



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2306104

引用格式:张旺,莫品强,张启革,等.黏土岩各向异性轴向延伸试验[J].科学技术与工程,2024,24(20):8648-8654.

Zhang Wang, Mo Pinqiang, Zhang Qige, et al. Experiment of anisotropic axial extension of clay rock[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(20): 8648-8654.

黏土岩各向异性轴向延伸试验

张旺^{1,2}, 莫品强^{1*}, 张启革², 秦敢², 王飞阳³

(1. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 徐州 221116;
2. 深圳市城市公共安全研究院有限公司, 深圳 518035; 3. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要 黏土岩具有极低的渗透性、裂缝的自密闭潜力及高吸附性的等优点,被运用于核废料封存主基岩。为了研究层面对黏土岩的峰值强度、破坏模式及弹性模量的影响,针对各向异性的黏土岩,通过实施一系列不同层理角度试样的轴向延伸循环加卸载试验。轴向延伸试验是在恒定的平均应力下同时增加径向应力和减少轴向应力来完成。试验结果表明,黏土岩轴向峰值强度与层理面有关。在与层理平行和垂直的方向达到最大,而在钻样取芯与层理方向的夹角 $\theta=45^\circ$ 方向表现最低,不同层理分布试样的强度曲线呈U形。不同角度的岩石破坏准则能较好地描述黏土岩轴向峰值强度特征。黏土岩破坏模式也因层理面而异,试样破坏主要以拉伸断裂为主,而在 $\theta=45^\circ$ 方向表现压缩破坏。弹性模量在不同的层理角度表现出较大差异性,垂直和平行于层理方向的弹性模量数值明显大于其他方向。

关键词 黏土岩; 轴向延伸; 各向异性; 轴向峰值强度; 弹性模量

中图分类号 TU458;

文献标志码 A

Experiment of Anisotropic Axial Extension of Clay Rock

ZHANG Wang^{1,2}, MO Pin-qiang^{1*}, ZHANG Qi-ge², QIN Gan², WANG Fei-yang³

(1. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Health Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Shenzhen Urban Public Safety and Technology Institute, Shenzhen 518035, China; 3. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

[Abstract] Clay rocks have the advantages of extremely low permeability, self-sealing potential of fractures, and high sorption capacity, and are thus chosen as a potential geological barrier for underground disposal of radioactive waste. In order to study the influence of bedding plane on the peak strength, failure mode and elastic modulus of clay rocks, a series of axial extension (AE) cyclic loading and unloading tests were carried out for specimens with different bedding angles. The AE test was performed by increasing the radial stress and decreasing the axial stress at the same time under constant mean stress. The experimental results show that the peak axial strength of clay rocks is related to the bedding plane. The peak strength of clay rocks reaches the maximum in the direction parallel to and perpendicular to bedding, and the lowest in the direction the angle between drilling core and bedding direction $\theta=45^\circ$. The strength curves of specimen with different bedding angles show U shape. The characteristics of the axial peak strength of clay rock can be described well by the rock breaking criteria at different angles. The failure pattern of clay rock also varies with bedding plane, the samples are mainly tensile fracture, while the compressive failure occurs at $\theta=45^\circ$. The elastic modulus shows great difference in different bedding angles, and the parallel and vertical directions of bedding are obviously larger than other directions.

[Keywords] clay rock; axial extension; anisotropy; axial peak strength; elastic modulus

经济的快速腾飞,使得中国成为当今世界上能源消耗大国之一。21 世纪能源的短缺或将影响着中国经济的可持续发展。核电具有能量高、易洁净、便于施工等优点,被广泛运用于发达国家。推行核电的发展可以有效缓解中国面临的能源短缺问题。然而放射性核废物的产生是核电运用过程中不可避免的问题。因此,如何安全处置放射性核废物是世界各国所

面临的共同难题^[1]。中外学者通过不断研究、对比分析,认为深部地质处置是目前核废料最优的处理方式^[2-3]。黏土岩由于有一定机械强度、稳定的地质结构、渗透率低及高吸附能力以阻止放射性核素的扩散等优点被许多国家的研究机构视为高放废物处置库围岩的候选基岩。受层理面影响,黏土岩表现出明显的各向异性,这对于处置库的设计和安全性评估,特

收稿日期: 2023-08-09 修订日期: 2024-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(52178374)

第一作者: 张旺(1990—),男,汉族,湖北黄石人,博士。研究方向:岩土力学。E-mail:529395276@qq.com。

* 通信作者: 莫品强(1988—),男,汉族,江苏徐州人,博士,副教授。研究方向:土力学与基础工程。E-mail:pinqiang.mo@cumt.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

别是关于放射性核素通过处置库周围开挖区迁移的潜在风险有重要的影响。

目前,关于黏土岩各向异性的各类工作,中外学者已取得了一系列成果。黏土岩的不均一性、非连续性、各向异性特征导致了它的力学行为比一般均质、单一、各向同性岩土材料更加复杂^[4-5]。文献[6-8]以各向同性摩尔-库伦准则为基础,研究了岩体各向异性剪切强度破坏,分析计算表明该屈服准则均与3个大主应力紧密相关。文献[9-10]对力与层理面在不同角度下的岩体进行了系列研究,认为层状岩石各向异性在各类试验中应作为重要特征来考虑。Shao等^[11-12]和Duveau等^[13]通过分析各向异性岩体材料的一些失效准则,从本构理论研究出发,揭示了各向异性材料的损伤机理。Abdi等^[14]和Valès等^[15]对黏土岩的研究表明,压缩强度取决于应力方向与层理面之间的角度 θ ,当后者在 $45^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 变化时,呈近线性依赖关系,但在 $\theta=0^{\circ}$ 时这种关系不再成立。然而,文献[16-17]通过分析等向性压缩试验,Callovo-Oxfordian地区黏土岩 CO_x 的初始力学各向异性并不明显。Zhang等^[18]通过压痕试验,发现黏土岩试样在垂直于层理方向的弹性模量对水饱和度的敏感性小于平行层理方向。Liu等^[19-20]从三轴压缩流变试验研究黏土岩表明,相同的应力条件下,垂直于层理方向的应变(轴向,横向)要大于平行方向,而流变速率却相反。王相^[21]通过分析各向异性岩石的渗流特征得出,对于各向异性岩石,渗流速度与压力一般不平行。赵东雷等^[22]通过对岩体各向异性损伤模型的研究,可以更好地把岩石损伤相关理论用于工程实践。Zhang等^[23-25]对黏土岩不同的层理角度(0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90°)进行不同的路径加载试验,得到峰值强度在平行或者垂直于层理方向达到最大,其他方向次之。综上可知,中外学者对黏土岩强度、破坏模式及损伤准则的各向异性开展了广泛的研究,其主要专注于常规的应力路径条件下的试验和理论分析,对于三轴拉伸条件下黏土岩的各向异性试验研究成果较少,而在实际核废料地下洞室开挖损伤区附近,岩体普遍存在着拉裂,因此针对岩体的拉伸研究具有十分重要的实际意义。

鉴于此,基于不同层理角度黏土岩的轴向延伸试验,研究了层理面影响下黏土岩的强度特征、破坏模式及弹性模量,以揭示黏土岩的力学行为在各向异性中产生的变化规律特征。为深部地质处置核废料的安全评估工作提供合理的支撑。

1 试验准备

1.1 试样制备

试验所用黏土岩试样来自法国核废料实验室,

该实验室位于地下490~520 m,由法国核废料管理署投资建造。黏土岩的组成大致包括:黏土占31%~53%,石英占20%~38%,碳酸盐占18%~42%,长石占1%~4%^[26-27]。富含黏土的岩石孔隙度为14%~20%^[28],天然含水量在5%~8%^[29]。

为获取不同层理角度的黏土岩试样,在钻样取芯时,钻取方向与层理面的夹角分别为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° ,如图1所示。用钻孔机将试样切割圆柱形,并在两端抛光至直径/高度($D/H=20\text{ mm}/40\text{ mm}$)的尺寸,径向误差 $\pm 0.1\text{ mm}$,端面平行度 $\pm 0.01\text{ mm}$,详细物理参数如表1所示。

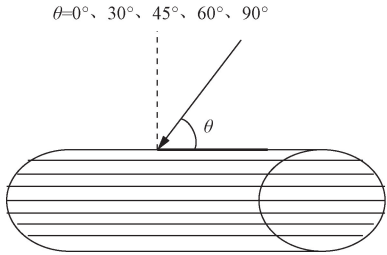


图1 黏土岩定向取样示意图
Fig. 1 Directional coring diagram of clay rock

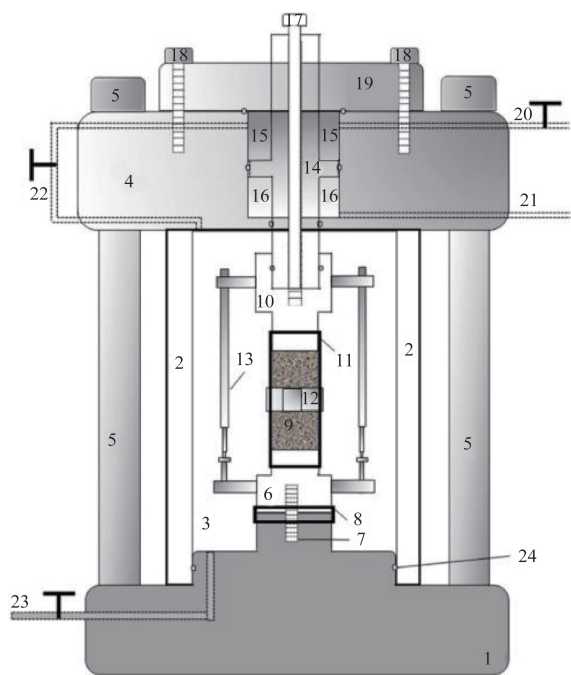
表1 黏土岩试样参数
Table 1 Clay rock sample parameters

试样编号	直径/ mm	高度/ mm	θ / ($^{\circ}$)	轴向应力 峰值/MPa	偏应力 峰值/MPa
EST57912-AE1	19.84	40.21	0	-0.507 9	18.912 1
EST57912-AE2	19.92	39.95	30	-0.107 4	18.899 8
EST57912-AE3	19.89	40.01	45	1.029 7	17.221 1
EST57912-AE4	19.96	39.88	60	-0.130 5	19.004 7
EST57912-AE5	19.91	39.91	90	-0.529 7	18.905 2

1.2 试验装置及实施方案

本试验选用法国里尔大学Lamcube实验室自主研发的三轴测试仪(图2^[30]),该设备可实现不同温度、渗流、应力、化学等多场耦合条件下岩石短期、长期力学以及渗透性研究。该仪器测试系统由围压室、上压头、底座、螺杆及高灵敏度传感器等部件组成。并设有偏压、孔压、围压加载泵。各加载系统独立工作,互不干扰,受环境影响小。

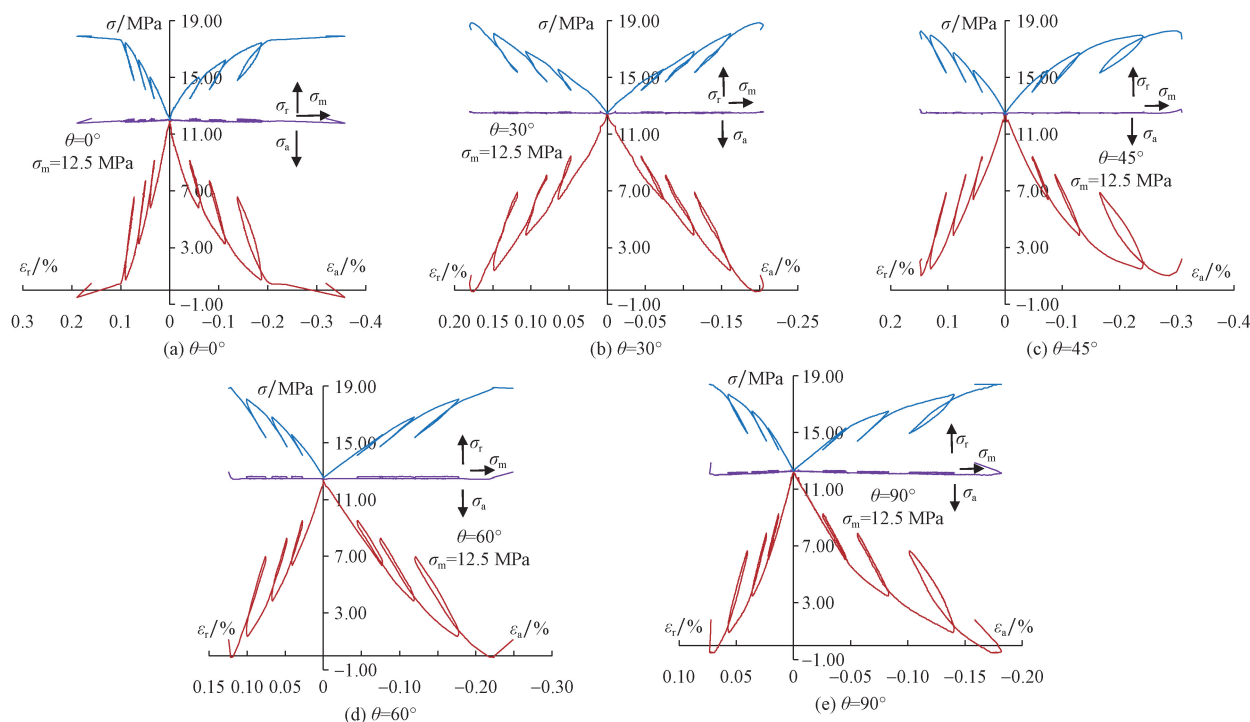
根据实际核废料存储过程中,原岩处于12.0 MPa的原位应力状态,考虑设备及测试误差,本试验选取12.5 MPa为初始条件。首先以0.1 MPa/min对试样施加静水压力至12.5 MPa,待应变稍稳定后开始实施轴向延伸循环加卸载操作直至试样破坏,整个试验过程始终保持平均应力不变,增加径向应力同时降低轴向应力,加载路径如图3所示。试验过程中对应力、变形进行实时监测和数据采集。对于每个应力或者应变分量,均以压为正拉为负。



1 为底座;2 为三轴围压桶;3 为三轴围压室;4 为上压头;5 为连接螺杆;6 为试样底部支撑;7 为连接螺栓;8 为密封橡胶;9 为试样;10 为试样顶部连接头;11 为橡胶套;12 为侧向应变环;13 为轴向应变计;14 为活塞;15 为自动压力平衡室;16 为拉力生产室;17 为拉力杆;18 为压头上部连接杆;19 为密封压力平衡室盖;20 为压力连接管;21 为拉力泵;22 为轴压、围压连接管;23 为围压管;24 为底座密封圈

图2 多场耦合三轴流变仪^[30]

Fig. 2 Used testing apparatus with multi-physics coupling^[30]



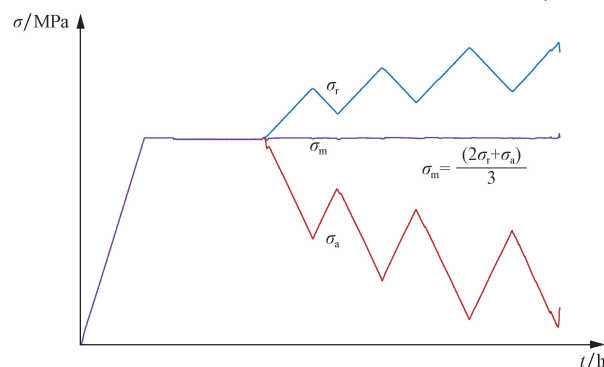
ε_a 为轴向应变; ε_r 为横(侧)向应变

图4 应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves

2 试验结果

图4给出了不同层理角度($\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)黏土岩试样在平均应力12.5 MPa条件下轴向延伸试验的应力-应变曲线,可以看出,所有试样在破坏前都经历3个等级的循环荷载,应力-应变曲线随循环荷载等级的提升逐渐稀疏,应变(轴向、径向)随应力等级的增加而逐渐增大,同等应力水平下,轴向应变大于径向应变。各个层理角度黏土岩试样的应力-应变曲线变化规律大体相似,都经历了内部孔隙被压密、近似弹性变形、裂纹萌生与贯通阶段和破坏后阶段。根据图4及表1可知,垂直



σ 为应力; t 为时间; σ_r 为横(侧)向应力; σ_a 为轴向应力; σ_m 为平均应力

图3 加载路径

Fig. 3 Loading path

($\theta = 90^\circ$)或者平行($\theta = 0^\circ$)于层理方向的试样破坏强度达到最大,而 $\theta = 45^\circ$ 方向最小,其他方向($\theta = 30^\circ$ 、 60°)介于两者之间,试样在峰值强度后均呈现出明显的脆性破坏现象。

不同层理方向的试样试验破坏后如图5所示,试样尺寸均为20 mm(直径)×40 mm(高),不同的层理角度,破坏特征有斜截面断裂和端部断裂两大类,破坏面形成的角度因层理角度而异。在垂直和平行于层理方向试样表现为典型的拉伸破坏,破坏面水平分布出现在试样两个端部附近。其他层理方向试样的破坏面均与大主应力方向呈现不同的夹角,而在 $\theta = 45^\circ$ 时,破坏面的方向与层理方向几乎一致,这与三轴压缩试验破坏现象十分相似,以斜截面受剪破坏为主。

为了探究黏土岩弹性模量随层理方向的变化规律。定义在应力-应变曲线中,卸载-加载直线线段的斜率为所研究的弹性模量,即 $M_{11} = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_1}$,

$M_{31} = \frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\varepsilon_1}$, $M_{13} = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_3}$, $M_{33} = \frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\varepsilon_3}$,这4个模量与偏应力加载等级水平对应关系如图6所示。其中, M_{ij} 为*j*方向的应力在*i*方向引起的弹性模量, $\Delta\sigma_1$ 为轴向应力增量, $\Delta\sigma_3$ 为横(侧)向应力增量, $\Delta\varepsilon_1$ 为轴向应变增量, $\Delta\varepsilon_3$ 为横(侧)向应变增量。

由图6可知,模量随偏应力加载等级水平和层理方向波动。 M_{11} 、 M_{31} 的变动范围分别为[8, 16]、[-8, -4] GPa。且 M_{11} 波动数值约为 M_{31} 的2倍。不同层理方向试样的模量在同一偏应力等级水平中大小不一,垂直($\theta = 90^\circ$)或平行($\theta = 0^\circ$)与层理方向明显大于其他方向($\theta = 30^\circ$ 、 45° 、 60°)。其他两个模量 M_{13} 、 M_{33} 也表现出相似的变化规律。

3 讨论

根据上述试验结果,分别从轴向峰值强度、破坏模式、弹性模量对不同层理方向的黏土岩进行深入分析。由应力-应变图(图4)可知,试样的轴向峰值强度在 $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$ 最高, $\theta = 45^\circ$ 最低,呈现出两

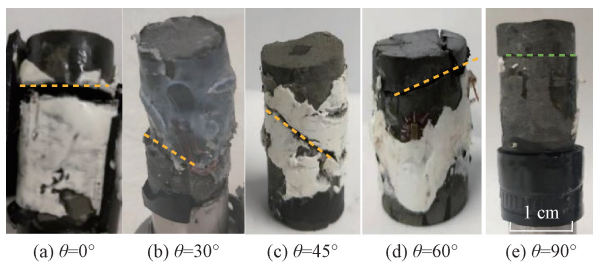
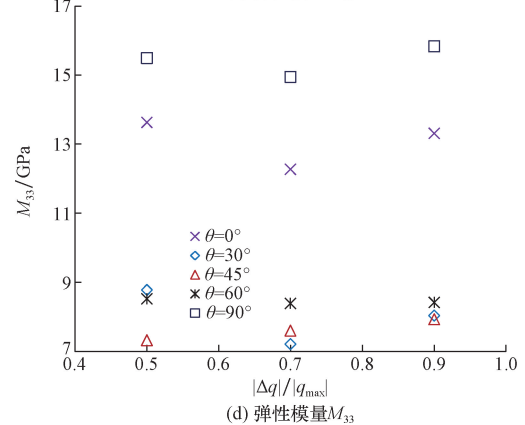
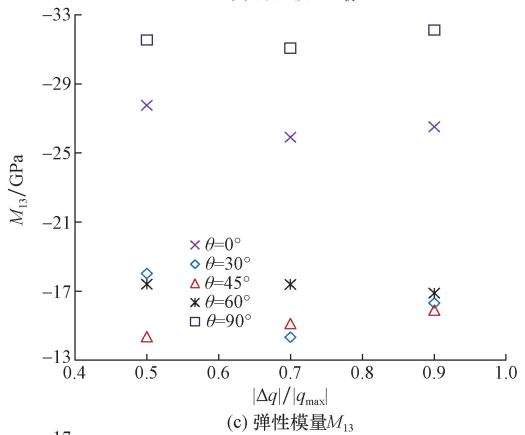
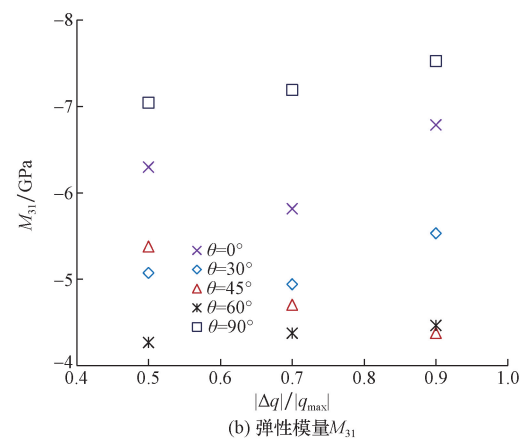
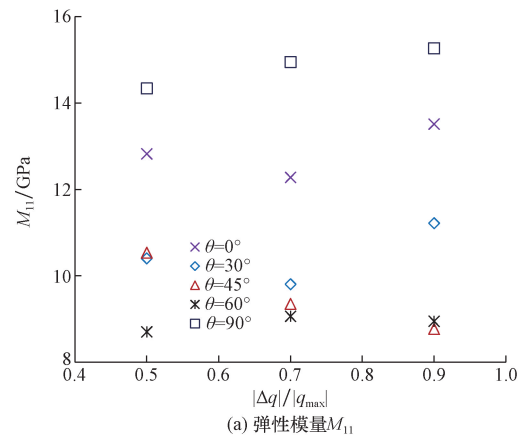


图5 破坏模式

Fig. 5 Fracture modes



为偏应力增量绝对值与最大偏应力绝对值之比

图6 AE试验卸载模量的变化

Fig. 6 Unloading moduli variation during AE tests

边高中间低的变化规律。由于试样在 $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$ 处的最大强度非常相似,因此破坏强度与主应力方向的关系可初步基于各向异性岩石的 Jaeger 破坏准则^[31],该破坏准则较全面地考虑了岩土材料的强度、结构面及层理方向等多种因素,能很好地对岩石三轴延伸破坏机理进行模拟分析,用式(1)、式(2)所示的模型进行修正。

$$\sigma_F = (\sigma_1 - \sigma_3)_F = \frac{2(C_0 + \sigma_3 \tan \varphi)}{\sqrt{(\tan \varphi)^2 + 1} - \tan \varphi} \quad (1)$$

$$C_0 = A - B [\cos 2(\theta - \theta_{c0})]^n \quad (2)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为破坏时大、小主应力; C_0 、 φ 、 θ 分别为黏聚力、内摩擦角、层理夹角; A 、 B 、 θ_{c0} 、 n 为经验系数;根据文献[31]可知, σ_F 与本试验中偏应力 q 一致。

根据岩石 Jaeger 破坏准则,模拟结果如图 7 所示,其轴向峰值强度变化规律与试验结果基本一致。由此可知,受层理面影响,黏土岩轴向延伸峰值强度呈现 U 形变化规律,各向异性明显。不同角度的岩石 Jaeger 破坏准则可以很好地描述黏土岩峰值强度特征。由于三轴拉伸测试包括了延伸和拉伸阶段,定义当 $\sigma_1 = 0$ 时为拉压分界, $\sigma_1 > 0$ 试样为压缩破坏, $\sigma_1 < 0$ MPa 为拉伸破坏。由图 7 可知,平均应力 $\sigma_m = 12.5$ MPa 条件下,在层理夹角 $\theta = 45^\circ$ 时, $\sigma_1 > 0$,整个试样处于受压状态,表现为径向压缩剪切破坏。其他层理方向($\theta = 0^\circ$ 、 30° 、 60° 、 90°) $\sigma_1 < 0$,当大主应力由压缩转变为拉应力时,试样的破坏主要以拉应力驱动,表现为水平拉伸断裂为主。

由图 6 可知,不同层理方向试样的弹性模量数值大小不一。假设黏土岩是一种横向各向同性材料,在循环加卸载试验过程中表现出近乎弹性行为,应力-应变关系可用增量形式表示为

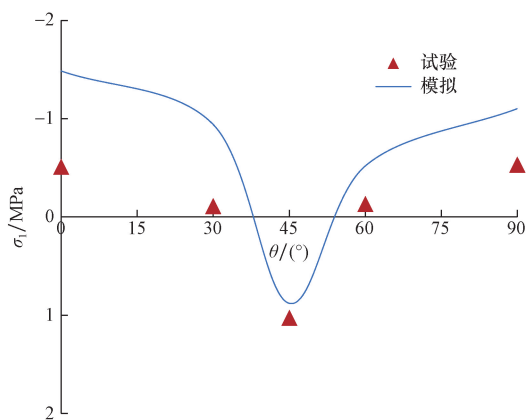


图 7 不同层理角度试样的轴向峰值强度

Fig. 7 Axial peak strength specimen with different bedding angles

$$\begin{bmatrix} \Delta \varepsilon_1 \\ \Delta \varepsilon_2 \\ \Delta \varepsilon_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_3} & -\frac{\nu_{13}}{E_3} \\ -\frac{\nu_{31}}{E_1} & \frac{1}{E_3} & -\frac{\nu_{23}}{E_3} \\ -\frac{\nu_{31}}{E_1} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \sigma_1 \\ \Delta \sigma_2 \\ \Delta \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中: E_i 为 i 方向的弹性模量, $i = 1, 3$; ν_{ij} 为 j 方向的应力在 i 方向引起的泊松比; $\Delta \sigma_2$ 为小主应力增量; $\Delta \varepsilon_2$ 为小主应变增量。

由于试样为圆柱体状,可得

$$\begin{cases} \Delta \varepsilon_1 = \frac{1}{E_1} \Delta \sigma_1 - \frac{2\nu_{13}}{E_3} \Delta \sigma_3 \\ \Delta \varepsilon_3 = -\frac{\nu_{31}}{E_1} \Delta \sigma_1 + \frac{1 - \nu_{32}}{E_3} \Delta \sigma_3 \end{cases} \quad (4)$$

本试验过程中,为保持平均应力不变,令 $\Delta \sigma_1 = -2\Delta \sigma_3$,则有

$$\begin{cases} 1 = \frac{-2\Delta \sigma_3}{\Delta \varepsilon_1} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{\nu_{13}}{E_3} \right) \\ 1 = \frac{\Delta \sigma_3}{\Delta \varepsilon_3} \left(\frac{2\nu_{31}}{E_1} + \frac{1 - \nu_{32}}{E_3} \right) \end{cases} \quad (5)$$

由图 6 的模量定义可得

$$\begin{cases} \frac{1}{E_1} + \frac{\nu_{13}}{E_3} = -\frac{1}{2M_{31}} \\ \frac{2\nu_{31}}{E_1} + \frac{1 - \nu_{32}}{E_3} = \frac{1}{M_{33}} \end{cases} \quad (6)$$

进一步假设黏土岩是一种各向同性材料,可得

$$\begin{cases} -\frac{1}{2M_{31}} = \frac{1 + \nu}{E} \\ \frac{1}{M_{33}} = \frac{1 + \nu}{E} \end{cases} \quad (7)$$

即

$$\begin{cases} \frac{E}{2(1 + \nu)} = -M_{31} = G \\ M_{33} = -2M_{31} \end{cases} \quad (8)$$

由此可知,假设黏土岩为各向同性材料,由

式(1)~式(8)及 $\Delta \sigma_1 = -2\Delta \sigma_3$ 可得出 $\frac{M_{11}}{M_{31}} = -2$,而计算比值大于或者小于理论值 -2 ,如图 8 所示,这与前面假设材料的各向同性不一致。由于层理面的存在,黏土岩表现结构各向异性特征。

4 结论

通过对不同层理方向的黏土岩进行轴向延伸循环加卸载试验,在恒定平均应力($\sigma_m = 12.5$ MPa)条件下,根据试验数据及分析可得出以下结论。

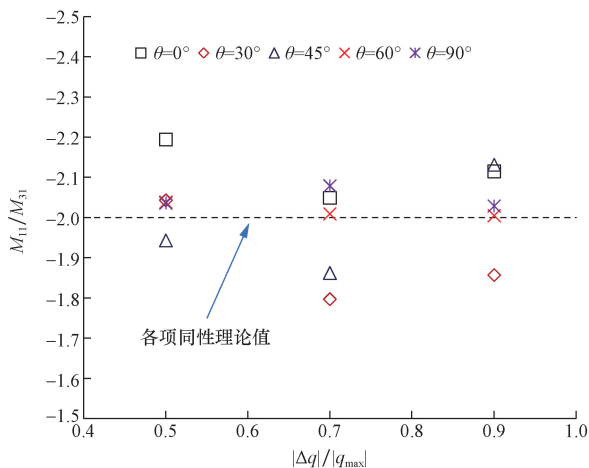


图8 不同层理角度的各项同性验证

Fig.8 Verification of isotropy with different bedding angles

(1)黏土岩轴向峰值强度与层理方向密切相关。与层理平行($\theta=0^\circ$)和垂直($\theta=90^\circ$)的方向达到最大,而在 $\theta=45^\circ$ 方向最低,其他层理方向($\theta=30^\circ, 60^\circ$)次之。整体上表现出两边高、中间低的规律特征。不同角度的岩石破坏准则也大致呈现U形变化规律,能较好描述黏土岩轴向峰值强度特征。

(2)黏土岩的破坏类型因层理方向不同而异。在 $\theta=45^\circ$ 方向试样的破坏由压应力控制,表现为压缩剪切破坏。其他层理方向($\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)破坏由拉应力驱动,表现为水平拉伸断裂。

(2)不同层理方向表现出的各项异性对黏土岩弹性模量的影响很明显。垂直和平行于层理方向的弹性模量数值明显大于其他方向,应力-应变增量关系的理论分析进一步证实黏土岩这种材料结构各向异性。

参 考 文 献

- [1] 闵茂中, 陈式. 放射性废物处置原理[M]. 北京: 原子能出版社, 1998.
Min Maozhong, Chen Shi. Principles of radioactive waste disposal [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1998.
- [2] 潘自强, 钱七虎. 我国高放废物地质处置战略研究[J]. 中国核电, 2013, 6(2): 194-196.
Pan Ziqiang, Qian Qihu. The geological disposal of high-level radioactive waste strategy research in China[J]. China Nuclear Power, 2013, 6(2): 194-196.
- [3] 彭超, 唐军, 冯爱国, 等. 涪陵页岩气储层含气性测井评价[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(2): 190-196.
Peng Chao, Tang Jun, Feng Aiguo, et al. Gas content ability evaluation by logging technology in fuling shale gas reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(2): 190-196.
- [4] 徐志英. 岩石力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
Xu Zhiying. Rock mechanics[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2002.
- [5] 王思敬. 论岩石的地质本质性及其岩石力学演绎[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 433-450.
Wang Sijing. Geological nature of rock and its deduction for rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 433-450.
- [6] 张贵科, 徐卫亚. 节理岩体正交各向异性等效强度参数研究[J]. 岩土工程学报, 2007(6): 806-810.
Zhang Guike, Xu Weiya. Study on orthotropic equivalent strength parameters of jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007(6): 806-810.
- [7] 徐卫亚, 张贵科. 正交各向异性剪切屈服准则研究及其数值实现[J]. 岩土力学, 2008(5): 1164-1168.
Xu Weiya, Zhang Guike. Study on orthotropic shear yield criterion and its numerical implementation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(5): 1164-1168.
- [8] 宁宇, 徐卫亚, 郑文棠, 等. 柱状节理岩体随机模拟及其表征单元体尺度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(6): 1202-1208.
Ning Yu, Xu Weiya, Zheng Wentang, et al. Random simulation and characterization of columnar jointed rock masses at the unit scale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(6): 1202-1208.
- [9] 赵文瑞. 泥质粉砂岩各向异性强度特征[J]. 岩土工程学报, 1984(1): 32-37.
Zhao Wenrui. Anisotropic strength characteristics of argillaceous siltstone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984(1): 32-37.
- [10] Tien Y M, Kuo M C. A failure criterion for transversely isotropic rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(3): 399-412.
- [11] Shao J F. Poroelastic behaviour of brittle rock materials with anisotropic damage[J]. Mechanics of Materials, 1998, 30(1): 41-53.
- [12] Shao J F, Ata N, Ozanam O. Study of desaturation and resaturation in brittle rock with anisotropic damage[J]. Engineering Geology, 2005, 81(3): 341-352.
- [13] Duveau G, Shao J F, Henry J P. Assessment of some failure criteria for strongly anisotropic geomaterials[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd., 1998.
- [14] Abdi H, Labrie T S, Nguyen J D, et al. Laboratory investigation of the mechanical behaviour of Tournemire shale[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(1): 3-16.
- [15] Valès F, Minh D N, Gharbi H, et al. Experimental study of the influence of the degree of saturation on physical and mechanical properties in Tournemire shale (France)[J]. Applied Clay Science, 2004, 26(1/4): 197-207.
- [16] Chiarelli A S, Shao J F, Hoteit N. Modelling of elastic-plastic damage behaviour of a claystone[J]. International Journal of Plasticity, 2003, 19(1): 23-45.
- [17] Hoxha D, Giraud A, Hommand F, et al. Saturated and unsaturated behaviour modelling of Meuse-Haute-Marne argillite[J]. International Journal of Plasticity, 2007, 23(5): 733-766.
- [18] Zhang F, Xie S Y, Hu D W, et al. Effect of water content and structural anisotropy on mechanical property of claystone[J]. Applied Clay Science, 2022, 69: 79-86.
- [19] Liu Z B, Xie S Y, Shao J F, et al. Effects of deviatoric stress and structural anisotropy on compressive creep behavior of a clayey rock[J]. Applied Clay Science, 2015, 114: 491-496.

- [20] Liu Z, Shao J, Xie S, et al. Mechanical behavior of claystone in lateral decompression test and thermal effect[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52: 321-334.
- [21] 王相. 各向异性岩石方向渗透率计算模型[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(17): 5037-5039.
Wang Xiang. Directional permeability calculation model for anisotropic rock[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(17): 5037-5039.
- [22] 赵东雷, 左双英, 王嵩, 等. 层状岩体各向异性损伤模型及验证[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(11): 254-261.
Zhao Donglei, Zuo Shuangyi, Wang Song, et al. Anisotropic damage model of layered rock mass and its verification[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(11): 254-261.
- [23] Zhang C L, Armand G, Conil N, et al. Investigation on anisotropy of mechanical properties of Callovo-Oxfordian claystone[J]. Engineering Geology, 2019, 251: 128-145.
- [24] Zhang C L, Rothfuchs T. Experimental study of hydromechanical behaviour of the Callovo-Oxfordian argillites[J]. Applied Clay Science, 2004, 26: 325-336.
- [25] Zhang C L, Armand G, Conil N. Investigation on the anisotropic mechanical behaviour of the Callovo-Oxfordian clay rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 78(3): 290-303.
- [26] The French National Agency of Radioactive Waste. Referentiel du site meuse-haute marne[R]. Paris: National Radioactive Management Agency, 2005.
- [27] Hu D W, Zhang F, Shao J F, et al. Influences of mineralogy and water content on the mechanical properties of argillite[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47: 157-166.
- [28] Liu Z, Shao J, Xie S, et al. Gas permeability evolution of clayey rocks in process of compressive creep test[J]. Materials Letters, 2015, 139: 422-425.
- [29] 张帆, 唐永生, 刘造保, 等. CO_x 黏土岩三轴压缩蠕变特性及速率阈值试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 644-649.
Zhang Fan, Tang Yongsheng, Liu Zaobao, et al. Experimental study on creep rate thresholds of CO_x clay rock under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 644-649.
- [30] Liu Z, Zhou H, Zhang W, et al. A new experimental method for tensile property study of quartz sandstone under confining pressure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 123: 104091.
- [31] McLamore R, Gray K E. The mechanical behavior of anisotropic sedimentary rocks[J]. Journal of Engineering for Industry, 1967, 89: 62-73.