

文章编号: 1001-1455(2009)04-0413-06

切槽孔爆破动态力学特征的动焦散线实验*

李 清¹, 王平虎^{1,2}, 杨仁树¹, 田晓冰¹, 韩伟光¹, 张二蒙¹

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;

2. 晋城无烟煤矿业集团有限公司寺河矿, 山西 晋城 048000)

摘要: 应用爆炸加载的透射式动焦散线测试系统, 分析了有机玻璃切槽孔爆破模型的裂纹动态特征变化规律。比较了不同切槽角度、切槽深度的定向断裂裂纹尖端的扩展长度、扩展速度和动态应力强度因子。初步探讨了切槽爆破的动态效应, 研究表明切槽孔爆破早期裂纹破坏模式为爆炸拉应力波作用下的 I 型快速扩展裂纹, 裂纹尖端拉应力集中积聚的较大应变能维持了爆炸裂纹进一步扩展, 裂纹尖端扩展后期表现为 P 波、S 波共同作用下的复合型扩展特征。切槽角为 60° 时获得的定向断裂效果最好, 合理切槽深度为炮孔半径的 1/4~1/2。

关键词: 爆炸力学; 裂纹扩展; 动焦散线; 切槽爆破; 动态效应

中图分类号: O384; TD235.1

国标学科代码: 130·35

文献标志码: A

1 引 言

材料在爆炸荷载作用行为和动态响应能有效揭示动态断裂机理, 是爆炸荷载作用下的力学破坏机理研究中最被关注的研究课题, 成为当今固体力学和材料科学界研究的热点之一。超动态爆炸荷载表现为爆炸应力波和高压气体 2 种作用, 二者的破坏因实际材料性质、荷载大小不同而有很大的不同, 爆炸荷载不同于静荷载而表现为结构惯性效应和材料高应变率效应的基本动力效应, 确定内爆炸荷载作用下介质周围动应力场的解析解一直是个难题, 实验仍是揭示爆炸断裂基本规律的有效途径。

测量应力场和位移场的动态光测力学方法在 20 世纪 70~90 年代较多地应用在工程爆破领域的研究。其中测量应力场的有动光弹法和全息干涉法; 测量位移场的有动态云纹、云纹干涉、全息干涉、散斑法等, 爆破模型研究中以动光弹和全息干涉法用得最多, 取得了一些研究成果^[1-2], 对于认识材料爆炸力学行为有一定的作用。但由于爆生裂纹尖端应力区表现为明显的奇异性, 光学条纹十分密集, 因此很难准确定量分析裂纹尖端的应力强度因子等动力学特征量, 而动焦散线实验方法^[3-4]对裂纹尖端的应力应变奇异场力学特征量测量精度较高, 与光弹性法及全息光弹性法相比, 焦散线法在研究裂纹尖端的力学行为方面具有优越性。

定向断裂爆破通过采用切槽炮孔、聚能药卷等技术有效实现定向控制炸药能量的释放, 此领域的研究和实践均取得了大量成果^[5-7]。早在 20 世纪 60 年代, U. Langefors 等对改变炮孔形状后的爆破效果研究表明^[8], 炮孔形状可以控制周边裂缝的生成, 切槽爆破控制了爆生裂缝的起裂和发展方向。本文中应用电爆炸加载的动焦散线测试系统进一步研究切槽孔爆破裂纹的动态力学特征, 着重研究不同切槽角度、切槽深度对爆破效果的影响规律, 为确定合理的切槽方式和探讨切槽孔爆破裂纹扩展机理提供参考。

2 实验模型和测试原理

加载方法采用高敏感度的叠氮化铅单质炸药, 起爆后产生瞬时爆炸荷载。装药时在炮孔内放置 2 组探针, 其中 1 组连接高压脉冲起爆器, 利用起爆器高压放电产生的火花引爆炸药; 另 1 组提供一个断通信号给延迟控制器, 传递触发信号, 延迟控制器自动按照预先设置好的幅间间隔时间连续传递 16 个触发信号给高速摄影机, 火花塞在预定时间内放电产生很强的脉冲光, 可得时间间隔可调的 16 幅动焦散线图片。为避免实验仪器被爆炸后的碎块所破坏, 同时尽可能减少防护装置影响实验结果, 在模型与场镜之间设置厚 3 mm 的无应力氟化玻璃, 采用了导烟装置降低炸药爆轰生成的爆

* 收稿日期: 2008-02-01; 修回日期: 2008-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(50774086); 国家 863 计划目标导向项目(2007AA06Z131)

作者简介: 李 清(1969—), 男, 博士, 副教授。

烟对视场的影响,以提高照片质量。

图 1 为切槽爆破模型示意图,实验材料为有机玻璃。爆炸加载透射式动焦散线试验系统主要包括光电系统、爆炸加载系统与同步控制系统。安装试件后,DDGS-II 型火花式高速摄影系统按延时控制器设置的幅间隔时间放电。

如图 2,将高速摄影底片记录的爆炸扩展轨迹通过投影放大仪,便可得到不同时刻裂纹扩展的尖端位置,由每个焦散斑的形状得出其纵向直径 D_l 与横向直径 D_t ,由此确定对应时刻裂纹扩展长度;由相邻 2 幅照片裂纹长度的差值,除以 2 幅照片的时间间隔,即可得到该时间间隔内的裂纹扩展平均速度。裂纹扩展各时刻的动态应力强度因子计算可采用以下各式

$$K_I^d = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3|C_t|dz_0} \left(\frac{3}{10\sin\frac{2\pi}{5}} \right)^{5/2} \left(\frac{D_l}{\delta_l} \right)^{5/2}, \quad K_{II}^d = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3|C_t|dz_0} \left(\frac{3}{10\cos^2\frac{\pi}{10}} \right)^{5/2} \left(\frac{D_t}{\delta_t} \right)^{5/2}$$

式中: K_I^d 为 I 型裂纹动态应力强度因子; z_0 为模型与参考平面的距离,取 520 mm; d 为模型厚度; C_t 为透射焦散线的应力光学常数,取 0.088 GPa^{-1} ; D_l 为焦散斑的纵向半径; D_t 为焦散斑的横向半径。实验条件确定后, z_0 、 C_t 、 d 就可以确定,对于有机玻璃试件的动态力学参数,已知 $c_p=2\,252 \text{ m/s}$ 、 $c_s=1\,200 \text{ m/s}$ 、 $E_d=4.5 \text{ GPa}$ 、 $\nu_d=0.38$ 。因为实验模型的裂纹扩展速度不大于 400 m/s ,因此 δ_l 和 δ_t 约等于 1。

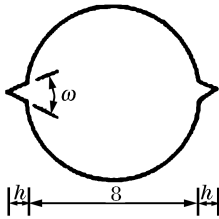


图 1 切槽爆破的模型

Fig. 1 A model for V-notch blasting

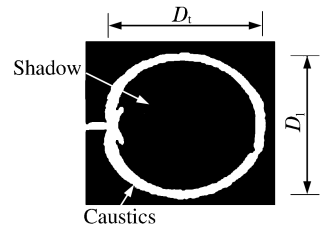


图 2 典型焦散斑

Fig. 2 The typical dynamic caustics spot

3 实验结果与切槽爆破力学行为分析

3.1 切槽角对爆破效果的影响

实验模型材料为有机玻璃,规格 $290 \text{ mm} \times 210 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,切槽角 ω 分别为 30° 、 60° 、 90° 等 3 种情况,切槽深度 h 为 2 mm ,炮孔直径 8 mm ,装药量均为 112 mg 。图 3~5 是切槽角度分别为 30° 、 60° 、 90° 的部分动焦散线照片,实验结果如图 6~7。图中, l_c 为裂纹尖端位置, v_c 为裂纹扩展速度。

图 6 中,在约 $120 \mu\text{s}$ 以后,裂纹扩展速度明显减慢,约 $170 \mu\text{s}$ 以后,裂纹扩展速度为最大速度的约 10% ,定向扩展裂缝主要在这个期间内形成。可以看出裂纹扩展速度在 $100 \mu\text{s}$ 较小时间范围内由 250 m/s 很快衰减为 25 m/s 左右。同

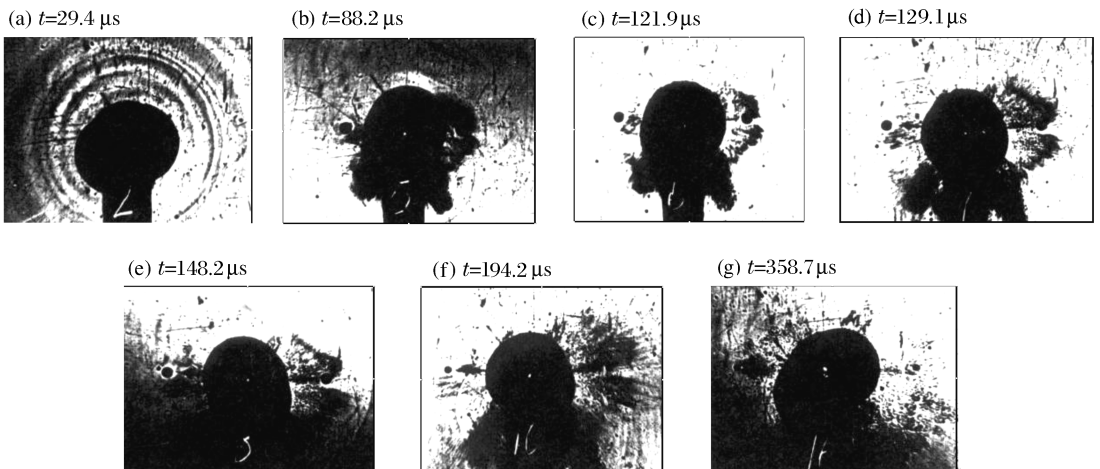


图 3 $\omega=30^\circ$ 时的切槽爆破系列动焦散线照片

Fig. 3 Photographs showing the crack propagation under the notched borehole blasting at $\omega=30^\circ$

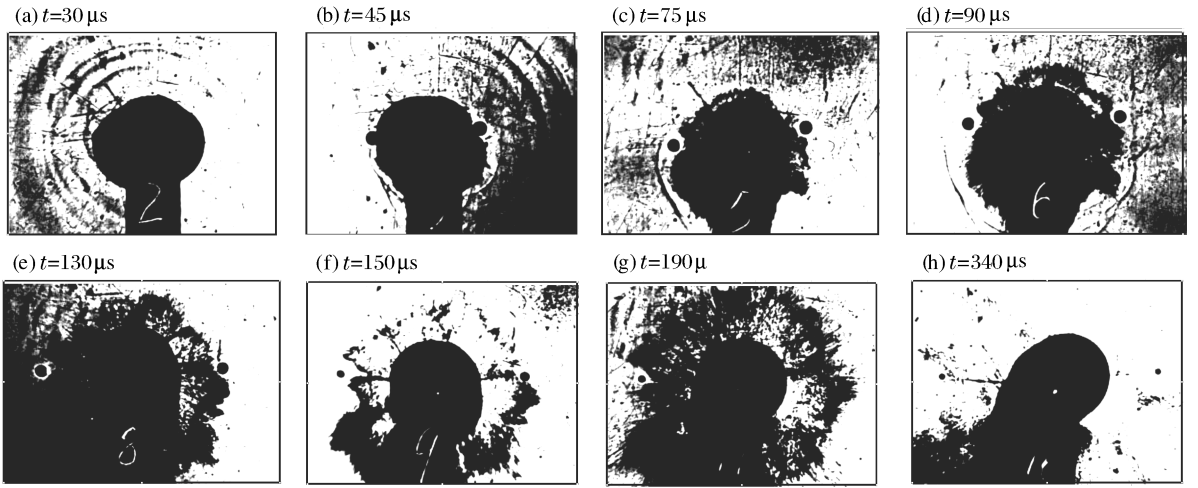


图 4 $\omega = 60^\circ$ 时的切槽爆破系列动焦散线照片

Fig. 4 Photographs showing the crack propagation under the notched borehole blasting at $\omega = 60^\circ$

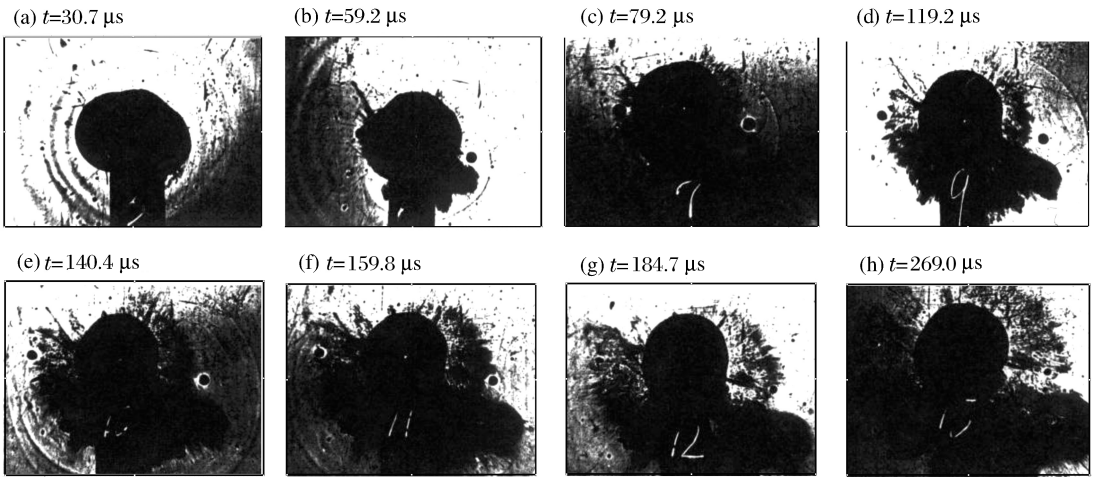


图 5 $\omega = 90^\circ$ 时的切槽爆破系列动焦散线照片

Fig. 5 Photographs showing the crack propagation under the notched borehole blasting at $\omega = 90^\circ$

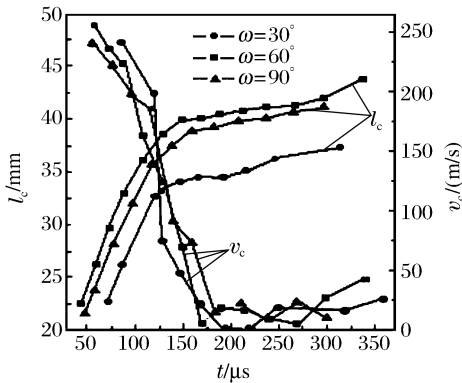


图 6 爆破载荷裂纹扩展与时间关系

Fig. 6 Crack propagation versus time under blast loading

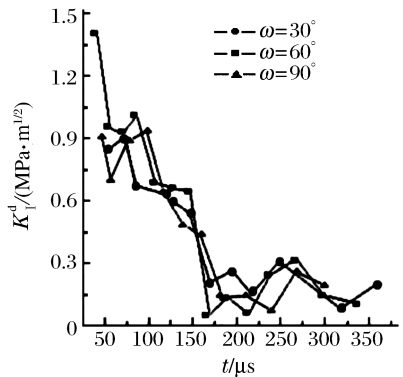


图 7 爆破动态应力强度因子与时间关系

Fig. 7 Dynamic stress intensity factor versus time

样,图 7 中爆生裂纹起始扩展阶段的应力强度因子值很大,但随着裂纹扩展, K_d 急剧下降,一直降到非常小, K_d 衰减速度变慢。裂纹扩展速度、动态应力强度因子后期变化都表现为减小到一定程度后,又开始有一定程度的增大,再由大变小直至止裂,呈现小幅度的波动,裂纹扩展速度、动态应力强度因子变化规律类似。

裂纹扩展速度、动态应力强度因子与裂纹尖端的应变能有必然关系。从动焦散线图3~5发现,炸药起爆后,爆轰波形成膨胀波(P波)与剪切波(S波),P波波速是S波的1.8倍左右,传播过程中,P波、S波相互分离,爆炸应力波在裂纹尖端表面发生绕射、反射,导致切槽尖端处产生较强的动态拉应力集中,裂纹尖端附近发生较大塑性变形,快速加载使裂缝尖端应变能积聚到较高程度,在切槽方向优先形成初始爆生裂纹,裂纹继续以一定速度扩展,表现为不同于静止裂纹的显著惯性效应。爆炸初期P波起主要作用,P波形成压应力波或张拉应力波,压应力波对裂尖不产生应力集中,而张拉应力波在裂尖形成应力集中,导致裂纹的扩展,若张拉应力脉冲较强,裂纹将随张拉脉冲逐步发展,爆炸荷载在炮孔周围产生的初期裂纹表现为I型裂纹的特征,切槽方向裂纹尖端的断口特征也表现为典型的拉断断裂,以张开变形占优,裂纹尖端不发生锐化变形,启裂位置、启裂方向与扩展方向趋于稳定。随着裂纹的扩展,S波的参与加重了剪切能量,S波的作用越明显,S波对裂纹扩展起主要作用,使得焦散斑形状的复合型特征更趋明显,裂纹尖端扩展后期的表现为复合型特征。裂纹快速扩展是裂纹尖端应变能不断释放的卸载破裂过程,裂纹尖端应变能不断消耗而使焦散斑直径由大变小,裂纹扩展后期,应力波在自由面形成的反射拉伸波作用于裂纹尖端,使裂纹尖端应变能增大,表现在裂纹尖端的焦散斑随爆炸应力波在裂纹尖端的应力集中程度发生增强或减弱,焦散斑形状和面积发生变化,裂纹尖端的应力场变化呈现振荡性,继续卸载到焦散阴影区很小,裂纹停止扩展。

尽管30 μs 内的爆炸裂纹发展过程的焦散斑很难从实验得到,但实验中发现,当切槽角为30°时,爆炸后73.7 μs 视场中出现焦散斑,此时裂纹尖端的应力强度因子为0.88 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;当切槽角为90°时,爆炸后49.5 μs 出现焦散斑,此时裂纹尖端的应力强度因子为0.89 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;当切槽角为60°时,爆炸后45 μs 出现焦散斑,此时裂纹尖端的应力强度因子为1.37 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。由此可以认为,其他条件相同时,切槽角60°的爆破裂纹起裂比30°和90°的都早。由图6~7,切槽角为60°的裂纹尖端扩展速度和动态应力强度因子比切槽角30°和90°的都大。

比较模型破坏后的最终结果,当炸药量和切槽深度相同时,切槽角60°形成的裂纹最长为115 mm,而切槽角30°、90°的裂纹长为105.85 mm,分别是炮孔直径的14.4、13.0和10.6倍。工程应用中,若切槽角度较小,相应钻具的槽尖锐,势必加剧钻孔时钻具的磨损而影响其使用寿命;另外,若切槽角度较大,裂纹沿切槽尖方向扩展速度的随机性增大,不利于裂纹的定向扩展,相应钻具的凿岩面积增加,影响钻孔速度。结合动焦散线模型实验结果,切槽爆破中选择60°的切槽角较好。

3.2 切槽深度对裂纹扩展的影响

模型材料为有机玻璃,尺寸为300 mm×220 mm×6 mm,孔径为8 mm,切槽角为60°,切槽深度分别为3.4 mm(左侧)、1.3 mm(右侧),装药量112 mg。图8为1组实验中2幅动焦散线照片,其中箭头指示的为焦散斑。表1为不同切槽深度下裂纹扩展情况对比, l_c 为裂缝长。

从图8、表1中看到,当切槽深度较大时,裂纹扩展的长度较大,但增加不明显,而裂纹扩展的速度却是当切槽深度较小时反而大。另外,如果切槽过深则钻孔难度加大。快速加载使切槽深度裂纹尖端的应变能随着裂缝长度增加和爆生气体压力下降,裂缝扩展的驱动力减小,爆炸应力波在切槽尖端处产生较强的动态拉应力集中,爆炸应力波峰值强度随传播距离衰减。因此,炮孔切槽深度较小时,起裂时拉应力集中大,裂纹尖端积聚的应变能较高,切槽深度小的裂纹尖端动态应力强度因子相比切槽深度较大的高,切槽深度较小的裂纹扩展速度大。但切槽深度过小时,切槽尖端的应力集中效应不明显,爆生裂纹沿切槽方向并不能表现出优先发展趋势。初步实验研究表明,理想的切槽深度为炮孔半径的1/4~1/2。

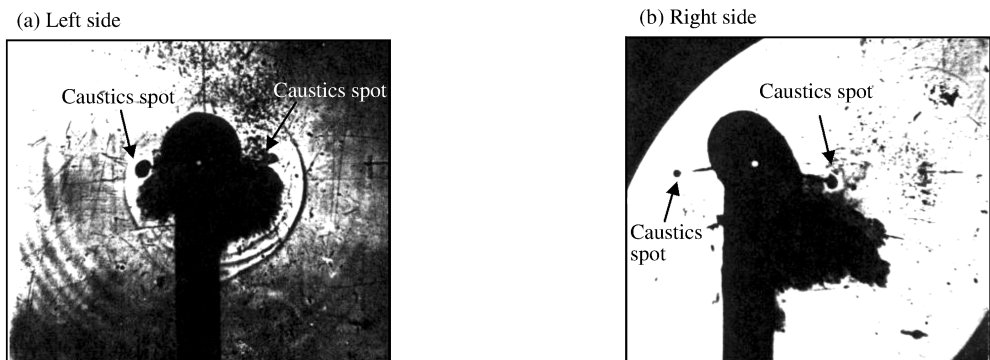


图8 不同切槽深度下动焦散线照片

Fig. 8 Photographs showing the crack propagation under different notch depths

表 1 不同切槽深度下的裂纹扩展
Table 1 The crack propagation under different notch depths

$t/\mu\text{s}$	$h=3.4\text{ mm}$			$h=1.3\text{ mm}$		
	l_c/mm	$v_c/(\text{m/s})$	$K_1^d/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	l_c/mm	$v_c/(\text{m/s})$	$K_1^d/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
61.3	26.46		0.98	23.69		1.02
82.8	30.67	195.8	1.03	28.87	240.9	1.03
102.5	33.94	165.9	0.64	32.42	180.2	1.04
122.0	36.49	130.8	0.35	35.03	133.8	0.92
147.2	37.95	57.9	0.15	35.94	36.1	0.82
172.6	39.11	45.7	0.14	36.48	21.4	0.52

3.3 切槽孔模型爆破的超动态应变测试

采用超动态应变测试切槽爆破模型的沿切槽方向和垂直方向的应变,应变测试系统主要由电阻应变片、SDY-2 超动态应变仪和 CS2092 动态数据分析仪组成。模型材料为有机玻璃,尺寸为 $330\text{ mm}\times 230\text{ mm}\times 6\text{ mm}$,切槽角 60° ,切槽深度 2 mm ,装药量 121 mg 。

由于切槽的应力集中作用效应,大大提高了沿切槽方向应变值。测点距炮孔中心 $40、80\text{ mm}$ 时,沿切槽方向应变峰值分别是 $0.003\ 729、0.001\ 142$;垂直切槽方向的应变值分别为 $0.001\ 013、0.000\ 743$ 。测点距 10 倍炮孔半径的 40 mm 处,切槽方向的应变峰值是垂直方向的 3.68 倍;距 20 倍炮孔半径 80 mm 处,切槽方向的应变峰值是垂直方向的 1.53 倍。同时,不同位置应变峰值随距离炮孔中心的距离增大,逐渐衰减,但切槽方向与非切槽方向的衰减程度不同。沿切槽方向的应变峰值最大,但衰减速度也快,测点距炮孔 80 mm 处的应变峰值仅是 40 mm 处的 30% ;沿垂直切槽方向的应变峰值较小,其衰减程度也小,测点距炮孔 80 mm 处的应变峰值却是 40 mm 处的 65% 。由此可知,沿切槽方向由于应力集中而优先形成爆生裂纹,应变能很快在裂纹定向扩展中释放;相对来说,垂直于切槽方向积聚的应变能小,应变也小,难以产生裂纹,因而能量释放速度慢,甚至这些能量部分转变为沿切槽方向释放,更有利于沿切槽方向裂纹的优先定向扩展。

4 结 论

切槽孔爆破主要是由于切槽孔的存在,炸药爆炸后在槽尖产生应力集中,从而改变可炮孔周围的应力场分布,使得爆炸能量相对集中地作用于该处,并优先由此产生裂缝,同时也抑制了其他方向裂纹的形成和扩展。沿切槽方向的早中期裂纹扩展基本表现为爆炸拉应力波作用下的 I 型,裂纹尖端形成的应力集中和积聚较大的应变能维持了爆破裂纹持续扩展,裂纹尖端扩展后期表现为 P 波、S 波共同作用下的复合型扩展特征。沿切槽方向的应变峰值总大于与垂直切槽方向的应变峰值。

切槽角度和切槽深度是直接影响定向断裂爆破效果的关键因素,切槽角 60° 左右、切槽深度为 $1/4\sim 1/2$ 倍炮孔半径能获得良好的定向断裂效果,有利于工程应用。实验表明,切槽角为 60° 的裂纹尖端扩展速度和动态应力强度因子比切槽角 30° 和 90° 的都大, 60° 切槽角形成的裂纹也最长。同时,切槽角度过小,则影响切槽钻具的使用寿命;切槽深度过大或过小都使槽尖应力集中程度降低,影响裂纹的定向发展,且过大的切槽深度加工难度大。

参考文献:

- [1] 朱振海. 动态光弹性研究中爆炸加载的若干问题处理[J]. 实验力学, 1986, 1(4): 384-387.
ZHU Zhen-hai. The processing of several problems in the experiment of the dynamic photoelasticity using explosive loading[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1986, 1(4): 384-387.
- [2] 朱振海, 杨永琦, 孙燕君, 等. 炮孔爆破中径向裂纹扩展的复合应力强度因子的研究[J]. 煤炭学报, 1989, 14(3): 103-111.
ZHU Zhen-hai, YANG Yong-qi, SUN Yan-jun, et al. Investigation of mixed type stress intensity factors of propagation of radial cracks in blast hole blasting[J]. Journal of China Coal Society, 1989, 14(3): 103-111.
- [3] 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 Ren-shu, LI Jun-lei, et al. Experimental study propagation of dynamic cracks under blasting loadng[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2912-2916.

- [4] 李清, 杨仁树. 节理介质中爆炸裂纹扩展的细观行为研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(3): 271-274.
LI Qing, YANG Ren-shu. Micro-behaviors of crack propagation in jointed materials under blasting load[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(3): 271-274.
- [5] 杜云贵, 张志呈, 李通林. 切槽爆破中 V 形切槽产生的力学效应研究[J]. 爆炸与冲击, 1991, 11(1): 26-30.
DU Yun-gui, ZHANG Zhi-cheng, LI Tong-lin. Studies on the mechanical effects produced by the V-shaped notch borehole blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 1991, 11(1): 26-30.
- [6] 杨永琦. 岩石聚能装药爆破[C]//工程爆破文集. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 175-180.
- [7] 罗勇, 沈兆武. 聚能药包在岩石定向断裂爆破中的应用研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(3): 250-255.
LUO Yong, SHEN Zhao-wu. Application study on directional fracture controlled blasting with shaped charge in rock[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(3): 250-255.
- [8] 宗琦. 岩石炮孔预切槽爆破断裂成缝机理研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 30-33.
ZONG Qi. Investigations into mechanism of crack formation for grooved hole-well blasting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 30-33.

Experimental investigation on dynamic mechanical behaviors of cracks induced by V-notch borehole blasting with dynamic caustics

LI Qing^{1*}, WANG Ping-hu^{1,2}, YANG Ren-shu¹, TIAN Xiao-bing¹,
HAN Wei-guang¹, ZHANG Er-meng¹

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

2. Shihe Coal Mine, Jincheng Anthracite Coal Mining Group Corporation Ltd, Jincheng 048205, Shanxi, China)

Abstract: Using the transparent material PMMA, a model experiment was carried out by the transmitted dynamic caustics to obtain a series of dynamic caustic photos. By the experimental results, the directional fracture characteristics of crack tips, such as dynamic stress intensity factors, expanding lengths and velocities, were discussed for different notch angles and depths. In addition, dynamic effects in V-notch blasting were explored according to the discussed results. It is shown that the cracks are subjected to tensile (mode-I) loading to rapidly expand at the initial stage of the V-notch blasting and later the crack tip propagation is affected by the combined action of P and S waves (complex mode). And the appropriate V-notch angle and notch depth was obtained to control the directional fracture.

Key words: mechanics of explosion; crack propagation; dynamic caustics; V-notch blasting; dynamic effect

* Corresponding author; LI Qing
Telephone: 86-10-62331292-210

E-mail address: liq@cumtb.edu.cn