

高压物理学报

自由边界影响下定向断裂爆破裂纹尖端应力分布与扩展机理

邱鹏 岳中文

Stress Distribution and Propagation Mechanism of Crack Tip in Directional Fracturing Blasting under the Influence of Free Boundary

QIU Peng, YUE Zhongwen

引用本文:

邱鹏, 岳中文. 自由边界影响下定向断裂爆破裂纹尖端应力分布与扩展机理[J]. 高压物理学报, 2024, 38(5):054104. DOI: 10.11858/gywlb.20240799

QIU Peng, YUE Zhongwen. Stress Distribution and Propagation Mechanism of Crack Tip in Directional Fracturing Blasting under the Influence of Free Boundary[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(5):054104. DOI: 10.11858/gywlb.20240799

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240799>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单向围压下切槽爆破裂纹扩展规律研究

Crack Propagation Law of Notch Blasting under Unidirectional Confining Pressure

高压物理学报. 2023, 37(6): 064102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230716>

深部岩石爆破裂纹扩展与不耦合装药系数的关系

Relation between Crack Propagation and Decoupling Charging Coefficient in Deep Rock Blasting

高压物理学报. 2023, 37(5): 054203 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230649>

深部煤层水压爆破裂纹扩展规律

Crack Propagation Regularity of Hydraulic Blasting in Deep Coal Seam

高压物理学报. 2022, 36(3): 035301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210912>

混凝土界面过渡区对裂纹扩展过程的影响

Influence of Interfacial Transition Zone on Crack Propagation Process in Concrete

高压物理学报. 2023, 37(4): 044207 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230606>

不同炮孔间距对岩石爆炸裂纹扩展影响的数值分析

Numerical Analysis of Impact of Shot Hole Spacing on Crack Growth in Rock

高压物理学报. 2019, 33(4): 044103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180683>

花岗岩板双基火药切槽爆破破坏过程研究

Damage Process of Double Base Propellant Grooved Blasting on Granite Slab

高压物理学报. 2024, 38(4): 045302 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240711>

自由边界影响下定向断裂爆破裂纹 尖端应力分布与扩展机理

邱 鹏¹, 岳中文²

(1. 太原理工大学原位改性采矿教育部重点实验室, 山西 太原 030024;

2. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083)

摘要:天然岩体常含自由边界,对定向断裂爆破产生干扰。为探究自由边界对定向断裂爆破的影响,采用爆炸焦散线方法和高速摄影技术,研究了含自由边界时定向爆炸裂纹尖端的应力分布和扩展机理。自由边界的反射P/S波作用于定向爆炸裂纹,改变了裂尖应力分布,产生了“弧线形”裂纹扩展路径。定向爆炸裂纹扩展可分为3个阶段。(1)反射波作用前:裂尖受爆生气体“气楔”作用,产生I型断裂,并沿直线扩展。(2)反射波作用时:反射P/S波均使裂尖受张拉-剪切作用,产生I-II复合型断裂,裂纹偏转趋向自由边界;在反射P波的作用下裂尖产生畸变焦散斑,裂尖应力由K场主导变为非K场主导,而在反射S波的作用下裂尖应力恢复为K场主导。(3)反射波作用后:裂尖在惯性作用下恢复为I型断裂,沿直线扩展。在明确反射P/S波对定向爆炸裂纹作用的基础上,推导了自由边界影响下定向断裂爆破炮孔间距的计算公式,可为精细化定向断裂爆破提供理论参考。

关键词:自由边界;定向断裂爆破;反射P/S波;裂尖应力分布;裂纹扩展

中图分类号:O389; O521.9

文献标志码:A

定向断裂爆破是在特定方向上产生裂纹,满足特定的工程需求,对隧洞光面爆破^[1]、岩巷光面爆破^[2]、煤矿切顶卸压^[3]、坚硬顶板强制放顶^[4]、页岩气储层改造^[5]等具有重要的现实意义。然而,天然岩体含节理、缺陷、断层等自由边界,从而对定向爆炸裂纹尖端应力分布和裂纹扩展产生干扰。爆炸应力波在自由边界处会产生反射P/S波,反射波作用于定向爆炸裂纹,改变裂尖应力分布,导致裂纹扩展方向发生偏转,不利于定向断裂爆破实施。鉴于天然岩体的不透明性、爆炸的瞬态性、现场测试手段的局限性,定向断裂爆破设计常依赖于经验,自由边界对定向断裂爆破干扰的力学机理仍不清楚。

关于定向断裂爆破,诸多学者针对节理、缺陷、断层等自由边界对定向爆炸裂纹扩展的影响进行了研究。杨仁树等^[6]开展了含缺陷有机玻璃的定向断裂爆破实验研究,对比了裂纹缺陷、孔缺陷对定向爆炸裂纹扩展的影响。岳中文等^[7-8]分析了定向爆炸裂纹与斜节理、孔缺陷等自由边界的相互作用,发现节理使定向爆炸裂纹扩展方向发生偏转。王雁冰等^[9]对比了水平和竖直裂隙对定向爆炸裂纹扩展的影响规律。许鹏等^[10]研究了竖直层理产生的反射波对定向爆炸裂纹的抑制作用。费鸿禄等^[11]通过LS-DYNA数值模拟,分析了不同节理特征对爆炸裂纹扩展的影响。郭德勇等^[12]分析了断层对聚能爆破裂隙扩展和应力波传播的影响,发现断层产生的反射应力波叠加使煤体裂隙尖端产生应力集中。

* 收稿日期: 2024-04-22; 修回日期: 2024-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(52204106, 52174094); 国家重点研发计划(2021YFC2902103); 山西省基础研究面上项目(202203021211133)

作者简介: 邱 鹏(1991—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事煤岩爆破断裂研究。

E-mail: qiupeng@tyut.edu.cn

通信作者: 岳中文(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程、爆破工程、采矿工程研究。

E-mail: zwyue75@163.com

Qiu 等^[13-14] 等采用爆炸焦散线方法, 分析了水平和竖向反射应力波对定向爆炸裂纹尖端应力的影响, 建立了 I 型畸变焦散斑对应的应力强度因子测量准则, 并拓展至 I - II 复合型应力强度因子测量^[15]。

以往学者重点关注了节理、缺陷、断层等自由边界对定向爆炸裂纹扩展的影响, 较少涉及自由边界反射 P/S 波对裂纹的作用机理。反射 P/S 波改变了裂尖应力分布, 进而影响裂纹扩展方向, 是自由边界干扰定向断裂爆破的根本原因。

为此, 本研究采用爆炸焦散线方法和高速摄影技术, 将自由边界的反射 P/S 波、定向爆炸裂纹尖端应力可视化, 从裂尖应力和裂纹扩展两方面分析自由边界对定向爆炸裂纹的影响。按反射波作用时序, 将定向爆炸裂纹扩展分为 3 个阶段, 即反射波作用前、作用时、作用后, 重点分析反射 P/S 波对爆炸裂纹尖端应力分布和裂纹扩展路径的影响, 最后推导自由边界影响下定向断裂爆破炮孔间距的计算公式, 以期为精细化定向断裂爆破提供理论依据。

1 爆炸焦散线实验

1.1 爆炸试件

采用透明的有机玻璃材料, 开展爆炸焦散线实验。该材料透明且易于加工, 常用于爆炸实验^[16]。采用激光切割试件, 获得光滑平整的自由边界, 试件尺寸为 360 mm×200 mm×5 mm, 如图 1(a) 所示。试件含有 2 个直径为 10 mm 的空孔, 其中: A 为炮孔, 距上边界较近, 本实验重点研究上边界产生的反射 P/S 波对定向爆炸裂纹尖端应力和裂纹扩展的影响; B 为空孔, 远离上边界, 便于安装爆炸夹具。

采用切缝药包实现定向断裂爆破, 如图 1(b) 所示。切缝药包由直径为 10 mm 的 PVC 管制作, 壁厚 1.0 mm, 在其水平方向两侧切割出窄缝, 缝宽 0.5 mm。在两侧窄缝处将优先产生水平定向爆炸裂纹。切缝药包中采用单质猛炸药: 叠氮化铅 (PbN_6) 110 mg, 通过细铜丝连接高压起爆器, 由细铜丝尖端产生的高压电弧火花引爆。

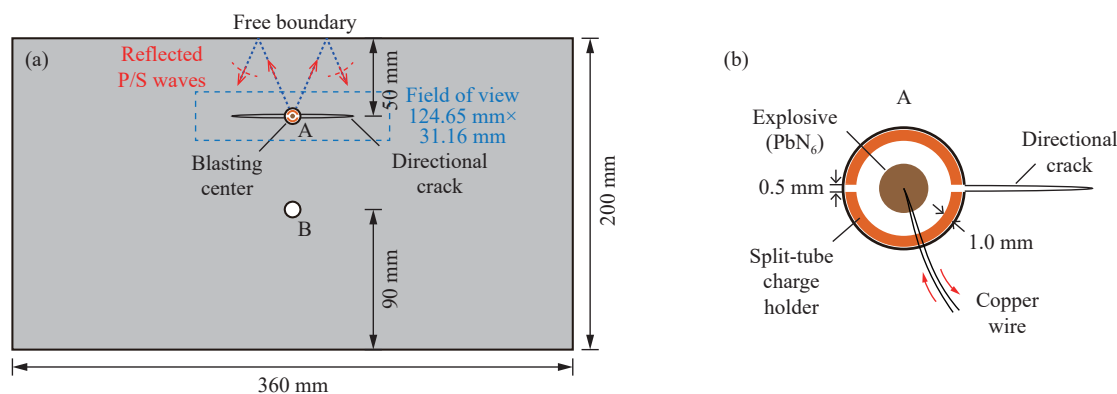


图 1 试件的示意图: (a) 试件尺寸, (b) 切缝药包

Fig. 1 Schematic diagram of the specimen: (a) size of the specimen; (b) slotted cartridge

1.2 爆炸焦散线实验系统

采用爆炸焦散线实验系统, 将自由边界的反射波和裂纹尖端的应力分布可视化, 从而直观地研究两者的相互作用^[17], 如图 2 所示。该系统由光学系统和起爆系统两部分组成。光学系统包括波长为 532 nm 的激光器、扩束镜、场镜 1、试件平台、场镜 2、Photron SA5 高速相机。起爆系统包括高压起爆器、细铜丝、叠氮化铅。2 个系统通过信号控制器实现同步。起爆器引爆叠氮化铅后, 同时触发信号控制器, 发出的控制信号触发高速相机, 最后将高速相机记录的爆炸过程储存于计算机中。

由于 Photron SA5 高速相机的拍摄视场随拍摄速度的增加而减小, 因此, 为兼顾拍摄速度和视场, 本实验的拍摄速度设置为 10^5 帧/秒, 像素视场为 512×128 , 实际视场为 $124.65 \text{ mm} \times 31.16 \text{ mm}$, 单位像素代表的实际长度为 $243.46 \mu\text{m}$ 。

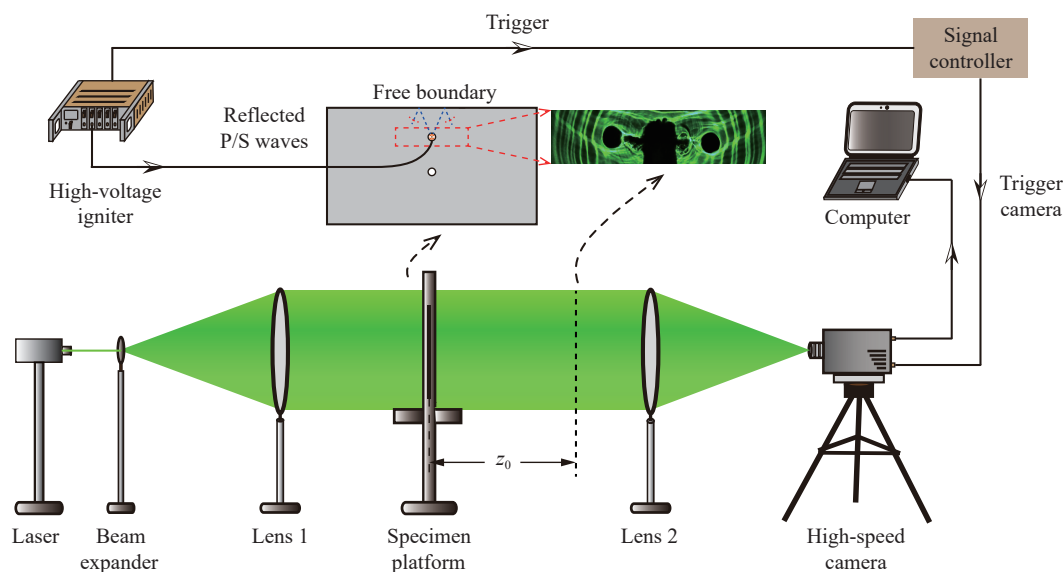


图 2 爆炸焦散线实验系统

Fig. 2 Blasting caustics experimental setup

2 爆炸裂纹尖端应力强度因子和扩展速度测量

焦散线方法可用于测量裂纹尖端应力强度因子, 该方法的开创者 Theocaris^[18] 和 Papadopoulos^[19] 根据裂尖焦散斑的尺寸和比例(图 3, 其中 D_T 为垂直裂纹扩展方向的焦散斑直径, D_L 为 I 型焦散斑沿裂

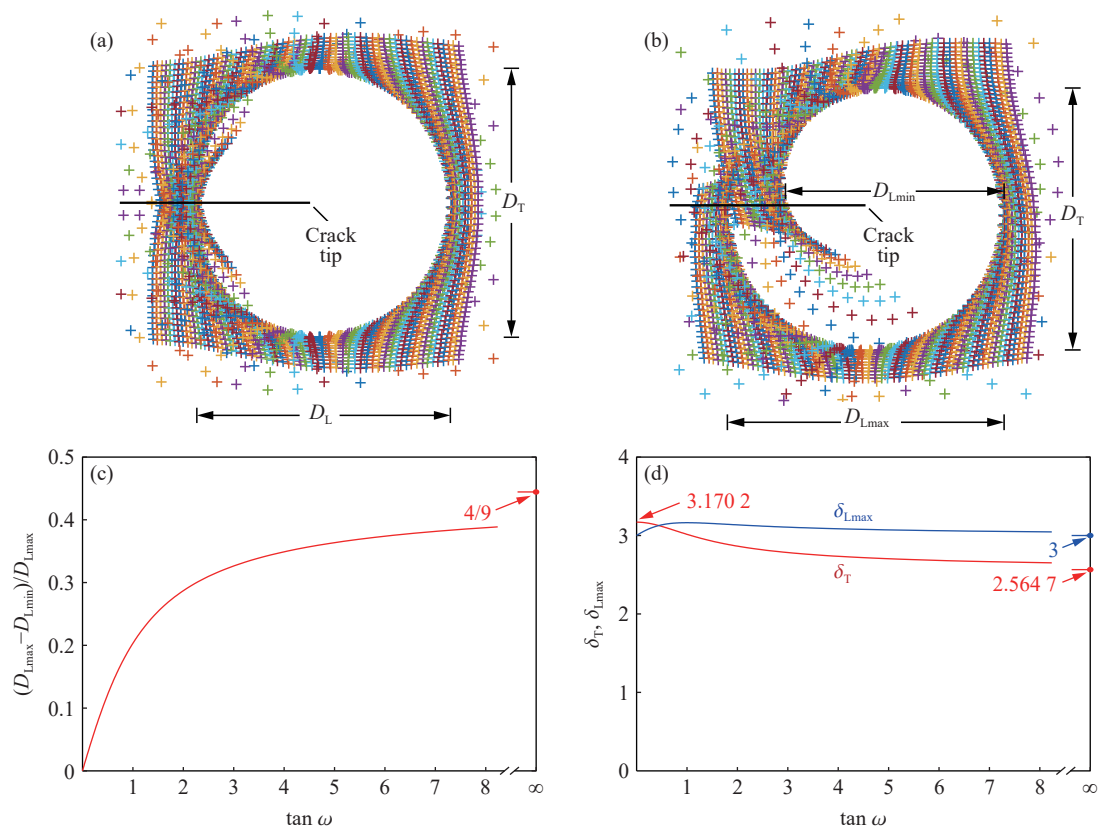
图 3 经典的焦散斑方法测量应力强度因子: (a) I 型焦散斑, (b) I-II 复合型焦散斑, (c) 焦散斑尺寸比例, (d) δ_T 和 δ_{Lmax}

Fig. 3 Classical stress intensity factor measurement by caustics patterns: (a) mode I caustics pattern; (b) mixed I-II mode caustics pattern; (c) ratio of caustics pattern size; (d) δ_T and δ_{Lmax}

纹扩展方向的直径, D_{Lmax} 和 D_{Lmin} 分别为 I - II 复合型焦散斑沿裂纹扩展方向的最大和最小直径), 给出了 I 型和 II 型应力强度因子的计算公式

$$K_I = \frac{2\sqrt{2}\pi F(v)}{3m^{3/2}c_t dz_0} \left(\frac{D_T}{\delta_T} \right)^{5/2} \cos \omega \quad \text{or} \quad K_I = \frac{2\sqrt{2}\pi F(v)}{3m^{3/2}c_t dz_0} \left(\frac{D_{Lmax}}{\delta_{Lmax}} \right)^{5/2} \cos \omega \quad (1)$$

$$K_{II} = K_I \tan \omega \quad (2)$$

式中: K_I 和 K_{II} 分别为 I 型和 II 型应力强度因子; $F(v) \approx 1$, 为裂纹速度影响因子; m 为实验系统放大系数, 本实验为平行光场, 未放大, $m=1$; $c_t=0.85 \times 10^{-10}$ [17], 为有机玻璃应力光学常数; $d=5$ mm, 为试件厚度; $z_0=250$ cm, 为相机成像平面与试件的距离; ω 反映 I - II 复合型程度, 与焦散斑尺寸比例有关, 如图 3(c) 所示; δ_T 和 δ_{Lmax} 分别为 D_T 和 D_{Lmax} 对应的数值因子, 如图 3(d) 所示。

根据图 3(a) 和图 3(b), 可获得每一时刻的裂尖位置, 经中点公式 [20], 可获得裂纹扩展速度

$$v = \frac{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} + \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}}{2\Delta t} \quad (3)$$

式中: $\Delta t=10$ μ s, 为高速相机拍摄相邻两张照片的间隔时间; (x_{i-1}, y_{i-1}) 、 (x_i, y_i) 、 (x_{i+1}, y_{i+1}) 分别代表 $i-1$ 、 i 、 $i+1$ 时刻的裂尖位置。值得注意的是, 因为高速相机每隔 10 μ s 拍摄一张照片, 裂纹扩展速度实为两时刻间的平均速度, 并非瞬时速度。

3 实验结果分析

3.1 实验重复性

在炮孔两侧均设计定向断裂, 验证同一爆炸过程中 2 条定向爆炸裂纹的重复性, 并与不同试件进行对比。对比发现, 4 条定向爆炸裂纹受自由边界影响, 均产生“弧线形”裂纹路径, 如图 4(a) 和图 4(b) 所示。为了进一步验证实验结果的可重复性, 根据高速相机拍摄的裂尖位置, 将 4 条定向爆炸裂纹扩展路径在同一坐标系中进行对比, 4 条裂纹基本重合, 如图 4(c) 所示。

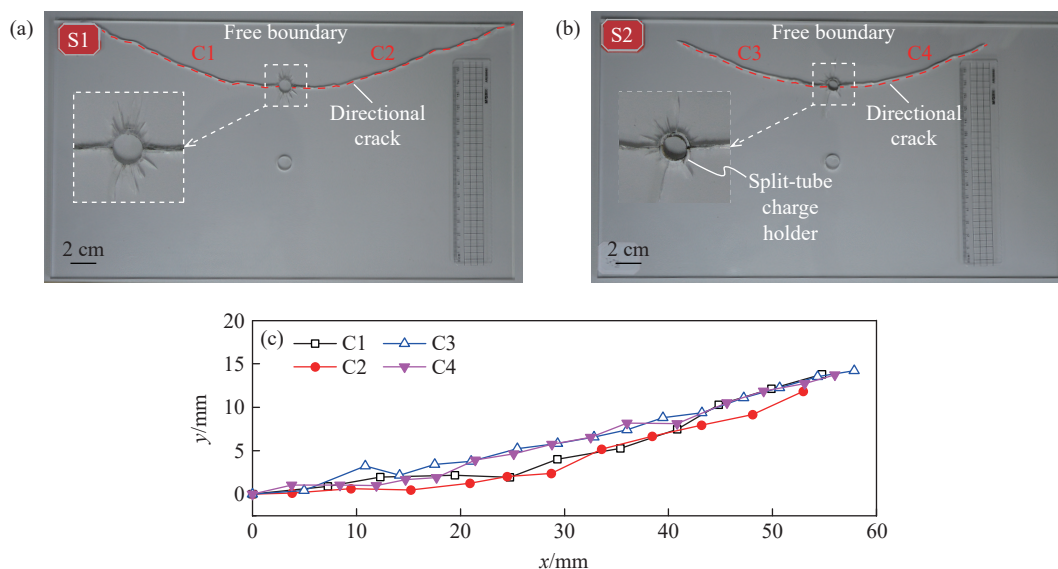


图 4 爆炸后裂纹路径: (a) 爆后试件 S1, (b) 爆后试件 S2, (c) 4 条定向爆炸裂纹路径
Fig. 4 Crack path after blasting: (a) specimen S1 after blasting; (a) specimen S2 after blasting;
(c) paths of four directional blast-induced cracks

3.2 自由边界影响下定向爆炸裂纹尖端应力分布

爆炸应力波在自由边界产生反射 P/S 波, P/S 波作用于定向爆炸裂纹, 改变裂尖应力分布。以试

件 S1 的爆炸焦散斑图像为例, 按时间顺序可分为 3 个阶段: (1) 反射波作用前, (2) 反射波作用时, (3) 反射波作用后。

3.2.1 反射波作用前爆炸裂纹尖端应力分布

反射波作用前, 炮孔两侧定向爆炸裂纹在爆炸应力波的作用下起裂, 并在爆生气体“气楔”作用下扩展, 如图 5 所示。当炮孔附近的爆炸应力波传播超过裂纹 C1 ($t=30\ \mu\text{s}$), 裂尖呈 I 型(张开)断裂, 在光场中表现为“圆形”焦散斑, 与经典焦散线理论曲线相吻合, 如图 5(b) 所示。此时, 裂尖应力为 K 场分布, 即由应力强度因子主导。 $t=40\ \mu\text{s}$ 时, 爆炸应力波超过裂纹 C2, 裂尖同样出现“圆形”焦散斑, 裂尖应力为 K 场分布。

然而, 当自由边界的反射 P 波返回临近爆炸裂纹 C1 时 ($t=40\ \mu\text{s}$), 受应力叠加的影响, 裂尖焦散斑发生畸变, 表现为“椭圆形”焦散斑, 如图 5(c) 所示, 意味着裂尖应力由 K 场主导变为非 K 场主导。采用本课题组提出的畸变焦散斑理论^[13, 17], 绘制出“椭圆形”焦散斑, 如图 5(c) 所示, 与实验图像相吻合。因裂纹 C2 的扩展方向偏下, $t=40\ \mu\text{s}$ 时反射 P 波未对其裂尖焦散斑产生干扰。

为进一步确认反射 P 波, 进行返回时间(波传播至边界并反射后返回到裂纹尖端的时间)计算。有机玻璃的 P 波波速为 $2.32\ \text{km/s}$ ^[17], 预估反射 P 波返回时间为 $(50\ \text{mm} \times 2 - 5\ \text{mm}) / (2.32\ \text{km/s}) = 40.95\ \mu\text{s}$, 与图 5(a) 中的拍摄结果相符。由于高速相机并非连续拍摄, 因此, 计算结果与拍摄结果存在一定的误差。

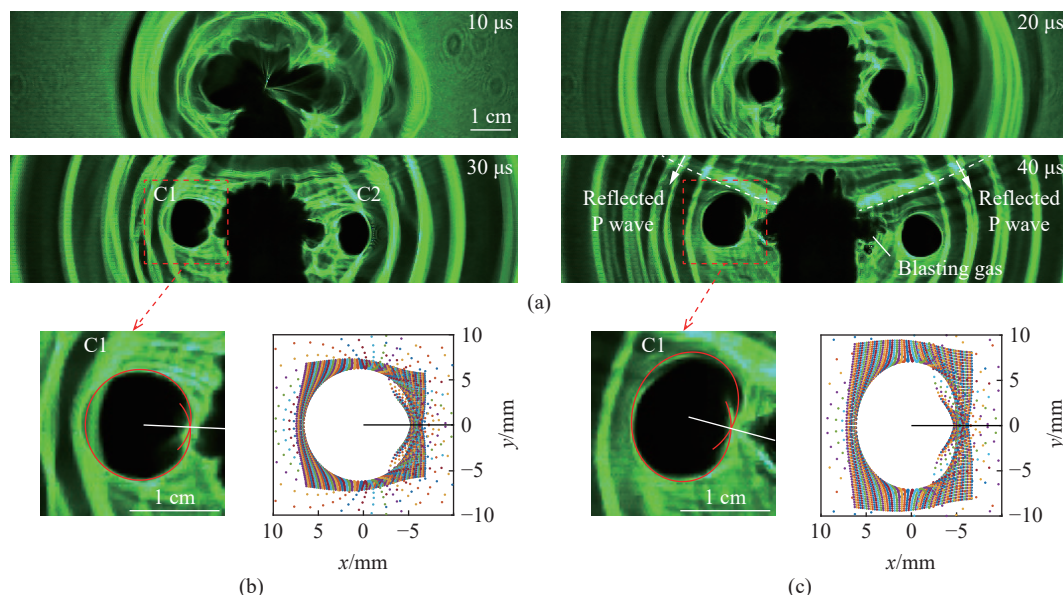


图 5 反射波作用前: (a) 爆炸焦散斑图像, (b) $t=30\ \mu\text{s}$ 时 C1 裂纹尖端“圆形”焦散斑, (c) $t=40\ \mu\text{s}$ 时 C1 裂纹尖端“椭圆形”焦散斑

Fig. 5 Before action of reflected waves: (a) blast-induced caustics patterns; (b) circle caustics pattern at the tip of crack C1 at $30\ \mu\text{s}$; (c) ellipse caustics pattern at the tip of crack C1 at $40\ \mu\text{s}$

3.2.2 反射 P 波作用时爆炸裂纹尖端应力分布

爆炸应力波在试件上侧边界产生反射 P 波和反射 S 波, 因波速差异, 反射波对定向爆炸裂纹的作用可分为 2 个阶段: 先反射 P 波作用, 后反射 S 波作用。

反射 P 波最先返回作用于定向爆炸裂纹尖端 ($t=50\ \mu\text{s}$), 裂纹 C1、C2 尖端均出现“椭圆形”焦散斑, 如图 6(a) 所示。采用本课题组提出的畸变焦散斑理论^[13, 17], 绘制出“椭圆形”焦散斑, 与实验图像相吻合, 如图 6(b) 所示。“椭圆形”焦散斑产生的原因是: 反射 P 波与裂尖应力相互叠加, 使裂尖应力由原先的 K 场主导变为非 K 场主导, 在光场中表现为焦散斑形状由“圆形”变为“椭圆形”。因此, 从焦散斑形状可直观地辨别裂尖应力分布状态。

由于反射 P 波以倾斜角度作用于水平定向爆炸裂纹, 因此, 在裂尖产生非对称加载, 导致裂尖产生

张拉-剪切作用,由 I 型断裂变为 I-II 复合型断裂,如图 6(c) 所示。张拉-剪切作用下,裂纹扩展将开始偏离水平方向,向上侧自由边界靠近。

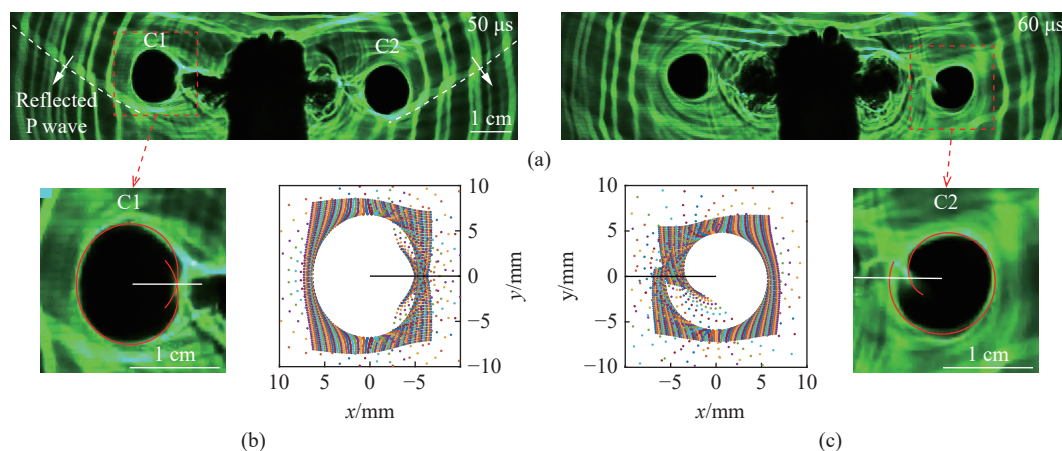


图 6 反射 P 波作用时: (a) 爆炸焦散斑图像, (b) $t=50 \mu\text{s}$ 时 C1 裂纹尖端的“椭圆形”焦散斑, (c) $t=60 \mu\text{s}$ 时 C2 裂纹尖端的 I-II 复合型焦散斑

Fig. 6 Under action of reflected P wave: (a) blast-induced caustics patterns; (b) ellipse caustics pattern at the tip of crack C1 at $50 \mu\text{s}$; (c) mixed I-II mode caustics pattern at the tip of crack C2 at $60 \mu\text{s}$

3.2.3 反射 S 波作用时爆炸裂纹尖端应力分布

反射 P 波作用后,反射 S 波返回作用于定向爆炸裂纹尖端($t=70 \mu\text{s}$),如图 7(a) 所示。根据焦散斑图像中条纹密集度的差异以及波速差异,可直观分辨出反射 S 波。为进一步确认反射 S 波,计算返回时间。有机玻璃的 S 波波速为 1.26 km/s ^[17],预估反射 S 波返回时间为 $(50 \text{ mm} \times 2 - 5 \text{ mm}) / (1.26 \text{ km/s}) = 75.40 \mu\text{s}$,与图 7(a) 中拍摄结果相符。高速相机并非连续拍摄,因此,计算与实验结果存在一定误差。

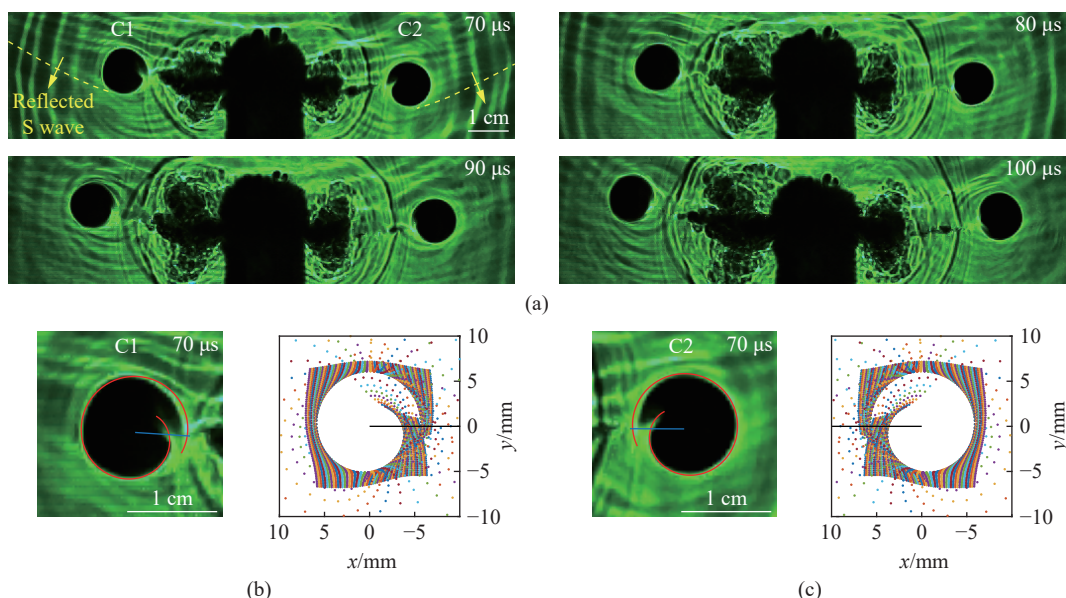


图 7 反射 S 波作用时: (a) 爆炸焦散斑图像, (b) $t=70 \mu\text{s}$ 时 C1 裂纹尖端的 I-II 复合型焦散斑, (c) $t=70 \mu\text{s}$ 时 C2 裂纹尖端的 I-II 复合型焦散斑

Fig. 7 Under action of reflected S wave: (a) blast-induced caustics patterns; (b) mixed I-II mode caustics pattern at the tip of crack C1 at $70 \mu\text{s}$; (c) mixed I-II mode caustics pattern at the tip of crack C2 at $70 \mu\text{s}$

反射 S 波作用下,由于 S 波自身的剪切作用,2 条定向爆炸裂纹 C1、C2 尖端均产生张拉-剪切作用,由 I 型断裂变为 I-II 复合型断裂,形成复合型焦散斑($t=70 \mu\text{s}$)。该实验图像与经典的焦散线理论

曲线相吻合, 未发生畸变, 如图 7(b) 和图 7(c) 所示。由此可知, 在反射 S 波的作用下, 裂尖应力为 K 场分布, 即裂尖应力由应力强度因子主导。

反射 S 波作用下, 由于裂尖产生 I-II 复合型断裂, 裂纹继续向上侧自由边界偏转。因此, “弧线形”裂纹路径是由反射 P/S 波共同作用产生的。两者作用的区别在于: 反射 P 波是由于倾斜作用角度使裂尖产生 I-II 复合型断裂, 而反射 S 波是由于自身的剪切作用使裂尖产生 I-II 复合型断裂。

3.2.4 反射波作用后爆炸裂纹尖端应力分布

反射 P/S 波作用后, 爆炸裂纹尖端恢复为 I 型(张开)断裂, 裂尖图像恢复为“圆形”焦散斑, 如图 8(a) 所示。实验图像与经典的焦散线理论曲线相吻合, 如图 8(b) 和图 8(c) 所示。由此可知, 裂尖应力恢复为 K 场分布, 由应力强度因子主导。尽管裂纹 C1、C2 的扩展方向不再偏转, 但之前的反射 P/S 波作用已将其方向偏转为斜向上。在惯性作用下, 裂纹 C1、C2 进一步靠近上侧自由边界。

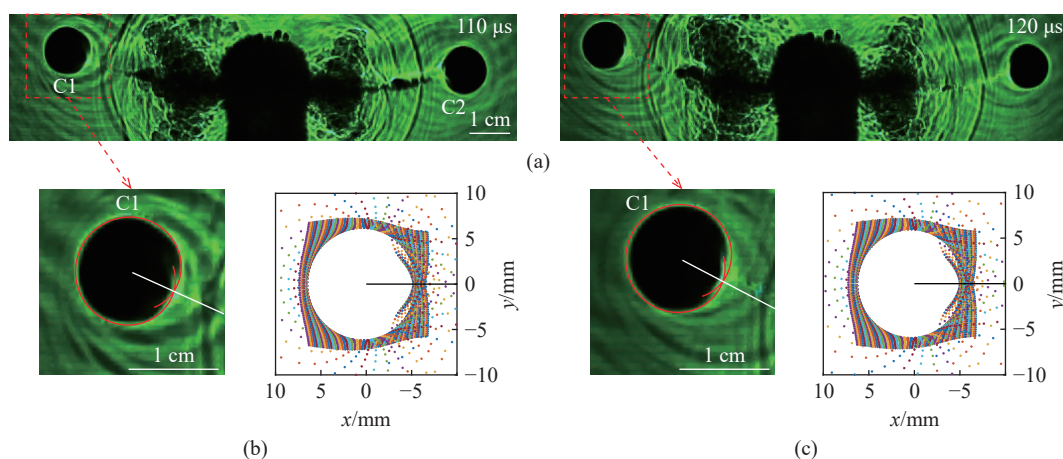


图 8 反射波作用后: (a) 爆炸焦散斑图像, (b) $t=110 \mu s$ 时 C1 裂纹尖端 I 型焦散斑, (c) $t=120 \mu s$ 时 C1 裂纹尖端的 I 型焦散斑

Fig. 8 After action of reflected waves: (a) blast-induced caustics patterns; (b) mode I caustics pattern at the tip of crack C1 at 110 μs ; (c) mode I caustics pattern at the tip of crack C1 at 120 μs

需要注意的是, 反射 P/S 波作用后, 裂尖出现了明显的应力波散射现象。该现象表明反射 P/S 波促进了裂纹扩展, 使裂尖蓄积了更多的应变能, 以应力波的形式向周围散射。

3.3 自由边界影响下定向爆炸裂纹尖端应力强度因子

通过测量焦散斑尺寸及其比例, 由式 (1) 和式 (2), 可得定向爆炸裂纹尖端应力强度因子 K_I 和 K_{II} , 并与反射 P/S 波作用时间对应, 如图 9 所示。4 条定向爆炸裂纹尖端的 K_I 和 K_{II} 变化规律具有相似性:

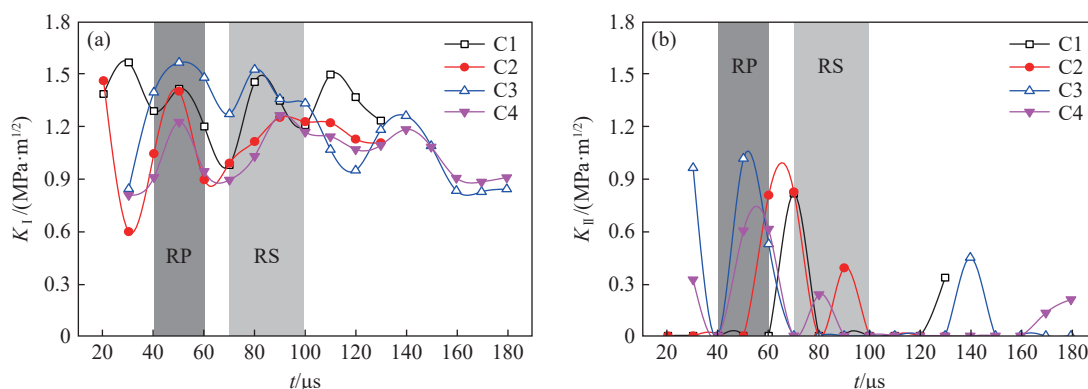


图 9 定向爆炸裂纹尖端应力强度因子: (a) I 型应力强度因子 K_I , (b) II 型应力强度因子 K_{II} (RP 和 RS 分别代表反射 P 波和反射 S 波)

Fig. 9 Stress intensity factors of directional blast-induced cracks: (a) mode I stress intensity factor K_I ; (b) mode II stress intensity factor K_{II} (RP and RS represent reflected P and S waves, respectively.)

在反射 P/S 波作用阶段, K_I 和 K_{II} 均增加, 且随着反射波的衰减而降低。

自由边界产生的反射 P/S 波均提高了定向爆炸裂纹尖端的 K_I , 形成 2 处峰值, 如图 9(a) 所示。反射 P 波的波前为拉伸项, 在爆炸裂纹尖端产生拉应力叠加, 增加了裂尖应力集中程度。反射 S 波在爆炸裂纹尖端产生剪应力叠加, 同样增加了裂尖应力集中程度。随着反射波的衰减, K_I 逐渐降低, 但是由于裂纹 I 型扩展的惯性作用, 并未瞬间下降。自由边界产生的反射 P/S 波均提高了定向爆炸裂纹尖端的 K_{II} 。随着反射波衰减, K_{II} 趋于零, 与 K_I 的变化相异。其原因是在惯性作用下, 裂纹天然趋于 I 型(张开)扩展^[21-22]。

3.4 自由边界影响下定向爆炸裂纹扩展行为

3.4.1 反射波作用下定向爆炸裂纹扩展速度

通过焦散斑图像获得每一时刻的裂尖位置, 从而可求出裂纹扩展速度, 并与反射 P/S 波的作用时间对应, 如图 10(a) 所示。可见, 4 条定向爆炸裂纹扩展速度(v)的变化规律具有相似性: 反射 P/S 波作用阶段均增加, 之后, 随着反射波衰减而逐渐降低。反射 P/S 波提高了裂纹扩展速度, 与焦散斑图像中裂尖应力波散射现象相互印证。裂纹扩展速度与图 9(a) 中 K_I 的变化趋势一致, 符合经典断裂力学中两者的正相关性, 如图 10(b) 所示。反射 P 波的波前为拉伸项, 促进了爆炸裂纹扩展, 与常识相符。需要注意的是, 反射 S 波在爆炸裂纹尖端叠加剪应力, 增加了裂尖应力集中程度, 同样促进了裂纹扩展, 这一点在以往研究中常被忽视。因此, 在分析爆炸裂纹扩展行为时, 不仅要考虑 P 波的作用, 也要兼顾 S 波的作用。

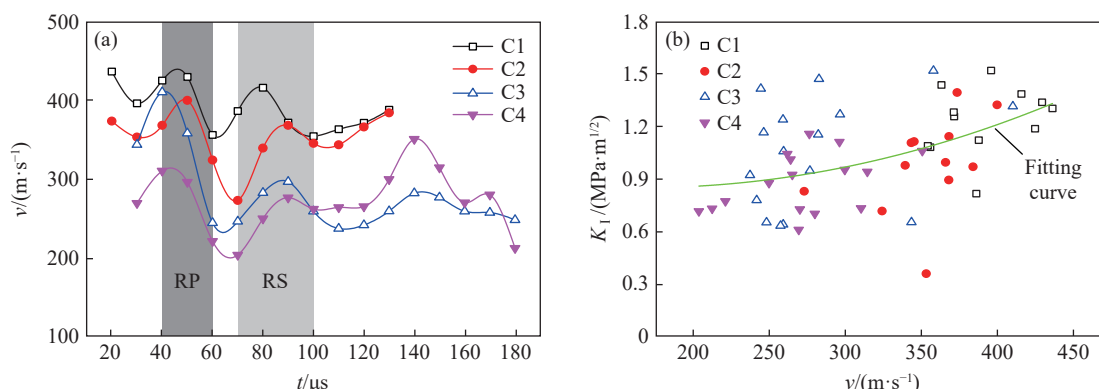


图 10 定向爆炸裂纹扩展结果: (a) 裂纹扩展速度, (b) 裂纹扩展速度与 K_I 的正相关性

Fig. 10 Results of directional blast-induced crack propagation: (a) crack propagation velocity; (b) positive correlation between crack propagation velocity and K_I

3.4.2 自由边界影响下定向断裂爆破炮孔间距计算

由爆炸后试件图片和爆炸过程中的焦散斑图像可知, 定向爆炸裂纹在反射 P/S 波的作用下产生“弧线形”路径, 与定向断裂爆破预期效果不符。因此, 需要控制炮孔间距, 使定向爆炸裂纹在反射波返回前贯通, 减少自由边界反射波的不利影响。以下将以反射 P/S 波返回裂纹尖端的时间计算定向断裂爆破炮孔间距, 如图 11 所示。

根据图 11 所示的几何关系, 建立方程组

$$2vt_{P,S} = a \quad (4)$$

$$\frac{1}{2}C_{P,S}t_{P,S}\cos\theta = w \quad (5)$$

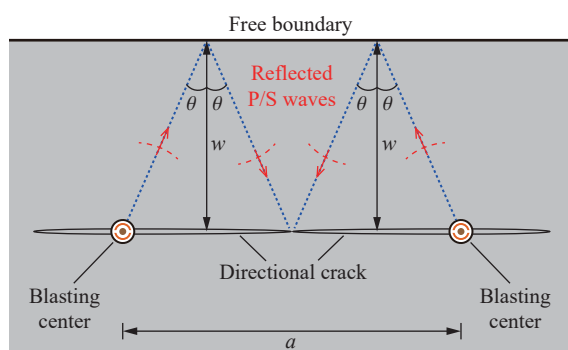


图 11 定向断裂爆破炮孔间距计算示意图

Fig. 11 Schematic diagram of borehole spacing calculation for directional fracturing blasting

$$\frac{v}{C_{p,s}} = \sin \theta \quad (6)$$

式中: a 为定向断裂爆破炮孔间距; $C_{p,s}$ 为反射 P/S 波波速; $t_{p,s}$ 为反射 P/S 波返回裂尖的时间; w 为爆破最小抵抗线, 即炮孔与自由面的最短距离; θ 为自由边界处反射 P/S 波对应的反射角度。

联立上述公式, 可得定向断裂爆破炮孔间距与裂纹速度、反射 P/S 波波速之间的关系

$$a = \frac{4}{\sqrt{(C_{p,s}/v)^2 - 1}} w \quad (7)$$

从上述公式推导结果发现, 定向断裂爆破炮孔间距为最小抵抗线乘以比例系数, 该比例系数为 P 波、S 波波速与裂纹速度之比的函数。本实验中, 有机玻璃中 P 波和 S 波的波速分别为 2.32 和 1.26 km/s^[17]; 由图 10(a) 可知, 爆炸裂纹速度在反射波作用前为 250~450 m/s, 可取 350 m/s。代入以上参数, 计算可得: 考虑反射 P 波作用时, 定向断裂爆破炮孔间距为 0.61 w ; 考虑反射 S 波作用时, 定向断裂爆破炮孔间距为 1.16 w 。为减少自由边界的反射 P/S 波对定向爆炸裂纹的干扰, 炮孔间距需小于 0.61 w ~1.16 w 。本研究从反射 P/S 波作用的角度推导了炮孔间距的计算公式, 可为精细化定向断裂爆破提供理论参考。

需要注意的是, 此处计算仅考虑了自由边界反射 P/S 波的干扰作用, 在实际定向断裂爆破工程中, 还需考虑被爆介质的内部结构、装药参数等因素。

4 结 论

采用爆炸焦散线方法和高速摄影技术, 研究了自由边界影响下定向断裂爆破裂纹尖端应力分布和扩展机理。定向爆炸裂纹扩展可分为 3 个阶段, 即反射波作用前、作用时、作用后, 分析了反射 P/S 波对定向爆炸裂纹尖端的应力分布、断裂模式、裂纹偏转的影响, 推导了自由边界影响下定向断裂爆破炮孔间距的计算公式, 得到以下结论。

(1) 反射波作用前, 定向爆炸裂纹尖端受爆生气体“气楔”作用, 产生 I 型(张开)断裂, 裂尖应力为 K 场主导, 即由应力强度因子主导, 裂纹沿直线扩展。

(2) 反射 P/S 波作用时, 裂尖均受到张拉-剪切作用, 均产生 I-II 复合型断裂, 导致裂纹偏转形成“弧线形”路径; 两者的区别在于, 反射 P 波是由于倾斜作用使裂尖产生 I-II 复合型断裂, 而反射 S 波是由于自身的剪切作用使裂尖产生 I-II 复合型断裂。反射 P 波作用下, 裂尖产生畸变焦散斑, 裂尖应力由 K 场主导变为非 K 场主导, 而反射 S 波对裂尖应力的干扰较小, 裂尖应力恢复为 K 场主导。

(3) 反射波作用后, 定向爆炸裂纹尖端在惯性作用下恢复为 I 型(张开)断裂, 裂纹沿直线扩展, 进一步趋向自由边界。

(4) 为减少反射 P/S 波的干扰作用, 推导了定向断裂爆破炮孔间距的计算公式, 可为精细化定向断裂爆破提供理论参考。

参考文献:

- [1] 赵晓明, 杨玉民, 蒋楠, 等. 深埋引水隧洞光面爆破周边孔装药结构优化试验研究 [J]. 高压物理学报, 2022, 36(4): 045301.
ZHAO X M, YANG Y M, JIANG N, et al. Optimization of charging structure of surrounding holes in smooth blasting of deep diversion tunnel [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(4): 045301.
- [2] 杨仁树, 李成孝, 陈骏, 等. 我国煤矿岩巷爆破掘进发展历程与新技术研究进展 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 224-241.
YANG R S, LI C X, CHEN J, et al. Development history and new technology research progress of rock roadway blasting excavation in coal mines in China [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 224-241.
- [3] 何满潮. 无煤柱自成巷开采理论与 110 工法 [J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 869-881.
HE M C. Theory and engineering practice for non-pillars mining with automagical entry formation and 110 mining method [J].

- Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 869–881.
- [4] 乔国栋, 刘泽功, 高魁, 等. 切缝药包超前预裂爆破厚硬顶板矿压与瓦斯综合防治试验研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(2): 334–345, 376.
- QIAO G D, LIU Z G, GAO K, et al. Experimental study on the control of mine pressure and gas governance in thick and hard roof by pre-blasting of slotted cartridge [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(2): 334–345, 376.
- [5] 杨国梁, 毕京九, 董智文, 等. 定向断裂控制爆破下层理页岩的致裂机理 [J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(6): 061001.
- YANG G L, BI J J, DONG Z W, et al. Fracturing mechanism of bedding shale under directional fracture-controlled blasting [J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(6): 061001.
- [6] 杨仁树, 丁晨曦, 杨立云, 等. 含缺陷 PMMA 介质的定向断裂控制爆破试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 690–696.
- YANG R S, DING C X, YANG L Y, et al. Experimental study on controlled directional fracture blasting on PMMA mediums with flaws [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 690–696.
- [7] 岳中文, 郭洋, 许鹏, 等. 定向断裂控制爆破爆生裂纹扩展机理的实验研究 [J]. 工程力学, 2016, 33(2): 50–58.
- YUE Z W, GUO Y, XU P, et al. Controlled blasting experimental study on the mechanism of blast-induced crack propagation under directional fracture [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(2): 50–58.
- [8] 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(3): 304–311.
- 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.
- [9] 王雁冰, 商禹智, 石震鑫, 等. 定向断裂双孔爆破含缺陷介质裂纹扩展的动焦散试验 [J]. 爆破, 2018, 35(1): 15–20, 48.
- WANG Y B, SHANG Y Z, SHI Z X, et al. Dynamic caustics experiment on crack propagation in defective medium by directional breaking with double hole blasting [J]. Blasting, 2018, 35(1): 15–20, 48.
- [10] 许鹏, 陈程, 郭洋, 等. 含垂直层理介质在切缝药包爆破下裂纹扩展行为的试验研究 [J]. 矿业科学学报, 2019, 4(6): 498–505.
- XU P, CHEN C, GUO Y, et al. Experimental study on crack propagation of slit charge blasting in media with vertical bedding plane [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2019, 4(6): 498–505.
- [11] 费鸿禄, 山杰, 包士杰, 等. 节理几何特征对爆破裂纹扩展的数值模拟研究 [J]. 工程爆破, 2023, 29(5): 12–21.
- FEI H L, SHAN J, BAO S J, et al. Numerical simulation study of joint geometric characteristics for explosion crack propagation [J]. Engineering Blasting, 2023, 29(5): 12–21.
- [12] 郭德勇, 张慧杰, 吕鹏飞, 等. 断层对深孔聚能爆破煤层增透的影响 [J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(10): 1281–1286.
- GUO D Y, ZHANG H J, LYU P F, et al. Effect of fault on deep-hole cumulative blasting to improve coal bed permeability [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(10): 1281–1286.
- [13] QIU P, YUE Z W, YANG R S, et al. Effects of vertical and horizontal reflected blast stress waves on running cracks by caustics method [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 212: 164–179.
- [14] QIU P, YUE Z W, JU Y, et al. Characterizing dynamic crack-tip stress distribution and evolution under blast gases and reflected stress waves by caustics method [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 108: 102632.
- [15] QIU P, YUE Z W, YANG R S, et al. Modified mixed-mode caustics interpretation to study a running crack subjected to obliquely incident blast stress waves [J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 150: 103821.
- [16] 吴延梦, 李洪伟, 苏洪, 等. 单向围压下切槽爆破裂纹扩展规律研究 [J]. 高压物理学报, 2023, 37(6): 129–139.
- WU Y M, LI H W, SU H, et al. Crack propagation law of notch blasting under unidirectional confining pressure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(6): 129–139.
- [17] 邱鹏. 爆炸应力波与裂纹相互作用机理研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2019.
- QIU P. Mechanisms of the interaction between blast stress waves and cracks [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2019.
- [18] THEOCARIS P S. Elastic stress intensity factors evaluated by caustics [M]//SIH G C. Experimental evaluation of stress concentration and intensity factors. Netherlands: Springer, 1981: 189–252.
- [19] PAPADOPOULOS G A. Fracture mechanics: the experimental method of caustics and the det.-criterion of fracture [M]. London: Springer-Verlag, 1993.
- [20] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

- LI Q Y, WANG N C, YI D Y. Numerical analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [21] ANDERSON T L. Fracture mechanics: fundamentals and applications [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005.
- [22] 范天佑. 断裂动力学原理与应用 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- FAN T Y. Principles and applications of fracture dynamics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006.

Stress Distribution and Propagation Mechanism of Crack Tip in Directional Fracturing Blasting under the Influence of Free Boundary

QIU Peng¹, YUE Zhongwen²

(1. Key Laboratory of In-Situ Property-Improving Mining of Ministry of Education,
Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Natural rock masses often contain free boundaries, which can interfere with directional fracturing blasting. To investigate effects of free boundary on directional fracturing blasting, the caustics method and high-speed photography were used to study the crack-tip stress distribution and propagation of directional blast-induced cracks. The reflected P/S waves from the free boundary act on a directional blast-induced crack, and change the crack-tip stress distribution and generate an “arc shaped” crack path. Directional blast-induced crack propagation can be divided into three stages. Stage one: before the action of reflected waves, the crack tip is subjected to the action of a blast-induced gas wedge, resulting in a mode I crack that propagates along a straight line. Stage two: under the action of reflected waves, both reflected P and S waves cause the crack tip to be subjected to tension and shear action, resulting in a mixed mode I - II crack which deflects towards the free boundary. Under reflected P waves, the crack tip produces distorted caustics, and crack-tip stress changes from K-dominated field to non-K-dominated field, while under reflected S waves, crack-tip stress returns to K-dominated field. Stage three: after the action of reflected waves, the crack tip is subjected to inertial action and then returns to a mode I crack which propagates along a straight line. On the basis of clarifying effects of reflected P/S waves on the tip of directional blast-induced cracks, a calculation formula for the distance between two directional fracturing blasting holes under the influence of free boundary is derived, providing a theoretical basis for refined directional fracturing blasting.

Keywords: free boundary; directional fracturing blasting; reflected P/S waves; crack-tip stress distribution; crack propagation