

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0308

基于 DIC 的爆炸加载下脆性材料裂纹扩展规律的试验研究*

孙 强, 李雪东, 姚腾飞, 高 淳

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 通过数字图像相关法(DIC), 应用 PMMA 对爆炸加载条件下脆性材料的裂纹扩展规律进行了试验研究。基于对称性试验模型, 实现了裂纹尖端位置和应变场信息的同步记录。以此为基础, 通过对比分析获知, 主应变场应变值最大点不能作为裂纹尖端的判断依据。并以动态裂纹扩展速度为参量, 应用断裂动力学和最小二乘牛顿迭代法, 计算出了考虑惯性效应的 I-II 混合型裂纹的应力强度因子: K_I 和 K_{II} 值会随着裂纹扩展方向改变而发生突变; K_I 最大值为 $2.63 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 最小值为 $0.89 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$; 其整体变化趋势表明, 爆炸加载条件下脆性材料裂纹扩展随能量积聚和释放呈循环阶梯式递减发展。

关键词: 数字图像相关法; 爆炸荷载; 脆性材料; 应力强度因子; 裂纹扩展

中图分类号: O346.1 **国标学科代码:** 13015 **文献标志码:** A

目前对爆炸荷载作用下岩石破坏机理的研究主要集中在裂纹尖端的奇异性、应力和应变场变化规律、裂纹的扩展规律这几个方面。相关的光测试验研究主要有: 动光弹实验、动焦散线实验和数字图像相关法(digital image correlation, DIC)。其中动光弹主要用于应力场的研究: 朱振海等^[1-2]研究了爆炸波所产生的压缩应力和拉伸应力对高速扩展的运动裂纹扩展方向和扩展速度的影响; 杨仁树等^[3-4]和杨立云等^[5]开发了数字激光爆炸加载动光弹实验系统, 实现了对整个断裂过程的连续观测; 并研究了相向运动裂纹的扩展规律, 认为正入射前段压缩波会使裂纹扩展速度和应力强度因子降低, 后端的拉伸波会使裂纹扩展速度和应力强度因子增强。动焦散线的优势在于解决裂纹尖端的奇异性问题^[6]; Kalthoff 等^[7]和 Ravi-Chandar 等^[8]结合断裂动力学分析了动态载荷情况下裂纹的起裂、传播和止裂过程, 指出当加载速度较高时, 起裂的动态应力强度因子会显著提高; Theocaris 等^[9]发现倾斜的边裂纹在冲击载荷下, 初始裂纹只在拉伸波的作用下成阶跃式传播; 李清等^[10]结合爆炸加载, 研究了爆炸裂纹扩展及其尖端应力强度因子的一般规律; 杨立云等^[11]发现, 压应力场中爆生裂纹沿最大主应力方向扩展, 且裂纹扩展速度越大, 裂纹尖端应力强度因子越大。

上述研究为我们开展爆炸加载下应力场和裂纹尖端奇异性研究, 提供了丰富的思路和理论基础, 然而, 上述方法具有实验条件要求高, 模型材料受限^[12-13], 应变场与破裂现象不能同时显现等缺陷, 为此, Peters 等^[14]提出了对于不同材料均可获得全场性应变与位移信息的数字图像相关法, 为我们研究岩石的破坏机理提供了新的研究方法; 潘兵等^[15-17]提出应用位移场进行局部最小二乘拟合的应变场计算方法, 提高了应变场的计算精度; 赵程等^[18]应用此方法, 研究了含节理岩石在单轴压缩条件下, 裂纹的扩展规律, 以及裂纹尖端塑性区尺寸的确定; 孙强等^[19]和杨立云等^[20]建立了超高速 DIC 试验系统, 并开展相关试验, 在模型材料应变场及裂纹扩展规律研究方面取得了较大进展。

目前, 在进行爆炸加载条件下裂纹扩展规律的试验研究中, 考虑惯性效应的动态应力强度因子是重要的破坏参量, 这一点在动光弹和动焦散线实验中均有证实^[21-22]。在 DIC 实验方法中, 虽然代树红等^[23]

* 收稿日期: 2018-08-21; 修回日期: 2019-04-07

第一作者: 孙 强(1962—), 男, 博士, 副教授, sunq_208@163.com;

通信作者: 李雪东(1990—), 男, 硕士研究生, li_xuedong@qq.com。

基于最小二乘—牛顿迭代法计算出了冲击载荷作用下裂纹尖端应力强度因子,但对于超动态条件下考虑惯性效应的应力强度因子计算仍有不足。为此本文采用对称性试验模型,开展裂纹尖端位置和应变场信息的同步记录试验,并结合断裂动力学,应用 PMMA 材料对裂纹尖端位置、动态应力强度因子计算和裂纹扩展规律等方面进行了试验研究,以期在该领域的研究进行进一步探讨。

1 数字图像相关法及动态断裂参量求解

1.1 DIC 试验原理

数字图像相关法(digital image correlation, DIC)是将超高速摄影技术和数字图像相关计算相结合,得到的一种新的试验方法。基本原理是:通过对试件表面变形前后的数字散斑图像的灰度矩阵进行相关计算,跟踪计算点变形前后的空间位置,从而获得试件表面位移和应变信息的光学测试试验方法。基本原理如图 1 所示。

根据图 1 所示变形前后子区中心 P 点的坐标关系为:

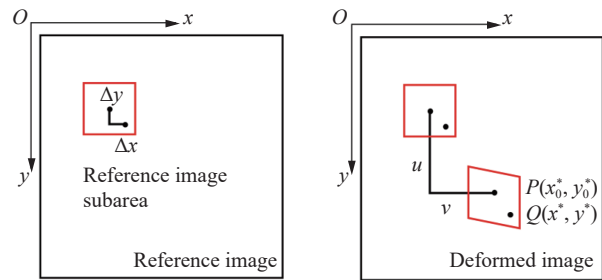


图 1 DIC 基本原理

Fig. 1 DIC Fundamentals

$$\begin{cases} x_0^* = x_0 + u \\ y_0^* = y_0 + v \end{cases} \quad (1)$$

式中: u 为竖直位移, v 为水平位移。

根据连续介质力学线性变形理论,一点的位移可以用其临近点的位移及其增量来表示。因此,参考图像中 $Q(x,y)$ 点的位移分量可表示为:

$$\begin{cases} u_Q = u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \\ v_Q = v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \end{cases} \quad (2)$$

式中: Δx 、 Δy 分别为水平变形和竖直变形。

1.2 不连续问题的处理与子区大小的选取

数字图形相关法中子区连续均匀变形这一假设,是使用 N-R 图像匹配算法的前提,然而裂纹尖端区域的变形是有间断的,为此试验应用 VIC-2D 数字图像处理软件中的默认阈值处理方法,对不良或可疑的数据进行筛选,以此消除不连续变形问题。具体包括:应用一致性阈值和置信区间,移除中心点四周反向位置不匹配点及协方差置信区域超过阈值的点,以消除不连续的行为(例如裂缝或材料破裂)、散斑图案前面的障碍物、眩光或反射;匹配阈值将会自动删除由于光线条件差造成的子集对比度低的问题,以保证更多的有效数据;极端阈值用于消除运动模糊可能导致的高投影误差、校准不佳等试验误差。

子区大小的选取会直接影响试验的计算精度,对于一定的散斑质量,当位移函数不能准确描述真实变形时,子区越大,位移函数不匹配带来的测量误差越大^[24]。为了减少误差,本试验采用了软件推荐的最佳匹配置信度子区大小为 31×31 。

1.3 动态应力强度因子求解

在对动光弹和动焦散线试验方法的总结中可以了解到,在高速加载条件下,惯性效应为影响材料破坏的重要因素^[21-22,25],不可忽略。但目前应用 DIC 试验方法进行爆炸加载条件下脆性材料破坏机理和动态应力强度因子计算的研究中,对于惯性力的考虑还有欠缺,为此本文将超高速 DIC 试验技术得到的应变场和位移场与断裂动力学^[26]的理论结合,在动量平衡方程中引入惯性外力,进而应用位移法求得动

态应力强度因子, 为我们研究高应变率下的动态应力强度因子提供新的计算方法。

对于平面裂纹动态扩展情形下的研究, 范天佑^[26]在考虑惯性外力的情况下, 从弹性动力学^[27]基本方程出发, 以 Lamé 势函数作为基本未知量, 给出了 I 型裂纹动态扩展时的应力场和位移场。假设极坐标下势函数 $\varphi(r_1, \theta_1)$ 与 $\varphi(r_2, \theta_2)$ 分别为:

$$\begin{cases} \varphi_n(r_1, \theta_1) = r_1^{\lambda_n} [A_n \cos \lambda_n \theta_1 + B_n \sin \lambda_n \theta_1] \\ \Phi_n(r_2, \theta_2) = r_2^{\lambda_n} [C_n \cos \lambda_n \theta_2 + D_n \sin \lambda_n \theta_2] \end{cases} \quad (3)$$

式中: A_n 及 B_n 、 C_n 、 D_n 为实常数, λ_n 为参变量, 可以由边界条件 $\theta_1 = \theta_2 = \pm\pi$ 时, $\sigma_{yy} = \sigma_{xx} = 0$ 确定。其渐进展开项主项的 $\lambda_n = 3/2$ 。

通过动量平衡方程求得裂纹扩展速度稳定时, I 型裂纹尖端附近位移场奇异项表达式:

$$\begin{cases} u_x^{(n)} = \lambda_n r_1^{\lambda_n - 1} [A_n \cos(\lambda_n - 1)\theta_1 + B_n \sin(\lambda_n - 1)\theta_1] - \alpha_2 \lambda_n r_2^{\lambda_n - 1} [C_n \sin(\lambda_n - 1)\theta_2 - D_n \cos(\lambda_n - 1)\theta_2] \\ u_y^{(n)} = -\alpha_1 \lambda_n r_1^{\lambda_n - 1} [A_n \sin(\lambda_n - 1)\theta_1 - B_n \cos(\lambda_n - 1)\theta_1] - \lambda_n r_2^{\lambda_n - 1} [C_n \cos(\lambda_n - 1)\theta_2 + D_n \sin(\lambda_n - 1)\theta_2] \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\alpha_1^2 = 1 - \frac{v^2}{c_1^2}$, $\alpha_2^2 = 1 - \frac{v^2}{c_2^2}$, v 为裂纹扩展速度, c_1 、 c_2 为弹性波纵波与横波的波速。由广义胡克定律可得应力场为:

$$\begin{cases} \sigma_{xx}^{(n)} = \rho c_2^2 (\lambda_n^2 - \lambda_n) \left\{ (1 + 2\alpha_1^2 - \alpha_2^2) r_1^{\lambda_n - 2} [A_n \cos(\lambda_n - 2)\theta_1 + B_n \sin(\lambda_n - 2)\theta_1] \right. \\ \quad \left. - 2\alpha_2 r_2^{\lambda_n - 2} [C_n \sin(\lambda_n - 2)\theta_2 - D_n \cos(\lambda_n - 2)\theta_2] \right\} \\ \sigma_{yy}^{(n)} = \rho c_2^2 (\lambda_n^2 - \lambda_n) \left\{ -(1 + \alpha_2^2) r_1^{\lambda_n - 2} [A_n \cos(\lambda_n - 2)\theta_1 + B_n \sin(\lambda_n - 2)\theta_1] \right. \\ \quad \left. + 2\alpha_2 r_2^{\lambda_n - 2} [C_n \sin(\lambda_n - 2)\theta_2 - D_n \cos(\lambda_n - 2)\theta_2] \right\} \\ \sigma_{xy}^{(n)} = \rho c_2^2 (\lambda_n^2 - \lambda_n) \left\{ -2\alpha_1 r_1^{\lambda_n - 2} [A_n \sin(\lambda_n - 2)\theta_1 - B_n \cos(\lambda_n - 2)\theta_1] \right. \\ \quad \left. - (1 + \alpha_2^2) r_2^{\lambda_n - 2} [C_n \cos(\lambda_n - 2)\theta_2 + D_n \sin(\lambda_n - 2)\theta_2] \right\} \end{cases} \quad (5)$$

式中: ρ 为材料密度。又已知动态应力强度因子定义为

$$K_I(v) = \lim_{\substack{\theta_1 = \theta_2 = \theta \rightarrow 0 \\ r_1 = r_2 = r \rightarrow 0}} (\sqrt{2\pi r} \sigma_{yy}) \quad (6)$$

将式(5)中 $\sigma_{yy}^{(n)}$ 和式(6)代入式(4)求得位移分量为

$$\begin{cases} u_x = \left[\sqrt{r_1} \cos \frac{\theta_1}{2} - \sqrt{r_2} \frac{2\alpha_1 \alpha_2}{(1 + \alpha_2^2)} \cos \frac{\theta_2}{2} \right] \frac{4(1 + \nu)(1 + \alpha_2^2)^2}{\sqrt{2\pi E} [4\alpha_1 \alpha_2 - (1 + \alpha_2^2)^2]} K_I(v) \\ u_y = \left[\sqrt{r_2} \frac{2\alpha_1}{(1 + \alpha_2^2)} \sin \frac{\theta_2}{2} - \sqrt{r_1} \alpha_1 \sin \frac{\theta_1}{2} \right] \frac{4(1 + \nu)(1 + \alpha_2^2)^2}{\sqrt{2\pi E} [4\alpha_1 \alpha_2 - (1 + \alpha_2^2)^2]} K_I(v) \end{cases} \quad (7)$$

以上结果为考虑惯性效应的前提下, 裂纹扩展速度稳定时 I 型裂纹的位移分量, 但是爆炸加载条件下裂纹的扩展速度总是在振荡变化着, 且由于试验模型后期受力复杂, 裂纹多以 I - II 混合型方式进行扩展^[10]。为此依据微分原理, 将裂纹扩展的整个过程进行微分, 得出每一段的裂纹扩展速度 v , 并引入 II 型应力强度因子:

$$K_{II}(v) = \lim_{\substack{\theta_1 = \theta_2 = \theta \rightarrow 0 \\ r_1 = r_2 = r \rightarrow 0}} (\sqrt{2\pi r} \sigma_{xy}) \quad (8)$$

在考虑边界条件的前提下, 分别将式(5)中 $\sigma_{yy}^{(n)}$ 和 $\sigma_{xy}^{(n)}$ 代入式(6)和(8)求得:

$$\begin{cases} A_2 = \frac{4(1+\alpha_2^2)K_I(V)}{3\sqrt{2\pi\rho}C_2^2[4\alpha_1\alpha_2-(1+\alpha_2^2)^2]}, & C_2 = \frac{1+\alpha_2^2}{2\alpha_2}B_2 \\ B_2 = \frac{4(1+\alpha_2^2)K_{II}(V)}{3\sqrt{2\pi\rho}C_2^2[4\alpha_1\alpha_2-(1+\alpha_2^2)^2]}, & D_2 = -\frac{2\alpha_1}{1+\alpha_2^2}A_2 \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)和 $\lambda_n=3/2$ 带入公式(4), 则位移场主项可以表示为:

$$\begin{cases} u_x = \left[\sqrt{r_1}(1+\alpha_2^2)\cos\frac{\theta_1}{2} - 2\sqrt{r_2}\alpha_1\alpha_2\cos\frac{\theta_2}{2} \right] \frac{4(1+\nu)}{\sqrt{2\pi E}[4\alpha_1\alpha_2-(1+\alpha_2^2)^2]} K_I(V) \\ \quad + \left[2\sqrt{r_1}\alpha_2\sin\frac{\theta_1}{2} - \sqrt{r_2}(1+\alpha_2^2)\alpha_2\sin\frac{\theta_2}{2} \right] \frac{4(1+\nu)}{\sqrt{2\pi E}[4\alpha_1\alpha_2-(1+\alpha_2^2)^2]} K_{II}(V) \\ u_y = \left[2\sqrt{r_2}\alpha_1\sin\frac{\theta_2}{2} - \sqrt{r_1}(1+\alpha_2^2)\alpha_1\sin\frac{\theta_1}{2} \right] \frac{4(1+\nu)}{\sqrt{2\pi E}[4\alpha_1\alpha_2-(1+\alpha_2^2)^2]} K_I(V) \\ \quad + \left[2\sqrt{r_1}\alpha_1\alpha_2\cos\frac{\theta_1}{2} - \sqrt{r_2}(1+\alpha_2^2)\cos\frac{\theta_2}{2} \right] \frac{4(1+\nu)}{\sqrt{2\pi E}[4\alpha_1\alpha_2-(1+\alpha_2^2)^2]} K_{II}(V) \end{cases} \quad (10)$$

在应用位移法进行动态应力强度因子计算时, 为了减小裂纹尖端塑性区和三维效应的影响, 在大于裂纹尖端区域塑性区 r_p 和试件厚度 b 的一半, 小于 K 主导区 r_k 的数据选择区域内选取了 300 个数据点^[25-26](见图 2)。对于平面应力问题:

$$r_p = a \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_y} \right)^2, \quad r_k = 1.5a, \quad B = 4\text{mm} \quad (11)$$

式中: σ_y 是材料的屈服应力, σ_0 是加载应力, 通过主应力场获得, a 是裂纹半长度。

将所取数据点的位移和位置信息代入式(10), 组成超定非线性方程组, 应用最小二乘牛顿迭代算法^[28]的进行应力强度因子的计算。

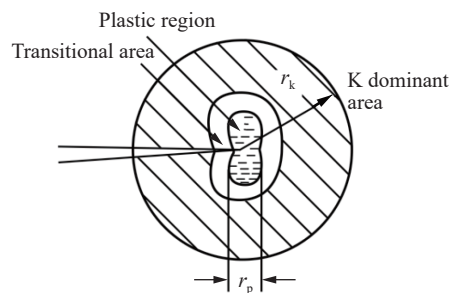


图 2 裂纹区域的划分
Fig. 2 Division of crack regions

2 DIC 动态断裂试验

2.1 试验系统

超高速数字图像相关法(DIC)试验系统主要包括: 超高速摄影系统、试件加载系统、系统分析软件三个部分, 其中超高速摄影系统包括信号源、补光系统和超高速摄影机, 其分辨率为固定值(924×768), 帧率为 $1\,000 \sim 5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$, 图像采集数量固定为 180 张, 可满足爆炸载荷作用下应变场的测试要求。具体布置见图 3~4。

2.2 试验模型

试件材料采用 PMMA 材料, 在考虑边界和炮烟影响的前提下, 试件尺寸设计为 $300 \text{ mm} \times$

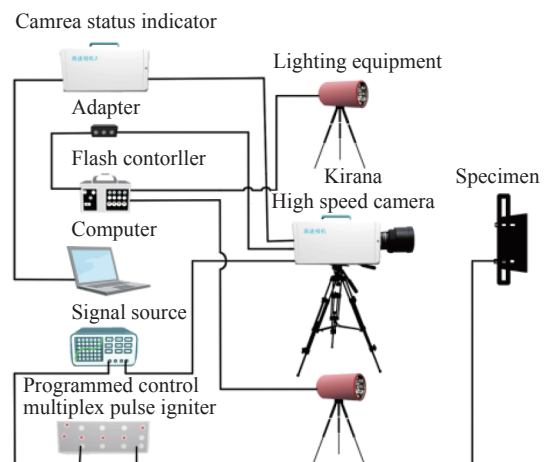


图 3 DIC 试验系统示意图
Fig. 3 DIC experimental system

300 mm×8 mm; 中心开孔直径为 6 mm, 两边尖角边长 3 mm, 角度 60°; 开孔深度为 4 mm。对称喷涂密度 85% 直径为 1.2 mm 的散斑^[20, 29]和白板, 如图 5~6 所示。试验装药量为 160 mg DDNP。相机拍摄帧率为 10^5 s^{-1} 。

本文炮孔采取非穿透性钻孔, 孔底平整, 孔口用一定厚度的橡胶垫封堵, 确保装药均匀且密度一致。孔两侧对称开槽(见图 6), 试验对称性良好, 可重复性高。



图 4 试验系统布置图

Fig. 4 Experimental system layout



图 5 试验模型图

Fig. 5 Experimental model

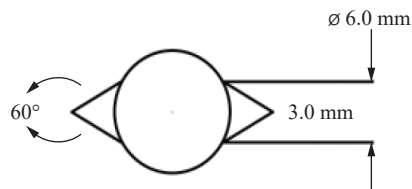


图 6 炮孔开槽模型

Fig. 6 Borehole slotting model

3 试验结果与分析

3.1 裂纹尖端与主应变场的关系

要想通过位移场获得准确的应力强度因子, 对裂纹尖端位置及尖端区域数据点的选择是至关重要的。为此 Withers 等^[30] 和 Du 等^[31] 通过冲击试验对取点数量、取点位置和取点范围做了大量的研究, 为我们应用 DIC 试验方法进行裂纹尖端位置数据点的选取, 奠定了很好的基础。然而, 现阶段对裂纹尖端的定位并不能直接获得, 多以主应变场的应变最大值点作为判断依据, 此法是否能够真实反映裂纹尖端的位置, 尚未可知。基于此为了探究裂纹尖端和主应变场的对应关系, 本试验采取了对称式的试验模型。试验结果显示, 应用此方法可以清晰的拍摄到裂纹的尖端位置和裂纹扩展路径(见图 7), 且在保证装药均匀的条件下, 从开槽顶端算起, 两侧裂纹扩展总长度分别为 78 和 79 mm, 偏转角度均为 9.8° , 呈现出较好的对称性(见图 8~9), 因此可以依据白板一侧裂纹的尖端位置对另一侧进行定位。

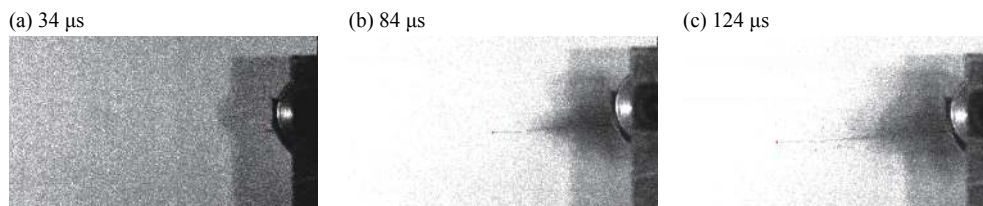


图 7 裂纹扩展过程

Fig. 7 Crack propagation process

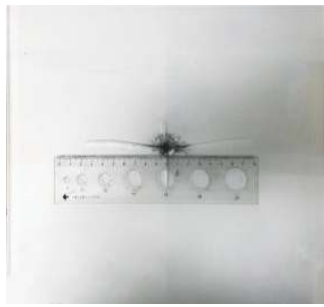


图 8 爆炸后实际裂纹图

Fig. 8 Actual crack after explosion

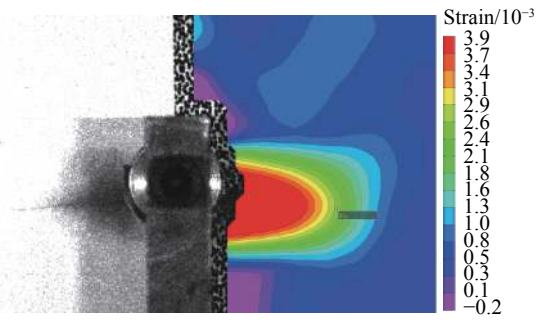


图 9 裂纹与主应变场对应图

Fig. 9 Correspond between crack and main strain field

通过对主应变场与裂纹尖端位置的对应分析, 裂纹在 135 μs 后虽然已经停止扩展, 但由于受到后续能量的影响, 在 135 至 149 μs 内裂纹尖端的应变仍在增加, 但并未再次开裂。149~154 μs 时间内裂纹保持稳定, 之后裂纹尖端应变场开始减弱, 163 μs 后应变场再次稳定, 且稳定时的应变场与 135 μs 时基本一致(见 图 10)。这种应变场先增强再减弱, 最后与增强前保持一致的现象, 在裂纹扩展的整个过程都有出现, 而这个现象发生过程中裂纹尖端的位置始终没有改变。因此可知, 不能单纯依靠应变场的应变最大点, 作为裂纹尖端位置的判断依据, 而对称式试验模型为我们解决尖端的定位问题, 提供了比较有效的试验方法。除此之外在后期的研究中我们还可以应用两台高速相机, 通过双面拍摄方法解决此类问题。

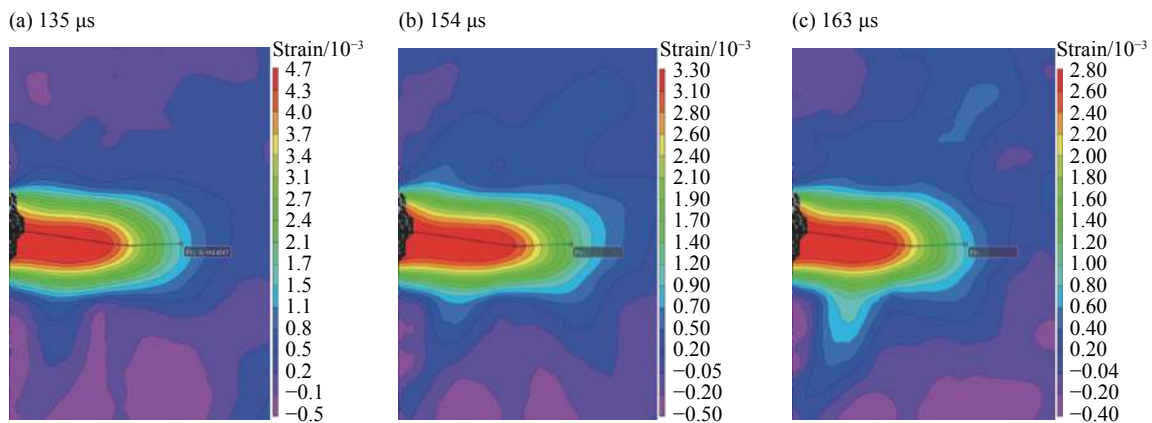


图 10 止裂后裂纹尖端应变场变化云图

Fig. 10 Cloud diagram of strain field change at crack tip after crack arrest

3.2 裂纹扩展规律的试验分析

3.2.1 裂纹扩展速度和扩展长度的计算

试验所得 y 方向应变 ε_y 云图和主应变 ε_1 云图, 见图 11。

分析应变云图可知(见 图 11), 30 μs 时起爆, 31 μs 爆炸波传播现象明显, 经过短暂的能量积聚, 从预制裂纹处开始起裂, 爆炸 34 μs 后开始记录到比较明显的裂纹。以每 10 μs 扩展长度值对裂纹的整个扩展过程进行累加, 求得裂纹扩展总长度为 57.5 mm, 与测量所得最终试验结果 57 mm 基本一致(见 图 12~13)。

由每个微分段的扩展长度除以时间, 求得每段的裂纹扩展速度(见 图 14), 以 34 μs 时为起点, 起裂 10 μs 后裂纹的扩展速度大约为 1 167 m/s, 裂纹扩展长度为 11.67 mm, 随着能量的释放, 裂纹扩展速度逐渐降低为 500 m/s。之后由于炮烟的作用能量重新积聚, 裂纹重新起裂并以 1 000 m/s 的速度继续扩展, 随后裂纹速度又开始逐渐降低为 170 m/s。20 μs 后能量再次积聚, 裂纹速度加速至 833 m/s, 最后稳定在 500 m/s, 直至裂纹扩展停止。

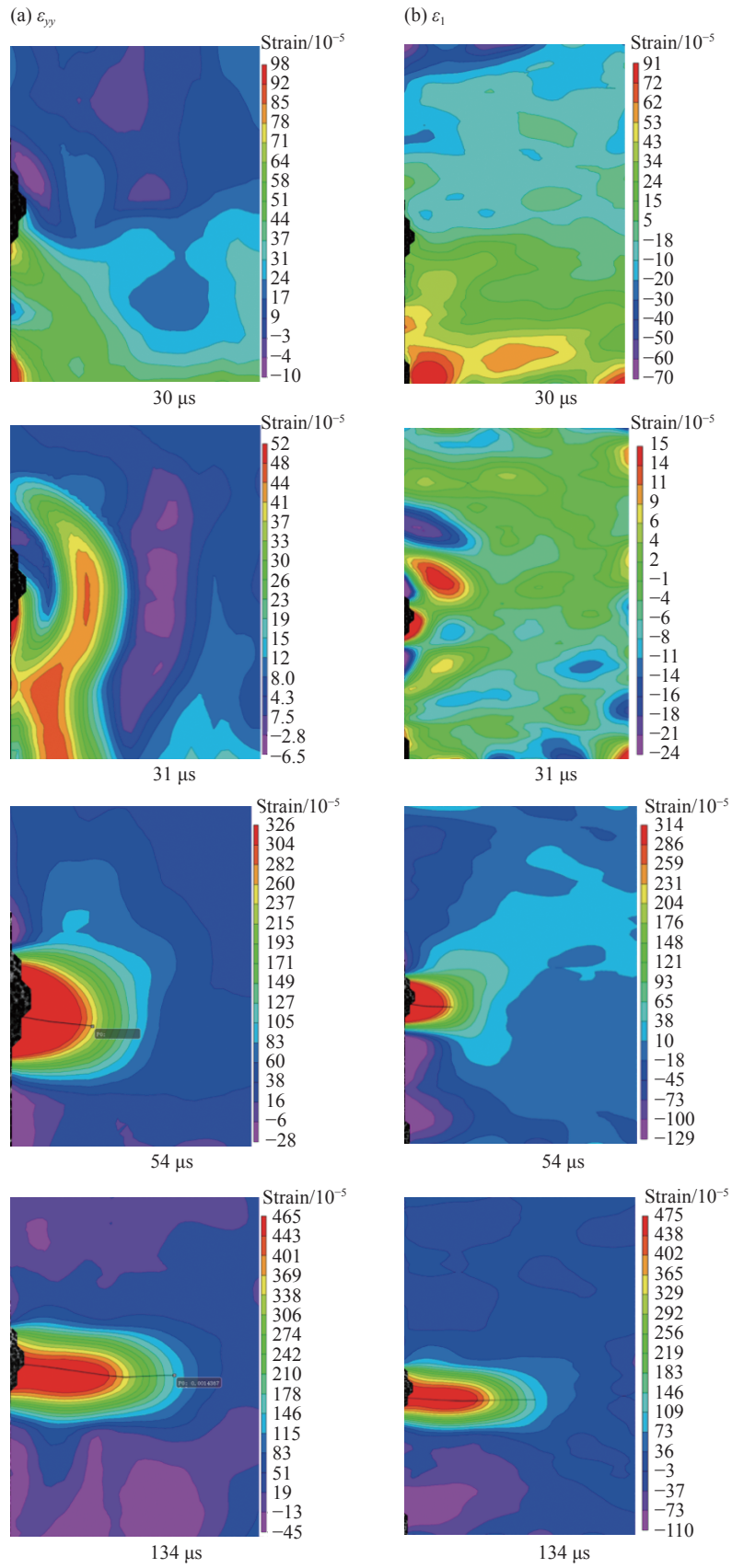


图 11 应变云图

Fig. 11 Strain cloud map

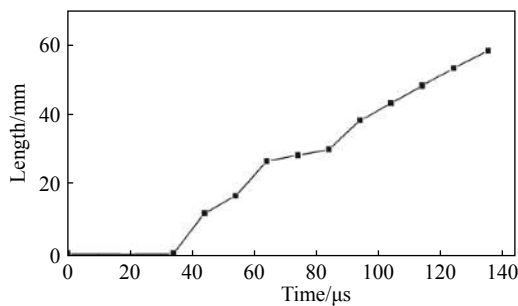


图 12 裂纹扩展长度

Fig. 12 Crack extension length

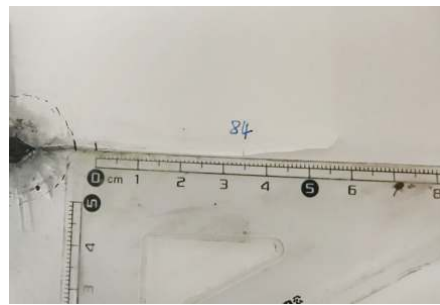


图 13 测量裂纹扩展长度

Fig. 13 Measures the crack extension length

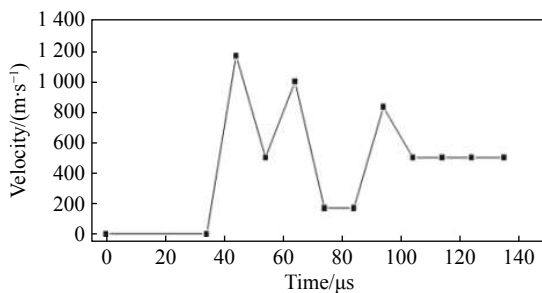


图 14 裂纹扩展速度图

Fig. 14 Crack expansion speed

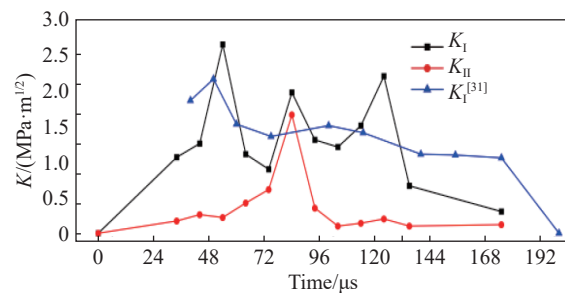


图 15 动态应力强度因子

Fig. 15 Dynamic stress intensity factor

3.2.2 应力强度因子变化趋势

依据试验结果计算出裂纹尖端动态应力强度因子 K_I 的最大值为 $2.63 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 最小值为 $0.89 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 稳定时基本维持在 $1.2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。如(图 15)。扩展过程中, 其在 $54 \mu\text{s}$ 时突然增大, 这主要是前期爆炸过程中裂纹尖端能量积聚的作用结果, 之后裂纹稳定发展, 整体变化趋势较为平缓; $84 \mu\text{s}$ 裂纹扩展到 35.1 mm , 理论计算结果应力强度因子 K_I 、 K_{II} 均发生了突变, 结合实际裂纹测量时我们发现, 35 mm 处正是裂纹扩展方向偏转点(见图 13), 即突变是裂纹扩展方向改变造成的。这种理论计算与试验结果相契合表明, 试验后期试验模型受复合力的影响, 裂纹会以 I - II 混合型方式进行扩展。而 $124 \mu\text{s}$ 时在动能和反射应力波共同作用下, 裂纹尖端能量再次积聚, 应力强度因子增大, 则再次验证了爆炸加载条件下裂纹的扩展总是在振荡变化。

3.2.3 与焦散线试验结果的对比分析

对比焦散线试验结果可知, K_I 的整个变化趋势基本符合文献 [24] 中爆炸载荷下脆性材料动态裂纹尖端应力强度因子的分布规律(见图 15)。即先急速增加在减小, 之后呈振荡递减, 但在裂纹循环破坏过程中, 起裂和止裂时具有相对较大值, 这除了与试件模型和装药结构有关以外, 还可能有以下原因: 前期裂纹扩展速度快, 动能较大, 导致了 K_I 值的突变; 后期虽然裂纹扩展动能减弱, 但其与反射应力波能量共同作用, 使得 K_I 值再次升高。

由此我们可以推测, 裂纹的扩展并不是一蹴而就的, 而是能量积聚到能量释放的循环阶梯式破坏过程。且爆炸加载条加下试验模型后期受力复杂, 裂纹扩展方向发生改变, 此时以 I - II 混合型裂纹作为分析对象更为合理。

4 结 论

本文应用 DIC 试验方法, 通过记录断裂过程中裂纹尖端位移场和应变场的变化信息, 以断裂动力学为理论依据, 对爆破加载条件下脆性材料的裂纹扩展规律进行了试验研究。主要结论如下。

(1) 采用对称式试验模型实现了裂纹尖端的直观定位, 并通过与主应变场的对比分析获知, 裂纹尖端位置并不总在主应变场的应变最大处。因此, 不能将主应变场中应变最大值点作为裂纹尖端位置的判断依据。

(2) 依据获取的裂纹尖端位置求得裂纹扩展速度, 结合裂纹尖端应变场和位移场的信息, 应用微分原理和最小二乘牛顿迭代法计算出考虑惯性效应的 I - II 混合型动态应力强度因子, 从而可以更好的分析脆性材料破坏时的整个动态过程。

(3) 动态应力强度因子 K_I 在 54 和 84 μs 时发生突变, 由此可知, 爆炸加载条件下脆性材料的破坏并不是一蹴而就的, 而是能量积聚到能量释放的循环阶梯式递减破坏。在 84 μs 由于裂纹扩展方向发生变化, K_I 和 K_{II} 同时增大, 表明此时试验模型受复合力的影响, 裂纹会以 I - II 混合型方式进行扩展。

(4) 通过裂纹扩展长度、应力强度因子变化趋势与实际试验结果的对比分析可知, 此试验方法试验精度较高与理论计算结果能够较好的匹配, 具有可行性, 为后期应用 DIC 试验方法开展超动态加载条件下岩石材料的裂纹扩展规律, 提供了试验方法和理论依据。

参考文献:

- [1] 朱振海, 魏有志. 爆炸应力场的动光弹性分析 [J]. *力学与实践*, 1987, 9(6): 43-46. DOI: 10.6052/1000-0992-1987-124.
ZHU Zhenhai, WEI Youzhi. Dynamic and optical elastic analysis of explosive stress field [J]. *Mechanics in Engineering*, 1987, 9(6): 43-46. DOI: 10.6052/1000-0992-1987-124.
- [2] 朱振海. 爆炸应力波对高速扩展裂纹影响的动态光弹性试验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 1993, 13(2): 178-185.
ZHU Zhenhai. Dynamic photoelasticity test of the effect of explosion stress wave on high-speed propagation crack [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1993, 13(2): 178-185.
- [3] 杨仁树, 杨立云, 孙强, 等. 数字激光爆炸加载动光弹实验系统: CN102589766A[P]. 2012.
- [4] 杨仁树, 陈程, 岳中文, 等. 正入射爆炸应力波与运动裂纹作用的动态光弹性实验研究 [J]. *煤炭学报*, 2018, 43(01): 87-94. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.0353.
YANG Renshu, CHEN Cheng, YUE Zhong, et al. Dynamic photoelastic experimental study of normal incident blast stress wave and motion crack [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(01): 87-94. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.0353.
- [5] 杨立云, 许鹏, 郭东明, 等. 新型数字激光动光弹性实验技术在爆炸力学中的应用 [J]. *科技导报*, 2013, 31(15): 27-30. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.15.003.
YANG Liyun, XU Peng, GUO Dongming, et al. Application of new digital laser dynamic photoelastic experiment technology in explosion mechanics [J]. *Science & Technology Review*, 2013, 31(15): 27-30. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.15.003.
- [6] SCHWIEGER H. A new application of differential interferometry for stress analysis [J]. *Experimental Mechanics*, 1984, 24(4): 277-285. DOI: 10.1007/BF02323988.
- [7] KALTHOFF J F, WINKLER S, BEINERT J. Dynamic stress intensity factors for arresting cracks in DCB specimens [J]. *International Journal of Fracture*, 1976, 12(2): 317-319. DOI: 10.1007/BF00036990.
- [8] RAVI-CHANDAR K, KNAUSS W G. An experimental investigation into dynamic fracture: III. On steady-state crack propagation and crack branching [J]. *International Journal of Fracture*, 1984, 26(2): 141-154. DOI: 10.1007/BF01157550.
- [9] THEOCARIS P S, PAPAPOPOULOS G A, MILIOS J. Crack interaction in bending due to impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1984, 2: 131-149. DOI: 10.1016/0734-743X(84)90002-2.
- [10] 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). DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.16.001.
LI Qing, YANG Renshu, LI Junlei, et al. Experimental study on dynamic crack propagation under blast loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16). DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.16.001.
- [11] 杨立云, 马佳辉, 王学东, 等. 压应力场中爆生裂纹分布与扩展特征实验分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(2): 262-268. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0262-07.
YANG Liyun, MA Jiahui, WANG Xuedong, et al. Experimental analysis of distribution and propagation characteristics of cracking in compressive stress field [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(2): 262-268. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0262-07.

- [12] 杨仁树, 杨立云, 岳中文. 爆炸加载反射式焦散线实验方法与技术探讨 [C]// 中国工程科技论坛第 125 场, 2011: 378–386.
- [13] 刘彩平. 反射式焦散法对岩石类介质的适用性研究 [C]// 北京力学学会学术年会. 2009.
- [14] PETERS W H, RANSON W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis [J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(3): 213427.
- [15] 潘兵, 谢惠民, 戴福隆. 数字图像相关中亚像素位移测量算法的研究 [J]. *力学学报*, 2007, 23(2): 245–252. DOI: 10.3969/j.issn.0258-1825.2007.02.020.
PAN Bing, XIE Huimin, DAI Fulong. Research on the measurement algorithm of sub-pixel displacement in digital image correlation [J]. *Chinese Journal of Theoretical & Applied Mechanics*, 2007, 23(2): 245–252. DOI: 10.3969/j.issn.0258-1825.2007.02.020.
- [16] 潘兵, 谢惠民, 续伯钦, 等. 数字图像相关中的亚像素位移定位算法进展 [J]. *力学进展*, 2005, 35(3): 345–352. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0992.2005.03.005.
PAN Bing, XIE Huimin, XU Boqin, et al. Progress of sub-pixel displacement localization algorithm in digital image correlation [J]. *Advances in Mechanics*, 2005, 35(3): 345–352. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0992.2005.03.005.
- [17] 潘兵, 谢惠民. 数字图像相关中基于位移场局部最小二乘拟合的全场应变测量 [J]. *光学学报*, 2007, 27(11): 1980–1986. DOI: 10.3321/j.issn:0253-2239.2007.11.012.
PAN Bing, XIE Huimin. Full field strain measurement based on local least squares fitting of displacement field in digital image correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(11): 1980–1986. DOI: 10.3321/j.issn:0253-2239.2007.11.012.
- [18] 赵程, 鲍冲, 松田浩, 等. 数字图像技术在节理岩体裂纹扩展试验中的应用研究 [J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(5): 944–951. DOI: 10.11779/CJGE201505022.
ZHAO Cheng, BAO Chong, SONG Tianhao, et al. Application of digital image technology in crack propagation test of jointed rock mass [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(5): 944–951. DOI: 10.11779/CJGE201505022.
- [19] 孙强, 王启乾, 刘国有, 等. 基于超高速 DIC 方法的近距侧爆破地铁隧道应变场分析 [J]. *矿业科学学报*, 2018(1). DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2018.01.005.
SUN Qiang, WANG Qiqian, LIU Guoyou, et al. Strain field analysis of metro tunnels with near-side blasting based on ultra-high speed DIC method [J]. *Journal of Mining Science*, 2018(1). DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2018.01.005.
- [20] 杨立云, 王学东, 孙金超, 等. 超高速数字图像相关实验的参数优化 [C]// 全国煤炭工业生产一线青年技术创新文集. 2016.
- [21] 陆渝生, 邹同彬, 连志颖, 等. 动光弹等差条纹的分析与判读 [J]. *解放军理工大学自然科学版*, 2003, 4(4): 49–53. DOI: 10.7666/j.issn.1009-3443.20030412.
LU Yusheng, ZOU Tongbin, LIAN Zhiying, et al. Analysis and interpretation of theisometric stripes of moving lights [J]. *PLA Natural Science Edition*, 2003, 4(4): 49–53. DOI: 10.7666/j.issn.1009-3443.20030412.
- [22] 苏先基, 刘承. 焦散线实验方法综述 [J]. *实验力学*, 1987(2): 3–29.
SU Xianji, LIU Cheng. Summary of experimental methods of caustics [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1987(2): 3–29.
- [23] 代树红, 马胜利, 潘一山. 数字图像相关法测定岩石 I - II 复合型裂纹应力强度因子 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(7): 1362–1368.
DAI Shuhong, MA Shengli, PAN Yishan. Determination of stress intensity factor of rock I-II composite crack by digital image correlation method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(7): 1362–1368.
- [24] 李清, 赵艳苹, 马英丽, 等. 动焦散线在爆炸裂纹扩展试验研究中的应用 [J]. *工程爆破*, 2005, 11(3): 5–8. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2005.03.002.
LI Qing, ZHAO Yanping, MA Yingli, et al. Application of dynamic caustics in experimental study of explosion crack growth [J]. *Engineering Blasting*, 2005, 11(3): 5–8. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2005.03.002.
- [25] 类维生, 苏燕, 董建令, 等. 动态断裂过程的惯性效应 [J]. *理化检验(物理分册)*, 1996(4): 32–34.
WEI Weisheng, SU Yan, DONG Jianling, et al. Inertia Effect of Dynamic Fracture Process [J]. *Physical and Chemical Testing (Physical Section)*, 1996(4): 32–34.
- [26] 范天佑. 断裂动力学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- [27] 马宏伟, 吴斌. 弹性动力学及其数值方法 [M]. 中国建材工业出版社, 2000.
- [28] HARILAL R, VYASARAYANI C P, RAMJI M. A linear least squares approach for evaluation of crack tip stress field parameters using DIC [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2015, 75: 95–102. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2015.07.004.

- [29] 潘兵, 吴大方, 夏勇. 数字图像相关方法中散斑图的质量评价研究 [J]. 实验力学, 2010, 25(2): 120–129.
PAN Bing, WU Dafang, XIA Yong. Research on quality evaluation of speckle pattern in digital image correlation method [J]. Laboratory Mechanics, 2010, 25(2): 120–129.
- [30] WITHERS P J, LOPEZ-CRESPO P, SHTERENLIKHT A, et al. The stress intensity of mixed mode cracks determined by digital image correlation [J]. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine & Hygiene*, 2008, 81(5): 771–772. DOI: 10.1016/0035-9203(87)90027-7.
- [31] DU Y, DIAZ F A, BURGUETE R L, et al. Evaluation using digital image correlation of stress intensity factors in an aerospace panel [J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 51(1): 45–57. DOI: 10.1007/s11340-010-9335-5.

Experimental study on crack propagation of brittle materials based on DIC under explosive loading

SUN Qiang, LI Xuedong, YAO Tengfei, GAO Chun

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

Abstract: In this paper, the digital image correlation method is used to test the tip position of the brittle material in the explosion loading strip, the stress intensity factor calculation considering the inertia effect and the crack propagation law. Firstly, the symmetry experimental model is used to realize the intuitive positioning of the crack tip, and the more accurate full-field strain and displacement information is recorded. By analyzing the main strain field at the crack tip, the maximum strain point cannot be used as the crack tip. Judgments based. Secondly, based on the fracture dynamics, the crack propagation length, the crack propagation velocity and the displacement information of the data points in a certain area of the tip are obtained according to the crack tip position. The differential principle and the least squares Newton iteration method are used to calculate the inertial effect. The stress intensity factor of the I-II hybrid crack, wherein the K_I maximum is $2.63 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ and the minimum value is $0.89 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. The overall trend of K_{II} has remained basically the same, but due to the complexity of the late stage of the model, the crack propagation direction changes and the mutation occurs; Then, the overall trend of the stress intensity factor shows that the crack propagation of the brittle material develops in a cyclically decreasing manner with the energy accumulation and release under explosive loading conditions, but the variation range is relatively large when crack initiation and crack arrest occur, and in the test. The late expansion crack is an I-II hybrid type. Finally, the crack propagation length and stress intensity factor change trend are compared with the actual test results. The two are basically the same, which indicates that the test method and the theoretical calculation result can be well matched, and the experimental precision is high, which is feasible.

Keywords: digital image correlation method; blast load; brittle material; stress intensity factor; crack propagation

(责任编辑 王小飞)