

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0364

爆炸加载下混凝土表面的裂纹扩展*

崔新男¹, 汪旭光^{1,2}, 王尹军², 陈志远¹

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;

2. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

摘要: 为深入研究内爆加载下岩土类材料的破坏机理, 提出了一种新的爆炸裂纹检测算法, 采用数字图像相关方法测量表面位移场和应变场, 建立了裂纹扩展和扩张模型, 并通过混凝土内爆试验观测裂纹扩展过程, 研究了裂纹长度扩展与宽度扩张规律。结果表明, 裂纹长度扩展是应力波和爆生气体共同作用的结果, 裂纹最大扩展速度为 225.95 m/s, 平均速度为 122.27 m/s, 裂纹总长 159.92 mm, 长度扩展止于 1.75 ms; 裂纹的张开由气体主导, 最大宽度 1.59 mm, 作用时间长达 4.5 ms; 拉应变集中区先于裂纹出现, 其形状决定了裂纹的走向和趋势, 爆炸加载下断裂过程区长度为骨料粒径的 8~9 倍。

关键词: 爆炸载荷; 表面裂纹; 混凝土; 高速数字图像相关; 数字图像处理; 断裂过程区

中图分类号: O389; TD235 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

External crack propagation of concrete surface under explosive loading

CUI Xinnan¹, WANG Xuguang^{1,2}, WANG Yinjun², CHEN Zhiyuan¹

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

2. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: To further investigate the failure mechanism of geotechnical materials under implosion loading, a novel blasting crack detection algorithm is proposed in this paper, the digital image correlation method is used to measure the surface displacement field and strain field, the crack propagation and expansion model is built. A concrete blasting experiment was carried out, the crack propagation and expansion process were measured and analyzed. The results show that the propagation of crack is a combined action of stress wave and explosive products. The maximum velocity is 225.95 m/s, the average velocity is 122.27 m/s, the total length is 159.92 mm, and the length propagation ceases at 1.75 ms. The opening of the crack is dominated by explosive products with a maximum width of 1.59 mm. The action time of explosive products is 4.5 ms. The tensile strain concentration zone appears before the initiation of crack and its shape determines the tendency of the crack. The fracture process zone is about 8~9 times of the maximum aggregate size.

Keywords: explosive loading; external crack; concrete; high-speed DIC; digital image processing; fracture process zone

炸药内爆是岩石及混凝土等材料受载破坏的常见形式, 其破坏机理为是: 在爆炸产生的应力波和高温高压气体共同作用下, 介质内部出现裂纹并向自由面扩展, 将介质切割成块。但对应力波和高温高压气体的作用分工研究较少, 尤其是两者共同作用下的裂纹扩展机理尚不完全清楚。

* 收稿日期: 2019-09-19; 修回日期: 2020-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(51664007); 中国工程院咨询研究项目(2018-XY-12)

第一作者: 崔新男(1986—), 男, 博士研究生, 工程师, chester_tsui@sina.cn

通信作者: 汪旭光(1939—), 男, 博士, 教授, 243458313@qq.com

裂纹扩展过程作为断裂力学的重要内容,一直是学者们研究的重点,测量方法也很多,主要包括电测法、模拟法、红外热成像法和光测法等。电测法主要使用电阻式应变片^[1]和裂纹扩展计(crack propagation gauge, CPG)^[2]等传感器,以金属栅丝断裂时刻作为裂纹发展到此的时间,从而得到裂纹的起裂、传播、止裂时刻。模拟法则主要采用各种动态分析软件,如 RFPA-dynamic^[3-4]、LS-DYNA^[5-6]、AUTODYN^[7]、ABAQUS^[8]等进行数值试验,设定爆炸条件,模拟介质的动力响应,由于模拟法具有不受试验条件限制,易设定爆破参数等优势,应用较多。相关研究^[9]表明,岩石材料受到冲击致裂时,伴随体积膨胀和断裂,试件表面会发生能量耗散和温度跃升,由温度变化可得到裂纹发展过程。然而,由于缺乏相关理论研究,基于热成像的方法研究较少。光测法包括激光裂纹成像传感器^[10]、动态焦散线和数字图像相关等方法。杨立云等^[11]、杨仁树等^[12-13]用固体激光器取代多火花式点光源,用数码高速相机代替胶片相机,设计了新型数字激光动态焦散线测试系统,研究了多种爆破模式下裂纹扩展及相互作用过程。数字图像相关(digital image correlation, DIC)具有非接触、全场变形及应变测量等优势,在高速动态过程研究中应用较为广泛。Siviour等^[14]、Zhang等^[15]、申海艇等^[16]将DIC方法应用到SHPB试验中,开展了基于DIC技术的冲击加载下岩石类材料动态响应研究,同时测得了裂纹扩展速度;徐振洋等^[17]应用两台高速相机的DIC-3D方法研究了炸药外爆的聚能射流侵彻过程;杨立云等^[18]应用超高速摄影和DIC技术分析了聚碳酸酯平板内爆炸应力波的传播过程。模拟法虽然不受试验条件限制,可以迅速开展研究,但是在模拟分析过程中,需要对边界条件和材料属性进行简化或近似,难以真实还原试验条件;应变片及裂纹扩展计受载后会破坏,不能测得裂纹扩展全过程;近年来,随着光学成像技术以及图像处理技术的进步,基于光学传感器的光测法被越来越多地应用到爆破裂纹扩展过程研究当中。

本文中应用DIC和数字图像处理(digital image processing, DIP)技术,分析混凝土内爆试验中表面裂纹在长度和宽度方向的扩展过程及表面变形场和应变场的演化过程,讨论应力波和气体对裂纹扩展的分工作用,并分析断裂过程区的发展过程。

1 裂纹扩展测量方法

1.1 基于数字图像处理技术的裂纹检测算法

高清、高速相机的出现,为研究爆炸、冲击等瞬态过程提供了有力工具,也使数字图像处理技术得到了全面发展。采用千眼狼5KF20高速摄影机、Nikon AF70-200 mm F/2.8镜头采集图像,远程快门触发,拍摄的裂纹图像如图1(a)所示,应用背景减除、图像增强、边缘检测等处理方法,提出了一种新的混凝土表面裂纹检测算法,裂纹检测流程如下。

(1) 背景减除

将起爆前拍摄图像作为背景,裂纹发展过程图像作为前景,由于散斑会干扰裂纹边缘检测,因此不能直接进行边缘检测,将前景减除背景可消除散斑影响,如图1(b)所示。

(2) 图像增强

采用室外自然光源照明,且帧率较高,图像整体亮度较低,经过背景减除后,虽获得了裂纹对象,但其灰度特征不明显,采用伽马变换增加图像对比度,其基本形式为:

$$s = \alpha r^\gamma \quad (1)$$

式中: s 为输出灰度值, α 为灰度缩放系数, r 为输入灰度值, γ 为灰度输入输出曲线。当 $\gamma < 1$ 时,拉伸灰度级较低的区域,压缩灰度级较高的区域;当 $\gamma > 1$ 时,则拉伸灰度级较高的区域,压缩灰度级较低的区域。本文中 γ 取值为 0.6, 增强后的裂纹特征图像如图1(c)所示。

(3) 裂纹边缘检测

边缘检测的本质是对图像进行滤波,通常的做法是求图像一阶或二阶导数以突出图像局部变化最

明显的部分,即边缘。求一阶导数常用 Sobel 算子、Canny 算子等,求二阶导数常用 Laplacian 算子,本文中使用的 Canny 算子检测到的裂纹边缘如图 1(d) 所示。

(4) 临近裂纹连接

将图 1(d) 中检测到的相近裂纹进行连通,同时删除非裂纹的噪点区域,方法为:对提取的边缘进行腐蚀、开闭等形态学操作,连通临近裂纹,并删除孤立对象,如图 1(d) 中孤点为一爆破碎石。

(5) 提取裂纹骨架

进行腐蚀操作后可得到的裂纹对象如图 1(e) 所示,以裂纹对象的中心像素为骨架,剔除两侧像素,将裂纹细化为单层像素,采用 Zhang 等^[19]提出的算法:以某一明点 $P_{i,j}$ 为中心,考察其 8 邻域 $P_{i-1,j-1}$ $P_{i-1,j}$ $P_{i-1,j+1}$ $P_{i,j-1}$ $P_{i,j}$ $P_{i,j+1}$ $P_{i+1,j-1}$ $P_{i+1,j}$ $P_{i+1,j+1}$ 内明点个数及明暗点组合方式,满足删除条件时,则删除该点,每一轮迭代删除一层像素,直至目标只剩一层像素,如图 1(f) 所示。由裂纹骨架中明点个数得到裂纹的长度,单位为像素,再由图中标尺所代表的实际物理距离,可得到每个像素的物理尺寸,计算裂纹的物理长度。

设在时刻 t_i ($i=1, 2, \dots, n$), 第 i 帧图像中检测到的裂纹为 c_i^k ($k=1, 2, \dots, m$), k 为裂纹数,裂纹扩展速度可用下式计算:

$$v_i^k = \frac{(n_i^k - n_{i-1}^k) D_p}{t_i - t_{i-1}} \quad (2)$$

式中: v_i^k 为第 k 条裂纹扩展速度, n_i^k 和 n_{i-1}^k 分别为第 k 条裂纹在第 i 帧和第 $i-1$ 帧中明点累计数, D_p 为单个像素点所代表的物理距离,本试验中为 0.89 mm/pixel。

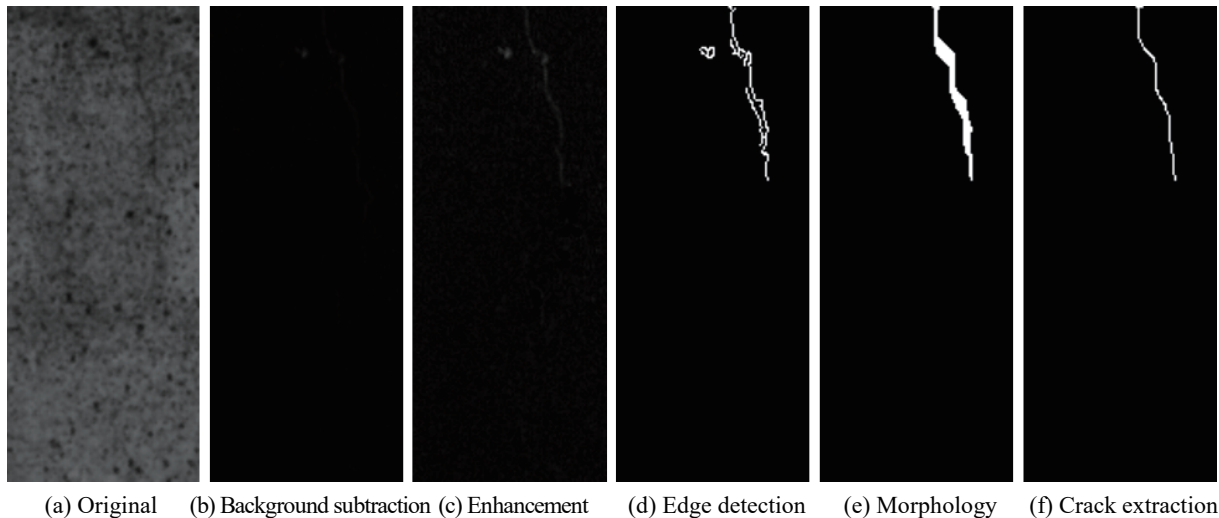


图 1 裂纹检测过程

Fig. 1 Crack detection process

1.2 基于数字图像相关方法的全场变形测量

数字图像相关方法的本质是模板匹配。如果将受载变形前后图像分别定义为参考图像 I_R 和匹配图像 I_M , 参考图像中某点 $P_0(x_0, y_0)$ 变形后在 x 和 y 方向的位移分别为 u 和 v , 那么 P_0 在匹配图像中的对应点为 $P(x_0+u, y_0+v)$ 。在参考图像中以 P_0 为中心建立大小为 $(2i+1) \times (2j+1)$ 的参考子区 $f(x, y)$, 在匹配图像中建立同样大小的匹配子区 $g(x+u, y+v)$, 使匹配子区在匹配图像中滑动, 同时进行相关运算, 计算相关系数 $C_{f,g,u,v}$, 当相关系数取得极值时, 点 P 即为 P_0 的对应点, 两点坐标差即为位移矢量 (u, v) , 此时位移为整像素精度, 并采用曲面拟合法求解亚像素位移。采用零均值归一化互相关 (zero-based normalized cross correlation, ZNCC) 函数计算相关系数, 表示如下:

$$C_{f,g,u,v} = \frac{\sum_{x=-i}^i \sum_{y=-j}^j [f(x,y) - f_{ij}][g(x+u,y+v) - g_{ij}]}{\sqrt{\sum_{x=-i}^i \sum_{y=-j}^j [f(x,y) - f_{ij}]^2} \sqrt{\sum_{x=-i}^i \sum_{y=-j}^j [g(x+u,y+v) - g_{ij}]^2}} \quad (3)$$

式中: $f_{ij} = \frac{1}{(2i+1)(2j+1)} \sum_{x=-i}^i \sum_{y=-j}^j f(x,y)$ 和 $g_{ij} = \frac{1}{(2i+1)(2j+1)} \sum_{x=-i}^i \sum_{y=-j}^j g(x+u,y+v)$ 分别为参考子区和匹配子区灰度均值。对图像中每一像素进行相关运算,可得到位移场分布情况,对位移场采用逐点最小二乘法求解应变场,再扩展到图像序列中每一帧,便可得到位移场和应变场演化过程。

2 试 验

2.1 测试系统

测试系统由混凝土模型、爆破器材、图像采集处理设备及喷漆、冲击钻、发电机等辅助材料组成,如图 2(a) 所示。

混凝土表面裂纹扩展过程以面内位移为主,故采用单台相机的二维 DIC 方法,调节三脚架使相机视轴垂直被测表面,高度与被测表面高度一致,拍摄的爆破过程图像如图 2(b) 所示。

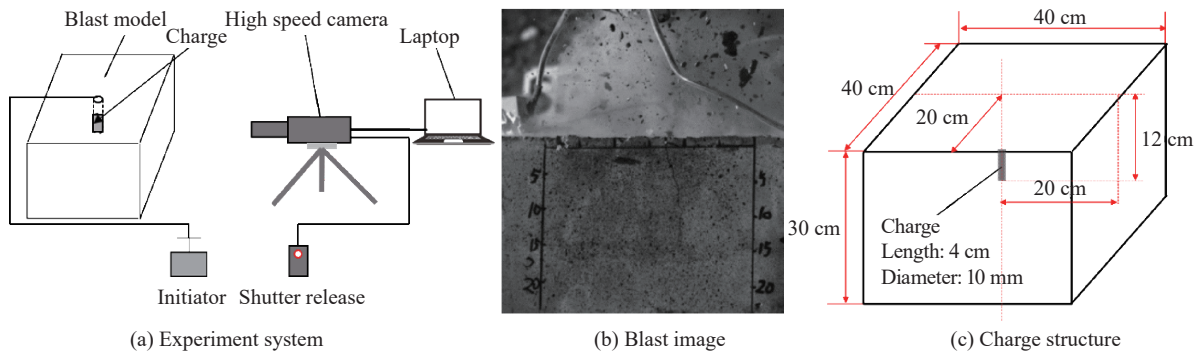


图 2 混凝土表面裂纹扩展试验系统

Fig. 2 Experiment system for crack propagation of concrete surface

2.2 装药参数

模型采用商用混凝土浇筑而成,尺寸为 40 cm×40 cm×30 cm,木制框架,自然养护 28 d,经测试其物理力学参数如表 1 所示。

表 1 混凝土模型物理力学参数

Table 1 The physical and mechanical parameters of the concrete model

混凝土标号	容重/(kg·m ⁻³)	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	泊松比
C30	2.7×10 ³	42.5	31.2	3.2	0.3

爆破器材为 8#导爆管雷管加 2 g 黑索金,先将黑索金倒入内径 10 mm、底部封堵的 PVC 管中,再插入导爆管雷管,压实,顶端用胶带缠绕,总装药长度约 4 cm,装药量 3 g。

使用冲击钻在模型顶面钻炮孔,孔径 12 mm,孔深 12 cm,爆破抵抗线约 9.5 cm,炮孔距离被测面 20 cm,如图 2(c) 所示。为保证堵塞质量,先在孔口填入石英砂,再灌注 502 胶水固结。被测表面喷涂散斑并描画刻度尺以便于获得像素与物理距离之间的比例。拍摄帧率为 20 000 s⁻¹,曝光时间为 50 μs,拍摄时长为 3 s,分辨率为 448×484,远程快门线触发。

3 结果分析

3.1 起裂点分析

拍摄的裂纹扩展过程如图3所示。起爆后0.50 ms模型侧面开始出现裂纹,起裂点位于模型上表面与侧面棱线处,如图3(b)所示;随后裂纹进一步扩展,于1.75 ms结束,如图3(c)~(e)所示;长度扩展结束后转面向宽度扩张,最终于4.50 ms结束,如图3(f)所示。

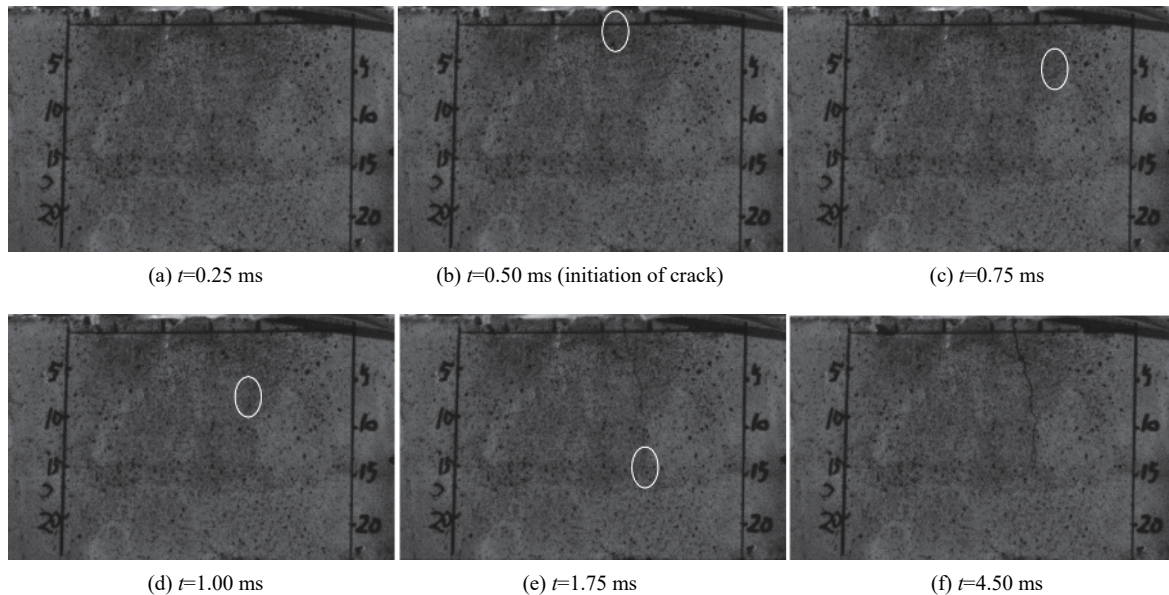


图3 裂纹扩展过程

Fig. 3 Crack propagation progress

炸药在混凝土内部爆炸时,其作用过程分为三种模式^[20]:一是在应力波的作用下,混凝土内部产生微裂隙,并使混凝土本身由于缺陷存在的原生裂隙扩展;二是应力波到达自由面后反射,引起自由面附近发生“剥落”;三是爆炸生成的气体使原生裂隙和次生裂隙进一步发展,并将介质切割成块。基于该理论,并结合装药结构,最小抵抗线约9.5 cm,侧面抵抗线为20 cm,而棱线处抵抗线约22.1 cm,可知模型表面最初的裂纹应形成于炮孔口处。侧面起裂点没有出现在侧面而出现在棱线上,说明一旦形成贯通裂纹,该裂纹将成为主裂纹,或称为“优势”裂纹,“优势”裂纹在表面扩展速度极快,也将决定后续裂纹的趋向。

3.2 裂纹扩展过程

3.2.1 长度扩展

应用第1.1节介绍的裂纹检测算法依次对图像序列进行检测,得到裂纹长度扩展过程如图4所示。由图4可知,裂纹长度扩展从0.50 ms开始,到1.75 ms停止,期间最大速度225.95 m/s,平均速度122.27 m/s。依速度值将曲线划为2段,0.50~1.20 ms为第1段,裂纹扩展速度始终大于平均值,起裂后速度跃升快,极值出现在0.60 ms,极值后有一定波动,整体稳定于较高水平,可称为裂纹稳定扩展段,此间裂纹长度为133.15 mm,达到总长的83%;第2段为1.20~

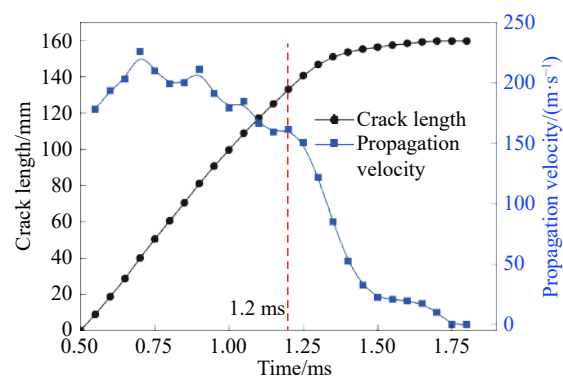


图4 裂纹长度和扩展速度曲线

Fig. 4 Curves of crack length and propagation velocity

1.75 ms, 裂纹扩展速度急剧衰减, 推测此时应力波作用已十分微弱, 甚至已停止, 只有爆炸气体继续推动裂纹扩展, 最终裂纹长度扩展至 159.92 mm 停止。黄家蓉等^[21]、冯盼学等^[22]测得内爆条件下应力波在混凝土中传播的速度达 10^3 m/s 级, 作用时间为几十至几百微秒, 而侧面裂纹起裂于 0.5 ms, 止裂于 1.75 ms, 可见, 裂纹在长度上的扩展为应力波和爆炸气体共同作用的结果。

3.2.2 表面位移场及宽度扩展过程

应用第 1.2 节介绍的数字图像相关方法计算裂纹区域水平位移场, 如图 5 所示, 纵横坐标分别为裂纹区域像素坐标, 位移单位为 mm。

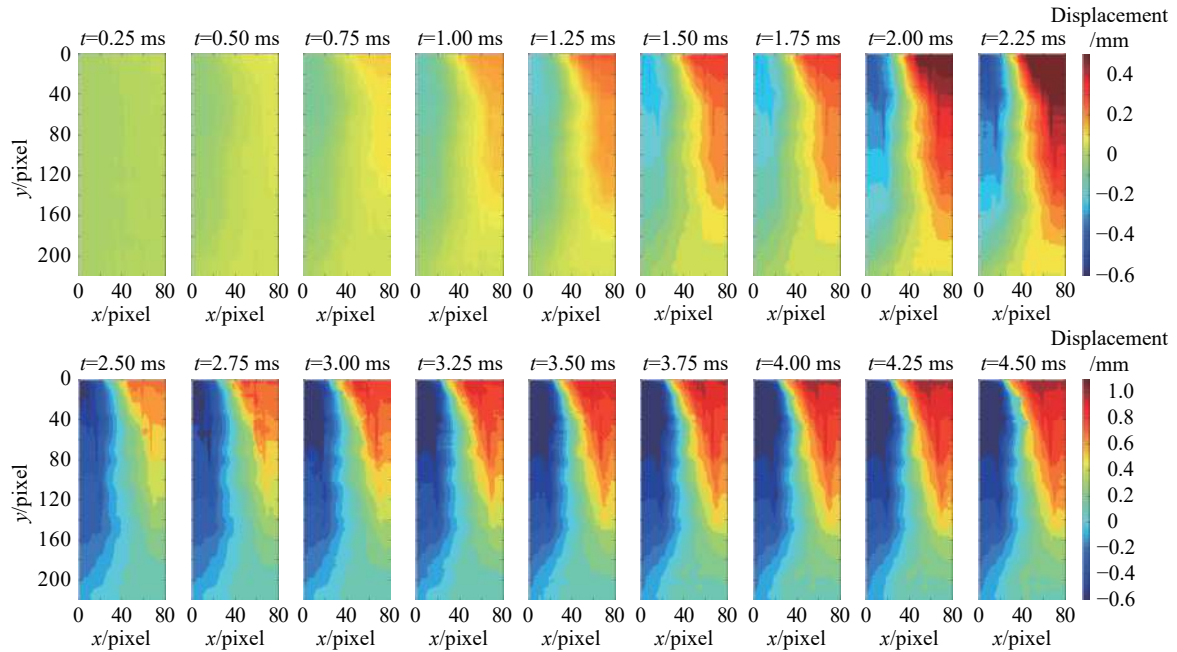


图 5 水平位移场的演化过程

Fig. 5 Evolution of horizontal displacement field

由图 5 可知, 裂纹的扩展过程是被测表面位移场由无序到有序不断演化、并在裂纹区域不断集中的过程。起爆后 0.25 ms, 表面位移普遍较小, 左侧为负值, 极值为 -0.041 mm, 右侧为正值, 极值为 0.052 mm, 宏观裂纹尚未形成, 裂纹区域位移为 $0 \sim 0.025$ mm; 0.50 ms 时起裂点两侧位移增大, 达到 $-0.052 \sim 0.126$ mm; 0.75~1.75 ms 为裂纹两侧位移逐渐增长、裂纹长度逐渐延伸的过程, 长度扩展结束时, 裂纹右侧位移极值为 0.318 mm, 左侧为 -0.282 mm; 1.75~4.50 ms 裂纹长度基本不再增加, 而转向横向(宽度)发展, 裂纹宽度扩展结束时, 裂纹两侧位移极值分别为 1.067 mm 和 -0.523 mm。

传统基于应变片、焦散线和裂纹扩展计(CPG)等方法对裂纹长度方向扩展研究较多, 而对裂纹在宽度方向的扩展研究较少, 为方便描述, 本文中将裂纹长度方向称为扩展, 宽度方向称为扩张。

在起裂点左侧和右侧每隔 10 pixel (8.9 mm) 分别取 5 对监测点, 记为 C_{Li} ($i=1, 2, \dots, 5$) 和 C_{Ri} ($i=1, 2, \dots, 5$), 则起裂点裂纹张开位移可用各监测点相对位移表示:

$$W_i = C_{Ri} - C_{Li} \quad (4)$$

以时间为横轴, 以裂纹张开宽度 W_i 为纵轴, 裂纹扩张曲线如图 6(a) 所示。从起裂点开始, 沿着裂纹扩展方向, 以 5 pixel (4.45 mm) 为步长, 以裂纹为中心, 按照上述方法分别取监测点, 得到沿扩展方向的裂纹宽度曲线, 如图 6(b) 所示。

由图 6(a) 可知, 无论监测点距离起裂点多远, 其相对位移发展趋势是一致的, 裂纹扩展停止后, 横向扩张要持续更长时间, 可达 4.5 ms, 在裂纹发展的整个过程中, 爆炸气体均起到重要作用, 但其对裂纹的扩张作用更明显。如前文所述, 裂纹扩展速度于 1.20 ms 明显下降, 这是由于应力波的作用微弱或已结

束, 但此时爆炸气体的作用仍较强, 其作用更主要表现为使裂纹进一步张开, 且能维持裂纹稳定扩张。随着距裂纹中心距离的增大, 各监测点间的相对位移增大, 监测点 W_1 最大相对位移 1.01 mm, W_2 最大相对位移 1.36 mm, W_3 、 W_4 、 W_5 最大相对位移较为接近, 分别为 1.59、1.55、1.54 mm。说明靠近裂纹近区介质内部受应力波拉伸作用较强, 表现为因孔隙、微裂隙等增大而变得“疏松”, 此“疏松”区宽度可达 5.34 cm, 由图 5 中位移最大区域并非裂纹附近而是与裂纹有一段距离, 同样可以证实这种“疏松”区的存在。从第 3 监测点开始远离裂纹区域, 介质更多地表现为刚体位移, 因此, 以 W_3 、 W_4 、 W_5 表示裂纹张开宽度是合适的。由图 6(b) 可知, 随着裂纹长度的增加, 其张开宽度逐渐减小, 起裂点附近宽度最大, 可达 1.59 mm, 止点附近张开宽度最小, 仅为 0.4 mm。

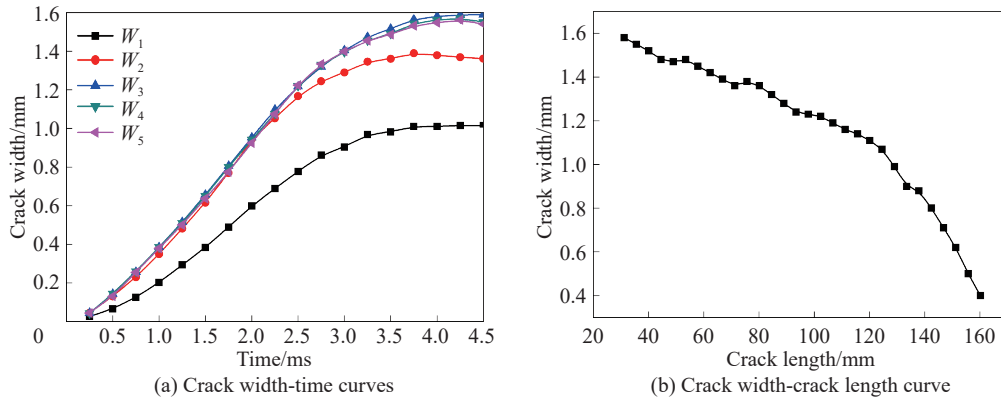


图 6 裂纹张开宽度随时间和裂纹长度的变化曲线
Fig. 6 Curves of crack width with time and crack length

3.3 应变场演化过程

最大主应变场的演化过程如图 7 所示, 其中, 红色表示应变较大, 由图 7 可知, 裂纹区域始终存在应变集中带。在 0.25 ms 时, 宏观裂纹尚未产生, 但应变已向裂纹区域集中; 0.50 ms 时, 未来的裂纹附近应变集中带已经形成, 起裂点附近最明显, 随着宏观裂纹的产生和扩展, 应变集中带越发明显, 1.75 ms 时,

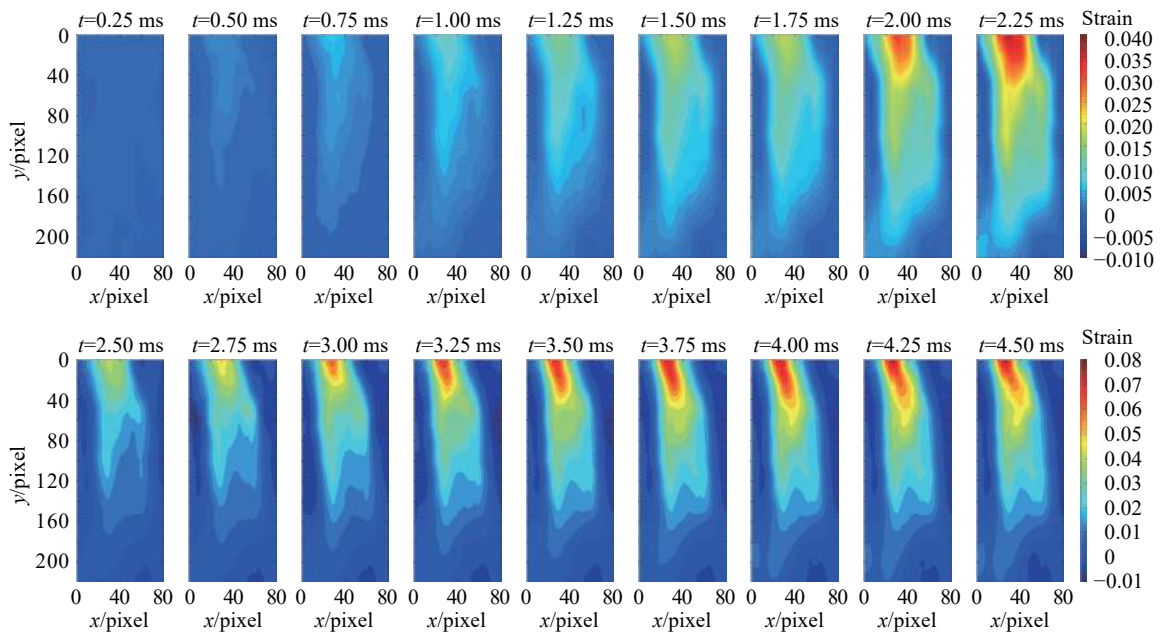


图 7 最大主应变场的演化过程
Fig. 7 Evolutionary process of maximum principle strain field

应变集中带的总体形态已经确定;在 1.75~4.50 ms,在裂纹附近应变集中带上,深色区域不断扩大,宏观表现为此处裂纹正在扩张。

3.4 断裂过程区分析

断裂过程区(fracture process zone, FPZ)模型是 Hillerborg 等^[23]在研究混凝土断裂过程中提出的,该模型认为混凝土裂纹的扩展以裂纹前端形成的微裂区为先导,此区域内材料强度降低,但由于骨料和砂浆之间的互锁效应,仍能传递部分应力,称为黏聚力,其作用为抵抗裂纹张开,并使裂纹转向。

FPZ 的观测通常在带有预制裂纹混凝土梁的三点弯曲试验中进行,属于准静态加载,对于动态加载过程 FPZ 的研究则较少。FPZ 尺寸的测量也逐步发展为以 DIC 方法为主,结合声发射(acoustic emission, AE)^[24]测量、引伸计^[25]等。FPZ 区域的界定不尽相同,有的以应变作为界定标准,也有的以位移作为标准^[26]。本文中以各帧中宏观裂纹尖端为 FPZ 起点,应变集中带作为 FPZ 边界,边界应变值取极限拉伸应变 100×10^{-6} (文献^[27]中测得相似配比混凝土极限拉伸应变为 $(80 \sim 120) \times 10^{-6}$),确定 FPZ 的尺寸,如图 8 所示,图中横纵坐标的单位为像素,裂纹尖端和 FPZ 尖端坐标也为像素,0.80 ms 后 FPZ 已超出观测范围,结合图 7,计算各时刻 FPZ 尺寸如表 2 所示。

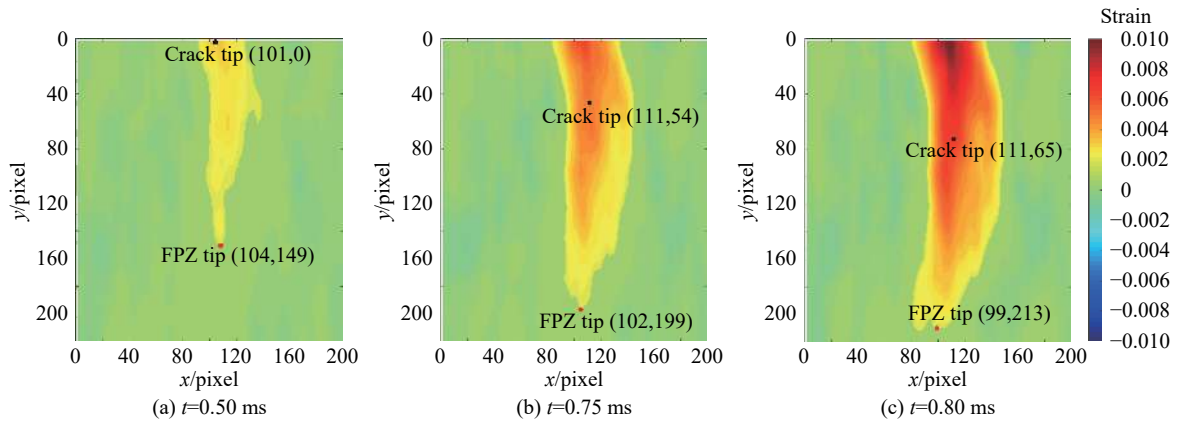


图 8 断裂过程区发展过程

Fig. 8 Propagation of fracture zone

表 2 断裂过程区尺寸

Table 2 Sizes of fracture process zone

时间/ms	FPZ宽度/mm	FPZ长度/mm
0.50	33.82	132.64
0.75	47.17	129.30
0.80	48.95	132.16
1.00	52.51	-
2.00	50.73	-
3.00	49.84	-
4.00	51.62	-

由表 2 可知,除起裂时刻 FPZ 宽度较小,为 33.82 mm 外,其余时刻宽度变化不大,在 47.17~52.51 mm 之间,FPZ 长度基本不变,为 129.30~132.64 mm,约为混凝土骨料最大粒径(15 mm)的 8~9 倍。赵艳华等^[28]的研究表明,断裂过程区的尺寸与混凝土的配比、骨料粒径等因素有关,为混凝土材料固有性质,但也有研究表明,断裂过程区还表现出与混凝土试件大小相关的尺寸效应。

4 结 论

结合数字图像相关方法和图像处理等技术,研究了内爆加载下混凝土表面裂纹扩展规律。该技术可观测裂纹的扩展和扩张效应以及断裂过程区的演化规律,同时提供裂纹变化的量化数据,是爆炸裂纹研究的有效方法。通过进行混凝土内爆试验,得到主要结论如下:

(1)侧面裂纹起裂点位于侧面与顶面交线上,扩展平均速度为 122.27 m/s,最大速度为 225.95 m/s,裂纹总长为 159.92 mm,裂纹方向与炮孔轴线方向近似平行;

(2)裂纹长度扩展集中在起爆后 0.50~1.75 ms 内,为应力波和爆炸气体共同作用结果,扩展停止后,裂纹主要进行横向扩张,持续时间可达 4.5 ms,主要动力为爆炸生成的气体楔入裂纹内,使模型被切割,最终裂纹最大张开宽度为 1.59 mm;

(3)根据应变场分析了爆破这种超动态加载下混凝土断裂过程区的演化规律,混凝土配比和骨料粒径固定后,其断裂过程区尺寸基本不变,其长度约为骨料最大粒径的 8~9 倍;

(4)试验采用单药包集中装药,且装药量较小,侧面只产生了一条宏观主裂纹,采用多药包装药,并设计不同装药参数和布置形式,对于全面分析多条裂纹扩展过程大有裨益;另外,电测法擅长对应力波的测量,光测法对裂纹动态扩展过程的测量更方便,将二者结合起来更有助于研究爆炸加载下介质的响应和应力波传播规律,这将是下一步工作的方向。

参考文献:

- [1] 周磊,朱哲明,董玉清,等. 中低速冲击载荷下巷道内裂纹的动态响应 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(6): 68-77. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1403.
ZHOU L, ZHU Z M, DONG Y Q, et al. Dynamic response of cracks in tunnels under impact loading of medium-low speed [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(6): 68-77. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1403.
- [2] 周磊,朱哲明,王蒙,等. 致密砂岩巷道模型试件动态起裂及止裂全过程分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(9): 095101-1-095101-11. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0073.
ZHOU L, ZHU Z M, WANG M, et al. Analysis on whole dynamical fracture process of tight sandstone tunnel model under impact loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(9): 095101-1-095101-11. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0073.
- [3] 刘超,崔娜. 不同地应力下煤体爆破裂纹扩展规律研究 [J]. *煤炭技术*, 2018, 37(6): 3-5. DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2018.06.002.
LIU C, CUI N. Study on crack propagation in coal mass blasting under different in-situ stress [J]. *Coal Technology*, 2018, 37(6): 3-5. DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2018.06.002.
- [4] 钟波波,李宏,张永彬. 爆炸荷载作用下岩石动态裂纹扩展的数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(6): 825-831. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0825-07.
ZHONG B B, LI H, ZHANG Y B. Numerical simulation of dynamic cracks propagation of rock under blasting loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(6): 825-831. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0825-07.
- [5] 穆朝民,潘飞. 煤体在爆炸荷载和地应力耦合作用下裂纹扩展的数值模拟 [J]. *高压物理学报*, 2013, 27(3): 403-410. DOI: 10.11858/gywlyxb.2013.03.014.
MU C M, PAN F. Numerical study on the damage of the coal under blasting loads coupled with geostatic stress [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2013, 27(3): 403-410. DOI: 10.11858/gywlyxb.2013.03.014.
- [6] 徐向宇,姚邦华,魏建平,等. 煤层预裂爆破应力波传播规律及增透机理模拟研究 [J]. *爆破*, 2016, 33(2): 32-38. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2016.02.007.
XU X Y, YAO B H, WEI J P, et al. Numerical study of stress wave propagation behavior and permeability-increasing mechanism of pre-splitting blasting in coal seam [J]. *Blasting*, 2016, 33(2): 32-38. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2016.02.007.
- [7] LI M, ZHU Z M, LIU R F, et al. Study of the effect of empty holes on propagating cracks under blasting loads [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2018, 103: 186-194. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.01.043.
- [8] 刘瑞峰,朱哲明,李盟,等. 爆炸荷载下 I 型裂纹的起裂及扩展规律研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(2): 392-402.

- DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1126.
- LIU R F, ZHU Z M, LI M, et al. Initiation and propagation of mode I crack under blasting [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(2): 392–402. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1126.
- [9] SHI W Z, WU Y H, WU L. Quantitative analysis of the projectile impact on rock using infrared thermography [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(5): 990–1002. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.03.002.
- [10] DANIEL I M, ROWLANDS R E. On wave and fracture propagation in rock media [J]. *Experimental Mechanics*, 1975, 15(12): 449–457. DOI: 10.1007/BF02318359.
- [11] 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. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.2013.02.005.
- YANG L Y, YANG R S, XU P. Caustics method combined with laser & digital high-speed camera and its applications [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(2): 188–194. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.2013.02.005.
- [12] 杨仁树, 苏洪. 爆炸荷载下含预裂缝的裂纹扩展实验研究 [J]. *煤炭学报*, 2019, 44(2): 482–489. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.0110.
- YANG R S, SU H. Experimental study on crack propagation with pre-crack under explosion load [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(2): 482–489. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.0110.
- [13] 杨仁树, 左进京, 肖成龙, 等. 爆炸荷载作用下静裂纹对运动裂纹扩展影响的实验研究 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(13): 65–70. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.13.010.
- YANG R S, ZUO J J, XIAO C L, et al. Tests for interaction between static crack and dynamic one under explosion loading [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(13): 65–70. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.13.010.
- [14] SIVIOUR C R, GRANTHAM S G. High resolution optical measurements of specimen deformation in the split Hopkinson pressure bar [J]. *Journal of Photographic Science*, 2009, 57(6): 333–343. DOI: 10.1179/174313109X454792.
- [15] ZHANG Q B, ZHAO J. Determination of mechanical properties and full-field strain measurements of rock material under dynamic loads [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 60(8): 423–439. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2013.01.005.
- [16] 申海艇, 蒋招绣, 王贝壳, 等. 基于超高速相机的数字图像相关性全场应变分析在 SHTB 实验中的应用 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(1): 15–20. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0015-06.
- SHEN H T, JIANG Z X, WANG B K, et al. Full field strain measurement in split Hopkinson tension bar experiments by using ultra-high-speed camera with digital image correlation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(1): 15–20. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0015-06.
- [17] 徐振洋, 杨军, 郭连军. 爆炸聚能作用下混凝土试件劈裂的高速 3D DIC 实验 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(3): 400–406. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0400-07.
- XU Z Y, YANG J, GUO L J. Study of the splitting crack propagation morphology using high-speed 3D DIC [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(3): 400–406. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0400-07.
- [18] 杨立云, 张蓝月, 丁晨曦, 等. 超高速数字图像相关实验系统及其在爆炸研究中的应用 [J]. *科技导报*, 2018, 36(13): 58–64. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.13.008.
- YANG L Y, ZHANG L Y, DING C X, et al. Ultra high speed digital image correlation system and its application in blasting research [J]. *Science & Technology Review*, 2018, 36(13): 58–64. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.13.008.
- [19] ZHANG T Y, SUEN C Y. A Fast parallel algorithm for thinning digital patterns [J]. *Communications of the ACM*, 1984, 27(3): 236–239. DOI: 10.1145/357994.358023.
- [20] 齐金铎. 现代爆破理论 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 111–118.
- [21] 黄家蓉, 王幸, 吴飏, 等. 混凝土靶内爆炸应力波测量方法研究 [J]. *中国测试*, 2016, 42(10): 25–28. DOI: 10.11857/j.issn.1674-5124.2016.10.005.
- HUANG J R, WANG X, WU B, et al. Research on stress wave measurement method in concrete target in explosion [J]. *China Measurement and Testing Technology*, 2016, 42(10): 25–28. DOI: 10.11857/j.issn.1674-5124.2016.10.005.
- [22] 冯盼学, 陈何. 束状孔爆破应力场的超动态应变试验研究 [J]. *矿冶*, 2011, 20(3): 33–35, 71. DOI: 10.3969/j.issn.1005-7854.2011.03.008.
- FENG P X, CHEN H. Super dynamic strain experimental study on bundle-holes blasting stress field [J]. *Mining and Metallurgy*, 2011, 20(3): 33–35, 71. DOI: 10.3969/j.issn.1005-7854.2011.03.008.

- [23] HILLERBORG A, MODEER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. *Cement & Concrete Research*, 1976, 6(6): 773–781. DOI: 10.1016/0008-8846(76)90007-7.
- [24] ALAM S Y, SALIBA J, LOUKILI A. Fracture examination in concrete through combined digital image correlation and acoustic emission techniques [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 69: 232–242. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.044.
- [25] SKARZYNSKI L, SYROKA E, TEJCHMAN J. Measurements and calculations of the width of the fracture process zones on the surface of notched concrete beams [J]. *Strain*, 2009, 47(S1): 319–332. DOI: 10.1111/j.1475-1305.2008.00605.x.
- [26] WU Z M, RONG H, ZHENG J J, et al. An experimental investigation on the FPZ properties in concrete using digital image correlation technique [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, 78(17): 2978–2990. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2011.08.016.
- [27] SWADDIWUDHIPONG S, LU H R, WEE T H. Direct tension test and tensile strain capacity of concrete at early age [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(12): 2077–2084. DOI: 10.1016/S0008-8846(03)00231-X.
- [28] 赵艳华. 混凝土断裂过程中的能量分析研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2002: 55–60.

(责任编辑 曾月蓉)