

单轴循环冲击下岩石的动力学特性及其损伤模型研究

朱晶晶¹, 李夕兵^{1,2*}, 宫凤强^{1,2}, 王世鸣¹

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 深部金属矿产开发与灾害控制湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘要: 利用改进的大直径 SHPB 试验装置, 对花岗岩试件进行单轴循环冲击压缩试验, 分析花岗岩在循环冲击载荷下的力学特性及能量吸收规律。通过基于 Weibull 分布的动态统计损伤模型计算岩石的累积损伤, 结合试验曲线分析岩石累积损伤的演化规律。研究结果表明: 随着冲击载荷循环作用次数的增加, 变形模量变小, 试件的屈服应变增大, 峰值应力呈降低趋势。岩石的累积比能量吸收值随着冲击次数的增加而增大, 且试件破坏前其值增加缓慢, 试件破坏时其值急剧增大。基于 Weibull 分布的动态损伤本构模型的计算曲线与试验曲线具有较好的一致性, 该模型能反映岩石的强度与应变、应变率的关系。累积损伤随着循环冲击次数的增加而增大, 其增加速率由小变大, 试件破坏前累积损伤的增加较为平缓, 其主要增量由最后一次冲击破坏产生。

关键词: 岩石力学; 霍普金森压杆; 动态压缩强度; 循环载荷; 损伤

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2013)03 - 0531 - 09

作者简介: 朱晶晶(1986 -), 男, 湖北襄阳人, 硕士, 主要从事岩石力学方面的研究。E-mail: zhujing6888@126.com。

Dynamic characteristics and damage model for rock under uniaxial cyclic impact compressive loads

ZHU Jing-jing¹, LI Xi-bing^{1,2}, GONG Feng-qiang^{1,2}, WANG Shi-ming¹

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Hunan Key Lab of Resources Exploitation and Hazard Control for Deep Metal Mines, Changsha 410083, China)

Abstract: Experiments on dynamic mechanical performance of granite are carried out under uniaxial cyclic impact loads by using a modified large diameter split Hopkinson pressure bar (SHPB). The dynamic characteristics of the granite specimens and the laws of the energy absorption are analyzed. The cumulative damage of the granite specimens is calculated by use of the dynamic statistics damage model based on the Weibull random distribution. The laws of the cumulative damage of the granite specimens are also analyzed through the stress-strain curves. The results show that, in the cyclic impact compressive tests, with the increase of repeated action times of impact loads, the deformation modulus of granite decreases, the yield strain increases and the yield stress shows a decreasing trend. The value of cumulative specific energy increases with the increase of impact times, which increases slowly before the failure of the specimen and increases rapidly at its failure. The model curves and the test curves have good consistency, which shows that this model can reasonably reflect the relationship of the stress-strain and stress-strain rate. The value of cumulative damage increases with the increase of impact times, and its increasing rate changes from slowly to rapidly. Before the failure of the specimen, the cumulative damage increases smoothly, and the main increment occurs in the last impact when the specimen is broken.

Key words: rock mechanics; split Hopkinson pressure bar (SHPB); dynamic compressive strength; cyclical load; damage

0 引言

近年来, 随着国家经济的迅猛发展, 各类大型岩体工程日渐增多, 与岩石力学相关的科研和实践得到了极大的发展, 同时也出现许多新的问题亟待解决^[1]。许多工程领域中的问题和各种自然灾害的产生都涉及到岩石在冲击载荷作用下的动态力学性能及动态破坏问题, 如隧道开挖、矿山开采、常规爆炸及核爆防护

工程, 以及滑坡、地震、岩爆等自然灾害, 从而使得岩石动力学及相关学科得到充分发展, 并已成为岩土力学界的热门前沿课题^[2]。实际工程中, 大多数岩体

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”项目)(2010CB732004);
国家自然科学基金项目(50934006, 41272304, 41102170)

收稿日期: 2012-05-14

*通讯作者

的破坏并不是由单次冲击载荷作用导致的，而是由多种形式载荷多次作用造成的，如炮弹对目标的多次打击、工程岩体的多次爆破以及多次地震余震对岩体破坏等。对一些大跨度隧道而言，由于采用多断面分次爆破开挖的方法，其掌子面周围岩体实际上受多次冲击动载荷的影响，可认为该过程属于动态循环冲击作用。因此，岩石在多次冲击荷载作用下的力学特性、损伤规律以及能量耗散特性，是探讨岩石破坏机理、应力波传播和衰减规律、结构的破坏效应分析等必不可少的基础信息和依据^[3]。

Meglis 等^[4]基于超声速度和振幅对裂纹的敏感性，应用超声层析成像现场测试方法研究了隧道开挖诱发的围岩损伤问题，得到围岩损伤程度和损伤分布规律。Gatelier 等^[5]对多孔砂岩进行了准静态单轴和三轴状态的循环加载试验，研究了各向异性对材料峰前损伤的影响。林大能等^[6]在压力试验机上开展对大理石试件的模拟冲击加载试验，得到了大理石试样的冲击损伤度与围压、荷载冲量和冲击次数的关系。李夕兵等^[7-9]、宫凤强等^[10]通过不断改进多载荷凿岩机、INSTRON 系统和 SHPB 装置，对岩石在不同加载形式下的强度特性、破碎规律及吸能效率进行了研究，得到大量研究成果。许金余等^[11]在不同围压等级和冲击荷载循环作用下，利用带围压装置的 SHPB 设备，对 3 种不同岩石的动力学性能进行了试验研究。

本文以花岗岩为研究对象，利用改进的 SHPB 装置进行常规的单轴冲击压缩和循环冲击压缩试验研究。采用基于 Weibull 分布的统计损伤本构模型计算岩石的损伤及累积损伤，研究其损伤演化规律。从而为正确认识岩体在循环荷载作用下的破坏机理，科学地评价工程岩体的长期稳定性，提供一定的理论依据和工程指导。

1 岩石的循环冲击压缩试验

1.1 花岗岩试样的制备及基本力学性能

从采自某花岗岩矿场的岩样中选取完整性和均质性较好的岩块作为研究对象。按照岩石力学试验性能测试要求，静载试件尺寸取为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。参考动态试验原理及已有的研究成果^[12]，动载试件尺寸取为 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。采用 2S-200 型立式取芯机、DQ-4 型岩石切割机、SHM-200 型双端面磨石机对岩样进行钻取、切割、打磨，使试件的不平行度和不垂直度均小于 0.02 mm。采用 RMT-150C 试验机对花岗岩试件进行基本力学性能测试，其静载物理力学参数见表 1。图 1 为加工好的岩石试件。图 2 为岩石静载试验的破坏形态。

表 1 花岗岩静载物理力学参数

Table 1 Physics-mechanical parameters of granite under static loads

密度 /(kg·m ⁻³)	应变率 /(s ⁻¹)	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	变形模量 /GPa
2 651	1.0×10^{-7}	145.44	2.36	15.03



(a) 静载试件



(b) 动载试件

图 1 加工好的岩石试件

Fig. 1 Processed granite specimens



(a) 静态单轴抗压



(b) 剪裂抗拉

图 2 岩石静载试验的破坏形态

Fig. 2 Failure modes of rock specimens under static loads

1.2 岩石 SHPB 试验装置

冲击试验采用自行研制的大直径 SHPB 装置（直径 50 mm），其示意图见图 3。

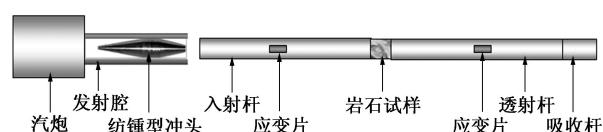


图 3 SHPB 试验系统示意图

Fig. 3 SHPB experimental system

该试验系统具有适应岩石类材料的非均质脆性的中高应变率加载特点，所得试样的应变率范围为 $10^1 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 。关于该装置的详细介绍可参考李夕兵等^[8-9]的研究。通过采用纺锤型结构冲头冲击产生半正弦应力波，从而实现试验过程的恒应变率的加载^[13]。图 4 为试件的受力模型与载荷示意图。

1.3 试验过程及结果

为避免试件被一次冲坏，达到循环冲击的效果，需对试件进行试验性的预冲击，即固定子弹在发射腔内的位置不变，选择合适的冲击气压对试件进行试验性的冲击加载，观察冲击后的试件状态，以试件破裂并有碎片剥离的状态为临界破坏状态。此时的气压值

认定为临界气压值。在进行循环冲击试验时, 需固定冲头在发射腔内的位置不变, 以低于临界气压值的气压进行循环冲击, 直至试样破坏。由于当入射应力波的峰值强度为 240 MPa 时, 试件已经开裂, 因此确定循环冲击试验的入射应力波峰值强度为 200 MPa 左右。图 5 为循环冲击试验中记录的典型波形叠加图。可以看出, 循环冲击中每次入射波的重复性很好, 基本一致。对试验数据进行处理, 试验结果见表 2。

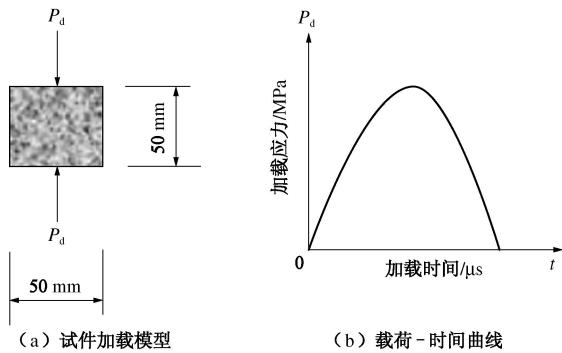


图 4 岩石冲击加载模型示意图

Fig. 4 Model sketch of rock specimens under impact loads

1.4 花岗岩循环冲击压缩试验结果及分析

图 6 是循环冲击载荷作用下花岗岩试件的应力应变曲线, 图中的数字表示冲击载荷循环作用的次序。由图 6 分析可知:

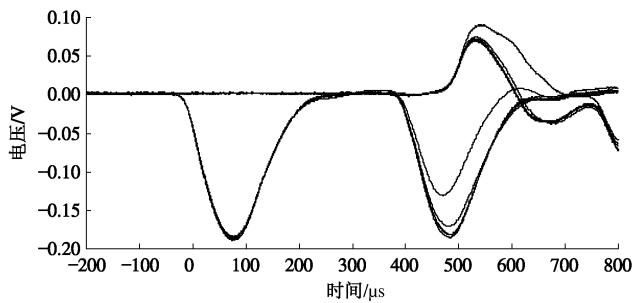


图 5 循环冲击试验中典型的波形叠加图

Fig. 5 Superposition of oscilloscopes in cyclic impact tests

(1) 试件破坏之前, 应力 - 应变曲线的初始段基本重合, 即初始弹模相同; 随着冲击载荷循环作用次数的增加, 应力 - 应变曲线的上升段斜率逐渐减小, 即变形模量变小, 且试件破坏时的曲线斜率减小的尤为显著。在一定范围内, 岩石的变形模量可以视为应变率无关量^[14], 因此可忽略应变率对变形模量的影响。从岩石材料的裂纹扩展和能量耗散角度来分析, 岩石中的原始细观裂纹由于冲击载荷的作用产生应力集中, 吸收能量导致裂纹起裂并扩展, 从而降低了岩石组构传递载荷的能力和效率, 导致变形模量减小, 材料性能劣化^[15]。继续施加冲击载荷, 岩石吸能增加, 已有的裂纹继续扩展, 且新裂纹逐渐增多, 从而导致其变形模量进一步减小。

表 2 花岗岩试件的力学试验参数和循环冲击压缩试验结果

Table 2 Mechanical parameters and experimental results of granite under cyclical impact compressive loads

试件编号	D/mm	L/mm	L/D	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$P_v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	n	P_a/MPa	σ_i/MPa	σ_d/MPa	$\dot{\varepsilon}/(\text{s}^{-1})$
0-4	49.32	51.04	1.03	2649	3998	1	1.00	265	191.48	54.63
0-6	49.42	50.24	1.02	2645	3980	1	1.00	267	212.10	60.25
						1	0.70	197	154.96	41.16
0-A1	49.36	49.88	1.01	2643	3979	2	0.70	204	150.73	47.43
						3	0.70	205	127.69	59.36
0-A2	48.86	49.50	1.01	2642	4090	1	0.70	202	166.42	40.13
						2	0.70	200	140.81	64.30
						1	0.70	196	171.16	30.31
						2	0.75	206	185.20	32.96
0-A3	49.30	52.40	1.06	2650	3973	3	0.80	218	195.43	36.53
						4	0.90	230	210.15	44.43
						5	0.90	230	164.27	58.67
						1	0.75	210	165.97	36.32
						2	0.75	214	173.69	37.24
0-A4	50.70	51.00	1.01	2649	4034	3	0.75	214	170.86	38.93
						4	0.75	211	161.36	41.67
						5	0.75	214	124.76	57.97

注: D 为试样直径, L 为试样长度, ρ 为密度, P_v 为纵波波速, n 为冲击次序, P_a 为冲击气压, σ_i 为入射波的峰值强度, σ_d 为应力应变曲线的峰值强度, $\dot{\varepsilon}$ 为应变率。

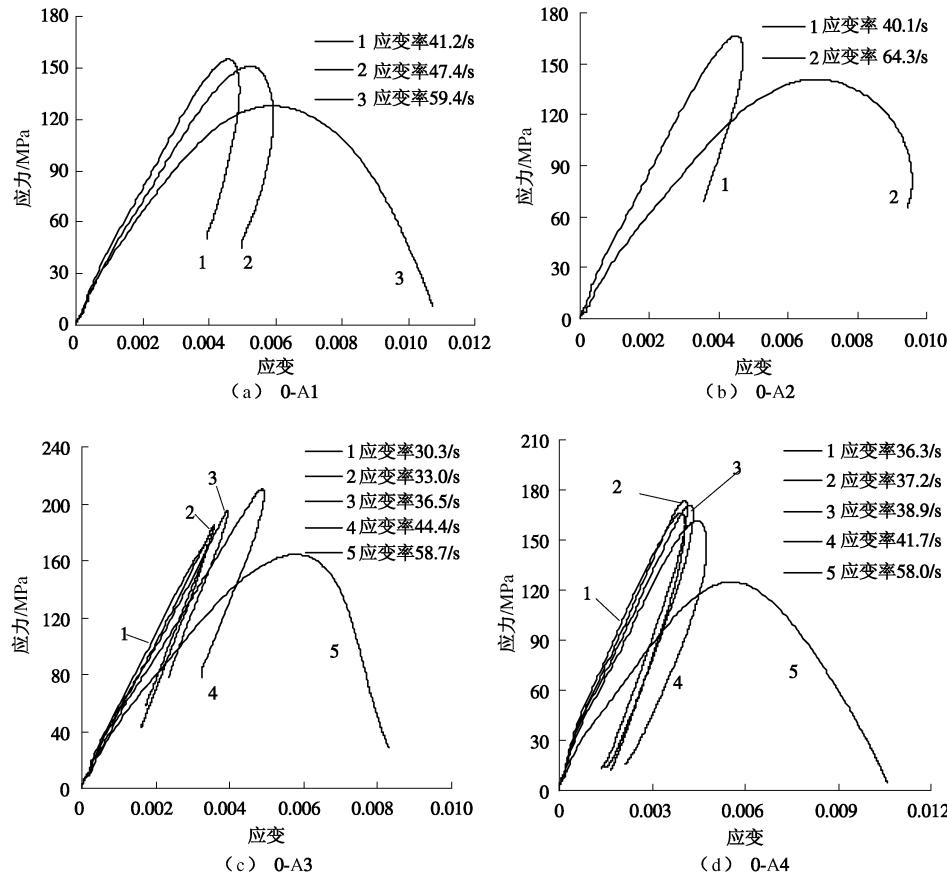


图 6 循环冲击载荷作用下花岗岩试件的应力 - 应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of granite specimens under cyclic impact loads

(2) 随着冲击载荷循环作用次数的增加, 试件的屈服应变增大, 峰值应力呈降低趋势。图 7, 8 分别为峰值应力、屈服应变与冲击载荷循环作用次数的关系。由图可知, 随着冲击次数的增加, 屈服应力逐渐增大, 且试件破坏时的屈服应变明显增加; 峰值应力基本上呈降低趋势, 最大降幅为 28%。但试件 0-A3 的峰值应力表现出先增大后减小的趋势, 这主要是由岩石强度的应变率效应引起的。由于其它试件循环冲击时的应变率大致相同, 应变率效应不明显, 试件受冲击载荷产生损伤, 并逐渐累积加剧, 峰值应力逐渐降低; 试件 0-A3 循环冲击时的应变率相差较大, 岩石强度的应变率效应显著, 即破坏前的峰值应力随应变率的增加而增大, 同样由于损伤的累积导致岩石性能的劣化, 其破坏时的峰值应力也会明显降低。

(3) 定义累积比能量吸收值 ϑ 为

$$\vartheta = \sum_{i=1}^n E_{V(i)} \quad (1)$$

式中 ϑ 为累积比能量吸收值, E_V 为单位体积吸收能, n 为循环载荷冲击次数。则由试验结果及公式(1)可得岩石的累积比能量吸收值随冲击载荷作用次数的关系, 如图 9 所示。

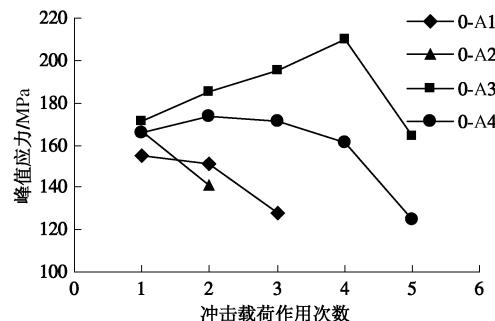


图 7 峰值应力与冲击载荷作用次数关系

Fig. 7 Relationship between peak stress and time of impact loads

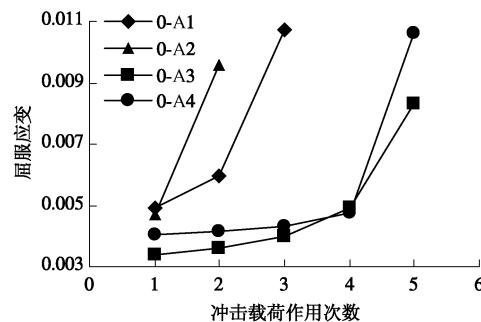


图 8 最大应变与冲击载荷作用次数关系

Fig. 8 Relationship between maximum strain and time of impact loads

由图9可知, 岩石的累积比能量吸收值随着冲击次数的增加而增大, 且试件破坏前其值增加缓慢, 均小于 $0.4\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$, 试件破坏时其值急剧增大, 最大增量约为总吸收能的70%。说明当入射能较小时, 试件吸能很少, 大部分入射能以反射能和透射能的形式耗散, 随着冲击次数的增加, 试件产生累积损伤, 吸能逐渐增大, 到达一定程度时, 吸能快速增加, 试件破坏, 即入射能主要被试件破坏所吸收^[14]。

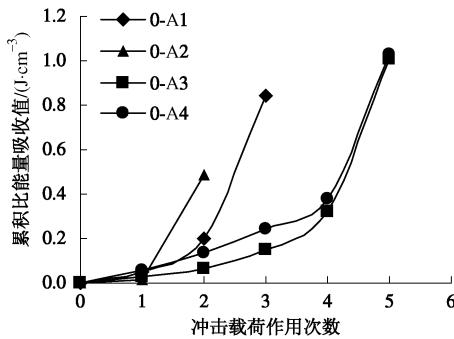


图9 累积比能量吸收值随冲击次数的关系图

Fig. 9 Relationship between value of cumulative specific energy and time of impact loads

2 岩石动态统计损伤本构模型

统计损伤理论是将统计理论与损伤理论相结合, 利用统计结果来定义损伤变量及其演化方程, 再通过等效性假设等方法, 建立损伤本构模型。自Krajcinovic等^[16]提出统计损伤模型以来, 统计损伤理论在岩石损伤研究中得到极大发展。目前, 对于岩石材料损伤规律的描述还没有形成统一看法, 常用的损伤分布规律有Weibull分布、正态分布和幂函数分布等, 现以Weibull分布应用较为广泛。

文献[17]假设岩石为规则微元体的组合体, 且微元体的强度服从某种统计规律, 结合统计理论与连续损伤理论, 建立了岩石的静态损伤本构模型。为了使模型在动态载荷条件下同样适用, 适当地修改该模型的假定与参数计算, 并考虑加载率的影响, 以建立适用于动载条件的动态统计损伤本构模型。

2.1 基本假定

假设岩石由大量微元体组成, 微元体尺寸在空间意义上足够大, 能够包含大量微缺陷, 但同时在力学意义上又充分小, 可将其视为一个质点。微元体模型的基本构造如图10所示, 该模型在空间任一平面内是由损伤体与黏性体并联而成的组合体。现作如下假定:

(1) 岩石的宏观表现为各向同性, 即损伤体具有各向同性损伤特性。

(2) 黏性体没有损伤特性, 且在静载作用下, 黏性体不发挥作用而成为透明体; 当加载速率达到一定

值时, 黏性体将发挥作用。黏性体遵循的本构关系为

$$\sigma_b = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2)$$

式中 σ_b 为黏性体的应力; η 为黏性系数, 反映了岩石的黏性特性, 可由岩石蠕变试验确定, 一般岩石的黏性系数 η 取值为 $0.1\sim 0.5$ 。

(3) 微元体破坏前是线弹性的, 服从虎克定律; 破坏后不再具有承载能力。

(4) 各微元体中损伤体的强度服从 Weibull 分布, 其概率密度函数表达式为

$$p(F) = \frac{m}{F_0} \cdot \left(\frac{F}{F_0}\right)^{m-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right], \quad (3)$$

式中, F 为微元体强度的分布变量, m 及 F_0 为 Weibull 分布参数, 反映了岩石材料的力学性质。

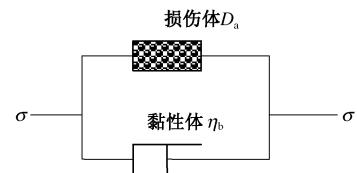


图10 微元体模型图^[18]

Fig. 10 Model sketch of infinitesimal unit^[18]

2.2 统计损伤变量

基于微元体强度服从统计分布的假定, 在荷载逐步增大的情况下, 微元体将逐渐破坏, 为反映此渐进过程, 可用统计损伤变量表征^[19]。假定岩石材料破坏就是由这些微元体不断破坏引起, 设在某一级荷载作用下已破坏的微元数目为 N_f , 则统计损伤变量 D 为已破坏微元数与总微元数 N 之比, 即

$$D = \frac{N_f}{N} \quad (4)$$

在任意区间 $[F, F + dF]$ 内破坏的微元体数目为 $N \cdot p(y)dy$, 当加载到某一载荷水平 F 时, 已破坏的微元数目为

$$N_f = \int_0^F Np(y)dy \quad (5)$$

将式(3)、(5)代入式(4), 可得基于 Weibull 分布的统计损伤变量

$$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \quad (6)$$

2.3 微元体强度

由式(6)可知, 损伤变量与岩石微元体强度有关。而微元体强度受其应力状态的影响, 为了表现复杂应力状态对岩石强度的影响, 考虑岩石的破坏准则, 假定岩石微元体的破坏准则通式为

$$f(\sigma) - k_0 = 0 \quad , \quad (7)$$

式中, k_0 表示与材料内摩擦角和黏聚力有关的常数。

$F = f(\sigma)$ 作为岩石微元体强度的表达式, 较为全面地反映了岩石微元破坏的危险程度。而微元强度的形式取决于岩石破坏准则的形式。由于 Drucker-Prager 破坏准则具有参数形式简单、适用于岩石材料等优点, 可设基于 Drucker-Prager 破坏准则的岩石微元强度为^[17]

$$F = f(\sigma) = \alpha_0 I_1 + \sqrt{J_2} \quad (8)$$

式中 $\alpha_0 = \sin \varphi / \sqrt{9 + 3 \sin^2 \varphi}$, φ 为岩石的内摩擦角; I_1 表示应力张量的第一不变量; J_2 表示应力偏量的第二不变量。结合虎克定律可得^[17]

$$I_1 = \frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3)E\varepsilon_1}{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3}, \quad (9)$$

$$\sqrt{J_2} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)E\varepsilon_1}{\sqrt{3}(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)} \quad (10)$$

将式(9)、(10)代入式(8)即得岩石微元强度表达式。在一维应力状态下, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, $\varepsilon_1 = \varepsilon$, 从而岩石微元体强度的表达式为

$$F = \left(\alpha_0 + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) E\varepsilon \quad (11)$$

2.4 本构模型的建立

如图 10 所示, 假定在微元模型的水平方向施加冲击载荷 σ , 由并联组合体的关系可知, 损伤体的应变等于黏性体的应变, 即组合体的应变等于两个分体的应变; 组合体的应力等于两个分体的应力之和, 即

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_a = \varepsilon_b \\ \sigma = \sigma_a + \sigma_b \end{cases} \quad (12)$$

由应变等效假设可得损伤体的本构关系为

$$\sigma = E\varepsilon(1-D) = E\varepsilon \exp \left[-\left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] \quad (13)$$

将损伤体和黏性体的本构关系代入式(12), 即得组合体的本构关系为

$$\sigma = E\varepsilon \exp \left[-\left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] + \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (14)$$

2.5 模型参数的计算

由模型的本构关系式可知, 建立本构模型的关键是确定模型参数 F_0 和 m 。由于在冲击试验中容易获得应力-应变曲线的峰值应力 σ_{\max} 及对应的应变 ε_m , 因此可考虑建立模型参数与二者的关系, 并确定模型参数 F_0 和 m 。

由多元函数求极值问题可知, 在应力应变曲线的峰值点处 $(\sigma_{\max}, \varepsilon_m)$, 有

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon}|_{(\sigma_{\max}, \varepsilon_m)} = 0 \quad (15)$$

由式(14)和(15)可得

$$F_0 = \left(\alpha_0 + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) E\varepsilon_m \cdot m^{\frac{1}{m}}, \quad (16)$$

$$m = \frac{1}{\ln(E \cdot \varepsilon_m) - \ln\left(\sigma_{\max} - \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}\right)} \quad (17)$$

由此可知, 对某次单轴冲击试验, 根据应力-应变曲线上的峰值点 $(\sigma_{\max}, \varepsilon_m)$, 试验应变速率 $d\varepsilon/dt$ 和岩石材料常数 E , η , φ 即可直接确定该次试验对应的损伤模型参数 m 和 F_0 。

2.6 模型的试验验证

运用上述动态统计损伤本构模型, 对本文的试验数据进行试算分析, 确定各试件的本构模型拟合参数, 计算结果见表 3。参数内摩擦角 φ 和黏性系数 η 分别需要由岩石剪切试验和蠕变试验来确定, 本文限于实验条件的限制, 没有实测的相关试验数据。但是由模型参数的计算过程可知, 参数内摩擦角 φ 和黏性系数 η 对模型的拟合结果影响非常小。因此, 参考相关研究, 人为确定了两参数的较为合理的取值, 若要得到更加准确的结果, 则应通过试验来确定两参数。表中其它参数均是由试验数据计算所得。

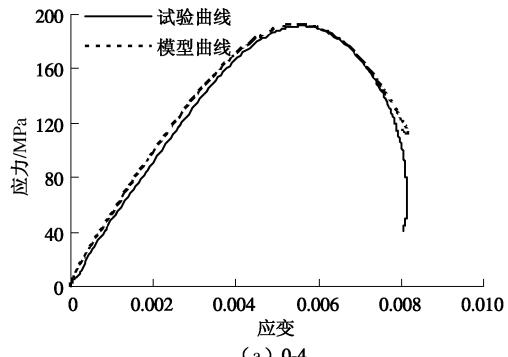
表 3 本构模型参数计算结果

Table 3 Results of constitutive model parameters

编号	参数					
	E/GPa	$\varphi/(^\circ)$	η	m	F_0	$\dot{\varepsilon}/(\text{s}^{-1})$
0-4	42.44	35	0.20	3.74	254.52	55.53
0-6	35.92	35	0.20	3.17	245.68	63.27
1	35.45	35	0.20	9.29	157.64	41.16
2-A1	30.85	35	0.20	7.16	162.27	47.43
3	24.66	35	0.20	4.27	156.08	59.36

图 11 为由动态损伤本构模型计算所得的花岗岩试件模型曲线与试验曲线对比图。

由图 11 可知, 模型曲线与实测曲线具有较好的一致性, 说明该模型能够充分反映岩石的强度与应变、应变速率的关系, 从而验证了模型的合理性。同时该模型曲线与实测曲线还有一些偏差, 如模型曲线尚不能准确反映实测曲线中的一些波动, 尤其是初始加载段



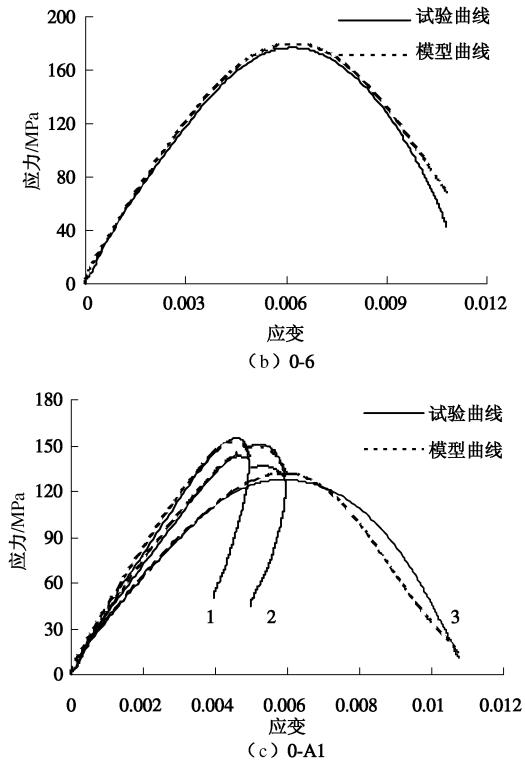


图 11 花岗岩冲击试验曲线与模型曲线对比图

Fig. 11 Comparison between experimental and model curves

的微小扰动;该模型能较完整的表现 I 类曲线的特征,即峰后应变持续增大,应力减小的状态,却无法反映 II 型曲线的特征,即无法表现实测曲线中的峰后回弹部分。这些偏差可能来源于模型参数的选取,也可能是模型本身尚不完善,有待进一步改进。

3 循环冲击载荷下岩石的损伤特性

由动态统计损伤模型建立过程可知,损伤 D 是应变 ε 的函数,即在冲击加载过程中损伤 D 值随着应变 ε 的变化而变化。图 12 为花岗岩试件 0-A1 在各次冲击试验中损伤演化规律。由图 12 可知,在每次冲击过程中,损伤随着应变的增加而逐渐增大,在初始弹性段内损伤值很小且增加缓慢,在应力应变曲线峰值点处,损伤急剧增加。随着冲击次数的增加,损伤随应变的增加幅度变大,且最大损伤值与最大应变有关,随最大应变的增大而增大。

在循环冲击载荷作用下,可由每次试验结果计算相应的损伤值,而多次冲击后的损伤是以前几次冲击后的损伤状态为基础,若要计算最终试件破坏的损伤值,不能只是简单的叠加。为表现循环冲击的累积损伤效应,采用如下公式计算岩石试件的累积损伤:

$$D_{n\text{累积}} = \begin{cases} D_1 & (n=1), \\ D_{(n-1)\text{累积}} + D_n (1 - D_{(n-1)\text{累积}}) & (n \geq 2). \end{cases} \quad (18)$$

式中, D_n 为第 n 次冲击的计算损伤值, $D_{n\text{累积}}$ 为第 n 次冲击的累积损伤值。根据每次冲击试验获得的数据,采用本文模型及式 (22) 计算试件在循环冲击载荷下的累积损伤,计算结果见图 13。

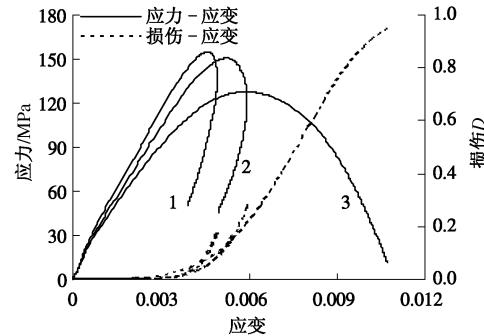


图 12 循环冲击加载过程损伤演化规律 (0-A1)

Fig. 12 Damage evolution under cyclical impact loads

由图 13 可知,花岗岩试件的累积损伤随着循环冲击次数的增加而增大,其累积损伤曲线表现为下凹型,即增长速率由小变大,试件破坏前累积损伤的增加较为平缓,且破坏前的累积损伤均小于 0.4,其主要增量由最后一次冲击破坏产生,最后一次冲击的损伤增量占累积损伤的最大值约为 85%。这与能量的耗散规律相吻合,由于试件破坏前吸能较少,大部分入射能以反射能和透射能的形式耗散,试件损伤较小并随着冲击次数的增加而逐渐累积,到一定程度时,试件破坏吸收大部分入射能,累积损伤急剧增大。虽然由于各岩石试件的差异性,导致在大致相同的冲击载荷下试件的冲击次数有所不同,但基本上随着冲击载荷的增大,循环冲击的累积损伤也会增大,且冲击次数也会减小。

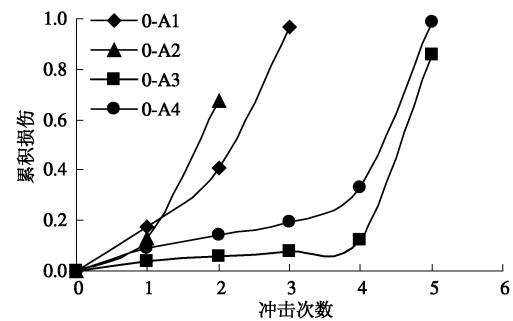


图 13 花岗岩的累积损伤与冲击次数关系

Fig. 13 Relationship between cumulative damage and time of impact loads

4 结论

本文采用改进的 SHPB 装置对均质花岗岩进行单轴冲击压缩和循环冲击压缩试验,并结合基于 Weibull

分布的动态统计损伤本构模型计算岩石的累积损伤。

对试验数据整理和分析, 得到如下主要结论:

(1) 随着冲击载荷循环作用次数的增加, 变形模量变小, 试件的屈服应变增大, 峰值应力呈降低趋势。且冲击破坏时的变形模量明显减小, 屈服应变急剧增大, 峰值应力显著降低。

(2) 岩石的累积比能量吸收值随着冲击次数的增加而增大, 且试件破坏前其值增加缓慢, 试件破坏时其值急剧增大。表明当入射能较小时, 试件吸能很少, 大部分入射能以反射能和透射能的形式耗散, 而试件破坏时, 入射能主要被试件破坏所吸收。

(3) 通过基于 Weibull 分布的动态损伤本构模型计算的曲线与实测曲线具有较好的一致性, 说明该模型能够充分反映岩石的强度与应变、应变速率的关系, 从而验证了模型的合理性。但该模型曲线与实测曲线还有一些偏差, 无法表现实测曲线中的峰后回弹部分。

(4) 累积损伤随着循环冲击次数的增加而增大, 其增长速率由小变大, 试件破坏前累积损伤的增加较为平缓, 其主要增量由最后一次冲击破坏产生。累积损伤的变化与冲击过程能量耗散规律相吻合。

参考文献:

- [1] 何满潮, 钱七虎. 深部岩体力学研究进展[C]//第九届全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2006: 49 - 62. (HE Man-chao, QIAN Qi-hu. Summarise of basic research on rock mechanics at great deep[C]// The Ninth Rock Mechanics and Engineering Academic Conference Proceedings. Beijing: Science Press, 2006: 49 - 62. (in Chinese))
- [2] 黄理兴, 陈奕柏. 我国岩石动力学研究状况与发展[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1881 - 1886. (HUANG Li-xing, CHEN Yi-bai. Rock dynamics in China: past, present and future[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1881 - 1886. (in Chinese))
- [3] 凌建明, 孙 钧. 脆性岩石的细观裂纹损伤及其时效特征[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 304 - 312. (LING Jian-ming, SUN Jun. Meso-crack damage and time dependent characteristic of brittle rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(4): 304 - 312. (in Chinese))
- [4] MEGLIS I L, CHOW T M, MARTIN C D, et al. Assessing in situ microcrack damage using ultrasonic velocity tomography [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining, 2005, 42(1): 25 - 34.
- [5] GATELIER N, PELLET F. Mechanical damage of an anisotropic porous rock in cyclic triaxial tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining, 2002, 39(3): 335 - 354.
- [6] 林大能, 陈寿如. 循环冲击荷载作用下岩石损伤规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4094 - 4098. (LIN Da-neng, CHEN Shou-ru. Experimental study on damage evolution law of rock under cyclical impact loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(22): 4094 - 4098. (in Chinese))
- [7] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994. (LI Xi-bing, GU De-sheng. Rock impact dynamics[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1994. (in Chinese))
- [8] 李夕兵, 周子龙, 叶州元, 等. 岩石动静组合加载力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1387 - 1395. (LI Xi-bing, ZHOU Zi-long, YE Zhou-yuan, et al. Study of rock mechanical characteristics under coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1387 - 1395. (in Chinese))
- [9] 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, 2008, 45(5): 739 - 748.
- [10] 宫凤强, 李夕兵, 刘希灵, 等. 一维动静组合加载下砂岩动力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2076 - 2085. (GONG Feng-qiang, LI Xi-bing, LIU Xi-ling, et al. Experimental study of dynamic characteristics of sandstone under one-dimensional coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2076 - 2085. (in Chinese))
- [11] 许金余, 吕晓聪, 张 军, 等. 围压条件下岩石循环冲击损伤的能量特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 4159 - 4165. (XU Jin-yu, LÜ Xiao-cong, ZHANG Jun, et al. Research on energy properties of rock cyclical impact damage under confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 4159 - 4165. (in Chinese))
- [12] 宫凤强. 动静组合加载下岩石力学特性和动态强度准则的试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010. (GONG Feng-qiang. Experimental study of rock mechanical

- properties under coupled static-dynamic loads and dynamic strength criterion[D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese))
- [13] 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.
- [14] 李夕兵, 宫凤强, ZHAO J, 等. 一维动静组合加载下岩石冲击破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(2): 251 – 260. (LI Xi-bing, GONG Feng-qiang, ZHAO J, et al. Test study of impact failure of rock subjected to one-dimensional coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(2): 251 – 260. (in Chinese))
- [15] 吕晓聪, 许金余, 葛洪海, 等. 围压对砂岩动态冲击力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(1): 193 – 201. (LÜ Xiao-cong, XU Jin-yu, GE Hong-hai, et al. Effects of confining pressure on mechanical behaviors of sandstone under dynamic impact loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(1): 193 – 201. (in Chinese))
- [16] KRAJCINOVIC D, SLIVA M A G. Statistical aspects of the continuous damage theory[J]. Int J Solids Structures, 1982, **18**(7): 551 – 562.
- [17] 曹文贵, 赵明华, 刘成学. 基于 Weibull 分布的岩石损伤软化模型及其修正方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(19): 3226 – 3231. (CAO Wen-gui, ZHAO Ming-hua, LIU Cheng-xue. Study on the model and its modifying method for rock softening and damage based on Weibull random distribution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(19): 3226 – 3231. (in Chinese))
- [18] 单仁亮, 薛友松, 张倩. 岩石动态破坏的时效损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(11): 1771 – 1776. (SHAN Ren-liang, XUE You-song, ZHANG Qian. Time dependent damage model of rock under dynamic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(11): 1771 – 1776. (in Chinese))
- [19] 吴政, 张承娟. 单向荷载作用下岩石损伤模型及其力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, **15**(1): 55 – 61. (WU Zheng, ZHANG Cheng-juan. Investigation of rock damage model and its mechanical behaviour[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, **15**(1): 55 – 61. (in Chinese))