

文章编号: 1006-4710(2015)02-0183-06

不同应力水平下砂岩力学特性的试验研究

何明明, 李宁, 郇久阳, 陈蕴生, 朱才辉

(西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了探讨循环加载下应力水平对岩石力学特性的影响, 利用 WDT-1500 材料试验机, 对砂岩进行不同应力上限、不同应力下限、相同应力幅值和不同荷载频率条件下循环加载试验, 对比分析不同加载条件下砂岩的力学特性, 揭示了砂岩的动弹性模量和动泊松比随循环次数的演化规律, 及随应力水平和应力幅值的变化规律。试验结果表明: 砂岩的屈服应力是其在循环加载过程中力学特性出现变化的一个分界点, 在分界点之上或之下动弹性模量和动泊松比的变化规律是不相同的; 对于同一砂岩试样, 动弹性模量和动泊松比随加载频率的增大而增大, 随着应力幅值的增大而减小, 并且应力幅值相同时, 动弹性模量与应力水平具有一定的线性关系。

关键词: 砂岩; 循环荷载; 应力水平; 动弹性模量; 动泊松比

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A

Experimental study of mechanics behavior of sandstone under different stress levels

HE Mingming, LI Ning, HUAN Jiuyang, CHEN Yunsheng, ZHU Caihui

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to discuss the effect of stress level upon rock mechanics behaviors under the cyclic loading, WDT-1500 material testing machine is used to carry out sandstone cycle loading tests in different stress upper limitations, different stress lower limitations, the same stress amplitudes and different loading frequencies. Also, the comparative analysis is made of sandstone mechanics behaviors under different loading conditions, whereby revealing that the dynamic elastic modulus of sandstone and Poisson's ratio have their evolution laws with their cyclic number as well as their varying laws with stress levels had stress amplitudes. Tests results indicate that the yield stress of sandstone can be one dividing point appeared in the cyclic loading process of mechanics behavior variation, above or below which the varying laws of dynamic elastic modulus and dynamic Poisson's ratio are dis-similar. As to the same sandstone specimen, dynamic elastic modulus and dynamic Poisson's ratio increase with an increase in loading frequency, and decrease with an increase in the amplitudes. And when the stress amplitudes are the same, there is a linear relationship between dynamic elastic modulus and stress level.

Key words: sandstone; cyclic loading; stress level; dynamic elastic modulus; dynamic Poisson's ratio

近年来, 随着我国各类大型岩土工程的兴建, 与岩石力学相关的科研和实践获得了很大的发展。许多工程领域中的问题都涉及岩石在周期荷载作用下的动态力学性能及破坏问题, 如矿山开采、能源储备、常规爆炸及核爆防护等工程, 从而使得岩体动力学得到了充分发展。

探讨周期荷载作用下岩石的力学特性, 有助于正确认识岩体的破坏机理, 进而科学地评价岩体的长期稳定性。已有众多国内外学者通过岩石的常规单轴与三轴试验^[1-4]及循环荷载试验^[5-18]获得了丰富的研究成果。如葛修润等^[5-6]对循环荷载作用下岩石的不可逆变形及疲劳门槛值等进行了系统的研

收稿日期: 2015-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179153, 51308456); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2015JM5175)。

作者简介: 何明明, 男, 博士生, 研究方向为岩土工程。E-mail: 807658619@qq.com。

通讯作者: 李宁, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为岩体动力学、冻土力学及隧洞边坡稳定性分析。

E-mail: ningli@xaut.edu.cn。

究;刘建锋等^[7-8]研究了单轴循环荷载和组合荷载作用下泥质粉砂岩的阻尼特性;杨永杰等^[9]研究了循环荷载条件下煤岩的强度与变形特性,认为煤岩比其他硬岩更容易发生疲劳破坏;李宁等^[10-11]研究了循环荷载下不同裂隙岩石的动力特性,并建立了疲劳损伤模型。还有一些学者研究了岩石在循环荷载作用下的能量特征^[12-13]、疲劳损伤^[14-15]、力学特性^[16-18]。以上研究提高了人们对循环荷载下岩石力学特性的认识。

但上述的研究成果主要集中在岩石的变形、疲劳特性及损伤演化规律等方面,而应力水平对岩石力学行为影响方面的研究还不够充分。因此,本研究以砂岩为对象,探讨动弹性模量和动泊松比对应力幅值、应力上下限及应力水平的响应特性,揭示动弹性模量和动泊松比随应力幅值、应力水平的变化规律,研究成果可为深入了解循环荷载下岩石力学性质及其工程实践提供参考。

1 实验设备及方法

1.1 试验仪器及试样制备

力学试验采用西安理工大学岩土工程研究所与长春朝阳试验仪器有限公司联合研制的 WDT-1500 多功能材料试验机,试验机由三轴压缩和直剪两部分构成,采用德国 DOLI 公司 EDC 全数字伺服测控器、自平衡压力室、轴向和径向变形引伸计等先进设备,配备声波检测系统,可进行复杂应力条件下的单轴或三轴压缩试验、剪切试验、疲劳试验。

本研究所选用的砂岩来自陕西铜川市新区龙潭水库,岩性为钙质长石砂岩,细中粒砂质结构,碎屑粒径 0.2~0.5 mm,碎屑结构次棱角状含量 73%,填隙物含量 27%,胶结物成分为碳酸盐,胶结类型为孔隙式,如图 1 所示。

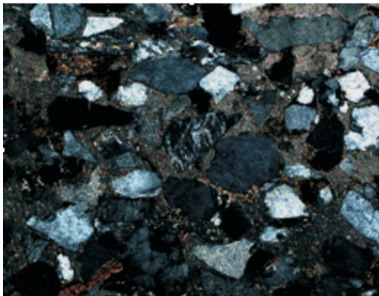


图 1 砂岩试样的显微结构图像

Fig. 1 Microscope image of sandstone sample

岩石中碎屑主要以长石为主,碎屑成分及含量分别为黑云母 10%、白云母 2%、钾长石 63%、石英 19%、金属矿物 3%、岩屑 3%。依据国际岩石力学

学会的规定,将所采集的砂岩加工成 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准试样,对试样断面切割、磨平,使其端面平整度控制在 0.02 mm 以内,直径误差小于 0.3 mm。测定砂岩密度 2.45~2.46 g/cm³,纵波速度 3 719~3 785 m/s。以上过程中,从取样、试样加工及选样等方面严格控制岩样非均匀性对试验结果带来的影响和误差。

1.2 试验方案

参考国内外现有的研究背景及试验方案,循环荷载试验施加的波形为余弦周期波,试验方案如下:

1) 不同应力上限条件下循环荷载试验方案

应力水平设定为 42.3%~63.5%、42.3%~74.1%、42.3%~84.7%、42.3%~90%,荷载频率为 0.5 Hz,可研究应力下限处于弹性阶段时砂岩的力学特性。

2) 不同应力下限条件下循环荷载试验方案

应力水平设定为 26.7%~93.3%、40%~93.3%、53.3%~93.3%、66.7%~93.3%、80%~93.3%,荷载频率为 0.5 Hz,以此研究应力上限处于塑性变形阶段时砂岩的力学特性。

3) 相同应力幅值条件下循环荷载试验方案

应力水平设定为 66.7%~93.3%、53.3%~80%、40%~66.7%、26.7%~53.3%、13.3%~40%,荷载频率为 0.5 Hz,可研究应力水平对砂岩力学特性的影响。

4) 不同荷载频率条件下循环荷载试验方案

荷载频率设定为 0.5 Hz、1.5 Hz 和 2.5 Hz,应力水平为 42.3%~84.7%。

1.3 试验原理

文献[18]定义了循环荷载条件下的动弹性模量和动泊松比,即:

$$E_d = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\epsilon_{1d}} \quad (1)$$

$$\mu_d = \frac{\Delta\epsilon_{2d}}{\Delta\epsilon_{1d}} \quad (2)$$

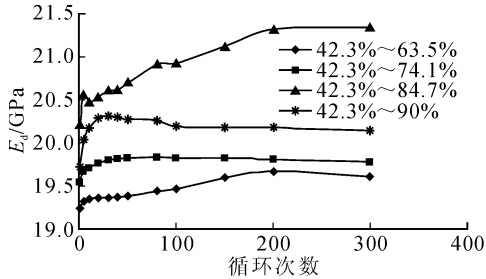
式中, E_d 为动弹性模量, μ_d 为动泊松比, $\Delta\epsilon_{1d}$ 和 $\Delta\epsilon_{2d}$ 分别为轴向和环向应变幅值, $\Delta\sigma_1$ 为应力幅值。

2 实验结果及分析

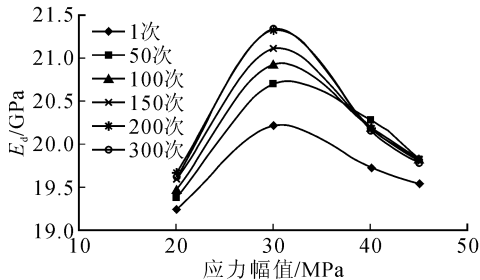
2.1 不同应力上限条件下循环荷载试验

利用式(1)求得砂岩在不同应力上限循环荷载条件下的动弹性模量,如图 2 所示。当应力水平为 42.3%~63.5%、42.3%~74.1%、42.3%~84.7%、42.3%~90%时,动弹性模量的变化范围分别为 19.2~19.6 GPa、20.2~21.3 GPa、19.7~

20.3 GPa、19.5~19.8 GPa,动弹性模量随着应力幅值的增大而先增大后减小,如图2(b)所示。主要原因是应力上限小于屈服应力(75.92 MPa)时,在循环加载过程中,轴向应变一直处于循环硬化阶段,岩样的动弹性模量随着应力水平的提高而增大;而应力上限大于屈服应力(75.92 MPa)时,随着应力水平的逐渐增大,砂岩内部产生次生裂纹并且逐渐扩展,塑性变形增大,从而动弹性模量减小。



(a) 动弹性模量-循环次数曲线



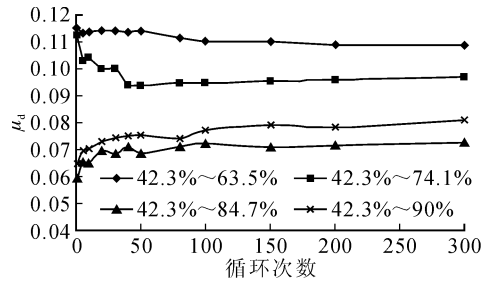
(b) 动弹性模量-应力幅值曲线

图2 不同应力上限条件下砂岩动弹性模量与循环次数和应力幅值关系曲线

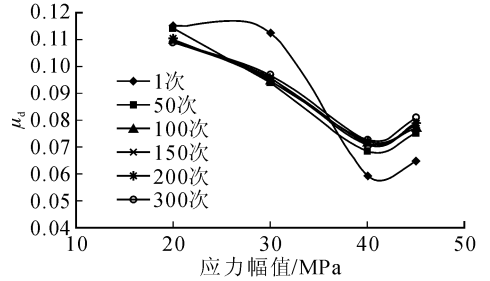
Fig. 2 Curves of dynamic elastic modulus-cycle number and stress amplitude of sandstone samples in different stress upper limitations

砂岩在不同应力上限循环荷载条件下的动泊松比,如图3所示。应力水平为42.3%~63.5%、42.3%~74.1%、42.3%~84.7%、42.3%~90%时,动泊松比的变化范围分别为0.115~0.109、0.113~0.096、0.058~0.068、0.065~0.082,动泊松比随着应力幅值的增大而先减小后增大,如图3(b)所示。应力上限小于屈服应力(75.92 MPa)时,环向变形发生循环硬化,岩样的动泊松比随着循环次数的增加而减小,且减小的趋势越来越慢,随着应力幅值的增大而减小;应力上限大于屈服应力(75.92 MPa)时,环向变形发生循环硬化,岩样的动泊松比随着循环次数的增加而增大,且增大的趋势越来越慢,随着应力幅值增大而增大。

这说明屈服应力对应的应力上限是砂岩在循环加载过程中力学特性出现变化的一个分界点,在分界点之上或之下,动弹性模量和动泊松比变化规律是不相同的。



(a) 动泊松比-循环次数曲线



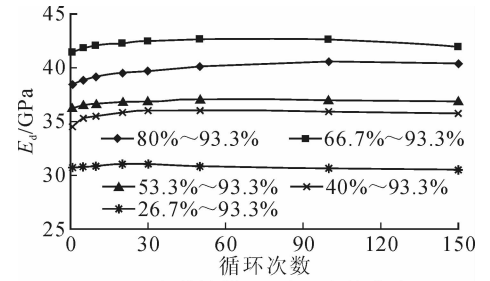
(b) 动泊松比-应力幅值曲线

图3 不同应力上限条件下砂岩动泊松比与循环次数和应力幅值的关系曲线

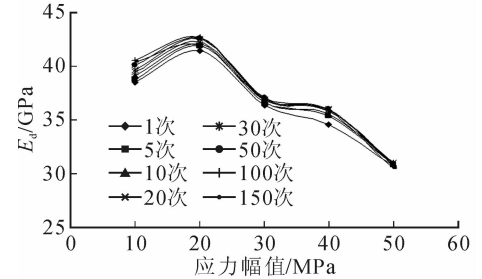
Fig. 3 Curves of dynamic Poisson's ratios-cycle number and stress amplitude of sandstone samples in different stress upper limitations

2.2 不同应力下限条件下循环荷载试验

不同应力下限循环荷载条件下动弹性模量与循环次数和应力幅值的关系曲线,如图4所示。



(a) 动弹性模量-循环次数曲线



(b) 动弹性模量-应力幅值曲线

图4 不同应力下限条件下砂岩动弹性模量与循环次数和应力幅值关系曲线

Fig. 4 Curves of dynamic elastic modulus-cycle number and stress level of sandstone samples under cyclic loading in different stress lower limitations

由图4可以看出,当应力水平为26.7%~93.3%、40%~93.3%、53.3%~93.3%、66.7%~93.3%、80%~93.3%,动弹性模量的变化范围分别

为 30.9~31.2 GPa, 34.6~36.2 GPa, 36.5~37.1 GPa, 41.3~42.1 GPa, 38.7~40.8 GPa, 动弹性模量随着应力幅值的增大而先增大后减小。而动泊松比的变化范围分别为 0.198~0.224、0.141~0.195、0.092~0.162、0.065~0.139、0.051~0.126, 随着应力幅值的增大而减小, 如图 5 所示。说明动弹性模量和动泊松比受到应力水平和应力幅值的双重影响。由于本组试验的应力上限大于屈服应力, 从图中可以看出动弹性模量和动泊松比随循环次数的变化规律与 2.1 节基本相同。

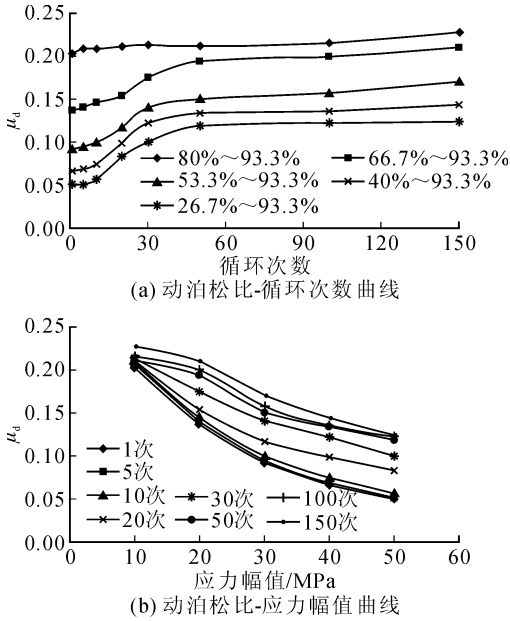


图 5 不同应力下限条件下砂岩动泊松比与循环次数和应力幅值的关系曲线

Fig. 5 Curves of dynamic Poisson's ratios-cyclic number and stress level of sandstone samples under cyclic loading in different stress lower limitations

2.3 相同应力幅值条件下循环荷载试验

砂岩在相同应力幅值条件下动弹性模量与循环次数和应力水平的关系曲线, 如图 6 所示。这里的应力水平为应力上限与应力下限和的平均值。可以看出循环次数相同时, 动弹性模量随应力水平的增大而呈线性增大。这是因为在相同应力幅值条件下, 随应力水平的提高, 循环加载过程中砂岩颗粒接触面滑移能力逐渐减弱, 同时发生循环硬化, 使得动弹性模量增大。

砂岩在相同应力幅值条件下的动泊松比, 如图 7 所示。可以看出, 当应力上限大于屈服应力时, 动泊松比随着循环次数的增大保持不变, 约 0.3; 当应力上限小于屈服应力, 动泊松比在前 50 次循环急速减小, 其后缓慢减小。然而, 动泊松比随应力水平的变化规律较为复杂, 在前 10 次循环时, 动泊松比随

着应力水平的增大而增大; 在其后, 随着应力水平的增大, 先减小再增大, 即当应力上限小于岩石屈服应力时呈减小趋势, 当应力上限等于屈服强度时达到最小值, 当应力上限大于屈服强度时, 在塑性变形阶段, 呈增大趋势。

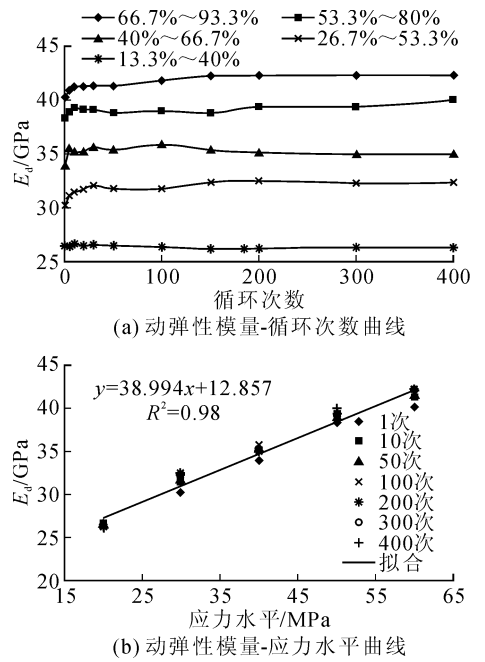


图 6 相同应力幅值条件下砂岩动弹性模量与循环次数和应力水平关系曲线

Fig. 6 Curves of dynamic elastic modulus-cyclic number and stress level of sandstone samples under cyclic loading in the same stress amplitudes

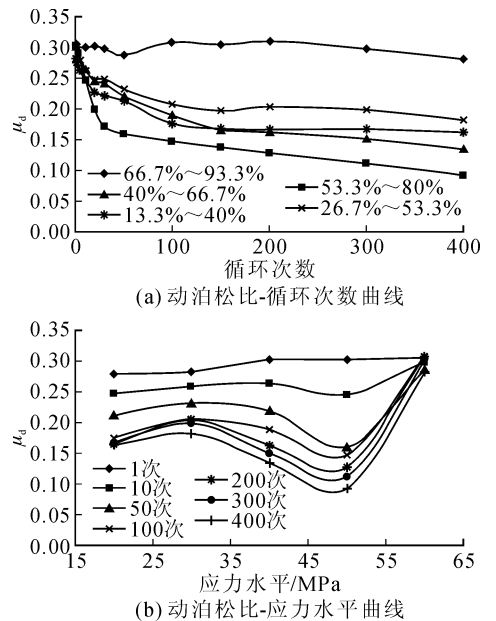


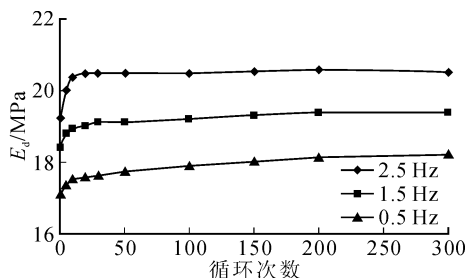
图 7 相同应力幅值条件下砂岩动泊松比与循环次数和应力水平的关系曲线

Fig. 7 Curves of dynamic Poisson's ratios-cyclic number and stress level of sandstone samples under cyclic loading in the same stress amplitudes

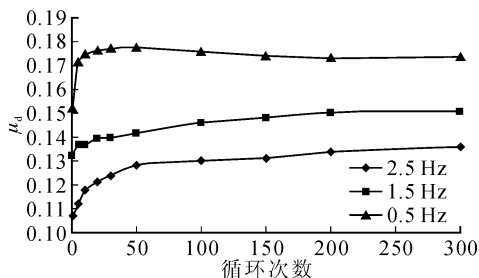
说明相同应力幅值条件下,应力水平和应力上限是影响动弹性模量和动泊松比的主要因素。

2.4 不同荷载频率条件下循环荷载试验

图8为0.5 Hz、1.5 Hz和2.5 Hz荷载频率条件下砂岩的动弹性模量和动泊松比与循环次数的关系曲线。由图可以看出,岩样的动弹性模量和动泊松比都随着循环次数的增加而增大,且增大的趋势越来越慢。动弹性模量随着频率的增大而增大,主要是由于荷载频率越大,变形速率越大,导致应变幅值越小;动泊松比随着频率的增大而增大,主要由于荷载频率对轴向应变速率的影响较小,对环向变形非常敏感,荷载频率越大,砂岩越易发生膨胀变形。



(a) 动弹性模量-循环次数曲线



(b) 动泊松比-循环次数曲线

图8 不同荷载频率下砂岩的动弹性模量和动泊松比
Fig. 8 Dynamic elastic modulus and dynamic poisson's ratios of sandstone under cyclic loading

3 讨论

循环荷载作用下应力水平和应力幅值对岩石力学特性影响的直观体现是力学参数的变化。应力水平和应力幅值对岩石的动弹性模量和动泊松比的影响,主要与岩石的次生微裂纹、颗粒接触面滑移能力及岩石本身的矿物成分和胶结物的组成等因素有关。

本文主要研究了不同应力水平条件下的循环加载试验,对比分析了不同应力上限、不同应力下限和相同应力幅值条件下砂岩的力学特性,揭示了砂岩的动弹性模量和动泊松比的演化规律,及其随应力水平和应力幅值的变化规律。试验结果表明,应力水平、应力幅值及应力上限三者综合影响砂岩的动弹性模量和动泊松比。当大于屈服应力时,应力上

限越大,循环加载过程中砂岩的次生裂纹越容易产生,试样的环向越易发生循环软化,动泊松比和动弹性模量也就越小。如果应力上限保持不变,应力幅值和应力水平越高,循环加载中砂岩内部的微裂纹越容易扩展,动弹性模量和动泊松比也就越小。在相同应力幅值条件下,砂岩的动弹性模量和动泊松比主要受应力水平的影响,应力水平越高,循环加载过程中砂岩的次生微裂纹越不易扩展,颗粒接触面滑移能力越弱,动弹性模量和动泊松比越小。从以上分析可以看出,本次实验结果较好的模拟了不同地层深度地震荷载作用下岩石的力学特性,其力学性质对于砂岩具有普遍性。

4 结论

对砂岩进行不同应力上限、不同应力下限和相同应力幅值条件下循环加载试验,研究不同应力水平条件下砂岩的力学特性,得到了以下结论:

1) 单轴压缩条件下的屈服应力对应的应力上限是砂岩在循环加载过程中力学特性出现变化的一个分界点,在分界点之上或之下,动弹性模量和动泊松比的变化规律是不相同的。

2) 在循环加载过程中,砂岩表现出不同的力学特性。应力上限大于屈服应力时,环向发生循环软化,动泊松比随循环次数增加而减小;当应力上限小于屈服应力时,环向发生循环硬化,动泊松比随循环次数增加而增大,直至保持稳定。

3) 动弹性模量和动泊松比受荷载频率、应力幅值、应力水平及应力上限的综合影响。相同应力幅值条件下,动弹性模量与应力水平具有一定的线性关系。

参考文献:

- [1] 仵彦卿,丁卫华,曹广祝. 岩石单轴与三轴CT尺度裂纹演化过程观测[J]. 西安理工大学学报,2003,19(2): 115-119.
Wu Yanqing, Ding Weihua, Cao Guangzhu. Observation and detection of evolution process of rock crack on CT scale under uniaxial and triaxial compression conditions [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2003, 19(2): 115-119.
- [2] 丁卫华,仵彦卿,蒲毅彬,等. 岩石细观损伤过程的动态观测[J]. 西安理工大学学报,2000,16(3):274-279.
Ding Weihua, Wu Yanqing, Pu Yibin, et al. CT dynamic detection of meso-damage process of rocks [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2000, 16(3): 274-279.

- [3] 夏洪春,朱训国. 砂岩单向压缩条件下的变形特性及破坏模式研究[J]. 西安理工大学学报,2014,30(3):309-314.
Xia Hongchun,Zhu Xunguo. Research on the deformation characteristics and failure mode of sandstone under the condition of uniaxial compression test[J]. Journal of Xi'an University of Technology,2014,30(3):309-314.
- [4] 韩铁林,师俊平,陈蕴生,等. 化学腐蚀对砂岩物理力学性质影响的试验研究[J]. 西安理工大学学报,2014,30(1):34-39.
Han Tielin,Shi Junpin,Chen Yunsheng, et al. Experimental study of physical and mechanics characteristic of sandstone sample subjected to chemical erosion [J]. Journal of Xi'an University of Technology,2014,30(1):34-39.
- [5] 葛修润,卢应发. 循环荷载作用下岩石疲劳破坏和不可逆变形问题的探讨[J]. 岩土工程学报,1992,14(3):56-60.
Ge Xiurun, Lu Yingfa. Study on fatigue failure and irreversible deformation problem of rock under cyclic load [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1992,14(3):56-60.
- [6] 葛修润,蒋宇,卢允德,等. 周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(10):1581-1585.
Ge Xiurun,Jiang Yu,Lu Yunde, et al. Testing study on fatigue deformation law of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2003,22(10):1581-1585.
- [7] 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.
Liu Jianfeng, Xie Heping, Xu Jin, et al. Experimental study on damping characteristics of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(4):712-717.
- [8] 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.
Liu Jianfeng, Xu Jin, Li Qingsong, et al. Experimental research on damping parameters of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(5):1036-1041.
- [9] 杨永杰,宋扬,楚俊. 循环荷载作用下煤岩强度及变形特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(1):201-205.
Yang Yongjie, Song Yang, Chu Jun. Experimental study on characteristics of strength and deformation of coal under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(1):201-205.
- [10] Li N,Zhang P,Chen Y S, et al. The mechanical properties and a fatigue-damage model for jointed rock masses subjected to dynamic cyclical loading[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2001,38(7):1071-1079.
- [11] Li N,Zhang P,Chen Y S, et al. Fatigue properties of cracked, saturated and frozen sandstone samples under cyclic loading[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2003,40(1):145-150.
- [12] Bagde M N,Petroš V. Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2005,42(2):237-250.
- [13] Bagde M N,Petroš V. Fatigue and dynamic energy behavior of rock subjected to cyclical loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2009,46(1):200-209.
- [14] Xiao J Q,Ding D X,Jiang F L, et al. Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2010,47(3):461-468.
- [15] 郭印同,赵克烈,孙冠华,等. 周期荷载下盐岩的疲劳变形及损伤特性研究[J]. 岩土力学,2011,32(5):1353-1359.
Guo Yintong, Zhao Kelie, Sun Guanhua, et al. Experimental study of fatigue deformation and damage characteristics of salt rock under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(5):1353-1359.
- [16] 王者超,赵建纲,李木才,等. 循环荷载作用下花岗岩疲劳力学性质及其本构模型[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(9):1888-1900.
Wang Zhechao, Zhao Jianggang, Li Shucui, et al. Fatigue mechanical behavior of granite subjected to cyclic load and its constitutive model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(9):1888-1900.
- [17] Liu E L,He S M. Effects of cyclic dynamic loading on the mechanical properties of intact rock samples under confining pressure conditions[J]. Engineering Geology,2012,125(27):81-91.
- [18] 陈运平,席道瑛,薛彦伟. 循环荷载下饱和岩石的滞后和衰减[J]. 地球物理学报,2004,47(4):672-679.
Chen Yunping, Xi Daoying, Xue Yanwei. Hysteresis and attenuation of saturated rocks under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Geophysics,2004,47(4):672-679.