

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0089

# 基于 FDM-DEM 耦合的冲击损伤大理岩 静态断裂力学特征研究\*

张涛<sup>1</sup>, 蔚立元<sup>1</sup>, 苏海健<sup>1</sup>, 罗宁<sup>1</sup>, 魏江波<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 西安科技大学地质与环境学院, 西安 陕西 710054)

**摘要:** 为探究循环冲击损伤后大理岩的静态断裂力学特征, 基于有限差分 (finite difference method, FDM)-离散元 (discrete element method, DEM) 耦合的建模技术构建了三维分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 数值模型, 其中杆件系统和岩石试件分别采用 FLAC<sup>3D</sup> 和 PFC<sup>3D</sup> 程序建模。利用该模型对中心直切槽半圆盘 (NSCB) 试样进行了恒定子弹速度下的循环冲击, 随后对受损试样进行静态三点弯曲断裂实验。通过编写 Fish 程序, 提取试样断裂面数据, 对断裂面进行重构并定量计算表面粗糙度。通过与相关室内实验结果的对比分析, 验证了本文数值分析的合理性与可靠性。模拟结果表明, 随着循环冲击次数的增加, 试样内部微裂纹、破碎颗粒均增加。连接力场分布混乱, 部分力链发生断裂。力链的变化是试样力学性能劣化的根本原因。在静态三点弯曲断裂实验中, 冲击 5 次后试样的静态断裂韧度较天然试样产生一定程度的降低。试样在静载过程中产生的微裂纹和碎块的数量随循环冲击次数的增加而增加, 断裂面粗糙度随循环冲击次数的增加而增加。

**关键词:** 岩石力学; 有限差分-离散元耦合; 霍普金森压杆; 循环冲击; 断裂韧度

中图分类号: O346.1

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

## Investigation on the static fracture mechanical characteristics of marble subjected to impact damage based on the FDM-DEM coupled simulation

ZHANG Tao<sup>1</sup>, YU Liyuan<sup>1</sup>, SU Haijian<sup>1</sup>, LUO Ning<sup>1</sup>, WEI Jiangbo<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering,

China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;

2. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** To investigate the mechanical characteristics of static fracture of marble subjected to dynamic damage after cyclic impacts, based on the modeling technology of the finite difference method (FDM) and the discrete element method (DEM) coupling, a three-dimensional numerical model of the split Hopkinson pressure bar (SHPB) was constructed, and the bar system and rock sample were modeled using FLAC<sup>3D</sup> and PFC<sup>3D</sup> programs, respectively. The numerical cyclic impact loading tests were carried out on notched semi-circular bend (NSCB) samples at a constant impact velocity, and then the static three-point bending fracture tests were simulated on these damaged samples. The coordinate data of the particles on fracture surfaces of the sample were extracted by compiling the Fish program, and then the fracture surface was reconstructed and the surface roughness was calculated quantitatively. The rationality and reliability of the numerical analysis were verified by comparison with the results of relevant laboratory tests. The results show that in the cyclic impact loading test, the stress-strain curve rebounds, resulting from the release of part of the stored strain energy during the unloading period. With the increase of the impact number  $n$ , the numbers of cracks and fragments generated increase. The connected force field becomes more and more

\* 收稿日期: 2021-03-16; 修回日期: 2021-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(51579239, 42077240, 12072363)

第一作者: 张涛(1994—), 男, 博士研究生, [TS17030057A3TM@cumt.edu.cn](mailto:TS17030057A3TM@cumt.edu.cn)

通信作者: 蔚立元(1982—), 男, 博士, 教授, [yuliyuan@cumt.edu.cn](mailto:yuliyuan@cumt.edu.cn)

chaotic and the number of broken force chains displays an increasing trend. The breakage of the force chains is the root cause of the deterioration of mechanical properties of the sample. The static fracture toughness of the sample after 5 times of impact is 53.35% lower than that of the natural sample, while the failure displacement increases. In the static loading process, more and more cracks and fragments generate as  $n$  increases. This is proof that the internal structure of the sample has been damaged in the cyclic impacts. The fracture surface roughness increases as the impact number increases. The research conclusions can provide certain guidance for the engineering practice.

**Keywords:** rock mechanics; FDM-DEM coupling; SHPB; cyclic impact; fracture toughness

随着经济建设的飞速发展,地下资源和空间的开发利用规模日益扩大<sup>[1-2]</sup>,大量地下岩体被开挖掘进,而钻爆法是目前最常用的施工方法<sup>[3]</sup>。炸药在爆炸破碎岩体的同时,也会导致地下工程预保留围岩的动态扰动、损伤甚至破裂<sup>[4-5]</sup>。循环爆破后,围岩将受到不同程度的累积动态损伤<sup>[6-7]</sup>,导致其在承受地应力重分布带来的静态荷载时断裂韧度降低、承载能力下降,引发各种工程事故。因此,研究循环冲击损伤后岩石的静态断裂特征具有较强的工程意义。

对脆性岩石在循环冲击作用下的疲劳特性已有大量研究<sup>[8-10]</sup>,但现有成果主要集中在循环冲击下岩石损伤、破裂直至完全破坏的全过程。如 Li 等<sup>[11]</sup>采用分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)对花岗岩进行了循环冲击加载实验,结果表明,当冲击气压在一定范围内时,每次冲击都会对岩石造成动态损伤但不至于完全破坏;林大能等<sup>[12]</sup>研究了循环冲击作用下围压、冲击气压和冲击次数对岩石动态损伤的影响;王彤等<sup>[13]</sup>利用动静组合加载装置进行不同轴压、不同冲击气压下的循环冲击实验。而在受损岩石的静态断裂特性研究方面,损伤诱因也多以环境因素为主,如左建平<sup>[14]</sup>探究了不同温度影响后花岗岩的细观断裂机制;贺晶晶等<sup>[15]</sup>分析了冻融损伤对砂岩断裂性能的劣化影响,并对试样断裂破坏面的形貌特征进行了扫描分析;杨健锋等<sup>[16]</sup>研究了不同程度水损伤作用对泥岩断裂力学特性的影响。

低能量密度的循环冲击能导致岩石的累积动态损伤乃至破裂,但是并不能使其完全破坏,此时岩石仍有一定的承载能力<sup>[17]</sup>,但目前涉及循环冲击损伤后岩石静态承载能力的研究鲜有报道。虽然付安琪等<sup>[18]</sup>利用 SHPB 系统对中心直切槽半圆盘(notched semi-circular bend, NSCB)大理岩试样进行了循环冲击损伤处理,然后对其进行静态断裂实验,分析了动态损伤对大理岩断裂力学性能的劣化影响,但是岩石材料离散性较大,实验结论适用范围有限。此外,由于室内实验条件的局限,该文献中未对动态损伤累积过程及静态断裂力学行为的劣化机制进行深入研究。

随着现代计算技术的不断发展,多种数值分析方法被用来构建 SHPB 模型并进行动态冲击实验,如有限元软件 ABAQUS<sup>[19]</sup>、AUTODYN<sup>[20]</sup>及离散元软件 PFC<sup>[21-22]</sup>等。由于杆件由高强度钢材加工而成,而岩石试样是强度相对较低的脆性介质,在冲击实验过程中,杆件仅发生形变,而岩样则将发生破裂甚至破碎。因此,利用连续介质模型模拟杆件系统、离散介质模拟岩石试样是较为理想的数值建模方法。此外,仅采用三维离散元方法模拟 SHPB 实验时,只能通过提高杆件颗粒接触黏结强度来近似满足“应力均匀性假定”<sup>[23]</sup>,并且杆件模型颗粒间的孔隙率对模拟结果的准确性也有一定影响。而连续-非连续耦合的建模方法则可以有效弥补这些缺陷,并能显著提高计算效率,但目前这种耦合技术很少被应用于 SHPB 实验的模拟。

鉴于此,本文中利用 Itasca 公司开发的 FLAC<sup>3D</sup>(基于有限差分方法 FDM)和 PFC<sup>3D</sup>(基于离散元方法 DEM)系列程序构建三维 SHPB 耦合模型。利用该模型对模拟 NSCB 试样沿厚度方向进行不同次数的循环冲击预损伤实验,随后对受损试样进行静态断裂韧度模拟实验,验证相关室内实验研究的结论,并结合微裂纹场、力链场等机理信息对动态损伤累积过程及断裂力学性能劣化机制进行深入研究。

## 1 模 型

### 1.1 循环冲击实验

三维 FDM-DEM 耦合 SHPB 模拟系统如图 1 所示。其中杆件利用 FLAC<sup>3D</sup> 中的线弹性模型建立,尺

寸及材料参数与室内实验一致<sup>[18]</sup>; NSCB 岩样是基于 PFC<sup>3D</sup> 构建的离散颗粒黏结体, 并选择了能够重现加载过程中的微裂缝萌生、聚结和宏观裂缝形成的平行黏结模型(parallel bonding model, PBM), 其尺寸构型与室内实验一致<sup>[18]</sup>。与大理岩三点弯曲室内实验结果反复对比反馈, 通过“试错法”对模拟试样细观参数进行标定, 最终获得一组能够反映脆性大理岩力学特性的细观参数。

模拟应力波如图 2 所示, 可以看出, 模拟波形的入射波和反射波之和近似等于透射波, 并且在峰值后一定时间内仍保持相等。可见, 本次模拟可实现试样的动态受力平衡。与室内实验一致<sup>[18]</sup>, 所有试样分为 6 组, 利用 SHPB 系统对各组试样沿厚度方向分别进行了 0~5 次冲击速度恒定的等能量冲击, 以获得损伤程度不同的 6 组岩样。

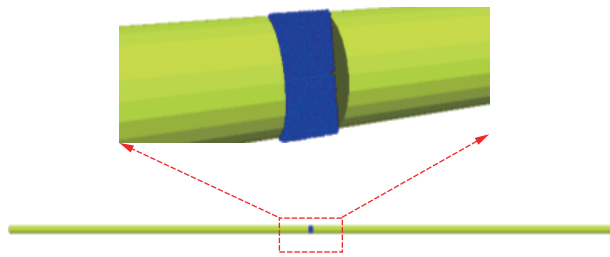


图 1 SHPB 模拟系统

Fig. 1 Simulation of the SHPB system

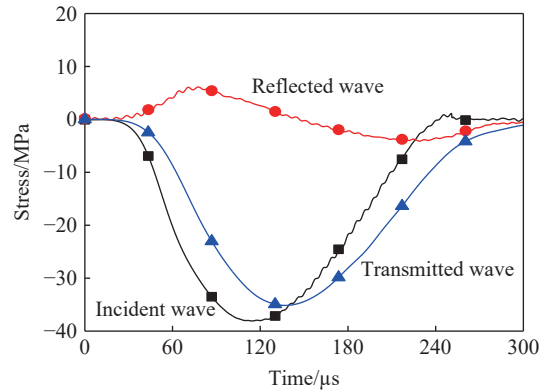


图 2 模拟应力波

Fig. 2 Stress waves obtained from the numerical simulation

### 1.2 静态三点弯曲断裂实验

预损伤实验完成后, 将子弹与杆件移除。在受损试样的底部加设两根支撑钢棒, 并在试样上侧以恒定速率施加荷载<sup>[18]</sup>, 如图 3 所示。图 4 中给出了完整试样静态三点弯曲实验中荷载-位移曲线的室内实验<sup>[18]</sup>与数值模拟结果对比。可见模拟获得的试样峰值荷载及破坏位移均与实验结果一致。

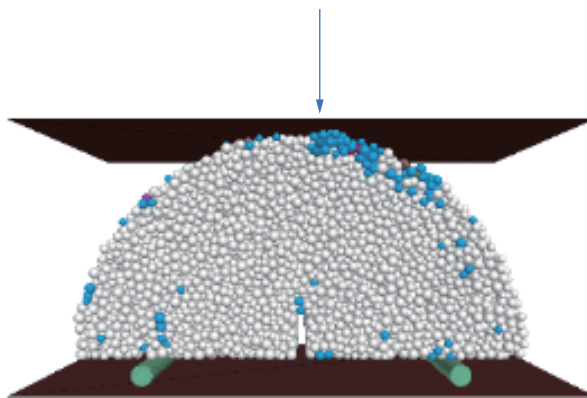


图 3 静态三点弯曲模拟实验

Fig. 3 Simulation of the static three-point bending test

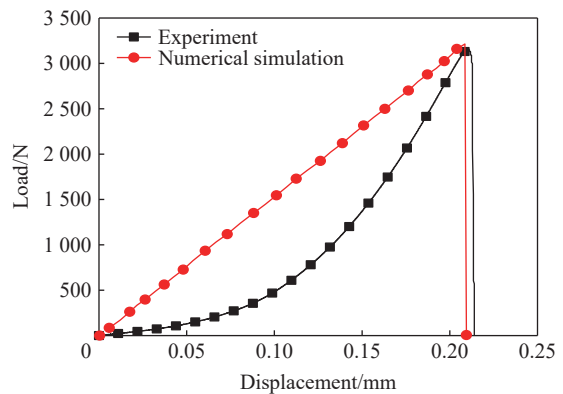


图 4 天然大理岩试样实验与模拟结果比较<sup>[18]</sup>

Fig. 4 Comparison of the experimental and numerical results of the static three-point bending test of a natural marble sample<sup>[18]</sup>

## 2 循环冲击结果分析

### 2.1 应力波信号

图 5 中给出了首次冲击时杆件中的应力波传播过程。当  $t=0 \mu\text{s}$  时, 子弹撞击杆件, 产生的压缩波由入射杆左端进入 SHPB 系统。当  $t=409 \mu\text{s}$  时, 压缩波到达试样的左端, 随即产生拉伸波(即反射波)向入

射杆左端方向传播。剩余应力波到达试样右端时,再次发生反射-透射,透射波作为压缩波向右端传播。需要注意的是,在反射拉伸波之后,有一个压缩波沿着入射杆向左端传播(图 5 中黑色线圈内)。这是因为在相对较低的冲击速度下,试件在加载期间(入射波上升段)未被完全破坏。在卸载期间(入射波下降段),试样中储存的部分应变能将沿着入射杆释放,即发生回弹现象,从而产生压缩波,这与 Li 等<sup>[23]</sup>的结论一致。

图 6 为循环冲击过程中的应力波信号叠加曲线。从图 6 中可以看出,入射波幅值在每个冲击周期中基本重合,说明模拟实现了等幅循环加载。随着循环冲击次数  $n$  的增加,透射波的幅值越来越小,而反射波的幅值则越来越大。主要原因为,在循环冲击作用下,岩石内部损伤累积,岩石孔隙率增加,而波阻抗降低<sup>[24]</sup>。与应力传播过程一致,在卸载段,入射杆上采集到的应力波信号有一段为负值,对应上述回弹现象。

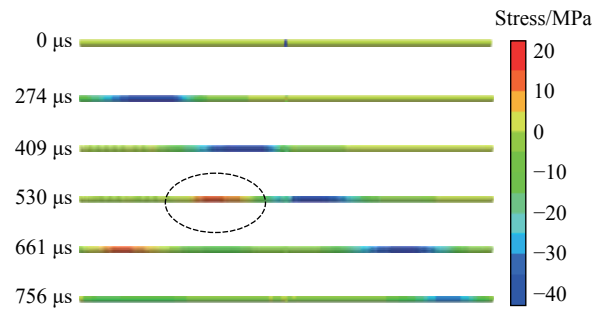


图 5 应力波在杆件中的传播过程  
Fig. 5 Stress wave propagation in the bars

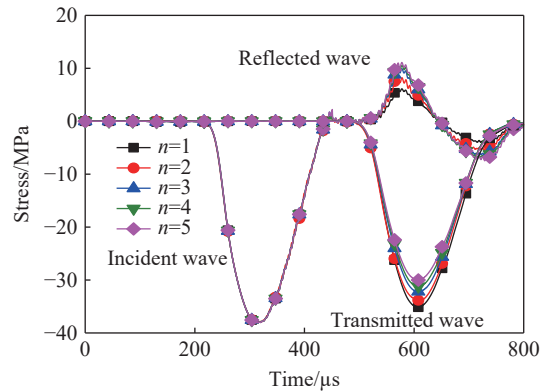


图 6 循环冲击加载过程中应力波信号变化  
Fig. 6 Variation of the stress wave signals during the cyclic impact loading

## 2.2 动态应力-应变曲线

图 7 为模拟试样在循环冲击过程中的动态应力-应变曲线,可划分为 3 个阶段:弹性变形阶段、裂纹扩展阶段和应力卸载阶段<sup>[24]</sup>。在弹性变形阶段,轴向应变几乎随动态应力的增加而线性增加。随着应力的进一步增大,试样进入微裂纹扩展阶段,微裂纹萌生、扩展并相互作用,导致曲线呈现非线性行为。应力卸载过程对应于曲线的峰后段。

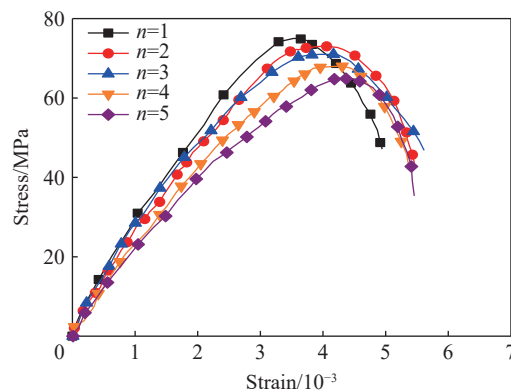


图 7 模拟动态应力-应变曲线  
Fig. 7 Dynamic stress-strain curves obtained from numerical simulations

图 8 为峰值应力的实验值与模拟值变化情况。当冲击次数由 1 增加至 5 时,峰值应力模拟值从 75.1 MPa 降低到 64.9 MPa,降幅 13.5%,远小于实验值的 30.4%,这主要是因为天然试样内部存在大量缺陷,这些缺陷会在动态冲击过程中进一步发育,加剧试样荷载传递能力的劣化。另一方面,随着冲击次数  $n$  的增



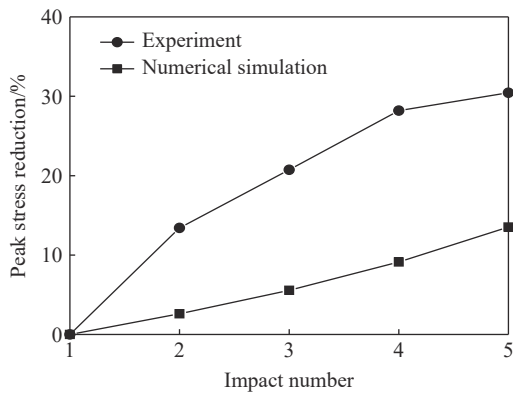


图 8 峰值应力实验值与模拟值比较<sup>[18]</sup>

Fig. 8 Comparison of the dynamic peak stress results obtained from experiments and numerical simulations<sup>[18]</sup>

加, 峰值应变增大, 裂纹扩展, 同时大量新裂纹萌生, 卸载阶段试样恢复的应变能降低。

### 2.3 动态损伤演变

PFC<sup>3D</sup> 程序中, 试样颗粒之间的黏结断裂即视为产生了微裂纹, 微裂纹扩展严重区域常伴随着颗粒脱落, 形成碎块。图 9 中给出了循环冲击过程中模拟试样裂纹场及碎块场的演变过程。从图 9 中可以直观了解到循环冲击过程中试样内部动态损伤演变过程: 随着冲击次数的增加, 试样内部微裂纹及碎块数目均有明显上升。图 9(b) 红色圈为撞击掉落颗粒, 与室内实验结果(图 9(c)) 中观察到的白斑及边缘掉落颗粒一致, 为岩石颗粒在动载作用下相互错动导致<sup>[25]</sup>。

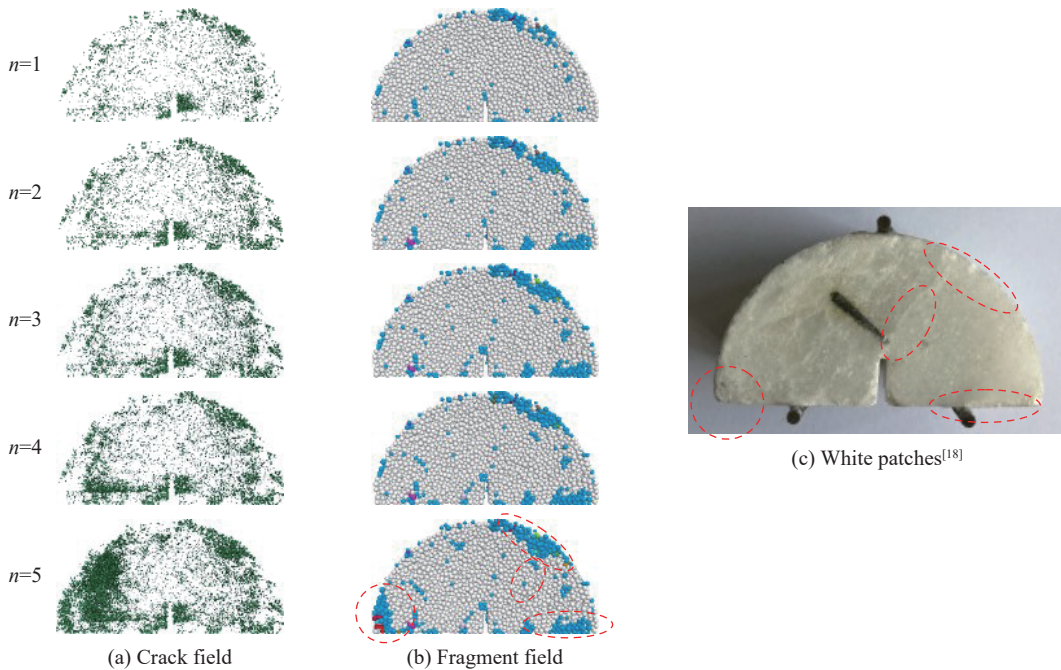


图 9 动态损伤演变过程

Fig. 9 Evolution process of the dynamic damage

为定量分析, 图 10 中给出了微裂纹数量  $N_c$  及碎块数量  $N_f$  随加载次数  $n$  的变化规律。可见试样损伤演变过程可以划分为急剧增长阶段、缓慢发展阶段和急剧增长阶段: 当  $n = 1$  时, 首次冲击造成的损伤较大,  $N_c$  及  $N_f$  分别由 0 增长至 3 558 和 32; 当  $n = 2 \sim 4$  时, 单次冲击造成的损伤较小, 冲击 4 次后,  $N_c$  及  $N_f$  分别为 6 402 和 58; 当  $n = 5$  时, 单次冲击造成的损伤较大,  $N_c$  及  $N_f$  分别增长至 11 331 和 198。

模拟试样颗粒之间具有黏结力, 形成的力链在受到荷载作用时会改变, 甚至断裂。因此, 力链演变能够揭示受损试样的动态损伤累积机理<sup>[26]</sup>。图 11 中给出了每次冲击后试样接触力场(剖面图)的演变过程。

由图 11 可知, 在动态荷载冲击作用下, 试样内部力链分布均匀性变差, 部分力链发生断裂。当  $n = 5$  时, 试样力链出现区域性缺失(黑色虚线圈内)。此外, 试样部分区域出现明显的应力集中(红色虚线圈内)现象, 且均与室内实验中试样白斑及颗粒掉落位置一致。力链的断裂及缺失使试样在受到后续荷载作用时更易被破坏, 这是受损试样力学特征劣化的根本原因。

穿晶裂纹和沿晶裂纹的数量可以在一定程度上反映试样结构的损伤程度。为了验证上述微观结构

变化, 图 12 中给出了受损试样内部结构偏光显微结果。可以看出, 天然状态下矿物颗粒完整, 没有明显微裂纹。然而, 经过动态冲击后, 颗粒之间黏结强度降低。当  $n = 1$  时, 可以观察到明显的裂纹, 说明岩石内部结构已被破坏; 当  $n = 2 \sim 3$  时, 裂纹数目增多, 且周围晶体颗粒的破碎程度明显增加; 当  $n = 4 \sim 5$  时, 裂纹已发生合并, 发展为宏观裂纹, 周围的晶体颗粒几乎完全破碎, 大理岩试样内部结构的动态损伤已经非常严重。

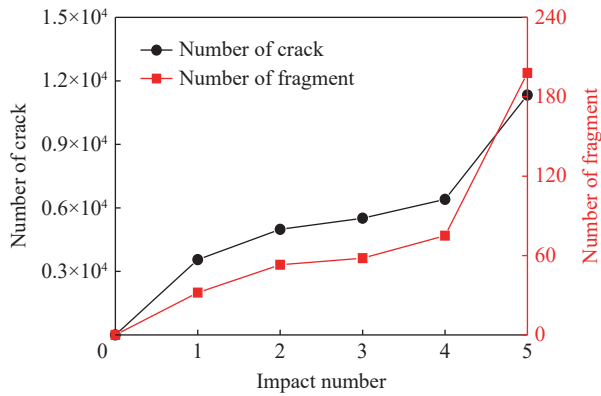


图 10 微裂纹及碎块数量随冲击次数的变化规律  
Fig. 10 Variation of the microcrack number and fragment number with the cyclic impact number

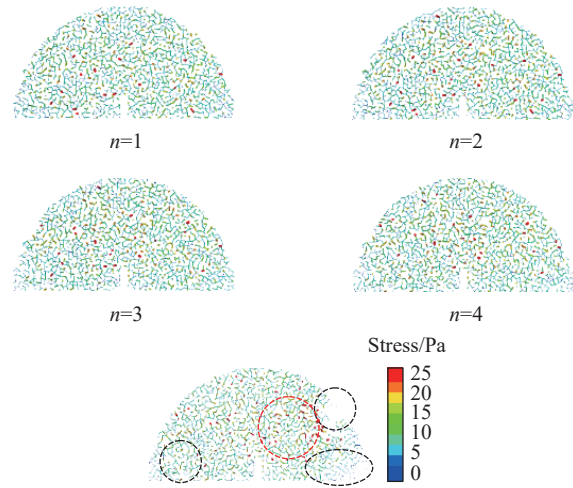


图 11 循环冲击作用下试样接触力场演变过程  
Fig. 11 Evolution of the contact force field of a sample under cyclic impact loading

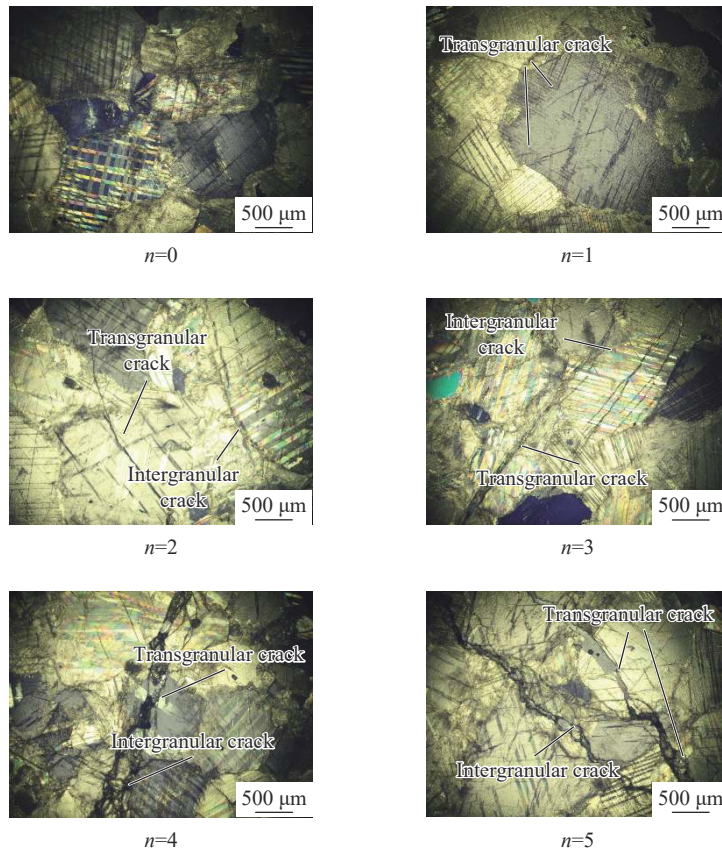


图 12 受损大理岩的微观图像  
Fig. 12 Photomicrographs of the damaged marbles

### 3 三点弯曲结果分析

#### 3.1 荷载-位移曲线

图 13 中给出了受损试样静态荷载-位移曲线的模拟结果及实验结果。模拟曲线包含: (1) 线弹性阶段, 荷载随位移线性增长; (2) 脆性破坏阶段, 试样发生脆性断裂, 荷载瞬间跌落。随着循环冲击次数的增加, 试样内部损伤加剧, 弹性段斜率随着冲击次数的增加而降低。模拟试样曲线整体趋势与室内实验结果一致。

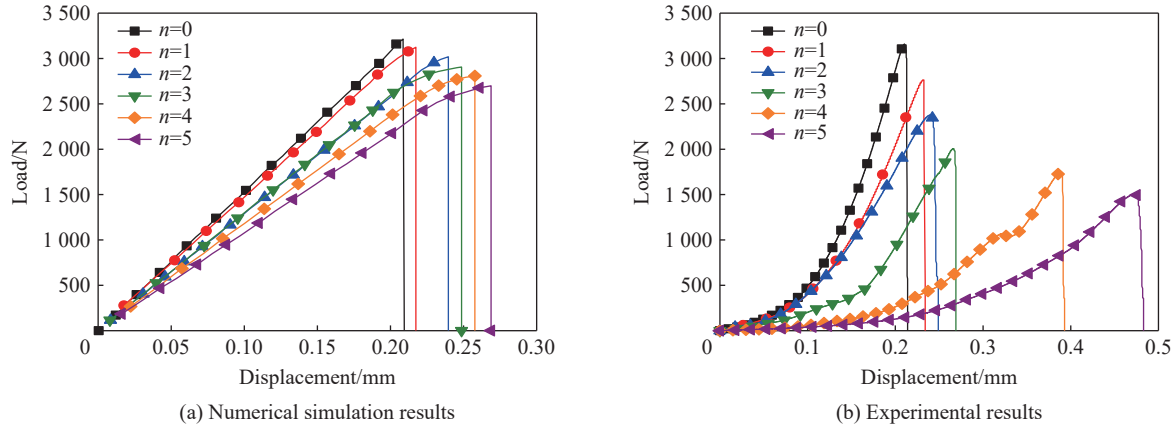


图 13 模拟静态荷载-位移曲线对比<sup>[18]</sup>

Fig. 13 Comparison of the static load-displacement curves obtained from experiments and numerical simulations<sup>[18]</sup>

#### 3.2 宏观力学特性

岩石静态 I 型断裂韧度  $K_{IC}$  的计算方法如下<sup>[27]</sup>:

$$K_{IC} = \frac{p_{max} \sqrt{\pi a}}{2RB} Y \tag{1}$$

式中:  $p_{max}$  为试样破坏时的峰值荷载,  $R$  为试样半径,  $B$  为试样厚度,  $Y$  为无量纲应力强度因子, 与预制裂缝长度  $a$  及试样支撑间距  $S$  有关, 计算公式如下:

$$Y = -1.297 + 9.516(S/2R) - [0.47 + 16.457(S/2R)]\alpha + [1.071 + 34.401(S/2R)]\alpha^2 \tag{2}$$

式中:  $\alpha$  为无量纲预制裂缝长度,  $\alpha = a/R$ ;  $S/2R$  是无量纲支撑间距。本次模拟中  $\alpha = 0.2$ ,  $S/2R = 0.7$ 。受损试样静态断裂韧度及破坏位移随循环冲击次数  $n$  的变化规律如图 14 所示。

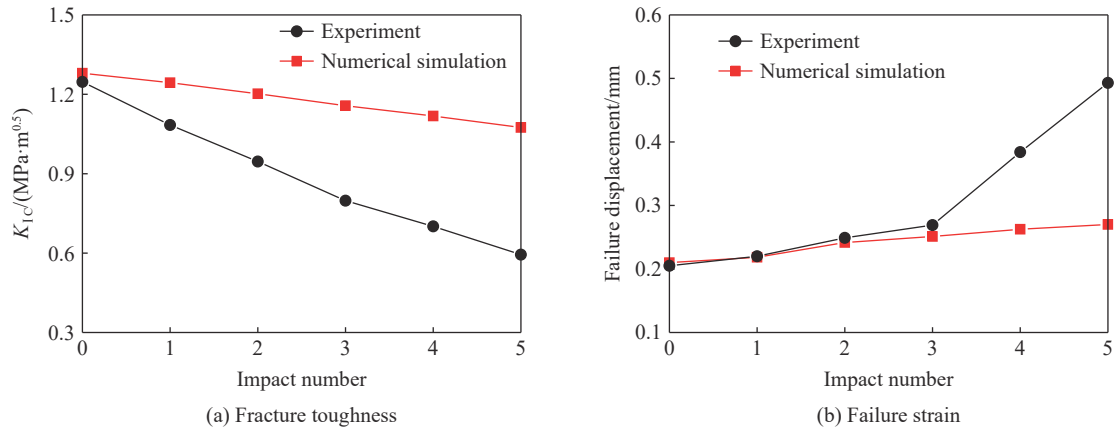


图 14 断裂参数实验值和模拟值比较<sup>[18]</sup>

Fig. 14 Comparison of the fracture parameters obtained from experiments and numerical simulations<sup>[18]</sup>



当循环冲击次数  $n$  从 0 增加至 5 时, 断裂韧度由  $1.28 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$  减小至  $1.07 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ , 破坏位移由  $0.21 \text{ mm}$  增长至  $0.27 \text{ mm}$ 。随着  $n$  的增加, 断裂韧度模拟值及实验值均呈下降趋势。破坏位移模拟值及实验值变化过程基本一致。值得注意的是, 模拟试样参量的变化程度远小于室内实验中的天然试样, 这主要是由于模拟试样内部不存在天然缺陷, 而这些缺陷会在动态冲击中进一步扩展, 汇聚, 进而对后续静力学参数变化产生影响。

### 3.3 试样破坏特征

图 15 中给出了模拟试样断裂破坏后的裂纹场及碎块场演变。从图 5 中可以看到, 受损试样的破坏形式均为典型的三点弯曲断裂破坏: 从预制裂缝的顶端处起裂, 扩展至加载点附近。

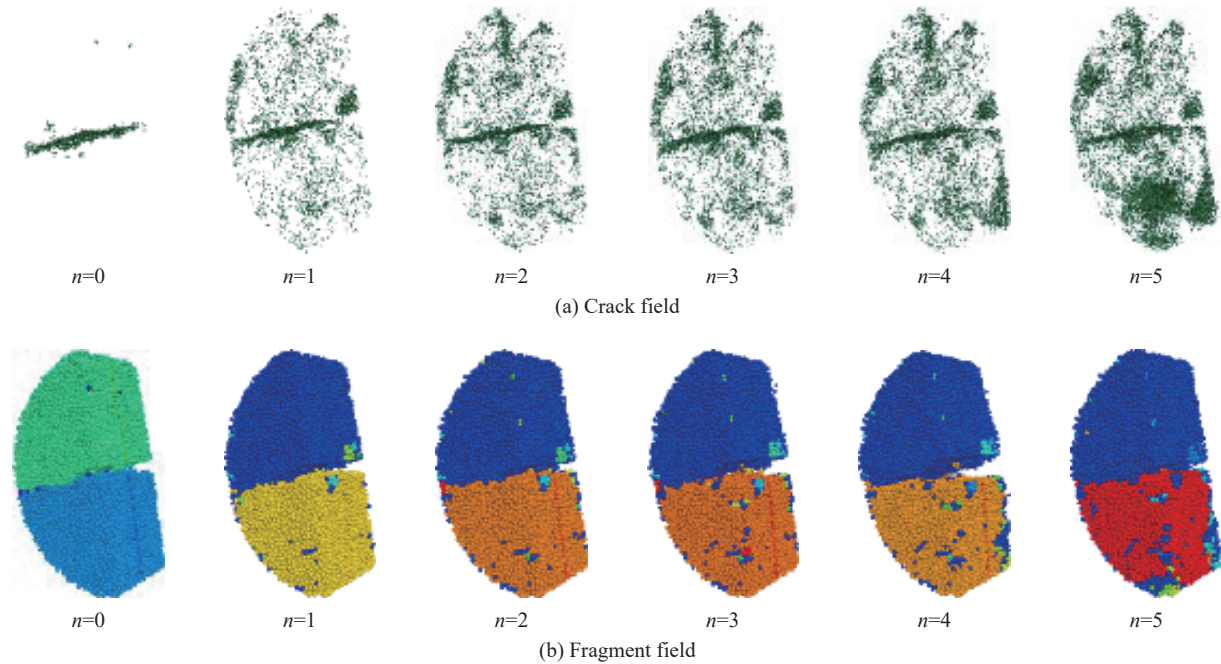


图 15 模拟试样断裂破坏形态  
Fig. 15 Fracture and failure patterns of the simulated sample

图 16 中给出了静态加载过程中新增微裂纹及碎块数量随循环冲击次数  $n$  的变化规律。随着冲击次数的增加, 受损试样力链断裂部分越来越多, 导致静态加载过程中更多的微裂纹萌生并扩展。 $n$  由 0 增加至 5 时, 新增微裂纹及碎块数量分别由 1429、11 增长至 1887、34。当外部荷载作用于试样、内部形成的集中应力大于试样损伤阈值时, 接触断裂, 微裂纹产生。而当外部荷载、参与试样变形的总接触数量一定时, 接触断裂现象越明显, 试样越易发生宏观破裂。结合图 13(a) 所示, 与天然试样相比, 当  $n = 1 \sim 5$  时, 试样刚度下降幅度分别为 27.23%、36.05%、39.38%、55.53%、76.59%。因此, 试样的抗变形能力随着冲击次数的增加而逐渐减小。

利用 surfer 软件对破坏后的试样断裂面进行后处理, 得到断裂面重建图, 如图 17 所示。为定量表征断裂面粗糙度, 采用断裂面轮廓高度均值( $S_a$ )、断裂面轮廓最大最小高度差值( $S_z$ )对断裂面进行精确描述。

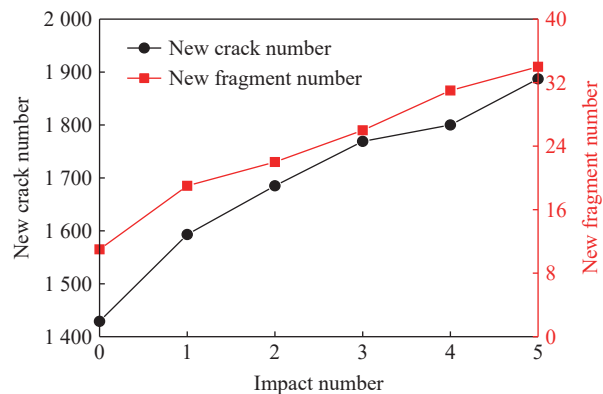


图 16 新增微裂纹及碎块数量随冲击次数的变化情况  
Fig. 16 Variation of the new microcrack and fragment number with the cyclic impact number



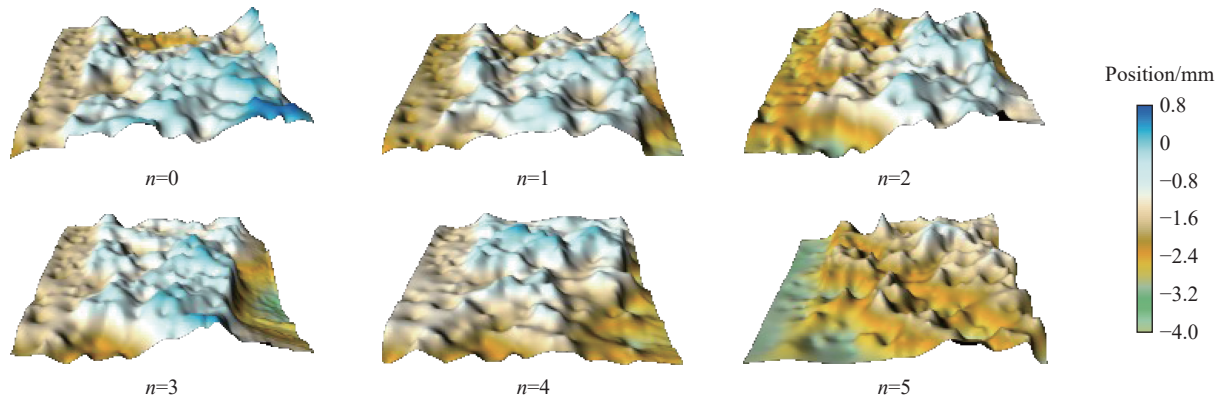


图 17 模拟试样断裂面形貌

Fig. 17 Topography of the fracture surface of the numerical sample

断裂面轮廓高度均值:

$$S_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |z_i| \quad (3)$$

断裂面轮廓最大最小高度差:

$$S_z = z_{\max} - z_{\min} \quad (4)$$

式中:  $N$  为裂隙面测点数;  $z_i$  为裂纹面内  $i$  点处的高度;  $z_{\max}$ 、 $z_{\min}$  分别表示裂纹面内最高点、最低点处的高度。

由图 18 可知, 断裂面粗糙度随冲击次数的增加而增加。与天然状态相比, 循环冲击 5 次受损试样断裂面的  $S_a$ 、 $S_z$  分别增长了 32.06%、27.70%。在动态荷载作用下, 微裂纹在试样内部随机产生, 介质非均匀性、非连续性程度升高, 致使试样破裂面粗糙度上升, 与室内实验结论一致<sup>[18]</sup>。

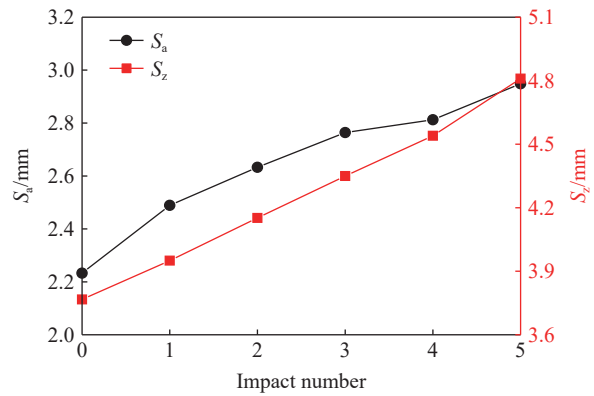


图 18 断裂面粗糙度变化

Fig. 18 Variation of the fracture surface roughness

## 4 结 论

基于有限差分法 FDM 及离散元方法 DEM 耦合思想, 利用 FLAC<sup>3D</sup> 及 PFC<sup>3D</sup> 软件构建了三维 SHPB 模型。利用该模型对 NSCB 试样进行沿厚度方向的等能量循环冲击, 对受损试样进行静态三点弯曲实验, 探究了大理岩试样在循环冲击作用下动态损伤累积机理及受损试样的静态断裂力学特征劣化机制, 主要结论如下。

(1) 压缩作用下的应力波信号与实验结果较吻合, 从而验证了 FEM-DEM 耦合 SHPB 系统用于动力加载的可行性。此外, 微裂纹场、碎块场、接触力链结构、峰值强度、断裂韧度等特征均与实验结果吻合。

(2) 在较低动态荷载作用下, 应力应变曲线会因试样在卸载段释放应变能而产生回弹。随着循环冲击次数的增加, 试样虽未发生整体破碎, 但内部微裂隙、破碎颗粒、断裂力链数量均增加, 其动态峰值应力降低, 动态损伤不断累积。

(3) 受损试样的静态断裂韧度较天然试样明显劣化, 破坏应变则呈上升趋势。随着冲击次数的增加, 试样力链断裂现象更加明显。试样介质非均匀性、非连续性程度在循环冲击过程中不断升高, 致使试样破裂面粗糙度上升、断裂面粗糙度增加。

## 参考文献:

[1] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803–2813. DOI: 10.3321/

- j.issn:1000-6915.2005.16.001.
- HE M C, XIE H P, PENG S P, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2803–2813. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.16.001.
- [2] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(10): 1945–1956. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2012.10.001.
- QIAN Q H. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(10): 1945–1956. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2012.10.001.
- [3] 刘达, 卢文波, 陈明, 等. 隧洞钻爆开挖爆破振动主频衰减公式研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(9): 2015–2026. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0311.
- LIU D, LU W B, CHEN M, et al. Attenuation formula of the dominant frequency of blasting vibration during tunnel excavation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(9): 2015–2026. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0311.
- [4] 单仁亮, 宋立伟, 白瑶, 等. 爆破作用下冻结岩壁损伤评价的模型试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(10): 1945–1952. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.10.001.
- SHAN R L, SONG L W, BAI Y, et al. Model test studies of damage evaluation of frozen rock wall under blasting loads [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(10): 1945–1952. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.10.001.
- [5] 刘亮, 卢文波, 陈明, 等. 钻爆开挖条件下岩体临界破碎状态的损伤阈值统计研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(6): 1133–1140. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0851.
- LIU L, LU W B, CHEN M, et al. Statistic damage threshold of critical broken rock mass under blasting load [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(6): 1133–1140. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0851.
- [6] 闫长斌. 基于声波频谱特征的岩体爆破累积损伤效应分析 [J]. *岩土力学*, 2017, 38(9): 2721–2727, 2745. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.09.033.
- YAN C B. Analysis of cumulative damage effect of rock mass blasting based on acoustic frequency spectrum characters [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(9): 2721–2727, 2745. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.09.033.
- [7] XIONG J J, SHENOI R A. A two-stage theory on fatigue damage and life prediction of composites [J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 64(9): 1331–1343. DOI: 10.1016/j.compscitech.2003.10.006.
- [8] 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.
- [9] 金解放, 李夕兵, 殷志强, 等. 轴压和围压对循环冲击下砂岩能量耗散的影响 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(11): 3096–3102, 3109. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.11.007.
- JIN J F, LI X B, YIN Z Q, et al. Effects of axial compression and confining pressure on energy dissipation of sandstone under cyclic impact loads [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(11): 3096–3102, 3109. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.11.007.
- [10] WANG Z L, TIAN N C, WANG J G, et al. Experimental study on damage mechanical characteristics of heat-treated granite under repeated impact [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(11): 04018274. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002465.
- [11] 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.
- [12] 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. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.22.014.
- LIN D N, CHEN S R. 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. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.22.014.
- [13] 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.
- [14] 左建平, 周宏伟, 范雄, 等. 三点弯曲下热处理北山花岗岩的断裂特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(12): 2422–2430.

- ZUO J P, ZHOU H W, FAN X, et al. Research on fracture behavior of Beishan granite after heat treatment under three-point bending [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(12): 2422–2430.
- [15] 贺晶晶, 师俊平. 冻融循环作用下砂岩三点弯曲断裂性能试验及其破坏形态研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(12): 2917–2925. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0778.
- HE J J, SHI J P. Fracturing behavior and failure pattern of sandstone in three-point bending test under freezing-thawing cycles [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(12): 2917–2925. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0778.
- [16] 杨健锋, 梁卫国, 陈跃都, 等. 不同水损伤程度下泥岩断裂力学特性试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(10): 2431–2440. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0690.
- YANG J F, LIANG W G, CHEN Y D, et al. Experiment research on the fracturing characteristics of mudstone with different degrees of water damage [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(10): 2431–2440. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0690.
- [17] HU L Q, LI X B. Damage and fragmentation of rock under experiencing impact load [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2006, 13(4): 432–437. DOI: 10.1007/s11771-006-0063-z.
- [18] 付安琪, 蔚立元, 苏海健, 等. 循环冲击损伤后大理岩静态断裂力学特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(10): 2021–2030. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0323.
- FU A Q, YU L Y, SU H J, et al. Experimental study on static fracturing mechanical characteristics of marble after cyclic impact loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(10): 2021–2030. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0323.
- [19] 汪小梦, 朱哲明, 施泽彬, 等. 基于 VB-SCSC 岩石试样的动态断裂韧度测试方法研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(2): 302–311. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0351.
- WANG X M, ZHU Z M, SHI Z B, et al. A method measuring dynamic fracture toughness of rock using VB-SCSC specimens [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(2): 302–311. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0351.
- [20] 周磊, 朱哲明, 董玉清, 等. 中低速冲击载荷下巷道内裂纹的动态响应 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(6): 1363–1372. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1403.
- ZHOU L, ZHU Z M, DONG Y Q, et al. Dynamic response of cracks in tunnels under impact loading of medium-low speed [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(6): 1363–1372. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1403.
- [21] DU H B, DAI F, XU Y, et al. Numerical investigation on the dynamic strength and failure behavior of rocks under hydrostatic confinement in SHPB testing [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 108: 43–57. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.05.008.
- [22] XU Y, DAI F, XU N W, et al. Numerical investigation of dynamic rock fracture toughness determination using a semi-circular bend specimen in split Hopkinson pressure bar testing [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(3): 731–745. DOI: 10.1007/s00603-015-0787-x.
- [23] LI X B, ZOU Y, ZHOU Z L. Numerical simulation of the rock SHPB test with a special shape striker based on the discrete element method [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(5): 1693–1709. DOI: 10.1007/s00603-013-0484-6.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 付龙龙, 周顺华, 田志尧, 等. 双轴压缩条件下颗粒材料中力链的演化 [J]. *岩土力学*, 2019, 40(6): 2427–2434. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1212.
- FU L L, ZHOU S H, TIAN Z Y, et al. Force chain evolution in granular materials during biaxial compression [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(6): 2427–2434. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1212.
- [27] KURUPPU M D, OBARA Y, AYATOLLAHI M R, et al. ISRM-Suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(1): 267–274. DOI: 10.1007/s00603-013-0422-7.

(责任编辑 曾月蓉)