

DOI: 10.11779/CJGE2018S1005

# 高庙子膨润土在高温高压下的强度特性研究

陈皓<sup>1, 2, 3</sup>, 吕海波<sup>\*3</sup>, 陈正汉<sup>4</sup>

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 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防灾减灾研究所, 广西南宁 530004; 4. 陆军勤务学院军事设施系, 重庆 401311)

**摘要:** 高庙子膨润土是中国高放废物地质库的首选缓冲/回填材料, 将长期在高温(100°C左右)高压(数十兆帕)条件下工作。为了探讨高庙子膨润土在高温高压条件下的强度特性, 使用高温高压土工三轴仪, 共做了81个三轴不排水剪切试验, 系统研究了干密度、围压、温度和含水率对其强度特性的影响。研究结果表明: ①围压和干密度对高庙子膨润土的破坏形态的影响很大; 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; 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。本文的研究成果为分析缓冲材料的热-水-力耦合性状提供了科学依据。

**关键词:** 高庙子膨润土; 高温高压土工三轴仪; 强度特性; 强度参数; 干密度; 含水率

**中图分类号:** TU43      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2018)S1-0028-06

**作者简介:** 陈皓(1990-), 男, 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: chenhao4912@163.com。

## Strength properties of GMZ bentonite under high temperatures and pressure

CHEN Hao<sup>1, 2, 3</sup>, LÜ Hai-bo<sup>3</sup>, CHEN Zheng-han<sup>4</sup>

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. College of Civil and

Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Research Institute of Preventing and Mitigating Disasters,

College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 4. Department of Military Facilities, Army Service College,

Chongqing 401311, China)

**Abstract:** GMZ bentonite is the first selection of buffer/backfill material for geological disposal repository of high-level radioactive waste in China. It will work under high temperature and high pressure for a long time. In order to investigate the strength characteristic of GMZ bentonite under high temperature and high pressure, 81 undrained triaxial shearing tests were conducted by using the high-temperature and high-pressure triaxial apparatus, and the effect of dry density, confining pressure, temperature and water content on its strength characteristic were systematically analyzed. The result shows that (1) confining pressure and dry density have a great influence on the failure forms of GMZ bentonite; (2) The strength of GMZ bentonite decrease with the increase of water content; The influence of temperature and dry density on its strength is complex, the position of deviator stress-axial strain curves are rising with the increase of temperature in low dry density, but it's on the contrary in high dry density; (3) The formula of cohesion and internal friction angle with the changing of dry density, water content and temperature of GMZ bentonite are established, respectively. The research results of this paper provide a scientific basis for analyzing the thermos-hydro-mechanical coupling characteristics of buffer materials.

**Key words:** GMZ bentonite; high-temperature and high-pressure triaxial apparatus; strength property; strength parameter; dry density; water content

## 0 引言

随着中国核工业的不断发展, 核电站乏燃料的存量越来越大, 这是中国高放废物的主要来源<sup>[1]</sup>。目前公认的最佳处置高放废物的方式是深部地质处置, 膨润土被认为是理想的缓冲/回填材料而用于隔开废物

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0405100); 国家自然科学基金项目(11672330, 11272353, 11072265); 江苏省交通运输科技项目(2017T12); 南京水利科学研究院基金项目(Y316017)

收稿日期: 2018-02-24

\*通讯作者(E-mail: lhb@glut.edu.cn)

包装罐和基岩。国内外一些学者已经对膨润土特性进行了大量试验，并取得了阶段性的成果。刘月妙等<sup>[2]</sup>研究了高庙子膨润土的膨胀力特性及无侧限压缩性能。秦冰等<sup>[3]</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>[4]</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。朱国平等<sup>[5]</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>[6]</sup>对饱和高庙子钙基膨润土的强度特性进行了研究。

由于受仪器设备所限，目前对膨润土所进行的研究绝大多数都处在“常温低压”状态。而高放废物是会不断发热的；且由于掩埋深度很大，膨润土所受到的围压甚至高达几十兆帕，加之膨润土在地下水浸入后会产生高达 10 MPa 以上的膨胀压力，远非普通三轴仪所能提供。所以对膨润土在高温高压下的热力学特性的研究很有必要。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。

## 1 试验仪器及试验制样方法介绍

### 1.1 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，其照片如图 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；温控箱从侧面加热，底部是不锈钢板，控制温度最高可至 350℃；围压和轴压均由 GDS 压力-体积控制器提供，围压最大可加至 3 MP，体变量测精度为 1 mm<sup>3</sup>，压力量测精度为 1 kPa。试验开始前，为了消除仪器本身所造成的试验误差，对仪器进行了标定。



图 1 高温高压土工三轴仪

Fig. 1 High-temperature and high-pressure triaxial apparatus

### 1.2 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 (GMZ001)，试样为浅灰白色，随着含水率增加稍稍有些偏肉色，基本物理性质和可交换阳离子含量参见文献[7]。

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，最后一层土的上面不喷水；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。

试样的初始干密度分别为 1.4, 1.6, 1.8 g/cm<sup>3</sup>，初始含水率分别为 5%, 15% 和 25%，围压分别控制为 0, 1000, 2000 kPa，温度分别控制为 20℃, 50℃, 和 80℃，共计做了 81 个试验，都是不固结不排水三轴剪切试验。

为了确定合适的剪切速率，正式试验前先做了 3 个不同剪切速率 (0.011, 0.015, 0.033 mm/min) 的试验，结果发现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没有太大不同，故选择 0.033 mm/min 的剪切速率来进行实验。此外，对于控制温度 50℃ 和 80℃ 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℃ 需要 30 min，到达 80℃ 需要 1 h。

## 2 试验结果分析

### 2.1 偏应力 - 轴向应变性状分析

试验发现，土样的破坏形式有两种，①脆性破坏，土样有明显的破裂面；②塑性破坏，土样中部鼓胀，没有破裂面。图 2, 3 分别是干密度等于 1.4 g/cm<sup>3</sup> 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偏应力 - 轴向应变曲线，干密度等于 1.6 g/cm<sup>3</sup> 试样曲线与干密度 1.4 g/cm<sup>3</sup> 的试样类似，限于篇幅不再列出。

从图中可以看到：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, 1.6 g/cm<sup>3</sup>) 和围压较高 (1000, 2000 kPa) 时，试样主要呈塑性破坏；而在干密度较高 (1.8 g/cm<sup>3</sup>) 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 2, 3 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当干密度较低时



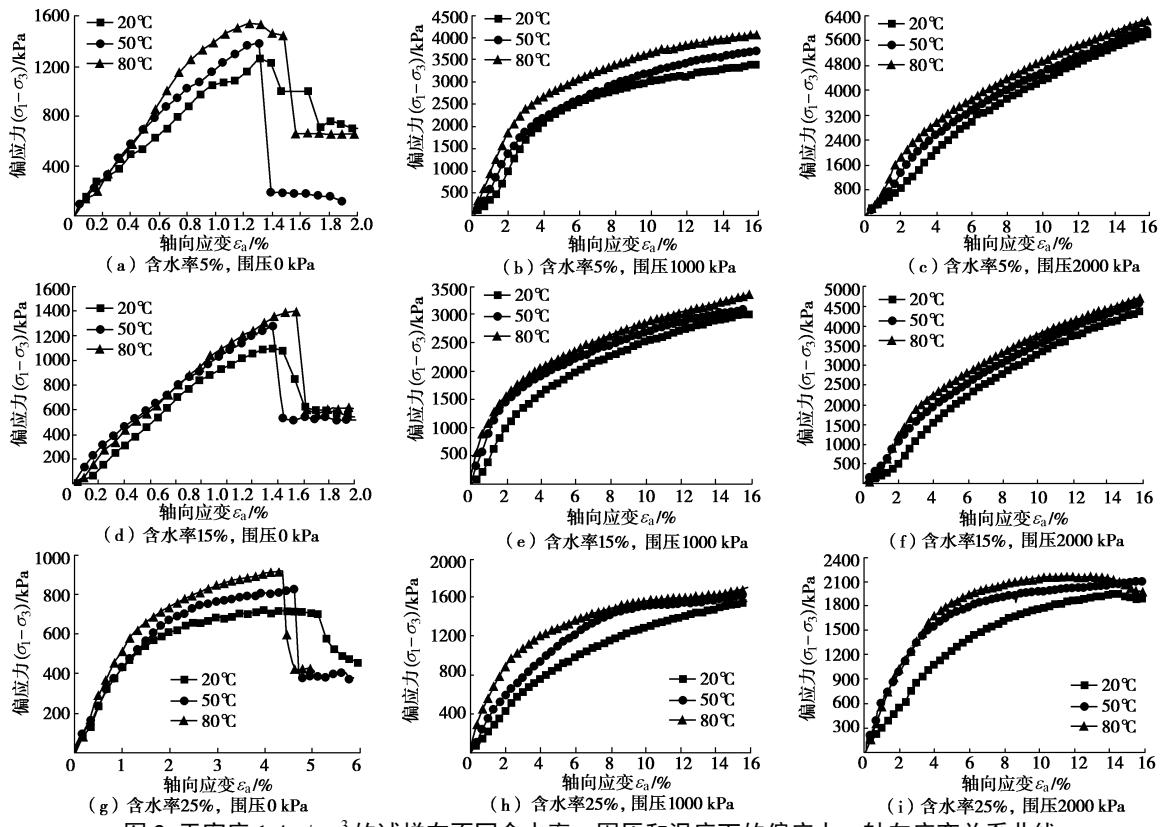


图 2 干密度  $1.4 \text{ g}/\text{cm}^3$  的试样在不同含水率、围压和温度下的偏应力 - 轴向应变关系曲线

Fig. 2 Relationship curves of deviator stress-axial strain of sample with dry density  $1.4 \text{ g}/\text{cm}^3$  under different water contents, confining pressures and temperatures

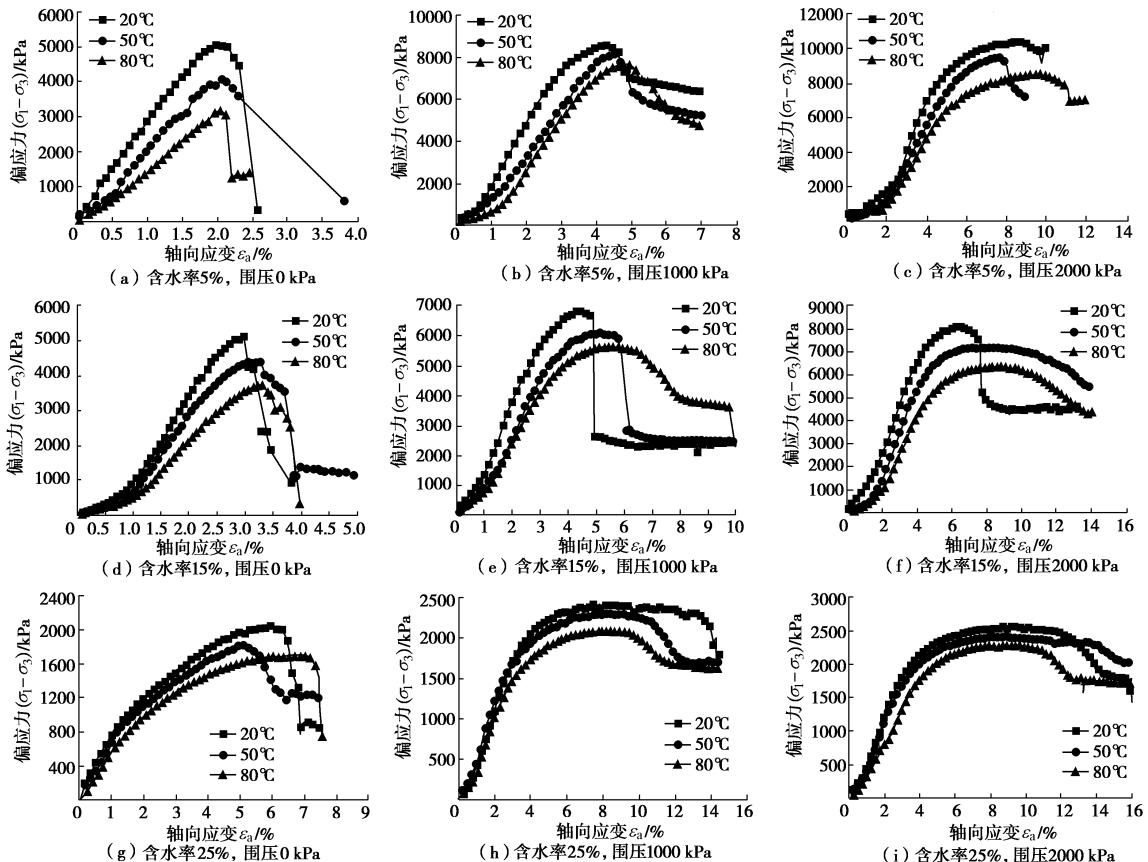


图 3 干密度  $1.8 \text{ g}/\text{cm}^3$  的试样在不同含水率、围压和温度下的偏应力 - 轴向应变关系曲线

Fig. 3 Relationship curves of deviator stress and axial strain of samples with dry density  $1.8 \text{ g}/\text{cm}^3$  under different water contents, confining pressures and temperatures

(1.4, 1.6 g/cm<sup>3</sup>), 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; 而干密度较高时 (1.8 g/cm<sup>3</sup>) 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。

## 2.2 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在此不再列出, 具体参见文献[7]。

根据破坏应力, 在 ( $q_f - p_f$ ) 平面内画出各试样的破坏点, 如图 4 所示。从图 4 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:

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

式中,  $\xi'$  和  $\tan \omega$  分别是直线的截距和斜率, 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, 后者无量纲。使用

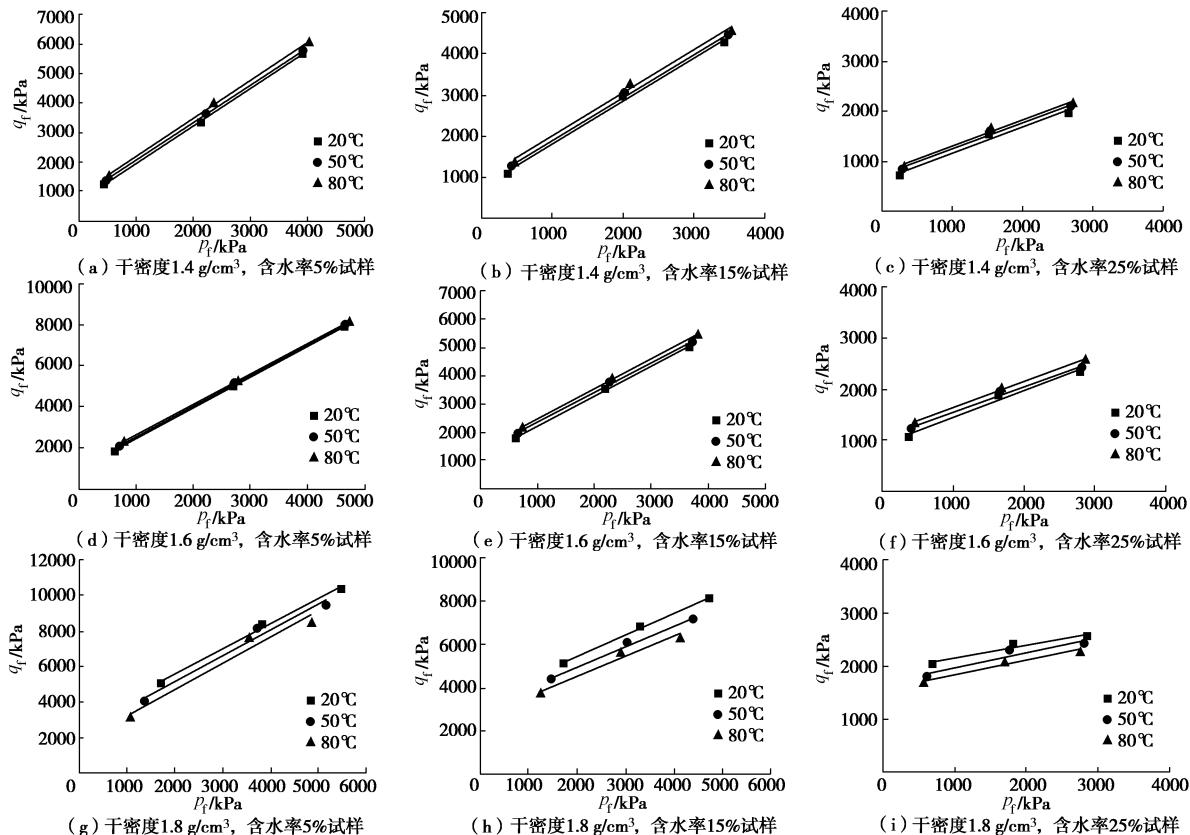


图 4 不同干密度、含水率及温度下的试样在  $p_f - q_f$  平面内的强度包线

Fig. 4 Strength envelopes samples on  $p_f - q_f$  plane under different dry densities, water contents and temperatures

最小二乘法拟合强度包线, 可以得到  $\xi'$  和  $\tan \omega$  的值。

土的黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\phi$  可分别由下式求出:

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

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

其值见文献[7]。

从图 4 可以看出, 干密度 1.4 g/cm<sup>3</sup> 和 1.6 g/cm<sup>3</sup> 的试样的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; 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 2.1 节中得到的结论是一致的。

### (1) 膨润土的黏聚力的变化规律

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 5, 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 5 (a) 所示, 可得黏聚力随含水率变化的关系见下式:

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

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 5 (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:

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

式中,  $T$  为温度, 单位  $^{\circ}\text{C}$ 。最后取  $B=11.58$ ,  $C=-0.47$ , 连同  $A$  一并带入式 (4) 中, 可得干密度  $1.4 \text{ g/cm}^3$  时的黏聚力随温度及含水率的变化:

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

式中, 含水率变化范围  $5\% \sim 25\%$ , 温度变化范围  $20^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 。

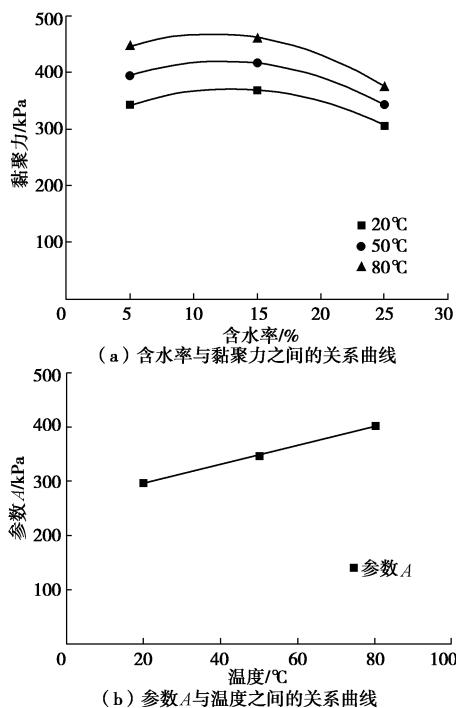


图 5 干密度  $1.4 \text{ g/cm}^3$  的试样黏聚力和含水率及温度的关系

Fig. 5 Relationship among cohesion, water content and temperature under dry density of  $1.4 \text{ g/cm}^3$

同理可得干密度  $1.6 \text{ g/cm}^3$  和  $1.8 \text{ g/cm}^3$  的黏聚力随温度及含水率变化为

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

$$c = 1022.22 - 7.93T + 126.17w - 4.71w^2 \quad . \quad (8)$$

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

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

对不同干密度条件下的  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  再次进行拟合,

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

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

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

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

将  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  分别带入式 (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。

## (2) 膨润土的内摩擦角的变化规律

以干密度  $1.4 \text{ g/cm}^3$  的情况为例。将不同含水率和不同温度下的试样内摩擦角值绘于图 6, 可得内摩擦角随含水率变化为

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

从图中可以看出,  $D$  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为

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

式中,  $w$  为含水率, 变化范围  $5\% \sim 25\%$ 。

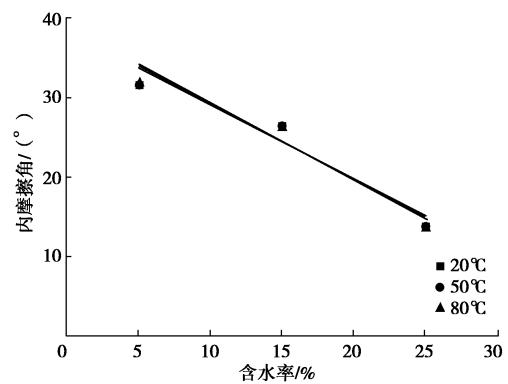


图 6 干密度为  $1.4 \text{ g/cm}^3$  时内摩擦角与含水率的关系

Fig. 6 Relationship between internal friction angle and water content of samples under dry density of  $1.4 \text{ g/cm}^3$

同理可得干密度  $1.6$ ,  $1.8 \text{ g/cm}^3$  条件下内摩擦角随温度和含水率变化的公式:

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

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

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

$$\varphi = \lambda_1 - \lambda_2 w \quad . \quad (18)$$

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

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

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

将  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  分别带入式 (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 结 论

用高温高压土工三轴仪对高庙子膨润土的强度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。

(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。

## 参考文献:

- [1] 王驹. 我国高放废物深地质处理战略规划探讨[J]. 铀矿地质, 2004, 20(4): 196–204. (WANG Ju. Analysis of development strategy for the geological disposal of high-level radioactive waste in China[J]. Uranium Geology, 2004, 20(4): 196–204. (in Chinese))
- [2] 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 Yue-miao, XU Guo-qing, LIU Shu-fen, 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))
- [3] 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, CHNE Zheng-han, LIU Yue-miao, et al. Characteristics of 3D swelling pressure of GMZ001 bentonite [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009(5): 756–763. (in Chinese))
- [4] 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 Fa-xin, CHNE Zheng-han, QIN Bing, et al. Characteristics of three-dimensional swelling pressure of gaomiaozi bentonite-sand mixture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1): 200–207. (in Chinese))
- [5] 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, 2008: 205–209. (ZHU Guo-ping, LIU Xiao-dong, YANG Ting, et al. Study on triaxial shear mechanical properties of Gaomiaozi bentonite[C]// Proceedings of the second symposium on underground waste disposal, Dunhuang, 2008: 205–209. (in Chinese))
- [6] 梁学海. 高庙子钙基膨润土饱和样强度研究[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(1): 161–164. (LIANG Xue-hai. Experimental study on strength of saturated GMZ Ca-bentonite[J]. Sichuan Building Science, 2015, 41(1): 161–164. (in Chinese))
- [7] 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[D]. 南宁: 广西大学, 2015. (CHEN Hao. Research of strength and volume change of buffer material in high temperature and pressure from high-level radioactive waste repository[D]. Nanning: Guangxi University, 2015. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)