

含缺陷 PMMA 介质的定向断裂控制爆破试验研究

杨仁树^{1,2}, 丁晨曦¹, 杨立云¹, 王雁冰¹, 许鹏¹

(1. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 以 PMMA 为试验材料, 采用新型数字激光动态焦散线方法试验系统, 从试验角度将裂纹缺陷和空孔缺陷纳入同一研究体系, 进一步研究缺陷对定向断裂控制爆破裂纹扩展的影响。结果表明, 缺陷形态对爆生主裂纹扩展长度的影响并不明显。爆生主裂纹的扩展分为 2 个阶段, I 阶段(0~120 μs): 爆生主裂纹的扩展速度和尖端动态应力强度因子均迅速减小; II 阶段(120 μs~止裂): 从缺陷处反射的应力波对裂纹尖端的作用效应逐渐明显, 加强了裂纹尖端的能量积聚和应力集中, 使得速度和动态应力强度因子均有较大程度的跃升; 随着试件缺陷两侧曲率的增加, II 阶段的爆生主裂纹速度峰值和动态应力强度因子峰值均逐渐减小。

关键词: 爆破工程; 定向断裂; 控制爆破; 爆生主裂纹; 动态应力强度因子

中图分类号: TD 235

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2017)03 - 0690 - 07

Experimental study on controlled directional fracture blasting on PMMA mediums with flaws

YANG Renshu^{1,2}, DING Chenxi¹, YANG Liyun¹, WANG Yanbing¹, XU Peng¹

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

2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The crack flaws and empty hole flaws were set in a single experiment using the experimental material of PMMA and the new system of digital laser dynamic caustics so that the effects of flaws on the crack propagation in the controlled directional fracture blasting were studied. The results show that the forms of flaws have little effect on the length of blasting induced main cracks. The propagation of main cracks have two stages. In stage I(0 - 120 μs), the propagation velocity and stress intensity factor at crack tip decrease rapidly. In stage II(120 μs - crack arrest), the effects on crack tips caused by stress wave reflected from flaws are more significant, the energy accumulation and stress concentration of crack tips are enhanced, and the velocity and dynamic stress intensity factor increase to a great extent. The peak velocity and peak dynamic stress intensity factor of blasting induced main crack decrease gradually with the curvature increasing of flaw sides during the stage II.

Key words: blasting engineering; directional fracture; controlled blasting; blasting induced main crack; dynamic stress intensity factor

收稿日期: 2016 - 04 - 05; 修回日期: 2016 - 06 - 01

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2016YFC0600903); 国家自然科学基金资助项目(51404273); 高等学校学科创新引智计划项目(B14006)

Supported by the National Key Basic Research and Development Program of China(973 Program)(Grant No. 2016YFC0600903), National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51404273) and the Discipline Innovative Engineering Plan(Grant No. B14006)

作者简介: 杨仁树(1963 -), 男, 1986年毕业于淮南矿业学院采矿专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土工程、矿建工程方面的教学与研究工作。E-mail: yrs@cumtb.edu.cn. 通讯作者: 丁晨曦(1991 -), 男, 现为博士研究生。E-mail: dingcx91@sina.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0334

1 引言

近年来, 定向断裂控制爆破技术在巷道掘进和矿山开采中应用十分广泛。总的来看, 要控制岩石沿特定的方向产生破裂, 采用的方法主要有两大类: 一是控制炮孔形状, 如采用切槽炮孔^[1]; 二是调整装药结构, 如采用切缝药包^[2-3]。围绕定向断裂控制爆破的起裂机理和定向断裂效果, 许多学者进行了深入研究, 其中, 宗琦^[4]应用岩石断裂力学理论和爆生气体膨胀准静压理论, 建立了岩石中炮孔不耦合装药孔壁预切槽爆破时的脆性断裂力学模型; 肖正学等^[5]通过理论分析, 详细讨论了“V”型切槽在冲击波的动态压力和爆轰气体的准静态压力作用下所产生的力学效应; 李清等^[6]利用动态焦散线试验验证当切槽角为 60° 时获得的定向断裂效果最好, 给工程实践提供了理论依据; S. H. Cho 等^[7]结合模型试验和数值模拟方法证实了炮孔上的切槽具有明显的导向作用并且有利于形成平整的断裂面; 杨仁树等^[8]运用高速激光纹影仪研究了切缝药包爆炸波动机理, 证明了切缝药包垂直切缝方向和药包端部的爆炸波的传播是切缝方向爆炸波动绕流的结果; 罗勇和沈兆武^[9]对切缝药包在岩石定向断裂爆破中的切缝产生及裂纹起裂和扩展进行了一定的研究, 结果表明切缝管能使爆炸后的能量有方向性地集中, 裂纹的定向断裂控制效果良好。

工程岩体中裂隙和孔洞的存在往往是不可避免的, 这些缺陷的存在会显著影响定向断裂控制爆破的成形效果。然而, 关于介质内部缺陷对定向断裂控制爆破裂纹扩展的影响研究并不多见, 岳中文等^[10]研究了定向断裂控制爆破中裂隙对爆生裂纹扩展的阻断, 并分析了裂隙倾角等因素的影响效应; 岳中文等^[11-12]研究了介质中空孔尺寸对切槽爆破产生的爆生裂纹扩展的影响, 并验证了空孔具有明显的导向作用。介质内部缺陷主要有裂纹缺陷和空孔缺陷两种, 一定意义上来说, 曲率是建立裂纹缺陷和空孔缺陷之间联系的物理量, 空孔缺陷曲率为有限制, 裂纹缺陷曲率远大于空孔缺陷的, 理想裂纹的曲率趋于无穷大。基于此, 从试验角度将裂纹缺陷和空孔缺陷纳入同一研究体系, 进一步研究缺陷对定向断裂控制爆破裂纹扩展影响及缺陷自身动态响应特征。

2 试验系统与测试方法

2.1 试验系统

该试验所采用的是新型数字激光动态焦散线方法试验系统(见图 1^[13]), 试验系统主要由激光器、扩束镜、加载架、场镜和高速相机组成, 其中高速相机能够将爆破过程全部记录, 在此基础上进行试验的后期处理和分析。试验中, 将高速相机的拍摄频率设置为 150 000 fps, 即每秒钟拍摄 150 000 幅照片, 相邻 2 张照片之间的时间间隔为 6.67 μs。

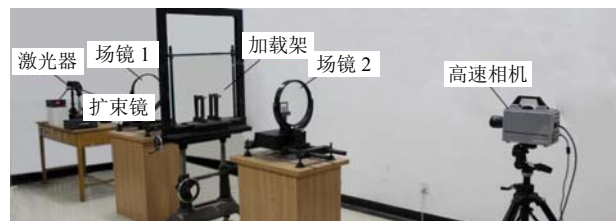


图 1 新型数字激光动态焦散线方法试验系统^[13]

Fig.1 The new system of digital laser dynamic caustics^[13]

2.2 测试方法

该试验是基于透射式动态焦散线方法^[14]进行的, 通过对裂纹尖端焦散斑形态的观测, 可以获得裂纹尖端瞬时的受力状态(受拉、受剪), 并且可以准确获得扩展裂纹尖端的动态应力强度因子值。裂纹尖端的动态应力强度因子的计算式^[14-15]为

$$K_I^d = \frac{2\sqrt{2\pi}F(v)}{3z_0d_{\text{eff}}cg^{5/2}}D_{\text{max}}^{5/2} \quad (1)$$

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

式中: D_{max} 为裂纹尖端焦散斑的最大直径; z_0 为参考平面到试件的距离, 取 $z_0 = 1 \text{ m}$; d_{eff} 为试件的厚度, 取 $d_{\text{eff}} = 0.005 \text{ m}$; $F(v)$ 动态荷载作用下的调节因子, 取 $F(v) = 1$; c 为应力光学常数, 取 $c = 1.08 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$; g 为数值因子, 取 $g = 3.17$; μ 为应力强度因子比值。由此可知, 对于一个特定的试验, K_I^d 由焦散斑最大直径 D_{max} 确定, K_{II}^d 由 μ 和 K_I^d 共同确定。

焦散斑中心为裂纹尖端所处位置, 因此根据高速相机所拍摄的焦散照片可以获得各瞬时时刻的焦散斑位置, 由于相邻 2 张焦散照片之间的时间间隔极短(6.67 μs), 可将相邻 2 张照片的裂纹平均速度视为该时刻裂纹扩展的瞬时速度。裂纹瞬时速度的计算式为

$$v \approx \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (3)$$

式中： v 为裂纹瞬时速度； Δs 为相邻焦散照片的裂纹尖端位移差值； Δt 为相邻焦散照片的时间差值，取 $\Delta t = 6.67 \mu s$ 。

3 试验描述

该试验以有机玻璃(PMMA)为材料，H. K. Kutter等^[16-17]通过试验论证了有机玻璃具有和脆性岩石相似的动态断裂特性。有机玻璃的动态力学参数为：膨胀波波速 $C_p = 2\ 320\text{ m/s}$ ，剪切波波速 $C_s = 1\ 260\text{ m/s}$ ，动态弹性模量 $E_d = 6.1\text{ GN/m}^2$ ，动态泊松比 $\nu_d = 0.31$ 。如图2所示，试件的规格为 $400\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ ，炮孔半径为 2.5 mm ，切槽深度 1 mm 。前3组试件分别预制半长轴 $a = 4, 3, 1\text{ mm}$ 的椭圆形空孔缺陷，依次对应的试件编号为S1, S2, S3；第4组试件预制一条长为 $2a = 8\text{ mm}$ 的激光切缝，试件编号为S4。炮孔中心和缺陷中心的距离均为 60 mm ，炮孔深度为 5 mm ，叠氮化铅为起爆药，单孔装药量为 120 mg ，采用金属探针高压放电起爆。

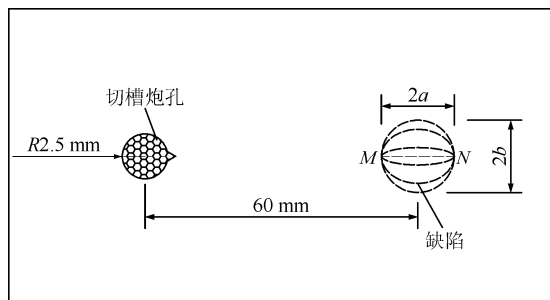


图2 试件示意图

Fig.2 Sketch map of the specimen

椭圆的长轴端点处的曲率为

$$\kappa = \frac{a}{b^2} \quad (4)$$

式中： κ 为长轴端点处的曲率， a 为半长轴长度， b 为半短轴长度。根据式(4)可得到试件S1, S2和S3缺陷两侧(M, N)的缺陷分别为 $25.0, 44.4, 400.0\text{ m}^{-1}$ 。试件S4的缺陷为一条激光切缝，两侧是以激光线度(0.3 mm)为直径的圆弧，曲率为 $4\ 444.4\text{ m}^{-1}$ ，远大于前3组试件的，可视为裂纹缺陷。随着椭圆端部曲率的逐渐增大，空孔缺陷逼近裂纹缺陷。

4 试验结果与分析

4.1 试件破坏形态与过程

图3为试件的破坏形态，通过对各试件破坏形态的观测和分析发现，炮孔起爆后，炮孔周边出现数条不同长度的爆生裂纹，其中爆生主裂纹基本沿切槽方向扩展，且较为平直，定向断裂效果良好。4组试件的爆生主裂纹长度依次为 $48, 51, 50, 48\text{ mm}$ 。可见，在该试验条件下定向断裂控制爆破的爆生主裂纹长度基本相同，为 50 mm 左右，缺陷形态对爆生主裂纹长度的影响并不明显。试件S1缺陷两侧未出现明显裂纹；试件S2缺陷右侧N处有微裂纹产生；试件S3缺陷两侧M, N处均有明显裂纹产生，长度约为 2 mm ；试件S4缺陷两侧M, N处均有明显裂纹产生，长度约为 3 mm 。可见，在该试验条件下，随着缺陷两侧M, N处曲率的增加，M, N处的裂纹起裂和扩展趋于明显。

图4为4组试件破坏过程中的动态焦散线照片及对应时间，由于炮孔堵塞装置对爆炸近区的遮掩，

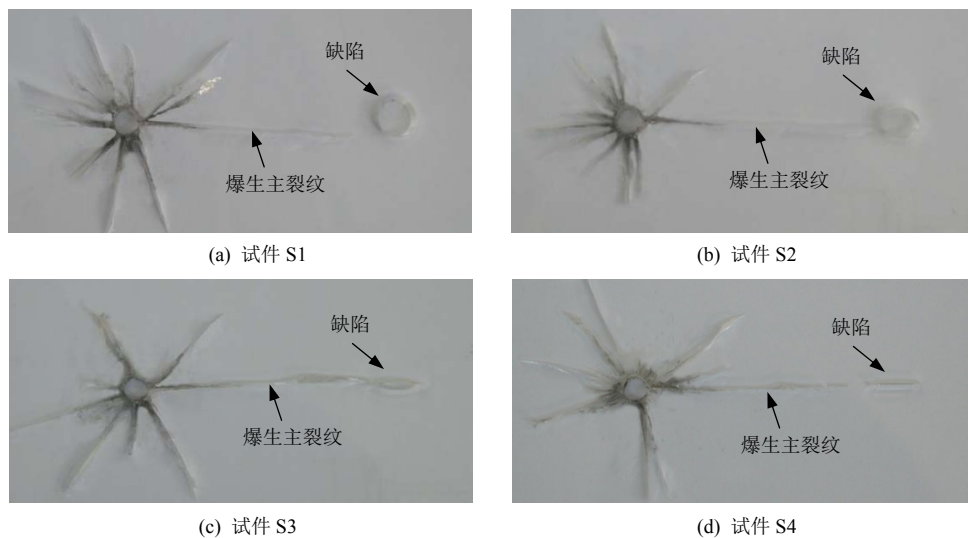


图3 试件破坏形态

Fig.3 Failure modes of specimens

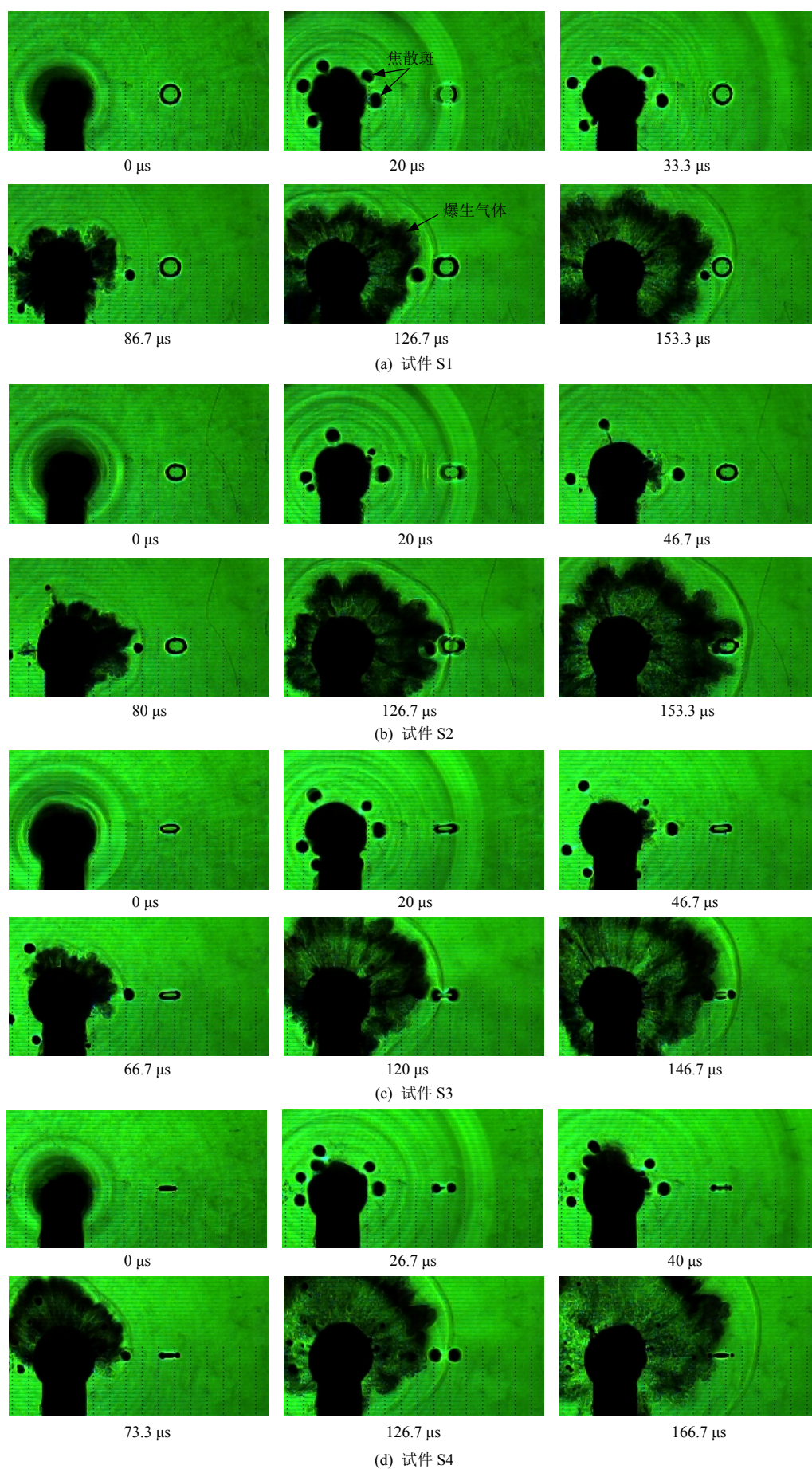


图 4 试件破坏的动态焦散线照片

Fig.4 Dynamic caustics of specimens during failure

高速相机拍摄的焦散照片中并未记录爆生裂纹起裂和最初扩展阶段的有效试验数据。当裂纹扩展离开遮掩区域进入高速相机的视场之后，所有裂纹扩展信息都能准确获得。

对于试件 S1，起爆后 20 μs，视野中出现完整的焦散斑，爆炸应力波传播至缺陷处；此后，爆炸应力波略过缺陷并继续扩散，这一过程中，爆生主裂纹尖端的焦散斑尺寸持续减小，裂纹尖端能量持续耗散；至 126.7 μs，爆生主裂纹尖端焦散斑尺寸急剧增加，缺陷两端出现“月牙”形散斑，说明裂纹尖端和缺陷均发生明显的能量积聚，这与爆生裂纹与缺陷的相互作用有关，在下文的裂纹扩展分析中将进一步阐述；随后，裂纹尖端焦散斑变小直至止裂，缺陷两端散斑消失。类似的，对于试件 S2，起爆后 20 μs，视野中出现完整的焦散斑，爆炸应力波传播至缺陷处；此后，焦散斑尺寸持续减小；至 126.7 μs，爆生主裂纹尖端焦散斑尺寸增加明显，缺陷两端出现“月牙”形散斑；随后，裂纹尖端焦散斑变小，至 153.3 μs，爆生主裂纹止裂，这一过程中，缺陷右侧 N 处有微裂纹产生。

对于试件 S3，爆生主裂纹扩展过程中裂纹尖端的焦散斑尺寸始终减小，直至 146.7 μs，爆生主裂纹止裂；120 μs 时刻，缺陷两侧产生焦散斑，能量积聚明显，并发生起裂和扩展。类似的，对于试件 S4，爆生主裂纹扩展过程中裂纹尖端的焦散斑尺寸始终减小，直至 166.7 μs 止裂；缺陷两侧产生焦散斑时间较早，26.7 μs 时刻，缺陷两侧发生明显应力集中，随后缺陷两侧焦散斑逐渐变小；126.7 μs 时刻，缺陷两侧焦散斑突然变大，M、N 处发生起裂并扩展，随后焦散斑逐渐变小直至消失。

总体来看，爆生主裂纹和缺陷两侧裂纹的起裂、扩展过程中，裂纹尖端焦散斑的形状为明显的 I 型形态，因此，试件的破坏以 I 型拉伸破坏为主。

4.2 爆生主裂纹的裂纹扩展分析

图 5 为 4 组试件的爆生主裂纹扩展速度与时间的关系图像，根据对图像数值的分析，以 120 μs 时刻为分界，结合裂纹扩展的焦散线照片，该时刻对应的裂纹尖端距离缺陷中心位置约为 12 mm，据此将速度的变化过程分为 2 个阶段，其中 0~120 μs 为 I 阶段，120 μs~止裂为 II 阶段。可以发现，爆生主裂纹扩展在 I 阶段时，4 组试件的速度变化趋势基本一致，裂纹起裂时的速度最大，在测算的范围内，最大速度为 450 m/s 左右，随后，速度迅速减小，这一阶段的速度 - 时间图像呈现为“外凸”

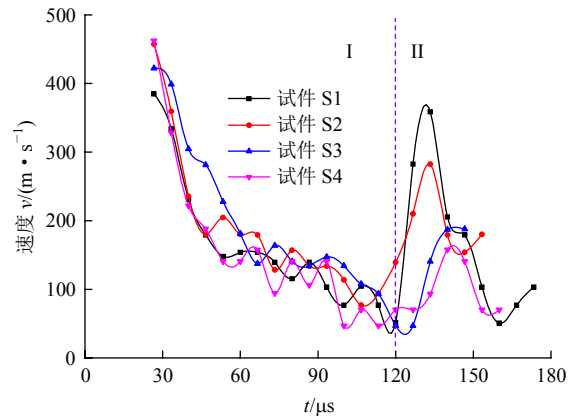


图 5 爆生主裂纹扩展速度 - 时间关系

Fig.5 Relation between velocity of blast induced main crack varied and time

形，速度下降逐渐变缓。由此可见，缺陷形态对 I 阶段爆生主裂纹的扩展没有明显影响。

120 μs 以后，爆生主裂纹扩展进入 II 阶段，速度迅速增加并达到 II 阶段的峰值，表 1 所示为该阶段 4 组试件的爆生主裂纹速度峰值，可以发现，从试件 S1~S4，随着缺陷两侧曲率的增加，爆生主裂纹的峰值速度逐渐减小。随后速度又迅速减小，趋于止裂。

表 1 各试件爆生主裂纹 II 阶段的速度峰值

Table 1 The peak velocities of blast induced main cracks in specimens during stage II

试件编号	速度峰值/(m · s ⁻¹)
S1	358.6
S2	282.4
S3	187.8
S4	157.8

图 6 所示为 4 组试件的爆生裂纹尖端动态应力强度因子与时间的关系图像，可以发现，爆生主裂纹尖端的动态应力强度因子 - 时间的变化趋势和上文中速度 - 时间的变化趋势有些类似。在 I 阶段，4 组试件裂纹尖端动态应力强度因子变化呈现较高的一致性，起裂后，动态应力强度因子值达到最大，在测算范围内的最大动态应力强度因子值为 0.8 MN/m^{3/2} 左右。试件 S3、S4 爆生主裂纹尖端的动态应力强度因子始终减小直至止裂；试件 S1、S2 爆生主裂纹尖端的动态应力强度因子在 I 阶段一直减小，120 μs 后，动态应力强度因子值迅速增加并达到 II 阶段的峰值，试件 S1、S2 的 II 阶段峰值分别为 0.67、0.46 MN/m^{3/2}；随后动态应力强度因子震荡减小至止裂。

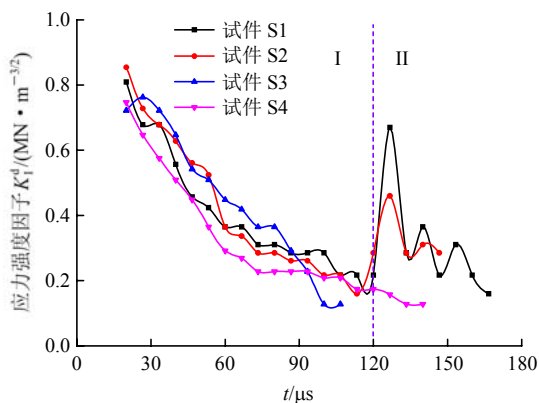


图 6 爆生主裂纹动态应力强度因子 - 时间关系

Fig.6 Relation between dynamic stress intensity factors of blast induced main cracks varied and time

综合对各试件爆生主裂纹的裂纹扩展分析, 可以发现爆生主裂纹的速度和动态应力强度因子随时间的变化呈现较高的一致性。缺陷对爆生主裂纹的扩展速度和裂纹尖端动态应力强度因子在 I 阶段的变化没有显著影响; 当爆生主裂纹逐渐靠近缺陷进入 II 阶段, 从缺陷处反射的应力波对裂纹尖端的作用效应逐渐显现, 加强了裂纹尖端的能量积聚和应力集中, 使得速度和动态应力强度因子均有较大程度的跃升。从试件 S1~S4, 随着缺陷两侧曲率的增加, 缺陷迎爆侧的有效反射面积是递减的, 使得反射应力波对爆生主裂纹的作用效应递减, 进而造成 II 阶段的峰值速度和动态应力强度因子逐渐减小。对于试件 S3, S4 的爆生主裂纹尖端动态应力强度因子在 II 阶段并没有发生跃升的原因可能是由于缺陷两侧曲率过小, 反射应力波对裂纹尖端的作用微弱, 不足以形成明显的应力集中。

4.3 缺陷处的应力分析

试验过程中, 试件 S1, S2 的缺陷处未发生过明显的应力集中, 试件 S3, S4 在 II 阶段有较为明显的应力集中产生, 并有起裂扩展的趋势。试件 S3, S4 缺陷两侧 M, N 处(见图 2)的应力变化基本一致, 取 N 处的应力强度因子 - 时间关系进行分析。如图 7 所示, 试件 S3, S4 缺陷 N 处的应力强度因子变化趋势基本一致; II 阶段初始, 试件 S3, S4 缺陷 N 处的应力强度因子均达到最大值, 试件 S3, S4 的分别为 0.45, 0.54 MN/m^{3/2}。随后, 应力强度因子迅速减小至 0; 140 μs 后, 应力强度因子又有所增长, 并呈现出波动变化的态势。

缺陷 N 处应力强度因子峰值时间对应于爆生主裂纹在 II 阶段裂纹扩展速度和应力强度因子的峰值时间, 均为 120 μs 左右。这是爆炸应力波与爆生主裂纹、缺陷相互作用的结果。

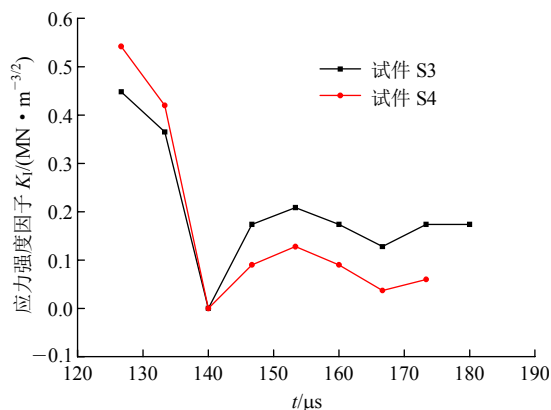


图 7 缺陷 N 处的 II 阶段应力强度因子 - 时间关系

Fig.7 Relation between stress intensity factor varied and time of flaw N during stage II

5 结 论

(1) 在该试验条件下, 缺陷形态对爆生主裂纹长度的影响并不明显; 随着缺陷两侧 M, N 处曲率的增加, M, N 处的裂纹起裂和扩展趋于明显。

(2) 爆生主裂纹和缺陷两侧裂纹的起裂、扩展过程中, 裂纹尖端焦散斑的形状为明显的 I 型形态, 试件的破坏以 I 型拉伸破坏。

(3) 爆生主裂纹的扩展分为 2 个阶段。I 阶段(0~120 μs): 爆生主裂纹的扩展速度和尖端动态应力强度因子均迅速减小。II 阶段(120 μs~止裂): 从缺陷处反射的应力波对裂纹尖端的作用效应逐渐显现, 加强了裂纹尖端的能量积聚和应力集中, 使得速度和动态应力强度因子均有较大程度的跃升; 从试件 S1~S4, 随着缺陷两侧曲率的增加, 缺陷迎爆侧的有效反射面积是递减的, 使得反射应力波对爆生主裂纹的作用效应递减, 进而造成 II 阶段速度峰值和动态应力强度因子峰值逐渐减小。

(4) 缺陷 N 处应力强度因子峰值时间对应于爆生主裂纹在 II 阶段裂纹扩展速度和应力强度因子的峰值时间, 均为 120 μs 左右。这是爆炸应力波与爆生主裂纹、缺陷相互作用的结果。

参考文献(References):

[1] 郑周练, 陈山林, 叶晓明. 切槽爆破研究的历史及现状[J]. 重庆建筑大学学报, 2001, 23(6): 103 - 108.(ZHENG Zhoulian, CHEN Shanlin, YE Xiaoming. Development of investigation on the v-notched rock blasting[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2001, 23(6): 103 - 108.(in Chinese))

- [2] FOURNEY W L, DALLY J W, HOLLOWAY D C. Controlled blasting with ligamented charge holders[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 1978, 15(3): 121 - 129.
- [3] FOURNEY W L, BARKER D B, HOLLOWAY D C. Model studies of well stimulation using propellant charges[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 1983, 20(2): 91 - 101.
- [4] 宗琦. 岩石炮孔预切槽爆破断裂成缝机理研究[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(1): 30 - 33.(ZONG Qi. Investigations into mechanism of crack formation for grooved hole-well blasting[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(1): 30 - 33.(in Chinese))
- [5] 肖正学, 郭学彬, 张志呈, 等. 切槽爆破在爆炸冲击波和爆轰气体作用下的力学效应[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(6): 650 - 654.(XIAO Zhengxue, GUO Xuebin, ZHANG Zhicheng, et al. The mechanical effect of notched blasting under the explosive shock wave and explosive gas[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(6): 650 - 654.(in Chinese))
- [6] 李清, 王平虎, 杨仁树, 等. 切槽孔爆破动态力学特征的动焦散线实验[J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(4): 413 - 418.(LI Qing, WANG Pinghu, YANG Renshu, et al. Experimental investigation on dynamic mechanical behaviors of cracks induced by V-notch borehole blasting with dynamic caustics[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(4): 413 - 418.(in Chinese))
- [7] CHO S H, NAKAMURA Y, MOHANTY B. Numerical study of fracture plane control in laboratory-scale blasting[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(13): 3 966 - 3 984.
- [8] 杨仁树, 高祥涛, 陈程, 等. 切缝药包爆炸波传播机制实验研究[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(8): 1 434 - 1 440.(YANG Renshu, GAO Xiangtao, CHEN Cheng, et al. Experimental study on blast wave propagation mechanics of split-tube charge holders[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1 434 - 1 440.(in Chinese))
- [9] 罗勇, 沈兆武. 切缝药包岩石定向断裂爆破的研究[J]. *振动与冲击*, 2006, 25(4): 155 - 158.(LUO Yong, SHEN Zhaowu. Study on the directional fracture controlled Blasting with slit-charge in rock[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2006, 25(4): 155 - 158.(in Chinese))
- [10] 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 Zhongwen, GUO Yang, XU Peng, et al. Experimental study on the mechanism of blast-induced crack propagation under directional fracture controlled blasting[J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(2): 50 - 58.(in Chinese))
- [11] 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 Zhongwen, GUO Yang, XU Peng, et al. Analysis of empty hole effect in directional fracture controlled blasting[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(3): 304 - 311.(in Chinese))
- [12] 岳中文, 郭洋, 王煦. 切槽孔爆炸载荷下裂纹扩展行为的实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(10): 2 018 - 2 026.(YUE Zhongwen, GUO Yang, WANG Xu. Experimental study of crack propagation under blasting load in notched boreholes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(10): 2 018 - 2 026.(in Chinese))
- [13] 杨立云, 杨仁树, 许鹏. 新型数字激光动态焦散线实验系统及其应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(2): 188 - 194.(YANG Liyun, YANG Renshu, XU Peng. Caustics method combined with laser and digital high-speed camera and its applications[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2013, 42(2): 188 - 194.(in Chinese))
- [14] TAKAHASHI K, ARAKAWA K. Dependence of crack acceleration on the dynamic stress-intensity factor in polymers[J]. *Experimental Mechanics*, 1987, 27(2): 195 - 199.
- [15] LAGARDE A. Static and dynamic photoelasticity and caustics recent developments[M]. New York: Springer-Verlag, 1987: 407 - 522.
- [16] KUTTER H K, FAIRHURST C. On the fracture process in blasting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 1971, 8(3): 181 - 202.
- [17] ROSSMANITH H P, DAEHNKE A, NASMILLNER R E K, et al. Fracture mechanics applications to drilling and blasting[J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1997, 20(11): 1 617 - 1 636.