

引文格式: 奚家米, 苟陇平, 王磊, 等. 层状板岩各向异性特征及应力扩容规律研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2025, 42(4): 136-145.

XI Jiami, GOU Longping, WANG Lei, et al. Study on anisotropy characteristics and stress expansion law of layered slate[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(4): 136-145.

DOI: 10.19815/j.jace.2023.10073

# 层状板岩各向异性特征及应力扩容规律研究

奚家米<sup>1,2</sup>, 苟陇平<sup>1</sup>, 王磊<sup>1</sup>, 原鑫磊<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 延安大学 建筑工程学院, 陕西 延安 716000)

**摘要:** 为探究层状板岩的各向异性力学特征和破坏机理, 揭示层理倾角和围压对岩石扩容的影响规律, 开展了不同层理倾角的板岩常规三轴压缩试验。结果表明: 层理弱面的存在对板岩的应力-应变曲线特征有较大影响, 层理倾角  $\alpha=90^\circ$  的试样应力-应变曲线受围压影响最为显著; 板岩的峰值强度随层理倾角呈“U”形分布, 围压显著降低了板岩强度的各向异性程度; 弹性模量和泊松比随层理倾角表现出变形各向异性特征, 弹性模量与围压正相关, 但弹性各向异性程度受围压的影响变化幅度不大; 板岩的破坏模式具有各向异性现象, 破坏的典型特征表现为沿层理面和贯穿层理面的破坏, 层理弱面的存在对试样的破坏模式起控制作用; 层状板岩的起裂应力和扩容应力随层理倾角具有各向异性特征, 围压对起裂应力的影响远大于对峰值应力的影响; 同一应力水平下, 当层理倾角为  $60^\circ$  时, 试样的强度最低, 起裂应力水平最高, 扩容应力水平接近于 1, 试样未发生扩容, 当即发生脆性破坏。

**关键词:** 层状板岩; 各向异性; 三轴压缩试验; 起裂应力; 扩容应力

**中图分类号:** TU452

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-2049(2025)04-0136-10

## Study on anisotropy characteristics and stress expansion law of layered slate

XI Jiami<sup>1,2</sup>, GOU Longping<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, YUAN Xinlei<sup>1</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. College of Architectural Engineering, Yan'an University, Yan'an 716000, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to explore the anisotropic mechanical characteristics and failure mechanism of layered slate, and to reveal the influence of strata inclination angle and confining pressure on rock expansion, conventional triaxial compression tests of slate with different strata inclination angles were carried out. The results show that the presence of weak strata surfaces has a great influence on the stress-strain curve characteristics of slate, and the stress-strain curve of specimen with strata inclination angle  $\alpha=90^\circ$  is most significantly affected by confining pressure. The peak intensity of slate is distributed in a “U” shape with the strata inclination angle, and the confining pressure significantly reduces the degree of strength anisotropy of slate. The elastic modulus and Poisson's ratio shows the characteristics of deformation anisotropy with different strata inclination angles, and the elastic modulus is positively correlated with confining pressure, but

the degree of elastic anisotropy is not greatly affected by confining pressure. The failure mode of slate has anisotropy, and the typical characteristics of failure are failure along the strata plane and through the strata plane, and the presence of weak strata surface controls the failure mode of sample. The initiation stress and expansion stress of layered slate have anisotropic characteristics with the strata inclination angle, and the influence of confining pressure on initiation stress is much greater than the influence on peak stress. Under the same stress level, when the strata inclination angle is  $60^\circ$ , the strength of specimen is the lowest, the cracking stress level is the highest, the expansion stress level is close to 1, and the brittle failure occurs immediately when the specimen is not expanded.

**Key words:** layered slate; anisotropy; triaxial compression test; initiation stress; expansion stress

**Author resume:** XI Jiami(1974-), male, PhD, professor, E-mail: 20185265@nwnu.edu.cn.

## 0 引言

中国甘肃、青海、新疆、四川等西部地区的公路和铁路隧道施工过程中广泛穿越侏罗系、白垩系板岩地层,如渭武高速公路木寨岭隧道,其板岩地层段(图1)占整条线路的五成以上<sup>[1]</sup>,因成岩年代晚,变质不完全,板岩地层常形成软硬差异明显的层状岩体结构。软弱层理面使得板岩在不同层理方向物理力学性质差异显著,表现出明显的各向异性力学特征<sup>[2-3]</sup>,并伴随强烈的应力扩容现象,使得这类岩体隧道大变形特征突出,如木寨岭公路隧道最大收敛变形大于2 000 mm<sup>[4]</sup>,给施工安全和支护设计带来巨大的风险挑战。因此,研究这类板岩的力学特性,分析其应力扩容规律,对隧道等地下工程的支护设计和施工安全控制具有重要意义。

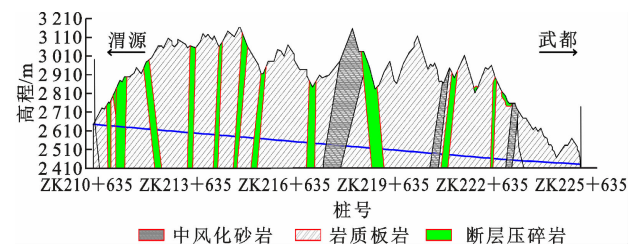


图1 木寨岭公路隧道纵断面图

Fig. 1 Longitudinal view of Muzhailing highway tunnel

国内外学者对层状岩体的各向异性力学性质已进行了大量研究,并取得了一定的成果。Wang等<sup>[5-6]</sup>研究了层理倾角对页岩破坏过程的影响并分析了页岩的脆性指标。Li等<sup>[7]</sup>研究了不同层理倾角的两种变质岩在三轴压缩状态下的强度和破坏模式各向异性特征。陈天宇等<sup>[8]</sup>从岩石的矿物成分和微观角度出发结合物理力学试验揭示了页岩各向异性的内在成因。衡帅等<sup>[9]</sup>引入反映岩体强度的各向

异性参数改进了 Hoek-Brown 强度准则,并分析了不同层理倾角页岩的破坏机制。由于板岩在试样制备过程中易沿软弱层理面开裂,成样率低,通常具有硬脆性特征,因此对板岩的力学特性和特征应力的研究相对较少。Jiang 等<sup>[10]</sup>进行了层状板岩的高温三轴压缩试验,分析了温度、层理倾角对变形参数及强度参数的影响,并构建了基于 Weibull 分布的统计损伤本构模型。Li 等<sup>[11]</sup>对粉质板岩进行了单轴压缩试验及巴西劈裂试验,分析了不同层理倾角下粉质板岩的力学特性。高春玉等<sup>[12]</sup>研究了层理倾角为  $0^\circ$  和  $90^\circ$  的砂板岩强度和弹性参数差异,指出围压对试样的各向异性特征有弱化效应。叶海旺等<sup>[13]</sup>开展了不同加载位置关系的层状板岩直接剪切试验,指出层理面是层状岩体强度和变形各向异性的根本原因,强度的各向异性是由试样的破坏机制控制的。李志刚等<sup>[14]</sup>研究了劈裂荷载作用下粉砂质板岩的破坏模式,并指出在实际工程的实施中需考虑板理面倾向和倾角,确定合理的施工工艺。此外,既有的研究发现层状岩体的特征应力受层理面倾角的影响,通常也具有各向异性特征。侯志强等<sup>[15]</sup>分别采用裂纹体积应变法和能量方法确定了层状大理岩的起裂和扩容应力,对比了二者的计算差异,探究了特征应力随层理倾角的变化规律。以上研究从岩石的层理方向、物质组成和应力水平等方面对层状岩体的各向异性力学特征进行了研究;对于层状板岩的应力扩容规律方面研究仍较少,且既有的研究大多只考虑了平行和垂直层理方向的力学性质差异,对其余角度试样的受力模式和各向异性特征缺乏探讨,同时对应力-应变曲线峰前特征应力点随层理倾角和围压的变化规律缺乏研究。

综上所述,结合木寨岭公路隧道岩层特征,充分

借鉴现有研究成果,通过开展不同层理倾角、不同围压下层状板岩的常规三轴压缩试验;分析板岩的强度和变形力学行为的层理倾角特征和围压效应,研究峰前特征应力点的层理倾角和围压的影响机制;通过特征应力分析,揭示层状岩体的各向异性扩容规律。

1 试验方案

1.1 岩样制备与波速特征

试验所用层状板岩取自甘肃木寨岭隧道,岩样表面主要呈灰色和深灰色,互层明显,成样率低,平均密度为  $2.70\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。经测量统计,岩石平均层理厚度为  $3\sim12\text{ mm}$ ,试样基质主要为定向排列的石英及黏土矿物,层理弱面主要为变质矿物和泥质胶结,存在微裂隙、孔隙。定义层理倾角  $\alpha$  为层理面法向与加载方向的夹角,现场选取相对完整且层理明显的岩块运至室内实验室,试样制备如图 2 所示。分别钻取层理倾角  $\alpha=0^\circ、30^\circ、60^\circ、90^\circ$  的岩样,根据国际岩石力学学会 (ISMR) 标准将试样切割打磨,制备成  $D\times H=50\text{ mm}\times100\text{ mm}$  的标准圆柱形试样 ( $D、H$  分别为岩样直径和高度),尺寸误差为  $\pm0.5\text{ mm}$ ,端面平整度为  $\pm0.2\text{ mm}$ 。为降低试样离散性对试验结果的影响,采用 NM-4B 型非金属超声检测仪,对已加工好的标准样进行筛选,同一层理倾角  $\alpha$  挑选纵波波速相近的试样进行后续试验。纵波波速测量结果如图 3 所示,由于层理弱面的存在,与均质岩石相比,岩样表现出明显的波速各向异性。

1.2 试验设备与加载步骤

试验设备采用由美国 GCTS 公司引进的 RTX-1500 型电液伺服控制低温高压岩土三轴测试系统,如图 4 所示。该系统主要由主控制平台、轴向及围压加载装置、数据采集与分析系统等组成。轴向最大荷载为  $1\,500\text{ kN}$ ,围压最大可加载至  $140\text{ MPa}$ 。采用 LVDT 变形测量系统,测量精度为  $0.001\text{ mm}$ ,可实时采集试件的轴向、径向变形数据,绘制全应力-应变曲线。

单轴试验采用位移控制的方式加载,加载速率为  $0.05\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ;常规三轴试验共设置 4 种围压 ( $0、5、10、15\text{ MPa}$ ),首先以  $1\text{ MPa}\cdot\text{min}^{-1}$  的加载速率将围压加载至目标值,待岩样在围压作用下稳定后,采用位移控制方式以  $0.05\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  的速率加载,直至试样破坏。

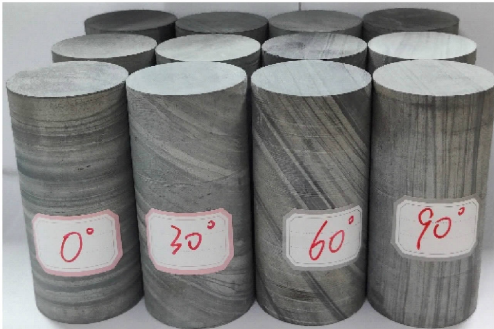
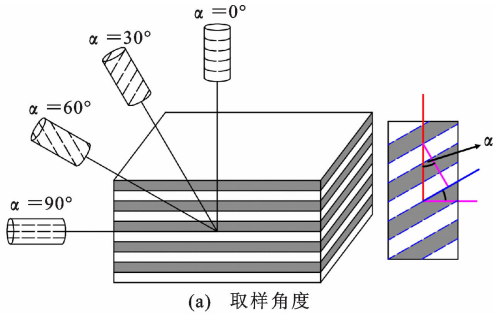


图 2 层状板岩试样的制备

Fig. 2 Preparation of layered slate specimens

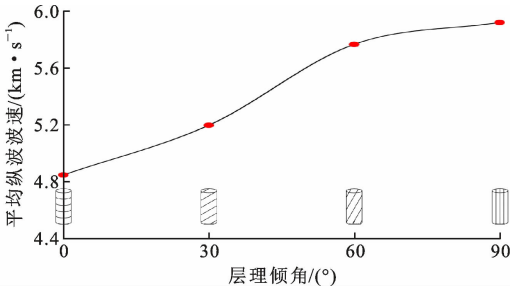


图 3 不同层理倾角试样平均纵波波速

Fig. 3 Average longitudinal wave velocity of specimens with different strata inclination angles



图 4 试验设备

Fig. 4 Experimental equipment

2 层状板岩各向异性力学特性分析

2.1 应力-应变曲线特征分析

图 5 为不同层理倾角、不同围压下层状板岩试

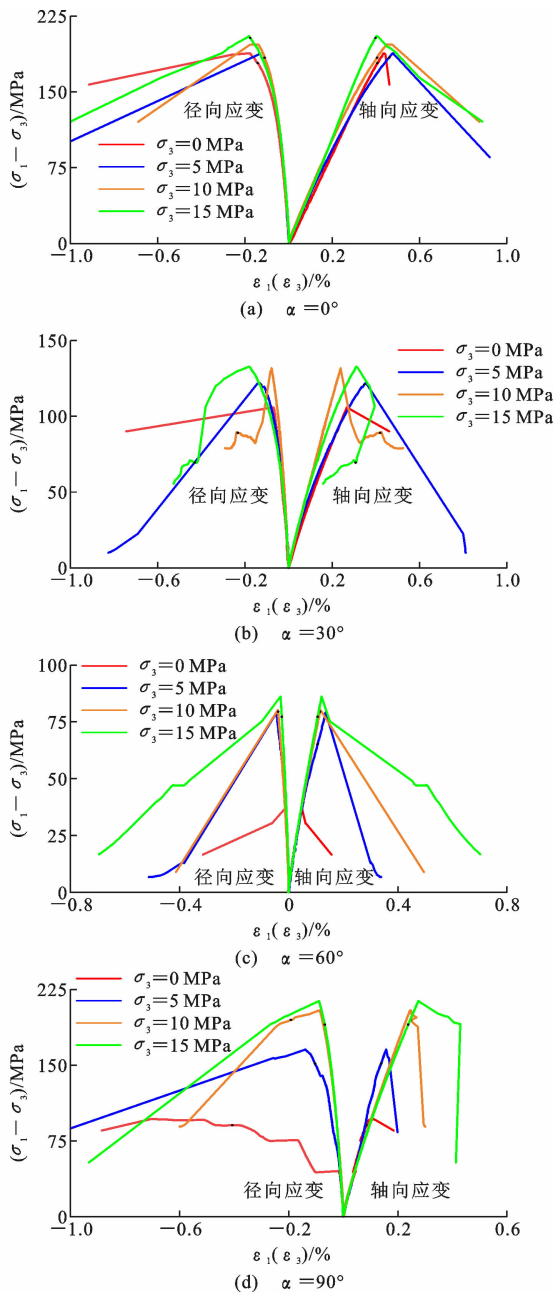


图5 不同层理倾角、不同围压下的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves with different strata inclination angles and confining pressures

样单轴和常规三轴压缩试验的全应力-应变曲线,其中 $\sigma_1$ 为峰值强度, $\sigma_3$ 为围压, $\epsilon_1$ 为轴向应变(值为正), $\epsilon_3$ 为径向应变(值为负)。从图5可以看出:应力-应变曲线形态整体上压密段较短,线弹性阶段较长,塑性屈服阶段不明显,在应力达到峰值后即发生应力跌落,几乎没有峰后应变软化和残余变形阶段。曲线形态受层理倾角与围压影响显著。同时,试验过程中发现,试样在最终破坏时常伴有明显的脆性破坏声音。

$\alpha=90^\circ$ 的试样受围压影响最为明显,如图5(d)

所示,在单轴试验加载过程中由于没有围压的压密作用,层理倾角 $\alpha=90^\circ$ 的试样应力-径向应变曲线出现明显的“阶跃”突变。对比试样应力-轴向应变曲线可以看出:在应力分别达到峰值强度的46.8%和78.3%时,轴向应变产生细微回弹而径向应变产生较大的膨胀;试样沿层理弱面发生两次明显的侧向膨胀,后续加载直至试样完全破坏的过程中仍有侧向膨胀的发生,但没有前两次变形明显。 $\alpha=90^\circ$ 的试样在低围压( $\sigma_3=5$  MPa)作用下时受载变形过程中依然有上述现象,而随着围压升高到 $\sigma_3=10$ 、15 MPa,围压对试样的压密作用增大,其应力-径向应变曲线逐渐趋于平滑。如图5(b)、(c)所示, $\alpha=30^\circ$ 和 $\alpha=60^\circ$ 的试样在单轴加载过程中出现在加载初期试样即沿层理面发生滑移破坏的现象,也印证了试样的力学性质受层理面倾角和围压影响的观点。如图5(a)所示, $\alpha=0^\circ$ 的试样单轴状态下峰值强度最高,应力-应变曲线形态受围压影响与其他角度相比不明显,随着围压的升高,试样的峰值强度增幅较小。

## 2.2 强度各向异性分析

层状岩体由于层理弱面的存在,在平行和垂直层理方向力学性质有显著的差异,通常将其视为横观各向同性体。层理倾角 $\alpha$ 对试样峰值强度的影响如图6所示。

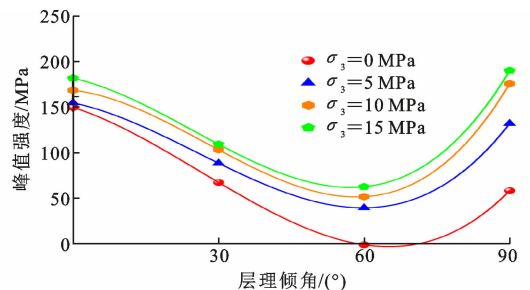


图6 峰值强度随层理倾角的变化

Fig. 6 Variation of peak intensity with strata inclination angle

试样破坏时,其峰值强度整体上随 $\alpha$ 的增大先减小后增大,近似呈“U”形分布,表现出显著的强度各向异性特征,此现象与既有的研究成果有相似规律<sup>[16-17]</sup>。峰值强度最低点始终在层理倾角 $\alpha=60^\circ$ 处,表明在此倾角下试样最容易发生破坏,原因在于 $\alpha=60^\circ$ 时试样的受力方向与层理面的夹角约为 $30^\circ$ ,层理弱面与基质受剪切作用胶结程度降低,相对松散,由于试样整体刚度受层理弱面的影响显著,在此倾角下试样更易发生沿层理面的破坏<sup>[18]</sup>。在单轴状态下, $\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=90^\circ$ 的试样峰值强度相差较大,差值为91.56 MPa,而随着围压的升高,二者差异逐



渐降低,在围压为 10、15 MPa 时, $\alpha=90^\circ$ 的试样峰值强度高于  $\alpha=0^\circ$ 的试样。

围压对试样峰值强度的影响如图 7 所示。试样峰值强度整体上与围压呈正相关关系,试样峰值强度随着围压的增大而增大,层理倾角  $\alpha=60^\circ$ 和  $\alpha=90^\circ$ 的试样受围压影响最为明显,当  $\sigma_3=15$  MPa 时,试样峰值强度比单轴状态下分别增加了 130.6%、120.8%。分析其原因在于,围压的增加一方面加强了固体颗粒的凝聚力和层理弱面与基质的胶结力,另一方面围压在一定程度上限制了试样沿层理面的侧向滑移,从而使试样的峰值强度得到增强,但从应力-应变曲线的形态来看,试样塑性并未得到显著改善。

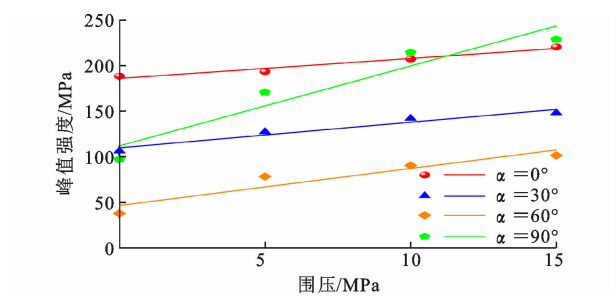


图 7 峰值强度随围压的变化

Fig. 7 Variation of peak intensity with confining pressure  
参照文献[9]的方法定义层状岩体的强度各向异性度为  $R_c$ ,表达式为

$$R_c = \frac{\sigma_{1\max}}{\sigma_{1\min}} \tag{1}$$

式中: $\sigma_{1\max}$ 、 $\sigma_{1\min}$ 分别为相同应力条件下不同层理倾角  $\alpha$ 的试样抗压强度最大值和最小值。

$R_c=1$ 表明试样为各向同性体, $R_c$ 与 1 的差值越大表明试样的强度各向异性程度越大。不同围压条件下层状板岩的强度各向异性度如表 1 所示。

表 1 不同围压下层状板岩强度各向异性度  
Table 1 Strength anisotropy of layered slate under different confining pressures

围压/MPa	0	5	10	15
$R_c$	5.04	2.38	2.55	2.48

由表 1 可知:层状板岩强度的各向异性主要受层理倾角  $\alpha$ 的控制,围压对试样强度的各向异性影响比较明显,较低的围压( $\sigma_3=5$  MPa)即可对试样强度各向异性度产生显著的影响;随着围压的持续增大,其各向异性程度先增大后降低,但各向异性程度随围压的变化幅度均小于围压为 5 MPa 时的变化幅度,最终围压对此板岩试样的各向异性抑制作用趋于稳定。根据  $\sigma_3=0$  MPa 时, $R_c=5.04$ ,参考

文献[19]对岩石各向异性程度的分类标准,判断该试样原岩所处地层为高度各向异性。

2.3 变形参数各向异性分析

弹性模量  $E$ 和泊松比  $\nu$ 是衡量岩石材料变形能力的两个重要指标。不同围压下试样弹性模量  $E$ 随层理倾角  $\alpha$ 的变化规律如图 8 所示。试样弹性模量整体上随层理倾角  $\alpha$ 增加逐步增大, $\alpha=0^\circ$ 、 $30^\circ$ 的试样与  $\alpha=60^\circ$ 、 $90^\circ$ 的试样弹性模量相差较大,试样呈现出显著的弹性各向异性特征。造成这种现象的原因在于  $\alpha=0^\circ$ 、 $30^\circ$ 的试样在荷载作用下产生变形时,其受力方向与层理弱面夹角较大,为  $60^\circ\sim 90^\circ$ ,而由于试样本身基质与层理弱面存在一定的刚度差异,此时的压缩变形主要体现为层理弱面的基质变形,从而造成试样整体压缩变形量大,弹性模量小。 $\alpha=60^\circ$ 、 $90^\circ$ 的试样在荷载作用下其受力方向与层理弱面的夹角较小,为  $0^\circ\sim 30^\circ$ ,此时荷载主要由试样的岩体骨架承担,因此试样整体变形量小,弹性模量偏大。

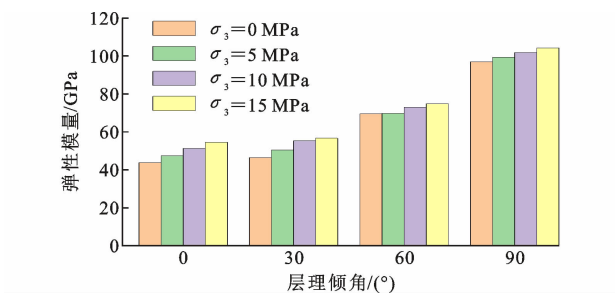


图 8 弹性模量随层理倾角的变化

Fig. 8 Variation of elastic modulus with strata inclination angle

围压对弹性模量的影响如图 9 所示。对于  $\alpha=0^\circ$ 、 $30^\circ$ 的试样,其弹性模量受围压的影响较大, $\alpha=60^\circ$ 、 $90^\circ$ 的试样弹性模量受围压的影响较小。当围压等于 15 MPa 时,与单轴状态相比,层理倾角  $\alpha=0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 的试样弹性模量分别增加 24.6%、21.9%、7.9%、7.4%。

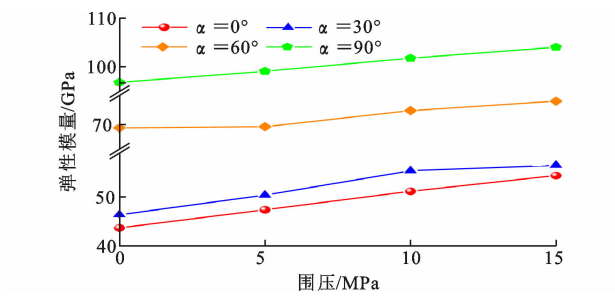


图 9 弹性模量随围压的变化

Fig. 9 Variation of elastic modulus with confining pressure

定义层状岩体的弹性各向异性度  $R_E$  为

$$R_E = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} \tag{2}$$

式中: $E_{\max}$ 、 $E_{\min}$  分别为相同应力条件下不同层理倾角  $\alpha$  的试样弹性模量最大值和最小值。

不同围压条件下层状板岩的弹性各向异性度计算结果如表 2 所示。

表 2 不同围压下层状板岩弹性各向异性度  
Table 2 Elastic anisotropy of layered slate under different confining pressures

围压/MPa	0	5	10	15
$R_E$	2.22	2.09	1.99	1.91

由表 2 可知:该试样单轴状态下的弹性各向异性度  $R_E=2.22$ ,与前文对比发现围压对  $R_E$  的影响没有对  $R_c$  的影响明显,仅在较高围压( $\sigma_3=10、15$  MPa)时,试样的弹性各向异性度  $R_E$  降低较大,当围压等于 15 MPa 时弹性各向异性度相比单轴状态下降了 13.96%。

不同围压下试样的泊松比  $\nu$  随层理倾角  $\alpha$  的变化规律如图 10 所示。

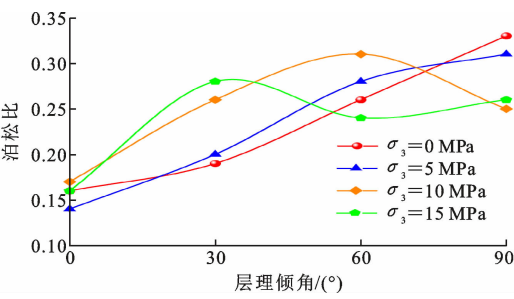


图 10 不同围压下泊松比随层理倾角的变化  
Fig. 10 Variation of Poisson's ratio with strata inclination angle under different confining pressures

在单轴状态和围压较低( $\sigma_3=5$  MPa)时,泊松比随层理倾角  $\alpha$  的增大呈增大趋势,层理倾角  $\alpha=90^\circ$  的试样泊松比比  $\alpha=0^\circ$  的试样分别高 94% 和 128%,说明  $\alpha=90^\circ$  的试样在受力作用下更容易产生侧向膨胀。当围压  $\sigma_3=10、15$  MPa 时, $\alpha=0^\circ、90^\circ$  的试样泊松比基本趋于稳定, $\alpha=90^\circ$  的试样比  $\alpha=0^\circ$  的试样泊松比分别高 47.1% 和 62.5%,说明较高的围压增强了岩石骨架与层理弱面的胶结,试样的整体刚度增加,试样的侧向变形受到抑制。

2.4 破坏模式各向异性分析

层状岩体由于层理弱面的存在,在荷载作用下受力方向与均质岩体不同,从而导致了破坏模式各向异性,图 11 为不同层理倾角试样在不同围压下的典型破坏模式。从图 11 可以看出:

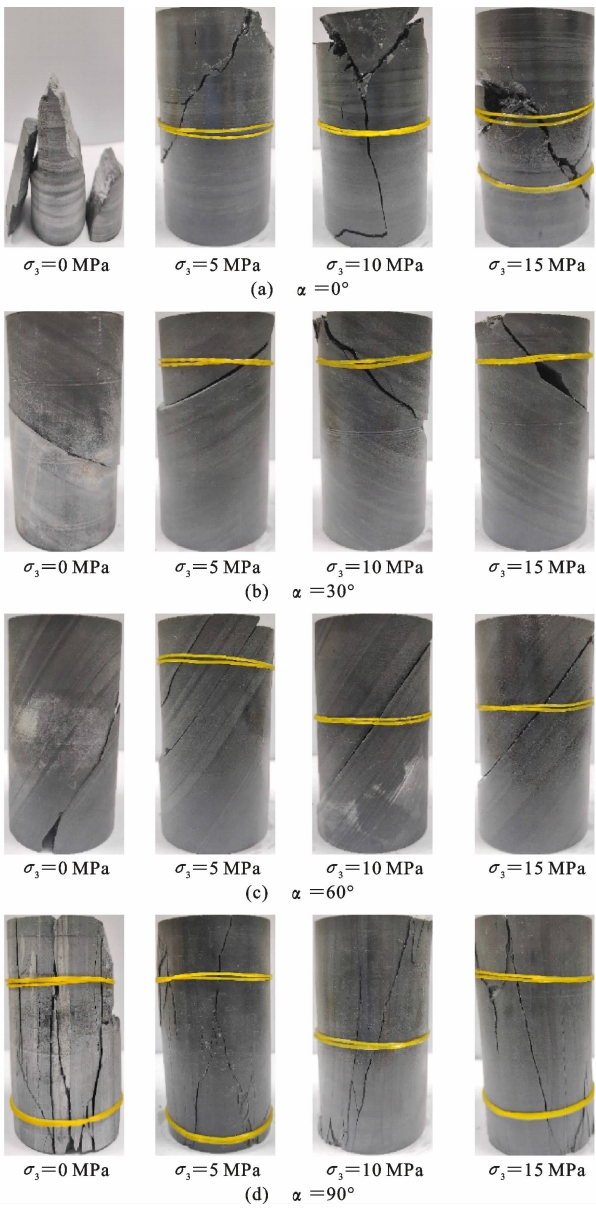


图 11 层状板岩试样典型破坏模式  
Fig. 11 Typical failure modes of layered slate specimens

当试样  $\alpha=0^\circ$  时,单轴状态下由于试样端部与试验机承压板的摩擦作用,试样底部表现为圆锥形破坏,中上部为张拉破坏,破坏过程产生了大量碎屑。当围压为 5 MPa 时,由于围压的侧向约束作用,试样表现为贯穿多个层理面的剪切破坏。当围压为 10 MPa 时,劈裂破坏与剪切破坏共同存在,破裂面贯穿整个试样近似呈“Y”形。随着围压的持续升高,试样主剪切面形态明显,剪切面有压碎现象,其余剪切裂隙与主剪切面相交。

当试样  $\alpha=30^\circ$  时,在单轴状态和较低围压( $\sigma_3=5$  MPa)时,试样呈现沿层理面的单一剪切破坏。当围压为 10、15 MPa 时,试样剪切面贯穿多个层理面,剪切面粗糙不平。

当试样  $\alpha=60^\circ$  时,单轴状态下试样形成单一剪切面,剪切面不平整,在边缘贯穿至其他层理。当围压为 10、15 MPa 时,剪切面居于试样中间,形成沿层理面的单一平整破裂面。

当试样  $\alpha=90^\circ$  时,此时试样受力方向与层理面平行,在单轴状态下破坏形态为多条沿层理面的柱状劈裂破坏。随着围压的增加,试样受侧向约束影响明显,破坏形态转变为张拉和剪切复合破坏。

对不同层理倾角  $\alpha$  的试样破坏模式分析可知,在单轴状态下试样的破坏机制主要分为贯穿层理或沿层理间的张拉劈裂破坏和贯穿层理或沿层理面的剪切滑移破坏两大类。围压的作用增强了试样的侧向约束,同时加强了试样基质与层理弱面的胶结作用,三轴压缩状态的破坏机制主要分为贯穿层理或沿层理面的剪切滑移破坏和张拉剪切复合破坏两大类。对层状板岩破坏机制分析可知,无论哪种应力状态,层理弱面对板岩的破坏模式起着重要的控制作用,其破坏模式的各向异性最终造成强度和变形的各向异性特征。

### 3 基于特征应力的层状板岩各向异性扩容规律分析

硬脆性岩石的峰前应力-应变曲线通常分为 4 个阶段<sup>[20-21]</sup>:岩石内部原生裂纹的压密闭合阶段;线弹性变形阶段;裂纹形成至稳定扩展阶段;裂纹的非稳定扩展阶段。变形的 4 个阶段分别对应裂纹闭合应力  $\sigma_{cc}$ 、裂纹起裂应力  $\sigma_{ci}$ 、扩容应力  $\sigma_{cd}$  及峰值应力  $\sigma_c$ 。层状板岩压缩过程中各阶段典型的应力-应变曲线如图 12 所示,其中总体积应变值为正,裂纹体积应变值为负。

起裂应力  $\sigma_{ci}$  是岩石裂纹开始稳定扩展的起点,采用裂纹体积应变法对其进行确定,裂纹体积应变曲线弹性段的终点对应的应力即为起裂应力。扩容应力  $\sigma_{cd}$  是裂纹非稳定扩展的起点,体积应变曲线上最大应变值对应的点即为扩容应力。

在同一应力水平作用下,试样的总体积应变由弹性体积应变和裂纹闭合及扩展引起的裂纹体积应变两部分组成<sup>[22]</sup>,计算公式为

$$\epsilon_v = \epsilon_v^e + \epsilon_v^c \quad (3)$$

式中: $\epsilon_v$ 、 $\epsilon_v^e$ 、 $\epsilon_v^c$  分别为岩石加载过程中的总体积应变、弹性体积应变、裂纹体积应变。

常规三轴压缩试验中,试样的总体积应变为

$$\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_r \quad (4)$$

式中: $\epsilon_1$  和  $\epsilon_r$  分别为试样在加载过程中的轴向应变

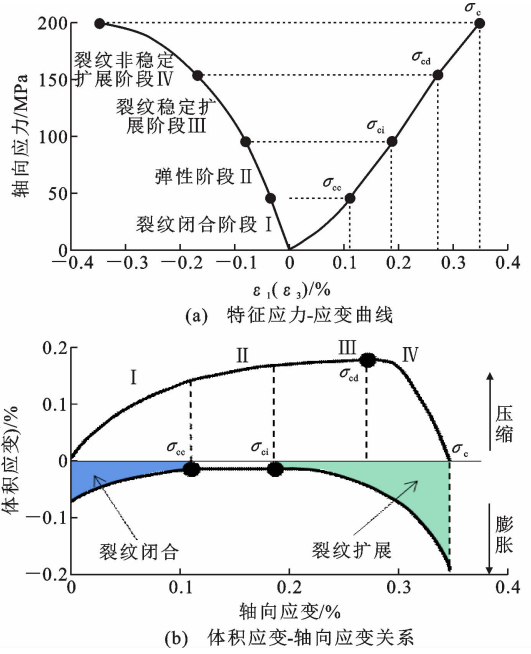


图 12 层状板岩压缩过程特征应力-应变曲线

Fig. 12 Characteristic stress-strain curve of layered slate compression process

和径向应变。

试样的弹性体积应变可根据虎克定律求得

$$\epsilon_v^e = \epsilon_1^e + \epsilon_2^e + \epsilon_3^e = \frac{1-2\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (5)$$

式中: $\epsilon_1^e$ 、 $\epsilon_2^e$ 、 $\epsilon_3^e$  分别为 3 个主应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  方向上产生的弹性应变。

因此,在轴向荷载作用下试样的裂纹体积应变表示为

$$\epsilon_v^c = \epsilon_v - \epsilon_v^e \quad (6)$$

同时,定义试样的起裂应力水平  $K_{ci}$  为起裂应力与峰值应力之比,扩容应力水平  $K_{cd}$  为扩容应力与峰值应力之比,计算公式为

$$K_{ci} = \frac{\sigma_{ci}}{\sigma_c} \quad (7)$$

$$K_{cd} = \frac{\sigma_{cd}}{\sigma_c} \quad (8)$$

不同层理倾角试样在不同围压下的特征应力值和应力水平如表 3 所示。图 13、14 为不同围压下试样起裂应力  $\sigma_{ci}$  与扩容应力  $\sigma_{cd}$  随层理倾角  $\alpha$  的变化规律。 $\sigma_{ci}$  与  $\sigma_{cd}$  随  $\alpha$  的变化与前文所述峰值强度  $\sigma_c$  随  $\alpha$  的变化规律具有相同的趋势,二者均随层理倾角  $\alpha$  的增大先减小后增大,表现出各向异性特征,且均在峰值强度最低点  $\alpha=60^\circ$  时起裂应力与扩容应力达到最小。

$\sigma_{ci}$  与  $\sigma_{cd}$  随围压的增大而增大,对于  $\alpha=90^\circ$  的试样,围压对特征应力的影响最为明显,当围压等于



表 3 层状板岩试样特征应力值

Table 3 Characteristic stress values of layered slate specimens

$\alpha/(^{\circ})$	$\sigma_3/\text{MPa}$	$\sigma_{\text{ci}}/\text{MPa}$	$\sigma_{\text{cd}}/\text{MPa}$	$\sigma_{\text{c}}/\text{MPa}$	$K_{\text{ci}}$	$K_{\text{cd}}$
0	0	54.71	140.88	188.28	0.29	0.75
	5	77.35	155.34	188.19	0.41	0.83
	10	83.28	168.97	197.01	0.42	0.86
	15	92.19	179.96	205.24	0.45	0.88
30	0	43.64	85.84	105.82	0.41	0.81
	5	55.62	102.37	121.93	0.46	0.84
	10	67.51	110.63	131.70	0.51	0.84
	15	72.83	116.04	132.76	0.55	0.87
60	0	17.83	36.81	37.33	0.48	0.99
	5	44.52	78.02	79.16	0.56	0.99
	10	58.27	78.75	80.12	0.73	0.98
	15	67.01	84.83	86.10	0.78	0.99
90	0	17.95	41.30	96.72	0.19	0.43
	5	47.82	83.51	165.48	0.29	0.50
	10	120.26	176.73	204.32	0.59	0.86
	15	162.47	192.78	213.54	0.76	0.90

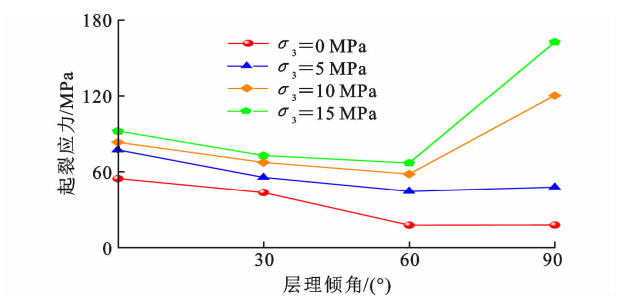


图 13 起裂应力随层理倾角的变化

Fig. 13 Variation of cracking stress with strata inclination angle

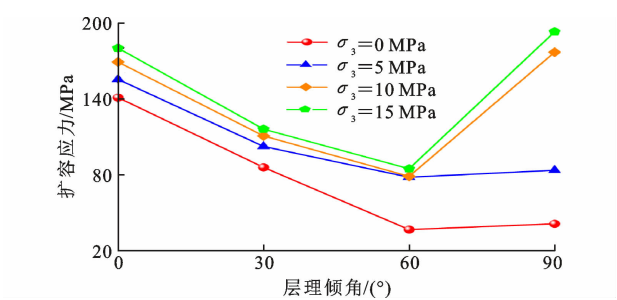


图 14 扩容应力随层理倾角的变化

Fig. 14 Variation of expansion stress with strata inclination angle

15 MPa 时,起裂应力、扩容应力、峰值应力相比单轴状态分别增加了 805.13%、366.78%、120.78%。

对于特征应力始终最低的点,即  $\alpha=60^{\circ}$  的试样,围压等于 15 MPa 相比单轴状态起裂应力、扩容应力、峰值应力分别增加了 275.83%、130.45%、

130.65%。对比发现围压对起裂应力的影响程度远大于对峰值应力的影响,随着围压的升高,试样裂纹的产生需要更高的应力,裂纹的产生时机相比单轴状态更迟缓。

图 15、16 为不同围压下起裂应力水平  $K_{\text{ci}}$  与扩容应力水平  $K_{\text{cd}}$  随层理倾角  $\alpha$  的变化规律。 $K_{\text{ci}}$  值越大说明试样产生裂纹所需的应力水平越高,试样原生裂纹压密阶段及弹性变形阶段在应力-应变曲线上占比较大。 $K_{\text{cd}}$  值越大说明扩容应力更接近峰值应力,裂纹不稳定发展阶段较短,试样脆性较强。可以看出,  $K_{\text{ci}}$  与  $K_{\text{cd}}$  随层理倾角  $\alpha$  的增大均先增大后减小,与  $\sigma_{\text{ci}}$  和  $\sigma_{\text{cd}}$  随  $\alpha$  的变化规律相反。

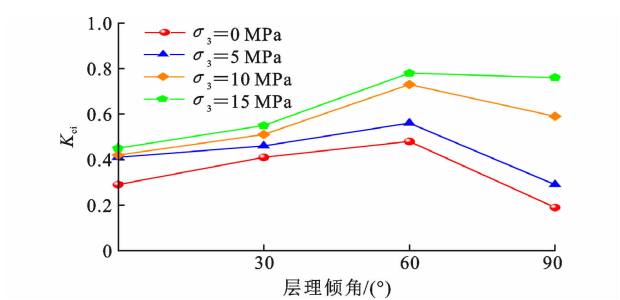


图 15 起裂应力水平随层理倾角的变化

Fig. 15 Variation of cracking stress level with strata inclination angle

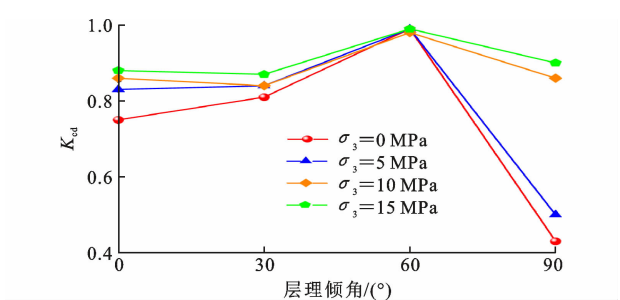


图 16 扩容应力水平随层理倾角的变化

Fig. 16 Variation of expansion stress level with strata inclination angle

不同围压下,层理倾角  $\alpha=60^{\circ}$  的试样峰值强度最低,但  $K_{\text{ci}}$  与  $K_{\text{cd}}$  均最大,且  $K_{\text{cd}}$  值接近于 1。这说明试样的起裂应力与扩容应力更接近峰值应力,裂纹的产生所需的应力较高,裂纹的稳定发展阶段和非稳定发展阶段都较短,试样从起裂到发生宏观破坏速度较快,  $K_{\text{cd}}$  值接近于 1 说明试样几乎没有塑性屈服阶段,即发生宏观脆性破坏。随着围压的增大,试样的起裂应力水平和扩容应力水平均有所提高,  $\alpha=90^{\circ}$  的试样  $K_{\text{ci}}$  与  $K_{\text{cd}}$  受围压影响最为明显。层理倾角  $\alpha=90^{\circ}$  的试样在单轴和围压等于 5 MPa 时的起裂应力水平和扩容应力水平均最低,单轴状态下



$K_{ci}=0.19, K_{cd}=0.43$ ,这是因为试样的受力方向与层理面平行,在荷载作用下试样更容易沿层理面发生张拉劈裂破坏;随着围压的增大,围压的加强及约束作用使得此现象有所变化,当围压等于 15 MPa 时  $K_{ci}=0.76, K_{cd}=0.90$ 。

## 4 结 语

(1)层状板岩的应力-应变曲线形态受试样层理倾角  $\alpha$  的影响,试样整体上呈现硬脆性特征。试样的峰值强度随层理倾角  $\alpha$  的增大近似呈“U”形分布,表现出显著的强度各向异性,围压对板岩的强度各向异性程度  $R_c$  有较大的影响,较低的围压( $\sigma_3=5$  MPa)即可使试样的强度各向异性程度显著降低。

(2)试样的变形参数  $E, \nu$  随层理倾角  $\alpha$  的增大也具有各向异性的特征。 $\alpha=0^\circ$  和  $\alpha=30^\circ$  试样的弹性模量与  $\alpha=60^\circ$  和  $\alpha=90^\circ$  的试样相差较大,  $E$  值随围压的升高而增大,但围压对弹性各向异性程度  $R_E$  的影响没有对强度各向异性程度  $R_c$  的影响明显。泊松比  $\nu$  在单轴和低围压时随层理倾角  $\alpha$  的增大而增大,随着围压的增加,  $\alpha=0^\circ$  和  $\alpha=90^\circ$  的试样泊松比逐渐趋于稳定。

(3)层理弱面的存在对试样的破坏模式起控制作用,破坏模式的各向异性导致层状板岩强度和变形的各向异性。单轴状态下层状板岩的破坏机制可分为张拉劈裂破坏和剪切滑移破坏,三轴状态下的破坏机制可分为剪切滑移破坏和张拉剪切复合破坏。

(4)板岩的起裂应力  $\sigma_{ci}$  和扩容应力  $\sigma_{cd}$  随层理倾角  $\alpha$  的增大也具有各向异性特征,呈现出近似“U”形的分布规律,围压对起裂应力的影响程度远大于对峰值应力的影响。起裂应力水平  $K_{ci}$  与扩容应力水平  $K_{cd}$  随  $\alpha$  的增大先升高后降低,表现出与  $\sigma_{ci}$  和  $\sigma_{cd}$  相反的规律。同一应力水平作用下,  $\alpha=60^\circ$  的试样峰值强度最低,  $K_{ci}$  最高,  $K_{cd}$  接近于 1,试样未发生扩容,当即发生脆性破坏。

## 参考文献:

## References:

[1] 汪波,喻炜,菅信,等.软岩大变形隧道不同支护模式的合理性探讨:以木寨岭公路隧道为例[J].隧道建设(中英文),2023,43(1):36-47.  
WANG Bo, YU Wei, ZI Xin, et al. Rationality of various support types of Muzhailing highway tunnel in soft rocks with large deformation[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(1): 36-47.

[2] 赵宁宁,李二强,冯吉利.层状板岩单轴压缩试验及数值研究[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(10):3978-3988.  
ZHAO Ningning, LI Erqiang, FENG Jili. Experimental and numerical investigation on uniaxial compression test of layered slate[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(10): 3978-3988.  
[3] 孙博,任富强,刘冬桥.基于声发射多重分形特征的层状板岩失稳前兆研究[J].岩土力学,2022,43(3):749-760.  
SUN Bo, REN Fuqiang, LIU Dongqiao. Research on the failure precursors of layered slate based on multi-fractal characteristics of acoustic emission[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(3): 749-760.  
[4] 陶志刚,罗森林,康宏伟,等.公路隧道炭质板岩变形规律及蠕变特性研究[J].中国矿业大学学报,2020,49(5):898-906.  
TAO Zhigang, LUO Senlin, KANG Hongwei, et al. Analysis of deformation law and creep characteristics of carbonaceous slate in highway tunnel[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(5): 898-906.  
[5] WANG M M, LI P, WU X W, et al. A study on the brittleness and progressive failure process of anisotropic shale [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(10): 886.  
[6] HOLT R M, FJER E, STENEBRATEN J F, et al. Brittleness of shales: relevance to borehole collapse and hydraulic fracturing [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 131: 200-209.  
[7] LI D Y, WONG L N Y, LIU G, et al. Influence of water content and anisotropy on the strength and deformability of low porosity meta-sedimentary rocks under triaxial compression[J]. Engineering Geology, 2012, 126: 46-66.  
[8] 陈天宇,冯夏庭,张希巍,等.黑色页岩力学特性及各向异性特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(9):1772-1779.  
CHEN Tianyu, FENG Xiating, ZHANG Xiwei, et al. Experimental study on mechanical and anisotropic properties of black shale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1772-1779.  
[9] 衡帅,杨春和,张保平,等.页岩各向异性特征的试验研究[J].岩土力学,2015,36(3):609-616.  
HENG Shuai, YANG Chunhe, ZHANG Baoping, et al. Experimental research on anisotropic properties

- of shale[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 609-616.
- [10] JIANG H P, JIANG A N, YANG X R, et al. Experimental investigation and statistical damage constitutive model on layered slate under thermal-mechanical condition[J]. Natural Resources Research, 2022, 31(1): 443-461.
- [11] LI Z G, XU G L, HUANG P, et al. Experimental study on anisotropic properties of Silurian silty slates [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35(4): 1755-1766.
- [12] 高春玉,徐进,李忠洪.砂质板岩加卸载力学特性的试验研究[J].长江科学院院报,2013,30(2):52-56.  
GAO Chunyu, XU Jin, LI Zhonghong. Mechanical properties of sandy slate under loading and unloading conditions[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(2): 52-56.
- [13] 叶海旺,蔡俊,雷涛,等.板岩渐进剪切破坏各向异性及其数值模型研究[J].地下空间与工程学报, 2018,14(4):945-954.  
YE Haiwang, CAI Jun, LEI Tao, et al. Anisotropic progressive shear failure of slate and its numerical model[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(4): 945-954.
- [14] 李志刚,徐光黎,黄鹏,等.粉砂质板岩力学特性及各向异性特性[J].岩土力学,2018,39(5):1737-1746.  
LI Zhigang, XU Guangli, HUANG Peng, et al. Mechanical and anisotropic properties of silty slates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1737-1746.
- [15] 侯志强,王宇,刘冬桥,等.层状大理岩破裂过程力学特性与能量演化各向异性研究[J].采矿与安全工程学报,2019,36(4):794-804.  
HOU Zhiqiang, WANG Yu, LIU Dongqiao, et al. Investigation of the anisotropic mechanical behaviors and energy evolution during uniaxial deformation of interbedded marble[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(4): 794-804.
- [16] 陈子全.高地应力层状软岩隧道围岩变形机理与支护结构体系力学行为研究[D].成都:西南交通大学, 2019.
- CHEN Ziquan. Study on the deformation mechanism of surrounding rock and mechanical behavior of supporting structures for layered soft rock tunnel under high geo-stress [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [17] 高敏.层状岩体破坏力学特性与本构模型研究[D].大连:大连理工大学,2020.  
GAO Min. Study on mechanical failure characteristics and constitutive model of layered rocks[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [18] 王伟,张宽,曹亚军,等.层状千枚岩各向异性力学特性与脆性评价研究[J].岩土力学,2023,44(4): 975-989.  
WANG Wei, ZHANG Kuan, CAO Yajun, et al. Anisotropic mechanical properties and brittleness evaluation of layered phyllite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(4): 975-989.
- [19] SINGH J, RAMAMURTHY T, VENKATAPPA R G. Strength anisotropies in rocks [J]. Indian Geotechnical Journal, 1989, 19(2): 147-166.
- [20] ALKAN H, CINAR Y, PUSCH G. Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(1): 108-119.
- [21] MARTIN C D. The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground openings [D]. Winnipeg: University of Manitoba, 1993.
- [22] 秦涛,段燕伟,孙洪茹,等.砂岩三轴加载过程中力学特征与能量耗散特征[J].煤炭学报,2020, 45(增1):255-262.  
QIN Tao, DUAN Yanwei, SUN Hongru, et al. Mechanical characteristics and energy dissipation characteristics of sandstone under triaxial stress conditions [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 255-262.