

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0336

## 定向断裂控制爆破下层理页岩的致裂机理\*

杨国梁, 毕京九, 董智文, 赵桐德, 赵建宇, 赵康朴

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为探究定向断裂控制爆破下层理页岩的爆破致裂机理, 采用切缝药包, 对四种切缝角度下的页岩立方体试件进行爆破试验, 采用数字图像相关技术(DIC)对页岩试件表面应变场的演化过程进行监测, 分析了微裂纹孕育至宏观裂纹贯通的内在机理, 并基于盒维数理论计算了不同切缝角度下页岩试件表面裂纹的分形维数, 采用 Matlab 软件对爆后块度的筛分方法进行了编程分析, 开发了全自动的粒径分析程序, 实现了粒径圈定的可视化。试验结果表明: 试件在不同比例爆距内的裂纹总密度与比例爆距之间存在负相关的幂函数关系, 切缝方向与层理弱面的夹角对微观损伤区域出现的位置影响显著, 当层理弱面与切缝方向平行时, 损伤区域多集中于层理弱面处, 对宏观裂纹的扩展路径影响显著, 易于形成单一裂纹; 层理弱面处的能量泄漏是造成页岩爆破破碎效果较差的重要因素, 当切缝方向与层理弱面一致时, 试件爆后的大块占比较高, 爆后块度的分形维数平均值在各组间最低, 仅为 0.7843, 而当切缝方向与层理面垂直时, 试件的爆后块度分布较为均匀, 爆后块度的分形维数平均值达到了 2.5233, 爆破破碎效果相对较好。

**关键词:** 页岩; 爆破; 裂隙场; 数字图像相关技术; 块度筛分程序; 分形维数

中图分类号: O389; TU452

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## Fracturing mechanism of bedding shale under directional fracture-controlled blasting

YANG Guoliang, BI Jingjiu, DONG Zhiwen, ZHAO Tongde, ZHAO Jianyu, ZHAO Kangpu

(School of Mechanics and Architectural Engineering, China University of Mining and Technology,  
Beijing 100083, China)

**Abstract:** The precise control of explosive energy to form an effective radial fracture network in shale is the key of shale gas dynamic extraction. In order to elucidate the damage and fracture mechanisms of shale under directional fracture-controlled blasting and establish a quantifiable relationship for shale damage and destruction under various blasting conditions, explosive tests were conducted on cubic shale specimens with four different fracture angles. The evolution of surface strain fields on the shale specimens was monitored using digital image correlation (DIC) technology. Additionally, the fractal dimensions of surface cracks on the shale specimens at different fracture angles were computed based on the box-counting theory. A programmed analysis of post-blast fragment size distribution was carried out using Matlab software, resulting in the development of a fully automated particle size analysis program with visual delineation of particle sizes. The experimental results demonstrate a negative power-law relationship between crack density and scaled distance within different scaled distances. The angle between the fracture direction and the weak plane of the bedding significantly influences the location of micro-damaged areas. Particularly, when the weak plane of the bedding is parallel to the fracture direction, damaged areas tend to concentrate along the weak plane, affecting the macrocrack propagation path and favoring the formation of a single crack. Energy dissipation at the weak planes of the bedding is identified as a crucial factor leading to suboptimal fracturing effects in

\* 收稿日期: 2023-09-20; 修回日期: 2024-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(51934001)

第一作者: 杨国梁(1979—), 男, 博士, 副教授, yanggl531@163.com

通信作者: 毕京九(1995—), 男, 博士研究生, bijingjiu@126.com

shale blasting. When the fracture direction aligns with the weak plane of the bedding, a higher proportion of large fragments is observed in the post-blast specimens. The average fractal dimension of fragment size distribution is the lowest among all groups, measuring only 0.784 3. Conversely, when the fracture direction is perpendicular to the weak plane of the bedding, the distribution of post-blast fragment sizes becomes more uniform. The average fractal dimension of fragment size distribution increases to 2.523 3, indicating relatively better blasting fragmentation results in such scenarios.

**Keywords:** Shale; blasting; fracture field; digital image correlation technology; blockiness screening program; fractal dimension

随着页岩气压裂技术发展,通过爆破产生高能气体进行储层压裂有望成为一种新的增产手段<sup>[1-2]</sup>。增效射孔技术将射孔与压裂作业有机结合,提高了油气井的注采效率,在低渗透率油气井及页岩气开采领域有重要应用前景。爆炸瞬间释放的能量巨大,精准控制爆炸能量在页岩中形成有效的径向缝网,难度较大。解决上述问题的关键是揭示页岩在定向聚能爆破下的损伤破裂机理,建立对应不同爆破条件下页岩损伤破坏的量化关系。

页岩作为一种沉积岩,具有层理构造,从而具有力学各向异性,层理弱面的位置对其力学特性和断裂行为影响显著<sup>[3-9]</sup>。衡帅等<sup>[10]</sup>通过三种不同加载角度下页岩的静态断裂试验,研究了页岩断裂韧度的各向异性,结果发现层理面的开裂和裂纹扩展路径的偏移是导致页岩断裂韧度各向异性的主要原因。李玉琳<sup>[11]</sup>对不同加载角度下页岩的三点弯曲破坏过程进行了模拟研究,发现页岩主裂纹的扩展路径有一定随机性,原始层理裂缝对试样裂纹主扩展的影响是局部的,主要与弯曲应力竞争,两者的竞争机制决定了裂纹的最终扩展路径。Shi 等<sup>[12]</sup>对不同加载角度(层理面与加载方向之间的夹角)下的页岩 NSCB 试样进行了动态三点弯试验,计算了不同加载角度下黑色页岩的动态 I 型断裂韧度,结果表明,当主裂纹扩展方向与层理面垂直时,试件断裂韧度出现最大值,而当预制裂纹方向与层理面平行,则出现最小值,其余各组则处于中间值。与 Shi 等的研究结果相同,诸多学者<sup>[13-15]</sup>在研究中也发现了层理角度对层状岩体断裂特性的影响。

在页岩储层增效射孔技术的应用中,保证层位操控精准的同时,应采用有效手段控制爆破能量释放,力求解放储气层,形成有效裂隙网络。定向断裂控制爆破,又称聚能爆破,是一种集中爆破能量从而定向破碎岩体的技术<sup>[16]</sup>。杨仁树等<sup>[17]</sup>通过试验研究发现,在实施聚能爆破时,爆破所产生的应力波与爆生气体优先沿聚能方向传播。王雁冰等<sup>[18]</sup>根据弹性波动理论,分析了切缝药包爆破下的爆破损伤区范围。岳中文等<sup>[19]</sup>对聚能爆破下层理对爆生裂纹的扩展过程影响进行了试验研究,结果表明,层理面对主裂纹的扩展具有阻碍作用,而次生裂纹的扩展长度则会随着切槽方向与层理方向夹角的增大而增加。

在对岩体爆破后的破碎程度研究方面,目前多通过分形维数来定量研究<sup>[20]</sup>。黄志辉<sup>[21]</sup>基于分形理论和计算机图像识别技术建立了确定爆堆块度分形维数的照片处理方法。骆浩浩等<sup>[22]</sup>通过分形理论、摄影方法与计算机图像识别技术对扇形中深孔爆破中的块度分布以及分形破碎模型进行了研究。爆后块度分形维数反映了不同爆破条件下岩体损伤破坏的量化关系,因此储层压裂的效果可以通过爆后块度的分形维数来定量评价。

综上所述,为定量评价不同爆破条件下页岩的损伤发育水平,本文以我国页岩气主产区四川长宁-威远地区页岩为研究对象,设计 4 种爆破工况下的聚能爆破试验,通过数字图像相关技术获取页岩试件表面应变场的演化过程,并结合自编的块度筛分程序对页岩爆后块度分布进行筛分评价,从表面应变场、表面裂纹密度分布、表面裂纹场分形维数、破碎块度分布与破碎块度分维入手,由面内裂纹分布深入至岩体内空间裂隙网络,深入揭示页岩在定向聚能爆破下的损伤破裂机理。

## 1 试验方案

试验所用页岩取自四川长宁-威远地区的页岩露头,页岩的基础物理力学参数如表 1 所示,其中层理倾角为加载方向与层理面法向之间的夹角。

表 1 页岩基础物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of shale

层理倾角/(°)	纵波波速/(m·s <sup>-1</sup> )	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	单轴抗压强度/MPa	单轴抗拉强度/MPa
0	3050.93	2.53	11.604	130.44	3.189
30	3100.53	2.48	11.720	104.41	3.753
60	3184.79	2.57	11.331	93.40	4.475
90	3212.55	2.55	12.373	114.18	4.561

参考杨仁树等<sup>[23]</sup>的研究经验, 本文试件设计为边长 200 mm 的立方体试件, 试件中心位置的炮孔深度 150 mm, 直径 10 mm, 同时采用了高速摄像机对试件表面裂隙场进行监测, 并运用数字图像相关技术 (digital image correlation, DIC) 对试件表面应变场的演化过程进行分析。

为对比分析层理面位置对页岩破碎的影响, 本文以两类页岩试件作为试验对象, 一类为炮孔方向与层理面垂直的页岩试件, 记为 B-C0; 一类为炮孔方向与层理面平行的页岩试件, 定义药包的切缝方向与层理面走向之间的夹角为切缝角度, 设置切缝角度 0°、45°和 90°下的 3 组试件, 分别记为 B-0、B-45 与 B-90, 各组试件层理方向与切缝角度设置如图 1 所示。

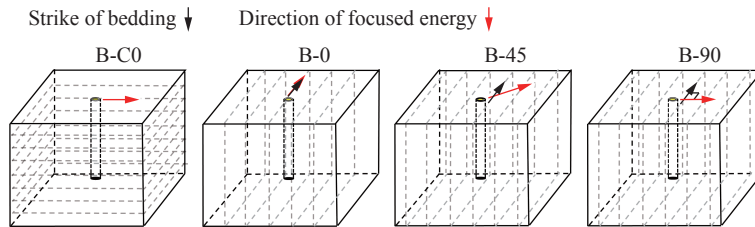


图 1 页岩切缝角度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of shale fracture angle

本试验采用切缝药包作为聚能爆破装药结构, 切缝管材质为钢, 切缝管长度为 100 mm, 外径 8 mm, 切缝宽度为 1 mm。切缝药包采用一发 8 号电子雷管, 主装药为 0.7 g 黑索金, 爆速 8750 m/s; 起爆药为 0.3 g 叠氮化铅, 爆速 5300 m/s。封堵采用细砂, 并滴入 502 胶进行凝固, 提高封堵质量, 装药结构如图 2 所示。

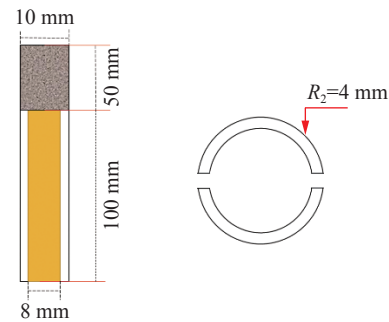


图 2 装药结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of explosive loading structure

## 2 不同切缝角度下表面裂纹场与表面应变场

### 2.1 表面裂纹场随比例爆距的变化

在爆后对页岩试件表面照片进行二值化操作, 即可得到页岩在不同切缝角度下的炮孔周围的表面裂纹分布图片, 裂纹场的二值化图像及各组典型试件裂纹场图像如图 3 所示。

为定量研究不同炮心距下页岩试件表面裂纹场的分布规律, 定义炮心距  $r$  与炮孔半径  $r_h$  的比值为无量纲比例爆距  $r/r_h$ 。通过对表面裂纹分布的二值化矩阵进行统计计算, 即可得到在不同比例爆距下表面裂纹面积占区域面积的百分比, 即裂纹密度  $C$ 。分析区域示意图如图 4 所示, 本节取比例爆距为 3~19 下的表面区域进行分析。

对表面裂纹照片进行二值化操作, 计算不同比例爆距内的裂纹面积与总面积的比值, 得到的各切缝角度下典型试件的裂纹密度  $C$  随比例爆距的变化曲线如图 5 所示。

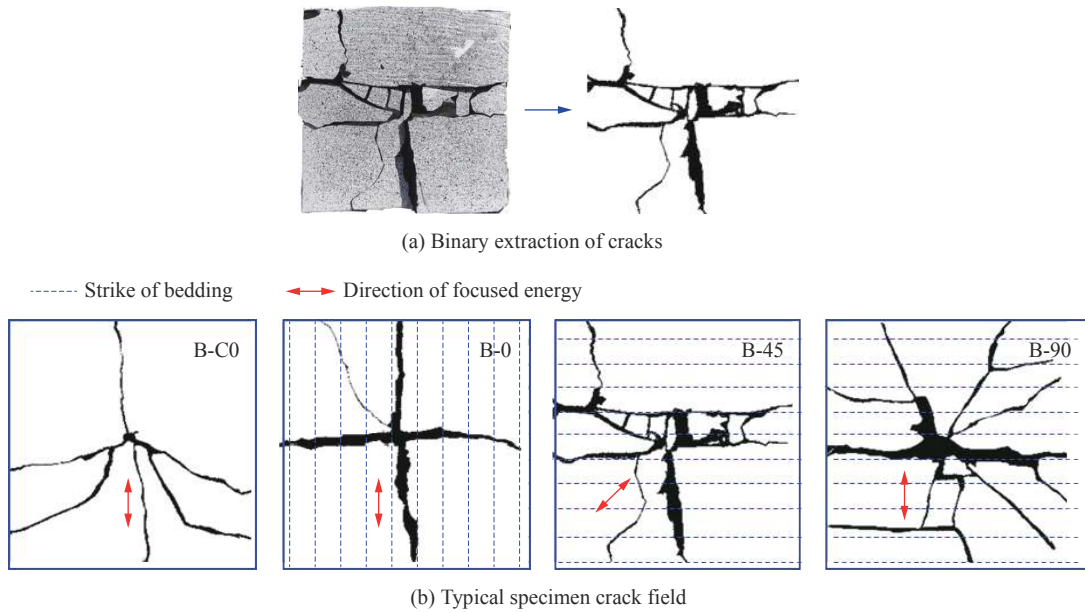


图 3 不同切缝方向下典型试件的表面裂纹分布

Fig. 3 Surface pattern distribution of typical specimens with different cutting directions

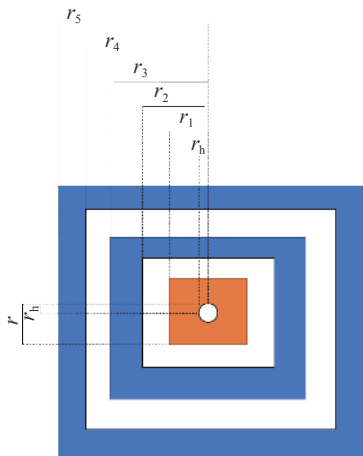


图 4 表面裂纹场分析区域

Fig. 4 Surface crack field analysis area

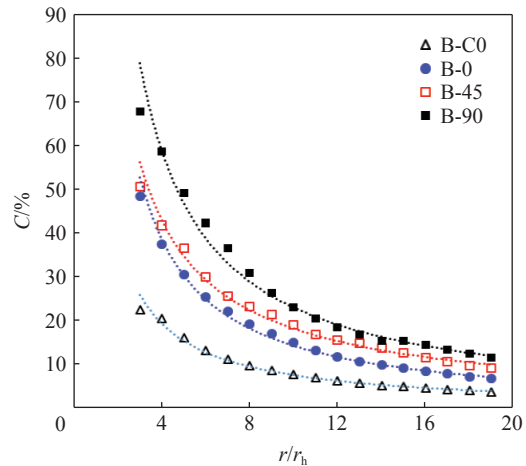


图 5 裂纹密度随比例爆距的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of crack density with proportional explosion distance

由图 5 可见, 试件在不同比例爆距  $r/r_h$  内的裂纹密度  $C$  与比例爆距之间存在负相关的幂函数关系, 拟合关系式与拟合相关系数  $R^2$  如下式所示:

$$\begin{cases} C = 240.93(r/r_h)^{-1.017} & (\text{B-C0}, R^2 = 0.989\ 2) \\ C = 156.48(r/r_h)^{-0.932} & (\text{B-0}, R^2 = 0.990\ 8) \\ C = 172.43(r/r_h)^{-1.078} & (\text{B-45}, R^2 = 0.995\ 5) \\ C = 79.672(r/r_h)^{-1.016} & (\text{B-90}, R^2 = 0.993\ 7) \end{cases} \quad (1)$$

可见  $C$  随着比例爆距的增加迅速降低, 但各组间存在显著的差异, 相对其他切缝角度下的试件, B-C0 试件的裂纹总密度最低, 这是由于 B-C0 试件在爆破破碎时破裂面沿水平层理面开展, 爆破能量从水平层理面泄漏导致整体爆破效果不佳; 而 B-0 组试件的裂纹总密度也相对较低, 由于其切缝方向与层理面平行, 同样导致爆破能量沿层理弱面逸散, 而切缝角度为  $45^\circ$  和  $90^\circ$  时, 层理弱面与切缝角度间存在一定

夹角,一定程度上降低了爆破能量沿层理弱面的逸散现象,提高了爆破的作用效果。进一步提取比例爆距为 0~5、5~10 与 10~15 范围内(分别记为 R5、R10 和 R15)的区域裂纹密度  $C_p$  进行横向对比,如图 6 所示。

可见在不同的比例爆距区间内,试件的区域裂纹密度  $C_p$  的变化受切缝角度影响显著。由岩体爆破的内部作用理论,岩体爆破后会在炮孔周围形成压碎区、破裂区和振动区,通常情况下,压碎区半径约为装药半径的 5 倍范围内,该区域由于受到药包爆炸产生的强压缩波而接近于粉碎,由上图中的统计结果可见, B-90 组典型试件在压碎区的  $C_p$  值最大,达到了 49.16%,压碎区破碎最为显著, B-C0 组试件最小,为 16.32%;当比例爆距在 5~10 的范围内时, B-C0 组试件的  $C_p$  仍然最小,为 5.03%, B-45 组与 B-90 组较为接近,分别为 13.41% 与 14.43%;当比例爆距进一步增加到 10~15 时,这一比例爆距区间内各组的  $C_p$  的差值开始减小,但 B-90 组的爆破效果仍为最优。

## 2.2 表面裂隙场的分形特征

表面裂纹的分形维数定量反映了试件的裂隙场发育程度<sup>[23]</sup>,因此可由分形方法定量研究不同切缝角度下页岩试件的破坏特征。盒维数方法是目前研究表面裂纹分形维数的主要方法之一,计算简单方便,应用广泛。盒维数可由下式计算:

$$D_c = -\lim_{r_c \rightarrow 0} \lg N_c(r_c) / \lg r_c \quad (2)$$

式中:  $r_c$  为覆盖裂纹的盒子边长,  $N_c$  为覆盖所有裂纹所需的最小盒子个数,  $D_c$  为损伤裂纹分形维数。

参考文献 [23] 的程序,进一步对图 3 中各典型试件的裂纹分布的二值化图像进行处理,可得到各试件表面裂隙的盒维数,结果如图 7 所示:各试件的表面裂隙场分布具有显著的分形维数特征, B-C0 组试件的表面裂隙盒维数较其他组更低,各切缝角度试件的表面裂隙盒维数在 1.337~1.537 之间,变化趋势与裂纹密度变化一致,随着切缝角度的增加显著提高,定量反映了试件表面裂隙的发育情况。

## 2.3 表面应变场的演化过程

为深入研究不同切缝角度下页岩的表面应变场演化过程,本文使用 PHOTRON 高速摄像机 Fastcam SA1.1,对不同切缝角度试件切缝区域的裂纹扩展过程进行了监测,相机拍摄频率为 50 kHz。采用 VIC-2D 软件对所摄照片进行处理,计算得到页岩试件表面应变场的演化过程。

通过对各切缝角度下页岩试件表面的应变场处理,可见一特别现象:即宏观裂纹的起裂与扩展滞后于应力波的传播过程。在演化过程中存在两个破裂阶段,第一阶段是爆破应力波传播造成的微裂隙发育阶段,在这一阶段中,由于炸药爆轰,爆轰波作用于炮孔壁,在炮孔壁中激起冲击波并在试件内部传播并逐渐衰减为应力波,当应力波传到层理界面时,就会产生反向的拉伸应力波,当拉应力超过层理弱面的粘聚力后,即会造成层理面处的局部拉伸破坏,形成损伤的发展区域;第二阶段是宏观裂纹的贯通阶段,随着爆生气体的膨胀,透过切缝管形成“高压射流”,在炮孔周围形成宏观主裂纹,伴随着爆生气体的“气楔作用”,宏观裂纹迅速起裂并贯通,导致岩石彻底破坏,而第一阶段形成的损伤区域对宏观裂纹的发展具有导向作用,试件内部形成通过裂隙损伤区域的宏观断裂带。DIC 技术可以形象地展现这一微观损伤累积与宏观裂纹贯通的过程,如图 8 所示,其中左侧红虚线框标注范围为分析区域。

由图 8 可见,在切缝角度为 0°时,炸药爆轰后,试件 DIC 分析区域内存在多处应变集中区域,即黑色虚线框内。随着应力波的传播,这一应变集中区域的范围也逐步扩展,在 1560  $\mu$ s 时,由于爆生气体的膨胀,促使径向主裂隙扩展,可见应变集中区域开始出现连接,损伤区域对宏观裂隙扩展的导向作用显著。

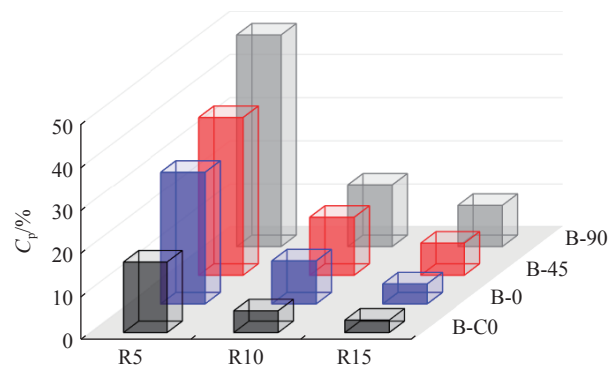


图 6 不同比例爆距的区域裂纹密度变化

Fig. 6 Crack density changes in the explosion zone with different proportions

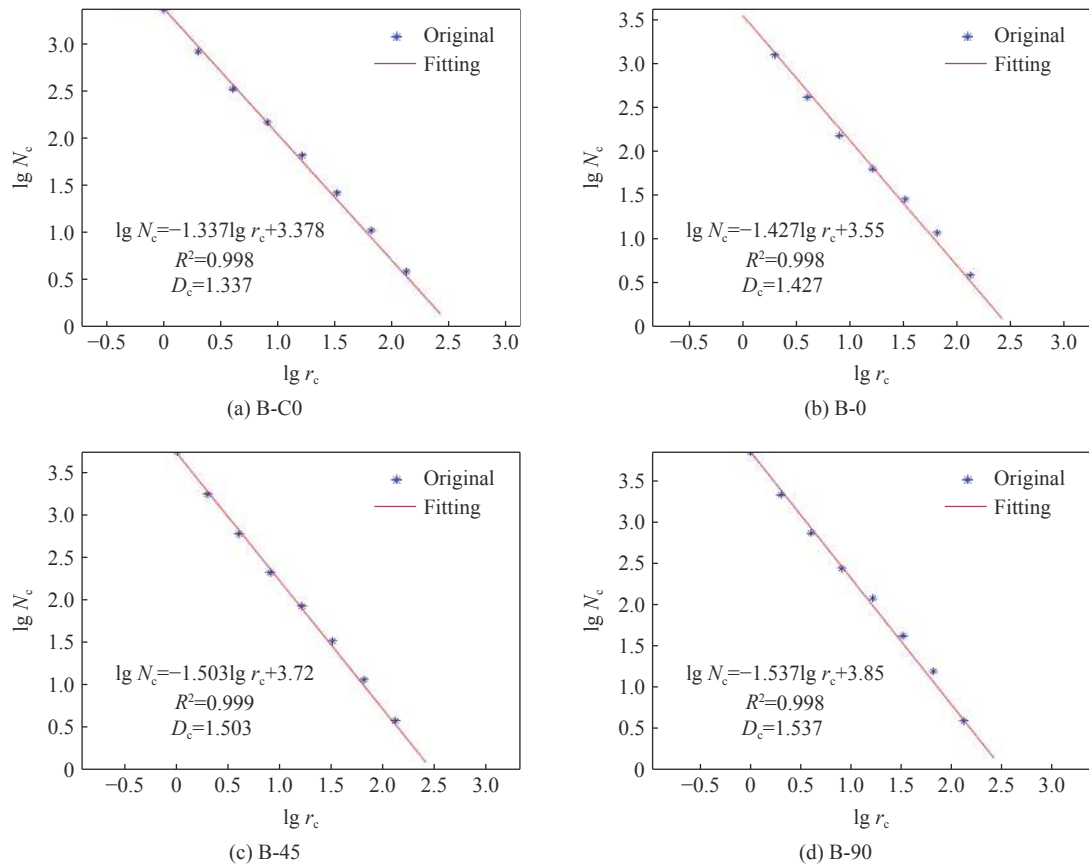


图 7 各切缝角度下典型试件的盒维数拟合曲线

Fig. 7 Box dimension fitting curves of typical specimens at various slit angles

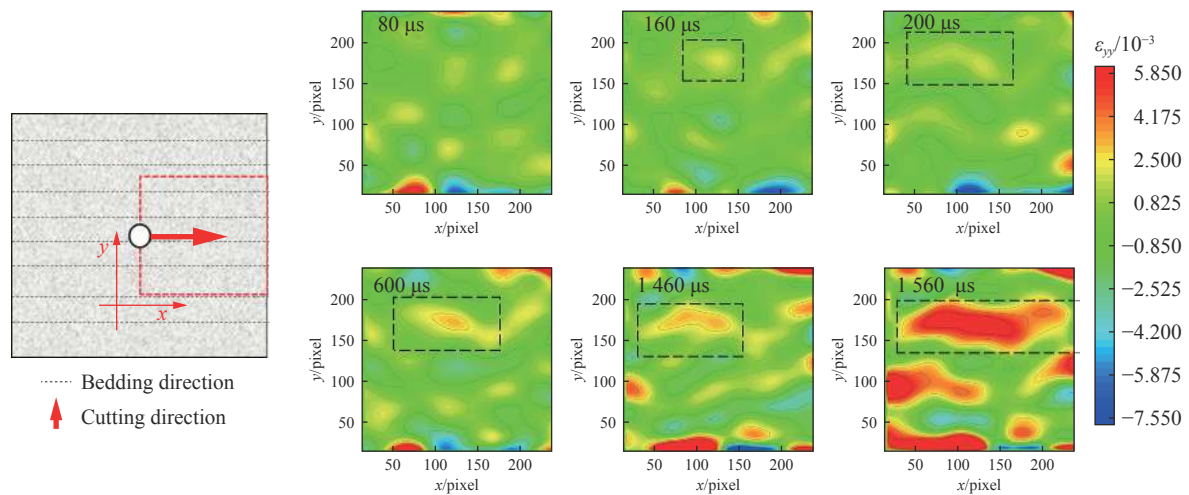


图 8 试件 B-0 纵向应变场演化过程

Fig. 8 Longitudinal strain field evolution process of typical specimens of group B-0

当切缝方向与层理弱面存在夹角时, 试件主裂纹的扩展路径则稍显复杂, 不仅受应力波在层理弱面的反射影响, 同时受应力波传播所致的基质压剪破坏区影响, 以 B-90 组典型试件为例, 如图 9~图 11 所示。由图 9 中横向应变场(x 方向)的演化过程可见, 在炸药爆轰后, 如黑色虚线框内所示, 试件横向应变场出现多处沿层理方向的应变集中区域, 说明应力波在层理弱面处的反射造成了微观层理面的张开, 当层理面完全张开后, 后续爆生气体静作用所产生的宏观裂纹就难以穿过层理弱面, 这也是导致如图 3(b)

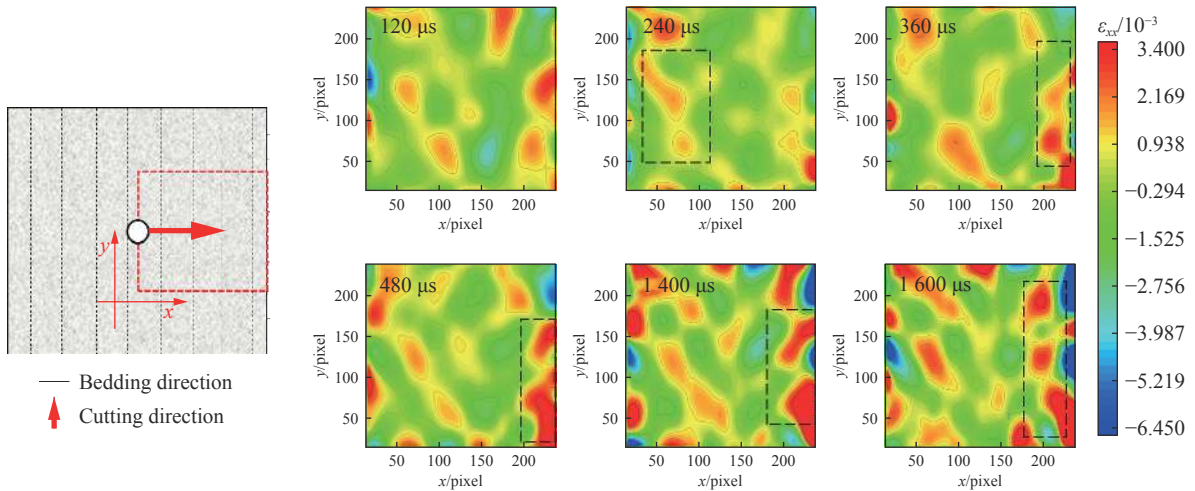


图 9 试件 B-90 应变场演化过程( $\epsilon_{xx}$ )

Fig. 9 Evolution process of strain field ( $\epsilon_{xx}$ ) of typical specimens of group B-90

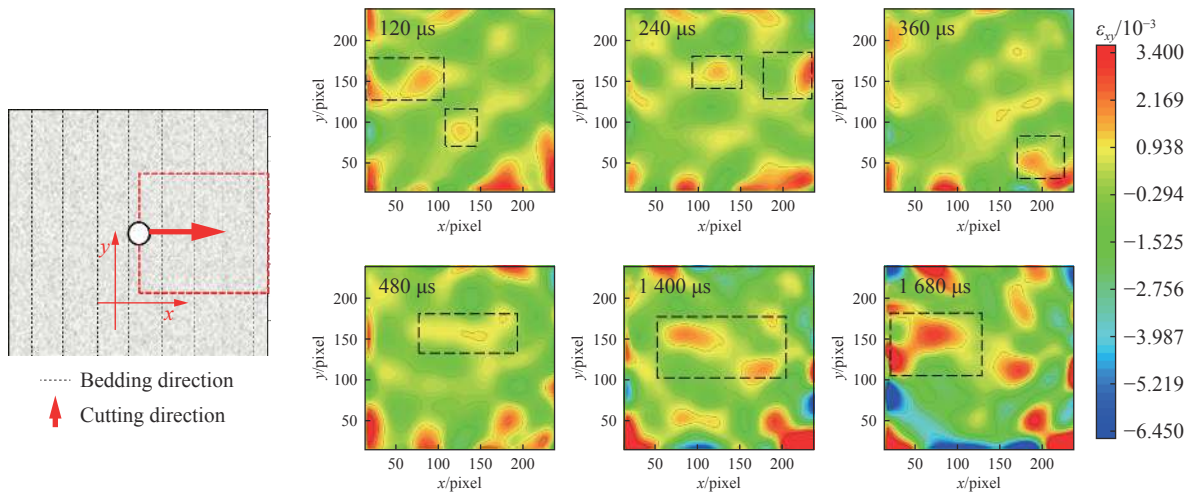


图 10 试件 B-90 应变场演化过程( $\epsilon_{xy}$ )

Fig. 10 Evolution process of strain field ( $\epsilon_{xy}$ ) of typical specimens of group B-90

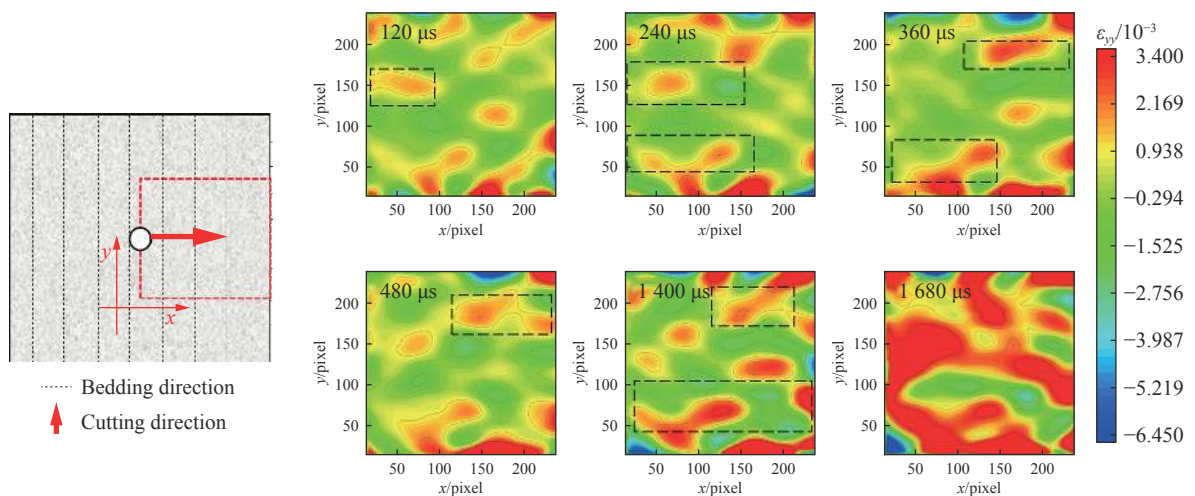


图 11 试件 B-90 应变场演化过程( $\epsilon_{yy}$ )

Fig. 11 Evolution process of strain field ( $\epsilon_{yy}$ ) of typical specimens of group B-90

中 B-45 与 B-90 组试件也存在沿层理弱面宏观断裂带的根本原因。不同于 B-0 组试件的是, 当切缝方向与层理弱面存在夹角时, 试件不仅存在层理面的局部拉伸破坏区, 同时存在压剪应力导致的裂隙发育区, 如图 10 中黑色虚线框标注所见, 试件存在多处剪切应变的集中区域, 这些压剪损伤区域与层理弱面处的拉伸损伤区域共同影响了主裂纹扩展路径, 如图 11 中 1 680  $\mu\text{s}$  时宏观裂纹贯通的拉伸应变场可见, 贯通区域的位置即是拉伸损伤区域与压剪损伤区域的集合, 这也是导致 B-45 与 B-90 组试件表面裂隙场较其他组更为发育的根本原因。

图 12 显示: 在切缝药包爆破后, 并没有立即产生宏观裂隙, 而是在爆生气体膨胀后发生宏观断裂, 可见 1 700  $\mu\text{s}$  后炮烟冲出炮孔, 随之宏观裂纹逐步贯通。这进一步验证了前文的分析。

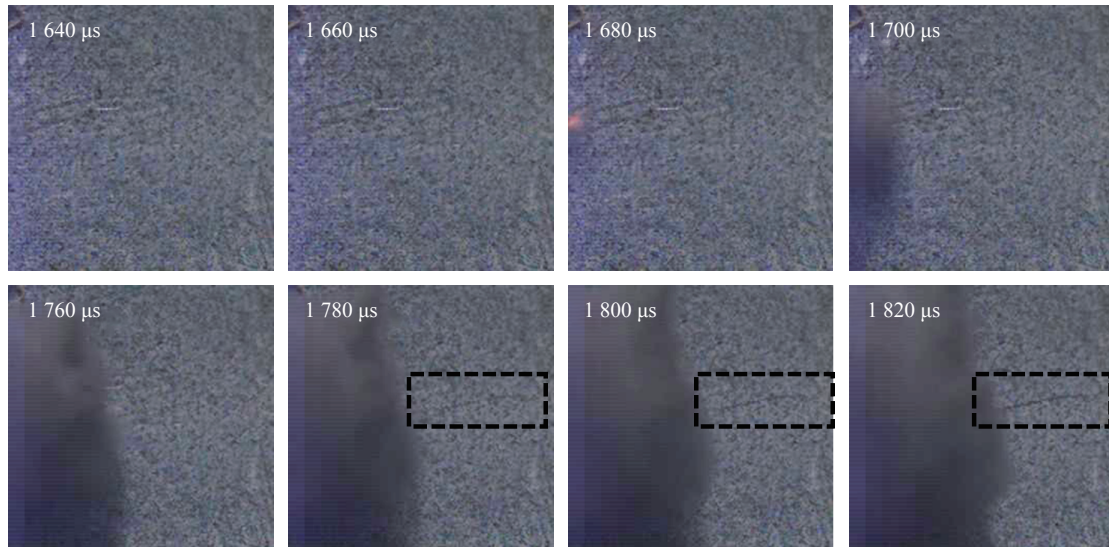


图 12 试件 B-90 宏观裂纹的扩展过程

Fig. 12 Macroscopic crack expansion process of typical specimens of B-90 group shale

切缝方向与层理弱面的夹角对微观损伤区域出现的位置影响显著, 当层理弱面与切缝方向平行时, 损伤区域多集中于层理弱面处, 由于层理弱面的粘聚力差, 易张开滑移, 造成试件所累积应变能的集中释放, 进而造成损伤累积区域沿层理显著发育, 进而影响爆破第二阶段后的宏观裂纹扩展过程, 形成单一裂纹, 对于页岩的增效射孔作业无益, 难以形成复杂的裂隙网络, 因此应当避免在这一方向进行射孔作业。

### 3 碎块分形分析

#### 3.1 块度筛分方法及分形计算原理

本文采用拍照法对爆堆的各处进行拍照, 岩块的筛分与计数工作均由计算机完成, 如图 13 所示。利用图像处理软件结合自编 Matlab 程序计算各级岩块的数量。该程序可进行全自动的粒径分析, 实现粒径圈定的可视化, 获取与块体破碎相关的重要参数和特征。然后进行分形计算。

在拍摄碎块时, 将碎块放置在背光的白色板子上, 防止拍照时由于光线造成的阴影问题, 同时在碎块空隙处放置乒乓球作为参照物, 在拍摄照片后通过软件对乒乓球直径的像素尺寸进行抓取, 然后获得照片的空间分辨率, 并输入到程序中, 处理后得到试件的块度分布。每组试验选择了相近的 7 个特征尺度, 用于碎块的筛分。

既往学者对照片法分析块度的研究多集中于得到块度的分布<sup>[21,24]</sup>, 对特征粒径的圈定缺乏研究。本文通过 Matlab 软件对粒径的圈定功能进行编程: 首先, 通过边缘切割和连通域分析, 采用更新后的 Sobel 函数进行边缘检测, 以提高块度图像的处理精度和效果; 然后, 利用 Matlab 中的 regionprops 函数和 Bounding box 功能, 对获得的各个连通域进行标记和特征提取, 得到各个连通区域的外接矩形的长和

宽, 进一步通过计算外接矩形的对角线长度, 即可得到每个连通域的特征粒径。

根据文献 [21], 岩体破碎的分形维数  $D_f$  可由碎块的线性特征尺寸  $\delta$  (本文中为筛孔特征尺寸) 和大于该尺寸的碎块数  $N(r)$  给出:

$$N(\delta) \propto \delta^{-D_f} \quad (3)$$

对上式取对数, 可得:

$$\ln N = D_f \ln(1/\delta) + A \quad (4)$$

式中:  $A$  为拟合常数。通过最小二乘法拟合  $\ln N$  与  $\ln(1/\delta)$  可以获取块度的分形维数  $D_f$ 。

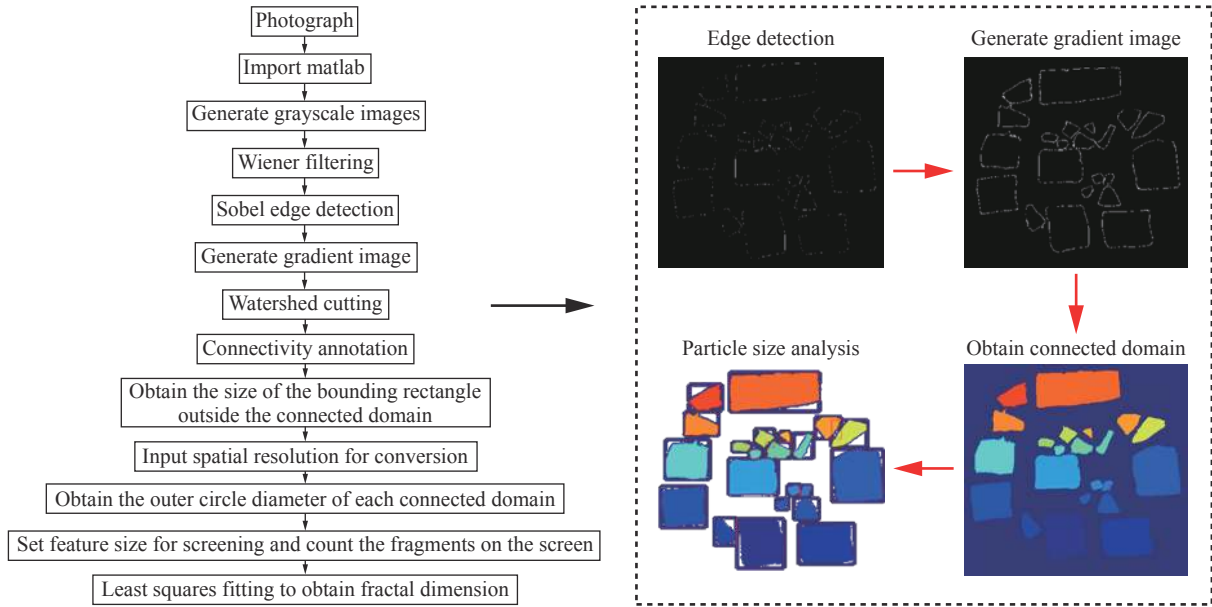


图 13 块度分析程序流程图

Fig. 13 Blockiness analysis program flow chart

### 3.2 不同切缝角度下试件爆后块度分布特征

本程序分析所得到的块度为碎块的平面投影面积, 因此筛下的累积分量(即通过率)为粒径对应的平面面积占比, 由此得到的各试件的爆破块度分布曲线如图 14~图 17 所示。为保证试验的有效性, 每种加载角度下的爆破试验重复两次, 如 B-C0 组两次爆破试件分别记为 B-C0-1 和 B-C0-2。

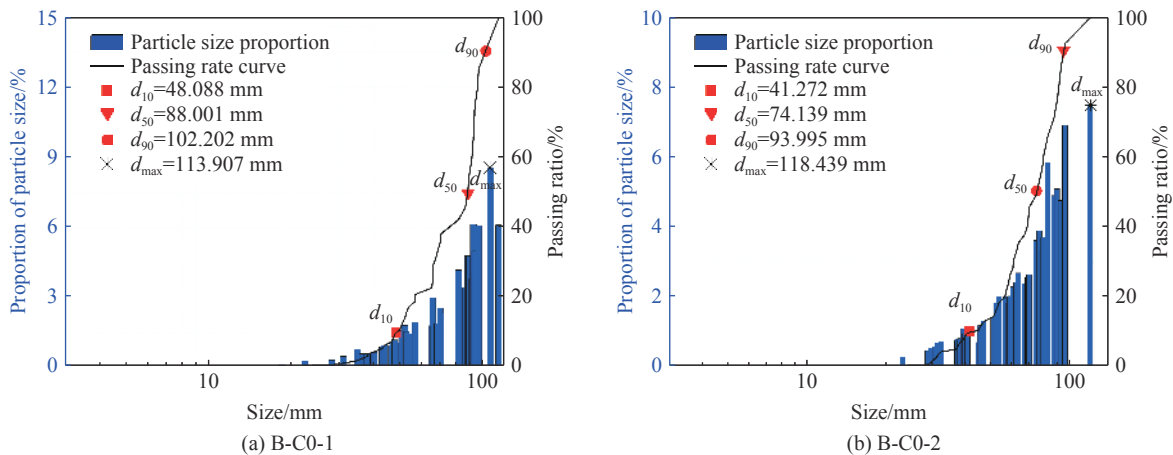


图 14 试件 B-C0 块度分布特征

Fig. 14 Fragment size distribution characteristics of specimens B-C0

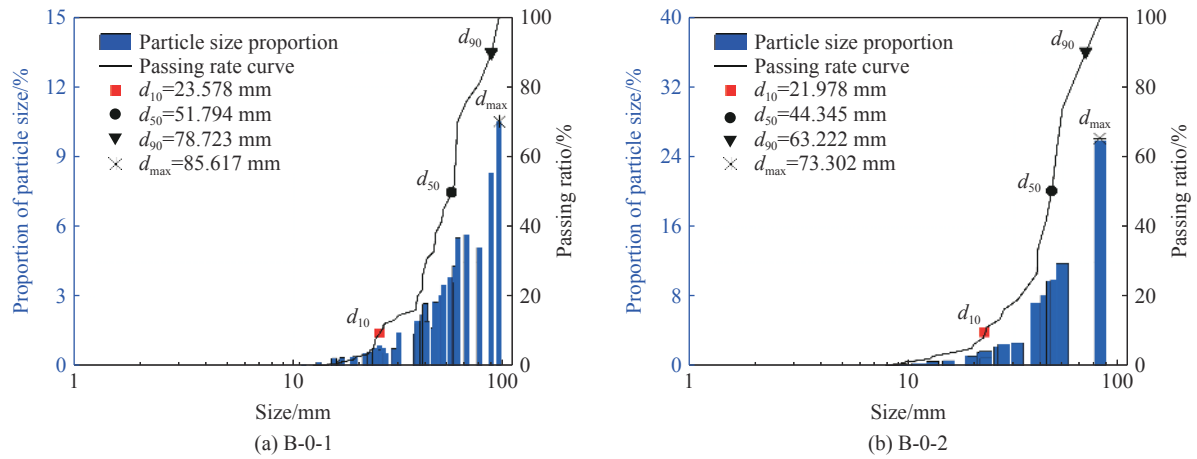


图 15 试件 B-0 块度分布特征

Fig. 15 Fragment size distribution characteristics of specimens B-0

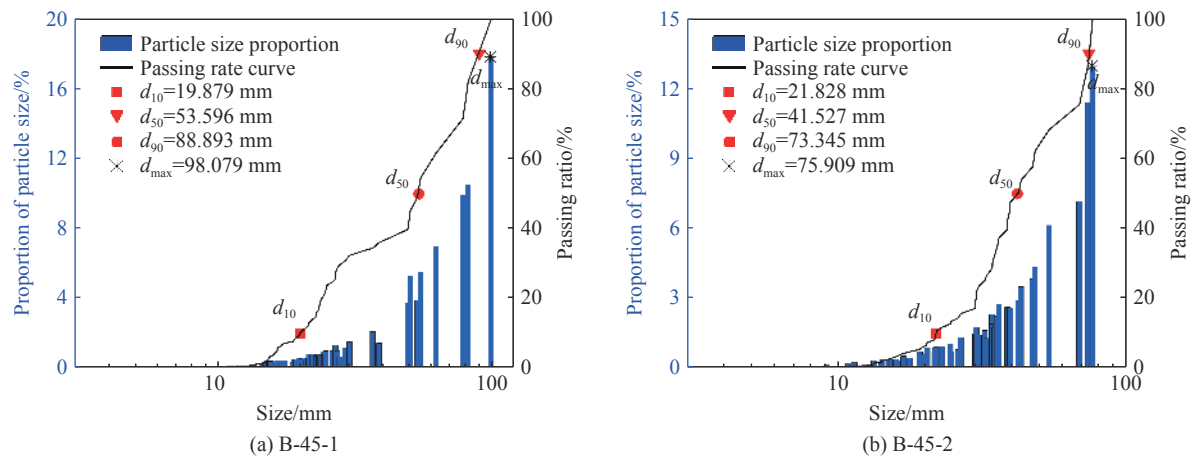


图 16 试件 B-45 块度分布特征

Fig. 16 Fragment size distribution characteristics of specimens B-45

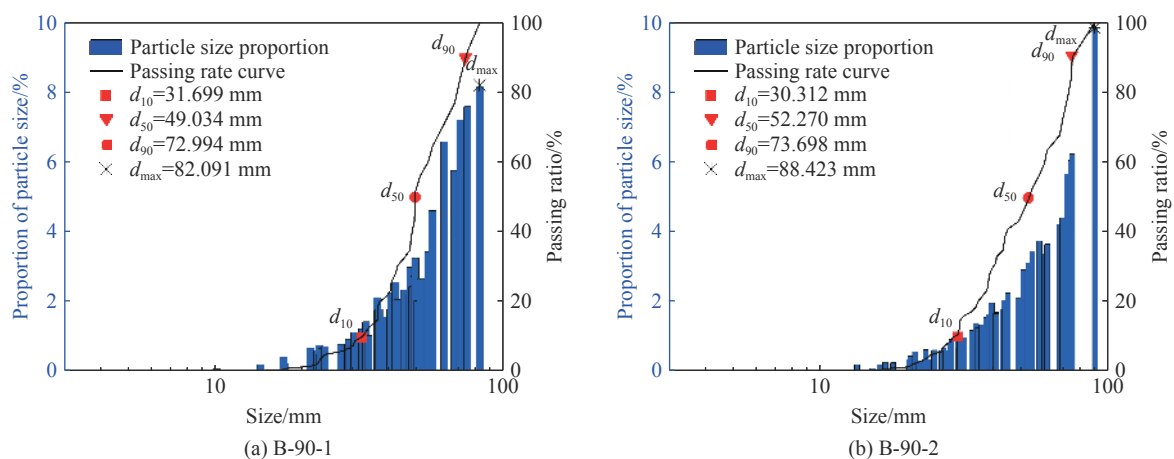


图 17 试件 B-90 块度分布特征

Fig. 17 Fragment size distribution characteristics of specimens B-90

由分布曲线可见, 不同切缝角度下页岩的块度分布差异较大, 为方便定量分析试件的爆后块度分布, 参照土力学的颗粒级配曲线的评价标准, 在筛分过程中引入了  $d_{10}$ 、 $d_{50}$ 、 $d_{90}$  与  $d_{max}$  四个参数<sup>[23]</sup>, 对应

为筛下累积占比为 10%、50%、90% 以及该试件在爆后的最大块度所对应的特征粒径, 并引入块度均匀系数  $C_U(d_{90}/d_{50})$  来评价块度分布的均匀性,  $C_U$  越大, 说明块度分布曲线越均匀。同时, 为了反映各破碎阶段的粒径是否连续, 进一步引入曲率系数  $C_C(d_{50}d_{90}/(d_{90}d_{10}))$  对粒径分布的连续性进行评价, 进行评价,  $C_C$  越小, 说明碎块集中在细粒端, 相应地就越破碎,  $C_C$  越大, 说明细粒端块度有缺失, 碎块集中于粗粒端, 大块率相对越高, 破碎效果相对较差。

提取图 18 中各试件的评价参数, 并计算各试件的爆后块度均匀系数, 如表 2 中所示。可以看出, 除 B-0 组试件的评价指标存在一定的离散性外, 其余各组试件的评价指标在同一切缝角度下基本接近。由表 2 中数据可知, B-C0 组试件较其余各组的块度均匀系数  $C_U$  相对较小, 但曲率系数  $C_C$  相对较大, 表明试件爆后块度分布的均匀性较差, 大块率较高, 最大块度均在 113.907 mm 以上; 试件出现了沿水平层理面的整体破坏, 如图 18 所示, 说明爆破能量在水平层理面处泄漏严重, 这是造成 B-C0 组试件块度分布均匀性较差的原因。

当切缝角度为  $0^\circ$  时, 试件由于切缝方向与层理弱面平行, 因此其破坏面主要沿层理弱面开展, 切缝断面如图 19 所示, 可见其断面具有较多的笔石动物化石。由于笔石动物化石具有较多的有机质, 化学性质不稳定, 因此使得层理面成为页岩的脆弱部分, 更易在外力作用下发生整体的张拉破坏。表 2 中 B-0 组的曲率系数  $C_C$  的计算结果与图 15 中的块度占比直方图显示, 其曲率系数相对较大, 反映了其爆后碎块集中于粗粒端, 最大碎块占碎块总量的比值可达 26.14%, 大块占比高, 爆破效果不佳。

表 2 各组试件的块度分布指标

Table 2 Block size distribution index of orthogonal test

试件	$d_{10}/\text{mm}$	$d_{50}/\text{mm}$	$d_{90}/\text{mm}$	$d_{\max}/\text{mm}$	$C_U$	$C_C$
B-C0-1	48.09	88.00	102.20	113.91	1.16	1.58
B-C0-2	41.27	74.14	94.00	118.44	1.27	1.42
B-0-1	23.58	51.79	78.72	85.62	1.52	1.45
B-0-2	21.98	38.01	44.35	63.22	1.17	1.48
B-45-1	19.88	53.60	88.89	98.08	1.66	1.63
B-45-2	21.83	41.53	73.35	75.91	1.77	1.08
B-90-1	31.70	49.03	72.99	82.09	1.49	1.04
B-90-2	30.31	52.27	73.70	88.42	1.41	1.22

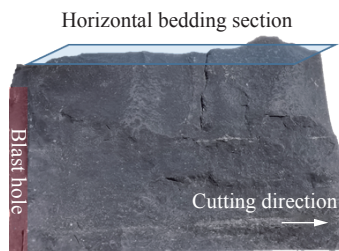


图 18 B-C0 试件沿水平层理面的破坏

Fig. 18 Failure of B-C0 specimen along horizontal bedding plane

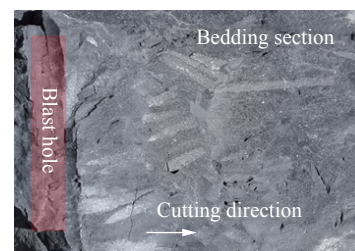


图 19 B-0 试件沿水平层理面的破坏

Fig. 19 Destruction of B-0 specimen along horizontal bedding plane

切缝角为  $45^\circ$  时, 试件的不均匀系数在各试验组中最大, 但由图 16 中的块度分布直方图可见, 其最大块度占总碎块的 13% 以上, 也存在沿层理面的整体张拉破坏; 切缝角度为  $90^\circ$  时, 试件的爆后块度分布较好, 不均匀系数较高, 且曲率系数在各组中较低, 说明其在细粒端与粗粒端均有较好的分布, 爆破破碎效果相对较好。

### 3.3 不同切缝角度下试件爆后块度分形维数计算结果

页岩在受到爆破荷载后, 内部缺陷不断发育、扩展、贯穿, 最后发展成为宏观破裂, 既往学者研究表明<sup>[20]</sup>, 岩石裂纹的破碎具有较好的自相似性, 碎块的分形维数越大, 试件的破碎程度就越高。对破碎块度分形维数特征的研究, 能够从定量的角度对不同切缝角度下的裂隙场发育情况进行表征。

各试件的块度分形维数结果如图 20~图 23 所示。可以看出, 各试样在爆后的碎块筛分中, 筛上碎块数与筛孔特征尺度(筛孔直径)间具有较好的线性相关关系, 相关系数( $R^2$ )在 88.451% 以上。

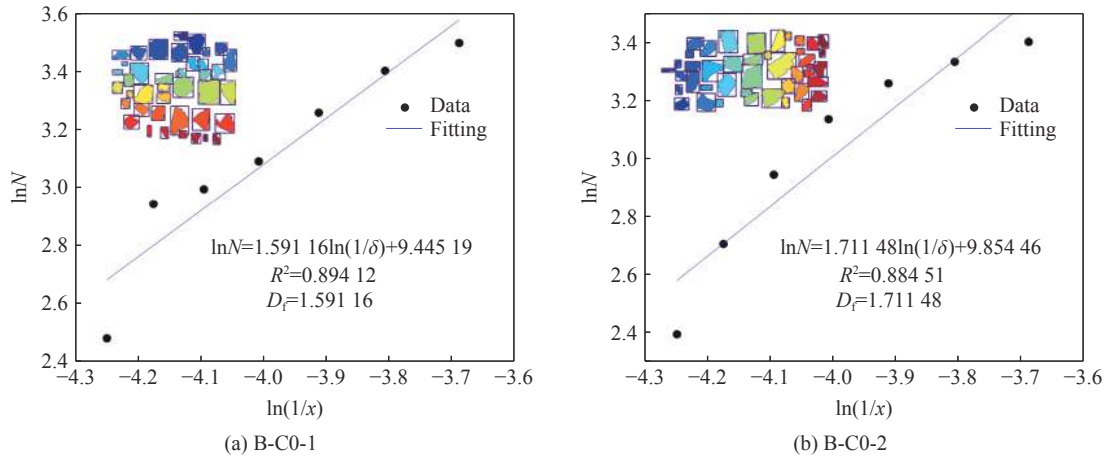


图 20 试件 B-C0 块度分形维数结果

Fig. 20 Fractal dimension results of specimens B-C0

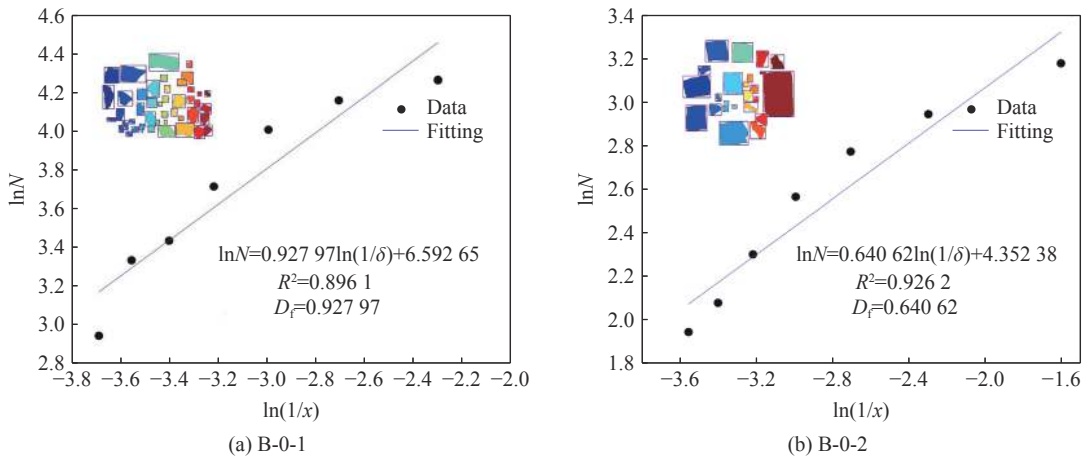


图 21 试件 B-0 块度分形维数结果

Fig. 21 Fractal dimension results of specimens B-0

进一步提取各试件的碎块分形维数进行横向对比, 如图 24 所示。试件在不同切缝角度下的爆后碎块分形维数存在显著的各向异性特征, 试件 B-0 由于沿层理弱面的能量逸散, 导致试件爆后的大块较多, 试件的爆破破碎效果较差, 因此其爆后块度的平均分形维数在各组间最低, 仅为 0.7843; 随着切缝角度的增大, 试件爆后的平均分形维数也随之增高, 表明层理弱面的影响减弱, 虽然存在沿层理弱面的能量逸散, 但岩层间的夹制作用提高了爆破能量的作用率, 降低了岩块整体张拉剥落破坏的可能性, 当切缝角度为  $90^\circ$  时, 这一作用最为显著, 因此其碎块分形维数为各试验组的最大值 2.5233; 试件 B-C0 虽然在切缝方向上无层理弱面的影响, 但其在爆破过程中, 存在沿水平层理弱面的整体张拉破坏, 造成了爆破能量的逸散, 其分形维数虽然较 B-0 组略大, 但分形维数显著低于试件 B-45 与 B-90 的破碎分形维数均值。

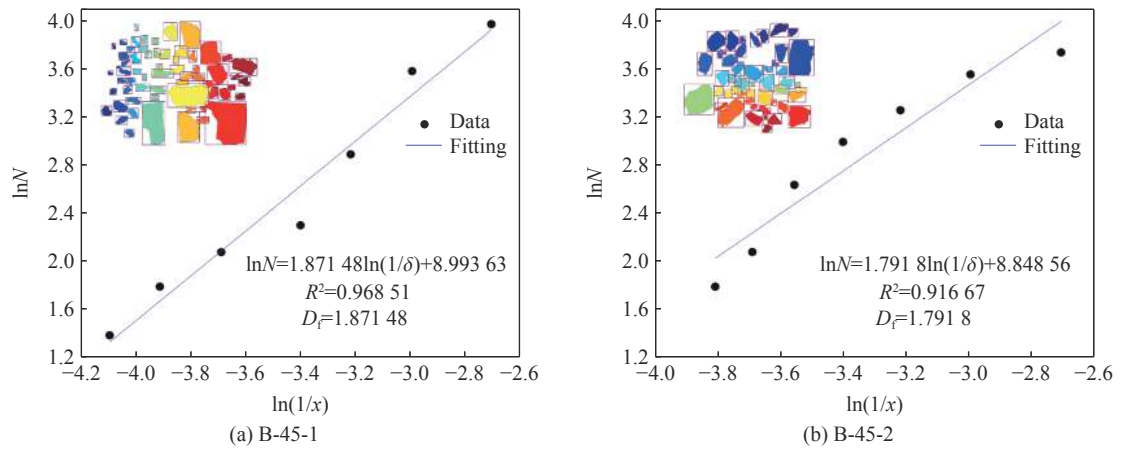


图 22 试件 B-45 块度分形维数结果

Fig. 22 Fractal dimension results of specimens B-45

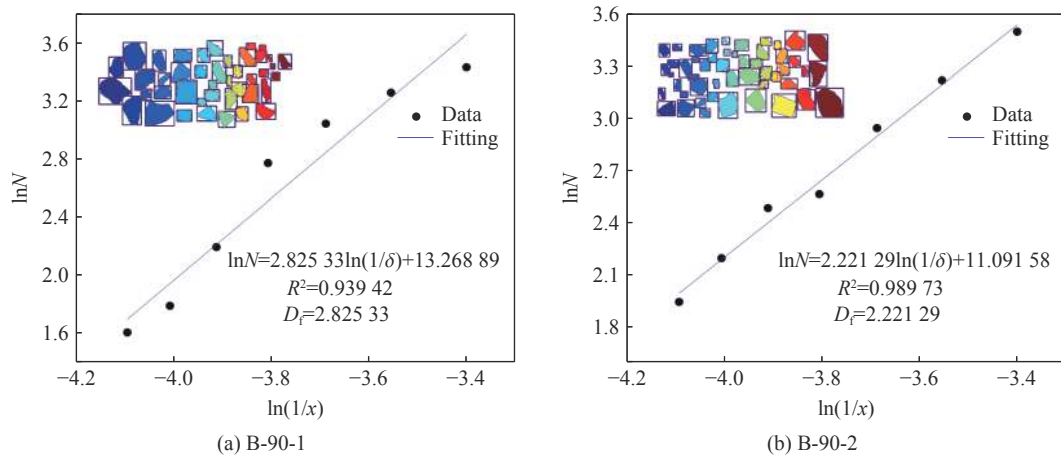


图 23 试件 B-90 块度分形维数结果

Fig. 23 Fractal dimension results of specimens B-90

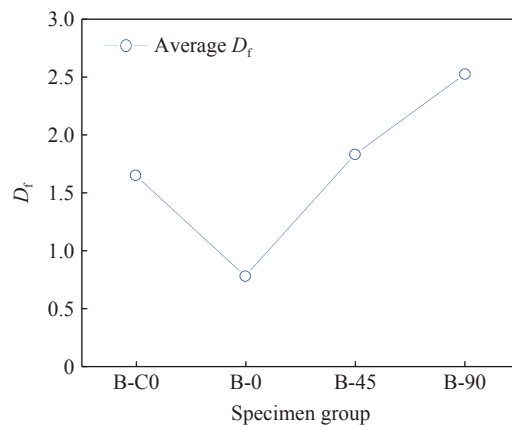


图 24 各组试件的爆后碎块分形维数

Fig. 24 Fractal dimension of post-blast fragments for each group of specimens

## 4 结 论

(1) 试件在不同比例爆距内的裂纹总密度与比例爆距之间存在负相关的幂函数关系, 相对其他切缝

角度下的试件,炮孔垂直于层理弱面时试件的裂纹总密度最低;表面裂纹场分布具有显著的分形维数特征,本文试验中,各切缝角度试件的表面裂纹盒维数在1.337~1.537之间。

(2) 页岩试件破碎是爆破动、静作用综合影响的结果,爆破应力波的动作用加剧了试件内部微观损伤区域的发育,对裂纹的扩展路径产生导向作用,爆生气体的静作用是驱动宏观裂纹的起裂与扩展的根本因素。

(3) 切缝方向与层理弱面的夹角对微观损伤区域出现的位置影响显著,当层理弱面与切缝方向平行时,损伤区域多集中于层理弱面处,对宏观裂纹的扩展路径影响显著,易于形成单一裂纹,难以形成复杂有效的裂隙网络,因此应当避免在这一方向进行射孔作业。

(4) 页岩的爆后块度分布受切缝角影响显著,B-C0组试件在爆后的最大块度最大,达到113.907 mm以上;B-0组试件爆后的大块较多,爆后块度的平均分形维数仅为0.7843,在各组间最低;切缝角度为90°时,试件爆后块度分布曲线的不均匀系数较高,且曲率系数在各组中较低,试件的爆后块度分布较好,爆后平均的碎块分形维数达到了各试验组的最大值2.5233,爆破破碎效果相对较好。

## 参考文献:

- [1] 陈军斌. 页岩气储层液体火药高能气体压裂增产关键技术研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [2] 索明武. 大庆长垣薄差层二次增效射孔技术研究——以萨中和杏89区为试验区块 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008: 1-2.
- [3] WAN Y, PAN Z J, TANG S H, et al. An experimental investigation of diffusivity and porosity anisotropy of a Chinese gas shale [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 23: 70-79. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.01.024.
- [4] NIANDOU H, SHAO J F, HENRY J P, et al. Laboratory investigation of the mechanical behaviour of Tournemire shale [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(1): 3-16. DOI: 10.1016/S1365-1609(97)80029-9.
- [5] HORNBY B E, SCHWARTZ L M, HUDSON J A. Anisotropic effective-medium modeling of the elastic properties of shales [J]. *Geophysics*, 1994, 59(10): 1570-1583. DOI: 10.1190/1.1443546.
- [6] LI G F, JIN Z J, LI X, et al. Experimental study on mechanical properties and fracture characteristics of shale layered samples with different mineral components under cyclic loading [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 150: 106114. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2023.106114.
- [7] GUO W H, GUO Y T, YANG H Z, et al. Tensile mechanical properties and AE characteristics of shale in Triaxial Brazilian splitting tests [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 219: 111080. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.111080.
- [8] WANG C Y, LI S J, ZHANG D M, et al. Study on the effects of water content and layer orientation on mechanical properties and failure mechanism of shale [J]. *Energy*, 2023, 271: 127050. DOI: 10.1016/j.energy.2023.127050.
- [9] WANG H, LI Y, CAO S G, et al. Fracture toughness analysis of HCCD specimens of Longmaxi shale subjected to mixed mode I-II loading [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 239: 107299. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2020.107299.
- [10] 衡帅, 杨春和, 郭印同, 等. 层理对页岩水力裂缝扩展的影响研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(2): 228-237. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.02.002.  
HENG S, YANG C H, GUO Y T, et al. Influence of bedding planes on hydraulic fracture propagation in shale formations [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(2): 228-237. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.02.002.
- [11] 李玉琳. 龙马溪组层状页岩宏观破坏行为及模型研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019: 92-104.  
LI Y L. Investigation on macroscopic and microscopic failure behavior and model study of layered Longmaxi shale [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2019: 92-104.
- [12] SHI X S, YAO W, LIU D A, et al. Experimental study of the dynamic fracture toughness of anisotropic black shale using notched semi-circular bend specimens [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 205: 136-151. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.11.027.
- [13] CHONG K P, KURUPPU M D. New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials [J]. *International Journal of Fracture*, 1984, 26(2): R59-R62. DOI: 10.1007/BF01157555.
- [14] NEJATI M, AMINZADEH A, AMANN F, et al. Mode I fracture growth in anisotropic rocks: theory and experiment [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2020, 195: 74-90. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2020.03.004.
- [15] JU M H, LI J C, LI J, et al. Loading rate effects on anisotropy and crack propagation of weak bedding plane-rich rocks [J].

- Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 230: 106983. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2020.106983.
- [16] 杨永琦, 张奇, 于慕松, 等. 定向控制断裂爆破技术的研究 [J]. *煤炭学报*, 1996, 21(3): 60–63. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.1996.03.013.  
YANG Y Q, ZHANG Q, YU M S, et al. Technology of directional split blasting [J]. *Journal of China Coal Society*, 1996, 21(3): 60–63. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.1996.03.013.
- [17] 杨仁树, 左进京, 杨国梁. 切缝药包定向控制爆破的试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(24): 24–29. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.24.005.  
YANG R S, ZUO J J, YANG G L. An experimental study on slotted cartridge directional controlled blasting [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(24): 24–29. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.24.005.
- [18] 王雁冰, 李书萱, 耿延杰, 等. 切缝药包爆破定向断裂机理及围岩损伤特性分析 [J]. *工程科学学报*, 2023, 45(4): 521–532. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2022.04.20.002.  
WANG Y B, LI S X, GENG Y J, et al. Directional fracture mechanism and surrounding rock damage characteristics of slotted cartridge blasting [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(4): 521–532. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2022.04.20.002.
- [19] 岳中文, 胡庆文, 陈彪. 爆生裂纹与层理缺陷相互作用的实验研究 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(12): 99–104. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.12.017.  
YUE Z W, HU Q W, CHEN B. An experimental study of the interaction between the blast-induced crack and the bedding defect [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(12): 99–104. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.12.017.
- [20] 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.
- [21] 黄志辉. 台阶爆破块度分布测定及其优化研究 [D]. 泉州: 华侨大学, 2005: 22–38.  
HUANG Z H. Study on determination and optimization of the bench blasting fragmentation distribution [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2005: 22–38.
- [22] 骆浩浩, 杨仁树, 马鑫民, 等. 石碌铁矿扇形中深孔爆破块度分布特征研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(2): 371–378. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2022.0159.  
LUO H H, YANG R S, MA X M, et al. Study on the distribution characteristics of deep hole blasting in the fan-shaped hole of Shilu Iron Mine [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(2): 371–378. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2022.0159.
- [23] 杨仁树, 李炜煜, 杨国梁, 等. 炸药类型对富铁矿爆破效果影响的试验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(6): 065201. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0396.  
YANG R S, LI W Y, YANG G L, et al. Experimental study on the blasting effects of rich-iron ore with different explosives [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(6): 065201. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0396.
- [24] 吕林. 图像处理技术在岩体块度分析中的应用 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011: 59–75.  
LV L. The application of photography-image processing in the analysis of rock fragmentation [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011: 59–75.

(责任编辑 王小飞)