

文章编号: 1000-7598 (2011) 05-1287-10

煤岩组合体分级加卸载特性的试验研究

左建平^{1,2}, 谢和平^{2,3}, 孟冰冰², 刘建锋³

(1. 中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院 岩石力学与分形研究所, 北京 100083; 3. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065)

摘 要: 通过 MTS 815 试验机研究了煤岩组合体分级加卸载试验。分级加卸载下煤岩组合体破坏以脆性破坏机制为主, 与单轴作用相比, 分级加卸载作用下煤岩组合体的破坏更为破碎, 且破坏强度有所提高, 但轴向和环向应变却有所降低。同一循环中的加载与卸载曲线基本不重合, 且多数情况不形成闭合环路; 卸载曲线与下一个循环的加载曲线通常也不重合, 但会形成闭合环路。第 1 循环结束时残余变形较大, 加卸载曲线形成了类似“牛角”状的曲线; 随着循环加卸载地进行, 与残余变形相比第 1 循环有所降低, 加载和卸载曲线在逐渐靠近, 并且加卸载曲线类似“竹叶”状。获得了残余变形和加卸载弹性模量随循环加卸载的变化关系, 并且实验表明卸载到 1 MPa 附近时, 卸载线是曲折波动的; 但在再次加载初期, 加载线几乎是直线, 且随着荷载的继续增加, 加载线和上一个循环的卸载线逐渐分离。循环加卸载后应变相位逐渐滞后于应力相位, 内因可能是因为岩石矿物颗粒间的黏滞性以及煤岩组合体界面之间的摩擦引起的, 而外因可能是循环加卸载导致了煤岩体内部损伤, 并由此诱发不可恢复的残余变形。

关 键 词: 煤岩组合体; 分级加卸载; 残余变形; 耗散能; 加卸载弹性模量

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

Experimental research on loading-unloading behavior of coal-rock combination bodies at different stress levels

ZUO Jian-ping^{1,2}, XIE He-ping^{2,3}, MENG Bing-bing², LIU Jian-feng³

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2. Institute of Rock Mechanics and Fractals, School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

3. School of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Sichuan, Chengdu 610065, China)

Abstract: In this paper, MTS 815 test system has been used to study the failure behavior of coal-rock combination bodies under different stress level cyclic loading-unloading. Experimental indicates that brittle failure is also the failure mechanism of coal-rock combination body under cyclic loading-unloading, but the failure under cyclic loading-unloading is more fragmentized than that under uniaxial loading. The failure strength under cyclic loading-unloading is higher than that under uniaxial loading; but the axial and circumferential strain in the contrast. The loading curves of coal-rock combination body are usually not coincidence with the unloading curves. In addition, they usually do not form a closed loop. In the first cycle, the residual deformation is large, and the loading-unloading curve forms a horn-shaped curve. The relationships of the residual deformations and the loading-unloading elastic modulus with the advancing of cyclic loading-unloading have been obtained in our tests, respectively. At the reverse position of unloading and loading, when unloading to about 1 MPa, the unloading line is fluctuant; however loading again, loading line is almost straight line in the early. In the all of cycles, some cycle loading lines are nearly coincidence with the unloading curves, some form sharp edges, or some forms cross lines. With the increasing of the loading, the loading curves separate gradually with the unloading curves. With the advancing of loading and unloading, strain phase gradually lags stress phase. The internal factors are the viscosity of rock minerals and the friction between the interface between coal and rock, and the external factors are the irreversible residual deformation under cyclic loading and unloading.

Key words: coal-rock combination; different level loading-unloading; residual deformation; energy dissipation; elastic modulus of loading and unloading

收稿日期: 2011-02-01

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)计划资助项目 (No. 2010CB732002, No. 2011CB201201); 高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目 (No. 201030); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (No. NCET-09-0726)。

第一作者简介: 左建平, 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩石力学、损伤、断裂及数值计算等方面的研究工作。E-mail: zjp@cumt.edu.cn

1 引言

随着我国煤炭开采深度的逐渐加大,特别是近年来大采高放顶煤开采及特厚煤层的开采,采场周围需留设各种类型的煤柱以保护煤炭的安全高效采出,如区段煤柱、断层保护煤柱、条带开采时的条带煤柱、房柱开采时的房柱等,这些煤柱具有支撑和隔离的作用,而煤柱与其上覆岩层组合结构的安全稳定性决定了整个采场的安全。留设煤柱除了受矿区地应力的影响外,还受到多次爆破、掘进和回采等因素的影响,尤其是大采高放顶煤开采、房柱式开采、条带开采等,煤柱要受到采动应力的反复作用;若是近距离煤层则还受到上下相邻煤层的采动影响,因此,考虑循环加卸载作用下煤岩组合体的力学行为及稳定性具有十分重要的意义。

目前的研究大多关注煤体或岩体在单轴和三轴荷载条件下的变形破坏,Paterson 和 Wong, Jaeger, Cook 和 Zimmerma, Mogi 在他们的专注中对岩石的基本力学性质做了非常系统的总结^[1-3]。唐春安等通过两岩体相互作用系统对地震孕育过程中的微破裂活动及弹性回弹等特性进行了研究^[4-5]。但有关两体系统加卸载循环特性研究目前还较少。大理岩、花岗岩、红砂岩等相对坚硬致密均质的岩石在循环荷载作用下的强度及变形特征也有研究^[6-7],但对于含有大量原生裂隙、且强度较低的煤岩体的循环荷载导致的破坏还缺乏系统研究。公认的试验结果表明,岩石类材料在多次反复加卸载条件下的卸载与加载曲线不相重合,其变形曲线会形成一条封闭的塑性滞回环,且该塑性滞回环随着循环加卸载次数的增加而逐渐变小变窄,直到某次循环没有塑性变形为止,最终合并为一条线^[1-2,8]。但也有学者持不同意见,认为岩石在循环加卸载条件下的卸载与加载曲线会形成一封闭的塑性滞回环,但该塑性环从第 2 次循环起就可能不再发生变化^[9-10]。Spencer 设计了一套单轴和卸载的试验装置,以观测应力-应变曲线的滞后现象,测量涵盖了地震勘探的频率以及非常小的(约 10^{-7}) 时的复模量、能量耗散和速度^[11]。Holcomb 通过辉绿岩和花岗岩的循环差应力试验,研究了膨胀岩石的记忆、弛豫和损伤^[12]。Mcall 和 Guyer 基于滞后细观弹性单元的假设,利用 Preisach-Marergoyz 模型讨论了静态应力-应变状态方程、准静态模量-应力关系和动态模量-应力关系,并应用于非线性弹性波传播的运动方程^[13]。Tutuncu 等对多孔隙颗粒状沉积岩在单轴循环应力作用下的情况进行了研究,指出应力-应变滞后回线的特征与

施加荷载的频率、应变振幅以及岩石的饱和流体特性等因素有关,并影响岩石的衰减特性^[14-15]。许江等^[16]通过地应力水平下不同应变速率时循环次数对安山岩的割线杨氏模量的研究发现,岩石这种天然材料自身具有明显的黏弹性特性,并且其表现出来的力学性质不仅与作用力的大小、方向、加载速率等密切相关,而且还与其作用力的方式和岩石自身的组构特征密切相关。陈运平等^[17]通过对饱和砂岩和大理岩的循环荷载试验发现,岩石的衰减和滞后存在密切的关系,认为孔隙流体流动在岩石的滞后和衰减中起着重要作用。有关岩石的滞后和衰减机制事实上是个非常复杂的问题,很难通过某一种模型或某一种机制来解释所有的岩石滞后及衰减机制。目前岩石滞后和衰减的模型或者理论中主要有两类:一类是从宏观或者非线性弹性波方程解释衰减;另一类是从衰减的微观机制考虑。席道瑛等研究了循环荷载下饱和砂岩、大理岩的各向异性和非线性黏弹性响应^[18],她研究了正弦载荷作用下饱和岩石的物理力学性质,认为其具有显著的各向异性,这种各向异性与砂岩固有的各向异性有关。循环荷载下饱和岩石的应力-应变曲线呈现闭合的尖叶状。在每一个载荷循环中,应力-轴向应变曲线基本不变,从而说明没有残余应变的参与,响应仍然是弹性的。许江等^[19]从不同位移速率、不同载荷水平和不同岩石孔隙性(如坚硬致密的细粒砂岩和软弱多孔的混凝土加气砖等)3 个角度对岩石类材料在循环加卸载条件下所形成的封闭塑性滞回环的演化规律进行探讨。杨永杰等^[20]指出,煤岩比其他坚固岩石更容易发生疲劳破坏,单轴循环荷载作用下鲍店矿 3 煤的疲劳破坏“门槛值”不超过其单轴抗压强度的 81%,且在疲劳破坏门槛值以下进行循环加卸载时,也会产生一定程度的疲劳损伤。Nish 等^[21]通过动态试验,得到了岩石动剪切模量与阻尼比和围压的关系。张勇等^[22]通过不排水动三轴试验研究了循环荷载作用下饱和重塑软黏土的累积塑性应变发展形态。徐速超等^[23]利用 MTS 和 PAC 声发射信号采集系统研究了单轴循环加卸载作用下砂卡岩强度变化及声发射特征。刘建锋等^[24]对循环荷载作用下岩石阻尼特性进行了研究,得出动弹模和阻尼比与动荷载大小的关系。

以上研究主要集中在循环荷载对岩石或者煤体的作用,对循环荷载下煤体-岩体组合体结构的力学行为还鲜见报道。作者在研究了煤岩组合体的单轴和三轴荷载下的基本力学行为之后^[25],本文将对循环荷载下煤岩组合体的力学特性及塑性滞回环的

演变进行研究, 该项研究对于科学合理地了解煤炭开采过程中受重复采动影响条件下煤柱尺寸的设计具有十分重要的意义。

2 煤岩组合体试件及加卸载试验方案

试验所用煤岩体采自开滦钱家营矿 2071 工作面, 埋深为 -850 m 。通过 $\phi 35\text{ mm}$ 的钻孔钻取煤岩样, 然后在磨平机上将煤岩样试件两端磨平, 保证试件两端的表面平行、光滑, 没有大的划痕, 研磨时要求试件两端面不平行度不得大于 0.01 mm , 上、下端直径的偏差不得大于 0.02 mm 。组合体试件中煤样和岩样的尺寸都为 $\phi 35\text{ mm}\times 35\text{ mm}$, 组合后为 $\phi 35\text{ mm}\times 70\text{ mm}$, 即径高比为 1: 2, 如图 1 所示。为了进行对比, 共加工了 6 组试件, 其中 3 组用于做单轴试验, 3 组用于分级加卸载试验。试件的尺寸如表 1 所示。

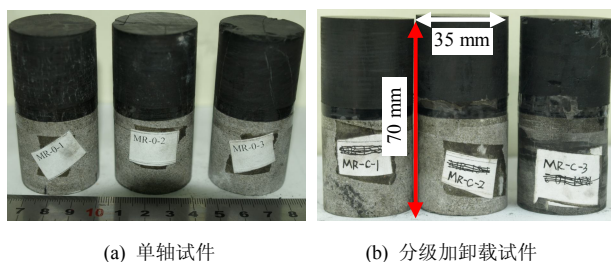


图 1 煤岩组合体实物图

Fig.1 Real samples of coal-rock combination body

表 1 煤岩组合体试件的尺寸及密度情况

Table 1 Size and density of coal-rock combination bodies

试样 编号	种类	直径 D / mm	高度 H / mm	质量 M / g	密度 ρ / (g/m ³)	波速 V / (m/s)
MR-0-1	煤	34.56	35.38	47.19	1.42	2 227.11
		34.94	34.43	83.78	2.54	
MR-0-2	煤	34.77	35.86	45.62	1.34	2 360.66
		34.89	34.49	83.65	2.54	
MR-0-3	煤	34.58	35.19	44.25	1.34	2 213.25
		34.81	34.95	85.30	2.57	
MR-C-1	煤	34.77	34.64	44.24	1.35	2 346.87
		34.91	35.19	86.22	2.56	
MR-C-2	煤	34.76	36.69	45.12	1.30	2 003.58
		34.85	34.99	85.03	2.55	
MR-C-3	煤	34.38	34.75	42.82	1.33	1 379.56
		34.43	35.00	87.48	2.69	

单轴和循环加卸载试验是在四川大学 MTS 815 试验机上完成, 该机轴向荷载最大 $4\,600\text{ kN}$, 单轴引伸计横向量程 $\pm 4\text{ mm}$, 纵向量程 $-2.5\sim +12.5\text{ mm}$, 各测试传感器的测试精度均为当前等比标定量程点

的 0.5% , 试验系统如图 2 所示。

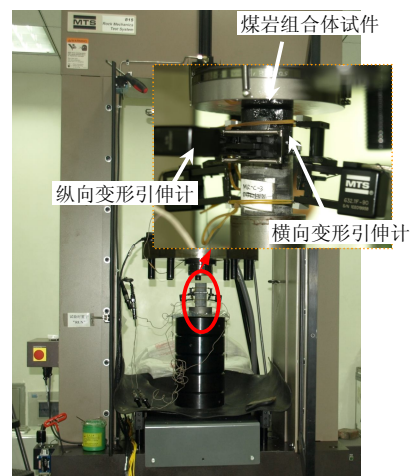


图 2 MTS 815 试验机

Fig.2 MTS 815 testing machine system

单轴试验采用位移加载模式, 先采用 0.06 mm/min 的加载速率直到破坏; 试件破坏后采用轴向位移控制模式, 加载速率为 0.1 mm/min 。为了模拟不同采矿活动对煤岩组合体的破坏情况, 通过 MTS 做不同应力水平的循环加卸载试验。加载初期采用力控制加载方式, 加载速率为 30 kN/min ; 然后卸载, 卸载速率为 30 kN/min ; 初始加卸载方案为: 初始荷载 $\rightarrow 4 \rightarrow 1 \rightarrow 6 \rightarrow 1 \rightarrow 8 \rightarrow 1 \rightarrow 10 \rightarrow 1 \rightarrow 12 \rightarrow 1 \rightarrow 14\text{ kN}$ 。加载到 14 kN 后, 采用位移控制模式加卸载, 加载速率为: 0.15 mm/min , 卸载速率为 0.2 mm/min , 加卸载方案为: $14 \rightarrow 1 \rightarrow 16 \rightarrow 1 \rightarrow 18 \rightarrow 1 \rightarrow 20\text{ kN} \rightarrow \dots \rightarrow$ 破坏。分级加载方案如图 3 所示, 图中应力是荷载除以每组试件的横截面面积而来。

本文试验在测量时采用了如下测试方法: 应力是煤岩组合体的整体应力, 而轴向应变是岩石和煤体的轴向应变之和; 而环向应变仪安装在煤体上, 因此, 环向应变则是煤体的环向应变。

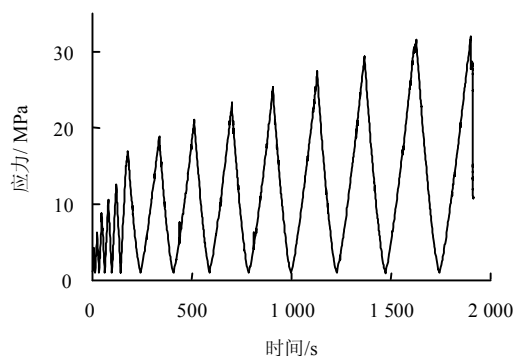


图 3 分级加载曲线

Fig.3 Level loading curve

3 煤岩组合体常规单轴试验

试件是煤在上方, 岩石在下方, 但 MTS 试验机加载时是下座动器在移动, 而上座动器是保持不动的, 因此, 试验机是主动加载在岩石上, 相当于该组合试件类似煤矿的煤与顶板岩石的相互作用。

3 个试件的峰值荷载如表 2 所示, 平均 26 MPa。由于岩石的破坏强度远远高于煤的破坏强度, 因此, 随着荷载的增加, 煤体上首先出现微裂纹, 当达到峰值荷载时, 煤体上部严重破碎, 产生粉碎性破裂, 并且局部区域有煤样剥落。试件 MR-0-1 的煤体侧面分布了 6 条大的竖向裂纹及 2 条与水平面呈 60° 的斜裂纹 (图 4(a)); 试件 MR-0-2 的煤体侧面分布了 7 条的竖向裂纹, 其中 2 条大的竖向裂纹贯穿到下部岩石中去 (图 4(b)); 试件 MR-0-3 的煤体侧面分布了 4 条倾斜裂纹和 11 条竖向裂纹 (图 4(c))。可以明显看出, 3 个试件的破坏都是以脆性破裂机制为主, 并且破坏先在煤体中发生, 煤体内出现多条竖向裂纹, 并且竖向裂纹的高速扩展都贯通到下部的岩石中去。单轴荷载条件下煤岩组合体的应力-应变曲线及煤岩组合体的基本物理力学参数如图 5 和表 2 所示。图中 ε_1 为轴向应变, ε_2 为环向应变, ε_θ 为体积应变。

表 2 单轴荷载下煤岩组合体的基本物理力学参数
Table 2 Fundamental physico-mechanical parameters of coal-rock combination bodies under uniaxial compression tests

试样编号	弹性模量 E / GPa	峰值强度 σ_c / MPa	峰值应变值 / 10^{-3}	
			轴向 ε_z	横向 ε_θ
MR-0-1	7.45	33.71	7.92	10.51
MR-0-2	5.41	25.93	8.23	6.38
MR-0-3	4.54	18.37	7.32	9.61

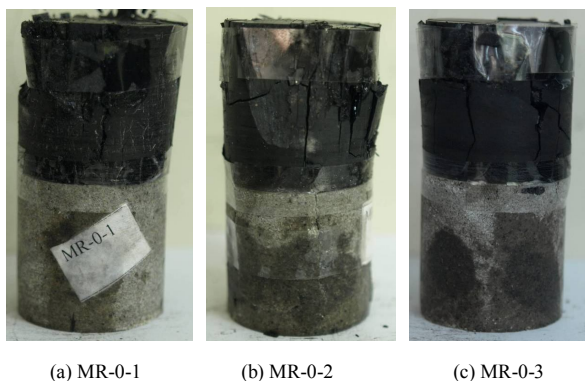


图 4 单轴荷载条件下煤岩组合体变形破坏图

Fig.4 Failure images of coal-rock combination bodies under uniaxial compression

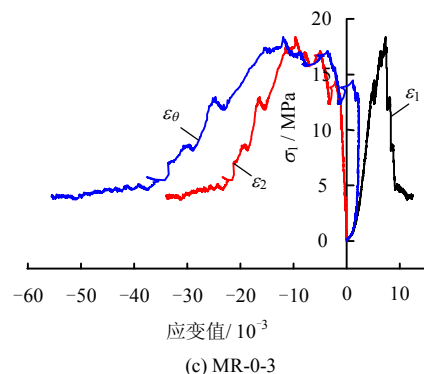
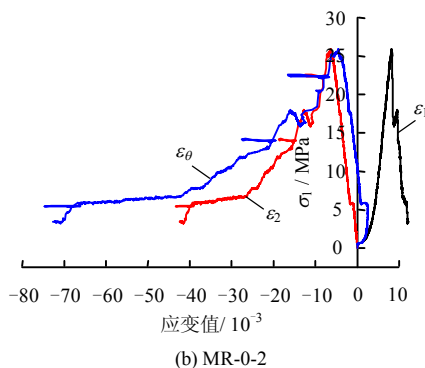
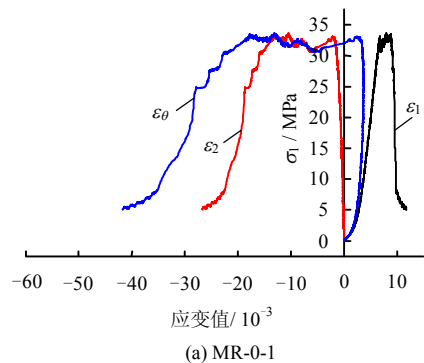


图 5 单轴荷载条件下煤岩组合体的应力-应变曲线
Fig.5 Stress-strain curves of coal-rock combination bodies under uniaxial compression

4 煤岩组合体分级加卸载试验

为了考虑采矿工程中煤岩体受到反复荷载作用, 对煤岩组合体进行了单轴加卸载循环试验。从试验结果来看, 分级加卸载下 3 个试件的峰值荷载如表 3 所示。考虑到加卸载 MR-C-3 试件的波速远远要低于其他试件, 因此可以说, 加卸载试验的试件单轴强度存在的裂隙要多于单轴加卸载试验的试件。但试验结果显示, 不同应力水平情况下加卸载试验的破坏强度 (平均 27.5 MPa) 比单轴强度 (平均 26 MPa) 有所提高, 但幅度并不大。主要的原因可能是分级加卸载过程中, 在初始阶段, 小荷载加卸载循环试验中导致煤岩体部分微裂纹闭合, 这样导致了加卸载试验的破坏强度有所提高。

对于煤岩组合体分级加卸载实验,煤岩体组合体破坏后裂纹主要分布在竖直面内,并且有剥落现象,竖直贯通的裂纹并且扩展到岩体里面去了,且煤体较为破碎,并伴有轻微噼啪的响声,如图6所示。从破坏机制来,分级加卸载条件下试件仍以脆性破坏机制为主,但与单轴试验相比,煤体更为破碎,这主要是分级加卸载导致煤体内部疲劳损伤所致;但轴向和环向变形与单轴荷载条件的变形相比都有减少的趋势。分级加卸载煤岩组合体的应力-应变曲线及其基本物理力学参数如图7和表3所示。

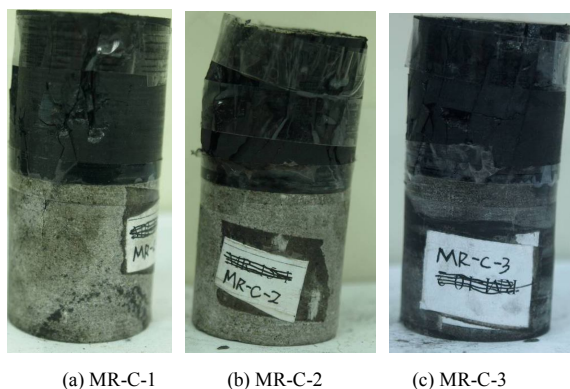


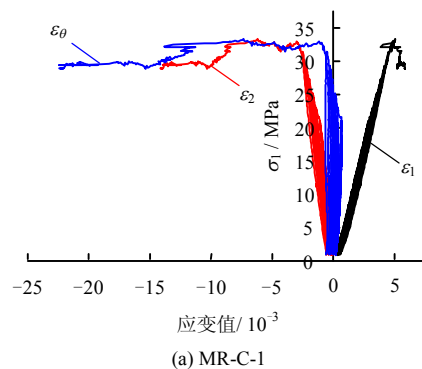
图6 分级加卸载条件下煤岩组合体变形破坏图
Fig.6 Failure images of coal-rock combination bodies under stepped cyclic loading-unloading

5 煤岩组合体分级加卸载特性分析

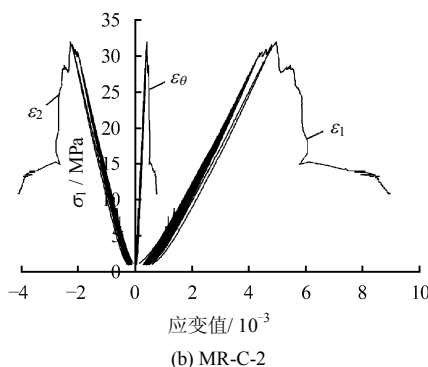
由于图7中分级加卸载曲线很多重合到一起,并不能看出他们的本质差异,分别提取了2个典型试件不同循环阶段的加卸载曲线如图8、9所示。从煤岩组合体的分级加卸载曲线可看出,由于煤岩体内部自身材料特性及内部原生缺陷,特别是由于煤体较为松软破碎,再加上岩石材料的黏滞性,煤岩组合体的同一个循环中的加载与卸载曲线通常不重合(加卸载曲线几乎不封闭),而上一个循环的卸载曲线与下一个循环的加载曲线也不重合(卸加载曲线封闭),会形成多样式形状的滞回环。煤体和岩体都是由多种矿物胶结而成,在长期的沉积环境下,矿物颗粒之间分布着许多裂纹、节理、孔洞等微观结构,同时煤岩体内还或多或少存在一些水和瓦斯等液气体,因此,煤岩体是一种多相、多组分、非均质的天然地质材料。也正因为这些特点,才导致了其煤岩组合体加卸载曲线的非线性弹性行为明显和显著的滞后特性。

在第1个循环可以明显地看出加载与卸载曲线偏离甚远,卸荷到1 kN时一个较大的残余变形,加卸载曲线形成了类似“牛角”状的曲线,这主要是

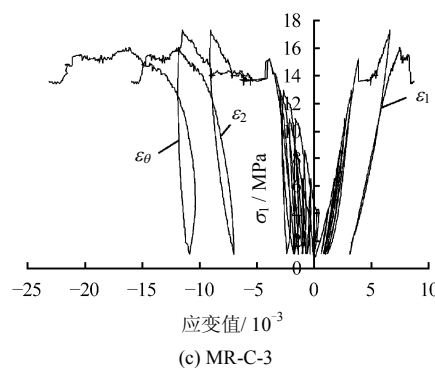
因为煤岩体内的大量的原生裂隙所致,如图8(a)和图9(a)。随着第2循环的进行,加卸载曲线依旧不重合,但残余变形相比第1循环有所减低,加卸载曲线形成“竹叶”状的曲线,曲线依旧不封闭,如图8(b)和图9(b)。随着循环加卸载的进行,加载和卸载曲线在逐渐靠近,并且这些曲线都是中部偏离



(a) MR-C-1



(b) MR-C-2



(c) MR-C-3

图7 分级加卸载条件下煤岩组合体变形破坏图
Fig.7 Stress-strain curves of coal-rock combination bodies under level cyclic loading-unloading

表3 分级荷载下煤岩组合体的基本物理力学参数
Table 3 Fundamental physico-mechanical parameters of coal-rock combination body under cyclic loading-unloading

试样编号	弹性模量 E / GPa	峰值强度 σ_c / MPa	峰值应变值 / 10^{-3}	
			轴向 ε_c	横向 ε_θ
MR-C-1	7.26	33.30	5.03	6.20
MR-C-2	7.29	31.99	4.98	2.27
MR-C-3	4.51	17.26	6.62	9.04

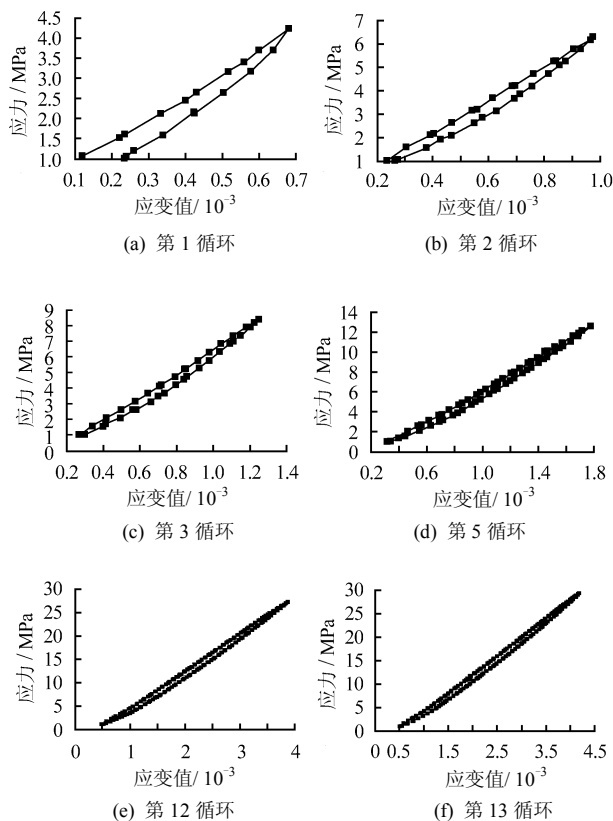


图8 MR-C-1不同循环阶段的动应力-应变曲线
Fig.8 Dynamical stress-strain curves of MR-C-1 at different cyclic stages

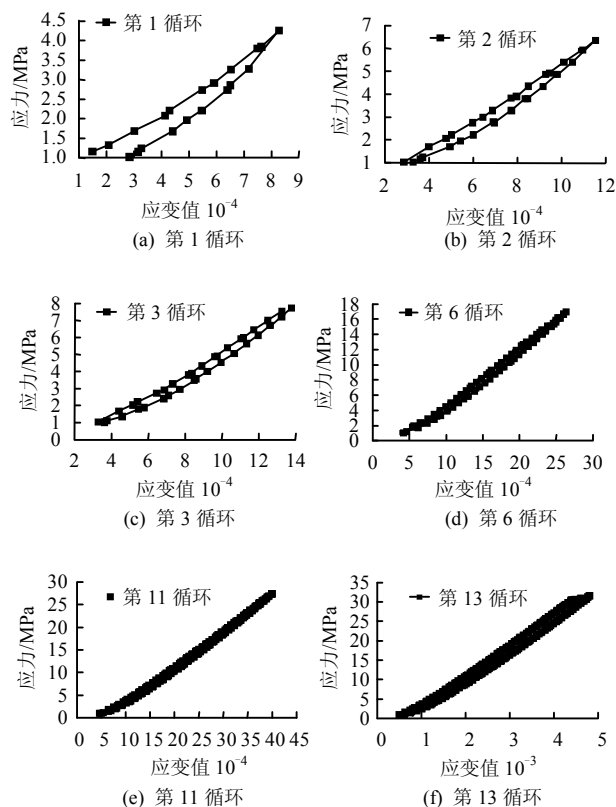


图9 MR-C-2不同循环阶段的动应力-应变曲线
Fig.9 Dynamical stress-strain curves of MR-C-2 at different cyclic stages

大, 每个循环阶段的最大和最小荷载处的呈尖状。笔者分析了所有分级加卸载后不可恢复的残余变形, 如图 10(a)、(c)所示, 可见随着循环荷载的进行, 累积残余变形是逐渐增加的。把下一循环的累积残余变形减去前一循环的累积残余变形获得相对残余变形, 如图 10(b)、(d)所示, 可以明显看出, 随着分级加卸载地进行, 相对残余变形在开始阶段是逐渐减少的, 初始时这个相对残余变形要大, 这主要是煤岩体内部存在大量的原生裂隙; 随着循环荷载地进行, 煤岩体内部逐渐被压密实, 使得这种滞后效应在逐渐降低, 并趋于稳定, 因此, 存在当煤岩体内这种黏滞效应降低到 0 时, 加卸载曲线才可能形成密闭环。当形成密闭环后, 代表了此时的煤岩体材料完全是脆性材料, 在加卸载之后不会残留残余变形。由于煤体通常较软, 因此, 这个循环之后不能持续太久, 如图 8(e)、9(e), 随着下 1~3 个加卸载循环, 煤体组合体加卸载循环的残余变形又可能增大, 这主要是超过了一个峰值荷载后, 煤岩体内又产生了新的次生裂隙, 并且这该变形具有不可恢复性, 这也是煤岩体内开始损伤劣化的标志, 也是组合体的破坏前兆。

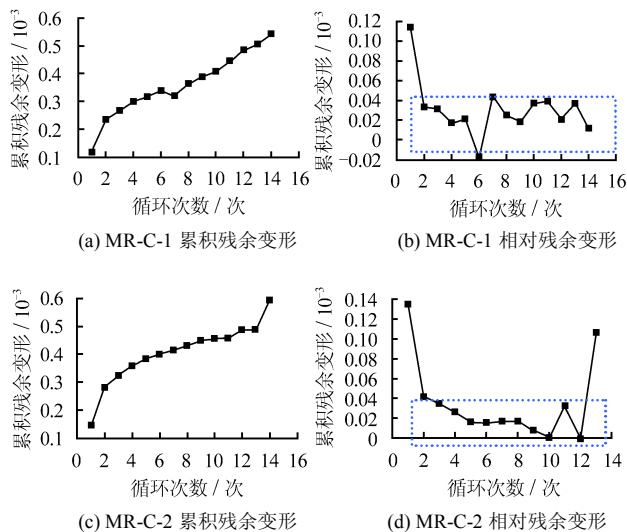


图10 典型不同循环阶段残余变形
Fig.10 Residual deformations of typical different stages

滞回环的面积表示了煤岩石内部体内产生了不可逆变形。对于不同应力状态下的分级加卸载循环试验中, 除了第 1 次循环到第 2 次循环所得到的塑性滞后环的残余变形较大外, 从第 2 次循环开始直到破坏为止, 残余变形可能将不会因循环次数的增加而产生较明显的变化, 如图 10(b)、(d)所示。对于分级加卸载循环试验, 随着循环次数的增加, 滞回环的面积逐渐增大, 该滞回环的面积代表了一

个循环过程煤岩组合体内能量耗散的多少, 因此, 由于分级加卸载应力水平提高, 不仅累计耗散在增加, 单个加卸载循环的能量耗散也可能在增加, 具体结果如图 11 所示。

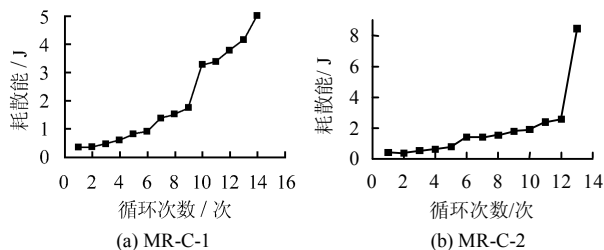
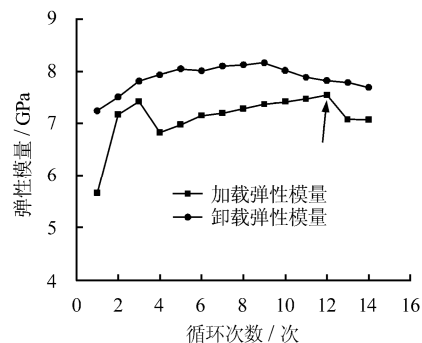


图 11 不同循环次数煤岩组合体的耗散能

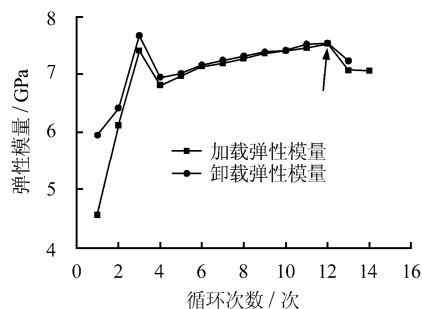
Fig.11 Dissipation energy of coal-rock combination body for different cycles

从图 8、9 可以看出, 每一循环加载与卸载过程煤岩组合体的应力-应变曲线均为下凸型, 随着分级加卸载的进行, 应力-应变滞回环不断向前推进, 这一方面是由于煤岩体材料自身的黏滞性质, 另一方面说明在加卸载过程中, 煤岩体内部原生裂隙存在不断地压密及扩展的循环过程, 当荷载超过一定极限时存在新裂纹的萌生和扩展, 最终导致煤岩组合体的整体破坏。卸载过程中, 原先被压密的微裂纹存储的弹性能可能被释放, 这导致了卸载线也不完全是直线, 反映在弹性模量上, 那就是弹性能的不断释放及煤岩体内部能量耗散, 导致岩石的有效弹性模量逐渐减小, 但在不同的加卸载阶段加卸载弹性模量的变化会有所不同。从图 12 可以看出, 在第 1 循环过程中, 加载弹性模量通常远远小于卸载弹性模量; 随着分级加卸载地进行, 加卸载弹性模量的逐渐靠近; 当加载弹性模量几乎等于卸载弹性模量时, 这时意味着此刻的煤岩组合体几乎是完全脆性材料, 随着加卸载地进行, 煤岩组合体加卸载弹性模量又逐渐分开, 这意味煤岩体又有新裂纹产生了, 是循环加卸载所累积的损伤导致岩石弹性模量的降低, 如图 12 中箭头所示, 这也是煤岩组合体发生最终破坏的前兆。可见在分级加卸载的过程中, 煤岩组合体的加载弹性模量经历了一个初始迅速增大, 随后缓慢增大, 最后缓慢降低的过程; 而卸载弹性模量变化相对比较平稳, 大致也是一个这样的过程。

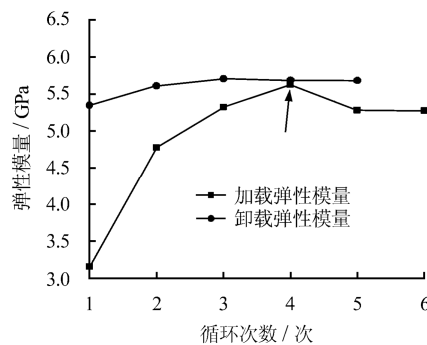
对于各分级加卸载应力-应变滞回环在卸载后再次加载时, 有文献认为, 在荷载翻转处应力-应变曲线是椭圆状的, 也有认为是尖叶状的^[6-20]。笔者把图 7 中卸载曲线再次加载的应力-应变曲线局部放大, 在翻转处的曲线形状是复杂的, 依据材料的



(a) MR-C-1



(b) MR-C-2



(c) MR-C-3

图 12 不同循环次数煤岩组合体的加卸载弹性模量

Fig.12 Load-unload elastic moduli of coal-rock combination body for different cycles

性质及试验机的刚性而有所不同。笔者认为, 上述的两种观点都是可能存在的, 认为是尖叶状的文献是把局部区域放大了, 而试验机记录的试验点是离散的, 因此, 卸载后再加载曲线连接起来肯定有尖点存在; 而认为是椭圆状曲线则是从宏观去把握, 例如从本文图 7(c)~(f)和图 8(c)~(f)则也可能认为其是椭圆状的, 因此, 从本质上讲, 文献中这些观点应该都没有错。笔者仔细分析了煤岩组合体试件的卸载到再次加载的这个过程, 有一点是值得注意的, 就是卸载到 1 MPa 附近时, 卸载线是波动的, 并且通常都是曲线, 这主要是卸载过程的煤岩体内可能诱发了卸荷裂纹并由此产生了非线性变形; 但在卸载后再次加载初期, 在一个重新加载的一个微小荷载变化范围内, 加载线几乎是直线, 有些加载

线与卸载线几乎重合,有些甚至与卸载线交叉。随着荷载的继续增加,加载线和上一个循环的卸载线逐渐分离,因此,在翻转处形成一个尖状的加卸载曲线,这也说明荷载翻转时煤岩组合体的弹性变形响应迅速,如图 13 所示。

由于岩石是黏滞材料,对于不同类型、不同饱和状态的岩石,其相位差是不同的,而相位差的大小反映了岩石偏离线弹性的程度,也就是循环荷载作用下滞后效应的强弱。为了方便比较两者的关系,把应变做了归一化的调整。本文把应变的初始值调

整为与应力的初始值相等。可以看出,对于煤岩组合体这种组合结构,在不同应力水平分级加载条件下其应力、应变与时间之间的关系如图 14 所示。图中显示,在初始阶段,应变几乎与应力是同步的,但随着加卸载的进行,应变相位稍微滞后于应力相位。煤岩组合体的滞后效应内因是因为岩石矿物颗粒间的黏滞性以及煤岩组合体界面之间的摩擦引起的,而外因是分级加卸载过程中的损伤所导致的不可恢复的残余变形。在破坏时应变相和应力相弯曲背离,即应变迅速加大,而应力则迅速降低。

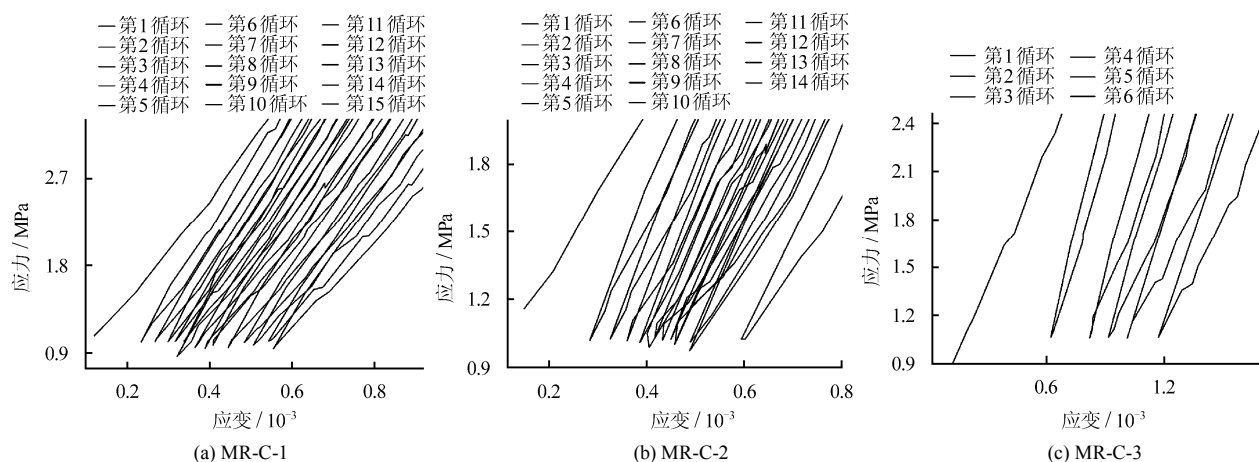


图 13 加卸载曲线图 7 局部放大图

Fig.13 Local enlarge figures of Fig.7 for load-unload curves

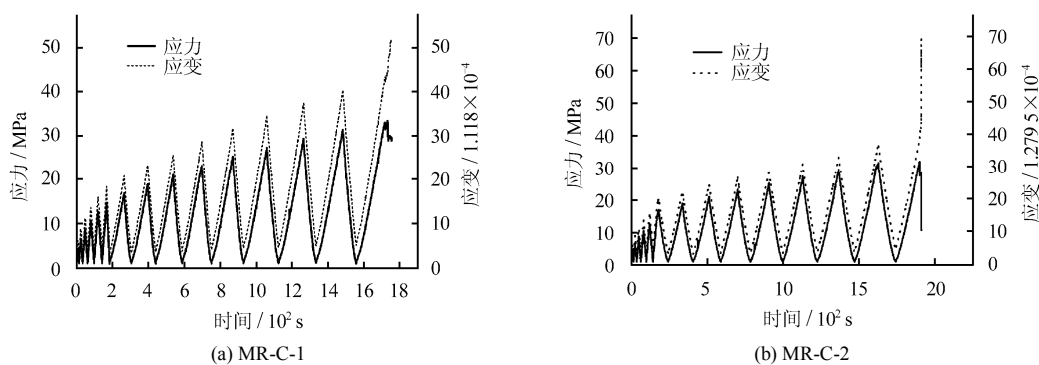


图 14 应力曲线和应变曲线滞后关系图

Fig.14 Lag relationships of stress and strain curves

5 结 论

(1) 单轴荷载和分级加卸载作用下,煤岩组合体的破坏都以脆性破坏机制为主,但分级荷载作用下煤岩组合体的破坏更为破碎,且煤岩组合体的整体强度相比单轴荷载下的强度有所提高,但轴向和环向应变却有所降低。

(2) 分级加卸载煤岩组合体同一循环中的加载曲线与卸载曲线不重合,卸载曲线与下一循环的加

载线也基本不重合。对于煤岩组合体这种黏滞性材料,大多情况下同一循环中的加卸载曲线几乎不形成闭合环路,当加卸载曲线几乎重合时,意味此时的煤岩组合体几乎是完全脆性材料;随着应力水平继续增加,煤岩组合体将发生破坏。

(3) 不同应力水平分级加卸载作用下煤岩组合体的残余变形经历了先迅速降低而后增加的过程;滞回环的面积表示了煤岩石内部体内发生了不可逆变形,随着循环次数的增加,滞回环的面积逐渐增

大,该面积代表了一个循环过程煤岩组合体内能量耗散的多少。

(4) 不同应力水平下分级加卸载作用下煤岩组合体的加载弹性模量经历了一个初始迅速增大,随后缓慢增大,最后缓慢降低的过程;而卸载弹性模量变化比较平稳,大致也是一个缓慢增加然后缓慢降低的过程,主要原因是不同阶段微裂纹可能处于闭合或者张开状态。

(5) 对于各循环卸载后再次加载时,在荷载翻转处应力-应变曲线形状是复杂的,这主要取决于材料的性质及试验机的刚度。对于煤岩组合体,卸载到 1 MPa 附近时,卸载线是曲线波折的,这主要是卸载过程中煤岩体内可能诱发了卸荷裂纹并由此产生的非线性特征;但在卸载后再次加载初期,在一个重新加载的一个微小荷载变化范围内,加载线几乎是直线,有些加载线与卸载线几乎重合,有些甚至与卸载线交叉。随着荷载的继续增加,加载线和上一个循环的卸载线逐渐分离,因此,在翻转处形成一个尖状的加卸载曲线,这也说明荷载翻转时煤岩组合体的弹性变形响应非常迅速。

(6) 随着分级加卸载的进行,初始阶段应变相与应力相开始同步,随后应变相位逐渐滞后于应力相位,内因可能是因为岩石矿物颗粒间的黏滞性以及煤岩组合体界面之间的摩擦引起的,而外因则可能是分级加卸载导致了煤岩体内部损伤由此产生不可逆的残余变形。

参考文献

- [1] PATERSON M S, WONG T F. Experimental rock deformation-the brittle field[M]. Berlin: Springer, 2005.
- [2] JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R W. Fundamentals of rock mechanics[M]. 4th ed. Oxford: Blackwell, 2007.
- [3] MOGI K. Experimental rock mechanics[M]. Taylor & Francis, 2007.
- [4] 林鹏, 唐春安, 陈忠辉, 等. 二岩体系统破坏全过程的数值模拟和试验研究[J]. 地震, 1999, 19(4): 413—418.
LIN Peng, TANG Chun-an, CHEN Zhong-hui, et al. Numerical and experimental study of deformation and failure behavior in a double rock specimen system[J]. **Earthquake**, 1999, 19(4): 413—418.
- [5] 刘建新, 唐春安, 朱万成, 等. 煤岩串联组合模型及冲击地压机理的研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 276—280.
- LIU Jian-xin, TANG Chun-an, ZHU Wan-cheng, et al. Rock-coal model for studying the rockburst[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(2): 276—280.
- [6] 葛修润, 卢应发. 循环荷载作用下岩石疲劳破坏和不可逆问题的探讨[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 56—60.
GE Xiu-run, LU Ying-fa. Discussion about coal's fatigue failure and irreversible problem under cyclic loads[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1992, 14(3): 56—60.
- [7] 殷有泉, 曲圣年. 房山大理岩本构性质的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(3): 240—248.
YIN You-quan, QU Sheng-nian. Experimental study on constitutive characteristic of marble[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1993, 12(3): 240—248.
- [8] 刘云平, 席道瑛, 张程远, 等. 循环应力作用下大理岩砂岩的动态响应[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 216—219.
LIU Yun-ping, XI Dao-ying, ZHANG Cheng-yuan. Dynamic response of marble and sandstone under rotational stress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(2): 216—219.
- [9] 许江, 王维忠, 杨秀贵, 等. 细粒砂岩在循环加、卸载条件下变形试验[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2004, 27(12): 60—62.
XU Jiang, WANG Wei-zhong, YANG Xiu-gui, et al. Experimental study on the deformation characteristics of fine-sandstone under the loading and unloading conditions[J]. **Journal of Chongqing University (Nature Science Edition)**, 2004, 27(12): 60—62.
- [10] 王鸿, 许江, 杨秀贵. 循环荷载条件下岩石塑性滞回环的演化规律[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(4): 80—82.
WANG Hong, XU Jiang, YANG Xiu-gui. Evolvement of plastic-loop of fine-sandstone under the loading and unloading conditions[J]. **Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)**, 2006, 29(4): 80—82.
- [11] SPENEER J W. Stress relaxation at low frequencies in fluid saturated rocks: Attenuation and modulus dispersion[J]. **J. Geophys. Res.**, 1981, 86(B3): 1803—1812.

- [12] HOLCOMB D J. Memory, relaxation, and microfracturing in dilatant rock[J]. **J. Geophys. Res.**, 1981, 86: 6235—6248.
- [13] MECALL K R, GUYER R A. Equation of state and wave propagation in hysteretic nonlinear elastic materials[J]. **J. Geophys. Res.**, 1994, 99: 23887—23897.
- [14] 席道瑛, 刘斌, 田象燕. 饱和岩石的各向异性及非线性黏弹性响应[J]. 地球物理学报, 2002, 45(1): 109—118.
- XI Dao-ying, LIU Bin, TIAN Xiang-yan. Anisotropy and nonlinear viscoelastic behavior of saturated rocks[J]. **Chinese J. Geophys.**, 2002, 45(1): 109—118.
- [15] TUTUNEU A N, PODIO A L, GREGORY A R, et al. Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rock. Part I: Hysteresis effect and influence of type of fluid on elastic moduli[J]. **Geophysics**, 1998, 63: 195—203.
- [16] 许江, 冯涛, 鲜学福, 等. 低应力水平下循环载荷对岩石杨氏模量影响的研究[J]. 湘潭矿业学院学报, 2001, 16(1): 14—16.
- XU Jiang, FENG Tao, XIAN Xue-fu, et al. Study on the effect of the circulate loading on the Young's modulus of rock in a low stress state[J]. **J. Xiangtan Min. Inst.**, 2001, 16(1): 14—16.
- [17] 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 Yun-ping, XI Dao-ying, XUE Yan-wei. Hysteresis and attenuation of saturated rocks under cyclic loading[J]. **Chinese J. Geophys.**, 2004, 47(4): 672—679.
- [18] 陈运平, 席道瑛, 薛彦伟. 循环荷载下饱和岩石的应力-应变动态响应[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(4): 409—413.
- CHEN Yun-ping, XI Dao-ying, XUE Yan-wei. Dynamic stress-strain response in saturated rocks under cycling load[J]. **Oil Geophysical Prospecting**, 2003, 38(4): 409—413.
- [19] 许江, 鲜学福, 王鸿, 等. 循环加、卸载条件下岩石类材料变形特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 3040—3045.
- XU Jiang, XIAN Xue-fu, WANG Hong, et al. Experimental study on rock deformation characteristics under cycling loading and unloading conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp. 1): 3040—3045.
- [20] 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 Yong-jie, 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.
- [21] NISHI K, KOKUSHAO T, ESSAHI Y. Dynamic shear modulus and damping ratio of rocks for a wide confining pressure range[C]//Proceedings of the Fifth Congress of International Society for Rock Mechanics. [S. l.]: [s. n.], 1983: 223—226.
- [22] 张勇, 孔令伟, 郭爱国, 等. 循环荷载下饱和软黏土的累积塑性应变试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1542—1548.
- ZHANG Yong, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Cumulative plastic strain of saturated soft clay under cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(6): 1542—1548.
- [23] 徐速超, 冯夏庭, 陈炳瑞. 砂卡岩单轴循环加卸载试验及声发射特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 2929—2934.
- XU Su-chao, FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui. Experimental study of skarn under uniaxial cyclic loading and unloading test and acoustic emission characteristics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(10): 2929—2934.
- [24] 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 Jian-feng, XIE He-ping, 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.
- [25] 左建平, 谢和平, 吴爱民, 等. 深部煤岩单体及组合体的破坏机制及力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 84—92.
- ZUO Jian-ping, XIE He-ping, WU Ai-ming, et al. Investigation on failure characteristics and mechanical behavior of deep coal-rock single body and combined body under different confining pressures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(1): 84—92.