

循环荷载作用下含缺陷岩石破坏特征试验研究

胡盛斌^{1, 2}, 邓建², 马春德², 王卫华²

(1. 广东省建设工程质量安全监督检测总站, 广东 广州 510075; 2. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 采用水泥砂浆材料和充填材料模拟含缺陷岩石, 分别对含孔洞、柔性充填物及刚性充填物试样进行低周疲劳试验, 观察含缺陷试样的疲劳破坏特征, 得出含缺陷试样的轴向不可逆变形阶段性规律, 研究不同缺陷对岩石类材料的疲劳寿命、疲劳裂纹萌生及其扩展的影响。试验结果表明: 循环荷载作用下含缺陷岩石试样的轴向不可逆变形经历初始变形、等速变形以及加速变形 3 个阶段; 含缺陷试样疲劳裂纹首先在有较大应力集中的缺陷与基体材料界面边缘处萌生及扩展; 在相同循环加载卸载条件下, 预制孔洞直径越大, 对应的孔洞试样疲劳寿命越短; 刚性充填物试样最容易发生疲劳破坏, 孔洞试样次之, 柔性充填物试样疲劳寿命最长。

关键词: 岩石力学; 含缺陷岩石; 循环荷载; 低周疲劳; 疲劳寿命; 不可逆变形; 疲劳裂纹扩展

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)12 - 2490 - 06

EXPERIMENTAL STUDY OF FAILURE CHARACTERISTICS OF ROCK CONTAINING FLAW UNDER CYCLIC LOADING

HU Shengbin^{1, 2}, DENG Jian², MA Chunde², WANG Weihua²

(1. *Guangdong Provincial General Station for Supervision and Examination of Quality and Safety of Construction Engineering, Guangzhou, Guangdong 510075, China*; 2. *School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China*)

Abstract: Experimental study of failure characteristics of rock containing flaw under cyclic loading is carried out by using similarity materials. The similarity materials are elaborately designed by cement mortar and filling materials to simulate rocks with hole, flexible filling, or rigid filling. The characteristics of rocks containing flaw for the low-cycle fatigue damage are observed; and the three stages of the irreversible uniaxial deformation process are presented. Different defects in rock-like materials have great influence on their fatigue life and initiation and propagation of fatigue cracks. Experimental results show that the uniaxial deformation can be divided into three stages: initial deformation stage, constant-speed deformation stage, and acceleration deformation stage. Fatigue cracks are prone to initiate and propagate on the interface of defective and basis materials, where stress is concentrated. Conclusion can be made that with the same load conditions and the same sizes of flaw, the greater diameter of the hole is, the shorter fatigue life of hole-defect specimen is. It is also found that the fatigue lives of rigid-filling specimens are the shortest; the hole specimens take the second place; flexible-filling specimens have the longest life.

Key words: rock mechanics; rock containing flaw; cyclic loading; low-cycle fatigue; fatigue life; irreversible deformation; fatigue crack propagation

收稿日期: 2009 - 04 - 16; **修回日期:** 2009 - 07 - 15

基金项目: 高等学校博士学科点基金资助项目(200805330029); 教育部新世纪优秀人才计划资助项目(NCET - 07 - 0860)

作者简介: 胡盛斌(1979 -), 男, 2006 年于中南大学资源与安全工程学院岩土工程专业获硕士学位, 主要从事岩土动力学、地基与基础工程检测、建筑工程质量鉴定等方面的研究工作。E-mail: hqcsut2000@163.com

1 引言

岩石是由多种矿物晶粒、胶结物及孔隙缺陷等组成的复杂混合物,一般都随机地赋存大量地质缺陷,如裂纹、断裂面、节理、孔洞、充填物等,并且随机地分布于岩石中^[1]。在外力作用下,这些缺陷大大降低了岩石的力学性能,破坏了岩石基体的连续性、均一性,而且它们与岩石基体的热膨胀系数和弹性模量不匹配极易造成局部应力集中,从而导致疲劳裂纹萌生和扩展的敏感性增大、对应的岩石疲劳损伤增加及其宏观力学性能劣化。岩石无论发生局部破坏还是整体破坏,其根源之一是岩石材料中包含的各种尺度不同的缺陷^[2]。

近年来,在循环荷载作用下岩石类材料的强度及变形特征等宏观方面的试验研究成为关注的热点^[3~11];同时,岩石类材料的断裂机制、裂纹扩展以及其数值模拟等细观方面理论研究也取得进展^[12~18],而在循环荷载作用下含预制缺陷(如裂缝、孔洞、充填物、节理等)岩石类材料的强度、变形、破坏及其裂纹扩展等方面研究还不多见。本文采用模型试验手段,对比研究循环荷载作用下不同缺陷对岩石类材料试样的破坏特征、疲劳寿命以及疲劳裂纹萌生与扩展的影响,对于正确认识荷载作用下岩石疲劳破坏机制,合理指导工程岩体设计及科学评价岩体稳定性等具有重要意义。

2 试验条件

2.1 试样材料与制备方法

为了使模型材料与岩石在力学性能上相似,较好地反映岩石类材料的脆性断裂特征,本次试验选用水泥砂浆作为模拟材料^[11, 13],其主要配制原料为 42.5R 普通硅酸盐水泥和粒径小于 2 mm 的河砂,其原料配合比(质量比)为水泥:河砂:水=1:2:0.35,这样有利于保证试样的均匀性,减少试样离散性对试验结果的影响。砂浆材料的弹性模量为 6.5 GPa,泊松比为 0.25,单轴抗压强度为 46.8 MPa。在砂浆试样几何中心预制不同直径和类型的单个圆柱状缺陷,缺陷类型分为孔洞、柔性充填物和刚性充填物,完整试样、含孔洞试样的缺陷形状及类型见图 1。所有试样的外观尺寸均为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm,预制的圆柱状缺陷直径分别为 5, 6, 7,

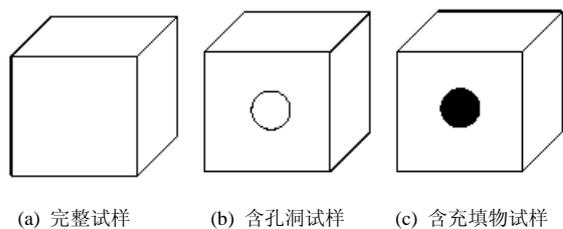


图 1 试样形状及类型

Fig.1 Shapes and types of specimens

8, 9 mm。根据试验的要求,本次试验共设计 112 个试样,其中完整试样有 9 个,含缺陷试样有 103 个。

试样的制备过程为:按配合比将砂浆主要原料倒入搅拌机内混合均匀,加水充分搅拌均匀,并将表面涂好润滑油的三联试模放在振动台上,再将拌和好的砂浆分层入模振捣,保证试模内砂浆均匀密实。振动完毕后,放入 38 °C 温湿养护箱 48 h 后脱模,在标准条件下养护 28 d 成型,这样就可得到完整砂浆试样。含孔洞、柔性充填物及刚性充填物试样均是在完整砂浆试样的基础上制作而成的,在砂浆浇注入模后 1~2 h,分别将加工好的直径为 5, 6, 7, 8, 9 mm 的光滑钢棒插入砂浆试样几何中心,待砂浆初凝时取回钢棒,这样就形成不同直径的孔洞试样;若不取出钢棒,则可得到含刚性充填物试样;若在孔洞试样中浇注拌和好的水泥净浆(水灰比为 0.6),则可得到含柔性充填物试样。

2.2 测试系统与加载方式

本试验在中南大学现代分析测试中心 INSTRON 1346 型电液伺服刚性试验系统完成的。该系统轴向最大加载值为 2 000 kN,加载频率达到 5 Hz 以上,加载波形可为正弦波、三角波、方波及随机波等。图 2 给出了循环加卸载波形示意图, σ_{\max} , σ_{\min} 分别为循环荷载的上限、下限应力,且循环荷载的平均应力 $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$, 应力幅 $\sigma_a = (\sigma_{\max} -$

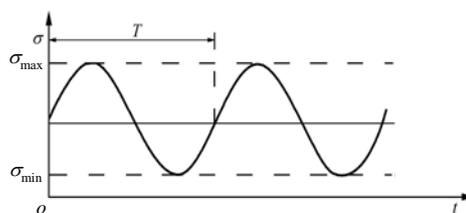


图 2 循环加卸载波形示意图

Fig.2 Sketch of wave shape of cyclic loading

$\sigma_{\min})/2$ ，应力比 $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ ， T 为循环周期，且 $T = 1/f$ ， f 为振动频率。本次低周疲劳试验以荷载为控制变量，加载波形为正弦波，振动频率为 1.0 Hz，应力比为 0.1。

3 含缺陷试样的破坏特征

本试验研究共进行了 24 组试验，试验分为单轴抗压强度试验和低周疲劳试验。在单轴抗压强度试验中，完整试样有 1 组，共 5 个试样；含缺陷试样有 6 组，共 15 个试样。在低周疲劳试验中，完整试样有 1 组，共 4 个试样；含缺陷试样有 16 组，共 88 个试样。单轴抗压强度试验结果表明，砂浆材料的离散性小，不同类型的缺陷试样与完整试样的单轴抗压强度值几乎接近。因此，选取砂浆试样的平均值($\sigma_c = 46.8$ MPa)作为所有试样的单轴抗压强度值。

3.1 轴向不可逆变形过程

从试验数据中可以分别得到试样的应力 - 应变全过程曲线和轴向应变 - 循环次数变化曲线(见图 3, 4)，含缺陷试样与完整试样的这两类曲线的主要特征大体相似，主要区别在于试样的循环次数和滞回环大小。选取上限荷载幅值为 220 kN(上限应力值为 44 MPa)，应力比为 0.1，直径为 5 mm 的孔洞试样的曲线作为代表。

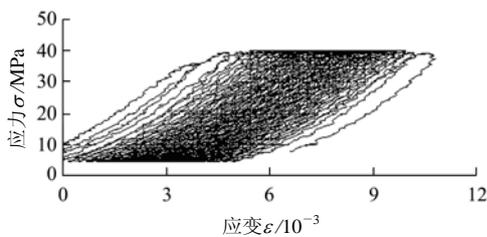


图 3 含缺陷试样的应力 - 应变全过程曲线

Fig.3 Curve of uniaxial stress-strain of specimen containing flaw

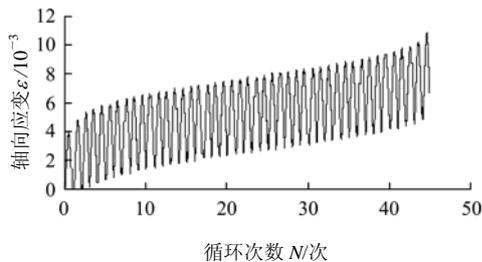


图 4 含缺陷试样轴向应变 - 循环次数变化曲线

Fig.4 Development curve of uniaxial strain and cyclic number of specimen containing flaw

由图 3 可知：由于岩石类材料的非线性特性，

在循环荷载作用下卸载曲线与加载曲线不重合，每一个循环加卸载都会产生滞回环，滞回环在加载初期比较大，随着循环次数的增加，滞回环逐渐变小并趋于稳定；经历一定的循环周期后滞回环又逐渐变大，直至试件疲劳破坏，该曲线的特征为：随着循环次数的增长，轴向变形逐渐向变形增大的方向移动，呈“疏—密—疏”状态分布；接近疲劳损伤极限状态时，应力 - 应变曲线发生明显的倾斜，且循环应力上限已经上升不到设定的上限应力，认为该试样已发生疲劳破坏。

由图 4 可知：在循环加卸载的起始阶段，轴向变形发展较快，每次循环加卸载会使材料出现应变硬化；经历前几次循环加卸载后，轴向变形速率趋于稳定，随着循环次数的增加，轴向变形在整体上呈缓慢增大趋势；最后阶段变形突然加速，每次循环加卸载所产生的应变逐渐变大，表明循环加卸载后岩石类材料会出现应变软化，经过短短的几个循环后，试样很快发生疲劳破坏。试样的轴向不可逆变形发展可划分为 3 个主要阶段：初始变形阶段、等速变形阶段和加速变形阶段，分别对应疲劳裂纹萌生阶段、疲劳裂纹扩展阶段、宏观疲劳裂纹贯通破坏阶段，与完整岩石蠕变曲线类似，呈倒“S”形。3 个阶段变形的累积将导致试样的最终破坏，而且等速变形阶段的循环次数直接决定到试样疲劳寿命的长短。岩石类材料的这样宏观力学性能响应的阶段性特征也反映了材料的内部损伤的演化行为。

3.2 含缺陷试样破坏过程

在低周疲劳试验前，将试样上下 2 个受压面用砂纸打磨平整，以保证受压面的平整度，并涂抹适量黄油，以减少端部效应，同时，保证自由面的光洁度，以便观察裂纹的萌生和扩展。从试样的破坏过程和破坏形态来看，发现含缺陷试样与完整试样都具有共同特征：在最初的几次循环加卸载后，试样 4 个自由面出现以竖向裂纹为主的宏观裂纹，呈劈裂破坏特征，形成易脱离基体的碎片；经历一定的循环加卸载后，试样会发出较大的“砰”的响声，试样在瞬间失效破坏，用手轻轻地剥离破坏试样上残留的碎片，发现主破坏面与轴向呈约 45° 的夹角，这样就形成上下对称的双锥体(见图 5~8)，与樊秀峰和简文彬^[12]观察到的砂岩疲劳破坏形态类似。

对于孔洞试样而言，在循环加卸载过程中，孔洞由圆形逐渐变成长轴为水平方向的椭圆形，疲劳



图 5 完整试样的疲劳破坏形态
Fig.5 Fatigue failure of intact specimen



(a) 疲劳破坏后形态 (b) 剥离碎片后形态

图 6 含孔洞试样的疲劳破坏形态($d = 6 \text{ mm}$)

Fig.6 Fatigue failure of specimen containing hole with $d = 6 \text{ mm}$



(a) 疲劳破坏后形态 (b) 剥离碎片后形态

图 7 含柔性填充物试样的疲劳破坏形态($d = 6 \text{ mm}$)

Fig.7 Fatigue failure of specimen containing flexible filling with $d = 6 \text{ mm}$



(a) 疲劳破坏后形态 (b) 剥离碎片后形态

图 8 含刚性填充物试样的疲劳破坏形态($d = 6 \text{ mm}$)

Fig.8 Fatigue failure of specimen containing rigid filling with $d = 6 \text{ mm}$

裂纹极易在孔洞的长轴方向 2 个端点处萌生, 裂纹扩展以翼裂纹模式为主, 以次生裂纹为辅(见图 6); 对于含柔性填充物(水泥净浆)试样而言, 填充物形状由圆形逐渐变成长轴为水平方向的椭圆形, 但这

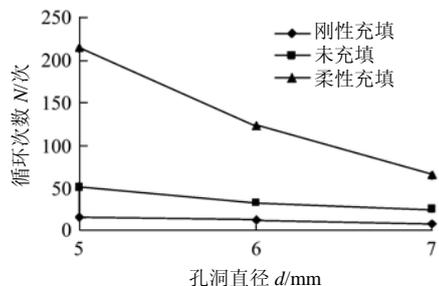
一变形并不明显。填充物与基体界面处形成一层薄薄的白色粉末状细颗粒, 且不易产生裂纹(见图 7); 对于含刚性填充物(钢棒)试样而言, 在循环加卸载过程中, 因钢棒与基体界面反复地摩擦发出“嘶嘶”的轻微声响, 且钢棒有发热现象。在钢棒与基体交界面上上下两端点处产生较大的竖向裂纹, 钢棒无明显变形, 其表面变得更加光滑(见图 8)。

4 讨论

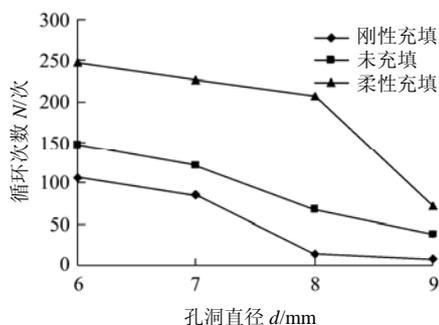
通过对含缺陷试样的低周疲劳试验, 获得了在相同循环加卸载条件下不同类型缺陷试样的疲劳寿命, 分析了不同缺陷对岩石类材料的疲劳裂纹萌生及其扩展的影响。试验结果表明, 缺陷对岩石类材料的疲劳寿命、疲劳裂纹萌生及其扩展有明显影响。

4.1 缺陷对试样疲劳寿命的影响

从循环加卸载波形可以看出, 影响材料的疲劳强度及变形特征的因素很多, 如 σ_m , σ_a , R , f 等。本次试验侧重研究缺陷尺寸、缺陷类型等对岩石类材料疲劳寿命的影响, 得到的含缺陷试样低周疲劳试验结果见图 9。在相同的循环加卸载条件下, 预制孔洞直径越大, 对应的孔洞试样疲劳寿命越短;



(a) 上限荷载幅值为 220 kN、应力比为 0.1



(b) 上限荷载幅值为 200 kN、应力比为 0.1

图 9 不同直径的含孔洞、填充物试样的循环次数比较
Fig.9 Contrast of cyclic numbers between hole and filling-bearing specimens with different diameters

刚性充填物试样最容易发生疲劳破坏, 孔洞试样次之, 柔性充填物试样疲劳寿命最长。另外, 上限荷载幅值对含缺陷岩石试样的疲劳寿命影响较为明显, 即在超过应力门槛值之后, 当上限荷载幅值比从 0.85 增加到 0.94 时, 含缺陷岩石试样的疲劳寿命就会明显减少, 与葛修润等^[7]得到的完整岩石疲劳试验结论相一致。

4.2 缺陷对试样疲劳裂纹萌生及扩展的影响

在均匀分布应力或没有明显应力集中条件下, 微裂纹可以随机地萌生和扩展, 萌生方式和位置受材料微观组织的影响, 对应不同的组织, 有不同的萌生方式^[19]。在有较大应力集中的地方, 疲劳裂纹的萌生位置具有强烈的择优性^[20]。从试样的疲劳破坏过程和破坏形态可知, 完整试样自由面的裂纹萌生与扩展具有随机性, 无明显分布规律(见图 5), 而含缺陷试样的裂纹首先在有较大应力集中的缺陷与基体材料界面边缘处萌生, 并由此对称扩展(见图 6~8)。这些试验现象说明缺陷的存在对岩石类材料疲劳裂纹萌生及其扩展有很大影响。

对于孔洞试样而言, 此时可以认为充填物的弹性模量($E \rightarrow 0$)远小于砂浆基体, 垂直于最大主应力方向的孔洞两侧处极易出现裂纹; 对于含柔性充填物(水泥净浆)试样而言, 充填物的弹性模量接近砂浆基体, 充填物与基体界面处不易出现裂纹; 对于含刚性充填物(钢棒)试样而言, 充填物的弹性模量大于砂浆基体, 平行于最大主应力方向的充填物上下端点处极易出现裂纹。

5 结 论

通过对含缺陷岩石试样的低周疲劳试验结果的分析, 可得到如下结论:

(1) 与完整岩石试样一样, 循环荷载作用下含缺陷岩石试样的轴向不可逆变形都经历 3 个主要阶段: 初始变形阶段、等速变形阶段及加速变形阶段。随着循环次数的增长, 含缺陷岩石试样的应力-应变曲线均呈“疏-密-疏”状态分布, 与之对应的轴向应变-循环次数变化曲线均呈倒“S”形。

(2) 在相同循环加卸载条件下, 预制孔洞直径越大, 对应的孔洞试样疲劳寿命越短; 刚性充填物试样最容易发生疲劳破坏, 孔洞试样次之, 柔性充填物试样疲劳寿命最长。另外, 上限荷载幅值对含

缺陷岩石试样的疲劳寿命影响较为明显。

(3) 含缺陷试样裂纹首先在有较大应力集中的缺陷与基体材料界面边缘处萌生及扩展。当充填物的弹性模量小于基体时, 垂直于最大主应力方向的充填物两侧处极易出现裂纹; 当充填物的弹性模量接近基体时, 充填物与基体界面处不易出现裂纹; 当充填物的弹性模量大于基体时, 平行于最大主应力方向的充填物上下端点处极易出现裂纹。

参考文献(References):

- [1] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕, 等. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.(CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan, et al. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [2] 林 鹏, 唐春安, 黄凯珠, 等. 脆性介质中裂纹与孔洞缺陷的分类与尺度效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增2): 2 296 - 2 300.(LIN Peng, TANG Chun'an, WONG R H C, et al. Classification and size effect of flaw and pore in brittle medium[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp.2): 2 296 - 2 300.(in Chinese))
- [3] ATTEWELL P B, FARMER I W. Fatigue behavior of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1973, 10(1): 1 - 9.
- [4] 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 loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 1987, 8(3): 31 - 37.(in Chinese))
- [5] 莫海鸿. 岩石的循环试验及本构关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1988, 7(3): 215 - 224.(MO Haihong. Study of rock's cyclic experiment and constitutive relation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1988, 7(3): 215 - 224.(in Chinese))
- [6] 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 of micro and meso-damage of rock by macro-hysteresis curve[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 182 - 187.(in Chinese))
- [7] 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): 1 581 - 1 585. (GE Xiurun, JIANG Yu, LU Yunde, et al. Testing study of fatigue deformation law of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1 581 - 1 585.(in

- Chinese))
- [8] BAGDE M N, PETROS 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.
- [9] 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): 3 040 - 3 045.(XU Jiang, XIAN Xuefu, WANG Hong, et al. Experimental study of rock deformation characteristics under cyclic loading and unloading conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Supp.1): 3 040 - 3 045.(in Chinese))
- [10] 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 of characteristics of strength and deformation of coal under cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(1): 201 - 205. (in Chinese))
- [11] 周秋景, 李同春, 宫必宁. 循环荷载作用下脆性材料剪切性能试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(3): 573 - 579.(ZHOU Qiujing, LI Tongchun, GONG Bining. Experimental study on shear behaviors of brittle materials under cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 573 - 579.(in Chinese))
- [12] 樊秀峰, 简文彬. 砂岩疲劳特性的超声波速法试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(3): 557 - 563.(FAN Xiufeng, JIAN Wenbin. Experimental research on fatigue characteristics of sandstone using ultrasonic wave velocity method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(3): 557 - 563.(in Chinese))
- [13] 刘东燕, 朱可善, 胡本雄. 含裂隙岩石受压破坏的声发射特性研究[J]. *地下空间*, 1998, 18(4): 210 - 215.(LIU Dongyan, ZHU Keshan, HU Benxiong. A study of acoustic emission characters of failure of fissured rock under compression[J]. *Underground Space*, 1998, 18(4): 210 - 215.(in Chinese))
- [14] LI N, CHEN W, ZHANG P, 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 and Mining Sciences*, 2001, 38(7): 1 071 - 1 079.
- [15] 谭志宏, 唐春安, 朱万成, 等. 含缺陷花岗岩破坏过程中的红外热像试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(16): 2 977 - 2 980. (TAN Zhihong, TANG Chun'an, ZHU Wancheng, et al. Experimental study of the infrared thermal image for failure process of granite with fracture[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2 977 - 2 980.(in Chinese))
- [16] 王元汉, 苗雨, 李银平. 预制裂纹岩石压剪试验的数值模拟分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(18): 3 113 - 3 116.(WANG Yuanhan, MIAO Yu, LI Yinping. Numerical simulation of the experiment on rock with preexisted cracks under compression and shearing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(18): 3 113 - 3 116.(in Chinese))
- [17] 赵永红, 杨振涛. 含软弱夹层岩石材料的损伤破坏过程[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(13): 2 350 - 2 356.(ZHAO Yonghong, YANG Zhentao. Research on fracturing around cement slot in rock specimen[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(13): 2 350 - 2 356.(in Chinese))
- [18] 张平, 李宁, 贺若兰. 含裂隙类岩石材料的局部化渐进破损模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(10): 2 043 - 2 050. (ZHANG Ping, LI Ning, HE Ruolan. Research on localized progressive damage model for fracture rocklike materials[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(10): 2 043 - 2 050.(in Chinese))
- [19] HALL J A. Fatigue crack initiation in alpha-beta titanium alloys[J]. *International Journal of Fatigue*, 1997, 19 (7): 23 - 37.
- [20] 龚明, 赵建华, 董本涵, 等. 含孔薄板孔边疲劳裂纹的萌生和扩展[J]. *航空学报*, 2002, 23(3): 202 - 205.(GONG Ming, ZHAO Jianhua, DONG Benhan, et al. Initiation and propagation of fatigue crack in edge region of hole in a sheet with central hole[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2002, 23(3): 202 - 205.(in Chinese))