文章编号: 1001-1455(2013)06-0631-07

定向断裂双孔爆破裂纹扩展的动态行为*

杨仁树[1,2],王雁冰[1,2],岳中文[1,2],刘国庆[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: 利用爆炸加载动态焦散线测试系统,研究了双炮孔切槽方式下、同时起爆、两炮孔间贯穿裂纹和炮孔外侧裂纹扩展的动态行为。实验结果表明:贯穿裂纹尖端并未直接相遇,而是一上一下,相遇后继续扩展,并向异方已有的裂纹方向移近。裂纹扩展速度和加速度均呈现波浪起伏式的涨落变化。同一条裂纹扩展的速度和加速度的峰值交替出现,加速度先达到峰值,速度再达到峰值。动态应力强度因子 K_{I} 由最大值迅速减小,然后经过反复振荡后,又逐渐增大,并达到第 2 个峰值,之后开始减小。裂纹扩展的过程中,K_{II} 基本都小于 K_{I}。贯穿裂纹尖端的动态应力强度因子大于外侧裂纹的。动态能量释放率由最大值迅速减小,振荡变化后第 2 次达到峰值,又逐渐减小。

关键词: 固体力学;动态行为;动态焦散线;裂纹扩展;切槽爆破;贯穿裂纹

中图分类号: O346.1 **国标学科代码**: 1301545 **文献标志码**: A

岩土工程中,周边眼对光面爆破中巷道的成形质量有显著的影响。李清[1]、张志呈[2]、黄涛等[3]和朱振海等[4]对相邻炮孔间裂纹贯穿机理进行了研究。但由于爆炸荷载的复杂性,裂纹扩展的动态行为还需进一步研究。裂纹扩展的动态行为宏观上用裂纹长度、偏转角度、扩展速度、加速度、动态应力强度因子及动态能量释放率等表达。双孔爆破裂纹扩展的动态行为对于工程实践有着重要的意义。

焦散线方法为动态断裂力学研究提供了一种有效的实验方法[5-11]。它不仅测量精度较高、设备简单,而且更重要的是它只测量一个几何长度——焦散斑直径,就可以确定裂纹尖端的应力强度信息。本文中,利用爆炸加载动态焦散线测试系统[12],研究炮孔切槽方式下、双孔同时起爆、两炮孔间贯穿裂纹和炮孔外侧裂纹扩展的动态行为。

1 测试原理

1.1 裂纹长度和贯穿裂纹偏转角度

从摄影底片上可以精确测得瞬时裂纹尖端的位置,并按图片与实物的比例进行换算,以此得到裂纹扩展的长度;在试件破坏后的照片上,用 Photoshop 软件精确测得两条贯穿裂纹上各点的坐标,根据 $\tan\theta=\mathrm{d}Y/\mathrm{d}X$,可近似得到裂纹偏转角度 θ 与水平位移 X 的关系。

1.2 裂纹扩展速度和加速度

根据测得的瞬时裂纹尖端的位置,分析裂纹扩展的速度和加速度时,为了减少数据的分散程度,K. Takahashi 等[13]提出了一种数据拟合的方法,将裂纹长度 $L(t)$ 拟合成时间 t 的 9 次多项式:

$$L(t)=\sum_{i=0}^{9}L_i t^i \tag{1}$$

式中:$L(t)$ 为扩展裂纹的长度,系数 L_i 由最小二乘法原理求出。因而,裂纹扩展的速度 v 和加速度 a 即对曲线 $L(t)$ 求一次和二次导数即可。

* **收稿日期**: 2012-04-01; **修回日期**: 2012-06-03

基金项目: 国家自然科学基金委员会与神华集团有限公司联合基金重点项目(51134025);
中央高校基本科研业务费专项基金项目(2009QL15,2009QL04)

作者简介: 杨仁树(1963—),男,教授,博士生导师。

1.3 动态应力强度因子

采用透射式动态焦散线测试方法[12],动态载荷下复合型扩展裂纹尖端的动态应力强度因子为:

$$K_{\mathrm{I}}=\frac{2\sqrt{2\pi}F(v)}{3g^{5/2}z_0Cd_{\mathrm{eff}}}D_{\max}^{5/2} \tag{2}$$

$$K_{\mathrm{II}}=\mu K_{\mathrm{I}} \tag{3}$$

式中:$D_{\max}$为沿裂纹方向的焦散斑最大直径;z_0 为参考平面到物体平面的距离;C 为材料的应力光学常数;d_{eff}为试件的有效厚度,对于透明材料,板的有效厚度即为板的实际厚度;μ 为应力强度因子比例系数;g 为应力强度数值因子;K_{I}、K_{II}为动态载荷作用下,复合型扩展裂纹尖端的Ⅰ型、Ⅱ型动态应力强度因子;$F(v)$为由裂纹扩展速度引起的修正因子,在具有实际意义的裂纹扩展速度下,$F(v)\approx 1$。

1.4 动态能量释放率

能量释放率是用能量反映裂纹尖端应力、应变场,它是裂纹扩展单位面积弹性系统释放(耗散)的能量,反映了裂纹扩展的驱动力,表示裂纹扩展单位面积时系统势能的减少[14]。L. B. Freund[15]分析了动态能量释放率与动态应力强度因子之间的关系,将动态能量释放率与动态应力强度因子关系,即平面应力情况下的表达式,表示为:

$$G=\frac{1}{E}[A_{\mathrm{I}}(v)K_{\mathrm{I}}^2+A_{\mathrm{II}}(v)K_{\mathrm{II}}^2] \tag{4}$$

式中:$A_{\mathrm{I}}(v)$、$A_{\mathrm{II}}(v)$为裂纹扩展速度函数,当 $v=0$ 时,$A_{\mathrm{I}}(v)=A_{\mathrm{II}}(v)=1$;当 $v\neq 0$ 时,$A_{\mathrm{I}}(v)=v^2a_{\mathrm{d}}/[(1-v)c_{\mathrm{s}}^2D]$,$A_{\mathrm{II}}(v)=v^2a_{\mathrm{s}}/[(1-v)c_{\mathrm{s}}^2D]$,$D=4a_{\mathrm{d}}a_{\mathrm{s}}-(1+a_{\mathrm{s}}^2)^2$,$a_{\mathrm{d}}=\sqrt{1-v^2/c_{\mathrm{d}}^2}$,$a_{\mathrm{s}}=\sqrt{1-v^2/c_{\mathrm{s}}^2}$;$E$ 为材料的弹性模量;c_{d}、c_{s} 分别为膨胀波波速和剪切波波速;v 为裂纹的扩展速度。根据式(4),可以求得各时刻裂纹尖端的动态能量释放率。

2 实 验

爆炸加载动态焦散线实验系统[12]主要包括:(1) 爆破加载与防护;(2) 起爆方法及起爆装置;(3) 多火花式高速摄影光路系统 DDGS-Ⅱ;(4) 延迟与控制器装置;(5) 光-电转换系统。火花放电与焦散照片拍摄的时间通过电子控制系统控制,根据需要的时间间隔提前设置,幅间隔为 0~999 μs。采用这种光-电系统可拍摄到清晰的焦散斑照片。图 1 为透射式焦散线试验系统光路。

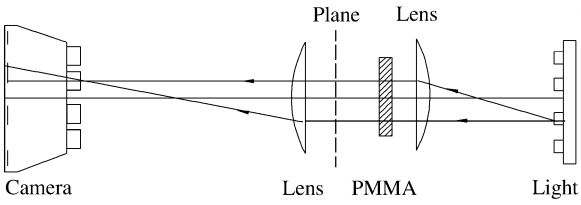

图 1 透射式焦散实验光路图

Fig. 1 Experimental optical system for dynamic caustics

实验材料为有机玻璃 PMMA,规格为 400 mm×300 mm×5 mm,PMMA 动态力学参数分别为:$c_{\mathrm{P}}=2.32$ km/s,$c_{\mathrm{S}}=1.26$ km/s,$E_{\mathrm{d}}=6.1$ GN/m^2,$\nu_{\mathrm{d}}=0.31$,$|C_{\mathrm{t}}|=85$ μs。两炮孔位于试件中央,间距 120 mm,炮孔直径 6 mm,切槽角度 $\alpha=60°$,切槽深度 $h=1$ mm。图 2 为切槽爆破模型。每个孔装 140 mg 叠氮化铅单质炸药。装药时在炮孔 A 内放置 1 组探针,连接高压脉冲起爆器,利用起爆器高压放电产生的火花引爆炸药;在炮孔 B 内放置 2 组探针,其中 1 组连接高压脉冲起爆器,另 1 组提供延迟控制器通断信号,传递触发信号,延迟控制器自动按预先设置好的幅间间隔时间连续传递高速摄影机 16 个触发信号,火花塞在预定时间内放电产生很强的脉冲光,可得 16 幅动态焦散线图片。

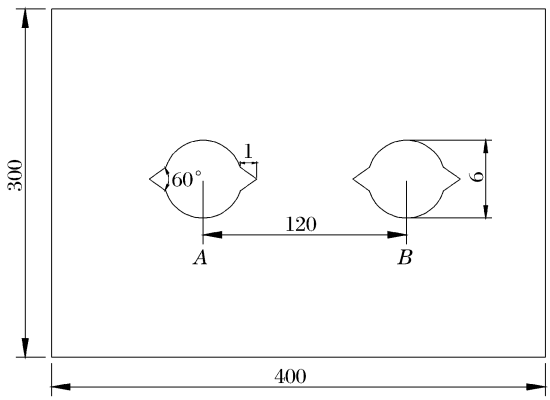

图 2 切槽爆破模型

Fig. 2 Notched blasting model

3　结果及分析

3.1　裂纹长度和贯穿裂纹偏转角度

图 3 为试件破坏后的照片，图 4 为裂纹长度随时间的变化曲线。由于切槽的存在，炸药爆炸产生的能量沿着切槽方向优先释放，形成引导裂纹，并抑制其他方向裂纹的扩展，切槽方向产生的裂纹长度较长。两炮孔外侧切槽方向的裂纹 *AO*、*BO* 直接扩展至试件边缘，裂纹 *BO* 几乎沿水平直线方向扩展，只是在临近边缘处向上轻微翘曲，裂纹 *AO* 则出现弯曲，但弯曲程度并不大，这些现象与装药结构、炮孔的填塞方式、起爆器的性能、材料内部的微观结构、应力波对裂纹扩展的影响有直接关系。

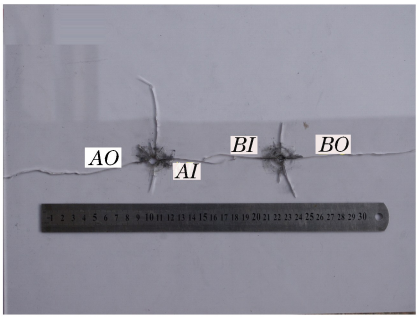

图 3　试件破坏后的照片

Fig. 3　Photo of specimen after destruction

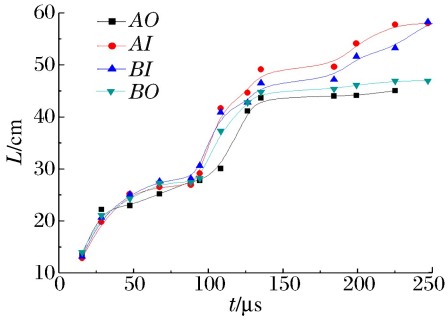

图 4　裂纹长度

Fig. 4　Crack lengths

在两炮孔连线方向，两条贯穿裂纹 *AI*、*BI* 尖端并未直接相遇，而是一上一下，相遇后继续扩展，并向异方的已有的裂纹方向移动，最终裂纹尖端与异方已有裂纹相遇，裂纹停止扩展。贯穿裂纹 *AI*、*BI* 偏转角度 θ 与水平位移 X 的关系见表 1。两裂纹相遇前，裂纹偏转角度较小，在 −15°～15°，且振荡变化，这与材料的力学性能、爆生气体与应力波对裂纹扩展的影响有关系。当 $X=60$ mm 时，两裂纹在空间中相遇，且 *AI* 在下、*BI* 在上，之后角度发生较大的偏转，在两炮孔连线中间形成近似椭圆形的交汇区域。裂纹沿最小抵抗线方向扩展，快速释放能量。两条贯穿裂纹相遇时，最小抵抗线方向即为异方的已有裂纹方向，已有裂纹为能量的释放提供了自由面，引起异方裂纹向已有裂纹方向扩展。在未切槽方向的炮孔壁上存在着一些微裂纹，炸药爆炸产生的能量及爆生气体先沿存在微裂隙的方向释放，而微裂隙随机分布，所以在炮孔未切槽的方向也随机生成了 3～4 条裂纹。

表 1　偏转角度与水平位移的关系

Table 1　Relation between deflection angle and horizontal displacement

X/mm	θ_{AI}/(°)	θ_{BI}/(°)	X/mm	θ_{AI}/(°)	θ_{BI}/(°)
10	2.62	5.56	370	−5.65	9.38
50	2.84	2.44	410	−3.37	0
90	7.40	2.98	450	−10.06	14.21
130	11.53	7.56	490	−3.82	10.63
170	4.49	12.34	530	14.47	−4.09
210	10.02	14.75	570	22.26	−16.94
250	6.76	10.25	610	22.36	−3.35
290	2.02	10.67	650	31.25	−35.76
330	4.59	13.87	690	79.65	−85.22

3.2　裂纹扩展速度和加速度

图 5 为裂纹扩展速度和加速度随时间的变化曲线。裂纹扩展过程中，速度和加速度均呈现波浪起伏式的涨落变化。由速度曲线(见图 5(a))可见，外侧裂纹 *AO*、*BO* 的扩展速度由最大值 986、977 m/s 开始，迅速减小。当 $t=32$ μs 时，*AO* 第 1 次到达谷值 226 m/s；当 $t=62$ μs 时，*BO* 第 1 次到达了谷值 331 m/s。贯穿裂纹 *AI*、*BI* 分别由初始值 158、388 m/s 开始，迅速增大至峰值 869、877 m/s，然后又迅

速减小，当 $t=57\ \mu s$ 时，AI、BI 分别第 1 次达到谷值 4、113 m/s 。裂纹扩展初期 AO、BO 和 AI、BI 的速度变化差异，可能是由于裂纹 AO、BO 距离边界较近，且试件的四周边界无约束，为裂纹扩展和能量释放提供了自由面，在一定程度上引导能量的优先释放。而裂纹 AI、BI 向试件中心区域相向扩展，裂纹扩展的阻力较大，且异方炮孔产生的应力波与贯穿裂纹相互作用，可能抑制裂纹的扩展。由加速度曲线(见图 5(b))可以看出，裂纹扩展的整个过程中，都存在着裂纹扩展的加速和减速变化，裂纹一旦起裂，加速度即产生，炸药爆炸后产生强烈的冲击波，冲击波迅速衰减为应力波，试件炮孔壁上的应变能迅速积聚，达到裂纹扩展所需的能量时，裂纹便开始扩展，但此时加速度已经产生。从时间上看，速度和加速度的峰值交替出现，同一条裂纹，都是加速度先达到峰值，速度再达到峰值。加速度代表了驱动力的变化，加速度达到峰值，此时驱动力最大，而裂纹在此驱动力的作用下将继续加速扩展。速度和加速度的交替变化，表明了裂纹扩展时速度和加速度的变化规律。由于应力波与扩展裂纹相互作用，改变了整个试件中的应力分布状态以及裂纹尖端的奇异应力场，最终影响了裂纹扩展的状态[16]。

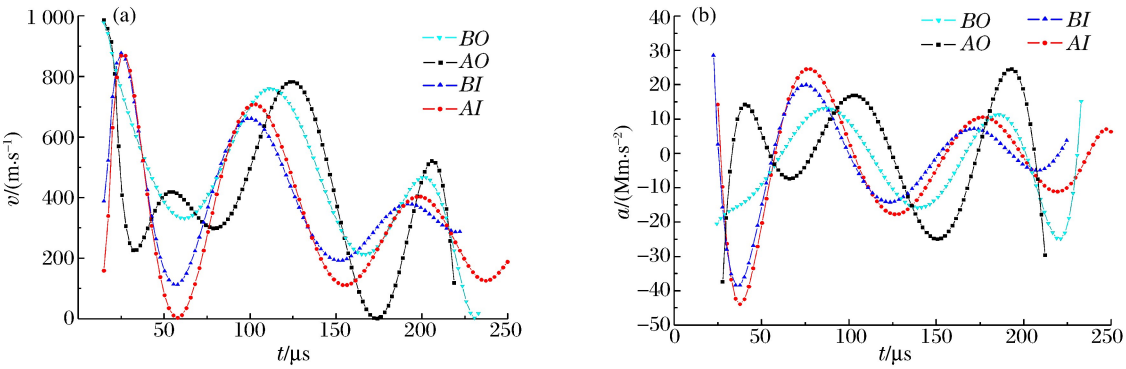

图 5 裂纹扩展的速度和加速度

Fig. 5 Crack velocities and accelerations

3.3 动态应力强度因子

图 6 为实验过程中拍摄到的动态焦散斑图像。由图 6 可以直观看出，两炮孔同时起爆后，应力波开始沿炮孔径向向外传播，当 $t=28\ \mu s$ 时，应力波到达异方炮孔，而此时爆生裂纹扩展距离较短，裂纹 AI 扩展 21.1 mm，BI 扩展 22.3 mm，裂纹的扩展速度远远滞后于应力波的传播速度，此时裂纹 AI、BI、AO、BO 尖端焦散斑的直径分别为 8.25、8.62、8.81 和 8.32 mm。当 $t=135\ \mu s$ 时，AI 裂纹在下，BI 在上，两裂纹尖端在空间中相遇，裂纹尖端的焦散斑变得扭曲，焦散斑不再与裂纹扩展方向对称。这说明裂纹尖端的应力场是正应力和剪应力共同作用的复合应力场，反映了裂纹尖端的应力集中程度。之后裂纹继续扩展，并移向异方已有的裂纹面。由于视场的限制，在 $t=200\ \mu s$ 后，未拍到外侧裂纹 AO、BO 尖端的焦散斑。

图 7 为动态应力强度因子 K_{I}、K_{II} 随时间的变化曲线。动态应力强度因子 K_{I} 变化趋势基本一致：从初始值迅速减小，然后经过反复振荡后，又逐渐增大，并达到第 2 个峰值，之后开始减小。炸药爆炸后，能量迅速释放，产生强烈的冲击波，并快速衰减为应力波。膨胀波先作用于裂纹尖端，应力强度因子产生。接着随着应变能的耗散，K_{I} 减小，随后异方炮孔炸药爆炸产生的应力波到达裂纹尖端处，与裂纹相互作用，K_{I} 出现振荡变化。裂纹继续扩展，从自由面反射的拉伸波到达裂纹尖端，K_{I} 第 2 次达到峰值。当 $t\approx140\ \mu s$ 时，贯穿裂纹 AI、BI，外侧裂纹 AO、BO 第 2 次达到峰值，即 1.25、1.46、0.66 和 0.84 $\mathrm{MN/m^{3/2}}$，贯穿裂纹 AI、BI 尖端的应力强度因子大于外侧裂纹 AO、BO，说明应力波在炮孔间叠加，明显增加了炮孔间区域的应力场。整个振荡变化过程中贯穿裂纹 AI、BI 尖端的应力强度因子基本都大于外侧裂纹 AO、BO，说明炮孔外侧切槽距离自由面更近，一定程度上引导了能量的释放。应力强度因子 K_{II} 在 0.1～0.8 $\mathrm{MN/m^{3/2}}$ 振荡变化，总体呈下降趋势。裂纹扩展的过程中，K_{II} 基本都小于 K_{I}，说明应力波与裂纹尖端相互作用过程中，P 波起到了主要作用，S 波的作用次之。K_{I}、K_{II} 的振荡性变化充分体现了应力波对裂纹扩展的影响。以上这些为研究定向断裂控制爆破提供了有效的实验依据。

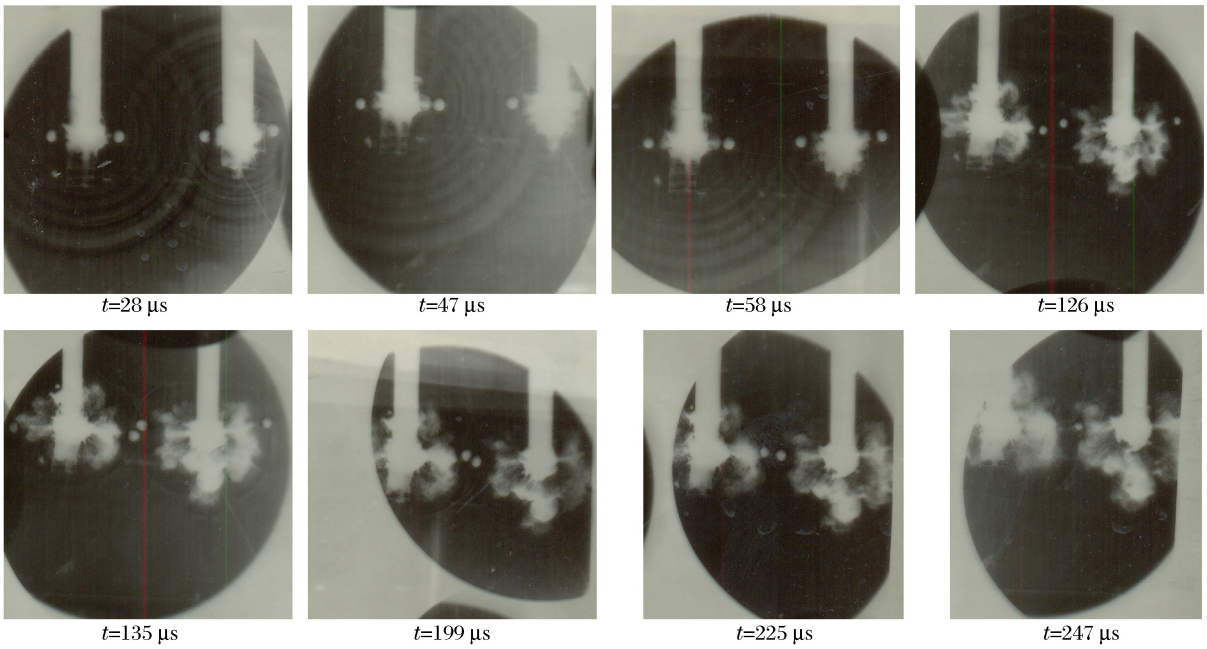

图 6　动态焦散斑图像

Fig. 6　Pictures of dynamical caustics speckle

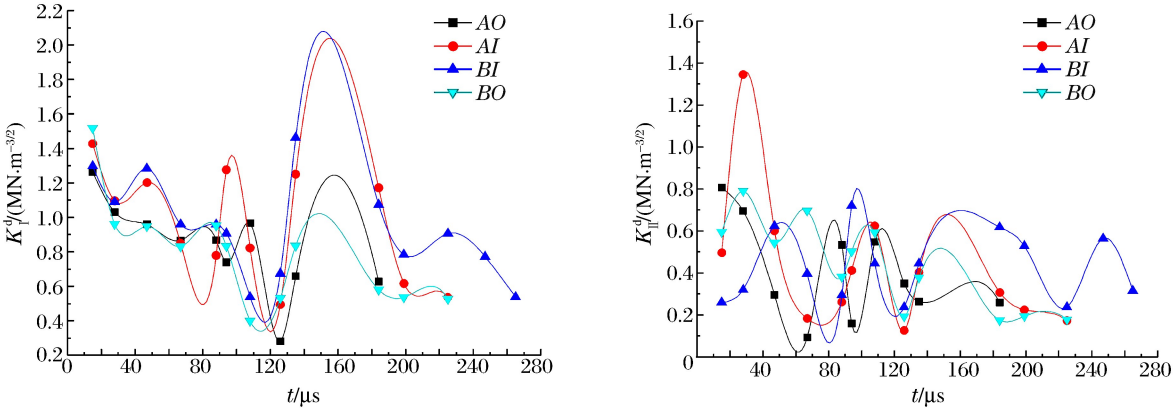

图 7　动态应力强度因子

Fig. 7　Dynamic stress intensity factors

3.4　动态能量释放率

图 8 为裂纹尖端动态能量释放率与时间的变化关系。由于实验设备的限制，当 $t=15$ μs 时，开始获得裂纹尖端的动态能量释放率，且为最大值，裂纹 AI、BI、AO 和 BO 的最大动态能量释放率分别为 1 583.1、542.4、1 377.1 和 772.6 N/m。裂纹 AI、AO、BI 尖端的动态能量释放率都由最大值迅速下降。根据这种变化趋势，起裂后的裂纹尖端的能量释放率比起裂前裂纹尖端的能量释放率低，它们之间的差值体现了动态能量释放率对裂纹扩展的驱动作用[17]。炸药起爆后、裂纹未扩展前，系统的势能逐步转化为弹性应变能，能量释放率随时间增加而

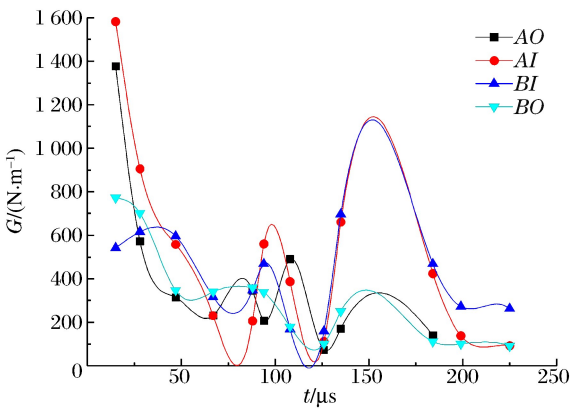

图 8　动态能量释放率

Fig. 8　Dynamic energy release rates

递增,当它达到裂纹扩展单位面积所需要的能量 G_{I} 时,裂纹便开始扩展,储存在裂纹尖端的弹性应变能在起裂瞬间突然释放,导致裂纹尖端的能量释放率突然下降。当 $t\approx 60\ \mu s$ 时,这种趋势才开始收敛,振荡变化后,贯穿裂纹 AI、BI 在 $t=135\ \mu s$ 时第 2 次达到峰值,而外侧裂纹 AO、BO 则一直呈振荡减小的趋势。这种振荡变化充分体现了应力波对裂纹扩展的影响,应力波传播过程中携带着能量,应力波与裂纹尖端相互作用,改变了整个试件的应力状态及裂纹尖端的动态奇异应力场,改变了裂纹的扩展状态。应力波携带的能量传递给裂纹,改变裂纹扩展规律。

4 结 论

利用动焦散实验方法,基于文中的实验模型,对裂纹扩展的动态行为进行分析并得到如下结论:

(1)贯穿裂纹尖端并未直接相遇,而是一上一下,相遇后继续扩展,并向异方的已有的裂纹方向移动。两条贯穿裂纹相遇时,最小抵抗线方向即为异方的已有裂纹方向,已有裂纹为能量的释放提供了自由面,引起异方裂纹向已有裂纹方向扩展。

(2)动态应力强度因子 K_{I} 从初始值迅速减小,然后经过反复振荡后,又逐渐增大,并达到第 2 个峰值,之后开始减小。这种变化反映了应力波对裂纹扩展的影响。裂纹扩展的过程中,K_{II} 基本都小于 K_{I},说明应力波与裂纹尖端相互作用过程中,P 波起了主要作用,S 波次之。贯穿裂纹 AI、BI 尖端的动态应力强度因子大于外侧裂纹 AO、BO,应力波在炮孔间叠加,明显增加了炮孔间区域的应力场。

(3)裂纹扩展速度 v 和加速度 a 均呈现波浪起伏式的涨落变化,应力波以及由界面反射的拉伸波在裂纹尖端散射、绕射,对裂纹扩展产生了影响。速度和加速度的峰值交替出现,加速度首先达到峰值,然后速度再达到峰值。

(4)动态能量释放率由最大值迅速减小,振荡变化后第 2 次达到峰值,又逐渐减小。在一定程度上表明了动态能量释放率对裂纹扩展的驱动作用。

参考文献:

[1] 李清.爆炸致裂的岩石动态力学行为与断裂控制试验研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2009.

[2] 张志呈.定向断裂控制爆破机理综述[J].矿业研究与开发,2000,20(5):40-42.
Zhang Zhi-cheng. Summary of the mechanism of directional fracture controlled blasting[J]. Mining Research and Development, 2000,20(5):40-42.

[3] 黄涛,陈鹏万,张国新,等.岩石双孔爆破过程的流形元法模拟[J].爆炸与冲击,2006,26(5):434-440.
Huang Tao, Chen Peng-wan, Zhang Guo-xin, et al. Numerical simulation of two-hole blasting using numerical manifold method[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(5):434-440.

[4] 朱振海,曲广建,杨永琦,等.起爆时差对孔间裂缝贯穿影响的动光弹研究[J].爆炸与冲击,1991,11(4):346-352.
Zhu Zhen-hai, Qu Guang-jian, Yang Yong-qi, et al. Dynamic photoelastic studies in the influence of delay ignition on the penetration of cracks between boreholes[J]. Explosion and Shock Waves, 1991,11(4):346-352.

[5] Kalthoff J F, Winkler S, Beinert J. Dynamic stress-intensity factors for arresting cracks in DCB specimens[J]. International Journal of Fracture, 1976,12:317-319.

[6] Theocaris P S. Dynamic propagation and arrest measurements by the method of caustics on overlapping kewparallel cracks[J]. International Journal of Solid and Structures,1978(14):639-653.

[7] 杨仁树.岩石炮孔定向断裂控制爆破机理动焦散试验研究[D].北京:中国矿业大学(北京),1997.

[8] 杨仁树,岳中文,肖同社,等.节理介质断裂控制爆破裂纹扩展的动焦散试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(2):244-250.
Yang Ren-shu, Yue Zhong-wen, Xiao Tong-she, et al. Dynamic caustics experiment on crack propagation of jointed medium fracture with controlled blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(2):244-250.

[9] 岳中文.缺陷介质爆生裂纹扩展规律的动态焦散线试验研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2009.

[10] 杨仁树,牛学超,商厚胜,等.爆炸应力波作用下层理介质断裂的动焦散实验分析[J].煤炭学报,2005,30(1):36-39.

Yang Ren-shu, Niu Xue-chao, Shang Hou-sheng, et al. Dynamic caustics analysis of crack in samdwich materials under blasting stress wave[J]. Journal of China Coal Society, 2005,30(1):36-39.

[11] 杨立云. 岩石类材料的动态断裂与围压下爆生裂纹的实验研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2011.

[12] 杨仁树,桂来宝. 焦散线方法及其应用[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1997.

[13] Takahashi K, Arakawa K. Dependence of crack acceleration on the dynamic stress intensity factor in polymers[J]. Experimental Mechanics, 1987(6):195-217.

[14] 王泽. 断裂力学[M]. 南宁:广西人民出版社,1979.

[15] Freund L B. Dynamic fracture mechanics[M]. Edinburgh: Cambridge University Press, 1990.

[16] 姚学锋,倪受庸,方竞. 关于瞬态应力强度因子和裂纹扩展加速度之间的关系探讨[J]. 工程力学,1996(8):33-39.
Yao Xue-feng, Ni Shou-yong, Fang Jing. An analysis of the relations between the stress intensity factor and crack acceleration[J]. Engineering Mechanics, 1996(8):33-39.

[17] 姚学锋,方竞. 冲击载荷下扩展裂纹尖端动态能量释放率分布的焦散线分析[J]. 爆炸与冲击,1996,16(2):111-116.
Yao Xue-feng, Fang Jing. Analysis of caustics on dynamic energy release rate of running crack tip under impact load[J]. Explosion and Shock Waves, 1996,16(2):111-116.

Dynamic behaviors of crack propagation in directional fracture blasting with two holes*

Yang Ren-shu[1,2], Wang Yan-bing[1,2], Yue Zhong-wen[1,2], Liu Guo-qing[1]

(1. *School of Mechanics and Architecture Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing* 100083, *China*;
2. *State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Using a dynamic caustics blast loading system, the paper studied the dynamic behavior of perforated crack propagation between two holes and lateral crack propagation on the condition of grooving with two borehole blasting and simultaneous initiation. As can be seen from the results, the perforated crack tips did not directly encounter, but one was at the top and the other was below, met and went on propagation, then got closer to the direction of the anisotropic existing crack. The velocity and acceleration showed a type of fluctuation changes as wave. For one crack, the acceleration firstly came to the peak, then the velocity came to the peak. The dynamic stress intensity factor K_{I} decreased rapidly from the maximum, oscillated, and up to the second peak, then decreased. K_{II} was almost smaller than K_{I}. The stress intensity factor of the perforated crack tip was almost greater than that of the lateral crack. The dynamic energy release rate decreased rapidly, oscillated, and then decreased.

Key words: solid mechanics; dynamic behavior; dynamic caustics; crack propagation; notched blasting; perforated crack

---

* Received 1 April 2012; Revised 3 June 2012
Supported by the National Natural Science Foundation of China (51134025)
Corresponding author: Wang Yan-bing, ceowyb818@163.com

(责任编辑　丁　峰)