

微差时间对预裂爆破效果及围岩稳定性影响

苏洪^{1,2,3}, 高承武^{1,*}, 李桂臣⁴, 岳文豪¹, 汪泉¹, 郭子如¹,

孙元田⁴, 龚悦^{1,2}

(1.安徽理工大学化工与爆破学院, 安徽 淮南 232001;

2.安徽理工大学安徽省新型爆炸材料与爆破技术工程研究中心, 安徽 淮南 232001;

3.安徽理工大学深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽 淮南 232001;

4.中国矿业大学矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 在岩石开挖工程中, 预裂爆破是保护围岩稳定性的关键技术手段。预裂孔与主爆孔的起爆延时时对爆破效果及围岩稳定性具有决定性影响。为揭示其内在作用机制, 本研究采用数字激光动态焦散线(DLCS)系统结合AUTODYN数值模拟方法, 系统研究了不同起爆延时时条件下预裂裂纹扩展规律、应力场演化特征及保留岩体中原生裂纹的动态响应规律。实验制备了聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)试件, 设计多组起爆延时时工况。结果表明: 当主爆孔在预裂裂纹扩展阶段起爆时, 裂纹尖端断裂模式由I型向I-II复合型转变, 预裂裂纹发生偏转, 有效预裂缝长度最低降至20.2%, 破坏预裂面连续性; 对于围岩稳定性, 预裂爆破产生的应力波叠加效应与爆生气体准静态压力可对原生裂纹产生压实闭合作用; 随着起爆延时时延长, 预裂裂纹对主爆应力波的衰减效应显著增强, 原生裂纹尖端应力强度因子峰值从 $0.156 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ 降至 $0.081 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$, 最大降幅达48.1%, 抑制原生裂纹起裂与扩展, 进而提升围岩稳定性。数值模拟结果与DLCS实验数据吻合良好, 验证了结论的可靠性。本研究明确了起爆延时时对预裂爆破效果及围岩稳定性的调控机制, 为工程实践中爆破参数优化提供了重要的理论支撑与工程技术指导。

关键词: 动焦散; 预裂爆破; 微差时间; 波与裂纹; 数值仿真

中图分类号: O381

国标学科代码: 44020

文献标识码: A

Influence of delay time on pre-splitting blasting performance and surrounding rock stability*

SU Hong^{1,2,3}, GAO Chengwu^{1,*}, LI Guichen⁴, YUE Wenhao¹, WANG Quan¹, GUO Ziru¹, SUN Yuantian⁴, GONG Yue^{1,2}

(*School of Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;

*收稿日期: 2026-03-26; 修回日期: 2026-06-06;

基金项目: 1.安徽省新型爆炸材料与爆破技术工程研究中心(项目编号: AHBP2024A-02); 2.国家自然科学基金(项目编号: 52304201, 52474160, U22A20165); 3.非煤露天矿山安全智能开采国家矿山安全监察局重点实验室重点专项课题(编号: 2024-K05)

第一作者: 苏洪(1987-), 男, 博士, 副教授. E-mail: hsu@aust.edu.cn;

通信作者: 高承武(2003-), 男, 研究生. E-mail: 3305471293@qq.com。

²Anhui Engineering Research Center of New Explosive Materials and Blasting Technology, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;

³State Key Laboratory of Deep Coal Safe Mining and Environmental Protection, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;

⁴School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: In rock excavation engineering, presplit blasting serves as a core technology to protect the integrity and long-term stability of surrounding rock masses, while the initiation delay between presplit holes and main blast holes is the dominant parameter that directly determines blasting contour quality, stress wave transmission law and retained rock damage degree. To reveal the intrinsic dynamic regulation mechanism of initiation delay on presplit blasting process, this study adopted a coupled method of Digital Laser Dynamic Caustics (DLCS) test system and AUTODYN nonlinear dynamic numerical simulation. A series of dynamic blasting tests were conducted on polymethyl methacrylate (PMMA) specimens with prefabricated primary cracks under multiple typical delay conditions, to systematically analyze presplit crack propagation characteristics, blast stress field evolution, and initiation and propagation response of primary cracks in retained rock masses. Results show that when the main blast holes are initiated during the propagation of presplit cracks, the fracture mode at the crack tip transforms from Mode I to mixed Mode I-II, and the presplit cracks deflect. The effective length of the presplit fracture decreases to 20.2% at minimum, which impairs the continuity of the presplit surface. For surrounding rock stability, the stress wave superposition effect and the quasi-static pressure of detonation gas produced by presplit blasting can compact and close the primary cracks. With the increase of initiation delay time, the attenuation effect of presplit cracks on the main blast stress waves is significantly enhanced. The peak stress intensity factor at the tip of primary cracks decreases from $0.156 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ to $0.081 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$, with a maximum reduction of 48.1%, which restrains the initiation and propagation of primary cracks and thus improves the stability of surrounding rock. The numerical simulation results are in good agreement with the DLCS test data, verifying the reliability of the conclusions. This study clarifies the regulation mechanism of initiation delay on presplit blasting performance and surrounding rock stability, and provides important theoretical support and engineering guidance for the optimization of blasting parameters in engineering practice.

Keywords: dynamic caustics; presplit blasting; delay time; stress wave and crack; numerical simulation

在矿山、水利和交通等工程中，爆破是岩石开挖的主要手段，但传统爆破常对保留岩体造成扰动^[1,2]，影响工程安全与稳定^[3-5]。预裂爆破通过主炮孔起爆前先起爆预裂孔引导预裂缝形成^[6,7]，可以削弱主爆应力波对保留岩体的破坏作用^[8]。在此过程中，预裂孔与主爆孔间的微差起爆时间是调控应力波叠加与能量分布的关键因素，直接关系到岩体损伤控制与爆破效果^[9-11]。因而，深入研究其合理设置，对实现高效、安全、精准的岩石开挖具有重要意义。

焦散线方法是典型的光测力学方法，早期已被用于裂纹尖端应力强度因子的实验测定和动态断裂研究。例如，Gdoutos^[12]对焦散线方法在断裂力学中的应用进行了系统研究；Beinert^[13]采用阴影光学/焦散线方法测定动态应力强度因子；Kalthoff^[14]后续也对焦散线方法在实验力学中的应用进行了总结。在爆破动力学领域，焦散线方法已被用于研究爆炸应力波作用下裂纹起裂、扩展、偏转及波-裂纹相互作用等问题。例如，杨仁树等^[15]采用焦散线方法研究了爆炸荷载下空孔与运动裂纹的相互作用机理；邱鹏^[16]修正了在动荷载作用下的裂纹尖端应力强度因子的精准测量，完善了动态测试的理论体系。

微差爆破方面，通过合理调整微差时间，可减弱不利地质条件影响，控制爆破有害效应，降低单耗并改善块度，从而提升整体爆破效果。Seccatore等^[17]通过现场实验、数值模拟及信号分析等手段，明确了合理设置微差时间可优化爆破破碎效果、降低振动危害并提升围岩稳定性。Zhang等^[18]通过理

论分析、数值模拟及现场实验,明确了在高台阶孔的微差爆破中,调整适宜的参数可优化岩石破碎效果与应力分布。Ding 等^[19]通过理论推导、数值模拟及实验测试,揭示了相邻炮孔间应力波叠加效应及其对裂纹起裂与扩展规律的影响机制。冷振东等(2019)^[20]探究了孔内双点起爆条件下的爆炸能量传输机制与破岩性能,研究表明,该起爆方式可通过调控应力波叠加效应,优化能量利用效率,提升岩体破碎均匀性。在此基础上,冷振东等(2024)^[21]进一步开展了工业电子雷管在台阶爆破中的工程应用研究,证实精准调控段间延时能够有效强化应力波叠加效果、降低爆破振动强度,进而优化台阶爆破的破岩效果。关振长等^[22]分析了爆炸应力波传播、岩石破碎及抛掷规律,指出预裂孔与主爆孔间不同的微差时间对岩体可能造成不同程度的破坏效果。

预裂爆破方面,Liu 等^[23]构建了新型裂纹动态驱动模型,揭示了预裂爆破中应力波与爆生气体协同作用下动态裂纹定向起裂、贯通的核心机理。Ji 等^[24]采用数字图像相关(DIC)技术和动态焦散系统,验证预裂缝在加剧被爆岩体损伤、阻碍爆破裂纹向保留岩体的扩展中起到关键作用。Ma 等^[25]基于应力波叠加诱导损伤原理,建立了初始应力下岩石预裂爆破的裂缝聚结判据,以预测孔间裂纹的传播行为。马泗洲等^[26,27]萨达系统揭示了初始地应力场下岩体爆破的损伤演化规律与裂纹扩展主控机制,阐明了地应力条件下预裂爆破的成缝过程、裂纹偏转机制及成缝质量主控因素。Li 等^[28,29]深入研究了高地应力环境中的预裂爆破问题,明确了高地应力主导预裂裂纹发育的内在机制,并通过实验测试与数值模拟手段,揭示了初始地应力与爆破荷载共同作用下岩体破裂模式的动态演化规律。Liu 等^[30]探究了空孔间距对爆生裂纹扩展的影响机制,证实优化空孔间距能有效调控应力集中效应并引导爆破裂纹的定向延伸。

目前,微差爆破的研究多集中于主爆区相邻炮孔间的延时设计,取得了大量有益成果;而预裂爆破的研究则主要聚焦于成缝机制与减振效果。尽管如此,针对预裂孔与主爆孔之间微差时间对预裂爆破裂纹扩展行为及围岩稳定性影响的作用机制,尚缺乏系统、深入的研究。为此,本文拟采用数字激光动态焦散线测试系统结合数值模拟,对预裂孔与主爆孔间微差时间的调控机制开展系统研究。该研究不仅有助于深化对预裂爆破中裂纹演化规律的理解,也将为爆破参数优化设计、提升岩体定向破裂控制能力及保障围岩稳定性提供理论支撑与实践指导。

1 实验原理及系统

1.1 实验原理

数字激光动态焦散线系统(DLCS)具有非接触、高时空分辨率及裂纹尖端力学参数可定量反演等优势,能够同步获取焦散斑形态、裂纹扩展路径及动态应力强度因子^[31-41]等信息。相较于仅能表征表面位移场或宏观裂纹形态的测试方法,DLCS 更适用于爆炸荷载下裂纹尖端瞬态断裂行为的研究。基于此,本文采用 DLCS 方法,在微差起爆条件下对预裂孔与主爆孔作用过程中裂纹扩展行为及应力演化特征进行高精度观测与分析,从而揭示波-裂纹相互作用机制。

焦散线原理如图 1 所示,当透明光弹材料(如 PMMA)受瞬时加载作用时,裂纹尖端因应力集中导致局部折射率发生变化,从而使激光在通过该区域时发生非均匀折射。在参考屏上形成由强光边界包围的阴影区,即所谓“焦散斑”,其边界即为“焦散线”。焦散斑的形态、大小与变化规律反映了裂纹尖端应力强度因子的演化过程。

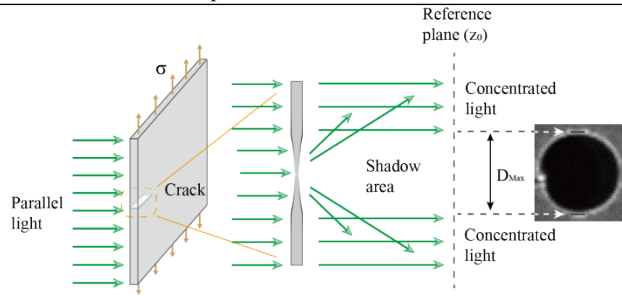


图1 焦散线原理图

Fig.1 Schematic diagram of the caustics principle

1.2 实验系统

数字激光动态焦散线(DLCS)系统主要由激光器、扩束镜、两片场镜、爆炸加载架、同步信号控制器、起爆器、超高速相机及数据采集计算机组成,如图2所示。其中,激光器选用波长为532 nm绿色激光源,输出功率范围为0~600 W;扩束镜具备1.5 mrad的扩束角度,有效扩大光斑覆盖区域;场镜通光孔径为300 mm,光学透过率达90%,确保良好的成像质量。动态断裂过程的可视化采集采用NAC-M40型超高速相机,结合本文预裂裂纹扩展的时间尺度特征,将拍摄帧率设置为 10^5 fps、图像分辨率设为 1280×896 pixels,完整捕捉裂纹尖端从起裂、扩展到止裂的全动态过程^[42]。实验采用多通道同步信号控制器实现预裂孔与主爆孔的精准延时起爆,时间控制精度可达 $1 \mu\text{s}$,完全满足不同微差时间工况的时序控制要求。

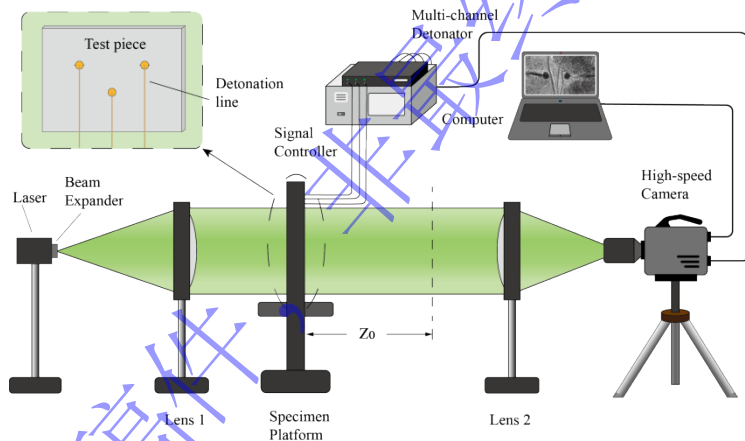


图2 焦散线实验系统

Fig.2 Dynamic caustics experimental system diagram

1.3 数据处理

1.3.1 应力强度因子

通过每组实验的焦散图片,测量焦散斑特征尺寸 D_{\max} 并带入公式(1)、(2)可准确描述裂纹尖端应力强度因子^[43]。

$$K_I^d = \frac{2\sqrt{2\pi}F(v)}{3g^{5/2}Z_0C_I d_{\text{eff}}} D_{\max}^{5/2} \quad (1)$$

$$K_{II}^d = \mu K_I^d \quad (2)$$

式中, K_I^d 为I型应力强度因子, D_{\max} 为焦散斑最大直径, D_{\min} 为焦散斑最小直径; μ 为应力强度因子比例系数,其值可根据 $(D_{\max}-D_{\min})/D_{\min}$ 查表确定; g 为焦散线数值因子; Z_0 为试件与参考平面间的距离; C_I 为试件光学特性常数; d_{eff} 为试件有效厚度; v 为裂纹扩展瞬时速度; $F(v)$ 为速度修正因

子, 其公式为:

$$F(v) = \frac{4\alpha_1\alpha_2 - (1 + \alpha_2^2)^2}{(\alpha_1^2 - \alpha_2^2)(1 + \alpha_2^2)} \quad (3)$$

$$\alpha_i = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_i}\right)^2} \quad (4)$$

式中 c_1 、 c_2 分别为纵波波速、横波波速。

2 微差时间对预裂爆破效果影响实验

2.1 实验设计

本研究选用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)制作实验试件, 该材料兼具高光学透明性与优异的动态光弹特性, 在爆炸瞬态加载下可通过数字激光动态焦散线(DLCS)系统, 清晰还原裂纹尖端应力集中区域的演化与裂纹扩展全过程; 同时其动态脆性断裂特征与岩体高度吻合, 是爆破断裂动力学模型实验的标准相似材料, 已在同类研究中得到充分验证与应用^[44-46]。

如图 3 所示, 试件尺寸为 $400 \times 300 \times 5$ mm, 预裂爆破中的两预裂孔在同一水平线上, 中心距离为 120 mm, 直径均为 6 mm, 为获得稳定的定向裂纹, 基于作者前期研究结果, 在炮孔两侧预制切槽结构, 切槽长度为 0.5 mm, 宽度为 0.3 mm^[47]。两预裂孔连线模拟周边轮廓线, 连线上部模拟保留岩体, 下部模拟被爆岩体。试件中心偏下位置处设置一主爆孔模拟主爆区爆破, 其直径为 6 mm, 中心距离两预裂孔连线 50 mm。炸药为 TATP, 预裂孔药量 50 mg, 主爆孔药量为 70 mg, 均采用耦合装药。TATP 炸药密度 0.55 g/cm^3 , 爆速 3214 m/s , C-J 爆轰压力 $5.1 \times 10^6 \text{ kPa}$, 爆热 4850 kJ/kg ^[48-50]。

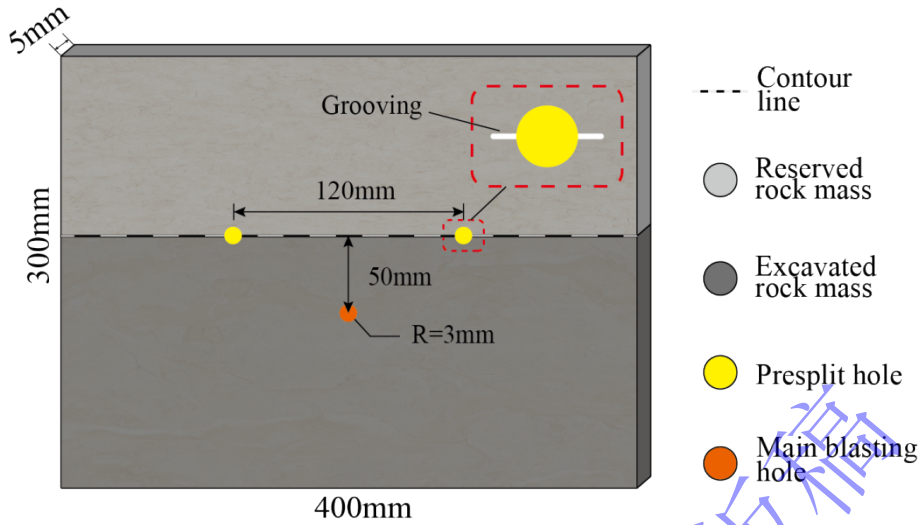
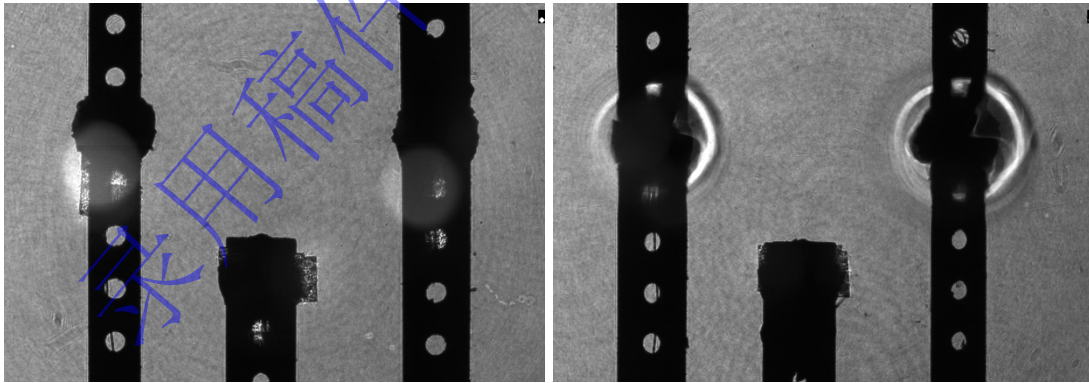


图3 实验方案图

Fig.3 Schematic diagram of the experimental scheme

两预裂孔设置为同时起爆，改变主爆孔的起爆延期时间。主爆孔不起爆，试件标记为 S-0；此时预裂定向裂纹的贯通时间为 $150 \mu\text{s}$ ，在此基础上，主爆孔与预裂孔微差时间分别设置为 $0 \mu\text{s}$ 、 $40 \mu\text{s}$ 、 $80 \mu\text{s}$ 、 $140 \mu\text{s}$ 、 $200 \mu\text{s}$ ，对应五种不同工况，分别标记为 S-1 至 S-5。其中，S-1 表示预裂孔与主爆孔同时起爆，S-2 至 S-5 分别对应主爆孔在预裂缝扩展的前期、中期、后期以及止裂后起爆的情形。通过设置不同的微差时间，研究主爆孔在预裂缝扩展的不同阶段起爆对预裂缝最终贯通状态及成缝质量的影响规律。本文所称裂纹止裂，是指裂纹尖端在连续多帧焦散图像中不再发生可识别扩展，扩展速度趋近于零，且焦散斑明显减弱或消失，表明裂纹已失去继续扩展的有效驱动力。

炮孔采用多通道同步信号控制器同时起爆，时间控制精度为 $1 \mu\text{s}$ ，并通过相同装药、封堵方式及等长度同规格导线减小回路差异。实验采用 10^5 fps 超高速相机记录起爆与应力波传播过程，仅选取如图 4 所示，两孔起爆发光、初始应力波处于同一帧且裂纹扩展无明显非对称的结果进行分析，以保证同步起爆条件下数据的可靠性。



(a) Discharge simultaneously

(b) Stress wave generation

图4 两预裂孔同时起爆

Fig.4 Two pre-splitting holes are detonated at the same time

表1 PMMA材料特性参数^[51]

Table 1 Material property parameters of PMMA^[51]

弹性模量 E_d /(Gpa)	泊松比 V_d	纵波波速 c_p / [(m·s ⁻¹)]	横波波速 c_s / [(m·s ⁻¹)]	光学常数 C_l / [(m ² ·N ⁻¹)]
-------------------	-----------	--	--	--

6.10

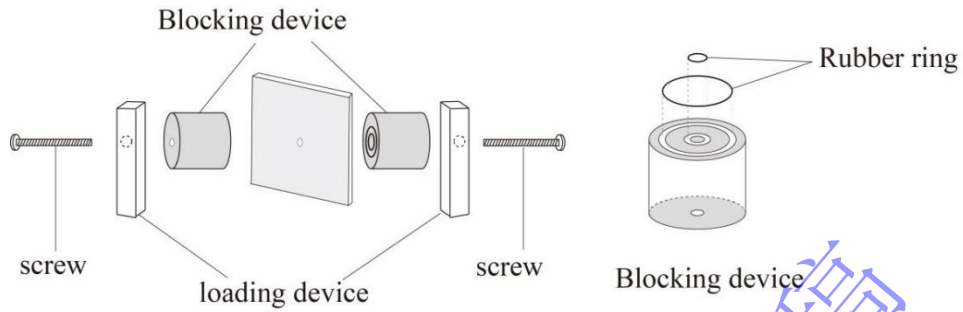
0.31

2320

1260

0.88×10^{-10}

为保证爆生气体在薄板试件中的作用，本文采用自制炮孔堵塞装置对炮孔进行封堵。前期研究已验证该封堵结构的有效性^[52]，相关结构见图 5。



(a) Blocking system diagram

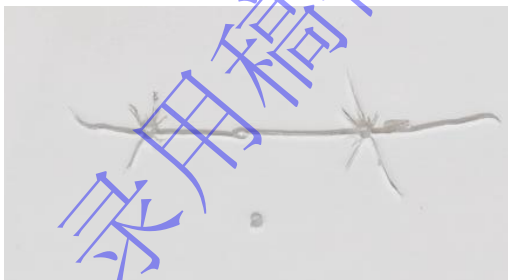


(b) Blocking device in kind

图 5 堵塞装置模型

Fig.5 Blocking device model

2.2 实验结果



(a) S-0



(b) S-1





图6 不同微差时间工况下预裂纹扩展形态图

Fig.6 Morphological diagram of pre-crack propagation under different delay time conditions

图6显示了不同工况下试件爆后裂纹扩展的典型形态。S-0试件中，主爆孔未起爆，仅两预裂孔起爆，形成了明显的定向裂纹结构。其中内侧定向裂纹发生勾连，整体上内外两侧定向裂纹形成的预裂缝较为平直。

S-1至S-4工况下主爆孔的起爆时刻均早于预裂缝内侧裂纹的勾连。与S-0试件相比，S-1至S-4试件的裂纹扩展路径发生了显著变化：定向裂纹沿水平方向扩展至一定距离后，受到主爆孔爆炸应力场的影响，发生偏转。内侧向主炮孔方向偏转，外侧向背离主炮孔方向偏转。其中，S-4试件中两条内侧裂纹尖端在发生偏转前已极为接近，若无主爆扰动，可能实现自然勾连，该现象说明主爆孔所产生的应力扰动主导裂纹尖端局部应力场的演化，其对裂纹扩展路径的影响强于相邻裂纹尖端间的应力场相互作用。

S-5试件为两预裂孔定向裂纹勾连止裂后主炮孔起爆。其裂纹扩展形态与S-0试件基本一致，表明主爆孔起爆并未改变已止裂预裂缝的几何形态。

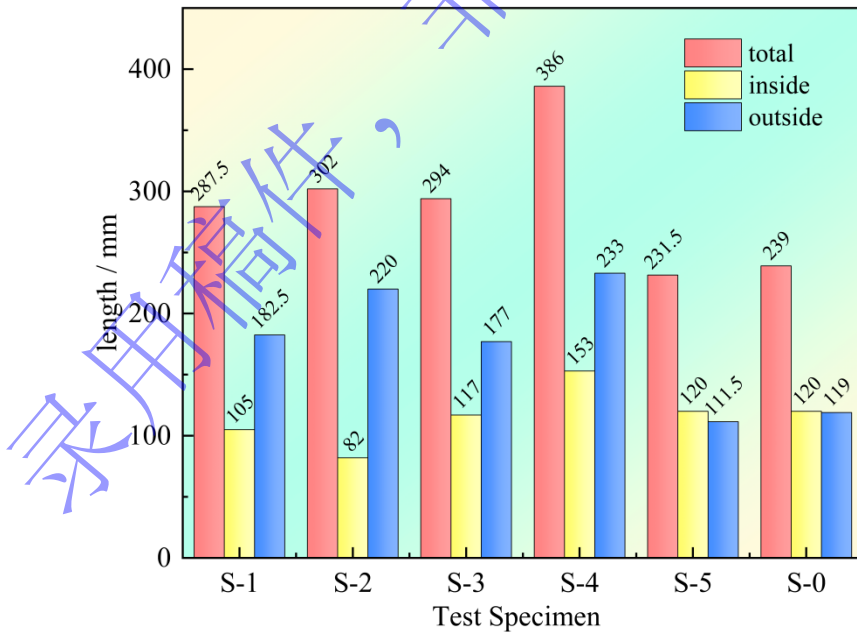


图7 裂纹扩展长度

Fig.7 Crack propagation length

从图7可见，S-0与S-5试件内、外侧定向裂纹的扩展长度基本一致，既表明实验重复性与稳定性较好，也说明当定向裂纹已止裂时，后续主爆产生的应力波对其扩展影响效果有限。相较之下，S-1~S-4试件外侧定向裂纹的扩展长度显著大于内侧裂纹，且其定向裂纹扩展总长度整体高于S-0与S-

5, 说明在定向裂纹尚处于扩展阶段时, 主爆孔爆炸应力波对裂纹具有明显的“促扩展”作用。然而, 这一应力扰动同时会改变裂纹扩展路径, 削弱其方向性与成缝连续性。

2.3 预裂纹成缝质量分析

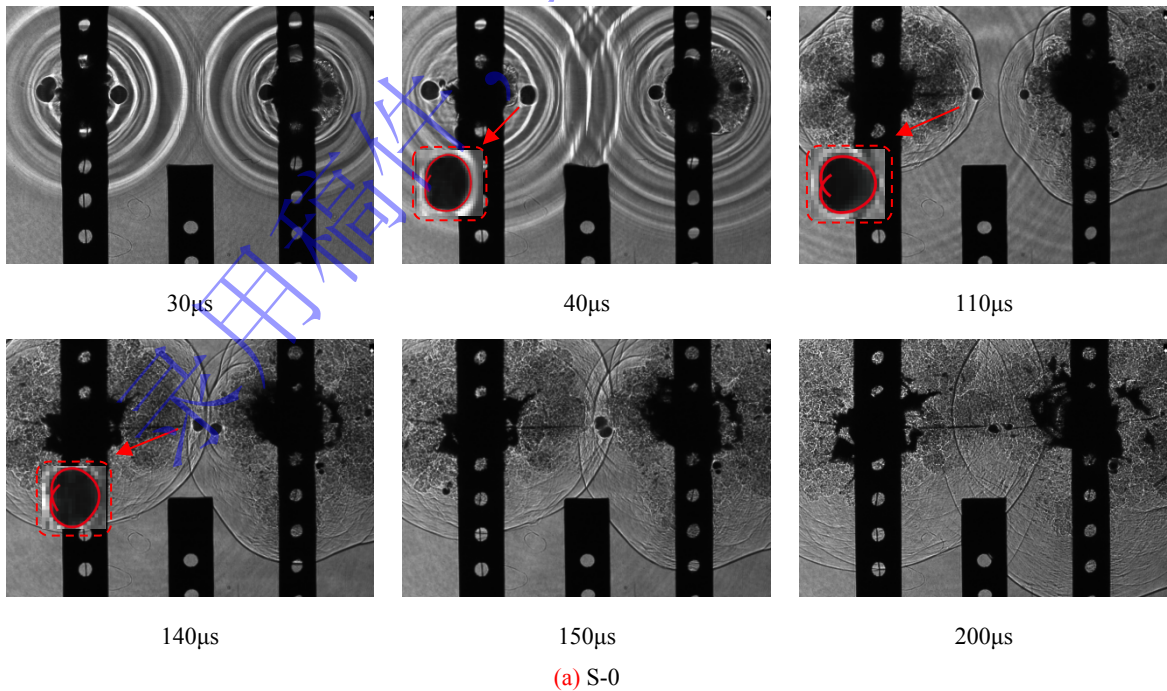
表 2 预裂纹成缝质量

Table 2 Quality of pre-crack seam formation

组号	微差时间/ μs	预裂纹路径长度/mm			裂纹平均偏转角/ $^{\circ}$		
		左	右	长度比/%	左	右	平均
S-1	0	11.4	12.8	20.2	17	19	18
S-2	40	35.2	33.8	57.5	65	52	58.5
S-3	80	44.7	45.3	75.0	63	72	67.5
S-4	140	48.3	62.8	92.6	74	90	82
S-5	200	58.7	61.3	100	0	0	0

为定量评价不同微差时间下预裂缝成缝质量, 本文引入水平成缝长度比和平均偏转角两个指标。水平成缝长度比为预裂裂纹在发生明显偏转前沿设计水平方向扩展的总长度与两预裂孔间距之比, 用于表征裂纹沿预定方向的有效成缝程度; 平均偏转角为裂纹偏转段与设计水平方向之间的夹角, 用于表征裂纹偏离预裂方向的程度。结果表明, S-1~S-4 工况中, 主爆孔均在预裂裂纹扩展阶段起爆, 裂纹发生不同程度偏转, 其水平成缝长度比分别为 20.2%、57.5%、75.0%和 92.6%, 平均偏转角分别为 18° 、 58.5° 、 67.5° 和 82° 。随着微差时间增大, 裂纹在受主爆应力波扰动前沿设计方向的扩展长度逐渐增加, 水平成缝长度比明显提高, 但裂纹后期仍存在偏转现象, 说明只要主爆应力波作用于扩展中的裂纹尖端, 就会干扰其定向扩展。S-5 工况中, 主爆孔在预裂裂纹止裂后起爆, 水平成缝长度比达到 100%, 平均偏转角为 0° , 预裂缝保持平直连续, 成缝质量最佳。

2.4 动焦散演化分析



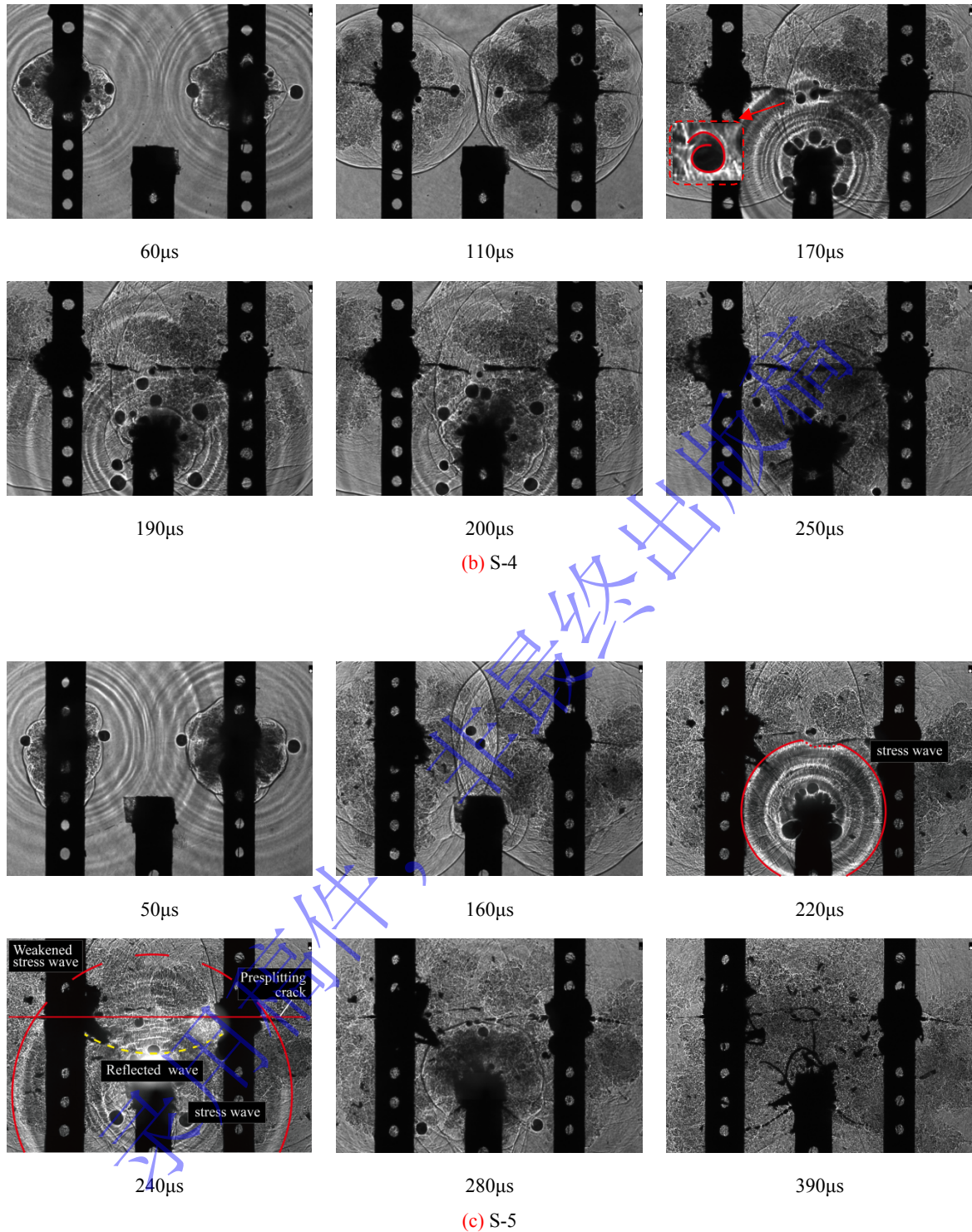


图 8 预裂纹尖端焦散斑演化图

Fig.8 Evolution diagram of caustic spots at the tip of pre-cracks

图 8 显示了不同工况下试件爆炸过程中焦散斑的演化过程。

S-0 试件中，两预裂孔同时起爆，主炮孔不起爆。预裂孔爆炸应力波以炮孔为中心呈圆形波阵面向外传播。同时在爆炸应力波和爆生气体共同作用下，预裂孔割缝尖端产生应力集中，并起裂扩展。40 μs 时可以明显看出定向裂纹尖端为 I 型焦散斑，同时两炮孔应力波叠加明显。随着定向裂纹相向扩展，焦散斑逐渐减小。140 μs 时，预裂缝尖端接近，焦散斑增大，随后发生勾连。裂纹扩展过程中

以 I 型裂纹焦散斑为主。

S-4 试件中，两预裂孔同时起爆，主爆孔延期 140 μs 后起爆。主炮孔起爆后，170 μs 爆炸应力波传播至扩展中的预裂纹尖端，其焦散斑形状由 I 型焦散斑转变为 I-II 复合型焦散斑。说明此时预裂纹尖端应力场由拉应力场转变为拉剪复合应力场。随后裂纹扩展轨迹发生偏转，向主炮孔方向扩展。

S-5 试件中，两预裂孔同时起爆，主爆孔延期 200 μs 后起爆。在 220 μs 时，主爆孔起爆产生的应力波到达已止裂的定向裂纹，240 μs 时，应力波的传播在裂纹处明显受阻并产生反射波，可见定向裂纹对应力波的传播具有显著阻滞效应。随后裂纹尖端未出现明显的焦散斑，说明该爆生定向裂纹未被再活化或延伸，爆炸应力波对其不产生实质性作用，预裂缝的最终形态与 S-0 基本一致。

2.5 裂纹尖端动态断裂行为分析

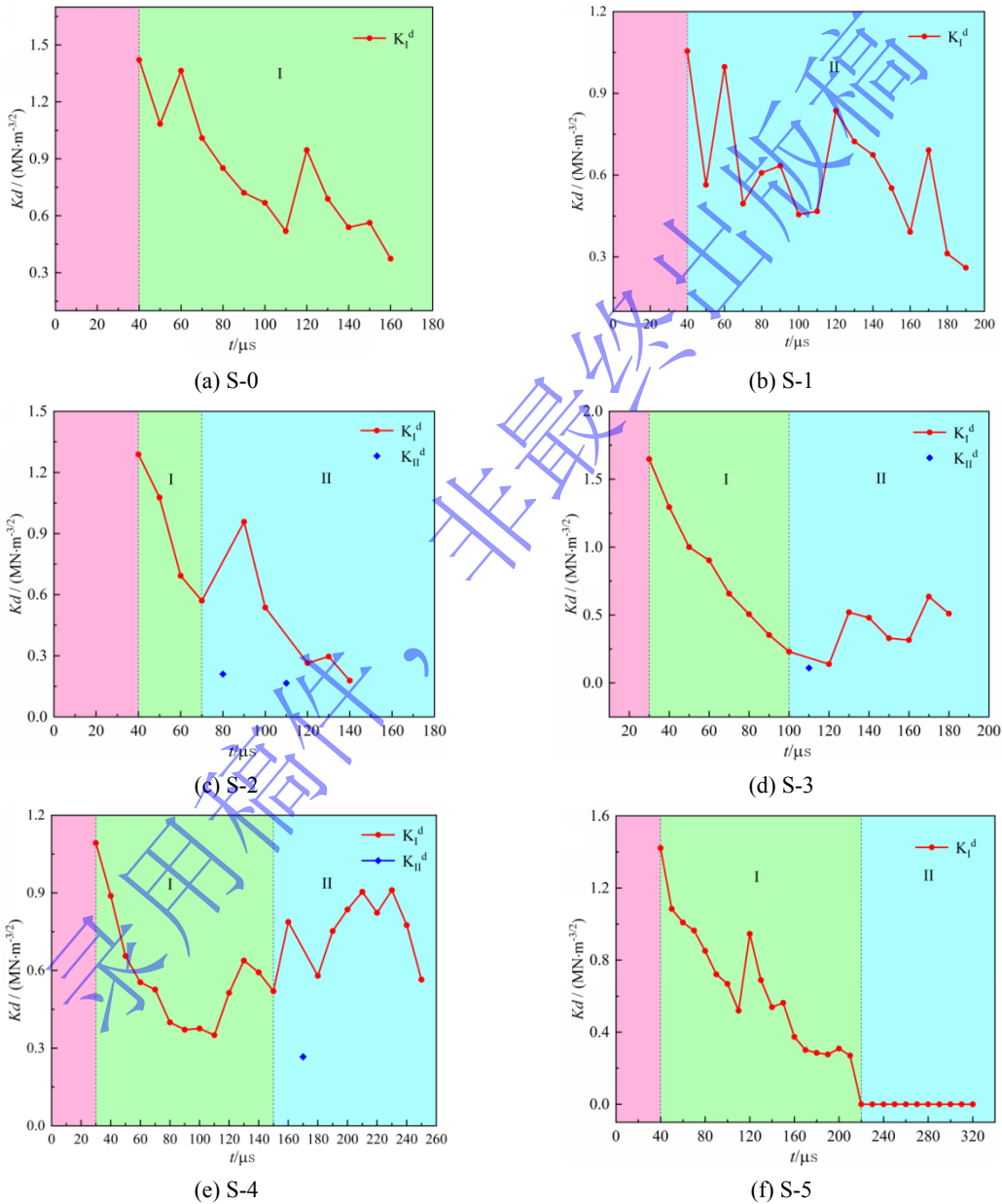


图9 应力强度因子演化图

Fig.9 Dynamic stress intensity factor (DSIF) curves of oriented cracks

图9为各模型应力强度因子随时间变化曲线。受堵塞头遮挡影响，裂纹起裂至早期扩展阶段无法直接观测，以粉色区域标示；主爆孔爆炸应力波到达之前的演化过程定义为阶段I(绿色)；主爆孔爆炸应力波作用之后的演化过程定义为阶段II(蓝色)。

从图9中可以看出各模型裂纹尖端应力强度因子整体呈震荡性下降，表明裂纹扩展过程中应力波入射、反射与能量耗散共同作用，导致裂纹扩展具有非稳态和阶段性特征。各模型在120 μs 左右均有明显的增强。结合应力波传播速度和试件尺寸，可以判断是由于两预裂孔的爆炸应力波传播到试件边缘反射的拉伸波所致，如图10所示。

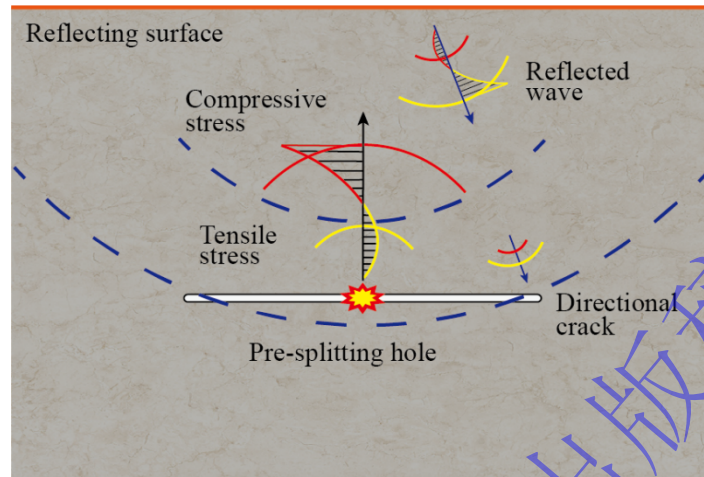


图 10 120 μs 应力波反射图

Fig.10 Stress wave reflection diagram at 120 μs

S-1试件中主爆孔与预裂孔同时起爆，与S-0试件相比，S-1试件在40~100 μs 时间段内的应力强度因子波动幅度更大且衰减速率较慢，说明主爆孔爆炸应力波对定向裂纹尖端应力场产生了持续扰动与叠加效应，延缓了应力释放过程。

由S-2~S-4试件可以看出，当主爆孔应力波作用于仍处于扩展阶段的定向裂纹时(II阶段)，应力强度因子均出现不同程度上升，表明外部爆炸应力波对裂纹尖端的瞬态应力集中具有明显促进作用。相较之下，S-5试件中，当爆炸应力波作用于已止裂的定向裂纹时，应力强度因子始终维持在接近零的水平，说明主爆孔爆炸应力波对已止裂裂纹不再产生显著影响。通过S-2~S-4试件还可以看出，爆炸应力波作用于定向裂纹后，出现了II型应力强度因子，说明此时定向裂纹发生复合型断裂。

3 微差时间对围岩稳定性影响

3.1 实验设计

为探讨两预裂孔与主炮孔微差起爆时间对保留岩体原生裂纹的影响，在两预裂孔连线中心上方 10 mm 处预制一条竖直原生裂纹(长度 10 mm，裂缝宽度 0.3 mm)，示意图 11(a)。实验采用 TATP 炸药，为增强原生裂纹起裂响应并便于观测与定量分析，主爆孔药量统一设置为 150 mg。各工况仅改变预裂孔与主爆孔之间的微差时间，因此不影响不同工况之间的可比性。为简化微差时间的设置，设置三种典型时序：0 μ s、50 μ s 与 300 μ s，分别对应主爆孔与预裂孔同时起爆、主爆孔在预裂缝扩展过程中起爆、以及主爆孔在预裂缝基本止裂后起爆三种工况，编号为 W-2 至 W-4。为进行对比分析，同时设计无预裂孔的对照模型，编号为 W-1(见图 11(b))。

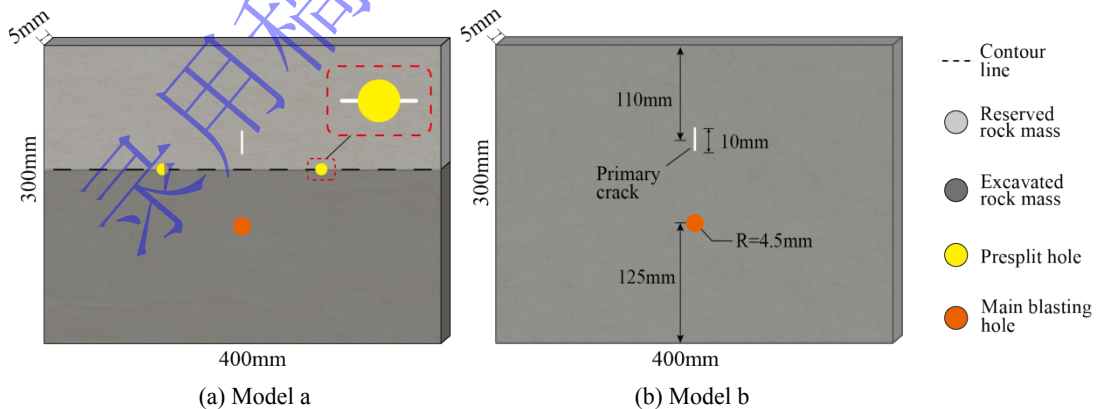


图 11 实验方案图

Fig.11 Schematic diagram of the experimental scheme

3.2 实验结果

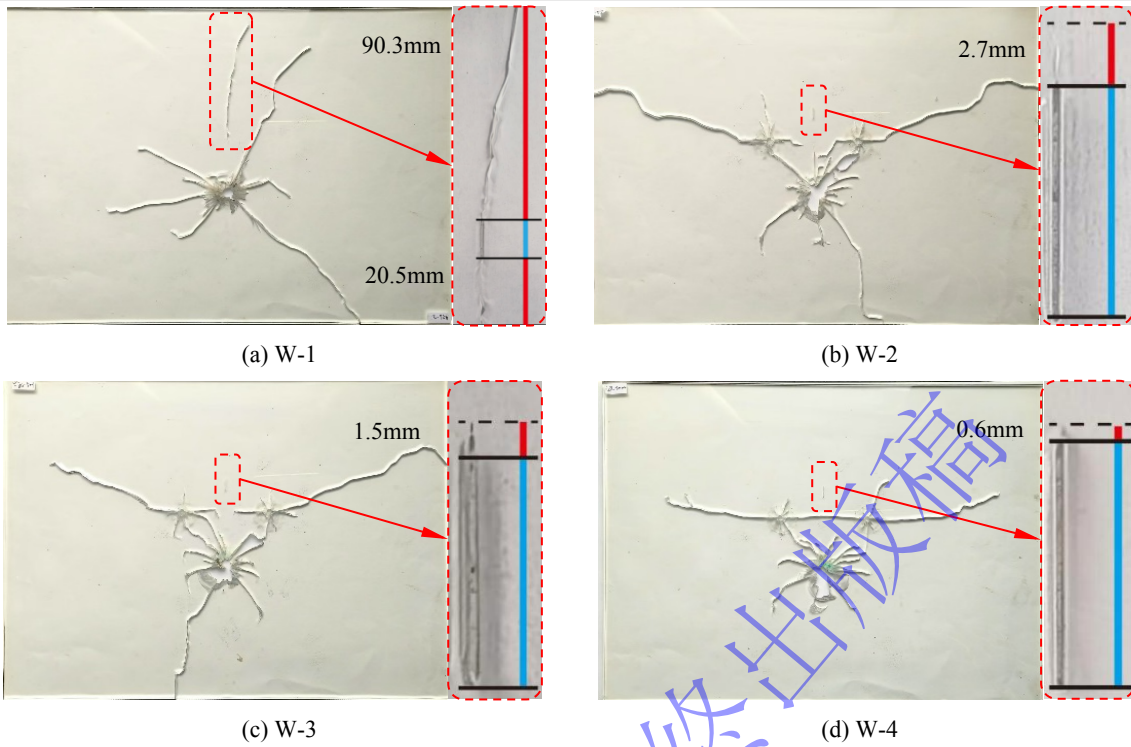


图 12 不同微差时间工况下原生裂纹扩展形态图

Fig.12 Morphologica ldiagram of primary crack propagation under different delay time conditions

图 12 显示了不同工况下试件爆后裂纹扩展的典型形态。

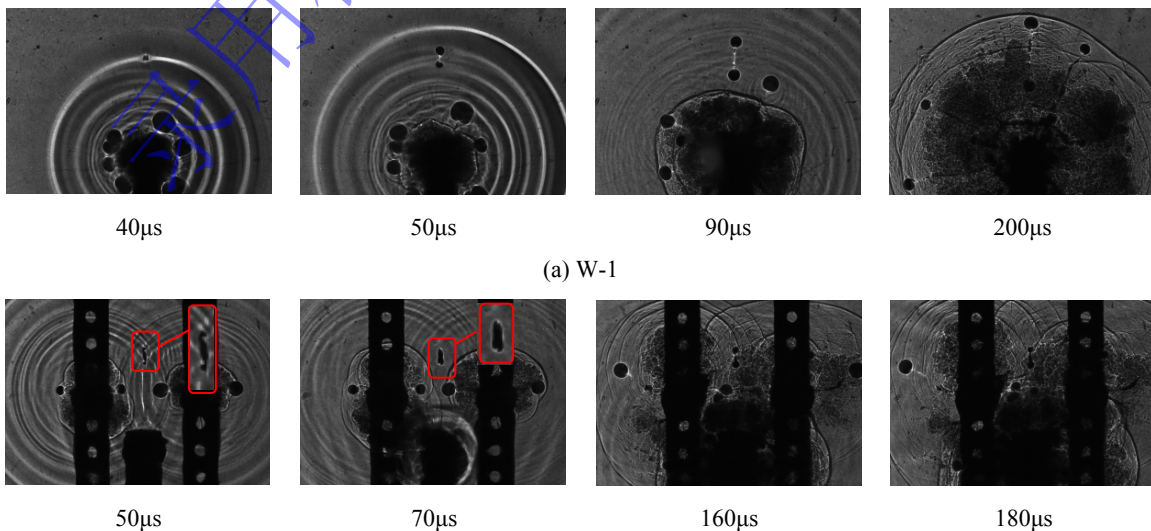
W-1 试件中，仅主爆孔起爆，原生裂纹在应力波影响下发生起裂并扩展。其中，原生裂纹上侧起裂扩展的裂纹长度要明显长于下侧。

W-2 与 W-3 工况下主爆孔的起爆时刻均早于预裂缝内侧裂纹的勾连。两种工况下的原生裂纹也进行了扩展，其中 W-2 试件原生裂纹的扩展长度大于 W-3 试件，但均明显小于 W-1 试件，且原生裂纹下侧均未起裂。

W-4 工况下，预裂缝内侧裂纹勾连后主爆孔的起爆，该工况下原生裂纹未发生明显起裂。

由此可见，带预裂炮孔的原生裂纹扩展长度明显小于无预裂炮孔试件，且微差时间越大，原生裂纹起裂越短。

3.3 动焦散演化分析



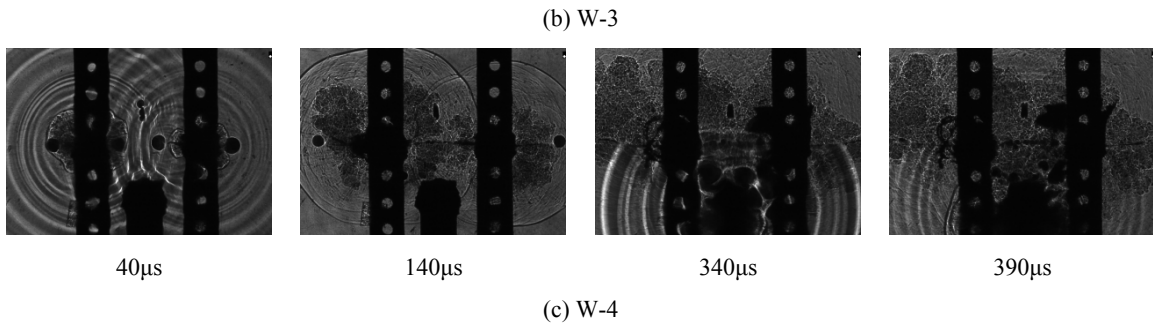


图 13 原生裂纹尖端焦散斑演化图

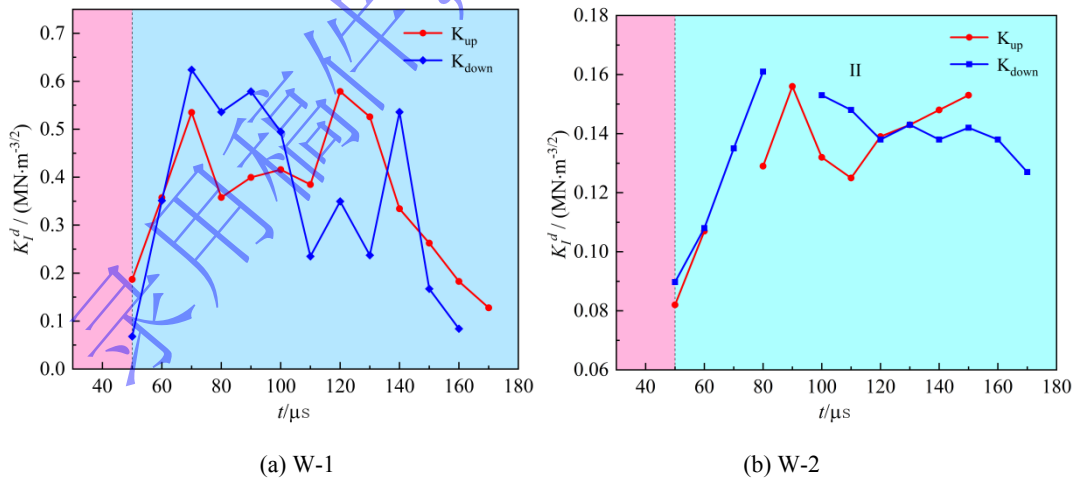
Fig.13 Evolution diagram of caustic spots at the tip of native cracks

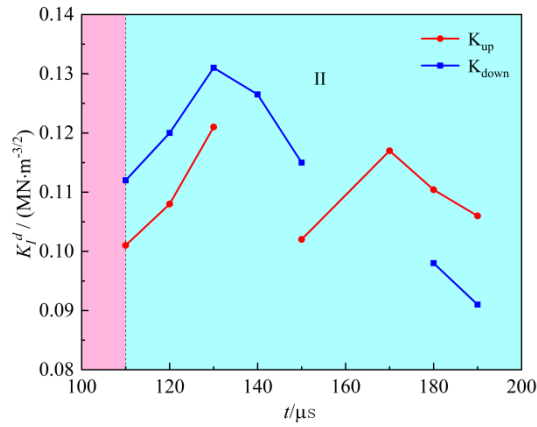
图 13 显示了不同工况下试件爆炸过程中焦散斑的演化过程。W-1 试件中，在主爆孔起爆 20 μs 时刻，试件中有明显应力波开始传播，直至 40 μs 时，应力波传播至原生裂纹下侧端部。随着应力波的传播，在 50 μs 时，原生裂纹尖端出现稳定焦散斑，直至焦散斑大小不断增加到一定程度，即裂纹尖端应力大于试件起裂韧度，裂纹发生起裂并不断扩展，焦散斑开始移动；裂纹扩展过程中其尖端焦散斑主要以 I 型为主。

W-2 与 W-3 试件的原生裂纹焦散演化规律相近，以下以 W-3 为例阐述。两预裂孔同时起爆后，其爆炸应力波以近圆形波阵面相向传播并在原生裂纹处汇聚。与 W-1 试件显著不同，W-3 试件在预裂孔爆炸应力波作用下原生裂纹发生形态畸变，但未形成清晰焦散斑(如 50 μs 和 70 μs)；随主爆孔起爆，主爆孔爆炸应力波作用于原生裂纹后，其两端逐步出现明显焦散斑。上述现象表明：在主爆孔应力波到达之前，原生裂纹面以受压为主，裂纹扩展驱动力不足；当主爆孔应力波抵达后，裂纹面转而承受显著拉应力，驱动力提升，从而诱发焦散斑增强与裂纹扩展活化。

W-4 试件中，主炮孔起爆前，原生裂纹裂纹面上的应力状态与 W-3 试件类似；但由于 W-4 试件的预裂缝贯通，对主爆孔应力波传播有明显阻滞作用(如 340 μs)，少许应力波穿过预裂缝继续传播，但应力波衰减严重，虽引起原生裂纹产生畸变，但无法使得尖端产生焦散斑。

3.4 原生裂纹应力强度因子





(c) W-3

图 14 原生裂纹尖端应力强度因子与时间关系曲线

Fig.14 Dynamic stress intensity factor (DSIF) curves of primary cracks

图 14 所示为不同微差时间下原生裂纹尖端应力强度因子与时间关系曲线。W-1 试件中，主爆孔爆炸应力波在 40 μs 时传播至原生裂纹，随后裂纹尖端开始积累能量，50 μs 时裂纹尖端出现应力强度因子并不不断增大，原生裂纹上下两侧达到第一次峰值后开始起裂，随后原生裂纹下侧尖端应力强度因子振荡性衰减，上侧尖端受反射拉伸波影响后持续扩展，裂纹尖端应力强度因子有所增大，直至 120 μs 时达到二次峰值后开始下降直至裂纹止裂。结合图 15 分析，W-2~4 试件原生裂纹尖端的应力强度因子峰值远小于 W-1，其中 W-4 试件预裂缝完全勾连，其原生裂纹尖端的应力强度因子最小。相较于 W-2，W-3 组微差时间增加，定向裂纹扩展距离较长，对主爆孔爆炸应力波的阻滞作用增大，致使在蓄能阶段上下侧裂纹尖端应力强度因子峰值更小；W-4 试件中，定向裂纹发生贯通形成预裂缝，对主爆孔爆炸应力波起到最大限度的阻滞作用，应力波衰减严重，其作用于原生裂纹尖端时，不足以使得裂纹发生起裂。

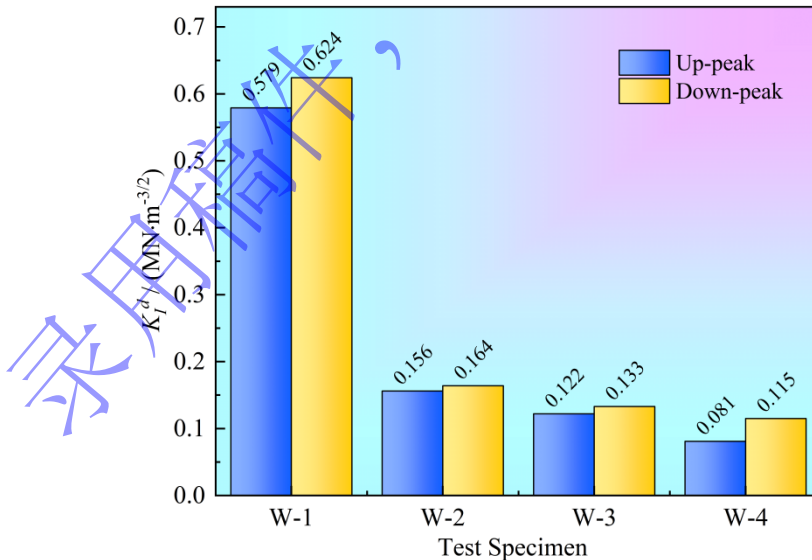


图 15 原生裂纹上下侧应力强度因子峰值柱状图

Fig.15 Histogram of peak stress intensity factor at upper and lower sides of primary cracks

非最终出版稿

4 数值模拟研究

焦散线实验的优势在于能够将裂纹尖端的复杂应力场问题转化为可视化的几何光学问题，便于裂纹动态扩展过程中应力集中与演化特征的研究。然而，该方法的局限性在于其观测范围仅限于裂纹尖端的局部区域，难以获取试件全场的应力分布信息。为弥补上述不足，本文引入数值模拟方法对试件全场应力演化过程进行补充分析，通过与焦散线实验结果相互印证，以实现裂纹扩展机制更全面、精确的理解。

4.1 数值模型

采用 AUTODYN 仿真软件开展数值模拟研究^[53-56]。建立尺寸为 300 mm×400 mm 的二维简化分析模型，模型中炮孔与原生裂纹的几何参数均与物理实验保持一致，如图 16 所示。图 16(a)为单孔爆破，编号为 Z-1。图 16(b)为三孔爆破，两个预裂孔同时起爆，主炮孔和预裂孔的微差时间分别设置为 0 μ s、1.22 μ s、11.63 μ s，以保证主炮孔爆炸应力波在预裂纹扩展前期、中期及贯通后传播至预裂纹，编号为 Z-2~Z-4。

模型采用四边形网格划分，并在分析区域进行局部加密处理，以提高模拟精度。试件材料为有机玻璃，考虑其典型脆性特征，选用 Johnson-Holmquist-Cook(JHC)本构模型，并结合最大拉应力准则对裂纹扩展及断裂过程进行模拟；其杨氏模量 $E=6.1$ GPa，泊松比 $\nu=0.31$ ，密度 $\rho=1200$ kg/m³，拉伸强度为 30 MPa。炸药选用 TATP，采用 JWL 状态方程^[57]，炸药和空气采用欧拉算法计算，空气状态方程为理想气体状态方程。空气状态方程为理想气体状态方程。数值模拟模型中炸药、空气的主要参数分别见表 3 和表 4，A、B、R1、R2 和 W 分别为与炸药有关的常数。

表 3 炸药参数表^[50]

Table 3 Explosive parameters^[50]

Explosivetype	Density/(g·cm ⁻³)	A/kPa	B/kPa	R ₁	R ₂	W	C-J detonation pressure/kPa	Detonation velocity/(m·s ⁻¹)
TATP	0.55	4.377× 10 ⁷	3.2×10 ⁵	6.51	1.24	0.48	5.1×10 ⁶	3214

表 4 空气参数表^[58]

Table 4 Air parameters^[58]

Density/(g·cm ⁻³)	Temperature/K	γ
0.001225	288.20	1.40

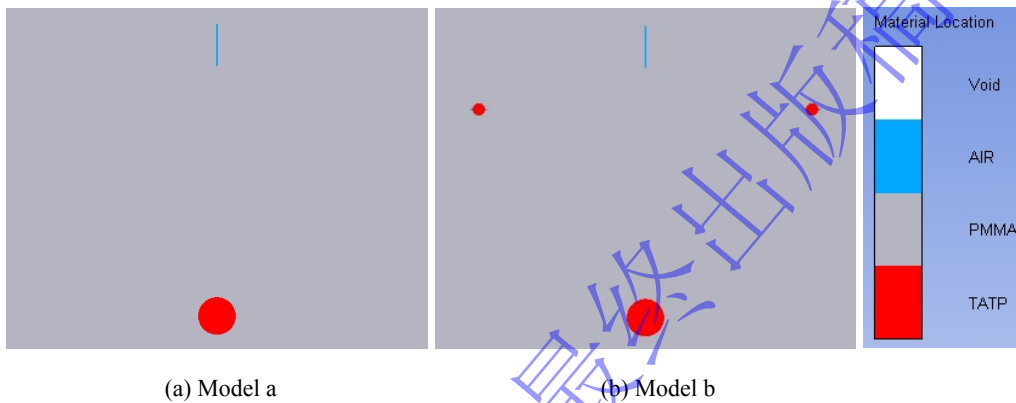


图 16 数值模型二维简化图

Fig.16 Two-Dimensional simplified diagram of the numerical model

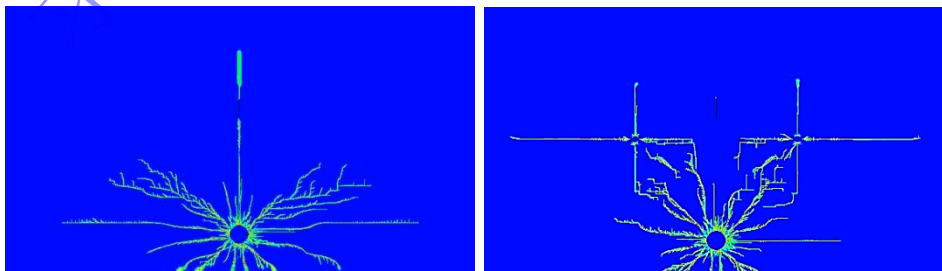
4.2 数值模拟结果

如图 17 所示，图 17(a)~(d)分别对应单孔起爆、三孔同时起爆、主炮孔中间起爆以及主孔后起爆四种数值模拟结果，模拟结果与实验结果一致。

Z-1 模型原生裂纹两侧尖端产生较长的损伤；Z-2 模型预裂孔两侧形成定向损伤，内侧裂纹扩展距离较短，随后向主孔方向发展，外侧裂纹则表现出明显的向上扩展趋势，且原生裂纹上侧出现损伤、下侧无损伤。

Z-3 模型和 Z-2 相似，但预裂孔内侧裂纹扩展距离更长，之后向主孔方向延伸。主孔后起爆时，预裂孔先行起爆形成定向损伤并实现贯通，主孔起爆后未引发进一步向内侧的裂纹扩展，外侧裂纹仍呈上扩趋势，原生裂纹上下侧均未出现损伤。

综上，数值模拟中损伤云图的演化规律与实验裂纹扩展路径高度一致，验证了模拟结果的有效性。



(a) Z-1

(b) Z-2

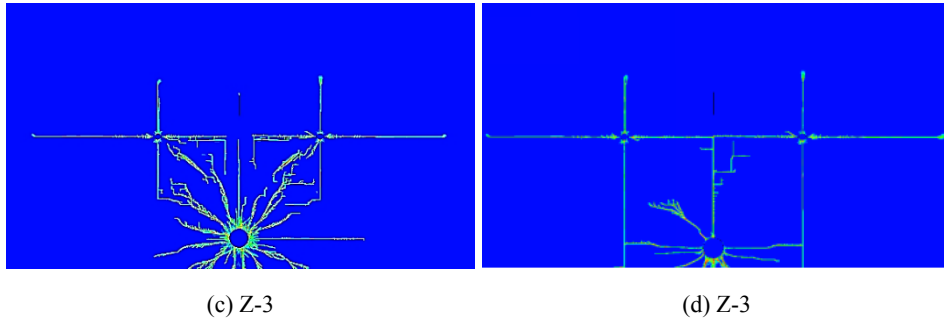


图 17 数值模拟结果

Fig.17 Numerical simulation results

4.3 应力演化分析

(1) Z-1 模型

主炮孔爆炸应力波以圆形波阵面向外传播。在 $5.74 \mu\text{s}$ 时，应力波传播至原生裂纹下侧尖端，此时原生裂纹下侧尖端并未出现损伤，随后应力波传播至原生裂纹上侧尖端，尖端受主炮孔爆炸应力波作用产生拉应力集中，从而不断积累能量，直至 $10.22 \mu\text{s}$ 时，原生裂纹上侧尖端应力集中达到一定程度，开始出现损伤，随后受应力波作用影响，应力集中区域发生移动，损伤随之发生扩展。

(2) Z-2 模型

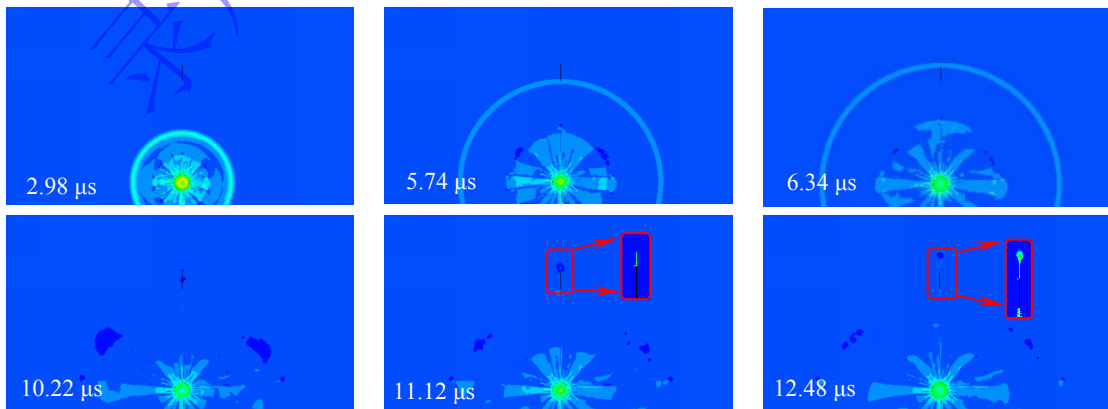
在 $3.51 \mu\text{s}$ 时，两预裂孔起爆后，应力波以孔心为圆心向外传播，几乎同时到达原生裂纹面。由原生裂纹两侧质点运动方向可知，此阶段原生裂纹主要受压缩作用影响；至 $4.99 \mu\text{s}$ 时，裂纹面呈明显压实趋势。与此同时，预裂孔内的定向损伤区沿水平方向扩展，其尖端应力集中区在 $4.41 \mu\text{s}$ 呈上下对称分布，表明此时最大主应力方向为水平向，与裂纹传播方向一致。当主爆孔爆炸应力波传播至预裂孔内侧定向裂纹尖端后，应力集中区发生畸变，不再保持对称，而是明显偏向主爆孔方向，最大主应力方向随之改变，定向裂纹尖端呈向主爆孔方向运动趋势。此时尖端应力集中显著增强，与焦散实验中主爆孔爆炸应力波短暂提升定向裂纹应力强度因子的规律相吻合。随后，主爆孔应力波作用于原生裂纹，使裂纹面逐渐张开， $8.13 \mu\text{s}$ 时原生裂纹尖端出现拉应力集中并发生初始损伤。

(3) Z-3 与 Z-4 模型

Z-3 与 Z-4 模型的整体演化规律与 Z-2 类似，均可观察到原生裂纹受压实及预裂孔定向裂纹尖端应力场畸变现象。但存在以下差异：

1) Z-3 模型中，由于预裂孔定向裂纹扩展距离较长，主爆孔应力波在到达其尖端时引发更强烈的应力畸变；

2) Z-4 模型中，预裂孔定向裂纹贯通后主爆孔起爆，贯通裂纹对主爆孔爆炸应力波形成明显阻滞作用，使波能在预裂缝处反射与耗散更为充分，从而削弱了应力波对原生裂纹的直接加载效应。



(a) Z-1

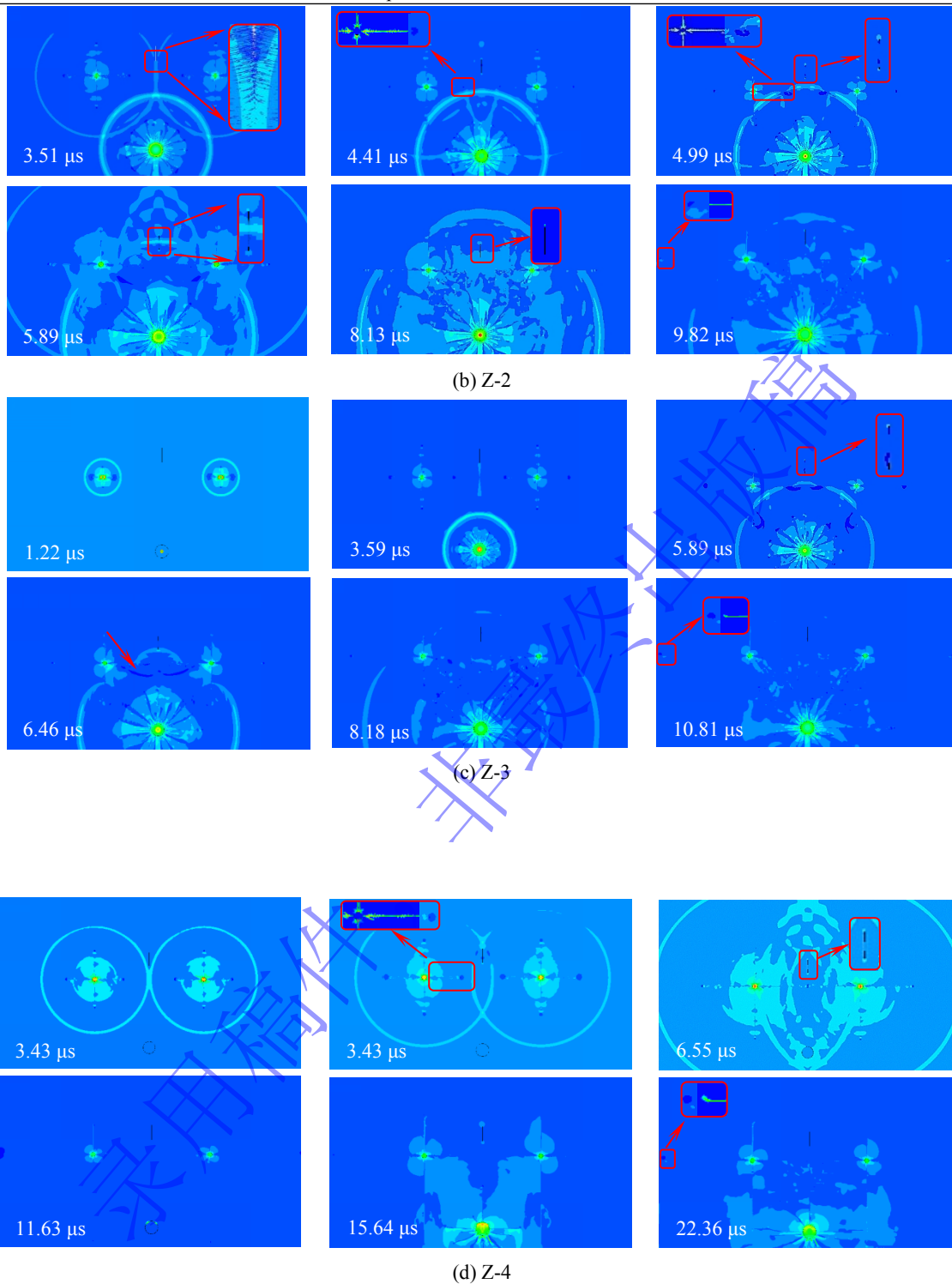


图 18 应力演化图

Fig.18 Stress evolution diagram

5 机制分析

5.1 主爆应力波到达时刻对预裂裂纹扩展阶段的调控机制

在预裂孔起爆后，定向裂纹经历起裂、扩展、接近贯通和止裂稳定等阶段；而主爆孔起爆后，其爆炸应力波需要经过一定传播时间后才能作用于裂纹尖端。因此，主爆应力波的实际作用时刻可表示为：

$$t_a = \Delta t + \frac{L_m}{c_p} \quad (5)$$

式中， t_a 为主爆应力波到达预裂裂纹尖端的时刻， Δt 为主爆孔与预裂孔之间的微差时间， L_m 为主爆孔至裂纹尖端的等效传播距离， c_p 为应力波传播速度。

为描述主爆应力波到达时裂纹所处的扩展阶段，进一步定义：

$$\lambda = \frac{t_a - t_i}{t_s - t_i} \quad (6)$$

式中， t_i 为预裂裂纹起裂时刻， t_s 为预裂裂纹止裂或稳定贯通时刻。当 $0 < \lambda < 1$ 时，主爆应力波作用于扩展中的裂纹尖端；当 $\lambda \geq 1$ 时，主爆应力波作用于已止裂或稳定贯通的预裂缝。

由此可知，控制裂纹是否偏转和成缝是否平直的关键并不是 Δt 本身，而是 t_a 相对于预裂裂纹动态扩展过程的位置。当主爆应力波到达时，若预裂裂纹仍处于扩展阶段，裂纹尖端动态应力场尚未稳

定，外部爆炸应力波易与裂纹尖端应力场发生耦合，诱发断裂模式转变和裂纹路径偏转；而当主爆应力波到达时，若预裂纹已止裂并形成稳定结构，则预裂缝主要表现为应力波阻滞、反射和能量耗散作用，难以再次激活裂纹扩展。

5.2 定向裂纹偏转机制

预裂孔爆炸后，切槽尖端首先在爆炸应力波和爆生气体共同作用下形成定向裂纹。在主爆孔爆炸应力波到达定向裂纹之前，裂纹尖端主要受到近似对称的张拉作用，裂纹尖端应力场以 I 型断裂为主，此时 $K_{II} \approx 0$ ，裂纹倾向于沿预设方向平直扩展，如图 19(a)所示。

当主爆孔爆炸应力波以一定入射角作用于扩展中的定向裂纹尖端时，裂纹面附近应力场发生非对称重构。一方面，主爆应力波在裂纹尖端附近发生反射、绕射和叠加；另一方面，由于入射方向与裂纹扩展方向不完全一致，裂纹尖端除原有张拉分量外，还会产生剪切分量，使裂纹由 I 型断裂转变为 I-II 复合型断裂，如图 19(b)所示。焦散实验中，S-4 试件在主爆应力波作用后，裂纹尖端焦散斑由 I 型特征转变为 I-II 复合型特征，随后裂纹路径发生偏转；应力强度因子曲线中也出现了 K_{II} ，说明主爆应力波改变了裂纹尖端的断裂模式。

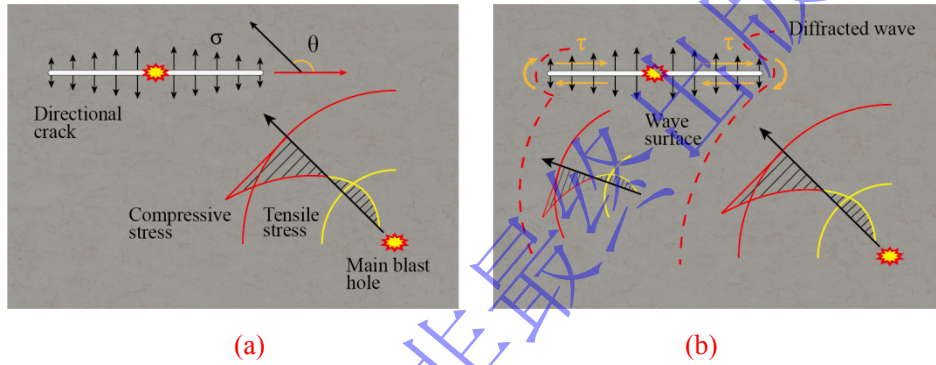


图 19 定向裂纹转向机制图

Fig.19 Schematic diagram of directional crack deflection mechanism

为进一步解释裂纹偏转方向，引入混合型裂纹尖端周向应力^[59]表达式：

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] \quad (7)$$

式中， r 和 θ 为以裂纹尖端为原点的极坐标， K_I 和 K_{II} 分别为 I 型和 II 型应力强度因子。当 $K_{II} = 0$ 时，裂纹尖端周向拉应力场关于原裂纹方向对称，最大周向拉应力方向与原裂纹延伸方向一致，裂纹趋于直线扩展；当主爆应力波引入剪切分量后， $K_{II} \neq 0$ ，周向拉应力场的对称性被破坏，最大周向拉应力方向发生偏移，从而导致裂纹偏转。

根据最大周向应力准则，裂纹将沿周向拉应力最大的方向扩展，即：

$$\frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial \theta} = 0 \quad (8)$$

可得到裂纹偏转角满足：

$$K_I \sin \theta_0 + K_{II} (3 \cos \theta_0 - 1) = 0 \quad (9)$$

其解析形式可写为：

$$\theta_0 = 2 \arctan \left(\frac{K_I - \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}}{4K_{II}} \right) \quad (10)$$

由上式可知，裂纹将沿裂尖周向拉应力最大的方向扩展，且裂纹偏转角 θ_0 与 K_{II}/K_I 比例直接相关。当 $K_{II} = 0$ 时， $\theta_0 = 0$ ，最大周向拉应力方向与原裂纹延长线一致，裂纹趋于直线扩展；当 $K_{II} \neq 0$ 时， θ_0 不再为零，周向拉应力场的对称性被破坏，最大周向拉应力方向发生偏移，裂纹路径随之偏离原设计方向。如图 20 所示，当主爆应力波作用于预裂纹裂尖时，焦散斑由 I 型转变为 I-II 复合型，结合式(2)可计算得出 $K_{II}/K_I = \mu$ 。由表 5 可知，S-2、S-3 与 S-4 工况对应时刻下 μ 分别为 0.3494、0.4189 和 0.4648，裂纹平均偏转角分别为 58.5°、67.5°和 82°。可以看出，随着 μ 增大，裂尖拉剪复合程度越强，最大周向应力方向偏移越明显，裂纹偏转程度也越大。该结果说明，微差时间调控下裂纹路径偏转的核心机制，是主爆应力波非对称加载改变了裂纹尖端 K_I 与 K_{II} 的比例关系，使最大周向应力方向偏离原裂纹延长线，进而诱导裂纹背离原先扩展路径。

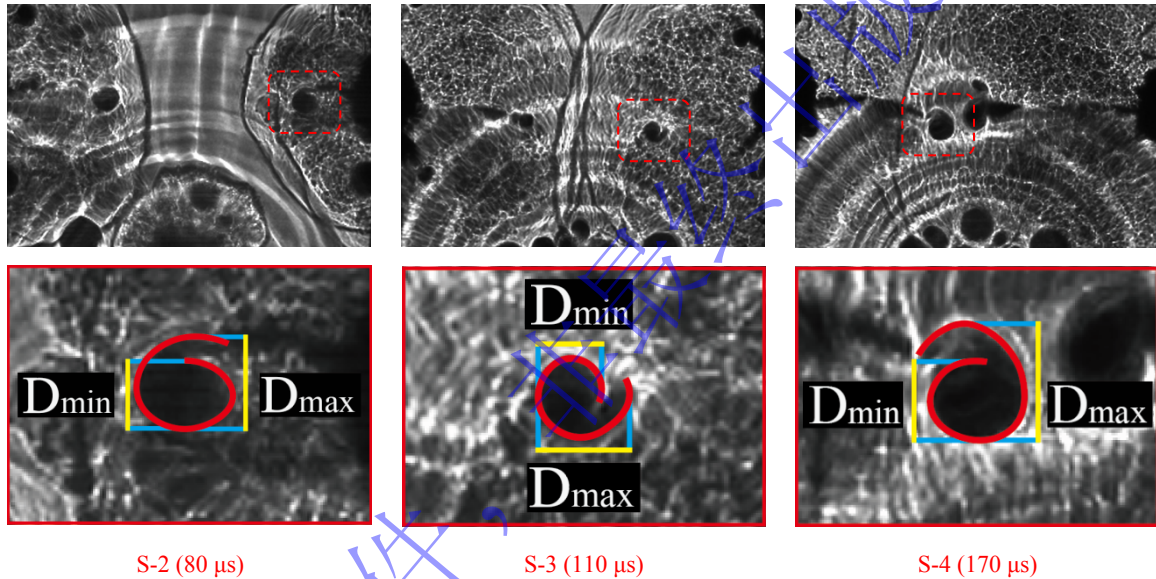


图 20 I-II 复合型焦散斑特征

Fig.20 I-II composite caustic speckle characteristics

表 5 K_{II}/K_I 与裂纹平均偏转角关系

Table 5 The relationship between the K_{II}/K_I and the average deflection angle of the crack

组号	时刻/ μs	μ	裂纹平均偏转角/(°)
S-2	80	0.3494	58.5
S-3	110	0.4189	67.5
S-4	170	0.4648	82

结合本文实验现象可知，S-1~S-4 工况中，主爆应力波均在预裂纹尚未完全止裂前作用于裂纹尖端，使裂纹尖端出现 I-II 复合型断裂特征，并导致裂纹扩展路径发生偏转。其中，内侧定向裂纹相对于主爆孔处于迎波侧，主爆应力波诱导的剪切分量使最大周向拉应力方向偏向主爆孔，因此内侧裂纹向主爆孔方向偏转；外侧定向裂纹则受绕射应力波及非对称应力场影响，最大周向拉应力方向背离主爆孔，表现为向保留岩体方向偏移。该结果说明，裂纹偏转并非单纯由裂纹尖端相互吸引或裂纹长度差异引起，而是由主爆应力波作用下裂纹尖端应力场重构及 I-II 复合型断裂共同控制。

5.3 原生裂纹受力分析

实验结果表明：预裂孔爆炸后，原生裂纹未出现明显的焦散斑特征，且裂纹面呈现闭合趋势。其主要原因在于，两预裂孔爆炸所产生的爆炸应力波相互叠加，并与爆生气体的准静态压力共同作用，二者耦合导致了原生裂纹的压闭效应。如图 21(a)所示，两炮孔的应力波在原生裂纹处汇聚，使裂纹面法向处于以压缩波为主导的压-剪复合应力状态；同时，如图 21(b)所示，在爆生气体准静态压力作用下，裂纹界面进一步趋于闭合，并在裂纹面切向形成梯度应力场，诱发界面摩擦滑移与耗能机制。数值模拟结果表明，在主爆孔应力波到达之前，两预裂孔爆炸产生的应力波首先在原生裂纹附近汇聚，使裂纹面法向处于以压缩波为主导的压-剪复合应力状态；AUTODYN 中 Z-2 模型的质点运动方向也显示，原生裂纹两侧质点向裂纹面靠近，裂纹面呈现明显压实趋势。与此同时，在炮孔封堵条件下，爆生气体准静态压力对预裂孔及其附近裂纹结构产生持续作用，使局部压缩状态得以维持。这种由动态应力场与准静态气体压力共同叠加形成的协同作用，显著抑制了原生裂纹的起裂与扩展过程。

需要指出的是，本文 DLCS 实验和数值模型尚未设置应力波与爆生气体压力的解耦对照工况，二者在爆炸加载过程中的作用又具有明显时空耦合特征，因此目前难以可靠给出二者对原生裂纹压实闭合的独立贡献比例。基于现有证据，本文更审慎地认为：爆炸应力波主要提供早期瞬态法向压缩，爆生气体准静态压力主要起到持续加载和维持压闭状态的作用，二者耦合共同导致原生裂纹尖端焦散斑不明显、应力强度因子降低，并抑制其起裂与扩展。

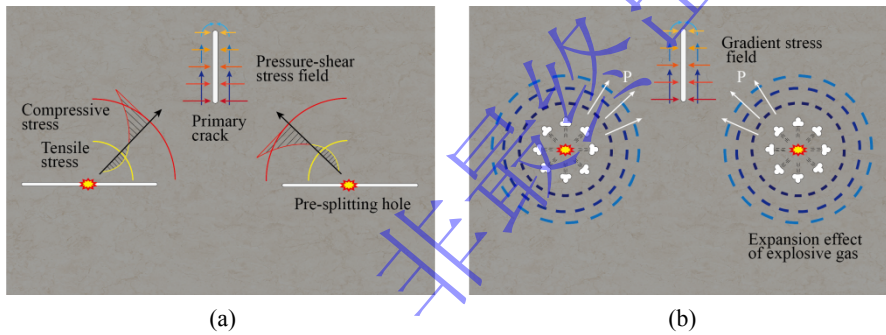


图 21 原生裂纹受力分析图

Fig.21 Schematic diagram of stress analysis of primary cracks

爆炸应力波在传播过程中遵循“惠更斯原理”^[60]。波阵面上质点可以看成次级子波的波源，新的爆炸应力波波阵面就是这些次级子波的包络线，如图 22 所示。当主炮孔爆炸应力波传播至预裂孔的定向裂纹处，定向裂纹会减弱其传播路径上的次级子波强度。虽然在主炮孔和原生裂纹之间无障碍物，不会减弱应力波强度。但定向裂纹附近的子波强度降低，这些子波传播至原生裂纹的强度也会降低。定向裂纹扩展的越长，遮挡的子波越多，其传播至原生裂纹的强度越低。因此，焦散实验中，W-3 相较于 W-2 试件，原生裂纹扩展更短，其尖端应力强度因子峰值更低。

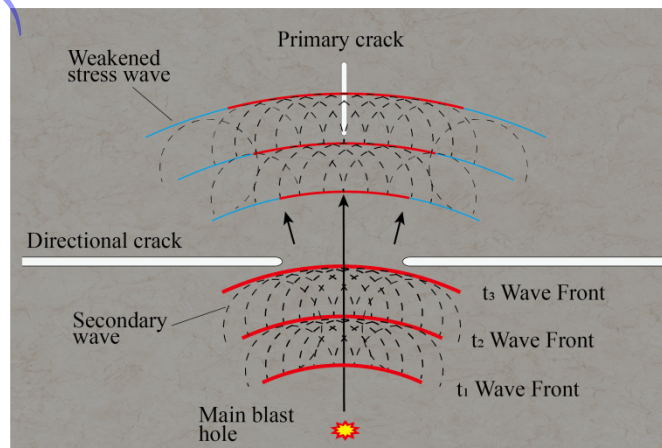


图 22 定向裂纹对主爆孔应力波的阻滞作用

Fig.22 Blocking effect of directional cracks on the stress wave from the main blast hole

录用稿件，非最终出版稿

6 讨论

需要指出的是，主爆孔在预裂裂纹扩展阶段起爆时，不仅会影响内侧裂纹的相向勾连，也会诱发外侧定向裂纹向保留岩体方向偏转。如图 6 和图 12 所示，S-1~S-4 工况中外侧裂纹均存在不同程度的向上偏移，说明主爆应力波改变了外侧裂纹尖端的局部应力场，使其偏离原设计成缝方向。该偏转可能导致预裂轮廓线偏离设计边界，并在保留岩体内形成附加裂隙，从而削弱围岩完整性并增加局部损伤风险。相比之下，当主爆孔在预裂裂纹止裂后起爆时，外侧裂纹无明显偏转，预裂缝形态更加平直连续，有利于减少保留岩体附加损伤。因此，避免主爆应力波作用于仍处于扩展阶段的预裂裂纹，是提高预裂成缝质量和围岩稳定性的重要条件。

本文采用 PMMA 透明材料和 TATP 炸药开展小尺度模型实验，主要目的在于在相同条件下对比分析不同微差时间对预裂裂纹扩展、成缝质量及原生裂纹稳定性的影响。因此，文中获得的裂纹扩展长度、应力强度因子峰值及最优微差时间等结果，主要反映不同微差时间工况之间的相对变化规律，并不直接代表复杂岩体条件下的绝对工程参数。

实际岩体通常具有非均质性、节理裂隙及复杂原位应力状态，工程炸药的爆轰参数和能量释放特征也与 TATP 存在差异。因此，本文结论的主要意义在于揭示预裂孔与主爆孔微差起爆时序对裂纹扩展、成缝质量及围岩稳定性的调控机制。其工程推广应用仍需结合岩石类型、节理结构、原位应力、炮孔布置、装药结构及工业炸药参数等因素进一步验证和优化。

本研究所得结论主要适用于爆破作用机制与相关理论探索，其在复杂岩体工程中的实际应用，仍需后续结合复杂工程地质环境下的实验工作开展进一步验证。

7 结论

基于数字激光动态焦散实验与数值模拟，系统揭示了预裂孔与主爆孔微差时间对裂纹演化及围岩稳定性的调控机理，主要结论如下：

(1) 预裂孔与主爆孔之间的微差时间显著控制预裂裂纹的扩展行为与成缝质量。当主爆孔在预裂缝扩展阶段起爆时，爆炸应力波与裂纹尖端应力场发生耦合，促使断裂模式由 I 型（张开型）向 I-II 复合型（张开-剪切型）转变，导致裂纹发生偏转，有效预裂缝长度最低降至原始长度的 20.2%，严重破坏预裂面的连续性与平整度；当主爆孔在预裂缝止裂后起爆时，预裂缝结构已趋于稳定，裂纹形态平直，成缝质量最佳。因此，合理控制微差时间以避免预裂裂纹扩展阶段起爆，是保障预裂面完整性的关键。

(2) 增大预裂孔与主爆孔之间的微差时间有利于提升围岩稳定性。预裂孔爆炸产生的应力波叠加效应与爆生气体准静态压力可对原生裂纹产生压实闭合作用，降低其扩展潜力；随着起爆延时的延长，预裂缝对主爆应力波的阻滞与能量耗散能力显著增强，原生裂纹尖端的应力强度因子峰值从 $0.156 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ 降至 $0.081 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ ，最大降幅达 48.1%，有效抑制原生裂纹的起裂与扩展，从而显著提升围岩稳定性。

(3) 数值模拟结果与 DLCS 实验数据吻合良好，验证了微差时间调控裂纹演化及围岩稳定性的作用机制，为工程实践中爆破参数的优化提供了重要的理论支撑与技术指导。

(4) 工程实践中宜将主爆孔起爆时间设置在预裂缝完全止裂之后，以获得最佳成缝效果并提高围岩稳定性。

参考文献

- [1] TANG Y L, LI J C, WANG D P, et al. An energy-driven crushing-plasticity coupling model for grain crushing in porous rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2024, 183: 105931. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2024.105931>.
- [2] ZHU Y M, TANG Y L, WANG H C, et al. Development of a dynamic cumulative damage model and its application to underground hydropower caverns under multiple blasting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2024, 184: 105948. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2024.105948>.
- [3] ZHU Y M, ZHANG Q B. Lifecycle resilience and sustainability trade-offs for underground infrastructure under multi-hazard scenarios[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2025: 111797. <https://doi.org/10.1016/j.res.2025.111797>.
- [4] ZHU Y M, ZHANG Q B. Modelling and assessing lifetime resilience of underground infrastructure to multiple hazards: Toward a unified approach[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2025, 156: 106212. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106212>.
- [5] YU B B, YANG R S, ZUO J J, et al. Impact risk analysis and pressure relief evaluation of deep rockburst mines based on multi-factor data fusion and combination empowerment[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2025: 1-24. <https://doi.org/10.1007/s00603-025-05097-0>.
- [6] LI D Y, LI M L, WANG S, et al. Research process and hotspot prediction of deep-hole presplitting blasting technology in China's mines[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2025, 11(1): 117. <https://doi.org/10.1007/s40948-025-01053-y>.
- [7] LIU K W, LI X D, HUANG L Q, et al. Investigation on rock fracturing in presplit blasting under various initial stresses[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2024, 57(9): 6927-6950. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-03877-8>.
- [8] 张渊通, 杨仁树, 陈程, 等. 爆炸应力波在梯度介质中的可视化传播[J]. *爆炸与冲击*, 2026, 46(2): 023201. doi: 10.11883/bzycj-2024-0497.
- ZHANG Y T, YANG R S, CHEN C, et al. Visual propagation of explosion stress waves in gradient media[J]. *Explosion And Shock Waves*, 2026, 46(2): 023201. doi: 10.11883/bzycj-2024-0497.
- [9] 何理, 杨仁树, 钟东望, 等. 毫秒延时爆破等效单响药量计算及振速预测[J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(9): 129-141. DOI:10.11883/bzycj-2020-0363.
- HE L, YANG R S, ZHONG D W, et al. Calculation of equivalent charge weight per delay and prediction of vibration velocity for millisecond delay blasting[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(9): 129-141. DOI:10.11883/bzycj-2020-0363.
- [10] 周星源, 岳中文, 金庆雨, 等. 反射爆炸应力波作用下动静裂纹的贯通机理[J]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(6): 123-137. DOI:10.11883/bzycj-2024-0409.
- ZHOU X Y, YUE Z W, JIN Q Y, et al. Coalescence mechanism of dynamic and static cracks under the action of reflected blasting stress waves[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(6): 123-137. DOI:10.11883/bzycj-2024-0409.
- [11] 曹永帮, 黄俊红, 王自旭, 等. 不同炮孔间距下微差爆破诱发爆生裂纹扩展规律研究[J]. *爆破*, 2025, 42(2): 81-87, 96. <https://doi.org/10.3963/j.issn.1001-487X.2025.02.010>.
- CAO Y B, HUANG J H, WANG Z X, et al. Study on propagation law of blast-induced cracks under millisecond blasting with different borehole spacings[J]. *Blasting*, 2025, 42(2): 81-87,96. <https://doi.org/10.3963/j.issn.1001-487X.2025.02.010>.

- [12] GDOUTOS E E, RAFTOPOULOS D D. The method of caustics in conjunction with stress frozen technique for the investigation of three-dimensional crack problems[J]. *International Journal of Fracture*, 1992, 56(4): R53-R59. DOI:10.1007/BF00015869.
- [13] BEINERT J, KALTHOFF J F. Experimental determination of dynamic stress intensity factors by shadow patterns [J]. Springer Netherlands, 1981, 7: 281-330. DOI:10.1007/978-94-009-8337-3_5.
- [14] KALTHOFF J F. Shadow Optical Method of Caustics[J]. *Handbook on Experimental Mechanics*, 1987, 9. DOI:10.1007/978-4-431-68039-0_14.
- [15] 杨仁树, 肖成龙, 丁晨曦, 等. 空孔与运动裂纹相互作用的动焦散线实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(5): 05220 2. doi: 10.11883/bzycj-2019-0091
- YANG R S, XIAO C L, DING C X, et al. Experimental study on dynamic caustics of interaction between void and running crack[J]. *Explosion And Shock Waves*, 2020, 40(5): 052202. doi: 10.11883/bzycj-2019-0091
- [16] 邱鹏. 爆炸应力波与裂纹相互作用机理研究[D]. 中国矿业大学(北京), 2019. <https://link.cnki.net/doi/10.27624/d.cnki.gzkb.2019.000136>
- [17] SECCATORE J, VIGNA S, MARIN T, et al. The role of delays in the performance of blasting[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(11): 4657. <https://doi.org/10.3390/app14114657>.
- [18] ZHANG P F, BAI R C, SUN X, et al. A study of millisecond blasting on high bench at barun iron ore operation[J]. *Geofluids*, 2021: 3645438. <https://doi.org/10.1155/2021/3645438>.
- [19] DING C X, YANG R S, FENG C. Stress wave superposition effect and crack initiation mechanism between two adjacent boreholes[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 138: 104622. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104622>.
- [20] 冷振东, 范勇, 卢文波, 等. 孔内双点起爆条件下的爆炸能量传输与破岩效果分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38 (12): 2451-2462. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2019.0474>.
- LENG Z D, FAN Y, LU W B, et al. Analysis of explosive energy transmission and rock-breaking effect under double-point initiation condition in borehole[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(12): 2451-2462. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2019.0474>.
- [21] 冷振东, 张程娇, 邓小英, 等. 台阶爆破工业电子雷管精确延时爆破设计与应用[J]. *工程爆破*, 2024, 30(5): 216-225. <https://doi.org/10.19931/j.EB.20240178>.
- LENG Z D, ZHANG C J, DENG X Y, et al. Design and application of precise delay blasting with industrial electronic detonators in bench blasting[J]. *Engineering Blasting*, 2024, 30(5): 216-225. <https://doi.org/10.19931/j.EB.20240178>.
- [22] 关振长, 朱凌枫, 俞伯林. 隧道掘进排孔爆破的精细化数值模拟[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(11): 154-162. <https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2021.11.022>.
- GUAN Z C, ZHU L F, YU B L. Refined numerical simulation of row hole blasting in tunnel excavation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(11): 154-162. <https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2021.11.022>.
- [23] LIU X, YAN P, LU W B, et al. Investigation of dynamic crack formation mechanism based on a new crack dynamic driving model[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 159: 105471. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105471>.
- [24] JI Z, SU H, LI H W, et al. Study on the influence of arched pre-splitting crack on cracks propagation under explosion load[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2025, 136: 104837. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2024.104837>.
- [25] MA S Z, JIANG H M, LIU K W, et al. Numerical and theoretical investigation of crack extension and coalescence behavior of rock mass in presplit blasting subjected to initial stress[J]. *Computers and Geotechnics*, 2026, 191: 107790. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107790>.

- [26] 马泗洲, 刘科伟, 杨家彩, 等. 初始应力下岩体爆破损伤特性及破裂机理[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(10): 152-173. doi: 10.11883/bzycj-2023-0151.
MA S Z, LIU K W, YANG J C, et al. Blast-induced damage characteristics and fracture mechanism of rock mass under initial stress[J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(10): 152-173. doi: 10.11883/bzycj-2023-0151.
- [27] 马泗洲, 蒋海明, 刘科伟, 等. 地应力对岩体预裂爆破成缝过程的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(09): 162-182. doi: 10.11883/bzycj-2024-0365.
MA S Z, JIANG H M, LIU K W, et al. Influence of in-situ stress on pre-split blasting seam formation process of rock mass[J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(9): 162-182. doi: 10.11883/bzycj-2024-0365.
- [28] LI X D, LIU K W, SHA Y Y, et al. Experimental and numerical investigation on rock fracturing in tunnel contour blasting under initial stress[J]. International Journal of Impact Engineering, 2024, 185: 104844. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104844>.
- [29] LI X D, LIU K W, QIU T, et al. Study of presplit blasting under high in-situ stress[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 288: 109360. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109360>.
- [30] LIU B Q, SU H, GONG Y, et al. Influence mechanism of void hole spacing on blast-induced crack propagation [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2025: 105067. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2025.105067>.
- [31] LIU Z, YANG R S, ZUO J J, et al. Mechanism of explosive crack propagation under the coupling of high crustal stress field and explosion stress field[J]. International Journal of Impact Engineering, 2025: 105549. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2025.105549>.
- [32] QIU P, YUE Z W, LIANG W G, et al. Mixed-mode crack-tip stress intensity factors measurements by caustics method: A comparison between low and high loading rate conditions[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 310: 110446. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110446>.
- [33] ZHU X G, DING C X, SUI Z, et al. Rock fracture mechanism of buffer blasting with cushion layer at the borehole bottom[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2025, 32(2): 325-334. <https://doi.org/10.1007/s12613-024-2941-5>.
- [34] 杨仁树, 肖成龙, 丁晨曦, 等. 空孔与运动裂纹相互作用的动焦散线实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(5): 05220-2. DOI:10.11883/bzycj-2019-0091.
YANG R S, XIAO C L, DING C X, et al. Experimental study on the interaction between empty holes and moving cracks by dynamic caustics[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(5): 13-21. DOI:10.11883/bzycj-2019-0091.
- [35] 骆浩浩, 张渊通, 左进京, 等. 冲击荷载下运动裂纹与空孔相互作用的焦散线实验研究[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(2): 210-216. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2022.02.008
LUO H H, ZHANG Y T, ZUO J J, et al. Caustics experimental study on the interaction between moving cracks and voids under impact loading[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(2): 210-216. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2022.02.008
- [36] YOU S, YANG R S, XIAO C L, et al. Study on the superposition effect of stress waves and crack propagation law between blastholes at different angles[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 178: 108193. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2024.108193>.
- [37] LI X D, LIU K W, SHA Y Y, et al. Experimental and numerical investigation on rock fracturing in tunnel contour blasting under initial stress[J]. International Journal of Impact Engineering, 2024, 185: 104844. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104844>.
- [38] 杨立云, 张勇进, 孙金超, 等. 偏置裂纹对含双裂纹 PMMA 试件动态断裂影响效应研究[J]. 矿业科学学报, 2017, 2(4): 330-335. <http://kykxxb.cumtb.edu.cn/cn/article/id/80>

- YANG L Y, ZHANG Y J, SUN J C, et al. The effect of offset distance on dynamic fracture behavior of PMMA with double cracks[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2017, 2(4): 330-335. <http://kykxxb.cumtb.edu.cn/cn/article/id/80>
- [39] LIANG X T, DING C X, ZHU X G, et al. Visualization study on stress evolution and crack propagation of jointed rock mass under blasting load[J]. Engineering Fracture Mechanics. 2024(296): 109833. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109833>.
- [40] LIU R F, ZHU Z M, LI Y X, et al. Study of rock dynamic fracture toughness and crack propagation parameters of four brittle materials under blasting[J]. Engineering Fracture Mechanics. 2020(225): 106460. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.04.034>.
- [41] XIAO C G, YANG R S, LI Q, et al. Experiment on blasting damage and dynamic caustics of jointed medium[J]. Engineering Fracture Mechanics. 2022(259): 108143. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.108143>.
- [42] 赵勇, 肖成龙, 杨立云, 等. 动、静裂纹作用偏置效应的动焦散冲击实验[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(7): 82-93. DOI:10.11883/bzycj-2019-0401.
- ZHAO Y, XIAO C L, Yang L Y, et al. Dynamic Caustics Impact Experiment on the Offset Effect of Dynamic and Static Crack Interaction[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(7): 82-93. DOI:10.11883/bzycj-2019-0401.
- [43] XIAO C L, LIU W, DING C X, et al. The protection mechanism of arc-cracks with different radii against impact load[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 293: 109728. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109728>.
- [44] 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. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.03.018>.
- [45] YANG Z, SHUAI Y, KANG Y Q, et al. Study on fracture behavior of PMMA materials under the action of shaped charge with different diameters[J]. Materials Today Communications, 2023, 34: 105319. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105319>.
- [46] DING C X, YANG R S, ZHU X G, et al. Rock fracture mechanism of air-deck charge blasting considering the action effect of blasting gas[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 142: 105420. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105420>.
- [47] 纪哲, 岳文豪, 苏洪, 等. 不同割缝宽度爆生裂纹扩展行为研究[J]. 高压物理学报, 2024, 38(6): 064107. doi:10.11858/gywllxb.20240733
- JI Z, YUE W H, SU H, et al. Study on the Behavior of Blasting Crack Propagation under Different Crack Widths[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(6): 064107. doi:10.11858/gywllxb.20240733
- [48] Matyáš R, Šelešovský J. Power of TATP based explosives[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009(165): 95-99. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.063>
- [49] 刘锋, 黄国强, 李松林, 等. TATP 空中爆炸冲击波传播规律的实验研究[J]. 火炸药学报, 2024, 47(10): 921-930. DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.202311006.
- LIU F, HUANG G Q, LI S L, et al. Experimental study on the propagation law of shock waves from TATP air explosion[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2024, 47(10): 921-930. DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.202311006.
- [50] 李松林. TATP 爆炸场参数与 JWL 状态方程研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022. <https://doi.org/10.26918/d.cnki.gnhgc.2022.000327>.
- [51] ZHAO Y P, QIN W J, JIN A B. Research and analysis of the impact of the pore structure on the mechanical properties and fracture mechanism of sandstone[J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 107753. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107753>.

- [52] LIU B Q, SU H, GONG Y, et al. Directional fracture mechanism and advantages of slit and notched coupled blasting[J]. *Engineering Fracture Mechanics*. 2025;325:111303. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2025.111303>.
- [53] ZHAO Y P, QIN W J, JIN A B, et al. Research and analysis of the impact of the pore structure on the mechanical properties and fracture mechanism of sandstone[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 38: 107753. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107753>.
- [54] 李子涵, 程扬帆, 王浩, 等. 负压环境对乳化炸药爆炸温度场和有害效应的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(8): 28-40. DOI:10.11883/bzycj-2023-0106.
- LI Z H, CHENG Y F, WANG H, et al. Effects of negative pressure environment on explosion temperature field and adverse effects of emulsion explosives[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(8): 28-40. DOI:10.11883/bzycj-2023-0106.
- [55] ZHANG X Y, YAN P, LU W B, et al. Energy release and damage characteristics induced by fracture planes in face distress blasting[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 173: 104485. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104485>.
- [56] ZHANG X Y, YAN P, LU W B, et al. Energy release and damage characteristics induced by fracture planes in face distress blasting[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 173: 104485. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104485>.
- [57] SU H, YUE W H, ZHANG X Y, et al. The influence of length under blast load on the propagation mechanism of interconnected cracks[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2025, 32(13): 3036-3051. <https://doi.org/10.1080/15376494.2024.2387749>.
- [58] 王雁冰, 李松林, 耿钰杰, 等. 切缝药包爆破定向断裂机理及围岩损伤特征 [J]. *工程科学学报*, 2023, 45 (4): 521-532. <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2022.04.20.002>.
- WANG Y B, LI S L, 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. <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2022.04.20.002>.
- [59] 马恩临, 赖金星, 王万锋, 邱军领. 考虑 I-II 型断裂韧度的隐伏溶蚀裂隙扩展突水机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2025, 44(7): 1808-1827. <https://rockmech.whrsm.ac.cn/CN/10.3724/1000-6915.jrme.2024.0157>.
- MA E L, LAI J X, WANG W F, et al. Propagation and water inrush mechanisms of concealed karst fissures with consideration of mixed-mode I-II fracture toughness. 2025, 44(7): 1808-1827. <https://rockmech.whrsm.ac.cn/CN/10.3724/1000-6915.jrme.2024.0157>.
- [60] LIU C W, LU Y Y, XIA B W, et al. Directional fracturing by slotting-blasting-caused stress wave form changes[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 129: 141-151. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.02.002>.