

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2021.04.006

## 循环荷载作用下泥岩动力特性

龙 慧<sup>1</sup>, 刘书文<sup>1</sup>, 庄 轲<sup>1</sup>, 梁海安<sup>2</sup>

(1. 南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:**利用微机伺服岩石三轴试验机 TAW-2000, 对泥岩进行了不同围压( $\sigma_3=0.5$  MPa、2 MPa)和加载频率( $f=0.2$  Hz~2 Hz)下的变幅循环荷载试验, 研究了围压、加载频率及加载幅值对泥岩的破坏形式、动抗压强度、滞回曲线面积及动弹性模量( $E_d$ )的影响。试验结果表明:在 0.2 Hz~2 Hz 的加载频率下, 岩石破坏形式受围压影响较大, 以剪切破坏为主, 部分岩样出现劈裂破坏;在 0.2 Hz~1 Hz 的加载频率和 0.5 MPa~1 MPa 的围压下, 动抗压强度主要呈现减小趋势, 仅在 2 Hz 的加载频率下, 岩石抗压强度有较大提高;滞回曲线面积随加载幅值增加逐渐增加, 同一幅值作用下, 滞回曲线面积随循环次数的增加呈现减小趋势; $E_d$  随加载幅值增加而减小后趋于稳定。

**关键词:**动力特性;变幅循环荷载;加载频率;围压

**中图分类号:**TU45 **文献标志码:**A

**文章编号:**1673-0062(2021)04-0035-06

## Dynamic Characteristics of Mudstone Under Cyclic Loading

LONG Hui<sup>1</sup>, LIU Shuwen<sup>1</sup>, ZHUANG Ke<sup>1</sup>, LIANG Hai'an<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;

2. College of Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

**Abstract:** The variable amplitude cyclic loading tests of mudstone under different confining pressures ( $\sigma_3=0.5$  MPa, 2 MPa) and loading frequencies ( $f=0.2-2$  Hz) were carried out by using microcomputer servo rock triaxial testing machine TAW-2000, the effects of confining pressure, loading frequency and loading amplitude on the failure mode, dynamic compressive strength, hysteretic curve area and dynamic elastic modulus of mudstone are studied. The test results show that under the loading frequency of 0.2-2 Hz, the rock failure mode is greatly affected by the confining pressure, mainly shear failure, and split failure occurs in some rock samples. Under the loading frequency of 0.2-1 Hz and the confi-

收稿日期:2021-01-24

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51708273);湖南省自然科学基金青年基金项目(2017JJ3263)

作者简介:龙 慧(1982—),男,讲师,博士,主要从事岩土地震工程领域方面的研究。E-mail:28748388@qq.com

ning pressure of 0.5–1 MPa, the dynamic compressive strength mainly shows a decreasing trend. Only at the loading frequency of 2 Hz, the compressive strength of the rock is greatly improved. The area of the hysteresis curve gradually increases with the increase of the loading amplitude. Under the same amplitude, the area of the hysteresis curve decreases with the increase of the number of cycles.  $E_d$  decreases with the increase of loading amplitude and then tends to be stable.

**key words:** dynamic characteristics; variable amplitude cyclic load; loading frequency; confining pressure

## 0 引言

随着经济的发展与社会需求,越来越多的大型工程正在或将要兴建,这些建(构)筑物在使用过程中很可能受到地震作用、冲击荷载等动力荷载的作用。在实际工程中,泥岩是一种较为常见的地基土体,与一般土质地基相比,泥岩质地基承载力相对较高,但泥岩属于软岩,其力学性质较为特殊,为了更好的研究泥岩在地震作用、冲击荷载等动力荷载下的动力性能,保证工程的安全性,需对循环荷载作用下泥岩的动力特性进行深入研究。

段东等<sup>[1]</sup>利用 CT 图像和声发射技术,较好地反映出不同加载阶段试件中微裂纹闭合、扩展、分叉等细观损伤活动及岩样内部微破裂、微裂纹的演化过程;王传洋、段东<sup>[2-3]</sup>等对泥岩进行了单轴压缩下的同步 CT 扫描试验,描述了不同荷载水平下,泥岩细观下裂纹演化与宏观的变形特性;王春等<sup>[4]</sup>基于高轴压与围压的试验条件,分析了围压对岩石动应力-应变曲线及岩石破坏加载次数的影响。

范秋雁等<sup>[5]</sup>通过单轴压缩无侧限蠕变试验和有侧限蠕变试验并配合扫描电镜来分析泥岩的蠕变特性,实验结果表明岩石的蠕变是岩石损伤效应与硬化效应共同作用的结果;刘海壮、吴仲衡等<sup>[6-7]</sup>分别通过试验与数值模拟,分析了泥质砂岩在不同围压条件下的应力-应变曲线及岩石的破坏形式,吴仲衡指出随着围压的提高,岩石变形从脆性破裂向脆-塑变形(共轭裂缝)转化。李福林等<sup>[8]</sup>通过对泥岩在 4 种不同加载速率(0.005、0.05、0.5 和 3 mm/min)下进行的系列性单轴压缩试验,表明泥岩具有明显的加载速率变化效应且表现为等速黏性特性。

蔡国军<sup>[9]</sup>等使用 MTS815 岩石力学试验机在频率为 1 Hz 的条件下对泥岩进行 7 级循环加卸载试验,发现泥岩动弹性模量随着循环级数的增

加逐渐减小,阻尼比则反之;王金鹏等<sup>[10]</sup>同样使用 MTS815 岩石力学试验机研究了单轴循环荷载作用下泥岩与页岩滞回面积、动弹性模量及阻尼比与循环加卸载次数间的变化关系;邓华峰等<sup>[11]</sup>则通过岩石的单轴加卸载循环试验,探究了在加卸载过程中能量及损伤演化规律,并提出了在残余应变及滞回效应的影响下,各能量参数在循环加卸载过程中的修正方法;潘旦光、陈钊等<sup>[12-13]</sup>对饱和泥岩进行了变幅分级循环荷载试验,在变幅分级循环加载阶段,阻尼比与动弹性模量都随动应力幅值的增加而增加;王轲等<sup>[14]</sup>在 MTS815 岩石力学试验系统上对饱和泥岩与饱和砂岩进行变幅分级循环荷载试验,发现应力幅值不变时,随着循环次数的增加,阻尼比趋向于稳定,应力幅值越大,阻尼比越大;何明明等<sup>[15]</sup>研究了动弹性模量与应力幅值间的响应,建立了耗散能演化模型来描述循环荷载下能量耗散行为并提出阻尼参数的计算方法;刘建峰<sup>[16]</sup>等利用 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验系统,对细砂岩和粉砂质泥岩进行单轴压缩循环荷载下的试验研究,发现岩石的加卸载循环塑性变形、滞回环面积、阻尼比、阻尼系数与岩石密度间的相关性。

已有对岩石动力特性的研究更多专注于高围压下岩石的强度与稳定性,或高频激励下岩石的率效应,而多数情况下建(构)筑物基础的埋深不大(如核电站),岩体多处于低围压状态。因而本文选取 0.5 MPa 和 1 MPa 作为岩样施加的围压,同时湖南省内及周边无活跃近断层,所受地震风险以低频成分较多的远场地震动为主,所以取 0.2 Hz ~ 2 Hz 为岩石的加载频率。在低围压状态下对其施加循环荷载,研究泥岩在低围压低频循环荷载作用下的岩石的破坏形式特性、动强度(模量)及滞回曲线面积特性。相关研究可为浅埋基岩建构物的选址及抗震设计提供理论依据。

# 1 实验概述

## 1.1 岩样制备

试验岩样采自于湖南浏阳市,岩样为褐色块状结构,泥质胶结,中-强风化。岩石样品为标准岩样即  $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  进行加工,岩石样品高度与直径误差分别小于  $2\text{ mm}$  和  $0.3\text{ mm}$ ,且岩石端面偏离轴向角度小于  $0.25^\circ$ 。样品误差满足《工程岩体实验方法标准(GB/T50266—2013)》对岩体样品的要求。为减少对试样的扰动以保证试验质量,岩样全程由保鲜膜包裹以减少水分蒸发对岩样抗压强度的影响。

## 1.2 试验设备及步骤

如图1所示,试验仪器采用东华理工大学的微机伺服岩石三轴试验机 TAW-2000,该仪器最大试验力:2000 kN;有效测量范围:在最大试验力的  $2\% \sim 100\%$  范围内,测力精度  $\leq \pm 1\%$  示值;围压系统:最大围压  $100\text{ MPa}$ ,测力精度  $\leq \pm 2\%$  示值;轴向变形范围: $0 \sim 5\text{ mm}$ ,径向变形范围: $0 \sim 3\text{ mm}$ ,测量精度  $\leq \pm 1\%$  示值。试验设备能够较好地满足该实验的实验要求,保证试验的顺利进行。

试验过程中需要对岩样进行编号处理。以编号为 M-A1 岩样为例,用泥岩单词的首字母“M”表示泥岩,“-A1”为编号,具体见表1。加载过程中,振幅从  $0\text{ kN}$  开始进行循环加载,每级振幅增加  $2$ ,循环  $5$  次,每个循环结束回到  $0\text{ kN}$ ;轴压通过控制位移的方法实现加载;加载围压主要通过围压室液压油施加围压,频率为余弦函数形式,通过微机控制,当岩样压坏时,停止试验。



图1 微机伺服岩石三轴试验机 TAW-2000  
Fig.1 Micro-computer servo rock triaxial testing machine TAW-2000

# 2 试验结果

## 2.1 岩石破坏特征

如图2所示,当围压为  $0.5\text{ MPa}$  时,岩石破坏形式随频率的变化较大,随着频率的提高,由剪切破坏向劈裂破坏过渡。这是由于此时围压较低,当加载频率提高后,岩石上端加载面产生了较大的动力变形,在端部摩擦力的约束下(即端部效应影响),应力在局部集中形成类似刚性楔(图2(a)中上端三角形),并向下劈裂。因此,当建筑在使用过程中可能受到较大的冲击荷载(如大型设备振动)作用时需要防止浅埋泥岩地基出现这种破坏。当围压为  $1\text{ MPa}$  时,则以水平向的剪切破坏为主。

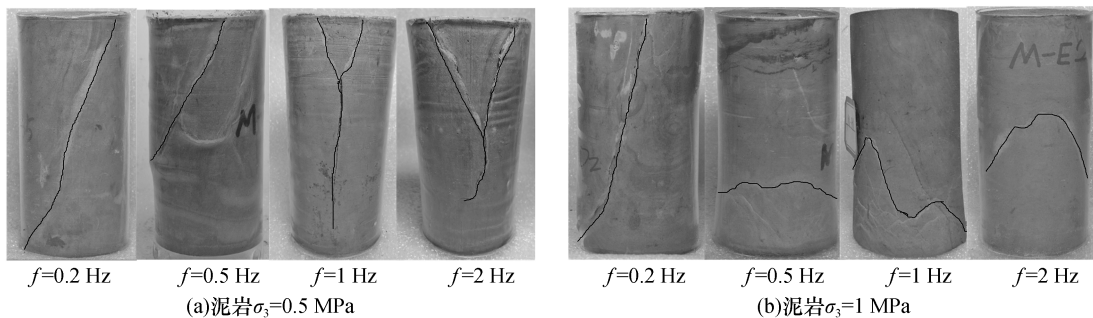


图2 岩石受压破坏照片

Fig.2 Photos of rock failure under compression

如图3所示,泥岩的应力-应变曲线主要分为四个阶段。OA段为微裂隙压密阶段,在荷载加载初期,岩石内部微裂隙、裂缝等缺陷被压缩挤密,曲线下凹,形成早期非线性变形;AB段为弹性

变形阶段,岩样中原有裂隙继续被压密,与之前相比,岩石内部缺陷减少,使材料更为理想,此阶段内认为岩石的应力与应变同步增长,故在轴力的作用下,曲线接近一条直线;BC段为裂隙的发生、

扩展直至破坏阶段,在荷载的持续加载过程中,形成新的微裂缝,加载方向裂隙不断发展,裂隙进入不稳定发展阶段,裂隙扩展交接形成滑动面,导致岩石试件完全破坏;CD段为不稳定阶段,岩样通过峰值强度后,结构遭到破坏,试件基本保持整体形状,此后岩石变形主要表现为沿宏观断裂面的块体滑移,其承载力降低较快,但并不降为零,说明岩石破坏后仍有一定的承载力。

## 2.2 岩石动抗压强度

如表1所示,泥岩的动抗压强度,在0.2 Hz~1 Hz范围内,主要呈现减小趋势,主要是由于泥岩强度较低,在较低的加载频率下,其动力响应较为显著,岩石变形较大,导致泥岩动抗压强度略低于静抗压强度;当频率达到2 Hz时,泥岩的率效应较为显著,且随着围压的提高,动抗压强度均有较大提高。

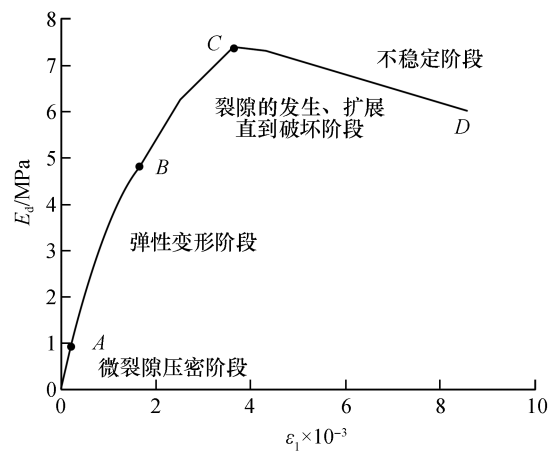


图3 泥岩应力-应变曲线( $\sigma_3=0.5$  MPa,  $f=0.5$  Hz)

Fig. 3 Stress strain curve of mudstone

( $\sigma_3=0.5$  MPa,  $f=0.5$  Hz)

表1 泥岩基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of mudstone

加载方式	编号	围压/MPa	频率/Hz	抗压强度/MPa	直径/mm	高度/mm
单轴加载	M-A1	0	0	8.18	48.16	99.51
	M-B1	0.5	0.2	4.97	48.45	100.60
	M-B2	0.5	0.5	7.51	48.55	100.90
	M-B3	0.5	1	7.93	48.65	100.60
三轴加卸载循环	M-B4	0.5	2	12.56	47.95	100.80
	M-C1	1	0.2	8.14	48.70	100.60
	M-C2	1	0.5	5.89	48.40	100.80
	M-C3	1	1	7.19	48.60	100.20
	M-C4	1	2	13.82	48.30	100.90

由实验结果可知,岩样 M-B1 和 M-C2 抗压强度明显低于岩石其他岩石抗压强度,可能是其内部存在节理造成的,故岩石抗压强度较低,在进行数据分析时,并未考虑这两个岩样。如表1所示,岩样(M-B1)的抗压强度明显较小,主要是岩石是一种不连续非均质多空材料,其内部可能存在缺陷,导致其力学实验结果与其它岩样数据产生较大的离散性,故在进行数据分析时,并未考虑岩样(M-B1)的影响。岩的单轴抗压强度为8.18 MPa;当 $\sigma_3=0.5$  MPa,  $f=0.5$  Hz、1 Hz、2 Hz时,与泥岩静抗压强度对比,在0.5 Hz、1 Hz范围内,动抗压强度分别降低了8.2%和3.1%,在2 Hz时,动抗压强度提高了53.5%;当 $\sigma_3=1$  MPa,  $f=0.2$  Hz、1 Hz、2 Hz时,在0.2 Hz、1 Hz范围内,与泥岩静抗压强度对比,动抗压强度分别降低了0.005%

和12.1%,在2 Hz时,动抗压强度提高了68.9%。可见在1 Hz范围内,加载频率对泥岩抗压强度总体影响不大,而在加载频率达到2 Hz时,岩石动抗压强度有明显提高。

## 2.3 应力-应变滞回曲线

以围压为0.5 MPa、加载频率为0.5 Hz的岩样为例,如图4所示。在循环荷载作用下,随着荷载的增加,滞回曲线面积明显增加,并向应变增大方向移动。同一级加载水平下,随着循环次数的增加,滞回曲线向应变增大方向平移,说明在同一级加载水平下,每次加卸载作用下,泥岩均产生了不可恢复的变形。

如图5(a)所示,在围压相同的条件下,随频率的增加,滞回曲线面积与频率间并无明显的相关性;在0.5 MPa~1 MPa的围压下,滞回曲线面



积与围压间并无明显的相关性。

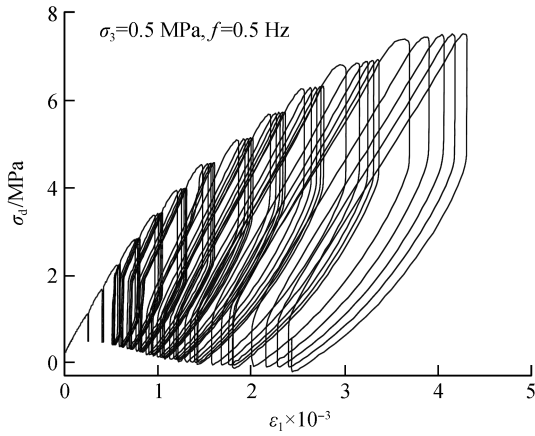
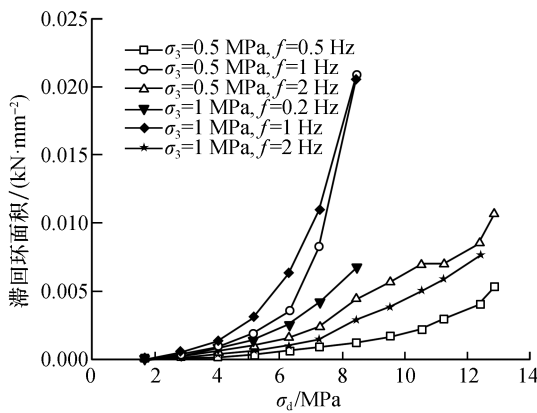
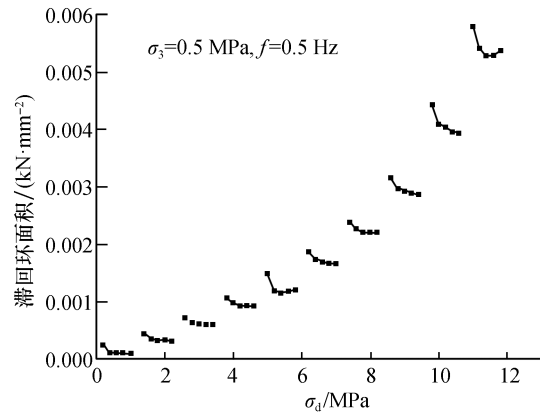


图4 循环荷载作用下岩石应力-应变曲线

Fig. 4 Stress strain curve of rock under cyclic loading



(a)不同围压及频率下滞回曲线面积



(b)循环次数对滞回曲线面积的影响

图5 循环荷载及频率作用下岩石滞回曲线面积

Fig. 5 Hysteretic curve area of rock under cyclic load and frequency

### 2.4 动弹性模量 $E_d$

动弹性模量与阻尼比的计算公式<sup>[18]</sup>如下:

$$E_d = \frac{\sigma_{d \max}}{\varepsilon_{d \max}} = \frac{\sigma_A}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{dm}} \quad (1)$$

$$\lambda_d = \frac{A}{4\pi A_s} \quad (2)$$

A:图6中 ABCDA 面积,反应了岩石在加、卸载作用下,能量损耗大小; $A_s$ : $\triangle AFE$  面积,代表峰值所对应的弹性能。

在加载初期,泥岩动弹性模量波动较大,故部分岩样未取加载初期动弹性模量。如图7所示,在0.5 MPa~1 MPa的围压下,加载频率为0.2 Hz~2 Hz的条件下,泥岩的动弹性模量均随加载幅值的增加逐渐减小,与蔡国军<sup>[9]</sup>实验结果具有一致

性。如图5(b)所示,泥岩在同一级加载幅值下,随循环次数的增加,滞回曲线面积逐渐减小,且第一次循环下,滞回曲线面积均明显大于第2~4次循环时的面积。同样,第一次循环下,滞回曲线的残余应变均也明显大于第2~4次循环时的残余应变,第一次循环作用下滞回环残余应变较大的现象与张媛<sup>[17]</sup>实验具有一致性。滞回曲线面积的大小与岩石耗能和内部疲劳损伤的大小有着正相关性。由此可知,泥岩随着加载幅值的增加,泥岩的能量耗散与损伤不断加剧。在同一级加载幅值作用下,能量的耗散与损伤随循环次数的增加呈减小趋势,在加载阶段面积随着循环次数的增加而逐渐减小,卸载阶段面积随循环次数的增加而增大并趋于稳定,故滞回环面积随循环次数的增加而逐渐减小<sup>[17]</sup>。

性。同一围压作用下, $E_d$  随频率的增加,无明显改变。在加载初期,随着围压的增加, $E_d$  普遍高于低围压下的岩样;随着加载幅值的增加,0.5 MPa 与 1 MPa 下的岩样  $E_d$  并无明显差别;随着加载幅值的增加, $E_d$  先减小后趋于 3 600 MPa 至 3 800 MPa 区间内( $\sigma_3 = 1 \text{ MPa}, f = 2 \text{ Hz}$  的泥岩除外),直至破坏。

### 3 结 论

1) 在 0.2 Hz~2 Hz 循环荷载及不同围压作用下,岩石破坏形式有所不同;当围压为 0.5 MPa 时,岩石破坏形式随频率的变化较大,随着频率的提高,由剪切破坏向劈裂破坏过渡;当围压为 1 MPa 时,岩石以剪切破坏为主。

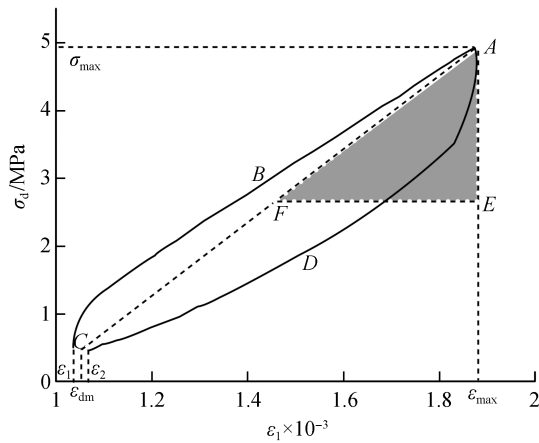


图6 循环荷载作用下应力-应变曲线

Fig. 6 Stress strain curve under cyclic loading

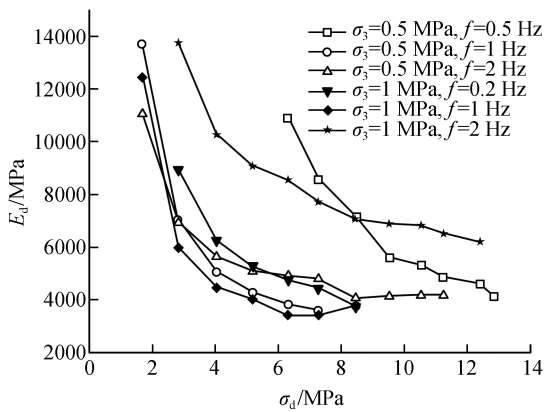
图7 循环荷载作用下  $E_d$ -加载幅值曲线

Fig. 7 Curve of dynamic elastic modulus and loading amplitude under cyclic loading

2) 在 0.5 MPa ~ 1 MPa 的围压和 0.2 Hz ~ 1 Hz 的加载频率下, 泥岩动抗压强度峰值主要呈现减小趋势。当加载频率为 2 Hz 时, 随着围压的提高, 泥岩动抗压强度均有较大提高。

3) 围压由 0.5 MPa ~ 1 MPa 的变化过程中, 同一幅值作用下, 滞回曲线面积随循环次数的增加呈现减小趋势;  $E_d$  先减小后趋于 3 600 MPa 至 3 800 MPa 区间内, 直至破坏; 滞回曲线面积和  $E_d$  在 0.5 MPa ~ 1 MPa 围压下, 其变化规律与加载频率无明显相关性。

#### 参考文献:

[1] 段东, 赵阳升, 冯小静, 等. 泥岩实时细观破坏过程及其声发射事件产生机制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(1): 29-35.  
[2] 王传洋, 杨春和, 衡帅, 等. 压缩荷载下泥岩裂缝演化

规律的 CT 试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1591-1597; 1605.

- [3] 段东, 赵钰铤, 张睿哲, 等. 基于显微 CT 的泥岩单轴压缩破坏特征的声发射表征[J]. 振动与冲击, 2020, 39(16): 163-170; 195.  
[4] 王春, 唐礼忠, 程露萍, 等. 高轴压和围压共同作用下砂岩受频繁动态扰动时的动力学特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(12): 4537-4546.  
[5] 范秋雁, 阳克青, 王渭明. 泥质软岩蠕变机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1555-1561.  
[6] 刘海壮, 刘春, 张庆, 等. 泥质砂岩三轴压缩力学特性试验研究[J]. 科技创新与应用, 2020(35): 29-31.  
[7] 吴仲衡, 王升. 不同围压下泥岩岩石力学性质的数值模拟[J]. 兰州文理学院学报(自然科学版), 2018, 32(3): 83-86.  
[8] 李福林, 杨健, 刘卫群, 等. 单轴压缩条件下泥岩加载速率变化效应研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 369-378.  
[9] 蔡国军, 程宇航, 仲闯, 等. 循环加卸载作用下泥岩的动力学特性研究[J]. 甘肃水利水电技术, 2019, 55(5): 20-24.  
[10] 王金鹏, 李渝生, 张超. 循环荷载作用下软岩力学性能试验研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(29): 183-188.  
[11] 邓华锋, 胡玉, 李建林, 等. 循环加卸载过程中砂岩能量耗散演化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊1): 2869-2875.  
[12] 潘旦光, 王轲, 芦盼, 等. 不同振动频率下泥岩非线性动力参数试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(6): 1188-1196.  
[13] 陈钊, 潘旦光, 王轲, 等. 分级循环荷载下泥岩的非线性特征参数试验[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2020, 37(1): 86-93.  
[14] 王轲, 潘旦光, 鲁文艳, 等. 分级循环荷载下泥岩和砂岩的阻尼特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(12): 3046-3054.  
[15] 何明明, 李宁, 陈蕴生, 等. 不同循环加载条件下岩石阻尼比和阻尼系数研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2531-2538.  
[16] 刘建锋, 徐进, 李青松, 等. 循环荷载下岩石阻尼参数测试的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 1036-1041.  
[17] 张媛, 许江, 杨红伟, 等. 循环荷载作用下围压对砂岩滞回环演化规律的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 320-326.  
[18] 刘建锋, 谢和平, 徐进, 等. 循环荷载作用下岩石阻尼特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 712-717.