

文章编号: 1001-1455(2013)06-0613-07

循环冲击作用下岩石应力应变曲线及应力波特性*

金解放¹, 李夕兵², 常军然³, 陶 伟¹, 邱 灿¹

(1. 江西理工大学建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000;

2. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083;

3. 江西理工大学应用科学学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 利用研制的岩石动静组合加载实验装置进行循环冲击实验, 研究了在循环冲击过程中岩石典型的动态应力应变曲线及反射波和透射波的变化规律。结果表明: 岩石在循环冲击过程中的动态应力应变曲线可分为压密阶段、弹性阶段、内部裂纹扩展的加载阶段、第 1 卸载阶段和第 2 卸载阶段等 5 个阶段。在相同入射波循环作用下, 随着循环次数的增加, 岩石的反射波峰值越来越大, 反射波峰值出现的时间越来越迟, 透射波峰值越来越小, 透射波峰值出现的时间越来越早, 表明在循环冲击过程中岩石内部损伤逐渐累积, 从而导致抵抗外部冲击载荷的能力逐渐降低。

关键词: 固体力学; 动态应力应变曲线; 循环冲击; 岩石; 应力波特征; 损伤累积; 强度劣化

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

目前, 传统的钻爆法仍是隧道和矿山工程开挖的主要手段^[1-2]。由于生产和工艺的需要, 大型地下洞室开挖和矿山开采大都需要多次爆破, 例如大断面隧洞施工过程的推进式往复爆破施工^[3]、小净距并行隧道的爆破开挖^[4]和核电站基岩小药量的多次爆破开挖^[5]。工程岩体遭受爆破、机械钻凿等循环动载作用时, 已经承受了自重应力和构造应力等静载荷, 如图 1 所示的点 A 和点 B 处的围岩, 图中 F_s 表示静载荷, F_d 表示冲击动载荷。基于上述认识, 工程岩体在爆破开挖过程中, 承受载荷的形式为具有一定静应力下的循环冲击。研究具有一定预应力岩石在循环冲击载荷作用下的力学特性对岩体工程安全、高效施工和运营具有重要意义。

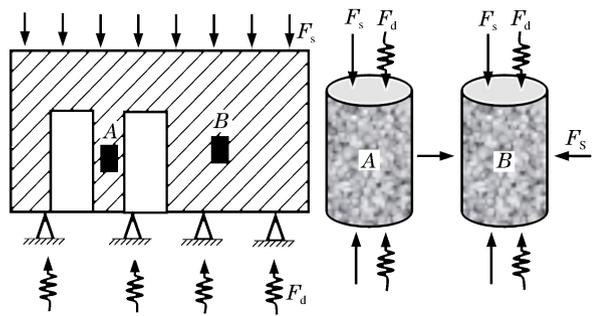


图 1 多次爆破开挖时围岩体受力示意图

Fig. 1 Force sketch of surrounding rock mass under repeated blasting excavation

岩石在静态或准静态循环载荷作用下的力学特性已取得丰硕的研究成果^[6-8], 而岩石在循环冲击载荷作用下的力学特性研究相对较少。X. B. Li 等^[9]利用杆径为 75 mm 的霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 研究无轴压无围压的花岗岩在多次冲击过程中的力学性能, 结果表明, 当冲击载荷的峰值应力小于岩石静态单轴强度的 60%~70% 时, 循环冲击基本不能增加岩石内部的损伤; 只有当循环冲击载荷强度达到静态强度的 80%~90% 时, 每次冲击引起的损伤才较大, 这相当于静态循环载荷时的门槛值问题。金解放等^[10-12]分别对岩石在静载荷和循环冲击组合作用下损伤变量的定义、动态强度劣化和疲劳变形以及破坏模式和机理进行了探索研究, 结果表明, 可用岩石波阻抗的变化定义其损伤变量; 当侧向围压为零时, 轴向静载荷大小对岩石抵抗外部冲击载荷的能力影响较大, 轴压为岩石单轴抗压强度的 22% 时, 抵抗能力最强; 承受静载荷的组合形式对岩石的破坏模式有较大影响。金

* 收稿日期: 2012-07-04; 修回日期: 2012-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51104068)

作者简介: 金解放(1977—), 男, 博士, 讲师。

解放等^[13]、吕晓聪等^[14]利用带围压装置的 SHPB,对斜长角闪岩、石英片岩和砂岩进行循环冲击实验,结果表明,随着循环冲击次数的递增,上升段的模量逐渐变小,屈服应力降低,应变增加。

文献^[9-14]对岩石在循环载荷作用下的力学特性研究取得了一些有益的结果。与静态循环载荷下岩石力学特性的研究成果相比,对循环冲击载荷作用下岩石的力学特性研究还处于起始阶段,许多问题有待进一步研究,例如岩石在循环冲击载荷作用下的应力应变曲线的变化特征,相同大小冲击载荷循环作用过程中反射波和透射波的变化规律等。基于此,本文中利用动静组合加载实验装置,对具有一定轴压的岩石进行循环冲击实验,重点讨论循环冲击过程中,单次冲击得到的岩石应力应变曲线的变化特性,以及此过程中反射波和透射波的变化规律,为深入研究岩石在循环冲击作用下的强度劣化和疲劳变形特性奠定基础。

1 试件制备及实验

1.1 试件制备

试件采用完整性和均质性较好的砂岩,根据应力波作用下岩石试件应力均匀的条件,试件的长径比为 1,尺寸为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,对试件的两端进行仔细研磨,两横截面的不平行度和不垂直度均小于 0.02 mm 。其平均单轴抗压强度为 96 MPa 。

1.2 实验设备

采用自行研制的基于 SHPB 装置的岩石动静组合加载实验系统^[15],该设备除了具有常规 SHPB 的功能外,还可以对岩石试件施加轴压和围压,如图 2 所示。该装置的冲头、入射杆、透射杆和吸收杆均为高强度 40Cr 合金钢,其弹性极限达 800 MPa ,纵波波速为 5.4 km/s ,密度为 7.81 g/cm^3 ,即其波阻抗的大小为 42 TPa/s ;直径 50 mm 的入射杆、透射杆和缓冲杆长度分别为 2 、 1.5 和 0.5 m ,发射腔内采用异型冲头以消除 PC 振荡,实现半正弦波加载,达到恒应变率加载的目的。数据采集和显示设备为 CS-1D 超动态应变仪和 DL-750 示波器。

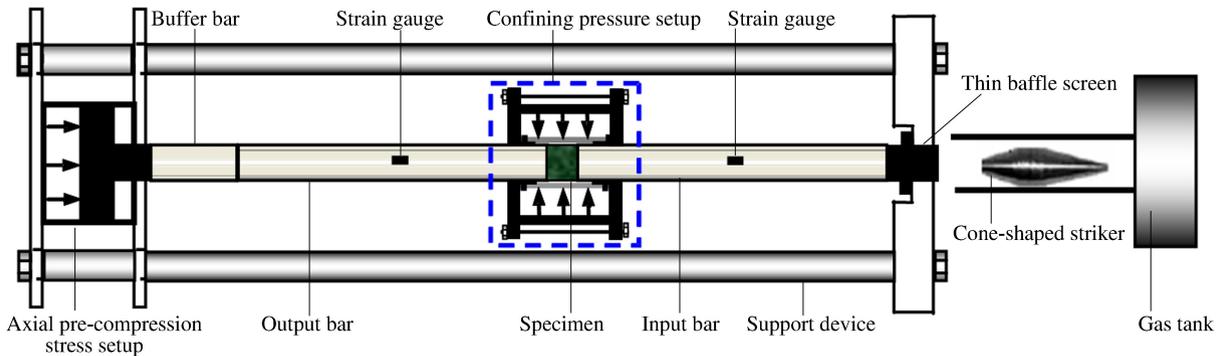


图 2 循环冲击的实验系统示意图

Fig. 2 Device of cyclic impact experiment

1.3 实验方法

在整个循环冲击过程中,试件的轴向预应力始终保持 49 MPa 、围压 4 MPa 。进行循环冲击实验时,异型冲头的起始位置始终不变,都在气腔的最里端,高压气室的气压都为 1.1 MPa 。

2 实验分析原理

2.1 实验原理

由于岩石试件的厚度很小,引入均匀性假设 $\epsilon_1(t) + \epsilon_R(t) = \epsilon_T(t)$ 。由实验测得的入射杆和透射杆的应变值,根据一维应力波理论,岩石试件的应力、应变和应变率用下式简化计算:

$$\sigma(t) = \frac{A_c E_c}{A_s} \epsilon_T(t) \quad (1)$$

$$\epsilon(t) = -\frac{2c_e}{L_s} \int_0^t \epsilon_R(t) dt \tag{2}$$

$$\dot{\epsilon}(t) = -\frac{2c_e}{L_s} \epsilon_R(t) \tag{3}$$

式中： A_e 、 c_e 和 E_e 分别是弹性杆的横截面面积、声波波速和弹性模量， A_s 和 L_s 分别是试样横截面面积和长度， $\epsilon_1(t)$ 、 $\epsilon_R(t)$ 和 $\epsilon_T(t)$ 分别为入射、反射和透射应变波。

2.2 应力波的多次透反射

根据一维应力波理论，由于试件和弹性杆(入射杆和透射杆)的波阻抗不同，应力波在入射杆和试件界面处必然发生反射和透射现象；同理，进入岩石试件内部的应力波，在试件和透射杆界面也产生反射波和透射波。如此往复，在试件与入射杆的界面及试件与透射杆的界面处将有多次透反射发生。图 3 为某时刻在岩石与两弹性杆界面处发生的多次透反射示意图，图中 A_1 和 A_2 分别表示岩石与入射杆的界面及与透射杆的界面； $\rho_e c_e$ 和 $\rho_s c_s$ 分别表示弹性杆和岩石试件的波阻抗，冲击过程中岩石的波阻抗 $\rho_s c_s$ 为变化量，而认为弹性杆的波阻抗 $\rho_e c_e$ 为定值； L_s 表示试件的长度； $\sigma_1(t)$ 表示入射应力波， $\sigma_{Ri}(t)$ 和 $\sigma_{Ti}(t)$ 分别表示第 i 次的反射和透射应力波。

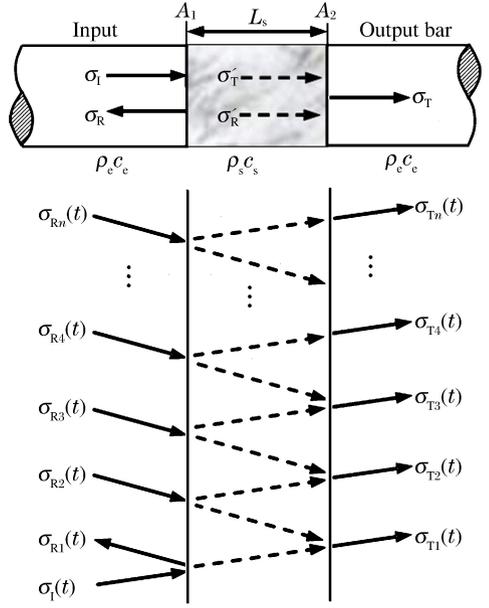


图 3 SHPB 系波的透反射传播图
Fig. 3 Propagation graph of transmission and reflection on SHPB

由一维应力波理论可知，界面两侧介质的速度和应力应相等。因此，入射波、反射波和透射波间应有如下关系：

$$\sigma_R(t) = \lambda \sigma_1(t) \tag{4}$$

$$\sigma_T(t) = (1 - \lambda^2) \sigma_1(t) \tag{5}$$

式中： $\lambda = (\rho_s c_s - \rho_e c_e) / (\rho_s c_s + \rho_e c_e)$ ，表示入射杆和试件间的反射波系数。

设定入射应力脉冲为 $\sigma_1(t) = f(t)$ ，其延续时间为 τ ，取定波前到达界面 A_1 的时刻为 0，则有

$$\sigma_1(t) = \begin{cases} 0 & t < 0, t \geq \tau \\ f(t) & 0 \leq t < \tau \end{cases} \tag{6}$$

由图 3 并结合式(4)~(5)可知，在时刻 t ，入射杆和透射杆测得的反射波和透射波应为^[10]

$$\sigma_R(t) = \sigma_{R1}(t) + \sigma_{R2}(t) + \dots = \lambda f(t) + (1 - \lambda^2) (-\lambda) f\left(t - \frac{2L_s}{c_s}\right) + (1 - \lambda^2) (-\lambda)^3 f\left(t - \frac{4L_s}{c_s}\right) + \dots \tag{7}$$

$$\sigma_T(t) = \sigma_{T1}(t) + \sigma_{T2}(t) + \dots = (1 - \lambda^2) f\left(t - \frac{L_s}{c_s}\right) + (1 - \lambda^2) (-\lambda)^2 \times f\left(t - \frac{3L_s}{c_s}\right) + (1 - \lambda^2) (-\lambda)^4 f\left(t - \frac{5L_s}{c_s}\right) + \dots \tag{8}$$

式中： c_s 为岩石试件纵波波速。

3 典型动态应力应变曲线

当试件的轴压为 49 MPa、围压为 4 MPa 时，循环冲击过程中单次冲击得到的典型动态应力应变曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出，应力应变曲线大致可以分为 5 个阶段：OA 段、AB 段、BC 段、CD 段和

DE 段,下面对每一段进行分析。

3.1 压密阶段

第 1 阶段为 OA 段,该段延续的时间约为应力波在岩样内传播一次所需的时间,该段应力应变曲线的斜率整体上小于后面的 AB 段,认为岩石试件在应力波作用下被逐渐“压密”,这与岩石在静态压缩实验时有压密过程^[16]一致。

下面证明在冲击过程中,岩石试件确实有一段被压密的过程。根据一维应力波理论,将式(5)逆变换,可以求得不同时刻的岩石波阻抗值的大小^[10]

$$\rho_s c_s = \frac{2 - n(t) - 2\sqrt{1 - n(t)}}{n(t)} \rho_1 c_1 \quad (9)$$

式中: $n(t) = \sigma_T(t) / \sigma_1(t)$ 。

波阻抗是由岩石密度和声波波速乘积而得,对同一岩石试件,其大小也能反映岩石的致密程度,波阻抗越大表示岩石越致密。图 5 为岩石试件在图 4 冲击过程中波阻抗随时间的变化曲线(部分)。从图 5 可以看出,岩样波阻抗的大小在前 13 μs (即应力在岩石试件传播一次所需的时间),即图 5 中 oa 段波阻抗值逐渐增加,证明岩石试件在此阶段是逐渐被压密的。

3.2 弹性阶段

第 2 阶段为 AB 段,此段应力应变曲线近似成直线型,认为是岩石发生了弹性变形。从图 5 中 ab 段波阻抗值的变化也可以看出,在此阶段岩石波阻抗大小基本没有变化,证明岩石仅发生了弹性变形。

3.3 内部裂纹扩展的加载阶段

第 3 阶段为 BC 段。该段的特点为应力应变曲线的切线斜率(即切线模量)逐渐降低,表明岩石试件内部裂隙在不断扩展,但发展比较稳定。C 点处为该次冲击过程中施加给岩石试件的最大冲击应力,简称峰值应力,其大小反映岩石对外部动载荷的最大抵抗力。由于 OA、AB 和 BC 段应力值一直逐渐增大,因此统称为加载阶段。

3.4 第 1 卸载阶段

第 4 阶段为 CD 段。该段的特点为外部动载荷逐渐减小,应变继续增加,直至到最大应变 D 处。相对于下一阶段 DE,定义 CD 段为第 1 卸载阶段。点 C 和 D 间割线斜率大小表示岩石抵抗变形的能力,其绝对值越大表示实验有较强抵抗冲击变形的能力。D 点的应变为峰值应变,D 点的应力值为临界卸载应力。

3.5 第 2 卸载阶段

第 5 阶段为 DE 段。该段的特点在于应变随应力的减小而减小,简称为第 2 卸载阶段。点 D 和点 E 间应变的变化量,表示冲击过程中岩石可恢复的弹性应变,其值越大表示岩石的弹性能力越好,反之表示岩石内部发生塑性变形越大。同理,点 D 到点 E 间应力的变化量与临界卸载应力之比,反映了冲击过程中由弹性变形所承受的动载荷能力大小。

4 循环冲击过程中应力波的特性

4.1 实验结果

当试件轴向静载为 49 MPa、循环冲击载荷大小相等时,循环冲击过程中岩石反射波和透射波的变

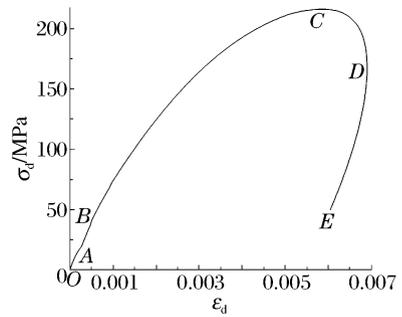


图 4 循环冲击中典型的应力应变曲线
Fig. 4 The typical stress-strain curve in cyclic impacts

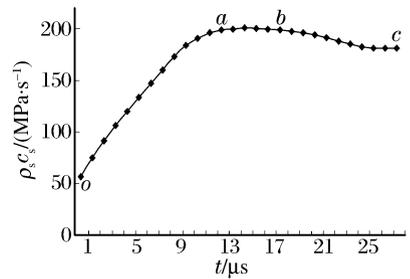


图 5 岩样的波阻抗随时间的变化曲线
Fig. 5 Wave impedance of rock sample varied with time

化如图6所示。从图6可以看出如下2个规律:(1)随循环冲击次数的增加,其透射波幅值越来越小,反射波的幅值越来越大;(2)随循环冲击次数的增加,透射波峰值出现的时间越来越早,而反射波出现的时间越来越晚。

4.2 实验结果分析

当冲击载荷达到一定值时,随循环冲击次数的增加,岩石内部损伤程度不可避免地逐渐增大^[9]。在循环冲击过程中,岩石内部损伤逐渐累积意味着其波阻抗值逐渐减小^[10]。由式(4)可以看出,当入射应力波 $\sigma_1(t)$ 大小相等时,随循环冲击次数的增加,岩石波阻抗越来越小,其反射波幅值必然呈越来越大的趋势。同理,由式(5)可以看出,当入射应力波大小一定时,随岩石波阻抗值逐渐减小,透射波幅值必然呈逐渐减小的趋势。这就是循环冲击过程中,岩石反射波幅值逐渐增加,而透射波幅值逐渐减小的原因。

由关系式(1)可得,在冲击过程中,岩石试件的应力与透射波绝对值大小呈正比,随循环冲击次数的增加,透射波幅值越来越小意味着岩石试件对循环冲击的抵抗能力逐渐降低,体现出岩石动态强度劣化的特性。由式(3)可以看出,每一瞬时岩石试件应变率的大小与其反射波的大小呈正比,随循环冲击次数的增加,反射波幅值越来越大,意味着岩石试件产生的应变率也越来越大。由式(2)~(3)可以看出,岩石应变与其应变率是积分关系,因此,随着循环次数的增加,岩石试件的应变也逐渐增大,体现出岩石动态疲劳变形的特性。

出现规律(2)的原因如下:假设岩石与弹性杆间仅有一次反射波和透射波,在相同入射波的情况下,反射波和透射波各自峰值出现的时间不会随岩石的波阻抗变化,即不会随循环次数的增加而改变,然而实际测试得到的反射波和透射波是多次透射应力波的叠加。随循环冲击次数的增加,岩石波阻抗逐渐降低,不同冲击次数相对应时刻的多次反射波和透射波的绝对值逐渐降低,且多次反射波与第1次的反射波方向相反,这就导致了反射波的峰值出现时间越来越晚,多次透射波与第1次透射波的方向一致,始终为压缩波,导致了透射波峰值时间越来越早。

从上述分析可以看出,规律(1)~(2)出现的原因都是由于循环冲击过程中岩石波阻抗逐渐减小引起的,而岩石波阻抗的减小意味着内部损伤程度的增加,因此,规律(1)~(2)通过不同角度表明循环冲击过程中岩石损伤累积的特性。

鞠杨等^[17]通过数值模拟研究了在相同入射波的情况下,反射波和透射波随岩石孔隙率的变化而变化的规律。对同一岩石试件,随着循环冲击的进行,岩石内部孔隙率也是逐渐增加,因此文献^[17]模拟的结果在一定程度上也可以反映反射波和透射波在循环冲击过程中的变化规律。

5 结 论

(1)根据应变和应变率的变化规律,在循环冲击过程中,单次冲击得到的典型动态应力应变曲线可分为5个阶段:压密阶段、弹性阶段、微裂纹扩展的加载阶段、第1卸载阶段和第2卸载阶段。

(2)随循环冲击次数的增加,反射波的峰值强度逐渐增加,而透射波的峰值强度持续减小,这表明岩石对外部冲击载荷的抵抗能力逐步降低。

(3)随循环冲击次数的增加,透射波的峰值出现的时间越来越早,而反射波的峰值出现的越来越晚。通过对应力波的多次透射进行分析,岩石试件波阻抗的持续降低和高次反射波和透射波与第1次的反射波和透射波传播方向不同是发生这些现象的主要原因。

(4)随循环冲击次数的增加,岩石反射波和透射波的变化规律是由于岩石波阻抗逐渐减小引起的,表明循环冲击过程中岩石损伤累积演化的特性。

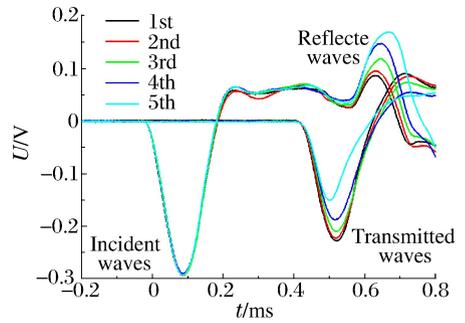


图6 循环冲击过程中应力波的变化规律

Fig. 6 Stress waves on cyclic impacts

参考文献:

- [1] 颜峰,姜福兴.爆炸冲击载荷作用下岩石的损伤实验[J].爆炸与冲击,2009,29(3):275-280.
Yan Feng, Jiang Fu-xing. Experiment on rock damage under blasting load[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(3):275-280.
- [2] 闫长斌,王泉伟,李国权,等.邻近爆破对矩形岩柱稳定性影响的突变理论分析[J].爆炸与冲击,2010,30(5):556-560.
Yan Chang-bin, Wang Quan-wei, Li Guo-quan, et al. Stability analysis of rectangular rock pillars influenced by vicinal blasting with catastrophe theory[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(5):556-560.
- [3] Ramulu M, Chakraborty A K, Sitharam T G. Damage assessment of basaltic rock mass due to repeated blasting in a railway tunnelling project—A case study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009,24:208-221.
- [4] 刘明贵,张国华,刘绍波,等.大帽山小净距隧道群中夹岩累计损伤效应研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(7):1363-1369.
Liu Ming-gui, Zhang Guo-hua, Liu Shao-bo, et al. Research on accumulative damage effect of interlaid rock in Damaoshan tunnel group with small clear distance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7):1363-1369.
- [5] Li Hai-bo, Xia Xiang, Li Jian-chun, et al. Rock damage control in bedrock blasting excavation for a nuclear power plant[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011,48(2):210-218.
- [6] 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 Xiu-run, Jiang Yu, Lu Yun-de, 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.
- [7] 杨春和,马洪岭,刘建锋.循环加、卸载下盐岩变形特性试验研究[J].岩土力学,2009,30(12):3562-3568.
Yang Chun-he, Ma Hong-ling, Liu Jian-feng. Study of deformation of rock salt under cycling loading and unloading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(12):3562-3568.
- [8] Liu En-long, He Si-ming. Effects of cyclic dynamic loading on the mechanical properties of intact rock samples under confining pressure conditions[J]. Engineering Geology, 2012,125(27):81-91.
- [9] Li X B, Lok T S, Zhao J. Dynamic characteristics of granite subjected to intermediate loading rate[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2005,38(1):21-39.
- [10] 金解放,李夕兵,殷志强,等.循环冲击下波阻抗定义岩石损伤变量的研究[J].岩土力学,2011,32(5):1385-1393;1410.
Jin Jie-fang, Li Xi-bing, Yin Zhi-qiang, et al. A method for defining rock damage variable by wave impedance under cyclic impact loadings[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(5):1385-1393;1410.
- [11] 金解放,李夕兵,殷志强,等.轴压和循环冲击次数对砂岩动态力学特性的影响[J].煤炭学报,2012,37(6):923-930.
Jin Jie-fang, Li Xi-bing, Yin Zhi-qiang, et al. Effects of axial pressure and number of cyclic impacts on dynamic mechanical characteristics of sandstone[J]. Journal of China Coal Society, 2012,37(6):923-930.
- [12] 金解放,李夕兵,王观石,等.循环冲击荷载作用下砂岩破坏模式及其机理[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(4):1453-1461.
Jin Jie-fang, Li Xi-bing, Wang Guan-shi, et al. Failure modes and mechanisms of sandstone under cyclic impact loadings[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012,43(4):1453-1461.
- [13] 金解放,李夕兵,钟海兵,等.三维静载与循环冲击组合作用下砂岩动态力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(7):1358-1372.
Jin Jie-fang, Li Xi-bing, Zhong Hai-bing, et al. Study of dynamic mechanical characteristic of sandstone subjected to three-dimensional coupled static-cyclic impact loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(7):1358-1372.
- [14] 吕晓聪,许金余,赵德辉,等.冲击荷载循环作用下砂岩动态力学性能的围压效应研究[J].工程力学,2011,28(1):

138-144.

Lü Xiao-cong, Xu Jin-yu, Zhao De-hui, et al. Research on confining pressure effect of sandstone dynamic mechanical performance under the cyclical impact loadings[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(1):138-144.

[15] Li X B, Zhou Z L, Lok S, et al. Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45:739-748.

[16] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 53-58.

[17] 鞠杨, 王会杰, 杨永明, 等. 应力波作用下岩石类孔隙介质变形破坏与能量耗散机制的数值模拟研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2010, 40(6): 711-726.

Ju Yang, Wang Hui-jie, Yang Yong-ming, et al. Numerical simulation of mechanisms of deformation, failure and energy dissipation in porous rock media subjected to wave stresses[J]. *Science China: Technological Sciences*, 2010, 40(6): 711-726.

Stress-strain curve and stress wave characteristics of rock subjected to cyclic impact loadings^{*}

Jin Jie-fang¹, Li Xi-bing², Chang Jun-ran³, Tao Wei¹, Qiu Can¹

(1. *School of Architectural and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;*

2. *School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;*

3. *School of Applied Science, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)*

Abstract: An innovative testing technique coupled by static and dynamic loads was introduced to investigate the typical dynamic stress-strain curve of the rock specimen under cyclic impact loadings as well as the changes of the reflected and transmitted waves propagating in it. The results show that the single typical stress-strain curve of the rock specimen under cyclic impacts can be divided into five stages: the compacted stage, the elastic stage, the loading stage of the internal crack propagation, the first unloading stage and the second unloading stage. With the increase in the number of impact, the amplitude of the reflected wave increases and the corresponding peak value appears later; the amplitude of the transmitted wave decreases and the corresponding peak value occur increasingly earlier, respectively. It is demonstrated that the cyclic impacts on the rock specimen are accompanied by the damage accumulation resulting in the reducing of its ability to resist the external impact loads.

Key words: solid mechanics; dynamic stress-strain curve; cyclic impact; rock; stress waves characteristic; damage accumulation; strength deterioration

* Received 4 July 2012; Revised 22 August 2012

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51104068)

Corresponding author: Jin Jie-fang, jjf_chang@126.com