

文章编号: 1001-4888(2006)04-0539-07

含节理岩体爆生裂纹扩展的动焦散模型实验研究^{*}

肖同社¹, 杨仁树¹, 边亚东², 桂良玉¹, 李 清¹

(1. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 中原工学院 土木建筑工程系, 郑州 450007)

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不同夹角的情况下, 裂纹尖端动态应力强度因子的变化规律, 裂纹穿过节理面的扩展规律, 以及裂纹扩展速度的变化规律。实验结果分析表明, 爆生裂纹穿过节理面时, 裂纹尖端的动态应力强度因子和裂纹扩展速度显著下降, 穿过节理面后, 应力强度因子又有所增强; 裂纹穿过节理面时, 裂纹会沿节理面偏离一段距离后沿初始裂纹方向继续扩展。研究结果可以为节理岩体的断裂爆破提供理论依据。

关键词: 爆炸加载; 动态焦散线; 应力强度因子; 裂纹扩展规律

中图分类号: O328

文献标识码: A

随着工程技术的发展, 岩石断裂控制爆破技术逐步在工程中得到应用, 但在理论上, 由于岩石动态断裂的复杂性, 裂纹尖端应力、应变场至今仍未有解析解。近年来, 许多研究人员提出和采用了如动光弹、动云纹、全息干涉等多种测试技术, 做了一些有意义的研究, 但裂纹尖端应变奇异区域的动光弹的光学条纹非常密集, 无法直接得到裂纹尖端奇异应力区的力学信息。

焦散线实验方法由 Manogg^[1] 于 1964 年提出, 它非常适合于解决力学和光学的奇异性问题, 1970 年, 希腊学者 Theocaris^[2,3] 开始用这一方法去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, 1976 年, Kalthoff^[4,5] 等人将该方法扩展到动态断裂力学领域。1984 年, 北京大学力学系苏先基^[6,7] 等人用多火花式高速摄影系统对冲击载荷下裂纹动态扩展问题进行了研究。这种实验方法在测定裂纹尖端复杂应力、应变场中具有相当的优越性。

1997 年, 中国矿业大学杨仁树、李清^[8,9] 等人首次建立爆炸加载动态焦散线测试系统, 研究岩石中爆生裂纹的扩展机理, 这些研究主要着重于均质岩体爆生裂纹扩展规律的研究, 而实际的工程岩体中, 存在许多节理裂隙, 对岩石进行断裂爆破时, 这些节理裂隙对应力波的传播有很大的影响。所以, 研究爆生裂纹穿过节理面扩展的一般规律是非常重要的课题。本文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不同夹角的情况下, 节理对裂纹扩展的影响和裂纹尖端应力强度因子的变化。这些研究可以为含节理岩体的爆破参数的设计提供理论指导。

1 焦散线实验方法原理

1.1 焦散线的形成

对于含裂纹的受拉透明平面试样, 当一束平行光透过试样时, 由于试件厚度与折射率的变化, 平行光线会发生偏转, 离裂纹尖端越近, 光线偏转越严重; 离裂纹尖端越远, 光线偏转越小。这样, 透过试件的偏转光线在空间形成一包络面(焦散曲面)。在距试件距离 Z_0 处, 如果用一平行于试件平面的参考平

^{*} 收稿日期: 2006-02-02; 修订日期: 2006-05-29

基金项目: 高等学校博士学科点专项基金课题(20020290010)

通讯作者: 肖同社(1972—), 男, 博士生, 从事实验力学与结构工程方面的研究工作。E-mail: xtshe@sohu.com

面切割该包络面,就会得到一条包围着一个暗区的光线集中亮线,这个亮线就是焦散线,暗区即为焦散斑。如图 1、图 2 所示。

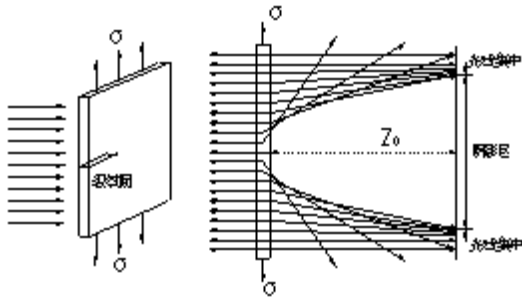


图 1 焦散线成像示意图

Fig. 1 Schematic illustration of caustics formation

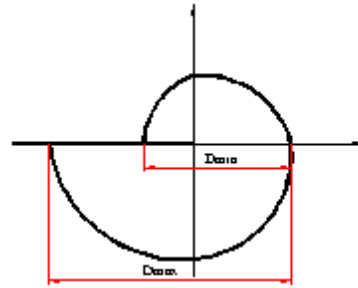


图 2 焦散曲线

Fig. 2 The curve of caustics

1.2 利用焦散线确定应力强度因子

国外的 Kalthoff^[10]及国内的苏先基、励争和刘承等^[6,11]详细分析了动态断裂过程中动态因素对焦散斑形状、尺寸的影响,为确定动态应力强度因子 K_I^d 提供了依据。在爆炸加载的作用下,裂纹附近受拉应力和面内剪应力的共同作用,裂纹尖端的应力为复合应力场,所以裂纹应视为 I、II 复合型裂纹。动态载荷下复合型扩展裂纹尖端的动态应力强度因子表达式为

$$K_I^d = \frac{2}{3} \frac{\sqrt{2\pi}}{g^{5/2} z_0 c d_{eff}} D_{max}^{5/2} \quad (1)$$

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

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,根据 $(D_{max} - D_{min})/D_{max}$ 来确定; g 为应力强度数值因子,它描述了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^d 、 K_{II}^d 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。

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) 计算出该时刻裂纹尖端的应力强度因子。

大量实验证明^[12], 改善实验条件和控制爆炸药量可以得到近似 I 型裂纹,特别是在裂纹扩展的前期,焦散斑能保持稳定的 I 型形状;在整个裂纹扩展过程中,裂纹主要表现为 I 型加载,正应力起主要作用。因此在应力强度因子变化中, K_I^d 始终大于 K_{II}^d , 所以后面的实验分析中仅对 K_I^d 进行分析。

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、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 $0 \sim 9999 \mu s$ 内可调。采用这种光电系统可拍摄到清晰的动焦散照片,图 3 为透射式焦散实验光路。

爆炸加载和同步控制系统的主要设备是北京大学研制的 DDGS-II 型多火花高速摄影仪。实验时在炮孔内放置两对探针,一对连接高压放电器,另一对接同步控制器。当高压起爆器使探针放电引爆起爆药时,另一对探针同时短路并输出一个短路信号给同步控制器,在预置延迟时间内,同步仪输出一个信号使点光源放电,从而实现爆炸加载和放电拍摄的精确同步控制。

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

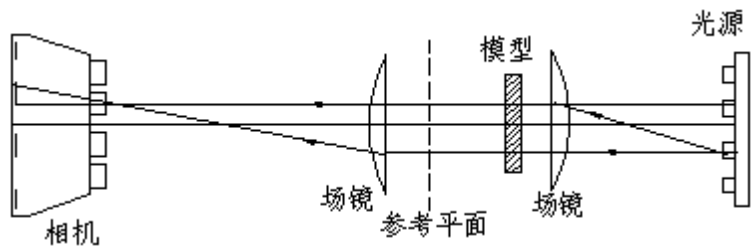


图 3 透射式聚焦实验光路图

Fig. 3 Experimental optical system for dynamic caustics

性的,所以产生单聚焦曲线,有利于对聚焦图像的分析,提高分析结果的精度。有机玻璃试件的动态力学参数见表 1。

节理的制作方法是,将有机玻璃板沿预定位置划出一道痕迹,然后沿划痕折断,在断面上涂环氧树脂胶将断板粘合,调节环氧树脂胶中固化剂的配比,使其既具有一定的粘性而粘结力又不太高,来模拟节理面。爆破加载时在平行于节理的板端放置两根钢条,并用钢夹夹紧。在炮孔上用薄刀片划出预裂纹(初始裂纹),裂纹长度为 2~3mm,裂纹方向与节理夹角分 0°、30°、45°、60°、90°五种情况,各试件具体参数见表 2。

表 1 有机玻璃试件的动态力学参数

Tab. 1 Dynamic mechanical parameters of specimens

参 数	纵波 C_1 (m/s)	横波 C_2 (m/s)	E_d (GPa)	泊松比 ν_d	$ C_t $ (m^2/N)
数 值	2179	1090	4.6	0.38	0.86×10^{-10}

表 2 试件尺寸参数表

Tab. 2 Size parameters of specimen

编号	试件规格 (mm×mm×mm)	爆炸初始裂纹与节理夹角	炮眼与节理距离 (mm)
1-1	320×220×5	0°	左侧 25,右侧 15
1-2	290×220×5	30°	20
1-3	290×220×5	45°	20
1-4	290×220×5	60°	20
1-5	320×250×5	90°	右侧 20,左侧 30

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。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,爆炸加载的瞬时性比一般的动载荷明显的多,所以幅间间隔时间要调整的较小,一般在 10~30 μs 之间。用来实现爆炸加载的炸药为叠氮化铅,炮孔直径为 8mm,药量为 100mg。

由于炸药爆炸时会产生炮烟,影响相机对聚焦斑的有效记录,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 实验结果

图 4 是初始裂纹方向与节理面不同夹角时爆后效果图。图 5 是试件的部分聚焦线图。

3.2 实验分析

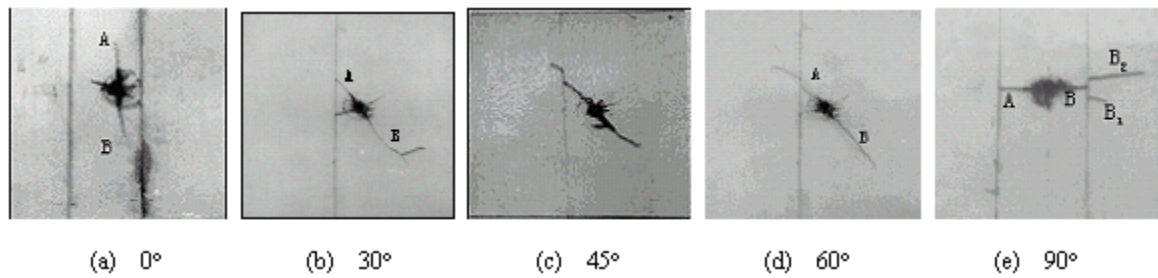


图 4 不同角度下爆破裂纹扩展图

Fig. 4 Propagation of blasting crack for different angles

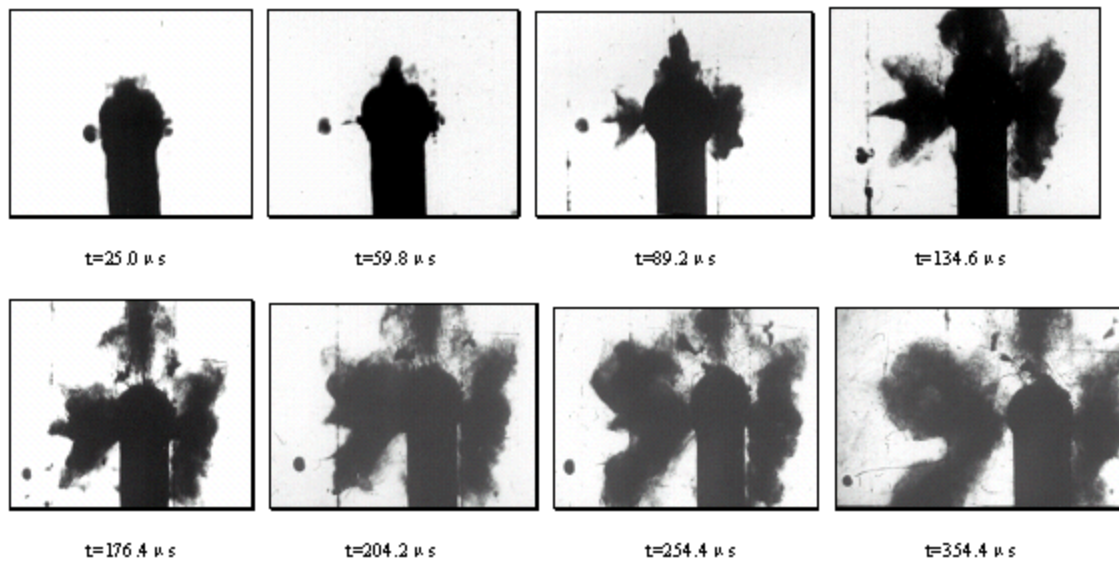


图 5 夹角为 90°时的焦散图

Fig. 5 Photographs of dynamic caustics

从爆后效果图可观察到,试件 1-1 爆破裂纹沿初始裂纹方向扩展成 A 和 B 两条主裂纹,同时在炮孔周围产生了许多较小的次裂纹。这是因为爆轰波在遇到节理面后反射,产生一拉伸应力波,拉伸应力波的作用使得节理面一侧产生次裂纹;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 1-1(图 4(a))中产生的两条主裂纹(A)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裂纹,这也是由于应力波遇到节理面反射后形成的拉伸应力波的作用。

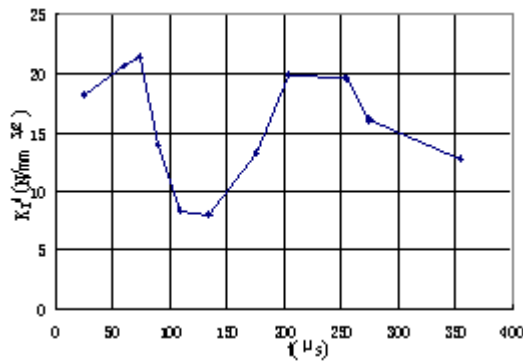
当初始裂纹方向与节理面夹角为 45°、60°和 90°时,炸药爆炸后裂纹沿爆炸初始裂纹方向扩展,当裂纹扩展至节理面时,裂纹则沿节理面发生偏转,偏转一段距离后,裂纹穿过节理继续扩展,扩展方向与原扩展方向基本平行。

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,而且随着夹角的增大,裂纹穿过节理面向前扩展的距离越长,这说明,初始裂纹方向与节理面夹角为 90°或接近 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的更远。

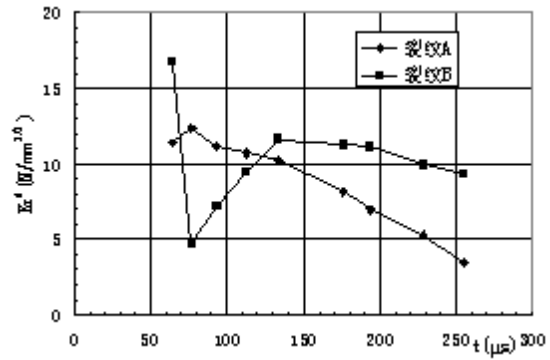
从焦散线图可以观察到,当运动裂纹尖端抵达节理时,焦散曲线的尺寸突然减小,焦散斑沿节理面移动,并且焦散斑的尺寸比刚入射时的小得多。移动一段距离后,此时焦散斑的尺寸逐渐加大,然后随裂纹穿过节理重新扩展而向前移动。

通过测定底片上的焦散斑直径,根据式(1)和(2)可计算出裂纹尖端应力强度因子值(在这里只对 K_I^d 进行分析);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值,并绘制成 $K_I^d - t$ 曲线。图 6 是试件 1-3、1-4 和 1-5 在破坏过程中,裂纹 A 和裂纹 B 尖端的动态

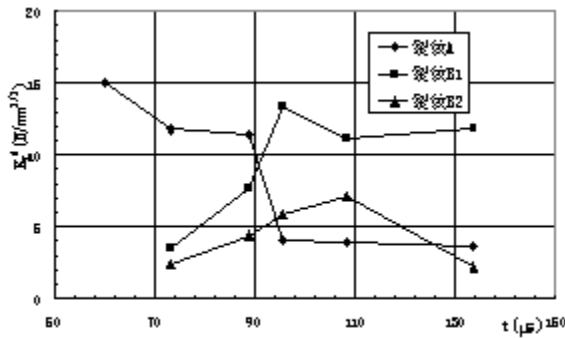
应力强度因子 K_I^d 随时间 t 变化曲线。通过测量不同时刻焦散线的位置,求出不同时间段内裂纹的扩展速度,绘制成 $v-t$ 曲线图,图 7 是试件 1-4 的 $v-t$ 曲线图。



(a) 试件 1-3 的 K_I^d-t 曲线



(b) 试件 1-4 的 K_I^d-t 曲线



(c) 试件 1-5 的 K_I^d-t 曲线

图 6 试件的 K_I^d-t 曲线

Fig. 6 Dynamic stress intensity factor

图 6(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^d 的值迅速减小,在裂纹穿过节理重新开始扩展时, K_I^d 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,这说明应力波通过节理面时会迅速衰减。

由图 6(b)发现裂纹 A 尖端扩展至节理时,焦散斑最大,随着裂纹尖端扩展进入节理面, K_I^d 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,大约经过 $11\mu s \sim 14\mu s$ 左右的时间。随着裂纹 A 的尖端穿过节理后继续发展, K_I^d 的值逐渐增大,逐渐达第二个峰值。由于节理的存在,第二个峰值比第一个峰值小。而裂纹 B 的应力强度因子随着爆破加载开始升高,然后达到最大,但比裂纹 A 的最大值略小。随后裂纹 B 的 K_I^d 的值大体成线性逐渐减小,直至裂纹停止扩展。

图 6(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,从图中可看到, B_1 和 B_2 裂纹尖端扩展时, K_I^d 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 的峰值要小。

3.3 机理分析

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^[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,这是由于裂纹在穿层时产生了偏移,从而导致爆生气体难以继续对裂纹扩展产生作用。

由于应力波入射至节理面时会产生反射,形成一个反射拉伸波,使得节理在入射点附近产生小裂隙,随着裂纹尖部扩展至节理面,裂尖将沿小裂隙向尖部发展,由于存在一定的入射角度,所以在两裂纹

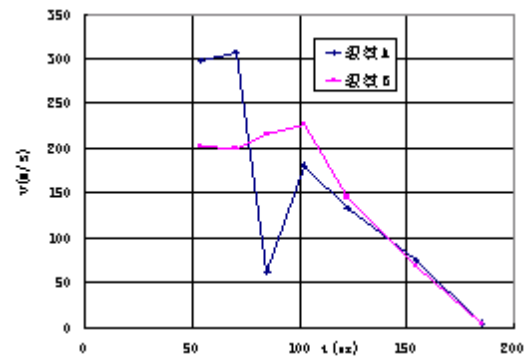


图 7 试件 1-4 裂纹扩展速度 $v-t$ 曲线

Fig. 7 The curve of velocity versus time

汇合的过程中,裂尖的应力场将会产生重新分布。当入射角过小时,沿节理方向的应力分量将大于垂直于节理方向的分量,所以当两裂纹尖部重合时,并不会沿裂纹入射时的方向越过节理继续扩展,而是沿节理方向向前发展,其结果是导致节理开裂。

节理使得裂纹穿层产生偏移的原因是炸药爆炸时产生一个冲击应力波,当其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。在以上的过程中,节理起到了一个能量汇集的作用,使得裂纹无法直接沿原方向直接穿过节理而继续扩展。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。

4 结论

本文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,当爆生裂纹与节理面夹角较小($\leq 30^\circ$)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($\geq 45^\circ$)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,裂纹的扩展速度会明显降低。

参考文献:

- [1] Manogg P. Schottenoptische messung der spezifische bruchenergie wahrend des bruchvorgangs bei plexiglas[C]. International Conference on The Physics of Non-crystalline Solids, Netherlands, 1964:481~490.
- [2] Theocaris P S. Local yielding around a crack tip in plexiglass[J]. J. App. Mech., 1970,37:409~415.
- [3] Theocaris P S. Reflected shadow method for the study of constrained zones in cracked plants[J]. App. Optics, 1972,10:2240~2247.
- [4] Kalthoff J F, Winkler S, Beinert J. Dynamic stress-intensity factors for arresting cracks in DCB specimens[J]. Int. J. 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]. Fast Fracture & Crack Arrest. ASTM STP627, 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(Sun Xianji, Liu Cheng. Summary of caustics experiment method. Journal of Experimental Mechanics, 1987,2(2):1~27(in Chinese))
- [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 Xianji, Lei Zhihui. Experimental method of dynamic caustics and its application in fracture mechanics. ACTA Mechanica SINICA, 1987,19(4):357~365(in Chinese))
- [8] 杨仁树,边亚东,程海燕,周小欢. 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 Renshu, Bian Yidong, Cheng Hanyan, Zhou Xiaohuan. Image processing for dynamic caustics under blasting loading. Journal of China University of Mining & Technology, 2005,34(2):133~137(in Chinese))
- [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 Qiang, Yang Renshu. Stress intensity factor and fracture behavior for crack propagation under blasting load. Journal of China Coal Society, 2002,27(3):290~293(in Chinese))
- [10] Kalthoff J F. Shadow optical method of caustics[M]. Handbook of experiment mechanics. Ed by A. S. Kobayashi, chap. 9, 1987:430~500.
- [11] 樊金武,励争,王文彦. 用焦散线方法测量集中载荷的误差分析[J]. 实验力学,2003,18(2):145~150(Fan Jinwu, Li Zheng, Wan Wenyan. The measuring error for concentrated load by caustics. Journal of Experimental Mechanics, 2003,18(2):145~150(in Chinese))
- [12] 刘继敏. 控制爆破动焦散图像的计算机自动处理[D]. 北京:中国矿业大学力学与建筑工程学院,硕士学位论文,2002((Liu Jimin. Image Processing for Dynamic Caustic in controlled blasting. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing,2002 (in Chinese))

Dynamic Caustics Model Experiment of Blasting Crack Propagating on Joint Rock

XIAO Tong-she¹, YANG Ren-shu¹, BIAN Ya-dong², GUI Liang-yu¹, LI Qing¹

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

2. Department of Civil Engineering and Architecture, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: The blasting processes of rock with joints, which had different separation angles between the initial crack and joint plane, were studied using the dynamic caustic experiment and PMMA model. The evolution of dynamic intensity factor in the crack-tip field was studied in experiment. And the mechanism of crack propagation while the crack runs through the joint plane was analyzed. In addition, the crack propagating speed was obtained as well. The experimental results show that the dynamic intensity factor at the crack-tip and the propagating speed decreased dramatically while the cracks propagated through joint plane, but afterwards, the intensity factor enhances. When the crack runs through the joint plane, it would deviate a short distance along the joint, and it would continue to propagate in its initial direction. The results of the present research can provide the theoretical basis about the blasting fracture of rock mass with joints.

Key words: blasting loading; dynamic caustics; stress intensity factor; crack extension regularity