

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.08.003

爆炸荷载下不对称 Y 型裂纹扩展规律的试验研究

杨仁树¹, 苏 洪¹, 龚 悦², 陈 程¹

(1. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 安徽理工大学 化学与工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 采用爆炸加载透射式动焦散测试系统, 研究了爆炸荷载下不对称 Y 型裂纹扩展的动态行为。试验结果表明: 爆炸荷载下两相向运动裂纹在相遇前裂纹尖端奇异场相互影响, 焦散斑扭曲, 裂纹尖端应力场改变, 相遇前沿偏离水平方向相向扩展, 偏离角度逐渐增大, 相遇后偏离角度逐渐减小并朝对方已有裂纹方向扩展; 两分支裂纹相交于主裂纹, 翼裂纹主要从与入射应力波夹角较小和长度较长的分支裂纹起裂, 沿周向最大拉应力垂直方向扩展; 入射应力波夹角较小和长度较长的分支裂纹对入射应力波夹角较大和长度较短的分支裂纹扩展及其尖端应力强度因子有抑制作用; 分支裂纹尖端动态应力强度因子均值随分支裂纹与应力波夹角增大而减小, 分支翼裂纹扩展速度呈现振荡式变化规律。研究结果为实际工程中分析相互贯通裂纹的扩展规律提供了可靠依据。

关 键 词: Y 型裂纹; 爆炸荷载; 动焦散; 裂纹扩展; 动态应力强度因子

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017)08-2175-07

Study on the regularity of asymmetric Y-shaped cracks propagation under blast loading

YANG Ren-shu¹, SU Hong¹, GONG Yue², CHEN Cheng¹

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

2. School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui, 232001, China)

Abstract: Using a dynamic caustics blast loading system, we studied dynamic behavior of asymmetric Y-shaped cracks propagation under blasting loading. It was found that before two opposite moving cracks encountering, their tip singular fields affected each other, the shape of caustics spots distorted and stress fields of the crack tip changed. Moreover, two moving cracks propagated along the deviating horizontal direction, and the deviation angle gradually increased. However, after two opposite moving cracks encountering, the deviation angle gradually decreased, and two moving cracks propagated along the direction of the existing crack. It can be seen that two branched cracks intersected at the main crack, and the wing crack easily initiated from the branched crack with a smaller incident angle of stress wave and a longer length, and propagated along the vertical direction of the maximum tensile stress. However, this kind of branched crack may inhibit the propagation and the stress intensity factor of the branched crack with a larger incident angle and a shorter length. The average values of dynamic stress intensity factor of the branched crack decreased with the increase of the incident angle of stress wave. In addition, the propagation velocity of the branched wing crack presented oscillating change law. Therefore, the results provide a reliable basis for the analysis of crack propagation in practical engineering.

Keywords: Y-shaped cracks; blasting load; dynamic caustics; crack propagation; dynamic stress intensity factor

1 引 言

在爆破工程中, 被爆介质含有大量节理、裂隙、层理等缺陷, 这些缺陷会分叉和贯通, 表现出显著的非连续性、各向异性和不均匀性。爆破时缺陷介质对应力波传播和爆生裂纹扩展有显著影响, 严重影

响爆破效果。因此, 研究爆炸荷载下岩体节理裂隙动态力学性质和应力波传播规律一直是国内外学者关注的热点问题^[1-5]。Ing 等^[6]利用焦散线测试方法, 研究了在应力波载荷下扩展裂纹的相关解。Dally^[7]、岳中文^[8]和姚学峰^[9]等分别利用动光弹试验和动焦散试验, 研究了爆炸应力波与单一缺陷介

收稿日期: 2016-11-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 51274203, No. 51374210); 高等学校学科创新引智计划资助 (No. B14006)。

This work was supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (51274203, 51374210) and the Program of Introducing Talents of Discipline to Universities (B14006).

第一作者简介: 杨仁树, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: rengshuy@163.com

通讯作者: 苏洪, 男, 1987 年生, 博士, 主要从事爆破技术与应用方面的研究工作。E-mail: suhonggy2016@163.com

质的相互作用。Rossmanith^[10]和胡荣^[11]等研究了不同入射角度爆炸应力波和爆生裂纹的作用机制。杨仁树等^[12]利用动焦散试验得到了含不同大小圆孔缺陷介质裂纹扩展的全过程。朱哲明等^[13]应用数值模拟方法,研究了爆炸荷载下含水和微小孔洞岩体的动态破坏过程。肖同社等^[14]研究了含不同夹角节理面的缺陷介质在爆炸荷载下的动态响应问题。唐世斌等^[15]进行了 T 应力对岩石裂纹扩展路径及起裂强度的影响研究。上述研究主要分析了爆炸荷载对单一缺陷(如单支裂纹)的影响,实际工程中节理裂隙往往相互贯通形成裂隙群,而从试验研究方面入手,考虑爆炸荷载对相互贯通裂纹扩展规律影响的研究较少。

本文正是基于此,将透射式动焦散试验系统应用到爆炸荷载对相互贯通裂纹(不对称 Y 型裂纹)扩展影响的研究中,探讨其影响机制,以期工程实践提供一定帮助。

2 试验原理及数据处理

2.1 试验原理和试验系统

试验原理^[16]如图 1 所示,试件受到拉应力 σ_0 作用,试件厚度减小,其折射率也随之改变。一束平行光线射入试样,平行光发生偏转,在与试件表面相距 Z_0 处的参考平面上会观察到光强分布不均的图像,称为焦散斑。

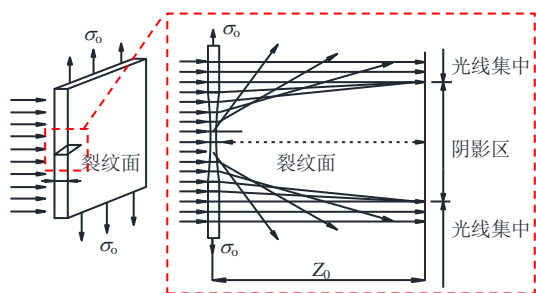


图 1 试验原理图

Fig.1 Diagram of experimental principle

试验系统采用中国矿业大学(北京)光测力学实验室新型数字激光动态焦散系统,如图 2 所示,当激光光源产生一束稳定的光源,通过扩束镜和透镜 1 后变成的平行光入射到受载试样后,将发生偏转,发生折射偏转的光束再由透镜 2 汇成点光源进入高速相机镜头由相机进行成像。

2.2 试验数据处理

2.2.1 裂纹长度、速度

由高速相机所拍摄的图片可得到裂纹尖端位移,



图 2 数字激光动态焦散系统

Fig.2 Experimental system of digital laser dynamic caustics

即裂纹长度 l 。为了减少数据误差,采用 7 次多项式近似拟合裂纹扩展长度 l 与时间 t 的变化关系^[16]。

$$l(t) = \sum_{i=0}^7 l_i t^i \quad (1)$$

因此,裂纹的扩展速度可由拟合曲线 $l(t)$ 的时间导数得到。

2.2.2 动态应力强度因子

对于动焦散试验系统,爆炸荷载下的裂纹尖端复合应力强度因子可表示为

$$K_I^d = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3g^{5/2}z_0c_id} D_{\max}^{5/2} \quad (2)$$

$$K_{II}^d = \mu K_I \quad (3)$$

式中: D_{\max} 为焦散斑最大直径; D_{\min} 为焦散斑最小直径; d 为试件的有效厚度; c_i 为应力光学常熟, $c_i = 0.88 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$; z_0 为参考平面到试件的距离, $z_0 = 1000 \text{ mm}$; g 为焦散线的数值因子,其值可根据 μ 来查表确定; μ 为应力强度因子比例系数,其值可根据 $(D_{\max} - D_{\min})/D_{\max}$ 查表确定; K_I^d 、 K_{II}^d 分别为动荷载作用下,复合型扩展裂纹尖端的 I 型、II 型应力强度因子。

3 试验描述

PMMA 有很好的透光性,被广泛地应用到光测力学试验中来研究材料断裂行为,因此,本试验采用 PMMA,规格为 $400 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,其动态力学参数如表 1 所示。炮孔直径为 6 mm ,单边切槽,切槽角度为 60° ,切槽深度为 1 mm 。试验爆炸加载的炸药为 $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$,药量为 190 mg 。考虑分支裂纹与入射应力波径向夹角和裂纹长度对裂纹动态断裂行为影响,设计了两类试验:①在离炮孔 40 mm 处预制 3 条长 20 mm 相交裂纹,主裂纹 B 水平,并与切槽轴线处于同一水平线,分支裂纹 D

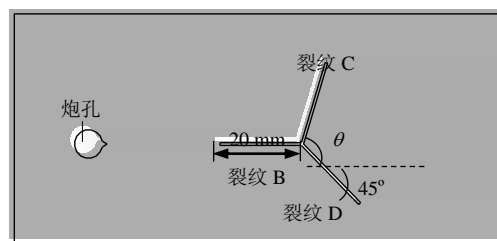
与入射应力波径向夹角为 45° , 分支裂纹 C 与入射应力波径向夹角 θ 分别为 15° 、 30° 、 60° 、 75° 、 90° , 如图 3(a)所示。②分支裂纹 C、D 与入射应力波径向夹角均为 45° , B、D 长为 20 mm, 只改变分支裂纹 C 长度为 10 mm, 如图 3(b)所示。裂纹宽度控制在 0.3 mm 以内。

表 1 PMMA 动态力学参数

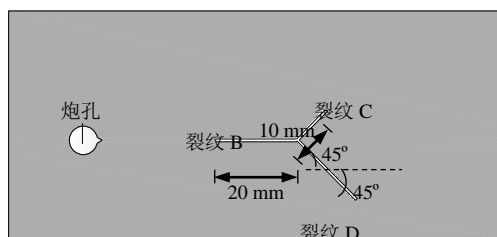
Table 1 Dynamic mechanical parameters of PMMA

E_d /(GN/m ²)	C_p /(km/s)	C_s /(km/s)	V_d	C_t /(m ² /N)
4.5	2.32	1.26	0.31	0.88×10^{-10}

注: E_d 为弹性模量, C_p 为纵波波速, C_s 为横波波速, V_d 为泊松比, C_t 为应力光线常数。



(a) 等长 Y 型裂纹模型



(b) 不等长 Y 型裂纹模型

图 3 试验模型示意图

Fig.3 Diagrams of experimental specimens

4 试验结果

图 4 为爆炸后模型裂纹扩展图。图 5 列举了部分模型动焦散图片。从图可以看出, 炸药爆炸后, 在切槽处形成主裂纹 A, 在 B 裂纹端部形成翼裂纹 B, 主裂纹 A 和翼裂纹 B 相向运动, 但其尖端之间没有直接贯通, 而是相遇前沿偏离水平方向相互避开, 然后朝对方裂纹方向扩展, 最终接近或贯通形成类似圆饼状区域。当预制分支裂纹 C 与入射应力波夹角 θ 为 15° 和 30° 时, 分支裂纹 C、D 端翼裂纹主要从 C 端起裂扩展。当预制分支裂纹 C 与入射应力波夹角 θ 为 60° 、 75° 、 90° 和预制分支裂纹 C 长度为 10 mm 时, C、D 端翼裂纹主要从 D 端起裂扩展。C、D 端翼裂纹并没有沿原裂纹面扩展, 而是沿最大环向拉应力垂直方向扩展。

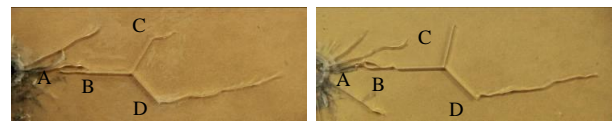
(a) $\theta=15^\circ$ (b) $\theta=30^\circ$ (c) $\theta=60^\circ$ (d) $\theta=75^\circ$ (e) $\theta=90^\circ$ (f) $c=10\text{ mm}$

图 4 不同模型预制裂纹扩展图

Fig.4 Propagation patterns of cracks with various models

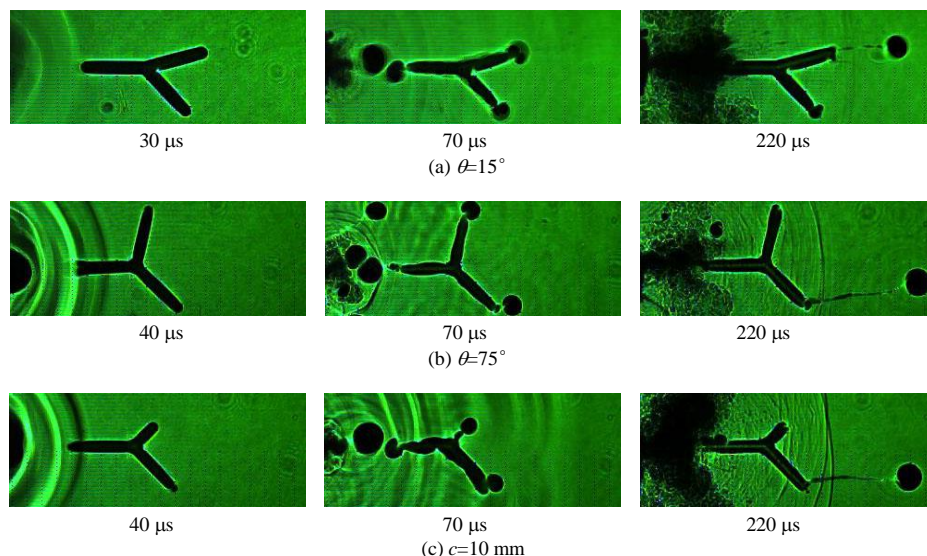


图 5 裂纹扩展动焦散图片

Fig.5 Photographs showing cracks propagation

5 裂纹扩展动态断裂行为分析

5.1 A、B 裂纹动态断裂行为分析

由于所有模型 A、B 裂纹动态断裂行为类似, 故只选取 $\theta = 15^\circ$ 模型分析。图 6、7 为 $\theta = 15^\circ$ 模型在爆炸荷载下 A、B 裂纹动态应力强度因子 K^d 和裂纹相遇前偏离角度 ω 随时间变化关系, 偏离角 ω 为 A、B 裂纹在扩展中偏离水平方向的角度。

5.1.1 A、B 裂纹动态应力强度因子变化规律

如图 6 所示, A、B 裂纹动态应力强度因子先上升达到极值后再降低。40 μs 时, 应力波传到 B 裂纹尖端, 产生应力集中, 70 μs 时, 焦散斑第 1 次达到最大, K_I^d 出现第 1 次峰值 0.809 $\text{MN}/\text{m}^{3/2}$ 。接着, 随着应变能耗散, K_I^d 减小。裂纹继续扩展, 由于自由面反射的应力波作用于裂纹尖端, 应变能累积, 90 μs 时 K_I^d 出现第 2 次峰值, 之后开始减小。 K_{II}^d 变化规律和 K_I^d 类似, 裂纹扩展过程大部分时间内 $K_I^d > K_{II}^d$, 说明应力波与裂纹尖端作用过程中 P 波起主要作用。但 A、B 两裂纹尖端相遇之前 50~80 μs 内 $K_{II}^d > K_I^d$, 通过焦散斑图片可以看出, A、B 两裂纹相遇前尖端焦散斑形状扭曲, 裂纹尖端应力场已经发生改变, 剪切波起主要作用, 所以 $K_{II}^d > K_I^d$, 这说明了当 A、B 裂纹尖端靠近时, 裂纹尖端应力奇异场互相影响, 从而改变对方裂纹尖端应力场。A 裂纹 K^d 变化规律与 B 裂纹类似。

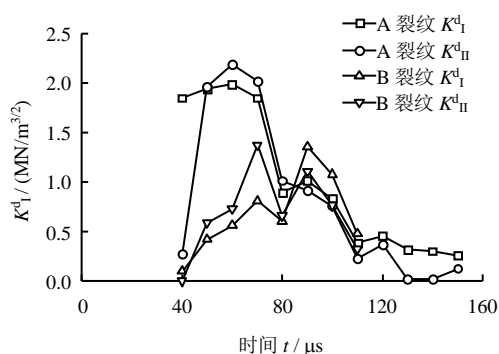


图 6 裂纹 A、B 尖端动态应力强度因子与时间关系
Fig.6 Relationships between dynamic stress intensity factors of cracks A and B and time

5.1.2 A、B 裂纹偏离角度分析

由图 7 可知, 爆炸荷载作用下产生的 A、B 裂纹相遇前沿偏离水平方向相向扩展, 并且随着时间增加偏离角度越来越大, 直至 80 μs 时, A、B 裂纹尖端相遇且偏离角度达到最大, A 裂纹最大偏离角度为 14.9° , B 裂纹最大偏离角度为 14.2° , 然后偏离角度逐渐减小并朝对方裂纹面方向继续扩展。

A、B 裂纹相遇前沿偏离水平方向相向扩展主要是因为两裂纹尖端靠近时应力奇异场会互相影响, 改变对方裂纹尖端应力场分布, 而裂纹尖端产生反射应力波也会改变对方裂纹尖端应力场, 继而改变最大主应力方向, 使裂纹相遇前的扩展方向发生改变。A、B 裂纹相遇后偏离角度逐渐减小是因为裂纹一般向含有自由面方向扩展, 达到快速、较易释放能量的目的, 而对方裂纹面则为己方裂纹扩展提供了自由面, 所以裂纹尖端相遇后, 朝对方裂纹面方向扩展, 偏离角度逐渐减小。Fender 等^[17]在研究金属材料断裂问题时也发现了类似现象。

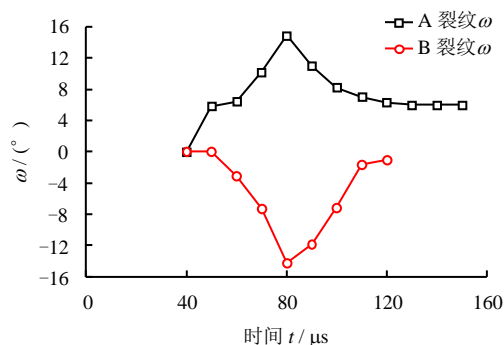


图 7 裂纹 A、B 偏离角度与时间关系
Fig.7 Relationships between the deviation angles of cracks A and B and time

5.2 C、D 裂纹动态断裂行为分析

图 8 为 C、D 裂纹 K_I^d 随时间变化关系, 图 8(a) $\theta = 15^\circ$ 与 $\theta = 30^\circ$ 规律类似, 图 8(b) $\theta = 90^\circ$ 与 $\theta = 60^\circ$ 、 75° 规律类似。

5.2.1 动态应力强度因子变化规律

由图 8 可以看出, C、D 裂纹 K_I^d 变化规律为先振荡上升, 达到极值后再振荡减小。对于 $\theta = 15^\circ$ 的模型来说, 由图 8(a) 结合焦散斑图片可以看出, 50 μs 时应力波传到分支裂纹 C、D 尖端, 在裂纹尖端发生反射、衍射现象, 后续波形发生紊乱。130 μs 时 C 裂纹尖端 K_I^d 第 1 次达到峰值 0.922 $\text{MN}/\text{m}^{3/2}$, 并超过材料的动态断裂韧性, 裂纹开始起裂扩展, 裂纹尖端所累积的应变能转化为裂纹扩展所形成新裂纹表面自由能和动能, 所以起裂扩展的过程也就是能量释放的过程, K_I^d 随之下降, 140 μs 时下降到 0.631 $\text{MN}/\text{m}^{3/2}$ 。随着反射和后续应力波不断作用, 裂纹能量又不断累积, K_I^d 增加, 200 μs 时达到极值 1.394 $\text{MN}/\text{m}^{3/2}$ 。此后, 随着应力波作用减弱, 裂纹驱动力降低, 裂纹扩展又继续释放能量, 所以裂纹尖端 K_I^d 振荡减小。在整个裂纹扩展过程中分支翼裂纹 C 长度达到 31 mm, D 端没有产生翼裂纹。

模型 $\theta = 90^\circ$ 和 $c = 10 \text{ mm}$, C、D 裂纹 K_I^d 变化规律与模型 $\theta = 15^\circ$ 类似, 区别在于模型 $\theta = 90^\circ$ 和 $c = 10 \text{ mm}$ 时 D 裂纹 K_I^d 超过材料断裂韧性, 翼裂纹从 D 端起裂, 扩展长度达到 35 mm 和 55 mm, 而 C 裂纹并没有扩展。由于高速相机视场有限, 模型 $c = 10 \text{ mm}$ 只观察到 240 μs 以前动态应力强度因子变化情况, 并没有观察到止裂时情况。

5.2.2 C 裂纹角度改变对 C 裂纹尖端应力强度因子影响

由图 8(d)和图 9 可知, C 裂纹角度的改变对 C 裂纹 K_I^d 产生较大影响。图 9 可以更明显看出, C 裂纹与入射应力波夹角 θ 从 $15^\circ \sim 90^\circ$ 时, K_I^d 极值和均值随夹角 θ 增大而逐渐减小。按照惠更斯理论^[18], 当应力波传播路径上含有缺陷介质, 应力波会与缺陷介质作用产生衍射、反射现象, 应力波能量发生衰减。裂纹与入射应力波夹角增大, 裂纹对应力波的衍射、反射现象更明显, 应力波能量衰减增大, 裂纹尖端应力集中效应减弱, 所以入射应力波夹角增大, 裂纹尖端 K_I^d 极值和均值减小。

5.2.3 C 裂纹角度改变对 D 裂纹尖端应力强度因子影响

由图 8(a)、图 8(b)、图 8(e)和图 4 可知, C 裂纹角度的改变对 D 裂纹 K_I^d 和翼裂纹起裂扩展具有很大影响。当 C 裂纹与入射应力波夹角 $\theta = 15^\circ$ 时 D 裂纹 K_I^d 均值和极值小于 C 裂纹 K_I^d 均值和极值;

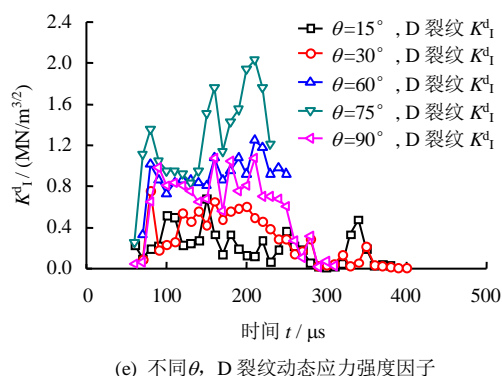
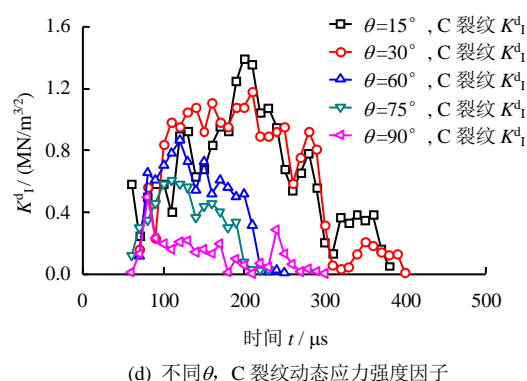
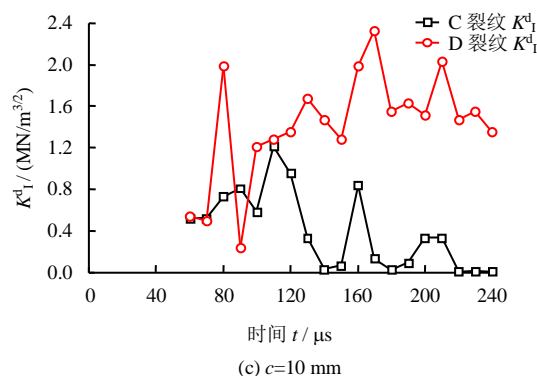
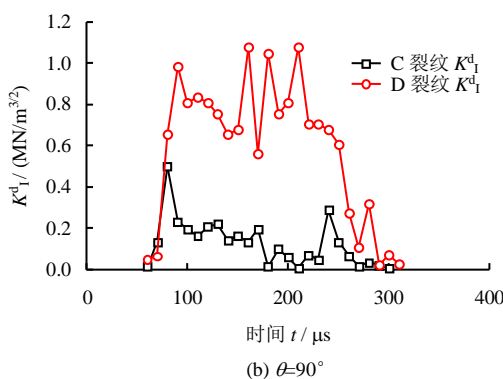
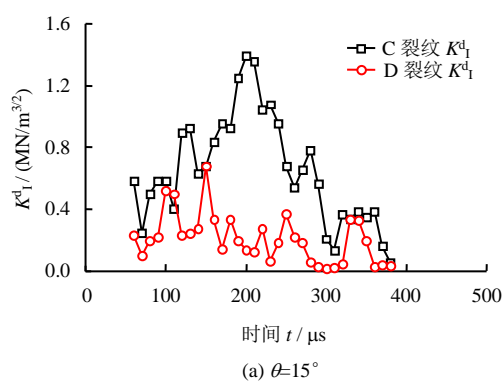


图 8 裂纹 C、D 动态应力强度因随时间变化关系
Fig.8 Relationships between dynamic stress intensity factors of cracks C and D and time

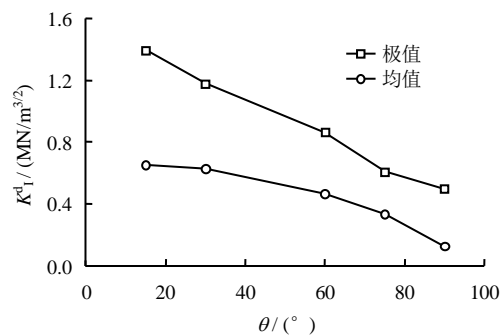


图 9 C 裂纹应力强度因子极值和均值随夹角 θ 变化关系
Fig.9 Relationships between the extreme and mean values of dynamic stress intensity factor of crack C and the incident angle of stress waves

当 C 裂纹与入射应力波夹角 $\theta = 90^\circ$ 时, D 裂纹 K_I^d 均值和极值大于 C 裂纹 K_I^d 均值和极值。上述规律扩展到所有模型: 即当 C 裂纹与入射应力波的夹角小于 D 裂纹与入射应力波的夹角时, D 裂纹 K_I^d 主要在 $0.007 \sim 0.655 \text{ MN/m}^{3/2}$ 之间振荡变化, K_I^d 极值和均值都小于 C 裂纹 K_I^d , 翼裂纹主要从 C 裂纹尖端起裂扩展; 当 C 裂纹与入射应力波夹角大于 D 裂纹与入射应力波夹角时, D 裂纹 K_I^d 主要在 $0.028 \sim 2.337 \text{ MN/m}^{3/2}$ 之间振荡变化, K_I^d 极值和均值均大于 C 裂纹 K_I^d , 翼裂纹主要从 D 裂纹尖端起裂扩展, 产生翼裂纹长度最长达到 63 mm, 分支 D 裂纹抑制了分支 C 裂纹 K_I^d 及其翼裂纹扩展。

出现上述现象的原因主要是因为当 C 裂纹与入射应力波夹角 θ 小于 D 裂纹与入射应力波夹角时, 对应力波的阻碍宽度较小, C 裂纹尖端应力集中效应更加明显, 翼裂纹较易从应力更集中的裂纹尖端起裂。当 C 裂纹起裂以后, D 裂纹尖端积累的能量有可能转移到 C 裂纹尖端, 从而促进 C 裂纹扩展, 抑制 D 裂纹扩展。当 C 裂纹与入射应力波夹角 θ 大于 D 裂纹与入射应力波夹角时, C 裂纹对应力波的阻碍宽度较大, D 端的应力集中效应更加显著, 裂纹更易从 D 端起裂扩展。在 D 裂纹扩展过程中 C 裂纹积累的能量可能转移到 D 裂纹尖端促进 D 裂纹扩展, 抑制 C 裂纹扩展。这更进一步解释了 D 裂纹不做任何改变而其翼裂纹扩展和 K_I^d 变化很大的原因。

5.2.4 C 裂纹长度改变对 C、D 裂纹尖端应力强度因子影响

当 C、D 裂纹与入射应力波夹角都为 45° , 只改变 C 裂纹长度为 10 mm 时, 按理论分析, 由于 C 裂纹长度比 D 裂纹小, C 裂纹尖端离炮孔距离近, 应力波传到 C 裂纹尖端距离短, 应力波衰减小, C 裂纹尖端应力更为集中, 所以 C 裂纹 K_I^d 应该更大。但由图 8(c) 和图 4 可以看出, 当 C 裂纹长度为 10 mm 时, C 裂纹 K_I^d 均值和极值却小于 D 裂纹 K_I^d 均值和极值, 翼裂纹从长度更长的 D 端起裂扩展, D 裂纹抑制了 C 裂纹扩展和 K_I^d 。上述现象主要是因为^[19]在一定裂纹长度内, 裂纹起裂扩展之前, 裂纹驱动力随着裂纹长度增加而增加, 所以当 D 裂纹长度大于 C 裂纹长度时, D 裂纹尖端 K_I^d 大于 C 裂纹 K_I^d , 翼裂纹从 D 端起裂扩展。

5.2.5 裂纹扩展速度

图 10 为 C、D 翼裂纹扩展速度随时间变化曲线图。由图可以看出, C、D 翼裂纹速度均呈现振荡

式变化规律。C 裂纹与入射应力波夹角为 15° 时, 翼裂纹从 C 裂纹起裂扩展, 130 μs 时, 速度迅速达到 236.36 m/s, 140 μs 时达到第 1 个峰值 245.45 m/s, 此后速度振荡变化, 在 210 μs 时出现速度极值为 318.18 m/s, 然后速度振荡下降, 直至止裂。上述现象主要是因为应力波作用于裂纹, 能量累积, 在裂纹尖端产生强弱变化的应力场, 裂纹扩展又是能量释放过程, 裂纹能量不断累积和释放, 裂纹扩展的驱动力不断变化; 范天佑^[19]曾提出, 裂纹的扩展速度不同, 材料对裂纹扩展的阻力也不同。驱动力和阻力都在动态变化, 所以裂纹的扩展速度呈现振荡变化规律。

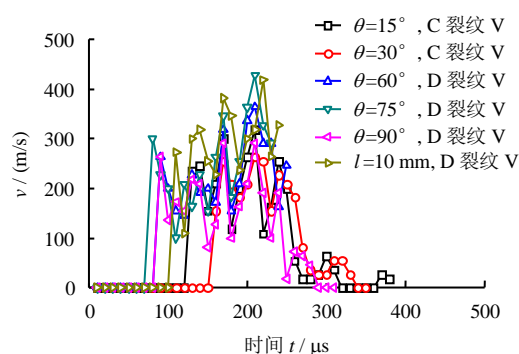


图 10 C、D 裂纹扩展速度随时间变化关系

Fig.10 Relationships between propagation velocity of cracks C and D and time

6 结 论

(1) 在爆炸荷载下, 两相向运动裂纹在相遇前, 裂纹尖端奇异场互相影响, 焦散斑形状扭曲, $K_d^H > K_I^d$, 裂纹尖端之间没有互相贯通, 而是相遇前沿偏离水平方向相互避开, 然后朝对方裂纹方向扩展。

(2) 两分支裂纹相交, 翼裂纹主要从与入射应力波夹角较小和长度较长的分支裂纹端部起裂, 沿环向最大拉应力垂直方向扩展。

(3) 与入射应力波夹角较小和长度较长的分支裂纹对夹角较大和长度较短的分支裂纹动态应力强度因子及其扩展有抑制作用。

(4) 在爆炸荷载作用下, 分支翼裂纹尖端动态应力强度因子随分支裂纹与入射应力波夹角增大而减小, 其扩展速度呈现振荡式变化规律。

参 考 文 献

- [1] ZHAO Y X, ZHAO G F, JIANG Y D, et al. Effects of bedding on the dynamic indirect tensile strength of coal: Laboratory experiments and numerical simulation[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 132: 81

- 93.
- [2] CHOA S H, NAKAMURA Y, MOHANTY B, et al. Numerical study of fracture plane control in laboratory-scale blasting[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2008, 75(13): 3966—3984.
- [3] CHO S H, KANEKO K. Rock fragmentation control in blasting[J]. **Materials Transactions**, 2004, 45(5): 1722—1730.
- [4] LI J C, MA G W. Experimental study of stress wave propagation across a filled rock joint[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2009, 46: 471—478.
- [5] LI Ye-xue, ZHU Zhe-ming, LI Bi-xiong, et al. Study on the transmission and reflection of stress wave across joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2011, 48: 364—371.
- [6] ING YI-SHYONG, MA CHIEN-CHING. Theoretical simulations of a propagating crack subjected to in-plane stress wave loading by caustic method[J]. **International Journal of Fracture**, 1997, 85: 313—331.
- [7] DALLY J W. An Introduction to Dynamic Photoelasticity[J]. **Experimental Mechanics**, 1980, 20(12): 409—416.
- [8] 岳中文, 杨仁树, 郭东明, 等. 爆炸应力波作用下缺陷介质裂纹扩展的动态分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 949—954.
- YUE Zhong-wen, YANG Ren-shu, GUO Dong-ming, et al. Dynamic analysis of crack propagation in media containing flaws under the explosive stress wave[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(4): 949—954.
- [9] 姚学锋, 方竞, 熊春阳, 等. 爆炸应力波作用下裂纹与空洞的动态焦散线分析[J]. 爆炸与冲击, 1998, 18(3): 231—236.
- YAO Xue-feng, FANG Jing, XIONG Chun-yang, et al. Dynamic caustics analysis of crack and hole under the explosive stress wave[J]. **Explosion and Shock Waves**, 1998, 18(3): 231—236.
- [10] ROSSMANITH H P, SHUKLA A. Dynamic photoelastic investigation of interaction of stress waves with running cracks[J]. **Experimental Mechanics**, 1981, 21(11): 415—442.
- [11] 胡荣, 朱哲明, 胡哲源, 等. 爆炸动荷载下裂纹扩展规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1476—1480.
- HU Rong, ZHU Zhe-ming, HU Zhe-yuan, et al. Experimental study of regularity of crack propagation under blasting dynamic loads[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(7): 1476—1480.
- [12] 杨仁树, 许鹏, 岳中文, 等. 圆孔缺陷与 I 型运动裂纹相互作用的试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1597—1602.
- YANG Ren-shu, XU Peng, YUE Zhong-wen, et al. Laboratory study of interaction between a circular hole defect and mode I moving crack[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(6): 1597—1602.
- [13] 朱哲明, 李元鑫, 周志荣, 等. 爆炸荷载下缺陷岩体的动态响应[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1157—1167.
- ZHU Zhe-ming, LI Yuan-xin, ZHOU Zhi-rong, et al. Dynamic response of defected rock under blasting load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(6): 1157—1167.
- [14] 肖同社, 杨仁树, 边亚东, 等. 含节理岩体爆生裂纹扩展的动焦散模型试验研究[J]. 试验力学, 2006, 21(4): 539—545.
- XIAO Tong-she, YANG Ren-shu, BIAN Ya-dong, et al. Dynamic caustics model experiment of blasting crack propagating on joint rock[J]. **Journal of Experimental Mechanics**, 2006, 21(4): 539—545.
- [15] 唐世斌, 黄润秋, 唐春安. T 应力对岩石裂纹扩展路径及起裂强度的影响研究[J]. 岩土力学, 2016, (6): 1521—1529.
- TANG Shi-bin, HUANG Run-qiu, TANG Chun-an, et al. Effect of T-stress on crack growth path in rock and fracture strength[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, (6): 1521—1529.
- [16] YAO X F, XU W, ARAKAWA K, et al. Dynamic optical visualization on the interaction between propagating crack and stationary crack[J]. **Optics and Lasers in Engineering**, 2005, 43(2): 195—207.
- [17] FENDER M L, LECHENAULT F, DANIELS K E, et al. Universal shapes formed by two interacting cracks[J]. **Physical Review Letters**, 2010, 105(12): 1—4.
- [18] 李清, 张茜, 李晟源, 等. 爆炸应力波作用下分支裂纹动态力学特性试验[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3026—3032.
- LI Qing, ZHANG Qian, LI Sheng-yuan, et al. Experimental study of dynamic fracture behaviors of branched cracks under blasting stress wave[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 3026—3032.
- [19] 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, 1993: 127—149.
- FAN Tian-you. Introduction to Fracture Dynamic Mechanics[M]. Beijing: Institute of Technology Press, 1993: 127—149.