

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.S1.005

# 不同围压及应变速率下页岩变形及 破损特性试验研究

刘俊新<sup>1,2</sup>, 张 可<sup>2</sup>, 刘 伟<sup>1,3</sup>, 施锡林<sup>3</sup>

(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. 西南科技大学 土木与建筑工程学院, 四川 绵阳 621010;  
3. 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)

**摘 要:**为揭示围压及应变速率对页岩力学特性的影响规律,对志留统龙马溪组页岩试样开展了不同围压及不同应变率下的三轴压缩力学试验研究。结果表明,围压和应变率对页岩的弹性模量、峰值强度及破裂形态等均具有显著影响,弹性模量和峰值强度均随围压的升高而增加,峰值强度增加的幅度明显大于弹性模量,峰值强度呈线性增加趋势,低围压时应变率从低到高,弹性模量和峰值强度都呈逐渐升高的趋势,两者与应变率对数的关系可用二次多项式描述;随着围压增大,页岩的应变率效应逐渐减弱,在较高高围压(50 MPa)下峰值强度和弹性模量随应变率增加而增加现象均变得极不显著。对试验后岩样的破坏模式进行分析可知,页岩在低围压高应变率状态下主要是劈裂-剪切破坏,随着围压的增加和应变率的减小,试样的破坏由脆性劈裂-剪切破坏向单一剪切破坏转变,再逐渐向延性破坏过渡。研究结果对于合理确立页岩力学参数及设计压裂方案具有较好的参考。

**关键词:**页岩;应变率;围压;力学特性;弹性模量;峰值强度;破坏模式

**中图分类号:** TU 452

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2017) 增 1 - 0043 - 010

## Experimental study of mechanical behaviours of shale under different confining pressures and different strain rates

LIU Jun-xin<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Ke<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>1,3</sup>, SHI Xi-lin<sup>3</sup>

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

2. Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** To investigate the mechanical properties of shale under different confining pressures and different strain rates, the triaxial compression experiments of Longmaxi Group shale samples are conducted under different confining pressures and different strain rates. The experimental results show that the confining pressure and strain rate affect obviously elastic modulus, peak strength and fracture morphology of the shale. The elastic modulus and peak strength increase with the increase of confining pressure, the increase of peak strength is significantly greater than the length of the elastic modulus; and the peak strength showed a linear increasing trend. At a low confining pressure, elastic modulus and peak strength gradually increase along with the inclining of strain rate from low to high; the relationship between the two and the strain rate can be described by a biquadratic polynomial. With the increase of confining pressure, the effect of strain rate on the shale is gradually weakened; at a high confining pressure of 50 MPa, the phenomenon of the compressive strength and elastic modulus increase with the increase of strain rate is terminated. Under condition of low confining pressure and high strain rate, the shale is mainly split shear failure; with the increase of confining pressure and the decrease of strain rate, the failure mode would change from split shear failure to single shear failure; and then gradually transits to a ductile fracture. The results of the test have important guiding roles in establishing the mechanical parameters of shale and designing the fracturing program.

**Keywords:** shale; strain rates; confining pressure; mechanical properties; elastic modulus; peak strength; failure mode

收稿日期: 2016-09-17

基金项目: 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室开放基金(No. 2011DA105287-FW201404); 重庆市博士后特别资助(No. Xm2016028); 四川省科技支撑计划项目(No. 2016GZ0157)。

This work was supported by the National Nature Science Foundation of China(51604044); Chongqing Postdoctoral Foundation(Xm2016028) and the Sichuan Province and Technology Support Project(2016GZ0157).

第一作者简介: 刘俊新, 男, 1976 年生, 双博士后, 教授, 主要从事岩石力学与渗流力学研究。

通讯作者: 刘伟, 男, 1986 年生, 博士后, 讲师, 主要从事与能源储备及矿山灾害治理相关的岩石力学、渗流力学及地质工程研究。E-mail: guarenliuwei@126.com

## 1 引 言

随着传统油气资源的逐渐枯竭,具有替代意义的非常规能源(页岩气)逐渐获得了世界各国的密切关注,美国更是依赖页岩气革命,迎来能源结构的重大调整和升级。我国也蕴藏着巨大的非常规油气资源,其中页岩气预估资源量达到  $30 \times 10^{13} \text{ m}^3$ ,略高于美国  $28.2 \times 10^{13} \text{ m}^3$  的探明储量,开采前景十分广阔<sup>[1]</sup>,国家已经明文规定将页岩作为一种独立矿种,并要求大力加强对页岩气资源的研究及开发工作<sup>[2]</sup>。

页岩是地壳中广泛分布的一类沉积岩,由于其本身结构致密、分布连续,在石油地质学中常常作为优质油气藏盖层<sup>[3]</sup>。以往的研究多是从盖层的封闭性角度对其开展探索研究,随着页岩气资源开发的兴起,页岩的力学性质也渐趋成为研究热点。页岩是一种生、储、盖一体化的特殊气藏,一般情况下采用常规开采方法几乎无法获取工业气流,必须通过水力压裂制造人工裂缝,才能驱使其内部的甲烷渗出形成有价值的工业气流。页岩赋存于深部地下处于三向地应力状态,而压裂作业的不同推进速度等储层改造作业相当于使页岩处于不同应变速率作用下。因此,开展不同围压及不同应变速率对页岩的力学特征影响研究,具有十分重要的理论价值和实用意义。

近些年来关于岩石围压效应及应变率效应方面的研究探索从未间断过,并取得了一些有价值的研究成果。朱瑞赓等<sup>[4]</sup>对花岗岩进行了不同加载速率的力学试验,得出其强度随加载速率变化的规律。李永盛等<sup>[5]</sup>研究了红砂岩在 9 级不同加载速率下的力学特征,分析了红砂岩力学参数与加载速率关系。Bieniawshi 等<sup>[6]</sup>和 Peng 等<sup>[7-8]</sup>分别对细砂岩和凝灰岩等进行了不同应变率下的力学试验。Cho 等<sup>[9]</sup>研究了不同应变率的岩石的抗拉强度。纪文栋等<sup>[10]</sup>开展了不同应变率、不同围压下盐岩的三轴压缩试验,揭示了在围压与应变率耦合效应下盐岩的力学特征。苏承东等<sup>[11]</sup>对大理岩试样在应变率  $2 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  范围内进行了 6 级应变率下的单轴压缩试验,分析应变率对大理岩力学性质的影响。

基于国家对页岩气开采的极大重视,国内学者对页岩的物理力学特性也开展了广泛而深入的研究,衡帅等<sup>[12]</sup>研究了页岩层理面特性对页岩压裂效果的影响,侯振坤等<sup>[13-14]</sup>研究了页岩的各项异性与脆性特征,陈天宇等<sup>[15]</sup>研究了页岩的力学性能和各向异性特征,侯宇光等<sup>[16]</sup>研究了页岩的孔隙结构对

甲烷气吸附能力的影响,但是,这些研究仅仅涉及页岩的常规物理力学特性及破坏模式,针对页岩的应变率效应下的力学响应特征的研究成果较为缺乏,国外仅见 Chong 等<sup>[17]</sup>利用 Instron 电液伺服刚性试验机对油页岩进行了应变率效应研究,国内只有刘俊新等<sup>[18]</sup>分别在 4 种不同应变速率下对页岩开展单轴压缩力学试验,分析了应变速率对页岩的弹性模量、峰值强度、破裂形态等产生的显著影响,关于页岩在三轴条件下不同围压和不同应变速率对物理力学性质的研究却未见报道。

本次对页岩进行了不同围压下变应变率的三轴压缩试验,研究了应变率对强度、应变、弹性模量和破裂方式的影响规律,分析了围压对应变率变化效果的影响,结合页岩气开发的相关背景开展了关于应用的探索与讨论,本研究结果可为进一步探明页岩的破碎和压裂特征提供一定参考。

## 2 试样准备和试验方案

### 2.1 试样准备

试样均取自重庆市武隆县江口镇的下志留统龙马溪组页岩,现场钻取直径为 50 mm 左右的长柱岩芯,采用保鲜膜包装并用牛皮纸蜡封后妥善运至实验室进行再加工。页岩层理发育且含有一定量的黏土矿物,遇水较易开裂、膨胀,故试验中所需试样只能通过手工加工获取,首先利用钢锯切出长 102 mm 左右的试样,然后利用专用夹具配合细砂纸分步打磨直至形成符合试验规程的标准试样。本次试验所有试样层理均为水平向,与试样轴向垂直。

组分是影响页岩物理力学性能的重要原因,为了对试样有更深入地了解,加工试样中收集了岩芯粉末,开展成分分析。X-射线衍射分析(XRD)结果显示,各组分含量平均为石英 48.94%,方解石 2.22%,黄铁矿 6.92%,钠长石 13.18%,钾长石 6.16%,伊利石 19.36%,高岭石 3.22%,可见该试样脆性矿物含量相对较高,基本归类于脆性岩石。

### 2.2 试验方案

本次试验采用的是常规三轴压缩试验,在长春新特试验机厂和中国科学院武汉岩土力学研究所共同研制的 XTR01 型微机控制电液伺服岩石三轴试验仪上完成,见图 1。试验时,将试样安置在上、下压头后用热缩胶套密封,防止岩样破裂时碎渣溅入硅油内,在压头与试样接触处采用“O”型圈密封。将该试样置于三轴压力室内,先施加预定的围压并保持不变,以预定的速率施加轴向荷载直至试件破坏,在加轴压的过程中同时测定试件的各项变

形值。



图1 XTR01 型高温高压岩石伺服试验机  
Fig.1 XTR01 servo controlled rock mechanical test machine of high temperature and high pressure

本次试验设定 3 组不同围压( 10、30、50 MPa )，代表页岩所处不同地质深度，每组围压下取 4 种不同的应变率，为  $5 \times 10^{-4}$ 、 $1 \times 10^{-4}$ 、 $2 \times 10^{-5}$ 、 $4 \times 10^{-6}$  /s，每组应变率下取一个试样进行试验，共 12 个试样分析。试验方案见表 1。表中， $D$  为直径； $L$  为高度。周维恒<sup>[19]</sup>对动、静加载的定义是当加载速率（应变率）在  $10^{-4} \sim 10^{-6}$  /s 的范围内时为静态加载，当加载速率高于  $10^{-4}$  /s 时为动态加载。本文不涉及页岩动力特性研究，故所设计的应变率均不高于  $10^{-4}$  /s。

表1 三轴压缩试验方案

Table 1 Test scheme of triaxial compression

编号	$D$ /mm	$L$ /mm	围压 /MPa	应变率 /s
1	47.72	100.4	10	$5 \times 10^{-4}$
2	47.73	97.23	10	$1 \times 10^{-4}$
3	47.97	100.83	10	$2 \times 10^{-5}$
4	47.67	99.06	10	$4 \times 10^{-6}$
5	47.95	100.68	30	$5 \times 10^{-4}$
6	47.96	98.94	30	$1 \times 10^{-4}$
7	48.01	101.14	30	$2 \times 10^{-5}$
8	47.72	98.92	30	$4 \times 10^{-6}$
9	47.99	100.41	50	$5 \times 10^{-4}$
10	48.02	99.23	50	$1 \times 10^{-4}$
11	48.00	100.26	50	$2 \times 10^{-5}$
12	47.81	100.48	50	$4 \times 10^{-6}$

### 3 试验结果及分析

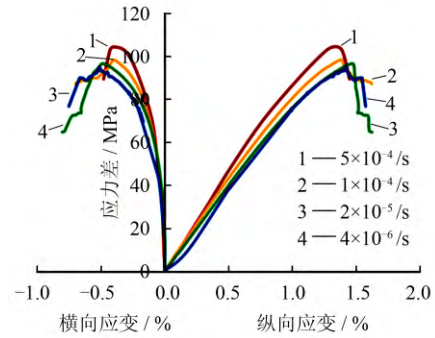
#### 3.1 试验结果

整理三轴压缩试验记录的荷载、位移数据，分析得出页岩在不同应变速率及不同围压下的应力-应变全程曲线，如图 2 所示，并在表 2 中给出了试验结果主要力学指标参数。

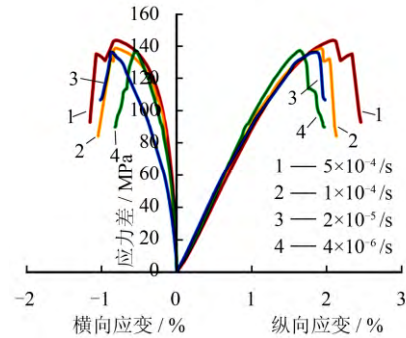
#### 3.2 围压对页岩力学性质影响

##### 3.2.1 围压对应力-应变曲线的影响

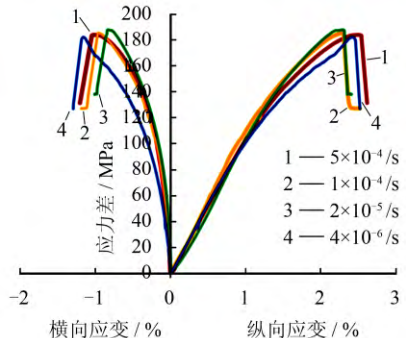
在没有围压的单向加载试验中页岩的应力-应



(a) 围压 10 MPa



(b) 围压 30 MPa



(c) 围压 50 MPa

图 2 不同围压下应变率影响示意图

Fig.2 Strain rate effects sketch under different confining pressures

表 2 三轴压缩试验结果

Table 2 Experimental results of triaxial compression

编号	围压 /MPa	应变率 $\dot{\epsilon}$ /s	应变率对数 $\lg \dot{\epsilon}$	峰值强度 /MPa	弹性模量 /GPa
1	10	$5 \times 10^{-4}$	-3.301	104	9.03
2	10	$1 \times 10^{-4}$	-4.000	98	8.67
3	10	$2 \times 10^{-5}$	-4.699	96	8.01
4	10	$4 \times 10^{-6}$	-5.398	95	7.63
5	30	$5 \times 10^{-4}$	-3.301	145	8.83
6	30	$1 \times 10^{-4}$	-4.000	139	9.19
7	30	$2 \times 10^{-5}$	-4.699	137	9.69
8	30	$4 \times 10^{-6}$	-5.398	135	9.64
9	50	$5 \times 10^{-4}$	-3.301	184	10.35
10	50	$1 \times 10^{-4}$	-4.000	185	11.33
11	50	$2 \times 10^{-5}$	-4.699	187	10.30
12	50	$4 \times 10^{-6}$	-5.398	182	10.34

注：峰值强度通过差应力表示。

变基本上是线性的，破坏前偏离线弹性的变形也很小，是一种典型的脆性破坏方式<sup>[18]</sup>。在三轴压缩下（见图 2）页岩试样随围压增加逐渐由脆性向延性

转化,应力-应变曲线呈现出不同程度的应变软化特征。全程曲线主要分为4个阶段:第一阶段为压密阶段,应力缓慢增加,曲线朝上凹,岩石试件内裂隙逐渐被压缩闭合而产生非线性变形,卸载后仅部分可恢复;第二阶段为弹性变形阶段,曲线接近直线,应力-应变属线性关系,卸载后可完全恢复;第三阶段为弹塑性变形阶段,即应变软化阶段,随着应力的逐渐增加,曲线偏离线性,斜率逐渐减少,出现塑性变形,表征着岩石的破坏已经开始,此时试样内部有微裂纹开始渐渐萌生、扩展,但其程度仍远不及导致形成贯通型宏观裂纹的状态,且随着围压的增加,其应变软化特征越来越明显;第四阶段为峰后破坏阶段,在围压下应力达到峰值后并未出现陡降,而随应变的增加,应力逐渐跌落,失去继续承载的能力。就整体对比而言,较低围压(10 MPa)下应力-应变第二阶段较长,进入塑性阶段的位置较靠后,破坏中仍体现明显的脆性特性,而随着围压的升高,峰值强度(差应力表示)增加、轴向应变增加;弹性-塑性转折点大大提前,即出现较为明显的应变软化特征。

### 3.2.2 围压对强度的影响

从图2中还可以看出,在相同的应变速率下,随着围压的增加页岩的峰值强度逐渐增加,见表3。

表3 抗压强度对比

Table 3 Comparison of compression strengths

围压 /MPa	不同应变率(/s)时抗压强度/MPa			
	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-6}$
10	104	98	96	95
30	145	139	137	135
50	179	185	187	182

围压对岩石强度的影响是显著的,为进一步反映三轴压缩下页岩的围压效应,采用 Origin Pro 软件对表3所得数据进行线性拟合,得到(1)应变率为  $5 \times 10^{-4}$ /s 时围压从 10 MPa 增加到 50 MPa,峰值强度从 104 MPa 增加到 179 MPa,增幅为 72%,三轴抗压强度  $\sigma_{1c}$  (峰值强度)与围压强度  $\sigma_3$  的拟合结果为

$$\sigma_{1c} = 1.875\sigma_3 + 86.417 \quad (1)$$

两者拟合相关系数高达 0.99;(2)应变率为  $1 \times 10^{-4}$ /s 时围压从 10 MPa 增加到 50 MPa,峰值强度从 98 MPa 增加到 185 MPa,增幅为 89%,三轴抗压强度  $\sigma_{1c}$  与围压强度  $\sigma_3$  的拟合结果为

$$\sigma_{1c} = 2.175\sigma_3 + 75.417 \quad (2)$$

两者拟合相关系数高达 0.99;(3)应变率为  $2 \times 10^{-5}$ /s

时围压从 10 MPa 增加到 50 MPa,峰值强度从 96 MPa 增加到 187 MPa,增幅为 95%,三轴抗压强度  $\sigma_{1c}$  与围压强度  $\sigma_3$  的拟合结果为

$$\sigma_{1c} = 2.275\sigma_3 + 71.75 \quad (3)$$

两者拟合相关系数高达 0.99;(4)应变率为  $4 \times 10^{-6}$  时围压从 10 MPa 增加到 50 MPa,峰值强度从 95 MPa 增加到 182 MPa,增幅为 92%,三轴抗压强度  $\sigma_{1c}$  与围压强度  $\sigma_3$  的拟合结果为

$$\sigma_{1c} = 2.175\sigma_3 + 72.083 \quad (4)$$

两者拟合相关系数高达 0.99。

由以上得到的拟合的相关性系数均为 0.99 可知,在一定应变率条件下页岩峰值强度和围压呈明显的线性关系,拟合度极高,能较好地反映页岩三轴抗压强度与围压呈线性增长关系。为了更好地分析峰值强度与围压和应变率之间的关系,采用 Origin Pro 软件对表2数据进行二元线性拟合,可得

$$\sigma_{1c} = 2.16\sigma_3 + 3.10 \lg \varepsilon + 89.38 \quad (5)$$

拟合相关系数高达 0.99。

在实际工程应用中,当确定了页岩在地下的应力状态后,可由以上4个式子估算得到页岩的峰值强度。对比发现,在低应变率的情况下围压对峰值强度的影响更加明显,图3为不同围压下4种应变率下的峰值强度。

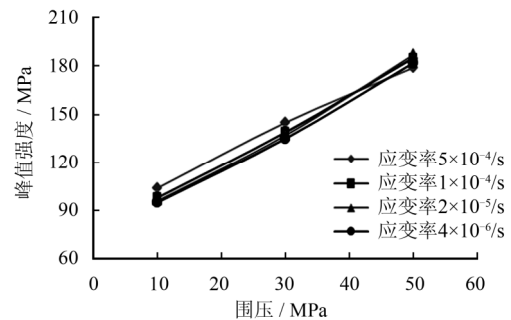


图3 峰值强度随围压变化

Fig.3 Variations of peak strength with confining pressure

从图3中可以看出,围压对峰值强度的影响近似线性关系,应变率对峰值强度的影响为在低围压下影响较为显著,如 10 MPa 的围压下应变率最高的  $5 \times 10^{-4}$ /s 对应于峰值强度 104 MPa,最低应变率  $4 \times 10^{-6}$ /s 对应峰值强度为 95 MPa,二者相差幅度为 9.47%;高围压下,(如 50 MPa)时应变率的影响已经渐趋消失,峰值强度最高的值为 187 MPa,对应应变率为  $2 \times 10^{-5}$ /s,峰值强度最小为 179 MPa,反而对应最高的应变率  $5 \times 10^{-4}$ /s,其变化趋势已经完全不同与低围压下的情形,且峰值间的差异也非

常有限。

围压对三轴测试中岩石性能的影响主要体现在它对试样内部摩擦的影响上。岩石类材料受力时矿物颗粒界面之间的滑移产生的摩擦力也是岩体承载力的重要组成部分。摩擦力的大小主要受摩擦因数和正应力两个因素的影响，围压的增大会使正应力明显增大，直接提高了摩擦力，表现出来就是承载力的提高。低围压下应变率越高，峰值强度也越高；较高围压时应变率的变化对于峰值强度的影响急剧减弱直至几乎无影响，说明围压仍然是影响页岩强度的主控因素。

### 3.2.3 围压对弹性模量的影响

从表 4 和图 4 中可以看出，页岩的弹性模量在同一应变速率时随着围压的增加而增加的。这是因为页岩是以矿物颗粒及黏土矿物为主的固结程度较高的沉积岩，由于矿物颗粒间的物理力学差异性及其成岩差异性，在层面一般有微孔隙、微裂隙、细小层理等微缺陷的存在，且本次所取试样位于地表附近，为受长期侵蚀且并没有受岩层深部的高压，当围压增大时孔隙被压密后孔隙表面积接触面加大，摩擦力相应提高，宏观上表现为弹性模量的增大。

表 4 弹性模量对比

Table 4 Comparison of elastic modulus

围压 /MPa	不同应变率/(s)时弹性模量/GPa			
	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-6}$
10	9.03	8.6	8.01	7.63
30	8.83	9.19	9.69	9.64
50	10.35	11.33	10.30	10.34

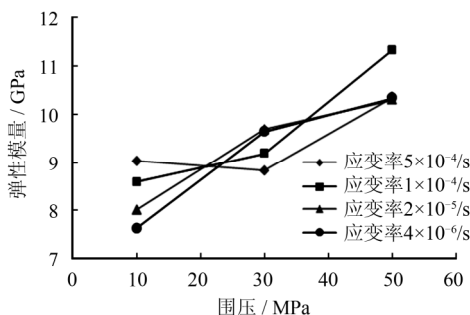


图 4 弹性模量随围压变化

Fig.4 Variations of elastic modulus with confining pressure

分析这方面的结果存在着这样一种情况，即对于致密完整的脆性岩石来说，一般围压大小对其弹性模量无重要影响，如 Lindholm 等<sup>[20]</sup>对坚硬的高强度玄武岩的试验结果表明弹性模量并不随围压而变化，对于破裂岩石或有丰富裂隙的岩石以及孔隙

率高的岩石，弹性模量一般表现为随围压增加而增加，但达到某一足以使裂隙完全闭合的压力时弹性模量随围压的变化便告终止。王亚等<sup>[21]</sup>对灰岩的研究表明，围压超过 17 MPa 时灰岩的弹性模量趋于稳定，即使围压继续加大，弹性模量也不再增加。但图 4 的结果还是表明围压对页岩弹性模量的影响是不可忽略的，应该与页岩属于典型的横观各向同性介质，且层理面含有丰富的微缺陷有关，这对压裂有利的性质，微缺陷的存在为压裂时裂纹扩展及渗透通道的形成提供了重要条件，而围压对弹性模量的影响程度某种意义上反映了微缺陷的多少，对此值得进一步深入研究。

### 3.3 应变率对页岩力学性质的影响

应变率反映岩体对于加载条件的力学响应特征，应变率效应中弹性模量和峰值强度是影响最为重要的 2 个表征指标，也是压裂方案设计时必须充分考虑的力学参数<sup>[18]</sup>。考虑应变率对页岩的物理力学参数的影响，具有重要的使用价值。

本次研究开展了 3 组不同围压下变加载速率的试验，为更明显地揭示应变率与峰值强度、弹性模量之间的关联，将两者绘制在同一图中。由于应变率区间跳跃较大，为便于观察对应变率采用对数坐标，其坐标值越大，表示应变率越高。对比试验结果发现，不同的围压情况下应变率对抗压峰值强度和弹性模量的影响情况是不同的，下文对此展开详细论述。

#### 3.3.1 应变率对峰值强度的影响

由表 3 可知，在围压为 10、30 MPa 的情况下页岩的峰值强度是随着应变率的增加而增加的，拟合关系发现页岩强度与应变率的对数可以采用二次多项式描述，应变率的对数由表 2 给出。10、30 MPa 围压时页岩峰值强度与应变率关系如图 5 所示。

当围压 10 MPa 时，应变率从  $4 \times 10^{-6}/s$  增加到  $5 \times 10^{-4}/s$ ，强度从 95 MPa 增至 104 MPa，增幅为 9.4%，拟合关系为

$$\sigma_{ic} = 2.558 (\lg \varepsilon)^2 + 26.404 \lg \varepsilon + 163.13 \quad (5)$$

两者拟合相关系数高达 0.99。

当围压 30 MPa 时，应变率从  $4 \times 10^{-6}/s$  增加到  $5 \times 10^{-4}/s$ ，强度从 135 MPa 增至 145 MPa，增幅为 7.4%。拟合关系为

$$\sigma_{ic} = 2.046 (\lg \varepsilon)^2 + 22.382 \lg \varepsilon + 196.38 \quad (6)$$

两者拟合相关系数高达 0.98。

当应变率较低时，页岩矿物颗粒发生变形的反应时间比较充分，裂纹扩展可与载荷增加协调发展。

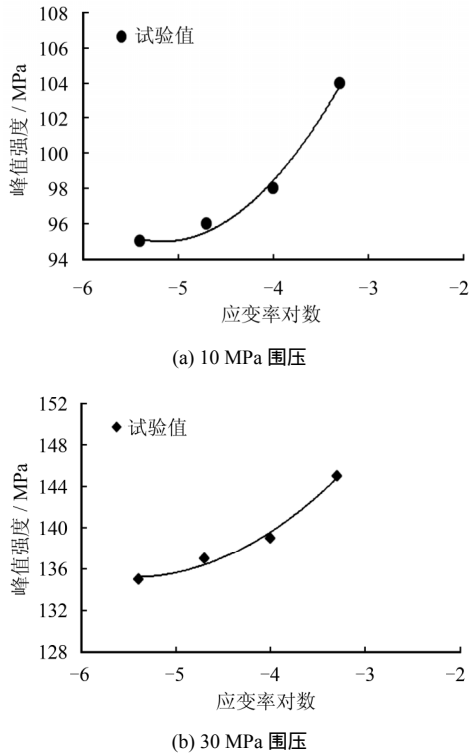


图 5 不同围压时页岩峰值强度与应变率的关系

Fig.5 Relationships between peak strength of shale and strain rate under different confining pressures

在较高的应变速率下材料内部裂纹扩展滞后于载荷的增加, 吸收的能量蓄积在材料内部, 表现出来就是峰值强度随着加载速率的提高而增加。

当在围压为 50 MPa 时, 页岩的峰值强度跟应变速率不再呈线性的关系, 对应 4 种不同应变率, 最低、最高峰值强度差距仅有 2.7 %, 已经显示出非常微弱的影响, 如图 6 所示。

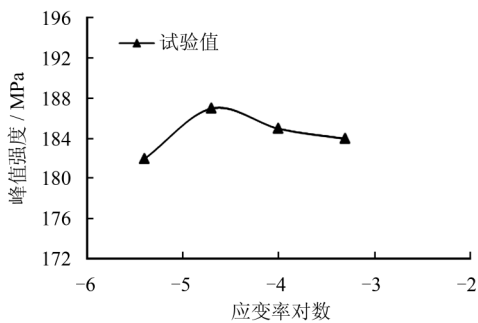


图 6 50 MPa 围压时页岩峰值强度与应变率的关系

Fig.6 Relationship between peak strength of shale and strain rate under confining pressure of 50 MPa

由图 6 可见, 低围压时页岩的抗压强度是随着应变率的增加而增加, 随着围压的增大, 应变率对峰值强度的影响逐渐减弱, 体现在峰值强度增幅的减小, 当围压增加到一定程度时应变率对峰值强度

造成影响微乎其微了, 这种影响的出现可能与转换围压有关。

3.3.2 应变率对弹性模量的影响

如图 7 所示, 通过拟合关系发现页岩弹性模量与应变率的对数可以采用线性描述:

$$E = 0.6953 \lg \varepsilon + 11.359 \quad (7)$$

两者拟合相关系数高达 0.98。

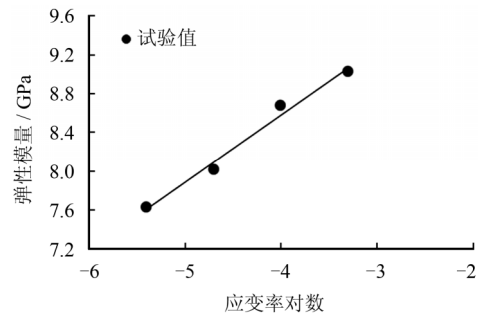


图 7 10 MPa 围压时页岩弹性模量与应变率的关系

Fig.7 Relationship between elastic modulus of shale and strain rate under confining pressure of 10 MPa

在 30、50 MPa 围压下页岩的弹性模量与应变速率并没有呈现出线性相关的关系, 如图 8 所示。

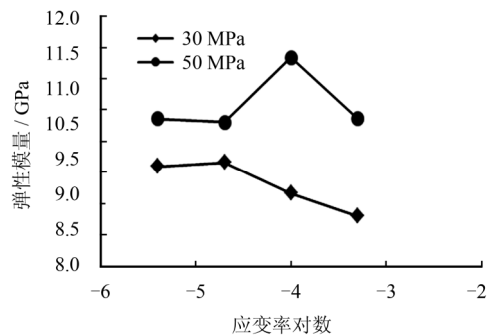


图 8 不同围压下页岩弹性模量与应变率的关系

Fig.8 Relationships between elastic modulus of shale and strain rate under different confining pressures

30 MPa 整体上应变率对弹性模量有一定影响, 即应变率越低弹性模量也越低, 50 MPa 时应变率对弹性模量的影响变得复杂, 反而是应变率为  $5 \times 10^{-5}/s$  时弹性模量最高。所以, 较低围压时应变率的大小影响着岩石内部的能量释放速率, 而高围压时由于岩石整体的破坏呈现剪切、剪胀等延性破坏特征。弹性模量反映的是其弹性阶段的破坏特性, 与应变率所引起的塑性末阶段的能量释放的关联性不大, 故在高围压下应变率效应变得十分微弱。对比两种围压下的岩石, 高围压下的弹性模量仍较高, 说明围压作用使岩样压缩更加密实, 强度有所提高。

以上结论可以表明, 10 MPa 的低围压下应变率

对于页岩的力学性质的影响较为明显，峰值强度和弹性模量都随着应变率的增加而增加，且弹性模量的增幅更大，随着围压增大，页岩的应变率效应逐渐减弱，峰值强度和弹性模量随应变率变化而变化的情况变得复杂，不再是单纯线性增加的关系。

#### 4 破裂特征分析

岩石本身是存在众多微裂纹的，其变形破裂过程其实就是在外载作用下内部裂纹的萌生、扩展、贯通直至形成宏观裂纹的综合过程。

岩样在三轴压缩条件下的破坏形式大致可分为脆性劈裂、剪切破坏及塑性破坏 3 种类型，但岩样的具体破坏模式，除了受其自身属性影响外，很大

程度上还受应力状态和变速率的控制影响。

图 9 为不同围压及不同应变加载速率下试验后试样破坏模式对比图和宏观裂隙素描图。由图 9、10 可以看出，不同应变率及不同围压作用后得到试样破坏形式有所不同。下文分别对不同围压下的岩样破坏特征进行分析。图 9(1)中，围压为 10 MPa 时在应变速率较高的情况下页岩应力迅速达到峰值，然后发生剧烈破坏，并伴随较大轰响。最高应变率为  $5 \times 10^{-4}/s$  的情况下页岩试样以劈裂破坏为主，岩芯被劈裂成较大的竖直片状碎块，局部伴随少量剪切破裂面的出现。破裂面凹凸不平且有细小颗粒状物质掉落，说明为典型的张拉破坏但破坏前又发生过较重的摩擦，表明在较高应变下岩样的破

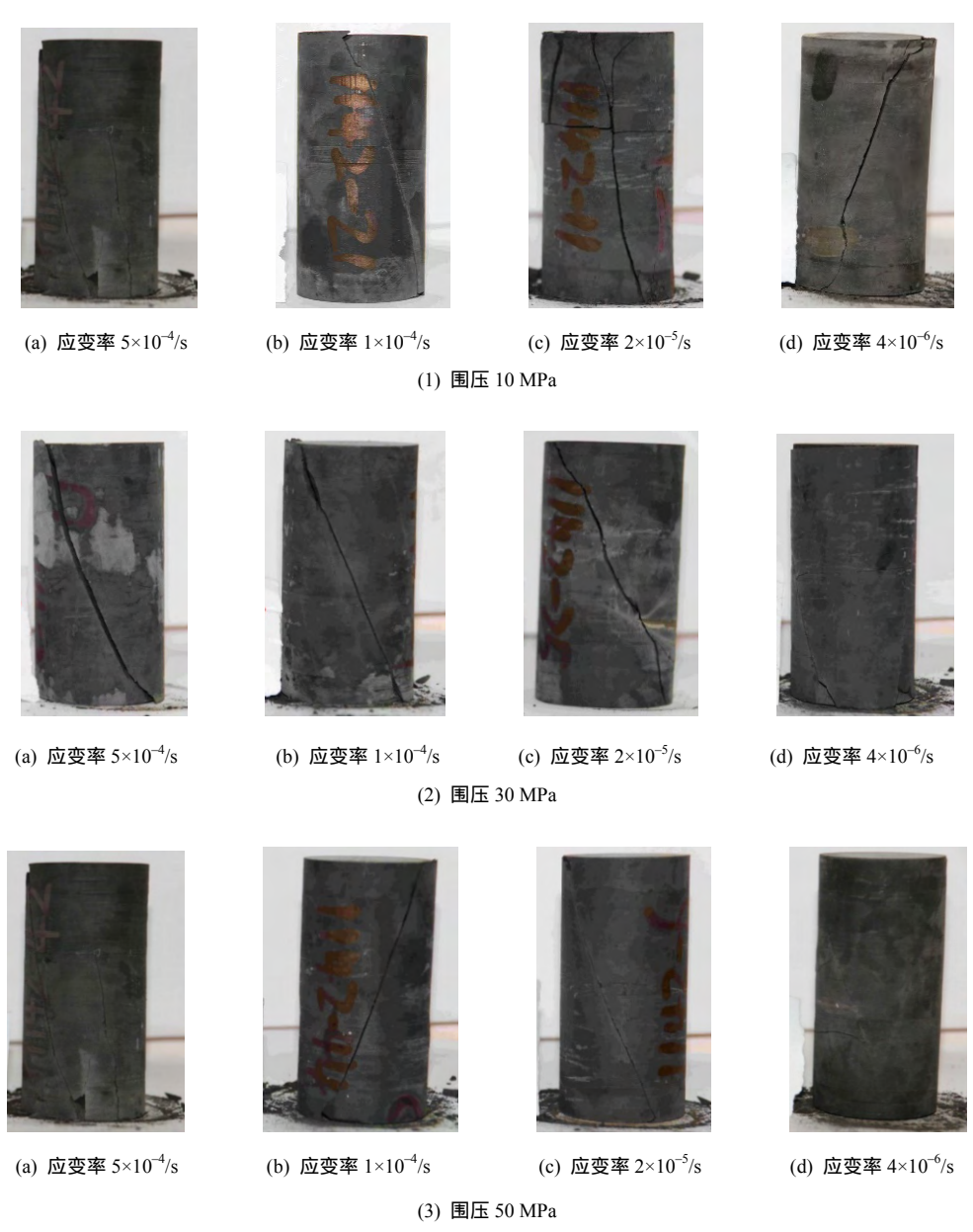


图 9 不同围压下不同应变率下的破坏形态

Fig.9 Failure modes of different strain rates under differant confining pressures

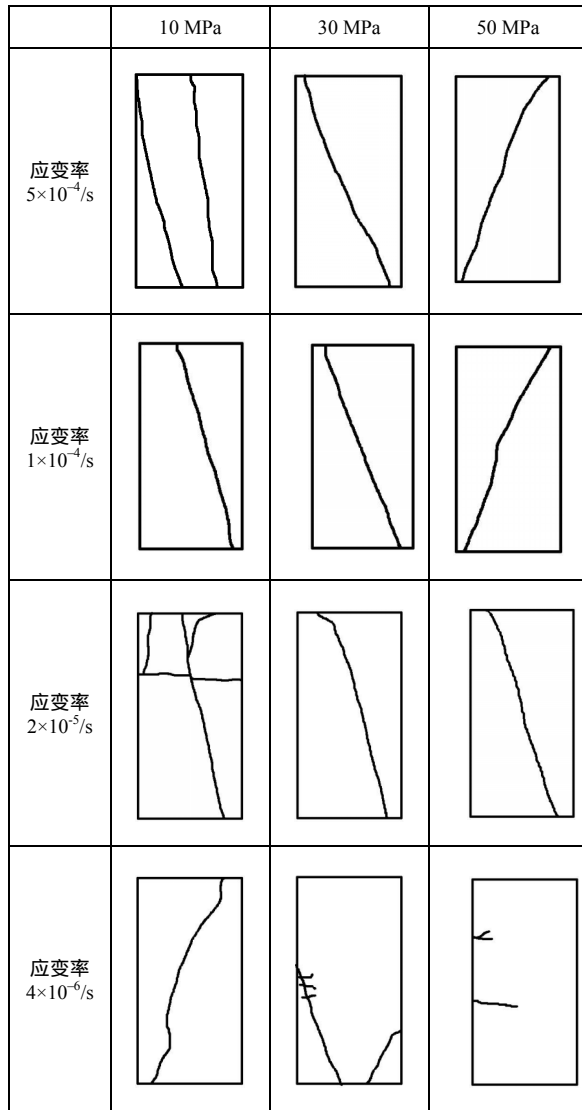


图 10 不同围压不同应变率下破坏形态素描图  
Fig.10 Sketch of failure pattern under different strain rates and different confining pressures

破坏模式可能并非完全遵循于岩石中裂纹‘萌生—生长—扩展—贯通’经典模式，因在外载荷作用下岩石矿物颗粒自身也会发生变形，并会通过旋转、滑移等方式来调整不平衡力。当应变加载速率较高时，页岩矿物颗粒没有充足的时间来完成这种自我调整，导致岩样的破坏从较微裂纹局部带开始，短时间内裂纹迅速开展，而且裂纹之间根本没有足够的时间萌生和贯通，最终会形成单根明显、长度较长、分布稀疏的裂纹。随着应变率的下降，岩样的破坏模式也逐渐变得缓和，应变率为  $1 \times 10^{-4}/s$  情况下岩样以剪切破坏为主，破坏角大致为  $70^\circ$ ，破坏产生的裂缝明显，从顶端一直倾斜贯穿至底端，并产生了较多碎块，个别试样破坏面呈“Y”型共轭剪切面，破坏模式已经具有显著的剪切破裂特征。随着应变率的继续降低，可以明显观察到试样侧面出现

多条细小裂缝，横向裂纹的数量也随之逐渐增加，而且裂纹逐渐呈贯通之势，即破坏之后试样成为由较多纵横裂纹交错切割的裂纹网体系。当加载率较低的时候，页岩内部矿物颗粒可较为充分发生位错、偏转等适应性变形，应力加载过程中的不平衡力得以调整，无较大突变，这种情况下就会产生单根短小、纵横交错的裂纹网。当达到最低应变  $4 \times 10^{-6}/s$  时，页岩的破裂面已经呈现完全的剪切破坏了，多条剪切裂纹贯穿整个试样，具有有细小裂纹与之交叉，由于破坏的缓慢发展，塑性阶段相对较长，破坏也相对较为缓和。图 9(2)、9(3)中，围压为 30 MPa 和 50 MPa 时页岩试样的破坏形式发生了改变。在较高应变率的情况 ( $5 \times 10^{-4}/s$  和  $1 \times 10^{-4}/s$ ) 下页岩试样主要呈剪切破坏，应变率下降时岩样的破坏模式逐渐由脆性剪切破坏向延性破坏过渡；围压为 50 MPa 应变率为  $4 \times 10^{-6}/s$  的情况下不但产生了较大角度的剪切破裂面，还出现了“塑性流动”的典型延性的侧鼓现象，如图 9(3)的(d)图，试样表面的裂纹并不清晰，但试样有一定侧鼓，围压 30 MPa 时不同应变率间的岩样的破坏模式仍有一定差异，即高应变率下剪切破裂面更加平直，可见其形成过程较为快速，能量聚集到一定程度接近于瞬间释放导致剪切面形成。随着应变率的降低，剪切面整体上仍是一个平面，但局部弯折逐渐显现，同时围绕主裂纹周围还出现一些次生裂纹，也说明能量释放不是瞬间完成，而是具有阶段性和多次性，反映出岩样更多程度的塑性破坏特征。围压升至 50 MPa 时，试样之间单从力学参数及应力-应变曲线上已经难以区分其差异所在，但在破坏模式图上的差别仍然存在，即应变率越高破裂面的张开度越大，表明破坏时的强烈程度越大，应变率越低，破坏后的裂纹闭合越紧密，但横向小裂纹却越多。当到达最低应变率时，由于横向小裂纹的增加，试样侧面已经微微鼓起，表明试样内部被众多裂纹纵横切割、出现了近似碎裂流动的破坏模式。

整体而言，高围压使岩样内部的矿物颗粒相互嵌合更加紧密，宏观表现为黏聚力和内摩擦角的提高，进而致使岩样宏观上强度增加，从而更加不易发生断裂；低应变率可使岩样矿物颗粒充分发挥适应性变形，所以应变率越低，破坏越缓和，破裂产生的裂纹反而也更多，试样表现出了延性变形也更明显，可以说页岩在低围压高应变率状态下主要是劈裂—剪切破坏，随着围压的增加和应变率的减小，岩样的破坏由脆性劈裂—剪切破坏及纯剪切破坏转变，再逐渐显现近似碎裂流动的延性破坏现象。



## 5 结 论

(1) 三轴压缩试验下的页岩试样随着围压增加,破坏模式逐渐由脆性向延性转化,应力-应变曲线呈现出不同程度的应变软化特征,均经历压密、弹性、屈服和破坏 4 个阶段,但弹塑性转换点随围压升高及应变率降低均有所提前。

(2) 相同的应变率下弹性模量和峰值强度均随围压的增加而增加,峰值强度增加的幅度明显大于弹性模量,且峰值强度呈线性增加趋势,在 4 种不同的应变率下线性拟合的相关性非常高。

(3) 较低围压(10 MPa)下应变率对于页岩的力学性质的影响较为明显,抗压强度和弹性模量都随着应变率的增加而显著增加,其中弹性模量的增幅更大。峰值强度与应变率的对数可以采用二次多项式描述,而弹性模量与应变率的对数可以采用线性描述。

(4) 随着围压进一步增大,页岩的应变率效应逐渐减弱,当在较高围压(50 MPa)条件下峰值强度和弹性模量随应变率增加而增加现象均变得极不显著。

(5) 页岩在低围压高应变率状态下主要是劈裂—剪切破坏,随着围压的增加和应变率的减小,岩体的破坏由脆性劈裂—剪切破坏向单一剪切破坏转变,再逐渐向延性破坏过渡。

## 参 考 文 献

- [1] 黄玉珍, 黄金亮, 葛春梅, 等. 技术进步是推动美国页岩气快速发展的关键[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 7 - 10.  
HUANG Yu-zhen, HUANG Jin-liang, GE Chun-mei, et al. A key factor promoting rapid development of shale gas in American: Technical progress[J]. **Natural Gas Industries**, 2009, 29(5): 7 - 10.
- [2] 国家发改委、财政部、国土资源部和能源局. 2011-2015 页岩气发展规划[M]. 北京: 中国计划出版社, 2012.  
National Development and Reform Commission, Ministry of Finance, Ministry of Land and Resources and Energy Bureau. 2011-2015 shale gas development plan[M]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [3] 霍亮, 杨春和, 冒海军, 等. 鄂西渝东盖层碳质泥页岩的卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1): 2898 - 2906.  
HUO Liang, YANG Chun-he, FENG Hai-jun, et al. Experimental study on unloading mechanical properties of carbonaceous shale in the Eastern part of Western Hubei[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Supp.1): 2898 - 2906.
- [4] 朱瑞庚, 吴绵拔. 不同加载速率条件下花岗岩的破坏判据[J]. 爆破与冲击, 1984, 4(1): 1 - 9.  
ZHU Rui-geng, WU Mian-ba. Failure criterion of granite at different loading rates[J]. **Explosion and Shock Waves**, 1984, 4(1): 1 - 9.
- [5] 李永盛. 加载速率对红砂岩力学效应的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1995, 23(3): 265 - 269.  
LI Yong-sheng. Experimental study on the mechanical effect of loading rate on red sandstone[J]. **Journal of Tongji University(Natural Science Edition)**, 1995, 23(3): 265 - 269.
- [6] BIENIAWSKI Z T. Time-dependent behavior of fractured rock[J]. **Rock Mech. & Rock Eng.**, 1970, 2(3): 123 - 137.
- [7] PENG S S, PODNIEKS E R. Relaxation and the behavior of failed rock[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst.**, 1972, 9(6): 699 - 712.
- [8] PENG S S. Time-dependent aspects of rock behavior as measured by a servocontrolled hydraulic testing machine[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst.**, 1973, 10(3): 235 - 246.
- [9] CHO S H, OGATA Y J, KANEKO K. Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 2003, 40(5): 763 - 777.
- [10] 纪文栋, 杨春和, 姚院峰, 等. 应变加载速率对盐岩力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2507 - 2513.  
JI Wen-dong, YANG Chun-he, YAO Yuan-feng, et al. Effects of loading strain rate on mechanical performances of salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(12): 2507 - 2513.
- [11] 苏承东, 李怀珍, 张盛, 等. 应变速率对大理岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 943 - 950.  
SU Cheng-dong, LI Huai-zhen, ZHANG Sheng, et al. Experimental investigation on effect of strain rate on mechanical characteristics of marble[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(5): 943 - 950.
- [12] 衡帅, 杨春和, 郭印同, 等. 层理对页岩水力裂缝扩展的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 228

- 237.
- HENG Shuai, YANG Chun-he, GUO Yin-tong, et al. Influence of bedding planes on hydraulic fracture propagation in shale formations[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(2): 228 - 237.
- [13] 侯振坤, 杨春和, 郭印同, 等. 单轴压缩下龙马溪组页岩各向异性特征研究[J]. **岩土力学**, 2015, 36(9): 2541 - 2550.
- HOU Zhen-kun, YANG Chun-he, GUO Yin-tong, et al. Experimental study on anisotropic properties of Longmaxi formation shale under uniaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(9): 2541 - 2550.
- [14] 侯振坤, 杨春和, 魏翔, 等. 龙马溪组页岩脆性特征试验研究[J]. **煤炭学报**, 2016, 41(5): 1188-1196.
- HOU Zhen-kun, YANG Chun-he, WEI Xiang, et al. Experimental study on the brittle characteristics of Longmaxi formation shale[J]. **Journal of China Coal Society**, 2016, 41(5): 1188 - 1196.
- [15] 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.
- [16] 侯宇光, 何生, 易积正. 页岩孔隙结构对甲烷吸附能力的影响[J]. **石油勘探与开发**, 2014, 41(2): 248 - 256.
- HOU Yu-guang, HE Sheng, YI Ji-zheng, et al. Effect of pore structure on methane sorption capacity of shales[J]. **Petroleum Exploration and Development**, 2014, 41(2): 248 - 256.
- [17] PENG K P, BOREST A P. Strain rate dependent mechanical properties of New Albany reference shale[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.**, 1990, 27(3): 199 - 205.
- [18] 刘俊新, 刘伟, 杨春和, 等. 不同应变速率下泥页岩力学特性试验研究[J]. **岩土力学**, 2014, 35(11): 3093 - 3100.
- LIU Jun-xin, LIU Wei, YANG Chun-he, et al. Experimental research on effects of strain rate on mechanical properties of shale[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(11): 3093 - 3100.
- [19] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1990: 219 - 219.
- ZHOU Wei-yuan. Higher rock mechanics[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 1990: 219 - 219.
- [20] LINDHOLM U S, YEAKLY L M, NAGY A, et al. The dynamic strength and fracture properties of dresser basalt[J]. **Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.**, 1974, 11(5): 181 - 191.
- [21] 王亚, 万文, 赵延林, 等. 三轴压缩下茅口灰岩围压效应的试验研究[J]. **矿业工程研究**, 2015, 30(3): 50 - 55.
- WANG Ya, WAN Wen, ZHAO Yan-lin, et al. Experimental study of confining pressure effect under triaxial compressive strength of Maokou limestone[J]. **Mineral Engineering Research**, 2015, 30(3): 50 - 55.

## 岩土工程进展与实践案例选编

著译者: 孙宏伟 版次: 第一版 出版时间: 2016-09 开本: 小16开

出版单位: 中国建筑工业出版社 装帧: 平膜勒口 标准书号: 978-7-112-19713-2 页数: 338

【内容简介】本书主要有两个部分, 上篇是岩土工程的大师学者对我国岩土工程和体制发展过程中一些问题的思考和总结; 下篇汇集了国内岩土工程勘察与地基基础设计实践的精品论文, 涉及超深大基础实践、复杂地质条件分析、基于变形控制的基础设计案例等诸多热点和难点。本书适合从事岩土工程的相关技术人员和科研人员学习参考。

【读者对象】从事岩土工程相关技术人员和科研人员

【目录】上篇 岩土工程进展回顾 下篇 工程实践案例选编 附录 关于工程勘察单位进一步推行岩土工程的几点意见 编后记

(信息来源: 中国建筑书店网站)