

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.01.005

## 动载作用板岩断裂韧度与裂纹扩展特征试验研究\*

张建国<sup>1</sup>, 杨文<sup>1</sup>, 汪海波<sup>2</sup>, 拜晓亮<sup>1</sup>, 张翌炜<sup>1</sup>, 樊永强<sup>1</sup>, 邢永杨<sup>2</sup>,  
杨永斌<sup>1</sup>, 杨波<sup>1</sup>, 闫高文<sup>1</sup>, 薛文飞<sup>1</sup>, 段聪<sup>1</sup>, 刘振江<sup>1</sup>

(1. 中交第二公路工程局有限公司, 西安 710000; 2. 安徽理工大学 土木建筑学院, 淮南 232001)

**摘要:** 为探究动载作用下天然板岩的断裂韧度, 论文采用板岩制作直切槽半圆盘弯曲试样(NSCB), 利用直径50 mm分离式霍普金森压杆(SHPB)试验系统进行了动态冲击试验, 同时使用高速摄像机记录了其裂纹扩展过程, 研究了不同冲击气压和预制裂纹长度下板岩的动态断裂韧度及裂纹扩展速度。结果表明: 试件的动态断裂韧度与冲击气压和加载率呈现正相关, 而随着预制裂纹长度的增加动态断裂韧度先增加后减小, 根据拟合结果, 当预制裂纹长度为7.45 mm时试件的动态断裂韧度达到最大值, 0.2、0.3和0.4 MPa三种冲击气压下对应的动态断裂韧度最大值分别为2.99、3.57和4.14 GPa·m<sup>1/2</sup>; 试件的破坏过程可以分为动态损伤、裂纹孕育、裂纹形成、裂纹扩展和试件断裂五个阶段; 试件主裂纹的扩展速度波动较大, 而预制裂纹长度对试件裂纹扩展速度的影响较小。研究揭示了不同工况下板岩试件动态断裂行为的差异, 对该类岩性地下工程支护、爆破参数设计具有一定的参考意义。

**关键词:** 板岩; NSCB; SHPB; 预制裂纹; 动态断裂韧度

**中图分类号:** TU458 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)01-0037-07

## Experimental Study on Fracture Toughness and Crack Propagation Characteristics of Slate under Dynamic Loading

ZHANG Jian-guo<sup>1</sup>, YANG Wen<sup>1</sup>, WANG Hai-bo<sup>2</sup>, BAI Xiao-liang<sup>1</sup>, ZHANG Yi-wei<sup>1</sup>, FAN Yong-qiang<sup>1</sup>,  
XING Yong-yang<sup>2</sup>, YANG Yong-bin<sup>1</sup>, YANG Bo<sup>1</sup>, YAN Gao-wen<sup>1</sup>, XUE Wen-fei<sup>1</sup>, DUAN Cong<sup>1</sup>, LIU Zhen-jiang<sup>1</sup>

(1. China Communications Second Highway Engineering Bureau Limited Company, Xi'an 710000, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** To investigate the fracture toughness of natural slate under dynamic loading, dynamic impact tests were conducted on notched semi-circular bending slate specimens by a 50 mm diameter split Hopkinson pressure bar testing system and the crack growth process was recorded by the high-speed cameras. Furthermore, the dynamic fracture toughness and crack propagation rate of slate under different impact pressure and prefabricated crack lengths were studied. The results show that the dynamic fracture toughness of the specimen is positively correlated with the impact pressure and loading rate, and the dynamic fracture toughness first increases and then decreases with the rise

收稿日期 (Date of reception): 2024-04-15

网络首发日期 (Published online): 2024-05-20

作者简介: 张建国 (1968-), 男, 学士、教授级高级工程师, 主要从事隧道施工管理工作, (E-mail) 2760683453@qq.com。

通讯作者: 汪海波 (1983-), 男, 博士、教授, 主要从事爆破理论与技术、冲击动力学方面的研究, (E-mail) wanghb\_aust@163.com。

基金项目: 安徽省爆破器材与技术工程实验室开放基金 (AHBP2022A-02)

**About the author:** ZHANG Jian-guo (1968-), male, bachelor, professor of engineering, mainly engaged in tunnel construction management work, (E-mail) 2760683453@qq.com.

**Corresponding author:** WANG Hai-bo (1983-), male, Ph. D., professor, doctoral supervisor, mainly engaged in research on blasting theory and technology, as well as impact dynamics, (E-mail) wanghb\_aust@163.com.

**Fund Programs:** Open Foundation of Anhui Engineering Laboratory of Explosive Materials and Technology (AHBP2022A-02)

of the prefabricated crack length. According to the fitting results, the dynamic fracture toughness of the specimen reaches the maximum value when the prefab crack length is 7.45 mm. The maximum values of dynamic fracture toughness at 0.2, 0.3 and 0.4 MPa were 2.99, 3.57 and 4.14  $\text{GPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , respectively. The failure process of the specimen can be divided into five stages: dynamic damage, crack propagation, crack formation, crack propagation, and specimen fracture. The propagation speed of the main crack of the specimen greatly fluctuates, while the prefabricated crack length has little effect on the propagation velocity of the specimen. The study revealed the differences in dynamic fracture behavior of slate specimens under different working conditions.

**Key words:** slate; NSCB; SHPB; prefabricated crack; dynamic fracture toughness

岩石在自然状态下,受到物理、化学、生物等风化作用的影响,使得岩体中产生了很多的节理、层理及微裂隙等<sup>[1]</sup>。含裂隙的岩体在施工过程中易受到机械振动、爆破开挖等动荷载的影响,造成进一步的损伤破裂。因此,研究裂隙岩体在冲击荷载下的动力学特性,可为围岩保护、爆破计划优化和支护参数调整等提供基础。

国内外学者对层状复合岩体、节理充填岩体和单一岩体的破裂进行了大量研究,岩体的节理对岩石中裂纹的扩展和起裂都会产生显著的影响<sup>[2-5]</sup>。李杨等利用三种岩石制作6种不同组合方式的层状复合岩石并制成NSCB试件<sup>[6]</sup>,探究不同复合岩石试件的动能及断裂能关系。赵洪宝等采用SHPB试验系统和数字图像相关系统(DIC)<sup>[7]</sup>,对煤-岩、岩-煤两种组合方式下的复合岩体进行不同应变率下的冲击试验,综合分析两种复合岩体的应力波传播及破坏模式,建立考虑复合煤-岩特性的本构模型。Zou等利用SHPB试验系统<sup>[8]</sup>,对含夹层的大理石试件进行了冲击试验,并研究了夹层倾角对大理石抗压强度的影响。岳中文等利用有机玻璃和环氧树脂两种材料进行动态焦散线三点弯冲击试验<sup>[9]</sup>,研究了层理面与裂纹扩展行为的关系。杨仁树等采用红、灰两种砂岩制成的层状复合岩体试样<sup>[10]</sup>,利用SHPB试验装置进行不同冲击速度下的冲击压缩试验,结合DIC试验系统,从理论角度分析了复合岩体的受力特征和强度条件,并对其破坏特征进行研究。周辉等结合地质赋存条件<sup>[11]</sup>,利用制作的类层状岩石试样进行三轴压缩试验,研究了水平层状复合岩体变形特征受围压的影响程度。Zou等利用SHPB试验系统<sup>[12]</sup>,对含夹层的大理石试件进行了冲击试验,并研究了夹层倾角对大理石抗压强度的影响。Dai等通过数值模拟研究了所有ISRM建议的试样的动态断裂韧性<sup>[13]</sup>。周靖轩基于有限元软件ANSYS LS-DYNA以及SHPB试验系统<sup>[14]</sup>,对复合结构巷道围岩在预应力与爆炸荷载下的力学响应与破坏特征进行了研究。Xu等采用离散法对岩石

的动态断裂行为进行了研究<sup>[15]</sup>。刘钊等采用数字激光焦散线方法开展了一系列双垂直裂隙模型爆破试验<sup>[16]</sup>,展现了爆生裂纹演化过程。

为分析含裂隙板岩在受到动荷载作用下的破裂特性,本文选取某高速公路施工现场典型板岩样品,经过取芯、切割、打磨,制作成3种不同预制裂纹长度的NSCB岩石试件,利用SHPB试验装置进行冲击试验,同时采用高速摄像机对加载过程进行拍摄,得到了板岩在冲击荷载作用下裂纹的萌生、扩展及贯通的渐进破坏过程。分析裂纹扩展过程中的动态断裂韧度与冲击气压、预制裂纹长度和加载率的变化关系,同时研究了试件的裂纹扩展速度、裂纹扩展路径受预制裂纹长度的影响规律。

## 1 试样制作与试验方案

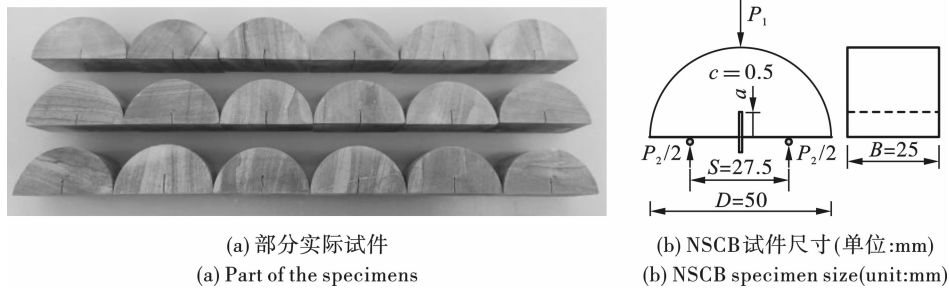
### 1.1 试样制作

根据国际岩石力学学会(ISRM)推荐的方法<sup>[17]</sup>,将现场爆破施工后的典型板岩试样取回,在实验室内进行取芯、切割、打磨制成直径50 mm、高度25 mm的圆盘形试件(即直径:厚度=2:1),然后再使用切割机将圆盘形试件切割成半圆盘试件并使用线锯进行预制裂纹的加工,制成NSCB试件,裂缝的宽度 $c=0.5$  mm,长度 $a$ 分别为5、7和9 mm三种,支座距离 $S=27.5$  mm。部分加工完成后的试件及试件尺寸如图1所示。

### 1.2 试验加载装置

试验加载装置选用直径50 mm的SHPB系统<sup>[18]</sup>,试验装置如图2所示。该系统主要由合金钢制成的冲击子弹、入射杆、透射杆以及阻尼装置和数据采集系统组成,合金钢材料的弹性模量为210 GPa,纵波波速为5190 m/s,入射杆上粘贴型号为BFH120-5AA-D150的电阻应变片,电阻值为 $(120 \pm 0.1) \Omega$ ,灵敏度系数为 $2 \pm 1\%$ ;透射杆选用型号为HU-101B-120的半导体应变片,电阻值为 $(120 \pm 5\%) \Omega$ ,灵敏度系数为 $110 \pm 5\%$ 。通过前期的试冲击,最终选择冲击气压为0.2、0.3和0.4 MPa。在进行试验时,利用高速

摄像机同步拍摄试件的裂纹扩展过程。



(a) 部分实际试件  
(a) Part of the specimens

(b) NSCB 试件尺寸 (单位:mm)  
(b) NSCB specimen size (unit:mm)

图 1 NSCB 试件及尺寸

Fig. 1 NSCB specimens and dimensions

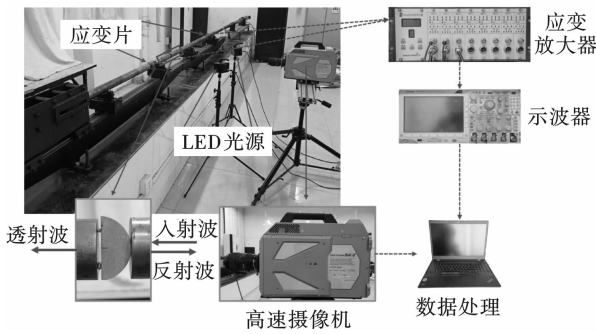


图 2 SHPB 试验装置

Fig. 2 SHPB testing device

## 2 试验结果分析

### 2.1 动态力平衡检验

根据 ISRM 建议的测试方法<sup>[19]</sup>, 夹持试件时在与入射杆和透射杆接触的试件两端涂抹凡士林以减少摩擦对试验结果的影响。试验前在入射杆接触子弹的端面上粘贴波形整形器, 以减少波形振荡和弥散的影响<sup>[20]</sup>。试验过程中, 为保证试验数据的有效性, 需对每一次冲击试验的结果进行动态力平衡的检测, 典型 NSCB 板岩试件冲击试验的动态力平衡检测, 如图 3 所示。

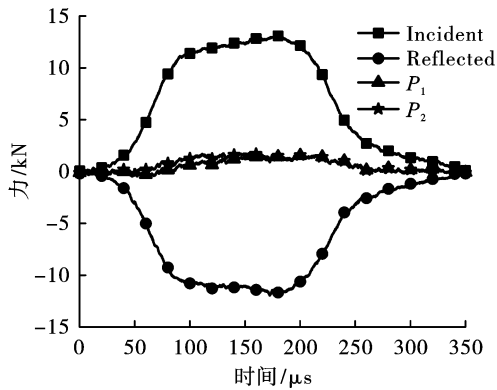


图 3 典型的动态力平衡曲线

Fig. 3 Typical dynamic force balance curve

### 2.2 加载率确定及动态断裂韧度计算

加载率是动力学分析中的重要参数之一, 可以通过试件的应力强度因子 (SIF) 随时间变化的曲线确定。图 4 展示了典型 NSCB 试件的 SIF 随时间变化的曲线<sup>[21]</sup>, 其中曲线呈现出一段近似线性的上升段, 该段的斜率即为加载率 (K)。

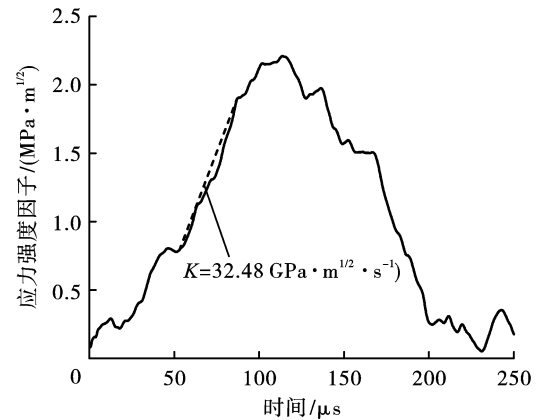


图 4 典型 NSCB 试件的加载率确定方法

Fig. 4 Method for determining the loading rate of typical NSCB specimens

子弹在撞击入射杆之后产生半正弦波, 同时试件两端分别受到的加载力的作用, 试件两端的加载力可通过入射应变  $\varepsilon_i$ 、反射应变  $\varepsilon_r$  和透射应变  $\varepsilon_t$  进行计算; NSCB 试件受到杆件施加平衡力, 使试件中心的预制裂纹产生 I 型破坏, 当冲击荷载达到最大时, 试件中裂纹尖端的应力强度因子即为试件的动态断裂韧度 ( $K_{I_d}$ )。计算公式如下

$$P_1(t) = A_0 E_0 (\varepsilon_i + \varepsilon_r) \quad (1)$$

$$P_2(t) = A_0 E_0 \varepsilon_t \quad (2)$$

$$K_{I_d} = A_0 E_0 S P_{\max} Y(\alpha_a) / (2R^{3/2} B) \quad (3)$$

$$Y(\alpha_a) = -4.9585 + 47.790\alpha_a - 107.69\alpha_a^2 + 101\alpha_a^3 \quad (4)$$

$$P(t) = P_1(t) + P_2(t) \quad (5)$$

式中:  $A_0$ 、 $E_0$  分别为杆件的截面积和弹性模量,  $\text{mm}^2$ ,  $\text{GPa}$ ;  $P_1(t)$ 、 $P_2(t)$  分别为入射杆和透射杆两端的加载力,  $\text{N}$ ;  $Y(\alpha_a)$  为一个关于试件特征几何尺寸的函数, 给定了几何尺寸则为一常量;  $P_{\max}$  为试件所受到的峰值荷载,  $\text{N}$ ;  $R$  为试件的半径,  $\text{mm}$ ;  $\alpha_a$  为无量纲的预制裂纹长度,  $\alpha_a = a/R$ ;  $\alpha_s$  为无量纲的支撑间距,  $\alpha_s = S/2R = 27.5/50 = 0.55$ ;  $S$  为支撑键之间的距离,  $\text{mm}$ ;  $B$  为试件的厚度,  $\text{mm}$ ;  $a$  为试件切缝的宽度,  $\text{mm}$ 。

### 2.3 动态断裂韧性试验结果与分析

通过上述方法, 获得了不同冲击气压和预制裂纹长度时试件的动态断裂韧性及加载率, 结果见表1。研究发现冲击气压和预制裂纹长度对动态断裂韧性随有显著影响, 建立三维曲面拟合模型, 如图5所示。

表1 试件断裂韧性及加载率计算结果

Table 1 Calculation results of fracture toughness and loading rate of specimens

试件编号	冲击气压/ MPa	预制裂纹 长度/mm	加载率/ ( $\text{GPa} \cdot \text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	动态断裂韧性/ ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )
N-1	0.2	5	16.03	0.74
N-2	0.2	7	52.01	3.01
N-3	0.2	9	35.01	2.35
N-4	0.3	5	34.97	1.45
N-5	0.3	7	81.95	3.50
N-6	0.3	9	38.94	2.38
N-7	0.4	5	42.43	2.10
N-8	0.4	7	100.42	3.94
N-9	0.4	9	63.18	3.55

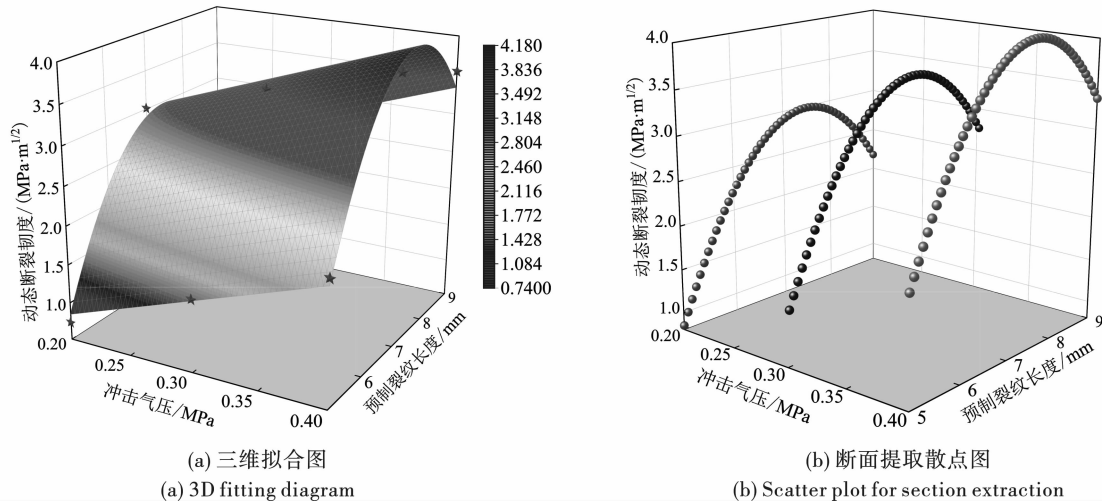


图5 动态断裂韧性随冲击气压与预制裂纹长度的变化关系

Fig. 5 The relationship between dynamic fracture toughness and impact air pressure and prefabricated crack length

结合表1可知, 在试验选取的冲击气压和预制裂纹长度范围内, 相较于冲击气压, 岩石的动态断裂韧性受预制裂纹长度的影响更明显; 从图5(a)三维曲面拟合图中可以看出, 随着预制裂纹长度的增加, 试件的动态断裂韧性呈现先上升后下降的趋势, 试件的动态断裂韧性随冲击气压的增加而增大。通过图5(b)可知, 在不同的冲击气压下, 存在一个理论的预制裂纹长度使得试件的动态断裂韧性达到最大值。根据拟合结果计算可知, 当预制纹长度为7.45 mm时试件的动态断裂韧性达到最大值, 0.2、0.3和0.4 MPa三种冲击气压下对应的动态断裂韧性最大值分别为2.99、3.57和4.14  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。此时, 试件的无量纲预制裂纹长度  $\alpha_a = a/R = 7.45/25 \approx 0.30$ , 试验中不同冲击气压下  $K_{Id}$  测试值最大时试件的无量纲预制裂纹长度  $\alpha_a = a/R = 7/25 \approx 0.28$ , 二者比

较接近。

通过计算可得试验中每次试验的加载率, 在不考虑预制裂纹长度的情况下, 仅考虑加载率对动态断裂韧性的影响, 将试验结果进行线性拟合, 结果如图6可知, 试件的动态断裂韧性随加载率的增加而增大, 且二者呈现线性正相关关系, 岩石表现出明显的增韧效果; 拟合过程中同时绘制出95%置信带, 对于个别数据位于置信带之外, 这是由于板岩内部所存在的天然节理对试验结果造成的影响, 使得试验结果有一定的离散性。

## 3 板岩破裂特征分析

### 3.1 板岩的破坏过程

图7(a)为NSCB试件的典型应力强度因子时程曲线(以冲击气压为0.3 MPa, 预制裂纹长度为

5 mm 试验结果绘制曲线), 并将曲线划分为五个阶段; 为研究在冲击荷载作用下试件中裂纹的演化过程, 图 7(b) 给出了与图 7(a) 对应的 5 个阶段典型的裂纹扩展过程。

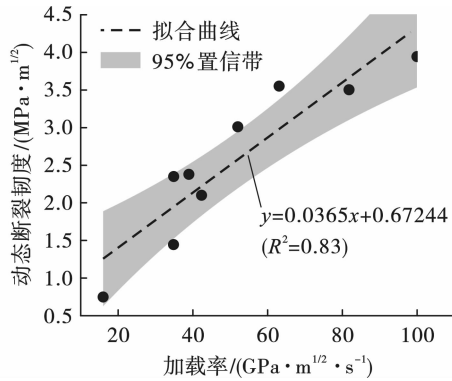
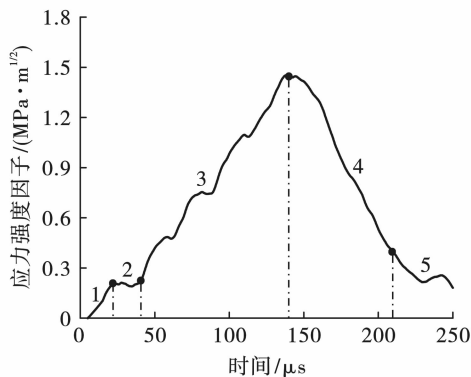
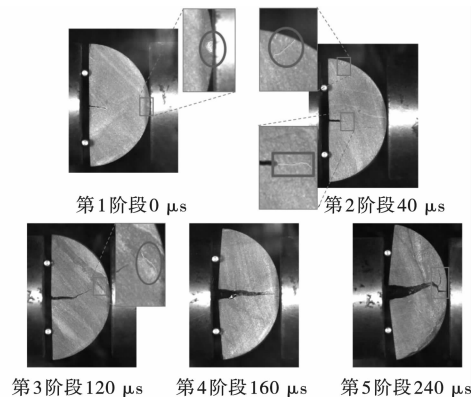


图 6 动态断裂韧度随加载率的变化  
Fig. 6 The variation of dynamic fracture toughness with loading rate



(a) 典型试件应力强度因子阶段划分  
(a) Stage division of stress intensity factor for typical specimens



(b) 不同阶段典型的裂纹扩展  
(b) Typical crack propagation at different stages

图 7 试件破坏过程分析

Fig. 7 Analysis of specimen failure process

(4) 裂纹扩展阶段: 主裂纹持续扩展直至贯穿整个试件, 试件在该阶段依然能承受一些残余应力的作用; 表现为试件完全断裂成两个主要部分。

(5) 试件断裂阶段: 裂纹贯穿整个试件后, 试件达到最终的破坏, 同时由于试件断成两半之后依然没有脱离杆件, 在压缩应力的作用下形成不稳定的临时支撑体系传递荷载, 直至试件的承载能力基本丧失; 表现为试件仍然与杆件接触, 压缩过程没有完全结束, 同时次生裂纹在不断地快速扩展。

图 8 为高速摄像机拍摄的不同试件最终的破裂形态及破坏后的实物。由图 8 可知, 试件的破坏均由预制裂纹开始起裂, 裂纹沿着杆件的轴向方向扩展形成主裂纹, 由于板岩内部天然节理的存在及其

(1) 动态损伤阶段: 试件顶端最先受到较大的压应力, 应力波在试件内部传递, 此时试件没有产生裂纹, 但是在试件的端部形成局部的压缩损伤区和拉伸损伤区; 表现为试件顶端与入射杆接触部分出现了压缩损伤区, 出现岩石表面剥落的现象。

(2) 裂纹孕育阶段: 曲线的斜率变小, 这是由于应力传递到支撑键处, 受试件内部节理和微裂隙的影响, 此时节理裂隙等不断地被压缩, 试件的损伤程度加大, 预制裂纹尖端受到的拉应力也逐渐增大, 导致裂纹首先在预制裂纹的尖端上开始起裂并迅速扩展, 同时在底部支座与节理处均出现拉伸损伤破坏; 表现为裂缝从预制裂纹处开始起裂, 同时受支座的影响, 试件边缘节理处也出现次生裂纹。

(3) 裂纹形成阶段: 试件预制裂纹尖端的应力达到自身强度, 裂纹开始形成, 并随着尖端损伤区域持续扩大, 裂纹持续向前扩展, 同时会伴随有次生裂纹的产生; 表现为裂纹开始快速扩展, 同时主裂纹周围伴随有次生裂纹的产生。

与预制裂纹夹角的影响, 导致主裂纹扩展的方向不尽相同, 部分主裂纹形态近似为直线, 部分主裂纹会在起裂处受到节理的影响导致扩展方向偏转一定角度, 还有部分主裂纹会在裂纹末端出现扩散现象, 产生次生裂纹。结合表 1 动态断裂韧度的结果和图 8 试件最终破坏形态可以分析: 一方面, 当人工预制的裂缝长度  $\leq 7.45$  mm 时, 在预制裂纹尖端达到临界的 SIF 而发生断裂之前, 由于试件内部的节理及微裂纹的发育, 使所测得的  $K_{Ic}$  结果偏低。并且裂缝容易在起裂时就受到节理等弱面的影响使得主裂纹的扩展方向沿加载杆件的轴向方向发生偏转。另一方面, 当预制裂缝长度  $> 7.45$  mm 时, 试件承受的劈裂拉伸作用的有效长度又会偏短, 这样试件发生断裂

所需的荷载就更小,多余的能量没有完全用于试件主裂纹的扩展,反而会在试件的弱面处使次生裂纹

迅速孕育并演化、扩展。

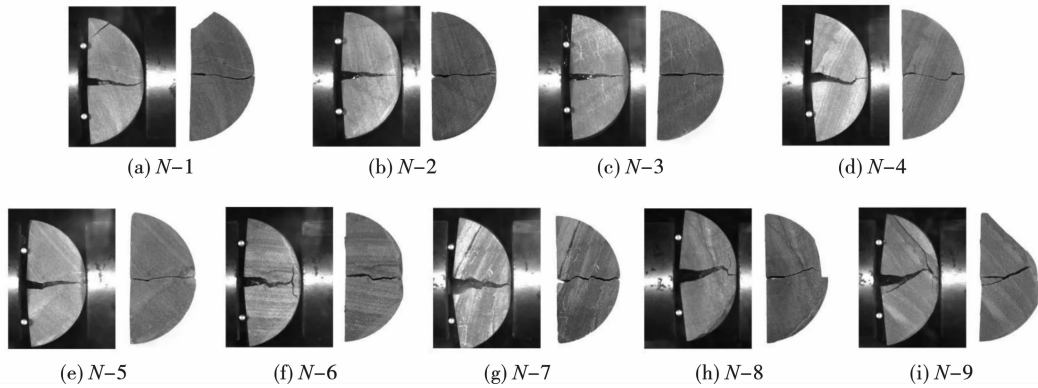


图8 不同试件最终破坏形态

Fig. 8 Final failure mode of the specimens

### 3.2 裂纹扩展速度分析

对于高速摄像机捕获的试件动态裂纹扩展图像进行处理,从而计算出不同 NSCB 试件裂纹的扩展

速度。在图9中展示了不同条件下各个 NSCB 试件裂纹扩展速度的统计结果。

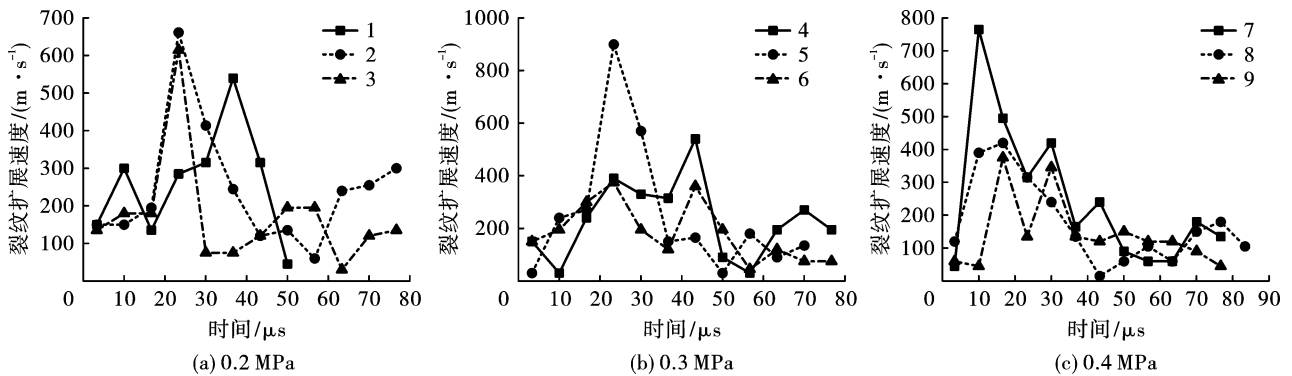


图9 不同冲击气压下不同预制裂纹长度试件的裂纹扩展速度

Fig. 9 The crack propagation speed of specimens with different prefabricated crack lengths under different impact pressures

由图9可以看出,主裂纹的扩展贯穿过程主要集中在 $0 \sim 80 \mu\text{s}$ ,以 $0 \mu\text{s}$ 为裂纹起裂的时刻,试件的裂纹扩展速度分布在 $50 \sim 700 \text{ m/s}$ ,且不同时刻裂纹扩展速度具有较大的波动。一方面由于岩石材料的非均质性,所使用的板岩为工程现场的砂质板岩,裂纹扩展过程中易遇到岩石材料本身粗颗粒的影响,同时裂纹在天然板岩内部扩展还受到节理和细小软弱夹层等的引导作用;另一方面由于应力波的透反射现象会在试件中发射进行,对裂纹的扩展既有促进也有抑制作用。但是可以发现,裂纹在前期的扩展速度明显大于后期的扩展速度,前期裂纹快速扩展阶段速度可达到 $650 \sim 700 \text{ m/s}$ ,后期扩展速度相对较慢,维持在 $300 \text{ m/s}$ 以下。因为后期可能受到试件内应力波的反复作用,以及次生裂纹的快速扩展,导致裂纹扩展末期的速度有所上升。不

同冲击气压以及不同预制裂纹长度下的岩石试件裂纹扩展速度随时间的增加呈现波动性减小的趋势,且冲击气压越大波动性越小;大部分试件的最大裂纹扩展速度在 $10 \sim 25 \mu\text{s}$ 内,对比不同预制裂纹长度下的岩石裂纹扩展速度可知,预制裂纹长度对试件裂纹扩展速度的影响较小。

## 4 结论

(1) 预制裂纹长度与冲击气压相比较,前者对 NSCB 板岩试件的动态断裂韧度影响更大,试件的动态断裂韧度随着冲击气压的增大而增大,随预制裂纹长度的增加呈现先增加后减小的变化规律,且当无量纲的预制裂纹长度接近 $0.30$ 时,动态断裂韧度拟合值达到最大。

(2) 动载作用下试件的破坏过程大致可以分为

五个阶段,受到板岩内部天然弱面的影响,主裂缝扩展的方向易发生偏转,还会伴随有次生裂纹的萌生。

(3)试件主裂纹的扩展速度波动较大,前期裂纹快速扩展阶段速度可达到 650 ~ 700 m/s,后期扩展速度相对较慢,维持在 300 m/s 以下。

### 参考文献 (References)

- [1] 罗丹旎,卢思航,苏国韶,等. 含预制单裂隙花岗岩的真三轴单面凌空岩爆试验研究[J]. 岩土力学,2023,44(1):75-87.
- [1] LUO Dan-ni, LU Si-hang, SU Guo-shao, et al. Experimental study on rock burst of granite with prefabricated single crack under true-triaxial stress condition with a free face [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(1):75-87. (in Chinese)
- [2] 刘小庆,宋佳辉,张瑶瑶,等. 冲击荷载下夹层复合岩石能量演化及断裂特征研究[J/OL]. 爆破:1-12. [2024-05-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20231227.1627.012.html>.
- [2] LIU Xiao-qing, SONG Jia-hui, ZHANG Yao-yao, et al. Study on energy evolution and fracture characteristics of sandwich composite rock under impact load[J/OL]. Blasting:1-12. [2024-05-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20231227.1627.012.html>. (in Chinese)
- [3] 宋彦琦,李向上,刘济琛,等. 节理充填物厚度对运动裂纹扩展的影响[J]. 爆炸与冲击,2020,40(8):67-75.
- [3] SONG Yan-qi, LI Xiang-shang, LIU Ji-chen, et al. Effects of joint filling thickness on crack propagation behaviors [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(8):67-75. (in Chinese)
- [4] ANDREA M, JORDI D, RICARDO J. Size effect and other effects on mode I fracture toughness using two testing methods[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 143:104785.
- [5] ZHU Quan-qi, MA Chun-de, LI Xi-bing, et al. Effect of filling on failure characteristics of diorite with double rectangular holes under coupled static-dynamic loads [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(6):1-21.
- [6] 李杨,王雁冰,付代睿,等. 动载下层状复合岩石能量耗散及断裂特征研究[J]. 工程科学学报,2023,45(11):1833-1846.
- [6] LI Yang, WANG Yan-bing, FU Dai-rui, et al. Energy dissipation and fracture characteristics of composite layered rock under dynamic load [J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(11):1833-1846. (in Chinese)
- [7] 赵洪宝,吉东亮,刘绍强,等. 冲击荷载下复合岩体动力响应力学特性及本构模型研[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(1):88-99.
- [7] ZHAO Hong-bao, JI Dong-liang, LIU Shao-qiang, et al. Study on dynamic response and constitutive model of composite rock under impact loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(1):88-99. (in Chinese)
- [8] ZOU Chun-jiang, LOUIS Ngai Yuen Wong. Experimental studies on cracking processes and failure in marble under dynamic loading [J]. Engineering Geology, 2014, 173:19-31.
- [9] 岳中文,宋耀,陈彪,等. 冲击荷载下层状岩体动态断裂行为的模拟试验研究[J]. 振动与冲击,2017,36(12):223-229.
- [9] YUE Zhong-wen, SONG Yao, CHEN Biao, et al. A study on the behaviors of dynamic fracture in layered rocks under impact loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(12):223-229. (in Chinese)
- [10] 杨仁树,李炜煜,方士正,等. 层状复合岩体冲击动力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(9):1747-1757.
- [10] YANG Ren-shu, LI Wei-yu, FANG Shi-zheng, et al. Experimental study on impact dynamic characteristics of layered composite rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(9):1747-1757. (in Chinese)
- [11] 周辉,宋明,张传庆,等. 水平层状复合岩体变形破坏特征的围压效应研究[J]. 岩土力学,2019,40(2):465-473.
- [11] ZHOU Hui, SONG Ming, ZHANG Chuan-qing, et al. Effect of confining pressure on mechanical properties of horizontal layered composite rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2):465-473. (in Chinese)
- [12] ZOU Chun-jiang, WONG Yuen Ngai Louis. Experimental studies on cracking processes and failure in marble under dynamic loading [J]. Engineering Geology, 2014, 173:19-31.
- [13] DAI F, WEI M, XU N, et al. Numerical investigation of the progressive fracture mechanisms of four ISRM-suggested specimens for determining the mode I fracture toughness of rocks [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 69:424-441.

- [13] YANG Yan-guo, FAN Nan. Experimental study on surrounding rock loosening circle by single-hole acoustic wave testing method [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 93-100. (in Chinese)
- [14] 曹晓立, 高文学, 吕洪涛, 等. 爆破振动信号的 Hilbert-Huang 变换分析与应用研究 [J]. 兵工学报, 2016, 37(S2): 107-113.
- [14] CAO Xiao-li, GAO Wen-xue, LV Hong-tao, et al. Hilbert Huang transform analysis and application research of blasting vibration signals [J]. Journal of Ordnance Industry, 2016, 37(S2): 107-113. (in Chinese)
- [15] 赵明生, 梁开水, 罗元方, 等. EEMD 在爆破振动信号去噪中的应用 [J]. 爆破, 2011, 28(2): 17-20, 59.
- [15] ZHAO Ming-sheng, LIANG Kai-Shui, LUO Yuan-Fang, et al. Application of EEMD in blasting vibration signal de-noising [J]. Blasting, 2011, 28(2): 17-20, 59. (in Chinese)
- [16] 关晓磊, 颜景龙. 爆破振动信号的 HHT 时频能量谱分析 [J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(5): 535-541.
- [16] GUAN Xiao-lei, YAN Jing-long. The HHT time-frequency power spectrum analysis of the blasting vibration signal [J]. Explosion And Shock Waves, 2012, 32(5): 535-541. (in Chinese)
- [17] 单仁亮, 黄博, 耿慧辉, 等. 爆破动载作用下新喷射混凝土累积损伤效应的模型实验 [J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(3): 289-296.
- [17] SHAN Ren-liang, HUANG Bo, GENG Hui-hui, et al. Model experiment to study cumulative damage effects of young shotcrete under blasting load [J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(3): 289-296. (in Chinese)
- [18] 邓军, 王津睿, 任帅京, 等. 声波探测技术在矿井领域中的应用及展望 [J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(6): 149-162.
- [18] DENG Jun, WANG Jin-rui, REN Shuai-jing, et al. Application and prospect of acoustic detection in the mining sector [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(6): 149-162. (in Chinese)

(上接第43页)

- [14] 周靖轩. 预应力与动态冲击下巷道复合围岩与结构力学响应及损伤特征研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [14] ZHOU Jing-xuan. Mechanical response and damage of roadway composite surrounding rock and structure under coupling of high prestress and dynamic impact [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021. (in Chinese)
- [15] XU Y, DAI F, XU W N, 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.
- [16] 刘钊, 张树辉, 臧小静. 含双垂直缺陷岩体爆生裂纹扩展行为试验研究 [J]. 爆破, 2024, 41(1): 21-26, 66.
- [16] LIU Zhao, ZHANG Shu-hui, ZANG Xiao-jing. Experimental study on propagation behavior of blast-induced crack in rock mass with double vertical defects [J]. Blasting, 2024, 41(1): 21-26, 66. (in Chinese)
- [17] ZHOU Zi-long, LI Di-yuan, MA Guo-wei, et al. Failure of rock under dynamic compressive loading [J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(3): 339-343.
- [18] 王浩, 宗琦, 汪海波, 等. 冲击荷载下饱水凝灰岩断裂韧性及裂纹扩展分形特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(7): 1709-1719.
- [18] WANG Ha, ZONG Qi, WANG Hai-bo, et al. Fractal characteristics of fracture toughness and crack propagation of saturated tuff under impact loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(7): 1709-1719. (in Chinese)
- [19] CHEN R, XIA K, DAI F, et al. Determination of dynamic fracture parameters using a semi-circular bend technique in split Hopkinson pressure bar testing [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(9): 1268-1276.
- [20] FREW D J, FORRESTAL M J, CHEN W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar [J]. Experimental Mechanics, 2002, 42: 93-106.
- [21] 方士正, 杨仁树, 李炜煜, 等. 基于 NSCB 方法的冻结红砂岩动态断裂特性试验 [J]. 工程科学学报, 2023, 45(10): 1704-1715.
- [21] FANG Shi-zheng, YANG Ren-shu, LI Wei-yu, et al. Investigation of dynamic fracture characteristics of frozen red sandstone using notched semi-circular bend method [J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(10): 1704-1715. (in Chinese)