

点载荷循环加载下红砂岩疲劳破坏特性 试验分析

周子龙,吴志波,赵云龙,郭民,孙晶晶

中南大学资源与安全工程学院,长沙 410083

摘要 在掘进机截齿破岩、高频破碎锤破岩时,其与岩体的接触面积均很小,相当于点载荷循环加卸载破岩。为了解点载荷循环作用下上限应力对红砂岩疲劳特性的影响,利用MTS Landmark 试验系统对红砂岩进行上限应力比分别为0.70、0.80、0.85和0.90的循环点载荷试验。结果表明:在加载波形为渐变正弦波,下限应力比为0.3,加载频率为1 Hz的条件下,红砂岩的疲劳寿命随着上限应力的增大而减小,即上限应力越大,破岩速度越快;红砂岩在点载荷循环加卸载作用下发生破坏时的轴向应变与上限应力所对应的静态应力-应变曲线峰后段的应变相当。

关键词 点载荷循环加载;上限应力;疲劳寿命;变形控制规律

中图分类号 TU458.3

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.23.006

Test and Analysis on Fatigue Failure Properties of Red Sandstone under Cyclic Point Loading

ZHOU Zilong, WU Zhibo, ZHAO Yunlong, GUO Min, SUN Jingjing

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract The application of point load is involved in many fields of practical engineerings such as the rock-breaking of boom-type roadheader, high-frequency hammer, etc. As the contact area between the machine and rock mass is very small and can be seen as a point contact, the rock-breaking type is equivalent to cyclic point loading. In order to understand the effect of upper limit stress on fatigue life (the time required for destruction) of red sandstone under the cyclic loading of point load, the MTS Landmark test system is adopted for the fatigue test with different upper limit stress ratios including 0.70, 0.80, 0.85, and 0.90. The experimental result shows that the fatigue lifetime of red sandstone decreases with the increase of upper limit stress when the loading waveform is a gradient sine wave and the lower limit stress ratio and the loading frequency are 0.3 and 1 Hz, respectively. It is also shown that the terminal strain corresponding to fatigue failure is equal to the one corresponding to the point where the post-peak stress-strain curve and the line of the maximum cyclic load intersect, which is called the deformation control law.

Keywords cyclic point loading; the upper limit stress; fatigue lifetime; deformation control law

岩石疲劳破坏机制对岩体的长期稳定性评价和破岩效率研究具有重要意义,一直受到国内外学者的广泛关注。循环载荷作用下的岩石破坏机制和变形特性与静态载荷作用下的变化规律虽有关联,但又有显著区别。循环载荷作用下岩石疲劳变形特性和相关因素对疲劳寿命影响的研究有助

于为岩体的长期稳定性提供科学的评价,同时也有助于提高破岩效率的研究。目前,国内外关于岩体在循环载荷作用下强度、变形特性等的研究已取得大量的研究成果^[1]。

已有研究成果表明^[2-3],岩石疲劳破坏存在“门槛值”,即当循环载荷上限应力低于一定值时,无论载荷作用多少个周

收稿日期:2014-03-03;修回日期:2014-06-23

基金项目:国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(51322403);国家自然科学基金面上项目(51274254);湖南省科技计划重点项目(2013SK2011)

作者简介:周子龙,教授,研究方向为岩石力学及岩土工程灾害防治,电子信箱:zzhou@mail.csu.edu.cn;吴志波(共同第一作者),硕士研究生,研究方向为疲劳力学,电子信箱:wzb-csu@qq.com

引用格式:周子龙,吴志波,赵云龙,等.点载荷循环加载下红砂岩疲劳破坏特性试验分析[J].科技导报,2014,32(23):45-49.

期,岩石都不会发生破坏,可见上限应力对岩石疲劳寿命有重要影响。葛修润等^[2-5]对循环载荷作用下岩石的不可逆变形及疲劳门槛值等进行过系统的研究,提出了以变形来度量岩体破坏和强度的“变形控制规律”,认为岩石的疲劳寿命主要由岩石本身结构、幅值载荷和载荷差决定;任建喜等^[4]对单轴压缩岩石疲劳寿命的影响因素进行了研究,重点分析了应力幅值、波形、频率等因素对岩石疲劳破坏寿命的影响规律;Bagde 等^[6]对不同波形不同振幅条件下完整砂岩的疲劳特性进行了深入研究,认为加载波形和幅值均对岩石疲劳特性影响很大;Haimson^[7]对循环加载下硬岩的疲劳特性进行了系统的研究,认为硬岩在循环加载下强度得到了很大的削弱,如在应力控制、斜波加载、加载频率为 1 Hz 的循环加载下岩石单轴抗压和抗拉强度只有其静力加载的 60%~80%,同时通过对试件进行声发射和高速摄影研究,得出微裂纹扩展破裂是其主要疲劳破坏机制。

上述对岩体的疲劳试验研究多是在单轴或三轴下进行的,且已取得很大成果,但国内外关于点载荷下岩体的疲劳试验研究目前尚未见文献报道。而实际工程中有很多地方都涉及到点载荷的应用,如掘进机截齿破岩、高频破碎锤破岩等,其与岩体的接触面积均很小,相当于点接触,属于点载荷循环加卸载破岩。所以对于点载荷循环加载下岩石力学性质的研究无论在工程应用上还是理论上都有重要意义。

影响岩石疲劳寿命的因素很多,如上限应力、下限应力、幅值、加载波形和频率等,由于试件数目等客观试验条件限制,本文仅对上限应力这一因素进行研究,同时对葛修润等在单轴和三轴循环加载下得到的“变形控制规律”是否仍适用于点载荷循环加载条件进行分析验证。

1 试验设备与试验方案

1.1 岩石试件

试验所用红砂岩取自云南昆明。为保证实验结果的可比性,避免由于尺寸效应、形状效应、深度不同造成应力历史和应力状态不同等因素对试验数据离散度的影响。本次试验所用红砂岩试件均加工成直径 50 mm、高 50 mm 的圆柱形,其长度和直径之比满足国际岩石力学学会试验方法委员会关于点荷载试验的建议方法^[8]中 0.3~1.0 的要求,且是在一大块岩石的某一面上密集套钻所得。为防止在钻芯时试件中产生较大热应力,加工时采用了水钻法。对加工成的试件也进行了筛选,剔除了表面有明显破损及可见裂纹的试件。

本文用 J-B, F-A-B 对红砂岩统一编号。这里, J 代表静态点载荷试验所用试件, F 代表动态点载荷试验所用试件, A 为组号, B 为组中的试件编号。如 J-1 代表静态试验的第一个试件, F-1-1 代表循环试验第一组的第一个试件。试验时试件处于自然风干状态。

1.2 试验设备

目前市场上还没有专门用于进行点载荷循环加载的试

验仪器。经过仔细遴选,选定 MTS Landmark 电液伺服试验系统作为试验仪器。MTS Landmark 试验系统可以对金属、岩石等多种材料进行疲劳压缩或拉伸试验,其最大频率范围为 0~100 Hz,最大载荷量程为动态-100~100 kN,载荷测量精度为±0.5%。系统可获得良好的峰后段特征曲线,整个试验系统具有良好的动、静态特性,能跟踪脆性岩石的瞬间破坏,直接获取轴向载荷和位移数据,且保护功能强,自动化程度高,后处理方便。其夹持槽的灵活设计使得可以通过加工一个端部为圆柱形、顶端为球端圆锥形的加压锥来安装入夹持槽,从而可以改装成进行点载荷循环加卸载的试验系统。球端圆锥形加压板的形状尺寸如图 1 所示,材料为铬 12 淬火,硬度洛氏 60°以上,与文献[8]中的相关要求一致。

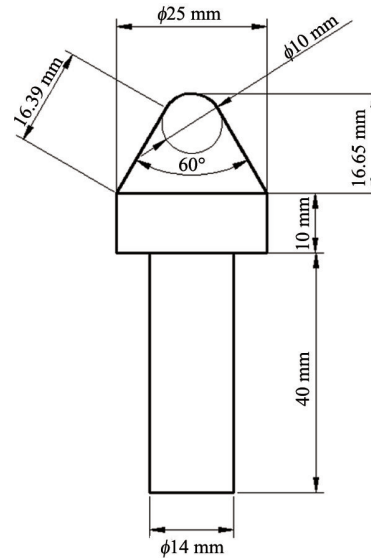


图 1 加压锥的形状和相关尺寸

Fig. 1 Shape and related dimensions of the pressure cone

1.3 试验方案

1.3.1 静态点载荷试验

为确定红砂岩循环点载荷试验相关参数,首先进行静态点载荷试验。具体操作步骤:将加压锥的圆柱形端部放入 MTS Landmark 的夹持槽中,调节夹持力使其固定。将试件安放到两加压锥之间(预先在所有试件两端圆心处用红色签字笔标记,以便保证每次试验加载点均在试件端面圆心)。待试件安放恰当,调节仪器采用力控模式给试件一个 0.05 kN 的预应力使其被两加压锥固定。完成后,检查无误,便可按照设定的加载参数进行试验。静态全过程试验以纵向位移控制,位移速率为 0.05 mm/s。点载荷强度计算式^[9]为

$$I = \frac{\pi F}{4RD} \quad (1)$$

式中, I 为点载荷强度, MPa; F 为试件破坏时的最大载荷, N; R 为试件直径; D 为试件上下两个加荷点之间的距离即试件

高度。

试件轴向应变计算式为

$$\varepsilon = \frac{\Delta D}{D} \times 100\% \quad (2)$$

式中 ΔD 为两加载点间距离减小值, mm。

由式(1)和(2)可得到试件的点载荷强度和轴向应变, 试验结果如表1所示。从表1可看出, 3个试件的峰值应力误差分别为0、2.2%和1.9%。可见由于初期的严格取样, 红砂岩的离散性得到较好控制。图2给出了红砂岩静态点载荷试验的应力-应变曲线, 可见其重演性较好。

表1 静态点载荷试验结果

Table 1 Test results for static point load

试件编号	时间/s	应变/%	应力/MPa	应力误差/%
J-1	24.5	2.44	2.70	0
J-2	23.7	2.36	2.64	2.2
J-3	24.6	2.46	2.75	1.9
应变平均值		2.42		
应力平均值			2.70	

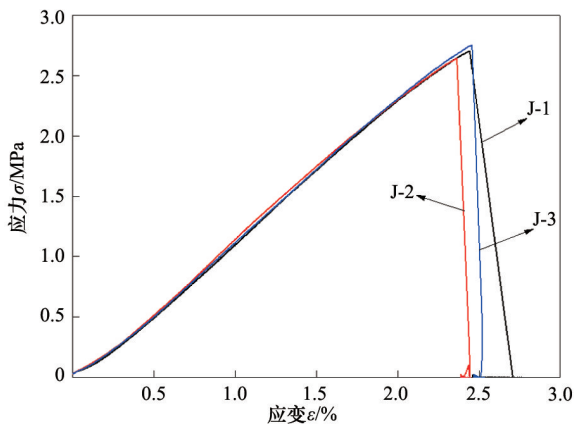


图2 静态点载荷试验应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain complete curves of static point load test

1.3.2 点载荷循环加卸载试验

为减小对试验仪器的损伤, 循环点载荷试验采用渐变正

弦波(sine tapered)加载, 即载荷不是直接加到设定的最高值, 而是经过几个循环缓冲后由小到大慢慢增加到最高值, 其加载波形如图3所示。为便于计算和对比分析, 本文的应力以应力比的形式给出, 应力比表示试验设定的应力参数与岩石静态点载荷强度平均值之比, 如上限应力比0.90即指上限应力为静态点载荷强度平均值的0.90倍, 下限应力比和幅值应力比的定义同此。试验固定加载频率和下限应力比分别为1.0和0.3 Hz(即不完全卸载, 因此试件的加载点不会因卸载发生变化, 保证了每次循环的加载点位置相同), 对上限应力比为0.70、0.80、0.85、0.90这4种情况进行试验研究。

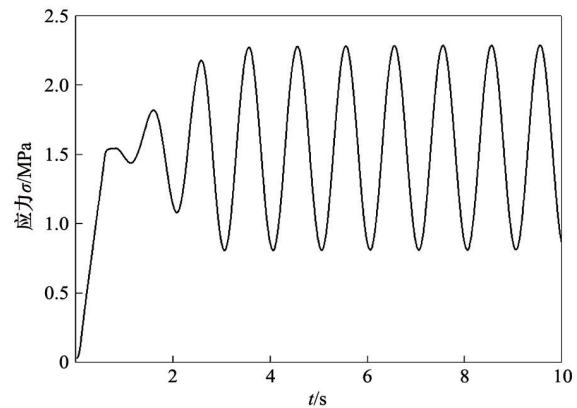


图3 加载波形示意

Fig. 3 Loading waveform schematic

2 试验结果与分析

2.1 上限应力对红砂岩疲劳寿命的影响

为研究上限应力对红砂岩疲劳寿命的影响, 本文采取固定下限应力, 改变上限应力的方法进行研究, 试验参数及试验结果如表2所示。图4是各试件应力、应变随时间变化的曲线。试验结果表明: 在相同下限应力、加载频率和波形的条件下, 红砂岩疲劳寿命随着上限应力的增大而减小, 即上限应力越大, 红砂岩疲劳寿命越短。在相同下限应力的条件下, 增大上限应力相当于增大振幅。上限应力较小时, 振幅也较小, 滞回环很狭窄, 意味着裂纹闭合和张开较小, 损伤量和能量耗散也很少, 疲劳进行缓慢。上限应力大时振幅亦大, 则滞回环大, 在循环损伤扩裂的作用下很快发生破坏^[9]。

表2 上限应力对疲劳寿命的影响

Table 2 Maximum stress's influence on fatigue life

试件编号	加载频率/Hz	上限应力比	下限应力比	幅值应力比	破坏时应变/%	疲劳寿命/s	备注
F-1-1	1	0.90	0.30	0.60	2.54	2.52	未达到最大值即破坏
F-1-7	1	0.85	0.30	0.55	2.38	29.55	正常破坏
F-1-4	1	0.80	0.30	0.50	2.32	未知	237 s仍未破坏
F-1-3	1	0.70	0.30	0.40	1.78	未知	340 s仍未破坏

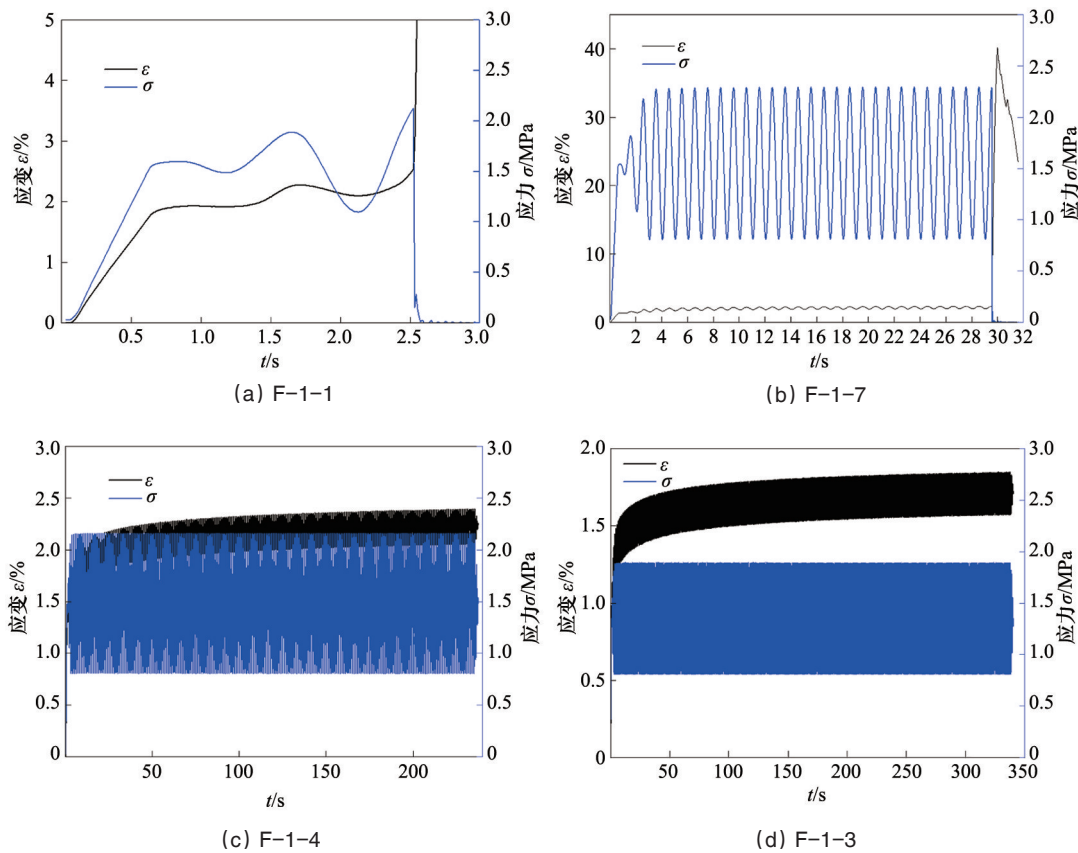


图4 应力、应变随时间变化曲线
Fig. 4 Curves of stress and strain over time

由于上限应力和循环加载过程中的能量密切联系在一起,所以下面从能量耗散角度分析上限应力对岩石破坏所需时间的影响。

周期载荷作用下产生的能量,一部分以摩擦热量的形式耗散,其余的能量转化成应变能用于疲劳裂纹的产生和扩展。这种能量耗散表现在应力-应变曲线上就是塑性滞回环的存在。由于循环塑性变形是岩石疲劳破坏的原因,所以必须考虑到岩石的弹塑性性质。把试件的变形分为弹性变形和塑性变形之和,即对于任一点有

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (3)$$

则

$$\Delta W = \Delta W_e + \Delta W_p \quad (4)$$

式中, ΔW 为每个循环的总应变能; ΔW_e 为弹性应变能; ΔW_p 为塑性应变能。

对于一闭合路径中,

$$\Delta W_e = 0 \quad (5)$$

故

$$\Delta W = \Delta W_p \quad (6)$$

又

$$\begin{cases} \Delta \varepsilon = \Delta \sigma / E \\ \Delta \sigma = K(\Delta \varepsilon^m / 2) \end{cases} \quad (7)$$

所以可以得到循环总应变能

$$\Delta W = \frac{1}{E^m} \frac{1-n}{1+n} \Delta \sigma^{m+1} \quad (8)$$

式中 E^m 为弹性模量。由此可见,每个循环的应变能 ΔW 与应力幅值直接相关,而在下限应力固定的情况下,应力幅值大小由上限应力决定。上限应力越大,应力幅值也就越大,则滞回环的面积越大,每个循环用于裂纹扩展的能量也就越多,岩石疲劳寿命(即破坏所需时间)就越短。

2.2 循环点载荷下红砂岩变形控制规律

图5是各试件应力-应变关系曲线,为方便对比观察,将静态和循环点荷载的应力-应变曲线放在同一幅图中显示。

单轴和三轴周期载荷下岩石疲劳破坏遵循变形控制规律:岩石的疲劳破坏完全受到静态全过程曲线的控制,疲劳破坏的极限应变(变形)即为周期载荷上限应力(载荷)水平线所对应的静态全过程曲线后区的应变(变形)总量^[2-5]。对照本次试验可知:已破坏的试件其实际破坏应变与由变形控制规律确定的理论值十分相近,试件 F-1-1 和 F-1-7 实际破坏时应变值与由变形控制规律确定的理论值误差分别为 1.6% 和 4.0%,这在工程上是非常小的;而尚未发生破坏的试件,其最大应变值离理论破坏值还很远。可见,“变形控制规律”在红砂岩循环点荷载试验中同样适用。

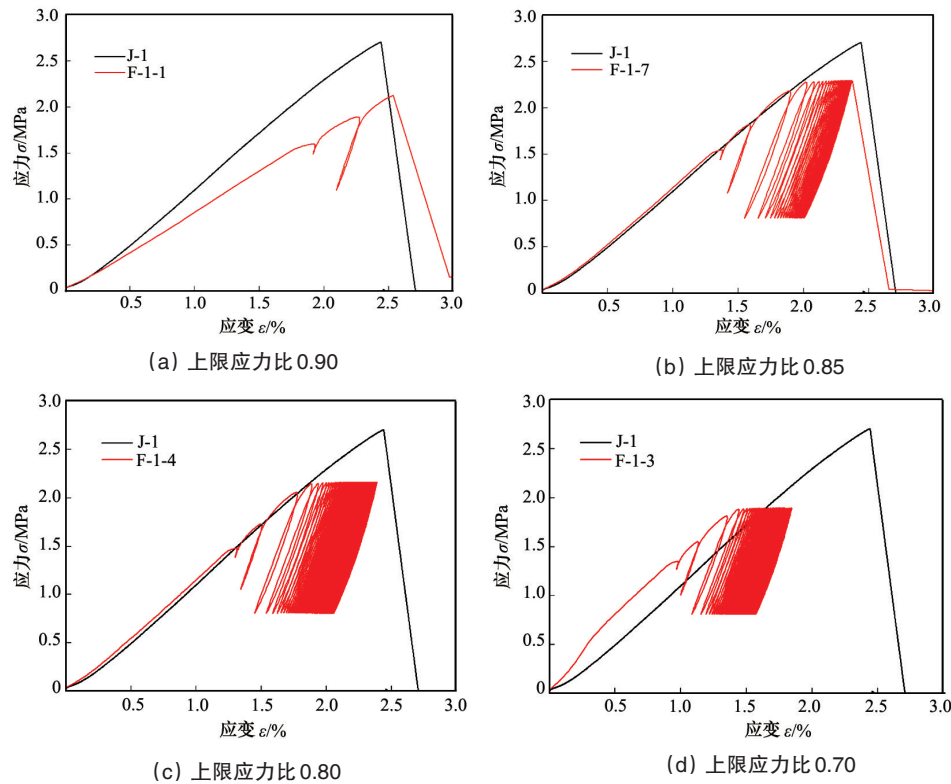


图5 静态和循环点荷载的应力-应变组合曲线

Fig. 5 Stress-strain combination curves of static and cyclic point loads

3 结论

试验利用MTS Landmark 试验系统完成了循环点荷载作用下上限应力对红砂岩疲劳寿命的影响及其变形控制特性的试验研究,试验结果表明:

1) 点荷载循环加卸载作用下,当加载波形为渐变正弦波,下限应力和加载频率不变时,上限应力越大,红砂岩的疲劳寿命越小,即,上限应力越大其破坏所需时间也越少。

2) 点荷载循环加卸载作用下,已破坏的试件其实际破坏应变与由变形控制规律确定的理论值十分相近,试件F-1-1和F-1-7实际破坏时应变值与由变形控制规律确定的理论值误差分别为1.6%和4.0%;尚未发生破坏的试件,其最大应变值还未达到理论破坏值。“变形控制规律”在红砂岩循环点荷载试验中同样适用。

分析红砂岩在点荷载循环加卸载作用下的破坏特性及各影响因素对其疲劳寿命的影响研究还需进一步的试验进行深入探讨。

参考文献(References)

- [1] 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]. 岩土工程学报, 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.
- [2] 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. Discussion on fatigue failure and irreversible

deformation of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(3): 56-60.

- [3] 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.
- [4] 任建喜, 葛修润. 单轴压缩岩石损伤演化微观机制及其本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 425-431.
Ren Jianxi, Ge Xiurun. Study on rock meso-damage evolution law and its constitutive model under uniaxial compression loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 425-431.
- [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] Bagde M N, Petroš V. Waveform effect on fatigue properties of intact sandstone in uniaxial cyclical loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2005, 38(3): 169-196.
- [7] Haimson B C. Mechanical behaviour of rock under cyclic loading: 9F, 1T, 11R[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts Pergamon, 1976, 13(2): A12.
- [8] Franklin J A. Suggested method for determining point load strength[C]// International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Oxford: Pergamon Press, 1985, 22(2): 51-60.
- [9] 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(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(11): 1282-1285.

(责任编辑 赵业玲)