

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0243

# 循环冲击下大理岩的损伤力学行为 及能量耗散特性\*

王志亮, 汪大为, 汪书敏, 巫绪涛

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 为了研究循环冲击荷载作用下大理岩的动态力学行为和能量耗散特性, 首先采用分离式霍普金森压杆, 通过试冲法确定出5种代表性的入射子弹速度, 据此完成了大理岩试样的等幅循环冲击试验, 并对试样的应力均匀性进行了检验。接着, 从应变率时程曲线、应力-应变关系、冲击次数和能量耗散特性等方面对测试数据进行了系统分析。最后, 基于能量演化定义损伤变量, 探讨了能量耗散与岩样损伤发展之间的关联机制。结果表明: 试样应变率时程曲线在低弹速下会出现变化率恒定的平台段, 应力-应变曲线在峰后阶段均产生一定的回弹; 随着循环次数的增加, 试样峰值应力总体减小, 而峰值应变、平均应变率和累积比能量吸收值则变化趋势相反, 且在临近破坏或开裂前其变化速率呈现突增现象; 峰值应力与平均应变率存在明显的线性关系, 弹性模量随平均应变率的变化整体上符合指数衰减规律; 试样的耗散比能与平均应变率之间呈线性正相关, 基于能量耗散定义的损伤变量可以较好地表征该大理岩试样动载下的损伤破坏过程。

**关键词:** 大理岩; 循环冲击; 动力学特性; 能量耗散; 损伤演化

中图分类号: O383

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

## Dynamic behaviors and energy dissipation characteristics of marble under cyclic impact loading

WANG Zhiliang, WANG Dawei, WANG Shumin, WU Xutao

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

**Abstract:** In order to study the dynamic behaviors and energy dissipation characteristics of marble under cyclic impact loading, a split Hopkinson pressure bar system was first adopted to determine the five representative incident velocities of striking projectile through the trial impact method. Based on this, constant amplitude cyclic impact tests of the marble samples were performed, and stress uniformity of the samples was examined. Then, a systematic analysis is conducted on the test data from the aspects of strain rate time history curve, stress-strain relationship, impact times and energy dissipation properties. Finally, a damage variable is defined based on the energy evolution, and the associated mechanism between energy dissipation and damage development of the rock samples is further explored. The results show that the time-history curves of the strain rate of the samples exhibit a plateau segment with a constant rate of change at low projectile velocities, and the stress-strain curve has a certain rebound at the post-peak stage. The peak stress of the rock samples decreases with the increase of the number of cycles, while the peak strain, average strain rate and cumulative absorption specific energy take on the opposite trend, and their change rates all show a sudden increase phenomenon before sample's break or fracture. The peak stress has a linear relationship with the average strain rate, while the variation of sample elastic modulus with average strain rate generally follows an exponential decay law. There is a positive linear correlation between the dissipated specific energy and the average

\* 收稿日期: 2023-07-10; 修回日期: 2024-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(12272119, U1965101)

第一作者: 王志亮(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, [cvezwzL@hfut.edu.cn](mailto:cvezwzL@hfut.edu.cn)

strain rate of the marble samples. The damage variable defined based on energy dissipation analysis can better characterize the break or fracture process of the marble samples under dynamic loading. The research results of this study have certain reference value for revealing the evolution mechanism of rock internal damage under cyclic load disturbance.

**Keywords:** marble; cyclic impact; dynamic characteristics; energy dissipation; damage evolution

随着经济的持续快速发展,土木交通、水利水电以及深部资源开发利用等工程建设方兴未艾。未来相当长一段时期内,爆破仍将是地下岩土工程开挖的主要手段<sup>[1]</sup>。在爆破施工取得良好破岩效果的同时,工作面处的动力扰动不可避免地会对周围岩体产生振动危害<sup>[2]</sup>,导致围岩力学性能下降,承受外荷载的能力降低,已有研究表明岩体的变形破碎效果与其力学特性和破碎能耗密切相关<sup>[3]</sup>。特别地,在实际爆破施工中岩体所受到的荷载形式往往不是单次的,而是循环的、重复的<sup>[4]</sup>,多次爆破振动造成岩体的损伤不断累积,这种重复扰动诱发的岩体失稳严重威胁着工程的安全。因此,深入研究岩石在循环冲击荷载作用下的动态力学响应及其能量演化特征具有重要的工程意义。

学者们对岩石类材料已开展了大量的冲击试验研究:李夕兵等<sup>[5]</sup>通过施加不同的轴向荷载,获得了单轴动静组合加载下砂岩的动力学特征和破坏模式;宫凤强等<sup>[6]</sup>基于砂岩的单、三轴压缩试验,发现在围压一定时,应变率的高低决定了岩石抗压强度的变化趋势;平琦等<sup>[7]</sup>开展了环向约束下的冲击压缩测试,发现在被动围压条件下岩石试件的性能得到了增强。对比无围压条件,试样轴向应力提升 20%,破坏应变提高 2~3 倍;李晓锋等<sup>[8]</sup>和 Yang 等<sup>[9]</sup>针对 3 种岩石进行了不同速度下的冲击压缩试验,指出不同岩石的动态力学特性对应变率的敏感性有所不同;Song 等<sup>[10]</sup>基于褐煤的动态压缩试验,发现试样的动力学参数在应变率提高时有明显的硬化效应,破碎程度随冲击速度的提高而逐渐提高;Zhao 等<sup>[11]</sup>进行了泥质石灰岩的单次冲击试验,发现岩石动态峰值强度随应变率的提高而提高,并提出用动态增强因子描述这种应变率效应。此外,在考虑重复冲击效应方面,王彤等<sup>[12]</sup>对风化岩石开展了不同条件下的循环冲击试验,发现其在轴压一定时有较明显的应变率效应;金解放等<sup>[13]</sup>对砂岩进行了动静组合循环冲击试验,发现随着循环荷载的施加,反射波和透射波分别增强和衰减,岩石的抗载荷能力降低;闫雷等<sup>[14]</sup>对花岗岩开展了不同速度下的等速循环冲击试验,构建了花岗岩双参数损伤演化模型,该模型在损伤演化阶段的曲线特征与试验结果吻合度较高;Li 等<sup>[15]</sup>对花岗岩开展了单轴循环冲击试验,发现动态载荷小于一定值时,岩石出现明显的损伤阈值;王志亮等<sup>[16]</sup>基于花岗岩的等幅循环冲击试验,发现不同入射波应力幅值下岩样呈现不同的损伤演化规律,并提出了花岗岩动态起裂应力的近似确定方法;唐礼忠等<sup>[17]</sup>对砂岩进行了循环冲击加载试验,结果证明了不同轴压下岩石循环冲击破坏模式有所不同;许金余等<sup>[18]</sup>通过对 3 种岩石开展带围压循环冲击试验研究其能量特性,发现在岩石循环冲击损伤演化过程中围压越高,岩样达到损伤阈值所需累积吸收能越多;Zhou 等<sup>[19]</sup>基于红砂岩的动态循环加载试验,建立了以损伤和应变率为自变量的岩石动态抗压强度函数表达式。综上所述,以往单次冲击和循环冲击试验研究大多集中于应变率和围压等因素对岩石损伤破坏模式的影响,但对于岩样力学参数的详细变化特征以及能量耗散与损伤发展间关系的分析鲜少。

鉴于此,本文中对深部大理岩开展中等应变率下的等幅循环冲击试验,探究大理岩的力学行为和破坏特征,并基于能量耗散特性和破坏模式定义此岩石的损伤变量,以期揭示循环荷载冲击下大理岩的累积损伤演化规律。

## 1 试 验

### 1.1 试样

试验所用大理岩的平均密度为  $2810 \text{ kg/m}^3$ 。加工后试样为直径 50 mm、高 25 mm 的圆柱体,如图 1 所示,它们均钻取自同一块完整岩块,其上、下端面的不平行度控制在 0.05 mm 以内<sup>[20]</sup>。通过声波测验数据剔除声速异常的试样,以减小试样阻抗比的差异,试样的基本物理参数见表 1。



图 1 大理岩试样

Fig. 1 Marble specimens

表 1 试样基本参数

Table 1 Basic physical parameters of the specimens

试样	高度/mm	直径/mm	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	声速/(m·s <sup>-1</sup> )	试样	高度/mm	直径/mm	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	声速/(m·s <sup>-1</sup> )
S2	25.10	49.40	2.82	5390	S17	25.12	49.52	2.79	4850
S4	24.94	49.40	2.83	5390	S18	24.94	49.32	2.84	5110
S5	25.18	49.48	2.79	4970	S19	25.20	49.40	2.82	5110
S7	25.30	49.36	2.80	5180	S20	24.94	49.42	2.80	5110
S9	25.18	49.54	2.80	5390	S21	24.92	49.38	2.83	4970
S12	25.10	49.50	2.79	5390	S23	24.92	49.32	2.83	5240
S14	24.94	49.36	2.83	5240	S24	24.92	49.28	2.84	4970
S16	25.10	49.36	2.82	4970					

## 1.2 装置

试验加载采用图 2 所示的分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)装置, 该装置主要由发射系统、杆件系统、数据采集和分析系统等组成。其中, 子弹和杆件材质均为高强度合金钢, 密度为 7900 kg/m<sup>3</sup>, 声速 5172 m/s, 弹性模量为 210 GPa。在入射杆的撞击端粘贴一个直径 10 mm、厚度 1 mm 的圆形橡胶片作为波形整形器, 来延缓入射波的上升沿, 同时滤去高频振荡部分。

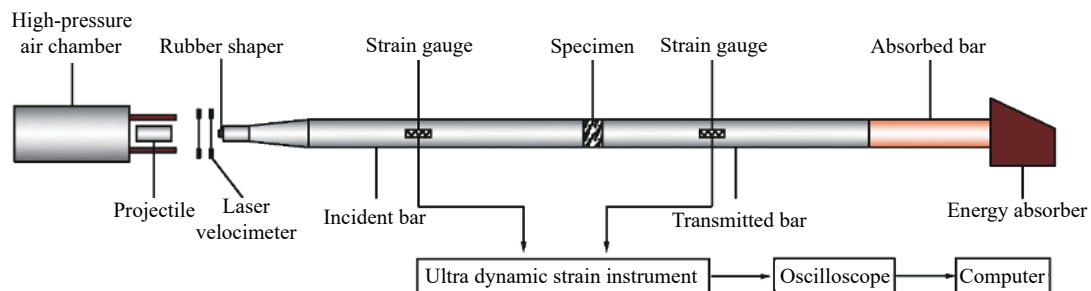


图 2 SHPB 装置

Fig. 2 The SHPB device

## 1.3 数据处理方法

对每个试样以相同的弹速进行等幅循环冲击, 直至它发生宏观开裂或出现碎块剥落。冲击速度通过调整发射腔气压或子弹位置来控制。经过多次预试验, 确定出后续循环冲击的 5 种弹速等级分别为 6.5、7.0、7.5、8.0 和 8.5 m/s。其中, 最低弹速下试样破坏时的循环次数在 30 次左右, 最高弹速下试样至少能承受 2 次加载, 再把高低弹速等间距划分出 3 个等级。考虑到试样性能的离散性, 每个弹速下至少对 3 个试样进行平行试验。

基于一维应力波理论, 采用三波法<sup>[21]</sup> 获得试样的应变率、应变和应力时程分别为:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{c}{l_s} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)], \quad \varepsilon(t) = \frac{c}{l_s} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt, \quad \sigma(t) = \frac{EA}{2A_s} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_i(t)$ 、 $\varepsilon_r(t)$  和  $\varepsilon_t(t)$  分别为入射波、反射波和透射波的应变时程,  $A$  和  $A_s$  分别为杆件和试样的横截面积,  $c$  和  $E$  分别为杆件的纵波波速和弹性模量,  $l_s$  为试样高度。

## 2 力学性能循环弱化分析

测试中共采集到 122 条试验数据, 表 2 为所有试样经循环冲击的基本参数, 入射波幅值为同一试样相同弹速下入射波最大应力的平均值。考虑到试样的离散性, 同一弹速下选取冲击次数为中位数的试验结果进行分析, 所取试样编号为 S23、S18、S4、S12 和 S17, 对应的入射波幅值分别为 76.96、71.99、63.91、60.92 和 50.74 MPa。

表 2 循环冲击的基本参数

Table 2 Basic parameters of cyclic impacts

试样	平均弹速/(m·s <sup>-1</sup> )	最大循环冲击次数N	入射波幅值/MPa
S21	8.51	4	75.25
S23	8.53	2	76.96
S24	8.52	2	77.03
S18	8.10	4	71.99
S19	8.09	4	70.12
S20	8.13	3	72.56
S2	7.53	4	64.98
S4	7.52	6	63.91
S5	7.50	6	63.76
S7	6.98	9	61.57
S9	7.14	12	60.88
S12	7.09	12	60.92
S14	6.55	10	51.88
S16	6.51	23	50.22
S17	6.52	21	50.74

### 2.1 应力均匀性验证

图 3 为弹速为 7.5 m/s 时第 1 次冲击荷载下试样的动态应力平衡检验曲线。由图 3 可见, 入射应力波曲线呈钟形, 且入射应力波(I-wave)曲线、反射应力波(R-wave)曲线之和与透射应力波(T-wave)曲线在峰前阶段基本重合, 这表明试样两侧应力已达到平衡, 测试结果有效。由图 4 中典型的应力波形(试样 S18, 弹速 8.0 m/s)可以看出, 随着循环冲击的进行, 透射应力波峰值减小, 波形无明显变化, 而反射应力波曲线在前 3 次冲击下形态差别较小, 应力幅值基本不变, 最后一次时则明显增大, 这是因为此时试样已经发生了破坏, 其完整性降低, 大部分应力波被反射回入射杆。

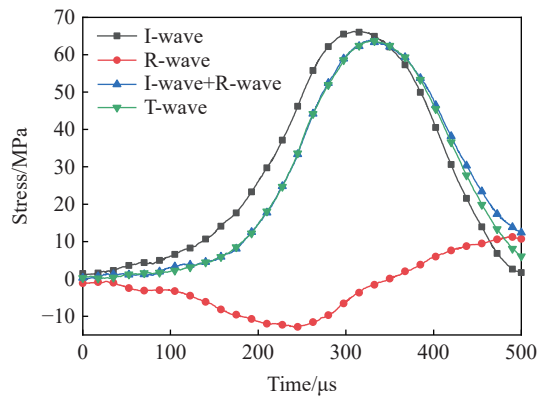


图 3 弹速为 7.5 m/s 时第 1 次冲击荷载下试样的动态应力平衡检验曲线

Fig. 3 Dynamic stress balance test curves of the specimen under the first impact loading at the projectile velocity of 7.5 m/s

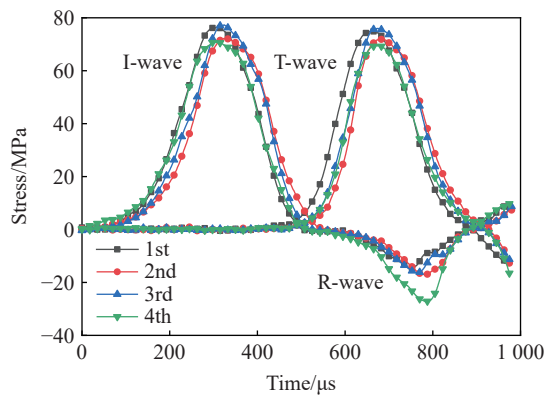


图 4 试样 S18 在弹速 8.0 m/s 循环冲击下的应力波形

Fig. 4 Stress waveforms in specimen S18 under cyclic impact with the projectile velocity of 8.0 m/s

### 2.2 循环冲击下应变率时程曲线特征

图 5~9 为不同弹丸速度的循环冲击下试样的应变率时程曲线, 易见试样的应变率均在 300 μs 前达到峰值, 随后应变率降低, 在 350 μs 附近向负值发展, 此时应变逐渐减小。峰值应变率与冲击次数呈正相关, 说明循环冲击加载时, 试样损伤发生及其累积过程与入射弹速正相关。此外, 应变率时程曲线在低弹速下(如 6.5、7.0 和 7.5 m/s)出现如图 5~7 中的平台段, 而在较高弹速下(如 8.0、8.5 m/s)未能观察

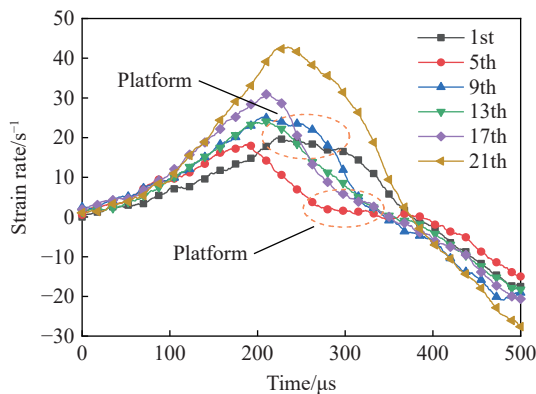


图 5 弹速为 6.5 m/s 时试样的应变率时程曲线

Fig. 5 Strain-rate history curves of the specimen at the projectile velocity of 6.5 m/s

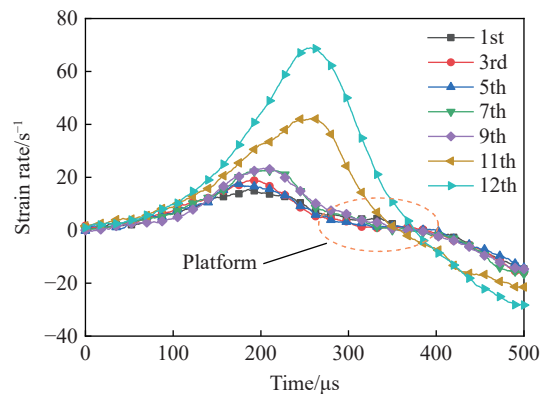


图 6 弹速为 7.0 m/s 时试样的应变率时程曲线

Fig. 6 Strain-rate history curves of the specimen at the projectile velocity of 7.0 m/s

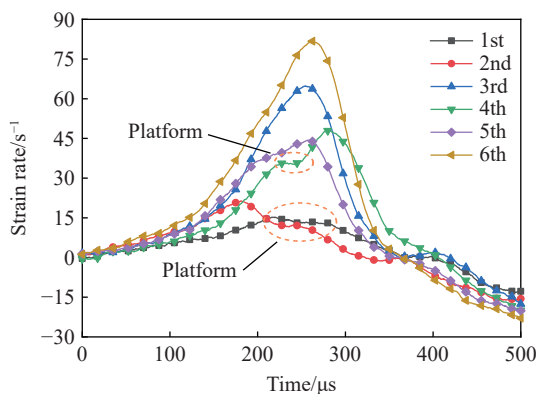


图 7 弹速为 7.5 m/s 时试样的应变率时程曲线

Fig. 7 Strain-rate history curves of the specimen at the projectile velocity of 7.5 m/s

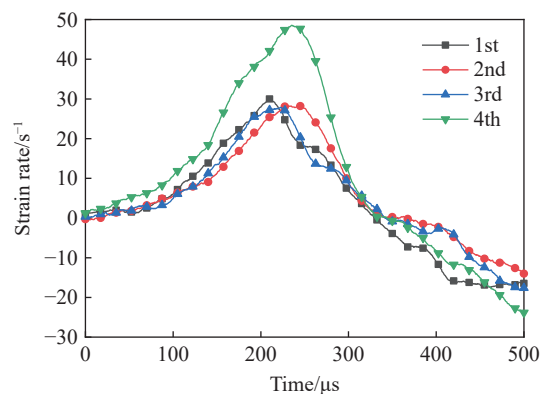


图 8 弹速为 8.0 m/s 时试样的应变率时程曲线

Fig. 8 Strain-rate history curves of the specimen at the projectile velocity of 8.0 m/s

到, 这是因为低弹速下试样损伤演化缓慢, 形变速率保持稳定, 而弹速较高时, 试样损伤发展加快, 应变率变化剧烈。

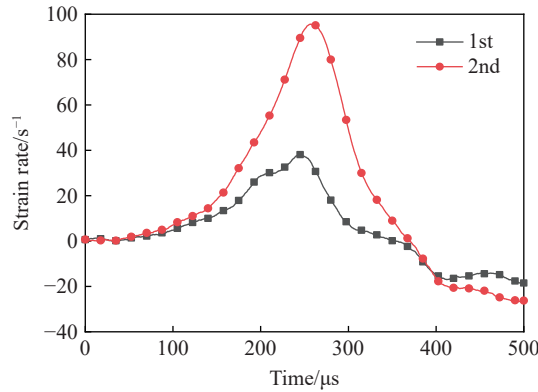


图 9 弹速为 8.5 m/s 时试样的应变率时程曲线

Fig. 9 Strain-rate history curves of the specimen at the projectile velocity of 8.5 m/s

### 2.3 循环冲击下应力-应变响应特性

图 10~14 为不同弹速冲击下岩样的应力-应变曲线。可以看出, 随着冲击次数的增加, 试样峰值应力整体降低, 峰值应变增大。循环冲击的应力-应变曲线形态相似, 均存在峰后回弹现象, 即当应变达到一个值后又变小。最后一次冲击下的应力-应变曲线同样出现回弹, 这是由于此时试样主要为“留心”破坏模式(见图 15), 大部分应力波仍能透过岩样传递至透射杆。此外, 还可见在较低应力水平下, 其滞回曲线所围的面积随循环次数增加渐渐趋于稳定, 试样的弹性模量在初始阶段近似相同, 且应力、应变值均处于较小的变化范围内; 在临近破坏时, 试样的峰值应力稍有减小, 峰值应变则突然增大, 这表明循环冲击作用导致岩样内部损伤积累呈非线性发展, 在临近破坏前损伤演化加速。

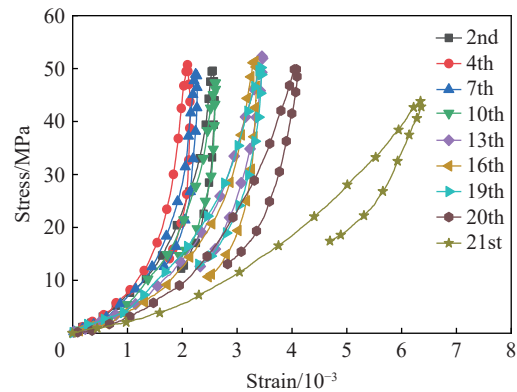


图 10 在 6.5 m/s 的弹速循环冲击下试样的应力-应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curves of the specimen under cyclical impact loading at the projectile velocity of 6.5 m/s

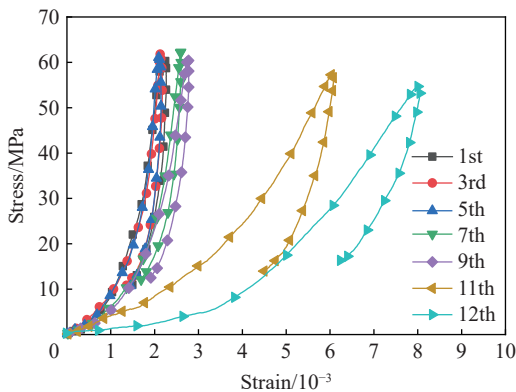


图 11 在 7.0 m/s 的弹速循环冲击下试样的应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curves of the specimen under cyclical impact loading at the projectile velocity of 7.0 m/s

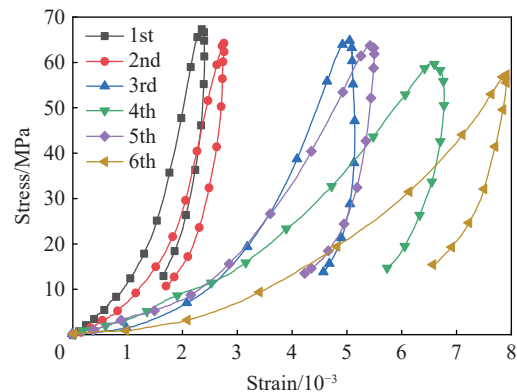


图 12 在 7.5 m/s 的弹速循环冲击下试样的应力-应变曲线

Fig. 12 Stress-strain curves of the specimen under cyclical impact loading at the projectile velocity of 7.5 m/s

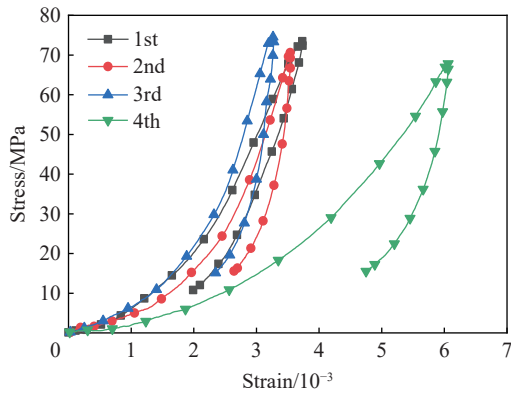


图 13 在 8.0 m/s 的弹速循环冲击下试样的应力-应变曲线  
Fig. 13 Stress-strain curves of the specimen under cyclical impact loading at the projectile velocity of 8.0 m/s

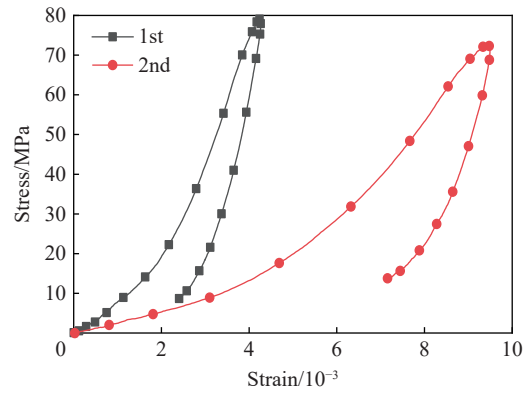


图 14 在 8.5 m/s 的弹速循环冲击下试样的应力-应变曲线  
Fig. 14 Stress-strain curves of the specimen under cyclical impact loading at the projectile velocity of 8.5 m/s

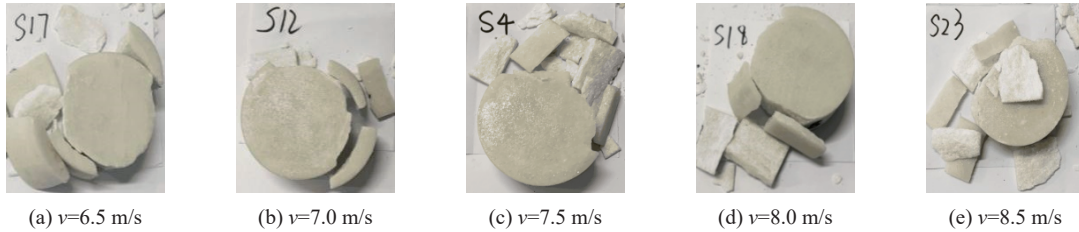


图 15 不同冲击速度下试样的破坏形态

Fig. 15 Failure modes of specimens under different impact velocities

## 2.4 力学行为的循环冲击效应

### 2.4.1 峰值应力的变化

图 16 为冲击次数对岩样峰值应力的影响。前几次冲击时, 试样完整性好, 其峰值应力与冲击速度呈显著的正相关关系, 即弹速越高, 试样循环破坏前整体应力水平越高。峰值应力曲线在循环次数增加时总体呈下降趋势, 且冲击弹速越高其下降速度越快, 这说明高弹速冲击下, 岩样损伤累积速度更快。此外, 可见在临近破坏前的 1~2 次冲击下, 峰值应力下降程度最大, 表明在循环过程中岩样损伤累积导致其承载力的损失在后期是突变式发展。

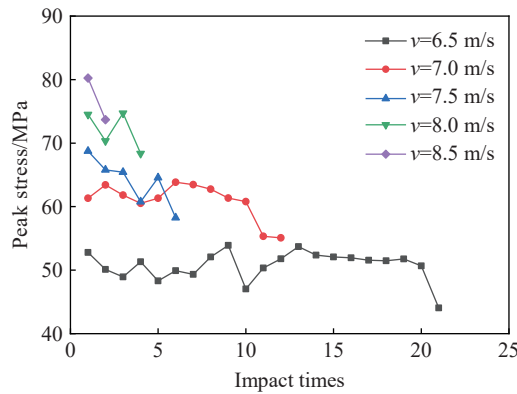


图 16 峰值应力随冲击次数的变化

Fig. 16 Variation of peak stress with impact times

### 2.4.2 峰值应变的变化

图 17 显示随着循环冲击次数增多, 试样峰值应变曲线出现波动式变化, 这可能是因为试验过程中的

误差导致每次冲击的弹速不完全相同, 入射波幅值不稳定造成峰值应变曲线的波动起伏。冲击弹速越高, 峰值应变随冲击次数上升的整体趋势越陡。循环冲击直至试样临近破坏前, 试样的峰值应变出现突跃。可见, 循环荷载下大理岩的损伤逐渐积累, 一旦达到其损伤阈值, 裂纹迅速扩展最终产生破坏, 且入射弹速越高时所经历的冲击次数越少。

2.4.3 平均应变率的变化

平均应变率为试样加载至峰值应力前的应变率均值。随着循环冲击次数的增加, 试样内部损伤累积, 导致其波阻抗降低。对于同一冲击速度下的循环冲击试验, 入射波基本保持不变, 由于试样受损反射波逐渐增强, 平均应变率也随之提高<sup>[22]</sup>。图 18 为岩样平均应变率随冲击次数的变化, 可见同峰值应变曲线趋势相近, 整体上持续增加, 临近破坏时上升幅度陡增, 说明此时试样损伤累积导致其抗变形能力急剧下降。

2.5 力学参数的弱化效应

工程结构的实际最大承载能力往往取决于剩余强度, 而非设计强度, 所以研究循环冲击下岩石力学参数的弱化效应能可为后期工程稳定性评价等提供指导。本文试验中, 由于高弹速下循环次数较少, 因而选取冲击弹速为 7.5、7.0 和 6.5 m/s 的试样(编号分别为 S4、S12 和 S7)分别间隔 5 次冲击后的数据进行分析, 经循环冲击后

各参数及其与首次冲击相比的变化率列于表 3 中。由表 3 可知, 循环冲击后期试样力学参数的变化率明显增大, 因而临近破坏时的冲击荷载对力学参数的弱化起关键性作用。其中, 试样 S4 与 S17 恰好采集到最后一次冲击的数据, 在循环结束时其峰值应力均下降约 15%, 峰值应变上升约 200%, 弹性模量则降低约 77%, 这表明较低弹速下“留心”破坏的岩样动态力学参数弱化程度基本相同。

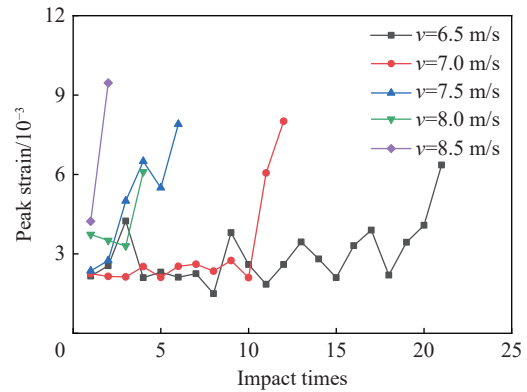


图 17 峰值应变随冲击次数的变化

Fig. 17 Variation of peak strain with impact times

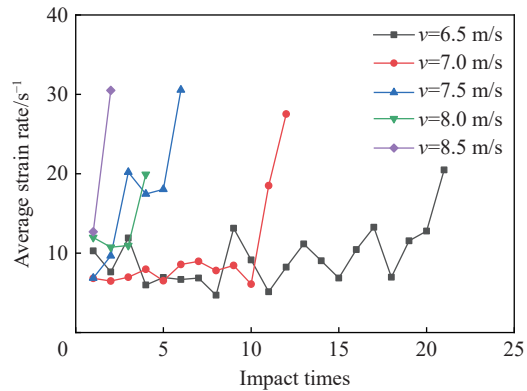


图 18 平均应变率与冲击次数的关系

Fig. 18 Relationship of average strain rate with impact times

表 3 循环冲击后试样力学参数

Table 3 Mechanical parameters of specimens after cyclic impact

试样	总冲击次数	经历的冲击次数	峰值应力/MPa	峰值应变/ $10^{-3}$	弹性模量/GPa
S4	6	1	68.73	2.36	41.83
		6	58.26	7.90	9.62
S12	12	1	61.32	2.25	42.80
		6	63.84	2.53	38.75
		11	55.33	6.06	11.47
S17	21	1	52.79	2.16	37.53
		6	49.92	2.12	26.94
		11	51.78	1.85	23.7
		16	51.95	3.31	21.63
		21	44.05	6.36	8.52



### 2.6 力学行为的应变率效应

图 19 显示平均应变率处在  $5 \sim 35 \text{ s}^{-1}$  之间, 各弹速下试样的峰值应力  $\sigma_p$  (MPa) 与其平均应变率  $\dot{\epsilon}$  ( $\text{s}^{-1}$ ) 之间呈线性相关, 它们的拟合公式为:

$$\sigma_p = \begin{cases} -0.40\dot{\epsilon} + 52.61 & v = 6.5 \text{ m/s} \\ -0.38\dot{\epsilon} + 64.78 & v = 7.0 \text{ m/s} \\ -0.38\dot{\epsilon} + 70.49 & v = 7.5 \text{ m/s} \\ -0.41\dot{\epsilon} + 78.86 & v = 8.0 \text{ m/s} \\ -0.37\dot{\epsilon} + 84.91 & v = 8.5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (2)$$

不同弹速下各拟合曲线的斜率非常接近, 这说明循环冲击荷载作用导致的峰值应力随平均应变率的下降速率几乎相同, 岩样抗变形能力减弱的同时其承载能力也相应降低。

图 20 显示在不同冲击速度下, 循环冲击试样的弹性模量  $E$  (GPa) 与平均应变率  $\dot{\epsilon}$  ( $\text{s}^{-1}$ ) 在整体上呈现指数关系衰减, 它们之间的拟合公式为:

$$E = 97.12 e^{-0.17\dot{\epsilon}} + 10.25 \quad (3)$$

由于岩样吸收能量导致其内部损伤积累, 临近破坏前抗变形能力显著下降。结合上述分析发现, 随着循环冲击次数的增加, 峰值应力、弹性模量与岩样损伤间的关联机制存在着明显的应变率相关性, 即随着岩样损伤发展, 其峰值应力、弹性模量伴随平均应变率的提高而减小。值得一提的是, 循环冲击试验中的这种效率应与单次冲击下有很大不同——在单次冲击试验中, 应变率的大小主要由试样变形速率的改变所决定, 一定程度内弹速提高往往会导致试样应变率升高, 并引起峰值应力和弹性模量的提升; 而在循环冲击试验中, 弹速相同时其入射波的应力幅值基本相同, 岩样内部损伤积累乃至破坏才是其应变率升高的主要原因。

## 3 循环冲击下能量及损伤演化分析

### 3.1 能量耗散基本原理

试样在动态破碎过程中所吸收的能量, 一般主要由碎片形成过程耗散的能量和碎片动能等几部分组成<sup>[23]</sup>, 而在循环荷载作用下试样破坏前绝大部分能量耗散于内部裂纹发展, 其他形式的能量占比较小, 因此本文中将吸收能近似替换为耗散能。定义耗散比能 ( $Q_d$ ) 为单位体积岩样在冲击载荷作用过程所耗散的能量, 并假设接触界面处无能量损耗, 则有:

$$Q_d = W_d/V_s \quad W_d = W_i - W_r - W_t \quad (4)$$

式中:  $W_d$  为试样耗散能,  $V_s$  为试样体积;  $W_i$ 、 $W_r$  和  $W_t$  分别为试样的入射能、反射能和透射能。入射能、反射能和透射能可通过下式得出:

$$W_i = AEc \int_0^t \dot{\epsilon}_i^2(t) dt, \quad W_r = AEc \int_0^t \dot{\epsilon}_r^2(t) dt, \quad W_t = AEc \int_0^t \dot{\epsilon}_t^2(t) dt \quad (5)$$

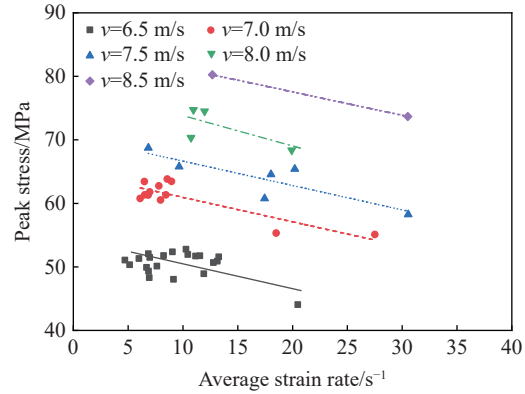


图 19 峰值应力与平均应变率的关系

Fig. 19 Relation of peak stress with average strain rate

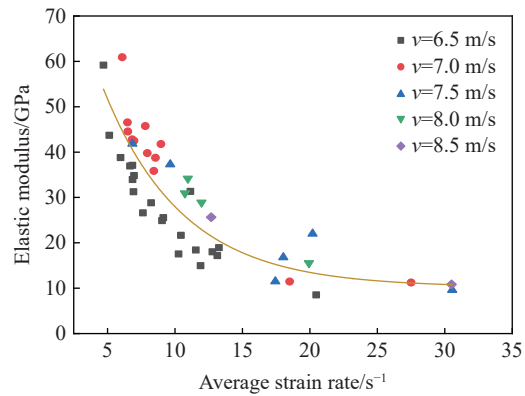


图 20 弹性模量与平均应变率的关系

Fig. 20 Relation of elastic modulus with average strain rate

为了更好地分析循环冲击下大理岩的能量特性, 引入累积耗散比能( $\vartheta$ )<sup>[24]</sup>:

$$\vartheta = \sum_{i=1}^n Q_{d,i} \quad (6)$$

式中:  $Q_{d,i}$  为第  $i$  次冲击下的耗散比能,  $n$  为循环冲击的次数。

### 3.2 累计比能量与耗散比能

图 21 显示随循环冲击次数的增加, 累积耗散比能呈逐渐上升趋势, 弹速越高其总体增长速率越快。在一定冲击次数内, 增长速率基本保持不变, 临近破坏时的冲击载荷作用下, 累积耗散比能的上升幅度变陡。这是由于在循环冲击下, 岩样内部损伤累积到一定程度发生宏观破坏, 导致耗散能明显增加<sup>[25]</sup>。图 22 显示循环冲击荷载下试样的耗散比能与平均应变率总体呈线性关系, 拟合公式为:

$$Q_d = 0.0047\dot{\epsilon} - 0.012 \quad (7)$$

在较高弹速下(如 8.0、8.5 m/s), 耗散比能增长速度更快, 且较之低弹速的数据点离散性大。冲击速度由低到高, 其线性增大趋势愈发不明显, 这是因为高弹速下试样经历循环冲击次数变少, 发生破坏的历时较短, 这一过程中能量耗散速率加快, 耗散比能增幅变大。

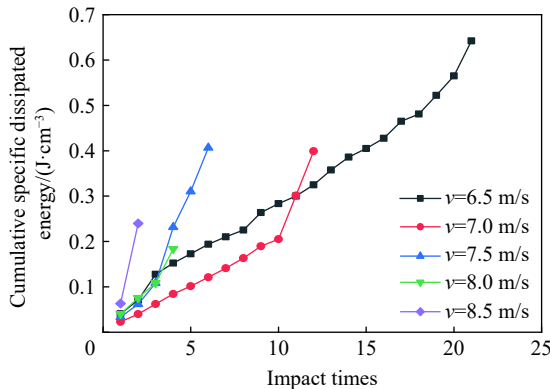


图 21 不同冲击速度下累积耗散比能与冲击次数的关系

Fig. 21 Relation of cumulative specific dissipated energy with impact times under different impact velocities

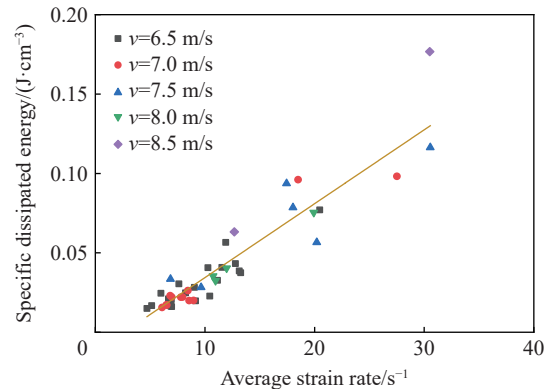


图 22 耗散比能与平均应变率的关系

Fig. 22 Relation of specific dissipated energy with average strain rate

### 3.3 能量耗散与损伤发展的耦合关系

岩样吸收外部能量激发内部微裂纹激活与扩展, 最终发展成宏观裂缝以致变形破坏, 这一损伤演化过程为能量耗散的不可逆过程<sup>[26]</sup>。循环冲击过程中, 每次荷载做功都会使得试样内部损伤加剧, 基于能量耗散效应的损伤参数能更好描述损伤演化规律, 因此将损伤变量  $D$  定义为累积耗散能与累积总输入能之比<sup>[27]</sup>:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n W_{d,i}}{\sum_{i=1}^N W_{i,i}} \quad (8)$$

图 23 显示损伤变量随冲击次数的增加不断增大, 最大值不超过 0.12, 这是由于试验过程中认定试样有明显开裂或外围碎块脱落时即为破坏状态, 因此本文中所提到的损伤阈值与规定的破坏特征相对应, 为“留心”破坏模式下试样达到破坏极限前的损伤界限。冲击速度为 7.0 和 8.0 m/s 时试样破坏时的损伤变量相对冲击速度为 7.5 和 8.5 m/s 时的要小, 这与岩样的破坏形态相对应, 损伤值大的试样完整程度相对低, 剥落碎块多。易见, 损伤变量在最后 2 次冲击时上升趋势明显增大, 表明循环过程临近破坏时的外部冲击对试样损伤发展起关键性作用。从图 24 可以看出, 损伤变量随累积耗散比能的增大而线性增大, 大理岩损伤发展速度与冲击弹速呈显著正相关, 即冲击弹速越高, 入射总能量越多, 损伤累积速度越快, 更容易达到损伤阈值。循环冲击荷载作用下, 每次总入射能基本保持恒定, 循环加载前期大

部分能量透过试样, 少部分耗散于裂纹扩展; 随着循环次数增多, 损伤逐渐积累, 用于裂纹扩展的能量增多, 当损伤接近或超过其阈值, 试样将出现宏观开裂或伴有碎块剥落现象。由上可见, 岩样在变形破坏过程中始终不断地与外界交换着能量, 是一个能量耗散的损伤演化过程。

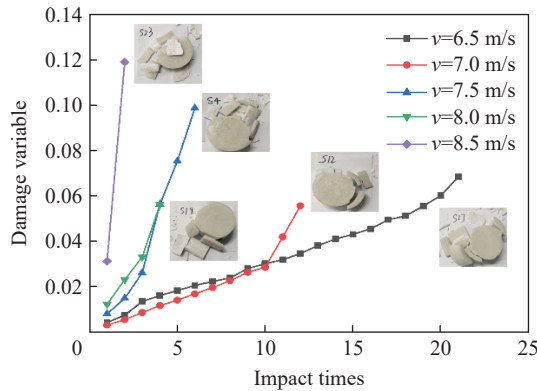


图 23 损伤变量与冲击次数的关系

Fig. 23 Relation of damage variable with impact times

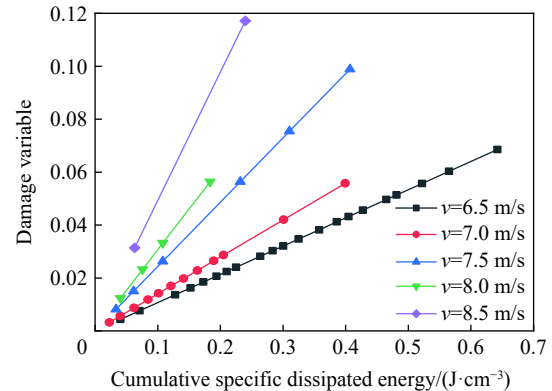


图 24 损伤变量与累积耗散比能的关系

Fig. 24 Relation of damage variable with cumulative specific dissipated energy

## 4 结 论

基于等幅循环冲击试验, 首先对岩样应变率时程及应力-应变曲线的特征进行分析, 随后探讨了岩样动力学特性的循环冲击弱化效应, 并阐明了动态力学参数之间的关系, 最后从能量角度揭示了岩样损伤演化的规律, 得到的主要结论如下。

(1) 试样应变率时程曲线在低弹速下会出现变化率恒定的平台段, 而高弹速下应变率波动程度大, 未能观察到此现象。循环冲击试验中每次获得压缩应力-应变曲线与试样的破坏形态对应, 在峰后阶段均产生一定回弹现象, 即当应变达到一个值后又变小。

(2) 随循环冲击次数的增加, 大理岩试样的峰值应力总体呈减小趋势, 而其峰值应变、平均应变率和累积比能量吸收值则变化趋势相反, 在临近破坏或开裂前各自的变化速率均有一定程度的突增; 试样峰值应力与平均应变率呈线性关系, 而弹性模量随平均应变率符合指数函数衰减。

(3) 循环动态荷载下岩样损伤非线性累积, 一旦达到其损伤阈值后, 岩样将产生宏观裂缝并伴有外围碎块剥落; 基于能量耗散所定义的损伤变量, 可较好地描述本文大理岩循环冲击下的损伤演化过程, 对其他类型岩石损伤演化机理的揭示也有借鉴意义。

## 参考文献:

- [1] LUO Y, GONG F Q, LI X B, et al. Experimental simulation investigation of influence of depth on spalling characteristics in circular hard rock tunnel [J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(3): 891–910. DOI: 10.1007/s11771-020-4339-5.
- [2] WANG S F, HUANG L Q, LI X B. Analysis of rockburst triggered by hard rock fragmentation using a conical pick under high uniaxial stress [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 96: 103195. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103195.
- [3] DU K, YANG C Z, SU R, et al. Failure properties of cubic granite, marble, and sandstone specimens under true triaxial stress [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 130: 104309. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104309.
- [4] HAO H, WU C, SEAH C C. Numerical analysis of blast-induced stress waves in a rock mass with anisotropic continuum damage models. part 2: stochastic approach [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2002, 35(2): 95–108. DOI: 10.1007/s006030200013.
- [5] 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 X B, GONG F Q, 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.
- [6] 宫凤强, 陆道辉, 李夕兵, 等. 不同应变率下砂岩动态强度准则的试验研究 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(9): 2433–2441. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.09.007.
- GONG F Q, LU D H, LI X B, et al. Experimental research of sandstone dynamic strength criterion under different strain rates [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(9): 2433–2441. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.09.007.
- [7] 平琦, 马芹永, 卢小雨, 等. 被动围压条件下岩石材料冲击压缩试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33(2): 55–59. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2014.02.011.
- PING Q, MA Q Y, LU X Y, et al. Impact compression test of rock material under passive confining pressure conditions [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(2): 55–59. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2014.02.011.
- [8] 李晓锋, 李海波, 刘凯, 等. 冲击荷载作用下岩石动态力学特性及破裂特征研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(10): 2393–2405. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0539.
- LI X F, LI H B, LIU K, et al. Dynamic properties and fracture characteristics of rocks subject to impact loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(10): 2393–2405. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0539.
- [9] YANG R S, LI W Y, YUE Z W. Comparative study on dynamic mechanical properties and energy dissipation of rocks under impact loads [J]. *Shock and Vibration*, 2020, 2020: 8865099. DOI: 10.1155/2020/8865099.
- [10] SONG Y Q, MA H F, YANG J K, et al. Dynamic mechanical behaviors and failure mechanism of lignite under SHPB compression test [J]. *Sustainability*, 2022, 14(17): 10528. DOI: 10.3390/SU141710528.
- [11] ZHAO H H, LIU C, ZHANG J, et al. Breakage behavior of gravel rock particles under impact force [J]. *Computational Particle Mechanics*, 2021, 8(5): 1075–1087. DOI: 10.1007/s40571-021-00393-2.
- [12] 王彤, 宋战平, 杨建永. 循环冲击作用下风化红砂岩动态响应特性 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(S1): 2772–2778. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1448.
- WANG T, SONG Z P, YANG J Y. Dynamic response characteristics of weathered red sandstone under cyclic impact [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(S1): 2772–2778. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1448.
- [13] 金解放, 李夕兵, 常军然, 等. 循环冲击作用下岩石应力应变曲线及应力波特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(6): 613–619. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)06-0613-07.
- JIN J F, LI X B, CHANG J R, et al. Stress-strain curve and stress wave characteristics of rock subjected to cyclic impact loadings [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(6): 613–619. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)06-0613-07.
- [14] 闫雷, 刘连生, 李仕杰, 等. 单轴循环冲击下弱风化花岗岩的损伤演化 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(5): 053303. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0354.
- YAN L, LIU L S, LI S J, et al. Damage evolution of weakly-weathered granite under uniaxial cyclic impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(5): 053303. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0354.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 唐礼忠, 王春, 程露萍, 等. 一维静载及循环冲击共同作用下砂卡岩力学特性试验研究 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(10): 3898–3906. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2015.10.045.
- TANG L Z, WANG C, CHENG L P, et al. Experimental study of mechanical characteristics of skarn under one-dimensional coupled static and cyclic impact loads [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(10): 3898–3906. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2015.10.045.
- [18] 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(S2): 4159–4165.
- XU J Y, LÜ X C, ZHANG J, 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.

- [19] ZHOU Y Q, SHENG Q, LI N N, et al. The relationship between dynamic strength and strain rate and damage to rock materials subjected to dynamic cyclic loading [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2021, 7(3): 88. DOI: 10.1007/S40948-021-00287-W.
- [20] 中国岩石力学与工程学会. 岩石动力特性试验规程: T/CSRME 001-2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.  
Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering. Technical specification for testing method of rock dynamic properties: T/CSRME 001-2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [21] WANG Z L, SHI G Y. Effect of heat treatment on dynamic tensile strength and damage behavior of medium-fine-grained Huashan granite [J]. *Experimental Techniques*, 2017, 41(4): 365–375. DOI: 10.1007/s40799-017-0180-7.
- [22] 田诺成, 王志亮, 熊峰, 等. 循环冲击荷载下轴压对花岗岩动力特性影响 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2021, 53(5): 156–164. DOI: 10.11918/201908134.  
TIAN N C, WANG Z L, XIONG F, et al. Influence of axial pressure on dynamic mechanical properties of granite under cyclic impact loading [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2021, 53(5): 156–164. DOI: 10.11918/201908134.
- [23] ZHANG Z X, KOU S Q, JIANG L G, et al. Effects of loading rate on rock fracture: fracture characteristics and energy partitioning [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(5): 745–762. DOI: 10.1016/S1365-1609(00)00008-3.
- [24] 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.
- [25] 余永强, 张文龙, 范利丹, 等. 冲击荷载下煤系砂岩应变率效应及能量耗散特征 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(7): 2281–2293. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.0440.  
YU Y Q, ZHANG W L, FAN L D, et al. Strain rate effect and energy dissipation characteristics of sandstone in coal measures under impact loading [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(7): 2281–2293. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.0440.
- [26] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(21): 3565–3570. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2004.21.001.  
XIE H P, PENG R D, JU Y. Energy dissipation of rock deformation and fracture [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(21): 3565–3570. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2004.21.001.
- [27] RAN Q C, LIANG Y P, ZOU Q L, et al. Experimental investigation on mechanical characteristics of red sandstone under graded cyclic loading and its inspirations for stability of overlying strata [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2023, 9(1): 11. DOI: 10.1007/S40948-023-00555-X.

(责任编辑 张凌云)