

文章编号: 1673-3363-(2014)03-0456-06

三轴循环加卸载作用下煤样变形及强度特征分析

苏承东, 熊祖强, 翟新献, 顾明

(河南理工大学能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要 利用 RMT-150B 岩石力学试验机对煤样进行三轴循环加卸载试验, 对三轴循环加卸载条件下煤样的变形及强度特征进行分析。结果表明: 在三轴循环加载过程煤样的变形表现出明显记忆性, 循环加载过程的应力-应变外包络线与连续加载的应力-应变曲线相吻合。在煤样屈服前进行加卸载, 加载时弹性模量始终低于卸载时的弹性模量, 且随加卸载次数的增加, 加卸载时的弹性模量均有小幅增加, 过峰值后弹性模量与峰值前弹性模量相比有所减小, 但仍高于第 1 加载的弹性模量。三轴压缩条件下煤样的峰值强度、残余强度与围压成正比, 符合 Coulomb 强度准则。峰值强度、残余强度与围压回归得到的摩擦系数大致相当, 黏聚力则减低 54.4%。

关键词 岩石力学; 三轴压缩; 循环加载; 变形特征; 强度特征

中图分类号 TU 458

文献标志码 A

Analysis of deformation and strength characteristics of coal samples under the triaxial cyclic loading and unloading stress path

SU Chengdong, XIONG Zuqiang, ZHAI Xinxian, GU Ming

(School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract The triaxial cyclic loading and unloading is conducted on the coal sample through RMT-150B rock mechanics testing system. The deformation and strength characteristics of the coal samples during the tests are analyzed. The results show that during the tri-axial cyclic loading the coal sample deformation shows distinct memory and good fitting in stress-strain curve between the cyclic loading and the continuous loading. For loading and unloading prior to yield, the elastic modulus of loading procedure is always lower than the elastic modulus of unloading procedure. And the elastic modulus increased slightly with the frequency. The elastic modulus of unloading procedure after peak value is lower than that before peak value; however, the elastic modulus is still higher than that of first loading procedure. The peak strength and residual strength are proportional to the confining pressure during triaxial compressive test, which is consistent with the Coulomb strength criterion. The friction factor obtained from the regression analyses of the peak strength, residual strength and confining pressure are roughly equal and the cohesion is reduced by 54.4%.

Key words rock mechanics; triaxial compression; cyclic loading; deformation characteristics; strength characteristics

收稿日期: 2013-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51074065); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2012CB723103)

作者简介: 苏承东(1961-), 男, 陕西省佛坪县人, 教授级高工, 从事采矿工程方面的研究。

E-mail: sucd@hpu.edu.cn

Tel: 0391-3986261

煤矿井下开采过程中，由于生产工艺和地质构造等因素的影响，需要留设起不同类型支撑和隔离作用安全煤柱，煤柱要受到采动应力的反复作用，这些煤柱安全稳定与否对于煤矿井下采场顶板及地表建筑物安全和环境保护具有决定性的作用；再如，采煤工作面回采过程中，前方煤体受上覆基本顶岩层结构周期破断的影响，在工作面超前移动支承压力表现出明显的周期性。由于煤体在循环荷载作用下的强度和变形规律与静态荷载作用下有所不同，有必要对煤体在循环加卸载作用下的变形及强度特征进行深入研究。

对于循环加卸载作用下岩石的变形及强度特征进行了一些研究^[1-16]。杨永杰等^[1]研究认为煤样在循环荷载作用下比其他坚硬岩石更容易发生疲劳破坏，单轴循环荷载作用下煤样的疲劳破坏门槛值不超过其单轴抗压强度的81%，煤样轴向变形可划分3个阶段，横向变形可划分为2个阶段；席道瑛^[2]通过岩石宏观应力-应变滞回曲线对周期载荷的响应，分析岩石微细观损伤的演化过程；金济山等^[3]分析认为大理岩的残余强度、弹性模量与围压及循环加卸载次数有关。葛修润等^[4-9]通过大量疲劳试验证明：岩石的疲劳破坏轴向变形量受到岩石单轴应力应变全过程线的控制，循环荷载作用下单轴压缩岩石轴向变形的发展可以分为初始阶段、稳定阶段和加速阶段等3个阶段。许江等^[10]对细砂岩不同参数循环荷载作用下的变形特性进行了研究，认为岩石变形的响应程度与加载速率和载荷水平关系密切。余贤斌等^[11]等利用自制具有单轴压缩和直接拉伸功能的试验装置，对5种岩石进行了压、拉伸循环加载试验，试验结果是3种岩石压缩平均模量大于拉伸平均模量，而拉伸卸载平均模量与压缩平均模量大致相当；尤明庆等^[12-13]试验结果认为循环加卸载可使岩样的强度增加5%~10%，随着循环加载应力水平及循环次数的增加，弹性模量有所增加的规律；苏承东等^[14]对煤样常规三轴与三轴卸围压试验，煤样峰值强度与围压符合Coulomb强度准则，围压影响系数基本相同，表明内摩擦角能够表征材料的力学性质，与加载方式没有关系；苏承东和尤明庆^[15]对大理岩和砂岩分别提出单一岩样确定强度参数的方法，对大理岩采用逐级提高围压的加载、砂岩采用高围压下轴向压缩破坏之后，保持试样轴向压缩变形恒定降低围压的方法，确定Coulomb强度参数。

煤样含大量原生节理裂隙等缺陷，受循环加卸载呈现变形及强度特征与其他岩石材料有所不同。鉴于此，本文采用RMT-150B岩石力学试验机对煤样进行不同围压常规三轴、三轴循环加卸载试验，分析三轴循环加卸载作用下煤样的变形及强度特征，研究成果对于受采动影响条件下煤柱尺寸合理留设及工作面前方煤体稳定性分析具有重要指导意义。

1 煤样特征及试验方法

1.1 煤样特征

从工作面煤壁上选取比较完整大煤块，在室内沿垂直层理方向采用密集布孔钻取，加工成直径为50 mm，长度为100 mm的圆柱体煤样。煤样两端不平行度小于0.05 mm，加工精度满足规程^[17]的要求，自然密度在1 359~1 411 kg/m³之间，平均密度为1 382 kg/m³。煤样具有明显层状结构，端面可以看出有纵横交错的节理裂隙，见图1，表明裂隙比较发育。为了减小试验结果的离散性，从制备10个标准煤样中，用声波测试筛选出6个波速值接近的煤样进行试验。



图1 试验煤样照片

Fig.1 Coal specimens

1.2 试验设备

试验加载设备采用RMT-150B岩石力学试验系统，采用1 000 kN力传感器测量轴向载荷，5 mm传感器测量轴向压缩变形量，50 MPa压力传感器测量围压值。全数字计算机自动控制，采用力、位移、行程多种控制方式，试验过程自动采集载荷、变形和围压，实时显示。

1.3 试验方法

常规三轴压缩试验：加载初期，采用力控制同时施加轴压与围压至预定值(围压分别为5, 8和15 MPa)，加载速率为0.5 MPa/s。而后在保持围压恒定条件下，控制方式改为位移控制，加载速率为0.005 mm/s，连续施加轴压至煤样完全破坏。

三轴循环加卸载试验：加载初期方式与常规三轴试验相同，在恒围压期间，采用位移控制，加载速率为 0.005 mm/s，在加载至不同载荷水平进行卸载 2~3 次至煤样完全破坏。

2 试验结果分析

2.1 变形特征

图 2 是煤样在常规三轴、三轴循环加卸载试验全程应力-应变对比曲线。从图 2 中可看出，煤样三轴压缩过程中均经历压密、弹性、屈服和破坏 4 个阶段。

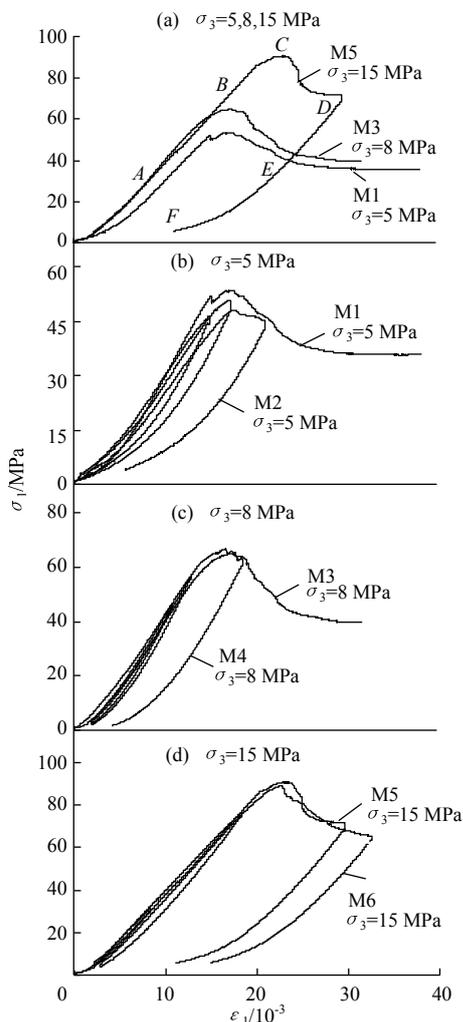


图 2 煤样三轴压缩全程应力-应变曲线
Fig.2 Coal specimens complete stress-strain curve under triaxial compression

分析图 2a 中，与煤样 M3 和 M5 相比，煤样 M1 压密阶段更加明显，说明围压较低时静水加载阶段不足以完成原生节理裂隙全部压密过程。随着围压增加压密阶段变短，峰值前屈服阶段逐渐明显，即峰值前有明显塑性变形，峰值应变逐渐增加，

峰值强度点逐渐后移，峰值强度增加。表明围压能够促使原有裂隙闭合，抑制裂隙滑移，围压越高压密阶段越不明显。围压对煤样弹性阶段变形的影响不大，不同围压作用下弹性阶段表现出良好线性特征，加载过程中煤样的变形包含了材料弹性变形和塑性变形，颗粒弹性变形卸载过程得以恢复，见图 2a 的 M5 煤样峰值后卸载的 DE 段。部分塑性变形在完整材料附近的闭合裂隙受其弹性恢复而张开，如图中 EF 段。而难以恢复颗粒间滑移变形和裂隙闭合称之为塑性变形或不可逆永久变形，煤样卸载后存在较大塑性变形 OF 段。煤样在围压作用下的峰后塑性特征明显，变形特征相似均具有明显残余强度，在围压作用下峰后滑移变形持续增加而承载能力大致保持不变，表明峰后在围压作用下抑制裂隙滑移，靠摩擦能够继续承载。

从图 1 中可以看出，煤样内部含有大量不同方向原始微裂隙，并且颗粒之间存在孔隙，在三轴压缩过程产生轴向变形中，包括矿物颗粒骨架的弹性变形、裂隙的滑移和孔隙的闭合 3 部分。围压不同裂隙间摩擦特征不同，从而影响煤样变形特征。三轴压缩加载过程中的塑性变形包含了颗粒之间摩擦滑移和孔隙闭合，摩擦力对煤样变形的作用明显。围压能使煤样内部裂隙得以部分闭合，裂隙之间发生滑移，随着围压增高时裂隙闭合更加充分，发生滑移的裂隙较少，因而煤样产生轴向变形减小，从而具有较高的弹性模量，表现出煤样抗变形能力随围压的增加而逐步提高。

对于围压 5 MPa 循环加卸载作用下的煤样 M2 来讲，见图 2b。第 1 次加载进行到 46.26 MPa 开始卸载，为峰值强度的 90.7%，尽管已经进入屈服阶段，卸载初期仍表现弹性特征，应力与应变大致呈线性变化，当应力低于 20 MPa 以后，应力与应变呈非线性变化，最终应力降至零时应变基本恢复，没有出现明显残余应变，可以解释为卸载后完整材料附近闭合裂隙受弹性恢复而张开。第 2 次轴向应力加载至 50.66 MPa 时，正好处于峰值处，在转换加载方式时出现瞬时应力降，而后应力与应变又大致成线性降低。第 3 次峰后加载进行到 47.99 MPa 时，明显低于峰值应力 50.66 MPa 出现宏观滑移煤样破坏，在应力跌落到 44.62 MPa 时，再次进行卸载，尽管过峰卸载煤样仍表现一定弹性特征，卸载模量与加载时大致相同。

对于围压 8 和 15 MPa 循环加卸载作用下煤样

M4 和 M6, 见图 2c, d。在峰值前不同应力条件下加、卸载 2 次, 最后 1 次加载应力分别为 56.43, 76.44 MPa, 分别为峰值强度的 84.2%和 85.9%, 也已进入屈服阶段, 由于围压较高, 在卸载过程中煤样压密闭合裂隙没有及时张开, 因而煤样循环加载过程中存在一定残余应变。当过峰值强度后完全屈服弱化后再进行卸载, 将会出现较大不可逆残余变形, 其不可逆变形量约为峰值前塑性变形和峰值后滑移变形量之和, 煤样 M4 和 M6 循环加、卸载过程应力-应变的外包络线几乎与煤样 M3 和 M5 连续加载全程的应力-应变曲线基本重合。

从图 2b~d 中可看出: 在三轴循环加、卸载过程的变形特征表现出明显记忆性, 加、卸载过程的应力-应变外包络线与连续加载的全程应力-应变曲线相吻合, 而加、卸载路径不能完全重复, 加、卸载应力-应变曲线之间始终具有滞回环, 也就是说应力和应变并不存在一一对应关系^[15]。这表明煤样加载过程的应力-应变线性特征并不意味着弹性特征。弹性模量表征应力与应变比值关系, 可见加卸载过程中的弹性模量并非一致。三轴压缩作用下弹性模量按下式计算^[17]:

$$E = \frac{(\Delta\sigma_1 + 2\Delta\sigma_3)(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)}{\Delta\sigma_3(\Delta\varepsilon_1 - 2\Delta\varepsilon_3) + \Delta\varepsilon_1\Delta\sigma_1} \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量, MPa; $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_3$ 分别为轴向应力和围压增量, MPa; $\Delta\varepsilon_1$, $\Delta\varepsilon_3$ 分别为轴向应变和横向应变增量。在三轴压缩试验时, 围压保持恒定(即 $\Delta\sigma_3=0$), 以恒定速率进行加卸载试验过程中。将 $\Delta\sigma_3=0$ 代入(1)式得出:

$$E = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_1} \quad (2)$$

由于试验机伺服控制加载过程中应力-应变曲线可能存在波动, 计算区间稍有变化, 结果就会发生明显变化。为此, 采用加卸载过程中轴向应力-轴向应变直线段的数据进行线性拟合作为弹性模量比较合适。

表 1 给出 6 个煤样三轴循环加卸载过程弹性模量计算结果, 从表中可以看出, 围压对煤样的弹性模量影响不大, 而加载路径对弹性模量有较大影响, 为了便于比较, 图 3 给出煤样 M2, M4 和 M6 循环加卸载过程弹性模量的变化情况。从图 3 中不难看出, 3 个煤样的弹性模量与加载路径有关, 随加载路径变化趋势一致, 大致呈波浪形。在煤样屈服前加卸载时, 加载过程的弹性模量始终低于卸载

过程的弹性模量, 且峰值前随加卸载次数的增加, 加卸载的弹性模量均有小幅增加, 过峰值后弹性模量与峰值前弹性模量相比有所减小, 但仍高于第 1 次加载的弹性模量。

表 1 煤样三轴循环加卸载弹性模量的测定结果
Table 1 Determination results of coal sample triaxial cyclic loading and unloading elastic modulus

煤样编号	D/mm	H/mm	E/GPa					
			加载	卸载	加载	卸载	加载	卸载
M1	50.0	101.4	4.55					
M3	49.4	100.5	5.12					
M5	50.3	100.8	4.66					
M2	49.0	101.6	3.74	4.72	3.75	4.62	3.47	4.14
M4	50.3	100.8	4.83	5.96	5.52	6.31	5.58	5.99
M6	50.3	98.4	4.37	4.82	4.52	5.31	4.78	4.63

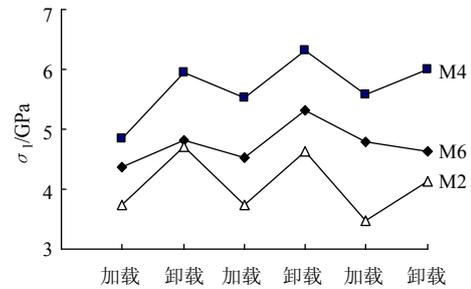


图 3 三轴循环加卸载过程弹性模量的变化

Fig.3 Changes of elastic modulus during triaxial cyclic loading and unloading process

2.2 强度特征

表 2 给出 6 个煤样常规三轴、三轴循环加卸载的试验结果。表 2 中: σ_3 为围压值, σ_1 , σ_c 为峰值和残余强度, E 为弹性模量, φ 为内摩擦角, c 为黏聚力。

表 2 煤样三轴压缩的试验结果
Table 2 Results of coal specimens under triaxial compression

煤样编号	加载方式	σ_3 /MPa	σ_1 /MPa	σ_c /MPa	E /GPa	φ /°	c /MPa
M1	常规三轴	5.0	53.54	<u>25.70</u>	4.55	34.0	4.09
M3		8.0	64.88	<u>39.94</u>	5.12		
M5		15.0	90.78	<u>69.60</u>	4.66		
M2	三轴加卸载	5.0	50.66		3.74	35.2	8.97
M4		8.0	66.99		4.83		
M6		15.0	89.00		4.37		

注: 画横线为残余强度及回归结果

便于比较图 4 给出了煤样峰值强度、残余强度与围压的关系。从表 2 和图 4 可看出, 煤样峰值强

度、残余强度与围压呈正比关系，两条直线大致平行，随着围压增加峰值强度、残余强度明显增大。这是由于煤样强度提高根源于材料承载能力的增加，随着围压的增大滑移阻力增大，从而煤样强度得以提高。

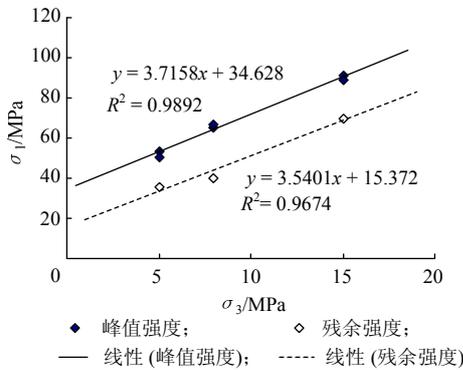


图 4 三轴压缩煤样峰值(残余)强度与围压的关系

Fig.4 Relationship between peak (residual) strength and confining pressure during triaxial compression

依据 Coulomb 强度准则

$$\sigma_1 = Q + K\sigma_3 \quad (3)$$

式中： σ_1 为峰值强度(或残余强度)； Q 、 K 为材料强度参数，与内摩擦角 φ ，黏聚力 c 的关系为

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{K-1}{K+1}\right) \quad (4)$$

$$c = \frac{Q(1-\sin\varphi)}{2\cos\varphi} \quad (5)$$

对常规三轴和循环加卸载不同围压作用下 6 个煤样的峰值强度进行线性联合回归，得到 Q 为 34.63 MPa， K 为 3.716，按式(4)，(5)进行计算，内摩擦角为 35.2° ，黏聚力为 8.97 MPa。对常规三轴压缩不同围压作用下，3 个煤样的残余强度进行线性回归，得到 Q 为 15.37 MPa， K 为 3.540，按式(4)，(5)进行相同计算，内摩擦角为 34.0° ，黏聚力为 4.09 MPa。不难发现，与峰值强度回归参数相比，残余强度回归得到的内摩擦角相差不大，摩擦系数大致相当，降低系数为 3.4%，而黏聚力则降低明显，降低系数为 54.4%。这与尤明庆等^[16]对煤样三轴压缩试验结果分析是一致的，摩擦系数是材料参数，黏聚力 c 与煤样内部最弱面的特征有关，在煤样破坏前后存在较大差异，即黏聚力结构参数。

2.3 破坏特征

图 5 是煤样三轴压缩试验的破坏形态。从图 5 可以看出：不同围压作用下煤样破坏形态有所不同，围压低于 8.0 MPa 时煤样出现剪胀破坏，破裂

面较复杂，剪切滑移破坏过程中伴随有胀性裂纹，局部具有拉伸破坏特征。在围压 15.0 MPa 作用下，煤样破坏形式趋于简单，出现 1 个或 2 个剪切面，通常呈对角破坏，多数煤样起裂一端。煤样破坏特征与原始节理裂隙、围压关系密切，与应力路径关系不大。

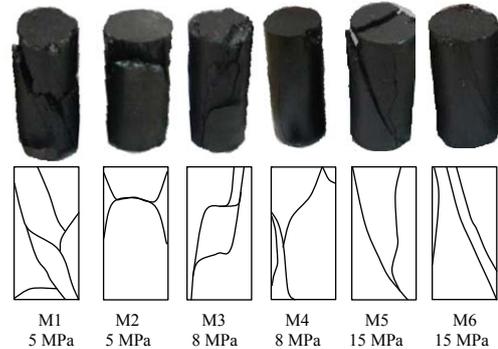


图 5 煤样三轴压缩的破坏形态

Fig.5 Failure mode of coal specimens after triaxial compression

3 结 论

1) 在三轴循环加载过程的变形表现出明显记忆性，循环加载过程的应力-应变外包络线与连续加载的应力-应变曲线相吻合。

2) 在煤样屈服前进行加卸载，加载时弹性模量始终低于卸载时的弹性模量，且峰值前随加卸载次数的增加，加卸载的弹性模量均有小幅增加，过峰值后弹性模量与峰值前弹性模量相比有所减小，但仍高于第 1 加载的弹性模量。

3) 三轴压缩煤样的峰值强度、残余强度与围压成正比，符合 Coulomb 强度准则。峰值强度、残余强度与围压回归得到的摩擦系数大致相当，黏聚力则降低 54.4%，表明摩擦系数材料参数，黏聚力结构参数。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 席道瑛, 刘小燕, 张程远. 由宏观滞回曲线分析岩石的微细观损伤[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 182-187.
XI Daoying, LIU Xiaoyan, ZHANG Chengyuan.

- Analysis on micro and meso-damage of rock by macro-hysteresis curve[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 182-187.
- [3] 金济山, 石泽全, 方华, 等. 在三轴压缩下大理岩循环加载实验的初步研究[J]. 地球物理学报, 1991, 34(4): 488-494.
JIN Jishan, SHI Zequan, FANG Hua, et al. A preliminary study on cyclic loading experiments of marble under triaxial compression[J]. Acta Geophysica Sinica, 1991, 34(4): 488-494.
- [4] 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.
- [5] 章清叙, 葛修润, 黄铭, 等. 周期荷载作用下红砂岩三轴疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 473-478.
ZHANG Qingxu, GE Xiurun, HUANG Ming, et al. Testing study on fatigue deformation law of red-sandstone under triaxial compression with cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 473-478.
- [6] 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 of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(3): 56-60.
- [7] 任建喜, 蒋宇, 葛修润. 单轴压缩岩石疲劳寿命影响因素试验分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1282-1285.
REN Jianxi, JIANG Yu, GE Xiurun. Test and analysis on rock fatigue life due to affecting factors under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1282-1285.
- [8] 葛修润. 周期荷载下岩石大型三轴试件的变形和强度特性研究[J]. 岩土力学, 1987, 8(2): 11-19.
GE Xiurun. Study on deformation and strength characteristics of large-scale triaxial test sample of rock under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 1987, 8(2): 11-19.
- [9] 林卓英, 吴玉山. 岩石在循环荷载作用下的强度及变形特性[J]. 岩土力学, 1987, 8(3): 31-37.
LIN Zhuoying, WU Yushan. Rock's characteristic of strength and deformation under cyclic loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 1987, 8(3): 31-37.
- [10] 许江, 杨秀贵, 王鸿, 等. 周期性载荷作用下岩石滞回曲线的演化规律[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(6): 754-758.
XU Jiang, YANG Xiugui, WANG Hong, et al. Evolution law of hysteresis curve of rock under cyclic loading[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(6): 754-758.
- [11] 余贤斌, 谢强, 李心一, 等. 岩石直接拉伸与压缩变形的循环加载实验与双模量本构模型[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 988-993.
YU Xianbin, XIE Qiang, LI Xinyi, et al. Cycle loading tests of rock samples under direct tension and compression and bi-modular constitutive model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 988-993.
- [12] 尤明庆, 苏承东. 大理岩试样循环加载强化作用的试验研究[J]. 固体力学学报, 2008, 29(1): 66-72.
YOU Mingqing, SU Chengdong. Experimental study on strengthening of marble specimen in cyclic loading of uniaxial or pseudo triaxial compression[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2008, 29(1): 66-72.
- [13] 苏承东, 杨圣奇. 循环加卸荷下岩样变形与强度特征试验[J]. 河海大学学报, 2006, 34(6): 667-671.
SU Chengdong, YANG Shengqi. Experimental study on deformation and strength characteristics of rock specimens under cyclic loading and unloading[J]. Journal of Hohai University, 2006, 34(6): 667-671.
- [14] 苏承东, 翟新猷, 李永明, 等. 煤样三轴压缩下变形和强度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊1): 2964-2968.
SU Chengdong, ZHAI Xinxian, LI Yongming, et al. study on deformation and strength of coal samples in triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup1): 2964-2968.
- [15] 苏承东, 尤明庆. 单一试样确定大理岩和砂岩强度参数的方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3055-3058.
SU Chengdong, YOU Mingqing. Determination method of strength parameters for sandstone and marble with one specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3055-3058.
- [16] 尤明庆, 苏承东, 周英. 不同煤块的强度变形特征及强度准则的回归方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 2081-2085.
YOU Mingqing, SU Chengdong, ZHOU Ying. Strength and deformation of specimens for different coal blocks and regression method of strength criteria[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(12): 2081-2085.
- [17] 中华人民共和国煤炭工业部. 煤与岩石物理力学性质测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, GB/T23561. 7-2009: 2-4.