

# 多炮孔岩体等离子体爆破定向致裂机理研究

李雪<sup>1,2)</sup>, 王传兵<sup>1)✉</sup>, 王雁冰<sup>1,2)</sup>, 梅洪嘉<sup>2)</sup>, 李琰庆<sup>1)</sup>, 王兆阳<sup>2)</sup>, 肖殿才<sup>1)</sup>

1) 淮南矿业(集团)有限责任公司深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 淮南 232000 2) 中国矿业大学(北京)力学与土木工程  
学院, 北京 100083

✉通信作者, E-mail: wangchuanbing@126.com

**摘要** 为了研究等离子爆破技术结合切缝管和预切槽技术的定向致裂效果, 开展等离子体电脉冲定向致裂试验, 探究不同切缝管切缝形状和不同预切槽间距下等离子体爆破定向致裂机理和定向断裂效果, 对比分析不同定向形式作用下等离子体爆破岩石定向断裂贯通效果. 结果表明, 与正楔形切缝管和平切形切缝管相比, 切缝管岩石试件中倒楔形结构中产生的应力峰值最大, 聚能效果最显著, 其定向贯通岩石效果更显著. 预切槽岩石的电爆聚能致裂效果随着钻孔切槽间距的增加而减小. 切槽间距为 40 mm 时, 预切槽岩石试件等离子体电脉冲的聚能效果优异, 产生定向裂纹的效果明显优于切槽间距为 50 mm 和 60 mm 的预切槽岩石试件. 同时, 预切槽定向形式的等离子体爆破定向致裂效果相对于切缝管定向致裂效果更为显著.

**关键词** 等离子体电脉冲爆破; 定向致裂; 切缝管; 预切槽; 数值模拟

**分类号** O383

## Research on the directional fracturing mechanism of multiborehole rock mass plasma blasting

LI Xue<sup>1,2)</sup>, WANG Chuanbing<sup>1)✉</sup>, WANG Yanbing<sup>1,2)</sup>, MEI Hongjia<sup>2)</sup>, LI Yanqing<sup>1)</sup>, WANG Zhaoyang<sup>2)</sup>, XIAO Diancai<sup>1)</sup>

1) Huainan Mining (Group) Co., Ltd, State Key Laboratory for Safe Mining of Deep Coal Resources and Environment Protection, Huainan 232000, China

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

✉Corresponding author, E-mail: wangchuanbing@126.com

**ABSTRACT** The study examines the directional fracturing effects of plasma blasting technology when combined with slit tube and precut groove technologies. Plasma electric pulse directional fracturing tests were carried out using two groups of test variables. The aim was to explore how different slit tube shapes and precut groove spacings affect the mechanism of directional rock fracturing under various configurations of plasma blasting. In the first set of experiments, results indicated that the embedded inverted wedge-shaped slip guides crack initiation, expansion, and extension along the intended rupture surface direction compared to both positive wedge-shaped slit pipe and flat cut slit pipe. The shape of the cut slit significantly affects the directional fracturing effect during rock electrobursting. The inverted wedge-shaped slit pipe exhibits a cross-sectional area that gradually decreases from the inside to the outside, resulting in strong energy convergence during the plasma blasting process. This configuration generates maximum peak stress on both sides of the slit, ensuring a higher degree of flatness on the inner surface of the rock specimen. Consequently, it produces the fewest secondary cracks and achieves more effective directional penetration through the rock. The second group of experiments revealed that prefabricated grooved rock specimens use precut grooves to steer the direction of crack expansion and rupture surface formation. As the spacing among these grooves increases, the effectiveness of the electro-explosive fusion fracturing gradually diminishes, leading to greater deviation from the expected crack direction. When the precut slot spacing is small, the shock waves from the electro-explosive events are

收稿日期: 2024-04-01

基金项目: 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室开放基金资助项目(HNKY2024YB103)

closer together, overlapping to form a combined shock wave. At a 40-mm slot spacing, the precut groove rock specimens exhibited optimal energy convergence from plasma electric pulses, forming a coupling surface along the precut groove line. This configuration enhances stress intensity at the rock crack tip, resulting in more precise directional cracks compared to spacing of 50 mm and 60 mm. At the same time, the directional fracturing effect of plasma blasting is more pronounced in precut groove orientations than that in slit pipe configurations, offering excellent penetration along the intended path.

**KEY WORDS** plasma electric pulse blasting; directional cracking; slit tube; precut groove; numerical simulation

随着爆破技术在矿山开采、城市建设、交通等工程中不断发展, 该技术现已进入精确爆破阶段, 其中定向控制爆破是精细爆破领域研究的重点之一<sup>[1]</sup>, 定向控制爆破在岩石开采、煤矿定向切顶卸压、油气井定向压裂、巷道开挖等多个领域得到广泛应用<sup>[2-4]</sup>.

在工程爆破中, 定向控制爆破多借助化学炸药进行定向破岩, 目前炸药定向爆破技术可分为切槽定向控制爆破、聚能药包定向控制爆破和切缝药包定向控制爆破<sup>[5]</sup>. 在切槽定向研究中, 陆文和张志呈<sup>[6]</sup>用脆性岩石断裂力学理论为基础, 从切槽对尖端岩石的断裂强度和爆轰产物的力学效应出发, 讨论了切槽定向断裂的机理. 在聚能药包定向研究中, 肖正学等<sup>[7]</sup>运用理论分析和模拟计算的方法, 对切槽孔和圆形孔爆破后裂纹的起裂、扩展方向等方面进行了对比研究. 在切缝药包定向研究中, 申涛等<sup>[8]</sup>发现定向爆破过程中切缝管能够有效控制爆炸能量的释放和爆生气体的力学行为. 然而, 传统炸药爆破存在对环境的有害影响, 比如产生有毒有害气体、飞石、粉尘和剧烈震动<sup>[9-10]</sup>, 为此应研究新型定向致裂控制爆破技术.

与传统炸药爆破相比, 等离子体电脉冲致裂技术具有安全性高、能量可控、绿色环保等优势<sup>[11-13]</sup>, 在矿石开采领域备受关注. 理论研究方面, 林柏泉和张祥良<sup>[14]</sup>通过分析等离子体击穿煤体理论, 提出了等离子体技术结合其他增透技术以研究等离子体对煤体内瓦斯解吸及渗流的影响; 刘伟吉等<sup>[15]</sup>通过分析电极钻头结构, 研究影响高压电脉冲钻井破岩效率的电学因素, 并提出了一种电脉冲机械负荷破岩技术; 黄仕杰等<sup>[16]</sup>提出电弧通道的阻抗特性与外回路阻抗的关系决定了脉冲放电中通道沉积能量大小. 实验研究方面, 卢红奇等<sup>[17]</sup>通过电脉冲应力波实验和微观观测方法研究了煤样裂隙的发展过程及特征; 张辉等<sup>[18]</sup>开展液相放电等离子体破岩室内实验, 得出冲击波在岩样表面发生受压破坏, 内部岩-液界面反射应力波产生拉伸应力; Kang 等<sup>[19]</sup>选用红砂岩进行高压电脉冲破碎试验, 得出红砂岩在高压电脉冲作用下的破裂过

程中发生以剪切破坏和拉伸破坏的复合机制破裂. 数值模拟方面; 余庆等<sup>[20]</sup>基于有限元软件 LS-DYNA 探究了液电效应冲击波破岩原理, 祝效华等<sup>[21]</sup>通过电击穿试验研究了等离子体电脉冲钻井破岩的机理, 并建立了物理数据模型(PDM)研究电脉冲击穿生成的等离子体轨道轨迹; Che 等<sup>[22]</sup>利用仿真软件模拟高压脉冲放电破碎过程中电极的电场分布和放电粒子的运动轨迹, 得出硬岩破碎效果与电极间距和岩石类型密切相关.

综上所述, 目前对等离子体电脉冲致裂研究多集中于等离子体爆破模型试验的影响因素, 但是等离子体电脉冲爆破在定向致裂机理方面的认识不够明确. 本研究首次提出采用等离子体电脉冲技术结合切缝管和预切槽技术定向致裂, 通过实验室试验和数值模拟对比分析不同定向控制形式下等离子体电脉冲定向致裂的效果, 揭示等离子体电脉冲定向致裂机理, 以期通过对等离子体电脉冲切缝管和预切槽定向致裂技术的理论和实验研究, 为等离子体电脉冲定向致裂技术的广泛推广和应用提供技术依据.

## 1 不同定向形式下等离子体电脉冲致裂试验

### 1.1 试验材料及设备

为探究等离子体电脉冲定向致裂效果进行实验室试验, 预制试验所用岩石试件尺寸为 400 mm×150 mm×100 mm, 抗压强度为 65.81 MPa, 抗拉强度为 3.95 MPa, 弹性模量为 7.6 GPa, 泊松比为 0.28. 试验岩石试件分为两组, 第一组岩石内嵌切缝管, 如图 1(a) 所示, 岩石试件上平面沿长边方向钻凿 3 个炮孔, 钻孔直径为 25 mm, 孔深为 70 mm, 间距  $L$  为 50 mm, 三个岩石试件分别编号为“A-1、A-2、A-3”, 用于切缝管定向致裂. 第二组岩石预制预切槽, 如图 1(b) 所示, 在岩石试件上表面沿长轴方向钻取三个直径为 20 mm、孔深为 70 mm 的圆孔, 预切槽长 10 mm, 宽 5 mm, 钻孔间距  $L$  为 40、50、60 mm, 三个岩石试件分别编号为“B-1、B-2、B-3”, 用于预切槽定向爆破. 两组试件的尺寸参数如表 1 所示.

在本试验中, 共设计了三种不同切缝形状的

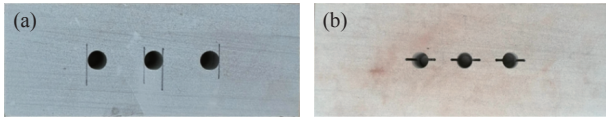


图1 不同形式三孔岩石试件图。(a)切缝管岩石试件;(b)预切槽岩石试件

Fig.1 Diagram of different forms of three-hole rock specimens: (a) slit pipe rock specimen; (b) precut grooved rock specimens

表1 三孔岩石试件情况

Table 1 Parameters of three-hole rock specimens

Specimen number	Type of slit tube	Width of external cutting seam/mm	Width of internal cutting seam/mm	Borehole spacing, L/mm
A-1	Positive wedge shape	4	2	50
A-2	Flat cut shape	2	2	50
A-3	Inverted wedge shape	2	4	50
B-1	—	—	—	40
B-2	—	—	—	50
B-3	—	—	—	60

双缝切缝管,如图2所示。切缝管材质为玻璃纤维,中间轴向切割对称双缝,切缝长度为50 mm,管长65 mm,外径24 mm,壁厚2 mm,力学参数如表2所示。

等离子体电脉冲破岩设备如图3所示,包括充电电源、储能电容模块、控制系统和双线电极。其输入电压为交流电380 V,脉冲放电电压范围为0.5~10 kV,电容量范围为50~20000 μF,释放能量范围在1~100 kJ,等效串联电阻ESR≤5 MΩ。该装置是将高压电荷储存在储能电容模块内,由正负极插入密封的岩石孔内,向孔洞中注入电解质溶液后密封,电容器组两极间的开关瞬间闭合时,

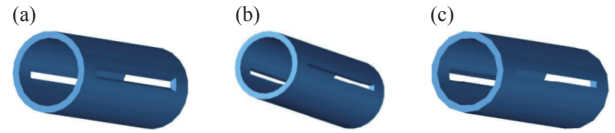


图2 玻璃纤维双缝切缝管示意图。(a)正楔形切缝管;(b)平切形切缝管;(c)倒楔形切缝管

Fig.2 Schematic diagram of fiberglass double slit tube: (a) positive wedge-shaped slit tube; (b) flat cut slit tube; (c) inverted wedge-shaped slit tube

强电流脉冲在溶液内迅速积聚巨大能量,发生爆炸、破碎岩石。

### 1.2 试验描述

试验前在岩石试件钻孔侧壁和底部进行防水处理,防止电离溶液渗漏,将第一组中岩石试件、切缝管、电极线和堵头,以及第二组中岩石试件、电极线和堵头分别固定,将其固化24 h后进行预试验。向岩石试件中注入饱和NaCl电离溶液,用螺栓封闭堵头注液孔,确保钻孔密闭性,将岩石试件连接高压电脉冲爆炸设备并放入爆破仓中。预试验先采用1、2、3 kV电压对岩石试件进行爆破,观察岩石是否有定向破裂效果,将岩石三孔之间裂隙能够贯通且岩石破裂块度较大的电压设置为试验电压。经预实验确定试验电压为3 kV。正式试验时,首先将注入电离溶液后的岩石试件置于爆破仓中,连接高压电脉冲爆炸设备。当施加试验电压时,大量电子在正负电极处释放,基于液体介质不可压缩的性质,电离溶液中形成等离子体通道并不断膨胀,形成冲击波向钻孔四周不断扩散。由于三个钻孔间基体应力叠加,拉应力峰值总是沿着切缝管或预切槽连线方向发展,当冲击应力增加到岩石试件抗拉强度时,岩石优先沿着钻孔连线方向发生破裂,使爆破岩体达到定向断裂的效

表2 玻璃纤维切缝管物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of glass fiber slit tube

Circumferential elastic modulus/GPa	Longitudinal elastic modulus/GPa	Poisson's ratio	Circumferential compressive strength/MPa	Longitudinal tensile strength/MPa
0.061	0.186	0.23	450	280

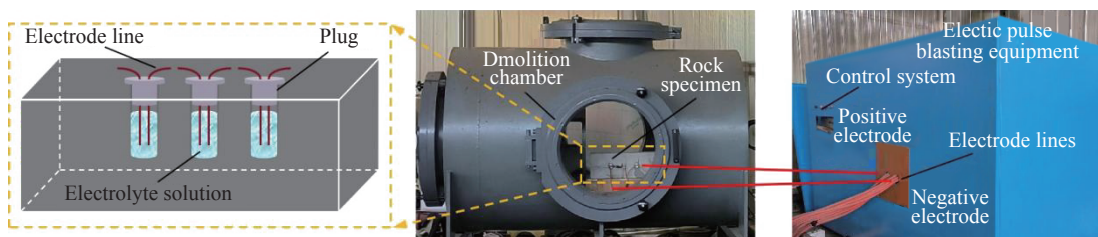


图3 等离子体电脉冲破岩设备

Fig.3 Plasma electric pulse rock-breaking equipment

果. 分别对切缝管试件 A-1、A-2、A-3 和预切槽试件 B-1、B-2、B-3 依次施加 3 kV 试验电压进行等离子体电脉冲爆破, 观察整个岩体的定向破裂效果及三孔之间裂隙的贯通程度, 将电爆后岩石试件的破坏状况进行对比分析.

## 2 实验结果及分析

### 2.1 不同定向形式电爆后岩体破坏效果

#### 2.1.1 切缝管定向电爆后岩石表面破坏形态

内嵌切缝管定向电爆后岩石试件上表面的裂纹扩展状况如图 4 所示, 其中绿色虚线表示岩石试件横向钻孔中心连线方向. 起爆后, 在钻孔电离溶液中形成等离子体通道, 并形成爆炸冲击波, 优先由切缝位置向钻孔两侧传播, 切缝垂直方向的冲击波在钻孔连线方向相互叠加, 形成叠加应力场, 致使岩石沿钻孔方向开裂. 可见试件 A-1 中内嵌正楔形切缝管时, 电爆后岩石试件上表面长边裂纹的扩展方向与预期岩石沿钻孔开裂的方向相差较大, 左侧裂纹较预期开裂方向相差约  $13^\circ$  的夹角, 且三孔切缝管爆破时, 电爆应力波优先在切缝位置扩散, 钻孔间应力场重叠, 致使裂纹在钻孔间位置开始萌生, 并优先沿着钻孔连线方向扩展, 由于中心钻孔间的起爆速度快于左右两侧钻孔, 致

使中间钻孔位置出现多余竖向裂纹, 由于应力场叠加作用, 其裂纹发展与钻孔连线方向较为契合. 左右钻孔外侧区域由于应力场的叠加效果减弱, 其裂纹的扩展弯曲程度较大. 试件 A-2 中内嵌平切形切缝管, 可见沿中心钻孔连线方向, 岩石试件上表面钻孔之间裂纹发展大致与预期方向相一致, 左侧钻孔位置裂纹开始偏离预期切缝管连线方向约  $10^\circ$  的夹角. 垂直于钻孔连线方向, 由于电爆冲击波优先沿切缝处向两侧传播, 同时左侧位置钻孔起爆速度快, 致使出现两条多余竖向裂纹, 并且岩石试件边缘出现明显的岩石开裂与岩屑脱落, 且其竖向裂纹扩展宽度逐渐增大. 试件 A-3 中内嵌倒楔形切缝管, 岩石试件上表面沿钻孔连线方向中间裂纹与预期方向吻合性很好, 钻孔两侧裂纹偏离钻孔连线方向约  $15^\circ$ . 电爆起爆后, 冲击波由倒楔形切缝管向两侧传播过程中, 倒楔形切缝管由于内切口大、外切口小, 产生显著的聚能效果, 使应力在切缝位置形成集中效应, 使初始裂纹优先沿切缝方向向两侧扩展, 并随着冲击波沿岩石薄弱面的传播, 裂纹逐渐沿着切缝管切缝连线方向贯通试件左右边界, 倒楔形岩石试件中未产生多余竖向裂纹, 其定向致裂效果较正楔形切缝管和平切形切缝管较明显.

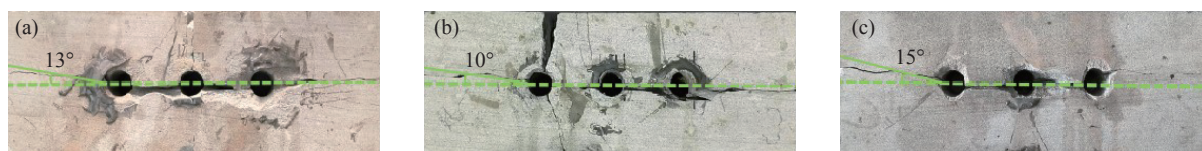


图 4 爆后切缝管岩石试件上表面裂纹状态. (a) A-1; (b) A-2; (c) A-3

Fig.4 Cracked states of the upper surface of the rock specimen of the slit tube after explosion:(a) A-1; (b) A-2; (c) A-3

上述试验现象表明, 不同切缝管形式下岩石试件的定向破裂效果及三孔之间裂隙的扩展状况不尽相同. 倒楔形切缝管岩石试件电爆定向致裂效果优于正楔形和平切形切缝管岩石试件, 由于倒楔形切缝由内向外切缝面积逐渐减小, 当电爆压缩液体介质形成等离子通道不断向外膨胀时, 等离子体在切缝管内不断反射散射, 由于双向切口位置的压力峰值最大, 电爆冲击波逐渐在切口位置汇聚, 并以射流形式不断向外传播, 导致在双向切缝口处的能量远远大于切缝管非切口位置, 切缝处冲击波的传播速度最快, 导致三钻孔的冲击波相互重叠, 并形成叠合应力场, 致使岩石优先由中间钻孔切缝连线方向开裂, 并向两侧扩展. 正楔形切缝管岩石试件和平切形切缝管岩石试件聚能效果相较于倒楔形结构减弱, 致使其定向致裂

效果相较于倒楔形切缝管岩石减弱.

#### 2.1.2 预切槽定向电爆后岩石表面破坏形态

经过预切槽处理后的岩石试件, 钻孔周围应力发生变化, 电爆前应力沿着钻孔周围呈均匀分布, 电爆过程中变化为沿预切槽连线方向集中分布, 且预切槽的尖端出现应力集中. 电爆放电时, 由于钻孔周围应力场的变化, 应力波优先沿着预切槽连线方向开始传播, 并且随着应力波扩散, 预切槽尖端的冲击应力逐渐增强, 致使裂纹沿着预切槽连线方向优先扩展. 由图 5 可知, 在同一电压下不同预切槽间距的岩石试件电爆后, 其上表面具有形态类似的裂纹, 在电爆冲击荷载作用下, 电爆后预切槽岩石试件中心钻孔位置受到电爆冲击波作用, 致使岩石整体均沿着预切槽连线方向贯通, 形成定向断裂. 裂纹由钻孔处萌生, 并在中间



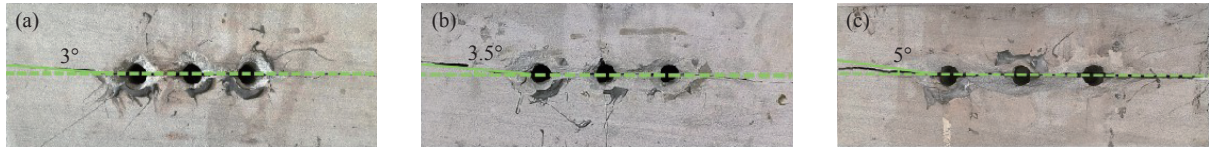


图5 爆后预切槽岩石试件上表面裂纹状态。(a) B-1; (b) B-2; (c) B-3

Fig.5 Upper surface crack states of precut grooved rock specimen after explosion: (a) B-1; (b) B-2; (c) B-3

应力叠加场的作用下逐渐向岩石试件两侧扩展,随着应力波传播至试件边缘,裂纹扩展到岩石试件两侧.试件 B-1 钻孔间距较小,在预切槽的定向作用下形成定向致裂主裂纹.在三钻孔预切槽连线范围内,主裂纹的扩展路径与预切槽连线方向较为吻合,与预期方向几乎一致,在预切槽连线范围之外,右侧裂纹扩展方向偏离预切槽连线方向大致  $3^\circ$ ,同时钻孔位置中心粉碎区面积相较于试件 B-2 和试件 B-3 较小.试件 B-2 由于中间钻孔处起爆时间早于左右两侧钻孔,致使中间钻孔位置产生多余两条横向裂纹,主裂纹的扩展方向偏离钻孔中心连线方向约  $3.5^\circ$ ,定向致裂效果较为明显.试件 B-3 在电爆后其初始裂纹优先沿预切槽位置起裂,并随着电爆冲击波的传播裂纹沿着预切槽连线方向向两侧扩展直至岩石试件实现定向贯通,试件 B-3 电爆主裂纹的扩展方向与预期方向较为一致,预切槽两侧范围之外区域裂纹扩展方向偏离钻孔中心连线方向约  $5^\circ$ ,其定向致裂效果相较于钻孔间距小的岩石试件不明显.

由此可知,预切槽钻孔间距的设置能够控制岩石试件的定向致裂效果,预切槽间距越小,钻空间应力场的叠加效应越明显.电爆冲击波优先沿预切槽方向传播时,可以更好地控制裂纹沿预期方向起裂,且钻孔周围相较于试件边缘的定向致裂效果更明显,同时由于冲击应力高度集中,抑制了多余次生裂纹的萌生.对比不同间距的岩石试件可知,随着预切槽间距增大,其冲击应力集中效果减弱,定向裂纹的偏离程度增大.

## 2.2 爆后岩体断面形貌

### 2.2.1 切缝管定向电爆后岩石内部断面形态

电爆后内嵌切缝管岩石试件内部断面的破坏

形态如图 6 所示,当电爆放电时,液体介质不断被压缩,当其压力峰值达到岩石试件的动态抗压强度时,在电爆冲击波的作用下,岩石试件切缝管两侧位置将会率先沿切缝管切缝方向起裂,随着冲击波不断增加,切缝管内冲击波不断碰撞反射,电爆冲击应力逐渐达到峰值,从而沿着切缝方向,形成定向裂纹贯通整个岩石试件,当岩石试件内部破裂面平整度较好,证明电爆冲击应力的冲击速度快.可见当岩石试件 A-1 内嵌正楔形切缝管时,由于正楔形切缝管的聚能效果低于平切形切缝管和倒楔形切缝管,其对应岩石试件内部破裂面的平整程度较差,断面起伏波动程度较大,内部破裂面出现明显断裂弧度,且内部破裂面的倾斜度沿着中心钻孔区域逐渐增加,证明电爆冲击波向四周传播过程中,应力波冲击的集中破坏程度逐渐减弱.岩石试件 A-2 内嵌平切形切缝管时,其内部破裂面的平整程度相较于岩石试件 A-1 升高,断面粗糙度逐渐降低.断面起伏波动程度从钻孔区域到岩石试件两侧逐渐变大.岩石试件 A-3 的断面平整度较高,其沿钻孔区域断面倾斜程度较小,证明倒楔形切缝管的聚能效果相较于正楔形切缝管和平切形切缝管岩石试件更显著,且电爆冲击波的传播速度有所增加.

### 2.2.2 预切槽定向电爆后岩石内部断面形态

电爆后预切槽岩石试件内部破裂面形态如图 7 所示,岩石试件三钻孔位置切割预切槽,预切槽槽尖的应力强度因子远远大于非切槽部位,由于裂纹沿着岩石薄弱处扩展的原则,随着电爆冲击波的传播,应力在预切槽中间连线位置相互叠加,形成钻孔中心区域加强应力场,相邻预切槽间产生的应力波相互耦合叠加,形成径向组合冲击波面,



图6 爆后切缝管岩石试件内部破裂面形态。(a) A-1; (b) A-2; (c) A-3

Fig.6 Morphology of internal rupture surfaces of rock specimen of slit tube after explosion: (a) A-1; (b) A-2; (c) A-3



图 7 爆后预切槽岩石试件内部破裂面形态. (a) B-1; (b) B-2; (c) B-3

Fig.7 Morphology of internal fracture surfaces of precut groove rock specimens after explosion: (a) B-1; (b) B-2; (c) B-3

裂纹贯通中间钻孔区域后沿着切槽方向向试件两侧延伸, 最终岩石试件沿预切槽连线方向实现定向致裂贯通, 岩石试件内部破裂面平整度越高, 证明电爆冲击应力的冲击速度越快. 由图 7(a)可知, 当钻孔间距为 40 mm 时, 岩石试件 B-1 钻孔周围区域电爆后破裂面平整程度优于钻孔区域以外的岩石部分. 由于钻孔附近区域应力叠加, 冲击波传播速度快, 定向破裂效果明显, 其断面粗糙度较小. 钻孔附近区域以外, 应力叠加效果减弱, 岩石内部破裂面平整程度下降, 断面起伏度增加, 并且在两侧形成明显的斜向裂痕. 随着钻孔间距增加为 50 mm, 如图 7(b)所示, 预切槽岩石试件 B-2 内部破裂面的平整程度略优于钻孔间距为 40 mm 的预切槽岩石试件 B-1, 由于应力场的叠加, 其钻孔周围内部断裂面凹凸起伏程度弱于钻孔区域之外岩石. 当钻孔间距增加至 60 mm 时, 电爆后岩石试件 B-3 内部断裂面的平整程度较前两者增加, 断面起伏程度下降. 可以看出, 随着钻孔间距的不断增加, 三钻孔间的应力波冲击速度有所上升, 在叠加应力场作用下, 裂纹优先沿着预切槽连线方向扩展, 致使电爆后岩石试件内部断裂面的平整程度逐渐增加. 说明预切槽间距影响电爆致裂效果, 随着预切槽间距的增大, 应力波的传播速度加快.

### 2.3 不同定向形式下岩石定向致裂效果对比分析

上述实验现象表明, 预切槽岩石试件的定向破岩效果整体优于内嵌切缝管岩石试件. 由于预切槽改变了钻孔处的应力分布特征, 强化了多孔岩石在预切槽处的应力集中程度, 进而有效控制了裂纹的萌生位置, 影响裂纹扩展的动态行为; 由于沿预切槽方向裂纹尖端的动态应力强度因子大于非预切槽部位, 在电爆冲击波传播过程中, 引导裂纹优先向预切槽连线方向扩展, 使得预切槽岩石试件能够在预期断裂面处产生裂纹, 从而实现岩石试件的定向断裂效果. 预切槽岩石试件在岩石破碎过程中定向产生单一裂纹面的现象明显, 其内部破裂面的平整程度整体大于内嵌切缝管岩石试件. 对比钻孔间距为 50 mm 的预切槽岩石试

件 B-2 和切缝管岩石试件 A-1、A-2、A-3, 可以看出在钻孔间距相同时, 不同形式的定向控制电爆效果差异明显, 预切槽岩石试件 B-2 定向致裂效果明显优于切缝管岩石试件 A-1、A-2、A-3, 前者产生多余横向裂纹的数量少于后者, 且断面粗糙度明显更小, 说明在钻孔间距相同时, 预切槽的定向控制效果比切缝管更明显. 预切槽岩石试件中间距越小, 钻孔预切槽周围的应力集中效应越显著, 裂纹的定向效果越明显. 在内嵌切缝管岩石试件中倒楔形切缝管聚能效果显著, 在电爆过程中, 电爆冲击波在钻孔中不断累积、反射, 并快速从两侧切缝位置释放, 从而形成径向的组合冲击波面. 由于正楔形和平切形切缝管的切缝角度聚能效果较差, 使得切缝管对岩石破裂的定向控制力较差, 从而影响定向致裂效果.

## 3 不同定向形式下岩体等离子体电脉冲定向致裂数值模拟

高压电脉冲等离子体破岩试验在反映岩石内部电脉冲定向致裂方面存在一定局限性, 无法直观观察到电脉冲冲击波作用和定向裂纹的扩展过程. 采用有限元分析软件 LS-DYNA 对等离子体电脉冲荷载作用下岩体的定向破裂过程, 建立数值模型研究不同定向结构形式下等离子体电脉冲作用的定向贯通岩体效果, 并与实验室试验对比分析, 探究等离子体高压电脉冲作用下岩石定向致裂机理, 对比不同定向形式下冲击波对裂纹定向扩展的效果.

### 3.1 计算模型与参数设计

为模拟岩石爆破裂纹扩展和应力演化过程, 岩石材料模型选用 RHT(Riedel-Hiermaier-Thoma) 本构模型. 岩石与水介质间的流固耦合通过关键字 CONstrained\_LAGRANGE\_IN\_SOLID 实现<sup>[23]</sup>, 等效炸药和空气单元使用多物质 ALE(Arbitrary Lagrange-Euler method) 算法, 边界条件设定为自由边界. 等效炸药材料选用 HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 材料模型, 并通过 JW(Jones-Wilkins-Lee) 状态方



程<sup>[24]</sup>描述等效炸药的爆炸过程,炸药材料参数如表3所示.为模拟爆炸中水介质传递冲击波的过程,水域材料采用初始化材料NULL本构模型,并采用Gruneisen状态方程进行描述<sup>[25]</sup>,相关水域材料参数如表4所示.

等效炸药的爆炸过程为:

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

其中,  $P$  为爆炸过程中的压力;  $V$  为爆炸产物的相对体积;  $e$  为爆炸产物内能;  $E_0$  为爆炸产物的初始比内能;  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  均为材料输入参数.

Gruneisen 状态方程为:

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E_0 \quad (2)$$

其中,  $\rho_0$  为水域材料的密度;  $C$  为冲击波速度与质点速度变化曲线斜率;  $\mu = \rho / \rho_0 - 1$ ,  $\rho$  为炸药密度;  $\gamma_0$  为 Gruneisen 方程参数;  $\alpha$  为  $\mu$  和  $\gamma_0$  的一阶体积修正量;  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  为曲线斜率系数.

计算模型如图8(a)和(b)所示,其中岩石、切缝管和预切槽的尺寸与等离子体电脉冲定向致裂试验设置相同.第一组切缝管岩石模型中6个测点分别在距炮孔边缘间距为25 mm及50 mm处(即图8(c)中,  $L_1=25$  mm、 $L_2=50$  mm)布置.第二组预切槽岩石模型中沿预切槽连线方向布置测点,

其中 B-1 岩石试件 6 个测点分别沿距炮孔边缘间距 20 mm 及 40 mm 处布置, B-2 岩石试件 6 个测点分别沿距炮孔边缘间距 25 mm 及 50 mm 处布置, B-3 岩石试件 6 个测点分别沿距炮孔边缘间距 30 mm 及 60 mm 处布置.

### 3.2 模拟结果分析

#### 3.2.1 切缝管定向致裂岩体损伤云图分析

由图9可知,当时间  $t=20 \mu\text{s}$  时,爆炸冲击波开始沿切缝管两侧切缝传播,正楔形试件 A-1 中电爆能量优先从切缝处射出,在钻孔中间形成应力重叠区,但由于正楔形结构外切口大于内切口,其冲击波面的辐射范围逐渐变宽,两侧钻孔区域冲击波沿切缝处传递后呈发散状,因此在两侧钻孔处产生辐射状损伤区域;平切形试件 A-2 由于其切缝由内向外横截面积不变,其聚能效果相对于正楔形更显著,当冲击波传播至左右钻孔两侧时,受切缝引导作用,冲击波沿切缝方向发展,产生呈“一”字型的损伤区域,两侧钻孔处出现部分辐射状的损伤;倒楔形试件 A-3 切缝聚能效果较前两者显著,在钻孔中心区域应力波优先传播,且当应力波传播至左右钻孔两侧时,由于倒楔形结构聚能定向作用,使得两侧损伤沿切缝方向发展,两侧钻孔区域未出现非切缝方向的损伤.随着应力波继续传播,试件 A-1 中间钻孔两侧的损伤沿切缝方向继续发展,并且两侧钻孔损伤开始沿纵向发展,当冲击波传播至切缝管管外,其聚能定向效果减弱,损伤区域由切缝方向向四周不断扩展,

表3 炸药材料参数

Table 3 Explosive material parameters

Density of explosive, $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Detonating velocity, $D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$P/\text{GPa}$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	Initial specific internal energy, $e/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3})$
1500	7450	22	586	23.2	5.25	1.60	0.282	8.56

表4 水域材料参数

Table 4 Water body material parameters

$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$\gamma_0$	$E_0$
1000	0.148	2.599	-1.985	1.226	0.35	0

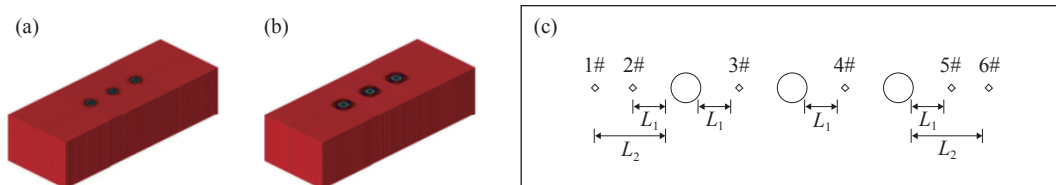


图8 定向电脉冲致裂岩石计算模型。(a)切缝管岩石模型;(b)预切槽岩石模型;(c)测点示意图

Fig.8 Calculation model for rock fracturing induced by directional electric pulse: (a) rock model of slit pipe; (b) precut groove rock model; (c) schematic of measuring points

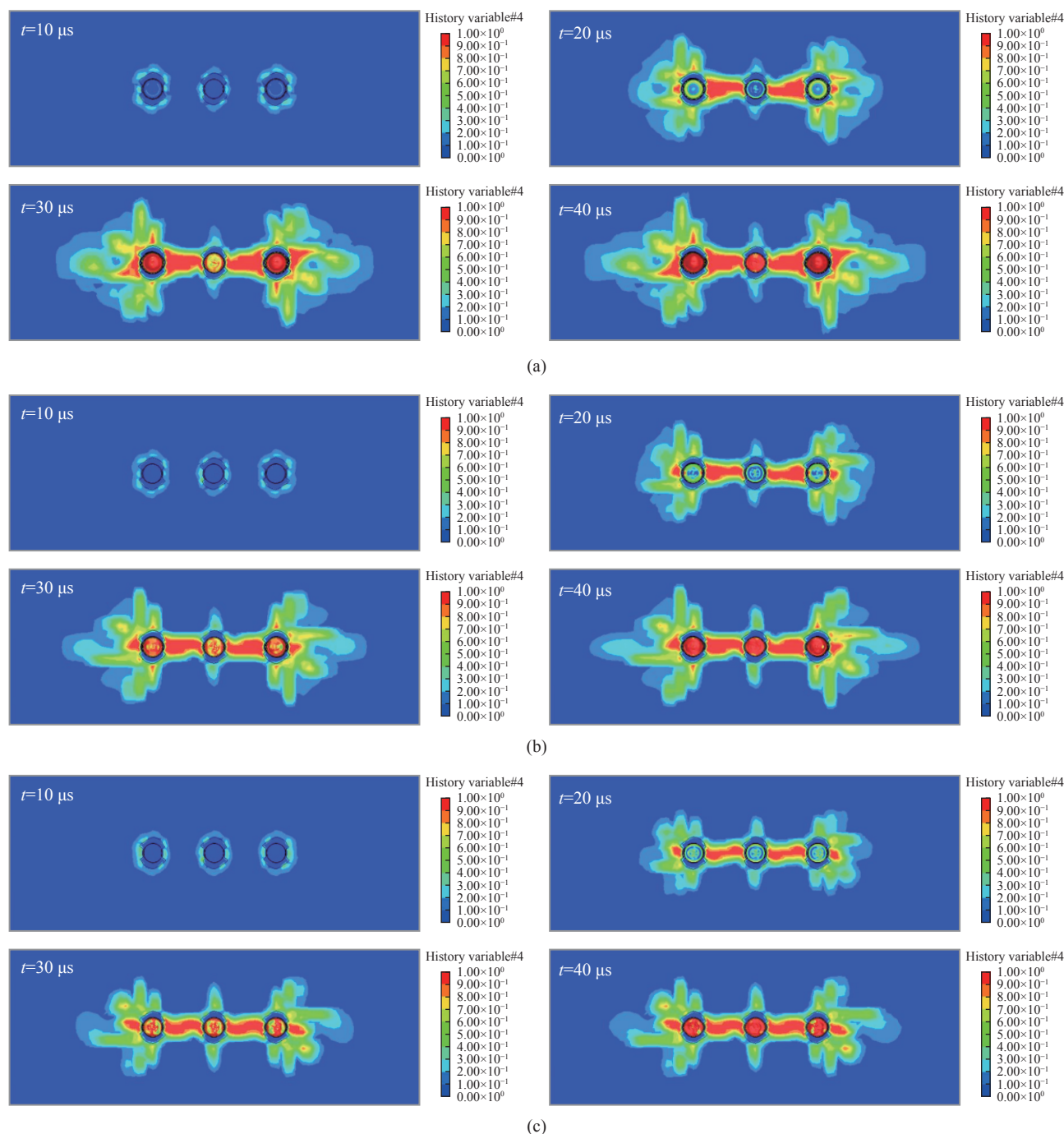


图 9 切缝管岩石电爆损伤演化云图. (a) A-1; (b) A-2; (c) A-3

Fig.9 Cloud map of rock electrical explosion damage evolution in slotted pipes: (a) A-1; (b) A-2; (c) A-3

钻孔中心位置处的损伤宽度明显增加; 试件 A-2 中间钻孔区域的损伤继续沿切缝方向发展, 两侧钻孔区域由于平切形切缝结构导向作用, 应力波呈辐射状向外侧发展, 且沿切缝方向其钻孔之间的损伤宽度增加, 损伤发展区域范围较试件 A-1 小; 试件 A-3 左右钻孔外侧损伤继续沿切缝方向发展, 损伤发展长度较前两者明显增加, 钻孔间损伤宽度较前两者增幅更小. 表明在三种切缝结构中, 倒楔形结构的切缝管具有更为显著的聚能效

果, 其损伤呈较为平直的条状结构, 损伤区域的定向发展效果显著, 其余定向效果依次为平切形和正楔形切缝管试件.

### 3.2.2 预切槽定向致裂岩体损伤云图分析

从图 10 可知, 随着预切槽间距增大, 岩石的定向损伤效果越不明显. 当  $t=20 \mu\text{s}$  时, 钻孔间距为 50 mm 时的纵向损伤发展范围比钻孔间距为 40 mm 时大, 两侧钻孔纵向损伤发展范围明显增大, 说明由于预切槽的导向作用, 随着爆炸冲击波传播, 钻



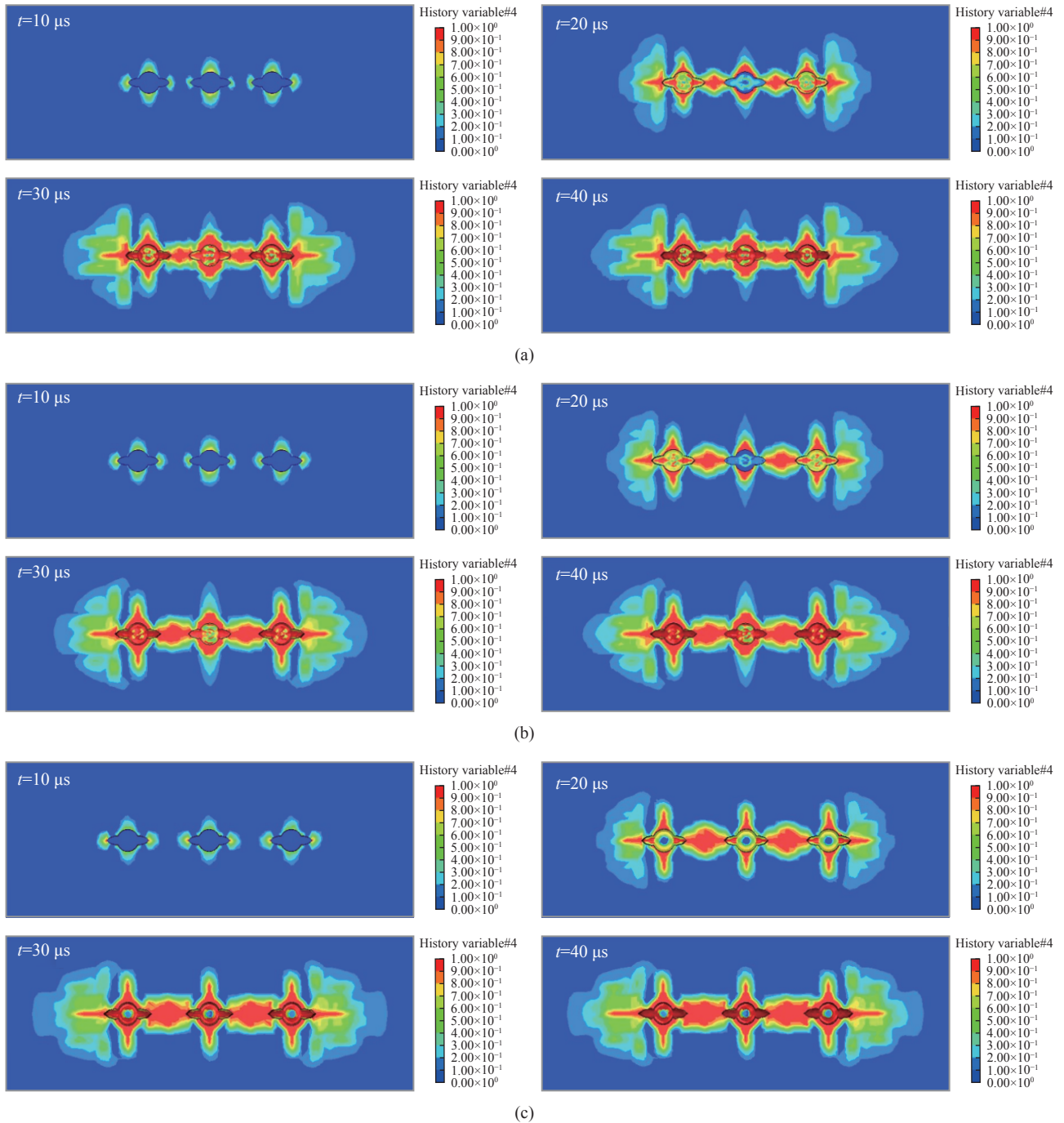


图 10 预切槽岩石电爆损伤演化云图。(a) B-1; (b) B-2; (c) B-3

Fig.10 Cloud map of damage evolution caused by precut groove rock electric explosion: (a) B-1; (b) B-2; (c) B-3

孔中间区域形成叠加应力场,使损伤优先沿预切槽方向定向发展.由于两侧钻孔区域预切槽的应力集中效果减弱,冲击波发展至钻孔两侧后沿垂直于预切槽方向继续传播,使损伤主要沿预切槽方向发展,同时出现损伤向钻孔四周发展;随着预切槽钻孔间距增大至 60 mm,由于预切槽之间的间距较大,三孔之间不能形成较为有效的应力叠加场,定向效果减弱,中间钻孔区域纵向损伤明显发展,两侧钻孔区域损伤沿预切槽方向和垂直预

切槽方向的初始发展速度基本一致.随着冲击波的传播,预切槽钻孔间距为 40 mm 的试件损伤继续沿预切槽方向发展,两侧钻孔区域纵向发展较前者范围更小;间距增大至 50 mm 时,三钻孔冲击波由孔壁沿预切槽方向传播,两侧钻孔定向效果减弱,垂直于预切槽方向的损伤继续发展,其发展趋势较沿预切槽方向较弱;间距增大至 60 mm 时,由于预切槽间距变大,三钻孔处损伤同时沿预切槽方向和垂直预切槽方向继续发展,并且其发

展趋势近乎一致. 说明随着钻孔预切槽间距的增大, 多钻孔中预切槽方向应力集中效应逐渐减弱, 损伤不再单一地沿预切槽定向发展, 岩石的定向致裂效果减弱.

### 3.2.3 不同定向形式下岩体致裂有效应力分析

图 11 为不同定向形式下不同测点的有效应力变化曲线, 其中测点 1#和测点 6#代表沿钻孔中心方向电爆远区位置, 测点 2#、3#、4#、5#代表沿钻孔中心方向电爆近区位置, 且测点 3#、4#位于钻孔中心应力重叠位置, 内嵌正楔形、平切形、倒楔形切缝管的岩石试件分别为 A-1、A-2、A-3, 预切槽间距为 40、50、60 mm 的预切槽岩石试件分别为 B-1、B-2、B-3. 对比不同测点的切缝管岩石试件可以观察到, 切缝管岩石试件 A-1、A-2、A-3 在电爆过程中不同测点的有效应力变化趋势相似, 但有效应力峰值差异较大, 以正楔形岩石试件 A-1 为例, 当  $t=8 \mu\text{s}$  时, 电爆冲击波突破切缝位置传播至测点 3#、4#处, 此时由于两侧应力场相互叠加, 钻孔之间应力短时间内快速增加, 应力峰值近似达到 0.005 GPa, 岩石试件沿切缝方向起裂; 电爆冲击波到达测点 2#、5#时, 由于切缝管外侧区域不再产生叠加应力场, 切缝管只发挥引导作用, 测点 2#、5#的应力峰值相对于测点 3#、4#有所下降, 应力峰值近似达到 0.004 GPa; 冲击波传播至电爆远处测点 1#、6#时, 沿切缝方向形成初始裂纹, 冲击波优先沿该方向继续发展, 此时应力峰值达到 0.003 GPa

左右, 裂纹沿着切缝方向继续发展形成定向裂纹, 最终沿预期方向贯通整个岩石试件. 可以发现, 切缝管岩石试件在不同测点位置的变化趋势近似一致, 应力峰值差异较大, 不同定向形式影响电爆冲击的应力集中程度及定向致裂效果.

对比同一测点位置处不同定向形式下电爆过程中有效应力变化趋势. 爆炸冲击波由三个钻孔开始传播, 当冲击波传播到电爆近区位置时, 同一测点位置的有效应力随着时间变化呈先增长后下降的趋势, 受钻孔中心叠合应力场影响发生应力绕射, 其余钻孔内应力波传播至测点时, 有效应力呈上升趋势并持续一段时间. 不同定向形式下, 爆炸近区的测点有效应力变化趋势一致性较高, 但有效应力峰值差异较大. 以测点 2#为例, 随着电爆冲击波沿着钻孔向外传播时, 正楔形切缝管岩石试件 A-1 的测点 2#在  $t=7 \mu\text{s}$  时达到有效应力峰值 0.043 GPa, 平切形切缝岩石试件 A-2 测点 2#在  $t=8 \mu\text{s}$  时达到有效应力峰值 0.047 GPa, 倒楔形切缝管有效应力峰值在  $t=10 \mu\text{s}$  时达到 0.063 GPa. 可见在同一测点处, 倒楔形结构的有效应力峰值比正楔形结构和平切形结构分别增加了 46.51% 和 9.30%. 且由于聚能效果差异, 当相邻钻孔冲击波传播至该测点时, 测点 2#处的有效应力呈上升趋势, 且增加幅度较小. 可见由于切缝的聚能效果差异, 倒楔形试件 A-3 由于内切口大、外切口小, 冲击波能量的传播速度较慢, 聚能效果明显优于正

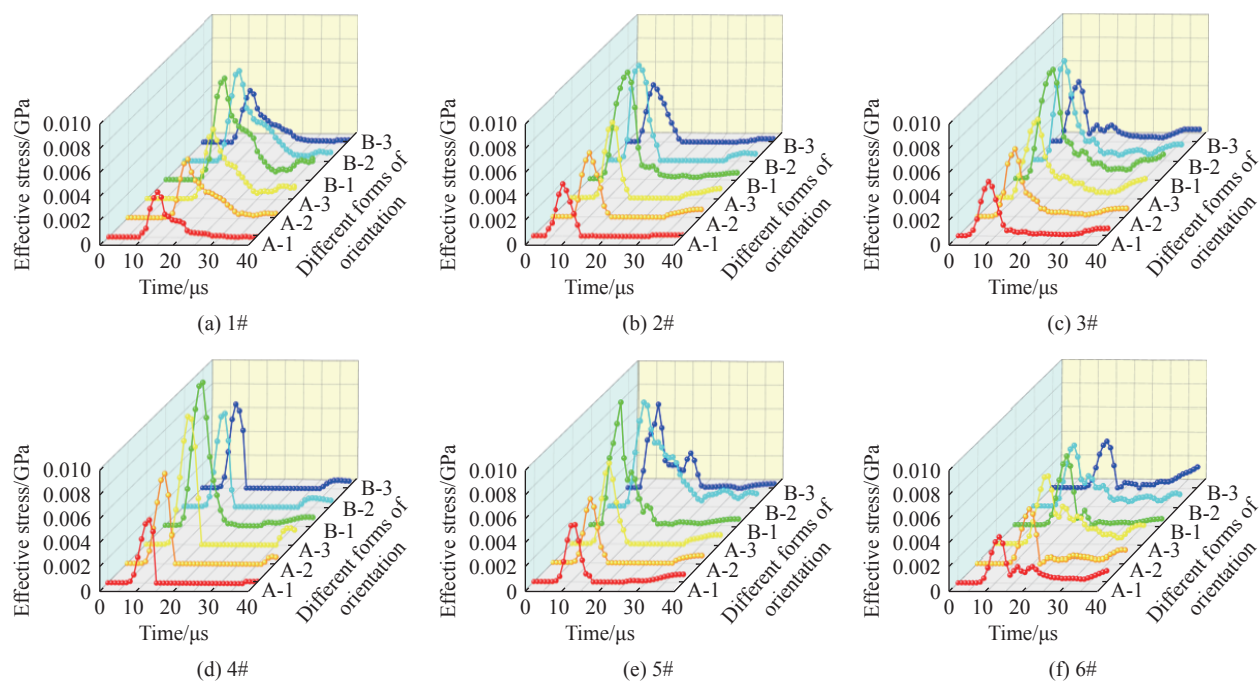


图 11 不同定向形式下测点有效应力变化曲线. (a) 1#; (b) 2#; (c) 3#; (d) 4#; (e) 5#; (f) 6#

Fig. 11 Effective stress variation curves of measuring points under different orientation forms: (a) 1#; (b) 2#; (c) 3#; (d) 4#; (e) 5#; (f) 6#

楔形切缝管和平切形切缝管. 预切槽岩石 B-1、B-2、B-3 试件中测点 2# 处的有效应力峰值随着预切槽间距的增大而减小, 电脉冲起爆后在钻孔内形成等离子体通道, 释放巨大能量, 由于预切槽的尖端应力较小, 致使电爆冲击波优先沿预切槽方向向钻孔两侧起爆, 冲击波发展至该测点时, 不同钻孔预切槽岩石 B-1、B-2、B-3 试件, 随着切槽间距的增大其有效应力峰值分别为 0.089 GPa、0.079 GPa 和 0.048 GPa, 同一测点处 B-2 试件和 B-3 试件有效应力峰值相较于 B-1 试件分别下降了 11.24%、46.07%. 可见由于钻孔间距减小, 在电爆冲击波传播过程中, 钻孔之间的叠加应力效果逐渐减弱, 有效应力峰值逐渐减小. 同时, 切缝管岩石试件的有效峰值整体大于预切槽岩石试件, 说明切缝管的聚能定向效果在一定程度上明显优于预切槽定向形式.

#### 4 结论

本文主要对不同定向形式下的岩石试件进行等离子体电脉冲定向致裂试验研究, 并通过数值模拟验证, 研究等离子体电脉冲定向破岩效果的机理, 主要得出以下结论:

(1) 倒楔形切缝管沿切缝方向的有效应力峰值较正楔形和平切形分别增加了 46.51% 和 9.30%. 倒楔形切缝管的切缝横截面积由内向外减小, 增强了电爆冲击波的定向侵彻能力, 导致其电爆产生的应力峰值最大, 岩石的定向致裂效果最为显著, 因此倒楔形结构相比于正楔形和平切形提高了切缝管聚能效果, 能够更有效地实现定向致裂贯通岩石.

(2) 不同预切槽间距岩石中, 间距为 40 mm 的预切槽岩石的定向裂纹相对于预期方向的偏离程度最小, 预切槽间距影响电爆冲击波的传播, 随着预切槽间距由 40 mm 增加至 50 mm 和 60 mm, 沿预切槽方向电爆有效应力峰值分别下降 11.24% 和 46.07%; 切槽间距较小时, 电爆冲击波之间的传播距离较近, 相互重叠形成较为完整的组合冲击波, 使等离子体电脉冲定向致裂效果显著增强.

(3) 预切槽岩石试件测点处的有效应力峰值明显高于切缝管岩石试件, 说明在等离子体电脉冲定向致裂中, 结合预切槽的定向致裂技术在一定程度上优于切缝管电脉冲定向技术, 预切槽等离子体电脉冲定向致裂技术能够充分利用预切槽聚能效果, 改变岩石裂纹尖端的应力强度, 使产生的冲击波优先沿预切槽方向进行叠加, 增强多钻

孔间应力峰值, 实现等离子体电脉冲技术沿预期方向定向断裂岩石.

#### 参 考 文 献

- [1] Liu J, Liu Z G, Gao K, et al. Experimental study and application of directional focused energy blasting in deep boreholes. *Chin J Rock Mech Eng*, 2014, 33(12): 2490  
(刘健, 刘泽功, 高魁, 等. 深孔定向聚能爆破增透机制模拟试验研究及现场应用. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2490)
- [2] Yu Y Q, Yu L W, Fan L D, et al. Application study of directional fracture controlled blasting technology in roadway excavation. *Blasting*, 2022, 39(1): 61  
(余永强, 余雳伟, 范利丹, 等. 定向断裂控制爆破技术在巷道掘进中应用研究. 爆破, 2022, 39(1): 61)
- [3] Zhang Y M, Qiu A C, Zhou H B, et al. Research progress in electrical explosion shockwave technology for developing fossil energy. *High Volt Eng*, 2016, 42(4): 1009  
(张永民, 邱爱慈, 周海滨, 等. 面向化石能源开发的电爆炸冲击波技术研究进展. 高电压技术, 2016, 42(4): 1009)
- [4] 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. *Coal Sci Technol*, 2023, 51(1): 224  
(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. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 224)
- [5] Gao Q C, Yang Y Q, Song H, et al. Directional fracture blasting technology of medium-long hole in rock roadway. *Coal Sci Technol*, 1995, 23(2): 13  
(高全臣, 杨永琦, 宋浩, 等. 岩巷中深孔定向断裂爆破技术. 煤炭科学技术, 1995, 23(2): 13)
- [6] Lu W, Zhang Z C. Determination of stress intensity factor and charge of blasthole on V shape blasting. *J Southwest Univ Sci Technol*, 1994, 9(1): 46  
(陆文, 张志呈. 切槽爆破断裂应力强度因子及其装药量的确定. 西南工学院学报, 1994, 9(1): 46)
- [7] Xiao Z X, Zhang Z C, Guo X B. Research on crack developing law of rock fracture controlled blasting. *Chin J Rock Mech Eng*, 2002, 21(4): 546  
(肖正学, 张志呈, 郭学彬. 断裂控制爆破裂纹发展规律的研究. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 546)
- [8] Shen T, Luo N, Xiang J X, et al. Numerical simulation on explosion mechanism of split-tube charge holders. *Explos Shock Waves*, 2018, 38(5): 1172  
(申涛, 罗宁, 向俊庠, 等. 切缝药包爆炸作用机理数值模拟. 爆炸与冲击, 2018, 38(5): 1172)
- [9] Cheng Y H, Jiang F X, Hu Z F, et al. Prevention and control of coal burst on gob-side entry in deep coal seam with fully mechanized sublevel caving mining. *Chin J Rock Mech Eng*, 2016, 35(Sup 1): 3000  
(成云海, 姜福兴, 胡兆锋, 等. 埋深千米综放采场沿空巷道冲击地压防治研究. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1): 3000)



- [10] Wang S F, Sun L C, Zhou Z L, et al. Development and prospect of non-blasting rock breakage theory and technology. *Chin J Nonferrous Met*, 2022, 32(12): 3883  
(王少锋, 孙立成, 周子龙, 等. 非爆破岩理论和技术发展与展望. 中国有色金属学报, 2022, 32(12): 3883)
- [11] Yang Y, Li C P, Ding H F. Modeling and parameter identification of high voltage pulse rock-breaking discharge circuit. *J Mech Eng*, 2022, 58(15): 243  
(杨扬, 李昌平, 丁华锋. 高压脉冲破岩放电回路建模及参数辨识. 机械工程学报, 2022, 58(15): 243)
- [12] Yan G L, Zhang F P, Hao H Z, et al. Experimental method and application of electrical explosion for breaking rock-like brittle materials. *J China Coal Soc*, 2021, 46(10): 3203  
(闫广亮, 张凤鹏, 郝红泽, 等. 电爆炸破碎岩石类脆性材料实验方法与应用. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3203)
- [13] Li H L, Qin Y, Zhang Y M, et al. Experimental study on the effect of strong repetitive pulse shockwave on the pore structure of fat coal. *J China Coal Soc*, 2015, 40(4): 915  
(李恒乐, 秦勇, 张永民, 等. 重复脉冲强冲击波对肥煤孔隙结构影响的实验研究. 煤炭学报, 2015, 40(4): 915)
- [14] Lin B Q, Zhang X L. Mechanism and research progress of plasma induced cracking and enhancement in low permeability and hard to extract coal seams. *J China Univ Min Technol*, 2023, 52(6): 1041  
(林柏泉, 张祥良. 低透难抽煤层等离子体致裂增透机制及研究进展. 中国矿业大学学报, 2023, 52(6): 1041)
- [15] Liu W J, Zhang Y J, Zhu X H, et al. Key factors influencing rock breaking efficiency of high voltage electric pulse. *Nat Gas Ind*, 2023, 43(10): 112  
(刘伟吉, 张有建, 祝效华, 等. 影响高压电脉冲破岩效率的关键因素分析. 天然气工业, 2023, 43(10): 112)
- [16] Huang S J, Liu Y, Lin F C, et al. Analysis of arc impedance characteristics in high-voltage electric pulse discharge rock destruction. *Trans China Electrotech Soc*, 2022, 37(19): 4978  
(黄仕杰, 刘毅, 林福昌, 等. 高压脉冲放电破岩电弧阻抗特性分析. 电工技术学报, 2022, 37(19): 4978)
- [17] Lu H Q, Nie B S, Chen X J, et al. Experimental research on coal crushing by using high-voltage electrical pulse based on electrohydraulic effect. *J Saf Sci Technol*, 2020, 16(10): 83  
(卢红奇, 聂百胜, 陈秀娟, 等. 基于液电效应的高压电脉冲对煤体致裂实验研究. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(10): 83)
- [18] Zhang H, Cai Z X, Chen A M, et al. Experiments and mechanism of rock breaking by the plasma shock wave generated by underwater discharge. *Acta Petrolei Sin*, 2020, 41(5): 615  
(张辉, 蔡志翔, 陈安明, 等. 液相放电等离子体破岩室内实验与破岩机理. 石油学报, 2020, 41(5): 615)
- [19] Kang J, Li C, Duan L, et al. An experimental and numerical study on the mechanism of high-voltage electro pulse rock-breaking. *Rock Mech Rock Eng*, 2023, 56(3): 2185
- [20] Yu Q, Zhang H, Yang R Z. Numerical simulation of the shock wave generated by electro-hydraulic effect based on LS-DYNA. *Explos Shock Waves*, 2022, 42(2): 128  
(余庆, 张辉, 杨睿智. 基于 LS-DYNA 的液电效应冲击波数值模拟. 爆炸与冲击, 2022, 42(2): 128)
- [21] Zhu X H, Luo Y X, Liu W J, et al. Electrical breakdown experiment and numerical simulation method of rock-breaking mechanism of plasma electric pulse drilling. *Acta Petrolei Sin*, 2020, 41(9): 1146  
(祝效华, 罗云旭, 刘伟吉, 等. 等离子体电脉冲钻井破岩机理的电击穿实验与数值模拟方法. 石油学报, 2020, 41(9): 1146)
- [22] Che L, Gu X H, Li H D. Numerical analysis and experimental research on hard rock fragmentation by high voltage pulse discharge. *Miner Eng*, 2021, 168: 106942
- [23] Huang Y P, Wang Z L, Yang H, et al. Determination of coupling range in the simulation of rock blasting using fluid-solid coupling algorithm. *J Hefei Univ Technol Nat Sci*, 2019, 42(12): 1672  
(黄佑鹏, 王志亮, 杨辉, 等. 流固耦合法模拟岩石爆破时耦合范围的确定. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(12): 1672)
- [24] Jiang P F, Tang D G, Long Y. Numerical analysis of influence of uncoupled explosive-charge structure on stress field in hard rocks. *Rock Soil Mech*, 2009, 30(1): 275  
(姜鹏飞, 唐德高, 龙源. 不耦合装药爆破对硬岩应力场影响的数值分析. 岩土力学, 2009, 30(1): 275)
- [25] Yan G B, Yu Y L. Numerical simulation of air and water medium decoupling charge blasting. *Eng Blasting*, 2009, 15(4): 13  
(闫国斌, 于亚伦. 空气与水介质不耦合装药爆破数值模拟. 工程爆破, 2009, 15(4): 13)