

文章编号:0253-9993(2010)09-1456-05

含倾斜边裂纹岩石冲击断裂模拟试验

岳中文¹,杨仁树¹,孙中辉^{1,2},肖同社¹,韩鹏飞¹

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083;2. 新汶矿业集团有限责任公司,山东 新泰 271233)

摘要:为模拟岩石在冲击荷载下,裂纹与加载方向不同角度情况下的断裂行为,利用透射式焦散线测试系统,采用单边切口三点弯曲梁试件,进行三点弯曲梁冲击断裂试验。研究表明:含倾斜边裂纹试件受到正应力和剪切力作用,裂纹为复合型裂纹,裂尖产生的焦散斑为复合型焦散斑;预制裂纹与加载方向的夹角变化时,动态应力强度因子、裂纹扩展时间以及裂纹扩展速度都随之变化;预制裂纹与加载方向的夹角增大时,裂纹扩展速度的最大值增大,裂纹扩展速度的振荡性增强;当荷载的加载方向与预制裂纹的方向一致时,裂纹起裂最快,裂纹为I型裂纹。冲击荷载方向与预制裂纹夹角增大时,扩展裂纹表现为复合型特征,动态应力强度因子 K_{II}^d 表现越明显,其最大值随夹角的增大而增大。

关键词:倾斜边裂纹;冲击荷载;透射式焦散线;动态应力强度因子;裂纹扩展规律

中图分类号:TU458 **文献标志码:**A

Simulation experiment of rock fracture containing inclined edge crack under impact load

YUE Zhong-wen¹, YANG Ren-shu¹, SUN Zhong-hui^{1,2}, XIAO Tong-she¹, HAN Peng-fei¹

(1. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. Xinwen Mining Group Co. Ltd., Xintai 271233, China)

Abstract: In order to simulate fracture behavior of rock under different angles between pre-crack and loading direction, the fracture experiments of the three-point bend beam containing unilateral incision subjected to impact load were carried out by transmission-type caustics test system. Experimental results show that inclined edge crack specimen is subjected to normal stress and shear stress. The growth cracks are mixed code cracks and the focal speckles at the tips of crack are also mixed. The dynamic stress intensity factor, crack propagation time and the crack propagation velocity are associated with the angle changes between pre-crack and the loading direction. As the angles between pre-crack and the loading direction increase, the maximum of crack propagation speed increases, and the oscillation of the crack propagation velocity also increases. When the loading direction is the same as the pre-crack direction, the crack initiates the fastest, and the crack is the I-type crack. As the angles between loading direction and pre-crack direction increase, the crack takes on mixed characteristic, the dynamic stress intensity factor K_{II}^d represents more obviously and its value increases.

Key words: inclined edge crack; impact loading; transmission-type caustics; dynamic stress intensity factor; crack propagation regularity

岩石动态断裂力学参数测定一直是岩土工程界备受关注的重要研究内容,特别是岩石动态应力强度因子可以反映岩石材料的动态断裂韧性更是研究者关注的热点^[1-2]。岩石在动荷载下的断裂力学行为

非常复杂,应力波与裂纹的相互作用很难用解析的方法加以解释,因此实验断裂力学是研究岩石动态断裂力学行为的重要手段^[3]。

光测断裂力学是动态断裂研究中首选的实验方

法,其中动态焦散线实验方法由于精度高而且计算简便,焦散斑的特征长度为裂纹尖端的应力强度因子提供了一种定量的度量,在动态断裂力学研究中得到了广泛应用。P. Manogg^[4]首先提出将焦散线法应用于断裂力学的研究中。之后,Theocaris^[5]利用该方法确定裂纹尖端附近塑性区尺寸、裂纹尖端位置及应力强度因子。Kalthoff等^[6-7]将其扩展到动态断裂力学的范畴。国内,苏先基^[8]等利用焦散线对冲击载荷作用下裂纹的动态扩展问题进行了研究。党进宝^[9]对非透明材料进行断裂研究,扩展了焦散线的应用范围。杨仁树等^[10-12]采用有机玻璃模型,进行了爆炸加载下透射式动态焦散线试验。

本文采用单边切口三点弯曲梁试件,模拟岩石在冲击荷载下,裂纹与加载方向不同角度情况下的断裂行为。

1 动态焦散线试验

1.1 试验原理

焦散线方法是利用几何光学的映射关系,将物体中应力集中区域的复杂变形状态,转换成简单而清晰的阴影光学图形,如图1、2所示^[13]。

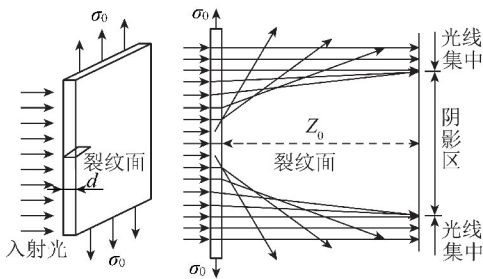


图1 焦散线成像示意

Fig. 1 Schematic diagram of caustic formation

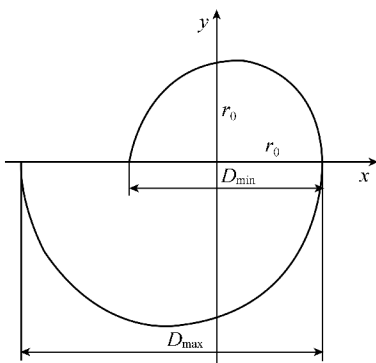


图2 焦散曲线

Fig. 2 Caustic curve

1.2 试验系统

动态焦散线试验系统主要包括:① 加载装置;② DDGS-II多火花式高速摄影光路系统;③ 延迟与控

制器装置;④ 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来管理,根据试验需要的时间间隔提前设置,其幅间隔在0~999 μs内可调。图3为透射式动态焦散线试验光路示意图。图4为透射式动态焦散线试验系统实物照片。

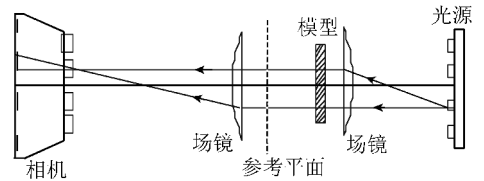


图3 透射式动态焦散线试验光路示意

Fig. 3 Experimental optical system for dynamic caustics



图4 试验系统实物照片

Fig. 4 Real photo of testing system

1.3 试验描述

试件选用PMMA材料,形状为长方形,长×宽=220 mm×50 mm,试件厚度6 mm。裂纹长度随角度不同而不同,裂纹角度θ分0、15、30、45、60、75等6种,对应试件分别为S-1、S-2、S-3、S-4、S-5和S-6,裂纹宽0.25 mm。试件外形尺寸如图5所示。

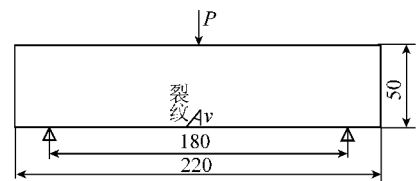


图5 试件几何尺寸示意

Fig. 5 Schematic illustration of specimen sizes

为得到初始裂纹与加载方向不同夹角情况下裂纹扩展规律,在设计试件时,试件的加载位置不变,裂纹尖端位置不变,这样就保证冲击应力波到达裂纹尖端的时间及外力在裂纹尖端产生的应力基本相同。试件加工的精度对试验结果有很大的影响,为了保证试验结果的精度,试件采用激光切割机加工,激光切割的试件切割面平整光滑,试件表面无磨损现象,裂纹宽度控制在0.3 mm以下,复合裂纹宽度小于0.5 mm的要求。试件的动态力学参数: $\rho = 1.13 \times 10^6 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 2190 \text{ m/s}$, $C_s = 1200 \text{ m/s}$, $E_d = 5.4 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, $\nu_d = 0.31$, $|C_1| = 0.84 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ 。

本文进行了相同的加载速率下、不同裂纹角度的 PMMA 动态断裂的各力学参量的变化情况试验研究, 试验中选取加载落锤的下落高度为 350 mm, 加载速度为 2.65 m/s。

2 测试原理

2.1 裂纹扩展速度的测试

由于焦散斑反映裂纹尖端场的应力变化, 裂纹尖端焦散斑随着裂纹的扩展而移动, 利用高速摄影拍摄的焦散斑可以精确测定扩展裂纹尖端位置。因此, 可以确定每瞬时刻裂纹扩展长度。为了获得裂纹扩展速度等断裂参数精确值, 可用由 Takahashi 提出的数据拟合方法来计算裂纹长度^[14]。

下面是关于时间 t 的 9 阶多项式

$$l(t) = \sum_{i=0}^9 l_i t^i \quad (1)$$

其中, 系数 l_i 利用最小二乘法原理求出, 由此裂纹扩展的速度 v 可由拟合曲线 $l(t)$ 的一次时间导数得到, 即

$$v = \dot{l}(t) \quad (2)$$

在扩展裂纹为弯曲的状况下, 可通过高速摄影拍摄的焦散斑测量初始裂纹纵向和横向裂纹长度 l_x 和 l_y 。每个 l_x 和 l_y 曲线通过 9 阶多项式的最小二乘法得到, 即

$$l_x(t) = \sum_{i=0}^9 l_{x_i} t^i \quad (3)$$

$$l_y(t) = \sum_{i=0}^9 l_{y_i} t^i \quad (4)$$

对多项式 l_x 和 l_y 进行关于时间 t 求导, 可得到裂纹扩展速度关于 x 和 y 方向的分量 v_x 、 v_y , 即

$$\begin{cases} v_x = \dot{l}_x(t) \\ v_y = \dot{l}_y(t) \end{cases} \quad (5)$$

那么, 在瞬时裂纹扩展方向上的裂纹扩展速度, 由下面关系式给出, 即

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (6)$$

2.2 动态应力强度因子 K_I^d 和 K_{II}^d 的测试原理

冲击荷载作用下倾斜边裂纹在应力波与裂纹之间相互作用, 将产生折射、反射、绕射及应力波在边界上的反射, 从边界反射的致使应力波在裂纹附近叠加, 使得裂纹尖端的应变、应力场十分复杂。倾斜边裂纹在冲击荷载下扩展时, 扩展裂纹是介于 I 型与 II 型之间的复合型裂纹。动态应力强度因子可由式 (7) 和 (8)^[5] 得出

$$K_I = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3g^{5/2}z_0cd_{\text{eff}}\lambda_m^{3/2}}D_{\text{max}}^{5/2} \quad (7)$$

$$K_{II} = \mu K_I \quad (8)$$

式中, D_{max} 为复合型裂纹尖端焦散斑最大直径; 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; λ_m 是光学系统的放大倍数; 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^d 、 K_{II}^d 为复合型扩展裂纹尖端的 I 型、II 型应力强度因子。

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

图 6 为部分试验结果焦散斑图像。从图 6(a) 可以看出, 试验中裂纹沿初始裂纹方向进行扩展, 焦散斑形状关于裂纹的扩展方向对称, 说明裂纹类型为 I 型裂纹。图 6(b)、(c) 中的焦散斑则表现出不同的现象, 复合型特征明显。

3.2 裂纹尖端位移变化规律

通过准确测量裂纹尖端焦散斑特征点的位置及焦散斑的特征长度, 测定不同时刻裂纹尖端的位置, 可以确定裂纹的扩展轨迹。图 7(a) 是裂纹尖端位移随时间的变化曲线。从裂纹位移-时间曲线可以看出, 试件 S-1 ~ S-6 的位移-时间曲线基本相同, 刚开始开裂时斜率较高, 随后逐渐降低。由图 7(a) 还可以看到, 试件 S-1 ~ S-6 分别在时间 $t = 454$ 、460、500、518、530 和 575 μs 时起裂, 由此可知, 随着预制裂纹与加载方向夹角的增大, 裂纹起裂时间越迟。同时由试验结果知, 试件 S-1 ~ S-6 都是彻底断裂, 由图 7(a) 的裂纹尖端位移变化曲线也可得到印证。

3.3 裂纹扩展速度变化规律

用式(6)就可以求得裂纹扩展速度-时间曲线。从图 7(b) 裂纹扩展速度曲线上可以看出, 裂纹开裂后扩展速度增加很快, 达到最大值后迅速下降, 随后下降速度降低, 在下降过程中曲线并非平滑的, 而是呈振荡特性变化。从裂纹扩展速度随时间变化的对比曲线图 7(b) 还可以看出, 随着加载方向与初始裂纹方向夹角 θ 的增大, 裂纹开裂后扩展速度的最大值有增大的趋势。

3.4 裂纹尖端动态应力强度因子变化规律

图 8(a) 是 K_I^d 随时间变化的对比曲线。图 8(b) 是 K_{II}^d 随时间变化的对比曲线。从图中曲线可以看到, 试件 S-1 在裂纹起裂前, 动态应力强度因子 K_I^d 数值不断增加, 即能量不断积聚, 在 $t = 454 \mu\text{s}$ 时起裂, 这时动态应力强度因子达到最大值 2.06 MN/m^{3/2}; 裂纹起裂后, 动态应力强度因子值迅速下降, 这

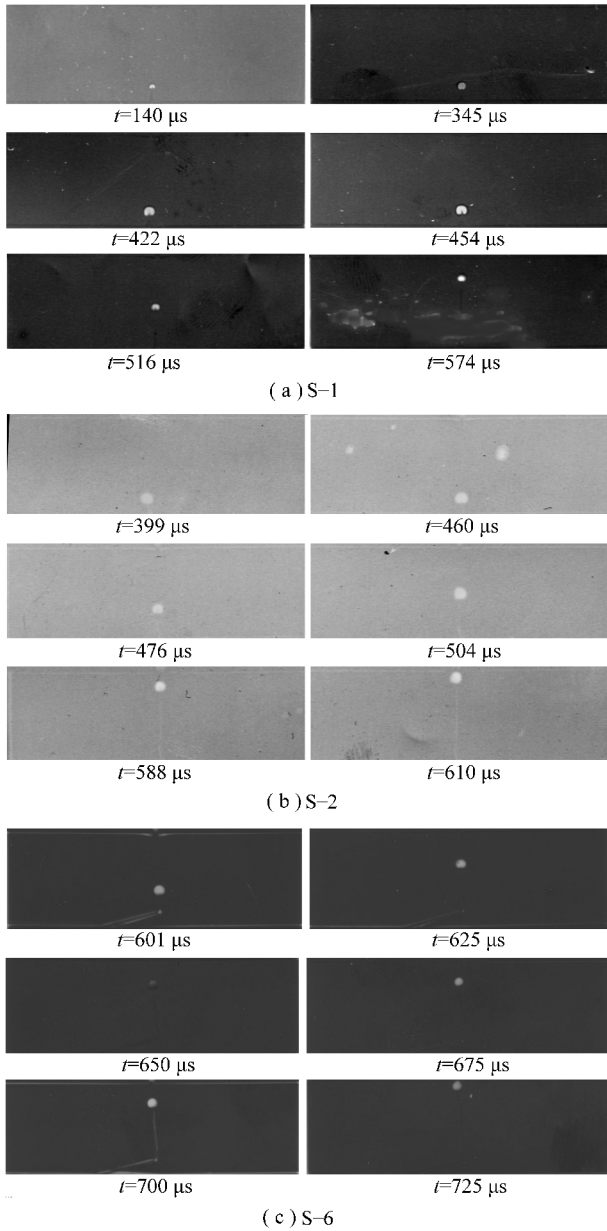


图 6 试件 S-1、S-2、S-6 动态焦散线照片

Fig. 6 Dynamic caustics images of specimen S-1, S-2, S-6

时积累的能量迅速释放。当应力强度因子下降至 $1.15 \text{ MN/m}^{3/2}$ 时,下降速度变慢,出现一次振荡,出现一次极大值为 $1.30 \text{ MN/m}^{3/2}$,随后应力强度因子值继续降低,直至断裂贯通。

试件 S-2 裂纹初始方向与加载方向的夹角为 15° ,在冲击加载初期表现为明显的复合型裂纹特征, K_I^d 和 K_{II}^d 同时存在,且加载初期 K_{II}^d 比 K_I^d 值还要大,随后 K_{II}^d 逐渐减小, K_I^d 逐步增大,在 $t \approx 200 \mu\text{s}$ 时 K_I^d 与 K_{II}^d 相等,之后, K_I^d 进一步增大,在 $t = 460 \mu\text{s}$ 时达到极值 $1.41 \text{ MN/m}^{3/2}$,此时裂纹开始开裂, K_I^d 出现下降,在出现一次振荡后, K_I^d 达到最大 $1.79 \text{ MN/m}^{3/2}$,后来 K_I^d 开始下降,在 $t = 588 \mu\text{s}$ 时又出现一次振荡,

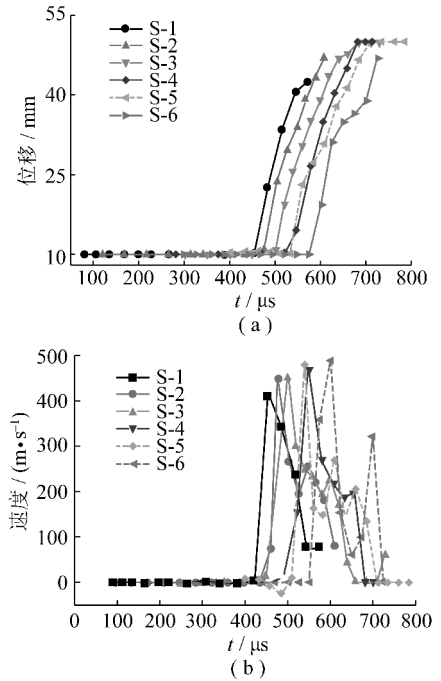


图 7 位移-时间和裂纹扩展速度-时间对比曲线

Fig. 7 Compared curves of displacement vs. time and velocity vs. time

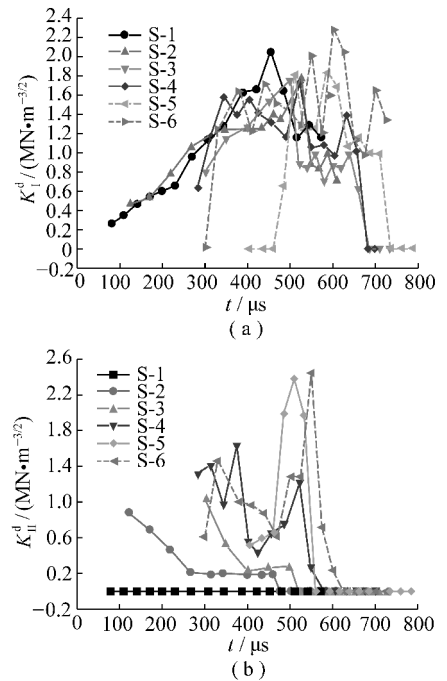


图 8 K_I^d -时间和 K_{II}^d -时间曲线

Fig. 8 Curves of K_I^d vs. time and K_{II}^d vs. time

达到极值 $0.88 \text{ MN/m}^{3/2}$;而 K_{II}^d 逐步下降,在 K_I^d 达到最大值裂纹开裂后,裂纹扩展方向逐渐与加载方向一致,裂纹尖端焦散斑也变为 I 型裂纹焦散斑, K_{II}^d 的值为 0。

试件 S-3 ~ S-6 中, K_I^d 和 K_{II}^d 的变化与试件 S-2 基本相似,在加载初期由于裂纹方向与加载方向有一

定的夹角,复合型裂纹的特点表现得较为明显,在裂纹起裂前, K_{I}^d 逐渐增加, K_{II}^d 逐渐减小,在 K_{I}^d 达到最大值裂纹开裂后,裂纹扩展方向逐渐与加载方向一致,裂纹尖端焦散斑同样变为I型裂纹焦散斑, K_{II}^d 的值变为0。不同的是:试件S-2和S-3中, K_{II}^d 随时间的变化逐渐下降,而试件S-4~S-6中, K_{I}^d 和 K_{II}^d 均随时间的变化呈振荡变化。随着加载方向与初始裂纹夹角的增大, K_{I}^d 和 K_{II}^d 均随时间变化呈振荡变化的规律越明显。

由以上分析可以得到,动态应力强度因子随预制裂纹与加载方向夹角 θ 变化的规律:预制裂纹与加载方向的夹角 θ 增大时,应力波、裂纹与边界的互相作用越明显,动态应力强度因子的振荡性增强, K_{II}^d 随夹角 θ 的增大而增大, K_{I}^d 随夹角 θ 的增大振荡性增强。

在冲击应力波的作用下,随着裂纹尖端能量的积累,裂纹尖端应力集中程度越来越大,使得裂纹尖端的焦散斑尺寸达到最大值,裂纹开裂后积累的能量得到迅速释放,动态应力强度因子迅速减小,此时裂纹扩展驱动力最大,裂纹扩展速度迅速达到最大值。随着裂纹的扩展,冲击应力波在边界反射后在裂纹尖端不断积累,同样驱动裂纹的扩展,同时使得动态应力强度因子及裂纹扩展速度呈振荡变化。

4 结 论

(1)含倾斜边裂纹试件受到正应力和剪切力的作用,裂纹为复合型裂纹,产生的焦散斑为复合型焦散斑。

(2)随着初始裂纹与加载方向夹角的变化,动态应力强度因子、裂纹扩展时间及裂纹扩展速度都随之变化。

(3)当加载方向与预制裂纹方向一致时,裂纹起裂最快,裂纹为I型裂纹。随着作用方向与预制裂纹夹角的增大,扩展裂纹表现为复合型特征,II型动态应力强度因子表现越明显,其最大值随夹角的增大而增大。

(4)随着预制裂纹与加载方向夹角的增大,裂纹起裂时间越迟,起裂时的应力强度因子越大,说明随着角度的增大,起裂越困难,起裂需要的能量越大,能量的积累时间越长。

(5)随着预制裂纹与加载方向夹角的增大,开裂后裂纹扩展速度的最大值越大,裂纹扩展速度的振荡性越强。

参考文献:

[1] 李海波,赵 坚,李廷芥,等.花岗岩动三轴抗压强度的裂纹模

型研究(II):应用[J].岩土力学,2002,23(3):329-333.

Li Haibo, Zhao Jian, Li Tingjie, et al. Study dynamic triaxial compressive strength of a granite using sliding crack model(II): application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(3): 329-333.

- [2] 陈 明,卢文波. P波对大体积混凝土裂缝的扩展作用研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 123-126.
- Chen Ming, Lu Wenbo. Research on crack propagation of mass concrete under effect of longitudinal wave[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 123-126.
- [3] 张胜强,刘再华,解 德,等.工程断裂动力学[M].武汉:华中理工大学出版社,1996:281-300.
- [4] Manogg P. International conference on the physics of non-crystalline solids[M]. Netherlands: 1964:481-490.
- [5] Theocaris P S, Gdoutos E E. The modified Dugdale-Barenblatt model adapted to various fracture configurations in metals[J]. Int. J. Fracture, 1974, 10:549-564.
- [6] 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.
- [7] Kalthoff J F, Beinert J, Winkler S. Fast fracture and crack arrest[J]. ASTM STP, 1977.
- [8] 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[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1987, 2(2): 1-27.
- [9] Dang Jinbo. Application of the caustic technique to any materials by ficker's mirror transplantation method[A]. Proceedings of the International Conference on Experimental Mechanics [C]. Beijing: Science Press, 1985:854-859.
- [10] 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 Renshu, Yue Zhongwen, Xiao Tongshe, 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.
- [11] 肖同社,杨仁树.节理岩体爆生裂纹扩展动态焦散线模型实验研究[J].爆炸与冲击,2006,27(2):159-164.
- Xiao Tongshe, Yang Renshu. Dynamic caustics model experiment of blasting crack developing on sandwich rock [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 27(2): 159-164.
- [12] 杨仁树,杨立云,岳中文,等.爆炸荷载下缺陷介质裂纹扩展的动焦散试验研究[J].煤炭学报,2009,34(2):187-192.
- Yang Renshu, Yang Liyun, Yue Zhongwen, et al. Dynamic caustics experiment of crack propagation in material containing flaws under blasting load[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 187-192.
- [13] 高尔新,杨仁树.爆破工程[M].徐州:中国矿业大学出版社, 1999.
- Gao Erxin, Yang Renshu. Blasting engineering[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1999.
- [14] Takahashi K, Arakawa K. Experimental mechanics, dependence of crack acceleration on the dynamic stress intensity factor in polymers [J]. Exp. Mech., 1987, 27: 195-217.