

# 多通道土膨胀力自动化测试系统研制

刁晓红 吴中伟 刘 艳 王嘉怡

(岩土工程事业部工程实验研究中心)

〔摘要〕 详细介绍了自主研发的多通道土膨胀力自动化测试系统,该试验系统具有自动测试并记录土样膨胀力的功能。试验系统主要由恒定体积结构系统、高精度力传感系统和数据采集显示系统构成。试验系统能达到的最大测力值为2000 N,分度值为0.1 N,恒体积的判稳指标为0.01 mm。运用所研制的试验系统,对钠基膨润土重塑试样进行了一系列的膨胀力测试试验,并与人工平衡法进行了对比分析。试验结果表明:自动膨胀力测试系统测试结果标准差大幅度减小,测试结果的平行度较好,数据稳定,基本不受外界因素的影响,试验全程无人值守,实现了试验数据的自动采集、存储、处理,在进行土膨胀力研究中具有较大的推广价值。

〔关键词〕 膨胀力 恒体积 自动化 数据处理

## 1 引言

膨胀土是自然地质过程中形成的一类与水发生物理化学反应而引起自身体积变化的地质体,其主要特征之一是干缩湿胀,由此给公路、铁路、渠道边坡以及堤坝等工程建筑物带来巨大的危害,常称其为“工程中的癌症”,由此每年给全球带来巨大的经济损失,而我国膨胀土分布比较广泛,大量工程建设越来越多地向膨胀岩土地区发展,由膨胀岩土引起的岩土工程问题日益引起国内外岩土工程界的关注。膨胀力是膨胀土特性的重要指标之一,其测量的准确性对膨胀土地基及相关的工程设计、施工等均有着重要的指导意义<sup>[1-3]</sup>。

根据《岩土工程基本术语标准》(GB/T 50279-2014)的定义,膨胀力是在不允许侧向变形下,保持土体充分吸水而不发生竖向膨胀所需施加的最大压力值<sup>[4]</sup>。常见的试验方法有膨胀反压法、加压膨胀法和平衡加压法,其中国际岩石力学学会及国家标准中推荐的方法是平衡加压法,即在试样吸水开始膨胀时,逐步施加荷载维持体积不变,当膨胀量大于0.01 mm时加下一级平衡荷载直至变形稳定,此时的荷载经公式计算得出膨胀力。

近几年学者开展膨胀力研究多采用固结仪<sup>[5]</sup>,如丁振洲等使用高压固结仪开展膨胀力变化规律试验研究,张波等利用低压固结仪开展不同膨胀状态

下膨胀岩剪切蠕变试验研究,孙发鑫等利用改进的三向膨胀仪对高庙子膨润土 GMZ001 三向膨胀力特性研究<sup>[6]</sup>。在部分文献中,有学者采用恒体积固结仪法进行膨胀力的测试,这些研究有益地推动了膨胀力研究,但在膨胀力测试方法方面,无论竖向还是三向,这些研究均以平衡加压法为基础,本质上未脱离人工参与下的“膨胀-压缩-测定压缩荷载”过程,在反复的压缩和膨胀过程中体积不能保持恒定从而会导致试样扰动,且测试过程复杂。

规程推荐的膨胀力测试采用加荷平衡法,需要人工加荷、读数、记录,为此,部分科研院所进行自动化探索<sup>[7]</sup>,采用改进的竖向膨胀力测定仪,改装力传感器或土压力计,避免了人工加荷平衡,但仍需人工读数、记录,并未实现试验过程自动化。国外设备中尚未见可直接用于土膨胀力自动化测试的设备,经过加配测试系统和软件升级改造后能用于土膨胀力试验,但从经济方面而言性价比过低。

针对前人在土膨胀力测试方面存在的智能化程度低的现象,本文通过自主研发解决膨胀力试验过程存在耗费大量人力长期值守、试验数据不够精准等问题,研制出一款 TPL-1 型土膨胀力自动测试系统,高效、精准地记录岩土膨胀力特性发展过程,为膨胀土地区的工程勘察和设计提供基础试验数据支撑。

作者简介:刁晓红(1984 ),女,河南省南阳市人,高级工程师,从事岩土工程与材料科学试验研究工作。

## 2 自动化膨胀力测试系统的构成

自动化土膨胀力检测系统的设计基于恒定体积结构、高精度检测和自动控制技术等三个原理设计而成,主要由刚性恒体积结构系统、高精度力传感系统和数据采集显示系统等三部分构成<sup>[2]</sup>,如图1所示。为了满足多组平行试验研究需要,将对试验测试系统进行多通道扩展,实现一套采集显示软件控制多个试样同步开展试验,实物如图1(b)所示。

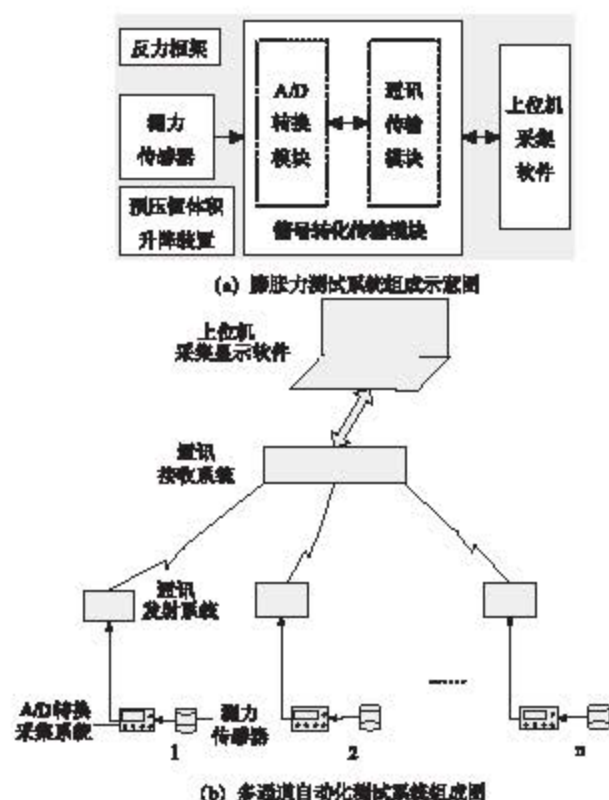


图1 多通道土膨胀力自动化测试系统

### 2.1 恒定体积结构系统

恒定体积结构系统主要的功能是保证试验测试过程中试样处于稳定不变的空间内,包括结构框架设计和恒体积升降装置设计。

#### 2.1.1 结构反力框架

结构框架的设计采用不锈钢型材构成,其受拉性能和承压性能通过力学计算选取适宜规格,加工成为图2所示的反力框架,通过液压千斤顶和精密压力表对结构框架施加21kN的力值,在框架底座上方架设磁性表架,用千分表记录框架横梁的变形情况。



图2 二立柱框架的稳定性能试验

通过试验,框架的变形量差别不大,72 h内变形均在0.001 mm以内,按照设计的性能满足要求的情况下,以节约成本、美观实用的原则,选用二立柱式框架。最终,选择二立柱式框架的尺寸为表1所示。

表1 二立柱式恒定体积框架的参数表

| 指标 | 立柱直径   | 立柱间距   | 基座尺寸            | 横梁尺寸                  |
|----|--------|--------|-----------------|-----------------------|
| 参数 | φ16 mm | 200 mm | 长225 mm×宽200 mm | 长225 mm×宽36 mm×厚20 mm |

#### 2.1.2 恒体积升降装置

土膨胀力的试验过程中,应尽量减少预压力对试样的扰动和对力传感器的影响,基于此要求,设计了如图3所示的抬升式伺服电机升降装置以完成恒体积的要求。为了保障试验过程试样处于恒体积状态,在测试膨胀力时选用伺服电机和位移传感器实时监测试样体积的变化,当试样位移变形量大于0.005 mm时,电机启动直至变形小于0.001 mm。

### 2.2 高精度力传感系统

高精度力传感系统由力传感器和A/D转换模块组成,力传感器采集膨胀力信号,A/D将信号变

换成数字信号以便进行传输。针对膨胀土的膨胀特性和膨胀力的统计分析,选用形状合适、精度适宜的S型力传感器。应用先进的密封工艺,密封等级达到IP65,能在高湿度环境中工作;具有较强抗扭、抗侧和抗偏能力,其技术参见表2。该类传感器选用优质弹性钢和采用箔式应变计工艺,具有较好的线性度和重复性,具有测量精度高、稳定性性能好、温度漂移小、输出对称性好等性能,保证了传感器的长期稳定性,如图4所示。

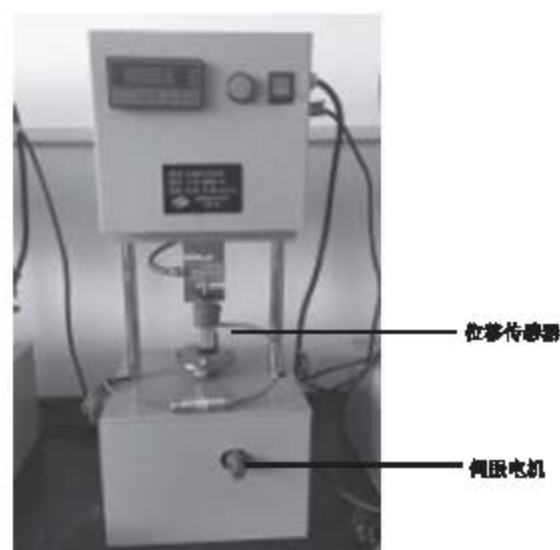


图3 恒定体积结构实物图

A/D转换模块采用AD-S324型,其结构示意图如图5所示,该模块适合工业现场电源(24V DC),

测量信号范围 $\pm 30\text{ mV}$ ,具有模数转换、数字化标定、去皮、置零、零点跟踪、开机置零、防抖动等功能;所有设定工作通过串口完成,具有防反接、防过压、瞬间抑制等多重保护,使用温度范围 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,各端口功能见表3。

### 2.3 数据采集显示系统

数据采集显示系统采用可编程控制器(PLC)为处理器,选择台达的DVP-EH系列控制器,该系列最大I/O点数512点,内存容量16K Steps,运算执行速度 $0.24\mu\text{s}$ (基本指令),通讯接口有内置RS-232与RS-485,相容MODBUS ASCII/RTU通讯协议,资料存储器10000字节,档案存储器10000字节,该系列应用200kHz高速计数器和内置独立200kHz脉冲输出功能(提供伺服定位指令),支持数字,模拟,通讯,内存功能卡与资料设定器等功能,整体的数据采集显示连接图如图6所示。

表2 S型测力传感器的技术参数

| 灵敏度            | 非线性                 | 滞后                  | 重复性                 | 蠕变                                | 灵敏度温度系数                                        | 输入电阻                 | 输出电阻                | 安全过载                | 微励电压        |
|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-------------|
| mV/V           | $\leq \% F \cdot S$ | $\leq \% F \cdot S$ | $\leq \% F \cdot S$ | $\leq \% F \cdot S/30\text{ min}$ | $\leq \% F \cdot S/10\text{ }^{\circ}\text{C}$ | $\Omega$             | $\Omega$            | $\leq \% F \cdot S$ | V           |
| $2.0 \pm 0.05$ | $\pm 0.03$          | $\pm 0.03$          | $\pm 0.03$          | $\pm 0.03$                        | $\pm 0.03$                                     | $350 \pm 20\ \Omega$ | $350 \pm 5\ \Omega$ | 150                 | 10 V - 15 V |

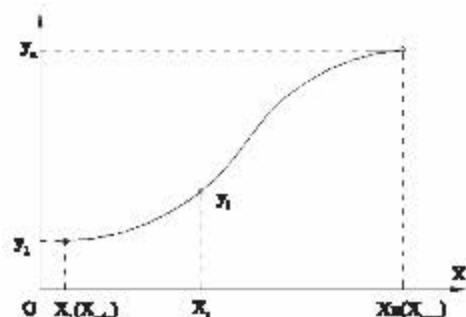


图4 传感器的传输特性曲线示意图

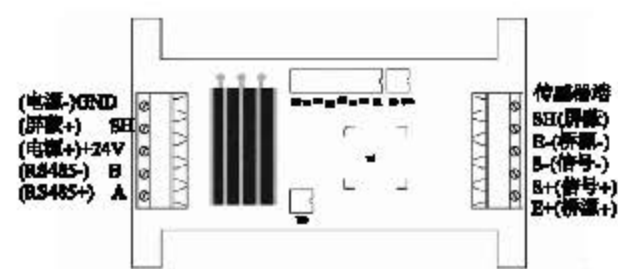


图5 AD-S324 结构示意图

表3 AD-S324 的各端口功能表

| 端口 | 传感器端口                         | 电源传输端                                 | 地址设置                                         | 波特率设置                                                                                            | 校验位设置             | 通讯终端电阻                                                                                           |
|----|-------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | SH、E-、E+、S-、S+                | GND、+24V、SM、A、B                       | S1-S5                                        | S6-S7                                                                                            | S8                | U、D                                                                                              |
| 功能 | SH屏蔽; E-桥源-、E+桥源+、S-信号-、S+信号+ | GND电源-、+24V电源+、SM屏蔽、A为RS485+、B为RS485- | 各个位置拨到OFF上时,对应的地址都为0;模块地址为S1-S5地址之和,范围为0-31。 | 4800 (S6: OFF, S7: OFF); 9600 (S6: ON, S7: OFF); 19200 (S6: OFF, S7: ON); 38400 (S6: ON, S7: ON) | OFF 为无校验, ON 为偶校验 | U 拨到 ON 上时 (5V) A 上拉 1K 欧姆电阻, D 拨到 ON 上时 B 下拉 (GND) 1K 欧姆电阻。当通讯距离过长影响通讯时,应在最远端的模块上将 U、D 拨到 ON 上。 |

上位机组态软件编程采用MCGS进行组态, MCGS软件系统包括组态环境和运行环境两个部

分。组态环境相当于一套完整的工具软件,帮助用户设计和构造自己的应用系统,是生成应用系统的

工作环境,完成动画设计、设备连接、编写控制流程、编制工程打印报表等全部组态工作后,生成扩展名为 .meg 的工程文件;运行环境则按照组态环境中构

造的组态工程,以用户指定的方式运行,并进行各种处理,完成用户组态设计的目标和功能,完成对系统的控制工作。

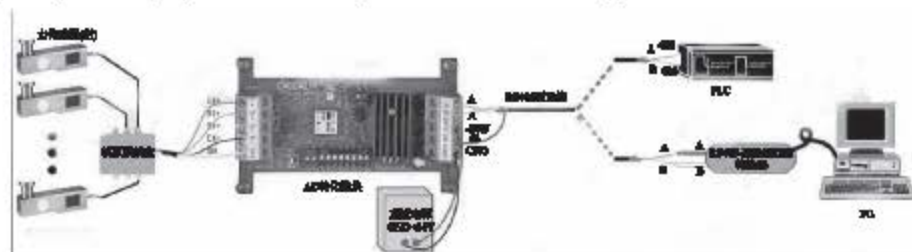


图6 数据采集显示连接示意图

PLC 编程采用 Delta WPLSoft,应用梯形图可以便捷的完成程序设计,PLC 的 RS485 通信程序如图

7(a)所示,系统上位机开机界面如图 7(b)所示,数据显示窗口如图 7(c)所示。



图7 数据采集显示系统编程及界面

### 3 系统的性能试验

#### 3.1 系统的性能测试

经过各部分加工组装和整体调试,完成的多通

道土膨胀力自动化测试系统如图 8(a)所示,采用标准测力仪和 2kN 标准力传感器,对自动化岩土膨胀力检测系统进行性能测试,其标定的控制界面如图 8(b)所示。



图8 系统的整体效果图

性能测试结果表明,8个通道的示值误差和重复度误差均符合国家检定规程内的指标要求。以第2通道为例,其传感器编号为160125501,各测试点位的最大示值相对误差为0.7%,最大重复性误差为0.1%,其测试结果见表4。

#### 3.2 系统的性能指标

自动化测试系统的性能满足《土工试验方法标准》GB/T50123-1999和《土工试验规程》(SL237-1999)等对土膨胀力性能测试的主要设备性能要

求,其性能参数见表5。

表4 性能测试的结果

| 序号 | 标准测力仪示值(N) | 示值相对误差(%) | 重复性(%) |
|----|------------|-----------|--------|
| 1  | 100        | +0.3      | 0.0    |
| 2  | 200        | +0.4      | 0.0    |
| 3  | 400        | +0.7      | 0.1    |
| 4  | 800        | +0.6      | 0.1    |
| 5  | 1200       | +0.6      | 0.1    |
| 6  | 1600       | +0.4      | 0.0    |
| 7  | 2000       | +0.3      | 0.0    |

表5 自动化检测系统的性能参数

| 参数      | 指标                   |
|---------|----------------------|
| 测试量程    | 0-2 kN               |
| 测量精度    | 1.0级                 |
| 测量分度值   | 0.1 N                |
| 额定功率    | 750 W                |
| 工作电压    | 220 V 50 Hz          |
| 升降装置速比  | 1:24                 |
| 压缩空间    | 50 mm                |
| 采集软件通道数 | 64 通道                |
| 通讯接口    | RS-485               |
| 资料存储器   | 10,000 字节            |
| 主机外形尺寸  | 240 mm×220 mm×600 mm |

4 工程应用案例

4.1 试验研究方案

为保障试样的均匀性,采用某输水工程的衬砌工程土料进行试验,试验仪器采用规范中推荐的固

结试验仪和新型膨胀力自动化试验仪两种类型进行对比,如图9所示。

具体试验方案为,用钠基膨润土添加一部分粉土、粘土等配成膨胀性土,称量固定质量的膨润土配置成为约100g的膨胀性土,其质量、密度、含水率均按照同一指标进行控制,按照表6进行配制试样。由2个试验人员进行对比试验,每人制作8个样品,4个试样放置在自动膨胀力测试仪上试验,4组采用原有试验仪进行试验。

4.2 试验结果及对比分析

两名试验人员采用人工加荷平衡法在人工式试验设备上上进行多天的膨胀力测试,并记录实验过程汇总的加荷情况和试验结果。同时,在采用自动化测试设备进行4组样品同步装样、同步开展试验,由电脑自动记录试验过程数据,试验结束后试样变形状况及试验曲线如图10所示,对比试验结果见表7。



图9 对比试验采用试验仪器实物图

表6 开展试验用土样的物性指标

| 配制方案      | 湿密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 干密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 含水率<br>(%) | 孔隙率<br>(%) | 液限<br>(%) | 塑限<br>(%) | 塑性<br>指数 | 自由膨胀率<br>(%) |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------|------------|------------|-----------|-----------|----------|--------------|
| 膨润土:粘土:粉土 |                             |                             |            |            |           |           |          |              |
| 5:3:2     | 1.98                        | 1.54                        | 37         | 43         | 31.8      | 20.6      | 11.2     | 345          |

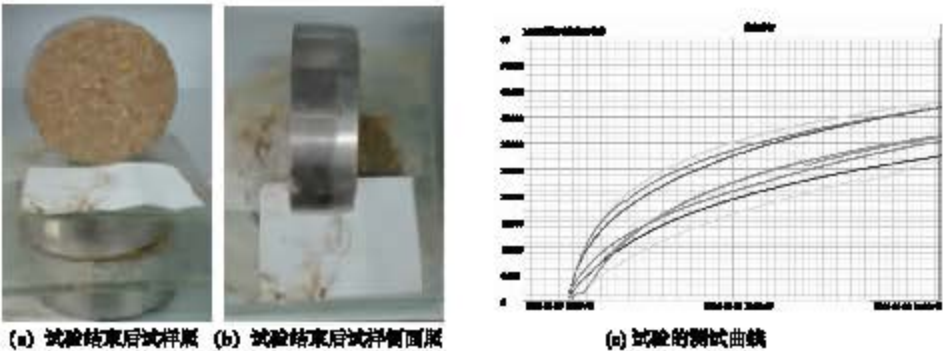


图10 自动化试验系统试验结束后试样状况

通过开展原膨胀力试验设备和自动膨胀力测试仪之间的仪器对比、人员比对试验,结果显示:

(1) 试验人员利用原膨胀力试验设备和自动膨胀力测试仪的检测结果范围大致相同,平均值误差

表7 不同试验设备的膨润土试样对比试验结果

| 序号 | 样品编号 | 试验人员  | 试验设备  | 试验结果      |          |
|----|------|-------|-------|-----------|----------|
|    |      |       |       | 试验数值(kPa) | 平均值(kPa) |
| 1  | 1-1  | 检测员 A | 自动化系统 | 154.1     | 154.1    |
| 2  | 1-2  |       |       | 153.8     |          |
| 3  | 1-3  |       |       | 155.1     |          |
| 4  | 1-4  |       |       | 153.4     |          |
| 5  | 1-5  |       | 人工式设备 | 151.0     | 153.3    |
| 6  | 1-6  |       |       | 154.6     |          |
| 7  | 1-7  |       |       | 153.1     |          |
| 8  | 1-8  |       |       | 155.6     |          |
| 9  | 2-1  | 检测员 B | 自动化系统 | 153.1     | 152.3    |
| 10 | 2-2  |       |       | 150.4     |          |
| 11 | 2-3  |       |       | 152.3     |          |
| 12 | 2-4  |       |       | 153.5     |          |
| 13 | 2-5  |       | 人工式设备 | 161.4     | 160.5    |
| 14 | 2-6  |       |       | 157.5     |          |
| 15 | 2-7  |       |       | 158.1     |          |
| 16 | 2-8  |       |       | 164.8     |          |

较小,均在规范要求的误差范围内;

(2)相比人工膨胀力试验设备,自动化膨胀力测试系统完成的测试结果标准差大幅度减小,测试结果的平行度较好,说明测试数据稳定,基本不受测试人员的影响;

(3)人工膨胀力试验设备在试验中只提供膨胀变形稳定后膨胀力数据,自动膨胀力测试系统可记录土样膨胀发展的全过程。自动系统的测试数据显示,相同的土样因为制样等原因,即使最终稳定后膨胀力相同,其膨胀发展的过程也可能不同,自动膨胀力测试系统有利于开展土膨胀性方面的科学试验研究。

(4)人工膨胀力试验设备在试验过程中需要2名试验人员至少48 h以上轮流值守,而自动化系统的测试时检测结果全程自动化测试,对比可得原设备耗用人工成本较大,在试验任务量大时,建议采用自动化系统。

## 5 结论

本文介绍了一种自主研制的 TPL-1 型多通道自动化膨胀力测试系统,该系统能够在无人值守的状态下,完成土膨胀力的自动测试,技术先进,符合国家检定规程的各项指标要求,可用于岩土工程力学性能的试验研究。

(1)研制的多通道全自动土膨胀力自动化测试系统,采用基于 PLC 编程的自动控制技术,试验全程无人值守,实现了数据自动采集、存储、处理,实时显示数据和图表,生成试验成果报表;采用可拓展的多通道技术,实现单套终端采集设备控制多路测试系统,最大拓展至 64 通道,实现多组试验同步开展,

提高了成果对比度和工作效率。

(2)采用高精度 S 型压力传感器,能够高效、智能、精准的检测岩土膨胀力;基于抬升式的刚性伺服升降系统,实现了试样恒体积条件,克服了人工加压平衡误差,避免了试样结构的扰动。传感器处于固定状态测力,避免传感器的波动误差,结构稳定且体积小巧,适用于室内、现场试验。

(3)将自动化测试系统在水利工程中进行应用,测试结果标准差大幅度减小,测试结果的平行度较好,数据稳定,基本不受外界因素影响,测试过程简便,在进行土膨胀力研究中具有良好使用效果,具有一定的推广价值。

## 参考文献

- [1] 丁振洲,郑颖人,李利晨. 膨胀力变化规律试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(7):1328-1332.
- [2] 孙即超,王光谦,等. 膨胀土膨胀模型及其反演[J]. 岩土力学,2007,28(10):55-59.
- [3] 董晓端. 南水北调中线工程潘王坎段膨胀岩(土)膨胀变形规律研究[D]. 武汉:中国地质大学,2010.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50279-2014,岩土工程基本术语标准[S]. 北京:中国计划出版社,2015.
- [5] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123-1999,土工试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社,1999.
- [6] 孙发鑫,陈正汉,秦冰,等. 高庙子膨润土-砂混合料的三向膨胀力特性[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(1):200-207.
- [7] 李海涛,刘军定,同霞,等. 新型膨胀土膨胀力测试仪器的研制及测试应用[J]. 西安科技大学学报,2013,33(6):674-679.
- [8] 刁晓红,吴中伟,李振灵,等. 多通道岩土膨胀力自动化测试系统:中国,ZL201620683582.2[P]. 2016年11月30日.