

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.09.014

单轴压缩下龙马溪组页岩各向异性特征研究

侯振坤¹, 杨春和^{1,2}, 郭印同², 张保平³, 魏元龙¹, 衡 帅², 王 磊²

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘 要:层状页岩的各向异性在页岩气开采中十分重要,以龙马溪层状页岩为研究对象,对不同层理方向取芯、平行于层理面取芯的页岩进行了电镜扫描和单轴压缩试验。结果表明:页岩的微观描述、单轴压缩参数各向异性明显;应力-应变曲线属于 II 类曲线,且 5 个阶段不明显;破坏类型主要有 3 种:0°~15°时为竖向劈裂型张拉破坏,30°~60°时为沿层理弱面的剪切滑移破坏,75°~90°时为穿切层理面的剪切破坏,取芯角度不同,对应的曲线之间差异较大。与层理面成 30°时单轴抗压强度最小,0°和 90°附近相对较大;弹性模量和纵波波速相关性较好,都随着角度的增加而减小;平行于层理面取芯的样品其横观各向异性不明显,可近似看作横观各向同性体;微裂隙发育、独特的破坏类型是造成各向异性的主要原因。

关键词:层状页岩;层理面;破坏模式;各向异性;力学特性

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2015) 09 - 2541 - 10

Experimental study on anisotropic properties of Longmaxi formation shale under uniaxial compression

HOU Zhen-kun¹, YANG Chun-he^{1,2}, GUO Yin-tong², ZHANG Bao-ping³,
WEI Yuan-long¹, HENG Shuai², WANG Lei²

(1. State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China)

Abstract: The anisotropic behavior of layered shale is particularly important during exploring shale gas. To investigate the anisotropic behavior of layered shale of Longmaxi Formation in Shizhu County, the scanning electron microscope tests and uniaxial compression tests are conducted on shale specimens cored at different angles to the shale bedding. The results of microscopic features and uniaxial compressive parameters indicate that the shale is distinctly anisotropic. The stress-strain curve belongs to type II and its five phases are not clearly identified. Under the uniaxial compression condition, there are three types of failure mode: vertical splitting tensile damage with the coring angle of 0° - 15°, shear sliding damage along the beddings with the coring angle of 30° - 60°, and shear failure across the beddings with the coring angle of 75° - 90°. Therefore, the curves are significantly different when the coring angles are variable. It is found that the uniaxial compressive strength (UCS) is minimum when the coring angle is 30° to the shale bedding; the value of UCS is substantially high when the coring angle is around 0° or 90°. The elastic modulus is in good agreement with longitudinal wave velocity, and moreover, both of them decrease with the increase of the coring angle. Since it is difficult to identify the transverse anisotropy of cored samples parallel to the bedding plane, the layered shale of Longmaxi Formation is considered as a transverse isotropic body. The micro fracture and the unique destruction type mainly contributes to the anisotropic properties of the layered shale.

Keywords: layered shale; bedding plane; failure mode; anisotropic properties; mechanical characteristics

1 引 言

天然气是一种高效、优质的清洁能源,它包括常规天然气和非常规天然气,其中非常规天然气资

源量巨大,约为常规石油天然气的 1.65 倍^[1],它主要包括页岩气、煤层气、致密气。美国能源信息署(EIA)评估数据显示:当前全球拥有页岩气资源 $1.87 \times 10^{14} \text{ m}^3$,其中我国页岩气技术可采储量为

收稿日期: 2014-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.No. 51104144); 国家重点基础研究发展规划(973)(No.2010CB226701); 中石化科技部项目“页岩气水平井分段压裂地应力变化规律研究”(No.P12129); “十二五”国家科技重大专项(No.2011ZX05005-006)。

第一作者简介: 侯振坤,男,1988年生,博士研究生,主要从事页岩气水力压裂开采过程中的岩石力学问题的研究工作。E-mail: 979357924@qq.com

$3.608 \times 10^{13} \text{ m}^3$, 位居世界第一^[2]。目前,页岩气主要采用水力压裂技术开采,但页岩在沉积成岩过程中,形成了较多的弱面,表现出不同程度的各向异性。对于大倾角的地层,页岩各向异性尤为重要的是层理弱面,在较小的钻井液压力下,页岩层理弱面先于岩体本身发生破坏,常常会引起意料之外的复杂情况,研究各向异性具有一定的现实意义^[3]。另外,层理性泥页岩的井壁失稳是制约深部油气钻井成功的关键问题之一,页岩的各向异性使钻进大斜度井时更容易发生井壁失稳^[4],为了实现页岩安全钻井、优化水力压裂过程,迫切需要开展页岩各向异性试验研究。

目前,关于岩石各向异性的研究,国内外已经取得了许多成果。席道瑛等^[5]从广义虎克定律出发,推出了横观各向同性介质波传播速度依赖于传播方向与其对称轴 Z 之间的夹角 θ ,并随 θ 角成椭圆规律变化;宛新林等^[6]以不同的砂岩和大理岩为标本,通过试验得到岩石标本在平行层理和垂直层理方向上存在着的差异情况和变化规律,指出地壳介质的岩体各向异性对地球物理勘探来说是不能忽视的;刘运思等^[7]对 7 种不同层理角度 θ 下的板岩进行单轴压缩试验,得出 θ 从 0° 变化到 90° 时,其抗压强度呈现两端大、中间小的趋势,视弹性模量以及视泊松比由小变大的结论;孟召平等^[8]基于沉积结构面的成因类型,分析了沉积结构面的变形与破坏特征,以及沉积岩体沿层理方向和垂直层理方向岩体力学性质的差异性;李正川^[9]对现场取样的各向异性岩石进行了单轴压缩试验,确定了描述岩石横观各向同性特征的 5 个弹性常数以及各向异性岩石的强度指标;高春玉等^[10]通过对板岩、砂岩各向异性力学特性研究,得到不同倾角对岩石变形特性、强度特性的影响;Walter^[11]研究了层状岩石的应力各向异性、波速各向异性,以及应力和波速的关系;Robacchi^[12]对各向异性岩体的应力测量进行了研究;Aadnoy^[13]对各向异性岩石中斜井稳定性模型进行了研究,得出了当岩石各向异性较弱时,引入误差小于 10%,当岩石各向异性较强时,引入的误差小于 25%的结论;Gonzaga 等^[14]基于 Saint-Venant 经验公式,测出了 5 个弹性参数。

以上研究多为波速、单轴、三轴、岩电响应等力学性质方面的试验研究。另外,对页岩的孔深特性及压裂特性也相继进行了研究^[15-20]。由于试验制样的困难,目前关于页岩各向异性的论述依然十分粗略,并且缺乏可靠的试验依据,故本文从单轴试验出发,详细地研究了页岩的各向异性,分析了产生各向异性的原因,为页岩水力压裂控制、钻井工

程计算分析、井壁稳定性问题提供必要的参数和理论支撑。

2 试样采取及试验方案

2.1 试样制备

本试验对彭水页岩气区块的页岩露头岩芯进行了现场采集,该露头是重庆彭水页岩气区块储层的自然延伸,也即石柱县漆辽海相志留统龙马溪组露头,坐标为 $N29^\circ 52'47.8''$, $E108^\circ 17'06.6''$ 。为了研究页岩的各向异性,在现场选取表层下风化相对较弱的大块新鲜页岩,取芯方法如下:

为验证页岩的各向异性为横观各向同性,现场钻取了两种不同类型的岩芯。第 1 种为不同层理方向取芯。如图 1 所示,取芯方向与层理的夹角依次为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° 。第 2 种为平行层理方向,即取芯轴线与层理面平行。如图 2 所示,在平行层理方向,选取一任意基准线,以该基准线依次逆时针取 0° 、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 和 150° 共 6 个不同方向的岩芯。为减小组分构成差异等对试验结果的影响,均在同一页岩块上钻取该类岩芯。为防止页岩风化开裂,钻取的岩芯立即蜡封保存。

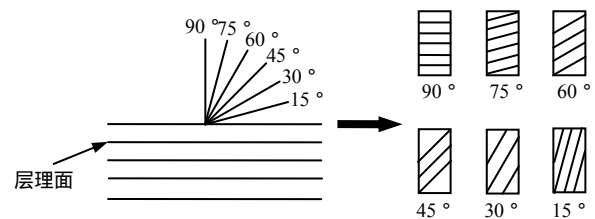


图 1 与页岩层理方向成不同夹角取芯

Fig.1 Coring samples at different angles to bedding plane of shale

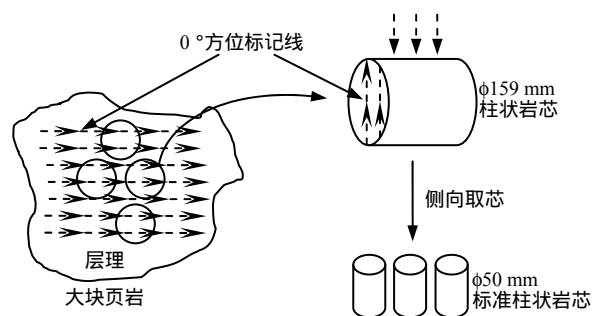


图 2 平行于层理方向取芯

Fig.2 Coring samples in the direction parallel to the bedding plane

取芯完毕后,在室内按《水利水电工程岩石试验规程》DLJ204-8 标准进行岩芯加工^[21],经过切、磨等加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准岩芯,直径允许偏差小于 0.2 mm ,两端面的不平整度允许偏差小于

0.05 mm，端面与轴线的垂直偏差控制在±0.25°以内，部分试样如图 3 所示。



图 3 部分加工试样
Fig.3 Image of the cored samples

2.2 试验设备

力学试验采用美国产 MTS815 型全数字型液压伺服刚性材料试验机，测试精度高，性能稳定，可

实时记录荷载、应力、位移和应变值，并能够同步绘制荷载-位移、应力-应变曲线。采用中国科学院武汉岩土力学研究所智能仪器研究室研制的 RSM-SY5 型非金属超声波检测仪进行声波测试，其测试系统主频为 650 kHz，试验时采用直达波法，换能器布置在试样两端面中心，接触面用超声波耦合剂耦合，使用纵波采样，采样频率为 0.2 μs。

2.3 试验方法

轴向加载时，采用环向位移控制，其加载速率为 0.015 mm/min。

3 试验结果分析

3.1 页岩矿物组分分析

矿物组成对研究页岩地层的力学特性、脆性特征和井壁稳定性等具有重要意义。采用德国 Bruker AXS D8-Focus X 射线衍射仪对页岩矿物组分进行分析，结果如表 1 所示。

表 1 矿物成分含量(单位: %)

Table 1 Mineral percentage of shale (unit: %)

| 参数 | 黏土类岩石 | | | 石英等脆性岩石 | | | 其余矿石 | | | | | |
|----|-------|------|------|---------|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| | 高岭石 | 蒙脱石 | 伊利石 | 石英 | 方石英 | 钠长石 | 黄铁矿 | 方解石 | 白云母 | 羟铁云母 | 铁白云石 | 褐锰矿 |
| 均值 | 1.00 | 1.42 | 3.43 | 55.50 | 2.88 | 14.57 | 4.08 | 4.44 | 5.57 | 1.41 | 5.10 | 0.37 |

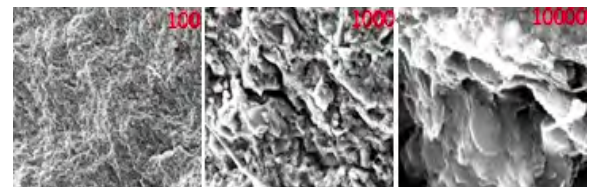
注：黏土类岩石总量为 5.85%，石英等脆性岩石总量为 72.94%，其余岩石总量为 21.20%。

目前，石油工程中以石英等脆性矿物含量作为脆性的主要评价标准。龙马溪组页岩石英含量较高，可达 62%，平均为 55.5%，而脆性矿物总量达 72.94%，属于可压性较高储层。黏土矿物含量较低，不足 6%；其余矿物中黄铁矿、方解石、白云母、铁白云石含量均可达 4%以上。

3.2 页岩微观描述各向异性

采用中国科学院武汉岩土力学研究所 Quanta 250 扫描电子显微镜对页岩岩芯的微观结构进行分析，测试采用高真空模式，加速电压为 30 kV，束斑直径为 3.0 nm，放大倍数设置为 100、500、1 000、2 000 与 10 000 倍，分别测试页岩内部矿物组分的粒径、空间分布及内部孔隙特征，试验结果以垂直与平行于层理面方向为例进行分析，如图 4、5 所示。

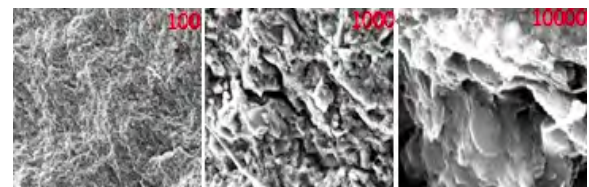
根据 XRD 试验测试结果可知：在垂直于层理面方向($\theta = 90^\circ$)和平行于层理面方向($\theta = 0^\circ$)，页岩矿物颗粒之间均为泥质胶结，相互之间胶结良好，几乎观察不到大的孔隙，但小的孔隙（纳米孔隙、微孔隙、微裂缝）十分发育，纳米级孔隙度可达 2%，并且孔隙一般在 100 nm ~ 50 μm 之间，使烃源岩有效地向外排烃成为可能，比较有利于改善页岩的渗



(a) 放大 100 倍 (b) 放大 1 000 倍 (c) 放大 10 000 倍

图 4 垂直层理面 ($\theta = 90^\circ$)

Fig.4 SEM images of sample perpendicular to bedding plane ($\theta = 90^\circ$)



(a) 放大 100 倍 (b) 放大 1 000 倍 (c) 放大 10 000 倍

图 5 平行层理面 ($\theta = 0^\circ$)

Fig.5 SEM images of sample parallel to the bedding plane ($\theta = 0^\circ$)

透性，并且在沉积压实作用下定向排列，形成明显的层理面，石英、长石与方解石等矿物形成夹层支撑；不同的是，当 $\theta = 90^\circ$ 时，层理面的发育程度与

取样位置有很大的关系,各种矿物颗粒排列相对整齐,有微裂隙发育且排列整齐,几乎沿一个方向发育。当 $\theta=0^\circ$ 时,各种矿物颗粒杂乱排列,相互之间充填完整,没有明显的分隔间隙,可以看出黏土与长石矿物的叠层形态,相对于 90° ,该微裂缝更加发育,更加杂乱无章。

页岩这种成层特性及微观构造,使泥页岩在外力的作用下极易沿微裂缝或层理面破坏、剥落,很容易造成井壁失稳、井壁掉块、坍塌等井内复杂情况,这是应该防治的重点。

3.3 不同层理方向页岩的单轴压缩试验分析

3.3.1 应力-应变曲线各向异性分析

应力-应变曲线见图6,横坐标中正、负值分别表示轴向应变、环向应变。从图6中可以得到如下特征:

(1) 该组页岩应力-应变曲线类型是Ⅱ类曲线,表明页岩破坏为非稳定断裂传播型,试件达到峰值强度后,试验机不用再做功,试件自身释放的能量就能使破裂继续扩展,且此破坏过程的稳定性是不可控的;脆而硬的岩石往往具有Ⅱ类曲线特征,这些特征是岩石所固有的,这说明龙马系组页岩是具有脆性的硬岩,这使得水力压裂法开采页岩成了可能,峰后曲线曲折较多,说明由于层理面的存在,页岩的均质性较差,这使得页岩水力压裂过程中形成多裂缝的缝网成为可能。

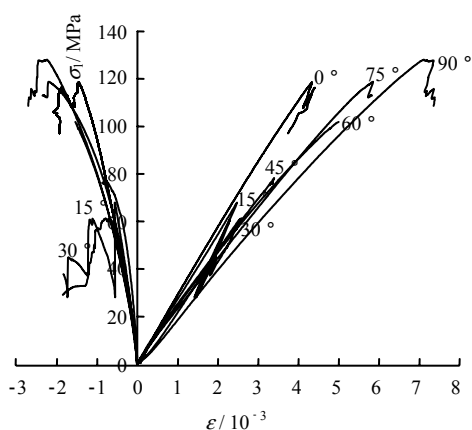


图6 应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of shale

(2) 该组页岩全应力-应变曲线的5个阶段不明显:有的几乎没有初始压密阶段,有的初始压密阶段不明显,线弹性变形阶段较长,弹性极限与屈服极限十分接近,此阶段与初始压密阶段、屈服应力点均难以区分,角度较小时曲线斜率几乎不减,表现出明显的线弹性,随着角度和应变的增加,曲线斜率稍有下降,有转向弹塑性的趋势,但趋势不

明显,到达峰值点时,页岩突然破坏,应力陡降,甚至有的直接降为0,无残余强度,脆性特征明显。

(3) 随着角度的不同,页岩单轴抗压强度、弹性模量、泊松比、变形特征等明显不同,表现出比较明显的各向异性,具体分析见3.3.3节。

(4) 不同角度下的应力-应变曲线在峰值点附近出现不同程度的波动,其原因各不相同。当 θ 为 $0^\circ \sim 15^\circ$ 时,加载过程中形成的多个独立压杆(形成原因见3.3.2节),由于压杆不可能同时形成,压杆承载力也不同,加载时,压杆本身失稳及压杆的相互扰动,造成了峰值附近应力产生波动;当 θ 为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 时,加载过程中凸台被剪断导致曲线波动较大;当 θ 为 $75^\circ \sim 90^\circ$ 时,应力-应变曲线波动是因为此角度下页岩先呈层状劈裂破坏,而后每个层状块体内出现剪切破坏连成宏观断裂面。

3.3.2 页岩破坏类型各向异性及破坏判据分析

页岩是硬脆性岩石,在单轴压缩条件下,具有脆性破坏性质,其破坏形态见图7。当 θ 从 0° 逐渐增加到 90° 的过程中,页岩由平行层理面的竖向劈裂型张拉破坏逐渐转变为沿层理弱面的剪切滑移破坏,最后演变成穿切层理面的劈裂型层状剪切破坏。

(1) 当 θ 从 $0^\circ \sim 15^\circ$ 时,如图7(a)、7(b)所示,破坏类型是平行层理面的竖向劈裂型张拉破坏。此阶段破坏时多胀裂为片状,个别页岩还存在张拉分叉破坏现象,这种破坏的实质是压杆失稳。由于此时页岩层理面是平行定向排列的,采用环向位移控制对其进行轴向加压,当荷载缓慢增加时,环向位移逐渐增大产生横向拉应力,在横向拉应力作用下,张拉微裂纹在层理弱面萌生、扩展、延伸,最终形成贯通性的宏观裂纹,页岩试样裂开形成多个独立压杆,这些独立压杆几乎与页岩层理面平行,从而沿多个平行层理面竖向劈裂破坏,此角度下岩石试件的峰值强度由弱面的抗拉强度和最大压杆强度共同决定,残余强度则是由压杆强度决定。破坏判据为最大拉张应变或者最大拉应力破坏准则: $\varepsilon_{\max} > \varepsilon_r$ 或 $|\sigma_n| > R_t$, 其中 ε_r 为拉张应变, ε_{\max} 为最大拉张应变, σ_n 为结构面法向拉应力(MPa), R_t 为结构面层间黏结强度(MPa)。

(2) 当 θ 从 $30^\circ \sim 60^\circ$ 时,如图7(c)~(e)破坏类型是沿层理弱面的剪切滑移破坏:此阶段是典型的层状岩石破坏类型,破坏为沿层理弱面发生剪切破坏,甚至贯穿层理弱面,形成宏观破裂,产生滑动,剪切面即为层理面,表面光滑,局部出现试样剪断,这种破坏的实质是剪断凸台,层理面受剪初期,剪切力上升较快,之后层理面部分凸台被剪断,

剪切力继续上升，梯度减小，直至破坏，此阶段单轴抗压强度完全由弱面黏结强度决定，由于页岩弱面黏结强度较低，故其单轴抗压强度也较低。破坏判据为库仑准则： $\tau_{max} > \sigma_{\theta} \tan \varphi + c$ 。

(3) 当 θ 从 $75^\circ \sim 90^\circ$ 时，如图 7(f)、7(g)，破坏类型是穿切层理面的劈裂型层状剪切破坏：压缩过程中页岩首先沿层理面呈劈裂破坏，然后每个层状块体内出现不同程度的竖向剪切破坏，且易爆裂为碎块，虽然是剪切破坏，但破裂面并不沿着层理面，其破坏实质是层理面的胶结强度远小于页岩本身的强度。由于轴向荷载并不是与层理面严格垂直以及端面不平等原因，在加载过程中会产生拉剪应力，造成微裂纹先沿层理面萌生和扩展，随后沿微裂纹的拉剪应力逐渐超过了层理面自身的抗剪强度，页岩首先发生层状破坏，产生近似平行的多个层状块体，由于拉应力分量较小，不足以发生沿层理面滑移，随着应力的增加以及应力集中现象，每个层状块体内出现剪切破坏，剪切裂纹逐渐连接



图 7 典型页岩试样破坏形态
Fig.7 Typical failure patterns of shale samples

形成宏观剪切面，从而试样发生沿该剪切面的滑移破坏，有的中部形成呈 X 形交叉的两个剪切破裂面，有的形成一个贯通型剪切破坏，但不在对角线上，这与定向排列的矿物束自身强度较大有很大的关系。此角度下岩石试件的峰值强度并不是由弱层所控制，而是由岩石本身的抗剪强度所决定。破坏判据为最大正应力或最大张应变能破坏准则： $\sigma_{max} > \sigma_c$ 或 $\epsilon_{max} > \epsilon_c$ 。

3.3.3 页岩物理力学参数各向异性分析

页岩在沉积成岩过程中，由于不同时期或者同一时期、不同时间和地点造岩矿物类型不同、沉积取向性差异、沉积环境的力学特性和构造历史迥异，再加上多期天然裂缝和人工扰动缝体相互交迭，使含气页岩的物理力学性质具有显著的各向异性，这些性质影响着页岩的钻井完井工作以及压裂效果。

(1) 波速各向异性分析

通过大量工程实践和试验研究，弹性波速测试法在岩体物理力学特性测定、施工前后工程岩体的评价等方面都取得了良好的效果^[22]。为了将这些成果较好地运用到页岩上，有必要对页岩的波速各向异性进行分析，本文仅讨论纵波波速，波速变化情况见表 2 和图 8。

表 2 页岩参数表

Table 2 Physical and mechanical parameters of shale

| 角度 θ /($^\circ$) | 弹性模量 E / GPa | 泊松比 μ | 抗压强度 σ_{mc} / MPa | 纵波波速 V_p /(m/s) |
|------------------------------|-------------------|-----------|-----------------------------|----------------------|
| 0 | 29.0 | 0.318 | 124.5 | 4 610 |
| 15 | 27.2 | 0.270 | 85.6 | 4 578 |
| 30 | 26.0 | 0.237 | 65.2 | 4 495 |
| 45 | 24.2 | 0.248 | 87.0 | 4 405 |
| 60 | 21.3 | 0.265 | 110.2 | 4 338 |
| 75 | 20.3 | 0.286 | 118.9 | 4 290 |
| 90 | 18.8 | 0.290 | 128.4 | 4 268 |

注： E 、 μ 、 σ_{mc} 、 V_p 的各向异性系数分别为 1.54、1.34、1.97、1.08。

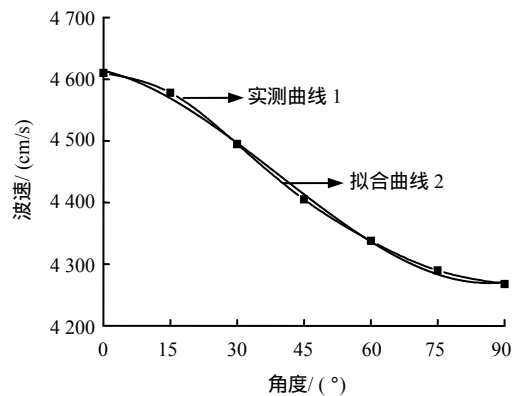


图 8 波速随层理角度变化规律
Fig.8 Variation of wave velocity with the orientation of bedding planes

由图 8 曲线 1 可以清晰地看出：页岩的波速随钻取角度不同而表现出显著的各向异性，0°时波速最大，为 4 610 m/s；15°时波速次之，为 4 578 m/s；到 90°时取得最小值，仅为 4 268 m/s，与最大值相差 342 m/s，相差较大。随着角度的增加，波速呈逐渐降低之势，降低幅度刚开始比较缓慢，随后迅速增加，最后又趋于缓慢。

页岩波速之所以表现出如此明显的各向异性，这与岩石中定向排列的微裂隙和组成矿物的优选排列有关。邓继新等^[23]通过 X-射线衍射和扫描电镜证明了这点，本文重点从宏观角度分析波速差异性的具体原因：当 θ 在 0°附近时，此时纵波方向与页岩层理面平行，有利于导波，故波速较大；当 θ 在 90°附近时，纵波与页岩层理面垂直，层理面对波速有阻碍作用，因而纵波在试件中行走时间较长，波速较小；当 θ 从 0°增加到 90°的过程中，纵波方向由平行层理面逐渐转变为垂直层理面，其穿透层理面的层数逐渐增加，增加幅度为缓慢—迅速—缓慢，层理面的增加使得低速介质增多、波的反射增强、能量衰减加重、波行走时间加长，波速降低，且降低幅度与之对应，变化规律也是缓慢—迅速—缓慢。利用上述规律外加下面的波速拟合方程(1)，可以综合利用声波资料进行储层评价，对层理角度进行预测，此波速拟合曲线如图 8 中曲线 2，拟合方程如下：

$$V_p = 4\,613.714\,3 - 1.663\,8\theta - 0.100\,1\theta^2 + 8.477\,3 \times 10^{-4}\theta^3 \quad (1)$$

式中： θ 为角度(°)； V_p 为纵波波速(m/s)；相关系数为 0.996。

(2) 单轴抗压强度各向异性分析

从图 9 中可以看出，随着层理角度的增大，页岩的强度曲线近似呈两边高中间低的 U 形变化规

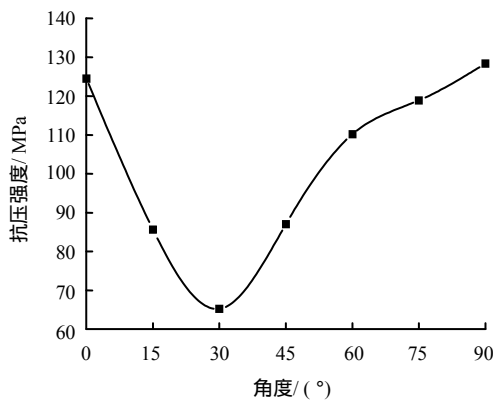


图 9 单轴抗压强度和层理角度的关系

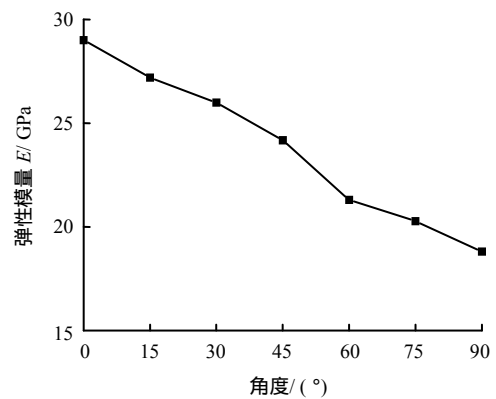
Fig.9 Variation of uniaxial compressive strength with the orientation of bedding planes

律，即随着角度的增加，页岩单轴抗压强度先是逐渐减小，然后逐渐增加，且当 θ 在 0°和 90°附近时取得最大值；当 θ 在 30°附近时，抗压强度达到最小值，最大值几乎是最小值的 2 倍；当 θ 从 60°~90°时，抗压强度变化缓慢，其余角度时变化较快，这些都说明层状页岩具有强烈的各向异性。

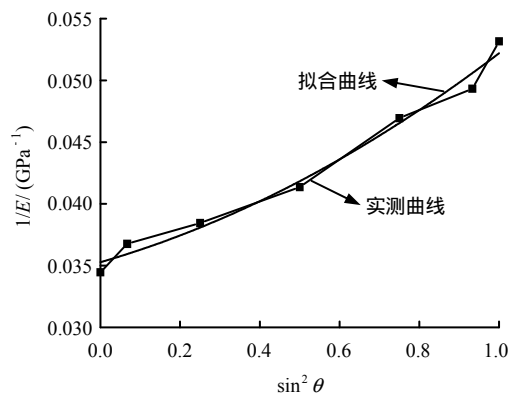
层状页岩如此大的强度各向异性和其破坏模式是分不开的，当 θ 在 0°附近时，破坏类型是压杆失稳破坏，强度取决于独立压杆，反映了页岩岩体结构面和结构体的抗剪切拉伸能力，强度较高；当 θ 在 30°附近时，破坏类型是沿层理弱面的剪切滑移破坏，抗压强度取决于层理弱面，故其值最低，反映了岩体结构面和结构体的抗剪切滑动能力；当 θ 在 90°附近时，破坏类型是穿切层理面的劈裂型层状剪切破坏，强度取决于页岩岩石本身，反映了岩石本身的抗压能力，故抗压强度最高。

(3) 弹性模量各向异性分析

图 10 为弹性模量-层理角度的关系曲线。从图 10(a)中得知，层状页岩弹性模量随层理夹角 θ 的



(a) 弹性模量随角度变化曲线



(b) 弹性模量倒数的拟合曲线

图 10 弹性模量和层理角度的关系

Fig.10 Variation of Young's modulus with the orientation of bedding planes

增加逐渐减小，最大值为 29.01 GPa，最小值为 18.81 GPa，降低幅度高达 35.16%，各向异性明显，其原因有以下几点：

(1) 内因 邓继新等^[23]已经证明了层理面内定向排列的黏土矿物和微裂隙是使样品显示出强弹性各向异性的内在原因，从本文做的 X-射线衍射和扫描电镜分析试验中也可看出，不同层理面夹角下页岩黏土矿物含量、微裂隙发育情况差别较大，这些差异性造成了弹性模量的各向异性。

(2) 外因 页岩是典型的沉积岩，在成岩过程中层间弱面压密程度较低，故当主应力平行于层理面时，层理面处于拉伸变形状态，试件侧向膨胀明显，弹性模量与变形模量较大；当主应力垂直层理面的作用下，层理面处于压密变形状态，此时轴向应变较大，弹性模量与变形模量较小。从岩石产状上看，所取页岩为露头岩芯，取芯时不同钻芯角度对试样变形也有一定影响。从破坏模式上来说，当 θ 在 0° 附近时，因为压杆相当于刚性体，此时引起的弹性变形相对较小，故弹性模量较大；当 θ 在 30° 附近时，此时破坏所需应力相对较小，故弹性模量相对于 0° 时变小；当 θ 在 90° 附近时，破坏类型是穿切层理面的劈裂型层状剪切破坏，由于软弱结构面的存在，压密层状页岩产生了很大的轴向变形，故弹性模量更小。

Niandou 等^[24]通过坐标系的变换，得到了如下公式：

$$\frac{1}{E} = \frac{\sin^4 \theta}{E_1} + \left[\frac{1}{G_3} - 2 \frac{\mu_3}{E_3} \right] \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\cos^4 \theta}{E_3} \quad (2)$$

式中： E_1 为平行各向同性面的弹性模量； E_3 为垂直各向同性面的弹性模量； μ_3 为垂直各向同性面的泊松比； G_3 为垂直层理方向的剪切模量。

令 $k = \frac{1}{G_3} - 2 \frac{\mu_3}{E_3}$ ，又有 $\cos^2 \theta = 1 - \sin^2 \theta$ ，代入

式 (2)，经过整理后可得

$$\frac{1}{E} = \left(\frac{1}{E_1} - k + \frac{1}{E_3} \right) \sin^4 \theta + \left(k - \frac{2}{E_3} \right) \sin^2 \theta + \frac{1}{E_3} \quad (3)$$

式 (3) 可以写成如下形式：

$$\frac{1}{E} = f(\sin^2 \theta) \quad (4)$$

利用式 (4) 对弹性模量进行最小二乘拟合，见图 10(b)，可得以下拟合公式，其相关系数为 0.977：

$$\frac{1}{E} = 0.0353 + 0.0093 \sin^2 \theta + 0.0076 \sin^4 \theta \quad (5)$$

陈乔等^[25]曾将灰色系统的关联度分析方法引入到岩土中来，该方法是分析系统中各因素的关联程度，其实质是对数据进行几何关系的比较，找出比较序列的发展趋势与参考序列发展趋势的吻合情况，并据此判断比较序列与参考序列的关联程度，从而得出影响参考序列的主要因素。对照图 8、图 10(a)，发现纵波波速和弹性模量变化趋势相同，关联度较高，对二者进行拟合，曲线如图 11 所示。

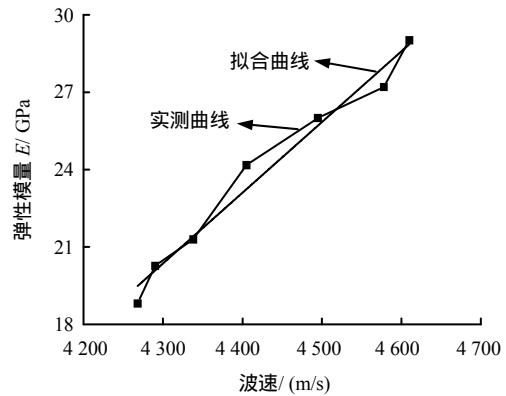


图 11 纵波波速和弹性模量关联度分析
Fig.11 Relationship between Young's modulus and wave velocity

图 11 中拟合公式为

$$E = -97.53 + 0.02742V_p, R^2 = 0.971 \quad (6)$$

用式 (5)、(6) 外加测井资料，对龙马溪层状页岩的弹性模量、层理面倾角等进行粗略预测，研究结果对工程实践具有指导意义。

3.4 平行于层理方向页岩单轴压缩试验分析

为了研究龙马溪页岩是不是横观各向同性体，进行了平行于层理方向页岩单轴压缩试验，得到的结果如图 12、13 所示。

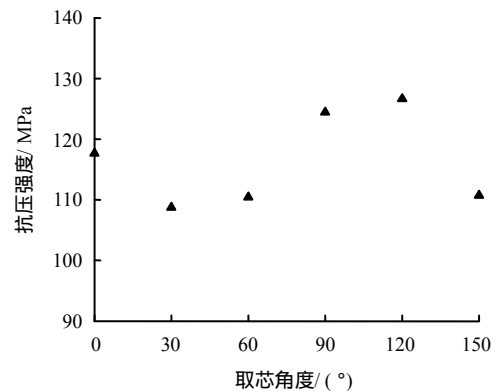


图 12 单轴抗压强度随层理角度变化图
Fig.12 Variation of uniaxial compressive strength with the orientation of bedding planes

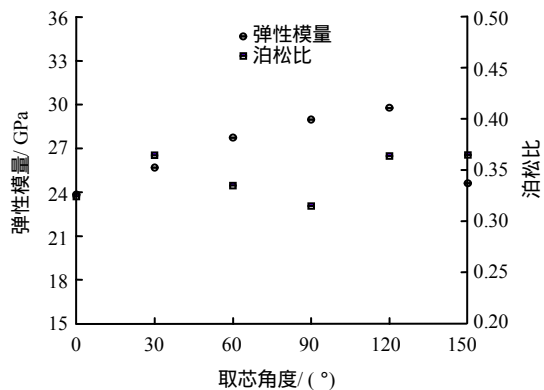


图 13 弹性模量、泊松比随层理角度变化

Fig.13 Variation of Young's modulus and Poisson's ratio with the orientation of bedding planes

(1) 平行于层理方向页岩单轴抗压强度在 108.8 ~ 126.7 MPa 范围内变化, 变化幅度在可接受变化范围之内, 约为 16.45%, 抗压强度平均值为 116.5 MPa, 与层理方向成不同夹角取芯页岩单轴抗压强度均值为 102.82 MPa, 相比之下平均增加 13.68 MPa, 增加率为 13.31%, 平行于层理方向页岩单轴抗压强度比较高。

(2) 弹性模量在 23.9 ~ 29.8 GPa 之间变化, 变化率为 20%左右, 平均值为 26.8 GPa, 与层理方向成不同夹角, 取芯页岩弹性模量均值为 23.83 GPa, 相比之下有所增长, 增加了 12.48%; 泊松比在 0.32 ~ 0.37 内波动, 变化量为 0.05, 变化率为 10%。

从上述分析可以看出, 在平行层理面内, 龙马溪页岩的单轴抗压强度、弹性模量、泊松比均存在不同程度的变化, 变化率分别为 16.5%、20.0%、10.0%, 存在着轻微的各向异性, 这些差异有可能是页岩本身的差异引起的, 但也不排除试验机的误差原因, 龙马溪页岩的横观各向异性不明显, 在适当的情况下, 还是可以把龙马溪页岩近似看成横观各向同性体。

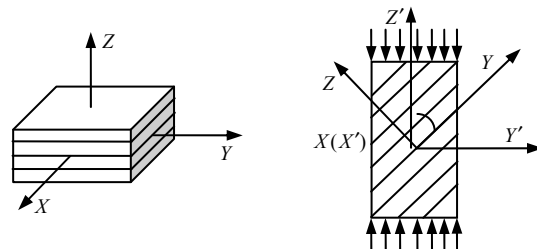
3.5 5 个参数求取

页岩可以近似看成横观各向同性体, 横观各向同性体的独立弹性常数从极端各向异性的 21 个降至为 5 个, 这 5 个独立弹性常量分别为: E_1 、 E_3 、 μ_1 、 μ_3 、 G_3 , 其中 μ_1 为平行各向同性面的泊松比, 其余参数含义见式 (2)。

如图 14 所示, 从横观各向同性介质坐标系统, 以 Z 、 Z' 轴为各向同性对称轴, X 和 X' 轴重合, 可

以得到如下矩阵方程^[26]:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_1}{E_1} & -\frac{\mu_3}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_1}{E_1} & \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_3}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_3}{E_3} & -\frac{\mu_3}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{E_1}{2(1+\mu_1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \end{pmatrix} \quad (7)$$



(a) 整体坐标系的横观各向同性材料 (b) 加载方向与层理面倾角

图 14 横观各向同性介质坐标系统

Fig.14 Schematic of the transversely isotropic material in global coordinate systems

该矩阵中的 5 个独立弹性常数计算方法如下, 计算结果见表 3。

表 3 5 个弹性常数求取结果
Table 3 Results of 5 elastic constants

| E_1 / GPa | E_3 / GPa | μ_1 | μ_3 | G_3 / GPa |
|-------------|-------------|---------|---------|-------------|
| 18.8 | 29.0 | 0.290 | 0.318 | 9.823 |

平行于层理面方向, 有

$$E_1 = \frac{\sigma_Z}{\varepsilon_Z}; \quad \mu_1 = -\frac{\varepsilon_X}{\varepsilon_Z} \quad (8)$$

式中: E_1 为平行于层理面时的弹性模量; σ_Z 、 ε_Z 、 ε_X 分别为平行于层理面时的轴向应力、轴向应变、侧向应变。

垂直于层理面方向, 有

$$E_3 = \frac{\sigma'_Z}{\varepsilon'_Z}; \quad \mu_3 = -\frac{\varepsilon'_X}{\varepsilon'_Z} \quad (9)$$

式中: E_3 为垂直于层理面时的弹性模量; σ'_Z 、 ε'_Z 、

ε'_x 、 μ_3 分别为垂直于层理面时的轴向应力、轴向应变、侧向应变、泊松比。

另外， G_3 可由式 (3) (5) 求得。

页岩的这 5 个独立弹性常量在水平井分段压裂的力学计算中非常重要，它是岩层中一点处的应力状态的重要参数，同时它与井眼稳定性分析、地层张性破裂分析、井壁垮塌分析、井筒对地应力及其分布的影响、注入压力所产生的应力和井壁上的总应力、水压致裂造缝条件等工程问题的分析研究也密切相关。

4 结 论

(1) 龙马溪页岩中石英等脆性岩石含量较高，可达 62%，平均为 55.5%，属于可压性较高储层，在垂直于层理面方向上和平行于层理面方向上，电镜扫描结果差异较大，前者各种矿物颗粒排列相对整齐，有微裂隙发育且排列整齐，后者矿物颗粒排列杂乱，相互之间充填完整，没有明显的分隔间隙，微裂缝发育且排列杂乱无章。

(2) 应力-应变曲线属于 Ⅱ 类曲线，5 个阶段不明显，角度不同，曲线差异较大，具有明显的各向异性，其破坏类型主要有 3 种：竖向劈裂型张拉破坏、沿层理弱面的剪切滑移破坏、穿切层理面的剪切破坏。

(3) 单轴抗压强度曲线近似呈两头大中间小的 U 形，当 θ 在 0° 和 90° 附近时取得最大值，当 θ 在 30° 附近时，页岩单轴抗压强度达到最低值，其各向异性原因较多，从微观上说，是微裂隙发育程度不同；从宏观角度来讲，主要是其不同破坏模式所致。

(4) 弹性模量和波速具有类似的变化规律，两者相关性较好，都随着角度的增加而减小。

(5) 在平行于层理方向页岩单轴压缩试验中，各参数虽然稍有差异，但变化幅度不大，可以把龙马溪页岩近似看成横观各向同性体。

参 考 文 献

[1] 肖钢, 唐颖. 页岩气及其勘探开发[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 1 - 17.

[2] U. S. Energy Information Administration. Annual energy outlook 2011 with projections to 2035[EB/OL]. [2011-08-16]. [http://www.eia.gov/forecast/aec/df/0383\(2011a\).pdf](http://www.eia.gov/forecast/aec/df/0383(2011a).pdf).

[3] 陈勉, 金衍, 张广清. 石油工程岩石力学[M]. 北京: 科

学出版社, 2008: 114 - 115.

- [4] 赵凯, 邓金根, 蔚宝华, 等. 层理性泥页岩大斜度井壁稳定性研究[J]. 科学技术与工程, 2013, (5): 1147 - 1151.
- ZHAO Kai, DENG Jin-Gen, YU Bao-hua, et al. Study on the stability of layered shale deviated wells[J]. **Science Technology and Engineering**, 2013, 32(5): 1360 - 1364.
- [5] 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. The anisotropy of sandstone deformation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1995, 14(1): 49 - 58.
- [6] 宛新林, 席道瑛, 叶青, 等. 岩石各向异性试验研究及对工程勘探的影响[J]. 中国煤炭地质, 2008, 20(8): 39 - 41.
- WAN Xin-lin, XI Dao-ying, YE Qing, et al. Experimental study of rock anisotropy and its impact on engineering investigation[J]. **Coal Geology of China**, 2008, 20(8): 39 - 41.
- [7] 刘运思, 傅鹤林, 伍毅敏, 等. 横观各向同性岩石弹性参数及抗压强度的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(8): 3398 - 3404.
- LIU Yun-si, FU He-lin, WU Yi-min, et al. Experimental study of elastic parameters and compressive strength for transversely isotropic rocks[J]. **Journal of Central South University(Science and Technology)**, 2013, 44(8): 3398 - 3404.
- [8] 孟召平, 陆鹏庆, 贺小黑. 沉积结构面及其对岩体力学性质的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(1): 33 - 37.
- MENG Zhao-ping, LU Peng-qing, HE Xiao-hei. Depositinonal structure planes and their influence on the mechanical properties of sedimentary rock mass[J]. **Coal Geology & Exploration**, 2009, 37(1): 33 - 37.
- [9] 李正川. 岩石各向异性的单轴压缩试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 5(3): 69 - 72.
- LI Zheng-chuan. Experimental study on the uniaxial compression of anisotropic rocks[J]. **Journal of Railway Science and Engineering**, 2008, 5(3): 69 - 72.
- [10] 高春玉, 徐进, 李忠洪, 等. 雪峰山隧道砂板岩各向异性力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1360 - 1364.
- GAO Chun-yu, XU Jin, LI Zhong-hong, et al. Experimental study of anisotropically mechanical characteristics of sandy slate in Xuefeng Mountain Tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1360 - 1364.

- [11] WALTER KONHAEUSER. Broadband wireless access solutions—Progressive challenges and potential value of next generation mobile networks[J]. **Wireless Personal Communications**, 2006, 37(3-4): 243 - 259.
- [12] ROBACCHI R. Rock stress measurements in anisotropic rock masses field measurements in rock mechanics[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1977, 16(3): 183 - 196.
- [13] AADNOY B S. Modeling of the stability of highly inclined boreholes in anisotropic rock formations[J]. **Society of Petroleum Engineers Drilling Engineering**, 1988, 3(3): 259 - 268.
- [14] GONZAGA G G, LEITE M H, CORTHESEY R. Determination of anisotropic deformability parameters from a single standard rock specimen[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 45(8): 1420 - 1438.
- [15] 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. 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.
- [16] 彭光忠. 单轴压应力下页岩岩块的结构面方向与其力学特性的关系[J]. **岩土工程学报**, 1983, 5(2): 101 - 109.
PENG Guang-zhong. The analysis of the relationship between structural plane direction of shale and its mechanical properties under uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1983, 5(2): 101 - 109.
- [17] 郭印同, 杨春和. 川东北砂岩单三轴压缩过程中应力-波速变化规律的试验研究[J]. **矿业研究与开发**, 2009, 29(3): 17 - 20.
GUO Yin-tong, YANG Chun-he. Experimental study on the change law between stress and velocity of longitudinal wave for the sandstone from northeastern Sichuan in uniaxial and triaxial compression[J]. **Mining Research and Development**, 2009, 29(3): 17 - 20.
- [18] 邓涛, 黄斌彩, 杨林德. 致密岩石纵横波波速各向异性的比较研究[J]. **岩土力学**, 2007, 28(3): 492 - 498.
DENG Tao, HUANG Bin-cai, YANG Lin-de. Anisotropy comparison of P wave and S wave velocity for compacted rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(3): 492 - 498.
- [19] 贾长贵, 陈军海, 郭印同, 等. 层状页岩力学特性及其破坏模式研究[J]. **岩土力学**, 2013, 34(增刊 2): 57 - 61.
JIA Chang-gui, CHEN Jun-hai, GUO Yin-tong, et al. Research on mechanical behaviors and failure modes of layer shale[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Supp.2): 57 - 61.
- [20] 孟陆波, 李天斌, 徐进, 等. 高温作用下围压对页岩力学特性影响的试验研究[J]. **煤炭学报**, 2012, 37(11): 1829 - 1833.
MENG Lu-bo, LI Tian-bin, XU Jin, et al. Experimental study on influence of confining pressure on shale mechanical properties under high temperature condition[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(11): 1829 - 1833.
- [21] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院. DL/T5368-2007 水电水利工程岩石试验规程[S]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [22] 赵平劳, 姚增. 层状岩石动静态力学参数相关性的各向异性[J]. **兰州大学学报(自然科学版)**, 1993, 29(4): 225 - 229.
ZHAO Ping-lao, YAO Zeng. The anisotropy of the dynamic parameters with the static parameters of bedded rock[J]. **Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)**, 1993, 29(4): 225 - 229.
- [23] 邓继新, 史调, 刘瑞珣, 等. 泥岩、页岩声速各向异性及其影响因素分析[J]. **地球物理学报**, 2004, 47(5): 862 - 868.
DENG Ji-Xin, SHI Ge, LIU Rui-xun, et al. Analysis of the velocity anisotropy and its affection factors in shale and mudstone[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2004, 47(5): 862 - 868.
- [24] 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.
- [25] 陈乔, 刘洪, 王森, 等. 重庆地区下志留统龙马溪组页岩基础物性试验研究[J]. **科学技术与工程**, 2013, 13(15): 4148 - 4152.
CHEN Qiao, LIU Hong, WANG Sen, et al. Experimental study of the fundamental physical properties on shale in Longmaxi formation of lower Silurian, Chongqing[J]. **Science Technology and Engineering**, 2013, 13(15): 4148 - 4152.
- [26] 陆明万, 罗学富. 弹性理论基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.