

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.S1.012

石英砂岩力学特性及各向异性试验研究

彭剑文¹, 曾飞涛², 李长洪¹, 苗胜军¹

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育国家重点实验室, 北京 100083; 2. 大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 为研究不同应力条件下层理对高孔隙率岩石材料破坏模式、弹性模量以及强度的影响, 针对各向异性的石英砂岩, 采用静水预压缩-增大轴向应力的加载方式, 进行了多组带有不同层理角度试样的三轴试验。试验结果表明, 不同应力条件下各向异性的石英砂岩试样表现出不同的变形破坏特征, 以 30 MPa 围压为界, 低围压范围内破坏模式为剪切型破坏, 在该范围内随着围压增大破坏面由倾斜转向水平, 并受到试样层理角度不同程度的影响, 高围压范围内受到层理的影响分为剪切屈服和体积屈服两种破坏模式; 随着围压的增大, 新闭合的孔隙裂纹数目减少, 各向异性对弹性模量的影响呈现降低趋势, 弹性模量增长速率降低, 弹性模量在层理分布角度 $\gamma = 60^\circ$ 时都会出现下降的现象; 不同层理分布试样的强度曲线呈 U 型, 围压在 0~20 MPa 范围内试样 $\gamma = 30^\circ$ 强度最低, 围压在 30~60 MPa 范围内强度最低试样转化到 $\gamma = 45^\circ$ 附近; 不同层理角度石英砂岩的强度特征系数随着围压的增大而逐渐减小, 围压大于 30 MPa 后该系数逐渐趋于稳定。

关 键 词: 岩石层理; 三轴试验; 各向异性; 破坏模式; 围压

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 增 1-0103-010

Experimental study of anisotropy and mechanical property of quartz sandstone

PENG Jian-wen^{1,2}, ZENG Fei-tao², LI Chang-hong¹, MIAO Sheng-jun¹

(1. Key laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100086, China;

2. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: To investigate the effect of bedding on failure mode, elastic modulus and strength of rock with high porosity under different stress conditions, several groups of triaxial tests on specimen with different bedding angles are conducted with pre-hydrostatic compression and axial stress increasing mode. The results show that the anisotropic quartz sandstone showed different characteristics of deformation damage under different stress conditions. With 30 MPa as dividing line of confining pressure, shear failure mode happened in the range of low confining pressure and as the confining pressure increased, fracture surface turned slope to horizontal and is influenced by the bedding. In range of high confining pressure, under the influence of bedding, failure mode could be divided to shear yield and volumetric yield. As the confining pressure increased, the number of newly closed crack reduce, the effect of anisotropy to elastic modulus showed reducing trend and the average increasing rate of Young's modulus decreased. Young's modulus of all specimen declined at bedding angle $\gamma = 60^\circ$. Strength curves of different specimen with different bedding angles showed U shape. The minimum compressive strength in range of 0-20 MPa confining pressures showed at the bedding angles $\gamma = 30^\circ$; while in 30-60 MPa transferred to $\gamma = 45^\circ$. Feature coefficient of compressive strength for quartz sandstone with different bedding angles decreases as the confining pressure increases, and keep constant as confining pressure is over 30 MPa.

Keywords: rock bedding; triaxial test; anisotropy; failure mode; confining pressure

1 引 言

砂岩是在地表浅层由其他岩石的风化物和火

山喷发物经过搬运、沉积、成岩作用形成的沉积岩, 其突出特征是具有层理构造, 在力学特性和破坏模式上存在层理方向的依赖性。力学试验研究是揭示

收稿日期: 2016-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51574014)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51574014).

第一作者简介: 彭剑文, 男, 1987 年生, 博士研究生, 主要从事试验岩石力学研究方面的工作。E-mail: penruan@126.com

通讯作者: 李长洪, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学研究与教学工作。E-mail: lch@ustb.edu.cn

砂岩各向异性对力学行为影响的重要手段,在地下工程如巷道支护地应力分析和油气开采如岩石破裂模式分析中均要考虑各向异性的影响^[1-2]。砂岩在我国分布广泛,是地下工程中的主要工程对象,其各向异性是重要的研究课题之一^[3-4]。由于在成岩过程中的受沉积作用及应力环境、水文地质条件影响,矿物颗粒的分布呈现选择性而出现层理,沿层理方向颗粒胶结程度较弱,为层理软弱面。沿不同软弱层理面岩石的强度、破坏模式、应力状态均存在较大差异^[5-7],全面地研究不同层理角度的砂岩力学特性和破坏模式,对地下工程建设、矿产油气资源经济高效开采,灾害防治以及安全生产有重要的意义。

目前岩石各向异性的研究国内外已取得丰硕成果,Taliercio等^[8-9]考虑了均化作用的层理,对层理的弹性参数各向异性进行理论分析,建立了层理间各向同性的破坏准则。蒋明镜等^[10]基于微观力学机制,建立了考虑各向异性结构性砂土的本构模型。Nasseri等^[11-13]对片岩、页岩进行了系统的试验研究,通过常规三轴试验和剪切试验探究了弹性模量、泊松比、剪切强度受各向异性影响的程度。李庆辉等^[14]对硅质页岩进行三轴压缩试验,获得不同应力条件下含气页岩的破坏模式和力学行为,认为低围压测试时含气页岩破坏模式以劈裂式、双剪切破坏为主,高围压测试时以单剪切破坏为主。席道瑛等^[15-16]基于层理横向同性理论,研究了砂岩的波速、弹性模量和静动态泊松比,指出各参数均遵循横观各向同性材料近似椭圆的变化规律。蒲成志等^[17]用水泥砂浆并预制裂纹模拟层理,探索了裂隙角度和分布密度对多裂隙类岩石材料断裂破坏强度的影响规律。何沛田等^[18]、衡帅等^[19]、陈天宇等^[20]从不同角度综合分析了层状页岩层理结构面夹角对其破坏特征、强度特性和变形性态的影响。陈运平等^[21]分析了单轴循环荷载条件下含层理砂岩的弹性模量和泊松比的影响,通过坐标转化导出了方向性模量和泊松比与岩石垂直层理、平行层理的弹性参数的关系,讨论层理砂岩弹性系数的各向异性程度。岩石各向异性在不同应力条件下的试验研究多集中于页岩,而石英砂岩为低强度的准脆性岩石,其矿物组成、颗粒大小、颗粒及层理胶结特性较页岩差异较大,尤其具有高孔隙率的特点,在高应力条件下的力学特性也表现出较大的差异性。此外,国内学者对砂岩的各向异性研究多集中于单轴单一应力条件下的试验和理论分析,在不同应力条件下的各向异性特征试验研究成果较少。

本研究针对具有典型层理分布的石英砂岩,采

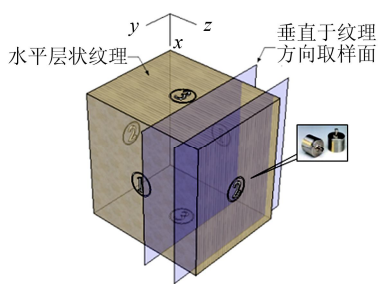
用静水预压缩-增大轴向偏应力的加载方式进行一系列三轴试验,结合电镜扫描观测,分析不同围压下砂岩微观结构的变化,并对多种围压下不同层理角度试样的破坏模式、弹性模量和强度进行了研究,以揭示带层理石英砂岩的力学特性和各向异性特征。

2 试样制备及试验设置

2.1 试样制备

试验砂岩采自美国北部明尼苏达州浅埋地层,属于侏罗纪浅海沉积石英砂岩,为浅黄色,肉眼可见深浅相间的层理。为了探讨不同层理的影响,避免不必要因素的干扰,从原样的采集到试样的加工都仔细的进行了设计,采集了一块 300 mm×200 mm×300 mm 长方体砂岩原样,不同层理的砂岩试样制取过程:

(1) 通过测定 P 波波速确定长方体原样的层理方向,如图 1 所示。在原样 xyz 三个方向所在的①-①、②-②、③-③对立面进行 P 波波速检测,每组对立面检测 5 次取平均值,波速①-①为 2 140 m/s,②-②为 2 490 m/s,③-③为 2 520 m/s,其中①-①对立面波速显著的表现较小值,为垂直于层理方向,②-②、③-③为层理方向。



(a) 原样波速测试示意图



(b) MTS 815 岩石试验系统

图 1 原样波速测试示意图和试验系统

Fig.1 Demonstration of P-wave test and rock test system

(2) 定义 γ 为层理方向与轴向加载方向的夹角,根据试样所要求的层理角度 γ ,将长方体原样嵌入不同安装角度 θ ($\theta = 90^\circ - \gamma$) 的模具底座中固定,分别进行钻孔制备得到 $\gamma = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 不同层理角度的圆柱体试样,如图 2 所示。

(3) 加工试样使其两端平度小于 0.02 mm,侧壁轴向误差小于 0.05°,放置烤箱 48 h 干燥处理,所有试样两端均匀涂抹硬脂酸润滑剂以降低端部摩擦效应的影响,每种层理角度和围压的试验均重复 3 次。

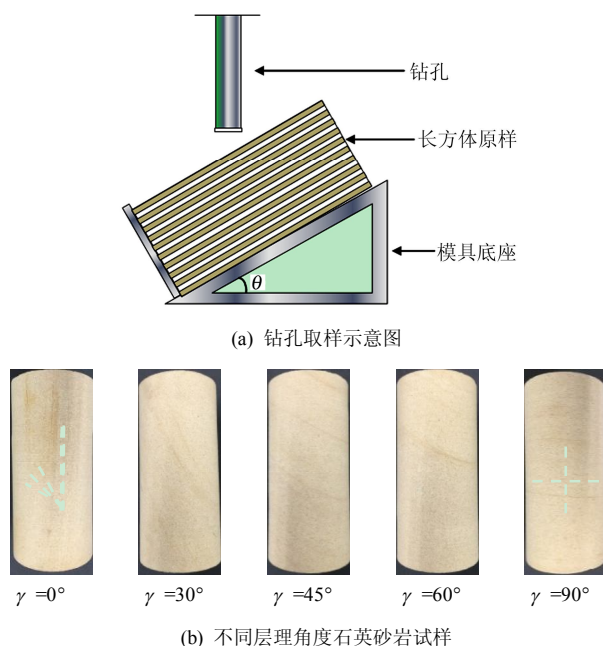


图2 钻孔取样示意图和不同层理角度石英砂岩试样
Fig.2 Sketch of specimen drilling and quartz sandstone specimens with different bedding angles

2.2 试验设置

石英砂岩试验采用 MTS 815 伺服试验系统。单轴试验采用 50 mm×100 mm 标准试样, 采用链式径向引伸计控制径向膨胀速率的加载方式, 膨胀率为 0.1 $\mu\text{m/s}$ 。三轴试验采用 30 mm×65 mm 试样, 采用特殊的油压套筒, 套筒将试样包裹其中并阻隔了与液态油的接触。试验首先将液态油加压注入套筒中以施加围压, 同时施加轴压保持与围压相等, 即对试样施加静水压力, 随后增大静水压力直到试验所要求的围压, 最后维持围压稳定并增大轴向应力进行测试, 直到试样破坏。围压采用数字式压力反馈传感器控制, 控制精度为 0.05 MPa, 轴向加载方式为位移控制, 控制速率为 2 $\mu\text{m/s}$, 单轴和三轴试验装置见图 3。

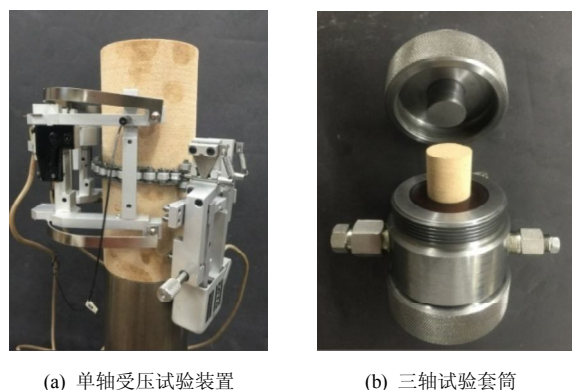


图3 单轴受压试验装置和三轴试验套筒
Fig.3 Uniaxial compressive test setup and triaxial test cell

3 力学特性及破坏模式

3.1 力学特性

石英砂岩属于低强度、高孔隙率的准脆性岩石, 孔隙率为 30.2%, 原生微裂隙较多。在初始阶段孔隙被压密, 应力-应变曲线向应变偏移而形成非线性段, 随着应力的增加, 曲线进入直线阶段。图 4 为不同围压条件下不同层理角度试样的应力-应变曲线。层理垂直或平行于最大主应力方向的 $\gamma=90^\circ$ 、 0° 试样应力-应变曲线较快进入线性阶段, 而层理方向和最大主应力方向斜交的 $\gamma=30^\circ$ 、 45° 、 60° 试样应力-应变曲线进入线性阶段较慢, 其中 $\gamma=90^\circ$ 试样进入线性阶段最快。随着主应力增大, 试样开始膨胀, 破裂面逐渐发育, 并在不同的应力条件下形成不同宏观破坏面。在低围压下试件迅速失去承载能力, 呈脆性破坏模式。随着围压的增大, 达到应力峰值之后试样的峰后阶段逐渐平缓, 在高围压下试样在峰值后逐渐维持应力稳定, 而低围压下峰后应力跌落明显, 表明石英砂岩在高围压下力学特性从脆性向延展性转化。

3.2 破坏模式

岩石类材料破坏模式受多种因素的影响, 随着层理角度以及应力条件的改变, 破坏模式呈现较大的差异性, 低围压下破坏模式为劈裂破坏和剪切破坏, 破坏面的角度受层理分布的影响; 高围压下试样逐渐屈服, 受到层理影响分为剪切屈服破坏和体积屈服破坏。剪切屈服的试样破坏面水平分布, 体积屈服的试样则不存在宏观破坏面, 不同围压试验条件下 $\gamma=90^\circ$ 、 60° 、 45° 、 30° 、 0° 石英砂岩试样的破坏模式如图 5 所示。

$\gamma=90^\circ$ 时试样在低围压条件下为贯穿多个层理面的剪切破坏。随着围压增大, 剪切破坏面与最大主应力的夹角增大, 剪切破裂贯穿的长度减小, 贯穿的层理条数逐渐减少。围压超过 30 MPa 后试样出现剪切屈服, 试样的端部出现水平分布的压密带破坏面^[22]。 $\gamma=60^\circ$ 时试样低围压下以剪切破坏为主, 在相同的围压条件下其破坏面与最大主应力的夹角大于 $\gamma=90^\circ$ 试样, 说明破坏面受到层理影响, 偏离了 $\gamma=90^\circ$ 试样的破坏面方向, 向层理一侧发生了偏转。围压升至 30 MPa 后, 随着围压的增大试样逐渐发生剪切屈服, 试件出现多段破坏面, 可能是由于此时层理角度较大, 相比于 $\gamma=30^\circ$ 、 45° 的层理为小倾角的试样, 相同的围压条件下颗粒及层理之间的密实程度较小, 破坏面除了沿剪应力最大平面发育之外, 更容易沿着靠近层理面的方向一并

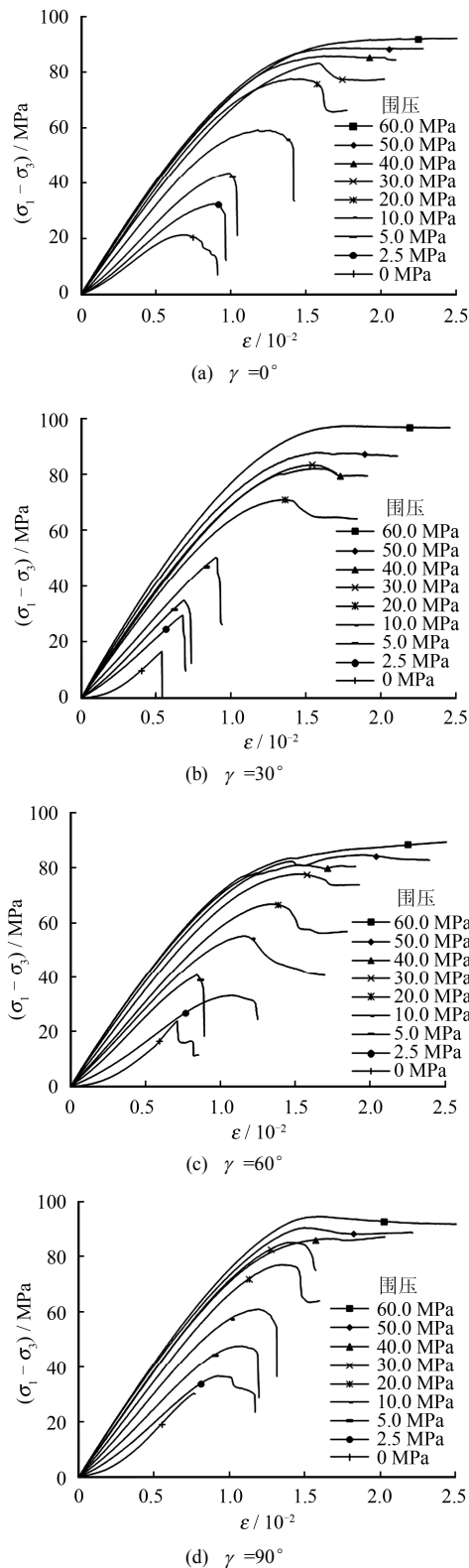


图4 不同层理角度和围压石英砂岩应力-应变曲线
Fig.4 Stress-strain curves of different confining pressures and bedding angles for quartz sandstones

发育, 而出现多段破坏的情况。当围压超过 50 MPa 后试样剪切屈服, 相比于 $\gamma = 90^\circ$ 试样, 破坏面由端部向试样中部靠近。

$\gamma = 30^\circ$ 时试样在低围压下大体沿层理面发生剪切滑移破坏, 破坏面与最大主应力的夹角大于

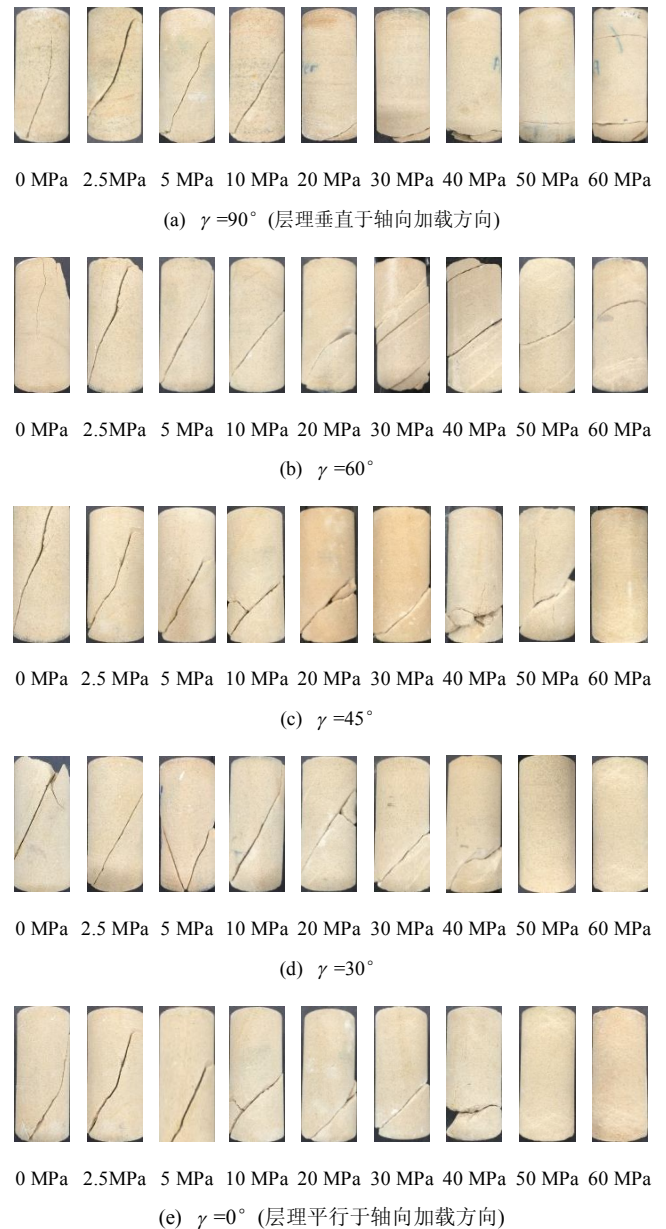


图5 不同层理角度试样在不同围压下的破坏模式
Fig.5 Fracture modes of specimen with different bedding angles under different confining pressures

$\gamma = 60^\circ$ 试样。与 $\gamma = 90^\circ$, 60° , 45° 试样不同的是围压 0 MPa 条件下 $\gamma = 30^\circ$ 试样的破坏面未贯通整个试件, 破坏面大约贯通试件长度的 80%。在 10~20 MPa 围压下破坏面与最大主应力夹角基本维持稳定, 围压大于 50 MPa 后试样体积屈服未出现宏观破坏面。

$\gamma = 45^\circ$ 时试样破坏面与最大主应力夹角介于 $\gamma = 30^\circ$ 和 $\gamma = 60^\circ$ 试样之间, 破坏面受层理的影响亦介于两者之间。 $\gamma = 0^\circ$ 试样加载方向平行于层理, 围压为 0 MPa 的条件下, 由于孔隙、裂隙多沿着层理方向分布, 在最大主应力作用下初始缺陷发育贯通, 平行于层理方向层理面强度较低, 破坏沿层理面发育, 破坏面贯通整个试件。在 0~30 MPa 围压

下破坏面方向逐由渐倾斜转向水平。围压增大到 40 MPa 时破坏面完全转向水平, 围压增大到 50 MPa, 由于颗粒以及层理之间的裂隙的压实度进一步增大, 石英砂岩内部的矿物颗粒被物理的挤压成新的结构分布形态。高围压下矿物颗粒被挤压错动, 黏结强度丧失, 试样出现体积屈服。围压 60 MPa 时颗粒及层理之间空间几乎被完全压密, 试样完全体积屈服而未见宏观破坏面。

综上所述, 随着围压的变化, 石英砂岩呈现不同的破坏模式并同时受到层理的影响。低围压条件下为剪切型破坏, 破坏面倾向于在层理软弱面的方向发生扩展和偏移, 受影响程度 $\gamma = 30^\circ > 45^\circ > 60^\circ$, 其中 $\gamma = 30^\circ$ 时几乎沿着层理面发生剪切滑移破坏。随着围压的增大, 颗粒以及层理之间的空隙被压实, 原始缺陷被缩小, 裂纹闭合, 试样逐渐发生屈服。破坏模式由剪切破坏向屈服挤密型破坏转化, 破坏面的方向逐渐转为水平。在高围压 (> 30 MPa) 下层理角度较小的试样 ($\gamma = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$) 出现屈服, 围压大于 50 MPa 后试样发生体积屈服而不存在宏观破坏面; 层理角度较大试样 ($\gamma = 60^\circ, 90^\circ$) 在高围压条件下为剪切屈服破坏, 其中 $\gamma = 60^\circ$ 试样受层理影响出现多段破坏面, 破坏面集中于试样的中部, 而 $\gamma = 90^\circ$ 试样在端部出现压密带破坏面^[22]。

4 不同应力条件下石英砂岩微观结构

试验砂岩属于石英砂岩, 粒径为 0.05~0.25 mm, 石英和各种硅质岩屑占 90%~95%, 碱性长石占 2%~5%, 在油气开采工程中油气以游离相态储存于岩石的裂缝、微空隙或者层理空间内。在微观尺度研究石英砂岩的颗粒和层理结构, 有助于进一步探究其力学特性、裂纹扩展、破坏模式和液气封存渗透性能。

岩石在不同方向上表现出不同的强度值称为岩石的各项异性, 岩石的各向异性分为两种: 一种是由于微裂缝的存在以及在不同方向上的排列, 分布不同而导致的, 具有这种各向异性的材料会随着岩石的应力变化而发生变形破坏特征的变化, 可称为应力各向异性; 另一种是由于岩石颗粒的定向排列引起的, 这种岩石的各向异性不会随着岩石的应力变化而改变。为了探究应力各向异性材料在不同应力条件下发生变形破坏特性变化的原因, 对不同应力条件下石英砂岩采用电镜扫描微观其结构, 采用 Leica ACE 600 扫描电镜对 $\gamma = 90^\circ$ 试样的原样、围压 30 MPa 和 60 MPa 试验后的试样进行微观结构的观察。用于微观结构观察的样品为 $\gamma = 90^\circ$ 试样中

靠近试样端部并平行砂岩层理方向的试样表面的一部分, 扫描部分见图 6(a) 白色矩形框内。图 6(b) 为原始试样, 红色箭头所指为沿着层理方向的层理间隙或微裂纹, 同时赋存有较大的原生孔隙 (蓝色箭头)。图 6(c) 为 30 MPa 围压试验后的试样扫描图由图可以发现, 较大的原生孔隙被压密, 颗粒间距变小, 矿物颗粒侵入原生孔隙中, 出现均匀分布的微小空隙。图 6(d) 为围压 60 MPa 试验后试样扫描图, 经过较高的围压压密之后红色箭头所指的层理间隙被闭合, 30 MPa 下出现的空隙被压密闭合 (蓝色箭头), 颗粒之间的间隙进一步变小。骨架颗粒附近出现错动带, 同时出现了新的带状空腔, 位于剪切屈服破坏面附近, 文献[22]认为此微观结构为压密带。由此可见, 随着应力的增大石英砂岩内部的矿物颗粒被物理挤压并形成新的结构分布形态, 石英砂岩的各向异性特征表现, 不同应力条件下破坏模式的转化与砂岩微观结构的改变有关。

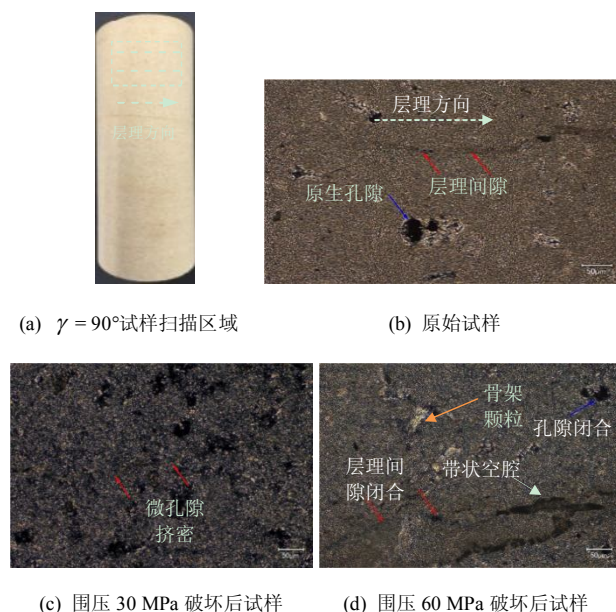


图 6 石英砂岩微观结构

Fig.6 Microstructure of quartz sandstone

5 各向异性特征

石英砂岩在成岩过程中的沉积作用和应力环境使得沿不同层理角度的矿物颗粒胶结程度, 微裂隙分布表现不同, 在力学特性上表现出各向异性。

5.1 弹性模量各向异性

根据全应力-应变曲线得到在不同围压条件下的不同层理角度试样的弹性模量, 线性部分取峰值的 10%~50% 部分拟合, 拟合系数大于 0.90。如图 7(a) 所示。不同层理角度石英砂岩的弹性模量随着围压增大而增大, 增长率在小于 30 MPa 范围内呈

快速增长趋势, 大于 30 MPa 范围时增长速率放缓, 其中 k_{ave} 为平均增长速率。以围压 30 MPa 为分界线, 之前增长率 ($k_{ave} = 0.177$) 远大于分界线之后的增长率 ($k'_{ave} = 0.028$), 两者的增长率比值为 6.32。在低围压 (<30 MPa) 下, 层理垂直和平行于轴向应力方向的 $\gamma = 90^\circ$ 、 0° 试样, 其弹性模量非常接近, 并且都大于中间角度层理的 $\gamma = 30^\circ$ 、 45° 、 60° 试样。在高围压 (>30 MPa) 下, 随着围压的增大, 不同层理角度试样之间的弹性模量数值逐渐接近, 出现这种现象的原因, 弹性模量的变化同时受到原生裂纹数目和层理软弱面的影响。在受原生微裂纹影响方面, 低围压范围内 (0~30 MPa), 微裂纹数目较多, 随着围压的增大, 裂纹闭合的数量较多, 弹性模量增长速率较大。高围压条件 (>30 MPa) 下原生裂纹已基本闭合, 新被闭合的裂纹数目较少, 对弹性模量的影响显著降低, 弹性模量趋于稳定。在弹性模量受到层理软弱面影响方面, 低围压下层理之间缝隙、微小裂隙、颗粒间微空间尚未被完全压密, 中间层理角度的 $\gamma = 30^\circ$ 、 45° 、 60° 试样受到层理软弱面的影响, 发生不同程度沿层理面的剪切滑移变形, 各试样达到峰值的应变 $\varepsilon_{\gamma=30^\circ} < \varepsilon_{\gamma=45^\circ} < \varepsilon_{\gamma=60^\circ} < \varepsilon_{\gamma=90^\circ}$, 弹性模量 $E_{\gamma=30^\circ} < E_{\gamma=45^\circ} < E_{\gamma=60^\circ}$ 即弹性模量在层理分布 $\gamma = 60^\circ$ 附近出现下降现象, 如图 7(b) 所示。

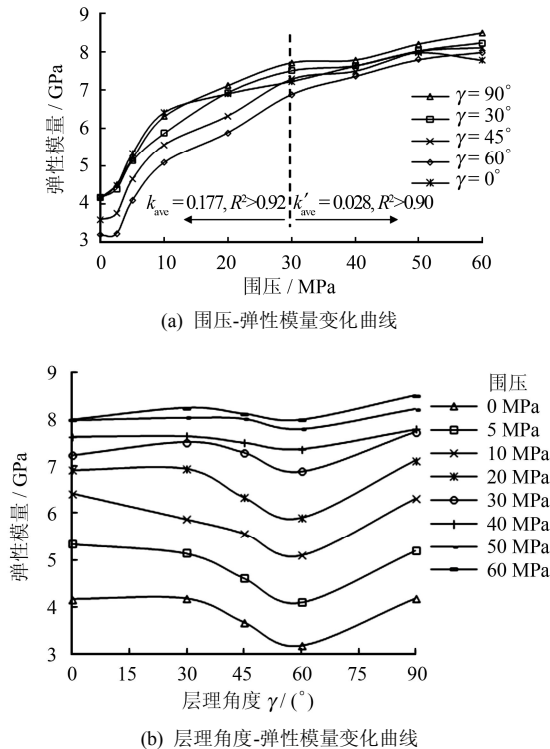


图 7 不同围压和层理石英砂岩的弹性模量各向异性
Fig.7 Anisotropy of elastic modulus of quartz sandstone under different confining pressures and bending angles

图 8 为带层理软弱面分布的石英砂岩, 其应力和变形可以分为平行于层理和垂直于层理 2 个分量。

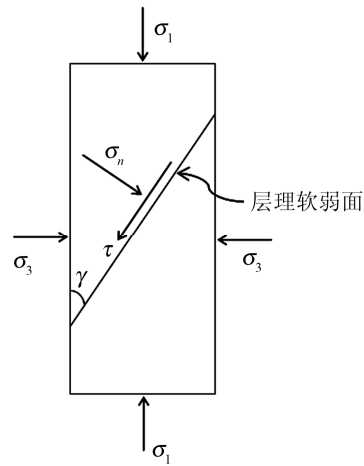


图 8 软弱滑移面上的正应力和剪应力
Fig.8 Normal stress and shear stress on weak slip plane

软弱滑移面上的应力可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos(2\gamma) \\ \tau &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin(2\gamma) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

沿层理方向的最大主应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1(\gamma)} &= \sigma_3 + \frac{2(c_w + \sigma_3 \tan \varphi_w)}{(1 - \tan \varphi_w \tan \gamma)\sin(2\gamma)} \\ S_{1(\gamma)} &= \sigma_{1(\gamma)} - \sigma_3 = \frac{2(c_w + \sigma_3 \tan \varphi_w)}{(1 - \tan \varphi_w \tan \gamma)\sin(2\gamma)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 c_w 、 φ_w 分别为层理软弱面的黏聚力和内摩擦角; $S_{1(\gamma)}$ 为破坏时层理角度为 γ 试样的偏应力。带层理分布的石英砂岩可看作是横观各向同性材料, 如图 9 所示。

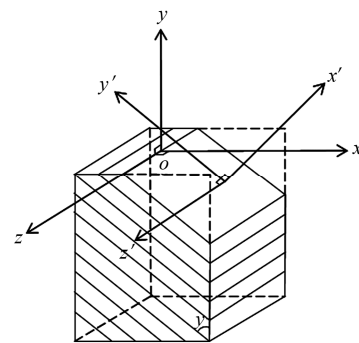


图 9 横观各向同性材料坐标转换示意图
Fig.9 Sketch of coordinate systems used for transformation law for material constants for transversely isotropic medium

在局部坐标 (x', y', z') 下有

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{x'x'} \\ \varepsilon_{y'y'} \\ \varepsilon_{z'z'} \\ \gamma_{y'z'} \\ \gamma_{x'z'} \\ \gamma_{x'y'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E'} \\ -\frac{\nu'}{E'} \\ -\frac{\nu}{E} \\ -\frac{\nu}{E} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{E'} & -\frac{\nu'}{E'} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu'}{E'} & \frac{1}{E'} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G'} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G'} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{x'x'} \\ \sigma_{y'y'} \\ \sigma_{z'z'} \\ \tau_{y'z'} \\ \tau_{x'z'} \\ \tau_{x'y'} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： E 、 E' 分别为垂直与平行层理方向的弹性模量； G' 为垂直于层理方向平面的剪切模量； ν 、 ν' 分别为垂直于层理与平行于层的泊松比，对于原始坐标系(x, y, z)则有

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & 0 & 0 & K_{16} \\ K_{12} & K_{22} & K_{23} & 0 & 0 & K_{26} \\ K_{13} & K_{23} & K_{33} & 0 & 0 & K_{36} \\ 0 & 0 & 0 & K_{44} & K_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{45} & K_{55} & 0 \\ K_{16} & K_{26} & K_{36} & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对于本文中的三轴试验，如图 10 所示，破坏时的应力状态可以用偏应力表示：

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_3 \\ \sigma_1 \\ \sigma_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_3 \\ \sigma_3 \\ \sigma_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \sigma_1 - \sigma_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_3 \\ \sigma_3 \\ \sigma_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ S_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： $S_1 = \sigma_1 - \sigma_3$ 。将偏应力代入式 (4) 可得

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & 0 & 0 & K_{16} \\ K_{12} & K_{22} & K_{23} & 0 & 0 & K_{26} \\ K_{13} & K_{23} & K_{33} & 0 & 0 & K_{36} \\ 0 & 0 & 0 & K_{44} & K_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{45} & K_{55} & 0 \\ K_{16} & K_{26} & K_{36} & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ S_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

轴向应变 $\varepsilon_{yy} = K_{22}S_1$ ，其中

$$K_{22} = \frac{1}{E_y} = \frac{\cos^4 \gamma}{E'} + \frac{\sin^4 \gamma}{E} + \cos^2 \gamma \sin^2 \gamma \left(\frac{1}{G'} - \frac{2\nu}{E} \right) \quad (7)$$

K_{22} 中水平层理和垂直层理分布试样的参数都能通过试验得到，图 11 为结合试验数据计算得出的不同层理弹性模量。

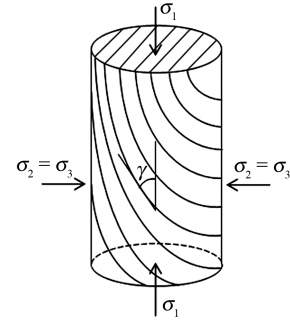


图 10 横观各向同性岩石三轴试验示意图
Fig.10 Sketch of conventional triaxial test for isotropic medium

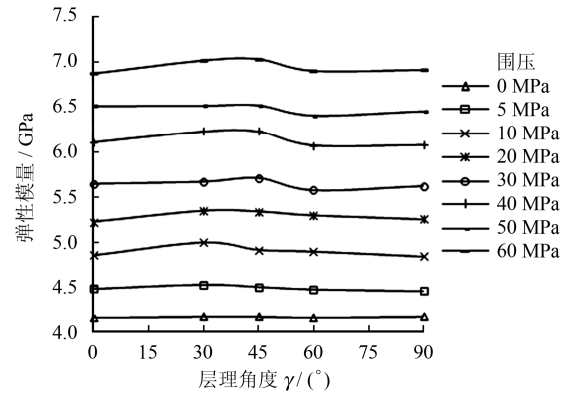


图 11 不同围压和层理石英砂岩的弹性模量理论计算值
Fig.11 Modulus of elasticity theory calculated values in different confining pressures and bending angles

采用弹性变形假设理论计算结果表明， $\gamma = 60^\circ$ 附近石英砂岩弹性模量存在下降趋势，与试验结果基本吻合。围压大于 30 MPa 后试件内部原生微裂纹，微孔隙被挤压密实，层理软弱面的影响逐渐消失，各层理角度试样的弹性模量逐渐接近，层理的各向异性逐渐减小。平行于层理的试样 ($\gamma = 0^\circ$) 弹性模量下降最快，在 60 MPa 条件下降低到最低值，原因可能是大围压垂直于层理走向释加后，使得石英砂岩内部微观结构重组，破坏了层理之间原有的颗粒胶结结构，使得轴向强度随围压增大而快速的丧失而导致应变增大，弹性模量迅速降低。

5.2 强度各向异性

石英砂岩在不同围压下的抗压强度变化趋势如图 12 所示。随着围压的增大，抗压强度增大。低围压 (<30 MPa) 条件下的试样，其强度随围压增大而增大的速率大于高围压 (>30 MPa) 条件。其中低围压条件下强度平均增长率 $k_{ave} = 3.0$ ，高围压条件下 $k'_{ave} = 1.36$ 。

石英砂岩强度在不同围压下随着层理角度的不同呈现各向异性的规律，如图 13 所示。相同的层理角度试样，随着围压的增大，强度增大。在低围

压(<30 MPa)下各层理试样强度呈浅U型,试样 $\gamma = 30^\circ$ 强度最低。当围压 $\sigma_3 \geq 30$ MPa后强度同样呈浅U型,强度最低值则转移至 $\gamma = 45^\circ$ 试样附近。Behrestaghi等^[23]、Nasseri等^[24-25]测试了石英岩、绿泥片岩、石英云母片岩、黑云母片岩等多种岩石,发现了类似的结论,即随着围压的增大,强度的最低值在 $\gamma = 30^\circ \sim 45^\circ$ 之间转化。原因是高应力下岩石内部的矿物颗粒被挤压形成新的结构分布形态所造成。

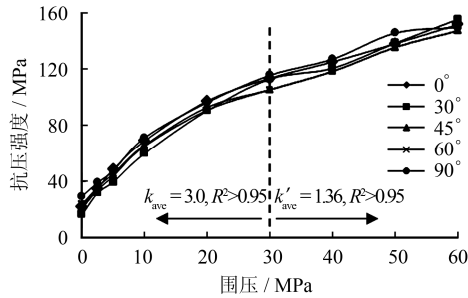
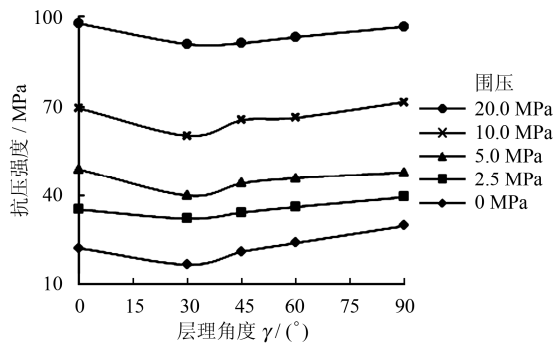
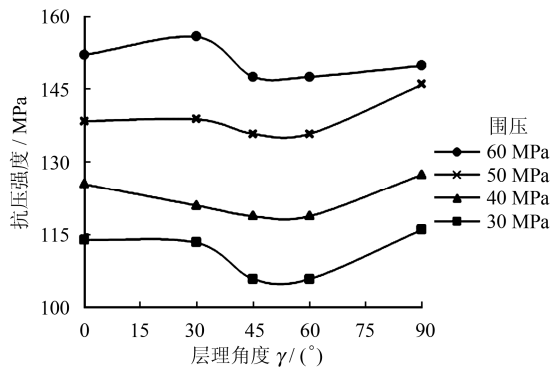


图12 不同围压下抗压强度

Fig.12 Uniaxial compressive strength under different confining pressures



(a) 围压 0~20 MPa 强度各向异性



(b) 围压 30~60 MPa 强度各向异性

图13 不同层理石英砂岩在不同围压下的抗压强度各向异性

Fig.13 Anisotropy of compressive strength of quartz sandstone with different bending angles and confining pressures

强度特征系数可表示为

$$K_c = \sigma_c / \sigma_{ci[\min]} \quad (8)$$

式中: σ_c 为单轴抗压强度; $\sigma_{ci[\min]}$ 为相同围压条件下不同层理岩石抗压强度的最小值。如图14所示,单轴条件下强度特征系数最大,随着在围压增大呈降低趋势。与单轴条件相比,20 MPa围压下强度特征系数由1.78降低至1.06。大于30 MPa之后石英砂岩层理软弱结构被高围压压密,强度特征系数降低,逐渐趋近于恒定值。

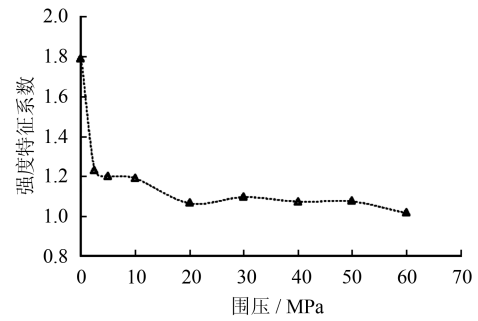


图14 不同围压条件下石英砂岩强度特征系数

Fig.14 Feature coefficients of compressive strength for quartz sandstone with different confining pressures

6 结 论

(1) 层理方向与最大主应力方向垂直或平行,应力-应变曲线较快由孔隙压密阶段进入线性阶段,斜交则较慢, $\gamma = 90^\circ$ 时试样应力-应变曲线最快进入线性阶段。

(2) 在低围压范围(<30 MPa)内以剪切破坏为主,随着围压的增大破坏面由倾斜转向水平。破坏面受到层理分布影响而发生偏转,偏转的程度 $\gamma = 30^\circ > 45^\circ > 60^\circ$, $\gamma = 30^\circ$ 时试样大体沿层理面剪切滑移破坏。高围压范围内破坏模式为由剪切破坏转化为屈服挤密型破坏, $\gamma = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 时试样发生体积屈服而不存在宏观破坏面, $\gamma = 60^\circ, 90^\circ$ 时试样发生剪切屈服破坏, $\gamma = 60^\circ$ 时试样受层理影响出现多段破坏面,破坏面集中于试样的中部,而 $\gamma = 90^\circ$ 时试样在端部出现压密带破坏面。

(3) 原样试件沿层理方向存在长条形的原生层理间隙,同时存在大量的原生孔隙。在中等围压作用下层理间隙被压密,矿物颗粒侵入原生孔隙中,生成均匀的网络状孔隙。在高围压下层理间隙被完全挤压闭合,原生空隙缩小网络状孔隙也随之挤密,骨料颗粒周围形成错动带,同时形成新的带状空腔。

(4) 弹性模量随围压的增大而增大,低围压下其增长速率较快,高围压下增长速率放缓,围压的增大使得各向异性对弹性模量的影响显著降低。低围压下, $\gamma = 90^\circ, 0^\circ$ 时试件弹性模量非常接近,并且都大于中间层理角度的试样,其中 $E_{\gamma=30^\circ} >$

$E_{\gamma=45^\circ} > E_{\gamma=60^\circ}$ 。高围压下各层理角度试样之间的弹性模量数值逐渐接近, $\gamma = 0^\circ$ 时试样的弹性模量随围压增大而增大的速率下降最快, 围压达到 60 MPa 时弹性模量为所有试件中最低。此外, 石英砂岩的弹性模量在层理角度 $\gamma = 60^\circ$ 都出现下降现象。

(5) 强度特征曲线呈 U 型, 围压在 0~20 MPa 范围内 $\gamma = 30^\circ$ 时试样强度最低, 在 30~60 MPa 范围内强度最低的试样转化到 $\gamma = 45^\circ$ 附近。强度的特征系数分析表明, 单轴条件下强度的各向异性最明显, 强度特征系数随着围压增大而降低, 围压大于 30 MPa 后强度特征系数趋近于稳定值。

致谢: 感谢国家留学基金委资助本人赴明尼苏达大学进行联合培养。感谢明尼苏达大学土木、环境与地质工程学院 Labuz 教授作为外方导师提供的试验设备以及指导。

参考文献

- [1] IBANEZ W D, KRONENBERG A K. Experimental deformation of shale: mechanical properties and microstructural indicators of mechanisms[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1993, 30(7): 723—734.
- [2] KUILA U, DEWHURST D N, SIGGIN A F, et al. Stress anisotropy and velocity anisotropy in low porosity shale[J]. **Tectonophysics**, 2011 503(1-2): 34—44.
- [3] 赵文瑞. 泥质粉砂岩各向异性强度特征[J]. 岩土工程学报, 1984, 6(1): 32—37.
ZHAO Wen-rui. Strength anisotropic of pelitic sandstone[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1984, 6(1): 32—37.
- [4] 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.
- [5] KATSUBE T J, MUDFORD B S, BEST M E. Petrophysical characteristics of shales from the Scotian shelf[J]. **Geophysics**, 1991, 56(10): 1681—1689.
- [6] DEWHURST D N, HENNIG A L. Geomechanical properties related to top seal leakage in the Carnarvon Basin, Northwest Shelf, Australia[J]. **Petroleum Geoscience**, 2003, 9(3): 255—263.
- [7] JOHNSTON J E, CHRISTENSEN N I. Seismic anisotropy of shales[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**(1978–2012), 1995, 100(B4): 5991—6003.
- [8] RAMAMURTHY T. Strength, modulus responses of anisotropic rocks[M]. Oxford: Pergamon Press, 1993: 313—325.
- [9] TALIERCIO A, LANDRIANI G S. A failure condition for layered rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1988, 25(5): 299—305.
- [10] 蒋明镜, 周卫, 刘静德, 等. 基于微观力学机制的各向异性结构性砂土的本构模型研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3347—3355.
JIANG Ming-jing, ZHOU Wei, LIU Jing-de, et al. A constitutive model for anisotropic structured sandy soil based on micromechanical mechanism[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(12): 3347—3355.
- [11] NASSERI M H B, RAO K S, RAMAMURTHY T. Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40(1): 3—23.
- [12] NIANDOU H, SHAO J F, HENRY J P, 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.
- [13] ATTEWELL P B, SANDFORD M R. Intrinsic shear strength of brittle anisotropic rock—I. Experimental and mechanical interpretation International[J]. **Rock Mechanics and Mining Science**, 1974, 11: 423—430.
- [14] 李庆辉, 陈勉, 金衍. 含气页岩破坏模式及力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 2): 3763—3771.
LI Qing-hui, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Experimental research on failure modes and mechanical behaviors of gas-bearing shale[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Supp.2): 3763—3771.
- [15] 席道瑛, 陈林, 张涛. 砂岩的变形各向异性[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(1): 49—58.
XI Dao-ying, CHEN Lin, ZHANG Tao. Anisotropic deformation of sandstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1995, 14(1): 49—58.
- [16] 席道瑛, 陈林. 岩石各向异性参数研究[J]. 物探化探计算技术, 1994, 16(1): 16—21.
XI Dao-ying, CHEN Lin. Anisotropy of rocks in geophysics[J]. **Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration**, 1994, 16(1): 16—21.
- [17] 蒲成志, 曹平, 赵延林, 等. 单轴压缩下多裂隙类岩石材料强度试验与数值分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3661—3666.
PU Cheng-zhi, CAO Ping, ZHAO Yan-ling, et al.

- Numerical analysis and experiment of rock-like materials with multi-fissures under uniaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(11): 3661—3666.
- [18] 何沛田, 黄志鹏. 层状岩石的强度和变形特征研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(10): 1—5.
HE Pei-tian, HUANG Zhi-peng. Studies of strength deformation characteristics for stratified rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(10): 1—5.
- [19] 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—617.
HENG Shuai, YANG Chun-he, ZHANG Bao-ping, et al. Experimental research on anisotropic properties of shale[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 609—617.
- [20] 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 Tian-yu, FENG Xia-ting, ZHANG Xi-wei, 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.
- [21] 陈运平, 王思敬, 王恩志. 循环荷载下层理岩石的弹性和衰减各向异性[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 25(11): 2232—2239.
CHEN Yun-ping, WANG Si-jing, WANG En-zhi. Elastic and attenuative anisotropy of bedding rock under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 25(11): 2232—2239.
- [22] BUAD P, KLEIN E, WONG T F. Compaction localization in porous sandstones: spatial evolution of damage and acoustic emission activity[J]. **Journal of Structural Geology**, 2004, 26: 603—623.
- [23] BEHRESTAGHI M H N, RAO K S, RAMAMURTHY T. Engineering geological and geotechnical responses of schistose rocks from dam project areas in India[J]. **Engineering Geology**, 1996, 44: 183—201.
- [24] NASSERI M H, RAO K S, RAMAMURTHY T. Failure mechanism in schistose rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(3-4): 219.
- [25] NASSERI M H, RAO K S, RAMAMURTHY T. Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40: 3—23.

上接第 102 页

- 力监测中的应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3161—3164.
LIN Chuan-nian, LIU Quan-sheng, GAO Wei, et al. Application of fiber optical sensing technology to monitoring axial forces of anchor bolts[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(11): 3161—3164.
- [10] 高冲. 基于光纤传感的锚杆轴力监测研究[硕士学位论文 D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
GAO Chong. The monitoring study of bolt axial force based on optical fiber sensor[Master's thesis D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2010.
- [11] 丁勇, 王平, 何宁, 等. 基于 BOTDA 光纤传感技术的 SMW 工法桩分布式测量研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 719—724.
DING Yong, WANG Ping, HE Ning, et al. SMW method based on optical fiber sensing technology pile BOTDA distributed measurement study[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(5): 719—724.
- [12] 江宏. PPP-BOTDA 分布式光纤传感技术及其在试桩中应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3190—3195.
JIANG Hong. PPP-BOTDA distributed fiber optic sensing techniques and its application to pile tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 3190—3195.
- [13] 丁勇, 王平, 李鹏飞, 等. 基于 BOTDA 的地下连续墙分布式变形监测技术研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 2): 500—503.
DING Yong, WANG Ping, LI Peng-fei, et al. Monitoring technology of deformation of continuous concrete wall based on BOTDA[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(Supp.2): 500—503.
- [14] 侯公羽, 谢冰冰, 江玉生, 等. 基于 BOTDR 的光纤应变与顶板沉降变形关系的模型构建与试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1298—1304.
HOU Gong-yu, XIE Bing-bing, JIANG Yu-sheng, et al. Research for the optical fiber strain and the settlement of roof based on BOTDR technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(5): 1298—1304.