国外资料<sup>[8-9]</sup>, 本文研制了一种用于饱和土的热固结试验装置, 本试验装置可用来测定变化温度荷载和外力荷载耦合作用下试样的热固结变形量以及孔隙水压力的演化过程, 并可测定不同温度条件下试样的三轴剪切强度。

# 1 一种热固结试验装置

## 1.1 试验装置描述

图 1 为所研制的热固结试验装置的示意图。构成该温控固结压力室的顶盖与压力室侧壁焊接; 压力室侧壁与压力室底座通过固定螺栓连接, 其间由 O 型橡胶圈密封; 轴向压力杆通过可止水的轴套穿过顶盖的中央处与试样帽相接触; 试样置于压力室内的压力室底座中央处的透水石上, 并与试样顶部的透水石以及试样帽相接; 试样周边包裹有不透水的筒状橡皮膜; 排水管的两端分别与试样帽顶部和压力室底座上的试样排水孔的进口连接。

压力室侧壁为由不锈钢制作的空腔式结构, 压力

室筒状电热板嵌入压力室侧壁内, 其电阻丝的两端与温度调控器连接, 压力室筒状电热板的外侧充填隔热用石棉。压力室电热偶安装在顶盖上, 其一端置于充满水的压力室内, 输出端与温度调控器连接。

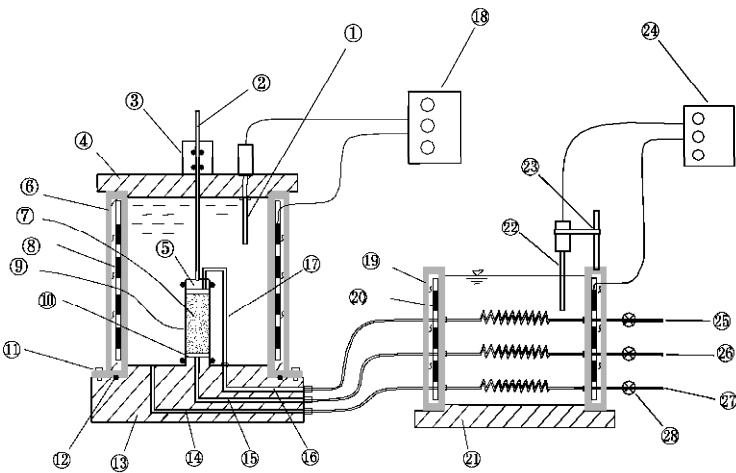
试样排水孔的出口通过接头与试样排水管连接; 孔隙水压力量测孔的出口通过接头与孔隙水压力量测管连接; 周围压力连接孔通过接头与周围压力连接管连接。试样排水管、孔隙水压力量测管、周围压力连接管均采用不锈钢材料制作, 中间段均为螺旋状结构, 螺旋状段置入一个充满水的温度恒定水容器中, 可与周围水体有较好的热交换。从温度恒定水容器中引出的试样排水管与体变管连接; 从温度恒定水容器中引出的孔隙水压力量测管与孔隙水压力量测系统连接; 从温度恒定水容器中引出的周围压力连接管与稳压调压系统连接。

这里, 体变管、孔隙水压力量测系统以及稳压调压系统均采用常规三轴固结仪通用的配套设备。

## 1.2 热固结压力室的特点

本试验装置克服了现有常规三轴固结压力室不能进行高温和变化温度荷载试验的缺陷, 提供了一种灵敏度高的温控固结压力室系统, 满足变化温度荷载作用下饱和土试样热固结试验的需要。压力室内温度控制在 17℃~100℃ 范围内变化, 试验时根据土样所要模拟的实际承受的温度荷载大小以及温度变化过程来确定。

在对饱和土样进行常规三轴固结试验时(即常温、等温条件), 试样的体积变化与试样孔隙水的排出



注: ①压力室电热偶, ②轴向压力杆, ③轴套, ④顶盖, ⑤试样帽, ⑥压力室侧壁, ⑦试样, ⑧压力室筒状电热板, ⑨橡皮膜, ⑩透水石, ⑪固定螺栓, ⑫ O 型橡胶圈, ⑬压力室底座, ⑭周围压力连接孔, ⑮孔隙水压力量测孔, ⑯试样排水孔, ⑰排水管, ⑱温度调控器, ⑲水容器侧壁, ⑳水容器电热板, ㉑水容器底座, ㉒水容器电热偶, ㉓支架, ㉔水容器温度调控器, ㉕试样排水管, ㉖孔隙水压力量测管, ㉗周围压力连接管, ㉘阀门。

图 1 热固结试验装置

Fig. 1 Test apparatus for thermal consolidation



量相等,即只要测得孔隙水的排出量就可知试样的体积应变。但在非等温条件下,由于孔隙水和土颗粒本身的热膨胀或收缩,其体积变化很难用上述方法来准确测定。通过量测压力室内水的体积变化来间接确定试样的体积变化是一个值得重视的方法。但在普通三轴固结试验中,由于试验装置本身(如有机玻璃压力室、塑料排水管和橡皮膜)的受热变形,以及由于孔隙水和土颗粒本身的热膨胀或收缩,试样的体积变化量不能直接由孔隙水的排出量来准确测定,因此试验结果存在很大误差。将压力室和量测管路等部件用金属材料来代替(图1)可以获得满意的精度。具体可由压力室压力控制系统来量测压力室内水的体积变化,由反压力系统量测试样内孔隙水的体积变化。通过对比分析,即可验证等温条件下两种量测结果的一致性,进而反映非等温条件下孔隙水和土颗粒的热体积变化效应。

此外,由于加压系统和排水系统处于实验室温度环境下(如 $17^{\circ}\text{C}$ ),而试样和压力室内的水则处于试验设定温度下(如 $50^{\circ}\text{C}$ ),从而导致排水管内不同部位水温有一定的梯度变化,也影响到量测的精度。为此,特别将连接压力室与压力控制和量测系统的金属管置于装满水的温度恒定(即实验室温度)容器内。这样,当压力室内温度变化时,不会影响到水体积变化的量测。这样,不但可以精确量测试样的热体积应变、孔隙水压力,同时还可以测得试验室温度下试样内孔隙水的排出量。

## 2 典型饱和土的热固结试验特征

### 2.1 试验土样基本性质

选用一种黏性土进行试验。经风干、碾散、过 $0.5\text{ mm}$ 筛制备扰动土样。基本物理性质指标为:塑限 $w_p=15.8\%$ ,液限 $w_L=34.9\%$ ,塑性指数 $I_p=19.1$ ,土粒比重 $G_s=2.71$ 。试样尺寸为 $f=3.91\text{ cm}$ , $h=8\text{ cm}$ ,制备含水率为 $29.3\%$ ,干重度 $\gamma_d=14.9\text{ kN/m}^3$ 。试样经真空抽气加蒸馏水饱和,饱和度 $S_r>95.1\%$ 。

### 2.2 等温条件下孔隙水压力和体应变的测定

图2给出未加热等温固结过程中(即室温 $17^{\circ}\text{C}$ ,围压 $s'_3=50\text{ kPa}$ )由试样内部孔隙水的变化(即反压力控制系统)和压力室内水的变化(即周围压力控制系统)分别测定的体应变的比较。由图2可以看出,两种量测结果得到的体应变随时间的固结过程是比较一致的。这表明,如果在不排水加热条件下则可由压力室内水体的变化来测定试样的体积变化(即加热或冷却过程中试样可能产生膨胀或收缩效应)。也应注意,在固结的后期(见图2,时间为 $958\text{ min}$ 时),由

压力室量测的体应变和由试样内部量测的体应变分别为 $7.7\%$ 和 $6.8\%$ ,即试样内部直接测定的体应变略有减小,这与压力室内水的进入所引起的压力室内温度的波动等有关。亦即,试样内孔隙水的排出导致压力室内水体的增加,从而使压力室内的水温发生改变。

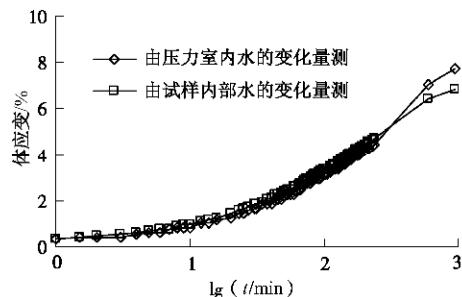


图2 等温条件下体应变与时间关系

Fig. 2 Relationship between volumetric strain and time under isothermal conditions

图3给出等温条件下固结过程中(即室温为 $17^{\circ}\text{C}$ ,围压 $s'_3=50\text{ kPa}$ )孔隙水压力的消散过程。对于本次试验用土,经过 $958\text{ min}$ ,孔隙水压力可消散至 $4\text{ kPa}$ 。

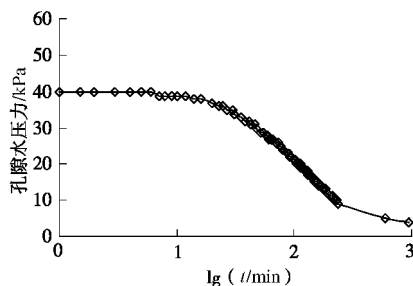


图3 孔隙水压力与时间关系

Fig. 3 Relationship between pore pressure and time under isothermal conditions

### 2.3 不排水升温过程中的温度和孔隙水压力

图4给出不排水条件下加热升温过程中试样内的温度演化过程(实际上为压力室内水的温度变化)。图4中,曲线1为由 $17^{\circ}\text{C}$ 升至 $50^{\circ}\text{C}$ (第1次升温,记为 $17^{\circ}\text{C}\rightarrow 50^{\circ}\text{C}$ )过程中温度的演化,曲线2为试样达到 $50^{\circ}\text{C}$ 的稳定值后经过后续等温条件下的排水固结过程(见2.4节的分析)再继续由 $50^{\circ}\text{C}$ 升至 $80^{\circ}\text{C}$ (第2次升温,记为 $50^{\circ}\text{C}\rightarrow 80^{\circ}\text{C}$ )过程中温度的演化过程。为后面方便分析温度演化的趋势,曲线3给出将第1次升温达到稳定后的时间(即 $102\text{ min}$ )作为第2次升温的时间起点所绘制的曲线(即将曲线2右移 $102\text{ min}$ )。

由图4可以看出,在试样温度随时间逐渐升高的过程中,其上升速率不断减小,并逐渐稳定在某一设定温度值(如 $90^{\circ}\text{C}$ )。也就是说,随着温度的升高,要上升同样的温度幅值所需要的时间会逐渐增大。对于本试验装置和试验土样,温度由 $17^{\circ}\text{C}$ 升至 $50^{\circ}\text{C}$ 大约

需要 102 min, 而温度由 50℃ 升至 80℃ 大约需要 219 min。

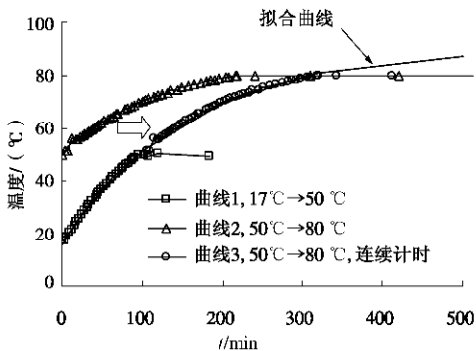


图 4 不排水条件下的加热过程

Fig. 4 Temperature evolutions by heating under undrained conditions

可以用下面的指数关系来描述温度荷载的变化过程, 即

$$q(t) = a q_{\max} \{1 - \exp[-w(t - t_0)]\} \quad (1)$$

式中  $q(t)$  为升温过程中试样的温度;  $q_{\max}$  为水的最大温度变化幅度, 一般取 100℃;  $w$  为与温度升高速率变化有关的参数, 与试验装置和土样有关;  $t_0$  为温度由最低水温 0℃ 上升至试验初始温度所需要的时间, 如本试验中第 1 次升温的 17℃ 或者第 2 次升温的 50℃;  $a$  为拟合参数, 实际上与试验仪器所处环境及压力室的保温性能等因素有关。

根据本试验, 可取  $w = 0.00652 \text{ min}^{-1}$ ,  $a = 0.9$ , 拟合结果见图 4。

图 5 给出不排水条件下两个加热升温过程中 (即曲线 1, 17℃→50℃ 和曲线 2, 50℃→80℃) 试样内的孔隙水压力变化。由图 5 可见, 在压力室内的温度逐渐升高的过程中, 饱和试样内温度诱致的孔隙水压力也不断增大, 然后逐渐趋于稳定。如第 1 次和第 2 次加热过程中 (曲线 1 和曲线 2) 其最终稳定值分别可达到 27 kPa 和 45 kPa, 表明温度诱致的孔隙水压力是非常显著的。

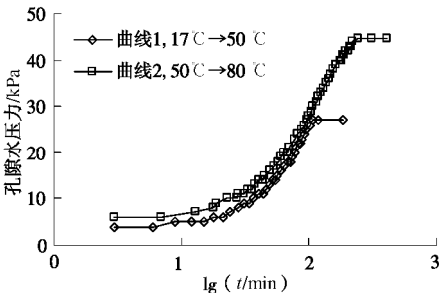


图 5 不排水加热过程中的孔隙水压力

Fig. 5 Pore pressure induced by heating under undrained conditions

此外还可以看出, 当温度由 17℃ 升至 50℃ 时 (曲

线 1), 孔隙水压力达到稳定值所需的时间大约为 108 min (图 5), 比压力室内温度升高至稳定值所需时间 (如第 1 次加热需 102 min) 略有滞后, 实际上也反映了试样内温度变化相对于压力室内温度变化的滞后性。这在热固结试验结果的分析中需要引起足够的重视。

2.4 热固结过程分析

图 6 给出当试样温度升高至 50℃ 时, 打开排水阀门允许试样排水 (或吸水) 后试样体积变化过程以及孔隙水压力的变化过程。

由图 6 (a) 可以看出, 温度升高后, 在等温条件下 (曲线 1, 试样温度为 50℃; 曲线 2, 试样温度为 80℃), 由于孔隙水压力的消散 (图 6 (b)), 即孔隙水的排出, 试样的固结体应变不断增大 (这里固结体应变为正, 表明试样为排水过程), 稳定后的固结体应变分别为 0.73% 和 2.84%。

当然, 比较图 6 (a)、(b) 可以看出, 孔隙水压力的消散时间与试样的固结体应变的完成时间相等, 例如当试样温度为 50℃ 时, 固结体应变达到稳定所需要时间大约为 113 min。

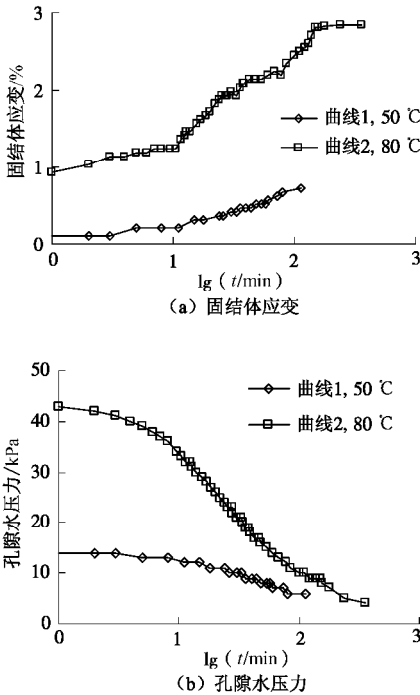


图 6 温度升高后试样的固结过程

Fig. 6 Consolidation processes under isothermal and drained conditions after heating

由图 7 可以看出, 两个升温阶段后压力室内的温度在排水固结过程中会有一定的波动, 其波动范围分别为  $50 \pm 0.5^\circ\text{C}$  和  $80 \pm 0.5^\circ\text{C}$ , 一般认为能够满足普通热固结试验的精度要求。波动的原因是由于试验室环境温度的变化、压力室的散热效应以及试样内的孔隙水

的进出所导致的压力室内水体的热冷变化等因素引起的。

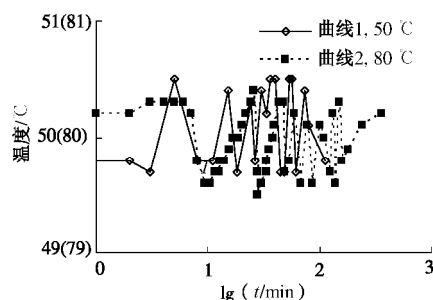


图 7 加热后等温排水条件下温度波动过程

Fig. 7 Temperature fluctuation under isothermal and drained conditions after heating

### 3 结 论

(1) 介绍一种热固结试验装置, 该装置用于岩土工程中饱和土圆柱形试样的热固结试验。可用来测定温度荷载和外力荷载耦合作用下试样的孔隙水压力和热固结变形量。该试验装置提供一种灵敏度高的温控固结压力室系统, 克服了常规三轴固结压力室不能进行温度变化试验的缺陷。

(2) 压力室内温度控制在  $17^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$  范围内变化, 等向周围固结压力范围为  $0\sim 3\text{ MPa}$ 。试验时可根据土样所要模拟的温度荷载大小、温度变化过程以及外力荷载来确定。

(3) 针对典型饱和黏性土, 对试样的温度演化、孔隙水压力变化以及热固结体积应变的测定结果进行了分析, 结果表明试验仪器性能良好。

#### 参考文献:

- [1] 白 冰, 赵成刚. 温度对黏性土介质力学特性的影响[J]. 岩土力学, 2003, **24**(4): 533 - 537. (BAI Bing, ZHAO Cheng-Gang. Temperature effects on mechanical characteristics of clay soils[J]. Rock and soil Mechanics, 2003, **24**(4): 533 - 537. (in Chinese))
- [2] TIDFORS M. Temperature effect on preconsolidation pressure[J]. Geotechnical Testing Journal, 1989, **12**(1): 93 - 97.
- [3] TOWHATA I, KUNTIWATTANAKUL 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.
- [4] ABUEL H M, BERGADO D T, BOUAZZA A, et al. Volume change behaviour of saturated clays under drained heating conditions: experimental results and constitutive modeling[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, **44**(8): 942 - 956.
- [5] HUECKEL T, BORSETTO M. Thermoplasticity of saturated clays and shales: constitutive equations[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **116**(12): 1765 - 1795.
- [6] BRUYN D DE, THIMUS J F. The influence of temperature on mechanical characteristics of Boom clay: the results of an initial laboratory program [J]. Engineering Geology, 1996, **41**: 117 - 126.
- [7] CEKEREVAC C, LALLOUI L, VULLIET L. A novel triaxial apparatus for thermo-mechanical testing of soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2005, **28**(2): 161 - 170.
- [8] DELAGE P, SULTAN N, CUI Y J. On the thermal consolidation of Boom clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**(4): 343 - 354.
- [9] ABUEL 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.
- [10] WIEBE B, GRAHAM J, TANG G X, et al. Influence of pressure, saturation, and temperature on the behavior of unsaturated sand-bentonite[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**: 194 - 205.
- [11] BLATZ J, GRAHAM J. A system for controlled suction in triaxial tests[J]. Geotechnique, 2000, **50**(4): 465 - 469.
- [12] 陈正汉, 谢 云, 孙树国, 等. 温控土工三轴仪的研制及其应用[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(8): 928 - 933. (CHEN Zheng-han, XIE Yun, SUN Shu-guo, et al. Temperature controlled triaxial apparatus for soils and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(8): 928 - 933. (in Chinese))
- [13] TANG A M, CUI Y J, BARNET N. Thermo-mechanical behavior of a compacted swelling clay[J]. Géotechnique, 2008, **58**(1): 45 - 54.