

文章编号:0253-9993(2013)03-0404-07

初始压应力场对爆生裂纹行为演化效应的实验研究

杨立云¹,杨仁树^{1,2},许 鹏¹,宋永威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:采用自主设计的动静组合加载系统,实现了在模型试件中产生静态应力场和爆炸动应力场,并对动静组合应力场中爆生裂纹的扩展行为演化特征进行焦散线实验研究,探讨初始应力场对爆生裂纹扩展规律的影响效应。通过对四周施加均布载荷和不施加载荷的两组试件进行实验,对比分析两组试件中爆生裂纹的扩展长度、速度和裂纹尖端动态应力强度因子随时间的变化规律,发现在垂直于裂纹扩展方向的压应力降低了裂纹尖端的应力集中程度,阻碍了裂纹的扩展,而平行于裂纹扩展方向的压应力对裂纹的扩展基本没有影响。

关键词:初始压应力场;爆生裂纹;焦散线实验;应力强度因子

中图分类号:TD235 文献标志码:A

Experimental study on the effect of initial compression stress field on blast-induced crack behaviors

YANG Li-yun¹, YANG Ren-shu^{1,2}, XU Peng¹, SONG Yong-wei¹

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

Abstract: With self-designed static-dynamic loading setup which can produce initial static stress and dynamic blasting stress field in the specimen, the behaviors of blast-induced crack in the dynamic-static stress field were studied by caustics experiment and the effect of initial stress field to the blast-induced crack was discussed. Two specimens, one is applied nothing and the other is applied 4-direction pre-compression loading, were studied by caustics. It is established that the pre-compression stress, which is vertical to the crack propagation direction, reduces the stress concentration degree at crack tip and hinders the crack propagation, but the pre-compression stress, which is parallel to the crack propagation direction, has no influence on the crack propagation.

Key words: initial compression stress field; blast-induced crack; caustics experiment; stress intensity factor(SIF)

目前,随着我国煤炭开采深度的增加,巷道所处位置的静态围岩应力水平也将大大增加。在高应力围岩压力作用下进行巷道爆破施工,岩石受到的夹制作用更大,即岩石断裂过程中将同时受到爆生应力波、爆生气体和高地应力三者的影响。在考虑初始高地应力对岩石动态断裂的影响效应方面的文献主要有:刘殿书等^[1]以最新的激光动光弹为实验手段,对初始应力条件下的爆破应力波的传播过程进行了实验研究,发现初始应力影响应力波的传播过程;肖正

学等^[2-3]通过室内实验和现场实例,分析了初始应力场对爆破效果的影响,发现初始应力场的存在改变了爆轰波的传播规律,同时,对裂纹发展起着导向作用;谢源等^[4-5]利用自行改造的加载设备,进行附加荷载介质爆破裂纹扩展的模拟试验研究,发现介质爆破裂纹的方向及大小与附加的主应力有关;高全臣等^[6]采用动光弹模型试验对不同应力条件下的爆破作用机理进行了探讨,并通过现场试验提出了适用于高应力岩巷掘进的控制爆破设计与施工技术;戴俊等^[7]

收稿日期:2012-04-04 责任编辑:王婉洁

基金项目:国家自然科学基金煤炭联合基金重点资助项目(51134025);高等学校博士学科点专项科研基金(新教师类)资助项目(20120023120020)

作者简介:杨立云(1983—),男,河北邢台人,讲师,博士。Tel:010-62339009, E-mail: yangly@cumt.edu.cn

利用弹性理论方法分析了原岩应力对光面爆破和预裂爆破炮孔间贯通裂纹形成的影响,发现原岩应力的存在有利于光面爆破的炮孔间贯通裂纹的形成,而不利于预裂爆破的炮孔间贯通裂纹的形成;王长柏等^[8]基于理论推导和 ABAQUS 动力有限元计算分析了不同埋深和侧压系数条件下岩石爆破裂纹的扩展规律;邵鹏等^[9]在充分考虑岩体损伤、地层压力影响的基础上,运用损伤和断裂理论分析了预裂成缝的机理,得出岩体的损伤和地层压力作为岩体成缝的影响因素不容忽视;Ma G W 和 An X M^[10]采用数值软件 LS-DYNA 模拟不同载荷和不同钻孔边界条件下爆炸导致的岩石断裂,其中包括地应力对爆炸断裂的影响效应。综上所述,在考虑初始静态应力场对岩石动态断裂的影响效应方面的文献不多。

在爆破载荷作用下,被爆破体断裂破坏机理是爆生裂纹在介质中起裂、扩展、止裂的过程。数学上,裂纹扩展是一个高度非线性问题,得到解析解异常困难,采用实验室实验是研究爆生裂纹的有效途径。Dally 等^[11]利用光弹性材料模型进行爆炸试验,验证了爆炸冲击波对裂纹产生和扩展的影响。张志呈等^[12-13]通过实验室实验,分析了裂纹起裂与扩展时间和多孔爆破裂纹发展的规律,揭示了在不同爆破方法下裂纹发展的基本规律以及裂纹长度和扩展速度,介绍了岩石的断裂现象、裂纹扩展速度的变化过程、断裂速度的理论计算方法与影响裂纹扩展的因素。朱振海等^[14]应用动光弹研究了应力波(P波、S波)与高速扩展的裂纹的相互作用过程。但是由于裂纹尖端的奇异性,导致这些实验应力分析方法遇到了困难。而焦散线法在解决裂纹尖端的奇异性问题方面具有很大的优越性,可以确定关于时间、裂纹长度、传播速度和其他因素的函数的动态应力强度因子,成为宏观断裂参数测量的有效手段。杨仁树、李清、岳中文等^[15-20]将焦散线方法用于岩石爆破断裂方面研究,对爆生裂纹的动态力学行为等进行了分析。

本文拟采用爆炸加载焦散线实验系统,针对初始静态应力场中爆生裂纹的扩展行为特征进行实验,探讨静态应力场对爆生裂纹扩展规律和试件破坏效果的影响作用。

1 动静组合应力场中裂纹尖端效应分析

在线弹性力学中,当几个载荷同时作用于某一弹性体时,弹性体中某一点的应力和位移符合叠加原理。裂纹在动静组合应力场中的受力情况如图1所示。线弹性力学中,在初始静态应力场和动态应力场

双重作用下,复合应力强度因子也包括动态和静态两部分^[21],可以表示为

$$K_N^0 = K_N^s + K_N^d \quad (1)$$

式中, K_N^s, K_N^d 分别为裂纹尖端的静态和动态应力强度因子; N 为裂纹的3种断裂形式。其中,在静态应力场中尖端的应力强度因子 $K_N^s = f(\sigma)$,动态应力场在裂纹尖端产生的应力强度因子 $K_N^d = g(\delta)$, σ 和 δ 分别为静态载荷和动态载荷。

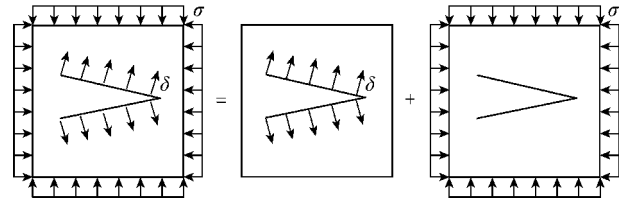


图1 动静组合应力场中裂纹受力示意

Fig. 1 Schematic illustration of crack stress analysis in dynamic-static stress field

对于四周施加均布初始静态载荷 σ 、沿水平方向扩展的裂纹($\theta=0$),当静态载荷为拉应力时,裂纹呈张开型,当静态载荷为压应力时,裂纹呈受压闭合状态(与张开型裂纹相反)。对于承受压应力的闭合裂纹,裂纹尖端的应力强度因子可以表示为

$$\begin{cases} K_{\perp}^s(\theta=0) = -\sigma\sqrt{\pi a}\sin^2\theta - \sigma\sqrt{\pi a}\cos^2\theta = \\ -\sigma\sqrt{\pi a} \\ K_{\parallel}^s(\theta=0) = (\sigma - \sigma)\sqrt{\pi a}\sin\theta\cos\theta = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, a 为裂纹扩展长度。可见,计算得的 K_{\perp}^s 值为负值,表示初始静态载荷没有促进裂纹尖端的应力集中,反而抑制了裂纹的扩展,相应地降低了裂纹尖端的应力集中程度。从式(2)可见,对于方向为 $\theta=0$ 的裂纹,主要是竖向围压载荷在裂纹尖端产生的应力集中效应,而侧向围压在裂纹尖端无应力集中效应,即侧向围压对裂纹的扩展行为没有影响作用,仅竖向围压对裂纹的扩展产生影响效应。

2 实验过程与原理

2.1 实验设备

爆炸加载焦散线实验系统由多火花式高速摄影光路系统、爆炸加载装置、DDGS-II型延迟与控制装置、光-电转换装置4部分组成。光路系统布置如图2所示。该高速摄影系统可以连续拍摄16幅照片,幅间隔为5~999 μs 可调。自主设计的动静组合加载系统由静态围压加载架和爆炸加载装置两部分组成,如图3所示。其中,静态加载架主要由缸体、活

塞推板和底板等组成,底板中部为通孔,作为观测区;活塞采用气缸加压,压强为 0~0.8 MPa 可调。

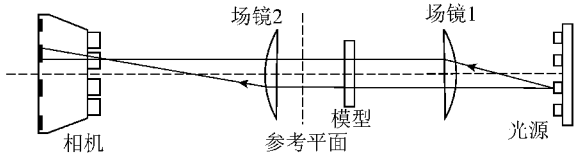
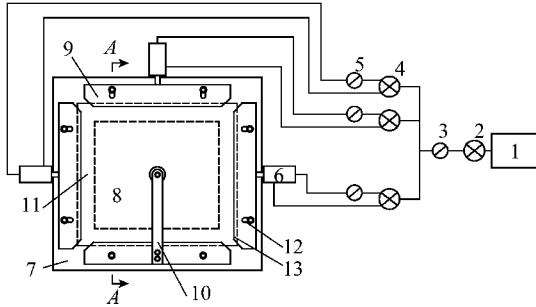
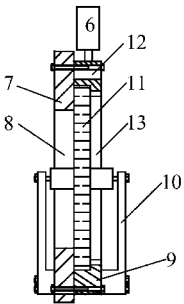


图 2 透射式焦散线光路系统示意

Fig. 2 Schematic illustration of transmitted caustics optical system



(a) 正视图



(b) A-A剖视图

- 1—动力; 2—总开关;
- 3—总压力表; 4—支开关;
- 5—支压力表; 6—缸体;
- 7—底板; 8—可观测区;
- 9—推板; 10—爆炸加载夹具;
- 11—试件; 12—通槽(螺栓);
- 13—卡棱

图 3 动静组合加载系统示意

Fig. 3 Schematic illustration of dynamic-static loading system

实验过程中,首先将装好药包的试件安置于围压加载架上,拧开气压开关,在试件边界上施加围压载荷;然后,调整爆炸加载夹具,使夹具紧紧约束住炮孔;最后,拧紧气缸推板通槽内的螺栓,使推板被固定住,使作用在试件上的载荷值保持恒定。

2.2 实验描述

采用有机玻璃板(PMMA)作为模型材料,进行施加围压载荷和未施加围压载荷的两组实验。其中,PMMA 的力学参数分别为:纵波波速 $C_p = 2125 \text{ m/s}$,横波波速 $C_s = 1090 \text{ m/s}$,动态弹模 $E_d = 2.6 \text{ GN/m}^2$,泊松比 $\nu_d = 0.32$,光学常数 $c_l = 0.08 \text{ m}^2/\text{GN}$ 。采用切槽控制爆破技术,实现对裂纹扩展方向的控制,便于实验观测和分析。两组实验采用相同的试件规格和装药参数:试件尺寸 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ (长度×宽度×厚度),炮孔直径 5 mm ,切槽角度 60° ,切槽深度 1.5 mm (炮孔和切槽采用激光加工);炸药为叠氮化铅,装药量为 120 mg ,耦合装药。具体的实验参数见表 1。其中,对自由边界不施加载荷的试件编号为 S-1,试件四周均匀施加载荷的试件编号为 S-2,载荷大小为 0.6 MPa 。

2.3 实验测试原理

(1) 裂纹扩展长度、扩展速度的测试。

根据不同时刻照片上裂纹尖端的位置,得到裂纹扩展的长度与时间的对应关系。采用文献[22]中的方法,对裂纹扩展长度 l 与时间 t 的关系进行多项式拟合,得到裂纹扩展长度 l 与时间 t 的 n 次多项式如下:

$$l(t) = \sum_{i=0}^n L_i t^i \quad (3)$$

表 1 试件和实验参数

Table 1 Parameters of specimen and experiment

试件编号	尺寸/mm	炮孔直径/mm	切槽深度/mm	切槽角度/(°)	装药量/mg	围压值/MPa	围压方向
S-1	300×300×5	5	1.5	60	120	0	无
S-2	300×300×5	5	1.5	60	120	0.6	4周

对式(3)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:

$$v = l'(t) \quad a = l''(t) \quad (4)$$

(2) 动态复合应力强度因子的测试原理。

根据 Kalthoff 给出的动态扩展裂纹尖端的动态应力强度因子计算公式,可以计算出裂纹尖端的动态应力强度因子值。Kalthoff 给出的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

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

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; 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,在具有实际意义的扩展速度下,

$F(v)$ 近似等于 1。

3 实验结果与分析

进行了多组重复实验,取得了相同的实验结果,下面以其中某一组实验结果进行分析。试件中切槽方向主裂纹的扩展情况如图 4 所示,不同时刻的焦散线照片如图 5,6 所示。

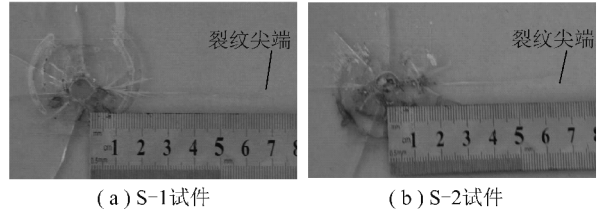


图 4 裂纹扩展路径

Fig. 4 Crack propagating trace

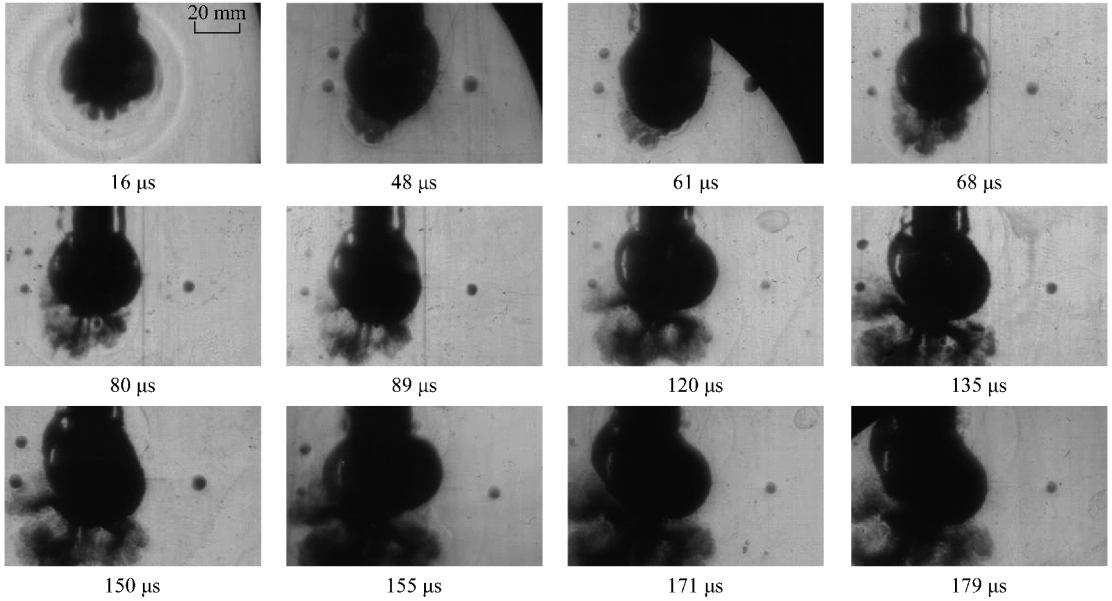


图 5 试件 S-1 的焦散线系列照片

Fig. 5 Caustic spot of specimen S-1

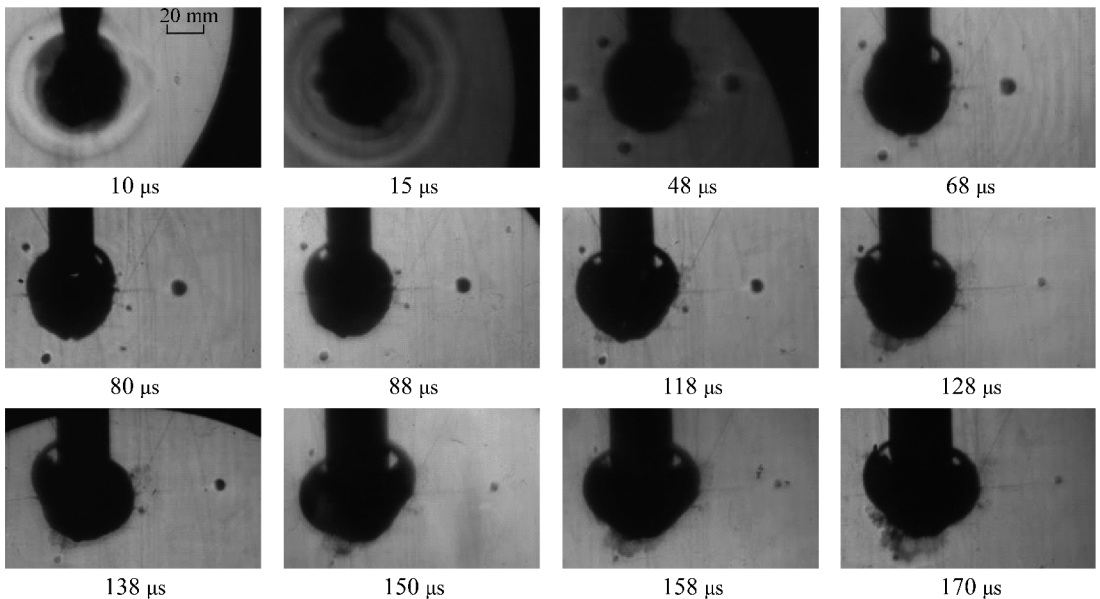


图 6 试件 S-2 的焦散线系列照片

Fig. 6 Caustic spot of specimen S-2

3.1 裂纹扩展行为参数对比

根据不同时刻胶片上记录的裂纹尖端位置,绘制裂纹扩展长度时间曲线和速度时间曲线,如图 7 所示。

由于导烟管和爆炸加载头的问题,裂纹在 48 μs 之前的裂纹扩展情况被导烟管等遮挡,在试验中观测不到,只记录下了裂纹在 48 μs 后的扩展情况。从图 7 可知,试件 S-2 在爆炸后的 125 μs 时,裂纹就停止

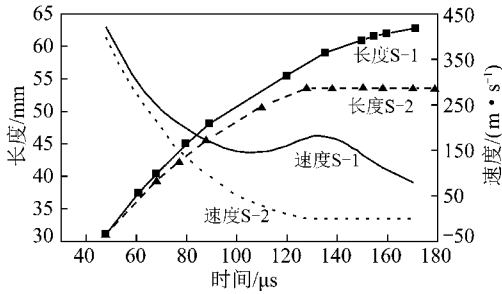


图7 裂纹扩展长度-时间与速度-时间曲线

Fig. 7 Curves of crack length vs. time and velocity vs. time

了扩展,裂纹扩展的总长度为 53.6 mm;而试件 S-1 在 179 μs 时的扩展长度为 52.5 mm,之后继续向前扩展,虽然实验没有记录 179 μs 之后的扩展情况,但从爆破后的试件照片(图4)可见,试件 S-1 的裂纹扩展总长度为 61.8 mm。对比得施加围压后,爆生主裂纹的扩展长度减少了 7.2 mm,相对于无围压约束情况大约减少了 11.7%,即围压的存在使爆生裂纹扩展的总长度降低了。

围压下裂纹扩展长度的减少主要是由 2 个原因引起的:一是围压的存在,使裂纹面的张开位移受到限制,裂纹扩展需要较大的驱动力,裂纹扩展单位长度需要消耗较多的能量,而用于驱动裂纹扩展的总能量不变,所以裂纹的扩展总长度相对减少了;同时,由于围压装置的存在,改变了试件的边界状态,无围压约束试件的边界为自由边界,应力波遇到自由边界时仅发生反射现象,施加围压约束试件的边界为两种介质分界面,入射应力波在遇到两种介质的分界面时,不仅发生反射,同时还发生透射现象,导致一部分能量以透射应力波的形式传播出去,使反射应力波的能量相对减少,这样反射应力波与运动裂纹的相互作用减弱。

由图7可以看出,四周施加围压约束的试件 S-2 的爆生裂纹在 48 μs 时的速度为 400 m/s,随着时间的延长逐渐下降,在 125 μs 时基本停止扩展,速度变为 0。而无围压约束的试件 S-1 的爆生裂纹的速度在 48 μs 时为 425 m/s,速度的变化趋势也是逐渐下降,但是其下降趋势相对较缓,在 110 μs 时速度降为 150 m/s,随后裂纹的扩展速度出现了回升。

试件 S-2 中的爆生裂纹较试件 S-1 的速度下降较迅速,表明其加速度较大,即四周围压约束产生的静力场对爆生裂纹的扩展产生了阻力,阻碍了爆生裂纹的扩展。无围压试件 S-1 的爆生裂纹在 120 μs 后速度出现回升,主要是由于应力波在试件的 4 个自由边界处发生反射,反射应力波与运动裂纹作用,使裂纹的扩展速度增大。而对于有围压约束的试件 S-2,

应力波在试件边界处发生反射的同时,也有透射现象发生,透射应力波的存在使反射应力波的能量降低,间接减弱了反射应力波与裂纹的相互作用,所以四周施加围压约束的试件在 120 μs 时,速度基本没有明显升高的趋势。

3.2 裂纹尖端动态应力强度因子的对比

根据不同时刻裂纹尖端的焦散斑直径,由式(5)可以计算出裂纹尖端的动态应力强度因子值。绘制应力强度因子随时间的变化曲线,如图8所示。

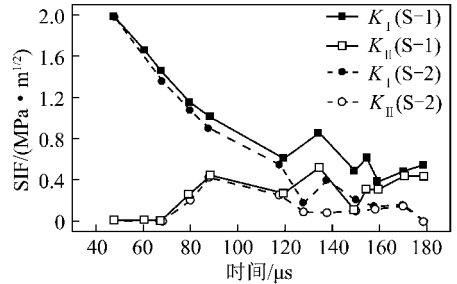


图8 裂纹尖端动态应力强度因子-时间曲线

Fig. 8 Curves of SIF vs. time

从图8可知,对于裂纹尖端的动态应力强度因子值 K_I ,试件 S-1 和 S-2 应力强度因子随时间的整体变化趋势是相同的。在 48 ~ 120 μs , K_I 逐渐减小,在 135 μs 时均出现了小幅度的回升,其中无围压试件 S-1 应力强度因子值的升幅要大于试件 S-2 的升幅。在 135 μs 后,试件 S-1 的 K_I 表现出更明显的波动震荡性,而试件 S-2 的波动性相对不明显。从图7可以看到,试件 S-2 的裂纹在 125 μs 后基本已停止扩展,所以试件 S-2 裂纹尖端的焦散斑在 125 μs 之后是原地震荡变化的,这是反射应力波与裂纹相互作用的结果。

从图8还可看到,在 48 ~ 120 μs ,试件 S-1 的 K_I 值稍大于试件 S-2 的值,说明围压降低了裂纹尖端的应力集中程度。但是在 120 μs 之后,试件 S-1 的 K_I 值表现出更加明显的波动性,这主要是由于无围压约束试件反射应力波的能量较有围压约束试件的反射应力波能量要大,使得反射应力波与裂纹的相互作用要强,更大地促进了裂纹尖端的应力集中。

另外,由图8可知,试件 S-1 和 S-2 的 II 型应力强度因子 K_{II} 的变化趋势和 I 型应力强度因子的变化趋势基本一致,只是 II 型应力强度因子出现时间晚于 I 型应力强度因子。这是由于裂纹的起裂主要是拉伸纵波引起的,且纵波的传播速度要大于横波的传播速度,当裂纹扩展一定距离后,横波与裂纹开始相互作用,使裂纹尖端出现剪切变形。在 125 μs 之前,试件 S-2 的 K_{II} 值与试件 S-1 的 K_{II} 值基本一致,没有明显差异,说明实验中的围压载荷对下爆生裂纹尖

端的 II 型应力强度因子的影响可以忽略。

4 结 论

(1) 四周施加均布围压载荷的试件相对无围压约束的试件,爆生主裂纹的扩展距离变短,这主要是由于围压载荷降低了裂纹尖端的应力集中程度,初始压应力场阻碍了裂纹的扩展;同时,围压装置改变了试件的边界条件,使得部分能量以透射应力波的形式传递出去,降低了反射应力波的能量,反射应力波与裂纹的相互作用减弱。

(2) 与裂纹方向垂直的初始压应力场降低了裂纹尖端的应力集中,使裂纹尖端的复合应力强度因子值偏小。

(3) 只对四周施加均布压应力的情况进行了实验研究,且该初始静态应力场较单一,围压载荷值也偏小。而实际生产中,竖向应力和侧向应力往往不一致,且裂纹扩展方向与初始应力场成一定夹角,裂纹不仅受压,同时还可能受剪、受拉。研究结论具有很大的局限性,关于初始应力场对爆生裂纹影响效应有待更深入的研究。

参考文献:

- [1] 刘殿书,王万富,杨吕俊,等. 初始应力条件下爆破机理的动光弹实验研究[J]. 煤炭学报,1999,24(6):612-614.
Liu Dianshu, Wang Wanfu, Yang Lijun, et al. Holophotoelasticity study on mechanism of blasting under initiative stress field[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6): 612-614.
- [2] 肖正学,张志呈,李端明. 初始应力场对爆破效果的影响[J]. 煤炭学报,1996,21(5):51-55.
Xiao Zhengxue, Zhang Zhicheng, Li Duanming. The influence of initial stress field on blasting[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(5): 51-55.
- [3] 肖正学, 张志呈, 郭学彬. 断裂控制爆破裂纹发展规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 546-549.
Xiao Zhengxue, Zhang Zhicheng, Guo Xuebin. Research on crack developing law of rock fracture controlled blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2002, 21(4): 546-549.
- [4] 谢 源, 刘庆林. 附加载荷下介质爆破特性的全息动光弹试验研究[J]. 工程爆破, 2000, 2(2): 11-15.
Xie Yuan, Liu Qinglin. Study on blasting characteristic of medium under high stress conditions by dynamic holophotoelastic method [J]. Engineering Blasting, 2000, 2(2): 11-15.
- [5] 谢 源. 高应力条件下岩石爆破裂纹扩展规律的模拟研究[J]. 湖南有色金属, 2002, 18(4): 1-3.
Xie Yuan. The modeling experiment for regularity of blasting crackle spread of rock under high stress conditions [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2002, 18(4): 1-3.
- [6] 高全臣, 赫建明, 冯贵文, 等. 高应力岩巷的控制爆破机理与技术[J]. 爆破, 2003, 20(S1): 52-55.

- Gao Quanchen, Hao Jianming, Feng Guiwen, et al. Mechanism and technology of controlled blasting under high stress rock tunneling [J]. Blasting, 2003, 20(S1): 52-55.
- [7] 戴 俊. 深埋岩石隧洞的周边控制爆破方法与参数确定[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(6): 493-498.
Dai Jun. The controlled contour blasting technique and its parameter determination for rock tunnel at depth [J]. Explosive and Shock Waves, 2004, 24(6): 493-498.
- [8] 王长柏, 李海波, 谢 冰, 等. 岩体爆破裂纹扩展影响因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(10): 31-34.
Wang Changbai, Li Haibo, Xie Bing, et al. Analysis on influencing factors of blasting crack expansion [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(10): 31-34.
- [9] 邵 鹏, 姜 涛, 张 勇. 岩巷预裂成缝机理的理论探讨[J]. 爆破器材, 1999, 28(6): 20-24.
Shao Peng, Jiang Tao, Zhang Yong. Research on the mechanism of cracking by presplit blasting in rock tunnel [J]. Explosive Materials, 1999, 28(6): 20-24.
- [10] Ma G W, An X M. Numerical simulation of blasting-induced rock fractures [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2008, 45(6): 966-975.
- [11] Dally J W, Fournery W L, Holloway D C. Influence of containment of the bore hole pressures on explosive induced fracture [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1975, 12(1): 5-12.
- [12] 张志呈, 肖正学, 郭学彬, 等. 断裂控制爆破裂纹扩展的高速摄影试验研究[J]. 西南工学院学报, 2001, 16(2): 53-57.
Zhang Zhicheng, Xiao Zhengxue, Guo Xuebin, et al. Experiment study of high-speed photography of crack development in fracture control blasting [J]. Journal of Southwest China Institute of Technology, 2001, 16(2): 53-57.
- [13] 张志呈. 岩体爆破裂纹扩展速度实验研究 [J]. 爆破器材, 2000, 29(3): 1-8.
Zhang Zhicheng. An experimental study of crack expansion speed in rock blasting [J]. Explosive and Materials, 2000, 29(3): 1-8.
- [14] 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 Zhenhai, Qu Guangjian, Yang Yongqi, et al. Dynamic photoelastic studies in the influence of delay ignition on the penetration of cracks between boreholes [J]. Explosive and Shock Waves, 1991, 11(4): 346-352.
- [15] 岳中文, 杨仁树, 董聚才, 等. 爆炸载荷下板条边界斜裂纹的动态扩展行为[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(1): 75-80.
Yue Zhongwen, Yang Renshu, Dong Jucai, et al. Dynamic propagation behaviors of an oblique edge crack in material under blast loading [J]. Explosive and Shock Waves, 2011, 31(1): 75-80.
- [16] 杨仁树, 杨立云, 岳中文. 爆炸载荷下缺陷介质裂纹扩展的动焦散试验[J]. 煤炭学报, 2009, 34(2): 187-192.
Yang Renshu, Yang Liyun, Yue Zhongwen. Dynamic caustics experiment of crack propagation in material containing flaws under blasting load [J]. Journal of China Coal Science, 2009, 34(2): 187-192.
- [17] 李 清, 王平虎, 杨仁树, 等. 切槽孔爆破动力学特征的动焦

- 散线实验[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(4): 413-418.
- Li Qing, Wang Pinghu, Yang Renshu, et al. Experimental investigation on dynamic mechanical behaviors of cracks induced by V-notch borehole blasting with dynamic caustics[J]. Explosive and Shock Waves, 2009, 29(4): 413-418.
- [18] 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.
- [19] 李 清, 杨仁树, 李均雷, 等. 爆炸荷载作用下动态裂纹扩展试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2912-2916.
- Li Qing, Yang Renshu, Li Junlei, et al. Experimental study on propagation of dynamic cracks under blasting loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2912-2916.
- [20] 李 清, 杨仁树. 爆炸荷载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 Renshu. Stress intensity factor and fracture behavior for crack propagation under blasting load[J]. Journal of China Coal Science, 2002, 27(3): 290-293.
- [21] 邵 鹏. 断续节理岩体中弹性波动力效应研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005: 33-38.
- [22] Takahashi K, Arakawa K. Dependence of crack acceleration on the dynamic stress-intensity factor in polymers[J]. Experimental Mechanics, 1987, 27(2): 195-200.

《煤炭学报》荣获“2012 中国最具国际影响力学术期刊”称号

2012 年 12 月 26 日, 2012 年《中国学术期刊影响因子年报 & 国际引证报告》暨“中国最具国际影响力学术期刊”发布会在国家会议中心举行。《煤炭学报》影响因子继续位居矿山工程技术类首位, 并荣获“2012 中国最具国际影响力学术期刊”称号, 这也是矿业工程技术类唯一入选的期刊。

此次评选活动是由清华大学图书馆、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、中国科学文献计量评价研究中心发起, 旨在客观地反映我国学术期刊国际影响力水平。中国科学文献计量研究中心、清华大学图书馆以 Web of Science(包括 SCI 等三大引文数据库)为统计源, 研制了《中国学术期刊国际引证报告》, 并按 TOP5%、TOP5%~10% 遴选, 结合专家意见, 评出了“中国最具国际影响力学术期刊”、“中国国际影响力优秀学术期刊”各 209 种, 其中当选“中国最具国际影响力学术期刊”的科技期刊有 175 种, 《煤炭学报》凭借自身在国际上的影响力获此殊荣。

本刊编辑部