

文章编号: 1001-1455(2007)02-0159-06

节理岩体爆生裂纹扩展动态焦散线模型实验研究*

肖同社¹, 杨仁树¹, 庄金钊², 李 清¹

(1. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 北京 100083;

2. 中国农业大学水利与土木学院, 北京 100083)

摘要: 应用动态焦散线测试系统, 模拟含节理岩体断裂爆破过程, 进行了 PMMA 模型透射式动态焦散线实验, 着重研究了爆炸初始裂纹与节理面夹角不同的情况下, 裂纹尖端动态强度因子的变化规律、裂纹穿过节理面的扩展规律, 以及炮孔与节理距离不同时裂纹穿过节理扩展的规律。实验结果分析表明, 爆生裂纹穿过节理面时, 裂纹尖端的动态强度因子和裂纹扩展速度显著下降, 穿过节理面后, 强度因子又增强; 裂纹穿过节理面时, 裂纹会沿节理面偏离一段距离后沿原方向继续扩展。实验结果还表明, 炮孔与节理间距适宜的情况下, 裂纹才会穿过节理继续扩展, 间距太小和过大都不利于裂纹的扩展。

关键词: 固体力学; 裂纹扩展规律; 动态焦散线; 节理岩体; 应力强度因子; 爆炸加载

中图分类号: O346.1

国标学科代码: 130 · 1545

文献标志码: A

在实际的工程岩体中, 存在许多节理裂隙, 对岩石进行爆破时, 这些节理裂隙对应力波的传播有很大的影响, 所以研究节理面对爆生裂纹扩展的影响, 探索爆生裂纹穿过节理面扩展的一般规律是非常重要的研究课题。焦散线实验方法由 P. Manogg^[1] 提出, 适合于解决力学和光学的奇异性问题。P. S. Theocaris^[2-3] 开始用这一方法确定裂纹尖端附近塑性区的尺寸、裂纹尖端位置和应力强度因子, J. F. Kalthoff 等^[4-5] 将该方法扩展到动态断裂力学领域。苏先基等^[6-7] 用多火花式高速摄影仪和凹面镜系统对冲击载荷下裂纹动态扩展问题进行了研究。杨仁树等^[8]、李清等^[9] 首次建立爆炸载荷动态焦散线测试系统, 研究岩石中爆生裂纹的扩展机理。这种实验方法在测定裂纹尖端位置和应力强度因子方面非常方便, 而且精度较高, 已经成为研究断裂力学的重要实验方法。本文中应用动态焦散线测试系统, 建立节理岩体爆破实验模型, 着重研究了爆炸初始裂纹与节理面夹角不同的情况下, 节理对裂纹扩展的影响和裂纹尖端应力强度因子的变化。这些研究可为含节理岩体的爆破参数的设计提供理论指导。

1 焦散线法实验方法原理

1.1 焦散线的形成

当一个含有裂纹的试件受到拉伸荷载时, 试件的厚度和材料的折射率将发生线性变化, 这两种变化都将使光线发生偏转作用, 当用一束光源照射试件时, 在距试件距离 z_0 处的平面上, 光强的分布不是均匀的, 对应于裂纹尖端附近的区域, 将成为暗斑, 称为焦散斑, 而在焦散斑的周围, 则形成一条亮线, 称为焦散线, 如图 1 所示。

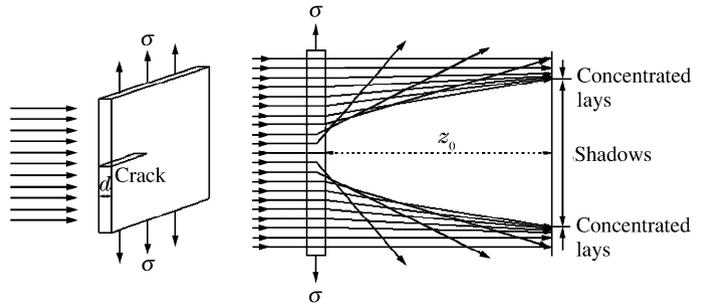


图 1 焦散线成像示意图

Fig. 1 Schematic illustration of caustics formation

* 收稿日期: 2005-12-08; 修回日期: 2006-05-19

基金项目: 高等学校博士学科点专项基金项目(20020290010); 教育部优秀青年教师资助计划项目

作者简介: 肖同社(1972—), 男, 博士研究生。

1.2 利用焦散线确定强度因子

J. F. Kalthoff^[10]和苏先基等^[6]详细分析了动态断裂过程中动力因素对焦散斑形状、尺寸的影响,为确定动态应力强度因子提供了依据。在爆炸加载的作用下,裂纹附近受P波和S波的作用,所以裂纹尖端的应力为复合应力场,承受拉应力和剪应力的共同作用,裂纹应为I、II复合型裂纹^[9,11]。动态载荷下复合型扩展裂纹尖端的动态应力强度因子

$$K_I = \frac{2\sqrt{2\pi}F(v)}{3g^{5/2}z_0Cd_{\text{eff}}}D_{\text{max}}^{5/2} \quad (1)$$

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

式中: D_{max} 、 D_{min} 分别为沿裂纹方向的焦散斑最大直径和最小直径; 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,由 $(D_{\text{max}} - D_{\text{min}})/D_{\text{max}}$ 确定; g 为应力强度数值因子,描述特征长度与初始曲线半径之间的关系,其值根据 μ 来确定; 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,其值约等于1。

这样,在参考平面上量得某一时刻沿裂纹方向的焦散斑最大直径 D_{max} 和最小直径 D_{min} 后,就可由式(1)和(2)计算出这一时刻裂纹尖端的应力强度因子。

2 爆炸加载动焦散实验

2.1 实验系统

焦散线实验方法所使用的设备主要包括光电系统和爆炸加载同步控制系统。光电系统的主要组成有高压电源、光源、双场镜(半反镜)、摄像机、触发装置、延迟装置和瞬态波形记录仪等。火花放电与焦散照片拍摄的时间通过电子控制系统来管理,根据实验需要的时间间隔提前设置,其幅间隔在0~999 μs 内可调。采用这种光-电系统可拍摄到清晰的动焦散照片。图2为透射式焦散实验光路。

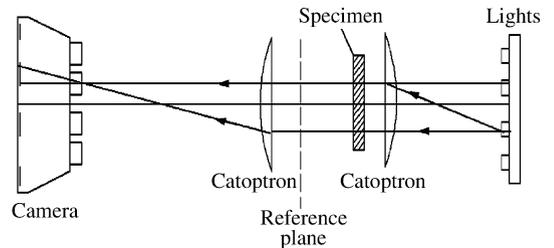


图2 透射式焦散实验光路图

Fig. 2 Experimental optical system for dynamic caustics

2.2 模型材料试件制备

实验中使用的试件材料为有机玻璃(PMMA),它较高的焦散光学常数 C ,并且几乎是光学各向同性的,所以产生单焦散曲线,有利于对焦散图像的分析,提高分析结果的精度。有机玻璃试件的动态力学参数分别为:纵波波速 $c_1 = 2.179 \text{ km/s}$,横波波速 $c_2 = 1.090 \text{ km/s}$,动态弹性模量 $E_d = 4.6 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu_d = 0.38$,透射时的应力光学常数 $|C_t| = 86 \mu\text{m}^2/\text{N}$ 。

试件的制作方法是,将有机玻璃板沿预定位置划出一道痕迹,然后沿划痕折断,在断面上涂上具有一定粘结力的胶水将断板粘合,模拟节理面。在节理面两侧放置两根钢条,用钢夹夹紧。在炮孔上用薄片划出预裂纹,预裂纹长度为2~3 mm,初始裂纹方向与节理之间的夹角 θ 取 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 五种情况,炮孔与节理之间的距离 l 为15、30、45 mm等,各试件具体参数见表1。

表1 试件尺寸

Table 1 Size parameters of specimen

编号	试件规格/mm ³	$\theta/(\circ)$	l/mm
1	320×220×5	0	上侧 15, 下侧 25
2	290×220×5	30	20
3	290×220×5	45	20
4	290×220×5	60	20
5	320×250×5	90	左侧 30, 右侧 20
6	320×250×5	90	左侧 15, 右侧 30
7	320×250×5	90	45

2.3 实验方法

按要求做好试件,炮孔中装药并插上起爆和同步信号探针,将试件固定在加载架上,炮孔两侧用铁夹夹紧。胶片装入相机暗盒内,并将暗盒在机架上固定好。设置延迟和控制器幅间隔,延迟时间为 100 μs ,由于炸药爆炸时能量释放是在极短时间内完成,所以幅间间隔时间较小,一般在 10~30 μs 。用来实现爆炸加载的炸药为叠氮化铅,炮孔直径为 8 mm,药量为 100 mg。

由于炸药爆炸时会产生炮烟,影响相机对焦散斑的有效记录,因此用导烟管减轻炮烟对拍摄效果的影响。另外,为了防止场镜有可能受到爆炸后模型碎片的损坏,需在模型两侧分别放置一块无应力透明氟化玻璃。

3 实验结果及分析

3.1 初始裂纹方向与节理面夹角不同时裂纹扩展规律

图 3 是初始裂纹方向与节理面不同夹角时爆后效果图。图 4 是试件的部分焦散线图。

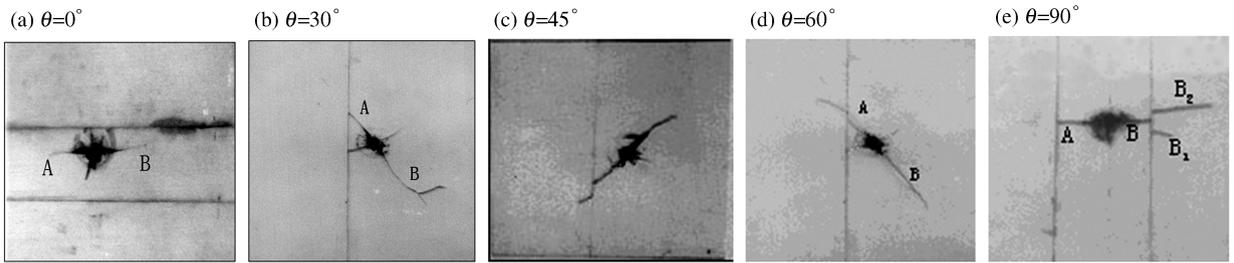


图 3 不同角度下爆破裂纹扩展图

Fig. 3 Propagation of blasting crack for different angles

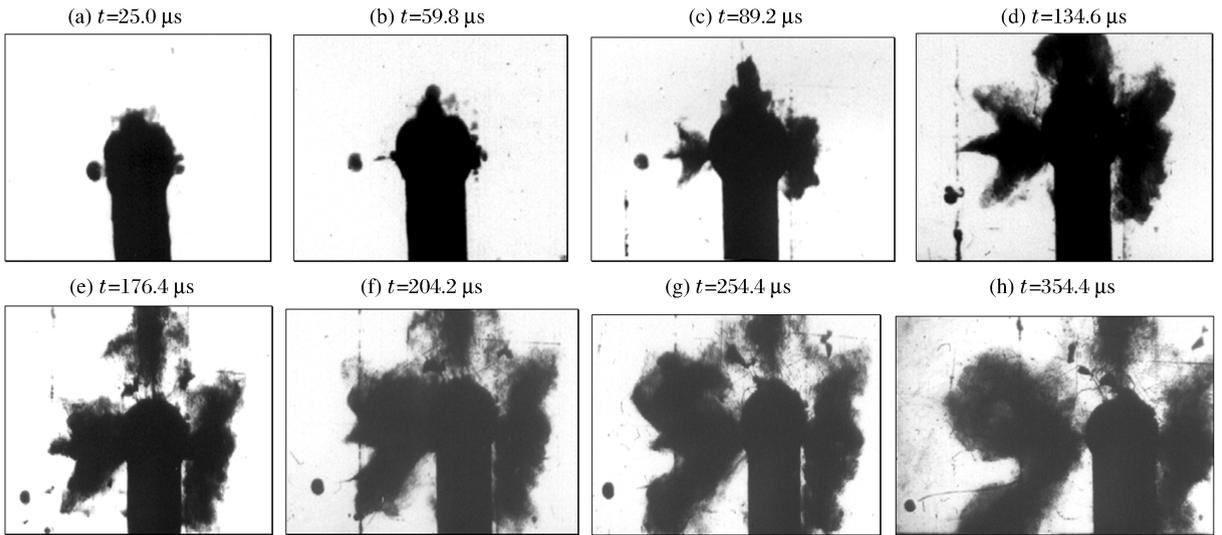


图 4 夹角为 90°时焦散图

Fig. 4 Photographs of dynamic caustics

从爆后效果图可观察到,试件 1 爆破后应力波在遇到节理面后产生反射,反射波的拉伸作用使得节理面一侧产生许多细小裂纹;另外,由于应力波(主要是膨胀波)遇到节理面后迅速衰减,所以试件 1 中产生的两条主裂纹的长度较短。当初始裂纹方向与节理面夹角为 30°时,裂纹没有穿过节理面继续向前扩展,而在节理一侧产生了一条次生裂纹,这也是由于应力波遇到节理面反射形成的拉伸波的作用。当初始裂纹方向与节理面夹角为 45°、60°和 90°时,炸药爆炸后裂纹沿爆炸初始裂纹方向扩展,当裂纹扩展至节理面时,裂纹则沿节理面发生偏转,偏转一段距离后,裂纹穿过节理继续扩展,扩展方向与原扩展方向基本平行。

裂纹遇到节理发生偏移的程度与裂纹扩展至节理面时的入射角度、炮孔与节理面的间距等多种因素有关^[9]。而且夹角越大,裂纹穿过节理面后向前扩展的距离越长,这说明,初始裂纹方向与节理面夹角接近或等于 90°时,裂纹最容易穿过节理面,并且在节理面另一侧的介质中扩展得更远。

通过测定底片上焦散斑的直径,根据式(1)和(2)可计算出裂纹尖端应力强度因子,再由焦散照片所对应的时刻,可以确定每一时刻裂纹尖端所在的位置和裂尖的应力强度因子。图 5 是试件 3、4 和 5 在破坏过程中,裂纹 A 的尖端和裂纹 B 尖端的动态应力强度因子 K_I 随时间 t 变化的曲线。通过测量不同时刻焦散线的位置,可求出不同时间段内裂纹的扩展速度,见图 6。

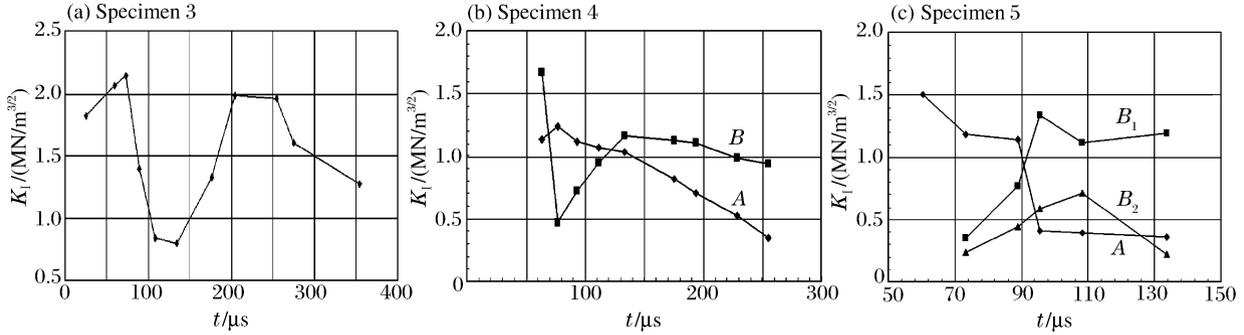


图 5 动态应力强度因子
Fig. 5 Dynamic stress intensity factor

图 5(a)中,裂纹扩展初期,应力强度因子逐渐增大,在到达第一个峰值后,随裂纹的扩展逐渐减小。当裂纹扩展至节理时, K_I 的值迅速减小,在裂纹穿过节理重新开始扩展时, K_I 逐渐增大,并到达第二个峰值,然后开始减小。第二个峰值明显小于第一个峰值,这说明节理对应力波有衰减作用。

由图 5(b)发现,裂纹 A 尖端扩展至节理时,应力强度因子最大,此时焦散斑最大,随着裂纹尖端扩展进入节理面, K_I 的值急剧减小,达到一个最小值。从焦散图推算裂纹尖端从进入节理面到穿过节理重新开始发展,经过 11~14 μs 的时间。随着裂纹 A 的尖端穿过节理后继续发展, K_I 的值逐渐增大,逐渐到达第二个峰值。由于节理的存在,第二个峰值比第一个峰值小。而裂纹 B 的强度因子的变化较为简单,随着爆破加载,强度因子开始升高,其应力强度因子值达到最大,但比裂纹 A 的最大值略小。随后裂纹 B 的强度因子大体成线性逐渐减小,直至裂纹停止扩展。

图 5(c)中,裂纹 B_1 、 B_2 是主裂纹 B 穿过节理后分叉形成的两个裂纹,当 B_1 和 B_2 裂纹尖端扩展时, K_I 逐渐增大,直至到达峰值后,才逐渐开始减小,直至裂纹停止扩展。从图中还可以看到, B_2 达到峰值的时间比 B_1 迟一些,而且 B_2 的峰值比 B_1 的峰值小。

在扩展至节理前,裂纹的生成是由冲击应力波和爆生气体共同作用的结果^[11-12],但在裂纹扩展穿过节理后,推动裂纹继续扩展的动力主要来自于应力波的作用,这是由于爆生气体迅速从节理面得到释放。

节理使得裂纹穿层产生偏移的原因可能是,炸药爆炸时产生一个冲击应力波,当它传播至节理面时将会产生反射,形成反射拉伸波。在拉应力作用下,节理面开裂形成一条裂纹。当运动裂纹扩展至该节理裂纹时,将会产生相互作用,导致扩展裂纹与节理汇合,在汇合的时间里,储存在运动裂纹尖部的能量将向节理裂纹的尖部传递,这可以从节理裂纹尖端的焦散斑尺寸变大来证明能量的积累过程。当能量积累到足够大时,将会产生一条新的裂纹。而当裂纹穿过节理沿新的裂纹扩展时,能量得到迅速释放,测得的动态强度因子急剧下降。

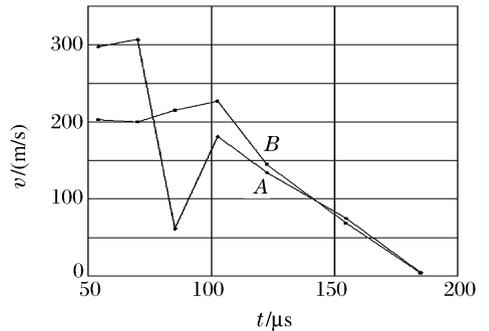


图 6 试件 4 裂纹扩展速度
Fig. 6 Velocity of crack extension of specimen 4

3.2 炮孔与节理距离对裂纹扩展的影响

图7是炮眼与节理间距不同时的爆破效果图。从图中可看到,当 $l=15\text{ mm}$ 时,爆生裂纹没有穿过节理继续扩展,而是在炮孔和节理间形成两条宽度较大的裂纹,两条裂纹的方向与节理面平行。

当 $l=30\text{ mm}$ 时,爆生裂纹在节理处偏移 8 mm 后,沿初始方向继续向前扩展,扩展长度为 52 mm 。当 $l=45\text{ mm}$ 时,爆炸后在节理两侧产生了三条较短的裂纹,这三条裂纹没有任何规律,没有一条主要的裂纹。所以可以认为,当 $l=45\text{ mm}$ 时裂纹很难穿过节理在节理另一侧继续扩展。

由实验可知,炮孔与节理间的距离对于爆生裂纹的扩展有着较明显的影响。当距离很小时(模型实验中 $l\leq 15\text{ mm}$),裂纹无法穿过节理面,只能使节理产生开裂和产生与节理平行的裂纹。其原因是由于节理距爆源太近,当爆生裂纹扩展至节理时,爆生冲击波和爆生气体的能量释放受阻,从而在炮孔与节理间沿爆炸初始裂纹方向形成了多条裂纹。另外,由于冲击波能量较强,所以在节理面处会产生很强的反射拉伸波,使得节理面开裂较大,导致能量的大量释放,因而裂纹无法穿过节理继续发展。当 $l=30\text{ mm}$ 时,裂纹扩展通过节理时的偏移距离逐渐减小,并且裂纹穿过节理继续扩展的长度较大。这是因为随着爆生裂纹的扩展,应力波的能量和爆生气体的压力都随之减弱。当炮孔与节理间距离较大时(实验中 $l=45\text{ mm}$),爆生裂纹一般无法穿过节理面,只能在使节理两侧产生一定程度的开裂。所以炮孔与节理间距离太小和过大都不利于裂纹的扩展,在对节理岩石进行断裂爆破时,应根据岩石的具体性质选择炮孔与节理间距,达到最佳断裂爆破效果。

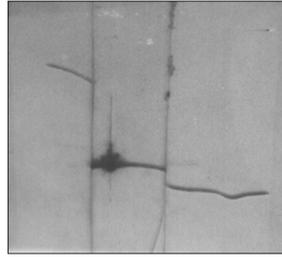
4 结 论

采用动焦散模型实验模拟含节理岩体中爆生裂纹的扩展规律,结果表明,节理面的存在对应力波具有较大的衰减作用,当爆生裂纹与节理面夹角较小($\theta\leq 30^\circ$)时,爆生裂纹很难穿过节理面继续扩展;当爆生裂纹与节理面夹角较大时($\theta\geq 45^\circ$)时,爆生裂纹到达节理面时,会沿节理面偏转一段距离后,大体沿原爆生裂纹的方向继续扩展;当爆生裂纹穿过节理面时,裂纹的扩展速度明显降低。炮孔与节理的距离对裂纹的扩展有很大的影响,距离过大或太小都不利于爆生裂纹的扩展。

参考文献:

- [1] Manogg P. Schottenoptische messung der spezifische bruchenergie wahrend des bruchvorgangs bei plexiglas[C]// Prins J A. International Conference on the Physics of Non-crystalline Solids. Amsterdam: North-Holland Pub Co, 1964:481-490.
- [2] Theocaris P S. Local yielding around a crack tip implexiglass[J]. Journal of Applied Mechanics, 1970,37:409-415.
- [3] Theocaris P S. Reflected shadow method for the study of constrained zones in cracked plants[J]. Applied Optics, 1972,10:2240-2247.
- [4] 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.
- [5] Kalthoff J F, Beinert J, Winkler S. Measurements of dynamic stress intensity factors for fast running and arresting cracks in double-cantilever-beam specimens[C]// Hahn G T, Anninen M F. Fast Fracture & Crack Arrest, Philadelphia, 1977:161-176.
- [6] 苏先基,刘承.焦散线实验方法综述[J].实验力学,1987,2(2):1-27.
SU Xian-ji, LIU Cheng. Summary of caustics experiment method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1987,2(2):1-27.

(a) $l_1=15\text{ mm}$, $l_2=30\text{ mm}$



(b) $l=45\text{ mm}$

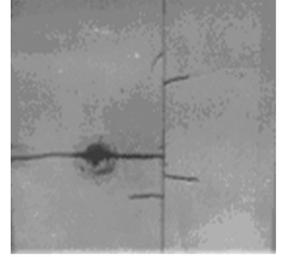


图7 炮眼与节理间距不同时爆破效果图

Fig.7 Photographs of blasting results for different distance between hole and joint

- [7] 苏先基, 雷志辉. 动态焦散线实验方法及其在断裂力学中的应用[J]. 力学学报, 1987, 19(4): 357-365.
SU Xian-ji, LEI Zhi-hui. Experimental method of dynamic caustics and its application in fracture mechanics[J]. Acta Mechanica Sinica, 1987, 19(4): 357-365.
- [8] 杨仁树, 边亚东, 程海燕, 等. 爆炸荷载下动态焦散图像的自动化处理[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(2): 133-137.
YANG Ren-shu, BIAN Ya-dong, CHENG Hai-yan, et al. Image processing for dynamic caustics under blasting loading[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(2): 133-137.
- [9] 李清, 杨仁树. 爆炸荷载及其裂纹扩展的应力强度因子及其断裂行为[J]. 煤炭学报, 2002, 27(3): 290-293.
LI Qing, YANG Ren-shu. Stress intensity factor and fracture behavior for crack propagation under blasting load[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(3): 290-293.
- [10] Kalthoff J F. Shadow optical method of caustics[C]// Kobayashi A S. Handbook on experimental mechanics. Englewood Cliffs, 1987: 430-500.
- [11] 姚学锋, 方竞, 熊春阳. 爆炸应力波作用下裂纹与孔洞的动焦散线分析[J]. 爆炸与冲击, 1998, 18(3): 231-236.
YAO Xue-feng, FANG Jing, XIONG Chun-yang. Dynamic caustics analysis of crack and hole under the explosive stress wave[J]. Explosion and Shock Waves, 1998, 18(3): 231-236.
- [12] 姚学锋, 方竞. 冲击荷载下扩展裂纹尖端动态能量释放率分布的焦散分析[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 caustics model experiment of blasting crack developing on sandwich rock

XIAO Tong-she^{1*}, YANG Ren-shu¹, ZHUANG Jin-zhao², LI Qing¹

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

2. Collage of Water Conservancy & Civil Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

Abstract: Using the dynamic caustic-test system, the PMMA model transmission-type experiment of dynamic caustics was carried out to simulate the blasting process of rock with joints. Varieties of dynamic intensity factors in the crack-tip field, extensions of cracks going through the joint planes for different distances between hole and joint were analyzed especially under the condition that the initial cracks and joint planes had different separation angles. Experimental results show that the dynamic intensity factor of the crack-tip and the extension speed decrease dramatically while the cracks go through joint planes but afterwards the intensity factor increases, that when the crack goes through the joint plane, it can deviate a short distance along the joint, and then continues to develop in its initial direction with respect to the appropriate distance between hole and joint.

Key words: solid mechanics; crack extension regularity; dynamic caustics; sandwich rock; stress intensity factor; blasting loading

* Corresponding author: XIAO Tong-she
E-mail address: xtshe@sohu.com
Telephone: 86-10-62331292-102