

复合型聚能药型罩作用下岩石的定向断裂

黄琦¹, 郭雁潮², 刘朕³

(1. 中国矿业大学(北京), 北京 100083; 2. 内蒙古科技大学, 内蒙古 包头 014010; 3. 北京科技大学, 北京市 100083)

摘要: 岩石爆破过程中裂纹扩展具有明显随机性, 定向断裂控制难、能量利用率低, 是控制爆破研究中的关键问题。为提高定向断裂中的爆破能量利用效率, 本文设计了一种“切缝+聚能”复合型药型罩结构, 采用动态焦散线实验与数值模拟相结合的方法, 研究了药型罩开口角度对裂纹扩展与能量释放的影响。结果表明: 复合型聚能药型罩能够显著增强聚能方向裂纹扩展并抑制非聚能方向损伤, 聚能效应随开口角增大呈先增强后减弱的变化规律。开口角为60°时, 裂纹扩展长度、裂纹扩展速度、聚能与非聚能方向分形维数比值及动态应力强度因子均达到峰值, 定向断裂效果最佳; 能量释放率随开口角增大呈上升趋势, 在75°时达到746.05 N/m。数值模拟显示, 开口角为60°时形成的金属射流形态最完整、头部速度最高, 对岩石的侵彻深度和入射孔径分别达到21.5mm和14.1mm。研究揭示了复合型药型罩中爆生气体准静态作用与金属射流侵彻的耦合机制, 可为聚能装药结构优化及岩体定向控制爆破设计提供参考。

关键词: 聚能装药; 复合药型罩; 动态焦散线; 分形维数

中图分类号: O349.2

国标学科代码: P63

文献标识码: A

Experimental and Numerical Study on Directional Rock Fracture Induced by a Composite Shaped Charge Liner

HUANG Qi¹, GUO Yanchao², LIU Zhen³

(1. China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

2. Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China

3. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Crack propagation in rock blasting exhibits strong randomness, making directional fracture control difficult and leading to low energy utilization efficiency, which remains a key issue in controlled blasting. To improve the energy utilization efficiency in directional fracturing, a composite shaped charge liner with a “slotting + shaped-charge” structure was designed. A combination of dynamic caustics experiments and numerical simulations was employed to investigate the effects of liner opening angle on crack propagation and energy release. In the experimental study, dynamic caustics techniques were used to capture the initiation and evolution of cracks under blasting loading, and key dynamic parameters such as crack propagation velocity and stress intensity factor were obtained from caustic patterns. Meanwhile, fractal dimension analysis was introduced to quantitatively characterize the complexity and directional distribution of blast-induced cracks. In the numerical study, a fluid-structure coupled model was established to simulate the blasting process, enabling further analysis of stress wave propagation, energy release behavior, and the formation and penetration characteristics of the shaped charge jet under different opening angles. The results show that the composite shaped charge liner significantly enhances crack propagation in the energy-focused direction while suppressing damage in non-focused directions. The shaped-charge effect first increases and then decreases with increasing opening angle.

* 收稿日期: 2025-12-08; 修回日期: 2026-04-14;

基金项目: 国家自然科学基金(52227805); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2025QN05098)

第一作者: 黄琦(2002-), 男, 硕士研究生, 2287170499@qq.com;

通信作者: 郭雁潮(1993-), 男, 博士, 讲师, 2024945@imust.edu.cn

When the opening angle is 60° , the crack propagation length, propagation velocity, the ratio of fractal dimensions between focused and non-focused directions, and the dynamic stress intensity factor all reach their peak values, indicating the optimal directional fracturing performance. The energy release rate increases with the opening angle and reaches 746.05 N/m at 75° . Numerical simulations indicate that, at an opening angle of 60° , the formed metal jet exhibits the most coherent morphology and the highest jet-tip velocity, with the penetration depth and inlet aperture reaching 21.5 mm and 14.1 mm , respectively. The study reveals the coupling mechanism between the quasi-static action of detonation gases and metal jet penetration in the composite liner, providing a reference for the optimization of shaped charge structures and the design of directional controlled blasting in rock engineering.

Keywords: shaped charge; composite shaped charge liner; dynamic caustics line; fractal dimension

随着地下空间开发和岩土工程建设的不断推进, 钻爆法因其施工效率高、成本低和适应性强等优势, 被广泛应用于隧道掘进、矿山开采及煤层开采等地下工程领域^[1]。然而, 传统非定向爆破过程中能量释放分散, 裂纹扩展具有随机性, 易造成围岩过度破坏和超挖现象, 难以满足高精度、高稳定性施工要求。为实现对岩体破裂形态和范围的可控调控, 定向爆破技术应运而生, 并逐渐发展成为岩体控制爆破的重要手段。因此, 优化聚能药包结构^[2], 深入研究聚能药包爆破的能量聚集机制与断裂模式, 对于工程爆破中炸药能量释放的精准控制具有重要意义。

近年来, 国内外学者围绕药型罩聚能爆破及切缝定向控制裂纹开展了大量研究。何满朝^[3]提出了“双向累积拉伸爆破”新技术, 建立了相应的力学模型和爆破机理, 实现了岩体裂纹在双向聚能作用下的可控扩展。宋俊生^[4]利用数字激光动态焦散线实验系统分析了不同装药结构下的动态断裂过程, 揭示了不耦合系数与爆破损伤之间的定量关系。杨仁树^[5-6]基于动态焦散线实验系统揭示了不同装药条件下岩石裂纹的起裂与扩展规律, 并结合扫描电子显微镜 (SEM) 对爆生裂纹断口形貌观察; 肖成龙^[7]采用数字激光动态焦散线实验系统表明节理角度在很大程度上决定裂纹穿越节理时的扩展路径与能量耗散特征; 谢华刚^[8]从爆炸力学与岩石断裂动力学角度出发, 发现复杂切槽结构较常规装药在裂纹导向性与能量集中效率方面更具优势。Kang^[9]研究发现, 当切缝数量为 2、3 和 4 时, 试样切缝方向上的爆生裂纹损伤值明显高于非切缝方向。Ding^[10]则通过比较双缝与三缝装药爆破的动力学行为, 指出三缝装药易导致裂纹偏向受保护岩体一侧, 可能引发岩体超挖问题。Yin^[11]等研究发现, 在定向裂缝控制爆破技术中, 双侧切槽聚能装药爆破方法的定向裂缝最长, 非定向裂缝最少, 且对围岩的保护效果最好。除了实验研究外, 数值模拟方法也被广泛用于分析聚能与切缝结构的动态响应机制。Wu^[12]利用 LS-DYNA 建立椭圆双极线型聚能爆破模型, 揭示了不同孔径下裂纹发展的时空规律与最优径向不耦合系数。申涛^[13]结合高速纹影实验与流固耦合数值模拟, 阐明了切缝药包爆炸载荷的传播重分配机制, 揭示切缝管对冲击波和爆生气体耦合作用的调控机理。Guo^[14]提出了抛物线型聚能药型罩的新结构, 并结合动态焦散线实验与 AUTODYN 显式动力学模拟系统研究了不同不耦合系数条件下裂纹扩展特性。

然而, 已有研究多侧重于单一聚能或单一切缝结构, 其对“聚能+切缝”复合装药的协同作用认识仍显不足, 特别是药型罩开口角度对能量释放率、裂纹定向性及围岩扰动控制的影响规律仍缺乏系统研究。基于此, 本文提出一种新型“切缝+聚能”复合药型罩结构, 通过动态焦散线实验和数值模拟的方法, 系统探讨不同开口角度条件下爆炸能量释放率、裂纹扩展与应力波演化的内在机制, 为精准控制爆破能量分配、优化定向破裂效果及工程爆破设计提供理论依据与技术支持。

1 动态焦散线实验

1.1 实验系统装置

实验采用北京科技大学智能爆破实验室的新型动态焦散线试验系统, 该系统由电脑、(Phantom-v2012)高速相机、场镜、时间加载平台、扩束镜、激光发射器和起爆器等组成。高速相机拍摄时, 拍

摄速度设置为 10^{-5} s，相邻两张照片的拍摄时间为 $10\mu\text{s}$ ，实验系统如图 1 所示。

1.2 实验原理

如图 2 所示，根据透射式动态焦散线原理^{[15]-[16]}，将试件垂直置于由场镜 1 与场镜 2 构建的平行光束场中，当试件受外部荷载时，裂纹尖端作为应力奇异点，其局部受力引发的厚度微扰会改变光线的透射率与折射率，导致裂纹尖端发生强烈的光线偏转或汇聚在距试件 Z_0 (参考平面到物体平面的距离)的参考平面上形成焦散斑与焦散线。

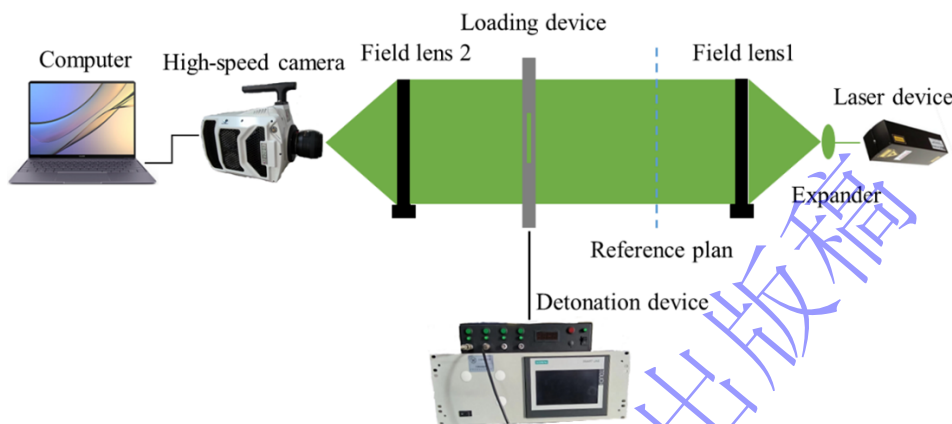


图 1 数字激光动态焦散线试验系统

Fig.1 Digital laser dynamic caustics experimental system

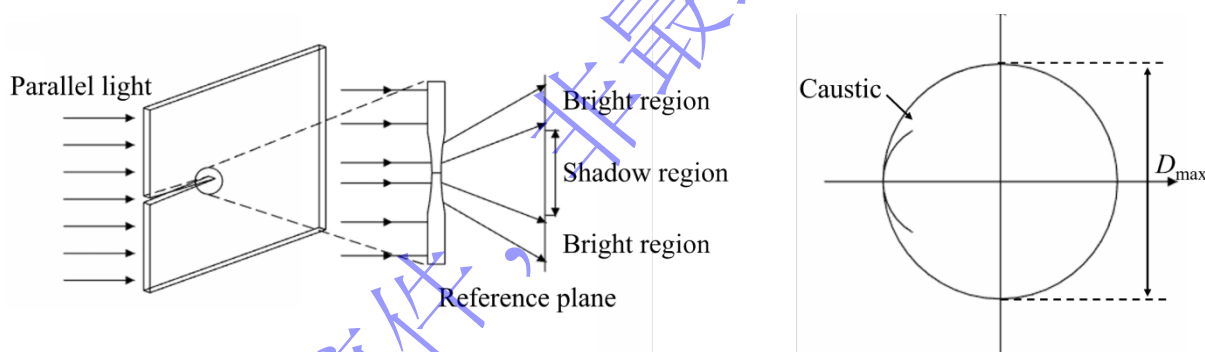


图 2 焦散线原理

Fig. 2 Principle of caustics

1.3 药型罩设计原理

传统聚能药型罩通过内凹结构在爆轰波作用下发生压垮并形成高速金属射流，实现爆炸能量的定向集中；切缝药包通过设置聚能缝结构，引导爆生气体定向逸散，实现裂纹的定向扩展。本设计在传统聚能药型罩与切缝药包定向作用机理的基础上，提出新型“切缝+聚能”复合结构药型罩，将聚能射流形成机理与切缝药包爆炸能量定向释能机制耦合，同时发挥“气楔^[17]”作用与金属射流侵彻效应。

(1) 药型罩参数设计:

壁厚变化会同时影响药型罩射流头部速度、射流长度、杵体质量及侵彻深度，根据已有研究成果^[18]，相对较薄药型罩壁厚 δ 与装药直径 d 的关系为 $\delta = (0.01 \sim 0.05) d$ ，因此壁厚 δ 选用 0.5mm 。

(2) 聚能缝参数设计:

切缝宽度是影响切缝药包定向断裂效果的重要结构参数，切缝过窄会堵塞爆生气体逸出；切缝过宽会削弱切缝方向的能量聚集能力，Li X^[19]研究发现，对于小尺度 PMMA 动态焦散线试验最优切缝宽度取 $0.50 \sim 0.80\text{mm}$ ，因此本设计聚能缝宽度尺寸选取 0.7mm 。

1.4 实验设计

本实验选用有机玻璃板 (PMMA) 作为试验材料, PMMA 为无色透明介质, 透光性好、便于裂纹演化的可视化观测; 根据已有研究表明^{[20]-[21]}, PMMA 作为典型脆性材料, 在冲击或爆破载荷作用下, 裂纹扩展与脆性岩石具有一定相似性, 常被用于脆性材料动态断裂行为的实验研究, 相关动力学参数见表 1^[22]。

实验试件尺寸为 300mm×300mm×5mm (长×高×厚), 中心炮孔直径为 13mm, 采用激光切割加工成型。炸药选用二硝基重氮酚 (DDNP), DDNP 属于起爆药, 适用于小药量爆炸加载试验, 其爆炸性能参数见表 2。实验采用新型复合结构药型罩 (如图 3), 材质为紫铜, 其结构尺寸为外径 10mm、内径 9mm、壁厚 0.5mm、高度 5mm。聚能缝尺寸为 0.7mm×4mm, 并设计 4 种不同开口角度 α 的药型罩如图 4a, 分别为 30°、45°、60°和 75°。实验共分为 4 组, 用以观测开口角度 α 对新型复合结构药型罩诱导裂纹扩展行为的影响。四组实验分别记为 S_1 ($\alpha=30^\circ$)、 S_2 ($\alpha=45^\circ$)、 S_3 ($\alpha=60^\circ$) 和 S_4 ($\alpha=75^\circ$), 每组重复试验 3 次以保证结果的可重复性。实验方案如图 4b 所示, 装药量为 70mg, 将 DDNP 装填于药型罩内, 并将金属探针置于药柱中心以实现中心起爆; 采用高压放电方式进行起爆, 从而实现对试件施加爆炸载荷。为抑制爆生气体沿炮孔过早逸散并提高边界约束条件一致性, 炮孔两端采用粘贴橡胶密封圈的专用堵塞块进行封堵与约束。

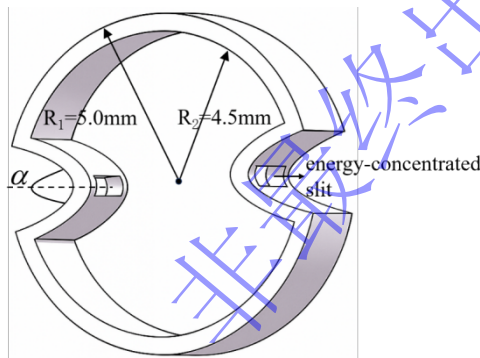


图 3 新型复合结构聚能药型罩示意图

Fig.3 Schematic diagram of the novel composite-structure shaped-charge liner

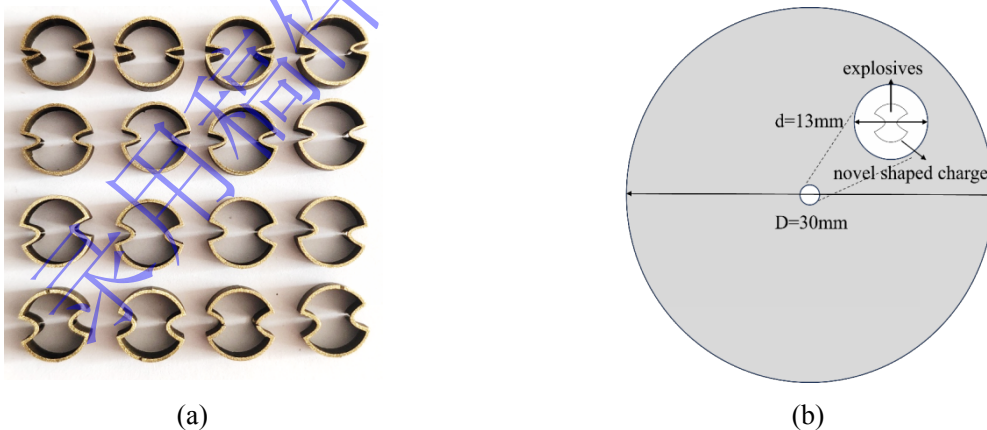


图 4 实验方案示意图

Fig.4 Schematic diagram of the experimental plan

表 1 PMMA 试件动力学参数

Table 1 Dynamic mechanical parameters of PMMA specimens

动力学参数	动态弹性模量 $E/$ ($N \cdot m^{-2}$)	动态泊松比 ν	膨胀波波速 $c_p/$ ($m \cdot s^{-1}$)	剪切波波速 $c_s/$ ($m \cdot s^{-1}$)	光学常数 $c/$ ($m \cdot N^{-1}$)
-------	-------------------------------------	-------------	--------------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------

数值	6.1	0.31	2320	1260	0.85×10^{-10}
----	-----	------	------	------	------------------------

表 2 DDNP 爆炸性能

Table 2 Explosion performance of DDNP

动态力学参数	爆速/(m·s ⁻¹)	爆热/(kJ·kg ⁻¹)	爆容/(L·kg ⁻¹)	爆温/°C
数值	6600	5900	2320	4950

2 实验结果分析

2.1 爆后试件宏观形态

考虑到爆炸能量释放过程存在不确定性,难以保证各组试验载荷完全一致,对同一开口角度进行了三次重复试验,以减小随机误差并验证结果的可重复性。试验结果表明,同组试件的裂纹扩展长度与扩展形态具有相似性,因此选取其中一组实验结果进行分析。鉴于 60° 工况下定向断裂效果最佳且非聚能方向围岩损伤最小,该工况的三次重复试验结果如图 5 和表 3 所示。

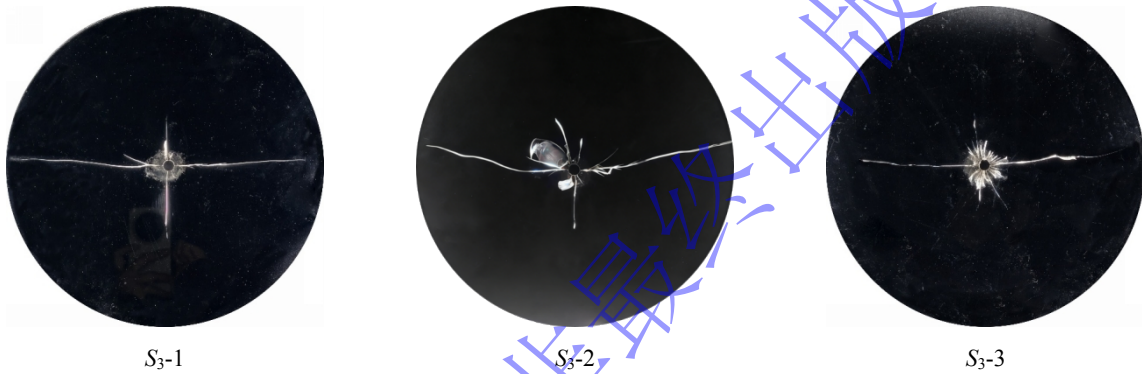


图 5 60° 工况重复试验试件断裂形态

Fig.5 Fracture patterns of specimens from repeated tests at an opening angle of 60°

表 3 裂纹的扩展长度

Table 3 Extension length of cracks

试验序号	裂纹扩展长度/cm			
	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂
S ₃ -1	14.0	12.2	3.8	5.7
S ₃ -2	14.5	14.3	4.2	4.4
S ₃ -3	12.0	13.5	4.3	3.7

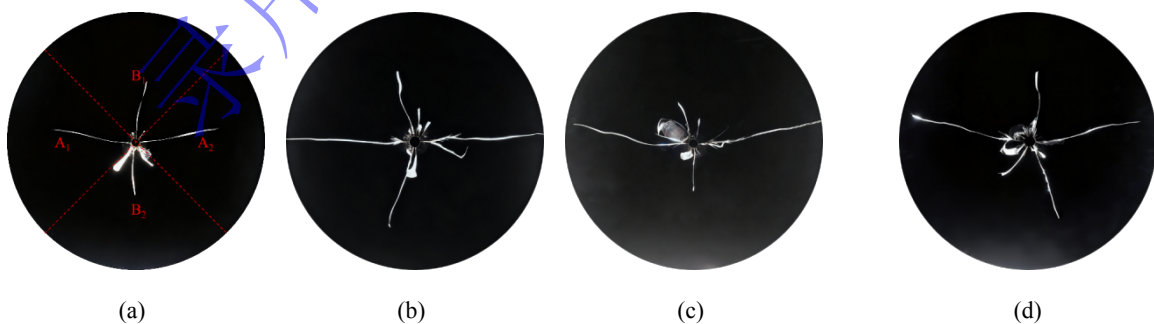


图 6 试件断裂形态 (a-d) 药型罩开口角度 30°、45°、60°、75°

Fig.6 Fracture patterns of the specimens (a)-(d) with the opening angles of the mold cover being 30°,45°,60°,and75°

不同开口角度试件的爆破后宏观形态如图 6 所示,依据爆后岩体破坏特征将炮孔周围岩体划分为 4 个特征区域,其中 A₁ 区、A₂ 区为聚能方向区域,B₁ 区、B₂ 区为非聚能方向区域。爆后实验结果表

明, 所有试件均在聚能方向 A_1 和 A_2 产生了较明显的定向裂纹, 非聚能方向 B_1 、 B_2 的爆生裂纹明显短于聚能方向 A_1 、 A_2 的裂纹, 表明“新型复合结构药型罩”具有显著的定向断裂效果, 在聚能方向形成了较长的定向裂纹, 同时可以抑制非聚能方向的裂纹扩展。表 4 裂纹扩展长度数据表明, 聚能方向裂纹扩展长度随药型罩开口角度增大呈先增后减的变化规律, 当开口角度为 60° 时, 聚能方向主裂纹扩展长度达到最大值, 非聚能方向裂纹扩展长度达到最小值, 表明新型切缝聚能药型罩的最优开口角度为 60° , 此角度下其定向断裂效果与围岩保护效果均实现最优。

结合第 2、3 章节对上述现象解释: 爆轰产生的初始应力波决定裂纹的起裂, 随后逸出的爆生气体对裂纹尖端施加近准静态压力, 驱动裂纹扩展。开口角通过调控爆生气体导流路径、应力波反射特征及药型罩压垮成流形态, 显著影响爆轰作用效果: 角度过小导致气体导流受限、准静态压力不足; 角度过大气体逸出过多, “气楔”效应增强, 加剧围岩损伤; 在 60° 时, 爆生气体准静态作用与药型罩压垮翻转形成最佳匹配, 并结合裂纹扩展动态力学分析对裂纹扩展速度 v 、动力学应力强度因子 K_{dI} 与爆炸能量释放率 GR_d 量化研究, 进一步验证了 60° 开口角为该新型复合结构最优开口角。

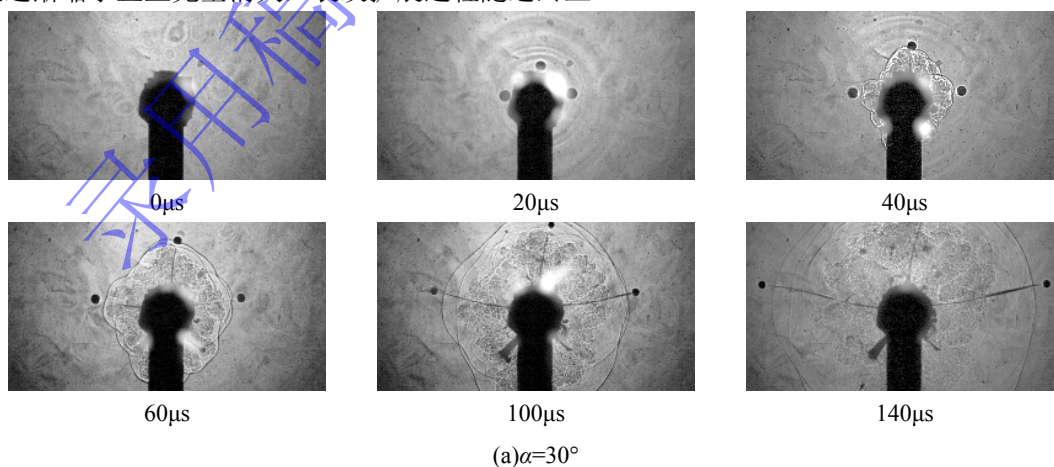
表 4 裂纹的扩展长度

Table 4 Extension length of cracks

开口角度	裂纹扩展长度/cm			
	A_1	A_2	B_1	B_2
30°	9.8	9.7	6.6	4.5
45°	14.3	14.0	7.5	9.3
60°	14.5	14.3	4.2	4.4
75°	12.9	13.1	7.5	8.7

2.2 爆炸裂纹尖端焦散斑图像

不同角度 (30° 、 45° 、 60° 、 75°) 试件裂纹扩展时的焦散斑演化图像如图 7 所示。炸药爆炸后, 爆轰波首先作用于炮孔壁, 随后衰减为应力波并以同心圆形态向周围传播。 $t=20\mu\text{s}$ 时, 波阵面呈现明暗交替条纹, 形成压-拉交替应力场, 其中明、暗条纹分别对应压缩应力波和膨胀应力波, 并伴随焦散斑出现, 裂纹开始扩展; $t=40\sim 60\mu\text{s}$, 爆炸应力波作用结束后, 爆生气体紧随其后并沿药型罩切缝方向逸出, 并成为裂纹扩展的主要驱动; $t=100\sim 140\mu\text{s}$, 随着爆生气体压力的逐渐衰减以及应力波反射拉伸作用的持续影响, 焦散斑尺寸呈现出周期性变化特征。随后, 爆生气体能量迅速衰减, 导致焦散斑逐渐缩小直至完全消失, 裂纹扩展过程随之终止。



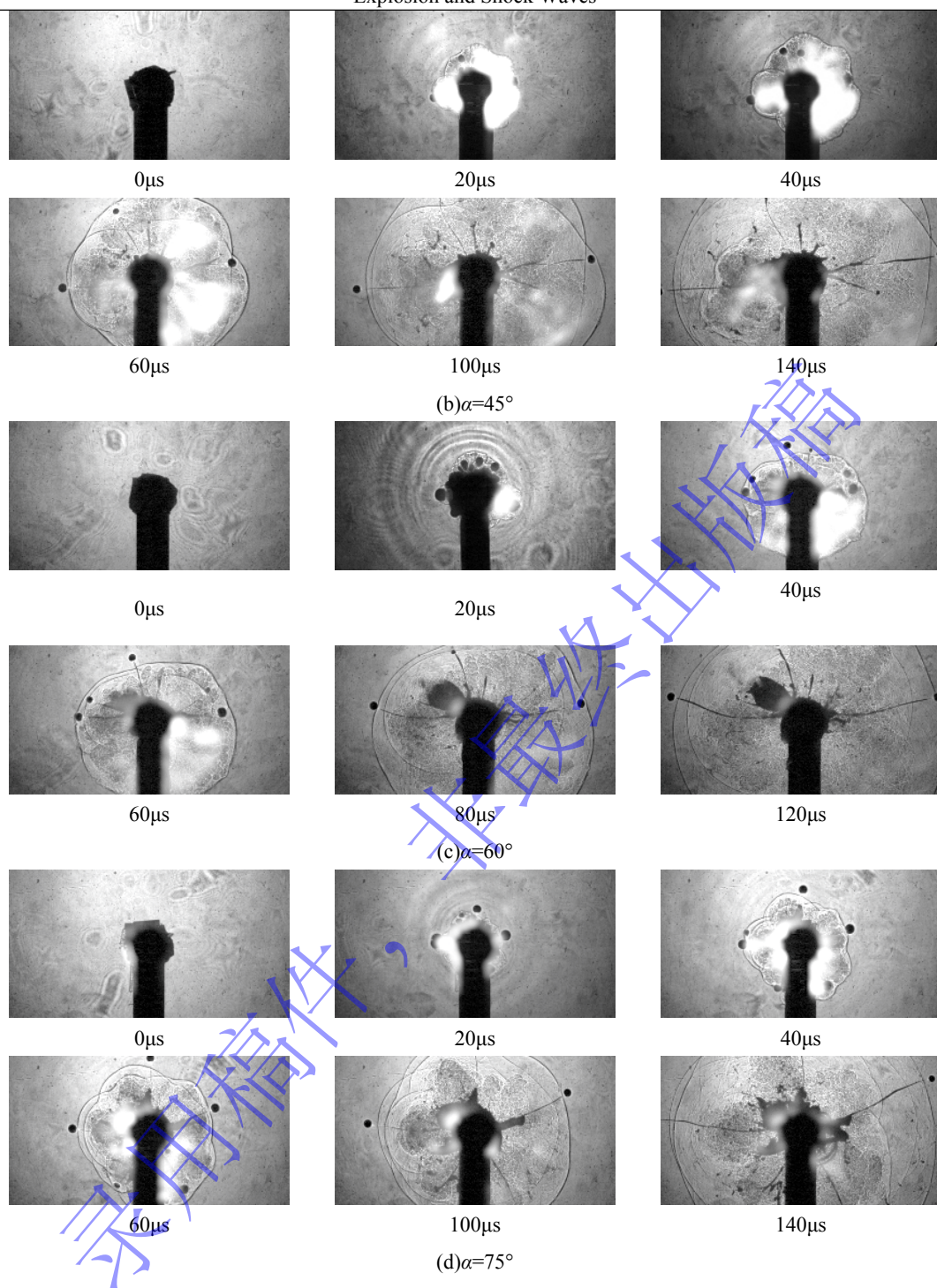


图7 焦散斑演化过程

Fig.7 Evolution process of the diffraction spot

为更直观展示裂纹扩展过程， 60° 工况下裂纹扩展的运动轨迹如图 8 所示。20 μs 时，爆炸应力波作用下裂纹开始起裂，裂纹尖端局部应力集中形成焦散斑；40 μs ，爆生气体逸出驱动裂纹扩展，焦散斑随裂纹尖端向外迁移；60~120 μs 裂纹尖端应力场衰减，焦散斑逐渐变小直至消失，裂纹停止扩展。将焦散斑图像导入 Photoshop 软件，利用软件中的测量工具准确测量焦散斑尺寸与相邻照片焦散斑的相对运动距离，进而计算裂纹尖端应力强度因子和裂纹扩展速度。

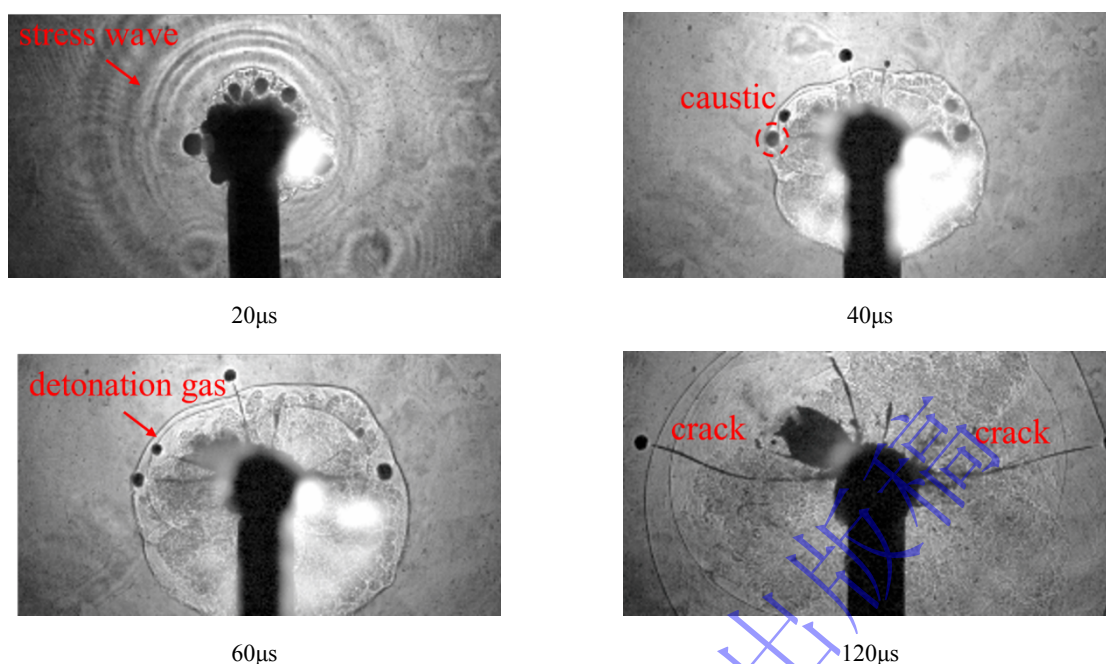


图 8 60°工况裂纹扩展时序图

Fig.8 Time-sequence images of crack propagation at an opening angle of 60°

2.3 爆破损伤的分形理论

分形理论最早由谢和平院士^[23]于 1985 年将分形理论应用于断裂与损伤分析，为研究裂纹等复杂结构时提供了新的理论方法，其中计盒维数是一种常用的分形维数之一，在本研究中，采用盒子覆盖法计算爆破后各区域的分形维数，考虑边长为 δ 的盒子覆盖图像，其中部分盒子是空的，其余盒子覆盖分形部分，所有非空盒子的个数为 $N(\delta)$ ，通过不断收缩盒子边长 δ ，根据盒子数 $N(\delta)$ 与盒子边长 δ 的关系，对数 $\log(N)$ 和 $\log(1/\delta)$ 进行线性拟合，斜率即为计盒维数。利用当 δ 接近 0 时，计盒维数可定义如下：

$$D = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg N(\delta)}{\lg \delta} \quad (1)$$

式中： $N(\delta)$ 为非空盒子的个数； δ 为盒子尺寸

经过二值化处理的裂纹轨迹图像如图 9 所示，根据计盒维数相关定义，本研究编写了 MATLAB 计盒维数计算程序，将二值化图像导入 MATLAB 计算程序中，分析裂纹轨迹的分形特性。图片中的黑色部分是介质宏观裂纹产生的区域（像素 0），白色部分是介质无宏观损坏的区域（像素 255）。爆破损伤越严重，二值化图像内容越复杂，图像的计盒维数越大。

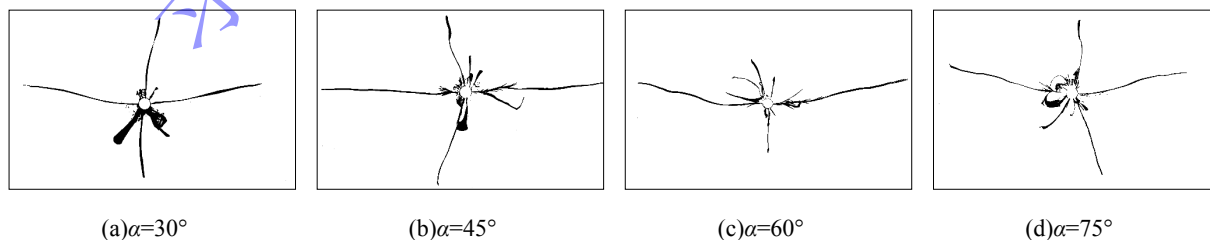


图 9 裂纹轨迹二值化图

Fig.9 Binary image of crack trajectory

如图 10 所示，对于开口角度 $\alpha=60^\circ$ 的情况，将裂纹扩展的二值化图像进行四等分并将聚能方向标记为 A_1 、 A_2 区域，非聚能方向标记为 B_1 、 B_2 区域，以便更细致地分析裂纹在不同区域的扩展情况。

对于 $\alpha=30^\circ$ 工况，裂纹在传播过程中易发生侧向分叉，非聚能方向萌生 4 条爆生裂纹，整体定向性差； $\alpha=45^\circ$ 工况，定向主裂纹扩展表现平直，呈“一”字形扩展，炮孔周围萌生较多短裂纹，非聚能区域有两条较长裂纹； $\alpha=60^\circ$ 工况，定向主裂纹保持近似直线扩展，炮孔邻近仅有少量爆生裂纹，非聚能区域几乎无长裂纹出现； $\alpha=75^\circ$ 工况，主裂纹的平直度与裂纹扩展长度均明显降低，且炮孔周围围岩损伤范围扩大，围岩的保护能力显著减弱。

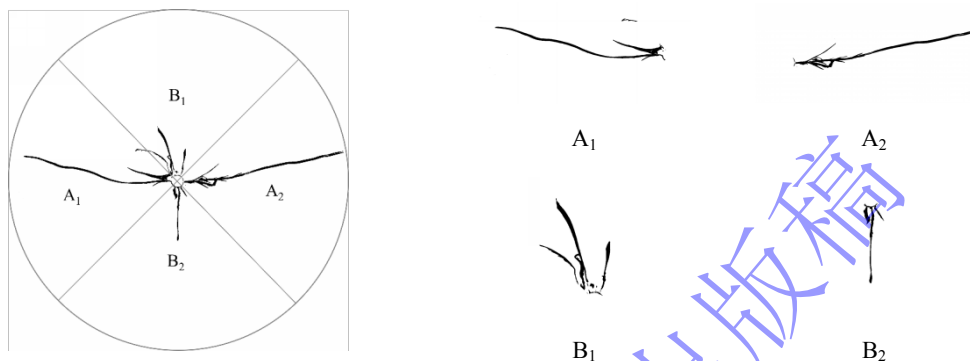
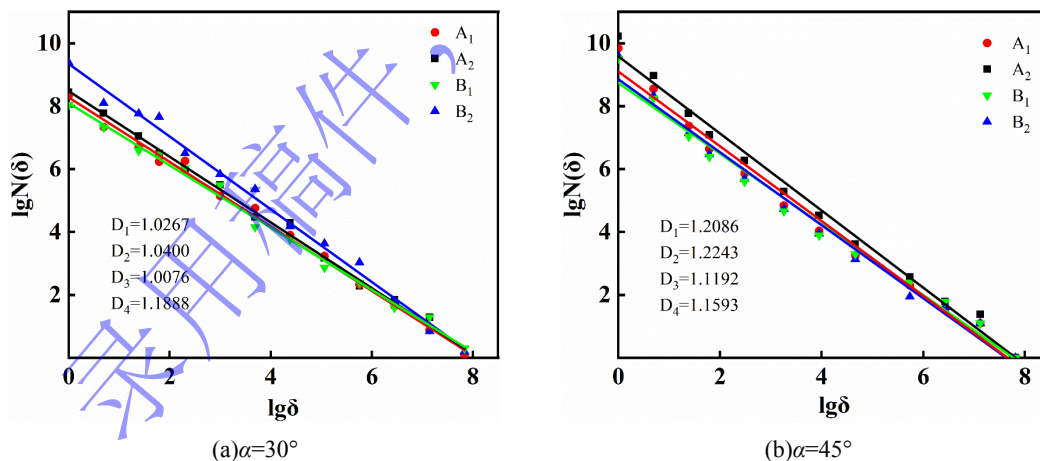


图 10 二值化划分图

Fig.10 Binary partition graph

材料破坏过程中形成的裂纹具有明显的分形特征，其复杂程度可通过分形维数 D 表征，分形维数与损伤变量之间存在幂函数关系^[24]。相同或相近的爆破损伤面积可能对应不同的裂纹扩展形态，产生不同的分形维数，相较于传统损伤面积指标，分形维数能够更准确地反映裂纹结构复杂性及损伤演化过程，可作为定量表征爆破损伤的重要参数。如图 11 所示，通过对不同药型罩开口角度下 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 处的裂纹轨迹进行计盒维数的计算并拟合为线性方程，拟合曲线的相关系数 R^2 均大于 0.98，表明实验数据与拟合曲线之间具有极高的相关性，此模型能够精确地捕捉裂纹轨迹的分形特征。



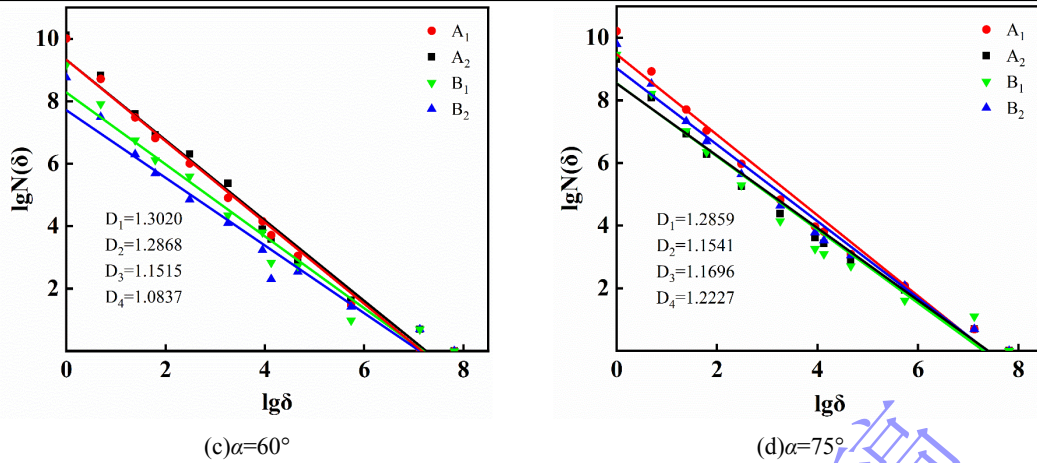


图 11 裂纹轨迹的计盒维数拟合曲线

Fig.11 Fitting curve of the box dimension of the crack trajectory

表 5 分形维数计算结果

Table 5 Calculation results of fractal dimension

开口角度	A ₁	A ₂	A	B ₁	B ₂	B	A/B
30°	1.0267	1.0400	1.0334	1.0076	1.1888	1.0892	0.9488
45°	1.2086	1.2243	1.2165	1.1192	1.1593	1.1393	1.0678
60°	1.3020	1.2868	1.2944	1.1515	1.0837	1.1176	1.1582
75°	1.2859	1.1541	1.2200	1.1696	1.2227	1.1962	1.0199

表 5 是对图 11 中不同开口角度条件下爆生裂纹的计盒维数统计结果。由表可知，在 $\alpha=30^\circ\sim 75^\circ$ 范围内，聚能方向(A₁、A₂)与非聚能方向(B₁、B₂)的分形维数及其比值 A/B，比值可作为评价聚能效应优劣的重要指标。A/B 比值越大，说明聚能方向裂纹的应力集中程度越强，聚能作用表现越显著。随着开口角度由 30°增加至 75°，聚能方向裂纹的分形维数整体呈持续上升趋势。该现象主要归因于 A₁、A₂ 区域裂纹扩展过程中主要受爆生气体的准静态作用影响。随着开口角度的增大，爆生气体在该方向上的准静态作用进一步增强，驱动裂纹扩展，从而强化了爆炸能量在聚能方向上的集中效应。相较而言，非聚能方向的分形维数变化幅度较小，其根本原因在于 B₁、B₂ 区域裂纹扩展主要受爆炸应力波的动作用控制，爆炸应力波受药型罩开口角度影响较小，因此 B 区域裂纹的分形维数波动较小。当开口角度为 60°时，聚能方向计盒维数达到最大值，非聚能方向维数处于较低水平，使得 A/B 比值达到峰值，此时聚能药包的定向破裂及损伤控制效果达到最优水平。随着切缝角度继续增大至 75°，A/B 比值出现下降，聚能效应明显减弱。与开口 30°药型罩相比，45°、60°和 75°的聚能效果分别提升 12.54%、22.07%和 7.49%。

综上所述，药型罩开口角度对爆生裂纹形态及其复杂性具有显著影响。当开口角度处于 45°~60° 区间时，可显著提高聚能方向裂纹的分形维数，使裂纹呈现更强的定向扩展特征，从而有效提升爆炸能量利用率及岩石破碎能力。

3 裂纹扩展动态特性分析

3.1 裂纹扩展速度

在高速相机拍摄实验中，通过捕捉连续短时间内的连续照片，当两张照片之间的时间间隔非常短时，可以假设在这段时间内裂纹的扩展速度变化较小，将两张连续照片中裂纹的平均速度视为瞬时速度。裂纹的瞬时速度 v 可以定义如下：

$$\begin{cases} v_1 = 1/\Delta t \left[\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \right] (i=1) \\ v_2 = 1/2\Delta t \left[\sqrt{(x_i - x_{(i-1)})^2 + (y_i - y_{(i-1)})^2} + \sqrt{(x_{(i+1)} - x_i)^2 + (y_{(i+1)} - y_i)^2} \right] (i > 1) \end{cases} \quad (2)$$

式中： v 为该时刻裂纹扩展沿运动方向的瞬时速度； $x_i-x_{(i-1)}$ 、 $y_i-y_{(i-1)}$ 为焦散斑几何中心沿运动方向的位移差值， m ； Δt 为相邻焦散图片间的时间差值， $\Delta t=10\mu s$ ； i 为照片张数。

3.2 裂纹扩展速度变化规律

由焦散图像反演得到的裂纹扩展速度随时间变化如图 12 所示，主裂纹扩展速度 $v(t)$ 随时间经历明显的三阶段演化特征。第一阶段：起爆后 0~40 μs ，药型罩开口角度 30°~75°，主裂纹初始速度分别为 751.15m/s、645.16m/s、515.37m/s 和 620.69m/s，该阶段裂纹萌生主要受爆炸应力波控制，起裂后裂纹扩展能量主要由应力波提供，由于应力波强度快速衰减，驱动能量降低，致使此阶段裂纹扩展速度呈下降趋势；第二阶段：40~130 μs ，该阶段裂纹扩展主要由爆生气体和反射应力波的共同作用驱动，裂纹尖端受反射应力波与爆生气体的周期性持续作用，呈现出非稳态传播特征，裂纹扩展速度呈波动下降趋势。第三阶段：130~180 μs 在应力波的反射拉伸作用下，裂纹扩展速度二次增大，速度峰值分别为 359.30m/s、395.16m/s、410.55m/s，随后迅速减小，直至裂纹停止运动。

整体来看，裂纹扩展速度受药型罩开口角度明显影响，在 60° 时裂纹扩展速度达到峰值。炸药爆炸后，爆炸应力波随着药型罩开口角度的增加，反射拉伸作用逐渐增强，且爆生气体更易于从开口越大的药型罩的聚能缝中传递出来。在聚能方向上，开口越大的药型罩与炮孔壁形成更大的“聚能穴”，“聚能穴”处爆生气体的压力和应力波强度更高，显著提高了裂纹扩展速度。因此合适角度的聚能药型罩可以引导爆炸能量更精准的作用到炮孔壁，使主裂纹沿切缝方向实现了良好的定向扩展，并减少了侧向分叉裂纹的形成。

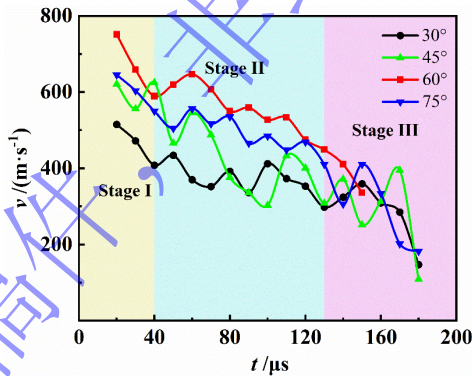


图 12 不同开口角度裂纹扩展速度-时间曲线

Fig.12 Velocity-time curves of crack propagation under different opening angles

3.3 裂纹尖端应力强度因子

动态应力强度因子是表征裂纹尖端应力场强弱的物理量，根据相关文献，数字激光动焦散线实验可以通过焦散斑反应裂纹尖端的复杂应力场，并通过焦散斑的几何尺寸计算应力强度因子，裂纹尖端动态应力强度因子 $K_d I^{[25]}$ ：

$$K_1^d = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3g^{5/2}z_0cd_{\text{eff}}} D_{\text{max}}^{5/2} \quad (3)$$

式中： D_{max} 为焦散斑的最大直径， m ； g 为应力强度因子的数值系数， $g=3.17$ ； z_0 为参考平面到试件表面的距离， $z_0=850\text{mm}$ ； c 为 PMMA 试件的应力光学常数， $c=0.88 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$ ； d_{eff} 为试件的有效厚度， $d_{\text{eff}}=5.0\text{mm}$ 。

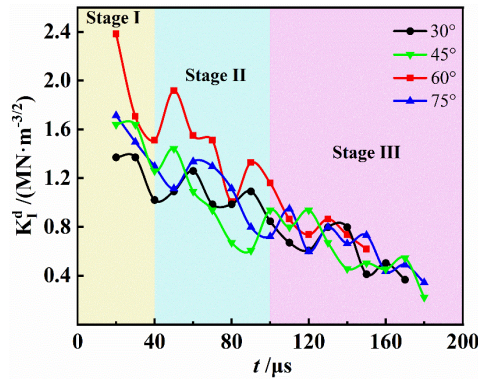


图 13 不同开口角度试件裂纹尖端的应力强度因子

Fig.13 Stress intensity factors at crack tips of specimens with varying opening angles

图 13 显示了不同开口角度试件主裂纹扩展的应力强度因子 $K_{d I}$ 随时间 t 的变化, $K_{d I}$ 的变化趋势与速度 v 相似, 主裂纹 $K_{d I}$ 的变化过程可分为 3 个阶段。在裂纹扩展第 I 阶段, 当开口角度为 $30^\circ \sim 75^\circ$ 时, 应力强度因子 $K_{d I}$ 分别为 $1.37\text{MN}/\text{m}^{3/2}$ 、 $1.64\text{MN}/\text{m}^{3/2}$ 、 $2.38\text{MN}/\text{m}^{3/2}$ 和 $1.71\text{MN}/\text{m}^{3/2}$ 。在裂纹扩展第 II 阶段, 应力强度因子 $K_{d I}$ 分别下降到 $1.09\text{MN}/\text{m}^{3/2}$ 、 $1.44\text{MN}/\text{m}^{3/2}$ 、 $1.91\text{MN}/\text{m}^{3/2}$ 和 $1.11\text{MN}/\text{m}^{3/2}$, 在裂纹扩展第 III 阶段, 主裂纹动态应力强度因子整体呈振荡衰减, 但 $K_{d I}$ 的振幅存在差异, 其原因在于开口角改变了聚能罩对反射应力波的调控特性, 导致反射波对四条主裂纹 $K_{d I}$ 的增强效应不一致。

3.4 爆炸能量利用分析

裂纹扩展过程中, 主裂纹的能量是有效的能量释放, 总能量释放率 $G_{d I}$ 等于各主裂纹的能量释放率之和。本实验裂纹是主要是 I 型裂纹, 应力强度因子与能量释放率 $G_{d I}$ 的关系可以表示为^[26]:

$$G_{d I}^R = \sum_{n=1}^N \frac{1}{E} A_1(v^n) (K_{d I}^n)^2 \quad (4)$$

式中: N 是 PMMA 板的主裂纹数, v^n 和 $K_{d I}^n$ 分别是第 n 个裂纹的扩展速度和应力强度因子。 E 是 PMMA 的动态弹性模量。 $A_1(v)$ 是裂纹速度和材料弹性性能的函数, $A_1(v)$ 可以表示为:

$$A_1(v) = \frac{v^2 \beta_1}{(1-v)c_s^2 (4\beta_1\beta_2 - (1+\beta_2^2)^2)} \quad (5)$$

$$\beta_1^2 = 1 - \frac{v^2}{c_p^2} \quad (6)$$

$$\beta_2^2 = 1 - \frac{v^2}{c_s^2} \quad (7)$$

其中 c_p 是样品的纵波速度, c_s 是样品的横波速度。

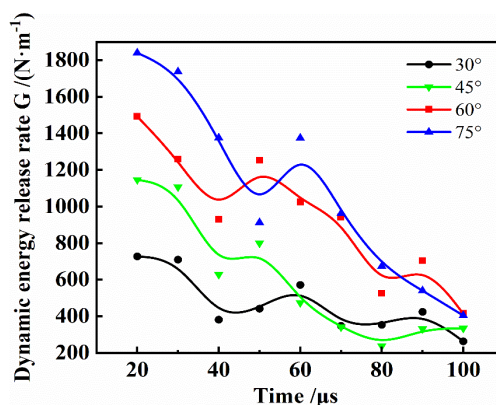


图 14 能量释放率-时间曲线

Fig.14 Energy release rate time curve

图 14 表明不同开口角度下新型“切缝+聚能”复合药型罩试件的动态能量释放率 G 随时间 t 的变化规律。整体来看，曲线均表现出明显的三阶段演化特征，即在爆轰初期迅速上升、中期出现振荡波动、后期逐渐衰减。爆炸能量释放率的初始峰值随开口角的变化呈现增大趋势，初始值分别约为 363.90N/m、573.43N/m、613.24N/m 和 746.05N/m。

结合第二章焦散线实验结果分析可知：开口角过小时，聚能通道狭窄使得爆生气体难以沿切缝充分逸出，气体的“静准态”加载作用不足，导致爆炸能量释放率偏低；当开口角为 60° 时，新型复合型药型罩在几何结构上实现了最佳的能量汇聚效果，爆生气体可以充分逸出，获得充分的裂纹驱动力，爆炸能量释放率较高；当开口角增至 75° 时，通道过宽引起气体过度泄散，裂纹起裂后“气楔”显著增强，从而加剧非聚能方向的损伤，爆炸能量释放率继续增大。

4 数值模拟

4.1 收敛性分析

为验证 Euler 算法的可靠性，对数值模拟工况开展网格收敛性分析。构建 1/2 轴对称模型，计算域为 $70\text{mm} \times 140\text{mm}$ ，金属射流通常在爆炸后的数十微秒内形成并趋于稳定，此阶段射流头部速度接近峰值且对网格划分较为敏感^[27]，本数值模拟射流稳定阶段主要位于 $20\sim 40\mu\text{s}$ 。因此选取 $t=26\mu\text{s}$ 时刻，设置多组不同网格尺寸，对新型药型罩聚能射流形成过程进行数值模拟，并绘制侵彻体头部速度随网格数量变化关系如图 15 所示，当网格尺寸为 $0.20\text{mm} \times 0.20\text{mm}$ 时，相较于 $0.10\text{mm} \times 0.10\text{mm}$ 和 $0.15\text{mm} \times 0.15\text{mm}$ 两种更细的网格，射流头部速度误差分别为 -6.3% 和 -3.3% 。侵彻体形成后射流头部速度的变化逐渐趋于稳定。综合考虑计算精度与效率，最终选取 $0.20\text{mm} \times 0.20\text{mm}$ 的网格尺寸。

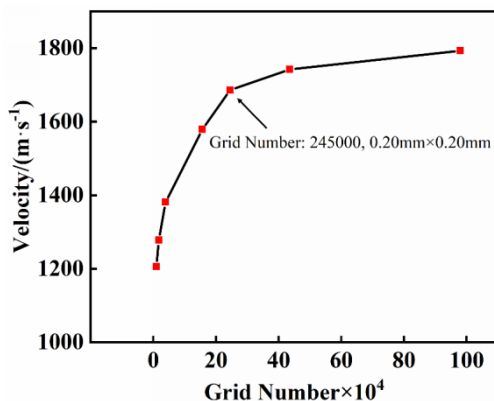


图 15 网格收敛性分析

Fig.15 Grid convergence analysis

4.2 模型建立

利用焦散线实验系统，只能观察到孔外应力波的传播规律，无法观察到聚能装药作用于炮孔壁时的应力波传播和裂纹形成过程，要考察聚能装药管爆炸作用下岩体的初始裂纹形成过程，采用 AUTODYN-2D 二维轴对称方法建立 50mm×100mm 模型，如图 16 所示。在建立模拟中，药型罩材料选用铜，炸药材料选用 TNT，采取中心点起爆，模型边界条件设为“FLOW-OUT”边界，计算区域为 70mm×140mm，网格大小选用 0.25mm×0.25mm，为了解决网格畸变问题，采用不同的数值计算方法：对于炸药、空气和聚能药型罩部分采用欧拉算法，对于岩石部分采用拉格朗日算法，利用流固耦合的方法可以同时处理流体和固体的相互作用，以此确保模拟的准确性和可靠性。

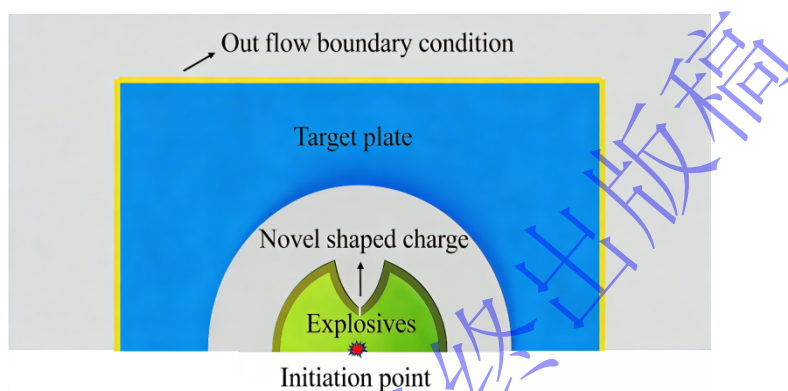


图 16 数值模拟模型

Fig.16 Numerical simulation model

根据已有相关岩石冲击与侵彻数值模拟研究表明^{[28][32]}，聚能装药管在爆炸初期具有一定的强度，当聚能装药管被挤压到孔壁时，在爆轰气体和爆炸热的冲击下，聚能方向的聚能装药管壁发生破坏，进而在聚能方向产生射流，对岩石造成定向断裂破坏，因此，选取理想弹塑性材料模拟含能管爆炸初始阶段，岩石材料采用 Johnson-Holmquist Concrete 本构模型，材料参数见表 6；金属药型罩采用 Steinberg-Guina 和 Shock 状态方程来描述，材料模型及状态方程参数见表 7；TNT 采用 JWL 状态方程^[35]来描述爆炸能量的释放过程：

$$P_j = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1}\right)e^{-R_1V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2}\right)e^{-R_2V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (8)$$

式中： P_j 为爆轰压力，Pa； A 、 B 为炸药参数，Pa； R_1 、 R_2 、 ω 均为炸药特性参数，无量纲； E_0 为爆轰产物内能， $J \cdot m^{-3}$ ； V 为初始相对体积，无量纲；具体参数见表 8。

表 6 岩石材料参数^[33]

Table 6 Rock material parameters

$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	G/GPa	σ_t/MPa	σ_c/MPa
2400	21.9	2.2	35

表 7 铜药型罩材料参数及状态方程参数^[34]

Table 7 Material parameters and state equation parameters of copper alloy hood

$\rho/g \cdot cm^{-3}$	E/GPa	ν	σ_y/MPa	γ_0	C_1	S_1	S_2
8.93	117	0.35	70	1.99	3.94×10^3	1.489	0

表 8 炸药的材料参数及 JWL 方程参数^[36]

Table 8 Material parameters of explosives and parameters of JWL equation

$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	E_0/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
--------------------------	-----------	---------	---------	-------	-------	----------

4.3 开口角度与应力演化规律

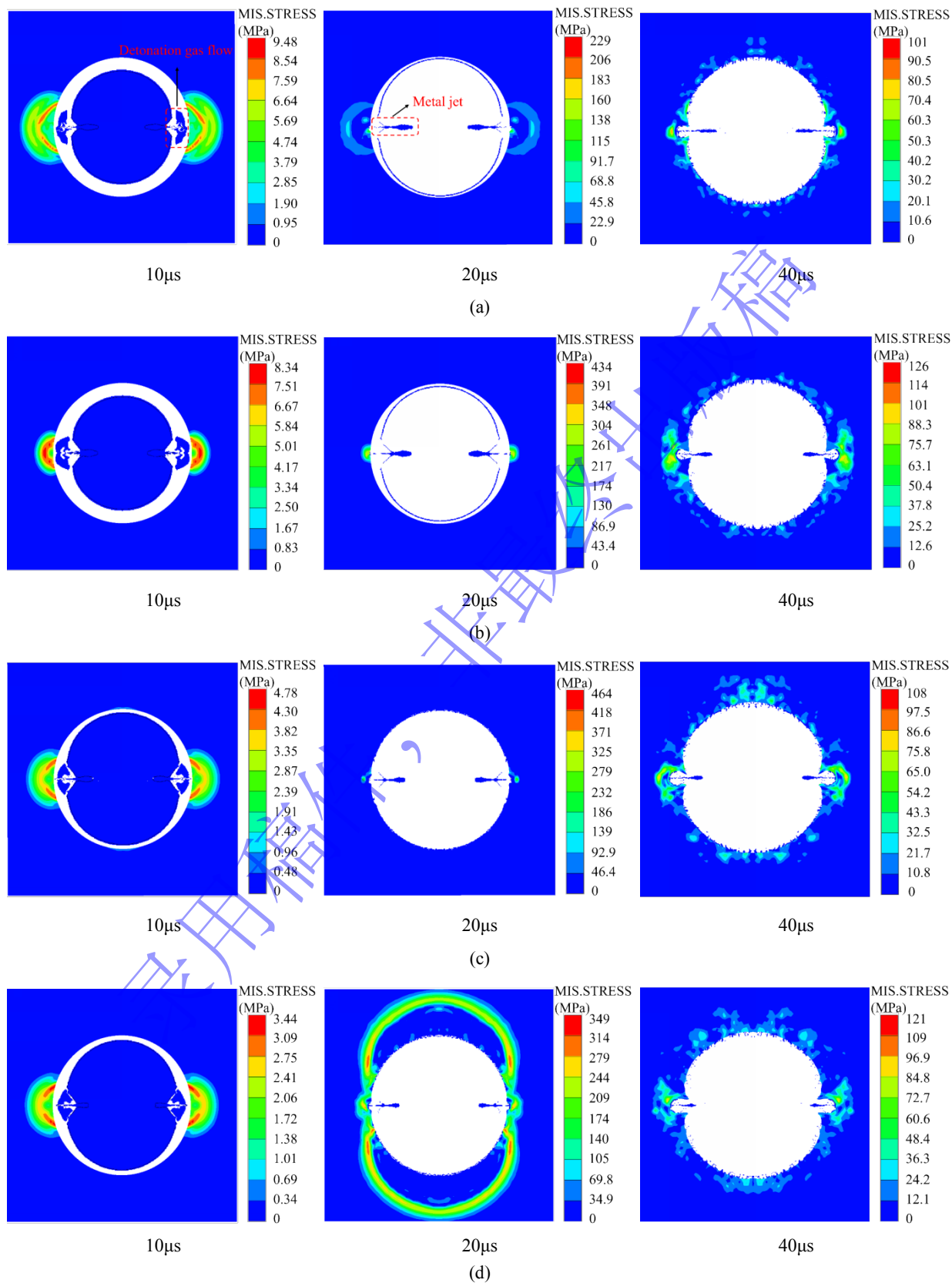


图 17 Mises 应力云图演化过程

Fig.17 Evolution process of Mises stress cloud diagram

不同开口角条件下岩石被侵彻过程的 von Mises 应力云图如图 17 所示。可以得出，在不同张角工况下，新型药型罩聚能装药结构在爆炸作用下经历了典型的“爆生气体流-金属射流-射流断裂”三阶段演化过程：在 $t=10\mu\text{s}$ 时，炸药起爆后爆生气体由聚能缝高速喷出，形成“爆生气体流”并首先作用于孔壁岩石表面；在 $t=20\mu\text{s}$ 时，药型罩结构基本被压垮，金属射流形成并以不同的射流头部速度撞击岩石单元，局部应力显著集中，岩石进入侵彻阶段；至 $t=40\mu\text{s}$ ，由于射流头尾部存在明显的速度梯度，金属射流发生断裂，对岩石的持续侵彻作用逐渐终止，此时侵彻深度达到最大值。

对比分析四种不同开口角工况下的 von Mises 应力云图可知，当开口角为 60° 时，金属射流的形态最为完整，射流头部的初始速度达到峰值为 1686m/s 。在爆生气体流与金属射流的协同作用下，对岩石单元产生显著的应力集中效应，使聚能效应达到最优。

4.4 数值模拟侵彻结果

采用 AUTODYN 数值模拟软件自带的专用测量工具，对不同开口角度药型罩对应的聚能射流侵彻深度与开孔孔径进行定量表征，数值模拟结果如表 9 所示。研究发现，随着药型罩开口角度的变化，聚能射流的侵彻深度与开孔孔径均呈现先增大至峰值后逐渐减小的演化规律。当药型罩开口角度为 30° 时，聚能射流的侵彻深度为 13mm ，开孔孔径为 10.1mm ；随着开口角度增大至 45° ，侵彻深度与开孔孔径同步提升，分别达到 16.8mm 与 11.4mm ；当开口角度进一步增至 60° 时，聚能射流的侵彻深度达到最大值 21.5mm ，开孔孔径增至 14.1mm ；而当开口角度继续增大至 75° 时，侵彻深度与开孔孔径均显著衰减，分别降至 15.7mm 、 8.4mm 。

表 9 数值计算侵彻结果

Table 9 Numerical calculation of piercing results

开口角度	侵彻深度/mm	入射孔径/cm
30°	13	10.1
45°	16.8	11.4
60°	21.5	14.1
75°	15.7	8.4

4.5 数值模拟与焦散线实验的对比验证

为检验数值模型的合理性，将数值模拟结果与动态焦散线实验结果进行对比分析。动态焦散线实验能够清晰记录裂纹的起裂与扩展过程，并获得裂纹扩展长度等关键参数，但受实验观测条件限制，难以直接测量金属射流在试件中的侵彻深度。本文将数值模拟得到的金属射流侵彻深度与实验测得的裂纹扩展长度变化规律进行比较，从变化趋势角度对数值模型进行间接验证。

结合表 4、9 统计数据，绘制不同开口角条件下射流侵彻深度与裂纹扩展长度变化关系图，如图 18 所示，焦散线实验表明，不同药型罩开口角条件下聚能方向裂纹扩展长度差异明显，且随开口角增大总体呈现先增大后减小的变化趋势，其中开口角为 60° 时裂纹扩展长度最大达 14.4cm ，表明该工况下爆炸能量在聚能方向的集中程度最高。侵彻结果显示，不同开口角条件下金属射流形态及侵彻能力亦存在显著差异，其中开口角为 60° 时射流结构最为完整、头部速度最高，对岩石的侵彻深度达到 21.5mm ，入射孔径为 14.1mm ，均为各工况中的最大值。

射流侵彻深度与裂纹扩展长度随开口角的变化趋势一致，均呈现先增大后减小的规律，并在 60° 时达到峰值。表明射流侵彻能力的增强有利于爆炸能量在聚能方向的集中，可以促进裂纹沿该方向扩展。数值模拟结果与实验观测在整体变化趋势上具有良好一致性，验证了所建立数值模型的可靠性。

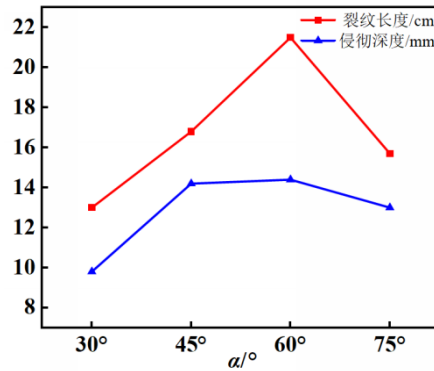


图 18 不同开口角条件下射流侵彻深度与裂纹扩展长度变化关系

Fig.18 Relationship between jet penetration depth and crack propagation length under different opening angles

5 结论

采用动态焦散线实验、分形维数分析及 AUTODYN 数值模拟方法探究复合型聚能药型罩定向破裂机理研究, 得到以下主要结论:

(1)“切缝+聚能”复合药型罩具有显著提升岩石定向断裂的能力, 且存在最优开口角。动态焦散线及分形维数分析表明, 该结构能够显著增强聚能方向裂纹扩展并抑制非聚能方向损伤, 裂纹长度及聚能/非聚能方向分形维数比值随开口角增大呈“先增后减”规律, 当开口角为 60° 时, 定向裂纹最长、非聚能区损伤最小, 定向控制效果最佳;

(2) 裂纹扩展与能量释放表现出典型三阶段动态演化特征, 裂纹扩展速度与动态应力强度因子均经历“应力波驱动-爆生气体主导-反射拉伸衰减”三阶段, 开口角为 60° 时速度峰值和动态应力强度因子最大; 爆炸能量释放率随开口角增大而增大, 在 75° 时达到最大, 但此时裂纹定向性与围岩保护劣于 60° 工况;

(3) 数值模拟揭示了“爆生气体准静态作用-金属射流高速侵彻”的双重作用机理, 并验证了 60° 的结构优选性。应力云图与侵彻结果表明, 复合药型罩爆炸过程经历“爆生气体流-金属射流-射流断裂”三阶段, 开口角为 60° 时射流形态最完整、头部速度最快达 1686m/s , 对岩体产生的应力集中最强, 侵彻深度: 21.5mm 和入射孔径: 14.1mm 均为最大, 为复合聚能装药结构参数优化及岩体定向控制爆破提供了可靠数值依据。

参考文献

- [1] LYU G, ZHOU C, JIANG N. Experimental and numerical study on tunnel blasting induced damage characteristics of grouted surrounding rock in fault zones [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(1): 603-617. DOI: 10.1007/s00603-022-03055-8.
- [2] MAO X, MA T, LIU J. Structure optimization of linear shaped charge based on different explosives [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2024, 49(5): DOI: 10.1002/PREP.202300321.
- [3] 何满潮, 郭鹏飞, 张晓虎, 等. 基于双向聚能拉张爆破理论的巷道顶板定向预裂[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(04): 795-803. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0359.
HE M C, GUO P F, ZHANG X H, et al. Directional pre-splitting of roadway roof based on the theory of bilateral cumulative tensile explosion [J]. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0359.
- [4] 宋俊生, 王雁冰, 高祥涛, 等. 定向断裂控制爆破机理及应用[J]. 矿业科学学报, 2016, 1(01): 16-28. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2016.01.004.
SONG J S, WANG Y B, GAO X T, et al. The mechanism of directional fracture controlled blasting and its ap

- plication [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2016, 1(01): 016-028. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2016.01.004.
- [5] YANG R S, CHEN G, YUE Z W, et al. Experimental study on the action of detonation gas under cutting seam cartridge blasting [J]. Coal Mine Blast, 2009, 4: 1-3. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2016.01.004.
- [6] 杨仁树, 王雁冰, 薛华俊, 等. 切缝药包爆破岩石爆生裂纹断面的 SEM 试验[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(03): 337-341. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.2013.03.002.
- YANG R S, WANG Y B, XUE H J, et al. SEM experiment of rock crack cross section morphology after explosion fracturing with slotted cartridge [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2013, 42(3): 337-341. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.2013.03.002.
- [7] XIAO C L, YANG R S, LI Q, et al. Experiment on blasting damage and dynamic caustics of jointed medium [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 259: 108143. DOI: 10.1016/J.ENGFRACMECH.2021.108143
- [8] Xie G H, Wang X Z, Li C, et al. Directional Fracture Blasting Experimental Study [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2516(341-342): 1477-1481. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.341-342.1477.
- [9] KANG Y Q, LI Y, XIAO C L, et al. Fractal damage and crack propagation of PMMA in multiple slit charge blasting [J]. Materials Today Communications, 2022, 31. DOI: 10.1016/J.MTCOMM.2022.103249.
- [10] DING C X, YANG R S, XIAO C L, et al. Directional fracture behavior and stress evolution process of the multi-slit charge blasting [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 152: 107037. DOI: 10.1016/J.SOILDYN.2021.107037.
- [11] YIN Y, SUN Q, ZOU B, et al. Numerical study on an innovative shaped charge approach of rock blasting and the timing sequence effect in microsecond magnitude [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(9): 4523-4542. DOI: 10.1007/s00603-021-02516-w
- [12] WU B, XU S, MENG G, et al. Study on dynamic evolution law of blasting cracks in elliptical bipolar linear shaped charge blasting [J]. Shock and Vibration, 2021, 2021(1): 5272878. DOI: 10.1155/2021/5272878
- [13] 申涛, 罗宁, 向俊彦, 等. 切缝药包爆炸作用机理数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(05): 1172-1180. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0410
- SHEN T, LUO N, XIANG J X, et al. Numerical simulation on explosion mechanism of split-tube charge holders [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(05): 1172-1180. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0410
- [14] GUO Y C, YANG R S, PENG S P, et al. Experimental study on decoupled charge blasting-induced crack propagation with parabolic shaped charge [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 304: 110178. DOI: 10.1016/J.ENGFRACMECH.2024.110178
- [15] 岳中文, 郭洋, 许鹏, 等. 定向断裂控制爆破的空孔效应实验分析[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(03): 304-311. DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0304-08.
- YUE Z W, GUO Y, XU P, et al. Analysis of empty hole effect in directional fracture controlled blasting [J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(3): 304-311. DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0304-08.
- [16] 李清, 薛耀东, 于强, 等. 含预制裂纹的悬臂梁-柱试件冲击断裂实验[J]. 矿业科学学报, 2018, 3(02): 139-147. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2018.02.005.
- LI Q, XUE Y D, YU Q, et al. Experimental study on impact fracture of cantilever beam-column specimen with prefabricated crack [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2018, 3(2): 139-147. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2018.02.005.
- [17] 杨仁树, 丁晨曦, 王雁冰, 等. 爆炸应力波与爆生气体对被爆介质作用效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2): 3501-3506. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0066.
- YANG R S, DING C X, WANG Y B, et al. Action-effect study of medium under loading of explosion stress wave and explosion gas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S2): 3501-3506. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0066.

- : 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0066
- [18] 刘彩连, 陈朗, 刘丹阳, 等. 药型罩锥角和壁厚对聚能射流速度影响的分析[J]. 北京理工大学学报自然版, 2015, 35(s2): 86-89. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2015.S2.021
LIU C L, CHEN L, LIU D Y, et al. Effects of cone angles or thicknesses of liner on shaped charge jet velocity[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(s2): 86-89. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2015.S2.021
- [19] LI X, YAN S, WANG J, et al. Influence of slot width in cartridge on crack propagation and energy concentration under explosion load [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 58(2): 1-15. DOI: 10.1007/S00603-024-04199-5.
- [20] WANG L Z, MEHRMASHHADI J, BOBARU F. Interfaces in dynamic brittle fracture of PMMA: a peridynamic analysis [J]. International Journal of Fracture, 2023, 244(1-2): 217-245. DOI: 10.1007/S10704-023-00731-W.
- [21] FOURNIER V, GIRARDOT J, KOPP B J. Revisiting dynamic fracture in PMMA: The Interplay Between Local and Global Methods[J]. International Journal of Fracture, 2025, 249(3): 47-47. DOI: 10.1007/S10704-025-00865-Z.
- [22] ROSSMANITH H P, DAEHNKE A, NASMILLNER R E K, et al. Fracture mechanics applications to drilling and blasting [J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 1997, 20(11): 1617-1636. DOI: 10.1111/j.1460-2695.1997.tb01515.x.
- [23] 谢和平, 陈至达. 分形(fractal)几何与岩石断裂[J]. 力学学报, 1988, (03): 264-271+290.
XIE H P, CHEN Z D. Fractal Geometry and Rock Fracture [J]. Acta Mechanica Sinica, 1988, (03): 264-271+290.
- [24] 杨仁树, 肖成龙, 李永亮, 等. 不耦合偏心装药结构爆破损伤破坏的分形研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(12): 129-134. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.12.017.
YANG R S, XIAO C L, LI Y L, et al. A fractal study on blasting damage of an eccentric decouple charge structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(12): 129-134. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.12.017.
- [25] 杨仁树, 肖成龙, 陈程, 等. 基于分形理论不同装药量的爆破动焦散线实验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(14): 80-86+93. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.14.012.
Yang R, Xiao C, Chen C, et al. Experimental study on the blasting dynamic caustics under different charge weight based on the fractal theory[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(14): 80-86. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.14.012.
- [26] Freund L B, Freund L B. Dynamic fracture mechanics[M]. Cambridge University Press, 1998.
- [27] WALTERS W P, ZUKAS J A. Fundamentals of Shaped Charges [M]. New York: Wiley, 1989.
- [28] KAN J L, DOU L M, LI X W, et al. Effect of initiation pattern on rock damage and blasting seismic under multi-hole blasting [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2023, 14(1): DOI: 10.1080/19475705.2023.2192334.
- [29] WANG Z L, WANG H C, WANG J G, et al. Finite element analyses of constitutive models performance in the simulation of blast-induced rock cracks [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 135: 104172. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104172.
- [30] WEI S J, LI J J, WANG M, et al. Parameter determination and numerical simulation of the sandstone HJC constitutive model [J]. ACS Omega, 2025, 10(18): 18744-18752. DOI: 10.1021/ACSOMEGA.5C00300.
- [31] 方秦, 孔祥振, 吴昊, 等. 岩石 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数的确定方法[J]. 工程力学, 2014, 31(03): 197-204. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.10.0780.
FANG Q, KONG X Z, WU H, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook constitutive model parameters of rock [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3): 197-204. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.10.0780
- [32] MARDALIZAD A, SAKSALA T, MANES A, et al. Numerical modeling of the tool-rock penetration process using FEM coupled with SPH technique [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 189: 107008-107008

8. DOI: 10.1016/j. petrol. 2020. 107008.
- [33] WANG J X, YIN Y, ESMAIELI K. Numerical simulations of rock blasting damage based on laboratory-scale experiments [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2018, 15(6): 2399-2417. DOI: 10. 1088/1742-2140/aacf17.
- [34] FENG H, WU H, FANG Q, et al. Numerical simulations of shaped charge jet penetration into concrete-like targets [J]. International Journal of Protective Structures, 2017, 8(2): 237-259. DOI: 10.1177/2041419617706863.
- [35] 焦俊杰, 单锋, 王晗程, 等. 基于水下爆炸的爆轰产物JWL状态方程确定方法研究[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(09): 134-142. DOI: 10. 11883/bzycj-2024-0203
- JIAO J J, SHAN F, WANG H C, et al. Determination of JWL equation of state based on the detonation product from underwater explosion [J]. Explosive and Shock Waves, 2025, 45(09): 134-142. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0203
- [36] BOGDANOV E N, VORONKOV R A, KNYAZEV V N. Determining the parameters of the Jones-Wilkins-Lee equation of state of explosives on the basis of data obtained by the barrier method [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2023, 59(5): 576-581. DOI: 10. 1134/S0010508223050064.