DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-0952-07

爆炸应力波作用下动、静裂纹相互作用的实验研究*

杨仁树[1,2],左进京[1],杨立云[1],李炜煜[1],余贤涛[1]
(1.中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083;
2.中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程重点实验室,北京 100083)

摘要:采用数字激光动态焦散线测试系统,研究爆炸应力波作用下动裂纹与预制静裂纹(水平夹角为90°、150°)相互作用机理,以及裂纹扩展的动态行为。结果表明:(1)在动、静裂纹贯通之前,静裂纹两端便出现焦散斑,动、静裂纹贯通以后,静裂纹沿爆炸应力波传播方向扩展,并且扩展速度小于动裂纹扩展速度,也小于无静裂纹时动裂纹扩展速度;(2)静裂纹存在时,动裂纹扩展的总体长度减小。动裂纹起裂时间缩短,扩展速度基本不受静裂纹的影响,裂纹应力强度因子值大于静裂纹两端值;(3)随着静裂纹水平夹角的增大,动、静裂纹贯通时动裂纹沿水平方向偏转距离增大,静裂纹 B 端反向扩展与动裂纹相互"咬合",C 端裂纹扩展位移和速度增大。

关键词:爆炸应力波;动态焦散线;动裂纹;扩展机制
中图分类号:O347.4 **国标学科代码**:13015 **文献标志码**:A

爆炸应力作用下动、静裂纹相互作用机理研究一直是很多学者非常关注的问题[1-3]。R. S. J. Corran 等[4]研究了冲击荷载下简支梁中预制裂纹尖端等差条纹模式和应力波的传播机制。H. P. Rossmanith 等[5]通过焦散与光弹实验结合在一起,研究了应力波与裂纹相互作用机制。肖同社等[6-7]运用动焦散系统,研究了裂纹过节理面时裂纹尖端动态应力强度变化,为节理岩体的断裂爆破提供依据。谢冰等[8]对爆炸作用下,预制裂纹与炮孔呈不同角度时进行预裂爆破研究,表明在裂纹与炮孔垂直时预裂爆破效果最好。胡荣等[9]通过模型实验,发现炮孔与裂纹的方位角度对爆生裂纹的产生分布有很大影响。杨鑫等[10]采用有机玻璃板为模型材料,研究了裂纹与炮孔相对位置变化时裂纹的扩展情况,得出了爆生裂纹随预制裂纹角度变化而变化的模型机制。李清等[11-12]研究了爆炸荷载作用下多条预制裂纹相互作用的动态扩展规律,得出预制裂纹减弱了爆炸主裂纹扩展行为的结论。杨仁树等[13]研究了冲击荷载下含缺陷介质时裂纹扩展的动态行为。

本文中利用动焦散测试系统[14],建立实验模型,研究爆炸应力波驱使下动裂纹与静裂纹的相互作用关系。

1 数字激光动态焦散线实验

1.1 动焦散测试系统

当光束平行照射带裂纹的试件时,在裂纹运动过程中,由于裂纹尖端有应力的集中现象,造成在裂纹尖端处试件厚度发生变化,影响其折射率与透光率,造成透射光偏离平行光,设定某一位置平行于试件,作为参考平面,在场景中会形成由明亮线包裹的一个暗区,该明亮线就是焦散线,暗区为焦散斑。

数字激光动焦散实验系统由高速摄影仪、场镜、试件、激光光源等组成。实验开始前预热激光光源,调整高速摄影仪位置,得到明亮清晰的光场。实验操作比较方便,目前主要用于冲击、爆破等动态裂纹扩展的光测力学分析,图 1 为透射式焦散线实验系统光路。

* **收稿日期**:2016-04-13;**修回日期**:2016-07-18
基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2016YFC0600903);
高等学校学科创新引智计划项目(B14006)
第一作者:杨仁树(1963—),男,博士,教授,博导,ceowyb818@163.com。

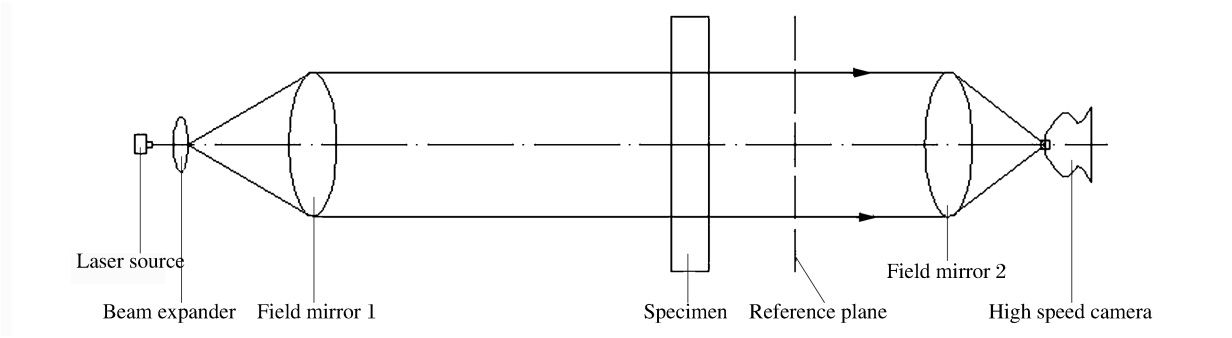

图 1 透射式焦散线实验系统光路

Fig. 1 Light path of transmissive caustics experimental system

1.1.1 裂纹扩展位移与扩展速度的确定

根据实验所拍摄的照片，确定一个参考平面，量取图片焦散斑中心距离参考平面的位移值，根据图片的比例大小，把图片上焦散斑位移值转化为实际值。求出每两幅图片的实际位移差，规定起爆时刻为位移 0 点，根据实际位移差可得出位移曲线。由每幅图片的位移差和时间间隔，可以求出焦散斑在邻近两幅图中的平均速度值。

1.1.2 动态应力强度因子 $K_{\mathrm{I,d}}$ 的确定

应力强度因子是反映裂纹扩展尖端弹性物理场强弱变化的参量，其值大小和焦散斑的直径大小、实测物体的几何尺寸、外力大小等有关。焦散斑直径越大表明裂纹尖端所处的应力场奇异性越大，尖端累积的能量就越大，应力强度因子值就越大。通过测量图片中裂纹尖端焦散斑直径，可以计算出应力强度因子值，由此可得出应力强度因子随时间的变化曲线。

在爆炸荷载下，试件每一点所处的应力场都是复合应力场。动态载荷下复合型裂纹扩展应力强度因子[15]为：

$$K_{\mathrm{I,d}}=\frac{2\sqrt{2\pi}F(v)}{3z_0g^{5/2}cd}D_{\max}^{5/2} \tag{1}$$

式中：$K_{\mathrm{I,d}}$ 为复合型裂纹尖端的动态应力强度因子，$D_{\max}$ 为所测焦散斑最大直径，z_0 为参考平面到试件的距离，g 为应力强度数值因子，c 为材料的应力光学常数，d 为试件的有效厚度，$F(v)$ 为由裂纹扩展速度引起的修正因子，在具有实际意义的裂纹扩展速度下，其值取 1。

1.2 实验描述

为了研究爆炸应力波作用下动裂纹与静裂纹的关系，首先要产生一条稳定的动裂纹，产生动裂纹的方法有很多，例如采用切缝药包可以产生动裂纹[16]，但是切缝药包作用下的裂纹为应力波和爆生气体共同作用的结果，对于研究应力波作用下产生动裂纹与静止裂纹作用关系时有一定的影响。实验根据空孔的应力集中效应，在空孔与炮孔连线方向上预制一条与空孔贯穿的裂纹，在爆炸应力波作用下，受空孔应力集中作用，裂纹会起裂并且扩展，产生稳定的动裂纹。

实验材料为有机玻璃板(PMMA)，尺寸大小为 500 mm×300 mm×5 mm。如图 2 所示，有机玻璃

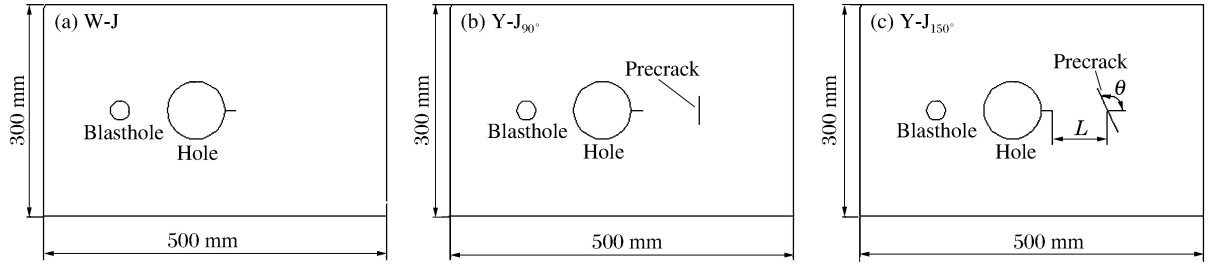

图 2 模型加工示意图

Fig. 2 Schematic of model processing

板的力学参数为:剪切波波速 c_s=1 260 m/s,纵波波速 c_p=2 320 m/s,泊松比 ν_d=0.31,弹性模量 E_d=6.1 GN/m^2,光学常数 $|C_t|$=85 μm^2/N。炮孔直径为 5 mm,炮孔装药为 130 mg 叠氮化铅单质炸药。空孔直径为 30 mm,空孔右侧预制裂纹长度为 4 mm,与空孔贯通,其作用为产生动裂纹。实验分为两部分:(1)无预制静裂纹时动裂纹的扩展情况,如图 2(a)所示;(2)有静裂纹时动、静裂纹相互作用时的特征,其中静裂纹与水平方向的夹角 θ=90°时的情况如图 2(b)所示,静裂纹与水平方向的夹角 θ=150°时的情况如图 2(c)所示。预制静裂纹长度为 10 mm,与动裂纹起点距离 L=15 mm。

1.3 实验结果

图 3 为动、静裂纹作用实验结果。其中端点 A 为动裂纹起点,端点 B 为静裂纹靠近端点 A 的一端,端点 C 为远离端点 A 的一端。图 3(a)为无静裂纹时,端点 A 处产生动裂纹的最终扩展情况,动裂纹扩展长度为 64 mm;图 3(b)为在动裂纹扩展路径上有静裂纹时的裂纹扩展情况,可以看出,动裂纹与静裂纹贯通,贯通点偏向端点 C 处 2 mm,从端点 C 处起裂扩展,裂纹沿水平方向扩展,扩展长度为 22 mm。端点 B 处则没有起裂;图 3(c)为静裂纹与水平方向夹角 θ=150°时,动、静裂纹相互作用最终结果,动裂纹与静裂纹贯通,贯通点偏向端点 B 处 3 mm,端点 B、C 处都发生起裂,端点 B 处裂纹与动裂纹相交在一起,端点 C 裂纹沿水平方向扩展,扩展长度为 42mm。结果表明:动、静裂纹相互作用时,动裂纹扩展的总体长度减小;静止裂纹有一定偏转角度且动、静裂纹贯通时,动裂纹沿水平方向偏转距离增大,端点 B 处起裂并且端点 C 处裂纹扩展长度增大。

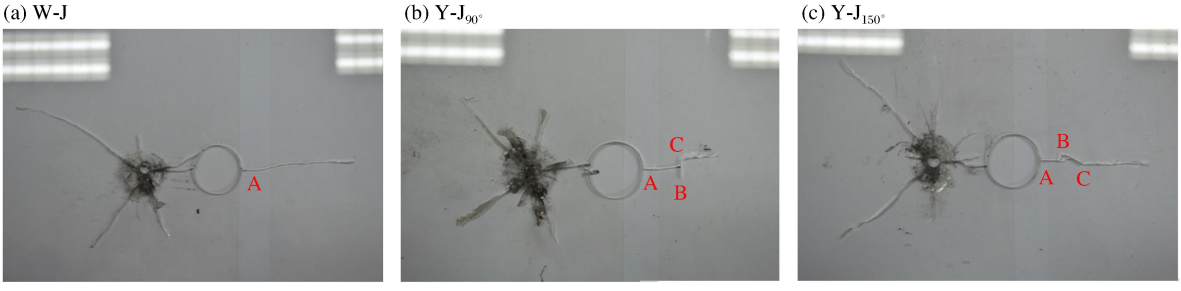

图 3 动、静裂纹作用最终实验结果

Fig. 3 Experimental results of dynamic and static crack interaction

2 动、静裂纹相互作用机理研究

2.1 动、静裂纹相互作用过程分析

图 4(a)为无静止裂纹时端点 A 处动裂纹扩展的系列焦散斑图像,t=10 μs 时端点 A 处开始出现焦散斑,t=70 μs 时裂纹开始扩展,t=280μs 时止裂。图 4(b)为静止裂纹存在时,动、静裂纹相互作用的系列焦散斑图像,t=10 μs 时端点 A 处开始出现焦散斑,t=40 μs 时动裂纹开始扩展,并且静裂纹两端同时出现焦散斑,t=70 μs 时动裂纹扩展至静裂纹边缘,t=90 μs 时动裂纹焦散斑完全进入静裂纹,动裂纹所携带的能量也传递到静裂纹端点处,在端点 B、C 处出现焦散斑,t=110 μs 时端点 C 处开始起裂,裂纹扩展方向沿着水平方向即应力波传播方向。t=240 μs 时止裂。图 4(c)为静裂纹与水平夹角 θ=150°时,动、静裂纹相互作用的系列焦散斑图像,t=20 μs 时动裂纹开始扩展,静裂纹两端同时出现焦散斑,t=30 μs 时动裂纹尖端焦散斑与端点 B 处焦散斑呈倾斜“哑铃”状,t=50 μs 时端点 B 处在动裂纹尖端应力场的作用下发生起裂,并且向着动裂纹方向扩展,说明动裂纹尖端形成了拉应力场,使端点 B 处裂纹在反射拉伸的作用下发生扩展。t=90 μs 时,端点 C 处起裂并沿水平方向扩展,t=220 μs 时止裂。根据焦散斑图像可以看出:在动、静裂纹贯通之前,静裂纹两端便出现焦散斑,动、静裂纹贯通以后,静裂纹才在端点 C 处开始扩展。静裂纹有一定偏角时,端点 B 处在动裂纹在尖端应力场的作用下发生拉伸扩展。

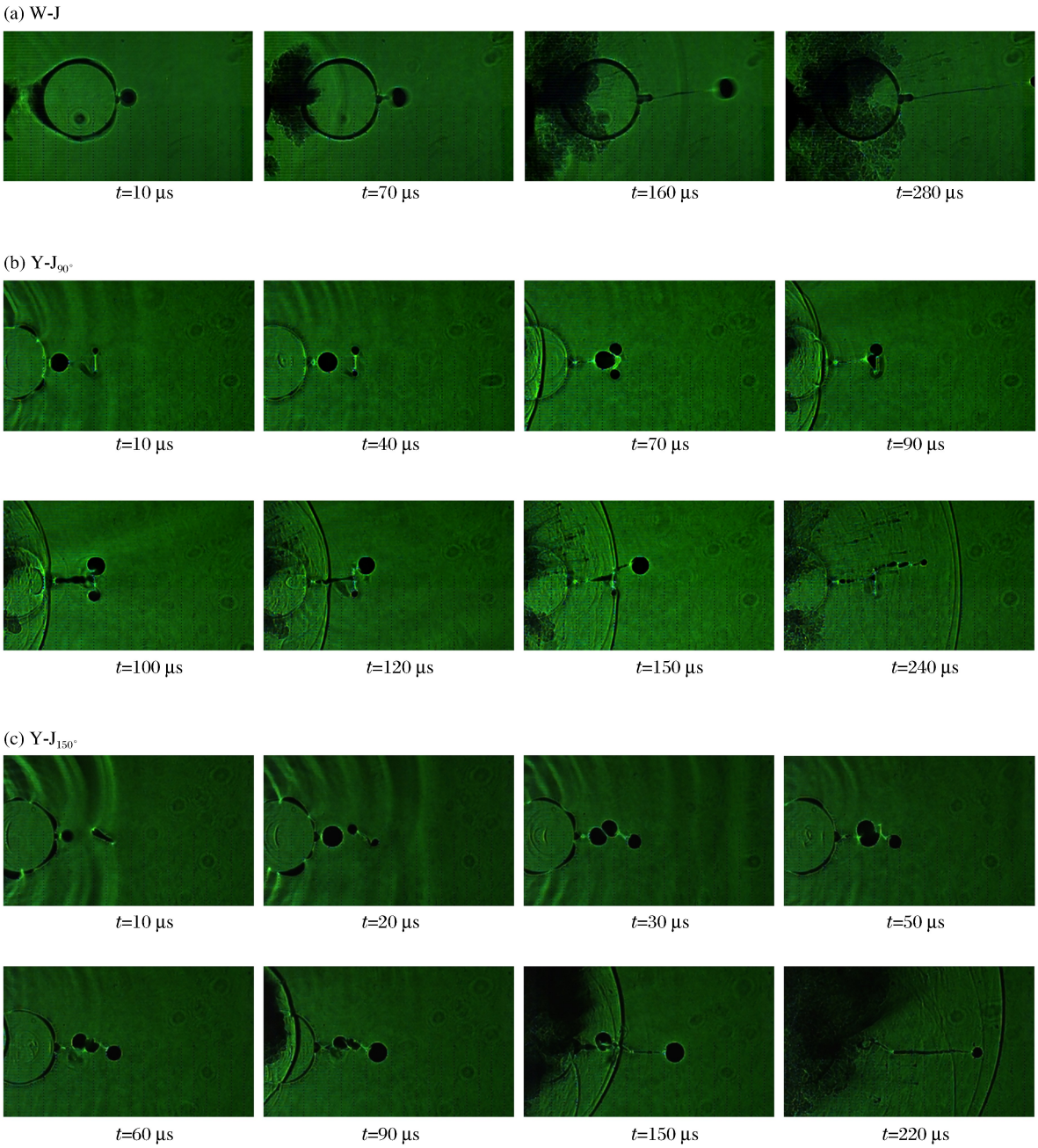

图 4　裂纹扩展的焦散斑图片

Fig. 4　Digital speckle photos of crack propagation

2.2　动、静裂纹相互作用动态分析

为了更好地对比动、静裂纹相互作用过程，首先对比分析 W-J 和 Y-$J_{90°}$的动态过程，以揭示静裂纹对动裂纹的影响。然后对比分析 Y-$J_{90°}$和 Y-$J_{150°}$的动态过程，找出静裂纹不同角度下动、静裂纹相互作用机理。

图 5(a)为无静裂纹和静裂纹与水平夹角为 90°时的动态过程。从速度与位移图可以看出，无静裂纹时端点 A 处在 t＝60 μs 时起裂，有静止裂纹时端点 A 处在 t＝30 μs 时起裂，即静裂纹的存在导致动裂纹的起裂时间减小。这可能是由于端点 A 处在爆炸应力波作用下形成的焦散斑受到静裂纹的影响所致。Y-$J_{90°}$中端点 A 处的速度基本没有受静裂纹的影响，和无静裂纹时的速度差不多。端点 C 处的扩展速度要小于端点 A 处的扩展速度，也小于无静裂纹时的速度。这是由于动、静裂纹相互贯通时耗

散了部分能量，同时要使端点 C 处起裂也要消耗部分能量，C 处裂纹在扩展过程中携带的能量减小，速度降低，这也是最终动裂纹扩展位移要小于没有静裂纹时位移的原因。从应力强度因子图可以得出，Y-J$_{90°}$中端点 A 处应力强度因子值大于端点 B、C 处值，受静裂纹的影响，端点 A 处应力强度因子值要大于无静裂纹时的值。端点 B、C 处在 $t=110$ μs 之前处于未起裂阶段，此阶段端点 C 处的应力强度因子值要大于端点 B 的应力强度因子值，端点 C 处应力强度因子要小于无静裂纹时的值。

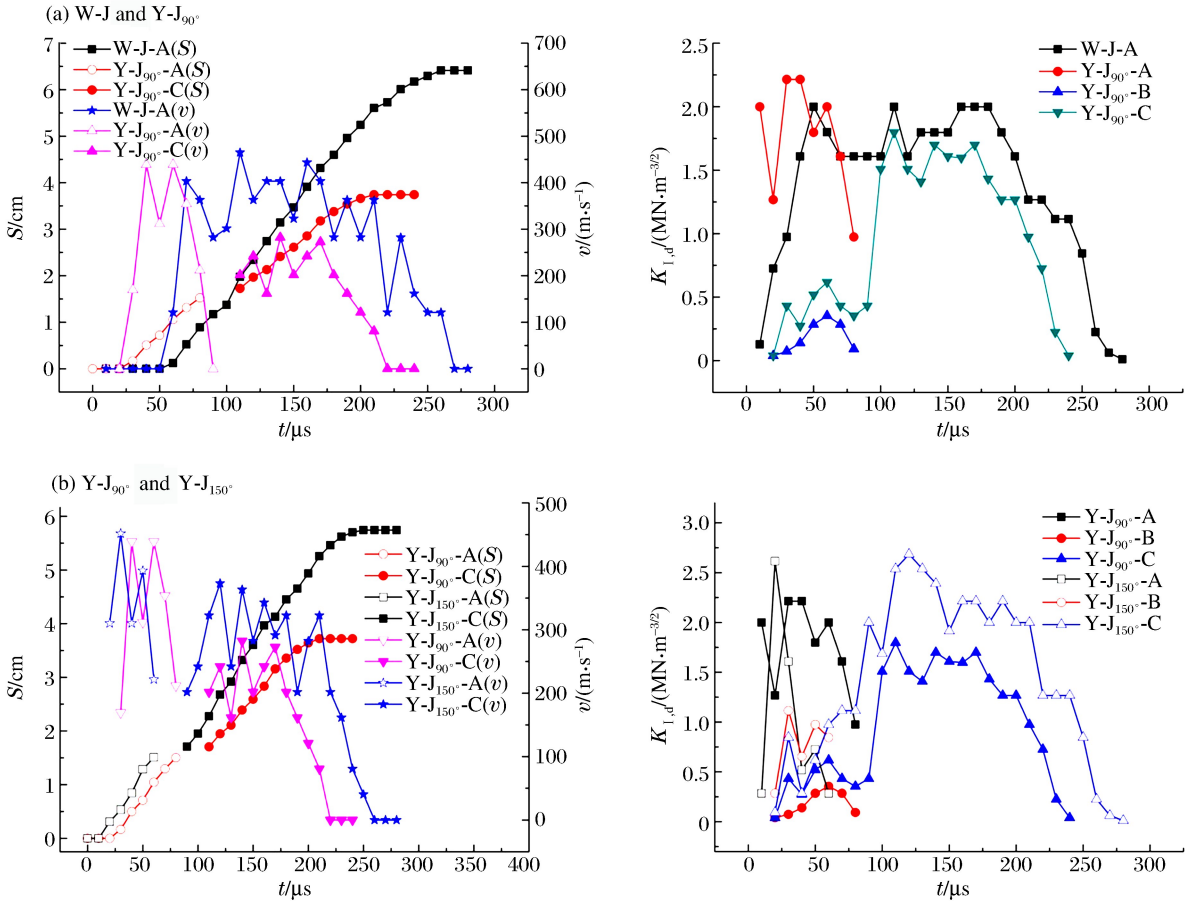

图 5 $K_{\mathrm{I,d}}$及裂纹尖端速度和位移随时间的变化规律

Fig. 5 Variation of $K_{\mathrm{I,d}}$ and displacement and velocity of crack tip with time

图 5(b)为静裂纹与水平夹角分别为 90°、150°时的动态过程。速度与位移图中，端点 A 起裂时刻 Y-J$_{150°}$时早于 Y-J$_{90°}$时，端点 C 处裂纹扩展位移 Y-J$_{150°}$时大于 Y-J$_{90°}$时。结合上面结果分析可以得出：静裂纹的存在对于端点 A 处裂纹起裂时间有影响并使起裂时间缩短，随着预制裂纹与水平方向的角度的增大，这种影响加剧；端点 C 处裂纹位移长度随着静裂纹与水平方向的角度的增大而增大，但都小于无静裂纹时的位移。端点 A 处裂纹速度 Y-J$_{150°}$时与 Y-J$_{90°}$时整体差不多，但端点 C 处裂纹速度 Y-J$_{150°}$时要大于 Y-J$_{90°}$时。结合上面结果分析可以得出：端点 C 处的裂纹速度随着静裂纹与水平角度的增大而增大，但都小于无静裂纹时的速度。Y-J$_{150°}$时端点 A 处应力强度因子值受静裂纹的影响程度要大于 Y-J$_{90°}$时的情况，表现为强度值更加跳跃。端点 B、C 处的应力强度因子值在 Y-J$_{150°}$时也要大于在 Y-J$_{90°}$时的情况，但相反的是，Y-J$_{90°}$时端点 B 处的应力强度因子值要大于端点 C 处的应力强度值，这是由于随着静裂纹与水平方向夹角的增大，端点 B 处受到端点 A 处动裂纹尖端应力的影响更大，在与静裂纹贯通之前，端点 B 处的应力强度值要大于端点 C 处的。结合上面结果分析可以得出：静裂纹与水平方向的夹角不同时，动、静裂纹相互作用时各端点的应力强度值的大小变化情况有所不同，端点 B、C 处的应力强度因子值随着静裂纹与水平方向夹角的增大而增大。

3 结　论

(1)在动、静裂纹贯通之前，静裂纹两端便出现焦散斑，动、静裂纹贯通以后，在端点 C 处沿水平方向扩展。随着静裂纹与水平方向夹角的增大，端点 B 处在动裂纹尖端应力场的作用下发生反向拉伸扩展，与动裂纹相互“咬合”。

(2)静裂纹存在时，动裂纹扩展的总体长度减小。随着静裂纹与水平方向夹角的增大，动、静裂纹贯通时动裂纹沿水平方向偏转距离增大，端点 C 处的裂纹扩展长度增大。

(3)静裂纹的存在使端点 A 处裂纹的起裂时间缩短，随着静裂纹与水平方向角度的增大，这种影响加剧；端点 A 处裂纹扩展速度基本不受静裂纹的影响，但动、静裂纹贯通后，端点 C 处裂纹扩展速度小于端点 A 处扩展速度，也小于无静裂纹时动裂纹扩展速度；同时随着静裂纹与与水平方向角度的增大，端点 C 处裂纹扩展速度增大。

(4)受静裂纹的影响，端点 A 处的裂纹应力强度因子值大于端点 B、C 处的，端点 B、C 处的应力强度因子值随着静裂纹与水平方向夹角的增大而增大。

参考文献：

[1] Li J C, Ma G M. Experimental study of stress wave propagation across a filled rock joint[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009,46(3):471-478.

[2] Wang Z L, Konietzky H. Modelling of blast-induced fractures in jointed rock masses[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009,76(12):1945-1955.

[3] 郭文章，冯顺山，王树仁，等. 节理岩体爆破研究进展[J]. 工程爆破，1999,5(4):72-77.
Guo Wenzhang, Feng Shunshan, Wang Shuren, et al. Progress in blasting research of jointed rock mass[J]. Engineering Blasting, 1999,5(4):72-77.

[4] Corran R S J, Mines R A W, Ruiz C. Elastic impact loading of notched beams and bars[J]. International Journal of Fracture, 1983,23(2):129-144.

[5] Rossmanith H P, Shukla A. Dynamic photoelastic investigation of interaction of stress waves with running cracks [J]. Experimental Mechanics, 1981,21(11):415-420.

[6] 肖同社，杨仁树，庄金钊，等. 节理岩体爆生裂纹扩展动态焦散线模型试验研究[J]. 爆炸与冲击，2007,27(2):159-164.
Xiao Tongshe, Yang Renshu, Zhuang Jinzhao, et al. Dynamic caustics model experiment of blasting crack developing on sandwich rock[J]. Explosion and Shock Waves, 2007,27(2):159-164.

[7] 肖同社，杨仁树，边亚东，等. 含节理岩体爆生裂纹扩展的动焦散模型实验研究[J]. 实验力学，2006,21(4):540-544.
Xiao Tongshe, Yang Renshu, Bian Yadong, et al. Dynamic caustic model experiment of blasting crack propagating on joint rock[J]. Journal of Experiment Mechanics, 2006,21(4):540-544.

[8] 谢冰，李海波，王长柏，等. 节理几何特征对裂隙爆破效果影响的数值模拟[J]. 岩土力学，2011,32(12):3812-3820.
Xie Bing, Li Haibo, Wang Changbai, et al. Numerical simulation of presplit blasting influenced by geometrical characteristics of joints[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(12):3812-3820.

[9] 胡荣，朱哲明，胡哲源，等. 爆炸动载荷下裂纹扩展规律的实验研究[J]. 岩土力学与工程学报，2013,32(7):1476-1481.
Hu Rong, Zhu Zheming, Hu Zheyuan, et al. Experiment study of regularity of crack propagation under blasting dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(7):1476-1481.

[10] 杨鑫，浦传金，肖定军，等. 不同方位裂隙对爆炸裂纹扩展的影响[J]. 实验力学，2014,29(6):751-759.
Yang Xin, Pu Chuanjin, Xiao Dingjun, et al. On the effect of cracks with different orientation on the propagation of blast-induced cracks[J]. Journal of Experiment Mechanics, 2014,29(6):751-759.

[11] 李清，张茜，李晟源，等. 爆炸应力波作用下分支裂纹动态力学特性试验[J]. 岩体力学，2011,32(10):3027-3032.
Li Qing, Zhang Xi, Li Shengyuan, et al. Experiment study of dynamic fracture behaviors of branched cracks under blasting stress wave[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(10):3027-3032.

[12] 李清.爆炸致裂的岩石动态力学行为与断裂控制试验研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2009.

[13] 杨仁树,王雁冰,侯丽冬,等.冲击荷载相爱缺陷介质裂纹扩展的 DLDC 试验[J].岩石力学与工程学报,2014,33(10):1971-1974.
Yang Renshu, Wang Yanbing, Hou Lidong, et al. DLDC experiment on crack propagation in defective medium under impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014,33(10):1971-1974.

[14] 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实验研究[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.

[15] 杨仁树,王雁冰.切缝药包不耦合装药爆破爆生裂纹动态断裂效应的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(7):1337-1343.
Yang Renshu, Wang Yanbing. Experiment study on dynamic fracture effect of blasting crack in slotted cartridge decoupling charge blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(7):1337-1343.

[16] 杨仁树,王雁冰,杨立云,等.双孔切槽爆破裂纹扩展的动焦散试验[J].中国矿业大学学报,2012,41(6):868-872.
Yang Renshu, Wang Yanbing, Yang Liyun, et al. Dynamic caustics experiment study on crack propagation in two borehole cut blasting[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2012,41(6):868-872 .

Dynamic and static crack interaction under action of explosive stress wave

Yang Renshu[1,2], Zuo Jinjing[1], Yang Liyun[1], Li Weiyu[1], Yu Xiantao[1]

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

Abstract: This paper studied the interaction mechanism between the dynamic crack and the precast static crack (horizontal angle for 90° and 150°) under the action of explosion stress and the dynamic behavior of crack propagation using the digital laser dynamic caustics test system. The results show that before the dynamic crack and static crack coalescence, the caustics speckles will occur at both ends of the static crack, while after the dynamic crack and static crack coalescence, the static crack extends in the horizontal direction with a speed lower than that of both the dynamic crack and the crack expansion without static crack; that when the static crack exists, the overall length of the dynamic crack expansion is reduced, the crack initiation time is shortened, the expansion speed is not affected by the static crack, and the stress intensity factor of the crack is greater than that of the static crack; and that as the horizontal angle of the static crack increases, the deflection distance of the dynamic crack increases along the horizontal direction when the dynamic crack and the static crack become coalescenced, end point B of the static crack expands towards the opposite direction, ending in "mutual occlusion" with end point C of the dynamic crack as the displacement and velocity of the latter's expansion increases.

Keywords: blasting stress wave; dynamic caustics; dynamic crack; propagation mechanism

(责任编辑 曾月蓉)