DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0400-07

爆炸聚能作用下混凝土试件劈裂的高速 3D DIC 实验*

徐振洋[1],杨 军[2],郭连军[1]

(1.辽宁科技大学矿业工程学院,辽宁 鞍山 114051;
2.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要:为探寻非钻孔条件下露天爆破大块二次破碎形态的控制方法,应用线性聚能射流对圆柱混凝土模型试件进行侵彻实验,使用 High-speed 3D DIC(高速三维数字图像相关方法)方法分析试件劈裂发展过程的全场三维形变特征。研究结果表明,数据分析区内劈裂裂纹扩展速度在 4 个区间内呈阶梯式变化趋势,峰值速度为 235.52 m/s,平均速度为 140.89 m/s;线性聚能射流侵彻对劈裂裂纹扩展有明显导向作用,应力集中作用使得劈裂裂纹围绕线性射流侵彻对称轴扩展,扩展方向变化幅度较小;在劈裂裂纹扩展速度突变的 3 个时刻,劈裂裂纹路径产生了 3 处明显拐点,在拐点处伴随有支裂纹的产生,支裂纹的扩展距离均未超过5 cm;主应变集中带形状及分布位置决定了裂纹扩展路径及趋势,拉应变集中先于裂纹出现,试件呈现准静态劈裂形态,劈裂面平整度较高。

关键词:爆炸力学;裂纹;高速 3D DIC;混凝土;速度;应变

中图分类号:O385;TD235.1 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

二次破碎作业在爆破工程中占有重要地位,特别是在抢险救灾中,利用线性聚能射流的侵彻实现大块劈裂形态的控制,对提高工作效率,控制爆破危害影响范围具有实际意义。根据相似理论进行模型实验,对于圆柱形混凝土试件,当装药线性长度为底面直径的 1/10、侵彻深度小于高度的 1/4 时,便可达到控制劈裂形态的目的。搭建高速 3D DIC 实验测试平台,开展爆炸聚能作用下劈裂实验的非接触式全场应变测量。

1 线性聚能射流劈裂试件

1.1 劈裂原理

利用线性射流侵彻圆柱形混凝土试件,线性射流侵彻轴向长度的优势使得侵彻轴平面产生拉应力场集中,并在侵彻裂口的两端形成数倍于平均拉应力的集中强度,应力集中作用将对试件劈裂裂纹扩展方向产生明显的导向作用,最终使试件均匀地劈裂为两部分。

图 1(a)为实验示意图,图 1(b)为试件劈裂效果图。线性装药长度与楔形罩宽度之比大于 1 时,可使侵彻轴向端点比径向端点形成强度更高的应力集中效应[1-3]。此时将形成沿侵彻轴向的单个主平面劈裂,劈裂裂纹较少分叉,表现出明显的定向劈裂作用,以此实现对劈裂形态的控制。

1.2 聚能装药参数

根据经验公式设计线性聚能装药参数,采用顶面中心起爆方式[4-5]。使用 0.2 mm 紫铜板作为楔形罩材料,楔角为 45°,楔形罩口部宽 35 mm、轴向长度 30 mm,楔形罩质量 2.64 g;装填炸药使用 45.3 g 黑索金,装药高度 30 mm,炸高选为 40 mm。

混凝土试件选用底面直径 30 cm、高 30 cm 的圆柱。参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》配

* **收稿日期**:2014-10-24; **修回日期**:2015-04-08
基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51504129)
第一作者:徐振洋(1982—),男,博士,讲师,xuzhenyang10@foxmail.com。

合比(质量)为：水：水泥：沙子：石子＝0.38：1：1.11：2.72，强度为 40 MPa，养护 28 d，可达到标准强度的 90%。

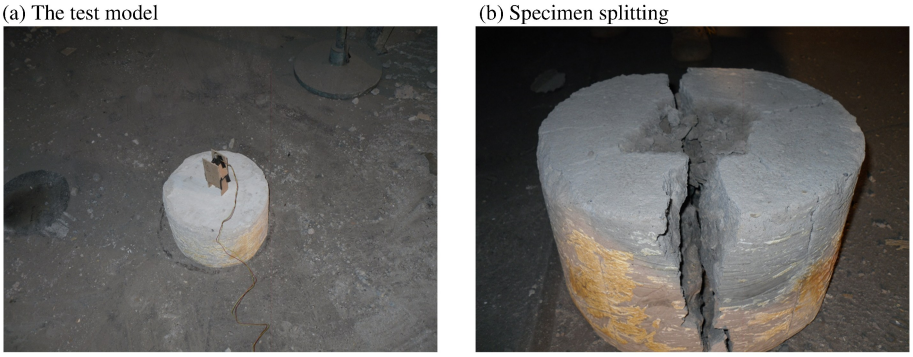

图 1 实验照片

Fig. 1 Pictures of the test

2 高速 3D DIC 实验设计

2.1 高速 3D DIC 原理

高速 3D DIC 非接触式全场形变测量系统，依靠两台摆放呈一定夹角的高速摄影仪，对试件同一部位进行拍摄，通过每幅图像中的散斑的形变信息获得试件表面的三维坐标(X,Y,Z)，从而得到被测质点形变量在各方向的分量(U,V,W)，并通过质点三维位移数据，可以计算求出试件裂纹扩展速度以及全场应变数据[6-8]。

2.2 实验设计

实验在爆炸实验室内进行，两台高速摄影仪夹角为 12°，试件距离摄影仪镜头 2.5 m，摄影仪镜头与试件拍摄面同水平放置。使用 2 台 1 kW 照明灯距离 1 m 处正面照射试件拍摄表面，测试系统见图 2。

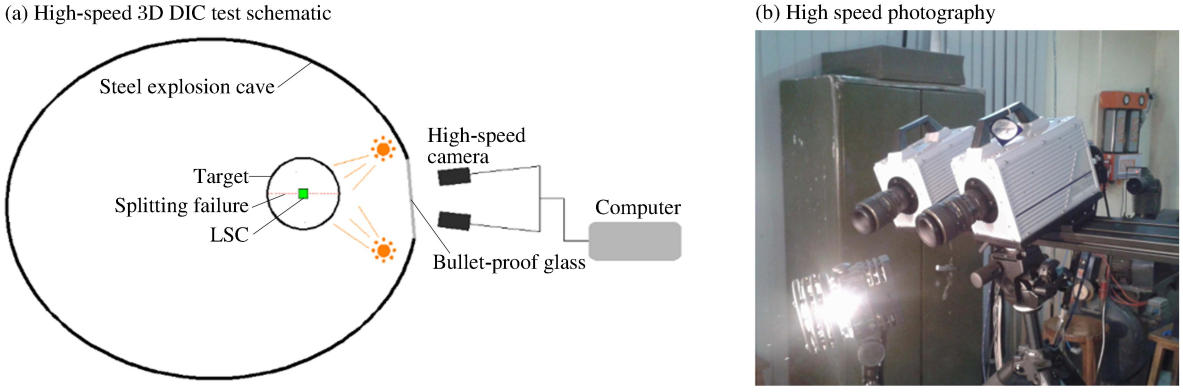

图 2 测试系统及设备

Fig. 2 Test systems and equipments

2.3 仪器参数设置

为使爆炸强光及爆轰产物不影响拍摄效果，用胶皮包裹试件，在试件侧面预留出 200 mm(宽)×250 mm(高)的范围供拍摄，并使用钢管对聚能装药部分进行遮盖。需要注意的是，由于拍摄速度选取为 5×10^4 s^{-1}，在高速拍摄的条件下，高速摄影仪拍摄分辨率仅为 120 mm(高)×100 mm(宽)，所以为了保证能够获取劈裂裂纹扩展图像，必须要保证实验设计，以确定劈裂裂纹能够穿过拍摄视场。以侵彻轴平面为对称面，在试件被测表面均匀地喷涂散斑，利用标定板对测试精度调整后进行实验。图 3(a)为仪器标定图，图 3(b)为试件防护及拍摄区域。

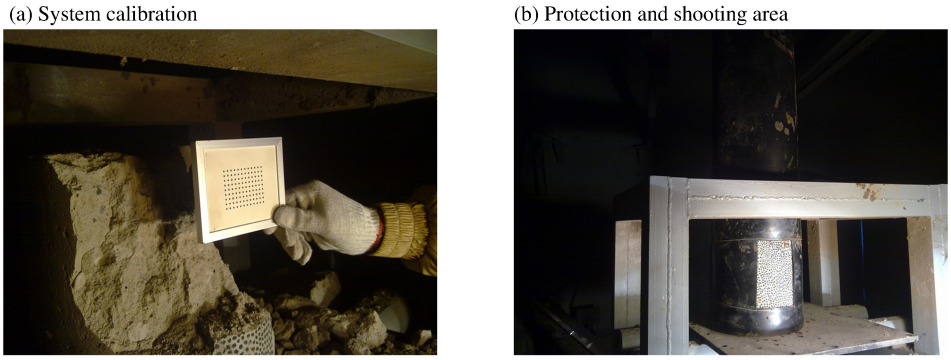

图 3 标定及散斑图

Fig. 3 Calibration and speckle

3 裂纹扩展分析

3.1 数据三维重构

高速 3D DIC 是基于散斑动态分析的方法，在断裂或者破碎的部位数据会丢失或者失真，断裂之前数据的可靠性是可以保证的。在拍摄视场中，选取红色区域为数据分析区域，重构后三维空间参数为 90 mm(高 Y)×70 mm(宽 X)×52 mm(厚 Z)。图 4(a)红色区域为数据分析区域，图 4(b)为分析区域的三维重构。

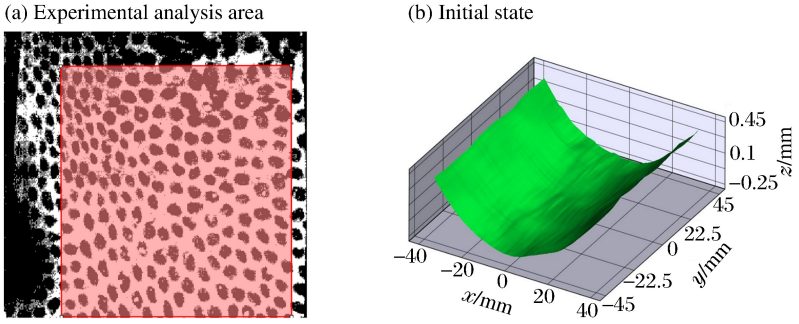

图 4 数据三维重构

Fig. 4 Three-dimensional reconstruction

3.2 劈裂裂纹扩展速度

以 0.04 ms 为间隔，选取裂纹尖端测点 16 个，分别定义为测点 c_1 ～ c_{16} ，起始点时刻为 3.76 ms，结束点时刻为 4.36 ms，如图 5 所示。

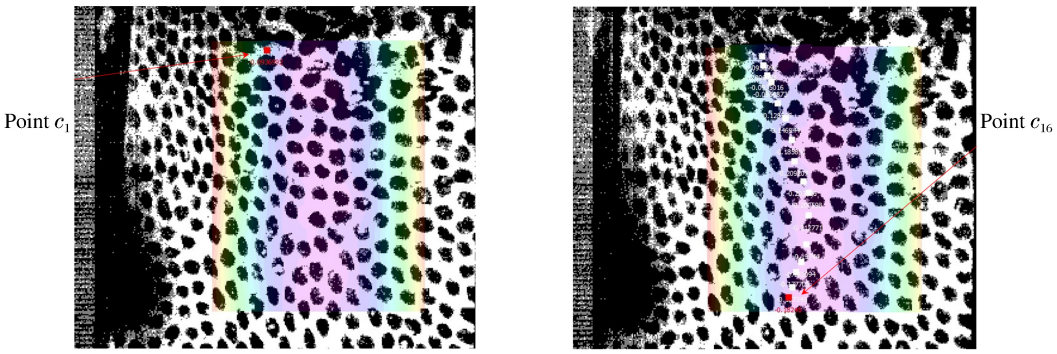

图 5 裂纹尖端观测点

Fig. 5 Crack tip measuring points

记裂纹尖端在时刻 t_i 的坐标为(x_i，y_i，z_i)，定义时刻 3.8 ms 时刻为 t_1，4.36 ms 时刻为 t_{16}。则在时程 $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ 内，可近似将裂纹扩展速度 v_i 视为裂纹扩展至测点 c_i 时的瞬时速度，每个时间间隔内将实际裂纹扩展路径近似为弧形。按照图 4(b)中坐标系，将试件表面的裂纹投影至 X-Y 平面，首先求得裂纹在在 X-Y 平面的投影弧长，而后通过裂纹与 X-Y 平面夹角计算获得裂纹在每个时间间隔内的实际扩展距离。

裂纹尖端位移为

$$|\vec{S}_i| = \frac{L}{\cos\alpha} = \frac{r2\theta}{\cos\alpha} = \frac{2r[\arcsin(c/2r)]}{\cos\alpha} \tag{1}$$

式中：θ 为裂纹在 X-Y 投影的圆截面半圆心角弧度，α 为每个时间间隔内裂纹所在的裂纹与 X-Z 平面的夹角，L 为裂纹在 X-Y 投影的圆截面弧长，c 为裂纹在 X-Y 投影的圆截面弦长，r =150 mm，为试件底面半径。

式中：

$$c = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} \tag{2}$$

$$\alpha = \arctan\left|\frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}\right| \tag{3}$$

裂纹在 Δt 内的速度为

$$v_i = \frac{\partial S_i}{\partial t} \tag{4}$$

裂纹扩展平均速度为

$$v_{\text{avg}} = \sum_{i=2} v_i \Big/ (i-1) \tag{5}$$

计算可得，裂纹扩展平均速度为 140.89 m/s。

如图 6 所示，裂纹扩展速度存在着阶梯式的波动特征，4.2 ms 时刻，速度达到峰值 235.52 m/s，接近于平均速度值的 3 倍。裂纹扩展至试件的中部时，由于中部属于剪应力集中部位，裂纹两侧的错位会造成在此开裂速度突然加速，峰值速度正式产生于这个时期；裂纹扩展后期，由于侵彻已经停止，试件无法再从外界获得裂纹扩展动力，此时裂纹的扩展依靠试件内应力波的作用，裂纹扩展速度将会迅速降低。将裂纹扩展速度分为 4 个阶段：3.76～3.88 ms内，速度先升高后降低，最高速度低于 45 m/s；3.89～4.16 ms 内，速度迅速上升到 195 m/s 左右的水平，在接近 0.2 ms 的时间内，扩展速度都较为平稳，属于裂纹的稳定扩展期；4.17～4.28 ms 内，速度达到整条曲线上的极大值，经过极大值后，便迅速衰减至 34.27 m/s，而后又呈现波动性的变化；4.29～4.36 ms 内，裂纹扩展平均速度低于前一个阶段内的平均速度。

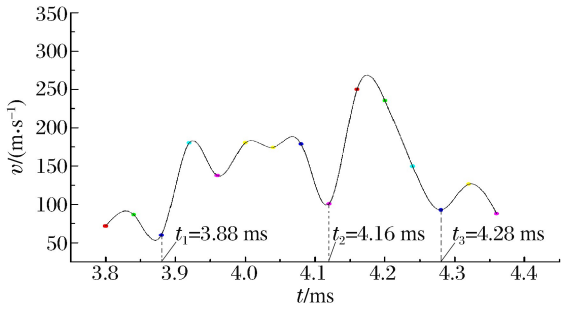

图 6 裂纹扩展速度曲线

Fig. 6 Crack propagation velocities

裂纹扩展动能来源于弹性能释放率 G 超过阻力 R 的部分，而阻力 R 的变化量相当小，从而裂纹扩展速度取决于裂纹尖端应力强度因子的大小。裂纹扩展速度的突然增大必然使弹性能量释放率瞬间增大，消耗了系统在断裂之前储存的弹性能，使剩余动能突然减小[8]。在裂纹传播过程中，局部的过度破碎产生了比裂纹面大得多的新表面，当破碎达到一定程度时，裂纹扩展必定会停止[9]。如果侵彻输入了足够的能量，在侵彻停止后，裂纹扩展速度仍得以保持一段时间内，那么在止裂前，裂纹便会贯穿试件[10-11]。但是，侵彻能量过高又容易造成劈裂初期裂纹的高速扩展，裂纹更易分叉[12]，可见，对劈裂方向的控制研究更应关注侵彻作用的初期。

3.3 裂纹扩展形态特征

读取各时刻点裂纹尖端的三维坐标，以 C++语言绘制裂纹发展三维动态图，如图 7 所示。试件呈现张开型断裂特征，裂纹路径接近于 S 型，裂纹扩展方向沿垂直负方向(Y 轴负方向)的变动角度被控制在±20°内。

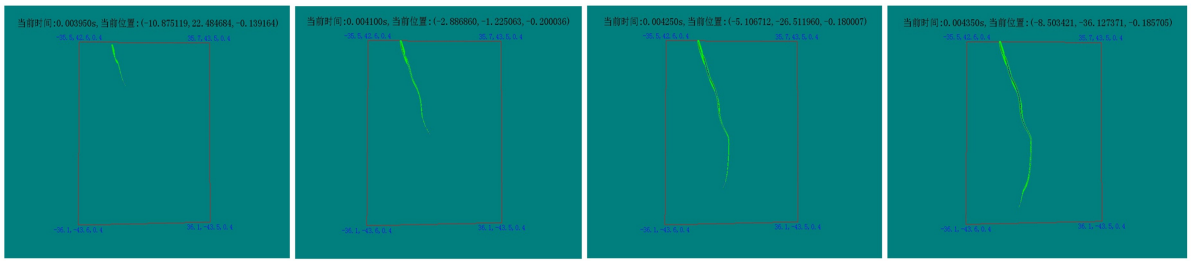

图 7 裂纹扩展动态图

Fig. 7 Dynamic of crack propagation

裂纹扩展速度受到侵彻输入试件能量与试件原始裂隙、损伤及裂纹尖端前方材料累损伤的共同影响[13]。混凝土材料在冲击作用下，在自由面附近合成为净拉应力作用，使试件表面产生拉伸损伤[14]。

如图 8 所示，损伤破坏在劈裂裂纹近区及试件上部表现更为明显，劈裂裂纹尖端出现 3 处明显的局部破碎，破碎改变了裂纹尖端的局部受力规律，致使裂纹扩展方向出现明显的偏移，裂纹扩展速度也发生了明显的变化。伴随着局部破碎的出现，3 条支裂纹也由此处开始扩展，支裂纹的扩展路径均较短，且各自独立发展，未再次出现分叉。应力集中分布规律对裂纹扩展路径起到了决定性作用，缺陷裂纹的竞争中始终无法占主导地位[15]，劈裂裂纹得以较为稳定地扩展，体现了线性射流侵彻对劈裂形态的控制作用。

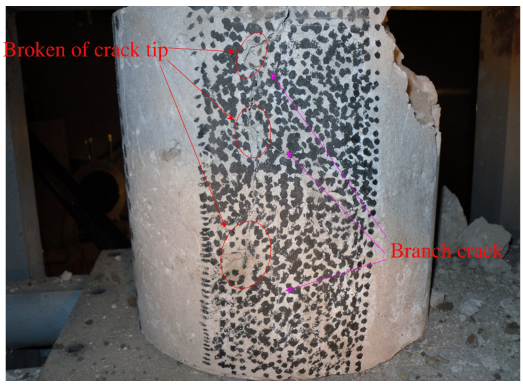

图 8 损伤破裂形貌

Fig. 8 Damage rupture morphology

3.4 最大主应变场

使用非接触动态测量方法可获得拍摄区域内的全场应变数据，并且完全不干扰实验过程，测量数据准确可靠，操作简便性也大大提高，对位移数据进行计算，可得到被测物体表面的全场应变。在计算区域内，将应变集中的 3 个区域分别标示为 1 区、2 区、3 区，如图 9 所示，图中红色部位表示应变值最大。

如图 9(a)所示，3.8 ms 时刻，裂纹首先进入 2 区，2 区的形状随时间不断在拉长，逐渐向下发展形成应变集中带。1 区中存在 2 处椭圆形的应变集中区，对比实验照片便可发现，此处正是试件右侧产生碎块的部位，可见通过最大主应变变化规律可较为准确地识别试件的破碎特征。如图 9(b)所示，至 3.9 ms时刻，1 区的 2 个椭圆形已基本消失不见。此时，1 区形成了一个强度稍弱的横向应变集中带，增大了此部位内产生横向断裂的可能性。2 区与 3 区形成了相连的应变集中带，且垂直于 1 区的应变集中带。2 区为此两条集中带的交汇处部位，应变值最大，劈裂裂纹首先在此处出现。如图 9(c)～(d)所示，随着劈裂裂纹的发展，2 区与 3 区中独立出现红色应变集中区逐渐伸长并连接，形成裂纹扩展路径上的应变集中带。

在分析中发现，当裂纹仅出现在 2 区时，3 区应变集中已经形成，因此 3 区形状的变化可视为试件内部劈裂发展形态的外部表现[16]。在宏观破坏现象产生前，侵彻作用已使试件的变形表现出明显规律，且拉应力集中分布规律决定了试件的破坏形态。由射流侵彻裂口出发的劈裂裂纹持续扩展，将在试件内部引起主劈裂面的扩展。对于试件侧面劈裂裂纹扩展路径上的某一“预定”部位，试件内部劈裂裂纹尖端将先于表面裂纹到达，当表面裂纹扩展至此处时，两者将交汇并共同扩展。

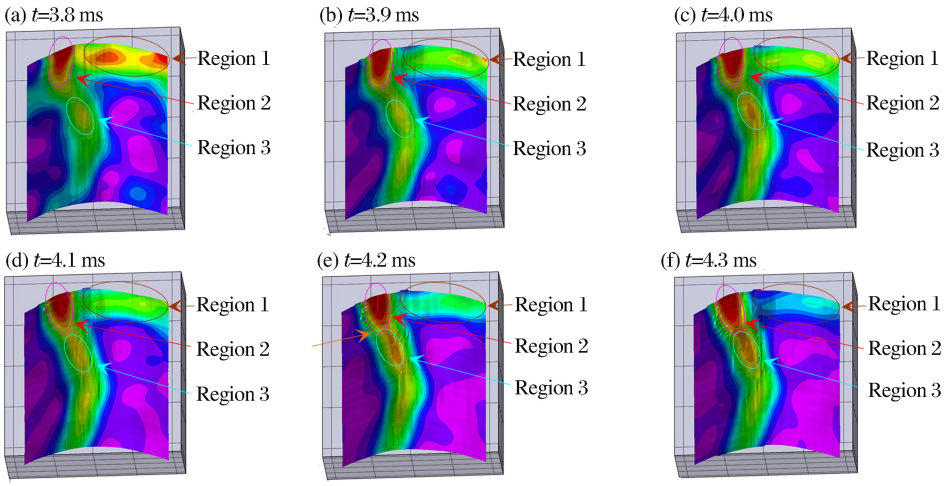

图 9　最大主应变

Fig. 9　Maximum principal strain field

4　结　论

使用高速 3D DIC 方法对线性射流侵彻作用下混凝土试件的劈裂实验进行非接触动态全场形变测量，得到了可靠的测试数据，并研究了应变场分布特征与劈裂裂纹扩展形态之间的关系，得到以下结论：(1)劈裂裂纹扩展速度峰值为 235.52 m/s，平均速度为 140.89 m/s，扩展速度突变会引起裂纹扩展方向的小角度偏转。在劈裂裂纹扩展速度突变的 3 个时刻，劈裂裂纹路径产生了 3 处明显拐点，在拐点处伴随有支裂纹的产生，支裂纹的扩展距离均未超过 5 cm。(2)线性射流对劈裂扩展方向具有较强的引导性，主应变集中带的形状及分布决定了劈裂扩展路径，劈裂裂纹始终在拉应变集中带内扩展，损伤多出现在原始缺陷处，损伤裂纹对劈裂扩展方向影响较小。(3)主应变集中带的形成出现在宏观裂纹产生之前，试件呈现与准静态劈裂类似的形态，被测表面的应变率在 10^2 数量级之下，低应变率可有效控制试件的破损程度，劈裂面与劈裂后的试件上下地面均较为平整。

参考文献：

[1]　钱伟长. 穿甲力学[M]. 北京：国防工业出版社，1984.

[2]　Alekseevskii V P. Penetration of a rod into a target at high velocity[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1966,2(2):63-66.

[3]　Sternberg J. Material properties determining the resistance of ceramics to high velocity penetration[J]. Journal of Applied Physics, 1989,65(9):3417-3424.

[4]　威廉·普·沃尔特斯，乔纳斯·埃·朱卡斯. 成型装药原理及其应用[M]. 王树魁，贝静芬，译. 北京：兵器工业出版社，1992.

[5]　肖强强，黄正祥，祖旭东. 双材质复合射流对混凝土的侵彻[J]. 爆炸与冲击，2014,34(4):457-463.
Xiao Qiangqiang, Huang Zhengxiang, Zu Xudong. Penetration of jacketed jet into concret[J]. Explosion and Shock Waves, 2014,34(4):457-463.

[6]　Kirugulige M S, Tippur H V. Measurement of fracture parameters for a mixed-mode crack driven by stress waves using image correlation technique and high-speed digital hotography[J]. Strain, 2009,45(2):108-122.

[7]　Chevalier L, Calloch S, Hild F, et al. Digital image correlation used to analyze the multiaxial behavior of rubber-like materials[J]. European Journal of Mechanics－A: Solids, 2001,20(2):169-187.

[8]　Erdogan F, Sih G C. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear[J]. Journal of Basic Engineering, 1963,85(4):519-525.

[9]　岳中文，杨仁树，郭东明，等. 爆炸应力波作用下缺陷介质裂纹扩展的动态分析[J]. 岩土力学，2009,30(4):949-954.

Yue Zhongwen, Yang Renshu, Guo Dongming, et al. Dynamic analysis of crack propagation in media containing flaws under the explosive stress wave[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014,35(8):2048-2414.

[10] 肖正学,张志呈,郭学彬. 断裂控制爆破裂纹发展规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(4):546-549.
Xiao Zhengxue, Zhang Zhicheng, Guo Xuebin. Research on crack developing law of rock fracture controlled blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002,21(4):546-549.

[11] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 北京:冶金工业出版社,2002.

[12] 王汉军,黄风雷,张庆明. 岩石定向断裂爆破的力学分析及参数研究[J]. 煤炭学报,2003,28(4):399-402.
Wang Hanjun, Huang Fenglei, Zhang Qingming. Mechanics effect analysis and parameters study on borehole directional fracture blasting[J]. Journal of China Coal Society, 2003,28(4):309-402.

[13] Chao Y J, Sutton M A, Peters W H, et al. Measurement of three-dimensional displacements in deformable bodies by digital image processing[C]// 1989 SEM Spring Conference on Experimental Mechanics. Cambridge, 1989: 139-146.

[14] Kolsky H, Shearman A C. Investigation of fractures produced by transient stress waves[J]. Research, 1949,2(8):384-389.

[15] 杨建华,卢文波,胡英国,等. 隧洞开挖重复爆炸荷载作用下围岩累积损伤特性[J]. 岩土力学,2014,35(2):512-518.
Yang Jianhua, Lu Wenbo, Hu Yingguo, et al. Accumulated damage in surrounding rocks due to repeated blasting loads during blasting excavation of tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014,35(2):512-518.

[16] 严成增,郑宏,孙冠华,等. 基于数字图像技术的岩土材料有限元-离散元分析[J]. 岩土力学,2014,35(8):2048-2414.
Yan Chengzeng, Zheng Hong, Sun Guanhua, et al. FDEM of geomaterials based on digital image technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014,35(8):2048-2414.

Study of the splitting crack propagation morphology using high-speed 3D DIC

Xu Zhenyang[1], Yang Jun[2], Guo Lianjun[1]

(1. *College of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan* 114051, *Liaoning, China*;
2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: To explore a method for control over the boulders splitting morphology, cylindrical concrete specimens were penetrated by a linear-shaped charge, the splitting cracks' propagation and development were photographed and the splitting development process of their 3D deformation characteristics were analyzed using high-speed 3D DIC. The results show that the velocity of the crack propagation within the data analysis region exhibits a tendency for a step-by-step increase. The peak velocity and the average velocity are respectively 235.52 m/s and 140.89 m/s. The impact of the linear shaped-charge jet plays a significant role in determining the splitting of the target so that the cracks of the target propagated symmetrically downward in an s-shape along the axis, and on its path the crack showed three obvious inflection points, where branch cracks were produced whose propagation distance was below 5 cm. The shape and location of the main strain concentration determines the crack propagation trend and path, and the tensile strain concentration occurs before the crack appears. The specimen exhibits a quasi-static splitting and the cracks have a fairly even distribution.

Key words: mechanics of explosion; crack; High-speed DIC-3D; concrete; velocity; strain

(责任编辑 曾月蓉)