

文章编号: 1673-3363-(2015)05-0834-06

# 冲击载荷下岩石裂纹动态断裂参数研究

宋义敏<sup>1</sup>, 杨小彬<sup>2</sup>, 杨晟萱<sup>1</sup>, 王乾<sup>1</sup>

(1. 北方工业大学土木工程学院, 北京 100144; 2. 中国矿业大学(北京)资源与环境工程学院, 北京 100083)

**摘要** 开展含 I 型预制裂纹的花岗岩矩形试件在冲击载荷作用下的动态断裂参数的试验研究。以自行研制的能实现中低冲击加载速度的可调速落锤冲击试验机进行加载, 通过高速相机搭建数据采集系统进行数据采集, 采用数字散斑相关方法对试验图像数据进行分析。对岩石 I 型裂纹在冲击载荷作用下的位移场演化特征、裂纹动态断裂的裂尖张开位移、裂纹扩展速度、动态断裂全过程中的裂尖应力强度因子等进行了定量研究。试验结果表明: 落锤与岩石试件接触后, 裂尖的应力强度因子呈增加趋势, 当达到某一量值时, 预制裂纹开裂, 后续裂纹扩展的应力强度因子大于预制裂纹初始扩展的应力强度因子。

**关键词** 数字散斑相关方法; 应力强度因子; 裂纹扩展速度; 岩石断裂; 冲击载荷

**中图分类号** TD 45 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.05.021

## The research of rock dynamic fracture parameter under the action of impact load

SONG Yimin<sup>1</sup>, YANG Xiaobin<sup>2</sup>, YANG Shengxuan<sup>1</sup>, WANG Qian<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract** An experimental research of rock dynamic fracture parameter under the action of impact load with the rectangular granite specimen with pre-cracks of Type I has been conducted. The test material is loaded by self-developed adjustable speed drop hammer impact tester which can realize low & medium impact loading speed; the data is recorded by data collecting system set up by high-speed cameras, and the data of specimen surface speckles images in the dynamic fracture process of crack is analyzed by using digital speckle correlation method. The quantitative results of displacement field evolution, the dynamic fracture of crack tip opening displacement, the speed of the crack growth and stress intensity factor of the dynamic fracture have been obtained. The experimental results have shown that the crack tip stress intensity factor increases after drop hammer contacts with the rock specimen, and when the stress intensity factor reaches a certain value, the prefabricated crack initiation and subsequent stress intensity factor of crack initiation is greater than the initial crack stress intensity factor.

**Key words** digital speckle correlation method; stress intensity factor; crack propagation speed; the rock fracture; impact load

由于岩石材料的复杂性以及冲击荷载的惯性效应, 岩石在冲击荷载作用下的力学性能与静荷载

收稿日期: 2013-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474013); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAK09B06)

作者简介: 宋义敏(1972—), 男, 辽宁省东港市人, 博士, 副教授, 从事岩石力学理论与试验方面的研究。

E-mail: ssyymmok@sina.com

Tel: 15201334573

作用时存在较大差异。通过开展冲击载荷下岩石裂纹动态断裂试验工作, 研究岩石动态断裂参数及动态断裂特征, 揭示冲击载荷作用下岩石破坏机制, 防止工程中由于冲击造成岩石破坏导致灾难性事故发生, 指导工程实践具重要理论与实践意义<sup>[1-4]</sup>。

岩石材料裂纹动态断裂一直是岩石力学研究的热点问题之一, 如: Costin<sup>[5]</sup>, Wu<sup>[6]</sup>和 Bazant<sup>[7]</sup>等在快速加载试验机上用三点弯的方法测量了油页岩、大理岩、花岗岩以及石灰岩的断裂韧性; Tang 和 Xu<sup>[8]</sup>用霍普金森杆冲击试验机进行了三点弯试验, 研究岩石动态断裂韧性; Zhang 等<sup>[9]</sup>用短杆试件分别测量了大理岩和辉长岩的静态和动态断裂韧性, 并研究了岩石断裂过程中能量分配情况; 胡柳青<sup>[10]</sup>开展了岩石冲击载荷下的动态断裂试验研究, 研究了冲击能量、岩石损伤、块度之间的关系。总结以上关于岩石动态断裂的研究发现: 1) 对岩石裂纹动态扩展过程的试验观测没有从全场测量的角度去研究。前人的研究中一般只将试件加载至破坏, 并用简单的模型计算得到应力强度因子的参量, 并没有完整地观测裂纹的扩展过程, 尤其没有定量地观测和分析裂纹扩展过程中全场的力学响应(如变形场), 这样既不利于从机理的角度深入分析岩石动态断裂的过程, 又不利于一些新的描述岩石动态断裂的准则和模型的提出。2) 前人关于岩石动态断裂的研究大都集中在高加载速率下(如用霍普金森杆)的试验研究, 而对中低加载速率下裂纹的动态扩展较少关注。实际工程中, 除了少数一些特殊领域(如爆炸环境)的岩石动态断裂问题, 大多数情况下岩石动态断裂问题的特点是中低加载速率, 裂纹高速扩展。事实上, 即使在准静态加载下, 岩石加载后期即将失稳时, 其裂纹的扩展也是高速扩展。目前, 关于中低加载速率下岩石裂纹动态扩展的试验研究、尤其是对裂纹扩展过程中全场的定量观测试验研究还鲜见报道。

本文开展含 I 型预制裂纹的花岗岩矩形试件在冲击载荷作用下的动态断裂参数的试验研究。以自行研制的能实现中低冲击加载速度的可调速落锤冲击试验机进行加载, 通过高速相机搭建数据采集系统进行数据采集, 采用数字散斑相关方法对试验图像数据进行分析; 并对岩石 I 型裂纹在冲击载荷作用下的位移场演化特征、裂纹动态断裂的裂尖张开位移、裂纹扩展速度、动态断裂全过程中的裂尖应力强度因子等进行定量研究。

## 1 试验系统及试验方法

### 1.1 试验系统

#### 1) 试验加载系统

图 1 为自行设计研制的调速落锤冲击试验机。试验机的加载系统包括 2 个主要部分, 一为加载调速装置, 工作原理如图 1 所示。落锤冲击速度可以通过弹簧的根数和落锤提升高度进行调整, 从自由落锤冲击到 5 组弹簧的组合使试验机的冲击速度可调范围为 0~10 m/s。试验前, 将落锤提升到试验机顶部, 使弹簧组拉伸。试验开始, 落锤下落, 弹簧组恢复变形, 落锤在重力和弹簧恢复力的共同作用下, 对试件进行冲击加载。落锤采用标准冲击试验机的落锤装置, 整个落锤结构的质量为 3.2 kg。二为加载支撑装置, 如图 2 所示, 加载支撑装置的下部支撑采用标准三点弯的支撑装置。

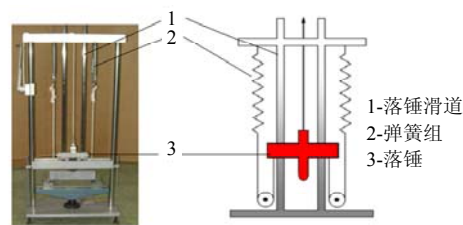


图 1 可调速落锤冲击试验机

Fig.1 Adjustable speed drop hammer impact experimental equipment



图 2 冲击加载装置

Fig.2 Impact loading device

试验机的测试系统主要包括落锤冲击速度测试和岩石试件变形破坏测试两部分内容。落锤冲击速度测试是通过在落锤的尖端用漆标注一白点, 在试验中根据散斑图中白点的位移对冲击速度进行测试。岩石试件变形破坏通过数字散斑相关方法进行分析, 同时配合高速相机拍摄试件整个冲击破坏过程。

#### 2) 试验数据采集系统

在岩石动态断裂试验的数据采集系统中, 一是数据采集速度的要求。高速相机采集岩石动态断裂

的整个变形破坏过程的散斑图像时,在保证测量要求的视场范围和图像清晰条件下,尽量采用高的数据采集速度,以便捕捉动态断裂演化过程中更详细的信息。二是高速采集系统的触发,即能准确记录到岩石动态断裂开始时刻。高速相机的触发采用自行研制的光电触发系统,其触发方式为前触发。光电触发系统包括了激光头和光敏电阻 2 个感应部件,将激光头和光敏电阻分别放置在冲击试验机的两侧。在试验初始时刻,光敏电阻接收激光的照射,处于闭路状态;当落锤下落到与试件表面距离为 10 mm 时,落锤遮挡住激光束,使得光敏电阻处于开路状态时,产生一个阶跃信号,信号被接入到比较器芯片的输入端,当达到比较器设定的阈值时,比较器产生一个标准的 TTL 脉冲电压,从而触发高速相机开始记录试验散斑图像。试验数据采集系统如图 3 所示。

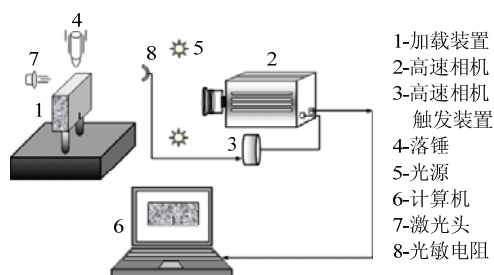


图 3 试验数据采集系统示意图

Fig.3 The schematic diagram of experiment data acquisition system

将高速相机采集的岩石动态断裂试验散斑图像进行数字散斑相关方法分析<sup>[11-12]</sup>,得到试验各个时刻试件表面位移场,并对岩石动态断裂的裂纹扩展历史、裂纹尖端张开位移以及应力强度因子进行定量分析。

## 1.2 试验过程

本文岩石动态断裂试验选用一种中粒花岗岩为试件。将岩石材料加工成断面为 400 mm×50 mm、高 100 mm 的试件,预制裂纹长 10 mm、宽 2 mm。

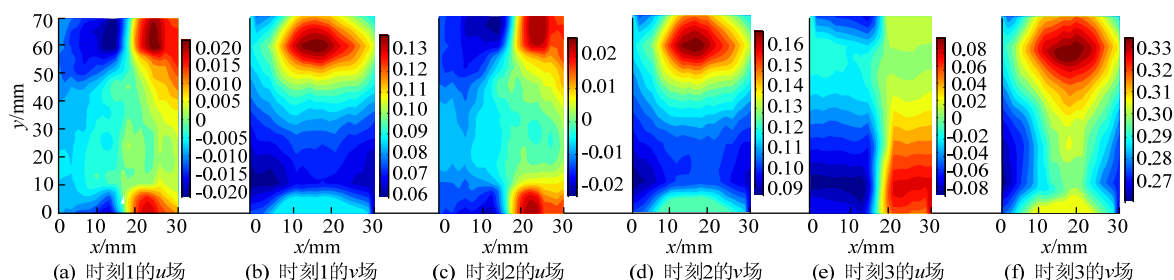
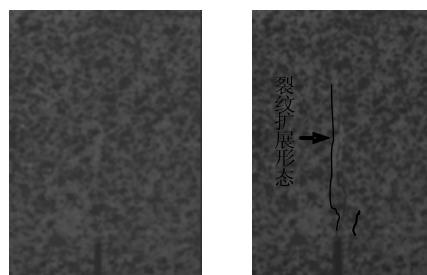


图 5 裂纹扩展位移场演化 (mm)

Fig.5 The displacement field of crack extension

白光光源照射试件表面,相机与光源光线近同轴布置,相机连接计算机图像处理系统及显示器。调整相机得到观察视场范围的清晰散斑场,视场包含的试件区域为 100 mm×50 mm,图像分辨率为 0.38 mm/pixel,试验中的高速相机图像采集速度为  $1 \times 10^5$  帧/s,记录了岩石试件从预制裂纹起裂、扩展到最终断裂的全过程。在试验过程中选取 100 张有效散斑图像进行保存,对所采集的散斑图像进行相关计算得到岩石试件变形过程中相应时刻的位移场。

图 4 给出了高速相机采集到的岩石试件动态断裂过程的散斑图像。其中图 4a 为落锤与试件接触时刻散斑场,当落锤与岩石试件的上端接触后,对比连续的 2 帧散斑图像,可以发现在接触端的灰度发生了明显的变化,并且灰度变化的位置不断向下移动,表明冲击波从接触端面向外传播。当落锤与试件接触 90  $\mu$ s 后,岩石预制裂纹的尖端出现一裂纹,预制裂纹开始起裂。试验中发现,岩石类脆性材料的冲击破坏过程速度非常快,从预制裂纹起裂到裂纹完全穿透试件的整个过程所用时间约为 60  $\mu$ s。图 4b 为岩石试件裂纹扩展形态散斑图像,图中清晰地表现了裂纹的整体张开。



(a) 落锤与岩石试件接触 (b) 岩石试件裂纹扩展形态

图 4 岩石试件动态断裂图

Fig.4 Evolution of dynamic fracture of rock specimen

由散斑图像计算得出的位移场对岩石动态断裂演化过程进行叙述。图 5 为岩石动态断裂 3 个时刻的位移场。

时刻1为落锤与岩石试件上表面发生接触后80  $\mu\text{s}$ , 没有发生裂纹扩展, 试件  $u$ ,  $v$  场如图 5a, b 所示。时刻2与时刻1相差10  $\mu\text{s}$ , 此时预制裂纹已经扩展, 沿  $v$  场方向裂纹扩展距离为6.84 mm, 试件  $u$ ,  $v$  场如图 5c, d 所示。时刻3为岩石试件裂纹扩展50  $\mu\text{s}$ , 沿  $v$  场方向裂纹扩展距离达到60.42 mm, 试件  $u$ ,  $v$  场如图 5e, f 所示。

## 2 试验结果分析

### 2.1 裂尖尖端扩展过程

在岩石动态断裂试验采集图像的数字散斑相关方法分析基础上, 通过加载过程中裂纹扩展速度和裂纹扩展距离的变化规律对岩石裂纹尖端扩展历史进行研究。图6给出裂纹扩展距离与裂纹扩展速度的演化曲线。沿  $v$  方向的预制裂纹尖端扩展距离依次为6.84, 22.04, 39.14, 49.40, 60.42 mm及裂纹扩展到试件边界。裂纹扩展距离曲线近似呈线性。而裂纹扩展速度体现波动增加的趋势, 在试验以4.5 m/s的冲击速度加载条件下, 裂纹扩展速度最大值达到2356 m/s, 平均速度约为1300 m/s。

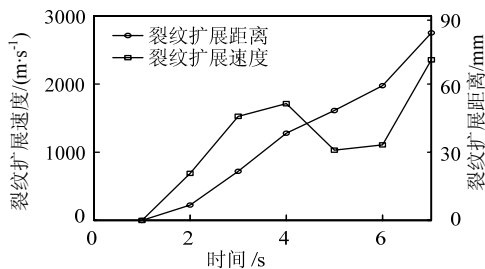


图6 岩石裂纹扩展历史

Fig.6 Rock crack propagation process

### 2.2 裂尖张开位移测量

根据分析得到的岩石动态断裂过程的位移场演化结果, 对动态断裂的裂尖张开位移进行研究。如图7a所示, 每次裂纹扩展过程中, 在裂纹尖端(图中数字1~6依次代表裂尖1、裂尖2, ..., 裂尖6)的两侧分别对称地选取5对像素点(图中矩形区域内), 用它们的位移分量取平均后表示裂纹尖端位移分量  $u$  和  $v$  值。用裂尖尖端两侧的  $u$  向位移分量的差值表示裂纹尖端张开位移, 将得到的数据绘制成曲线。

图8表示加载过程中裂纹张开位移演化曲线。曲线分别代表裂纹面上6个时刻的裂尖位置对应的张开位移随冲击载荷作用的变化过程, 裂尖1为预制裂纹尖端的位置, 裂尖2~6依次为裂纹第1次扩展到第5次扩展的裂纹尖端位置。预制裂纹扩展到点裂尖2时, 裂尖1处裂纹的张开位移为0.038 mm; 当裂纹从裂尖2扩展到裂尖3时, 测得裂尖2的裂纹张开位移为0.049 mm; 当裂纹从裂尖3扩展到裂尖4时, 测得裂尖3的裂纹张开位移为0.043 mm; 当裂纹从裂尖4扩展到裂尖5时, 测得裂尖4的裂纹张开位移为0.037 mm; 当裂纹从裂尖5扩展到裂尖6时, 测得裂尖5的裂纹张开位移为0.043 mm; 当裂纹从裂尖6扩展到试件边界时, 测得裂尖6的裂纹张开位移为0.034 mm。综合各次裂纹扩展时的张开位移值, 表明在所述试验条件下, 岩石动态断裂时的裂纹张开位移均值为0.041 mm。

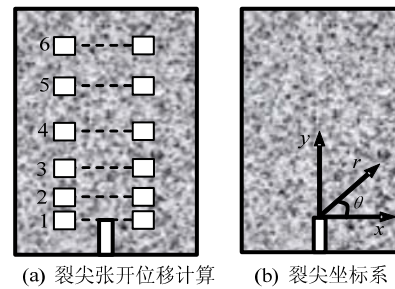


图7 岩石裂纹尖端张开位移及裂尖坐标系

Fig.7 Rock crack tip opening displacement measuring point and coordinate system of crack tip

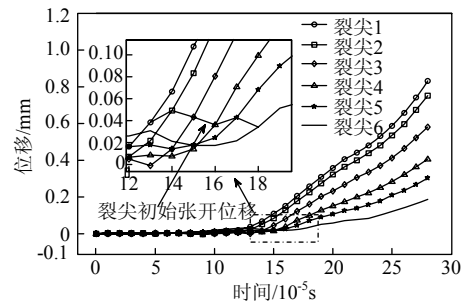


图8 岩石裂纹尖端张开位移演化

Fig.8 The displacement evolution of rock crack tip

### 2.3 岩石动态断裂应力强度因子测量

岩石动态断裂应力强度因子采用动态加载的准静态裂纹扩展公式<sup>[13]</sup>进行计算:

$$u = A_0(t) \frac{r^{1/2}}{\mu} \sin(\theta/2) \left( \frac{2}{1+\nu} - \cos^2(\theta/2) \right) - \frac{\nu B_0(t)}{\mu(1+\nu)} r \sin \theta - C_0(t) \frac{r^{1/2}}{\mu} \cos(\theta/2) \left( \frac{1-\nu}{1+\nu} - \sin^2(\theta/2) \right) - \frac{D_0(t)}{\mu(1+\nu)} r \cos \theta + Pr \cos \theta + Qr \sin \theta + Cr^0 + O(r^{3/2}) \quad (1)$$



式中:  $u$  为裂纹张开位移场( $x$  方向位移);  $(r, \theta)$  为以裂纹尖端为坐标原点的极坐标, 坐标系如图 7b 所示;  $\mu, \nu$  分别为岩石材料的剪切模量和泊松比;  $A_0, B_0, C_0, D_0, P, Q, C$  为裂纹渐进扩展的常系数,  $A_0$  和  $C_0$  与  $K_I(t)$  和  $K_{II}(t)$  相关, 其表达式为  $K_I(t) = A_0\sqrt{2\pi}$ ,  $K_{II}(t) = C_0\sqrt{2\pi}$ 。式中第 1, 2 项表

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(K_I)_n B_1(C)}{2\mu} \sqrt{\frac{2}{\pi}} (n+1) \left\{ -\beta_1 r_1^{n/2} \sin \frac{n}{2} \theta_1 + \frac{h(n)}{\beta_2} r_2^{n/2} \sin \frac{n}{2} \theta_2 \right\} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(K_{II})_n B_2(C)}{2\mu} \sqrt{\frac{2}{\pi}} (n+1) \left\{ \beta_1 r_1^{n/2} \cos \frac{n}{2} \theta_1 + \frac{h(\bar{n})}{\beta_2} r_2^{n/2} \cos \frac{n}{2} \theta_2 \right\} + Pr \cos \theta + Qr \sin \theta + Cr^0 \quad (2)$$

其中:

$$r_m = \sqrt{X^2 + \beta_m^2 Y^2}, \quad \theta_m = \arctan \left( \frac{\beta_m Y}{X} \right), \quad m=1, 2$$

$$\beta_1 = \sqrt{1 - \left( \frac{C}{C_L} \right)^2}, \quad \beta_2 = \sqrt{1 - \left( \frac{C}{C_S} \right)^2}$$

$$C_L = \sqrt{\frac{(\kappa+1)\mu}{(\kappa-1)\rho}}, \quad C_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

$$\text{对于平面应力条件, } \kappa = \frac{3-\nu}{1+\nu}$$

$$h(n) = \begin{cases} \frac{2\beta_1\beta_2}{1+\beta_2^2} & \text{奇异项} \\ \frac{1+\beta_2^2}{2} & \text{非奇异项} \end{cases}$$

$$h(\bar{n}) = h(n+1)$$

$$B_I(C) = \frac{(1+\beta_2^2)}{D}, \quad B_{II}(C) = \frac{2\beta_2}{D}$$

$$D = 4\beta_1\beta_2 - (1+\beta_2^2)^2$$

式中:  $(x, y)$  和  $(r, \theta)$  分别表示裂纹尖端扩展位置的笛卡儿坐标和极坐标;  $C$  为裂纹尖端扩展速度;  $C_L$  和  $C_S$  分别表示岩石材料的膨胀波速和剪切波速;  $\mu, \nu$  分别为岩石材料的剪切模量和泊松比;  $(K_I)_n$  和  $(K_{II})_n$  分别表示 I 型和 II 型动态断裂强度因子。

采用数字散斑相关方法进行岩石裂纹动态断裂的应力强度因子的计算方法如下: 首先, 根据试验采集的散斑图像确定出岩石试件的裂纹尖端, 并在裂纹尖端处建立直角坐标系和极坐标系; 其次, 根据极坐标半径  $r$  和试件的厚度  $B$  确定出尖端区域的数据点坐标选取条件 (即  $0.3 < r/B < 1.3$  且  $-135^\circ < \theta < 135^\circ$ ), 在此区域选取大于 200 个数据点坐标, 这些数据点的坐标对应位移值为数字散斑相关方法计算出的已知数据, 式(1), (2)中的系数通过最小二乘法拟合的方法求得; 最后, 通过系数与应力强度因子关系, 计算出冲击载荷作用下岩石裂纹动态断裂的应力强度因子。通过上述方法计算得出的

示对称变形的 I 型裂纹, 第 3, 4 项表示反对称变形的 II 型裂纹, 第 5, 6, 7 项表示旋转和刚体平移。式(1)中隐含的假设为, 当裂隙不发生扩展时, 裂纹尖端的函数形式保持不变。而对于稳定的裂纹扩展, 裂纹张开位移场的渐进表达式将采用式(2)进行计算<sup>[13]</sup>。

岩石裂纹动态断裂全过程中的应力强度因子如图 9 所示。

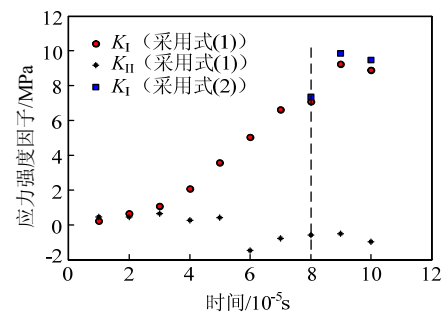


图 9 岩石裂纹动态扩展应力强度因子

Fig.9 The stress intensity factor of dynamic fracture

由图 9 可见: 在落锤开始与岩石试件的边界接触到试件的预制裂纹开始扩展整个过程中, 裂纹尖端的应力强度因子  $K_I$  呈递增趋势, 当应力强度因子  $K_I$  为  $7.066 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  时, 预制裂纹开始扩展。当预制裂纹扩展后, 总体表现为后期的裂纹应力强度因子  $K_I$  大于初次裂纹应力强度因子  $K_I$ , 裂纹应力强度因子  $K_{II}$  与  $K_I$  相比, 相差 1~2 个数量级, 因此, 试验总体表现为 I 型裂纹扩展。分别采用式(1)和式(2)对裂纹扩展过程的应力强度因子进行计算, 比较分析结果表明: 采用式(1)计算的裂纹扩展过程中的应力强度因子与式(2)相比, 趋势相同, 应力强度因子的数值偏小。另外, 裂纹扩展后期, 裂纹尖端位移场受落锤冲击对试件边界影响, 出现较大误差, 计算结果失真。因此, 本文只给出了 3 个裂尖扩展的应力强度因子的计算结果。

### 3 结 论

1) 以自行研制的可调速落锤冲击试验机进行加载, 通过高速相机搭建数据采集系统, 采用数字散斑相关方法作为试验的观测方法, 开展含 I 型预制裂纹的花岗岩试件在冲击载荷作用下的动态断

裂试验。

2) 对岩石I型裂纹在冲击载荷作用下的位移场演化、裂纹动态断裂的裂尖张开位移、裂纹尖端的扩展历史进行了定量研究, 得到岩石试件在冲击加载速度下裂纹扩展速度以及裂纹扩展距离随时间的变化规律。

3) 对岩石动态断裂的应力强度因子进行定量测量, 试验结果表明: 当落锤与岩石试件接触后, 裂尖的应力强度因子呈增加趋势, 当达到某一量值时, 预制裂纹开裂, 后续裂纹开裂的应力强度因子大于初始开裂的应力强度因子。

### 参考文献:

- [1] 刘再华, 解德, 王元汉, 等. 工程断裂动力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996: 285-295.
- [2] 范天佑. 断裂动力学原理与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 575-592, 390-391.
- [3] KANNINEN M F, POPELAR C H. Advanced fracture mechanics[M]. New York: Oxford University Press, 1985: 1-3.
- [4] RICE J R. Mathematical analysis in the mechanics of fracture[J]. Fracture, Vol II. New York: Academic Press Inc, 1968: 191-311.
- [5] COSTIN L S. Static and dynamic fracture behavior of oil shale[M]// Fracture Mechanics for Ceramics, Rock and Concrete. ASTMSTP745, 1981: 169-184.
- [6] WU M B. Effects of loading rates on fracture toughness of rock[J]. Mech Practice, 1986, 10(2): 21-24.
- [7] BAZANT Z P, BAI S P, GETTU R. Fracture of rock: effect of loading rate[J]. Eng Fract Mech, 1993, 45: 393-411.
- [8] TANG C A, XU X. A new method for measuring dynamic fracture toughness of rock[J]. Eng Fract Mech, 1990, 35: 4-9.
- [9] ZHANG Z X, KOU S Q, YU J, et al. Effects of loading rate on rock fracture[J]. Int J Rock Mech & Min Sci, 1999, 36: 597-611.
- [10] 胡柳青. 冲击载荷作用下岩石动态断裂过程机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
- [11] 宋义敏, 杨小彬. 煤破坏过程中的温度演化特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1344-1349. SONG Yimin, YANG Xiaobin. Experiment study of temperature evolution characteristics on deformation process of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1344-1349.
- [12] 宋义敏. 非均匀变形场测量的 DSCM 及其用于岩石破坏试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [13] MADHU S KIRUGULIGE, HAREESH V TIPPUR, THOMAS S DENNEY. Measurement of transient deformations using digital image correlation method and high-speed photography: application to dynamic fracture[J]. Applied Optics, 2007, 46(22): 5083-5096.
- [14] 于新锋, 柏建彪. 张集矿综采工作面破碎煤壁注浆加固技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(2): 69-71. YU Xinfeng, BAI Jianbiao. Research on grouting reinforced technology for broken coal wall of fully mechanized longwall mining face in Zhangji mine[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(2): 69-71.
- [15] 张淑同, 杨志恒, 汪华君, 等. 采场破碎煤体注浆加固渗流规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(3): 359-361. ZHANG Shutong, YANG Zhiheng, WANG Huajun, et al. Seepage law of grouting for reinforcing fractured coal in mining face[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(3): 359-361.
- [16] 王江峰, 张海波, 管学茂. 超细水泥注浆材料煤壁注浆加固试验研究[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2011, 30(2): 146-148. WANG Jiangfeng, ZHANG Haibo, GUAN Xuemao. The study on micro-fine cement grouting material applying in coal wall reinforcement[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science Edition, 2011, 30(2): 146-148.

(上接第 833 页)