

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0061

# 应变率对含裂隙红砂岩裂纹扩展模式 及破碎特征的影响\*

闻 磊<sup>1</sup>, 冯文杰<sup>1</sup>, 李明焯<sup>2</sup>, 寇子龙<sup>1,3</sup>, 王 亮<sup>1</sup>, 于俊红<sup>1</sup>

(1. 石家庄铁道大学工程力学系, 河北 石家庄 050043;

2. 河北工程技术学院, 河北 石家庄 050091;

3. 中铁大桥科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430034)

**摘要:** 以含不同倾角预制裂纹的长方形板状红砂岩为研究对象, 采用分离式霍普金森压杆沿试样宽度方向施加冲击荷载, 使用高速摄像机记录裂纹扩展过程, 获得试样的裂纹路径特征以及动态压缩强度和动态弹性模量, 利用筛分统计法分析试样碎块分布特征, 结合分形理论定量描述试样破碎程度及特点, 探讨中应变率条件下含裂隙试样裂纹扩展模式与动态力学性质和破碎程度的相互关系。研究表明, 应变率较高时试样会更多地出现远场裂纹和离层裂纹, 并且相比相关低应变率实验结果, 中应变率范围内试样破坏模式及裂纹分布情况随应变率的变化规律是不同的。随着应变率的提高, 试样大体上从 1 条拉伸裂纹的临界破坏演变成 X 形剪切裂纹为主的复杂裂隙网络, 并且不同角度预制裂隙对于这种裂纹扩展模式的演变有重要影响。在预制裂纹倾角一定的情况下, 岩样动态压缩强度和动态弹性模量表现出明显的应变率效应, 不同角度预制裂纹对于试样的应变率敏感性有显著影响。随裂纹倾角的增大, 试样的动态强度、动态弹性模量和分形维数表现出的变化趋势具有一定的相似性, 大体呈现先减小后增大的趋势, 裂纹倾角为 45° 的试样的动态压缩强度、动态弹性模量和分形维数均为最小。随应变率的升高, 不同预制裂纹倾角的试样碎块分布更加分散, 应变率越高, 预制裂纹倾角对于岩石冲击破碎程度、分形维数的影响越显著。

**关键词:** 应变率; 裂纹扩展; 红砂岩; 分离式霍普金森压杆; 裂纹倾角; 破碎

中图分类号: O383 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

## Strain rate effect on crack propagation and fragmentation characteristics of red sandstone containing pre-cracks

WEN Lei<sup>1</sup>, FENG Wenjie<sup>1</sup>, LI Mingyue<sup>2</sup>, KOU Zilong<sup>1,3</sup>, WANG Liang<sup>1</sup>, YU Junhong<sup>1</sup>

(1. Department of Engineering Mechanics, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, Hebei, China;

2. Hebei Polytechnic Institute, Shijiazhuang 050091, Hebei, China;

3. China Railway Bridge Science Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430034, Hubei, China)

**Abstract:** In this experiment, finite size red sandstone containing pre-existing single crack was taken as the research object. The ratio of length to width of the samples was set about 0.65. The inclination angle of the pre-crack includes 0°, 30°, 45°, 60° and 90°. A split Hopkinson pressure bar was used for impact test, and a high-speed camera was used to record the crack propagation. The dynamic loads were applied along the width of the samples. Velocities of striker in impact tests were set as 6, 8 and 10 m/s by adjusting the pressure of the air gun. Acquisition frequency of the high-speed camera was set as 75000 s<sup>-1</sup>. The characteristics of crack propagation, dynamic compressive strength and dynamic elastic modulus of the samples were obtained. The fractal theory was used to describe the fragmentation characteristics of the samples. The relationship between dynamic mechanical properties, fragmentation characteristics and crack propagation under medium strain rate was

\* 收稿日期: 2023-02-27; 修回日期: 2023-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(11872257); 河北省自然科学基金(A2020210008)

第一作者: 闻 磊(1983—), 男, 博士, 副教授, [w10921@126.com](mailto:w10921@126.com)

discussed. The findings show that when the strain rate is high, more far-field cracks and separation cracks appear in the sample. In the range of medium strain rate, the failure mode and the number of cracks change differently with strain rate compared with the experimental results of low strain rate. The strain rate and the angle of pre-existing crack have a great influence on the crack propagation and failure mode of the samples. The crack propagation of the samples with different pre-existing crack is different. With the increase of strain rate, the failure mode of the sample becomes more complex, gradually evolving from critical failure with a tensile crack to complex failure mainly with X-shaped shear crack. When the angle of the pre-existing crack is fixed, the dynamic compressive strength and dynamic elastic modulus of the samples show obvious strain rate effect, and the pre-existing crack with different angles have significant influence on the strain rate sensitivity of the samples. With the increase of pre-existing crack angle, the variation of dynamic compressive strength, dynamic elastic modulus and fractal dimension of the samples show a certain similarity. In all types of samples, the dynamic compressive strength, dynamic elastic modulus and fractal dimension of the sample containing cracks with the inclination angle at  $45^\circ$  are the smallest. With the increase of strain rate, distribution of fragments becomes more dispersed. The higher the strain rate, the more significant the effect of the pre-existing crack on the fracture degree and fractal dimension of the samples.

**Keywords:** strain rate; crack propagation; red sandstone; split Hopkinson pressure bar; crack inclination angle; fracture

天然岩体中普遍存在节理、微裂纹等缺陷<sup>[1]</sup>, 岩体的力学性质、破坏模式均受这些缺陷的影响。在岩质工程中, 机械振动、爆破施工等动载影响下, 岩体受到应力波的作用可能产生损伤、断裂, 此时需要尽可能避免或减轻岩体损伤, 使其宏观上保持稳定。但在矿石剥离、矿石粉碎等方面需要达到更好的岩体破碎效果。因此, 进行不同应变率条件下含裂隙岩石的裂纹扩展模式、力学性质及块度特征研究, 具有重要的工程实际意义。由于岩石具有非均质性以及冲击动载的瞬时性, 使得研究岩石冲击破坏等问题从理论入手是比较困难的<sup>[2]</sup>, 进行应变率影响下的岩石动态裂纹扩展及动态力学性质的实验研究具有重要价值。

静载作用下含裂隙岩体的力学性质及裂纹扩展模式研究始于 20 世纪, 且研究已较充分。杨圣奇等<sup>[3]</sup>以含裂隙大理岩试样为研究对象, 对其进行准静态单轴压缩加载, 探讨了裂隙倾角、间距、长度以及裂隙数目等对试样破坏模式及力学性质的影响。张亮等<sup>[4]</sup>以单裂隙砂岩为研究对象, 分析了单轴压缩条件下含不同产状裂隙岩样的裂纹扩展规律, 并对能量演化机制进行了讨论。Huang 等<sup>[5]</sup>和 Reisa 等<sup>[6]</sup>通过实验分别总结出了静态加载条件下含裂隙岩体的 5 种裂纹扩展模式和 9 种裂纹类型。Zhou 等<sup>[7]</sup>以含多裂隙岩石试样为研究对象, 讨论了 5 种裂纹类型, 在裂纹演化过程分析的基础上总结了 10 种裂纹聚结形式。易婷等<sup>[8]</sup>探讨了不同裂隙倾角、裂隙数目影响下试样的变形破坏特征及破坏模式与岩体强度的关系。总之, 人们得到的静载条件下岩石裂纹扩展模式和类别相对比较统一, 静态力学性质与裂纹扩展模式的相互关系也相对明确, 并且获得了低应变率加载条件下(在  $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  之间)含裂隙或孔洞岩体裂纹扩展路径与应变率的关系<sup>[9-11]</sup>。

在冲击荷载作用下, 外部能量的输入导致岩石细观裂纹发育、扩展和贯通而产生宏观破坏<sup>[12]</sup>。针对完整岩石的裂纹扩展已进行了大量研究, 早已证明无预制裂纹岩石在不同应变率条件下的裂纹萌生、扩展及最终破裂模式是不同的<sup>[13-15]</sup>, 应变率对其动态破坏模式有很大影响<sup>[16]</sup>, 并且随着应变率的改变, 岩石破碎模式发生转化<sup>[2]</sup>。虽然含裂隙岩体的动态力学性质及裂纹动态扩展研究起步略晚, 但目前已取得了诸多成果。Li 等<sup>[17]</sup>利用分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)研究了含预制单裂隙正方形板状大理岩在冲击动载下的力学性质, 以及预制裂隙参数对试样破坏模式的影响, 总结出了 6 种裂纹扩展类型, 并与其他学者静载条件下的裂纹扩展模式进行了对比。Zou 等<sup>[18]</sup>研究了含预制裂隙长方形板状石膏试样在动态冲击条件下的力学性能, 对裂纹扩展模式进行了总结和分类, 基于裂纹几何形状和裂纹扩展机理得到了 7 种裂纹类型, 并获得了多种应变率条件下的断裂模式。Li 等<sup>[19]</sup>以含 1 条和 2 条预制裂纹的正方形板状大理岩为研究对象, 分析了 SHPB 实验中岩体的断裂模式, 并总结了含 2 条预制裂纹试样的 9 种破坏类型。Yan 等<sup>[20]</sup>通过数值模拟研究发现, 冲击加载条件下单裂隙有限尺寸矩

形试件的裂纹扩展模式与加载速率有关, 并对比分析了多组加载速率、多种预制裂隙产状条件下岩样的裂纹扩展路径。王奇智等<sup>[21]</sup>以预制 1 条裂纹的类岩石正方形板为研究对象, 分析了加载率 0.2~1.2 TPa/s 下试样裂纹扩展模式及相应的应变场特征, 发现该实验条件下加载率变化对试样破坏形状影响不大。李地元等<sup>[22]</sup>采用改进的 SHPB 系统对圆柱形花岗岩进行动静组合加载实验, 发现相对轴压冲击气压对岩样破坏模式影响不显著。不难看出, 中应变率条件下针对含预制裂隙岩样, 目前在裂纹几何参数对岩石动态力学性质及裂纹扩展模式的影响方面已进行了较多探讨, 针对应变率对裂纹渐进扩展行为的影响研究也有所涉及, 但在中应变率范畴内的相关实验成果还不充分。众所周知, 试样动态力学性质具有尺寸效应<sup>[23]</sup>, 相关研究也表明裂纹扩展模式具有尺寸效应<sup>[24]</sup>, 并且岩石宏观力学性质与裂纹渐进扩展行为有紧密关联<sup>[25]</sup>。因此, 中应变率条件下含预制裂隙岩样裂纹扩展过程不仅是应变率相关的, 也与试样形状相关。目前, 采用长方形板状试样、利用 SHPB 实验探讨含预制裂隙试样的裂纹扩展问题时, 普遍在试样长度方向施加冲击动载(便于与静态实验结果对比)<sup>[18,20]</sup>, 但根据 SHPB 实验原理, 有些种类岩石试样的长径比小于 1 时是最适合的, 应力波在岩样内部来回传播次数才能满足要求, 同时在长方形试样宽度方向加载也能更好地减弱惯性效应<sup>[26]</sup>。

本文中, 以有限尺寸含裂隙长方形板状红砂岩为实验对象, 沿试样宽度方向施加动态冲击荷载, 分析试样在不同应变率下的动态压缩力学性质, 重点分析中应变率下裂纹扩展模式的应变率相关性及其变化规律。

## 1 试样制备及实验方案

实验对象为红砂岩, 取自湖南省某地下开采矿山, 属于岩质工程中比较常见的岩石种类。为避免试样结构、成分的差异, 试件均取自同一岩块。在轴向荷载作用下, 由于圆柱形试样裂纹在其表面的扩展与内部扩展模式是有区别的<sup>[20]</sup>, 本次岩样加工成板状, 近似平面应力问题。考虑到实验设备试样夹持部位的尺寸, 并且为了同时满足岩石动态力学性质和裂纹扩展的研究, 试样加工成板状, 长、宽和厚分别为 46、30 和 15 mm。采用中心钻孔法<sup>[27]</sup>预制贯通裂纹, 裂纹长度为 8 mm, 倾角( $\beta$ )分别为 0°、30°、45°、60°和 90°, 部分试样照片见图 1, 试样几何参数及加载方向见图 2。相关研究表明, 中心钻孔法在裂隙中间形成的圆形孔洞对预制裂纹尖端应力场与断裂特征无实质性影响<sup>[28]</sup>。将试样按照 D-裂纹倾角-块数命名, 比如 D-30-2 代表动荷载条件下裂纹倾角为 30°的第 2 块试样(简称第 2 块 30°试样)。每个倾角试样 12 块, 每 3 块编为一组, 共计 60 块。

实验在石家庄铁道大学工程力学实验中心进行。利用真空饱水箱、高精度电子天平(精度为 1 mg)、岩石波速仪等设备测得红砂岩试样的干燥密度为 2.37 g/cm<sup>3</sup>, 饱和吸水率为 2.75%, 干燥试样波速为 2290 m/s。采用 SHPB(如图 3 所



图 1 部分试样照片

Fig. 1 Photo of some samples

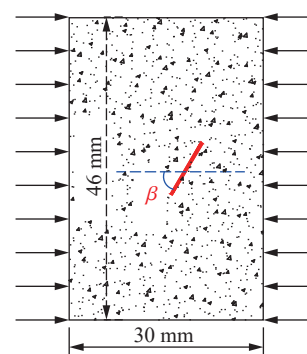


图 2 试样形态及加载方向

Fig. 2 Sample morphology and loading directions



示)对试样进行冲击加载,动态冲击实验过程参照相关规程<sup>[29]</sup>进行。为了消除含水率的影响,SHPB 实验中采用完全干燥后的试样。SHPB 装置的入射杆、透射杆、吸收杆均为 40Cr 合金钢材质,长度分别为 3 000、2 000 和 1 000 mm,直径为 50 mm,密度为  $7\ 810\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为 210 GPa,纵波波速为 5 410 m/s。试样两端涂抹耦合剂(凡士林)使试件和杆件接触紧密。使用超动态应变仪记录入射波、反射波、透射波波形,获得动态压缩应力-应变曲线。使用高速摄像机记录裂纹扩展过程(如图 4 所示),高速摄像机选用 Phantom 系列 VEO710 型号,高速相机拍照时需要调整光圈、焦距、灯光等进行调整,确保拍摄的图片清晰、明亮,兼顾图像精确度及亮度,本次拍摄速率设置为  $75\ 000\text{ s}^{-1}$ 。

SHPB 实验子弹采用纺锤形冲头,实现半正弦入射波加载。子弹初始速度采用光电法测得,子弹冲击速度控制在 4、6、8 和 10 m/s,虽然相同子弹冲击速度下入射波形态基本一致,但受预制裂纹的影响,试样应变率会发生改变。不同子弹速度条件下得到的试样应变率分别为  $16.7\sim 23.5$ 、 $37.8\sim 45.8$ 、 $55.3\sim 65.8$  和  $75.3\sim 83.9\text{ s}^{-1}$ ,简写作  $20\text{ s}^{-1}$  左右、 $40\text{ s}^{-1}$  左右、 $60\text{ s}^{-1}$  左右和  $80\text{ s}^{-1}$  左右。采用筛分统计法分析试样碎块的分布特征,结合分形理论探讨应变率、裂纹倾角对试样破碎特征的影响,标准筛孔径分别为 1、5、10、20、30 和 40 mm。

## 2 裂纹扩展特征

裂纹萌生和发展过程体现了岩石局部受力特征,是揭示动荷载作用下岩石破坏机理和力学特性的重要因素。以目前公认的 Li 等<sup>[17]</sup>和 Zou 等<sup>[18]</sup>总结的 6 种和 7 种动态冲击条件下含预制单裂隙岩样的裂纹扩展形态(依裂纹几何形状和裂纹扩展机理划分)为依据,综合本文动态实验过程中监测到的裂纹扩展模式,补充了离层裂纹,并将 Li 等<sup>[17]</sup>总结的裂纹分类中的远场裂纹合并到 Zou 等<sup>[18]</sup>总结的裂纹种类中,获得与本文实验相关的裂纹形态见图 5,图中 T 和 S 分别表示拉伸裂纹和剪切裂纹, P 为载荷。各类型裂纹扩展模式的特点如表 1 所述。

子弹冲击速度为 2 m/s 时(应变率  $20\text{ s}^{-1}$  左右),试样没有出现宏观裂纹。提高子弹速度后,试样出现了宏观破坏。以应变率为  $40\text{ s}^{-1}$  左右、 $60\text{ s}^{-1}$  左右和  $80\text{ s}^{-1}$  左右时的试样为分析对象,探讨不同应变率条件下含裂隙板状试样的破坏特征。随着应变率的提高,试样破碎后的块度显著减小,裂纹趋于复杂。应变率为  $40\text{ s}^{-1}$  左右和  $60\text{ s}^{-1}$  左右时,裂纹形态相对较简单,因此本文中仅描述试样裂纹扩展最终形态和所包含的裂纹类型(见表 2),为了使结果更清晰,使用裂纹素描图展示照片中的裂纹路径。

应变率为  $40\text{ s}^{-1}$  左右时, $0^\circ$ 试样在预制裂纹端部产生 II 型拉伸裂纹并贯通试样,局部产生 IV 型剪切裂纹,但该裂纹最终演化成沿荷载方向的拉伸裂纹,试样总体呈劈裂拉伸破坏模式。 $30^\circ$ 试样在预制裂纹端部分别产生 V 型剪切裂纹和 III 型拉伸裂纹并贯通试样。 $45^\circ$ 试样在预制裂纹两端分别产生 I 型、III 型拉伸裂纹并贯通至试样两侧。 $60^\circ$ 试样在预制裂纹两端产生 V 型剪切裂纹并扩展至试样两端,试样呈剪切破坏模式。 $90^\circ$ 试样在预制裂纹中部产生 III 型拉伸裂纹并贯通试样,试样总体呈拉伸破坏模式。



图 3 霍布金森压杆系统

Fig. 3 An SHPB system

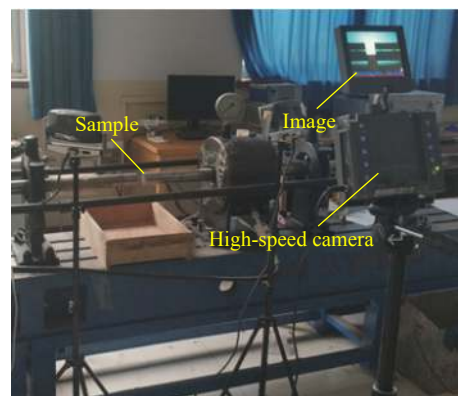


图 4 高速摄像机记录裂纹扩展过程

Fig. 4 The crack propagation recorded by a high-speed camera

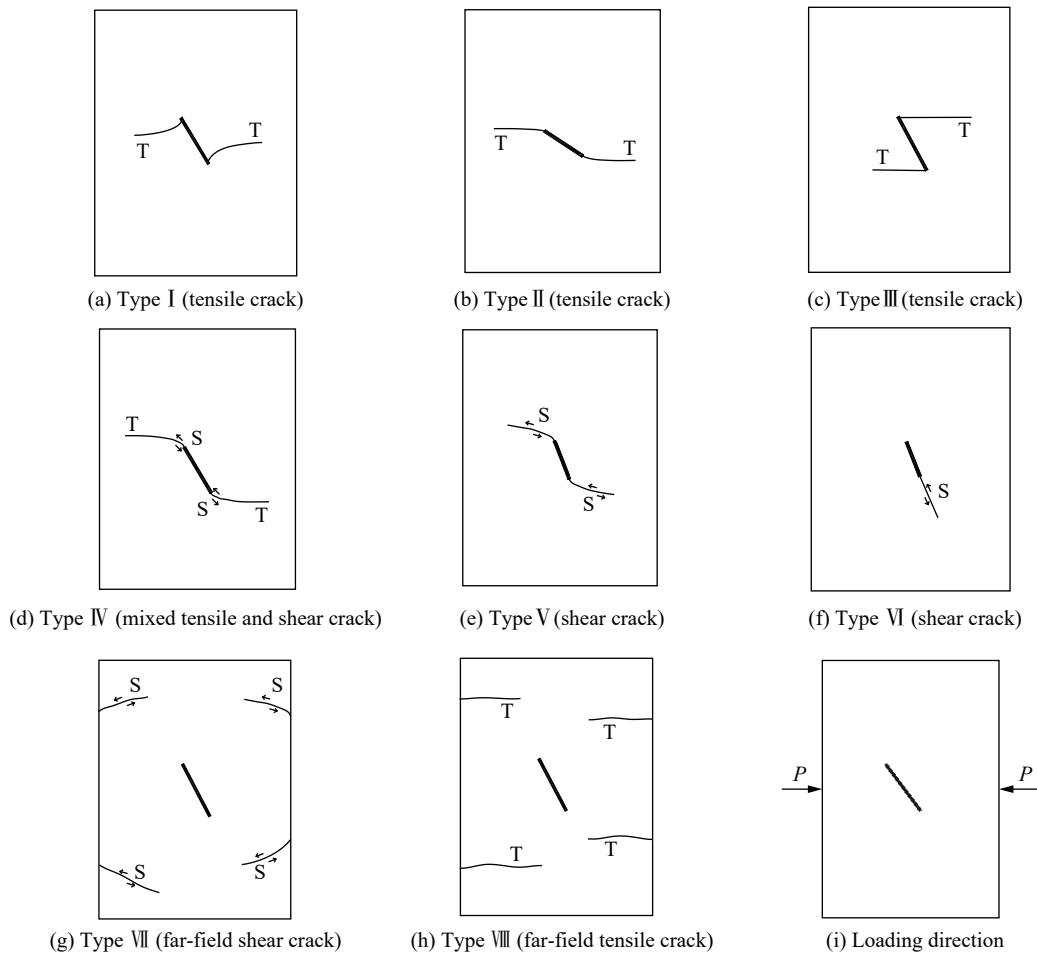


图 5 裂纹宏观扩展模式种类

Fig. 5 Types of crack propagation modes

表 1 各类型裂纹扩展模式的特点

Table 1 Characteristics of each type of crack propagation

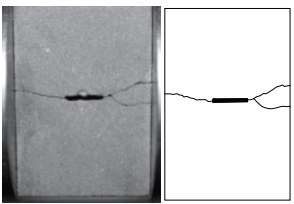
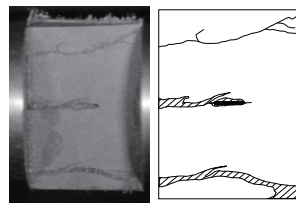
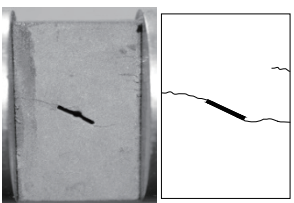
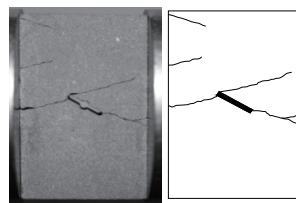
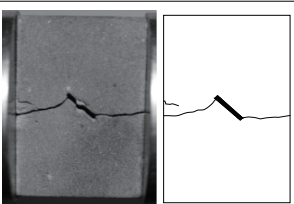
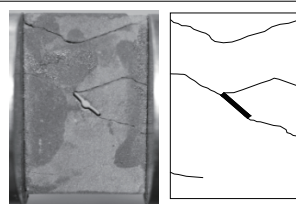
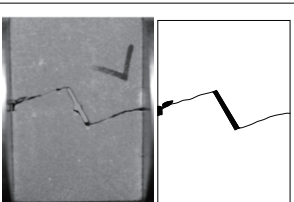
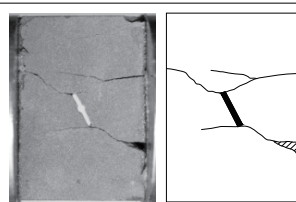
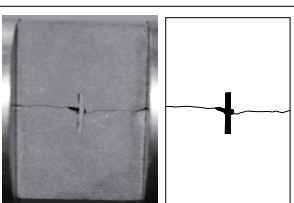
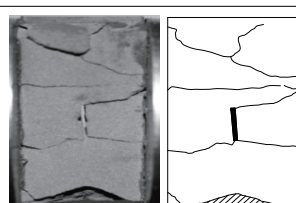
| 裂纹类型   | 裂纹扩展模式特点  |
|--------|---|
| I 型    | 从预制裂纹端部垂直方向起裂, 随后逐步向加载方向扩展  |
| II 型   | 从预制裂纹端部, 沿预制裂纹方向起裂, 随后逐步沿加载方向扩展   |
| III 型  | 从预制裂纹端部沿加载方向起裂, 或在裂纹中部起裂(预制裂纹 $90^\circ$ 布置时), 随后沿荷载方向扩展                |
| IV 型   | 与加载方向呈一定角度起裂, 产生剪切裂纹, 之后沿加载方向发展为拉伸裂纹。与 II 型裂纹相比该型裂纹在预制裂纹端部附近可能表现出局部的压碎区 |
| V 型    | 与加载方向呈一定角度起裂, 之后与加载方向呈一定角度继续扩展, 一般情况下裂纹扩展路径不平滑, 可形成沿裂纹扩展路径的岩屑覆盖剪切带      |
| VI 型   | 在预制裂隙端部沿预制裂隙方向起裂, 并沿预制裂隙方向扩展  |
| VII 型  | 远场剪切型裂纹普遍从试样受荷面起裂, 一般不会早于预制裂隙端部裂纹的形成, 并且最终将发展为剪切带                       |
| VIII 型 | 远场拉伸型裂纹普遍比预制裂隙端部裂纹形成晚, 通常将发展为沿荷载方向贯通试样的拉伸裂纹                             |

应变率为  $60 \text{ s}^{-1}$  左右时,  $0^\circ$  试样在裂隙端部萌生 1 条 II 型拉伸裂纹并延伸至试样端部, 并产生 1 条微小的 V 型剪切裂纹但没有进一步扩展, 远场产生明显的 VII 型剪切裂纹并贯通试样。 $30^\circ$  试样在裂隙端部萌生 V 型剪切裂纹并延伸至试样端部, 试样总体为剪切破坏模式。 $45^\circ$  试样在预制裂纹端部产生 II 型拉伸裂纹并贯通试样, 同时产生 V 型剪切裂纹扩展至试样一端, 远场产生明显的 VII 型剪切裂纹并贯通试

样。60°试样在预制裂纹端部产生多条 V 型剪切裂纹扩展并贯通试样, 远场产生明显的 VII 型剪切裂纹并与预制裂纹端部的 V 型剪切裂纹相互贯通。90°试样在预制裂纹端部产生多条 V 型剪切裂纹并进一步扩展至试样两侧, 同时在预制裂隙端部加载侧萌生 1 条 I 型拉伸裂纹并延伸至试样端部, 远场产生明显的 VII 型剪切裂纹和 VIII 型拉伸裂纹并贯通试样。

表 2 应变率为 40 s<sup>-1</sup> 左右和 60 s<sup>-1</sup> 左右时试样的裂纹形态

Table 2 Crack shapes of the samples at the strain rates of about 40 s<sup>-1</sup> and about 60 s<sup>-1</sup>

| $\beta/(\circ)$ | 应变率 40 s <sup>-1</sup> 左右   |              | 应变率 60 s <sup>-1</sup> 左右  |                               |
|-----------------|---|--------------|--|-------------------------------|
|                 | 裂纹形态  | 裂纹类型         | 裂纹形态   | 裂纹类型                          |
| 0               |    | II 型<br>IV 型 |    | II 型<br>V 型<br>VII 型          |
| 30              |   | III 型<br>V 型 |   | V 型<br>VII 型                  |
| 45              |  | III 型<br>V 型 |  | II 型<br>V 型<br>VII 型          |
| 60              |  | V 型          |  | V 型<br>VII 型                  |
| 90              |  | III 型        |  | I 型<br>V 型<br>VII 型<br>VIII 型 |

应变率为 80 s<sup>-1</sup> 左右时, 裂纹形态相对复杂, 通过分析试样裂纹的扩展过程和最终形态, 获得试样的裂纹扩展模式特征 (见表 3)。裂纹扩展过程与应力的对应关系见图 6。当应力波传播至预制裂纹处时, 预制裂纹处 (一般在裂纹端部) 产生应力集中, 使得裂纹尖端新裂纹萌生, 同时试样其他区域也可能出现随机远场微裂纹。由于岩石试样原生缺陷及新生裂纹的非均匀性, 一般会导致试样在靠近入射杆端产生局部应力集中, 出现沿冲击方向张拉裂纹的萌生<sup>[2,30]</sup>, 随着应力波在试样内部的传播, 产生垂直于加载方向的拉伸应力效应<sup>[30]</sup>, 驱使已经萌生的裂纹大致沿加载方向扩展、相互贯通, 最终形成水平向破裂面, 本文试样大部分也出现了在靠近入射杆方向萌生远场拉伸裂纹而后贯通试样的现象。岩样包含初始预

制裂纹, 而且试样内部靠近入射端位置存在或多或少复杂的微缺陷, 这些都会影响应力波在试样内部的传播, 阻碍应力波透过试样传入透射杆, 从而在试样内部产生剪切裂纹, 这也正是本文实验中出现的入射端破碎程度(剪切裂纹密集程度)普遍大于透射端的原因。应力波在岩样内部传播产生沿波传递方向的拉伸应力效应, 导致垂直方向的离层裂纹出现(在应变率  $40 \text{ s}^{-1}$  左右、 $60 \text{ s}^{-1}$  左右时基本没有)。应变率为  $80 \text{ s}^{-1}$  左右时, 剪切裂纹、水平向拉伸裂纹、垂直向离层裂纹共同构成试样复杂的裂纹网络。

表 3 含不同倾角预制裂隙试样裂纹扩展过程

Table 3 Crack propagation processes in samples containing precracks with different inclination angles

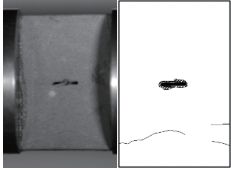
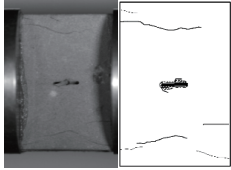
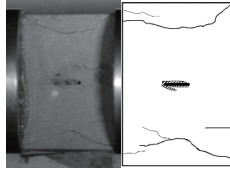
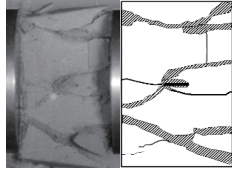
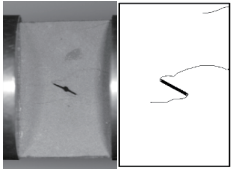
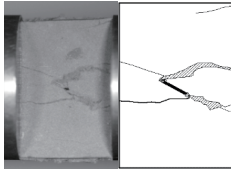
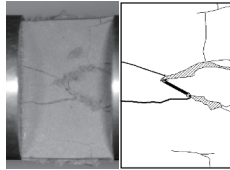
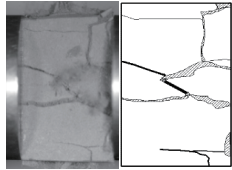
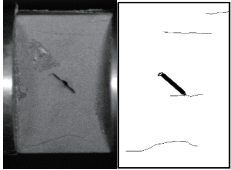
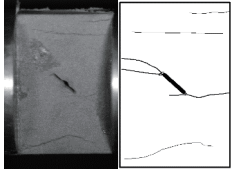
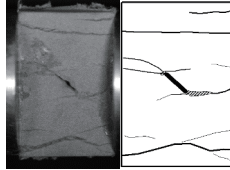
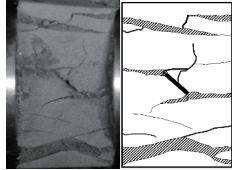
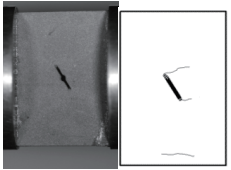
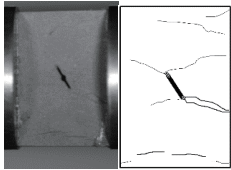
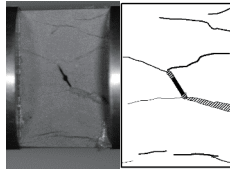
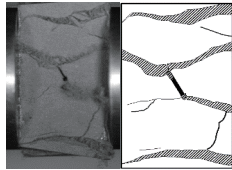
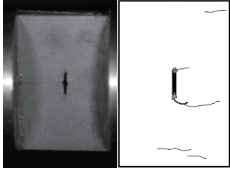
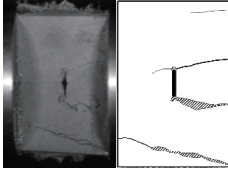
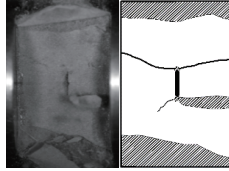
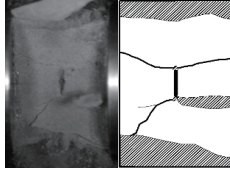
| $\beta(^{\circ})$ | 裂纹扩展过程   |  |  | 裂纹最终形态  |
|-------------------|--|--|--|---|
| 0                 |  <p>119.7 <math>\mu\text{s}</math></p> <p>预制裂纹端部IV型裂纹剪切段开始萌生, 出现远场VII型、VIII型裂纹</p>  |  <p>172.9 <math>\mu\text{s}</math></p> <p>预制裂纹端部IV型裂纹继续发展, 远场VII型、VIII型裂纹继续萌生和发展</p>                    |  <p>232.2 <math>\mu\text{s}</math></p> <p>预制裂纹端部IV型裂纹剪切段继续扩展, 出现向拉伸裂纹转变的趋势, 远场VII型裂纹贯通试件</p> |  <p>678.3 <math>\mu\text{s}</math></p> <p>最初产生的预制裂纹端部IV型裂纹贯通试样, 同时产生V型剪切裂纹以及1条II型拉伸裂纹, 远场VII型、VIII型裂纹相互贯通, 靠近入射杆侧出现垂直向离层裂纹</p> |
| 30                |  <p>133.0 <math>\mu\text{s}</math></p> <p>预制裂纹两端各产生1条III型、V型裂纹, 并开始萌生远场VIII型裂纹</p> |  <p>186.2 <math>\mu\text{s}</math></p> <p>预制裂纹两端的III型、V型裂纹贯通试样, 同时预制裂纹两端各产生1条VI型剪切裂纹</p>               |  <p>252.7 <math>\mu\text{s}</math></p> <p>远场VII型、VIII型裂纹大量出现, 扩展并相互贯通, 靠近入射杆侧出现垂直向离层裂纹</p>  |  <p>611.8 <math>\mu\text{s}</math></p> <p>远场VIII型裂纹迅速发展并贯通试样</p>  |
| 45                |  <p>133.4 <math>\mu\text{s}</math></p> <p>预制裂纹端部产生III型拉伸裂纹, 出现远场VII型、VIII型裂纹</p>  |  <p>146.3 <math>\mu\text{s}</math></p> <p>预制裂纹端部III型拉伸裂纹贯通试样, 另一端产生II型拉伸裂纹并贯通, 远场VII型、VIII型裂纹继续扩展</p> |  <p>199.5 <math>\mu\text{s}</math></p> <p>远场裂纹继续扩展贯通试样, 预制裂纹端部出现1条III型拉伸裂纹</p>             |  <p>438.9 <math>\mu\text{s}</math></p> <p>新出现的III型拉伸裂纹贯通试样, 产生新的远场VII型裂纹, 部分远场裂纹相互贯通, 出现离层裂纹</p>                             |
| 60                |  <p>146.3 <math>\mu\text{s}</math></p> <p>预制裂纹两端萌生V型剪切裂纹, 出现远场VII型裂纹</p>          |  <p>172.9 <math>\mu\text{s}</math></p> <p>预制裂纹两端V型剪切裂纹继续扩展, 出现大量远场VII型裂纹</p>                          |  <p>212.8 <math>\mu\text{s}</math></p> <p>预制裂纹两端V型剪切裂纹扩展至试样两端, 远场VII型裂纹继续扩展</p>            |  <p>452.2 <math>\mu\text{s}</math></p> <p>远场VII型裂纹扩展至试样两端, V型裂纹、远场VII型裂纹相互贯通, 靠近入射杆侧出现垂直向离层裂纹</p>                            |



表 3 (续)  
Table 3 (Continued)

| $\beta(^{\circ})$ | 裂纹扩展过程   |  |  | 裂纹最终形态  |
|-------------------|--|--|--|---|
| 90                |  <p>134.0 <math>\mu\text{s}</math></p> <p>预制裂纹两端出现 V 型剪切裂纹, 并开始萌生远场 VII 型裂纹</p> |  <p>172.9 <math>\mu\text{s}</math></p> <p>V 型剪切裂纹扩展至试样一端, 远场 VII 型裂纹迅速扩展、贯通试样, 并出现 VIII 型裂纹</p> |  <p>272.6 <math>\mu\text{s}</math></p> <p>V 型剪切裂纹扩展至试样另一端, 远场 VII 型、VIII 型裂纹迅速扩展</p> |  <p>399.0 <math>\mu\text{s}</math></p> <p>V 型剪切裂纹、远场 VII 型裂纹相互贯通</p> |

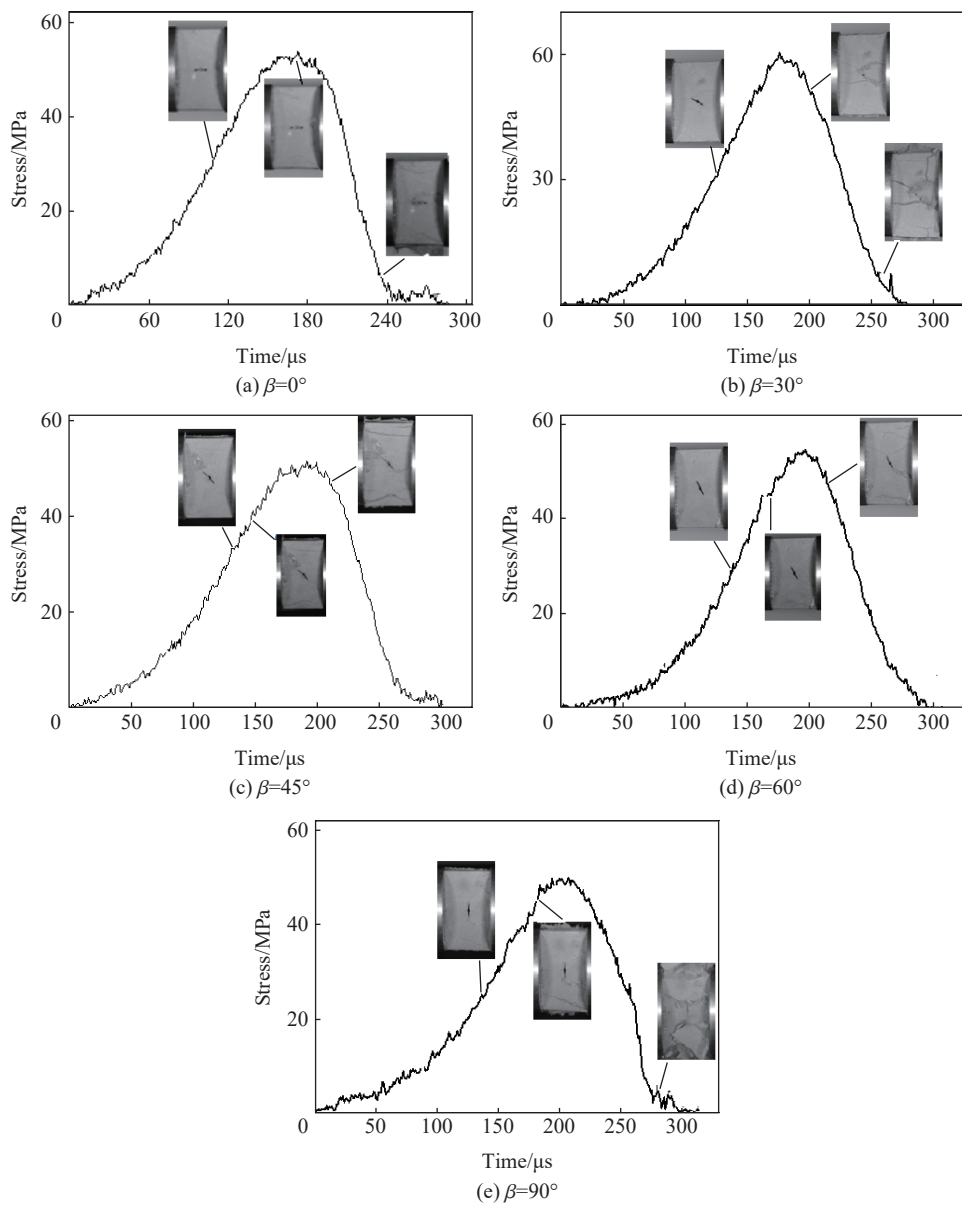


图 6 裂纹扩展过程与应力的对应关系

Fig. 6 Relationship between crack propagation and stress



相关研究<sup>[9-11]</sup>已经表明,低应变率范围内(涉及的应变率在  $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  之间),随着应变率的提高,原有微裂纹来不及扩展试样就会发生宏观破坏,致使试样最终破坏形态裂纹数量有所减少,应变率增大到一定程度后出现只有主裂纹扩展的破坏模式<sup>[11]</sup>。相关研究<sup>[10]</sup>还指出,低应变率( $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ )范围内,随着应变率的提高,岩样由剪切破坏模式转化为拉伸破坏模式。通过本文实验可知,冲击荷载作用下,裂纹倾角和应变率对裂纹路径及破坏模式有较大影响,但由于破碎机理的不同<sup>[31]</sup>,本文中讨论的中应变率条件下试样的破碎模式与低应变率情况下的有显著区别。中应变率条件下,随着应变率的提高,试样的最终破坏形态中裂纹数量逐渐增多,更加复杂,不仅出现更多的远场裂纹,预制裂纹的扩展模式也不相同,并且有离层裂纹的出现。当应变率很低时( $20 \text{ s}^{-1}$  左右),试样没有出现宏观裂纹。当应变率较低时( $40 \text{ s}^{-1}$  左右),试样近似临界破坏<sup>[26]</sup>,大多产生 1 条贯通性裂纹,并且通常包含 1 条拉伸裂纹( $60^\circ$  试样除外)。应变率提高到  $60 \text{ s}^{-1}$  左右后,各试样中剪切裂纹明显增多,主要为 V 型和 VII 型剪切裂纹, $30^\circ$  试样和  $60^\circ$  试样无拉伸裂纹出现。较高应变率时( $80 \text{ s}^{-1}$  左右),远场裂纹的数量远多于较低应变率时的情况,破坏模式相对更复杂,包含的裂纹类型更丰富,碎块更多。应变率  $80 \text{ s}^{-1}$  左右时,每种试样最终均形成 X 形裂纹破碎带(较低应变率情况下较少出现),并在此过程中产生大量的岩粉,而产生的这些岩粉也正是剪切裂纹形成、扩展的标志<sup>[32]</sup>。

### 3 含裂隙红砂岩的动态力学性质

#### 3.1 应力-应变关系

采用 SHPB 系统得到的典型波形见图 7,入射波和反射波的叠加曲线与透射波重合较好。这说明,在冲击过程中试样两端可以达到动态应力平衡,实验满足应力平衡的前提条件。

经典的三波法测试数据处理公式<sup>[26]</sup>为:

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

式中:  $\dot{\varepsilon}(t)$  和  $\varepsilon(t)$  分别为测试过程中试件的平均应变率和应变,  $\sigma(t)$  为试件两端面应力的平均值,  $c$  为压杆的弹性波波速,  $E$  为压杆的弹性模量,  $A$  为压杆的横截面积,  $A_s$  为试件的横截面积,  $l_s$  为试样的长度,  $\varepsilon_i$ 、 $\varepsilon_r$  和  $\varepsilon_t$  分别为测得的入射波、反射波和透射波,  $t$  为时间。

根据式 (1),以应变率  $60 \text{ s}^{-1}$  左右的实验结果为例,含不同倾角裂隙试样的典型动态应力-应变曲线见图 8。以  $60^\circ$  倾角裂隙试样为例,不同应变率下试样动态压缩应力-应变曲线见图 9。动态压缩强度取应力-应变曲线的峰值应力。从图 6 所示的裂纹扩展情况看,与洪亮等<sup>[23]</sup>和李地元等<sup>[31]</sup>的方法类似,动态弹性模量取应力-应变曲线中 50% 峰值应力与相应应变的比值比较合适,此时微裂隙开始萌生。获得的含不同倾角裂隙试样的动态压缩强度和动态弹性模量见表 4。

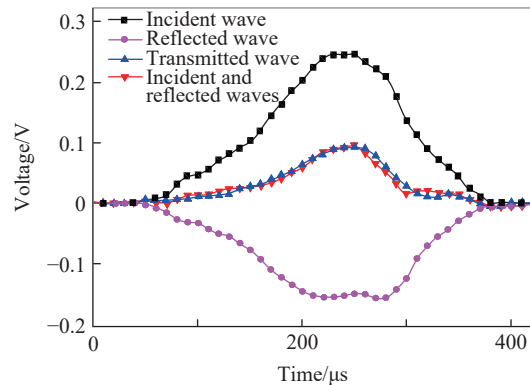


图 7 采用 SHPB 系统得到的典型波形

Fig. 7 Typical waves obtained by an SHPB system

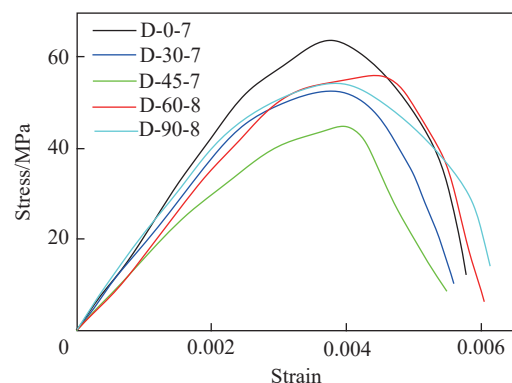


图 8  $60 \text{ s}^{-1}$  左右应变率下不同倾角裂隙试样的动态应力-应变曲线

Fig. 8 Dynamic stress-strain curves of samples containing cracks with different inclination angles at the strain rate of about  $60 \text{ s}^{-1}$

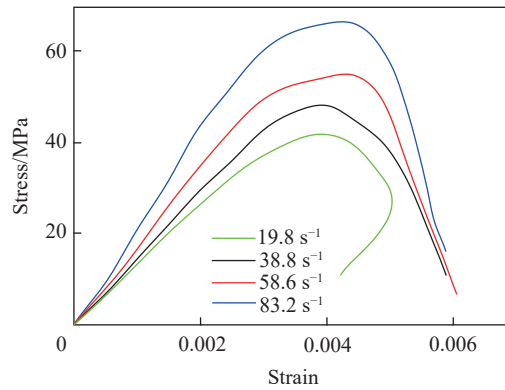


图 9 不同应变率下 60°倾角裂隙试样的应力-应变曲线

Fig. 9 Dynamic stress-strain curves of samples containing cracks with the inclination angle of 60° at different strain rates

表 4 含不同倾角裂隙试样的动态力学参数

Table 4 Dynamic mechanical parameters for samples containing precracks with different inclination angles

| 试样      | 应变率/s <sup>-1</sup> | 动态压缩强度/MPa | 弹性模量/GPa | 试样      | 应变率/s <sup>-1</sup> | 动态压缩强度/MPa | 弹性模量/GPa |
|---------|---------------------|------------|----------|---------|---------------------|------------|----------|
| D-0-1   | 16.7                | 35.8       | 6.3      | D-45-7  | 55.3                | 45.3       | 10.9     |
| D-0-2   | 23.5                | 40.2       | 7.2      | D-45-8  | 59.7                | 50.8       | 12.0     |
| D-0-3   | 19.8                | 37.6       | 5.9      | D-45-9  | 62.5                | 52.8       | 12.0     |
| D-0-4   | 41.3                | 48.7       | 10.3     | D-45-10 | 80.2                | 60.1       | 14.6     |
| D-0-5   | 38.7                | 45.2       | 9.7      | D-45-11 | 83.7                | 65.8       | 15.2     |
| D-0-6   | 40.9                | 44.8       | 10.7     | D-45-12 | 78.9                | 63.2       | 14.1     |
| D-0-7   | 65.8                | 64.9       | 16.8     | D-60-1  | 19.8                | 42.1       | 5.7      |
| D-0-8   | 60.4                | 61.9       | 15.2     | D-60-2  | 23.5                | 41.9       | 5.2      |
| D-0-9   | 57.2                | 57.3       | 15.9     | D-60-3  | 17.6                | 39.7       | 5.0      |
| D-0-10  | 76.8                | 79.8       | 20.8     | D-60-4  | 38.8                | 48.8       | 7.5      |
| D-0-11  | 82.3                | 81.1       | 21.0     | D-60-5  | 43.5                | 50.2       | 8.0      |
| D-0-12  | 83.2                | 83.5       | 20.4     | D-60-6  | 41.3                | 53.8       | 7.8      |
| D-30-1  | 17.8                | 31.8       | 6.4      | D-60-7  | 59.7                | 55.7       | 13.3     |
| D-30-2  | 19.2                | 33.2       | 5.7      | D-60-8  | 63.2                | 59.8       | 13.3     |
| D-30-3  | 21.9                | 34.3       | 5.8      | D-60-9  | 58.6                | 55.7       | 13.7     |
| D-30-4  | 37.8                | 39.8       | 8.8      | D-60-10 | 75.3                | 62.7       | 18.8     |
| D-30-5  | 42.3                | 43.5       | 9.3      | D-60-11 | 79.4                | 66.8       | 17.0     |
| D-30-6  | 39.8                | 41.7       | 9.0      | D-60-12 | 83.2                | 67.8       | 18.6     |
| D-30-7  | 55.6                | 55.2       | 14.6     | D-90-1  | 17.9                | 41.8       | 5.7      |
| D-30-8  | 59.7                | 58.8       | 15.2     | D-90-2  | 19.6                | 37.6       | 5.9      |
| D-30-9  | 62.1                | 54.3       | 13.9     | D-90-3  | 21.8                | 45.7       | 6.3      |
| D-30-10 | 76.5                | 76.2       | 16.5     | D-90-4  | 39.7                | 50.1       | 8.9      |
| D-30-11 | 79.8                | 79.3       | 17.3     | D-90-5  | 45.8                | 53.2       | 9.5      |
| D-30-12 | 83.2                | 78.5       | 16.9     | D-90-6  | 42.1                | 47.8       | 8.7      |
| D-45-1  | 18.7                | 32.9       | 4.4      | D-90-7  | 62.1                | 52.1       | 14.3     |
| D-45-2  | 23.5                | 35.3       | 4.2      | D-90-8  | 60.7                | 54.9       | 15.0     |
| D-45-3  | 20.1                | 31.8       | 3.7      | D-90-9  | 65.2                | 59.8       | 15.2     |
| D-45-4  | 40.8                | 39.7       | 7.0      | D-90-10 | 77.9                | 69.4       | 19.4     |
| D-45-5  | 39.7                | 41.2       | 7.6      | D-90-11 | 83.9                | 72.8       | 20.2     |
| D-45-6  | 43.2                | 42.8       | 7.0      | D-90-12 | 79.8                | 70.1       | 19.8     |

冲击加载条件下, 含裂隙试样的应力-应变曲线大致可分为 3 个阶段, 分别为弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段, 没有明显的压密阶段。应力开始增大时, 应力-应变曲线基本马上进入弹性阶段, 此时应力、应变大体呈线性关系, 之后新裂隙开始萌生, 应力-应变曲线趋于平缓直至峰值, 裂纹逐渐贯通试样, 随后裂纹充分发育和扩展, 应力下降。部分试样在冲击速度较小时(应变率  $20 \text{ s}^{-1}$  左右)未发生明显的宏观破坏, 曲线出现应变回弹现象。

### 3.2 动态压缩强度

试样动态压缩强度  $\sigma_c$  与应变率之间的关系可用指数函数进行拟合<sup>[26]</sup>:

$$\sigma_c = a e^{b\dot{\epsilon}} \quad (2)$$

式(2)中参数  $a$ 、 $b$  的取值见表 5。试样动态压缩强度与应变率的关系见图 10, 动态压缩强度与预制裂纹倾角的关系见图 11(该图没有包含应变率为  $20 \text{ s}^{-1}$  左右时未破坏试样的数据)。

表 5 指数函数系数值

Table 5 The coefficient values of the exponential function

| $\beta/(\text{°})$ | 0       | 30      | 45      | 60      | 90      |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $a/\text{MPa}$     | 28.01   | 23.87   | 26.49   | 36.14   | 34.3    |
| $b/\text{s}$       | 0.01308 | 0.01467 | 0.01070 | 0.00761 | 0.00867 |

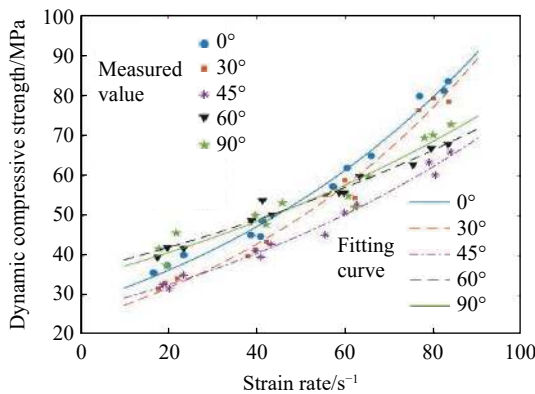


图 10 动态压缩强度与应变率的关系

Fig. 10 Relationship between dynamic compressive strength and strain rate

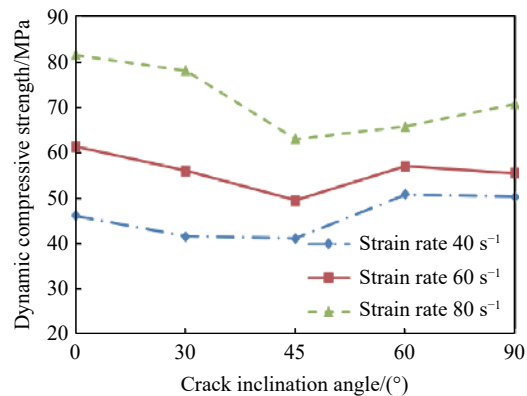


图 11 动态压缩强度与裂纹倾角的关系

Fig. 11 Relationship between dynamic compressive strength and crack inclination angle

在预制裂隙倾角一定的情况下, 随着子弹冲击速度的提高, 岩样的动态压缩强度表现出明显的应变率效应。预制裂隙倾角对于应变率效应有显著影响, 裂纹倾角为  $0^\circ$  和  $30^\circ$  的试样的应变率-动态强度关系曲线相对更陡, 指数函数系数  $b$  的值更大, 说明这 2 种试样的动态强度受应变率的影响更显著; 裂纹倾角为  $60^\circ$  和  $90^\circ$  的试样的应变率-动态强度关系曲线相对平缓, 指数函数系数  $b$  的值较小, 说明这 2 种试样的动态强度受应变率的影响相对较弱。

在本文实验条件下, 裂隙角度变化对试样动态压缩强度影响显著。总体来说, 在应变率相近时, 随着裂纹倾角的增大, 试样动态强度大体呈现先减小再增大的趋势。不同应变率时,  $45^\circ$  试样的动态压缩强度均为最小, 而动态压缩强度的最大值随应变率的不同出现在了  $0^\circ$  试样或  $60^\circ$  试样。应变率为  $40 \text{ s}^{-1}$  左右时,  $60^\circ$  试样的动态压缩强度最大(3 块试样的平均值为  $50.93 \text{ MPa}$ ), 相对  $45^\circ$  试样的动态压缩强度增大  $23.5\%$ 。应变率为  $60 \text{ s}^{-1}$  左右时,  $0^\circ$  试样的动态压缩强度最大(3 块试样的平均值为  $61.37 \text{ MPa}$ ), 相对  $45^\circ$  试样的动态压缩强度增大  $23.7\%$ 。应变率为  $80 \text{ s}^{-1}$  左右时,  $0^\circ$  试样的动态压缩强度最大(3 块试样的平均值为  $81.47 \text{ MPa}$ ), 相对  $45^\circ$  试样的动态压缩强度增大  $22.6\%$ 。当预制裂纹与加载方向呈  $0^\circ$  时, 试样的动态压缩强度普遍较大, 可以从 SHPB 实验原理考虑为,  $0^\circ$  方位的裂纹对于应力波初期在试样内部的传播影响最小, 这可

从该类试样裂纹扩展初级阶段(预制裂纹尖端刚刚萌生新的裂纹)已产生大量远场Ⅶ型和Ⅷ型裂纹并开始扩展得到印证,因此该类试样的动态压缩强度相对较大。但应变率较低时( $40\text{ s}^{-1}$ 左右) $0^\circ$ 试样以拉伸裂纹为主,而应变率较高时以剪切裂纹居多,裂纹种类的不同正是应变率较低时 $0^\circ$ 试样的动态压缩强度并非最大(相对 $60^\circ$ 试样和 $90^\circ$ 试样),而应变率较高时 $0^\circ$ 试样的动态压缩强度为最大的主要原因。预制裂纹与加载方向呈一定角度时,应力波在试样内的传播受到裂纹较大的影响,当裂隙角度为 $45^\circ$ 时试样动态压缩强度最小,这与试样均产生了拉伸裂纹并贯通试样有关。 $60^\circ$ 试样预制裂纹尖端产生剪切裂纹,远场也基本没有拉伸裂纹出现,使得强度增大。应变率为 $40\text{ s}^{-1}$ 左右和 $60\text{ s}^{-1}$ 左右时, $90^\circ$ 试样的动态压缩强度有所减小,从裂纹形态可以看出此时拉伸裂纹贯通试样。但应变率为 $80\text{ s}^{-1}$ 左右时, $90^\circ$ 试样相对 $60^\circ$ 试样,其动态压缩强度有所提高,这主要由于裂隙两端产生剪切裂纹,远场也基本为剪切裂纹所致。

### 3.3 动态弹性模量

根据表 3 得到动态弹性模量与应变率的关系见图 12, 动态弹性模量与预制裂纹倾角的关系见图 13 (该图没有包含应变率为 $20\text{ s}^{-1}$ 左右时未破坏试样数据)。

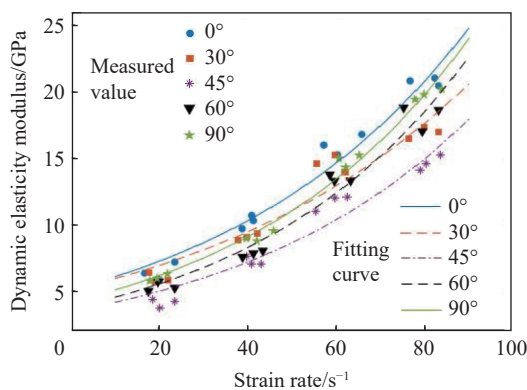


图 12 含有不同倾角裂纹试样的动态弹性模量随应变率的变化

Fig. 12 Dynamic elasticity moduli of samples containing cracks with different inclination angles varied with strain rate

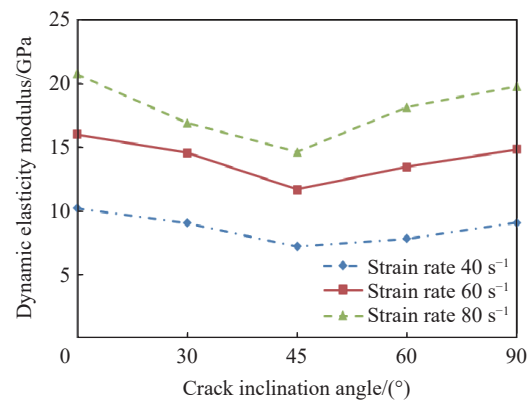


图 13 不同应变率下试样动态弹性模量随裂纹倾角的变化

Fig. 13 Dynamic elasticity moduli of samples varied with crack inclination angle at different strain rates

随着应变率的升高,动态弹性模量增大,这与动态压缩强度所具有的应变率效应一致,但与动态强度相比,不同裂纹倾角岩石动态弹性模量所体现的应变率效应的显著程度有所不同。这主要是由于随着应变率的升高,弹性阶段之后(裂隙开始显著扩展)至峰值应力过程中,裂纹扩展模式及新生远场裂纹类型不同导致的结果。

本文实验条件下,不同应变率时 $45^\circ$ 试样动态弹性模量均最小, $0^\circ$ 试样动态弹性模量最大,其次为 $90^\circ$ 试样动态弹性模量相对较大。应变率为 $40\text{ s}^{-1}$ 左右时,试样动态弹性模量最大值(3块 $0^\circ$ 试样动态弹性模量平均值 $10.21\text{ GPa}$ )相对 $45^\circ$ 试样增大 $42.0\%$ 。应变率为 $60\text{ s}^{-1}$ 左右时,试样的动态弹性模量最大值(3块 $0^\circ$ 试样动态弹性模量平均值 $15.99\text{ GPa}$ )相对 $45^\circ$ 试样增大 $37.3\%$ 。应变率为 $80\text{ s}^{-1}$ 左右时,试样的动态弹性模量最大值(3块 $0^\circ$ 试样的动态弹性模量平均值为 $20.76\text{ GPa}$ )相对 $45^\circ$ 试样增大 $42.0\%$ 。试样的动态弹性模量随裂隙倾角的变化趋势与动态强度的变化趋势具有一定的相似性,大体呈现先减小后增大的趋势,并且这一趋势的最小值位置相同,这主要反映出不同角度预制裂隙对于动态压缩强度和动态弹性模量的弱化程度具有近似的一致性。

## 4 试样破碎程度分析

针对试样裂纹扩展特征的分析难以定量反映其破碎程度的差异性,因此,有必要采用适合的定量方法对试样破碎特征进行描述。



从试样碎块形状特征来看, 主要包括长条状(含预制裂纹控制的长条状组合)、三棱锥形和粉末状, 其中出现长条状碎块是拉伸破坏的反映, 三棱锥形碎块表明岩样产生了压(拉)剪破坏, 这些现象与试样的裂纹扩展特征相互印证。本文中, 采用筛分统计法探讨试样碎块的分布特征, 定量分析应变率和裂纹倾角对试样破碎特征的影响。岩样的破碎程度可用平均破碎块度  $d_a$  来表示:

$$d_a = \frac{\sum (r_i d_i)}{\sum r_i} \quad (3)$$

式中:  $d_i$  为不同孔径标准筛得到的碎块平均尺寸,  $r_i$  为对应的碎块质量所占百分比。

在子弹速度较低的情况下, 试样基本未发生宏观破坏, 因而只对应变率为  $40 \text{ s}^{-1}$  左右、 $60 \text{ s}^{-1}$  左右和  $80 \text{ s}^{-1}$  左右的试样碎块进行筛分统计。筛分后试样碎块的典型形态见表 6。采用高精度电子天平称重后得到不同应变率试样的破碎块度分布情况, 见表 7。

表 6 不同应变率下含裂隙试样筛分情况  
Table 6 The sieving of samples containing cracks at different strain rates

| $\beta/(\circ)$ | 应变率/ $\text{s}^{-1}$ |           |           |
|-----------------|----------------------|-----------|-----------|
|                 | $\sim 40$            | $\sim 60$ | $\sim 80$ |
| 0               |                      |           |           |
| 30              |                      |           |           |
| 45              |                      |           |           |
| 60              |                      |           |           |
| 90              |                      |           |           |

平均破碎块度与裂纹倾角的关系如图 14 所示。应变率较低时( $40 \text{ s}^{-1}$  左右), 试样冲击破碎后大粒径碎块较多, 筛分得到的碎块度分布较集中, 不同裂纹倾角试样碎块度普遍在  $27.63 \sim 29.96 \text{ mm}$  之间, 大

体上破裂为 2 个大块以及少量小碎块及粉末。随应变率的提高, 大粒径碎块逐渐减少, 小粒径碎块和粉末状岩屑逐渐增多。在  $60\text{ s}^{-1}$  左右和  $80\text{ s}^{-1}$  左右应变率下, 随着裂纹倾角的增大, 试样平均破碎块度大体呈先增大后减小的趋势, 当预制裂纹倾角为  $45^\circ$  时, 试样的平均破碎块度  $d_m$  达到最大, 此时试样破坏时大粒径碎块所占比例最高。在  $60\text{ s}^{-1}$  左右应变率下, 当预制裂纹倾角为  $90^\circ$  时, 试样的平均破碎块度最小, 相比  $45^\circ$  试样减小 27.6%。在  $80\text{ s}^{-1}$  左右应变率下,  $60^\circ$  试样的平均破碎块度最小, 相比  $45^\circ$  试样减小 32.3%。随应变率的提高, 不同预制裂纹倾角的试样碎块分布更加分散, 应变率越高, 预制裂纹倾角对于岩石冲击破碎的影响越明显。

表 7 含裂隙试样破碎块度

Table 7 The granularity of samples containing cracks after impact

| 试样     | $d_a/\text{mm}$ | 试样      | $d_a/\text{mm}$ | 试样      | $d_a/\text{mm}$ | 试样      | $d_a/\text{mm}$ | 试样      | $d_a/\text{mm}$ |
|--------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|
| D-0-4  | 29.96           | D-30-4  | 29.56           | D-45-4  | 29.33           | D-60-4  | 28.06           | D-90-4  | 29.33           |
| D-0-5  | 29.52           | D-30-5  | 29.82           | D-45-5  | 29.53           | D-60-5  | 27.63           | D-90-5  | 29.14           |
| D-0-6  | 29.21           | D-30-6  | 29.69           | D-45-6  | 29.14           | D-60-6  | 28.03           | D-90-6  | 29.51           |
| D-0-7  | 18.42           | D-30-7  | 19.56           | D-45-7  | 21.83           | D-60-7  | 15.94           | D-90-7  | 15.94           |
| D-0-8  | 17.68           | D-30-8  | 19.26           | D-45-8  | 21.12           | D-60-8  | 17.51           | D-90-8  | 15.44           |
| D-0-9  | 17.94           | D-30-9  | 19.31           | D-45-9  | 21.90           | D-60-9  | 17.59           | D-90-9  | 15.59           |
| D-0-10 | 12.29           | D-30-10 | 13.34           | D-45-10 | 12.73           | D-60-10 | 8.79            | D-90-10 | 11.42           |
| D-0-11 | 11.96           | D-30-11 | 12.64           | D-45-11 | 13.01           | D-60-11 | 8.77            | D-90-11 | 10.35           |
| D-0-12 | 10.77           | D-30-12 | 13.00           | D-45-12 | 13.44           | D-60-12 | 8.98            | D-90-12 | 11.32           |

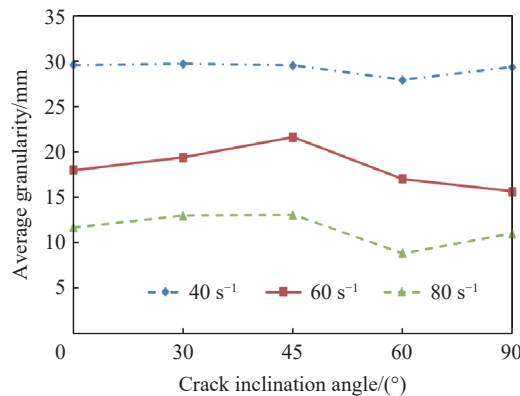


图 14 平均破碎块度与裂纹倾角关系

Fig. 14 Relationship between average granularity and crack inclination angle

目前, 分形理论广泛应用于岩石力学研究中, 试样碎块具有分形特征<sup>[33-34]</sup>。破碎分形维数可以直观、定量地反映岩石试件的破碎程度, 分形维数越大, 表明试样碎块越多, 破碎程度越高, 相较于破碎块度  $d_a$ , 分形维数有更加广泛的表征意义<sup>[35-36]</sup>。

按质量-块度关系度量<sup>[37]</sup>, 可获得试样冲击破碎后的块度分布方程:

$$Y = \frac{M(x)}{M_{\text{tot}}} = \left(\frac{x}{x_m}\right)^{3-D_b} \quad (4)$$

式中:  $D_b$  为冲击破碎块度分布的分形维数,  $x$  和  $x_m$  分别为颗粒粒径和碎块最大尺寸,  $M(x)$  和  $M_{\text{tot}}$  分别为尺寸小于  $x$  的破碎颗粒累计质量及碎块总质量。

对式 (4) 两边取对数, 可得:

$$\lg Y = \lg \frac{M(x)}{M_{\text{tot}}} = (3 - D_b) \lg \frac{x}{x_m} \quad (5)$$

由式 (5) 可知, 在  $\lg[M(x)/M_{tot}] \sim \lg x$  坐标系中, 直线的斜率为  $3-D_b$ , 由此可得到冲击破碎块度分布的分形维数  $D_b$ , 不同应变率下试样破碎块度分布的分形维数见表 8。

表 8 不同工况下试样的分形维数  
Table 8 Fractal dimensions of samples under different cases

| 试样     | $D_b$ | 试样      | $D_b$ | 试样      | $D_b$ | 试样      | $D_b$ | 试样      | $D_b$ |
|--------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| D-0-4  | 1.28  | D-30-4  | 1.29  | D-45-4  | 1.25  | D-60-4  | 1.31  | D-90-4  | 1.25  |
| D-0-5  | 1.40  | D-30-5  | 1.33  | D-45-5  | 1.29  | D-60-5  | 1.22  | D-90-5  | 1.33  |
| D-0-6  | 1.28  | D-30-6  | 1.25  | D-45-6  | 1.26  | D-60-6  | 1.40  | D-90-6  | 1.33  |
| D-0-7  | 2.07  | D-30-7  | 1.78  | D-45-7  | 1.63  | D-60-7  | 2.05  | D-90-7  | 2.05  |
| D-0-8  | 1.89  | D-30-8  | 1.85  | D-45-8  | 1.57  | D-60-8  | 2.06  | D-90-8  | 2.04  |
| D-0-9  | 1.89  | D-30-9  | 1.87  | D-45-9  | 1.62  | D-60-9  | 2.16  | D-90-9  | 2.01  |
| D-0-10 | 2.54  | D-30-10 | 2.20  | D-45-10 | 2.14  | D-60-10 | 2.42  | D-90-10 | 2.22  |
| D-0-11 | 2.50  | D-30-11 | 2.14  | D-45-11 | 2.17  | D-60-11 | 2.46  | D-90-11 | 2.14  |
| D-0-12 | 2.56  | D-30-12 | 2.22  | D-45-12 | 2.15  | D-60-12 | 2.35  | D-90-12 | 2.25  |

基于表 8 得到分形维数与裂纹倾角的关系曲线, 如图 15 所示。试样分形维数随裂纹倾角的增大, 大体呈现先减小后增大的趋势。随着应变率的升高, 试样分形维数增大, 同时不同倾角的预制裂纹会影响试样分形维数。应变率较低时 ( $40 \text{ s}^{-1}$  左右), 分形维数受裂隙角度的变化影响较小, 分形维数与裂纹倾角关系曲线近乎水平, 此时分形维数分布在  $1.28 \sim 1.40$  之间 ( $D_b < 2$ ), 大尺寸碎块占比较大。随着应变率的提高, 分形维数增大, 并且分形维数受裂隙角度的变化影响比较明显。应变率为  $60 \text{ s}^{-1}$  左右时, 预制  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$  裂纹的试样分形维数普遍分布在  $1.85 \sim 2.05$  之间 ( $D_b$  在 2 左右), 各种尺寸碎块占比更接近, 而  $45^\circ$  试样分形维数最小 (平均值为 1.60), 试样破碎程度低于其他种类试样。应变率达  $80 \text{ s}^{-1}$  左右时, 不同裂纹倾角的试样分形维数差距更明显,  $0^\circ$  试样分形维数最高达 2.54, 同样  $45^\circ$  试样分形维数最低 (平均值为 2.15), 此时  $D_b$  普遍大于 2, 小尺寸碎块占比较多。

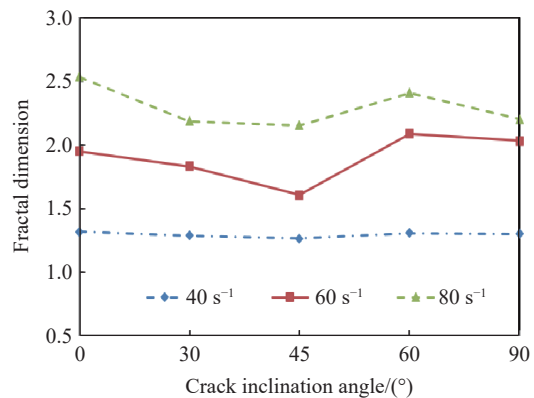


图 15 分形维数与裂纹倾角的关系

Fig. 15 Relationship between fractal dimension and crack dip angle

虽然岩石包含复杂内部结构, 不可避免地导致实验数据或多或少存在离散现象, 但本文中获得的裂纹倾角、动态力学参数、分形维数之间表现出了明显的规律性。可以看出, 分形维数-裂纹倾角关系曲线 (图 15) 与动态力学参数-裂纹倾角关系曲线 (图 11 和图 13) 形态有一定的相似性。相同应变率下, 不同裂纹倾角试样的动态压缩强度和动态弹性模量越高, 破碎程度越高, 小尺寸碎块占比越大, 分形维数越高。其中  $45^\circ$  试样的动态压缩强度和动态弹性模量相对最小, 该试样的破碎程度和分形维数相对最低。

分形维数与应变率的关系见图 16。分形维数随着应变率的提高而增大, 表现出良好的线性相关性 (决定系数  $R^2$  在  $0.9262 \sim 0.9816$  之间), 直线拟合公式如下:

$$D_b = p_1 \dot{\epsilon} + p_2 \tag{6}$$

拟合公式的系数见表 9, 拟合公式中  $0^\circ$  试样的系数  $p_1$  最大,  $45^\circ$  试样的系数  $p_1$  最小。这说明,  $0^\circ$  试样的破碎程度随应变率的变化比  $45^\circ$  试样明显, 即  $45^\circ$  试样在分形维数方面应变率效应最不显著。

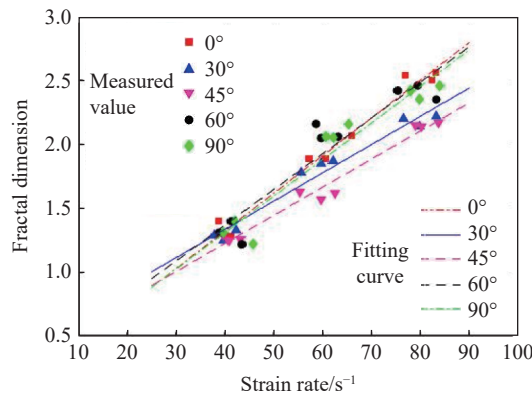


图 16 不同裂纹倾角试样分形维数随应变率的变化

Fig. 16 Variations of fractal dimensions of samples with different crack inclination angles with strain rate

表 9 拟合直线系数值

Table 9 The coefficient values of the fitting straight lines

| $\beta/(\text{°})$ | 0       | 30      | 45      | 60      | 90      |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $p_1/s$            | 0.02946 | 0.02212 | 0.02200 | 0.02793 | 0.02857 |
| $p_2$              | 0.1454  | 0.4509  | 0.3461  | 0.2513  | 0.1679  |

## 5 讨论

参照低应变率实验结果<sup>[9-11]</sup>,发现图 5 所示的大部分裂纹类型在低应变率( $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ )和中应变率下均会出现,但在低应变率下很少出现远场Ⅶ型、Ⅷ型裂纹,更极少出现离层裂纹。对比发现,低应变率范围内,随着应变率的提高,试样裂纹数量逐渐减少,最终呈现只有主裂纹扩展的破坏模式<sup>[11]</sup>,岩样由剪切破坏模式转化为拉伸破坏模式<sup>[10]</sup>。而在中应变率范围内,随着应变率的提高,不仅裂纹数量显著增多,而且裂纹种类更加丰富。由于岩石是各种矿物颗粒、矿物晶体胶结在一起的聚合物,试样受到冲击动载作用时,其内部预制裂纹继续发展,而试样内部随机分布的无序微裂纹也会向有序方向扩展,产生远场裂纹。动态冲击速率较低时,输入的能量相对较低,预制裂纹扩展不够充分,尤其与远场裂纹之间相互贯通较少,裂纹种类相对单一,试样碎块数量较少,较低应变率下试样甚至不发生宏观破坏。随着动态冲击速率的提高,输入能量提高,试样预制裂纹充分发育,远场裂纹大量产生并充分扩展,并出现垂直向的离层裂纹,各种裂纹相互贯通,使得试样裂纹数量较多,并且碎块尺寸较小,试样最终破碎程度加剧。裂纹萌生所需要的能量远高于裂纹扩展所需要的能量<sup>[24]</sup>,在本文较低应变率( $40 \text{ s}^{-1}$ 左右)实验条件下,基本只造成了原有预制裂纹的扩展,但在较高应变率实验条件下,输入试样的能量不仅造成了预制裂纹的充分扩展,而且萌生了远场裂纹,并且输入的能量越高,产生的远场裂纹越多。可见,低应变率( $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ )范围内和本次中应变率( $20 \sim 80 \text{ s}^{-1}$ )范围内试样破坏模式及裂纹数量随应变率、预制裂纹参数的变化规律是截然不同的,造成这种现象的原因也正是能量输入的形式和速率等因素决定的。上述低应变率( $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ )范围内的相关探讨基本处于准静态加载范畴,本次加载属于动态冲击范畴,这些实验现象的不同也充分展现出准静态加载和冲击加载实验结果的不同之处。

与沿长方形板状试样长度方向施加冲击动载的相关研究<sup>[18, 20]</sup>对比发现,试样产生的裂纹形态有诸多相同之处,比如裂纹扩展特征、种类划分基本相同,并且不同应变率下均出现了以拉伸裂纹为主或形成 X 状剪切破碎带为主的断裂形态,而且对于小倾角(预制裂隙与加载方向夹角小于  $60^\circ$ )试样,沿长度或宽度加载时主裂纹种类和形态极为相似。但沿长度方向和宽度方向冲击加载裂纹形态也有诸多不同之处,尤其当预制裂隙与加载方向夹角大于  $60^\circ$ 时( $90^\circ$ 试样最明显),沿长度方向加载时,除产生沿加载方向贯通试样的主裂纹外,还存在 1 条大体沿预制裂隙扩展、垂直加载方向贯通试样的主裂纹。在本文



实验条件下, 60°试样和 90°试样均未产生该新生裂纹。对比正方形板状试样<sup>[17, 21]</sup>和本文实验结果发现, 裂纹扩展形式不同之处主要体现在较低应变率时的 90°试样(应变率较高时主裂纹形态区别很小), 虽然这 2 类试样均未产生沿预制裂隙扩展、垂直加载方向贯通试样的主裂纹, 但较低应变率下, 90°试样产生剪切裂纹或拉伸裂纹的规律有些区别。分析原因可能为, 较大的预制裂隙角度对应力波在试样中传播影响较大, 试样形状不同或放置方式不同时, 应力波在试样内部来回传播次数不同, 尤其是沿长度方向加载时, 应力波沿试样长度来回传播较少次数试样就已产生新裂纹萌生。

众所周知, 对于含裂隙的不同几何尺寸有限尺度试样、含裂隙的无限大试样(试样外形尺寸超过预制裂纹一定范围), 在相同荷载条件、相同边界条件下内部裂纹的扩展路径可能是不同的, 导致其整体力学性质也是不一样的。本文中, 为了同时满足岩石动态力学性质和裂纹扩展研究选择了该尺寸的试样, 并且预制裂纹的长度、位置等参数是固定不变的。本文中所做的探讨初步揭示了该尺度红砂岩试样在中应变率条件下裂纹扩展模式、动态力学性质、破碎程度的一些特点及其与应变率的相关性问题, 对于更广泛尺度的含裂隙岩石应变率效应的相关研究还需要进行更丰富的实验。

## 6 结 论

对含不同倾角预制裂纹的有限尺寸红砂岩试样进行冲击加载, 获得了试样的裂纹扩展特征、破碎模式, 以及相关动态力学指标, 得到的主要结论如下。

(1) 冲击荷载作用下, 预制裂纹倾角与应变率对裂纹扩展路径及断裂模式有显著影响。不同角度预制裂隙试样的裂纹扩展模式有所区别, 并且随着应变率的提高, 试样大体上从 1 条拉伸裂纹的临界破坏演变成含 X 形剪切裂纹破碎带的破坏模式。

(2) 裂隙角度和应变率变化对试样的动态压缩强度、动态弹性模量影响显著, 这与裂纹类型以及远场裂纹萌生、扩展模式紧密相关。试样动态强度、动态弹性模量随预制裂隙倾角的变化趋势具有一定的相似性, 随着裂纹倾角的增大, 大体呈现先减小后增大的趋势。在本文实验条件下, 应变率不同时, 45°试样的动态压缩强度和动态弹性模量均为最低。

(3) 本文中获得的分形维数-裂纹倾角关系曲线与动态力学参数-裂纹倾角关系曲线形态有一定的相似性, 试样分形维数随裂纹倾角的增大大体呈现先减小后增大的趋势。当预制裂纹倾角为 45°时, 试样破坏时大粒径碎块所占比例相对更高, 分形维数最小, 试样破碎程度低于其他种类试样, 45°试样在分形维数方面的应变率效应相对最不显著。随应变率的提高, 不同预制裂纹倾角的试样碎块分布更加分散, 预制裂纹倾角对于岩石冲击破碎程度和分形维数的影响越明显。

(4) 相比低应变率( $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ )条件下的试样裂纹形态, 中应变率下会更多的出现远场Ⅶ型、Ⅷ型裂纹和离层裂纹, 并且低应变率( $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ )范围内和本次中应变率( $20 \sim 80 \text{ s}^{-1}$ )范围内试样破坏模式及裂纹数量随应变率的变化规律是截然不同的。

(5) 采用正方形板状试样、沿长方形板状试样长度或宽度方向冲击加载时, 裂纹种类划分基本相同, 主裂纹形态与应变率的关系大体相似, 但在预制裂隙与加载方向夹角更大(尤其 90°)时, 主裂纹形态有些区别。

## 参考文献:

- [1] 赵程, 幸金权, 牛佳伦, 等. 水-力共同作用下预制裂隙类岩石试样裂纹扩展试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(S1): 2823–2830. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1437.  
ZHAO C, XING J Q, NIU J L, et al. Experimental study on crack propagation of precrack rock-like specimens under hydro-mechanical coupling [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(S1): 2823–2830. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1437.
- [2] 李占金, 郝家旺, 甘德清, 等. 动载作用下磁铁矿石破坏特性实验研究 [J]. *振动与冲击*, 2019, 38(12): 231–238, 245. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.12.033.

- LI Z J, HAO J W, GAN D Q, et al. An experimental study on the failure characteristics of magnetite ore based on dynamic load [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(12): 231–238, 245. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.12.033.
- [3] 杨圣奇, 戴永浩, 韩立军, 等. 断续预制裂隙脆性大理岩变形破坏特性单轴压缩试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(12): 2391–2404. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2009.12.003.
- YANG S Q, DAI Y H, HAN L J, et al. Uniaxial compression experimental research on deformation and failure properties of brittle marble specimen with pre-existing fissures [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(12): 2391–2404. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2009.12.003.
- [4] 张亮, 王桂林, 雷瑞德, 等. 单轴压缩下不同长度单裂隙岩体能量损伤演化机制 [J]. *中国公路学报*, 2021, 34(1): 24–34. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2021.01.003.
- ZHANG L, WANG G L, LEI R D. Energy damage evolution mechanism of single jointed rock mass with different lengths under uniaxial compression [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(1): 24–34. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2021.01.003.
- [5] HUANG J F, CHEN G L, ZHAO Y H, et al. An experimental study of the strain field development prior to failure of a marble plate under compression [J]. *Tectonophysics*, 1990, 175(1/2/3): 269–284. DOI: 10.1016/0040-1951(90)90142-U.
- [6] REISA J, DA SILVA NUNES L C, DA C MATTOS H S. Crack propagation analysis of polymer mortars brazilian disc specimens containing cracks under compressive line loading [J]. *Advanced Materials Research*, 2015, 1129: 429–437. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1129.429.
- [7] ZHOU X P, CHENG H, FENG Y F. An experimental study of crack coalescence behaviour in rock-like materials containing multiple flaws under uniaxial compression [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(6): 1961–1986. DOI: 10.1007/s00603-013-0511-7.
- [8] 易婷, 唐建新, 王艳磊. 裂隙倾角及数目对岩体强度和破坏模式的影响 [J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(1): 98–106, 134.
- YI T, TANG J X, WANG Y L. Effect of fracture dip angle and number on mechanical properties and failure modes of rock mass [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(1): 98–106, 134.
- [9] 刘华博, 赵毅鑫, 姜耀东, 等. 含预制单裂隙石膏裂纹孕育与能量演化的应变率效应研究 [J]. *实验力学*, 2019, 34(3): 451–459. DOI: 10.7520/1001-4888-17-252.
- LIU H B, ZHAO Y X, JIANG Y D, et al. Strain rate effect on crack propagation and energy evolution of gypsum containing pre-existing single fracture [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2019, 34(3): 451–459. DOI: 10.7520/1001-4888-17-252.
- [10] 张天军, 景晨, 王喜娜, 等. 不同加载速率对含孔试样变形特性影响研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(4): 847–856. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2020.0254.
- ZHANG T J, JING C, WANG X N, et al. Experimental investigation of the effect of different loading rates on deformation characteristics of porous samples [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2021, 38(4): 847–856. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2020.0254.
- [11] 于利强, 姚强岭, 徐强, 等. 加载速率影响下裂隙细砂岩裂纹扩展试验及数值模拟研究 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(11): 3488–3501. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.1529.
- YU L Q, YAO Q L, XU Q, et al. Experimental and numerical simulation study on crack propagation of fractured fine sandstone under the influence of loading rate [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(11): 3488–3501. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.1529.
- [12] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(15): 2603–2608. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.15.001.
- XIE H P, PENG R D, JU Y, et al. On energy analysis of rock failure [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(15): 2603–2608. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.15.001.
- [13] 朱万成, 唐春安, 黄志平, 等. 静态和动态载荷作用下岩石劈裂破坏模式的数值模拟 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(1): 1–7. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.01.001.
- ZHU W C, TANG C A, HUANG Z P, et al. Numerical simulation on splitting failure mode of rock under static and dynamic loadings [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(1): 1–7. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.01.001.

- [14] XIE B J, AI D H, YANG Y. Crack detection and evolution law for rock mass under SHPB impact tests [J]. *Shock and Vibration*, 2019, 2019: 3956749. DOI: 10.1155/2019/3956749.
- [15] AI D H, ZHAO Y C, WANG Q F, et al. Experimental and numerical investigation of crack propagation and dynamic properties of rock in SHPB indirect tension test [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 126: 135–146. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.01.001.
- [16] 许金余, 刘石. 大理岩冲击加载试验碎块的分形特征分析 [J]. *岩土力学*, 2012, 33(11): 3225–3229. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.11.005.  
XU J Y, LIU S. Research on fractal characteristics of marble fragments subjected to impact loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(11): 3225–3229. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.11.005.
- [17] LI X B, ZHOU T, LI D Y. Dynamic strength and fracturing behavior of single-flawed prismatic marble specimens under impact loading with a split-Hopkinson pressure bar [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(1): 29–44. DOI: 10.1007/s00603-016-1093-y.
- [18] ZOU C J, WONG L N Y, LOO J J, et al. Different mechanical and cracking behaviors of single-flawed brittle gypsum specimens under dynamic and quasi-static loadings [J]. *Engineering Geology*, 2016, 201: 71–84. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.12.014.
- [19] 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.
- [20] YAN Z L, DAI F, LIU Y, et al. Numerical assessment of the rate-dependent cracking behaviours of single-flawed rocks in split Hopkinson pressure bar tests [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 247: 107656. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2021.107656.
- [21] 王奇智, 吴帮标, 刘丰, 等. 预制裂隙类岩石料板动态压缩破坏试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(11): 2489–2497. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0746.  
WANG Q Z, WU B B, LIU F, et al. Dynamic failure of manufactured similar rock plate containing a single fissure [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(11): 2489–2497. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0746.
- [22] 李地元, 胡楚维, 朱泉企. 预制裂隙花岗岩动静组合加载力学特性和破坏规律试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(6): 1081–1093. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.1089.  
LI D Y, HU C W, ZHU Q Q. Experimental study on mechanical properties and failure laws of granite with an artificial flaw under coupled static and dynamic loads [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(6): 1081–1093. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.1089.
- [23] 洪亮, 李夕兵, 马春德, 等. 岩石动态强度及其应变率灵敏性的尺寸效应研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(3): 526–533. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2008.03.012.  
HONG L, LI X B, MA C D, et al. Study on size effect of rock dynamic strength and strain rate sensitivity [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(3): 526–533. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2008.03.012.
- [24] 张旭龙, 张盛, 安定超, 等. 平行双裂缝圆盘试样裂纹扩展过程的尺寸效应试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(1): 115–128. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.1113.  
ZHANG X L, ZHANG S, AN D C, et al. Experimental study on the size effect of crack propagation process of disk samples containing parallel double pre-existing flaws [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(1): 115–128. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.1113.
- [25] DAI F, HUANG S, XIA K W, et al. Some fundamental issues in dynamic compression and tension tests of rocks using split Hopkinson pressure bar [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, 43(6): 657–666. DOI: 10.1007/s00603-010-0091-8.
- [26] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
LI X B. Rock dynamics fundamentals and applications [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [27] 鲁祖德. 裂隙岩石水-岩作用力学特性试验研究与理论分析 [D]. 武汉: 中国科学院研究生院 (武汉岩土力学研究所), 2010.  
LU Z D. Experimental and theoretical analysis on mechanical properties of fractured rock under water-rock interaction [D]. Wuhan, Hubei, China: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Wuhan Institute of Geomechanics), 2010.

- [28] 李银平, 杨春和. 裂纹几何特征对压剪复合断裂的影响分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(3): 462–466. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2006.03.004.  
LI Y P, YANG C H. Influence of geometric characteristics of pre-existing cracks on mixed mode fractures under compression-shear loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(3): 462–466. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2006.03.004.
- [29] 李夕兵, 李海波, 王明洋, 等. 岩石动力特性实验规程: T/CSRME 001—2019 [S]. 北京: 中国岩石力学与工程学会, 2019.  
LI X B, LI H B, WANG M Y, et al. Technical specification for testing method of rock dynamic properties: T/CSRME 001—2019 [S]. Beijing, China: Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering, 2019.
- [30] 王春, 熊宏威, 舒荣华, 等. 高温处理后含铜矽卡岩的动态力学特性及损伤破碎特征 [J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32(9): 2801–2818. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-36737.  
WANG C, XIONG H W, SHU R H, et al. Dynamic mechanical characteristic and damage-fracture behavior of deep copper-bearing skarn after high temperature treatment [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 32(9): 2801–2818. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-36737.
- [31] 李地元, 万千荣, 朱泉企, 等. 不同加载方式下含预制裂隙岩石力学特性及破坏规律试验研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(5): 1025–1035. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2021.0187.  
LI D Y, WAN Q R, ZHU Q Q, et al. Experimental study on mechanical properties and failure behaviour of fractured rocks under different loading methods [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2021, 38(5): 1025–1035. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2021.0187.
- [32] LI J C, LI N N, LI H B, et al. An SHPB test study on wave propagation across rock masses with different contact area ratios of joint [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 105: 109–116. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.12.011.
- [33] 张继春. 岩体爆破的块度理论及其应用 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2001.  
ZHANG J C. Fragment-size theory of blasting in rock mass and its application [M]. Chengdu, Sichuan, China: Southwest Jiaotong University Press, 2001.
- [34] 谢和平, 高峰, 周宏伟, 等. 岩石断裂和破碎的分形研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2003, 23(4): 1–9. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2132.2003.04.001.  
XIE H P, GAO F, ZHOU H W, et al. Fractal fracture and fragmentation in rocks [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2003, 23(4): 1–9. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2132.2003.04.001.
- [35] SHARAFISAF A M, ALIABADIAN Z, SHEN L M. Crack initiation and failure development in bimrocks using digital image correlation under dynamic load [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 109: 102688. DOI: 10.1016/j.tafmec.2020.102688.
- [36] 张人凡, 朱哲明, 王飞, 等. 冲击载荷作用下黑砂岩动态断裂参数的分形修正 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(7): 073101. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0051.  
ZHANG R F, ZHU Z M, WANG F, et al. Fractal correction of dynamic fracture parameters of black sandstone under impact loads [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(7): 073101. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0051.
- [37] 武仁杰, 李海波, 李晓锋, 等. 冲击载荷作用下层状岩石破碎能耗及块度特征 [J]. *煤炭学报*, 2020, 45(3): 1053–1060. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.0266.  
WU R J, LI H B, LI X F, et al. Broken energy dissipation and fragmentation characteristics of layered rock under impact loading [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(3): 1053–1060. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.0266.

(责任编辑 张凌云)