

循环冲击荷载作用下单节理岩体的动态力学行为

刘康琦¹, 刘红岩¹, 周月智¹, 薛雷², 张光雄³

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029;

3. 保利民爆哈密有限公司, 新疆 哈密 839200)

摘要: 在实际工程中, 岩体经常会遭受频繁往复的动力扰动, 对工程安全造成严重威胁。为探究节理岩体在循环动力扰动作用下的动态力学行为, 采用分离式霍普金森压杆试验系统, 对含单节理辉长岩进行了单轴循环冲击试验, 从试件的抗冲击能力、应力应变性质、能量和损伤的演化对其动态力学行为进行了全面分析。结果表明, 试件在循环冲击作用下的破坏模式为劈裂, 节理倾角显著影响了试件的抗冲击能力; 试件在循环冲击过程中均出现了应变回弹现象, 其力学性质并不随着冲击次数的增加而单调弱化; 用耗散能表示的累积损伤系数随着冲击次数的增加近似线性增加, 增幅随节理倾角的增大而减小。在低应力冲击作用下, 单节理试件内的压剪应力不足以产生剪切裂纹, 试件的破坏主要是由拉应力引起的张拉裂纹逐渐扩展并与节理相互贯通造成的。最后讨论了完整岩石、单节理岩体和多节理岩体在循环冲击作用下的破坏机理和模式的异同。

关键词: 单节理岩体; 循环冲击; 能量耗散; 累积损伤; 破坏机理

中图分类号: XXXX.X

国标学科代码: XXXXX

文献标识码: A

Dynamic mechanical behavior of single-jointed rock mass under cyclic impact loading

LIU Kangqi¹, LIU Hongyan¹, ZHOU Yuezhi¹, XUE Lei², ZHANG Guangxiong³

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Shale Gas and Geoengineering, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3. Poly Explosive Hami Co., Ltd., Hami 839200, China)

Abstract: In practical engineering, rock masses frequently suffer from recurrent dynamic disturbances, posing serious threats to engineering safety. To investigate the dynamic mechanical behavior of jointed rock masses under cyclic dynamic disturbances, cyclic impact tests were conducted on single-jointed gabbro (SJG) using a split Hopkinson pressure bar test system. The stress equilibrium during the tests was verified using the three-wave method and the force balance coefficient method. The dynamic mechanical behavior of the specimens was comprehensively analyzed in terms of impact resistance, stress-strain relationships, energy and damage evolution, as well as dynamic failure mechanisms. The results show that single-jointed rock specimens can achieve stress equilibrium under cyclic impact conditions. The failure mode of the specimens under cyclic impacts is splitting,

*收稿日期: 2024-09-20; 修回日期: 2024-12-23;

基金项目: 北京市自然科学基金(8222031); 新疆自治区天池英才引进计划(创新领军人才)

第一作者: 刘康琦(1996-), 男, 博士研究生. E-mail: lkq1104@126.com;

通信作者: 刘红岩(1975-), 男, 博士, 教授. E-mail: lhy1204@cugb.edu.cn.

and the joint inclination angle significantly influences the impact resistance of the specimens. As the joint inclination angle increases, the impact resistance of the specimens also increases. During the cyclic impact process, strain rebound occurs in all specimens, and their mechanical properties do not monotonically degrade with an increasing number of impacts. The peak stress of the specimens generally exhibits a decreasing trend with the number of impacts. The cumulative damage coefficient, represented by dissipated energy, increases approximately linearly with the number of impacts, while the rate of increase decreases with larger joint inclination angles. Under low-stress impacts, the compressive-shear stress inside the specimens is insufficient to produce shear cracks, and tensile stress causes tensile cracks at the initiation points, which propagate along the loading direction and ultimately lead to splitting failure of the specimens.

Keywords: single-jointed rock mass; cyclic impact loading; energy dissipation; cumulative damage; failure mechanisms

1 引言

岩体由块状岩石和结构面共同组成，是一种经受过变形、遭受过破坏，具有多种不连续结构面的地质体^[1]。由于结构面的存在，岩体和岩石之间的力学特性存在很大的差异。节理作为一种普遍存在的结构面，通常会导致岩体整体强度的降低^[2]，岩体强度一般介于岩石强度与节理强度之间，在岩体的破坏过程中，结构面，特别是节理，起着至关重要的控制作用。迄今为止，已有大量研究集中于探究岩体在静态或准静态荷载作用下的力学性质^[3-4]。然而，在实际情况下，岩体经常受到如爆破和频繁微小地震等连续动力扰动的影响^[5-7]。因此，研究节理岩体在循环动荷载作用下的动态力学和断裂行为变得尤为重要，这对于加强矿山开采、地下工程开挖中的岩体工程防护，以及理解断层破裂过程具有重要意义。

在静态或准静态荷载下，节理岩体的力学性质和破坏模式已经通过理论分析、室内试验和数值模拟方法得到了广泛研究。研究表明，节理岩体的强度和变形特性与诸如节理倾角、条数、间距、排距、和粗糙度等节理参数以及节理充填物性质有着密切的关联^[8-9]。近年来，节理岩体的动态力学性质也受到了广泛关注。在理论分析方面，刘红岩等^[10]在 Taylor-Chen-Kuszmaul (TCK) 模型的基础上，基于断裂和损伤理论提出了考虑节理三类参数的断续节理岩体动态损伤本构模型，计算结果表明节理的存在会降低岩体的动态弹性模量及峰值强度。邓正定等^[11]基于复合损伤理论，通过对广义 Bingham 模型进行改进，构建了不同应变率条件下节理岩体的动态本构模型。刘红岩等^[12]采用组合模型法建立了考虑节理剪切强度的贯通节理岩体动态损伤本构模型，发现随着节理倾角的改变，贯通节理岩体将发生岩块张拉或剪切破坏、沿节理面的剪切破坏及上述两种破坏模式的复合破坏。在数值模拟方面，颗粒离散元法和连续-离散耦合法已成功应用于模拟节理岩体的 SHPB 试验中^[13-15]。在室内试验方面，分离式霍普金森杆或 Kolsky 杆已成为研究岩石材料的动态力学性质最为经典的一种试验设备^[16]。刘红岩等^[17]采用相似材料模型，利用 SHPB 研究了不同节理倾角、节理贯通度、节理条数、载荷应变率、节理充填物厚度、节理充填物类型和试件长径比等工况下的节理动态强度和破坏模式，发现对于单节理岩体而言，节理倾角对其强度和破坏特征具有更大的影响。王建国等^[18]研究了节理倾角对应力波穿越节理面时的波动特性和能量传递及耗散的影响，发现在入射能相近的情况下，试件的反射能占比、透射能占比和耗散能占比均随着节理倾角的改变而改变。李地元等^[19]进行了含预制裂隙大理岩 SHPB 动态力学破坏特性试验，研究了端部裂隙形态对岩石动态力学特性以及裂纹扩展的影响，发现大理岩的裂纹总是从裂隙尖端或附近起裂并沿加载方向扩展并贯通。张人凡等^[20]进行了修正侧开单裂纹半孔板的动态冲击试验，利用分形理论修正了黑砂岩的动态强度因子，并计算了其动态断裂韧度。目前的研究已表明，由于应变率效应，岩石或节理岩体的强度通常随着应变率的提高而增大^[21-23]。在高应变率条件下，节理岩体的动态破坏模式总是呈“X”型或半“X”型的破坏模式，而与节理倾角的关系不大^[24-28]。

近年来, 研究者们越来越关注岩石材料在循环冲击荷载作用下的动态力学性质, 并进行了多种试验, 包括循环冲击试验、耦合轴压-循环冲击试验和耦合三轴围压-循环冲击试验^[29-32]。在没有轴压或围压的情况下, 根据不同的应变率条件, 完整岩石在受到冲击荷载时会表现出不同的力学行为。Li 等^[33]发现在中等应变率下, 一些大的断裂主导了试件的破坏行为。Xia 等^[34]认为在较低的应变率下 ($\sim 70\text{s}^{-1}$), 动态压缩会使岩石内的裂纹稍有扩展, 变形仅包含少量的永久变形, 而在高应变率下, 岩石的变形机制为从试样两端开始的压碎。Zhou 等^[35]认为岩石试件存在一个临界疲劳冲击应力, 当循环冲击应力低于此应力时试件几乎没有损伤发生。Li 等^[36]则认为花岗岩试件在冲击应力下的力学行为分为两种等级, 一类表现为轻微劈裂或劈裂, 当应变率超过阈值时则转化为普遍粉化状态。Aben 等^[37]则根据应力-应变率-应变曲线归纳总结了岩石在冲击荷载下的三种不同的力学行为。首先, 如果加载率低于损伤阈值, 试件会完全回弹, 此时岩石材料的损伤几乎可以忽略。其次, 当加载率高于损伤阈值但低于粉化阈值时, 岩石材料在卸载阶段会表现出较大的应变回弹。在这种情况下, 岩石宏观状态可能包括保持完整、剥落或动态断裂。最后, 若加载率超过粉化阈值, 岩石材料受冲击后会发破碎甚至粉化。在循环冲击荷载 (加载率高于损伤阈值但低于粉化阈值) 作用下, 完整岩石会首先被压密, 随后不断产生损伤, 其力学性质逐渐弱化, 导致粉化阈值降低^[38]。目前仅有少数学者对节理岩体在循环冲击荷载作用下的动态力学试验进行了研究。Han 等^[30]和 Zhou 等^[39]在对单节理岩体的循环冲击试验中发现, 在没有轴压的情况下, 翼裂纹在试件破坏中起主要作用。Liu 等^[40]进行了多节理岩体的循环冲击试验, 分析了试件的宏观和微观破坏机理。然而当前研究中多集中于分析轴压对单节理岩体在循环冲击作用下力学行为的影响, 对无轴压或围压条件下单节理岩体动态力学行为的归纳总结及损伤演化研究尚为缺乏。

在露天矿山开采过程中, 边坡岩体会遭受循环往复的爆破冲击荷载作用, 目前多集中于循环冲击作用下完整岩石的动态力学行为研究, 然而对单节理岩体在循环冲击荷载下的力学行为的了解仍然有限。为此, 通过一系列循环冲击试验, 研究了循环冲击作用下单节理岩体的动态力学和断裂行为以及累积损伤效应, 并对完整岩石、单节理岩体、多节理岩体在循环冲击作用下的破坏机理进行了讨论。

2. 试验材料与原理

2.1 试件制备

试验材料为来自中国山东省某矿山的辉长岩, 在偏光显微镜下对岩石试件进行切片观察 (图 1), 可以看到主要由斜长石 (65%)、斜辉石 (30%) 和石英 (<5%) 三种矿物相组成, 矿物颗粒尺寸最大为 1mm。对直径 50mm、高度 100mm 的圆柱形试件进行无侧限单轴压缩试验, 对直径 50mm、高度 25mm 的圆柱形试件进行巴西劈裂试验, 得到辉长岩的物理力学参数如表 1 所示。

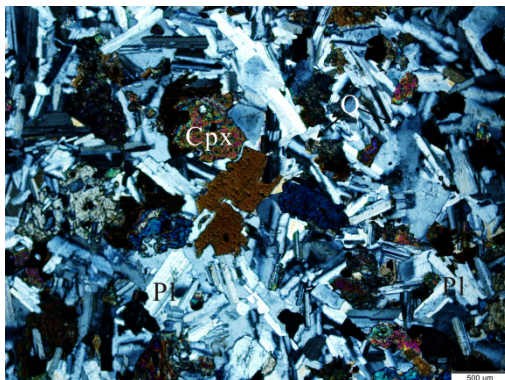


图 1 试件切片的偏光显微镜照片 (PI: 斜长石; Cpx: 斜辉石; Q: 石英)

Fig. 1 Polarizing microscope photo of specimen section (PI: plagioclase; Cpx: clinopyroxene; Q: quartz)

表 1 辉长岩基本物理力学性质

Table 1 Basic mechanical parameters of the gabbro

密度/kg · m ⁻³	波速/m · s ⁻¹	弹性模量/GPa	泊松比	单轴压缩强度/MPa	巴西劈裂强度/MPa
2870	4700	14.56	0.26	173.86	5.52

将质量均匀、完整性良好的块体加工成尺寸为如图 2a 所示的 60 mm × 45 mm × 20 mm (长 × 宽 × 厚) 的完整块体。单节理辉长岩试件如图 2 (b-f) 所示, 共制备了 5 组试件, 每组由 3 个试件组成。试件命名惯例为单节理辉长岩 (SJG)-倾角-编号, 如 SJG 0-2, 指 0° 节理倾角、编号为 2 的试件。最后, 将试件的表面粗糙度抛光至小于 0.02 mm。另外, 人为预先添加的缺陷定义为“节理”, 而由于冲击载荷在试件中形成的新缺陷定义为“裂纹”。

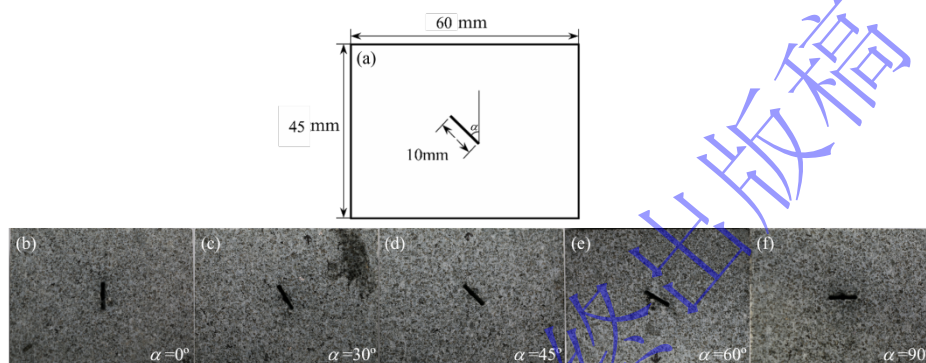


图 2 单节理辉长岩试件及几何示意图。(a) 试件几何示意图, 加载方向从左到右。单个节理长度 $2a = 10$ mm, α 表示节理倾角。(b-f) 分别表示 α 为 0°、30°、45°、60°、90° 的单节理辉长岩试件

Fig. 2 Single-jointed gabbro specimens and geometric schematic. (a) the geometric schematic of the specimen, with the loading direction from left to right. The length of a single joint is $2a = 10$ mm, with α representing the joint inclination angle. (b-f) respectively represent single-jointed gabbro specimens with α at 0°, 30°, 45°, 60°, and 90°

2.2 试验系统

利用改进的分离式霍普金森压杆 (SHPB) 进行循环冲击试验, 试验系统如图 3 所示, SHPB 系统由气压装置、撞击杆、入射杆、透射杆、吸收杆和动态数据采集装置组成。所有杆都是由 40Cr 钢制成, 弹性模量为 210 GPa, 密度为 7800 kg/m³, 撞击杆的长度为 300 mm, 入射杆长度为 2200 mm, 透射杆长度为 1400 mm, 杆的直径为 50 mm。在入射杆和透射杆的中间位置处粘贴应变片以记录试验过程中的入射波、反射波和透射波。选择直径 20 mm, 厚度 1 mm 的紫铜片作为波形整形器。另外, 在试验开始之前, 对 SHPB 装置进行空杆撞击以检查两杆对接的完好性。

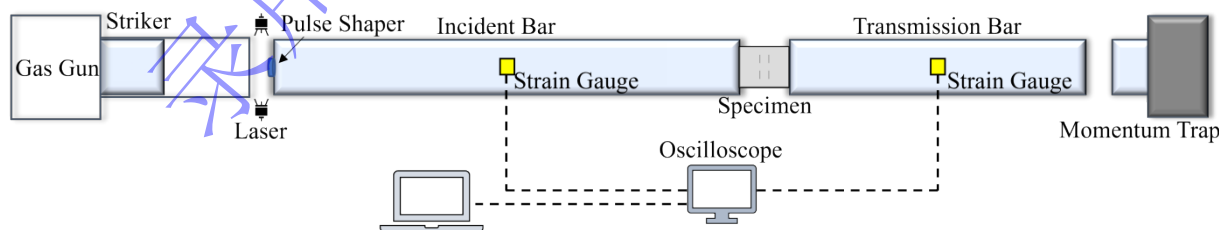


图 3 SHPB 系统示意图

Fig. 3 Schematic of the SHPB System

在试验过程中, 将试件放置在入射杆和透射杆之间。为减小摩擦效应, 将凡士林均匀涂抹于试件的两端。由于材料的波阻抗不同, 应力波会在杆与试件的交界面处发生透射和反射。在试验过程中, 必须满足应力平衡假设, 即试件内部和两端的应力应变必须一致。考虑到循环冲击作用下试件内部存

在节理和裂纹以及试验过程中发生的多次压实损伤会影响应力波的传播。因此利用应变仪监测的数据来验证应力平衡是评估试验结果有效性的关键。

三波法通过将入射波、反射波和透射波的起始时间平移到试件端面，检查入射波和反射波的总和是否与透射波相匹配来验证应力平衡。力平衡因子法通过计算试件两端的力 P_{in} 和 P_{tr} 以及力平衡因子 Coe (式 1) 来验证这一点。当 Coe 小于 0.1 时，认为试件达到了应力平衡[41-43]。图 4 为不同工况下试件动应力平衡试验结果，其中 In 为入射波， Re 为反射波， Tr 为透射波。采用三波法和力平衡因子法，分别选取 4 组不同节理倾角的试件的试验结果进行验证。结果表明，单节理岩体在循环冲击过程中能够很好地实现应力平衡，从而保证了试验结果的有效性。

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{in} = A_e E_e (\varepsilon_I + \varepsilon_R) \\ P_{tr} = A_e E_e (\varepsilon_T) \\ Coe = \frac{2(F_1 - F_2)}{(F_1 + F_2)} \end{array} \right. \quad (1)$$

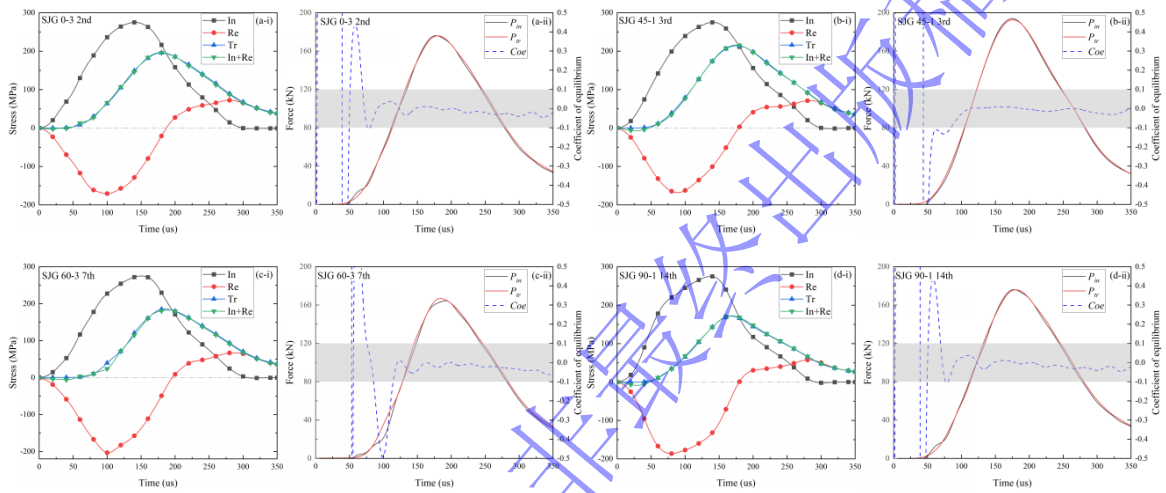


图 4 应力平衡验证 (i 为三波法, ii 为力平衡因子法)

Fig. 4 Stress equilibrium verification, (i) for the Three-Wave Method, (ii) for the Force Balance Factor Method

在满足 SHPB 试验的弹性一维应力波假定和应力均匀性假定之后，将应变片检测到的数据平移到试件端部，可以利用三波法计算得到试件的应变 ε_s 、应变率 $\dot{\varepsilon}_s$ 和应力 σ_s 。

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_s(t) = \frac{C_e \tau}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] dt \\ \dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{C_e}{L_s} [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] \\ \sigma_s(t) = \frac{E_e A_e}{2A_s} [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \end{array} \right. \quad (2)$$

式中： ε_I 、 ε_R 、 ε_T 分别为入射应变、反射应变和透射应变， C_e 为杆的波速， L_s 为试件的长度， E_e 为杆的弹性模量， A_e 为杆的横截面积， A_s 为试件的横截面积。

3. 试验结果与分析

3.1 冲击次数

为了确保每次冲击的入射应力保持一致，在每次冲击前都将子弹放回相同的初始位置，并均匀涂抹润滑油。这样在气压一致的情况下，入射应力峰值的差值均在 10 MPa 内。在进行冲击试验之前，需要设置合理的冲击气压，使试件能够承受多次冲击后再发生破坏。Li 等[44]的试验结果表明，当节理倾角为 0° 和 30° 时，单节理岩体的动态峰值强度最小。另外，通过设计与试验试件相同尺寸的 SHPB 数值模拟试验，同样发现当节理倾角为 0° 和 30° 时试件的动态峰值强度最小，因此首先利用节理倾角的 0° 和 30° 的试件进行确定循环冲击荷载大小的测试试验。试验结果显示 (表 2)，在 0.12 MPa 的气压下，节理倾角为 0° 的试件在受到 7 次冲击后发生劈裂破坏，节理倾角为 30° 的试

件在经历 20 次冲击后未发生破坏。因此，将气压设置为 0.13 MPa，并继续试验。在这一气压下，试件 SJG 0-2 和 SJG 0-3 在分别经历 2 次和 3 次冲击后发生了劈裂破坏。试件 SJG 30-2 和 SJG 30-3 在分别经历 5 次和 4 次冲击后发生了劈裂破坏。试件 SJG 45-1、SJG 45-2 和 SJG 45-3 在分别经历 6 次、3 次和 7 次冲击后发生了劈裂破坏。试件 SJG 60-1、SJG 60-2 和 SJG 60-3 在分别经历 7 次、8 次和 8 次冲击后发生了劈裂破坏。试件 SJG 90-1、SJG 90-2 和 SJG 90-3 在分别经历 14 次、15 次和 10 次冲击后发生了劈裂破坏。

以上结果表明，单节理辉长岩试件在循环冲击作用下的破坏模式为劈裂，节理倾角显著影响了试件在循环冲击下的抗冲击能力，试件可承受冲击次数随节理倾角的变化趋势为 $90^\circ > 60^\circ > 45^\circ > 30^\circ > 0^\circ$ 。

表 2 试验结果
Table 2 Overview of the experiment results

No.	气压/MPa	平均入射应力/MPa	冲击次数	最终状态
SJG 0-1	0.12	249	7	劈裂
SJG 0-2	0.13	275	2	劈裂
SJG 0-3	0.13	275	3	劈裂
SJG 30-1	0.12	249	20	未破坏
SJG 30-2	0.13	275	5	劈裂
SJG 30-3	0.13	275	4	劈裂
SJG 45-1	0.13	275	6	劈裂
SJG 45-2	0.13	275	3	劈裂
SJG 45-3	0.13	275	7	劈裂
SJG 60-1	0.13	275	7	劈裂
SJG 60-2	0.13	275	8	劈裂
SJG 60-3	0.13	275	8	劈裂
SJG 90-1	0.13	275	14	劈裂
SJG 90-2	0.13	275	15	劈裂
SJG 90-3	0.13	275	10	劈裂
Intact	0.13	275	50	未破坏

3.2 动态力学性质

考虑到试验结果的离散性，选取试件 SJG 0-3，SJG 30-2，SJG 45-1，SJG 60-3 和 SJG 90-1 的试验结果为代表进行后续的分析。如图 5，从循环冲击作用下单节理岩体试件的动态应力应变曲线图可以看出，试件在循环冲击过程中的峰值应力均明显小于入射应力 275 MPa。与常规 SHPB 试验的应力应变曲线不同，在循环冲击荷载作用下，试件在冲击作用结束后均出现了明显的应变回弹现象，这主要是由于在低应力冲击作用下，试件主要以弹性变形为主。对于完整试件，在经历 50 次冲击后试件未发生破坏，说明在峰值冲击应力 275 MPa 的条件下不足以导致试件中的微裂隙或者微孔洞被激活、贯通。但是对于单节理试件，裂纹会从预先添加的宏观节理处萌生，在随后的每一次冲击作用中，裂纹会逐渐扩展，直至试件最终断裂。循环冲击载荷下的应力应变曲线表明，在每次冲击开始时，试件

在低应力水平下积累了显著的应变，曲线呈凹向上的形状。这可能有两个原因，一是较低的应力允许试件在加载过程中有更多的微裂隙压实和节理闭合阶段，二是试件端部的凡士林压实和封闭空气的影响。在临近破坏前的几次冲击中，试件的动弹性模量不断降低，且峰值应变和极限应变呈增加的趋势，这是由于在经历循环冲击后试件内出现了大量的微裂纹和微孔隙，试件的损伤接近使试件破坏的程度，在达到峰值应力前会积累更大的应变，从应力应变曲线上反映为曲线的向前推移现象。但这种现象从一开始时的变化规律是呈波动式变化的，这是因为低应力的冲击会导致试件内同时发生裂隙的闭合以及萌生，使得试件的应力应变曲线的变化无规律可言。图 6 为试件的峰值应力与冲击次数的关系曲线，可以看出在循环冲击作用下，单节理岩体试件的峰值应力总体上呈下降的趋势，但并不随着冲击次数的增加而单调减小，这表明试件在受到冲击作用后，同时出现了微孔隙压密后强度增强和宏观节理裂纹扩展后试件损伤的现象。

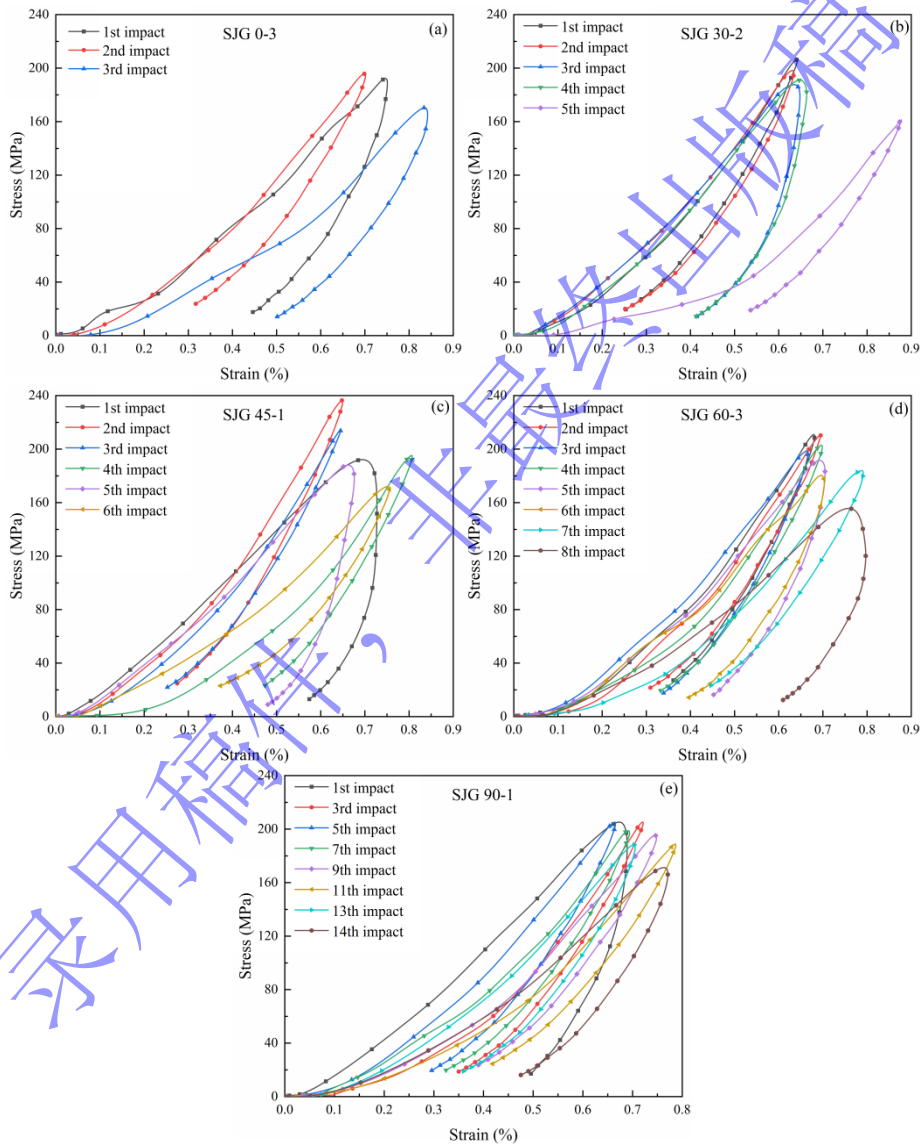


图 5 单节理岩体试件的动态应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of SJG specimens

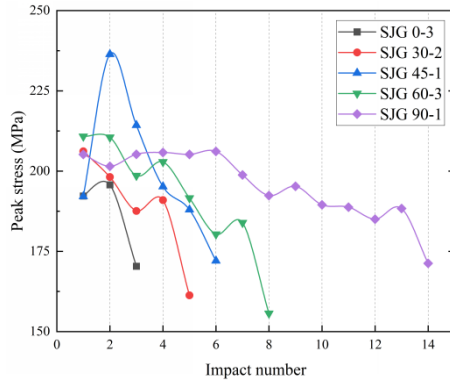


图 6 循环冲击作用下试件的峰值应力与冲击次数的关系

Fig. 6 Variation of peak stress with the number of repetitive impacts

3.3 能量与损伤演化

在 SHPB 试验中, 能量系统主要可以分为入射能 E_I 、反射能 E_R 、透射能 E_T 和耗散能 E_A , 耗散能主要分为试件内微缺陷压密、新裂纹萌生的能量, 动能, 热能和声能等。通过分析这些能量, 可以更深入地理解循环冲击过程中试件的动态力学行为。各部分能量的计算公式如下所述。值得注意的是, 在低应力冲击下, 应力波到达杆与试件的接触面时会产生一段拉伸应力波的反射, 试件出现应变回弹后又会出现一段压缩应力波, 因此将反射能分为两部分计算。

$$E_I = \frac{A_e C_e}{E_e} \int_0^\tau \sigma_I^2(t) dt \quad (3)$$

$$E_R = \begin{cases} \frac{A_e C_e}{E_e} \int_0^{\tau_1} \sigma_R^2(t) dt, & \sigma_R < 0 \\ -\frac{A_e C_e}{E_e} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \sigma_R^2(t) dt, & \sigma_R \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$E_T = \frac{A_e C_e}{E_e} \int_0^\tau \sigma_T^2(t) dt \quad (5)$$

$$E_A = E_I - E_R - E_T \quad (6)$$

式中: σ_I , σ_R 和 σ_T 分别表示入射应力、反射应力和透射应力。

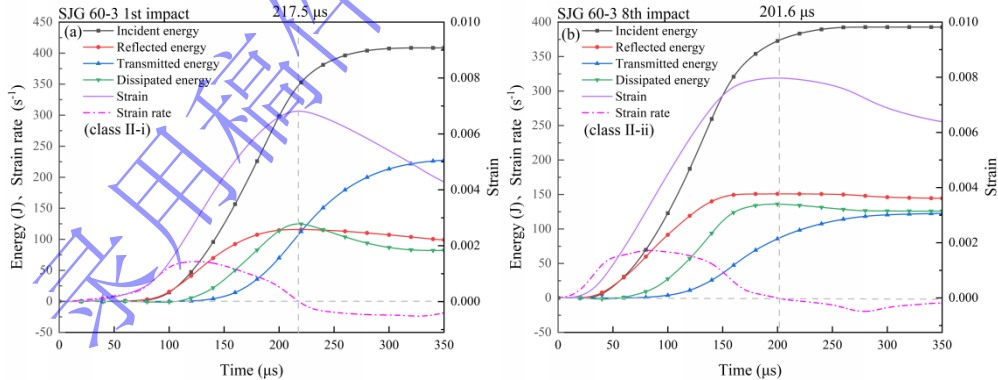


图 7 SJG 60-3 的能量时程曲线, a 为第 1 次冲击时情况, b 为第 8 次冲击时的情况

Fig. 7 Energy time history curve of SJG 60-3, (a) is the situation at the first impact and (b) is the situation at the eighth impact

Liu 等^[40]根据应力-应变-应变率随时间的变化关系将循环冲击荷载作用下岩体的力学行为分为两类, 图 7 显示了 class II - i 和 class II - ii 两种类型的能量时程曲线。在 class II - i 和 class II - ii 类型下, 应变在入射能较小时便开始增加, 一方面是因为低应力导致的试件内的微缺陷压密和弹性应变能的累积, 另一方面可能是凡士林的压实和封闭在其中的空气造成的。class II - i 指岩体在受冲击后具有较大的应变回弹行为, 并且由于试件未发生整体断裂, 其透射能的占比显著大于耗散能和反射能。图 7a 为 SJG 60-3 在第一次冲击作用时的应变和能量时程曲线, 首先根据图 5d 中可以看出, 试件在

第一次冲击中达到峰值应力后应变迅速回弹。在图 7a 中, 在 217.5 μs 时尽管入射能仍在增加, 但已不足以使试件继续变形, 应变率变为负值, 应变开始回弹, 以弹性应变能的形式储存在试件内的一部分耗散能随后被传递给入射杆和透射杆, 导致耗散能和反射能降低, 透射能增加, 用于试件断裂或损伤的耗散能在能量体系中占据最小的比例。class II - ii 指岩体在受冲击后具有很小的应变回弹行为, 如图 7b 所示, 从能量角度上讲, 应变在达到最大值后, 只有很少的弹性应变能传入入射杆和透射杆, 各部分能量最终趋于稳定, 而用于试件断裂或损伤的耗散能则要大于透射能。两种类型下能量的明显差别在于透射能, 当试件未发生整体断裂时, 大部分能量通过试件传入透射杆, 透射能占比较大, 而试件发生完全断裂后, 能量无法再通过试件传递, 透射能的占比最小。

当试件中存在节理时, 冲击荷载产生的能量不足以使试件中的完整部分产生破坏, 但是足以导致破裂由节理尖端萌生并逐渐扩展, 这导致了试件在循环冲击过程中即使没有发生劈裂或断裂破坏, 在荷载结束后仍然存在一定的残余应变和耗散能。根据式 (4), 此时的耗散能为用于试件内新裂纹的萌生和扩展的能量, 即使试件产生损伤的能量。因此将损伤变量 D 定义为由式 (7) 计算得到的耗散能累积之后的累积耗散能与累积总输入能之比^[32]:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n W_{D,i}}{\sum_{i=1}^N W_{I,i}} \quad (7)$$

图 8 为损伤变量与冲击次数的关系曲线, 可以看到, 单节理岩体在循环冲击荷载作用下的损伤累积近似线性增加。根据拟合曲线的斜率得到, 损伤的增幅随着节理倾角的增大而减小, 即在相同冲击应力作用下, 节理倾角越大, 试件的损伤越小。另外当单节理岩体的累积损伤变量大于 0.21 时, 在下次冲击时试件会断裂。

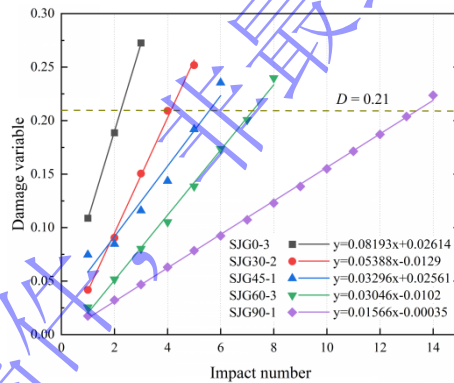


图 8 由能量计算得到的损伤变量与冲击次数的关系

Fig. 8 The relationship between the damage variable calculated by energy and the impact number

4. 完整岩石、单节理岩体、多节理岩体在循环冲击作用下破坏机理的讨论

Aben 等^[37]将岩石材料在冲击荷载作用下的力学行为分为三类。一类表现为加载应力远低于试件的静态/准静态峰值强度, 应力应变曲线存在明显的应变回弹; 二类表现为试件的动态峰值应力远低于施加的入射峰值应力, 应力应变曲线和一类相似, 存在应变回弹现象, 其破坏模式多为动态断裂; 三类曲线不存在应变率负值, 试件的破坏模式多为粉碎状。在高应变率加载下, 节理岩体的力学行为符合第三类曲线特征, 其破坏模式与节理参数无关, 节理处的剪切裂纹会先于拉伸裂纹出现, 并作为主导裂纹形成“X”型或半“X”型剪切带导致试件破坏, 这是由于在冲击荷载作用下, 当应力波到达时节理处的应力状态首先是压应力, 应力波通过后再形成拉应力, 若应力波幅值足够大, 则会使起裂点处的剪切应力迅速增大至较高水平并诱发剪切裂纹的产生, 同时抑制张拉裂纹的产生。同时若加载速率足够大, 节理尖端处萌生的裂纹来不及扩展, 试件内的其他缺陷同样会被激活, 岩石材料的破坏由整体的损伤导致而非由节理尖端处萌生的裂纹的扩展与贯通导致。

在低加载率的循环冲击作用下, 对于完整岩石, Wang 等^[45]的研究表明, 试件的峰值应力通常先

增大后减小。这是因为循环冲击会使完整岩石试件内的微观缺陷先以被压密为主，试件内的弹性应变能逐渐累积，试件的弹性模量和峰值应力逐次增大。随着冲击次数的增加，会使完整岩石试件内的微观缺陷转化为以被激活为主，导致弹性应变能迅速释放。完整岩石不存在宏观缺陷，因此每次被激活的缺陷呈概率分布^[46]，导致试件的弹性模量和峰值应力连续降低。而当试件已经存在节理等宏观缺陷时，低应力冲击加载可能同时导致微观缺陷压密和节理尖端处的裂纹萌生，直接导致了节理岩体的动态力学响应并不严格随着冲击次数增加而单调发展的现象。

表 3 为循环冲击荷载作用下单节理岩体和多节理岩体的破坏模式，循环冲击荷载作用下节理岩体的力学行为符合二类曲线特征，破坏模式多为劈裂。根据试件的破坏模式，与高应变率条件下不同，在低应力循环冲击中，当入射应力到达张开型节理处时，其压剪应力不足以使起裂点处产生剪切裂纹，由于岩石抗拉强度远低于抗压强度，随后的张拉应力会使试件在起裂点处产生拉伸裂纹，并沿着加载方向扩展最终导致试件产生劈裂破坏。节理面的正应力由式 (8) 所示，由此计算得到节理面正应力随节理倾角的变化趋势如图 9 所示。随着节理倾角的增加，试件中节理面上的正应力随之减小，由应力强度因子的一般表达式 (9) 可知，试件节理端应力强度因子随节理倾角的增加而减小，冲击荷载引起的裂纹扩展与损伤随节理倾角的增加而减小，试件的抗冲击能力增加。

$$\sigma_n = \sigma(t) \sin^2(\alpha + \pi/2) \quad (8)$$

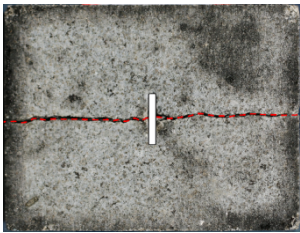
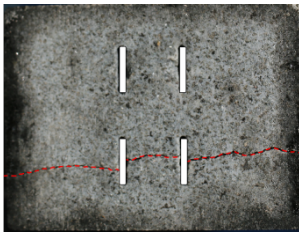
$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (9)$$

式中： $\sigma(t)$ 表示施加在试件上的动态应力， t 表示加载时间， Y 为边界修正因子， a 为节理半长。

对于单节理岩体和多节理岩体而言，裂纹总会在节理中部或节理尖端发育，这与节理倾角没有关系。裂纹均沿加载方向发展，与已有节理相连并贯穿整个试件，试件的破坏主要是由拉应力引起的张拉裂纹逐渐扩展并与节理相互贯通造成的。与完整岩石试件不同，节理岩体在较低的应变率条件下，新的裂纹可能只会在节理岩体试件内最大的缺陷处萌生，翼裂纹先沿着 I 型应力强度因子最大的方向扩展，并最终以有限的速度沿着最大压缩主应力的方向扩展。能量输入不足使裂纹的发展受到抑制，因此裂纹贯通成为试件断裂前的一个关键环节，这导致了单节理岩体与多节理岩体在破坏模式与抗冲击能力上的区别。对于单节理岩体，裂纹总是从节理处萌生，在循环冲击作用下沿着单一的发展路径即平行于加载方向扩展，亦或是在冲击作用下进一步的张开，单节理岩体的抗冲击能力也随着节理倾角的增加而增大。而对于多节理岩体，虽然裂纹同样总是从节理处萌生，但是裂纹在扩展路径上是否能多条节理之间互相贯通影响了试件最终的破坏模式和抗冲击能力。以节理倾角为 60° 和 90° 的试件为例，一般而言，当节理倾角为 90° 时，即节理与作用力的方向平行时，试件上的应力分布更加均匀，在静态或准静态加载下试件的强度和破坏模式接近于无节理岩体^[9, 47]。本文试验结果也表明节理倾角为 90° 时，单节理岩体试件的抗冲击能力最高。但是对于多节理岩体，Liu 等^[40]的试验结果表明当节理倾角为 60° 时，裂纹在平行于加载方向的扩展路径中无法使节理间相互贯通，这就导致了节理倾角为 60° 的多节理岩体试件相较于节理倾角为 90° 的试件能承受更多次数的冲击作用。

表 3 试件破坏模式

Table 3 Failure mode of the specimens

节理倾角	单节理岩体 (本试验)	多节理岩体 (Liu 等 ^[40])
0°		

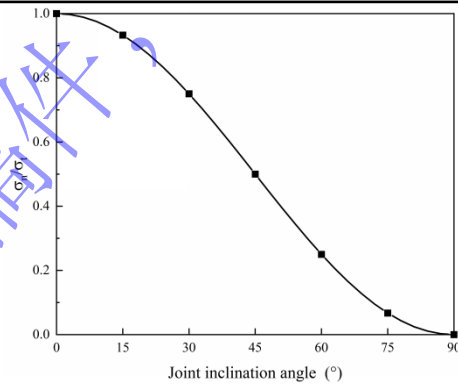
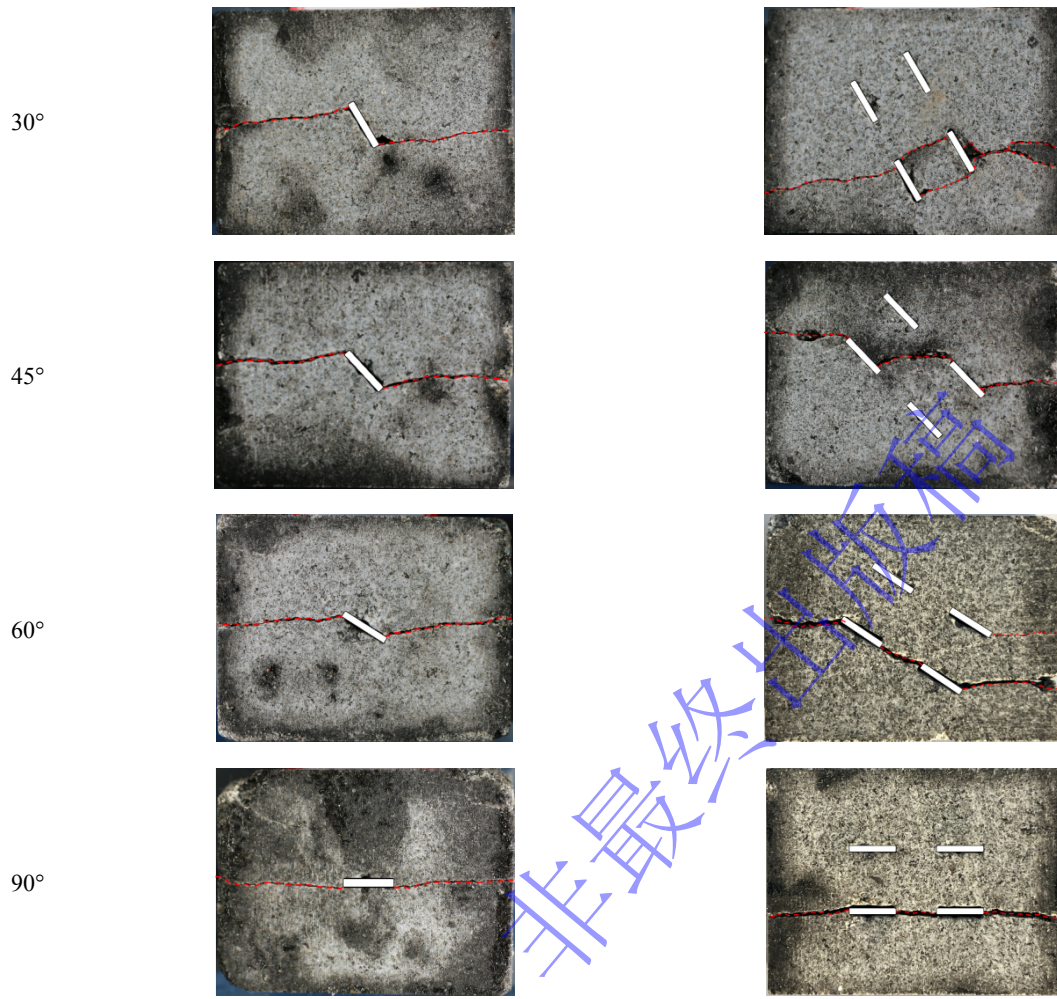


图9 节理表面正应力与节理倾角的关系

Fig.9 The relationship between normal stress of joint surface and joint inclination angle

5. 结论

本文利用分离式霍普金森压杆对单节理辉长岩试件进行了一系列的循环冲击试验。从试件可承受冲击的次数，应力平衡，应力应变关系，能量和损伤演化的角度研究了循环冲击对不同节理倾角试件的动态力学性质的影响。主要结论如下：

(1) 单节理岩体试件在循环冲击试验中可以很好地实现应力平衡，从而保证了试验结果的有效性。节理倾角显著影响了试件在循环冲击下的抗冲击能力，试件可承受冲击次数随节理倾角的变化趋势为 $90^\circ > 60^\circ > 45^\circ > 30^\circ > 0^\circ$ 。试件在循环冲击过程中的峰值应力均明显小于入射应力，在冲击作用结

束后均出现了明显的应变回弹现象。试件的峰值应力总体上呈下降的趋势,但并不随着冲击次数的增加而单调减小。

(2) 当试件未发生整体断裂时,大部分能量通过试件传入透射杆,透射能占比较大,而试件发生完全断裂后,能量无法再通过试件传递,透射能的占比最小。试件在循环冲击荷载作用下的损伤累积近似线性增加,损伤的增幅随着节理倾角的增大而减小,累积损伤变量大于 0.21 时,在下次冲击时试件会断裂。

(3) 在循环冲击荷载作用下,节理岩体内的压剪应力不足以产生剪切裂纹,裂纹由拉应力引起,并同时出现微缺陷的压密和宏观缺陷尖端张拉裂纹的萌生,裂纹以有限的速度沿着最大压缩主应力的方向扩展,最终贯穿试件导致试件发生劈裂破坏。而完整岩石内先出现微缺陷的压密,随后微裂纹以概率分布的形式被激活,最终导致试件破坏。

参考文献

- [1] 孙广忠. 论“岩体结构控制论”[J]. 工程地质学报, 1993, (01): 14-18.
SUN G Z. On the theory of structure-controlled rockmass[J]. Journal of Engineering Geology, 1993, (1): 14-18.
- [2] Singh M, Rao K S, Ramamurthy T. Strength and deformational behaviour of a jointed rock mass[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002, 35(1): 45-64. DOI: 10.1007/s006030200008.
- [3] Sarfarazi V, Haeri H. A review of experimental and numerical investigations about crack propagation[J]. Computers and Concrete, 2016, 18(2): 235-266. DOI: 10.12989/cac.2016.18.2.235.
- [4] Zhao F, Shi ZM, Yu SB, et al. A review of fracture mechanic behaviors of rocks containing various defects[J]. Underground Space, 2023, 12: 102-115. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.02.006.
- [5] Naoi M, Nakatani M, Igarashi T, et al. Unexpectedly frequent occurrence of very small repeating earthquakes ($-5.1 \leq M_w \leq -3.6$) in a South African gold mine: Implications for monitoring intraplate faults[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015, 120(12): 8478-8493. DOI: 10.1002/2015JB012447.
- [6] Huang J, Chen S H, Liu M L, et al. Physical model test and numerical simulation study of cumulative damage to deep tunnel surrounding rock under cyclic blasting load[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2023, 32(2): 161-184. DOI: 10.1177/10567895221133133.
- [7] Quinteros-Cartaya C, Solorio-Magana G, Nunez-Cornu F J, et al. Microearthquakes in the Guadalajara Metropolitan Zone, Mexico: evidence from buried active faults in Tesistán Valley, Zapopan[J]. Natural Hazards, 2023, 116: 2797-2818. DOI: 10.1007/s11069-022-05806-w.
- [8] Bahaaddini M, Sharrock G, Hebblewhite B K. Numerical direct shear tests to model the shear behaviour of rock joints[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 51:101-115. DOI: 10.1016/j.compgeo.2013.02.003.
- [9] Asadzadeh M, Hossaini M F, Moosavi M, et al. Mechanical characterisation of jointed rock-like material with non-persistent rough joints subjected to uniaxial compression[J]. Engineering Geology, 2019, 260: 105224. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105224.
- [10] 刘红岩, 李俊峰, 裴小龙. 单轴压缩下断续节理岩体动态损伤本构模型[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(2): 316-323. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0261.
LIU H Y, LI J F, PEI X L. A dynamic damage constitutive model for rockmass with intermittent joints under uniaxial compression[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(2): 316-323. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0261.
- [11] 邓正定, 王桢, 刘红岩. 基于复合损伤的节理岩体动态本构模型研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1368-1374. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.05.019.
DENG Z D, WANG Z, LIU H Y. Dynamic constitutive model of jointed rock mass based on the theory of composite damage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1368-1374. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.05.019.
- [12] 刘红岩, 吕淑然, 张力民. 基于组合模型法的贯通节理岩体动态损伤本构模型[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1814-

1821. DOI: 10.11779/CJGE201410008.
- LIU H Y, LV S R, ZHANG L M. Dynamic damage constitutive model for persistent jointed rock mass based on combination model method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(10): 1814-1821. DOI: 10.11779/CJGE201410008.
- [13] Yan Z L, Dai F, Liu Y, et al. Numerical assessment of the rate-dependent cracking behaviours of single-flawed rocks in split Hopkinson pressure bar tests[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 247: 107656. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2021.107656.
- [14] You W, Dai F, Liu Y. Experimental and numerical investigation on the mechanical responses and cracking mechanism of 3D confined single-flawed rocks under dynamic loading[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(2): 477-493. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.09.006.
- [15] Qiu J D, Zhou C T, Feng F. Dynamic responses and failure behavior of jointed rock masses considering pre-existing joints using a hybrid BPM-DFN approach[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 155: 105237. DOI: 10.1016/j.compgeo.2022.105237.
- [16] 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.
- [17] 刘红岩, 邓正定, 王新生, 等. 节理岩体动态破坏的 SHPB 相似材料试验研究[J]. 岩石力学, 2014, 35(3): 659-665. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.03.004.
- LIU H Y, DENG Z D, WANG X S, et al. Similar material test study of dynamic failure of jointed rock mass with SHPB[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 659-665. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.03.004.
- [18] 王建国, 梁书锋, 高全臣, 等. 节理倾角对类岩石冲击能量传递影响的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(5): 1237-1243. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2018.05.027.
- WANG J G, LIANG S F, GAO Q C, et al. Experimental study of jointed angles impact on energy transfer characteristics of simulated rock material[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(5): 1237-1243. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2018.05.027.
- [19] 李地元, 韩震宇, 孙小磊, 等. 含预制裂隙大理岩 SHPB 动态力学破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 2872-2883. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0488.
- LI D Y, HAN Z Y, SUN X L, et al. Characteristics of dynamic failure of marble with artificial flaws under split Hopkinson pressure bar tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 2872-2883. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0488.
- [20] 张人凡, 朱哲明, 王飞, 等. 冲击载荷作用下黑砂岩动态断裂参数的分形修正[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(07): 16-29. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0051.
- ZHANG R F, ZHU Z M, WANG F, et al. Fractal correction of dynamic fracture parameters of black sandstone under impact loads[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(07): 16-29. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0051.
- [21] Shu P Y, Li H H, Wang T T, et al. Dynamic strength of rock with single planar joint under various loading rates at various angles of loads applied[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(3): 545-554. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.01.005.
- [22] Rae A S P, Kenkmann T, Padmanabha V, et al. Dynamic compressive strength and fragmentation in felsic crystalline rocks[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2020, 125(10): 1-16. DOI: 10.1029/2020JE006561.
- [23] Rae A S P, Kenkmann T, Padmanabha V, et al. Dynamic compressive strength and fragmentation in sedimentary and metamorphic rocks[J]. Tectonophysics, 2022, 824: 229221. DOI: 10.1016/j.tecto.2022.229221.
- [24] Zou C J, Wong L N Y. Experimental studies on cracking processes and failure in marble under dynamic loading[J]. Engineering Geology, 2014, 173: 19-31. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.02.003.
- [25] Li X B, Zhou T, Li D Y. Dynamic strength and fracturing behavior of single-flawed prismatic marble specimens under impact loading with a split-Hopkinson pressure bar[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(1): 29-44. DOI: 10.1007/s00603-016-1093-y.
- [26] Li D Y, Han Z Y, Sun X L, et al. Dynamic mechanical properties and fracturing behavior of marble specimens containing

- single and double flaws in SHPB tests[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(6): 1623-1643. DOI: 10.1007/s00603-018-1652-5.
- [27] Dong P, Wu B B, Xia K W, et al. Fracture modes of single-flawed rock-like material plates subjected to dynamic compression[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20(9). DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001765.
- [28] Yan Z L, Dai F, Liu Y, et al. Experimental investigations of the dynamic mechanical properties and fracturing behavior of cracked rocks under dynamic loading[J]. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 2020, 79(10): 5535-5552. DOI: 10.1007/s10064-020-01914-8.
- [29] Wang X Y, Liu Z Y, Gao X C, et al. Dynamic characteristics and fracture process of marble under repeated impact loading[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 276: 108926. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2022.108926.
- [30] Han Z Y, Li D Y, Zhou T, et al. Dynamic progressive fracture behavior of axially confined sandstone specimens containing a single flaw[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 122: 103597. DOI: 10.1016/j.tafmec.2022.103597.
- [31] Luo Y, Gong H L, Huang J H, et al. Dynamic cumulative damage characteristics of deep-buried granite from Shuangjiangkou hydropower station under true triaxial constraint[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 165: 104215. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104215.
- [32] 王志亮, 汪大为, 汪书敏, 等. 循环冲击下大理岩的损伤力学行为及能量耗散特性[J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(4): 49-61. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0243.
- WANG Z L, WANG D W, WANG S M, et al. Dynamic behaviors and energy dissipation characteristics of marble under cyclic impact loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(4): 49-61. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0243.
- [33] 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.
- [34] Xia K, Nasser M H B, Mohanty B, et al. Effects of microstructures on dynamic compression of Barre granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45: 879-887. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2007.09.013.
- [35] Zhou T, Dong S L, Zhao G F, et al. An experimental study of fatigue behavior of granite under low-cycle repetitive compressive impacts[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(10): 3157-3166. DOI: 10.1007/s00603-018-1515-0.
- [36] Li X F, Li H B, Zhang Q B, et al. Dynamic fragmentation of rock material: Characteristic size, fragment distribution and pulverization law[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 199: 739-759. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.06.024.
- [37] Aben F M, Doan M L, Mitchell T M, et al. Dynamic fracturing by successive coseismic loadings leads to pulverization in active fault zones[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(4): 2338-2360. DOI: 10.1002/2015JB012542.
- [38] Doan M L, d'Hour V. Effect of initial damage on rock pulverization along faults[J]. *Journal of Structure Geology*, 2012, 45: 111-122. DOI: 10.1016/j.jsg.2012.05.006.
- [39] Zhou T, Han Z Y, Li D Y, et al. Experimental study of the mechanical and fracture behavior of flawed sandstone subjected to coupled static-repetitive impact loading[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 117: 103161. DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.103161.
- [40] Liu K Q, Liu H Y, Zhou Y Z, et al. Experimental study on the dynamic mechanical and progressive fracture behavior of multi-jointed rock mass under repetitive impact loading[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2024, 131: 104416. DOI: 10.1016/j.tafmec.2024.104416.
- [41] Ravichandran G, Subhash G. Critical appraisal of limiting strain rates for compression testing of ceramics in a split Hopkinson pressure bar[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1994, 77(1): 263-267. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1994.tb06987.x.
- [42] Dai F, Xu Y, Zhao T, et al. Loading-rate-dependent progressive fracturing of cracked chevron-notched Brazilian disc specimens in split Hopkinson pressure bar tests[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 88: 49-60. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.07.003.
- [43] Hokka M, Black J, Tkalic D, et al. Effects of strain rate and confining pressure on the compressive behavior of Kuru granite[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 91: 183-193. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.01.010.

- [44] Li X B, Zhou T, Li D Y. Dynamic Strength and Fracturing Behavior of Single-Flawed Prismatic Marble Specimens Under Impact Loading with a Split-Hopkinson Pressure Bar[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(1): 29-44. DOI: 10.1007/s00603-016-1093-y.
- [45] Wang P, Yin T B, Li X B, et al. Dynamic properties of thermally treated granite subjected to cyclic impact loading. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(4): 991-1010. DOI: 10.1007/s00603-018-1606-y.
- [46] Kimberley J, Ramesh K T, Daphalapurkar N P. A scaling law for the dynamic strength of brittle solids. Acta Materialia, 2013, 61(9): 3509-3521. DOI: 10.1016/j.actamat.2013.02.045.
- [47] 郭奇峰, 武旭, 蔡美峰, 等. 预制裂隙花岗岩的裂纹起裂机理试验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(S2): 476-483. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.1212.
- GUO Q F, WU X, CAI M F, et al. Crack initiation mechanism of pre-existing cracked granite[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S2): 476-483. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.1212.