

锦屏大理岩动态劈裂拉伸破坏及能量演化特征分析

缪逢晨, 王志亮, 孙 盼, 李松玉, 傅晶晶

Analysis of dynamic splitting tensile failure and energy evolution characteristics of Jinping marble

MIAO Fengchen, WANG Zhiliang, SUN Pan, LI Songyu, and FU Jingjing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211033>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

动态冲击下锦屏大理岩力学响应与能量特性

Mechanical responses and energy characteristics of the Jinping marble under the dynamic impact

李傲, 王志亮, 封陈晨, 巫绪涛, 卢志堂, 李松玉, 贾帅龙 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 112–118

动态载荷下大理岩断口形貌特征试验研究

An experimental study of the fracture morphology of marble under dynamic loading

王伟祥, 王志亮, 贾帅龙, 卢志堂 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 118–124

锦屏大理岩单轴压缩过程中的微结构演化

A study of mineral compositions and micro-structure characteristics for the Jinping marble

封陈晨, 李傲, 王志亮, 王浩然 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 90–96

单轴压缩下红色砦砂岩水泥土的能量演化机制研究

Energy evolution mechanism of red Pisha-sandstone cement soil under uniaxial compression

耿凯强, 李晓丽 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 134–141

含折线型裂隙砂岩试件翼型裂纹起裂与扩展机制研究

Investigation of the wing crack initiation and propagation mechanism of the sandstone specimen containing a folded fissure

张科, 潘哲, 刘享华 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 103–111

基于数字图像相关方法的裂隙砂岩应变场演化规律及前兆识别

Evolution law of strain field and precursor identification of flawed sandstone based on Digital Image Correlation method

张科, 李娜 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 150–156



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211033

缪逢晨, 王志亮, 孙盼, 等. 锦屏大理岩动态劈裂拉伸破坏及能量演化特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(2): 155-162.
MIAO Fengchen, WANG Zhiliang, SUN Pan, et al. Analysis of dynamic splitting tensile failure and energy evolution characteristics of Jinping marble[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(2): 155-162.

锦屏大理岩动态劈裂拉伸破坏及能量演化特征分析

缪逢晨, 王志亮, 孙盼, 李松玉, 傅晶晶

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 劈裂拉伸破坏是隧洞围岩失稳破坏的主要形式之一。现阶段, 在动态劈裂条件下岩石裂纹扩展及对应阶段的能量演化机制鲜有涉及。基于此, 采用分离式霍普金森压杆对锦屏大理岩试样进行了不同弹速下的劈裂试验, 并借助 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件, 模拟试样动态劈裂破坏过程。从试验测试和数值计算角度, 重点分析大理岩劈裂过程中的裂纹扩展机制以及能量演化特征。结果表明: 在应变率为 $5 \sim 35 \text{ s}^{-1}$ 时, 大理岩的动态拉伸强度与应变率呈线性正相关, 同其他地区大理岩相比较, 锦屏大理岩的应变率敏感性相对较低; 随着弹速的增加, 系统内能和动能均增大, 在试样破坏的瞬间系统内能降至最低; 采用标定的 Cowper-Symonds 本构模型参数进行数值模拟, 所得的试样最终破坏形态与试验观察到的现象基本一致。研究结果可为具体工程应用提供指导和参考。

关键词: 大理岩; 应变率; 裂纹扩展; 能量特征; 数值模拟

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)02-0155-08

Analysis of dynamic splitting tensile failure and energy evolution characteristics of Jinping marble

MIAO Fengchen, WANG Zhiliang, SUN Pan, LI Songyu, FU Jingjing

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

Abstract: Splitting tensile failure is one of the main forms of instability failure of tunnel surrounding rock. At present, the mechanisms of rock crack propagation and energy evolution at the corresponding stages under dynamic splitting conditions have been rarely addressed. In this study, the splitting tests were carried out on Jinping marble samples using a split-Hopkinson pressure bar under different striking velocities. The dynamic damage processes of the samples were simulated with the ANSYS/LS-DYNA finite element software. From the perspectives of laboratory tests and numerical calculations, the mechanism of crack propagation and the characteristics of energy evolution during the splitting process of marble were comprehensively analyzed. The results show that the dynamic tensile strength of marble is linearly and positively related to the strain rate in the range of 5 s^{-1} to 35 s^{-1} . The strain rate sensitivity of the Jinping marble is relatively low compared with the marbles of other regions. With the increase of the striking velocity, both the internal energy and kinetic energy of the system increase. At the moment of sample failure, the internal energy of the system drops to a minimum. Based on the calibrated parameters of Cowper-Symonds constitutive model, the final failure modes of the numerically

收稿日期: 2022-11-10; 修订日期: 2023-02-27

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1965101; 12272119)

第一作者: 缪逢晨(1998—), 男, 硕士研究生, 从事岩石动态损伤机理研究。E-mail: miaofengchen@163.com

通讯作者: 王志亮(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩石动力学研究。E-mail: cwewzL@hfut.edu.cn

simulated samples are basically consistent with the observed ones in the experiments. The research results of this study can provide guidance and reference for specific engineering applications.

Keywords: marble; strain rate; crack extension; energy characteristics; numerical simulation

无论是静态还是动态,岩石的抗拉强度远低于岩石的抗压强度,二者之间通常相差了一个数量级^[1],正是因为岩石材料的这种性质,导致其大概率会发生拉伸破坏。由于岩石试件的制作和试样实现单轴拉伸加载比较困难,致使直接测量岩石拉伸强度较为不易。因此,国内外普遍使用巴西圆盘劈裂法^[2]来间接获得岩石抗拉强度。

对于大理岩材料,众多学者采用试验或数值模拟的方法研究了其动态力学行为。在试验方面,如唐礼忠等^[3]、李伟等^[4]通过分离式霍普金森压杆(SHPB)进行了动态劈裂试验,研究结果表明在一定的应变率范围内,拉伸强度对应变率的敏感性要高于压缩强度,且材料的拉伸强度有着明显的应变率效应。王伟祥等^[5]利用扫描电镜对受动载作用的岩样断口形貌进行细观观察,分析了大理岩在动态劈裂下的断口形貌特征。宋小林等^[6]通过记录试样动态劈裂的应变路程,判断大理岩圆盘的起裂位置和时刻,以及裂纹的扩展顺序和速度。Wong 等^[7]在 Carrara 大理石的动态巴西圆盘试验中借助高速摄像机,观察到了在动态加载下,损伤的演化速度和范围普遍随径向压缩应变率的增大而增大。在数值模拟方面,韩东波等^[8]采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元的方法对大理岩动态劈裂拉伸试验过程进行数值模拟,研究了不同形状的冲头对试验结果的影响。Lou 等^[9]基于巴西圆盘劈裂试验,利用 LS-DYNA 软件确定了一套适用于高强脆性大理石的 HJC 模型参数。方新宇等^[10]利用 LS-DYNA 模拟 SHPB 得出系统破碎能与系统耗散能演化关系相似。

综上所述,国内外学者围绕大理岩动态劈裂行为开展了大量研究,但以往工作多是集中在试样的尺

寸、应变率效应以及弹速影响等方面。对动态劈裂条件下岩石的裂纹扩展及各阶段的能量演化机制研究开展较少。本文在动态劈裂试验的基础上,先结合相应数值模拟,标定出锦屏大理岩试样合适的本构模型参数,随后从大理岩动态劈裂裂纹扩展与能量演化等方面进行多角度分析,力求得出有实际参考价值的结论。

1 大理岩动态劈裂试验

1.1 岩样制备

本文的大理岩试样来自锦屏 II 级水电站深埋引水隧洞,所有试样均取自同一块完整的岩石,试样长径比为 0.5,即 $\Phi 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$,试样两端面不平整度误差均小于 0.02 mm。本次试验安排 3 组不同的加载弹速(5.0, 6.7, 9.0 m/s),为提高数据的准确性,每组准备 3~5 个试样,试样的基本物理力学参数见表 1。

表 1 大理岩基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of marble

参数	$\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/GPa	G/GPa	μ	f_c/MPa
取值	2 763	33.32	12.43	0.34	120

注: ρ_0 为密度; E 为弹性模量; G 为剪切模量; μ 为泊松比; f_c 为抗压强度。

1.2 测试方案和原理

图 1 为 SHPB 试验装置,该系统主要由高压气腔、子弹、入射杆、试样、透射杆、缓冲装置以及相配套的计算机数据处理系统组成。其中,入射杆和透射杆以及子弹的材料密度均为 $7\,900 \text{ kg/m}^3$,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3。子弹、入射杆、透射杆和吸收杆的长度分别为 400, 2 400, 1 400, 1 000 mm,此外,在入射杆前

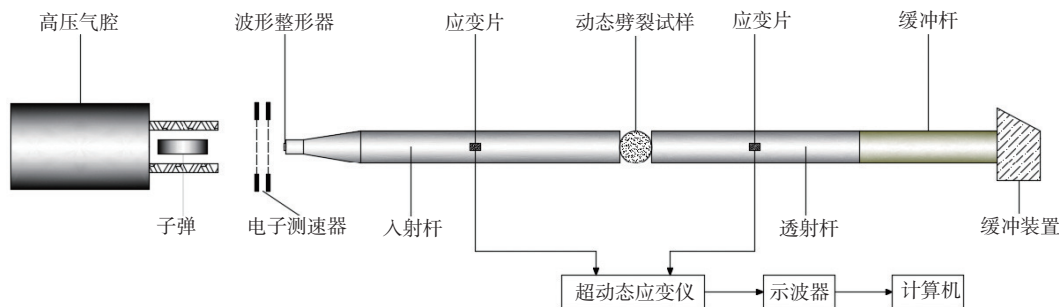


图 1 SHPB 装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SHPB device

端放置一个脉冲整形器, 以保证试验过程中应力均匀与恒应变率加载, 达到提高试验精度的目的^[11]。试样的基本物理参数及弹速见表 2。

表 2 试样几何尺寸和对应的子弹速度
Table 2 Sample geometric dimension and corresponding striking velocity

编号	M/g	l/mm	d/mm	$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
C14	134.5	24.99	49.65	2 779.89	5.11
C15	137.6	25.38	49.72	2 793.13	4.93
C21	138.2	25.40	49.70	2 806.09	5.06
C1	136.8	25.10	49.70	2 810.12	6.87
C2	133.9	25.10	49.68	2 753.49	6.64
C18	138.6	25.54	49.77	2 789.81	6.66
C8	136.1	25.60	49.72	2 738.21	8.77
C9	130.0	25.13	49.66	2 671.19	9.30
C11	138.3	25.40	49.72	2 805.13	8.88

注: M 为质量; l 为高度; d 为直径; ρ_0 为密度; v 为弹速。

当高速子弹撞击入射杆瞬间, 在入射杆前端会生成入射波, 入射波在入射杆方向上进行一维传播, 当入射波传至试样界面时, 一部分透过试样以透射波的形式进入透射杆, 而另外一部分被反射回来, 在入射杆上形成反射波。因此, 基于一维假设和应力均匀性假设, 试样应变(ε_s)、应变率($\dot{\varepsilon}_s$)和应力(σ)之间的关系可以采用“三波法”计算得到^[12]:

$$\varepsilon_s(t) = \frac{C_0}{d} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{C_0}{d} [\dot{\varepsilon}_i(t) - \dot{\varepsilon}_r(t) - \dot{\varepsilon}_t(t)] \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{EA_0}{2A_s} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \quad (3)$$

式中: C_0 ——压杆波速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$;
 E ——压杆的弹性模量/GPa;
 A_0 ——压杆的截面积/ m^2 ;
 A_s ——试样的截面积/ m^2 ;
 $\varepsilon_i(t)$ 、 $\varepsilon_r(t)$ 、 $\varepsilon_t(t)$ ——入射波、反射波与透射波的应变时程。

2 试验结果分析

2.1 应力平衡分析

图 2 是大理岩试样典型(编号 C2)的动态波形平衡图。可以看出入射波与反射波波形升降平缓, 未出现明显振荡。此外, 可见在波峰前, 入射波与反射波之和与透射波几乎相等, 说明试样两端在加载前已经基本达到应力平衡, 满足应力均匀性假设, 即本文试验结果是真实有效的。

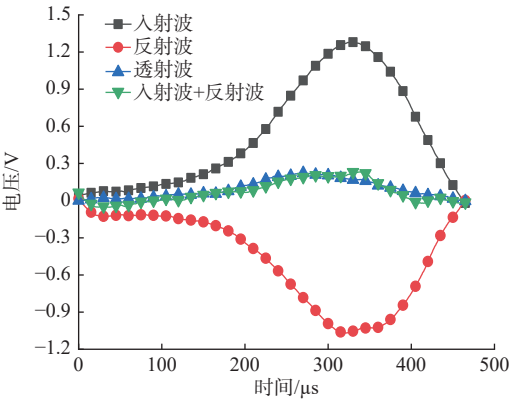


图 2 动态应力均衡图

Fig. 2 Diagram of dynamic stress equilibrium

2.2 动态劈裂强度与应变率

在 SHPB 测试中, 使试样沿直径方向劈裂破坏, 可间接测定岩石抗拉强度(也称劈裂强度)。图 3 显示了锦屏大理岩劈裂强度随着应变率的变化关系, 作为对比, 引用了唐礼忠等^[3]、李伟等^[4]、Padmanabha 等^[13]、Zou 等^[14]的数据。由于试样内部存在微孔洞、裂隙等缺陷^[15-16], 从而导致了拟合曲线出现一定离散, 但在应变率 $5 \sim 35 \text{ s}^{-1}$ 范围内, 两者整体上呈线性正相关。一般而言, 应变率敏感度与岩石内节理发育程度相关——节理越发育, 其应变率敏感性相对较低^[17]。本文取自锦屏深埋引水隧洞大理岩试样的节理发育可能相比于比其他地区的更为成熟, 从而导致其应变率敏感度较低。因此, 在该地区进行爆破等(高应变率条件)施工作业时, 工程岩体更易产生劈裂拉伸破坏, 进而引发工程地质灾害, 应当注意适时支护。

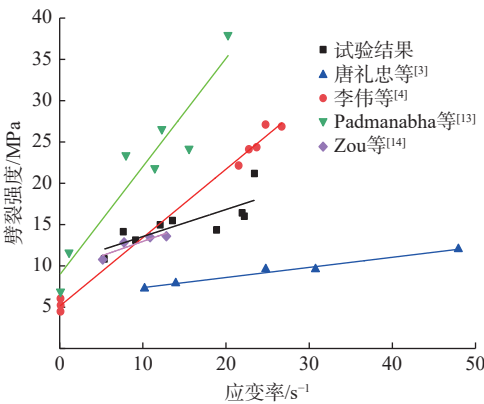


图 3 劈裂强度与应变率关系比较

Fig. 3 Comparison between splitting strength and strain rate

2.3 动态劈裂宏观破坏

图 4 给出了试样代表性破坏形态图。可以看出, 在试验的弹速范围内, 沿着径向有一条贯穿整个试

样的主裂纹。试样两端由于接触面积小、冲击力作用迅速,致使接触端面发生应力集中,导致在主裂纹贯通之前,试样两端的应力就已经超过材料的强度,从而使接触面迅速萌生裂纹并且快速发展,最终呈

现一个类似于三角形粉碎区的破坏形态^[18]。随着弹速的增大,粉碎区面积也随之增加。一般情况下,入射杆端的粉碎区面积略大于透射杆端的粉碎区面积。

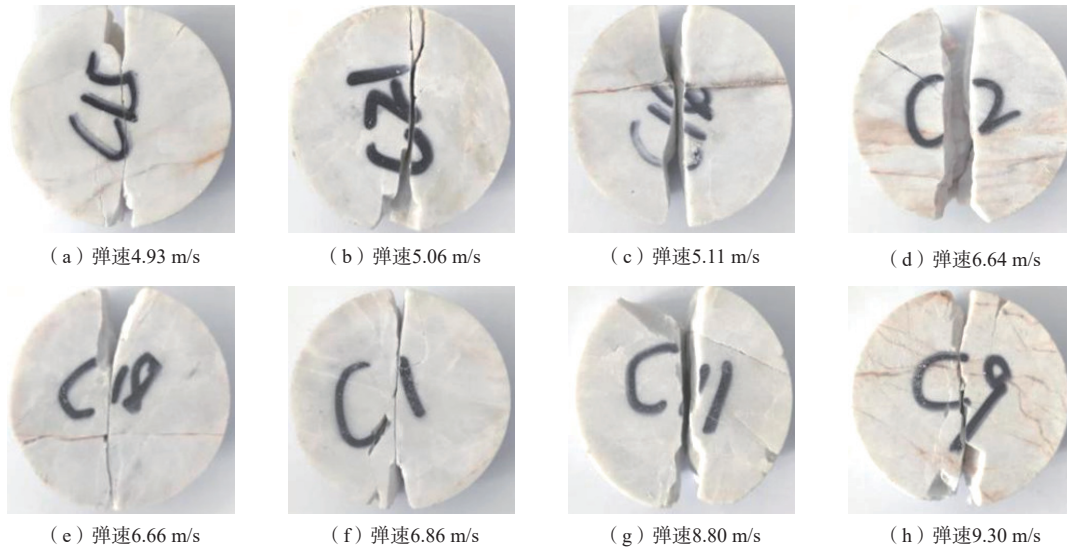


图 4 典型弹速下试样破坏比较
Fig. 4 Comparison of sample failure modes at typical velocities

3 损伤破裂模式数值模拟分析

3.1 模型与本构的确定

为了进一步探究动态劈裂过程中大理岩的裂纹扩展过程,本部分借助 ANSYS/LS-DYNA 数值软件进行分析。如图 5 所示,模型尺寸与实物 1:1 建立,压杆和试样选用 3D-Solid164 单元进行网格划分。入射杆和透射杆轴向方向网格分别划分为 240 段和 140 段,径向方向划分为 48 段,试样轴向和径向方向上分别划分 50 段和 120 段,本次模拟选择映射网格划分。试样与压杆间采用面面侵蚀接触,由于两者刚度差距较大,经过反复试算,最终确定最佳接触刚度比例因子为 0.04 ~ 0.06。

压杆采用线弹性模型,大理岩试样则采用 Cowper-Symonds 本构模型^[19],该模型可以提供材料的塑性变形模量,并考虑动态加载下的应变率效应,可以较好地模拟出混凝土等材料的劈裂过程^[20]。在软件中其关键字为 MAT_PLASTIC_KINEMATIC,本构方程见式(4):

$$\sigma_d = (\sigma_0 + E_p \bar{\epsilon}) [1 + (\dot{\epsilon}/C)^{1/p}] \quad (4)$$

式中: σ_d ——动态屈服应力/MPa;

σ_0 ——静态屈服应力/MPa;

E_p ——塑性硬化模量/GPa;

$\dot{\epsilon}$ ——应变率/ s^{-1} ;

$\bar{\epsilon}$ ——等效塑性应变;

C, p ——应变率常数。

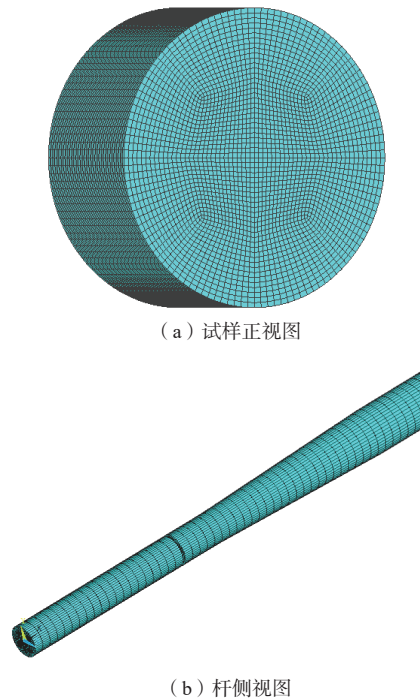


图 5 动态模拟中有限元网格划分
Fig. 5 Finite element meshing for dynamic simulation

本构方程中应变率常数 C 和 p 的取值可以依据文献 [21] 中锦屏大理岩动态压缩试验数据进行拟合所得(图 6), 最终 C 取 162.19, p 取 1.25。

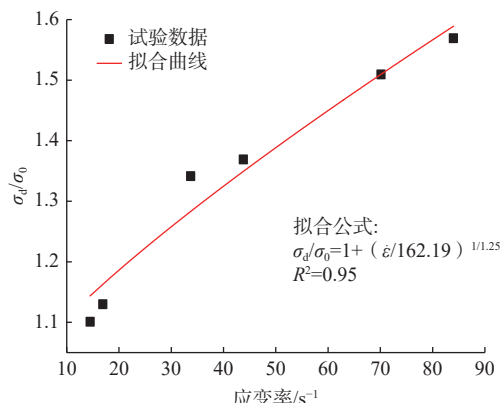


图 6 Cowper-symonds 本构中参数拟合曲线

Fig. 6 Parametric fitting curves of the Cowper-symonds model

考虑到试样的裂纹扩展拉伸破坏效果, 建模中通过关键字 MAT_ADD_EROSION 来定义失效准则。最终得到大理岩 Cowper-Symonds 本构模型参数, 见表 3。

表 3 Cowper-Symonds 本构参数

Table 3 Constitutive parameters of the Cowper-Symonds model

参数	$\rho_0/(kg \cdot m^{-3})$	E/GPa	μ	C	p	β
取值	2 763	33.32	0.34	162.19	1.25	0.1

注: ρ_0 为密度; E 为弹性模量; μ 为泊松比; C 、 p 为应变率常数; β 为硬化参数。

图 7 是模拟的入射波波形与试验中的入射波波形对比。从图中可以看出被赋予一定速度的子弹冲击入射杆产生的波形与试验中入射波波形基本吻合, 能实现与试验相同的冲击荷载, 说明子弹以及杆件建模

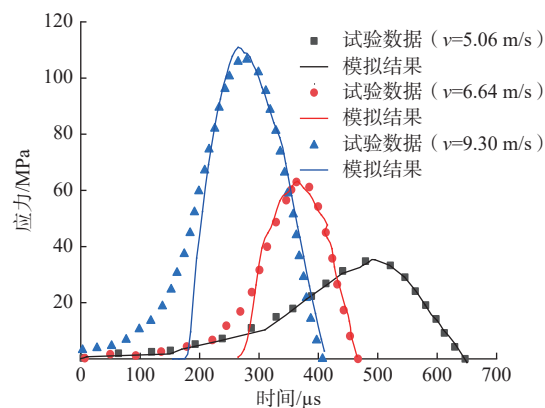


图 7 入射波形对比

Fig. 7 Comparison of incident waveforms

的合理性。

3.2 模拟结果破坏过程分析

图 8 和图 9 分别展示了数值模拟中试样裂纹扩展过程以及不同弹速下的试样最终破坏形态, 本次模拟的 3 种弹速情况下裂纹扩展趋势差异不大, 故取低弹速 ($v=5.0$ m/s) 下的试样裂纹扩展情况进行概括分析。模拟结果显示, 在试样应力未达到平衡之前, 靠近入射端(下端)且偏向中心位置的应力会率先达到材料的抗拉强度, 所以试样会在偏向中心靠近入射端的方向起裂。试样裂纹扩展的顺序为: 偏心起裂→双向扩展→入射端产生裂纹→透射端产生裂纹→完全破坏。整个过程仅仅持续了几十微秒, 试样最终呈现出显著的脆性拉伸破坏。这与文 [6] 中的试验结果以及文 [7] 中的高速摄影结果相吻合, 并且最终破坏形态与图 4 展示的试验结果相似, 进一步验证了本构模型的合理性以及模型参数取值的准确性。

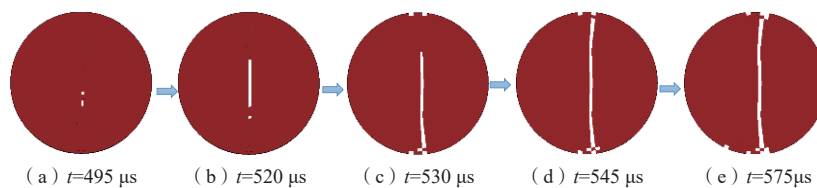


图 8 不同时刻裂纹的扩展过程 ($v=5.0$ m/s)

Fig. 8 Crack development process at different times

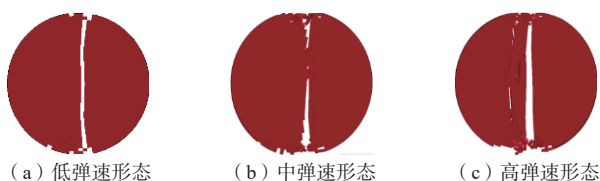


图 9 不同弹度下裂纹扩展最终形态

Fig. 9 Final cracking shapes under different velocities

3.3 模拟结果能量分析

试样破坏过程往往伴随着能量的吸收与释放, 当子弹以不同速度撞击入射杆时, 子弹的动能会以其他能量的形式输入到整个系统中。LS-DYNA 后处理软件 LS-PREPOST 中可以利用软件内部的能量处理手段自动跟踪能量转化过程, 能够更直观地理解整个实

验。本次模拟以入射杆-试样-透射杆为一个系统,所涉及到的能量如下^[22-23]:

①系统外部的总能量 E_t , 其包括系统中所有微元物理能量的积累, 公式如下:

$$E_t = Q + \sum_{N_p} [(mg_i + F_i)\Delta U_i + M_j\Delta_j] \quad (5)$$

式中: Q ——最后一个时间步的外部总能量/J;

N_p ——微元数/个;

m ——微元质量/kg;

g_i ——重力加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$);

F_i ——外部载荷/N;

ΔU_i ——位移增量;

M_j ——外力矩/($\text{N}\cdot\text{m}$);

$\Delta\theta_j$ ——角度增量/($^\circ$)。

②加载期间系统的动能 E_k , 其定义为系统中所有微元平移和旋转所产生的能量, 计算式如下:

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_p} m_i v_i^2 \quad (6)$$

式中: m_i ——单元粒子的广义质量/kg;

v_i ——单元粒子的广义速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

③加载期间系统所储备的内能 E_i , 主要以弹性应变能、塑性应变能的形式存在。

为了减少杆件之间的摩擦, 在试样与杆件接触面处涂抹凡士林, 故系统中因摩擦而消耗的能量可以忽略不计。假设系统内部与外部没有热量的交换, 试样耗散能 E_a 主要用于试样裂纹的扩展, 其计算式为:

$$E_a = E_t - E_i - E_k \quad (7)$$

图 10 是 SHPB 试验过程中的能量变化。在子弹撞击之初, 冲击应力波迅速施加到入射杆端, 系统能量持续增加, 一直增加到 A 时刻, 系统总能量累积至最大, 随后保持不变, 此时系统总能量等于系统内能与系统动能之和。冲击波在 B 时刻抵达试样, 一部分以反射拉伸波的形式返回入射杆, 另一部分则以透射压缩波的形式继续传输, 在 AB 时间间隔内, 系统的内能几乎与动能相等。系统的内能与动能在 B 时刻分离, 此时岩样中微元的应力超过其本身的强度, 内部的微裂纹被激活。接着, 系统储存的内能开始释放, 系统耗散能增加, 裂纹开始扩展。直至 C 时刻, 试样完全破坏, 系统动能和耗散能达到最大, 内能处于最小。随后, 动能减小, 内能增加, 耗散能则保持不变, 整个系统的能量突变时刻对应着图 8 中的裂纹扩展

时刻。可见, 试样的破坏过程伴随着系统能量间的相互转换, 也印证了数值模拟中用能量变化来解释试样的破坏规律是可行的。图 11 是不同弹速下系统内能和动能的关系。弹速的增大导致子弹冲击波的强度随之增加, 系统内能和动能的数值也相应增大。与此同时, 系统内部能量的转化速率加快, 从而加速试样的破坏。

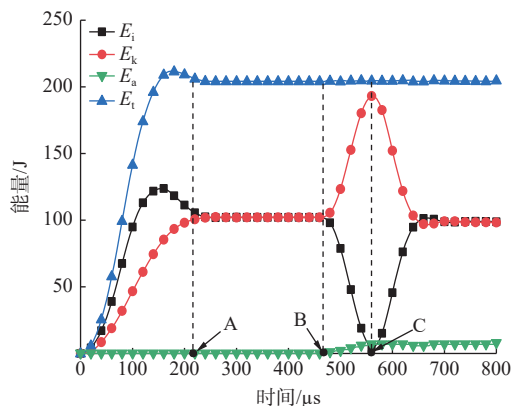


图 10 系统能量时程曲线

Fig. 10 System energy with time

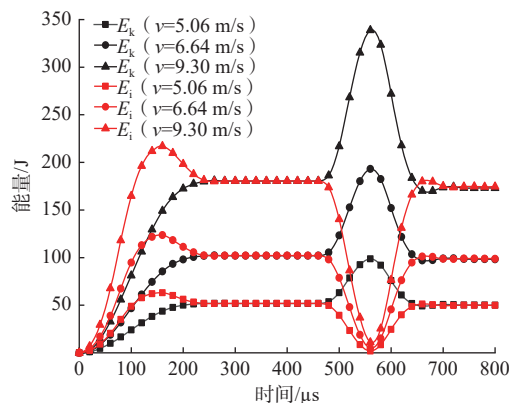


图 11 系统内能与动能时程曲线

Fig. 11 System energy and kinetic energy with time

4 结论

(1) 冲击荷载下大理岩动态劈裂破坏表现为明显的拉伸形式的脆性破坏, 其劈裂强度具有明显的应变率效应。在应变率 $5 \sim 35 \text{ s}^{-1}$ 范围内, 劈裂强度与应变率呈线性正相关。相比较其他地区的大理岩, 锦屏大理岩劈裂强度的应变率敏感性略低。

(2) 考虑应变率效应的 Cowper-Symonds 本构能够较好地表征锦屏大理岩动态劈裂拉伸破坏形态, 其模拟结果与试验观测现象比较吻合, 表明了文中本构参数选用的合理性, 可用来模拟分析锦屏水电站深部

洞室围岩损伤破坏乃至失稳的全过程。

(3) 系统总能量维持稳定后,如出现系统内能急剧下降现象,则表明试样开始发生破坏;当试样完全破坏时,系统内能降至最低。系统能量的变化能较好解释试样从裂纹开始萌生到完全破坏的过程;随着弹速的增加,系统内能和动能随之增大,从而加速试样的破坏。

参考文献 (References):

- [1] 吴顺川,李利平,张晓平.岩石力学[M].北京:高等教育出版社,2021. [WU Shunchuan, LI Liping, ZHANG Xiaoping. Rock Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2021. (in Chinese)]
- [2] 中华人民共和国水利部.水利水电工程岩石试验规程: SL 264—2001[S].北京:中国水利水电出版社,2001. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering: SL 264—2001[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2001. (in Chinese)]
- [3] 唐礼忠,刘涛,汪令辉,等.两种不同大理岩 SHPB 动态劈裂实验[J].武汉理工大学学报,2012,34(7): 72—77. [TANG Lizhong, LIU Tao, WANG Linghui, et al. SHPB dynamic splitting experiment of two different marbles[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(7): 72—77. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 李伟,谢和平,王启智.大理岩动态劈裂拉伸的 SHPB 实验研究[J].爆炸与冲击,2006,26(1): 12—20. [LI Wei, XIE Heping, WANG Qizhi. An experimental study for the dynamic split tension of marble disc using SHPB[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(1): 12—20. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 王伟祥,王志亮,贾帅龙,等.动态载荷下大理岩断口形貌特征试验研究[J].水文地质工程地质,2022,49(3): 118—124. [WANG Weixiang, WANG Zhiliang, JIA Shuailong, et al. An experimental study of the fracture morphology of marble under dynamic loading[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 118—124. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 宋小林,王启智,谢和平.确定动态劈裂裂纹起裂和扩展特性的简便方法[J].四川大学学报(工程科学版),2007,39(1): 63—68. [SONG Xiaolin, WANG Qizhi, XIE Heping. A simple method for determining crack initiation and propagation in the dynamic splitting test[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2007, 39(1): 63—68. (in Chinese with English abstract)]
- [7] WONG L N Y, ZOU Chunjiang, CHENG Yi. Fracturing and failure behavior of Carrara marble in quasistatic and dynamic Brazilian disc tests[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(4): 1117—1133.
- [8] 韩东波,赵光明,孟祥瑞.大理岩动态劈裂拉伸实验的数值模拟及分析[J].矿业研究与开发,2013,33(3): 18—21. [HAN Dongbo, ZHAO Guangming, MENG Xiangrui. Numerical simulation and analysis on dynamic splitting tension test of marble[J]. Mining Research and Development, 2013, 33(3): 18—21. (in Chinese with English abstract)]
- [9] LOU C D, ZHANG R, REN L, et al. Determination and numerical simulation for HJC constitutive model parameters of Jinping marble[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 861(3): 032074.
- [10] 方新宇,许金余,刘石,等.岩石动态劈裂试验中能量变化的有限元分析[J].地下空间与工程学报,2016,12(3): 691—697. [FANG Xinyu, XU Jinyu, LIU Shi, et al. Finite element analysis on energy variation of rock dynamic splitting tests[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(3): 691—697. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 庞书孟.脉冲整形器在 SHPB 试验中的理论与应用研究[D].广州:广州大学,2015. [PANG Shumeng. Research on theory and application of pulse shaper in SHPB experiment[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 石高扬.热处理花岗岩动态劈裂行为实验与数值研究[D].合肥:合肥工业大学,2018. [SHI Gaoyang. Experimental and numerical study on dynamic splitting behavior of heat-treated granite[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [13] PADMANABHA V, SCHÄFER F, RAE A S P, et al. Dynamic split tensile strength of basalt, granite, marble and sandstone: strain rate dependency and fragmentation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(1): 109—128.
- [14] ZOU Chunjiang, CHENG Yi, LI Jianchun. Strain rate and size effects on the brittleness indexes of Carrara marble[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 146: 104860.
- [15] 封陈晨,李傲,王志亮,等.锦屏大理岩单轴压缩过程中的微结构演化[J].水文地质工程地质,2022,49(6):

- 90 – 96. [FENG Chenchen, LI Ao, WANG Zhiliang, et al. A study of mineral compositions and micro-structure characteristics for the Jinping marble[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(6): 90 – 96. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 宋洋, 赵玉兵. 加锚贯通节理岩体宏观剪切破坏特性 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(1): 95 – 101. [SONG Yang, ZHAO Yubing. Macroscopic and microscopic shear failure characteristics of anchored penetrating jointed rock mass[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(1): 95 – 101. (in Chinese with English abstract)]
- [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]. *岩土力学*, 2014, 35(3): 659 – 665. [LIU Hongyan, DENG Zhengding, WANG Xinsheng, 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. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 刘石, 许金余, 白二雷, 等. 高温后大理岩动态劈裂拉伸试验研究 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(12): 3500 – 3504. [LIU Shi, XU Jinyu, BAI Erlei, et al. Experimental study of dynamic tensile behaviors of marble after high temperature[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(12): 3500 – 3504. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 石高扬, 王志亮, 石恒. C75 混凝土动态劈裂行为试验与数值模拟分析 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51(2): 109 – 116. [SHI Gaoyang, WANG Zhiliang, SHI Heng. Experimental and numerical analysis of dynamic splitting behavior of C75 concrete[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(2): 109 – 116. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 王震, 胡可, 赵阳. 考虑 Cowper-Symonds 黏塑性材料本构的向量式有限元三角形薄壳单元研究 [J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(4): 71 – 77. [WANG Zhen, HU Ke, ZHAO Yang. Study on triangular thin-shell element of vector form intrinsic finite element considering Cowper-Symonds viscoplastic constitutive model[J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(4): 71 – 77. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 李傲, 王志亮, 封陈晨, 等. 动态冲击下锦屏大理岩力学响应与能量特性 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(5): 112 – 118. [LI Ao, WANG Zhiliang, FENG Chenchen, et al. Mechanical responses and energy characteristics of the Jinping marble under the dynamic impact[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(5): 112 – 118. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 何亮, 魏玉峰, 潘远阳, 等. 基于能量耗散机制的粗粒土圆度损伤特性分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(5): 120 – 126. [HE Liang, WEI Yufeng, PAN Yuanyang, et al. Analyses of roundness damage characteristics of coarse-grained soil based on energy dissipation mechanism[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(5): 120 – 126. (in Chinese with English abstract)]
- [23] LUO Yi, WANG Gang, LI Xinping, et al. Analysis of energy dissipation and crack evolution law of sandstone under impact load[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 132: 104359.

编辑: 王支农