

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0354

单轴循环冲击下弱风化花岗岩的损伤演化*

闫雷¹, 刘连生^{1,2}, 李仕杰¹, 杨道学¹, 刘伟¹

(1. 江西理工大学资源与环境工程学院, 江西赣州 341000;

2. 江西理工大学江西省矿业工程重点实验室, 江西赣州 341000)

摘要: 为研究爆破应力波作用下弱风化花岗岩的力学特性和损伤演化机理, 利用直径 50 mm 的改进分离式 Hopkinson 压杆装置, 开展以不同速度对花岗岩进行单次和等速循环冲击下的实验研究。研究表明: 单次冲击中, 用能量法确定的损伤阈值, 可用于循环冲击实验中; 不同应变率下弱风化岩石裂纹扩展阶段存在应力松弛平台, 且随应变率升高而愈发明显, 峰值应力与应变率呈正相关。等速循环冲击中, 最大应力、应变与冲击速度呈正相关, 与岩样累积冲击总次数呈负相关; 损伤演化具有 3 个阶段呈倒 S 形, 由其构建的双参数损伤演化模型拟合效果理想, 且具有物理意义; 利用模型中的参数 α 和 β 可计算中值点处的损伤度和相对循环次数, 且与冲击速度正相关; 不同损伤变量计算的损伤演化模型不同, 合理定义损伤变量是必要的。

关键词: 弱风化花岗岩; 循环冲击; 损伤阈值; 演化模型

中图分类号: O382 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Damage evolution of weakly-weathered granite under uniaxial cyclic impact

YAN Lei¹, LIU Liansheng^{1,2}, LI Shijie¹, YANG Daoxue¹, LIU Wei¹

(1. School of Resource and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;

2. Jiangxi Key Laboratory of Mining Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties and damage evolution mechanism of weakly-weathered granite under blasting stress wave, single and constant-velocity cyclic impact tests on the granite specimens at different velocities were carried out using a modified split Hopkinson pressure bar (SHPB) with the diameter of 50 mm. The results show that the damage threshold determined by the energy method in single-impact tests can be used in the cyclic-impact tests. The stress relaxation platform exists in the crack propagation stage of the weakly-weathered granite at different strain rates, and it becomes more obvious with the increase of strain rate. The peak stress is positively correlated with strain rate. In the cyclic impact, the maximum stress and strain are positively correlated with the impact velocity, and negatively correlated with the total number of cumulative impacts; the damage evolution can be divided into three stages taking on an inverted-S shape, and a damage evolution model with two parameters is established by it. The fitting effect of the model is ideal and has physical significance; the damage degree at the median point and the relative number of cycles can be calculated by using the parameters α and β in the model, are positively correlated with the impact velocity. The damage evolution models described by different damage variables are different, so it is necessary to define the damage variables reasonably.

Keywords: weakly-weathered granite; cyclic impact; damage threshold; evolution model

* 收稿日期: 2019-09-15; 修回日期: 2019-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(51404111); 江西省自然科学基金(20192BAB206017); 江西理工大学清江优秀人才支持计划(JXUSTQJYX2016007)

第一作者: 闫雷(1994—), 男, 硕士研究生, yanleijxust@163.com

通信作者: 刘连生(1979—), 男, 博士, 教授, lianshengliu@jxust.edu.cn

赣南地区的花岗岩风化壳是我国南部红土风化壳的一部分^[1],爆破开挖活动不可避免的经过风化壳。爆破作业过程中岩体在多次动力扰动作用^[2]下极易发生失稳破坏,这是动态损伤累积的结果^[3]。因此,研究风化岩石在爆炸应力波反复作用下的损伤演化规律,对揭示风化岩石动态损伤力学特性、提高风化岩体稳定性及对风化壳矿体爆破增渗技术研究^[4]具有重要的理论和实际意义。

分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)实验系统广泛应用于岩石动态力学特性研究^[5],许多学者开展了循环冲击下岩石力学特性的研究:金解放等^[6-8]研究了砂岩在静载与循环冲击组合加载下的破坏模式,用波阻抗定义了损伤变量,并结合 Logistic 方程的逆函数建立了损伤演化模型,分析了各参数的物理意义及围压和轴压对其的影响。王春等^[9]对深部岩石在三维高静载下进行频繁动力扰动实验,推演了损伤演化方程和岩石本构模型并进行了实验验证。不考虑轴压和围压组合加载的情况下,朱晶晶等^[10]对花岗岩进行单轴循环冲击实验,基于 Weibull 分布的动态损伤本构模型分析了岩石累积损伤的演化规律,变形模量、屈服应变等随冲击次数增加均会发生变化,可以用来描述损伤演化的过程。Li 等^[11]利用摆锤驱动的 SHPB 装置对绿砂岩反复冲击,从声学特性、能量耗散、变形特征和微裂纹演变的角度揭示了绿砂岩损伤演化的内在机制。王志亮等^[12]对黑云母花岗岩以 4 种不同应力幅值进行等幅值循环冲击研究其损伤演化机理,结合裂纹起裂应力讨论了循环冲击岩石的损伤应力阈值问题。上述研究主要以深部致密岩石或完整性、均质性好的岩块为主,对具有一定风化程度的岩石,在循环冲击载荷下的力学性质和损伤演化规律的研究鲜有报道。

本文中,以弱风化花岗岩为研究对象,利用改进的 SHPB 装置,以不同的冲击速度单次冲击同组岩样,并结合准静态应力应变曲线,从能量角度分析损伤应力阈值的确定方法;在损伤阈值内,以 3 种速度对岩样进行等速循环冲击,利用每次冲击后的轴向最大应变研究损伤演化规律,用变形模量定义的损伤变量建立损伤演化模型,并讨论各个参数的物理意义,以为花岗岩风化壳岩土爆破破岩或防护设计提供参考。

1 实验

1.1 试样制备

岩样取自赣南安远县某稀土矿半风化层,为粗粒黑云母弱风化花岗岩。按照岩石力学实验规定,将岩样粗坯经过钻、切、磨加工成直径为 50 mm 的圆柱体试样,静载试件长度取 100 mm,动载试件长度取 50 mm^[13],端面不平行度和不垂直度均小于 0.02 mm。根据《GB50021—2001 岩土工程勘察标准》对花岗岩风化程度进行划分,并利用超声波纵波波速和强制饱和吸水法测得的有效孔隙度再对弱风化岩样进行筛选,保证实验样本的物理力学性质一致。为避免水对实验结果的影响,将所选试样在 108 °C 下烘干 48 h,置于干燥器中冷却至室温待用。采用江西省矿业工程重点实验室的 RMT-150C 试验机对干燥花岗岩进行单轴压缩实验。图 1 为加工好的部分试样。试样的基本物理力学参数:密度 $\rho = 2\ 389\ \text{kg/m}^3$,有效孔隙度 $n_{\text{eff}} = 2.55\%$,纵波波速 $v_p = 3\ 658\ \text{m/s}$,应变率 $\dot{\epsilon} = 5.0 \times 10^{-5}\ \text{s}^{-1}$,准静态单轴抗压强度 $\sigma_{\text{qc}} = 25.15\ \text{MPa}$,弹性模量 $E = 6.942\ \text{GPa}$,泊松比 $\mu = 0.257$ 。

1.2 实验装置及原理

冲击实验在江西理工大学 SHPB 实验系统上^[14]完成,实验系统如图 2 所示。该装置的冲头和杆件的材质均为 40Cr 合金钢,密度为 $7\ 810\ \text{kg/m}^3$,纵波波速为 $5\ 400\ \text{m/s}$,弹性模量为 $240\ \text{GPa}$,波阻抗为 $42\ \text{TPa/s}$;杆件直径为 50 mm,入射、透射和吸收杆的长度分别为 2.0、1.5 和 0.5 m;采用纺锤形冲头消除 P-C 振荡^[15]实现恒应变率加载,冲头直径为 50 mm,长度为 265 mm。



图 1 加工好的部分岩石试样

Fig. 1 Processed weakly-weathered granite specimens

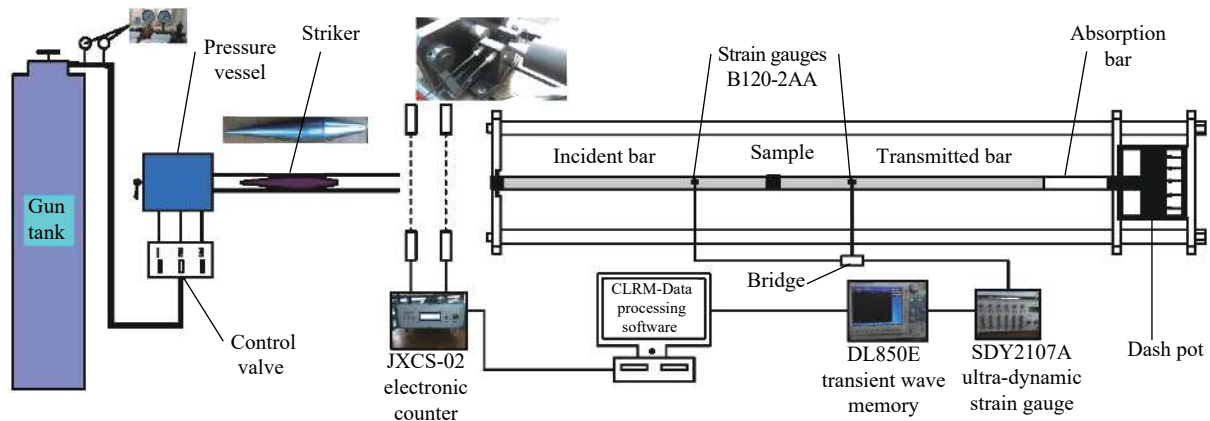


图 2 SHPB 实验系统

Fig. 2 SHPB experimental system

基于一维应力波和动态平衡假定, 结合采集到的入射应变信号 $\varepsilon_i(t)$ 、反射应变信号 $\varepsilon_r(t)$ 和透射应变信号 $\varepsilon_t(t)$, 对脆性岩石用三波法^[16] 计算其动态应力 $\sigma(t)$ 、应变 $\varepsilon(t)$ 和应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$ 能够得出准确结果, 分别为:

$$\sigma(t) = \frac{A_b E_b}{2A} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \tag{1}$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{c_b}{L} \int_0^t [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \tag{2}$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{c_b}{L} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \tag{3}$$

式中: A 、 L 分别为试样的横截面积和长度; E_b 、 A_b 分别为压杆的弹性模量和横截面积; c_b 为压杆纵波波速。

1.3 实验方案

为了研究弱风化花岗岩在爆炸应力波作用下的损伤演化机理, 采用 SHPB 实验系统对其施加一维循环冲击载荷。由于风化壳内岩石埋深较浅, 可不考虑围压和轴压。通过调节气室气压和冲头在发射腔的位置来控制冲头速度。将所有试样以 5 个/组, 分为单次冲击实验组 A 到 E, 冲击速度由低到高, 组内以字母加数字的形式编号, 例如 A1、D2; 等速循环冲击组 F、G 和 H, 组内以字母加数字的形式编号, 例如 F1-4 为 F 组 1 号岩样第 4 次冲击。(1) 以不同的速度对一组试样进行单次冲击直到发生宏观破裂, 确定产生有效损伤的冲击速度范围;

(2) 以不同的有效损伤冲击速度对试样进行等速循环冲击至裂实验。在试样/压杆接触面涂抹润滑油来降低端面摩擦效应^[17]。每次冲击后的动态应力平衡检验是必要的^[18], 并以此来筛选有效实验数据, 图 3 为 E4 岩样在 7.89 m/s 冲击下的应力平衡图。

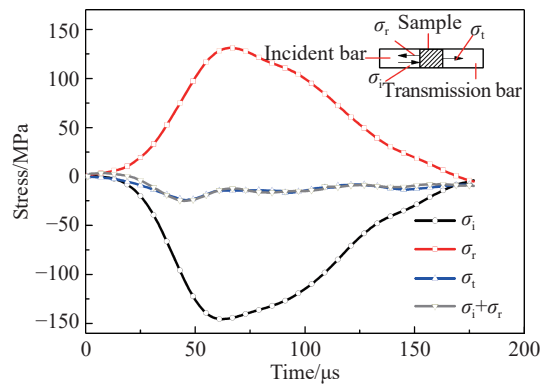


图 3 岩样 E4 动态力平衡检验

Fig. 3 Dynamic stress balance check for specimen E4

2 岩石损伤阈值确定

岩石在循环冲击荷载下, 存在一个开始出现损伤的阈值。葛修润等^[19] 通过岩石周期疲劳实验和 CT 细观分析得出疲劳损伤门槛值对应裂纹起裂应力。王宇等^[20] 结合声发射事件对单轴压缩起裂机制进行了分析, 并用裂纹体积应变拐点确定起裂应力, 具有明确的物理意义。梁玉昌等^[21] 研究得出在中低

应变率范围内花岗岩的静态起裂应力和峰值强度的比值与应变率无明显关系,王志亮等^[12]以此为基础利用 Nicksiar 等^[22]提出的“侧向应变响应法”确定起裂应力,提出动态起裂应力近似等于静态起裂应力与动态增长因子^[23]的乘积,作为循环冲击的损伤阈值。Li 等^[24]使用大直径 SHPB 对花岗岩反复冲击研究其损伤特性时,以该花岗岩静态应力-应变曲线线性偏离点,即损伤强度作为损伤冲击阈值。由上可知,起裂应力在中低应变率范围内作为岩石损伤阈值是可行的,在高应变率加载下,动态起裂应力与动态抗压强度的比值的率无关性有待进一步实验验证;直接用准静态损伤强度作为动态冲击损伤阈值,忽略了动态峰值应力、应变的率效应。以静态损伤加载能量为阈值,可避免高应变率下岩样具有高动态峰值强度 σ_{dc} 对应低动态峰值应变 ε_{dc} 时,分别以应力或应变为阈值判定的损伤结果相矛盾。

单轴压缩条件下,岩样达到静态损伤强度 σ_{cg} 吸收的体积能量 W_{cg} 为其应力-应变曲线下所包含的面积^[25-26],如图 4(a)所示;动态体积加载能 W_{dc} 为其动态应力-应变曲线加载段面积,如图 4(b)所示。可通过定积分的方法计算,即:

$$W_x = \int_0^{\varepsilon_x} \sigma_1 d\varepsilon_1 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\sigma_{i+1} + \sigma_i) (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \quad (4)$$

式中: σ_i 和 ε_i 分别为应力-应变曲线上的任一点的应力及其对应的轴向应变(其中 $i=1, 2, 3, \dots$),当 $i=0$ 时 $\sigma_i=\varepsilon_i=0$;将 $x=cg, dc$ 代入式(4)中,分别计算 W_{cg} 和 W_{dc} ,单位为 J/cm^3 。

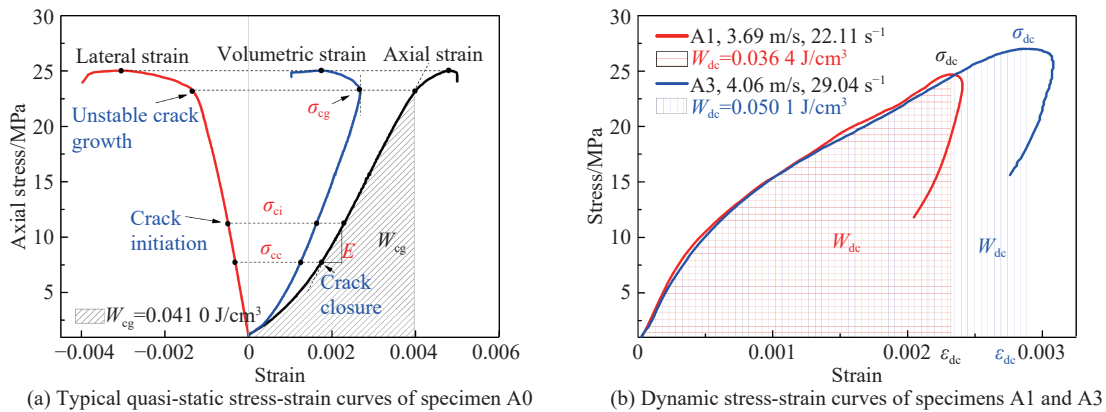


图 4 加载段单位体积能量计算

Fig. 4 Volume energy calculation for load segment

由上述分析得到, $W_{cg}=0.0410 J/cm^3$ 为循环冲击损伤下限,由图 4(b)可得,当冲头速度 $v \geq 4.06 m/s$ 时, $W_{dc} > W_{cg}$;对一组试样以不同速度进行单次冲击,以冲击后产生宏观裂纹所对应的速度为损伤上限,实验结果见图 5 和表 1。表 1 中 n_{eff} 为有效孔隙度, L/D 为试样长径比, ρ 为试样密度, v 为冲击速度, v_l 为纵波波速, σ_{dc} 第一次冲击动态峰值应力, ε 为第一次冲击平均应变率, N 为累积冲击次数, W_i 为入射能量。

图 5(a) 给出了不同应变率下岩样的应力-应变曲线。当冲击速度为 $6.94 m/s$ 时,岩石破裂,并以此速度为损伤上限。在冲击载荷下,弱风化岩石损伤大致可分为弹性阶段、裂纹扩展阶段和卸载阶段 3 个阶段;相对准静态加载而言,其压密阶段不明显但存在。其中,卸载阶段以最大应变为界又可分为第 1 和第 2 卸载段^[11],第 2 卸载段均出现应变回弹,是由于岩样在卸载过程中未完全破碎(图 5(b)、(c))仍具有一定的承载能力,并伴随弹性应变能释放而造成的。裂纹扩展阶段有两种表现形式,即近似线性的稳定增长和凹型的非稳定增长,且随应变率升高下凹段越明显。这是由于风化岩石内部空隙发育,加载初期微裂隙压密,骨架和孔洞共同承力进入弹性变形阶段;随应力增高,部分孔隙坍塌并再次平衡,进入稳定扩展阶段;随着总的入射能增大,超过大部分孔洞的屈服极限,在弹性阶段后大量孔洞坍塌出现应力松弛平台段,耗散大部分能量^[27]。同时,在发生脆性断裂前出现短暂的应变硬化,可理解为孔洞坍塌后应力迅速在其附近集中,达到岩样整体的屈服强度后突然断裂破坏。

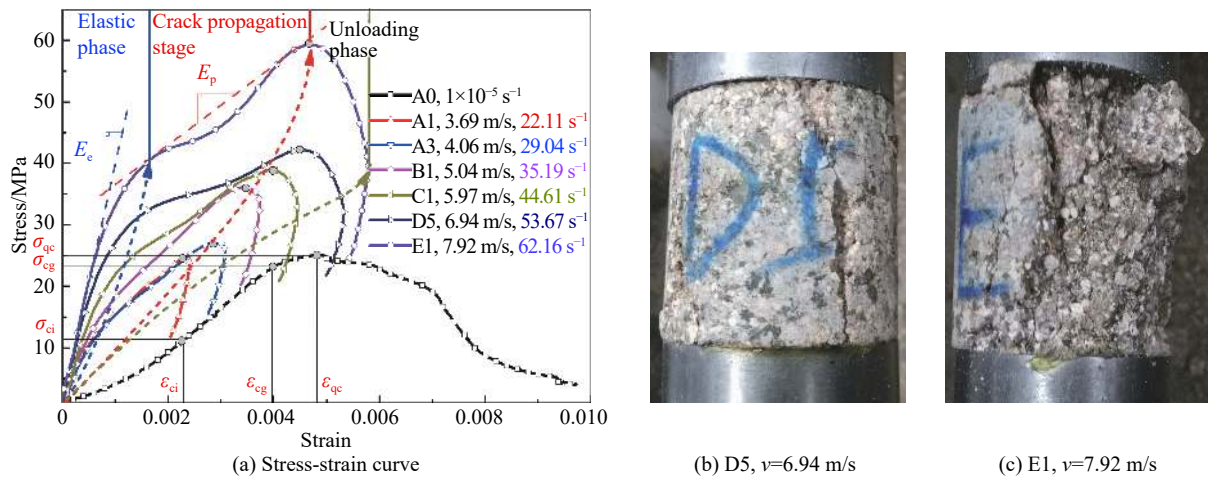


图 5 不同速度单次冲击的应力-应变曲线及破坏形式
 Fig. 5 Stress-strain curves and failure modes of the specimens subjected to single impact at different velocities

表 1 单次冲击和首次循环冲击实验结果

Table 1 Single impact and first cycle impact test results

编号	$v/(m \cdot s^{-1})$	W_i/J	L/D	$n_{crit}/\%$	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$v_i/(m \cdot s^{-1})$	σ_{ac}/MPa	$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	N
A1	3.69	8.85	1.02	2.35	2 477	3 628	24.76	22.11	1
A3	4.06	12.80	1.04	2.47	2 456	3 601	27.01	29.04	1
B1	5.04	20.03	1.03	2.50	2 455	3 594	36.06	35.19	1
C1	5.97	27.25	1.03	2.32	2 434	3 634	38.93	44.61	1
D5	6.94	37.92	1.03	2.45	2 457	3 605	42.18	53.67	1
E1	7.92	52.65	1.03	2.36	2 472	3 625	59.31	62.16	1
F1-1	3.92	10.41	1.03	2.41	2 446	3 614	31.31	16.42	17
G3-1	4.98	15.39	1.02	2.37	2 426	3 623	36.84	26.59	11
H2-1	5.87	25.22	1.04	2.55	2 406	3 583	49.00	35.99	5

3 损伤演化

3.1 循环冲击实验结果

由上节可以确定有效冲击速度在 4.06 ~ 6.94 m/s 之间, 分别以近似 4、5 和 6 m/s 的速度对岩样进行等速循环冲击, 实验结果见表 1, 图 6 为岩样在不同冲击速度下的动态应力-应变曲线及其破裂形态。

从图 6 可以看出, 随着冲击速度的升高, 初始孔隙度相近的岩样达到破裂的冲击总次数明显减少, 最后一次冲击破裂的最大应变也有显著的增长。经过多次冲击后, 岩样最终出现一条贯穿裂纹, 表现出随着冲击次数增加的渐进性扩展(图 6(a))和突然贯通(图 6(b)和(c))两种。裂纹扩展段的应力松弛平台, 也会随着冲击速度和次数的增加而凸显。动态峰值应力和最大应变与冲击速度正相关; 随冲击次数的增多, 峰值应力递减, 应变率呈先升后降的趋势; 峰值应力的变化是由于每一次冲击都会对岩样造成有效损伤, 使其力学性质不断劣化, 第二次冲击后峰值应力偶有增大, 是冲击速度控制误差造成的; 应变率表示应变的速率, 与变形对时间的一阶导数。冲击前期力作用时间一定, 变形不断增大, 应变率升高; 冲击后期岩石内部积累了大量的微裂隙, 卸载后变形不会立即停止, 即变形时间延长, 应变率降低。从最后一次冲击的应力-应变曲线也可以看出, 在卸载阶段出现应变软化, 且末尾有回弹现象, 说明卸载后变形依然持续, 使得应变率降低。由此可见, 应变率不仅对加载应力敏感, 也与损伤程度相关。

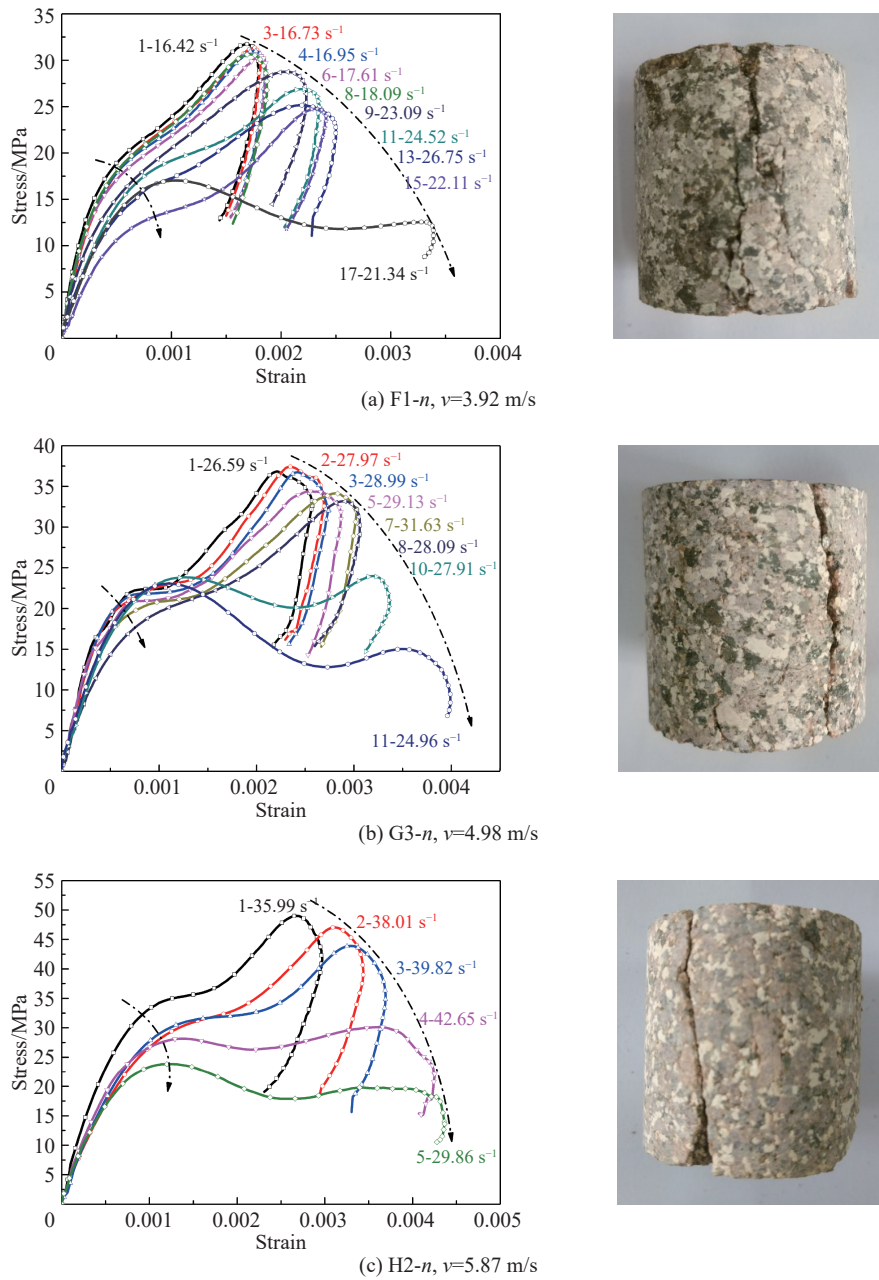


图6 不同速度循环冲击岩样的应力-应变曲线及其破坏形式

Fig. 6 Stress-strain curves and failure modes of different specimens subjected to cyclic impact at different velocities

3.2 损伤演化规律

为了描述循环荷载下岩石的疲劳损伤演化规律, Xiao 等^[28] 推导了完整岩石的倒 S 形疲劳损伤模型, 可分为 3 个阶段: 初始加速、稳定发展和加速扩展阶段; Liu 等^[29] 对间隔节理岩石进行循环单轴压缩, 不可逆应变也以 3 个阶段的倒 S 形发展; 金解放等^[8] 研究了岩石在静载荷和循环冲击组合加载下的损伤演化规律, 同样可分为 3 个阶段。由上可知, 岩石的疲劳损伤到破坏基本遵循倒 S 演化模型。本文中, 每次冲击后轴向最大应变 ϵ_{\max} 和循环冲击次数 n 也遵循这一规律, 如图 7 所示。

图 7 显示了不同冲击速度冲击下, 最大应变表示下岩石的疲劳损伤演化过程。可以看出, 在低速多次冲击下岩样破坏时的最大应变最小, 且随冲击速度增高, 稳定发展阶段的速度越快、历时越短, 最大应变值增大。用三次函数拟合可获得良好的效果, 但没有明确的物理意义, 需要建立简单合理的累积损伤演化模型。

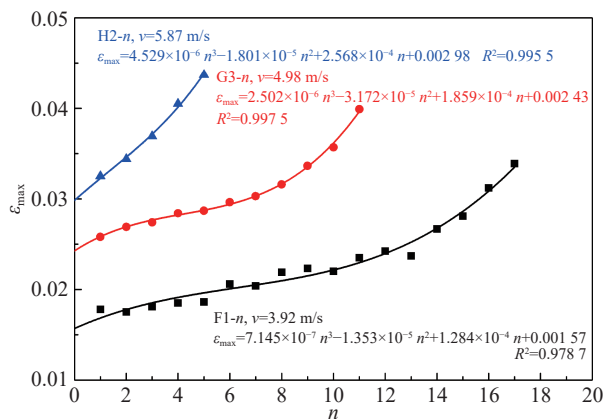


图 7 不同冲击速度下不同岩样最大轴向应变的演化

Fig. 7 Evolution of the maximum axial strain with cyclic-impact number at different impact velocities for different specimens

描述损伤的演化, 即:

$$D_{en} = 1 - \frac{E_{en}}{E_{e0}}, \quad D_{pn} = 1 - \frac{E_{pn}}{E_{p0}} \quad (5)$$

式中: E_{e0} 和 E_{p0} 分别取同批岩样中孔隙度最小、完整性最好的动态应力应变曲线^[31]上的相应值, 也是同批岩样中 E_{en} 和 E_{pn} 的最大值, 分别为 53 GPa 和 21.5 GPa, 以此作为弱风化花岗岩的初始变形模量。

岩石在循环加载下的损伤演化基本满足倒 S 形, Xiao 等^[28] 推导的疲劳损伤累积模型计及了岩石初始和第一次加载到最大应力所造成的损伤总和, 记为 D_0 , 不能单一量化首次加载所产生的损伤。金解放等^[8] 用 Logistic 方程的逆函数建立了损伤累积演化模型, 并分析了各个参数的物理意义, 但没有讨论过零点的意义, 且模型在初始和加速阶段损伤累积速率太快, 难以反映低冲击载荷扰动下损伤累积初始和破坏前渐进的演化过程。假设岩样冲击前损伤量 $D_0 = 0$, 这里讨论的初始损伤仅由冲击扰动产生。由其他非冲击扰动因素造成岩样的初始损伤, 可通过孔隙度、密度、纵波波速等无损检测得到的宏观指标来保持实验组岩样未冲击前损伤程度近似相同, 进而可不考虑; 冲击损伤量用式(5)计算, 破坏时 $D_N = 1$ 。

由 3.2 节知, 岩石循环冲击下累积损伤演化可用一元三次函数 $f(x) = \alpha x^3 + \beta x^2 + \eta x + C$ 表示, 当 $\alpha > 0$ 时, $f(x)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 内呈倒 S 形。自变量 x 用相对循环次数 n/N 表示, 因变量 y 用 D 表示; 由 $D(0)=0$ 得 $C=0$, 由 $D(1)=\alpha+\beta+\eta=1$ 得 $\eta=1-\alpha-\beta$, 整理得:

$$D = \alpha \left(\frac{n}{N}\right)^3 - \beta \left(\frac{n}{N}\right)^2 + (1 - \alpha - \beta) \left(\frac{n}{N}\right) \quad (6)$$

其中, 令 $D''=0$, 可得 $n/N=\beta/(3\alpha)$, 即该点为损伤减速累积与加速累积的拐点, 将其代入式(6)得到拐点对应的损伤值近似等于 $|\beta/\alpha-1|$, 相对差值在 4% 之内。因此, 可用 $\beta/(3\alpha)$ 表示达到中值点的相对循环次数, $|\beta/\alpha-1|$ 示中值点累积损伤程度, 图 8 显示了两种损伤变量表示的损伤演化模型。

由图 8 可以看出, D_p 的值明显高于 D_c 的值, 当 $D_p > 0.8$ 或 $D_c > 0.4$ 时均进入加速破坏阶段, 不同的损伤变量表示的演化模式差异较大, 对于风化岩石选取统一的损伤变量是预测疲劳寿命的必要前提。不同冲击速度下岩样损伤演化拟合相关系数均大于 0.97, 拟合效果理想。

图 9 分析了参数 α 和 β 对损伤演化模型的影响, 随 α 值增加, 初始阶段斜率变缓, 加速阶段斜率变陡, 控制着初始和加速阶段损伤累积的速率, 故参数 α 可定义为始、末段损伤累积速率因子; 随 β 值减小, $(\beta/\alpha)-1$ 增大, 因此, 参数 β 可表征稳定发展阶段损伤累积程度。综上所述, 本文提出的损伤演化模型可以较好地模拟不同冲击速度下岩石损伤演化的 3 个阶段; 双参数控制的模型, 关系式简单、物理意义明确, 可以估算中值点的损伤程度及其对应的冲击次数, 指导工程实践。

3.3 损伤演化模型

建立可靠的疲劳累积损伤模型来评估、预测岩石在频繁动力扰动下的寿命, 首先要定义合理的损伤变量。Xiao 等^[30] 列举了多种疲劳损伤变量的定义方法, 包括弹性模量法、最大应变法、能量耗散法、残余应变法、超声波速法和声发射累积计数法等, 都能用来描述损伤的演化。本文中选用弹性模量定义损伤变量, 通常取峰值应力的 40%~60% 之间的割线斜率, 或峰值应力的 50% 处切线斜率作为弹性模量计算损伤。从图 6 中可以观察到, 风化花岗岩的应力应变曲线具有明显的分段性, 且随冲击次数的增长变化明显, 因此不能用上述方法直接计算弹性模量。这里采用弹性阶段的切线模量 E_{en} 和裂纹扩展阶段割线斜率 E_{pn} (见图 5(a), 其中 n 表示冲击次数) 来

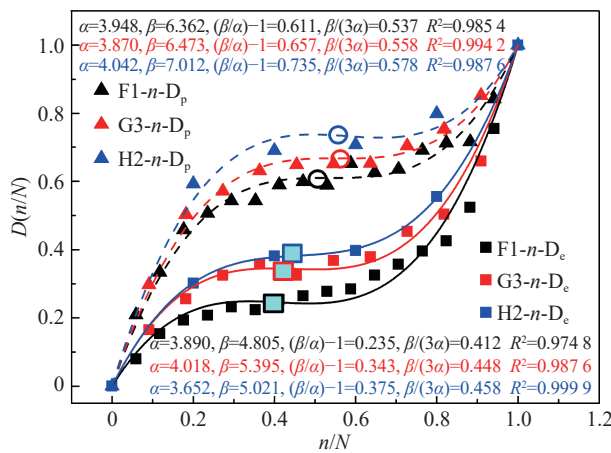


图 8 不同损伤定义下的损伤演化模型

Fig. 8 The damage evolution models represented by different damage variables

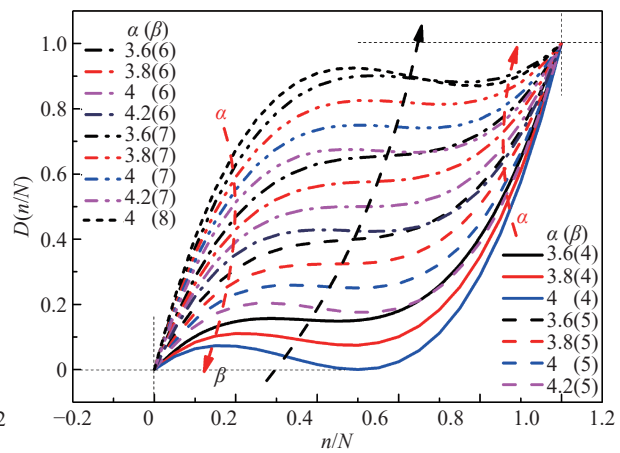


图 9 参数 α 和 β 对损伤累积模型的影响

Fig. 9 Effects of parameters α and β on the damage accumulation model

4 结 论

(1) 根据单次冲击作用下弱风化花岗岩力学特性和破坏形式, 结合准静态加载时达到损伤强度吸收的单位体积能和动态单位体积加载能的大小, 讨论了用能量确定损伤阈值的方法, 并通过确定产生有效损伤的冲击速度范围在 4.06~6.96 m/s 之间。

(2) 不同应变率下弱风化花岗岩应力应变曲线可分为弹性、裂纹扩展段和卸载 3 个阶段; 随应变率增加, 弹性模量增大、裂纹扩展阶段割线斜率呈先增后减趋势, 与新鲜致密岩石不同该阶段随应变率增大下凹越明显, 是由于孔洞坍塌出现的应力松弛; 峰值应力呈递增的趋势, 峰值应变后期增加不明显。

(3) 不同速度循环冲击下, 弱风化花岗岩应力应变曲线也具有 3 个阶段, 随冲击次数的增加弹模、割线模量均减小; 在等速循环冲击过程中, 由于损伤累积使得峰值应力递减, 应变率呈先增后减的趋势; 裂纹扩展段的应力松弛平台, 随冲击次数和冲击速度的增加而愈发明显; 最终形成一条贯穿的张开裂纹, 岩样整体仍保持完整。

(4) 循环冲击作用下弱风化岩石损伤演化具有初始加速、稳定发展、加速扩展 3 个阶段, 且随冲击速度增大, 这种趋势越不明显; 用弹性阶段的切线模量、裂纹扩展阶段割线斜率定义的损伤变量与相对循环次数建立了的双参数损伤演化模型; 讨论了待定参数的物理意义, 其中 α 为始、末段损伤累积速率因子, β 为稳定发展阶段损伤累积程度因子, 且中值点的相对循环次数 $\beta/(3\alpha)$ 和中值点累积损伤度 $(\beta/\alpha)-1$ 与冲击速度呈正相关。

参考文献:

[1] 沈滔, 李海东, 靳杨, 等. 赣南地区花岗岩风化壳中稀土元素特征探讨 [J]. 稀土, 2016, 37(2): 62-67. DOI: 10.16533/J.CNKI.15-1099/TF.201602010.
SHEN T, LI H D, JIN Y, et al. Discussion on the characteristics of rare earth elements from weathering crust of granites in south Jiangxi [J]. Chinese Rare Earths, 2016, 37(2): 62-67. DOI: 10.16533/J.CNKI.15-1099/TF.201602010.

[2] LI H B, XIA X, LI J C, 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. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2010.11.016.

[3] 李地元, 孙小磊, 周子龙, 等. 多次冲击荷载作用下花岗岩动态累计损伤特性 [J]. 实验力学, 2016, 31(6): 827-835. DOI: 10.7520/1001-4888-16-009.
LI D Y, SUN X L, ZHOU Z L, et al. On the dynamic accumulated damage characteristics of granite subjected to repeated impact load action [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(6): 827-835. DOI: 10.7520/1001-4888-16-009.

- [4] YAN L, YI W H, LIU L S, et al. Blasting-induced permeability enhancement of ore deposits associated with low-permeability weakly weathered granites based on the split Hopkinson pressure bar [J]. *Geofluids*, 2018, 2018: 4267878. DOI: 10.1155/2018/4267878.
- [5] ZHANG Q B, ZHAO J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(4): 1411–1478. DOI: 10.1007/s00603-013-0463-y.
- [6] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2011.05.017.
- JIN J F, LI X B, YIN Z Q, 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2011.05.017.
- [7] 金解放, 李夕兵, 王观石, 等. 循环冲击载荷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 J F, LI X B, WANG G S, 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.
- [8] 金解放, 李夕兵, 邱灿, 等. 岩石循环冲击损伤演化模型及静载荷对损伤累积的影响 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(8): 1662–1671. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.08.017.
- JIN J F, LI X B, QIU C, et al. Evolution model for damage accumulation of rock under cyclic impact loadings and effect of static loads on damage evolution [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(8): 1662–1671. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.08.017.
- [9] 王春, 唐礼忠, 程露萍, 等. 三维高静载频繁动态扰动时岩石损伤特性及本构模型 [J]. *岩土力学*, 2017, 38(8): 2286–2296; 2305. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.08.017.
- WANG C, TANG L Z, CHENG L P, et al. Damage characteristics and constitutive model of rock under three-dimensional high static load and frequent dynamic disturbance [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(8): 2286–2296; 2305. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.08.017.
- [10] 朱晶晶, 李夕兵, 宫凤强, 等. 单轴循环冲击下岩石的动力学特性及其损伤模型研究 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(3): 531–539.
- ZHU J J, LI X B, GONG F Q, et al. Dynamic characteristics and damage model for rock under uniaxial cyclic impact compressive loads [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(3): 531–539.
- [11] LI S H, ZHU W C, NIU L L, et al. Dynamic characteristics of green sandstone subjected to repetitive impact loading: phenomena and mechanisms [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(6): 1921–1936. DOI: 10.1007/s00603-018-1449-6.
- [12] 王志亮, 杨辉, 田诺成. 单轴循环冲击下花岗岩力学特性与损伤演化机理 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(2): 59–66. DOI: 10.11918/201811085.
- WANG Z L, YANG H, TIAN N C. Mechanical property and damage evolution mechanism of granite under uniaxial cyclic impact [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(2): 59–66. DOI: 10.11918/201811085.
- [13] DAI F, HUANG S, XIA K W, et al. Some fundamental issues in dynamic compression and tension tests of rocks using split Hopkinson pressure bar [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, 43(6): 657–666. DOI: 10.1007/s00603-010-0091-8.
- [14] LI X B, ZHOU Z L, LOK T 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(5): 739–748. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2007.08.013.
- [15] LI X B, LOK T S, ZHAO J, et al. Oscillation elimination in the Hopkinson bar apparatus and resultant complete dynamic stress-strain curves for rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(7): 1055–1060. DOI: 10.1016/S1365-1609(00)00037-X.
- [16] 宋力, 胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(4): 368–373. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)04-0368-06.
- SONG L, HU S S. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(4): 368–373. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)04-0368-06.
- [17] 王晓燕, 卢芳云, 林玉亮. SHPB 实验中端面摩擦效应研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(2): 134–139. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)02-0134-06.
- WANG X Y, LU Y F, LING Y L. Study on interfacial friction effect in the SHPB tests [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006,

- 26(2): 134–139. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)02-0134-06.
- [18] WANG P, YIN T B, LI X B, et al. Dynamic properties of thermally treated granite subjected to cyclic impact loading [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(4): 991–1010. DOI: 10.1007/s00603-018-1606-y.
- [19] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 岩石疲劳损伤扩展规律 CT 细观分析初探 [J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(2): 191–195. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2001.02.013.
- GE X R, REN J X, PU Y B, et al. Primary study of CT real-time testing of fatigue meso-damage propagation law of rock [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(2): 191–195. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2001.02.013.
- [20] 王宇, 李晓, 武艳芳, 等. 脆性岩石起裂应力水平与脆性指标关系探讨 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(2): 264–275. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.02.003.
- WANG Y, LI X, WU Y F, et al. Research on relationship between crack initiation stress level and brittleness indices for brittle rocks [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(2): 264–275. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.02.003.
- [21] 梁昌玉, 李晓, 王声星, 等. 岩石单轴压缩应力-应变特征的率相关性及其能量机制试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(9): 1830–1838. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2012.09.014.
- LIANG C Y, LI X, WANG S X, et al. Experimental investigations on rate-dependent stress-strain characteristics and energy mechanism of rock under uniaxial compression [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(9): 1830–1838. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2012.09.014.
- [22] NICKSIAR M, MARTIN C D. Crack initiation stress in low porosity crystalline and sedimentary rocks [J]. *Engineering Geology*, 2013, 154: 64–76. DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.12.007.
- [23] 宫凤强, 王进, 李夕兵. 岩石压缩特性的率效应与动态增强因子统一模型 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(7): 1586–1595. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1239.
- GONG F Q, WANG J, LI X B. The rate effect of compression characteristics and a unified model of dynamic increasing factor for rock materials [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(7): 1586–1595. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1239.
- [24] 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. DOI: 10.1007/s00603-004-0030-7.
- [25] 李树刚, 陈高峰, 双海清, 等. 加载速率和初始损伤对砂岩能量演化影响的试验研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(2): 373–380. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2019.02.021.
- LI S G, CHEN G F, SHUANG H Q, et al. Experimental study on effect of loading rate and initial damage on energy evolution of sandstone [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2019, 36(2): 373–380. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2019.02.021.
- [26] 文志杰, 田雷, 蒋宇静, 等. 基于应变能密度的非均质岩石损伤本构模型研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(7): 1332–1343. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1125.
- WEN Z J, TIAN L, JIANG Y J, et al. Research on damage constitutive model of inhomogeneous rocks based on strain energy density [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(7): 1332–1343. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1125.
- [27] ZHANG J X, WONG T F, DAVIS D M. Micromechanics of pressure - induced grain crushing in porous rocks [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(B1): 341–352. DOI: 10.1029/JB095iB01p00341.
- [28] XIAO J Q, DING D X, XU G, et al. Inverted S-shaped model for nonlinear fatigue damage of rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(3): 643–648. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2008.11.002.
- [29] LIU Y, DAI F, DONG L, et al. Experimental investigation on the fatigue mechanical properties of intermittently jointed rock models under cyclic uniaxial compression with different loading parameters [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(1): 47–68. DOI: 10.1007/s00603-017-1327-7.
- [30] XIAO J Q, DING D X, JIANG F L, et al. Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(3): 461–468. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2009.11.003.
- [31] YAN L, LIU L S, ZHANG S H, et al. Testing of weakly weathered granites of different porosities using a split Hopkinson pressure bar technique [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2018: 5267610.

(责任编辑 张凌云)