

# 杨家岭页岩微宏观下物理力学特征研究

Study on the Micro Macro Physical and Mechanical of Properties of Yangjialing Shale

黄界海<sup>1,2</sup>, 李小龙<sup>3</sup>, 胡国庆<sup>3</sup>, 张文媛<sup>1,2</sup>, 郑刘根<sup>1,2</sup>, 赵田<sup>1,2</sup>, 姜春露<sup>1,2</sup>

(1. 安徽大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽省矿山生态修复实验室, 安徽 合肥 230601;  
3. 无为华塑矿业有限公司, 安徽 无为 238300)

**摘要:**杨家岭中采区北坡高程150 m处有滑坡,由此造成的破坏变形给安全生产带来极大影响。滑坡岩石为孤峰组页岩,为探究岩石宏微观破坏机制,利用X射线粉晶衍射、扫描电镜、MTS816型电液伺服控制试验机等对其进行研究。试验结果表明:研究区页岩主要由碎屑矿物石英和黏土矿物伊利石、少量绿泥石和高岭石组成,岩石具有一定吸水性;微观下,页岩内部整体为片状结构,含有直径约0.61~4.01 μm的孔洞,长度约1.09~2.95 μm的原生裂纹;单轴压缩下,岩石抗压强度与弹性模量随着加载速率的增大,而成指数关系增大,在低加载速率下,页岩有明显的屈服阶段,且破坏形式为脆性张拉破坏;三轴压缩下,页岩抗压强度平均下降了15.31%~20.40%、黏聚力下降了16.57%左右,围压能够提高饱水页岩的抗压强度,其主要发生脆性剪切破坏,且破坏倾角约为67.38°;岩石损伤强度和峰值应变受围压影响最为明显,其强度受围压敏感程度依次为损伤强度>峰值强度>起裂强度。研究结果表明:研究区页岩矿物成分和微观结构可能是诱发其宏观破坏的主要原因。

**关键词:**页岩;物相分析;微观结构;单轴和三轴压缩试验;破坏变形

**中图分类号:** TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)06-0006-06

**Abstract:** There is a landslide at an elevation of 150 m on the north slope of the Yangjialing mining area, which has caused significant damage and deformation to safety production. The landslide rock belongs to the Gufeng Formation shale. In order to explore the macroscopic and microscopic failure mechanisms of the rock, using X-ray powder diffraction, scanning electron microscopy, MTS816 electro-hydraulic servo control testing machine to study it. The experimental results show that the shale in the study area is mainly composed of detrital mineral quartz and clay mineral illite, a small amount of chlorite and kaolinite, and the rocks have a certain degree of water absorption; The whole interior of siliceous shale is flaky structure, containing pores with a diameter of approximately 0.61 ~ 4.01 μm, and primary cracks with a length of approximately 1.09 ~ 2.95 μm. Under uniaxial compression, the compressive strength and elastic modulus of rocks increase exponentially with the increase of loading rate. At low loading rates, shale has a significant yield stage and the failure mode is brittle tensile failure; Under triaxial compression, the average compressive strength of shale decreased by 15.31% to 20.40%, and the cohesion decreased by about 16.57%. Confining pressure can improve the compressive strength of saturated shale, which mainly occurs brittle shear failure with a failure angle of about 67.38°; The damage strength and peak strain of rocks are most significantly affected by confining pressure, and the sensitivity of their strength to confining pressure is in the order of damage strength > peak strength > initiation strength. The research results indicate that the mineral composition and microstructure of shale in the study area may be the main reasons inducing its macroscopic failure.

**Key words:** shale; phase analysis; microstructure; uniaxial and triaxial compression tests; deformation mode

## 1 前言

由于岩体在漫长且复杂的地质作用下,天然的形成不同尺度下的裂隙,如岩层的断层、宏观下的

节理裂隙、细观下的孔裂隙和裂纹、微观下的分子或者原子之间的离散。

这些不同尺度下的裂隙之间的相互作用对岩石的物理力学强度和变形破坏方式有着重要的影响,且微观结构的变化直接体现在宏观物理力学强度上。因此开展岩石在不同尺度下的力学特征研究,有利于定性、定量分析出微细观与宏观之间的关系,为工程实践提供依据。

大量的研究表明,岩石微观结构是影响宏观破坏的重要因素之一,同时也是岩土工程上主要研究

[作者简介] 黄界海(1997—),男,硕士研究生,资源与环境专业。

[基金项目] 安徽省自然资源科技项目(2022-K-7);无为华塑矿业有限公司科技项目(K160139321);安徽省矿山生态修复工程实验室开放基金(KS-2022-006)资助。

[引用格式] 黄界海,李小龙,胡国庆,等. 杨家岭页岩微宏观下物理力学特征研究[J]. 中国矿山工程,2023,52(6):6-11.

的课题之一。目前对于岩石宏观破坏机理研究,普遍采用从微观角度出发,利用扫描电镜、CT扫描、原子力显微镜、X射线粉晶衍射、岩石压缩变形力学试验机研究。李冰洋等<sup>[1]</sup>通过矿物物相分析、SEM电镜扫描等对隧道页岩力学强度研究,认为岩石微观结构的变化能够影响到岩石宏观力学特征;时贤等<sup>[2]</sup>利用CT扫描、扫描电镜、X射线粉晶衍射技术、划痕和单轴实验,发现裂缝发育的页岩存在不同力学响应模式,同时随着围压的增大,其力学参数也不断增大;左罗等<sup>[3]</sup>通过对页岩岩体矿物组分、CT扫描和三轴试验,发现剪切和拉伸复合破坏为该研究区深层页岩的主要破坏模式;解经宇等<sup>[4]</sup>利用扫描、原子力显微镜和岩石压缩试验机等,发现页岩非均质性会影响力学性质,且微观孔隙结构发育程度会影响岩石单轴力学强度。

由于学者多集中于对油田、隧道和深层处页岩微宏观力学特征研究,对露天矿区页岩研究较少,本文以杨家岭矿区北坡滑坡体页岩为研究对象,通过室内试验探究出边坡岩石力学特征,研究主要从微观出发,包括岩石组成成分、微观结构,单轴和三轴压缩变形试验,其结果可为矿区边坡稳定性提供理论依据。

杨家岭矿区北坡位于无为县石涧镇潘家大山北麓,属于逆向坡,岩层厚度属中薄层,在150 m平台可见岩石破碎程度高,整个10 m左右的岩层表现出水平方向的波状起伏的现象,岩层受到剪切作用明显,发生岩石脱落的现象较多,岩体结构松散。

研究区岩性为二叠系孤峰组的页岩,其颜色为灰黑、深黑色且夹少量薄层,分布于采矿场中部,厚54 m,现场情况如图1所示。与栖霞组呈假整合接触关系。其节理较为发育,且无明显层理结构。



图1 北坡页岩波状岩层

## 2 页岩物理力学特征研究方法

### 2.1 XRD物相分析

将采集的北坡页岩岩样粉碎,筛至200目,利用X射线衍射粉晶衍射对岩石样品中物相进行鉴别,得出页岩所含矿物成分的含量占比。

### 2.2 扫描电镜试验

将不同破坏状态下的页岩沿着平行断口面切割成小块样品,制成规格大小为0.6 mm×0.6 mm×0.2 mm,并将试样用导电胶黏于样品台进行真空镀膜<sup>[5]</sup>,利用Regulus-8230超高分辨扫描电子显微镜对页岩进行微观结构观察。

### 2.3 不同加载速率单轴压缩试验

所选的岩样制成标准的圆柱体试样,其大小尺寸规格50 mm×100 mm,直径和高度误差范围为±1 mm。将所制的岩石样品在MTS816型电液伺服控制试验机上进行力学性能测试,试验采用位移控制法,连续加载直至岩样破坏,且选用3种不同加载速率进行岩样压缩试验,分别为0.005、0.03、0.3 mm/min,为了降低试验数据的误差,每组进行3个试样试验,取平均值。

### 2.4 三轴压缩变形试验

试样标准和实验设备同上,围压按等差梯度级0、2、4、6、8 MPa进行设取,当围压达到至预定值的同时,轴向以0.03 mm/min加载速率进行加载,直至试样达到破坏。

## 3 岩石力学特征研究结果及分析

### 3.1 岩石物相分析

通过XRD对岩石物相分析,页岩主要矿物含量见表1。由表1试验结果可知,北坡页岩组成成分主要是碎屑矿物和黏土矿物,碎屑矿物主要是石英,含量平均约为47.15%,其次为白云母、钠长石和白云石;黏土矿物主要是伊利石,含量平均约为18.85%,其次含有少量的绿泥石和高岭石。从该研究区页岩成分中看,其黏土矿物中伊利石、绿泥石和高岭石,具有一定的吸水性,水在浸入岩石后,岩屑与黏土矿物组成的胶结物在浸水后易溶解流失,岩石结构变得松散,使得岩石在破坏过程中的裂隙压密、内部摩擦滑动将会变少<sup>[6]</sup>,会弱化宏观上岩石物理力学强度。页岩矿物成分鉴定结果如图2所示。

表1 页岩主要矿物含量

样品编号	石英	白云母	钠长石	白云石	绿泥石	伊利石	高岭石	%
GF003-1	49.2	5.1	23.6	6.1	3.1	12.9	-	
GF003-2	46.1	21.2	8.9	4.2	-	18.5	1.1	
GF003-3	44.1	15.5	7.0	7.9	-	23.5	1.8	
GF003-4	49.2	14.2	6.8	8.1	-	20.5	1.2	

### 3.2 扫描电镜试验

图3所示为放大5 000倍页岩微观展布。由图

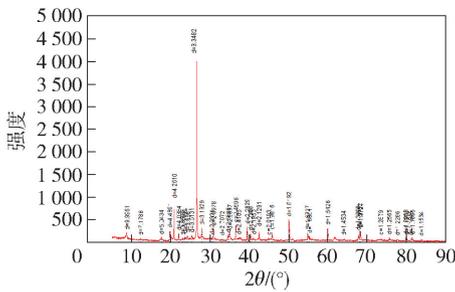


图2 页岩矿物成分鉴定结果图

3可知,将页岩放大5000倍,可以看出各矿物之间的分布具有较大的非均质性,此性质使得研究区页岩表现出各向异性。伊利石成块状分布在岩石内部,粒状的石英颗粒多数附着在片状的云母上,两者相互依存。云母的排列较为紧密,其表面夹杂着若干个矿物颗粒。

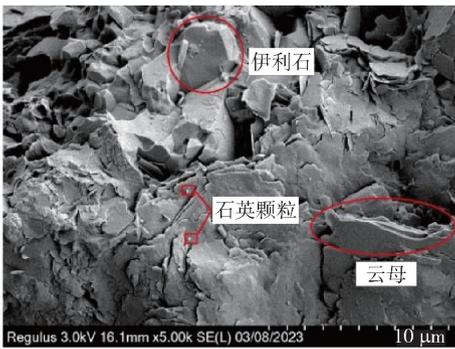


图3 放大5000倍页岩微观展布

图4所示为放大5000倍页岩裂纹和裂隙分布。由图4可知,页岩在扫描电镜下的微观结构呈现出片状结构,且各矿物之间排列较为紧密,微观结构表面分布着不同粒径的碎屑颗粒物。片状云母之间存在微裂纹和孔洞,孔洞直径约为0.61~4.01 μm,裂纹长度约为1.09~2.95 μm,这些微裂纹和孔洞的存在,削弱了页岩内部的连接力,这可能导致岩石的抗压强度降低和变形的增大。

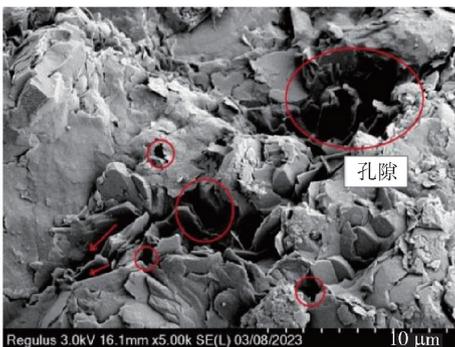


图4 放大5000倍页岩裂纹和裂隙分布

### 3.3 不同加载速率单轴压缩试验

通过实验,研究区页岩密度为2.69 g/cm<sup>3</sup>,不同加载速率页岩单轴测试强度结果见表2。由表2试验结果可知,不同加载速率下各组页岩岩石试样平均抗压强度为10.12~48.58 MPa,平均弹性模量为6.06~16.83 GPa。

图5所示为不同加载速率下部分轴向应力与应变曲线图,从图中可以看出,不同加载速率下曲线为典型的塑-弹-塑性变化曲线,各组抗压试验共经历了四个阶段,分别为孔隙压密、弹性变形、屈服、破坏阶段。随着加载率的增加,页岩峰值应变逐渐变小,岩石加载速率越小时,曲线越平缓,使得曲线斜率越小,即岩石弹性模量越小,反之则越大。加载速率在0.03和0.3 mm/min时试样的屈服阶段无明显出现。

表2 不同加载速率页岩单轴测试强度结果

组别	编号	尺寸/mm	加载速率/ mm·min <sup>-1</sup>	抗压强 度/MPa	弹性模 量/GPa
A	A1	49.90 × 99.98	0.005	18.68	6.61
	A2	49.83 × 99.88		10.12	6.06
	A3	49.69 × 99.74		15.72	6.73
B	B1	49.74 × 99.81	0.03	31.78	7.75
	B2	49.10 × 99.48		31.54	8.56
	B3	49.89 × 99.87		32.81	8.05
C	C1	49.73 × 99.14	0.3	48.58	16.83
	C2	49.00 × 99.24		39.12	15.55
	C3	49.80 × 99.93		47.58	15.87

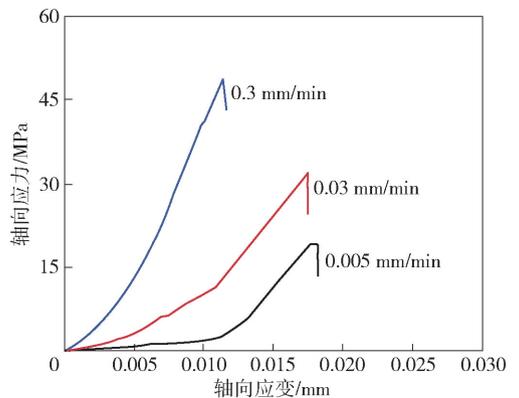


图5 不同加载速率下单轴应力-应变曲线

抗压强度、弹性模量与加载速率关系曲线如图6所示。由图6岩石拟合关系可知,加载速率由0.005 mm/min增加到60倍的0.3 mm/min时,试验得到的平均抗压强度增加了204.05%,平均弹性模量增加了148.53%。页岩抗压强度拟合方程为  $y =$

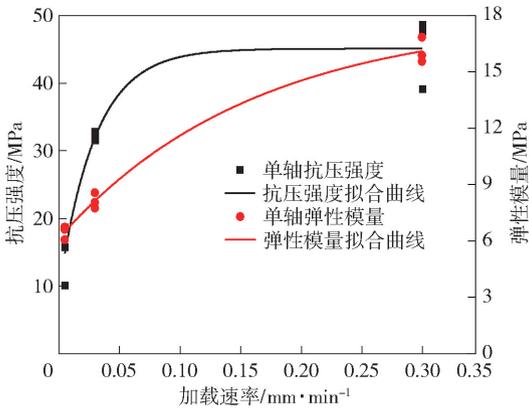


图6 抗压强度、弹性模量与加载速率关系曲线

43.98 - 32.44e<sup>-x/0.05</sup>, 其拟合程度为 0.937; 弹性模量拟合方程为  $y = 15.57e^{-\frac{x}{0.05}} - 12.57$ , 其拟合程度为 0.991, 由此可知, 页岩岩石强度参数对加载速率变化具有很大的依赖性<sup>[7-8]</sup>, 且抗压强度与弹性模量与加载速率均为指数函数关系。其非线性曲线拟合关系式对页岩本构模型研究提供一定的参考。

不同加载速率下岩石破坏后照片如图7所示。由图7可知, 岩石破坏程度随着加载速率增大而增大, 在 0.005 mm/min 下页岩破坏裂纹局部发展; 0.03 mm/min 下出现较明显的裂纹, 但未贯通整个岩石, 结合实际情况, 该速率更具有代表性; 0.3 mm/min 下出现贯通整个岩石裂纹破坏。各组加载率下页岩出现较多近乎垂直的不规则裂纹, 破坏形式为脆性张拉破坏。

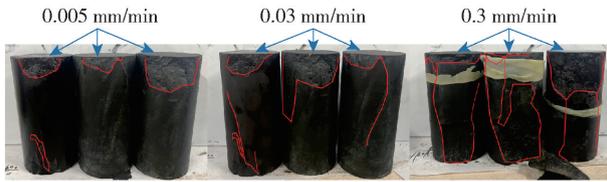


图7 不同加载速率下岩石破坏后照片

### 3.4 三轴压缩变形试验

岩石在三向应力条件下, 其材料物理力学强度会同时受到来自轴向和横向围压的影响<sup>[9-10]</sup>。本试验采用不同围压下, 分析岩石随围压变化, 其强度变化特征。然状态下页岩三轴应力-应变曲线如图8所示。由图8天然状态下页岩三轴试验变化曲线可知, 不同围压下, 页岩塑性屈服阶段未明显发生, 其在峰值后发生脆性破坏。

为了更好的对比不同含水状态下页岩的岩石力学特征, 根据工程岩体试验方法标准, 本试验结果见表3。结果表明, 随着围压的增大, 页岩的峰值抗压

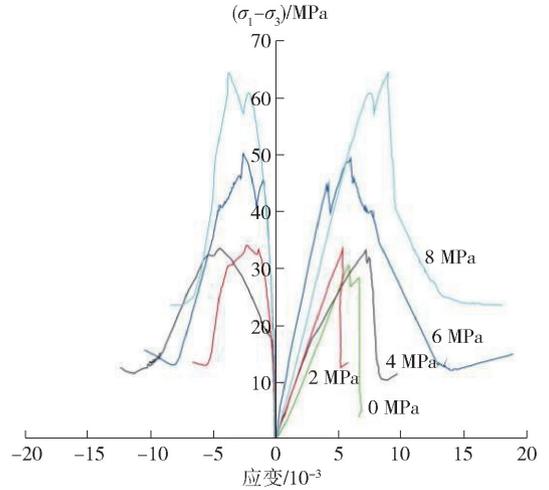


图8 天然状态下页岩三轴应力-应变曲线图

强度也随之增大, 天然状态下抗压强度变化范围为 30.92 ~ 75.44 MPa, 饱和状态下抗压强度变化范围为 23.10 ~ 63.89 MPa, 平均下降 15.31% ~ 25.29%, 天然状态下页岩平均黏聚力为 5.31 MPa, 饱水为 4.43 MPa, 下降了 16.57% 左右, 天然状态下平均内摩擦角为 44.75°, 饱水平均为 41.79°。

表3 页岩三轴试验结果

含水状态	黏聚力 C/MPa	内摩擦角 φ/(°)	剪应力τ与正应力 σ关系
天然	5.19	44.0	τ = 0.97σ + 5.19
天然	5.43	45.5	τ = 1.02σ + 5.43
饱和	4.13	43.0	τ = 0.93σ + 4.13
饱和	4.57	42.92	τ = 0.93σ + 4.57
饱和	4.58	39.45	τ = 0.81σ + 4.58

根据莫尔-库伦强度理论计算出岩石的黏聚力和内摩擦角, 页岩天然状态下平均为 5.31 MPa、44.75°。

根据公式:

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \quad (1)$$

式中: α 为剪切破坏面与最小主应力的倾角; φ 为内摩擦角。

因此, 页岩的破坏倾角约为 67.38°。

通过三轴实验结果, 结合页岩微观特征可知, 岩石内部存在原生裂隙与裂缝, 水在浸入后, 岩屑与粘土矿物组成的胶结物在浸水后易溶解流失, 岩石结构变得松散, 使得岩石在破坏过程中的裂隙压密、内部摩擦滑动将会变少<sup>[11-12]</sup>, 会弱化宏观上岩石的物理力学强度。饱水状态时, 岩石内部黏聚力、剪切模

量等有着较明显的损伤弱化效果<sup>[13-14]</sup>。岩石发生脆性破坏,但由于随着围压的介入,使的岩石微裂缝闭合,抑制了其横向变形,增强了岩石的强度。

### 3.5 页岩破坏变形分析

通过引入峰值、损伤和起裂的应力与应变,分析出天然状态下页岩力学强度和变形参数随着围压变化情况。页岩三轴力学参数如图9所示,图中 $\sigma_a$ 和 $\varepsilon_a$ 为主应力峰值和对应的应变值;图中 $\sigma_b$ 和 $\varepsilon_b$ 为损伤应力和对应的应变值;图中 $\varepsilon_i$ 为 $\varepsilon_c$ 与标准线的差值;图中 $\delta c$ 为岩石裂纹起裂临界应力;图中 $\varepsilon_c$ 为相对压缩应变值<sup>[15]</sup>,以此表示岩石起裂临界应变值,其公式为

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_2}{\varepsilon_b} \quad (2)$$

页岩天然状态下试验结果见表。由表4可知,页岩的峰值应力、裂纹损伤临界应力、起裂临界应力和泊松比随着围压的增大而增大。根据公式,可计算出岩石的峰值强度( $\sigma_{TP}$ )、损伤强度( $\sigma_{Tb}$ )和起裂强度( $\sigma_{Td}$ ),其公式为

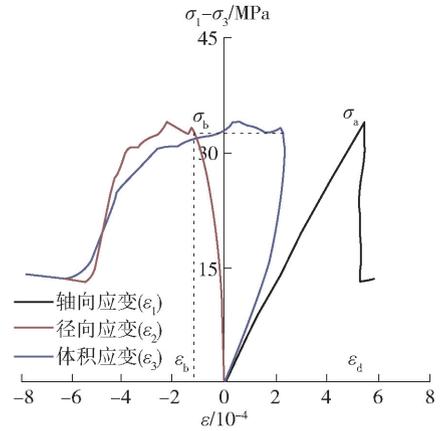
$$\begin{aligned} \sigma_{TP} &= \sigma_a + \sigma_3 \\ \sigma_{Tb} &= \sigma_b + \sigma_3 \\ \sigma_{Td} &= \sigma_d + \sigma_3 \end{aligned} \quad (3)$$

表4 页岩天然状态下试验结果

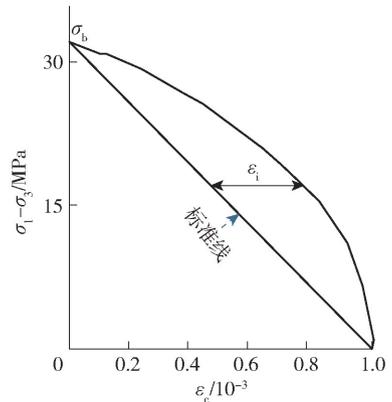
$\sigma_3/\text{MPa}$	$\sigma_a/\text{MPa}$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\sigma_d/\text{MPa}$	$E/\text{GPa}$	$\mu$
0	30.92	13.42	7.21	4.69	0.10
2	33.64	21.12	12.08	5.14	0.11
4	34.72	32.54	17.61	5.54	0.19
6	50.41	45.28	26.61	12.18	0.22
8	63.73	54.76	31.45	6.26	0.23

页岩强度变化拟合曲线如图10所示,由图可知,随着围压的增大,三者强度也随之增大,通过线性拟合的斜率,峰值强度为5.11、损伤强度为6.34、起裂强度为4.35,其拟合程度分别为0.93、0.99、0.98。由此可以得出页岩的损伤强度受围压的变化最为明显,同时也反映出三者对围压的敏感程度,依次为损伤强度>峰值强度>起裂强度。随着岩石压力和体积压缩变形不断地增大,页岩的裂纹损伤强度对围压最为敏感,在试验表现出,“砰的一声”但由于峰值强度对围压表现较为敏感,伴随着轴向压力不断地增大,页岩峰值强度也趋于不断地增大,直至试样破坏。

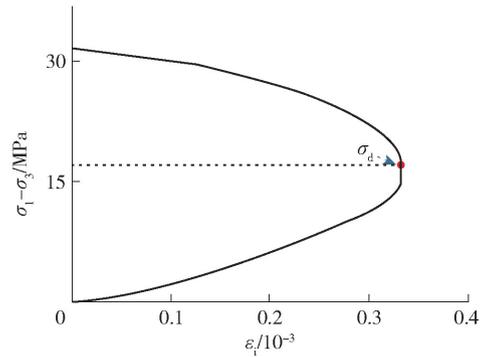
页岩应变变化曲线如图11所示,由图11可知,



(a) 应力-应变曲线图



(b) 相对压缩应力-应变曲线图



(c) 应变差值应力-应变曲线图

图9 页岩三轴力学参数示意图

随着围压的增大,岩石损伤和起裂应变,先增大、其次减小后增大;峰值应变则是先减小后增大。从曲线变化幅度可以看出,损伤和起裂应变对围压的敏感程度远小于峰值应变。造成损伤强度和和峰值应变受围压影响大的主要原因是岩石内部存在较多微裂隙和孔洞。

## 4 结论

通过对页岩矿物组成成分、微观结构、单轴和三轴压缩变形试验,探讨了微宏观下岩石物理力学特征,所得结论如下:

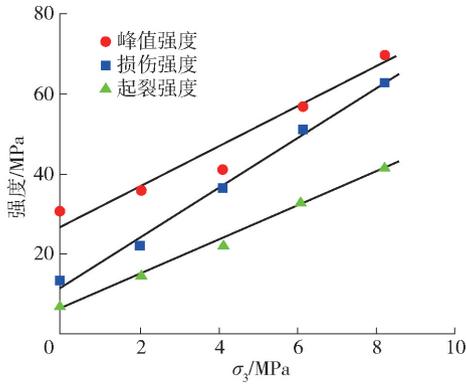


图 10 页岩强度变化拟合曲线图

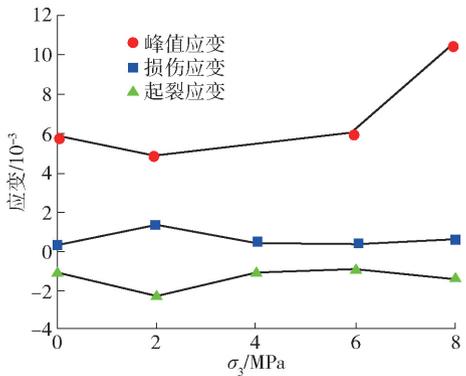


图 11 页岩应变变化曲线图

(1)页岩主要由碎屑矿物石英和黏土矿物伊利石、少量绿泥石和高岭石组成,具有一定的吸水性;在微观结构下,各组分矿物排列具有一定方向性,整体呈片状结构,并含有直径约为 0.61 ~ 4.01 μm 的原生孔洞,长度约为 1.09 ~ 2.95 μm 的裂纹,其矿物组分和微观缺陷可能导致岩石的抗压强度降低和变形增大。

(2)单轴压缩试验下,轴向加载速率在 0.03 mm/min 下更符合实际情况;页岩抗压强度、弹性模量与加载速率呈指数函数关系,其拟合关系式可为页岩本构模型研究提供一定的参考;岩石破坏程度随着加载速率增大而增大,其破坏形式为脆性张拉破坏。

(3)三轴压缩试验下,页岩抗压强度随着围压的增大而增大,平均黏聚力和内摩擦角为 5.31 MPa、44.75°,饱水状态下页岩抗压强度平均下降了 15.31% ~ 20.40%、黏聚力下降了 16.57% 左右,其破坏倾角为 67.38°,岩石发生脆性剪切破坏。

(4)在强度变化下,页岩损伤强度受围压影响最为明显,其敏感程度依次为损伤强度 > 峰值强度 > 起裂强度;在应变变化下,页岩峰值应变受围压影

响最为明显;造成两者的主要原因是岩石内部存在的微裂隙和孔洞。

[参考文献]

- [1] 李冰洋,刘建,刘振平,等.不同饱水系数页岩卸荷力学特性试验研究[J/OL].岩土力学,2020(S2):1-11.
- [2] 时贤,程远方,蒋恕,等.页岩微观结构及岩石力学特征实验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S2):3439-3445.
- [3] 左罗,仲冠宇,蒋廷学,等.页岩微观结构及力学特征变化规律研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2022,44(5):125-134.
- [4] 解经宇,陆洪智,陈磊,等.龙马溪组层状页岩微观非均质性及力学各向异性特征[J].地质科技通报,2021,40(3):67-77.
- [5] 刘超,袁伟,路军富,等.某铁路隧道底鼓段粉砂质泥岩微宏观物理力学特性研究[J].水文地质工程地质,2020,47(5):108-115.
- [6] 张寅,李哲,宋士康,等.自然与饱水状态下砂岩压缩破坏力学特性及声发射特征[J].煤田地质与勘探,2022,50(2):98-105.
- [7] 陈乐求,陈俊桦,张家生.岩石力学性质的应变率效应试验[J].地质与勘探,2017,53(5):1025-1031.
- [8] 李海琪,冯子军.不同加载方式及速率下石灰岩三轴力学特性研究[J].矿业研究与开发,2020,40(4):52-56.
- [9] 杨永杰,王德超,郭明福,等.基于三轴压缩声发射试验的岩石损伤特征研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(1):98-104.
- [10] 赵国彦,戴兵,董陇军,等.不同应力路径下岩石三轴卸荷力学特性与强度准则研究[J].岩土力学,2015,36(11):3121-3127+3149.
- [11] 张寅,李哲,宋士康,等.自然与饱水状态下砂岩压缩破坏力学特性及声发射特征[J].煤田地质与勘探,2022,50(2):98-105.
- [12] 许江,吴慧,陆丽丰,等.不同含水状态下砂岩剪切过程中声发射特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(5):914-920.
- [13] 李卉,李岩,曹乐乐,等.含水率对页岩动态弹性力学性质的影响研究[J].地质与勘探,2020,56(4):870-877.
- [14] 陈绪新,付厚利,秦哲,等.不同饱水条件下蚀变岩边坡稳定性分析[J].地质与勘探,2017,53(1):151-156.
- [15] 武倬如.特细砂混凝土配制的易性和抗压强度试验研究与分析[J].中国矿山工程,2022,51(4):79-83.