

文章编号: 1673-3363-(2014)02-0292-07

单轴循环载荷与渗透水压下预应力裂隙 岩石破坏试验研究

周志华^{1,2}, 曹平¹, 叶洲元², 赵延林², 万文²

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南科技大学能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要 为研究受地应力与渗透水压耦合作用下的深部岩体受到爆破等动力扰动的力学响应, 研制了渗透水压加载装置, 对含裂纹类岩石材料的混凝土试样加载预应力后, 进行有渗透水压作用和无渗透水压作用下单轴循环加载卸载压缩破坏对比试验。试验结果表明, 在试样弹性阶段加载有限次循环载荷有助于类岩石材料的强化; 在有渗透水压作用下, 单轴循环加载卸载后岩石的强度降低, 降低的程度与循环载荷加载时预应力的大小有关, 在弹性阶段加载循环载荷的岩石强度高于在损伤阶段加载循环载荷的岩石强度, 而且在渗透水压作用下岩石的应变大于无渗透水压作用下岩石的应变。具有岩爆倾向性的岩石可以通过加载、卸载产生损伤以降低其岩爆倾向性, 同时低渗透水压的作用可使岩爆降低程度更剧。

关键词 动静组合载荷; 渗透水压; 单轴循环载荷; 深部岩体

中图分类号 O 319.56

文献标志码 A

Failure characteristics of prestress fractured rock under uniaxial cyclic loading and seepage water pressure

ZHOU Zhihua^{1,2}, CAO Ping¹, YE Zhouyuan², ZHAO Yanlin², WAN Wen²

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;
2. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract In this paper, to reveal the mechanical response of deep rock under the coupled action of ground stress and seepage water pressure when facing dynamic disturbance such as blasting, the seepage pressure loading device was developed, and the uniaxial cyclic loading tests of prestress fractured concrete samples, coupling with and without seepage water pressure, were carried out respectively. The results show that the limited uniaxial cyclic loading is helpful to the strengthening of concrete material when it is in the elastic stage. Under the action of seepage water pressure, the rock strength is reduced after the uniaxial cyclic loading, while the reduction degree is related to the prestress of cyclic loading. Meanwhile, when the cyclic loading is compressed in the elastic stage, the rock strength is higher than that when cyclic loading is compressed in the damage stage. In addition, the rock strain under the action of seepage water pressure is greater than that without seepage water pressure. Therefore, the burst proneness of rock mass can be reduced by the action of cyclic loading and unloading, and the low seepage water pressure can further decrease the rock burst proneness.

收稿日期: 2013-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174228, 51274097, 51204068); 湖南省自然科学基金项目(12JJ6045)

作者简介: 周志华(1978-), 女, 湖北省仙桃市人, 博士研究生, 讲师, 从事采矿工程方面的研究。

E-mail: zhouzhihua@126.com

Tel: 0731-58290040

Key words coupling of static and dynamic loading; seepage water pressure; uniaxial cyclic loading; deep rock mass

随着矿产资源需求量的增加和开采强度的不断加大,浅部资源日益减少,国内外矿山都相继进入深部资源开采状态,深部岩石力学问题日益突出。深部岩体处于高地应力和高渗透水压作用状态,围岩表现出固液耦合、损伤断裂和突然失稳等特点。

大量工程实践表明,地下岩体工程施工过程中,岩石的反复加载和卸载^[1]过程经常发生。E. Eberhardt^[2]指出,地下工程围岩体在施工等多种因素作用下处于反复加卸载过程中,深部岩石破坏实质是其内部微裂纹在高应力作用下不断扩展累积。在岩石单轴循环加卸载的力学特性研究方面, E. Eberhardt 等进行了大量脆性岩石单轴压缩循环加卸载试验^[3],分析了单轴循环加卸载过程中脆性岩石断裂损伤力学特性;徐速超等^[4]对单轴循环加卸载下砂卡岩的强度和变形特性进行了分析,认为岩样的强度随着加卸载循环从无到有及循环的次数的增加有明显提高;尤明庆等^[5]进行了多种应力路径下岩石的加卸载试验,发现围压和轴向应力的加载、卸载可使岩石类材料呈现强化现象;尤明庆、苏承东等^[6]进行了不同晶粒大理岩单轴循环加卸载试验,分析得到,轴向应力在极限承载能力的40%以下,加载和卸载时平均杨氏模量随循环应力水平增加均有不同程度的增加;苏承东、席道瑛^[7]、许江等^[8]进行了岩石单轴循环加载破坏试验,分析发现岩石弹性模量等力学参数与循环次数的对应关系;徐建光等^[9]对含2~3条预制裂隙的类岩石材料试样进行了单轴循环加卸载试验,分析其变形规律;邵鹏等^[10]研究了断续节理岩体中应力波动力效应;李清等^[11]应用爆炸加载的透射式动焦散线测试系统,分析了平板中预制贯通裂纹在爆炸应力波作用下端部衍生分支裂纹及爆炸主裂纹的扩展规律。

对于深部围岩在高地下水压作用下表现出固液耦合、损伤断裂和突然失稳等特点,目前已有的一些研究成果:曹平等^[12-13]通过试验探讨了渗透水压作用下黏弹性压剪岩石裂纹的起裂规律及分支裂纹尖端应力强度因子的演变规律。汤连生等^[14]对水、岩作用的岩石宏观力学与断裂力学效应进行了试验研究。黄明利等^[15-17]在压剪条件下对岩石裂纹的起裂、贯通机制进行了大量试验和理论研究。李

夕兵等^[18]对渗透水压和远场应力共同作用下张开型裂纹的启裂规律及裂纹尖端应力强度因子的演化规律进行了研究。陈卫忠等^[19]通过实验和数值模拟手段详细地研究了闭合裂纹在单轴、双轴载荷作用下裂隙扩展、贯通的规律。冯夏庭等^[20]通过不同应力状态下的试验,考察了岩石破裂特性的化学环境侵蚀作用。

综上所述,国内外研究成果主要集中在岩体单一的加卸载力学行为或单一的裂隙扩展,未涉及到加卸载过程中裂隙扩展渗流问题。因此,笔者利用实验室条件开展单轴循环加卸载下渗透水压压剪预应力裂隙岩石破坏试验研究,以模拟地应力与水压耦合作用下岩体受开挖卸载的过程,探寻其破坏机理。

1 试验系统

试验系统是在 RMT-150C 试验机基础上改进的,在上压头下加一渗透水压加载装置,试验系统如图1,2所示。RMT-150C 试验机本身可以设置某一加压水平,再改用波动加载,以实现循环加卸载功能。

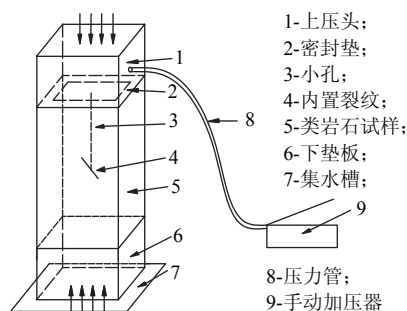


图1 渗透水压加载装置试验测试系统示意图

Fig.1 Test system of loading seepage water pressure device

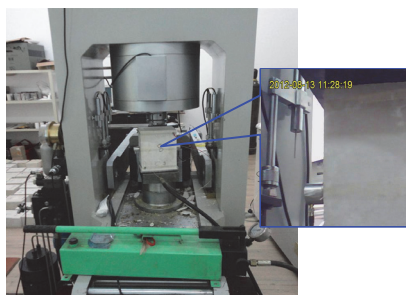


图2 试验测试系统实体

Fig.2 Test system

2 试验方案

2.1 试件制作

为了模拟裂隙岩体内裂隙扩展,本试验采用与岩石相似(脆性、剪胀)的模型材料(由白水泥、沙子、水组成)制作类岩石模型试样。采用的模型材料配比为,白水泥:沙子:水=2:1:1(体积比),沙子为 1 mm 筛下沙。裂纹用纸片代替,宽 3 cm,长 5 cm。试件尺寸:长×宽×高=20 cm×16 cm×10 cm。脱模后的试件放入自来水中养护 28 d。

2.2 单轴抗压强度的测定

通过试验测得试件的单轴抗压强度:用 3 块同样的试件测单轴抗压强度,分别为 31.2、29.6 和 33.0 MPa,取其平均值作为该种试件的抗压强度,即为 31.3 MPa。其单轴抗压全应力-应变曲线如图 3。

从图 3 可看出,混凝土试样的全应力-应变可分为 6 个阶段:OA 段,试样压密阶段,范围为 0~5.5 MPa 左右;AB 段,线弹性阶段,范围为 5.5~19.5 MPa 左右;BC 段,微损伤阶段,范围为 19.5~25 MPa 左右;CD 段,破坏阶段,范围为 25~31.2 MPa 左右;DE 段,软化阶段,范围为 31.2~17.5 MPa 左右;E 以后,残余强度阶段。

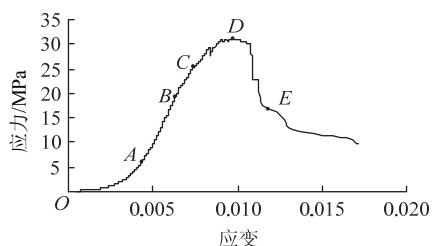


图 3 单轴抗压应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve with uniaxial compression

2.3 循环载荷下岩石破坏试验

1) 方案一:渗透水压弹性阶段加载循环载荷试验

① 按照图 1 安装好试件;② 通过注水孔给试件中裂纹充满水,将裂隙中的空气排出;③ 给试件加载至预定轴压:单轴抗压强度的 20%,对应应力为 6.26 MPa,对应试验中的实际加载力为 100 kN;④ 再通过手动加压泵给试件裂隙加载水压至预定压力 1.5 MPa;⑤ 在预定轴压的基础上给试件加载循环载荷,固定循环 20 次;⑥ 经过一定次数的循环加卸载后,直接加大轴向压力至试件破坏。绘出全应力-应变曲线。

2) 方案二:无渗透水压弹性阶段加载循环载荷

试验

为方案一对应不加渗透水压的对比试验。

3) 方案三:渗透水压下损伤阶段加载循环载荷试验

和方案一类似,只是在步骤③处改为,给试件加载至预定轴压:单轴抗压强度的 70%,对应应力为 21.91 MPa,对应试验中的实际加载力为 350 kN。

4) 方案四:无渗透水压损伤阶段加载循环载荷试验

为方案三对应不加渗透水压的对比试验。

针对上述 4 个试验方案,每个试验方案进行 3 次试验,共进行 12 组试验。测定不同试验方案抗压强度,绘出全应力-应变曲线。

试验在中国科学院武汉岩土力学研究所研制的 RMT-150C 型岩石力学刚性伺服试验机上进行(见图 2)。循环加卸载载荷幅值为 50 kN,频率为 1 Hz,其加载波形曲线如图 4。

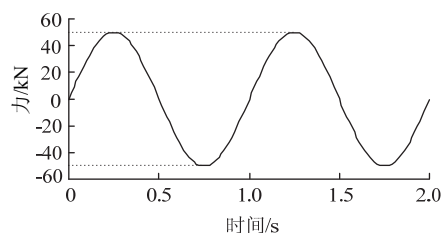


图 4 循环载荷波形曲线

Fig.4 Cyclic loading wave curve

3 试验结果分析

3.1 循环加卸载试验强度

试验完成后,得到不同试验方案下类裂隙岩石混凝土试件的抗压强度,见表 1。

表 1 不同试验方案抗压强度

Table1 Compression strengths in different schemes

试验方案	试验强度/MPa			平均值/MPa
单轴抗压	31.20	29.6	33.0	31.27
方案一	29.01	27.6	26.9	27.84
方案二	31.65	33.4	30.7	31.92
方案三	23.20	27.1	22.7	24.33
方案四	28.50	25.4	25.9	26.60

3.2 全应力应变曲线

1) 弹性阶段加载循环载荷对比

按方案一、方案二试验,绘出的典型的全应力-应变曲线如图 5 所示。

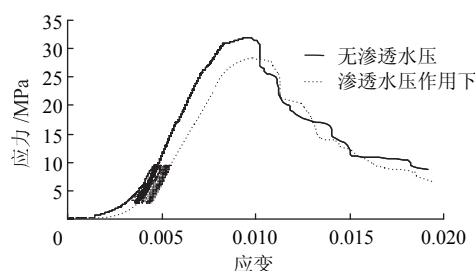


图5 弹性阶段加载循环载荷全应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curve when cyclic loading in the elastic stage

从表1和图5中可以看出,方案一中试样抗压强度小于方案二中的试样抗压强度,说明在渗透水压作用下试样的抗压强度降低,在弹性阶段加载循环载荷时,有渗透水压的试件产生的变形比无渗透水压的大。

2) 损伤阶段加载循环载荷对比

按方案三、方案四试验,绘出的典型的全应力-应变曲线如图6所示。

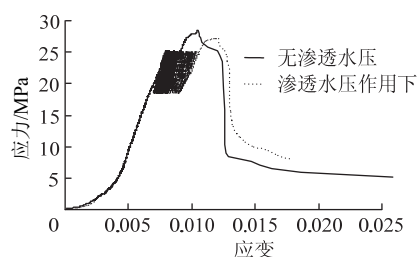


图6 损伤阶段加载循环载荷应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curve when cyclic loading in the damage stage

从表1和图6可以看出,在渗透水压作用下试样的抗压强度降低。循环加卸载阶段中,有渗透水压的试件产生的变形比无渗透水压试件要大得多。

3) 不同阶段加载循环载荷的对比

对比方案一和方案三,方案一中试样抗压强度普遍偏高,说明在全应力-应变曲线的不同阶段加载循环载荷对试样的强度有影响。弹性阶段加载循环载荷的岩石强度高于损伤阶段加载循环载荷岩石的强度。方案二和方案四的对比结果也印证了这种趋势。

4) 弹性阶段加载循环载荷的强化效应

对比单轴抗压试验与方案二(无渗透水压弹性阶段加载循环载荷试验)的强度,发现单个试样强度区别不大,而後者的平均强度稍大。因此从单个试样强度来看,在弹性阶段加载循环载荷对试样强度影响很小;从平均强度来看,试样表现出强化现象,

说明在弹性阶段加载循环载荷有助于试样强度的增加,这一结果发现与徐速超^[4]、尤明庆^[5]等的发现相同。

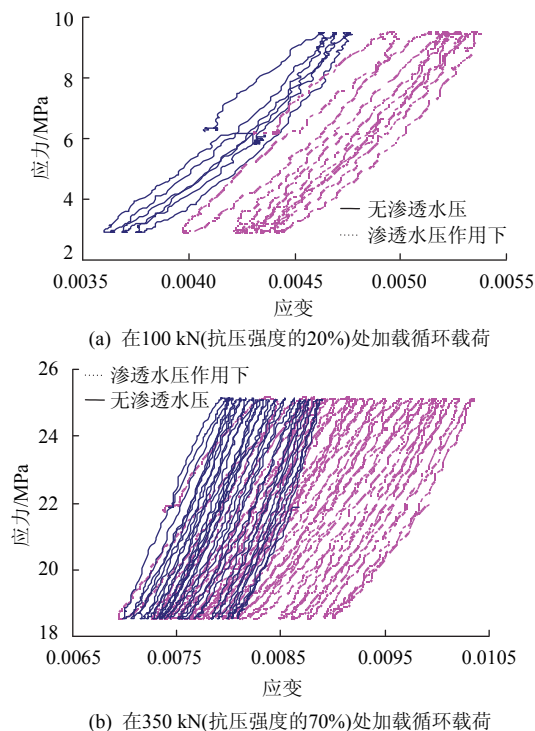
3.3 循环加卸载滞回曲线

在方案一和方案三中,利用手动加压泵给试样加载水压以模拟岩体内部渗透水压。方案一中,在试样轴向静压达到其单轴抗压强度的20%(100 kN)时给试样加载1.5 MPa水压,再加载循环载荷20周之后,加大轴向压力直至破坏。整个循环加载过程中,无肉眼可见裂隙扩展现象,渗透水压一直作用,循环加载结束后,加大轴压直至微损伤阶段(图3中BC段),裂隙扩展并贯穿,裂隙水流出,渗透水压失效。

在方案三中,在试样轴向静压达到其单轴抗压强度的70%(350 kN)时给试样加载1.5 MPa水压,再加载循环载荷20周之后,加大轴压直至破坏。整个过程中,当加载循环载荷4周左右,裂隙扩展并贯穿,裂隙中有水流出,渗透水压失效。

在这2个方案中,将图5和图6加载循环载荷过程的应力-应变曲线放大,见图7。

从图7可看出,在轴向载荷相同条件下,有渗透水压作用的试样轴向变形比无渗透水压作用的大,而且在渗透水压开始作用的第一个循环产生的应变相比其后每个循环产生的应变大。



(a) 在100 kN(抗压强度的20%)处加载循环载荷

(b) 在350 kN(抗压强度的70%)处加载循环载荷

图7 循环加卸载过程中应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curve during cyclic loading

4 岩爆倾向性讨论

判别岩石岩爆倾向性方法很多, 本文应用弹性应变能储存指数^[21]来分析判别类岩石材料的岩爆倾向性。

用 W_{ET} 表示应变能储存指数, 它是岩石的峰值强度前岩样中弹性应变能储存能量与塑性变形耗散的能量之比。则其量纲一的计算表达式为:

$$W_{ET} = \Phi_{sp} / \Phi_{st}$$

式中: Φ_{sp} 为变形后储存的最大弹性应变能, Φ_{st} 为耗损的应变能, 一般利用加卸载应力-应变曲线下包围的面积求得。其评判指标见表 2。

表 2 W_{ET} 值与岩爆判别
Table 2 Rockburst discrimination with W_{ET}

W_{ET} 值	判别情况
$W_{ET} < 2.0$	无岩爆
$2.0 \leq W_{ET} < 5.0$	中岩爆
$W_{ET} \geq 5.0$	强岩爆

图 8 为利用含裂纹类岩石模型试样通过一次加卸载试验得到的应力-应变曲线。

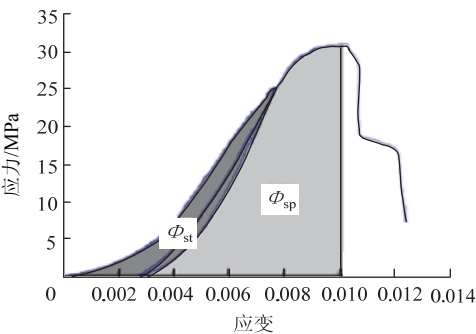


图 8 循环加卸载下应力-应变曲线
Fig.8 Stress-strain curve under cyclic loading

根据图 6 已有卸载曲线的趋势添加合理的完全卸载至 0 的卸载曲线, 如图 9。通过图 9 即可得到方案三、方案四的应变能储存指数 W_{ET} , 见表 3。

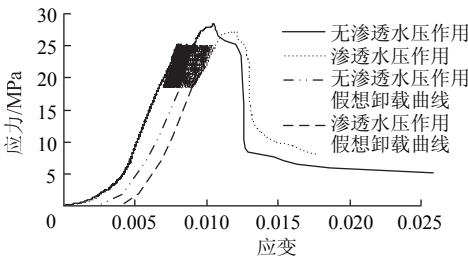


图 9 假想卸荷曲线
Fig.9 Imagined unloading curve during cyclic loading

表 3 不同应力路径下岩爆倾向性
Table 3 Rockburst proneness in different schemes

不同应力路径	Φ_{sp}	Φ_{st}	W_{ET}	岩爆倾向性
一次加卸载	960.0	215.0	4.7	中岩爆
方案三	483.1	306.0	1.6	无岩爆
方案四	436.0	209.9	2.1	中岩爆

从表 3 中不同应力路径下 W_{ET} 的大小可知: 方案四(无渗透水压损伤阶段加载循环载荷试验)相比较一次加卸载试验, 试样在循环加卸载过程中发生损伤, 产生应变较大, 消耗更多能量, 其岩爆倾向性降低, 故很多地下工程施工中通过爆破卸载使岩石产生损伤致集中应力发生转移。方案三(渗透水压下损伤阶段加载循环载荷试验)相比较一次加卸载试验, 试样受较低渗透水压作用(本试验中渗透水压为 1.5 MPa), 在循环加卸载过程中发生损伤, 压力水逐渐进入裂纹扩展之处, 对所处岩石起到软化作用, 降低了裂纹扩展所需的表面能, 使得岩石更容易沿裂隙滑动, 致使岩石不能储存更多的弹性能; 而且有渗透水压产生的应变更大, 消耗能量更多, 使其岩爆倾向性大大降低。说明具有岩爆倾向性岩石可以通过循环加卸载产生损伤以降低其岩爆倾向性, 同时较低渗透水压的作用可大大降低岩爆倾向。由于在本试验中渗透水压比较低, 对岩石的损伤破坏作用有限, 但如果渗透水压比较高, 对岩石的损伤破坏作用则可能很大, 这需要进一步研究。

5 结 论

对含裂纹类岩石材料在预应力及渗透水压下单轴循环加卸载破坏强度和变形特征等进行研究, 得到以下结论:

- 1) 对于含裂纹类岩石材料的混凝土试样, 在单轴抗压强的 20%加载循环载荷 20 周, 会使得试样强化, 导致其抗压强度稍大于单轴抗压强度, 但在渗透水压参与下, 其对应强度降低; 在单轴抗压强度的 70%加载循环载荷 20 周, 无论有无渗透水压参与, 其对应强度都低于单轴抗压强度, 且无渗透水压作用下试样的对应抗压强度要大于有渗透水压作用下试样的强度。有渗透水压作用下试样产生的应变较无渗透水压作用下试样的应变大。
- 2) 无论是在弹性范围内还是在损伤范围内加载循环载荷, 循环载荷加大了类岩石试件的应变, 且第一个循环产生的应变相比其后每个循环产生的应变大。

3) 具有岩爆倾向性岩石可以通过加载、卸载使岩石产生损伤以降低其岩爆倾向性, 同时较低强度的渗透水压可使岩爆降低程度加剧。

4) 在本试验中, 利用手动加压泵加载水压至定值后, 随着循环载荷循环次数增加, 岩石内部裂纹增多, 压力水逐渐渗入而压力降低, 需要人为监控并手动加压保持水压恒定。因此, 自行研制的渗透水压加载装置还有待改进。

参考文献:

- [1] LEMAITRE J, CHABOCHE J L. Mechanics of solid materials[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [2] EBERHARDT E. Brittle rock fracture and progressive damage in uniaxial compression[D]. Saskatoon: University of Saskatchewan, 1998.
- [3] EBERHARDT E, STEAD D, STIMPSON B. Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(3): 361-380.
- [4] 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]. 岩石力学与工程学报, 2009, 30(10): 2929-2934.
XU Suchao, FENG Xiating, CHEN Bingrui. Experimental study of skarn under uniaxial cyclic loading and unloading test and acoustic emission characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 30(10): 2929-2934.
- [5] 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 of strengthening of marble specimen in cyclic loading of uniaxial or pseudo-triaxial compression[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2008, 29(1): 66-72.
- [6] 苏承东, 杨圣奇. 循环加卸载下岩样变形与强度特征试验[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 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 Hehai University: Natural Sciences, 2006, 34(6): 667-671.
- [7] 席道瑛, 薛彦伟, 宛新林. 循环载荷下饱和砂岩的疲劳损伤[J]. 物探化探计算技术, 2004, 26(3): 193-198.
XI Daoying, XUE Yanwei, WAN Xinlin. The damage of saturated sandstones under cyclic loading[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2004, 26(3): 193-198.
- [8] 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(增刊 1): 3040-3045.
XU Jiang, XIAN Xuefu, 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(Sup 1): 3040-3045.
- [9] 徐建光, 张平, 李宁. 循环载荷作用下断续裂隙岩体的变形特性[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 802-806.
XU Jianguang, ZHANG Ping, LI Ning. Deformation properties of rock mass with intermittent cracks under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 802-806.
- [10] 邵鹏. 断续节理岩体中弹性波动力效应研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005: 28-51.
- [11] 李清, 张茜, 李晟源, 等. 爆炸应力波作用下分支裂纹动态力学特性试验[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3026-3032.
LI Qing, ZHANG Xi, LI Shengyuan, et al. Experimental study of dynamic fracture behaviors of branched cracks under blasting stress wave[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3026-3032.
- [12] 曹平, 杨慧, 江学良, 等. 水岩作用下岩石亚临界裂纹的扩展规律[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(2): 649-654.
CAO Ping, YANG Hui, JIANG Xueliang, et al. Subcritical crack growth of rock during water-rock interaction[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(2): 649-654.
- [13] 赵延林, 曹平, 林杭, 等. 渗透压作用下压剪岩石裂纹流变断裂贯通机制及破坏准则探讨[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 511-517.
ZHAO Yanlin, CAO Ping, LIN Hang, et al. Study on fracture mechanism and rheologic fracture failure criterion of compressive shear rock crack under saturated pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(4): 511-517.
- [14] 汤连生, 张鹏程, 王思敬. 水-岩化学作用之岩石断裂力学效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 822-827.
TANG Liansheng, ZHANG Pengcheng, WANG Sijing. Testing study on effects of chemical action of aqueous solution on crack propagation in rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 822-827.
- [15] 黄明利. 岩石多裂纹相互作用破坏机制的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 1999.

- [16] 郭少华, 孙宗颀, 谢晓晴. 压缩条件下岩石断裂模式与断裂判据的研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 304-308.
GUO Shaohua, SUN Zongqi, XIE Xiaoqing. Research on mode and criterion of rock fracture under compressive loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 304-308.
- [17] WONG R H C, CHAU K T, LIN P, et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws(part I): Experimental approach[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 909-924.
- [18] 李夕兵, 贺显群, 陈红江. 渗透水压作用下类岩石材料张开型裂纹启裂特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1317-1324.
LI Xibing, HE Xianqun, CHEN Hongjiang. Crack initiation characteristics of opening-mode crack embedded in rock-like material under seepage pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1317-1324.
- [19] 陈卫忠, 李术才, 朱维申, 等. 岩石裂纹扩展的试验与数值分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 22(1): 18-23.
CHEN Weizhong, LI Shucai, ZHU Weishen, et al. Experimental and numerical research on crack propagation in rock under compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 22(1): 18-23.
- [20] 冯夏庭, 赖户政宏. 化学环境侵蚀下的岩石破裂特性(第一部分): 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 403-407.
FENG Xiating, MA Sahiroseto. Rock fracturing behaviors under chemical corrosion (Part I): Experimental study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 403-407.
- [21] KIDYBINSKI A. Bursting liability indices of coal[J]. International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(6): 295-304.

《采矿与安全工程学报》2013 年第 6 期 Ei 收录情况

根据 Ei 中国信息部发布的最新收录结果, 本刊 2013 年第 6 期共发表论文 26 篇, 其中 Ei Compendex 收录论文 26 篇, 收录率为 100%。