

文章编号: 1001-4888(2012)06-0757-07

爆炸载荷下非透明介质断裂的焦散线实验方法^{*}

杨立云¹, 杨仁树^{1,2}, 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. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 首次把焦散线实验方法应用于非透明介质在爆炸载荷作用下的断裂问题的研究。在采用 DDGS-II 型多火花式高速摄影和反射式焦散线光路系统基础上, 改进了镜面移植的试件加工方法, 实现了较大面积的镜面移植; 设计了可多角度调节的爆炸加载架, 引进切槽控制爆破技术, 满足了爆生裂纹穿过镜面区的要求和摄影记录测量要求。并应用该实验方法, 进行了两种非透明介质(人造石和 PVC)爆炸致裂的焦散线实验, 得到爆生裂纹在人造石和 PVC 试件扩展过程中不同时刻的焦散线照片, 分析了人造石试件中爆生裂纹的运动学和力学行为特征。爆炸加载反射式焦散线实验方法拓展了焦散线实验的应用范畴, 为研究非透明介质的爆炸动态断裂问题提供了方法。

关键词: 爆炸载荷; 焦散线; 非透明介质; 人造石; 聚氯乙烯

中图分类号: O348

文献标识码: A

0 引言

爆炸载荷作用下, 被爆破物体(岩石、混凝土、金属等)的动态断裂问题是其核心问题。光测力学实验方法是动态断裂研究中首选的方法, 其中, 焦散线实验方法对于解决裂纹尖端应力奇异性问题, 研究裂纹尖端场的应力集中和裂纹扩展行为具有优越性。

焦散线实验方法最早是由 Manogg^[1] 在 1964 年提出来的, 但当时并没有引起人们的重视。直到 1970 年, Theocaris^[2] 开始用这一方法去确定裂纹尖端附近塑性区的尺寸和裂纹尖端的位置及应力强度因子, 使焦散线方法日臻完善, 引起了人们浓厚的兴趣。Theocaris^[3] 在 1971 年又提出了反射式焦散线法, 使这一方法可用于研究金属和岩石等非透明材料的断裂力学性能和裂纹扩展过程。1981 年, Theocaris^[4] 又将反射式焦散线法从用于测定 I 型和 II 型应力强度因子, 推广到可用于测定 III 型应力强度因子, 他推导了反射情况下 I 型、II 型和 III 型应力强度因子与焦散斑的形状和尺寸之间的关系。Kalthoff 等^[5] 从 1976 年开始把焦散线方法应用到动态断裂力学问题的研究, 从此引起了人们对动态焦散线方法和应用这一方法去研究动态断裂问题的极大兴趣。国内学者也开展了大量焦散线实验研究。1985 年, 党进宝^[6] 提出了在试件表面进行镜面移植技术, 用该方法可以对非透明材料但表面光滑的钢材进行断裂研究, 因而扩展了焦散线的应用范围。苏先基^[7] 等发展了反射式冲击载荷作用下的动态焦散线系统, 采用镜面移植技术研究了水泥环和金属的动态焦散实验。杨仁树^[8] 将焦散线方法用于爆炸加载材料的断裂问题, 建立了爆炸加载焦散线实验系统, 进行了爆炸载荷下裂纹扩展规律的实验研究。但是爆炸载荷下的焦散线实验都是采用 PMMA 材料来模拟爆生裂纹在介质中(主要是岩石)的力学行为特征, 而

^{*} 收稿日期: 2012-03-29; 修订日期: 2012-06-20

基金项目: 国家自然科学基金煤炭联合基金重点项目(No. 51134025)和中央高校基本科研业务费项目(No. 2011QL06)资助

通讯作者: 杨立云(1983—), 男, 博士, 讲师。主要研究领域: 工程爆破、实验力学、动态断裂力学等。E-mail: yangly@cumt.edu.cn

工程实际中,更多的介质是非透明的,因此对爆炸载荷下非透明介质材料的断裂进行反射式焦散线实验研究,具有重要的意义。

1 焦散线实验原理

考虑一块带裂纹的平板,受拉应力作用,在拉应力的作用下,平板裂纹附近的厚度以及材料的折射率发生变化,这两种变化都对光线的偏转具有相同的作用。假设一束平行光垂直入射到平板的左侧,光线透过平板无变形部分后没有偏转,但在平板的裂纹附近,光线发生偏转。因此,在试件后面(即试件右侧)的任意平面(像平面或者参考平面)内,光强分布不再是均匀的。某些光线照射不到的区域变暗,而另一些区域由于光强加倍而亮度倍增。在参考屏上可以直观显现光强分布情况,得到的图像就是平板内应力分布的定量描述。通过透射或者反射等不同方式,可以以实像或虚像的形式观察到焦散线的分布。图 1 是成像原理示意图。

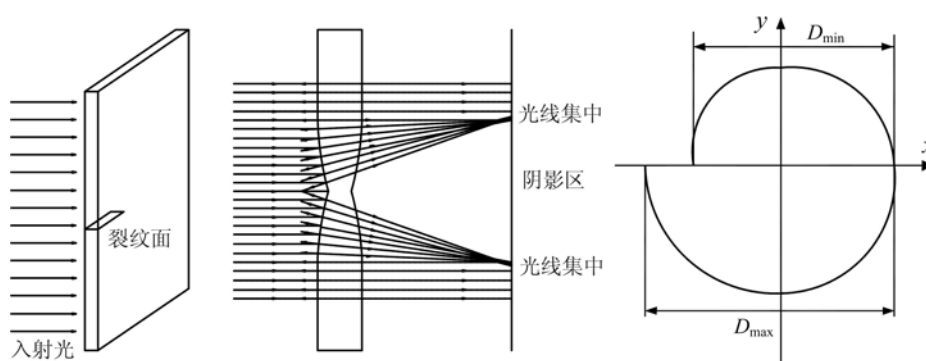


图 1 裂纹尖端焦散线成像原理示意图

Fig. 1 Diagram of caustics imaging principle of the crack tip

根据焦散斑的尺寸,可以得到裂纹尖端的应力集中程度。Kalthoff^[9]给出了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:

$$K_I = \frac{2}{3} \frac{\sqrt{2\pi} F(v)}{g^{5/2} z_0 c d_{eff}} D_{max}^{5/2}, \quad K_{II} = \mu K_I \quad (1)$$

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(见图 1); 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; μ 为应力强度因子比例系数; g 为应力强度因子数值系数; 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 型应力强度因子。一般情况下,在较低的裂纹扩展速度时, $F(v)$ 近似等于 1。对于给定的实验条件, d_{eff} 、 c 和 z_0 均为常数,只要利用动态焦散线确定扩展裂纹尖端的焦散斑直径,就可以确定不同时刻动态应力强度因子。

2 爆炸加载反射式焦散线实验方法

2.1 实验光路及设备

反射式焦散线法的实验光路由多火花高速照相机与双场镜及一个半反射镜共同组成,如图 2 所示。北京大学力学系研制的 DDGS-II 型多火花式高速摄影系统有 4×4 个相机镜头,分别记录 4×4 个火花放电产生的光经试件表面反射形成的焦散线图像。通过延迟控制系统控制 16 个点光源依次间隔放电,点光源发出的光线经过两个场镜和半反镜等透射和反射后,进入对应的 16 个相机镜头内,相机镜头记录下每一次放电瞬时的像,即完成了高速摄像。

2.2 试件加工技术

反射式焦散线法对试件表面的反光性能有较高要求,一般多采用镜面移植法进行镜面制作。对于爆炸加载试件,需要移植的镜面面积较大,给实验带来很大的困难。通过采用改进的镜面移植方法,成功移植成功了 $60\text{mm} \times 60\text{mm}$ 的镜面,环氧树脂胶和铝膜的厚度控制在 0.1mm 以内,它们对试件断裂

过程的影响可以忽略不计。具体的操作流程为:

(1)首先在全息干板的表面进行镜面制作:先对全息干板进行超声波清洗,待干板晾干后,进行脱膜处理,在一侧表面上涂光刻胶,并用离心机甩平;用真空镀膜机将铝蒸镀到干板胶层表面上,这样在全息干板的表面上形成了一层均匀的铝膜。(2)用脱脂棉沾取丙酮或酒精等有机溶剂彻底清洗试件表面,随后在试件表面均匀地涂一层环氧树脂胶;然后将全息干板镀膜的一面覆盖粘贴于试件涂胶处,并在全息干板的另一面涂胶,粘结玻璃板条,加一定重量的砝码将三者压紧,使干板与试件表面充分接触并粘结在一起。(3)待环氧树脂胶完全固化后(要求光刻胶与滤膜的粘结力小于滤膜与环氧树脂胶的粘结力),用力揭取玻璃板条,玻璃板条将带动全息干板与试件分离,铝膜就从干板上移植转贴到试件表面上,在试件表面上形成了反射镜面。图3为镜面移植示意图。

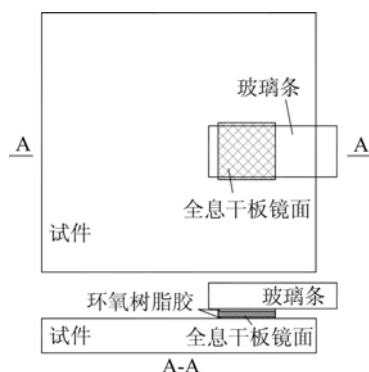


图3 镜面移植示意图

Fig.3 Diagram of mirror transplantation

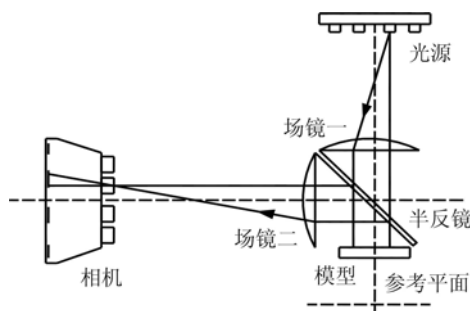


图2 反射式焦散线光路系统示意图

Fig.2 Diagram of optical system of reflection type caustics

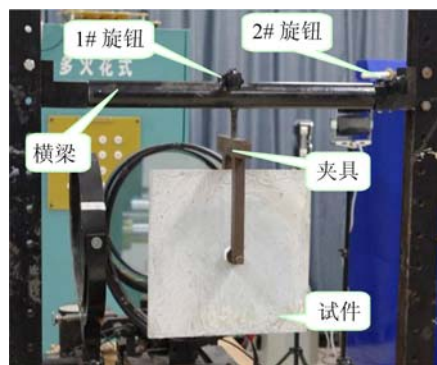


图4 爆炸加载架

Fig.4 Explosive loading frame

2.3 爆炸加载技术

实验室爆炸加载方法是采用少量敏感度高的单质炸药(叠氮化铅)制成的药包进行起爆。首先把自制药包放入试件中的炮孔中,药包内布置两组探针,其中一组连接高压起爆器,利用起爆器高压放电产生的火花引爆炸药;另一组连接延迟与控制器,传递触发信号给高速摄影系统。

装填药包的试件固定在爆炸加载架上,并放置于焦散线实验光路中。要求加载架需具备调控试件左右旋转和前后倾角的功能。实验中用到的加载架如图4所示,主要由一可上下旋转的横梁和一挂置于横梁上可左右旋转的试件夹具组成。横梁上的2#旋钮可以调控试件前后倾角,横梁上的1#旋钮用来控制试件左右旋转。通过这两个旋钮实现试件的左右和前后倾角方向的控制,使光线经过试件上反射区的反射后,满足实验光路系统的要求。

药包起爆后,在爆炸应力波和爆生气体作用下,药包四周的介质将产生大量的爆生裂纹,这些裂纹的分布具有很大的随机性。为了使爆生主裂纹穿过试件上的镜面区,采用定向控制爆破技术,控制爆生主裂纹的传播方向,便于实验过程中的观测。常用的定向控制爆破技术主要有切缝药包和切槽爆破两种,使爆生主裂纹沿切槽或切缝方向起裂和扩展,在炮孔四周的其他方向上产生的裂纹将大大减少。为了减少炮眼对实验结果的影响,实验过程中采用导烟管,便于实验过程中对爆生裂纹的观测。

2.4 数据处理技术

根据焦散线实验记录下不同时刻裂纹尖端的位置,可以得到裂纹扩展距离与时间的关系,进而可以根据多项式拟合法求得裂纹不同时刻的速度值。首先,近似拟合裂纹扩展长度 l 与时间 t 的变化关系,将裂纹的扩展位移 l 拟合成时间的 n 次多项式如下:

$$l(t) = \sum_{i=0}^n l_i t^i \quad (2)$$

然后,对该二项式(2)进行一次导数,得到裂纹扩展的速度曲线,进行二次导数,得到裂纹扩展的加速度曲线,公式如下:

$$v = \dot{l}(t) \quad a = \ddot{l}(t) \quad (3)$$

3 应用实例

3.1 实验描述

采用上述实验方法和技术,分别对人造石和 PVC 两种材料进行爆炸加载反射式焦散线实验。实验中采用 $300\text{mm} \times 300\text{mm} \times 8\text{mm}$ 厚的人造石板和 $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的 PVC 板。根据声波测试法,测得两种材料的基本力学参数如表 1 所示。在试件中部加工一圆形炮孔,炮孔直径为 6mm ,并在炮孔的一直径方向加工双对称切槽,槽深 2mm ,切槽角度为 60° 。然后,在靠近切槽一侧距炮孔中心 60mm 的位置进行镜面移植,移植镜面规格为 $60\text{mm} \times 60\text{mm}$ 。最后,分别在两块试件的炮孔中装填 140mg 和 200mg 的叠氮化铅炸药,进行爆破实验。实验光路选取的参考平面距离 z_0 为 900mm 。

表 1 人造石和 PVC 的波速和力学参数表

Tab. 1 Wave velocity and mechanical parameters of Artificial stone and PVC

Specimen	density $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	P-wave velocity $C_p(\text{m}/\text{s})$	S-wave velocity $C_s(\text{m}/\text{s})$	elastic modulus $E_d(\text{GN}/\text{m}^2)$	Poisson ratio ν_d	Shear modulus $G_d(\text{GN}/\text{m}^2)$	Optical sonstant $c(\text{m}^2/\text{GN})$
人造石	2322	3410	1800	19.66	0.307	75.23	0.031
PVC	1380	2750	1250	5.907	0.37	2.156	0.125

3.2 实验结果与分析

爆破后的试件见图 5 和图 6。人造石板经爆炸后沿着双切槽方向均匀的断成两块(如图 5 所示),爆生裂纹从镜面区中间穿过,在炮孔的其他方向上,没有形成明显的裂纹。而 PVC 试件,由于其韧性较大,爆炸载荷只在试件的切槽方向上产生了一条裂纹(如图 6 所示),在炮孔四周的其他方向上,没有产生明显裂纹。

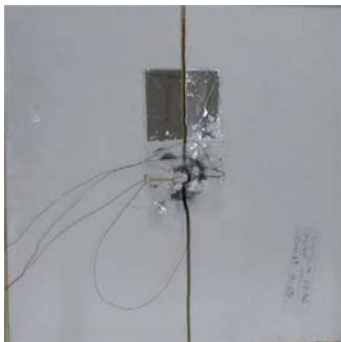


图 5 爆炸实验后的人造石照片

Fig. 5 Artificial stone specimen after blasting



图 6 爆破后的 PVC 试件照片

Fig. 6 PVC specimen after blasting

拍摄的焦散线照片分别如图 7 和 8 所示。由图可以看到不同时刻爆生裂纹尖端的位置和裂纹尖端出现的焦散斑。其中,PVC 材料的焦散斑直径较人造石材料要大。对实验照片进行高分辨率的扫描和图像分析软件的读图后,可以清晰区分焦散斑的形状和尺寸大小。下面以人造石材料的实验结果为例,对其进行分析(对 PVC 材料的爆炸致裂机理分析另文发表)。

由于试件镜面面积有限,实验过程中只记录下爆生裂纹在试件中传播的一小段轨迹,记录的数据有限。根据焦散线实验记录下不同时刻裂纹尖端的位置,利用公式(2)和(3)得到裂纹扩展距离与时间的

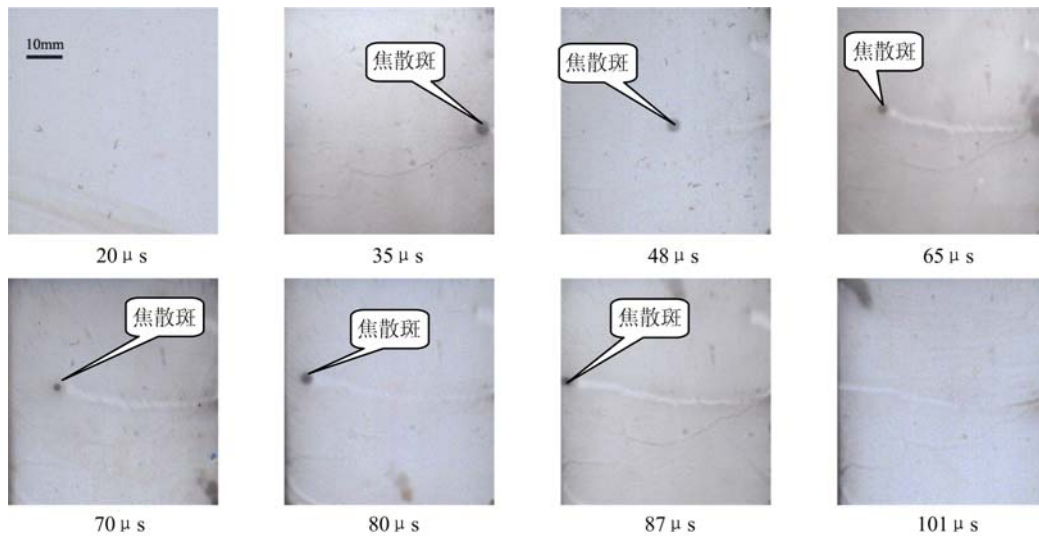


图7 人造石的焦散斑系列照片(注:图中10mm为该系列照片的比例尺)

Fig. 7 Series of shadow spot photographs of artificial stone

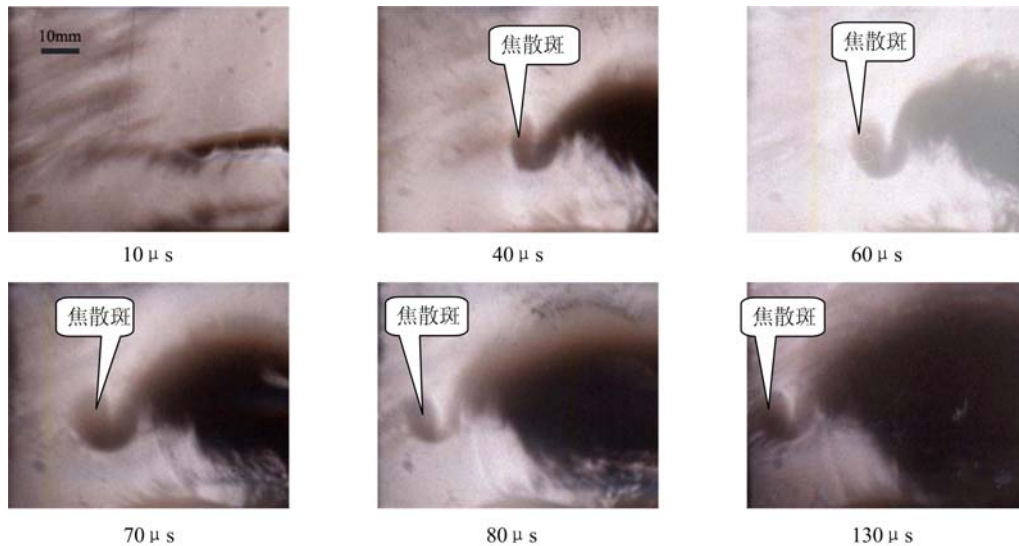


图8 PVC的焦散斑系列照片(注:图中10mm为该系列照片的比例尺)

Fig. 8 Series of shadow spot photographs of PVC

关系曲线和速度时间曲线,结果如图9所示。从图中可见,裂纹扩展的速度是逐渐下降的,在 $35\mu\text{s}$ 时裂纹传播到镜面区,此时裂纹的速度大约为 800m/s ,扩展的长度为 58mm (距离切槽尖端);在 $86\mu\text{s}$ 时裂纹穿透镜面区,此时裂纹的速度下降为 400m/s ,扩展的长度为 104mm 。从图上还可以看到,裂纹的扩展速度在 $70\mu\text{s}$ 时出现波动性,出现了小幅回升,随后又逐渐下降。这是由于应力波在试件边界发生反射,形成反射应力波,该应力波与扩展的裂纹相遇并互相作用,促进了裂纹的扩展速度。

爆生裂纹扩展的初始阶段,主要表现为I型断裂模式,把测得的焦散斑特征长度和相关实验参数代入公式(1),得到人造石中爆生裂纹尖端的动态应力强度因子值,并绘制应力强度因子与时间的关系曲线,如图10所示。从应力强度因子与时间的变化曲线图上看到,裂纹尖端的动态应力强度因子在 $35\mu\text{s}$ 时大约为 $0.41\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,然后逐渐下降,在 $70\mu\text{s}$ 时出现回升。这是由于反射应力波与扩展裂纹尖端相互作用,促进了裂纹尖端的应力集中,导致动态应力强度因子值升高。

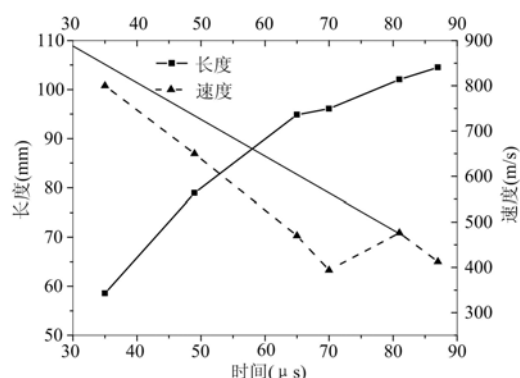


图 9 裂纹扩展距离—时间和速度—时间曲线

Fig. 9 The crack propagation and speed versus time

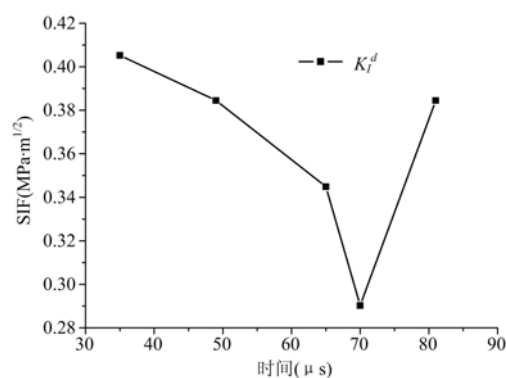


图 10 应力强度因子—时间曲线

Fig. 10 Dynamic stress intensity factor K_I versus time

4 结论

文中建立了爆炸加载反射式焦散线实验系统,提出用控制爆破与镜面移植相结合的实验技术解决爆炸加载反射式焦散线实验的关键问题,并采用人造石和 PVC 材料进行了爆炸加载反射式焦散线实验,对该实验方法和技术进行了实例验证,证明了建立的爆炸加载反射式焦散线实验系统和技术对研究非透明材料中爆生裂纹是可行的,该实验方法为研究爆炸载荷下非透明介质中裂纹的扩展规律提供了实验基础设备和实践指导,拓展了焦散线实验的应用范畴。

参考文献:

- [1] Manogg P. Anwendung der schattenoptik zur untersuchung des zerzeissvorgangs von platten[D]. West Germany: University of Freiburg, 1964.
- [2] Theocaris P S. Local yielding around a crack tip in plexiglas[J]. Journal of Applied Mechanics, 1970, 37(2): 409—415.
- [3] Theocaris P S. Reflected shadow method for the study of constrained zones in cracked plates[J]. Applied Optics, 1971, 10(10): 2240—2274.
- [4] Theocaris P S. The reflected caustics method for the evaluation of mode III stress intensity factor[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1981, 23(2): 105—117.
- [5] Kalthoff J F, Beinert J, Winkler S. Dynamic stress intensity factors for arresting cracks in DCB specimens[J]. International Journal of Fracture, 1976, 12: 317—319.
- [6] Dang J B. Application of the caustic technique to any materials by flicker's mirror transplantation method[C]. International Conference on Experimental Mechanics, Peking, 1985.
- [7] 苏先基, 励争. 用反射式动态焦散线法测定金属材料的动态断裂性能[C]. 北京: 第六届全国实验力学学术会议论文集, 1989 (SU Xianji, LI Zheng. Measurement of dynamic fracture of metallic materials by reflect caustics method[C]. Beijing: The Proceedings of Sixth Experimental Mechanic Conference, 1989 (in Chinese))
- [8] 杨仁树, 桂来保. 焦散线方法及其应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1997 (YANG Renshu, GUI Laibao. Caustics method and its application[M]. Xuzhou: Press of China University of Mining & Technology, 1997 (in Chinese))
- [9] Kobayashi A S. Handbook on Experimental Mechanics[M]. Prentice Hall, 1993.

Experimental Method of Caustics for Non-transparent Medium Fracture under Blasting Load

YANG Li-yun¹, YANG Ren-shu^{1,2}, XU Peng¹

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

2. State Key Laboratory for GeoMechanics & Deep Underground Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: Using DDGS-II multi-spark high speed photography and reflected caustics optical path, experimental caustics method is firstly applied to fracture study in non-transparent medium under blasting load. Larger area mirror transplanting was achieved based on improving mirror-transplanting method for specimen fabrication. Based on introducing notch-controlled blasting technology and designing a blast loading frame with multi-angle adjusting function, blast-induced-crack propagating path can be controlled to pass through the mirror area and can be recorded successfully by high speed photography. Using this method, fracture in two non-transparent mediums (artificial stone and PVC) was studied successfully and photos describing blast-induced-crack propagation in artificial stone and PVC specimens at different moments were obtained. Kinematics and mechanical behavior characteristics of blast-induced-crack in artificial stone specimen were analyzed. Experimental method of caustics for non-transparent medium fracture under blasting load expands the application of caustics and is helpful to the study of fracture in non-transparent medium under blasting load.

Keywords: blasting load; caustics; non-transparent medium; artificial stone; polyvinylchloride (PVC)