DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0304-08

定向断裂控制爆破的空孔效应实验分析*

岳中文,郭 洋,许 鹏,王 煦,宋 耀
(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083)

摘要: 采用新型数字激光动态焦散线实验系统,对爆炸荷载作用下空孔周围的动应力场分布及空孔对爆生主裂纹扩展行为的影响进行了研究。研究结果表明,在空孔周围强应力场的影响下,2 条相向扩展的爆生主裂纹逐渐向空孔处偏转,并在空孔处贯通;空孔附近的主应力方向与炮孔连心线夹角基本稳定在约 12°,增大空孔尺寸对空孔附近的主应力方向影响不明显;爆炸应力波与空孔相互作用,产生反射拉伸波,改变了主裂纹尖端的应力场,降低了主裂纹的扩展速度,且空孔直径越大,主裂纹的扩展速度越低;当爆生主裂纹扩展到空孔附近时,主裂纹尖端动态应力强度因子再次出现上升的趋势。

关键词: 爆炸力学;定向断裂控制爆破;爆破裂纹数字激光动态焦散线;空孔;爆破裂纹
中图分类号: O383.2 **国标学科代码**: 1303520 **文献标志码**: A

在井巷掘进施工中,钻爆法由于对地质条件的适应性强,施工成本低、速度快,操作工艺简单,因而在施工中应用广泛。采用传统爆破的方法进行施工时,往往会造成较大的超挖或欠挖,不仅增加了后期喷浆作业的费用,也增加了围岩的损伤,降低了围岩的稳定性[1]。为此,国内外学者提出了很多定向断裂控制爆破的方法。其中,通过在装药孔间设置空孔来实现定向断裂爆破的效果已在工程实践中被人们所证实,并且取得了较好的效果。该方法主要是利用空孔的影响,使爆生主裂纹方向偏向空孔方向,从而实现定向断裂,空孔的这种作用也被称为“空孔效应”[2]。

长期以来,一些学者对“空孔效应”进行了大量的研究。B. B. Mohanty[3-4]最先提出了在装药孔间设置空孔来达到控制爆破裂纹扩展的方向,并随后通过实验和现场测试进行了证明。Y. Nakamura 等[5]进行了爆破裂纹扩展控制实验,并对普通空孔和在空孔两侧切槽对爆生裂纹扩展的影响进行了分析。S. H. Cho 等[6]采用数值模拟和实验相结合的方法对空孔的定向断裂效果进行了研究。刘优平等[7]从理论上对空孔的作用机理进行了分析。毕谦等[8]采用动光弹法对空孔附近的动应力分布情况进行了研究,认为空孔壁附近的动拉应力集中是诱发主裂纹沿空孔方向运动的主要原因。文椿等[9]采用 LS-DYND 2D 数值软件利用不同空孔参数对空孔导向作用的影响进行了研究。姚学锋等[10]等采用焦散线实验方法研究了爆炸应力波对裂纹和空孔的作用,并得出了裂纹尖端应力强度因子及空孔周围应力场随时间的变化规律。然而由于爆炸荷载的瞬时性、爆炸作用的复杂性等原因,人们对含空孔时爆生裂纹扩展规律的研究还十分有限,存在很多的不足。因此,研究爆炸荷载下空孔的作用机理及其与爆生裂纹的相互作用关系具有重要的意义。

本文中采用新型数字激光动态焦散线实验系统,以有机玻璃板(PMMA)为实验材料,对两孔同时起爆时的“空孔效应”进行了研究,分析了在爆炸应力波作用下不同尺寸空孔周围应力场的变化及其对爆生主裂纹扩展行为的影响规律。研究结果表明,在空孔周围强应力场的影响下,2 条相向扩展的爆生主裂纹逐渐向空孔处偏转,并在空孔处贯通;爆炸应力波与空孔相互作用,产生反射拉伸波,改变了主裂纹尖端的应力场,降低了主裂纹的扩展速度,当爆生主裂纹扩展到空孔附近时,主裂纹尖端动态应力强度因子再次出现上升的趋势。

* **收稿日期**: 2013-09-24; **修回日期**: 2014-01-06
基金项目: 国家自然科学基金项目(51374210,51134025);中央高校基本科研业务费项目(2009QL15)
第一作者: 岳中文(1975—),男,博士,副教授,zwyue75@163.com。

1　实验测试原理

在爆炸荷载作用下，爆炸应力场中爆炸压力脉冲主要以压缩波和剪切波这 2 种体波形式传播，由于 2 种波的共同作用，在介质中任意一点产生正应力和切应力，即爆炸应力场为复合型，因而介质中的裂纹可视为复合型裂纹。对于动态焦散线测试方法，由其测试原理可知，裂纹尖端的复合应力强度因子可表示成：

$$\begin{cases} K_{\mathrm{I}} = \dfrac{2\sqrt{2\pi}}{3g^{5/2}z_0 c d_{\mathrm{eff}}} D_{\max}^{5/2} \\ K_{\mathrm{II}} = \mu K_{\mathrm{I}} \end{cases} \tag{1}$$

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，μ 为应力强度因子的比值，g 为应力强度数值因子，K_{I} 为Ⅰ型动态应力强度因子，K_{II} 为Ⅱ型动态应力强度因子。因此，对于给定的实验系统，z_0、c、d_{eff}为已知的确定常数，仅需测量焦散斑的最大直径就可以确定裂纹尖端的动态应力强度因子的大小。

由文献[11]可知，在双孔爆炸作用下，空孔周围的受力情况可简化为图 1 所示，图 2 给出了空孔周围焦散斑的形状及其尺寸。在双向拉伸应力场作用下，空孔附近的焦散斑特征尺寸 D 与荷载之间的关系可表示为：

$$p - q = \frac{1}{12 z_0 c d_{\mathrm{eff}} R_{\mathrm{B}}^2} \left(\frac{D}{2.67} \right)^4 \tag{2}$$

式中：$p-q$ 为空孔周围的主应力差值，R_{B}为空孔的半径，D 为空孔周围焦散斑的特征长度，其余参数与式(1)相同。

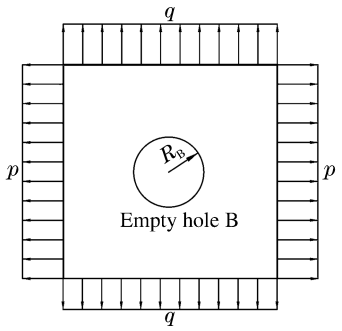

图 1 空孔的受力示意图

Fig. 1 Force diagram of empty hole

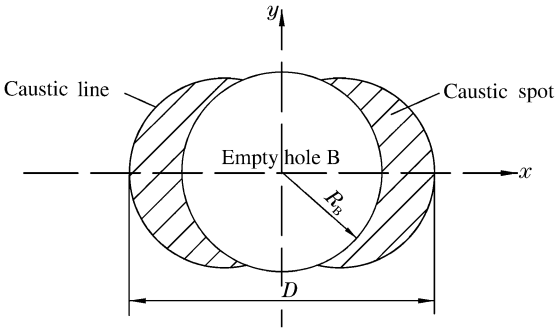

图 2 空孔周围的焦散线

Fig. 2 Caustics around empty hole

2　新型数字激光动态焦散线实验

2.1　实验描述

实验选用有机玻璃板(PMMA)作为实验材料，具有较高的光学常数，且光学各向同性，产生单焦散曲线，可以提高实验结果的准确度，其动态力学参数由文献[12]中实验测得。图 3 表示实验模型试件示意图。试件尺寸为 400 mm×300 mm×5 mm，2 个炮孔位于试件的中央，间距为 120 mm，炮孔直径为 6 mm，单孔装药量为 140 mg。为模拟实际施工中的切槽炮孔，在每个炮孔上沿 2 个炮孔连心线方向精确切割 2 个对向的切槽，切槽角度为 60°，切槽深度为 1 mm。空孔位于 2 个炮孔连心线的中间位置。实验设计 3 种方案：(1)无空孔(即空孔直径为 0)；(2)空孔直径为 6 mm；(3)空孔直径为 8 mm。

实验时，在炮孔中装药并预先插入一组探针，探针与高压起爆装置相连，高压起爆装置通过预先充电再放电产生电火花引爆炸药。本实验中采用同时起爆方式，高速数码相机在起爆前事先开启，对爆炸整个过程进行记录。此外，为防止炸药产生的碎片对两侧的透镜造成损坏，在模型两侧分别放置 2 块透明的有机玻璃板进行防护。

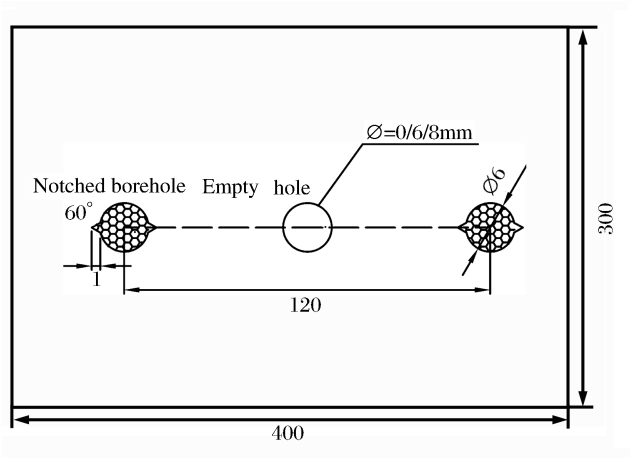

图 3 实验模型试件示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of experimental specimen models

2.2 实验光路及设备

图 4 所示为实验光路示意图。图 5 所示为新型数字激光动态焦散线实验系统。该系统改进了传统的多火花式焦散线实验系统，用高速数码相机和激光光源分别取代传统的多幅式胶片相机和多火花式点光源，具有拍摄幅数多、效果好；实验受环境影响小、系统误差低；实验图片易于进一步处理等特点[13]。实验采用的高速数码相机为日本生产的 Fastcam-SA5(16 G)型彩色高速数码相机，其最大拍摄速度可达 10^6 s^{-1}，能够满足对爆炸现象的超动态测试要求。实验采用的光源为绿色激光光源，其波长位于数码相机的最敏感光波波长范围内。同时，为配合不同实验需求，光源还配有调节旋钮，光强可在 0～200 mW间调节。本实验的相机拍摄速度为 3×10^5 s^{-1}，拍摄照片的分辨率为 256×64 pixels，泵浦激光器功率为 60 mW。

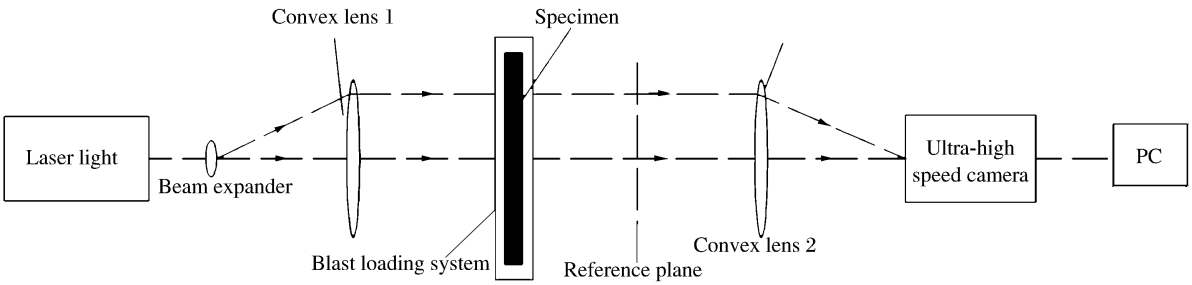

图 4 实验光路示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of experimental optical system

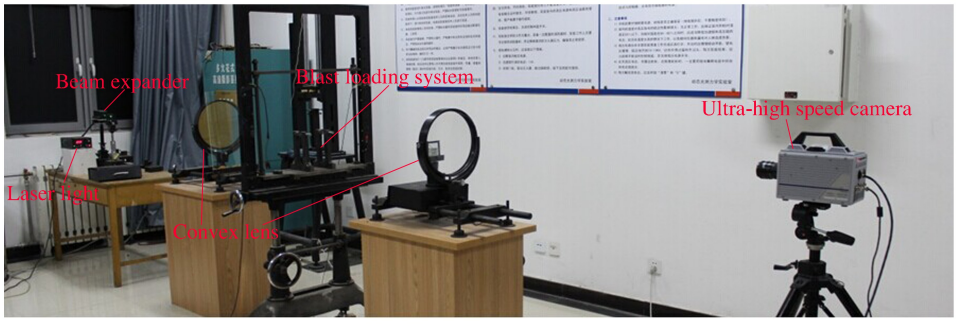

图 5 新型数字激光动态焦散线实验系统

Fig. 5 New-type digital laser dynamic caustics experimental system

3 实验结果及分析

3.1 爆生主裂纹扩展轨迹

图 6 表示空孔直径分别为 0、6 和 8 mm 的模型试件爆破实验结果图。从图 6 中可以看出，空孔对爆生主裂纹的扩展轨迹影响很大，具有明显的导向作用。当炮孔间无空孔时，如图 6(a)所示，由于在炮孔上预先设置了双向切槽，双孔同时起爆后，从 2 个炮孔处沿切槽方向产生 2 条爆生主裂纹 A_1、A_2，并相向扩展，当 2 条主裂纹 A_1、A_2 相遇时，由于对方已形成的裂纹成为了新的自由面，导致裂纹发生偏转并移向对方已有裂纹，最终在 2 炮孔间形成相互勾连的形状。当炮孔间有空孔时，爆生主裂纹沿切槽方

向优先扩展，当爆生主裂纹运动到接近空孔时，由于空孔的作用，爆生主裂纹与空孔相贯通，裂纹扩展基本呈直线，定向断裂效果明显好于无空孔爆破。这点对于工程爆破尤为重要，它表明了在周边眼定向断裂控制爆破中，在两炮孔连线方向上增设空孔，有利于爆生主裂纹沿空孔方向运动，并最终在空孔处相互贯通，从而减少对爆破围岩的损伤，实现精细化定向断裂控制爆破，而且空孔越大，爆破效果越明显。

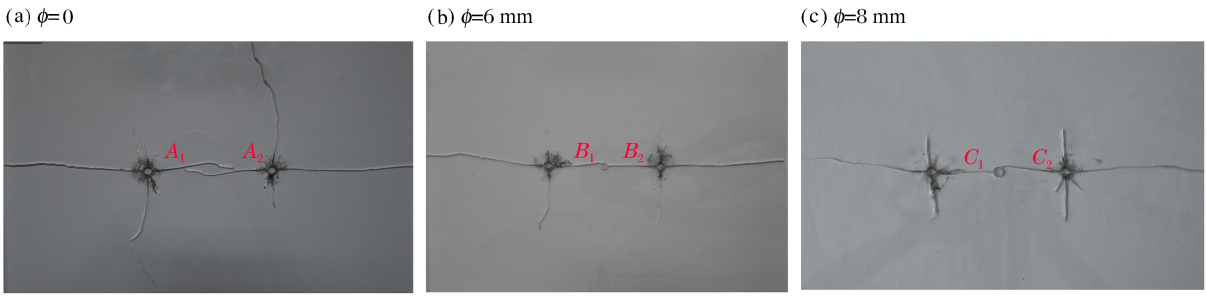

图 6　实验结果图

Fig. 6　Patterns of experimental results

3.2　空孔周围应力场的变化

图 7 所示为空孔直径分别为 0、6 和 8 mm 的空孔周围焦散斑。

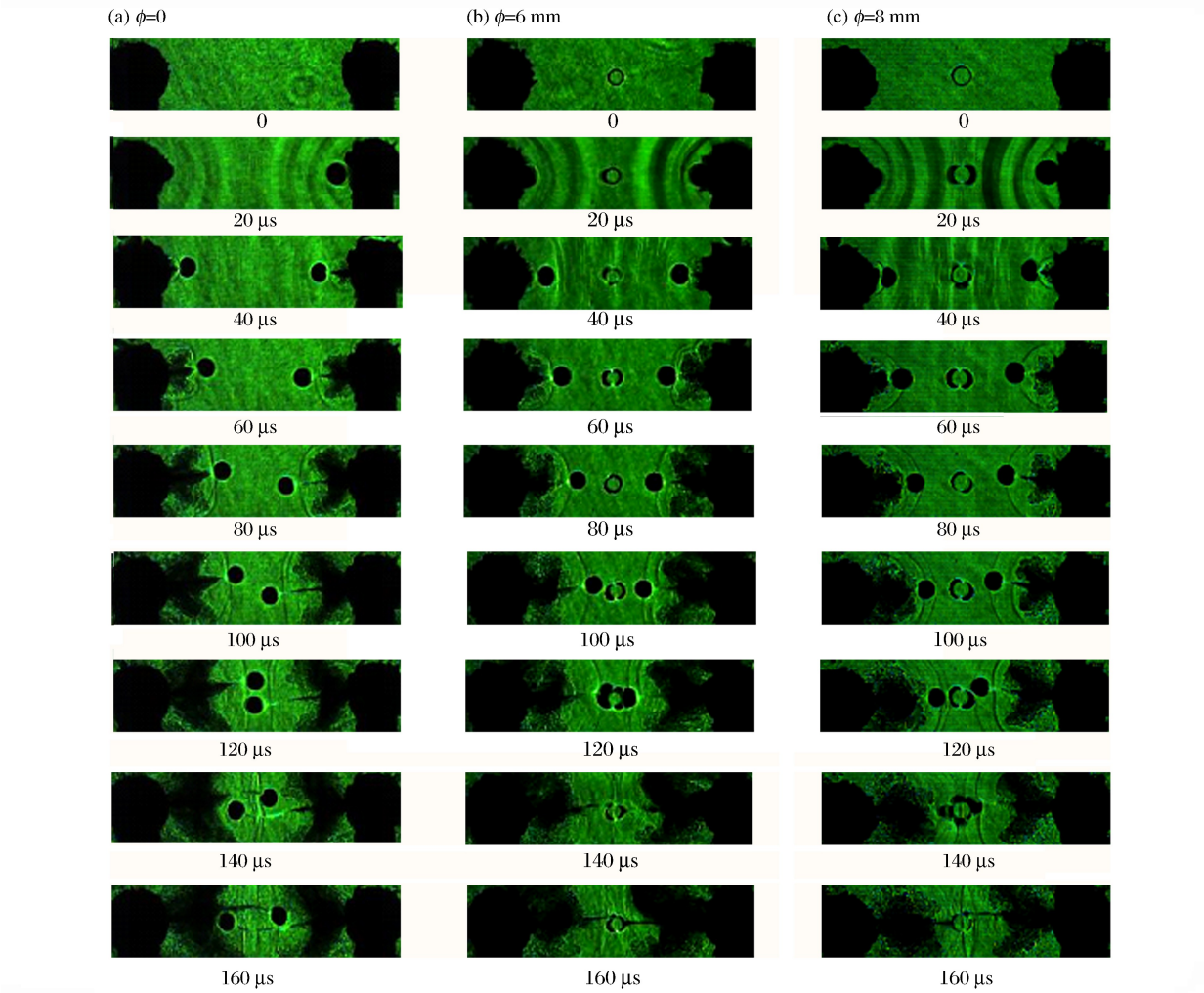

图 7　不同空孔直径周围焦散斑

Fig. 7　Caustics patterns around of empty holes with different sizes

从图 7 可以看出,起爆初期,由于切槽炮孔的影响,爆炸应力波在切槽处产生应力集中,裂纹优先沿切槽方向扩展形成爆生主裂纹。当空孔直径为 0 mm 时,在爆炸应力波与运动裂纹的相互作用和运动裂纹与运动裂纹的相互作用下,裂纹尖端附近形成复杂的动应力场;当空孔直径为 6 mm 时,爆炸应力波在 20 μs 时到达空孔,并与空孔产生相互作用,在两炮孔连心线上的空孔边缘处产生了应力集中,表现为在空孔边缘出现"月牙形"的焦散斑,焦散斑图像上具有 2 个特征点,特征点的连线经过空孔圆心。随着爆炸应力波在空孔处产生反射、绕射等作用,空孔周围的焦散斑也随之绕空孔运动,大小不断发生变化。空孔周围焦散斑的特征尺寸和方向的这种变化直观反映了爆炸应力波作用下空孔周围的应力集中程度和动应力场的变化;当空孔直径为 8 mm 时,在相同的时刻,空孔周围的焦散斑阴影区明显比 6 mm空孔周围的焦散斑阴影区大,其空孔周围焦散斑的特征尺寸更大,空孔周围的应力集中程度也更强,说明增大空孔直径有利于增强空孔周围的动应力场,有利于提高空孔对运动裂纹的导向控制作用。

图 8～9 分别表示爆炸荷载下不同尺寸空孔周围主应力差值及其夹角随时间变化曲线。空孔附近主应力差值的变化表征了空孔附近应力场的强弱,空孔附近两焦散斑特征点的连线和 2 个炮孔连心线间的夹角 θ 表征了主应力场方向以及应力集中区域的变化。从图 8 可以看出,空孔周围的主应力差值在主裂纹扩展过程中表现为振荡变化,并在裂纹靠近空孔时迅速增大的特点。在 80～126 μs 之间,6 mm空孔周围应力场的主应力差值由 1.72 MPa 增大到 6.80 MPa,增加了 5.08 MPa;8 mm 空孔周围应力场的主应力差由 1.87 MPa 增大到 8.55 MPa,增加了 6.68 MPa,较 6 mm 空孔周围应力场的主应力差提高了 30%,说明了随着爆炸应力波与空孔的相互作用,大直径空孔周围应力场的主应力差值更大,表现出更强的应力集中特性。空孔周围焦散斑特征点的连线和两炮孔连心线间的夹角 θ 随时间的变化情况如图 9 所示。夹角 θ 随空孔周围应力场的变化而呈现逐渐振荡上升的趋势,并在 12°左右趋于稳定。对于不同的空孔直径,夹角 θ 的变化趋势和大小基本相同,说明空孔直径对主应力方向 θ 的影响不明显,且当裂纹扩展到空孔附近时,空孔附近主应力方向与 2 个炮孔连心线的夹角大致稳定在 12°。

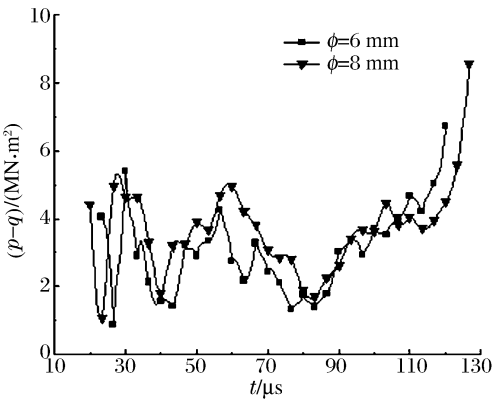

图 8 空孔周围主应力差值时程曲线

Fig. 8 Histories of difference between the two principal stresses around empty holes

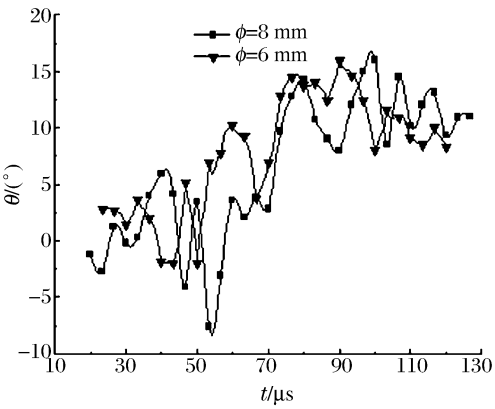

图 9 空孔周围夹角时程曲线

Fig. 9 Histories of of the included angles around empty holes

3.3 爆生主裂纹扩展速度的变化规律

图 10 所示为不同空孔直径下爆生主裂纹的扩展速度随时间变化曲线。从图 10 可以看出,在炸药爆炸后的 33.3 μs 内,3 组实验中的爆生主裂纹的扩展速度均快速上升并达到最大值(空孔直径为8 mm 时左侧爆生主裂纹 C_1 的扩展速度达到最大值的时间为 $t=23.3$ μs,这可能是由于起爆时间控制不精确及测量时的测量误差等原因造成的),此后,3 组实验中的爆生主裂纹的扩展速度均出现剧烈下降,并在 7 μs 后下降到最低值。其中,无空孔时的爆生主裂纹的扩展速度最低为 245.6 m/s,是最大值的 41%,空孔直径为 6 和 8 mm 时的爆生主裂纹几乎停止扩展,其扩展速度最低分别为 0 和 78 m/s。随后,3 组实验中的爆生主裂纹的扩展速度再次上升,并开始不断振荡下降,直到裂纹止裂。

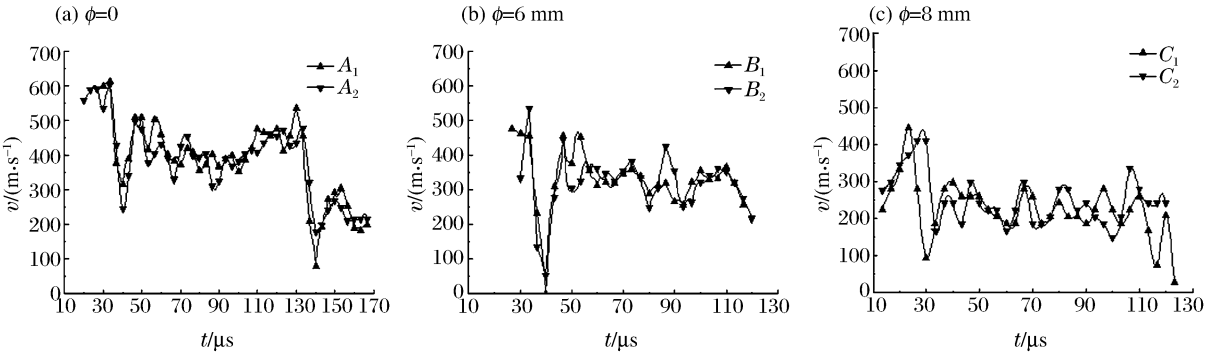

图 10　爆生主裂纹扩展速度时程曲线

Fig. 10　Propagation velocity histories of the blast-induced cracks

炮孔间有空孔时的双孔爆破爆生主裂纹的扩展速度在 t=33.3～40 μs 之间出现剧烈下降，甚至停滞的状态，这主要由 2 个原因引起的。一方面，从焦散斑系列图片中可以看出，在 t=33.3 μs 时，从炮孔处的产生的 S 波与从异方炮孔处产生的 P 波进行波形耦合，并与运动的爆生主裂纹相互作用，但是由于 S 波对同向运动的主裂纹起促进的作用，而 P 波对相向运动的主裂纹扩展起阻碍作用，因此，随着 P 波波峰向主裂纹传播，爆生主裂纹的扩展速度迅速下降。随后，随着 P 波与 S 波的继续传播，P 波波峰逐渐远离主裂纹尖端，对主裂纹扩展的影响逐渐减弱，S 波的作用逐渐增强，因此，爆生主裂纹的扩展速度再次上升，并继续沿原方向运动。另一方面，炮孔间有空孔时，从炮孔处产生的 P 波在空孔处产生反射拉伸 PP 波也在裂纹尖端处与 P 波和 S 波进行波形耦合，从而增强了阻碍主裂纹向前扩展的 P 波的能量，相对削弱了促进主裂纹向前扩展的 S 波的能量，因此，主裂纹的扩展速度下降更剧烈。

从图 10 中还可以看出，无空孔时爆生主裂纹扩展的最大速度为 610 m/s，空孔直径为 6 mm 时主裂纹扩展的最大速度为 535 m/s，较无空孔时下降了 12%，而空孔直径为 8 mm 时主裂纹的最大速度仅为 450 m/s，较无空孔时下降了 26%。同时，从图 7 中也可以看出，在 t=120 μs 时，无空孔时的 2 条主裂纹已经相遇，空孔直径为 6 mm 时的 2 条主裂纹刚运动到空孔处，而空孔直径为 8 mm 时的 2 条主裂纹还没有扩展到空孔处。

随着空孔直径的增大，爆生主裂纹在扩展过程中的最大速度及扩展的平均速度均有明显下降。这是因为垂直于空孔传播的 P 波在遇到空孔后反射产生 PP 波，增大空孔直径，使反射 PP 波的能量增强，阻碍主裂纹扩展的能量相对增强，促进主裂纹扩展的能量相对减弱，主裂纹的扩展速度降低。空孔的这种作用也增强了空孔对爆生主裂纹扩展方向的引导性，保证了爆生主裂纹沿空孔方向运动。

3.4　爆生主裂纹裂尖端动态应力强度因子的变化规律

图 11 所示为不同空孔直径下爆生主裂纹尖端应力强度因子随时间的变化曲线。

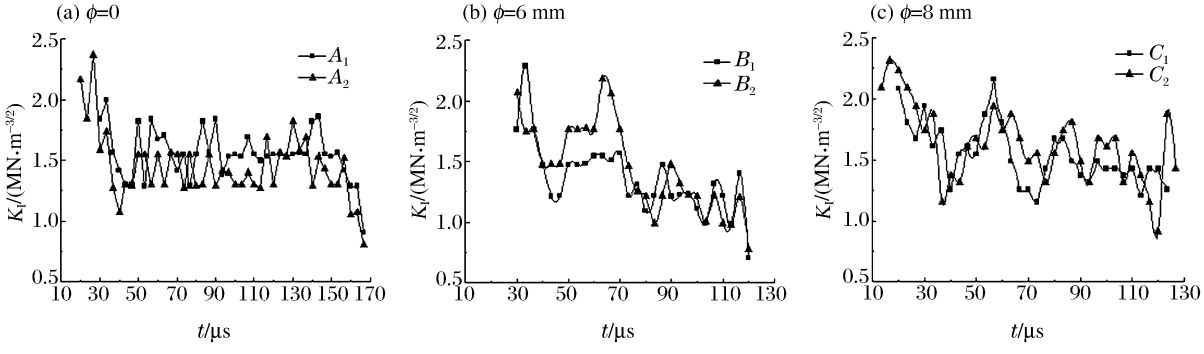

图 11　不同空孔直径下爆生主裂纹尖端应力强度因子时程曲线

Fig. 11　Histories of dynamic stress intensity factors under different diameters of empty hole

从图 11 可以看出,受爆生主裂纹尖端动应力场变化的影响,3 组实验中,爆生主裂纹尖端的动态应力强度因子呈先快速增大后减小不断振荡变化的特点。与裂纹扩展速度相似,3 组实验中,裂纹尖端的动态应力强度因子在起爆后的 $t=33.3$ μs 时均出现剧烈下降,并在 $t=40$ μs 附近达到最低点。无空孔时,爆生主裂纹 A_1 尖端动态应力强度因子在 $t=26.7$ μs 时达到最大值 2.37 MN·m$^{-3/2}$,然后下降,并在 $t=43$ μs 时达到最低值 1.3 MN·m$^{-3/2}$,然后开始振荡,并在裂纹扩展末期逐渐降低至零。当炮孔间空孔直径为 6 和8 mm时,爆生主裂纹尖端的动态应力强度因子在 $t=40$ μs 附近也达到最低值,分别为 1.21 和0.87 MN·m$^{-3/2}$,但有空孔时,爆生主裂纹尖端的动态应力强度因子再次上升并达到的最大值较无空孔时要高很多。无空孔时爆生主裂纹尖端的动态应力强度因子再次达到的最大值仅为第 1 次峰值的 75%,而空孔直径为 6 和 8 mm 时相应的动态应力强度因子为第 1 次峰值的 94%和 91%,其值分别为 2.16 和 2.23 MN·m$^{-3/2}$,这主要因为无空孔时,由于爆炸应力波的衰减,推动爆生主裂纹尖端的动态应力强度因子再次上升的能量较少,而炮孔间有空孔时,由于在空孔处产生的反射 PP 波和 PS 波与裂纹尖端附近的应力波发生波形耦合,增强了裂纹尖端的动应力场,延长了应力波对裂纹扩展的作用时间。在炮孔间空孔直径为 8 mm 时裂纹尖端的动态应力强度因子在裂纹扩展后期甚至出现明显上升趋势,这说明随着空孔直径的增加,空孔周围的应力集中程度更加明显,爆炸应力波在空孔处反射形成的反射 PP 波、PS 波、SP 波和 SS 波延长了爆炸应力波在裂纹尖端的作用时间,增强了空孔对爆生主裂纹尖端扩展方向的控制作用,迫使爆生主裂纹向空孔处扩展,达到精确控制定向断裂爆破的目的。

4 结 论

(1)由于空孔的应力集中效应、自由面效应和卸压效应,爆生主裂纹在扩展过程中逐渐向空孔发生偏转,并最终在空孔处贯通,说明空孔具有很好的导向作用。

(2)爆炸应力波与空孔相互作用,在与 2 个炮孔的连心线成 12°的方向产生应力集中,形成强拉伸应力场,且空孔尺寸与应力场的大小关系明显,与应力集中的方向关系不明显。

(3)爆炸应力波在空孔处产生反射波,与爆生主裂纹周围的应力波相互叠加,改变了主裂纹尖端的应力场,降低了相向运动的爆生主裂纹的扩展速度,且空孔尺寸越大,主裂纹的扩展速度越低。

(4)增大空孔直径,有利于增强爆炸应力波在空孔处的反射,使爆生主裂纹尖端的动应力场明显增强,主裂纹尖端动态应力强度因子再次出现明显上升趋势,同时,延长了爆炸应力波对运动裂纹的作用时间。

参考文献:

[1] 王树仁,魏有志. 岩石爆破中断裂控制的研究[J]. 中国矿业学院学报,1985(3):118-125.
Wang Shu-ren, Wei You-zhi. Fracture control in rock blasting[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1985(3):118-125.

[2] 林大能. 平巷掏槽爆破空孔尺寸效应及围岩频繁震动损伤累积特性研究[D]. 长沙:中南大学,2006.

[3] Mohanty B B. Smooth wall blasting in rock: US4690058[P]. 1987.

[4] Mohanty B B. Explosion generated fractures in rock and rock like materials[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990,35(4/5):889-898.

[5] Nakamura Y, Cho S H, Yoneoka M, et al. Model experiments on crack propagation between two charge holes in blasting[J]. Science and Technology of Energetic Materials, 2004,65(2):34-39.

[6] Cho S H, Nakamura Y, Mohanty B, et al. Numerical study of fracture plane control in laboratory-scale blasting [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008,75(13):3966-3984.

[7] 刘优平,周正义,黎剑华. 井巷掏槽爆破中空孔效应的理论与试验分析[J]. 金属矿山,2007,368(2):12-14.
Liu You-ping, Zhou Zheng-yi, Li Jian-hua. Theoretical and experimental study on empty hole effect in tunnel cut blasting[J]. Metal Mine, 2007,368(2):12-14.

[8] 毕谦,倪斌,杨邦成. 控制切割爆破中空孔导向机理研究[J]. 昆明工学院学报,1992,17(2):5-8.

Bi Qian, Ni Bin, Yang Bang-cheng. A study on orientation control mechanism of loading holes in cutting control blasting[J]. Journal of Kunming Institute of Technology, 1992,17(2):5-8.

[9] 文涛，谭海. 岩石爆破中的空孔效应数值计算分析[J]. 爆破，2011，28(3)：58-61.
Wen Tao, Tan Mei. The empty hole effect numerical computation analysis during rock blasting[J]. Blasting. 2011,28(3):58-61.

[10] 姚学锋，方竞，熊春阳. 爆炸应力波作用下裂纹与孔洞的动态焦散线分析[J]. 爆炸与冲击，1998，18(3)：40-45.
Yao Xue-feng, Fang Jing, Xiong Chun-yang. Dynamic caustics analysis of crack and hole under the explosive stress waves[J]. Explosion and Shock Waves, 1998,18(3):40-45.

[11] 岳中文，杨仁树，郭东明，等. 爆炸作用下空孔周围应力场变化的模型实验[J]. 煤炭学报，2009，34(5)：624-628.
Yue Zhong-wen, Yang Ren-shu, Guo Dong-ming, et al. Model experimental of stress field around empty hole under blasting loading[J]. Journal of China Coal Society, 2009,34(5):624-628.

[12] Arakawa K, Takahashi K. Relationships between fracture parameters and fracture surface roughness of brittle polymers[J]. International Journal of Fracture, 1991,48(2):103-114.

[13] 杨立云，杨仁树，许鹏. 新型数字激光动态焦散线实验系统及其应用[J]. 中国矿业大学学报，2013，42(2)：188-194.
Yang Li-yun, Yang Ren-shu, Xu Peng. Caustics method combined with laser and digital high-speed camera and its application[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2013,42(2):188-194.

Analysis of empty hole effect in directional fracture controlled blasting

Yue Zhong-wen, Guo Yang, Xu Peng, Wang Xu, Song Yao

(*School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: A new experimental system of digital laser dynamic caustics was used and the distribution of dynamic stress field around empty holes and the influence of empty holes upon the main cracks expanding under the blasting loading were studied. Experimental results show that two blast-induced main cracks, which were oppositely expanding, deflected gradually to empty hole under the strong stress and penetrated empty hole. The angle between the principal stress direction and the line of two blasting holes center near the empty hole kept about 12 °, and the principal stress direction did not change with the size of empty holes increasing; the interaction between explosive stress waves and empty holes produced reflective stretching waves, changed the stress field at the main crack tips, reduced expanding velocity of the main crack. The larger the diameter of empty hole was, the lower the main crack propagation velocity was. When the blast-induced main cracks expanded to empty hole, the dynamic stress intensity factor at crack tips appeared to rise again.

Key words: mechanics of explosion; fracture controlled blasting; digital laser dynamic caustics; empty hole; blast-induced cracks

（责任编辑　王易难）