

# 考虑温度影响的高庙子膨润土强度与变形特性试验研究

陈 皓<sup>1, 2, 3</sup>, 吕海波<sup>3</sup>, 陈正汉<sup>4</sup>, 秦 冰<sup>4</sup>

(1. 南京水利科学研究所 岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098;  
3. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 4. 后勤工程学院 建筑工程系, 重庆 401311)

**摘要:** 为了探讨温度对高庙子膨润土的强度和变形特性的影响, 使用高温高压土工三轴仪, 共做 81 个高压高温高庙子(GMZ)膨润土的三轴不排水剪切试验, 系统分析干密度、围压、温度和含水率对高庙子膨润土强度与变形特性的影响。结果表明: (1) 围压和干密度对高庙子膨润土的破坏形态的影响很大; 无围压及较高干密度时试样均呈现脆性破坏, 较高围压和较低干密度时, 试样主要呈塑性破坏; (2) 高庙子膨润土的强度随含水率增大而减小; 较低干密度时, 偏应力-轴向应变曲线的位置随温度升高而上移; 但较高干密度时的情况则完全相反; (3) 初始杨氏模量在干密度较低时随温度升高呈现增加的趋势, 而在干密度较高时则相反; 随着含水率的升高, 初始杨氏模量总体上不断减少; (4) 随着温度升高, 泊松比增加; 干密度和含水率对泊松比的影响不大; (5) 建立高庙子膨润土的黏聚力和内摩擦角随干密度、含水率和温度变化公式。研究成果可为分析缓冲材料的热-水-力耦合性状提供科学依据。

**关键词:** 土力学; 高庙子膨润土; 高温高压土工三轴仪; 变形强度特性; 强度参数; 变形参数

**中图分类号:** TU 43      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6915(2018)08-1962-18

## Strength and volume change of buffer material under high temperature and pressure

CHEN Hao<sup>1, 2, 3</sup>, LV Haibo<sup>3</sup>, CHEN Zhenghan<sup>4</sup>, QIN Bing<sup>4</sup>

(1. *Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210024, China*; 2. *College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China*; 3. *College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China*; 4. *Department of Architecture and Civil Engineering, Logistic Engineering University, Chongqing 401311, China*)

**Abstract:** In order to study the deformation and strength characteristics of GMZ bentonite under high temperature and high pressure, undrained triaxial shearing tests were conducted to 81 specimens with the high-pressure triaxial apparatus with temperature control. The influences of dry density, confining pressure, temperature and water content on deformation and strength characteristics of GMZ bentonite were investigated. The results show that the failure forms of GMZ bentonite were significantly influenced by confining pressure and dry density. The specimens tested under unconfined conditions were all in brittle failure. The specimens with low dry density under

**收稿日期:** 2017-06-22; **修回日期:** 2018-02-28

**基金项目:** 国家重点研发计划(2017YFC0405100); 国家自然科学基金资助项目(11672330, 11072265)

Supported by the National Key Research and Development Program of China(Grant No. 2017YFC0405100) and National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11672330 and 11072265)

**作者简介:** 陈 皓(1990-), 男, 2010 年毕业于南昌大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事非饱和土与特殊土方面的研究工作。E-mail: chen hao4912@163.com. 通讯作者: 吕海波(1973-), 男, 现任教授、博士生导师。E-mail: lhb@glut.edu.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0772

high confining pressure exhibited largely the plastic failure, while those with high dry density exhibited brittle failure. The strength of GMZ bentonite specimens decreases with the increasing of water content. The influence of temperature and dry density on strength is complex. The position of deviator stress-axial strain curves rises with the increasing of temperature for specimens with low dry density, but it behave oppositely for specimens with high dry density. The initial Young's modulus of the specimen with low dry density also rises with the increasing of temperature, but it's opposite for specimens with high dry density. The initial Young's modulus of specimens generally decreases with the increasing of water content. Poisson's ratio gradually decreases with the increasing of confining pressure for specimens with low dry density, but this tendency is not obvious for specimens with high dry density. Poisson's ratio is less influenced by temperature and water content. The formulae of cohesion and internal friction angle changing with dry density, water content and temperature were established for GMZ bentonite specimens.

**Key words:** soil mechanics; GMZ bentonite; high-temperature and high-pressure triaxial apparatus; deformation and strength characteristics; strength parameter; deformation parameter

## 1 引言

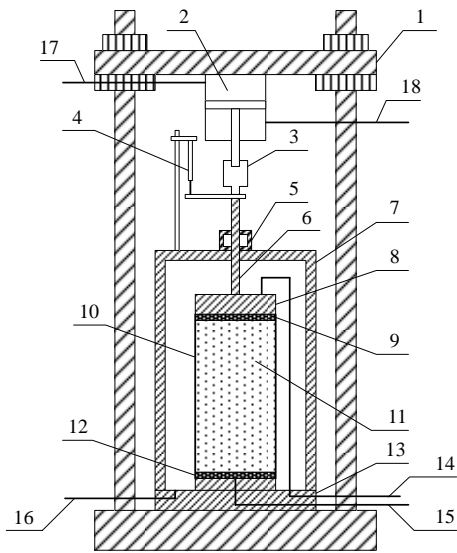
随着我国核工业的不断发展,核电站乏燃料的存量越来越大,成为我国高放废物的主要来源<sup>[1]</sup>。对其中的高放射性废弃物,目前国际上公认的最佳处置方式是深部地质处置<sup>[2]</sup>,膨润土被认为是理想的缓冲/回填材料,用于封填废物包装罐和基岩之间的空隙。国内外一些学者已经对膨润土特性进行了大量试验<sup>[3]</sup>,并取得了阶段性的成果。刘月妙等<sup>[4-5]</sup>研究了高庙子膨润土的膨胀力特性及无侧限压缩性能。汪龙等<sup>[6]</sup>对不同干密度、含水率和掺砂率的压实膨润土及其含砂混合物试样进行了一系列渗气试验,得到了不同条件下试样的渗气系数规律。沈珍瑶等<sup>[7-8]</sup>研究了不同含水率下高压实膨润土的单轴与三轴压缩特性及渗透特性。叶为民等<sup>[9-10]</sup>研究了高压实 GMZ 膨润土的单向膨胀特性以及盐溶液对其单向膨胀特性的影响。温志坚等<sup>[11-12]</sup>对高庙子钠基膨润土的热传导、水传导、力学性能参数及不同干密度条件下的膨胀特性参数测定结果进行了研究。秦冰等<sup>[13]</sup>研究了不同初始吸力及干密度条件下高庙子钠基膨润土 GMZ001 的三向膨胀力特性。孙发鑫等<sup>[14]</sup>进行了不同干密度和含砂率条件下膨润土及其含砂混合料的三向膨胀力研究,结果表明混合料存在各向异性,同时通过拟合得到纯膨润土及其含砂混合料的三向膨胀力的经验模型。朱国平等<sup>[15]</sup>通过三轴剪切试验,获得了高庙子膨润土的强度指标在常温条件下随含水率和干密度的变化规律。梁学海<sup>[16]</sup>对饱和高庙子钙基膨润土的强度特性进行了研究。

由于高放废物会不断发热;且掩埋深度很大,膨润土所受到的温度可以高达 100 °C 左右<sup>[17]</sup>,加之膨润土在地下水浸入后会产生高达数 MPa<sup>[3, 18]</sup>以至 11 MPa 以上<sup>[19]</sup>的膨胀压力,这种复杂的环境是常规土工试验仪器无法提供的,所以对膨润土在高温高压下强度和变形特性的研究很有必要。对此有学者开展了相关的研究,陆颀等<sup>[20]</sup>研究了温度循环变化下高庙子膨润土持水特性,张发忠等<sup>[21-22]</sup>研究了温度对高庙子膨润土膨胀特性的影响, Y. J. Cui 等<sup>[23]</sup>测定了压实高庙子膨润土的热膨胀系数,探讨了温度和吸力对压缩变形参数及屈服应力的影响; W. M. Ye 等<sup>[24-25]</sup>研究了温度及 PH 值对压实高庙子膨润土膨胀压力及饱和导水率的影响。但对高庙子膨润土在高温高压与三轴应力状态下的强度和变形特性尚缺乏系统的研究。本文以 GMZ001 膨润土为研究对象,采用后勤工程学院自主研制的高温高压土工三轴仪,对其变形强度特性进行了系统的温控三轴不排水剪切试验研究,揭示相应的规律性。

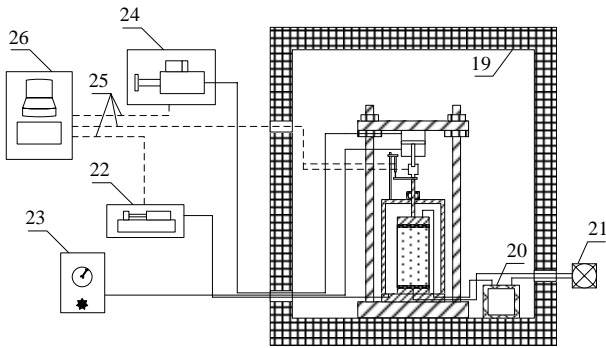
## 2 试验仪器及试验制样方法介绍

### 2.1 试验仪器及标定

试验设备为后勤工程学院自主研制的高温高压三轴仪,由台架和压力室、恒温箱、步进电机、压力-体积控制器、吸力控制装置和数据采集等部件组成,其示意图如图 1 所示。压力室和台架由特殊合金制造,置于专门设计配套的温控箱内,底部基座截面直径 39.1 mm,面积 12 cm<sup>2</sup>;温控箱从侧面加热,底部是不锈钢板,为放置三轴仪台架和压力室提供了方便,控制温度最高可至 350 °C;围压由



(a) 台架和压力室示意图



(b) 试验系统总体连接示意图

1—台架；2—加压活塞；3—荷载传感器；4—位移传感器；5—小水室；6—压力室活塞杆；7—压力；8—试样帽；9—上多孔不锈钢板；10—乳胶膜；11—试样；12—下多孔不锈钢板；13—压力室底座；14—吸力控制气体循环管路 I；15—吸力控制气体循环管路 II；16—围压管路；17—加压活塞进水管路；18—上抬加压活塞气体管路；19—恒温箱；20—盐溶液罐；21—蠕动泵；22—GDS 压力/体积控制器；23—气体压力控制柜；24—步进电机；25—数据采集线；26—采集控制系统

图 1 后勤工程学院的高温高压三轴仪示意图

Fig.1 Sketch of high-temperature and high-pressure triaxial apparatus in Logistical Engineering University

GDS 压力 - 体积控制器提供，围压最大可加至 3 MPa，体变量测精度为 1 mm<sup>3</sup>，压力量测精度为 1 kPa。轴压由步进电和轴向加载荷塞施加，亦可采用 GDS 压力 - 体积控制器施加。

由于膨润土的吸力很高，该设备采用饱和盐溶液罐上方的气体湿度控制试样的总吸力。盐溶液罐置于恒温箱内，通过循环泵使饱和盐溶液上方气体与试样内的气体不断交换，最终达到相同的湿度，从而控制土样的总吸力，吸力最高可达 500 MPa。本文做的是控温不排水不排气剪切试验，因而没有控制吸力。

试验开始前，为了消除仪器本身所造成的试验

误差，对仪器进行了不同温度及围压条件下的标定，当体变读数在 10 min 内不再变化时，认为达到稳定状态，此时的体变量称为最终体变量，具体标定结果如表 1 所示。

表 1 高温高压三轴仪标定结果

Table 1 The calibration results of the high-temperature and high-pressure triaxial apparatus

围压/kPa	最终体变量/mm <sup>3</sup>		
	20 °C	50 °C	80 °C
0	0	0	0
100	870	656	503
500	1 739	1 402	1 167
1 000	2 456	1 906	1 609
2 000	3 537	2 858	2 344

### 2.2 试样制备与试验方案

试验采用的土样为内蒙古兴和县高庙子村的钠基膨润土(试样编号 GMZ001)，试样为浅灰白色，随着含水率增加稍稍有些偏肉色，其基本物理性质见表 2<sup>[13]</sup>，其可交换阳离子组成及含量见表 3<sup>[13]</sup>。

表 2 高庙子膨润土基本物理指标<sup>[13]</sup>

Table 2 Indices of physical properties of GMZ001 bentonite<sup>[13]</sup>

相对密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	塑限/%	液限/%	塑性指数
2.65	42	325	283

表 3 高庙子膨润土可交换性阳离子组成及含量<sup>[13]</sup>

Table 3 Cation exchange capacity and exchangeable ions composition of GMZ001 bentonite<sup>[13]</sup>

CEC 值/(mmol · L <sup>-1</sup> )	可交换性阳离子含量/(mmol · L <sup>-1</sup> )			
	E(K <sup>+</sup> )	E(Na <sup>+</sup> )	E(1/2Ca <sup>2+</sup> )	E(1/2Mg <sup>2+</sup> )
0.75	0.01	0.35	0.24	0.15

注：E 为可交换阳离子含量。

在试验开始之前，用喷雾法将膨润土配置成目标含水率，方法如下：先称取一定量的膨润土，测定其含水率；计算增湿到目标含水率所需要的水的质量，用电子天平称量后装入喷雾器；在配土盘中撒一层膨润土，接着均匀喷一次水；如此反复多次，最后一层土的上不喷水；用塑料膜密封配土盘，静置 3 d 后搅拌均匀；再密封静置 3 d，搅拌均匀后即可使用，测定此时的含水率作为试样的初始含水率。

制样时, 根据设计干密度计算出一个土样所需的配水土的质量, 用专门的制样模具<sup>[26]</sup>将土分 5 层压实, 分层之间打毛, 以便层间结合良好。试样直径 39.1 mm, 高 80 mm。

从刘月妙等<sup>[18]</sup>可知, 中国高放废物地质处置缓冲材料大型试验中的压实膨润土干密度为  $1.6 \text{ g/cm}^3$ 。为了给日后缓冲材料的设计提供更多的数据, 本文研究的试样的初始干密度分别控制为 1.4, 1.6 和  $1.8 \text{ g/cm}^3$ , 初始含水率控制为 5%, 15% 和 25%, 围压控制为 0, 1 000 和 2 000 kPa, 温度控制为 20 °C, 50 °C 和 80 °C, 4 个因素互相交叉, 共计做了  $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$  个试验, 都是不固结不排水不排气三轴剪切试验。

由于非饱和土的渗透系数远小于饱和土, 为了使土中的孔压和吸力比较均衡, 通常采用的剪切速率远低于饱和土<sup>[27]</sup>。鉴于目前尚没有非饱和土的试验规程, 为了确定合适的剪切速率, 在正式试验前必须先做几个不同剪切速率的试验进行比选<sup>[27]</sup>。为此, 做了 3 个不同剪切速率的试验, 即 0.011, 0.015 和  $0.033 \text{ mm/min}$ , 相应的应变率是 0.014%, 0.019% 和  $0.041\%/min$ , 结果如图 2 所示。由图 2 可知, 虽然剪切速率不尽相同, 但是对于相同条件试样, 破坏前的应力 - 应变关系曲线以及破坏时的峰值基本相同, 所以可以认为剪切速率对于试验结果影响不大。据此, 选择应变率  $0.041\%/min$  的剪切速率进行试验, 本文的全部试验均采用这一剪切速率。此外, 对于控制温度 50 °C 和 80 °C 的试验, 在开始前需要对整个装置进行预热, 以保证试样及其整体周围环境均到达指定温度方可开始试验; 据实测, 加热到达 50 °C 需要 30 min, 到达 80 °C 需要 1 h。

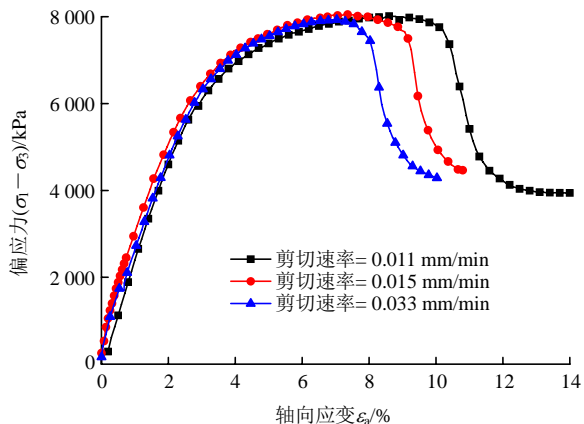


图 2 不同剪切速率条件下应力 - 应变关系曲线  
Fig.2 Stress-strain curves of sample GMZ001 under different shearing rates

### 3 试验结果分析

#### 3.1 偏应力 - 轴向应变性状分析

图 3 为土样破坏时的典型照片, 可见土样的破坏形式有 2 种, 一是脆性破坏, 土样有明显的破裂面; 二是塑性破坏, 土样中部鼓胀, 没有破裂面。图 4~6 分别为干密度等于 1.4, 1.6 和  $1.8 \text{ g/cm}^3$  的试样在不同围压、不同含水率和不同温度下的偏应力 - 轴向应变曲线。可以看到:



(a) 脆性破坏 (b) 塑性破坏

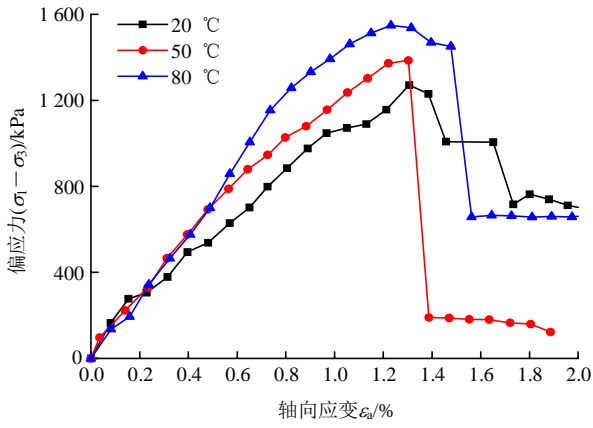
图 3 高庙子膨润土试样的典型破坏形式

Fig.3 Typical failure forms of samples of GMZ001

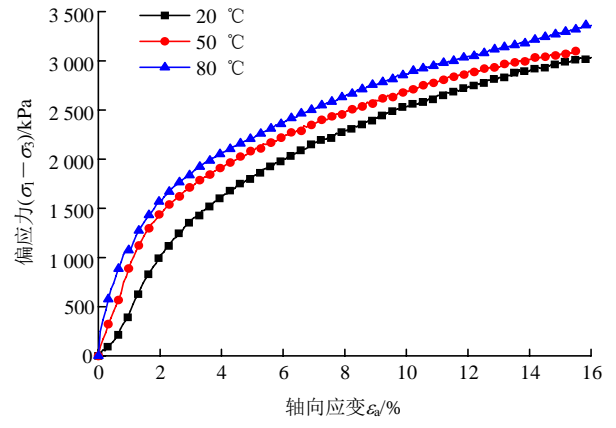
(1) 围压对曲线形态的影响很大, 无围压时, 所有试验的偏应力 - 轴向应变曲线都具有峰值, 试样呈现脆性破坏; (2) 干密度对曲线形态有显著影响, 在干密度较低 ( $1.4$  和  $1.6 \text{ g/cm}^3$ ) 和围压较高 (1 000 和 2 000 kPa) 时, 试样主要呈塑性破坏; 而在干密度较高 ( $1.8 \text{ g/cm}^3$ ) 时, 无论围压和温度的高低、含水率的大小, 所有试样都是脆性破坏; (3) 温度和含水率对试样破坏的形式基本没有影响。

由图 4~6 可知, 干密度、含水率和温度对试样的应力应变关系曲线有很大影响: (1) 当干密度较低 ( $1.4$  和  $1.6 \text{ g/cm}^3$ ) 时, 偏应力 - 轴向应变曲线的位置高低与温度的高低相应, 即温度越高, 偏应力 - 轴向应变曲线的位置也越高; 而干密度较高 ( $1.8 \text{ g/cm}^3$ ) 时的情况则与上述完全相反, 即温度越高, 偏应力 - 轴向应变曲线的位置越低; (2) 在干密度、围压和温度相同时, 比较不同含水率时的偏应力 - 轴向应变曲线可以发现, 含水率越大, 曲线位置越低, 强度也越小。

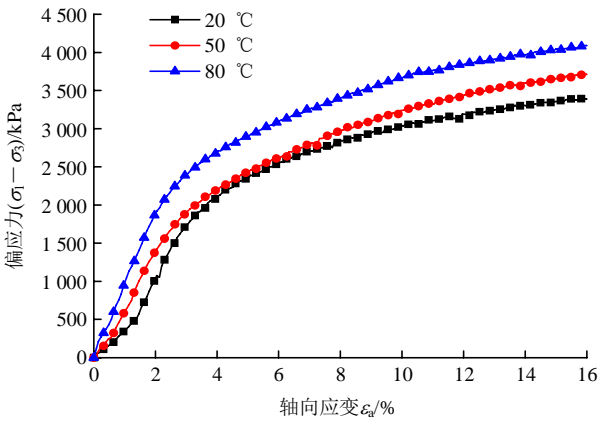
随着含水率升高, 试样的抗剪强度不断降低。对于在不同温度下因干密度不同而导致的偏应力 - 轴向应变曲线截然不同的结果, 可解释如下: M. V. Villar 和 A. Lloret<sup>[28]</sup>对膨润土研究时注意到, 其主



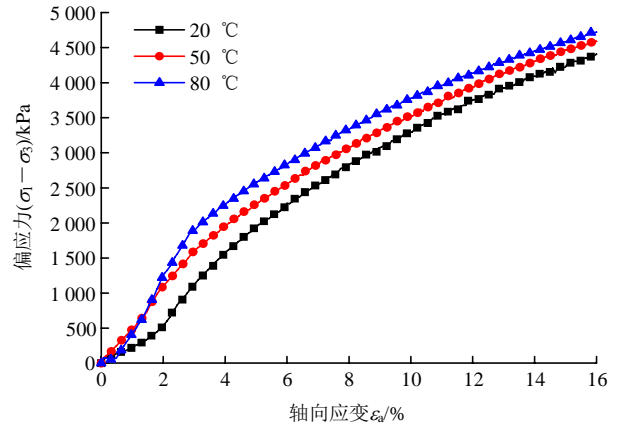
(a) 含水率 5%，围压 0 kPa



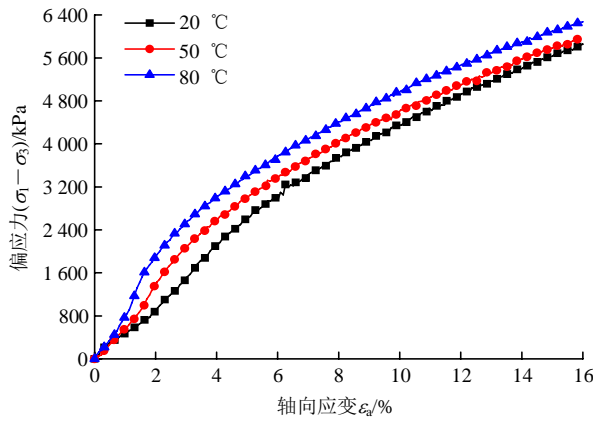
(e) 含水率 15%，围压 1 000 kPa



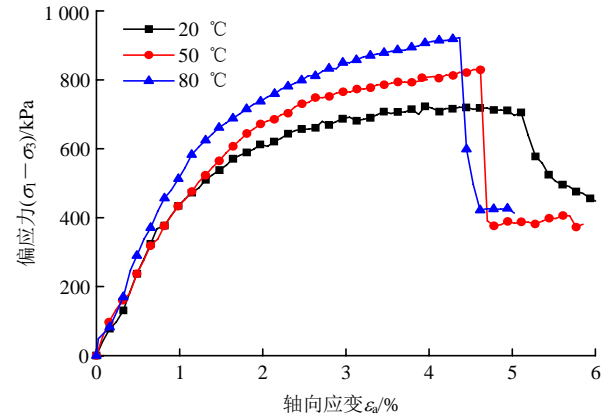
(b) 含水率 5%，围压 1 000 kPa



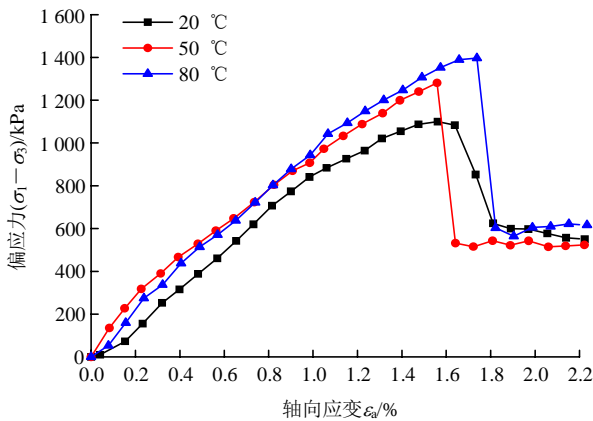
(f) 含水率 15%，围压 2 000 kPa



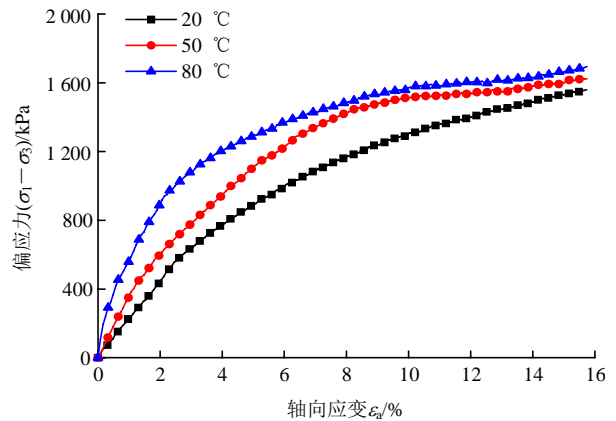
(c) 含水率 5%，围压 2 000 kPa



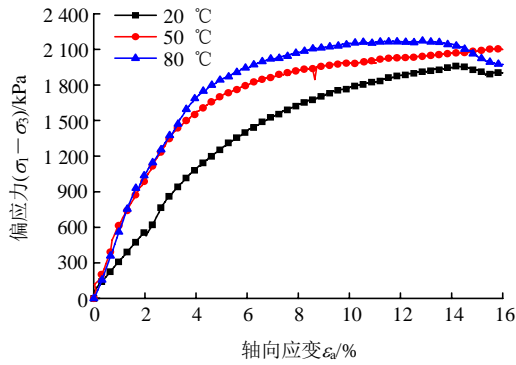
(g) 含水率 25%，围压 0 kPa



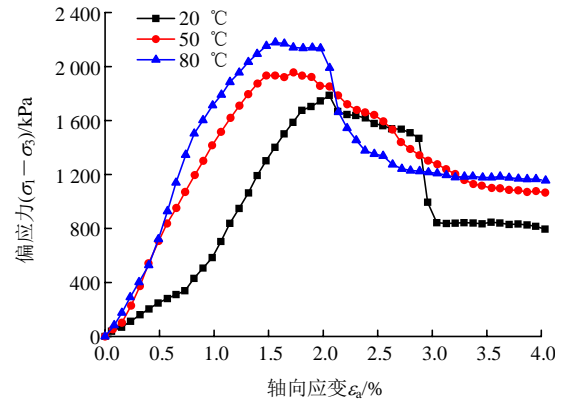
(d) 含水率 15%，围压 0 kPa



(h) 含水率 25%，围压 1 000 kPa



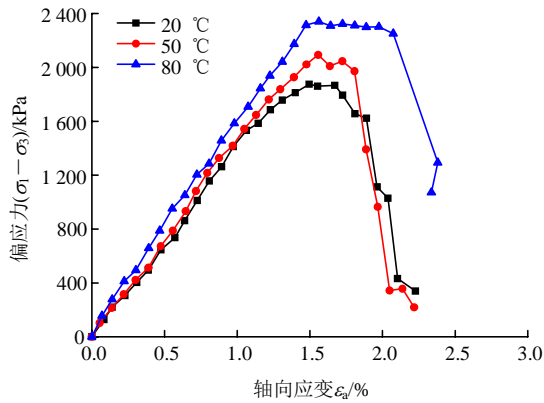
(i) 含水率 25%, 围压 2 000 kPa



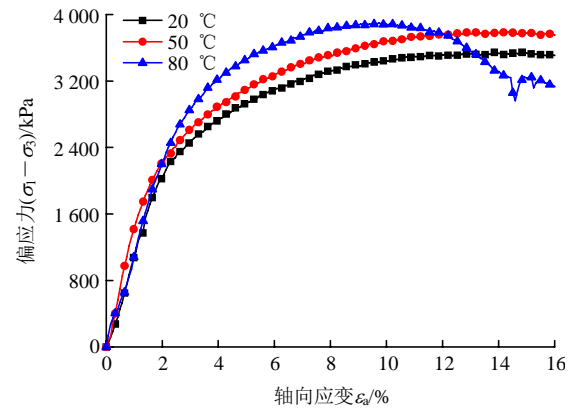
(d) 含水率 15%, 围压 0 kPa

图 4 干密度 1.4 g/cm<sup>3</sup> 的试样在不同含水率、围压和温度下的偏应力 - 轴向应变关系曲线

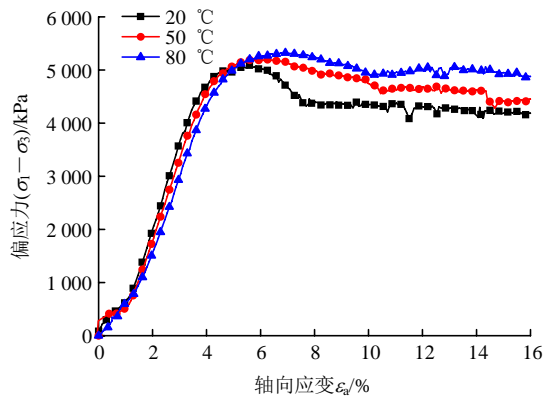
Fig.4 Curves of deviator stress-axial strain of samples with dry density 1.4 g/cm<sup>3</sup> under different water contents, cell pressures and temperatures



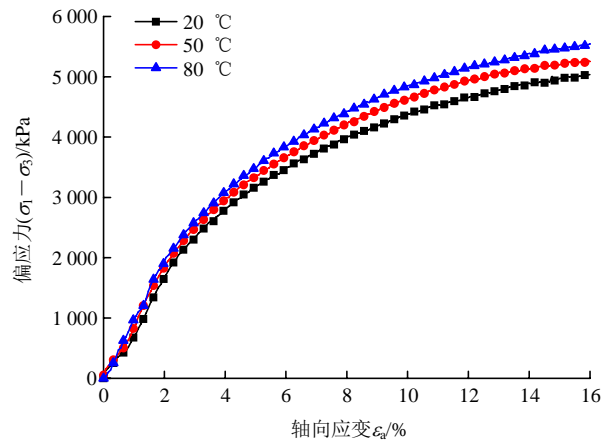
(a) 含水率 5%, 围压 0 kPa



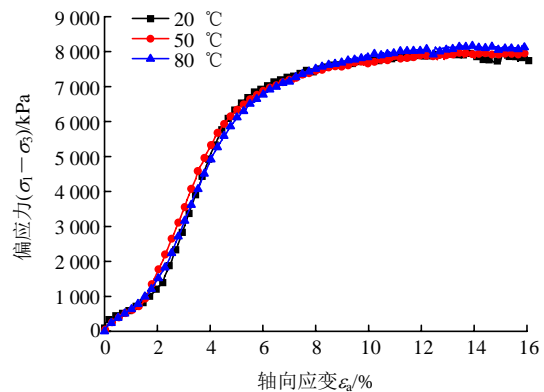
(e) 含水率 15%, 围压 1 000 kPa



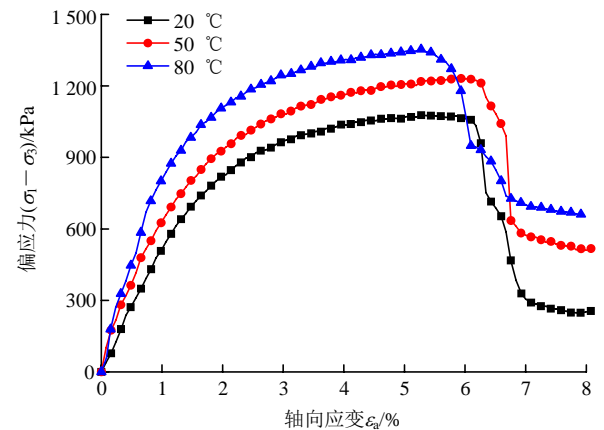
(b) 含水率 5%, 围压 1 000 kPa



(f) 含水率 15%, 围压 2 000 kPa



(c) 含水率 5%, 围压 2 000 kPa



(g) 含水率 25%, 围压 0 kPa

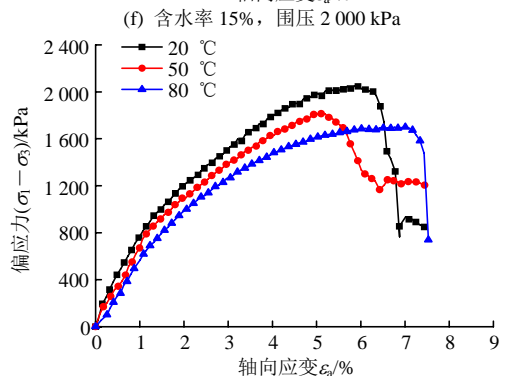
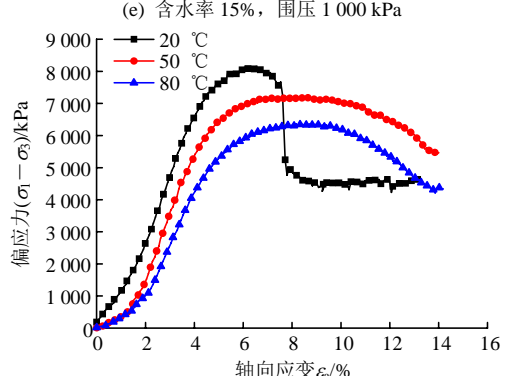
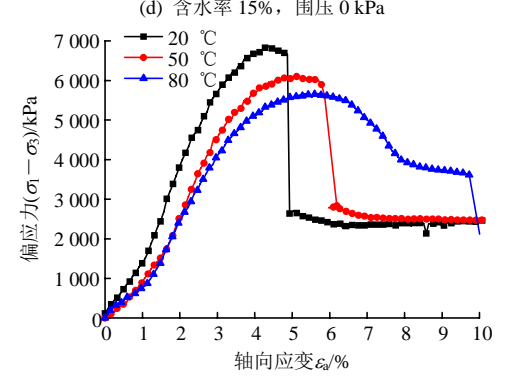
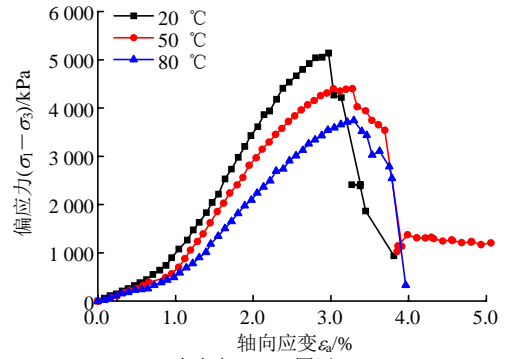
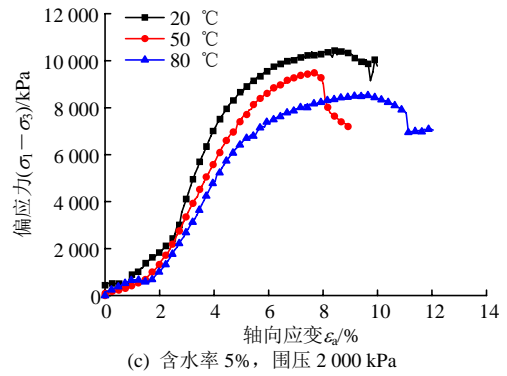
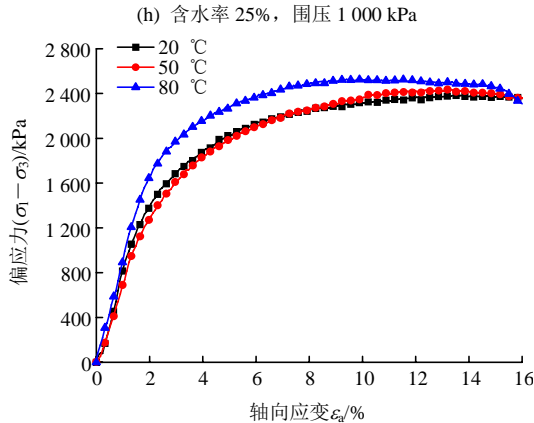
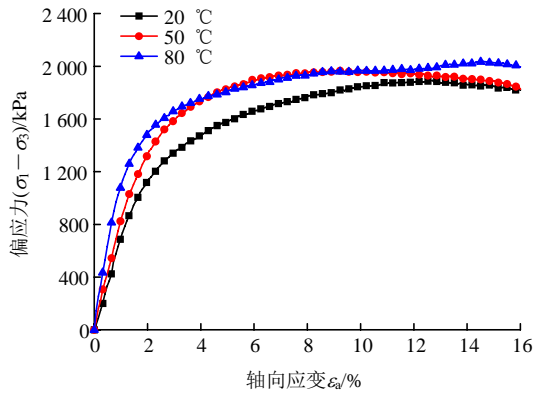
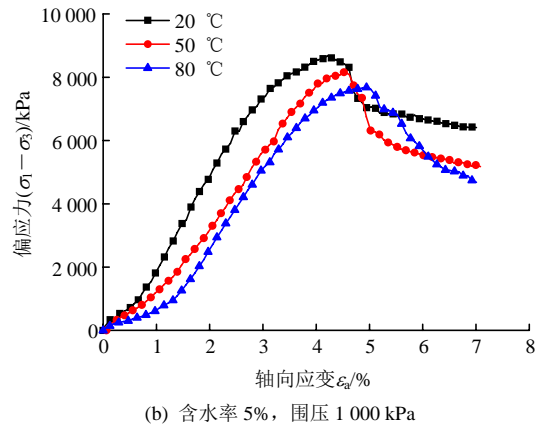
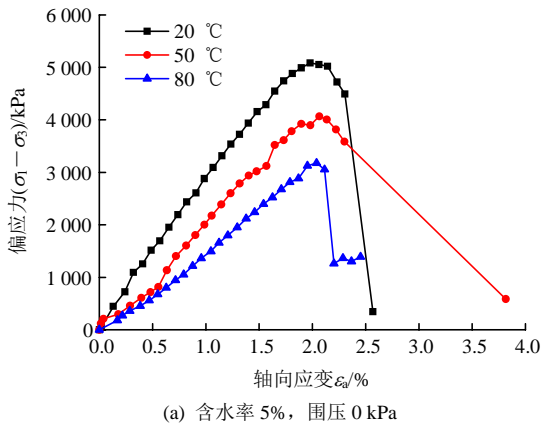


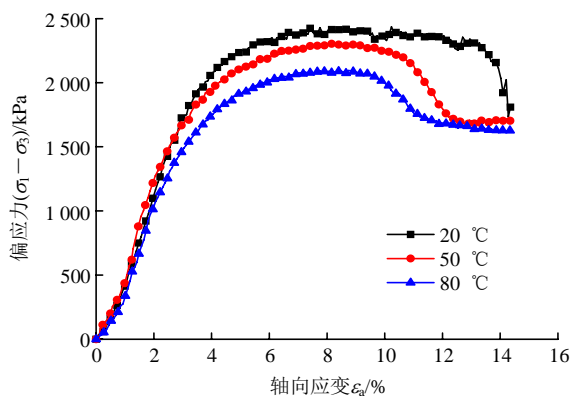
图5 干密度 1.6 g/cm<sup>3</sup> 的试样在不同含水率、围压和温度下的偏应力 - 轴向应变关系曲线

Fig.5 Curves of deviator stress-axial strain of samples with dry density 1.6 g/cm<sup>3</sup> under different water contents, cell pressures and temperatures

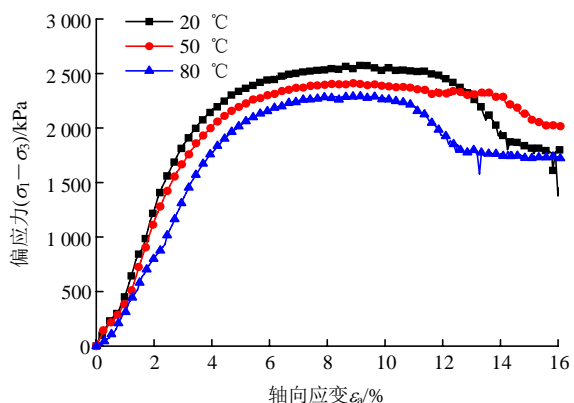


(b) 含水率 5%，围压 1000 kPa

(g) 含水率 25%，围压 0 kPa



(h) 含水率 25%，围压 1 000 kPa



(i) 含水率 25%，围压 2 000 kPa

图 6 干密度 1.8 g/cm<sup>3</sup> 的试样在不同含水率、围压和温度下的偏应力 - 轴向应变关系曲线

Fig.6 Curves of deviator stress versus axial strain of samples with dry density 1.8 g/cm<sup>3</sup> under different water contents, cell pressures and temperatures

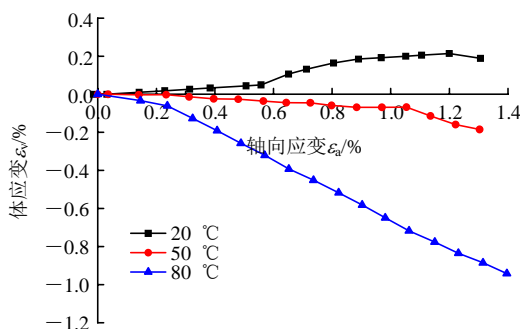
要成分蒙脱石附近的水分子结构处于被扰动的状态，这种状态下的水分子与自由水不同，它们是处于被蒙脱石吸附状态的结合水。通过分子动力学模拟及其他宏观测量手段测出结合水密度高达 1.4 g/cm<sup>3</sup> 甚至 1.5 g/cm<sup>3</sup>。随着土样干密度增加，结合水的密度也不断增加，二者之间呈指数关系<sup>[28]</sup>。另一方面，T. Carlsson<sup>[29]</sup>通过核磁共振技术对膨润土中水质子的弛豫时间  $t_p$  进行了量测，发现在含水率恒定的情况下，温度从 20 °C 升高到 72 °C 时，水质子的弛豫时间  $t_p$  大约升高了 1.5 倍，这就意味着通过增加温度，自由水的含量增加，而结合水含量则减少，这是因为在自由水状态下的水分子运动频率较高，土表面质子传递它们的磁力需要花费更长的时间，所以表现为弛豫时间  $t_p$  升高。随着温度升高结合水会逐步转化为自由水。

在土样含水率及体积一定时，土样干密度越大，

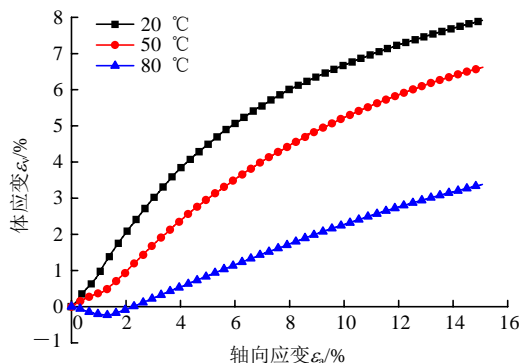
结合水的密度也越大，所含有的结合水质量就越多，在高温下所能释放出来的自由水就更多，土样基质吸力减少得更多。在本试验中，低干密度膨润土试样中结合水量很少，导致高温条件下能够释放出来的自由水也很少，基质吸力减小十分有限，所以总体上随着温度升高，土样的抗剪强度是增加的。但在高干密度的条件下，试样中结合水量较多，导致高温下释放出的自由水更多，试样基质吸力减少较为明显，导致试样强度随着温度升高而降低。试样从低干密度到高干密度逐渐过渡的过程中，能转变为自由水的结合水总量是逐渐增加的，基质吸力的减少也是逐渐变化的；当干密度超过一定的阈值时，试样的抗剪强度就会随温度升高而降低。

### 3.2 体应变分析

图 7~9 为干密度等于 1.4, 1.6 和 1.8 g/cm<sup>3</sup> 的试样在不同围压、不同含水率和不同温度下的轴向应变 - 体应变关系曲线，从图中可以看到，干密度、温度、围压和含水率均对体应变曲线有显著的影响：(1) 无围压作用时，所有试样的体应变在常温下基本上表现为剪缩，而在 50 °C 和 80 °C 下则基本上为剪胀；(2) 高围压(1 000 和 2 000 kPa)下试样的体应变以剪缩为主，反映了围压对剪胀的抑制作用；(3) 相同围压下，随着温度升高，试样的剪缩体应变不断减小，有的试样甚至出现了剪胀，其原因与膨润土矿物在高温下发生膨胀和能释放出来的自由水较

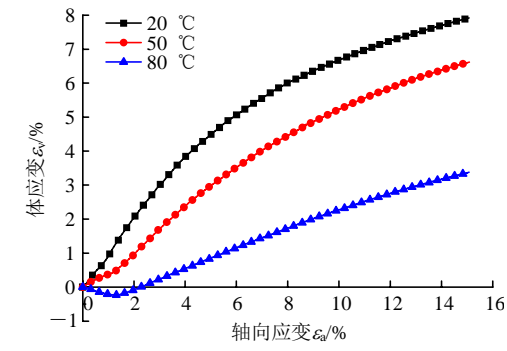


(a) 含水率 5%，围压 0 kPa

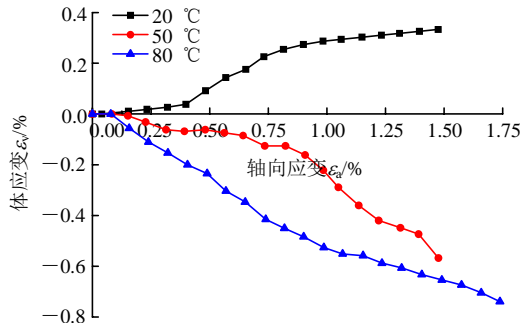


(b) 含水率 5%，围压 1 000 kPa

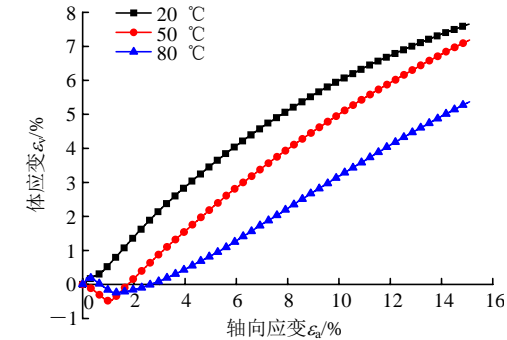




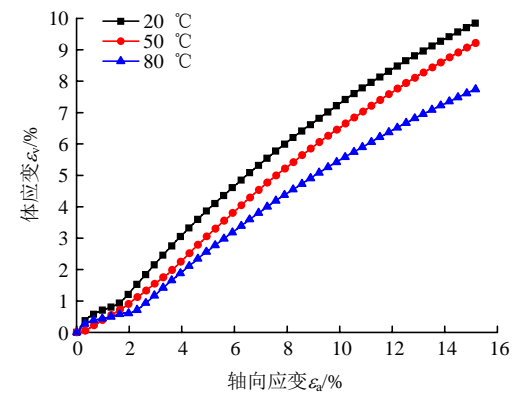
(c) 含水率 5%，围压 2 000 kPa



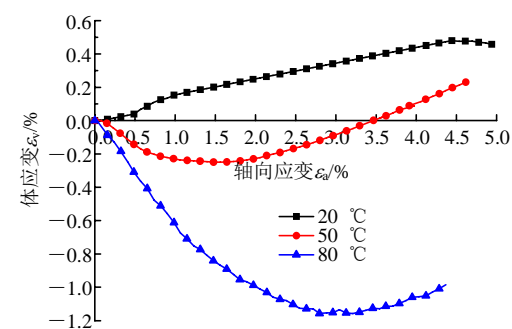
(d) 含水率 15%，围压 0 kPa



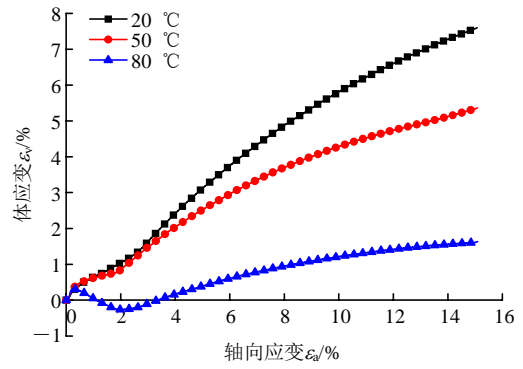
(e) 含水率 15%，围压 1 000 kPa



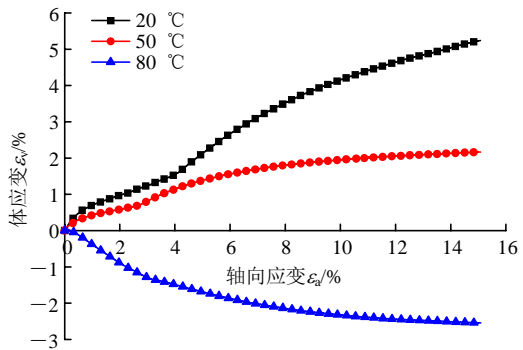
(f) 含水率 15%，围压 2 000 kPa



(g) 含水率 25%，围压 0 kPa



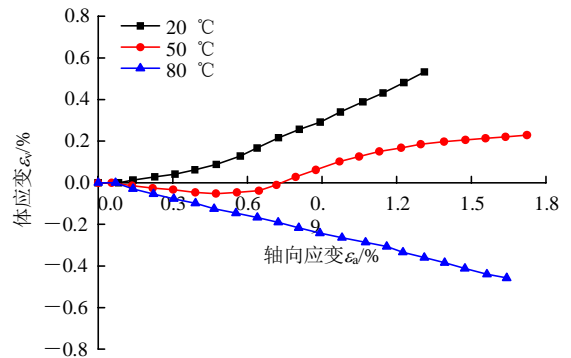
(h) 含水率 25%，围压 1 000 kPa



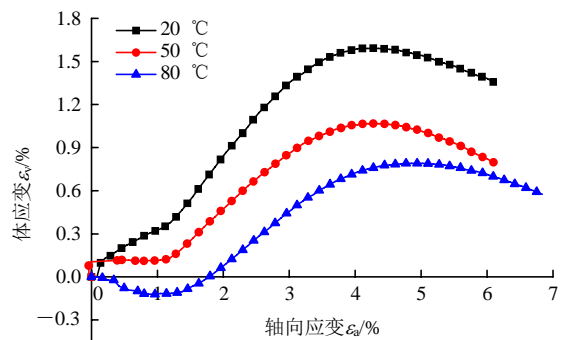
(i) 含水率 25%，围压 2 000 kPa

图 7 干密度  $1.4 \text{ g/cm}^3$  试样在不同含水率、围压和温度下的轴向应变 - 体应变关系曲线

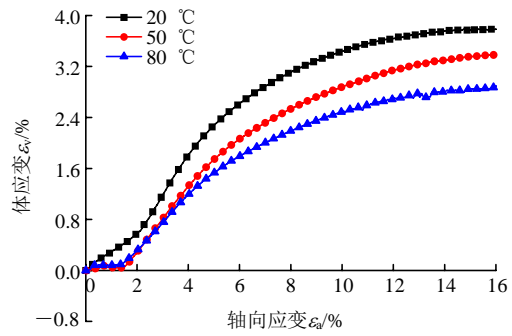
Fig.7 The relationship curves of volumetric strain and axial strain of the samples of dry density  $1.4 \text{ g/cm}^3$  under different water contents, confining pressures and temperatures



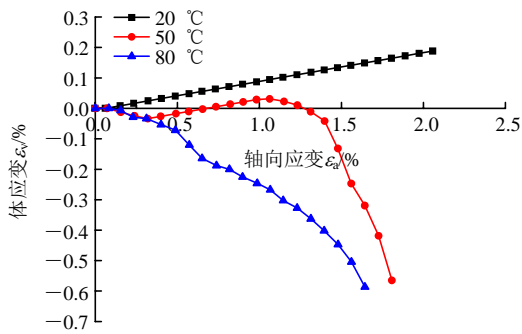
(a) 含水率 5%，围压 0 kPa



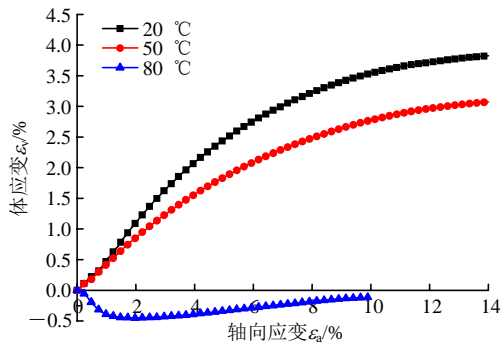
(b) 含水率 5%，围压 1 000 kPa



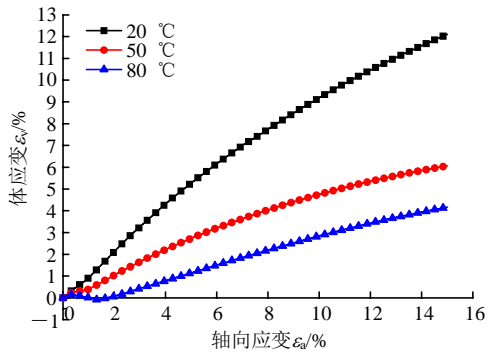
(c) 含水率 5%, 围压 2 000 kPa



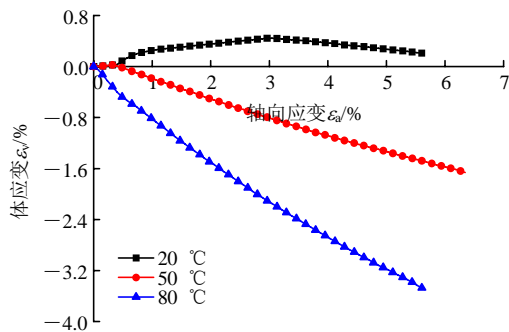
(d) 含水率 15%, 围压 0 kPa



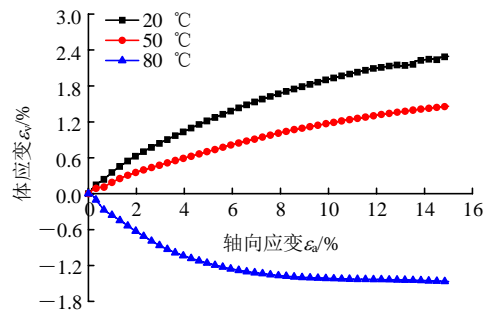
(e) 含水率 15%, 围压 1 000 kPa



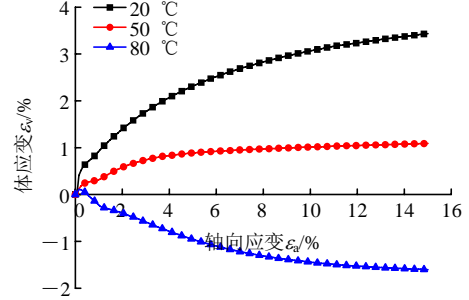
(f) 含水率 15%, 围压 2 000 kPa



(g) 含水率 25%, 围压 0 kPa



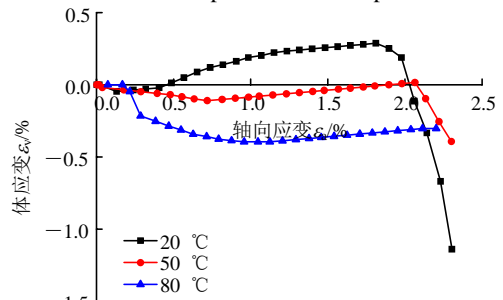
(h) 含水率 25%, 围压 1 000 kPa



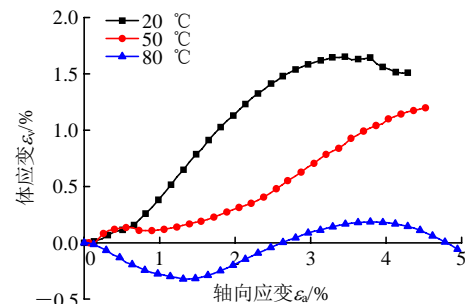
(i) 含水率 25%, 围压 2 000 kPa

图 8 干密度  $1.6 \text{ g/cm}^3$  的试样在不同含水率、围压和温度下的轴向应变 - 体应变关系曲线

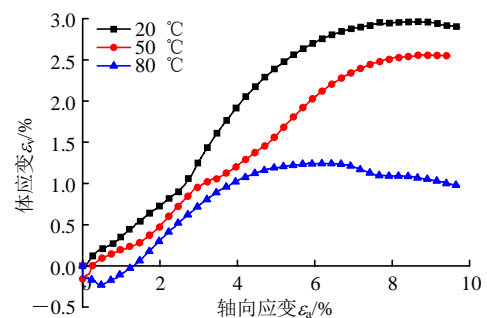
Fig.8 The relationship curves of volumetric strain and axial strain of the samples of dry density  $1.6 \text{ g/cm}^3$  under different water contents, cell pressures and temperatures



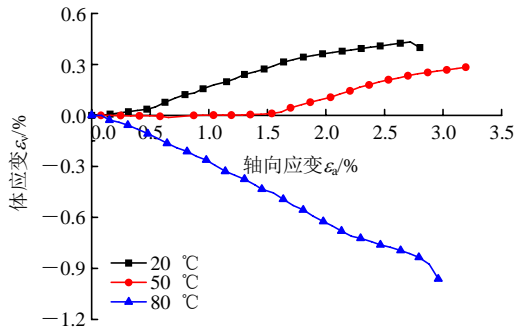
(a) 含水率 5%, 围压 0 kPa



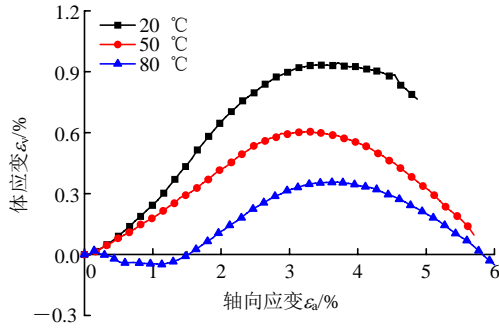
(b) 含水率 5%, 围压 1 000 kPa



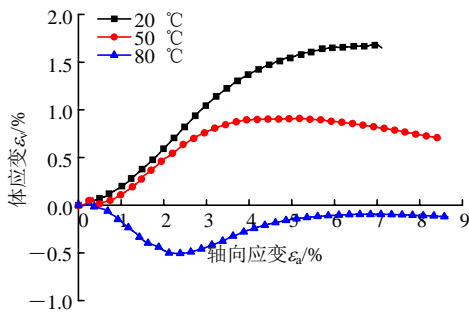
(c) 含水率 5%, 围压 2 000 kPa



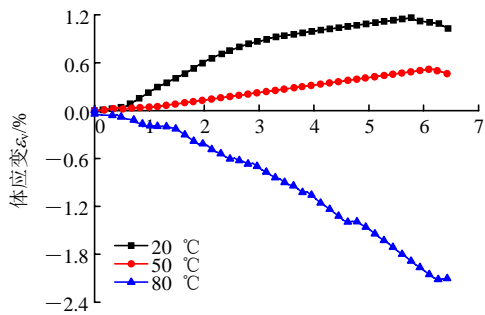
(d) 含水率 15%，围压 0 kPa



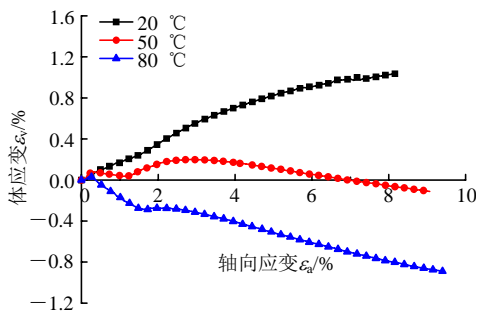
(e) 含水率 15%，围压 1 000 kPa



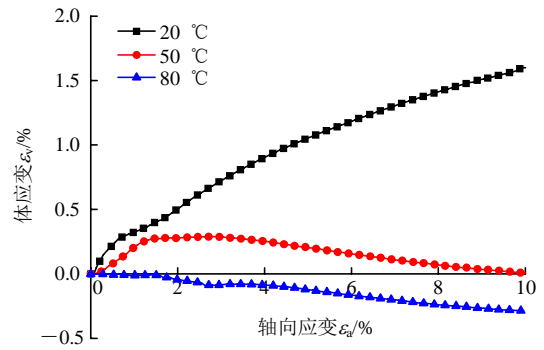
(f) 含水率 15%，围压 2 000 kPa



(g) 含水率 25%，围压 0 kPa 试样



(h) 含水率 25%，围压 1 000 kPa 试样



(i) 含水率 25%，围压 2 000 kPa 试样

图9 干密度 1.8 g/cm<sup>3</sup> 的试样在不同含水率、围压和温度下的轴向应变 - 体应变关系曲线

Fig.9 Curves of volumetric strain and axial strain of samples with dry density 1.8 g/cm<sup>3</sup> under different water contents, cell pressures and temperatures

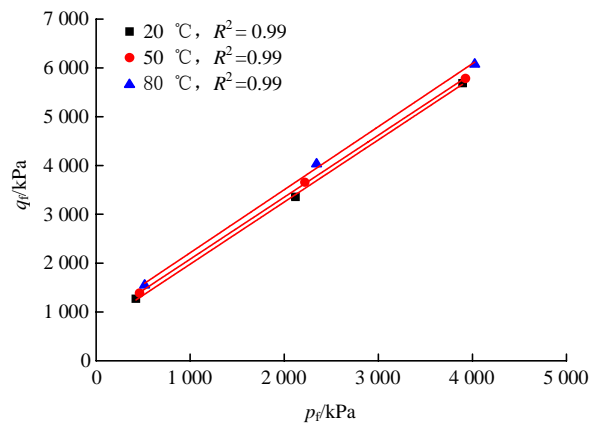
多有关；(4) 相同干密度的土样，含水率越高，在高温下越容易发生剪胀；(5) 干密度较低(如 1.4 g/cm<sup>3</sup>)时，试样以剪缩为主，而干密度较大的试样(如 1.8 g/cm<sup>3</sup>)以剪胀为主。

### 3.3 膨润土强度参数变化规律

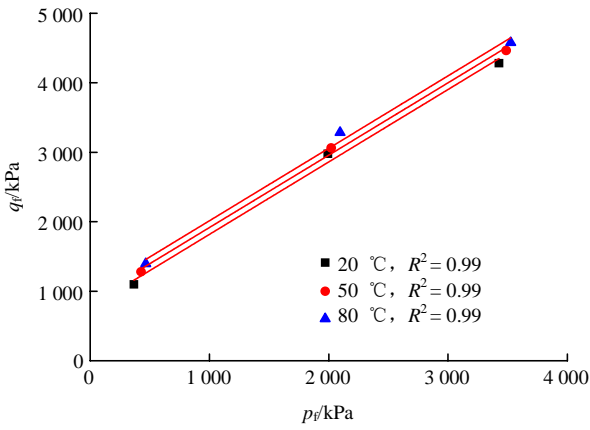
针对试样不同的破坏形态，分别采取不同的破坏标准。对脆性破坏，取偏应力 - 轴向应变曲线上的峰值点所对应的应力(包括球应力  $p_f$  和偏应力  $q_f$ ) 为破坏应力；而对塑性破坏，取偏应力 - 轴向应变曲线上的轴向应变等于 15% 的点所对应的应力为破坏应力，全部试样的破坏应力限于篇幅不再单独列出，具体参见陈皓<sup>[30]</sup>的研究。

在  $(q_f - p_f)$  平面内画出各试样的破坏点，如图 10 所示。从图 10 可以看出，相同温度下的一组破坏强度点基本落在同一直线上，可用下式表示：

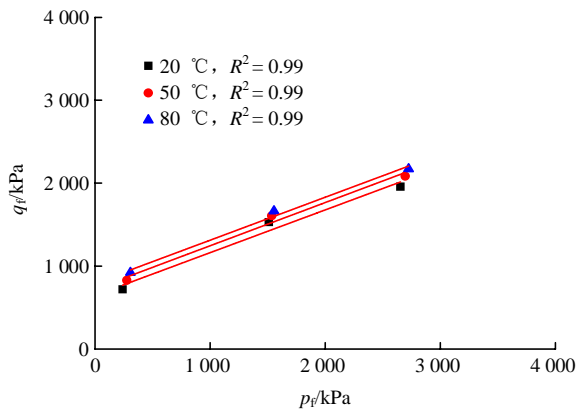
$$q_f = \xi' + p_f \tan \omega \quad (1)$$



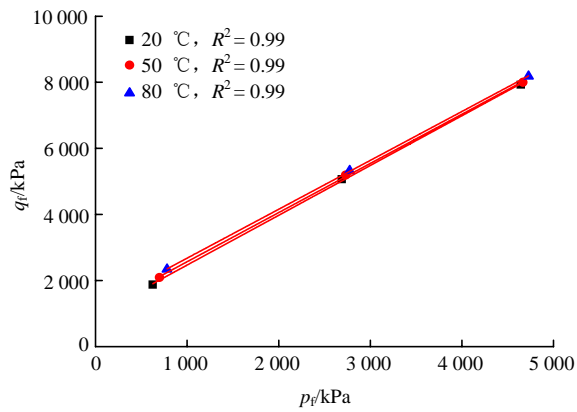
(a) 干密度 1.4 g/cm<sup>3</sup>，含水率 5% 试样



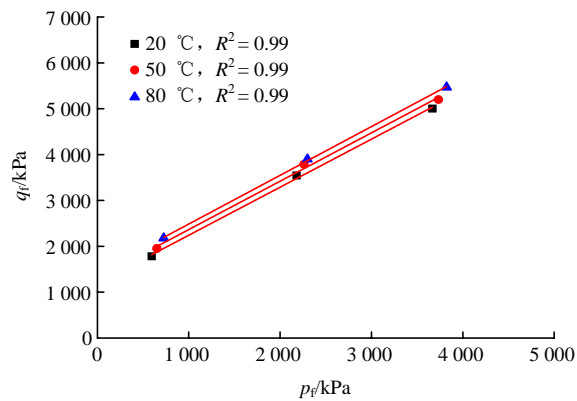
(b) 干密度 1.4 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 15% 试样



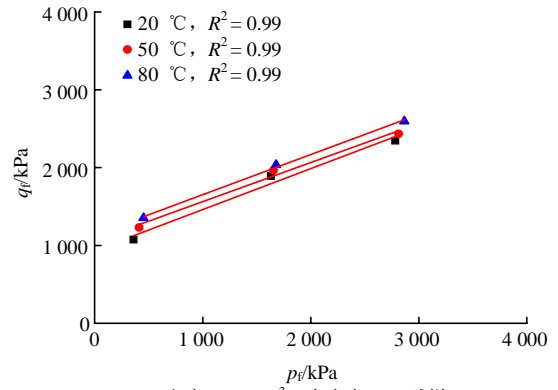
(c) 干密度 1.4 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 25% 试样



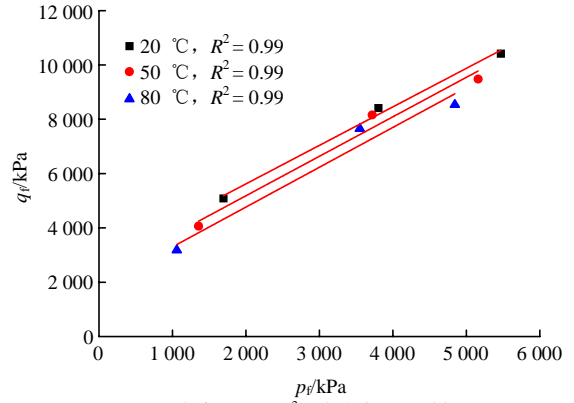
(d) 干密度 1.6 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 5% 试样



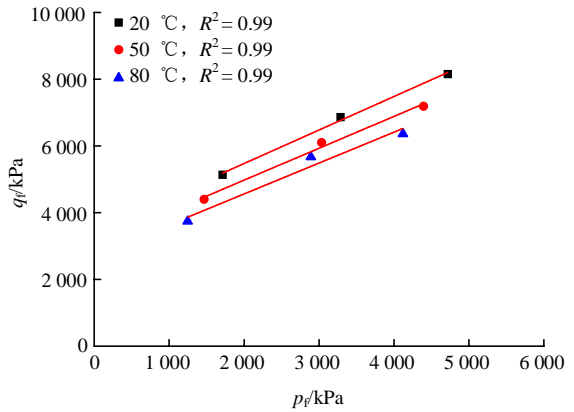
(e) 干密度 1.6 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 15% 试样



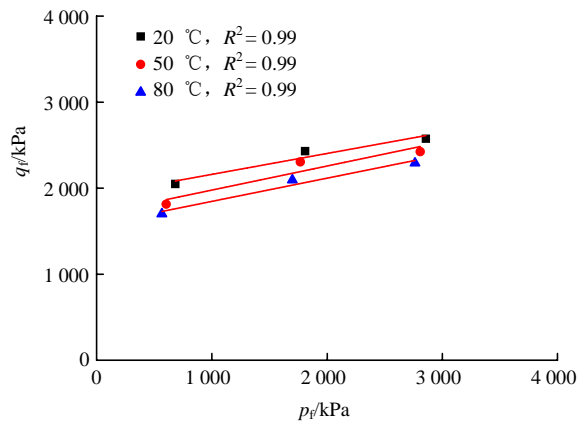
(f) 干密度 1.6 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 25% 试样



(g) 干密度 1.8 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 5% 试样



(h) 干密度 1.8 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 15% 试样



(i) 干密度 1.8 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 25% 试样

图 10 不同干密度、含水率及温度下的试样在  $p_f$ - $q_f$  平面内的强度包线

Fig.10 The strength envelopes on  $p_f$ - $q_f$  plane of specimens with different dry densities, water contents and temperatures

式中： $\xi'$  和  $\text{tg } \omega$  分别为直线的截距和斜率，分别代表了无围压状态时膨润土的破坏偏应力和破坏应力随围压的变化率，前者单位为 kPa，后者为无量纲。使用最小二乘法拟合强度包线，可以得到  $\xi'$  和  $\text{tg } \omega$  的值。

土的黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  可分别由下式求出：

$$c = \frac{3 - \sin \varphi}{6 \cos \varphi} \xi' \quad (2)$$

$$\sin \varphi = \frac{3 \tan \omega}{6 + \tan \omega} \quad (3)$$

从图 10 可以看出，干密度 1.4 和 1.6 g/cm<sup>3</sup> 的试样抗剪强度包线和总黏聚力均随着温度的升高而升高，而干密度 1.8 g/cm<sup>3</sup> 的试样的抗剪强度包线和黏聚力随着温度的升高降低，这是因为低干密度条件下试样中可供转化为自由水的结合水含量较少，不足以抵消温度升高带来的试样的抗剪强度的增加，而在高干密度条件下试样中结合水密度大，含量高，高温下转化为的自由水含量更多，基质吸力的减小开始占据主导地位，可以抵消甚至超过温度升高带来的抗剪强度的增加，所以高干密度条件下随着温度的升高试样黏聚力是不断减小的；所有强度包线彼此接近平行，说明温度对内摩擦角几乎没有影响；在干密度和温度相同的情况下，含水率的升高使得试样抗剪强度包线急剧降低；在含水率和温度不变的条件下，干密度越高，试样的抗剪强度也越大，这与从节 3.1 中得到的结论是一致的。

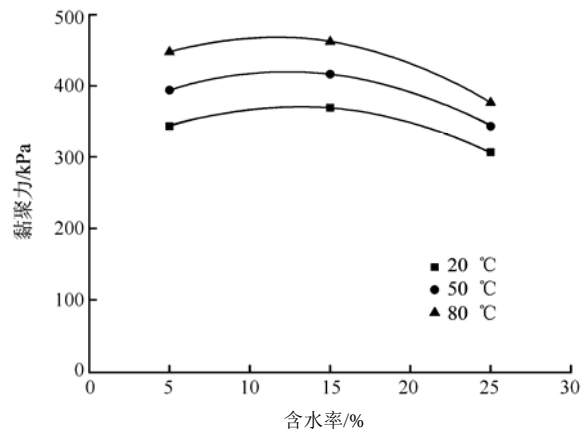
### 3.3.1 膨润土的黏聚力变化规律

为探求不同干密度、含水率以及温度条件下试样黏聚力和内摩擦角的变化规律，可对各自的试验数据进行拟合。以干密度 1.4 g/cm<sup>3</sup> 的情况为例，先将不同含水率和温度下的试样的黏聚力绘于图 11，分别在同一温度下先拟合出含水率与黏聚力的关系曲线，如图 11(a)所示，可得黏聚力随含水率变化的关系式如下：

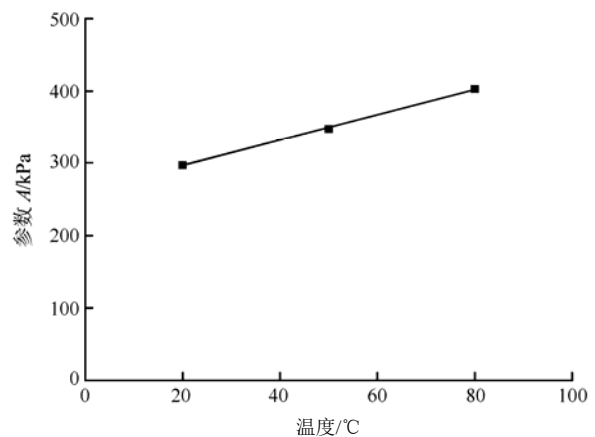
$$c = A + Bw + Cw^2 \quad (4)$$

其中不同温度下的参数值  $A, B, C$  列于表 4 中，从表中可以看出，由于  $B$  与  $C$  的值基本与温度无关，故可视为常数，取其平均值( $B = 11.58, C = -0.47$ )即可。参数  $A$  随温度变化很大，对其可进行不同温度下的拟合，结果如图 11(b)所示。从图中可以知道，参数  $A$  随温度呈现线性变化，其规律可用下式描述：

$$A = 260.20 + 1.77T \quad (5)$$



(a) 含水率与黏聚力之间的关系曲线



(b) 参数 A 与温度之间的关系曲线

图 11 干密度 1.4 g/cm<sup>3</sup> 的试样黏聚力和含水率及温度的关系  
Fig.11 The relationship of cohesion, water content and temperature under dry density of 1.4 g/cm<sup>3</sup>

表 4 不同干密度和温度下的参数值

Table 4 The values of parameters under different dry densities and temperatures

干密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	温度/ °C	A	B	C	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>
	20	296.59	11.49	-0.44				
1.4	50	347.02	11.79	-0.47	260.20	1.77	11.58	0.47
	80	402.99	11.46	-0.50				
1.6	20	357.14	29.97	-1.06				
	50	418.07	29.18	-1.03	319.65	1.92	29.76	1.06
1.8	80	472.73	30.14	-1.09				
	20	870.21	125.40	-4.92				
1.8	50	612.24	127.30	-4.76	1022.22	-7.93	126.17	4.71
	80	394.21	125.82	-4.44				

式中： $T$  为温度(°C)。最后取  $B = 11.58, C = -0.47$ ，连同  $A$  一并代入式(4)中，可得干密度为 1.4 g/cm<sup>3</sup> 时的黏聚力随温度及含水率变化的公式：

$$c = 260.20 + 1.77T + 11.58w - 0.47w^2 \quad (6)$$

其中含水率变化范围 5%~25%，温度变化范围

20 °C~80 °C。同理可得,干密度 1.6, 1.8 g/cm<sup>3</sup> 条件下,黏聚力随温度及含水率变化的函数如下:

$$c = 319.65 + 1.92T + 29.76w - 1.06w^2 \quad (7)$$

$$c = 1\ 022.22 - 7.93T + 126.17w - 4.71w^2 \quad (8)$$

观察不同干密度条件下的黏聚力表达式,可以将其统一写为

$$c = K_1 + K_2T + K_3w - K_4w^2 \quad (9)$$

对不同干密度条件下的  $K_1, K_2, K_3, K_4$  再次进行拟合,可分别用下式描述:

$$K_1 = \exp(3.82\rho_d) \quad (10)$$

$$K_2 = -279.28 + 375.75\rho_d - 125\rho_d^2 \quad (11)$$

$$K_3 = -4.96 \times 10^{-4}[1 - \exp(6.91\rho_d)] \quad (12)$$

$$K_4 = -1.50 \times 10^{-5}[1 - \exp(7.03\rho_d)] \quad (13)$$

将  $K_1, K_2, K_3, K_4$  分别代入式(9)中即可得到不同干密度、含水率及温度条件下的膨润土的黏聚力值。从式(9)中可以看出,温度对膨润土黏聚力影响较为明显,结合图 10 中的抗剪强度包线进行分析,可得出黏聚力随温度变化的数值,具体如表 5 所示。

表 5 膨润土黏聚力随温度变化的数值

Table 5 The values of cohesion of GMZ001 bentonite changed with temperature

工况	黏聚力变化/kPa	
	20 °C~50 °C	20 °C~80 °C
干密度 1.4 g/cm <sup>3</sup> , 含水率 5%	升高 15.20% (342~394)	升高 30.70% (342~447)
干密度 1.4 g/cm <sup>3</sup> , 含水率 15%	升高 12.73% (369~416)	升高 25.20% (369~462)
干密度 1.4 g/cm <sup>3</sup> , 含水率 25%	升高 12.09% (306~343)	升高 22.87% (306~376)
干密度 1.6 g/cm <sup>3</sup> , 含水率 5%	升高 12.08% (480~538)	升高 23.95% (480~595)
干密度 1.6 g/cm <sup>3</sup> , 含水率 15%	升高 9.88% (567~623)	升高 19.4% (567~677)
干密度 1.6 g/cm <sup>3</sup> , 含水率 25%	升高 13.54% (443~503)	升高 21.44% (443~538)
干密度 1.8 g/cm <sup>3</sup> , 含水率 5%	降低 17.83% (1 374~1 129)	降低 33.62% (1 374~912)
干密度 1.8 g/cm <sup>3</sup> , 含水率 15%	降低 11.74% (1 643~1 450)	降低 22.09% (1 643~1 280)
干密度 1.8 g/cm <sup>3</sup> , 含水率 25%	降低 11.75% (927~818)	降低 18.01% (927~760)

注:括号中的数值代表不同温度下膨润土的黏聚力,例如:(342~394)表示干密度 1.4 g/cm<sup>3</sup>、含水率 5%条件下,膨润土 20 °C时黏聚力为 342 kPa, 50 °C时黏聚力为 394 kPa。

### 3.3.2 膨润土的内摩擦角变化规律

以干密度 1.4 g/cm<sup>3</sup> 的情况为例。将不同含水率

和不同温度下的试样内摩擦角绘于图 12,可得内摩擦角随含水率变化的关系式如下:

$$\varphi = D + Ew \quad (14)$$

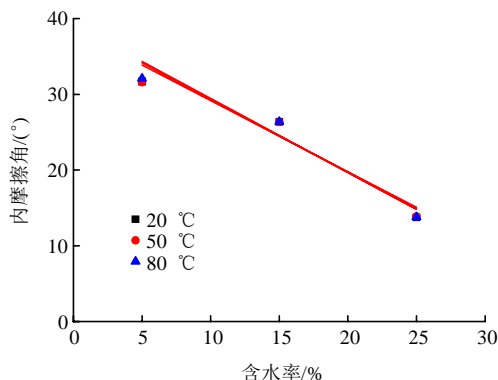


图 12 干密度为 1.4 g/cm<sup>3</sup> 时内摩擦角与含水率的关系  
Fig.12 Relationship between internal friction angle and water content for samples under dry density of 1.4 g/cm<sup>3</sup>

其中不同温度下的参数值  $D, E$  列于表 6 中。从表 6 可以看出,由于  $D$  与  $E$  随温度变化很小,故可以视为常数,取其平均值( $D = 38.92, E = -0.96$ )即可,代入式(14)即得内摩擦角随温度和含水率变化的公式:

$$\varphi = 38.92 - 0.96w \quad (15)$$

式中:  $w$  为含水率(%),变化范围为 5%~25%。

表 6 不同干密度和温度下的参数值

Table 6 Values of parameters under different dry densities and temperatures

干密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	温度/°C	$D$	$E$	$\lambda_1$	$\lambda_2$
1.4	20	38.99	-0.96	38.92	0.96
	50	38.56	-0.93		
	80	39.21	-0.97		
1.6	20	43.13	-1.15	42.93	1.15
	50	42.98	-1.16		
	80	42.69	-1.13		
1.8	20	43.63	-1.41	43.75	1.42
	50	43.71	-1.40		
	80	43.91	-1.43		

同理可得干密度 1.6 和 1.8 g/cm<sup>3</sup> 条件下内摩擦角随温度和含水率变化的公式:

$$\varphi = 42.93 - 1.15w \quad (16)$$

$$\varphi = 43.75 - 1.42w \quad (17)$$

观察不同干密度条件下的内摩擦角拟合公式,可以将其统一写为

$$\varphi = \lambda_1 - \lambda_2w \quad (18)$$

对不同干密度条件下的  $\lambda_1, \lambda_2$  再次进行拟合,

可得

$$\lambda_1 = 22.55 + 12.08\rho_d \quad (19)$$

$$\lambda_2 = -0.66 + 1.15\rho_d \quad (20)$$

将 $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  分别代入式(18)中即可得到不同干密度、含水率及温度条件下的内摩擦角值。

### 3.4 杨氏模量

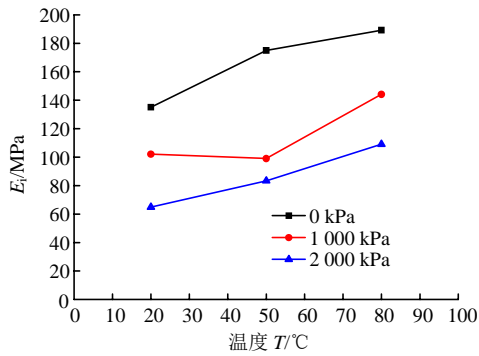
三轴试验的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$  关系可近似地用双曲线方程描述:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_a}{a + b\varepsilon_a} \quad (21)$$

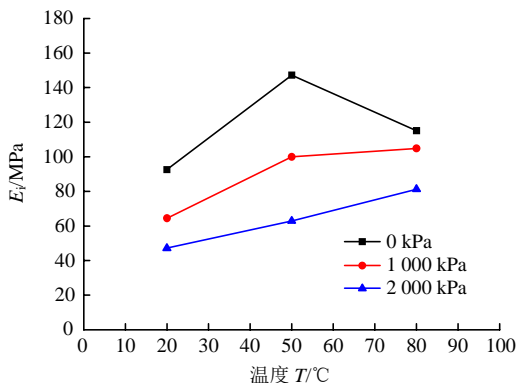
变换坐标后得到:

$$\frac{\varepsilon_a}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\varepsilon_a \quad (22)$$

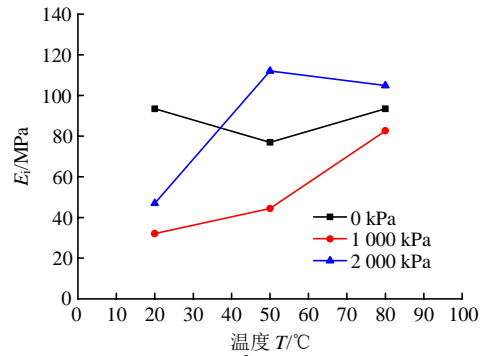
式中:  $a$  为初始杨氏模量  $E_i$  的倒数,  $b$  为主应力差渐进值  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$  的倒数。绘制不同围压条件下  $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$  关系曲线, 通过最小二乘法拟合, 可以求出  $a$  和  $b$  值, 进而可得出初始杨氏模量之值。图 13 为初始杨氏模量与温度的关系曲线。总体上看, 干密度 1.4 和 1.6 g/cm<sup>3</sup> 的试样的初始杨氏模量随温度升高呈现增加的趋势; 而干密度 1.8 g/cm<sup>3</sup> 的试样的初始杨氏模量则随温度升高呈现减少的趋势。在干密度相同的情况下, 随着含水率的升高, 试样初始杨氏模量  $E_i$  总体上也是不断减少的。



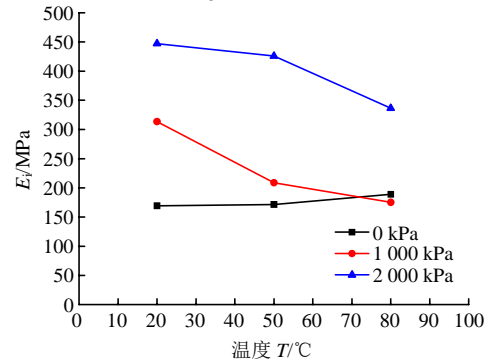
(a) 干密度 1.4 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 5% 试样



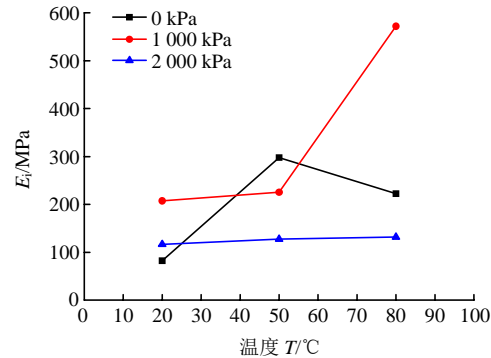
(b) 干密度 1.4 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 15% 试样



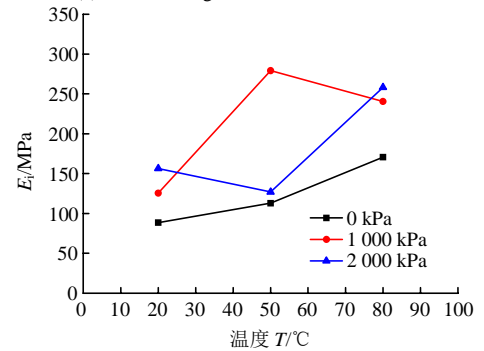
(c) 干密度 1.4 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 25% 试样



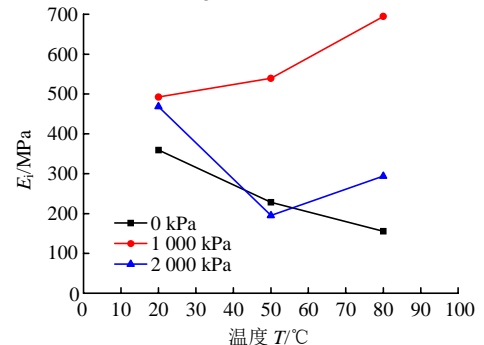
(d) 干密度 1.6 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 5% 试样



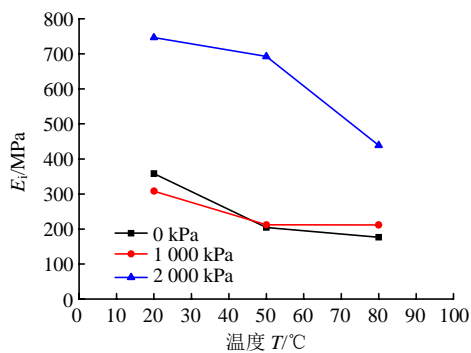
(e) 干密度 1.6 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 15% 试样



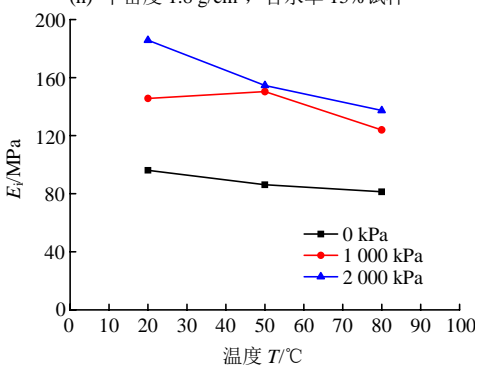
(f) 干密度 1.6 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 25% 试样



(g) 干密度 1.8 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 5% 试样



(h) 干密度 1.8 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 15% 试样



(i) 干密度 1.8 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 25% 试样

图 13 不同含水率、干密度及围压条件下试样初始杨氏模量随温度变化的曲线关系

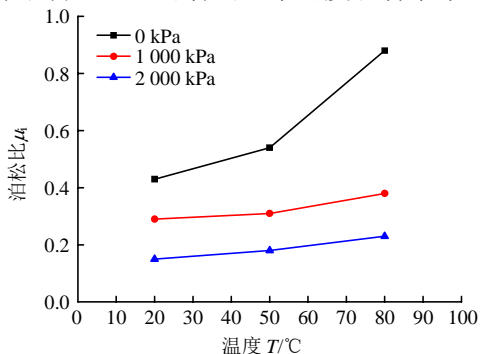
Fig.13 Curves of Young's modulus changing with temperature under different water contents, dry densities and confining pressures

### 3.5 泊松比

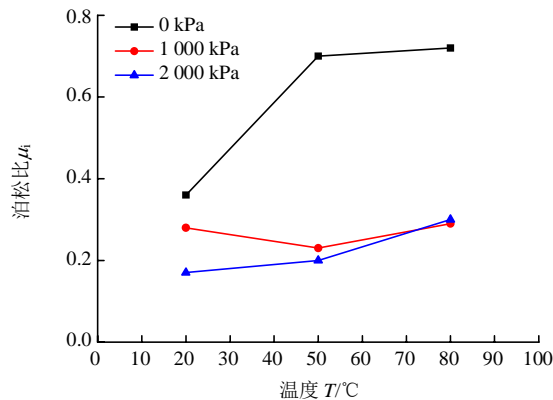
三轴剪切过程中的试样是圆柱形的, 其受力和变形都是轴对称的, 故其侧向应变可由下式确定:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_v - \varepsilon_a}{2} \quad (23)$$

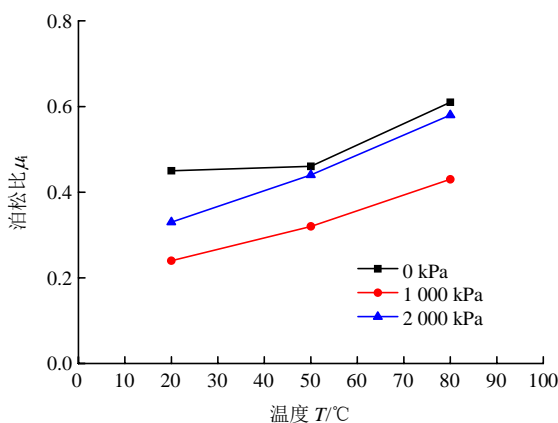
式中:  $\varepsilon_r$  为侧向应变,  $\varepsilon_v$  为体应变,  $\varepsilon_a$  为轴向应变。侧向应变和轴向应变之比即为泊松比  $\mu_t$ , 将计算结果绘于图 14 中。从图 14 中可以看出, 随着温度的升高, 试样的泊松比呈现不断增加的趋势。在干密度较低(1.4 和 1.6 g/cm<sup>3</sup>)时, 随着围压增大, 试样的泊松比逐渐减小; 而在干密度较高(1.8 g/cm<sup>3</sup>)时这一现象并不明显。还可看出, 干密度和含水率对泊松



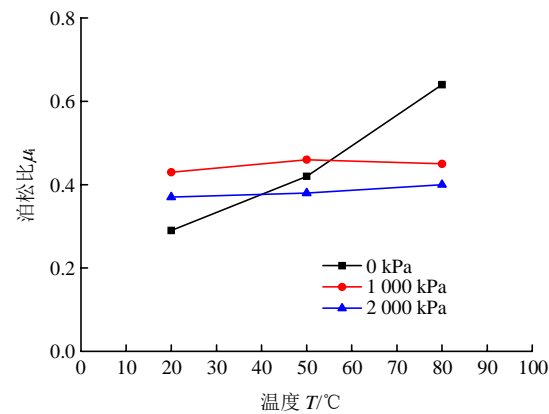
(a) 干密度 1.4 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 5% 试样



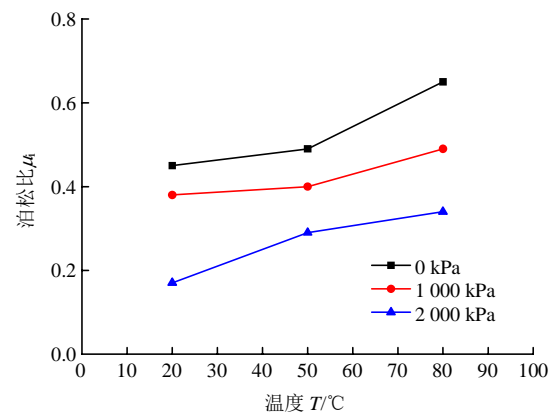
(b) 干密度 1.4 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 15% 试样



(c) 干密度 1.4 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 25% 试样

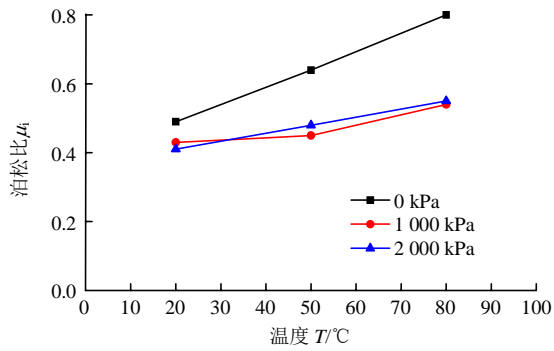


(d) 干密度 1.6 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 5% 试样

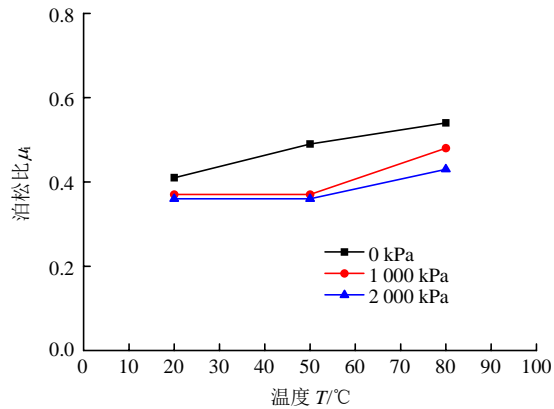


(e) 干密度 1.6 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 15% 试样

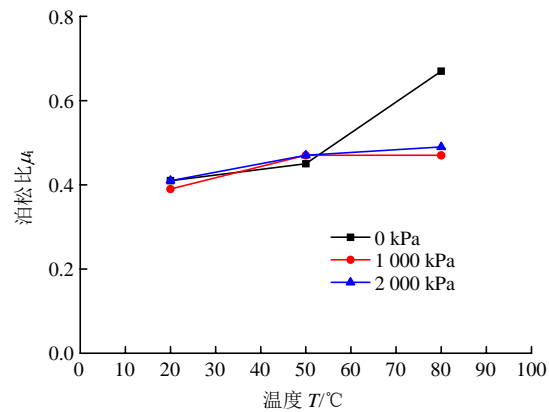




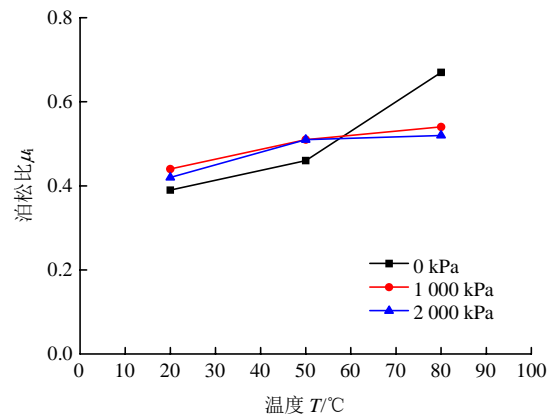
(f) 干密度  $1.6 \text{ g/cm}^3$ , 含水率 25% 试样



(g) 干密度  $1.8 \text{ g/cm}^3$ , 含水率 5% 试样



(h) 干密度  $1.8 \text{ g/cm}^3$ , 含水率 15% 试样



(i) 干密度  $1.8 \text{ g/cm}^3$ , 含水率 25% 试样

图 14 不同含水率、干密度及围压条件下试样泊松比随温度变化的曲线关系

Fig.14 Curves of Poisson's ratio varied with temperature under different water contents, dry densities and confining pressures

比的影响不大。

### 4 结 论

用高温高压土工三轴仪对高庙子膨润土的变形强度等热力学特性进行了系统的三轴剪切试验研究,分析了温度、含水率、干密度和围压对其强度和变形特性的影响,得出的主要结论如下:

(1) 围压和干密度对高庙子膨润土的破坏形态的影响很大,无围压作用的试样均呈现脆性破坏;在干密度较低和围压较高时,试样主要呈塑性破坏,而在干密度较高时试样都是脆性破坏。

(2) 高庙子膨润土的强度随含水率增大而减小;温度和干密度对其强度的影响比较复杂,干密度较低时,偏应力-轴向应变曲线的位置随温度升高而上移;但干密度较高时的情况则完全相反,其原因是由于高温下膨润土中结合水逐渐转变为自由水,导致基质吸力降低,当基质吸力降低引起的强度减小足以抵消温度带来的抗剪强度升高量时,试样抗剪强度就随着温度升高而降低。

(3) 分别建立了高庙子膨润土的黏聚力和内摩擦角随干密度、含水率和温度变化的公式。

(4) 总体上看,初始杨氏模量在干密度较低时随温度升高呈现增加的趋势,而在干密度较高时则相反;随着含水率的升高,初始杨氏模量总体上不断减少。

(5) 随着温度的升高,泊松比呈现略有增加的趋势,其原因是高温下密度较高的结合水转化为密度较低的自由水,从而引起试样剪缩体变减小,有的甚至呈现出剪胀,泊松比也随之呈现增大的趋势;在干密度较低时,随着围压增大,泊松比逐渐减小;而在干密度较高时,这一现象不明显;总体上看,干密度和含水率对泊松比的影响不大。

### 参考文献(References):

[1] 王 驹. 我国高放废物深地质处置战略规划探讨[C]// 中国高放废物地质处置十年进展. 北京: 原子能出版社, 2004: 13 - 25.(WANG Ju. Strategic planning for deep geological disposal of high level radioactive waste in China[C]// Ten Years' Progress in the Geological Disposal of High Level Radioactive Waste in China. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 2004: 13 - 25.(in Chinese))

[2] 潘自强, 钱七虎. 高放废物地质处置战略研究[M]. 北京: 原子能出版社, 2009: 3 - 7.(PAN Ziqiang, QIAN Qihu. Study on geological disposal strategy of high level radioactive waste[M] Beijing: Atomic Energy Publishing House, 2009: 3 - 7.(in Chinese))

[3] 陈正汉, 秦 冰. 缓冲/回填材料热-水-力耦合特性及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 8 - 10.(CHEN Zhenghan, QIN Bing. Coupled thermos-hydro-mechanical properties of buffer/backfill

- material and its application[M]. Beijing: Science Press, 2017: 8 - 10. (in Chinese))
- [4] 刘月妙, 徐国庆, 刘淑芬, 等. 我国高放废物处置库缓冲/回填材料压实膨胀特性研究[J]. 铀矿地质, 2001, 17(1): 44 - 47.(LIU Yuemiao, XU Guoqing, LIU Shufen, et al. Study on compaction and swelling property of buffer/backfill material for HLW repository[J]. Uranium Geology, 2001, 17(1): 44 - 47.(in Chinese))
- [5] 刘月妙, 蔡美峰, 王 驹, 等. 高放废物地质处置库预选缓冲材料压缩性能研究[J]. 铀矿地质, 2007, 23(2): 91 - 95.(LIU Yuemiao, CAI Meifeng, WANG Ju, et al. Compressibility of buffer material for HLW disposal in China[J]. Uranium Geology, 2007, 23(2): 91 - 95.(in Chinese))
- [6] 汪 龙, 方祥位, 申春妮, 等. 膨润土 - 砂混合型缓冲/回填材料渗气规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增 1): 3 381 - 3 388.(WANG Long, FANG Xiangwei, SHEN Chunni, et al. Experimental study of gas permeability of bentonite-sand mixtures as buffer/backfilling materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Supp.1): 3 381 - 3 388.(in Chinese))
- [7] 沈珍瑶, 董 威, 李国鼎. 高压实膨润土力学性能研究[J]. 岩土工程技术, 1998, (4): 45 - 46.(SHEN Zhenyao, DONG Wei, LI Guoding. Study of mechanical properties for high compaction expansive soil[J]. Geotechnical Engineering Technique, 1998, (4): 45 - 46.(in Chinese))
- [8] 沈珍瑶, 李国鼎. 高压实膨润土渗透性试验研究[J]. 大坝观测与土工测试, 1998, 22(1): 25 - 26.(SHEN Zhenyao, LI Guoding. Permeability experiment of highly compacted bentonite[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1998, 22(1): 25 - 26.(in Chinese))
- [9] 叶为民, 钱丽鑫, 王 驹. 高压实高庙子膨润土 GMZ01 的膨胀力特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 36(增 2): 3 861 - 3 865.(YE Weimin, QIAN Lixin, WANG Ju. Characteristics of swelling pressure of densely compacted GaoMiaoZi bentonite GMZ01[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 36(Supp.2): 3 861 - 3 865.(in Chinese))
- [10] CHEN Y G, ZHU C M, YE W M, et al. Effects of solution concentration and vertical stress on the swelling behavior of compacted GMZ01 bentonite[J]. Applied Clay Science, 2016, 124: 11 - 20.
- [11] 温志坚, 神德敬. 高庙子钠基膨润土静力学性能初析[J]. 世界核地质科学, 2006, 22(4): 211 - 214.(WEN Zhijian, SHEN Dejing. A preliminary analysis of the statics properties of the GMZ sodium bentonite[J]. World Nuclear Geoscience, 2006, 22(4): 211 - 214.(in Chinese))
- [12] 温志坚. 中国高放废物处置库缓冲材料物理性能[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 794 - 800.(WEN Zhijian. Physical property of China's buffer material for high-level radioactive waste repositories[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 794 - 800.(in Chinese))
- [13] 秦 冰, 陈正汉, 刘月妙, 等. 高庙子膨润土 GMZ001 三向膨胀力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 756 - 763.(QIN Bing, CHEN Zhenghan, LIU Yuemiao, et al. Characteristics of 3D swelling pressure of GMZ001 bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(5): 756 - 763.(in Chinese))
- [14] 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.(SUN Faxin, CHEN Zhenghan, QIN Bing, et al. Characteristics of three-dimensional swelling pressure of gaomiaozzi bentonite-sand mixture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1): 200 - 207.(in Chinese))
- [15] 朱国平, 刘晓东, 杨 婷. 高庙子膨润土三轴剪切力学性能研究[C]// 第二届废物地下处置学术研讨会论文集. 敦煌: [s. n.], 2008: 205 - 209.(ZHU Guoping, LIU Xiaodong, YANG Ting. Study on triaxial shear mechanical properties of GaoMiaoZi bentonite[C]// Proceedings on Underground Waste Disposal of the Second Symposium. Dunhuang: [s. n.], 2008: 205 - 209.(in Chinese))
- [16] 梁学海. 高庙子钙基膨润土饱和强度研究[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(1): 161 - 164.(LIANG Xuehai. Experimental study on strength of saturated GMZ Ca-bentonite[J]. Sichuan Building Science, 2015, 41(1): 161 - 164.(in Chinese))
- [17] RUTQVIST J, BÖRGESSON L, CHIJIIMATSU M, et al. Coupled thermo-hydro-mechanical analysis of a heater test in fractured rock and bentonite at Kamaishi Mine—comparison of field results to predictions of four finite element codes[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(1): 129 - 142.
- [18] 刘月妙, 王 驹, 曹胜飞, 等. 中国高放废物地质处置缓冲材料大型试验台架和热 - 水 - 力 - 化学耦合性能研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2 756 - 2 762.(LIU Yuemiao, WANG Ju, CAO Shengfei, et al. A large-scale THMC experiment of buffer material for geological disposal of high level radioactive waste in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10): 2 756 - 2 762.(in Chinese))
- [19] XU L, YE W M, CHEN B, et al. Experimental investigations on thermo-hydro-mechanical properties of compacted GMZ01 bentonite-sand mixture using as buffer materials[J]. Engineering Geology, 2016, 213: 46 - 54.
- [20] 陆 飏, 方振东, 秦 冰, 等. 温度循环变化下高庙子膨润土持水特性[J]. 后勤工程学院学报, 2016, 32(1): 69 - 73.(LU Yang, FANG Zhendong, QIN Bin, et al. Water retention property of GMZ Bentonite under temperature cycles[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2016, 32(1): 69 - 73.(in Chinese))
- [21] 张发忠, 方振东, 秦 冰, 等. 不同温度下膨润土膨胀变形行为研究[J]. 后勤工程学院学报, 2017, 33(2): 23 - 27.(ZHANG Fazhong, FANG Zhendong, QIN Bin. et al. Study on Bentonite's swelling strain behaviour at different temperatures[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2017, 33(2): 23 - 27.(in Chinese))
- [22] 蒋江红, 孙德安. 温度对高庙子膨润土浸水膨胀特性的影响[J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2016, 22(10): 1 - 11.(JIANG Jianghong, SUN Dean. Influence of temperature on swelling characteristics of GMZ bentonite due to wetting[J]. Journal of Shanghai University: Natural Science, 2016, 22(10): 1 - 11.(in Chinese))
- [23] CUI Y J, TANG A M, QIAN L X, et al. Thermal-mechanical behavior of compacted GMZ bentonite[J]. Soils and Foundations, 2011, 51(6): 1 065 - 1 074.
- [24] YE W M, WAN M, CHEN B, et al. Temperature effects on the swelling pressure and saturated hydraulic conductivity of the compacted GMZ01 bentonite[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68(1): 281 - 288.
- [25] YE W M, ZHENG Z J, CHEN B, et al. Effects of pH and temperature on the swelling pressure and hydraulic conductivity of compacted GMZ01 bentonite[J]. Applied Clay Sciences, 2014, 101: 192 - 198.
- [26] 张 龙, 陈正汉, 周凤玺, 等. 从变形、强度和水量变化三方面验证非饱和土应力状态变量的合理性[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 905 - 915.(ZHANG Long, CHEN Zhenghan, ZHOU Fengxi, et al. Verify of rationality of two stress state variables of unsaturated soil from deformation, moisture change and strength[J]. Journal of geotechnical engineering, 2017, 39(5): 905 - 915.(in Chinese))
- [27] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley and Sons Inc., 1993: 248 - 251.
- [28] VILLAR M V, LLORET A. Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite[J]. Applied Clay Science, 2004, 26(1): 337 - 350.
- [29] CARLSSON T. Interaction in MX-80 bentonite water electrolyte systems[Ph. D. Thesis][D]. Kiruna: University of Luleå, 1986.
- [30] 陈 皓. 高放废物地质库缓冲材料在高温高压下的变形强度特性研究[硕士学位论文][D]. 南宁: 广西大学, 2015.(CHEN Hao. Research of strength and volume change of buffer material in high temperatura and pressure from high- level radioactive waste repository [M. S. Thesis][D]. Nanjing: Guangxi University, 2015.(in Chinese))