

静态预应力条件作用下岩板动态破坏行为 试验研究

夏开文^{1,2}, 徐颖¹, 姚伟^{1,2}, 高桂云³

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 多伦多大学 土木工程系, 加拿大 多伦多 M5S1A4; 3. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

摘要: 深部岩石的动力破坏, 是岩石力学研究的一个热点问题。为模拟深部岩石动态断裂情况, 选取一种花岗岩制备带 10 mm 预制裂纹的板状试样, 开展含预应力条件下的岩板动态破坏行为研究。试件尺寸为 305 mm×305 mm×10.5 mm 岩板, 在静态竖向预压的条件下, 使用 25 mm 杆径的霍普金森压杆进行冲击试验。利用超高速摄影仪记录试样裂纹扩展的全过程, 采用数字图像相关(DIC)技术分析试样的位移场及应变场, 通过设置虚拟引伸计, 获得预应力条件下岩板起裂时刻、裂纹长度、裂纹扩展速度及断裂韧性等动态断裂力学参量。研究结果显示: 该岩板试样裂纹扩展速度可达到瑞利波速的 0.57 倍(~1000 m/s), 验证了采用花岗岩岩板测试的优势。在特定预应力条件下, 岩板的裂纹扩展速率与动态断裂韧性具有明显的率相关性; 特定冲击速度条件下, 随着静态预应力的增加, 裂纹扩展速度受到抑制, 破坏模式由单一裂纹扩展向多条微裂纹扩展等复杂模式转变, 甚至出现止裂现象。当气枪冲击气压 103.43 kPa、静态预应力 30 MPa 时, 裂纹扩展速度降为 452.4 m/s, 属于低速裂纹扩展范围。

关键词: 岩石力学; 预应力; 裂纹扩展; 数字图像相关; 岩板

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2017)05 - 1122 - 11

Experimental study of dynamic fracture behavior of brittle rock plate under static pre-loading

XIA Kaiwen^{1, 2}, XU Ying¹, YAO Wei^{1, 2}, GAO Guiyun³

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 230027, China; 2. Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, M5S1A4, Canada; 3. The Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China)

Abstract: The dynamic failure of deep seated rock materials is one of the hottest topics in rock mechanics. The fracturing behaviour of a rock plate under static pre-load and dynamic impact was studied. The specimen size is 305 mm×305 mm×10.5 mm with a 10 mm pre-notched crack. The impact load was applied by a Hopkinson bar system of 25 mm in diameter. The crack initiation and propagation processes were recorded with the ultra-high speed photography, and the displacement and strain fields during the fracture process were analysed using the digital image correlation(DIC) method. Then the crack initiation time, crack length, crack propagation velocity and fracture toughness etc. were obtained from DIC results combined with a virtual digital extensometer technique. Results show that the crack propagation velocity of this rock plate reaches up to 0.57 times of the Rayleigh wave

收稿日期: 2016 - 10 - 12; **修回日期:** 2016 - 11 - 22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51479131); 天津市自然科学基金项目(13JCYBJC40600, 16JCQNJC07800)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51479131) and Natural Science Fund of Tianjin(Grant Nos. 13JCYBJC40600 and 16JCQNJC07800)

作者简介: 夏开文(1973 -), 男, 2005 年于美国加州理工学院机械工程专业获博士学位, 现任教授, 主要从事岩石动力学和地震物理方面的研究工作。E-mail: kaiwen@tju.edu.cn。通讯作者: 徐颖(1987 -), 女, 博士, 现任讲师。E-mail: maggie_xu@tju.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1278

velocity(- 1 000 m/s), which validates the advantage of using the rock plate in crack propagation investigation. The crack propagation velocity and dynamic fracture toughness show obvious the rate dependence under the given pre-stress condition. At the given impact velocity, the crack propagation velocity decreases as the pre-load pressure increases, and the fracture mode change from one single crack to several cracks. The crack arrest may also occur under the high pre-load pressure. When the static pre-load pressure is 30 MPa and the gas gun pressure is 103.43 kPa, the crack propagation velocity is only about 452.4 m/s.

Key words: rock mechanics; pre-load; crack propagation; digital image correlation(DIC); brittle rock plate

1 引言

深部岩石的动态断裂特性是地壳演化过程和深部地下工程关注的热点问题。岩石的破裂与失稳常始于地质体内部的初始裂纹、晶面等原生缺陷,或者后期因工程扰动形成的次生裂纹等。岩石内部微裂纹产生、扩展及贯通的动态过程,是深部岩石破坏的重要表现形式。因此,国外学者对准脆性材料静态、动态断裂特性进行了大量的理论、试验和数值研究^[1-5],其中静态断裂韧性现已有相关的标准^[6-8]。而动态断裂特性,尤其是动态裂纹扩展还需要进一步深入研究和完善。

关于裂纹扩展的研究,常用的一种试件是平板试件,该试件一般处于平面应力状态,裂纹有足够的扩展空间使裂纹达到较高的扩展速度,但同时试验中存在一定的难度。李地元等^[9]利用霍普金森杆冲击加载含孔洞大理岩动态力学破坏特性,得到了裂纹传播速度萌生及扩展规律,但是没有测量断裂韧度。W. J. Hall 等^[10]在 19 世纪 50 年代,曾采用应变片测量钢板在楔形缺口冲击过程中试件表面变形,从而来确定钢板在冲击过程中应变变化、裂纹扩展速度以及破裂模式。J. Fineberg 等^[11]采用试件表面镀铝膜,并监视铝膜电阻率的变化来得到裂纹扩展速度,指出脆性 PMMA 裂纹尖端在裂纹高速扩展时是非稳定的,并给出裂纹尖端开始振荡的临界速度(300 ± 30 m/s)。

动态加载方面,目前分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)技术普遍应用到岩石动态断裂试验中^[12],Q. B. Zhang 和 J. Zhao^[1]采用 SHPB 试验系统,进行了半圆盘三点弯曲动态试验,对比使用多种方法检测了裂纹扩展速度,并用准静态法求得了大理岩的动态起裂和扩展韧度。Q. Z. Wang 等^[13]采用裂纹扩展计监测了砂岩中心直裂纹平台巴西圆盘动态试验中裂纹扩展的速度历程。G. Gao 等^[14]在 SHPB 动态试验中,结合数字图像相关

法,获得了切槽半圆盘试样动态试验中裂纹尖端区域的动态应变信息,并研究了大理岩材料的动态起裂和扩展韧度。

岩石断裂过程观测方面,主要有应变电测、声发射、热红外监测以及光测力学测量方法等^[15]。其中光测力学方法能够获得全场变形(位移和应变)信息而广被采纳。数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术^[16]作为一种非接触光测力学技术,测量范围上至工程结构、下至微纳米尺度,并且对待测试件没有特殊要求,通过设计合适的散斑点便可以得到试件表面相当精度的位移及变形,如王学滨等^[17]应用该技术研究了单轴压缩湿土样的剪切应变场。将位移场信息与断裂力学的理论相结合,可得到裂纹扩展信息及断裂参数。常用方法有位移场最小二乘拟合^[18-19]、裂纹张开位移计算^[20]等。其中虚拟数字引伸计最早由 M. A. Sutton 等^[21]在 20 世纪 90 年代提出,其基本思想是通过 DIC 跟踪裂纹面两边的 2 个子区域,得到变形前、后的相对张开和错动量。G. J. Pataky 等^[22]曾采用该方法监控各向异性钢材料在疲劳试验中裂纹的张开与闭合。郭文婧等^[23]将该虚拟数字引伸计应用于岩石的张开与错动量观测。

上述岩石动态断裂测试及裂纹扩展机制的研究都是基于零预加荷载的条件下进行的。深部岩石工程围岩所处的地质环境复杂,埋深较大,需要进行更加接近实际地质环境的岩石断裂特性深入研究。

K. Xia 等^[24-25]曾采用光弹性方法,研究了预应力下聚碳酸酯和 Homalite - 100 等光弹性平板试件在爆炸载荷作用下而引发的裂纹扩展,得到了类似自然地震的裂纹亚瑞利扩展速度和超剪切现象。然而,对于岩板预应力下裂纹扩展研究工作有限,因此进行预应力下岩板结构的裂纹扩展行为研究势在必行。

综上所述,本文通过设计静态加载系统,结合霍普金森压杆侧向动态冲击试验系统,来实现对深部受预应力条件岩石动态断裂过程及特性的研究。利用超高速摄影系统和 DIC 技术,开展预应力条件

下带预制裂纹的岩板动态破坏特性研究，通过改变冲击气压和预加压缩载荷，探讨加载速度和预应力对破坏模式的影响。

2 试件制备及试验方案

2.1 试件制备

选取花岗岩板作为试验材料。试验前对该花岗岩进行了基本物理力学特性分析，基本性能参数详见表 1。岩石静态拉伸强度采用常规巴西圆盘劈裂法测得^[4, 26]。断裂韧性采用国际岩石力学(ISRM)推荐的带预制裂缝的半圆三点弯曲试验^[27]，竖向预应力加载选用 Instron 3366 多功能试验机，所用缺口半圆弯曲试件半径 $R = 23.4 \text{ mm}$ ，厚 $B = 10.5 \text{ mm}$ 。其预制裂纹 $a = 5 \text{ mm}$ ，有效裂纹扩展长度约为 18.4 mm 。据根试验所得数据(见表 1)，由下式得到断裂韧度参数：

$$K_{IC} = \frac{P_{\max} \sqrt{\pi a}}{2RB} Y' \left(\frac{a}{R}, \frac{S}{2R} \right) \quad (1)$$

$$Y' \left(\frac{a}{R}, \frac{S}{2R} \right) = -1.297 + 9.516 \left(\frac{S}{2R} \right) - \left[0.47 + 16.457 \left(\frac{S}{2R} \right) \right] \left[\left(\frac{a}{R} \right) + \left[1.071 + 34.401 \left(\frac{S}{2R} \right) \right] \left(\frac{a}{R} \right)^2 \right] \quad (2)$$

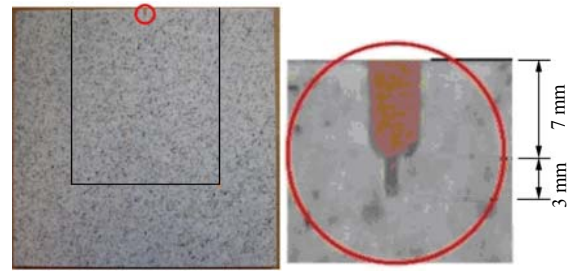
式中： K_{IC} 为断裂韧度； P_{\max} 为最大外载荷； S 为夹具两点间距； Y' 为形状因子，采用有限元分析方法获得^[12]。

表 1 试验所用花岗岩基本性能参数

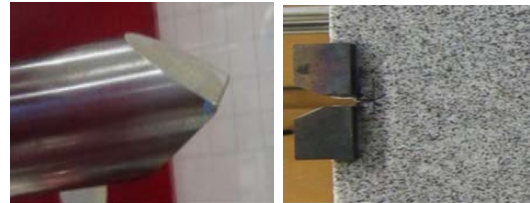
Table 1 The basic properties of the tested granite

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	纵波 C_L / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	横波 C_T / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	泊松比	弹性模量/ GPa	剪切模量/ GPa	拉伸强度/ MPa	断裂韧度/ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)
2 580	3 860	2 253	0.24	32.5	13.1	5.34	0.71

试验所采用的花岗岩岩板尺寸为 $305 \text{ mm} \times 305 \text{ mm} \times 10.5 \text{ mm}$ ，如图 1(a)所示。预制裂纹通过 2 种不同刀片宽度的切割机进行裂纹制作，首先采用宽度约为 3 mm 的刀片切割约 7 mm 长的裂纹，再采用窄刀片(约 1 mm 宽)制作 3 mm 深的细裂纹。为进行 DIC 测试，采用喷溅方法在试件表面制作散斑点，即先在试件表面均匀涂上白色漆，晾干后再在其表面喷洒黑色油漆，控制斑点的尺寸随机及分布平均灰度梯度满足建议值^[28-29]。



(a) 试验岩板及预制裂纹



(b) 入射杆冲头

(c) 加载适配头

图 1 岩板冲击破坏试验楔形冲击头及试件形状

Fig.1 Specimens with speckle patterns and impact device

本试验采用特殊杆作为冲击杆头(长度约为 2 m ，直径 25 mm)，见图 1(b)，楔形角度为 60° 。同时设计了相应的适配头，并采用环氧树脂 AB 胶 (LOCTIT^RHysol^R E - 120HPTM) 黏贴在试件预制裂纹端(见图 1(c))，以实现拉伸载荷作用，避免局部压缩破坏及保护冲击杆。

2.2 试验设备及原理

该试验装置主要分为 3 个部分：动态加载系统、静态加载系统和高速摄像系统。预应力下的冲击破坏试验测试系统中(见图 2)，动态加载系统通过直径 25 mm 的霍普金森压杆实现。杆的材料为马氏体钢，屈服强度为 2.5 GPa 。预应力加载通过液压泵施加静态预压力，压力方向垂直于杆方向(见图 2)。为保证压力均匀施加，设计了相应的加载适配头。将整个液压加载头和适配头固定在试验支架上(型号：Westward^R SP10B)。动态断裂过程通过 Ultra UHSi 12/24 IVV ImprintTM超高速摄影系统进行全称拍摄，该拍摄系统像素为 $1\,082 \text{ 像素} \times 974 \text{ 像素}$ ，最高拍摄速度为 2 亿张/s 。

试验中所测试的区域为靠近预制裂纹端约 $200 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ 的局部区域(见图 1)，放大系数为 0.207 mm/像素 。系统的触发及同步通过入射杆上的应变信号来控制。当撞击杆冲击入射杆时，会在入射杆内产生一个压缩波，通过入射杆上的应变片(距离试件入射杆界面端约 $1\,008.5 \text{ mm}$)记录入射波信号。当该信号触发示波器采集的同时，示波器发出一个同步负脉冲(约 -3.5 V)，该脉冲用来触发相机以及闪光灯，从而保证加载与图像采集的同步。考虑波在

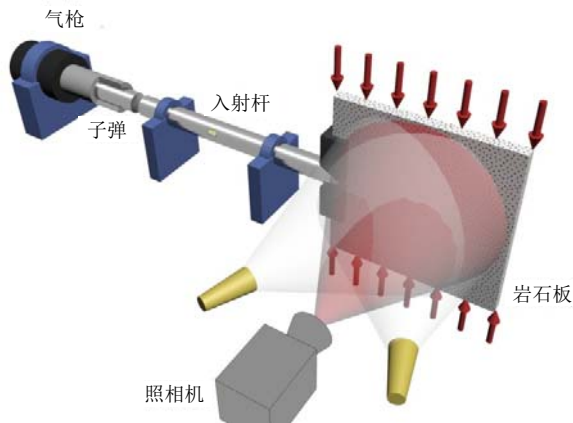
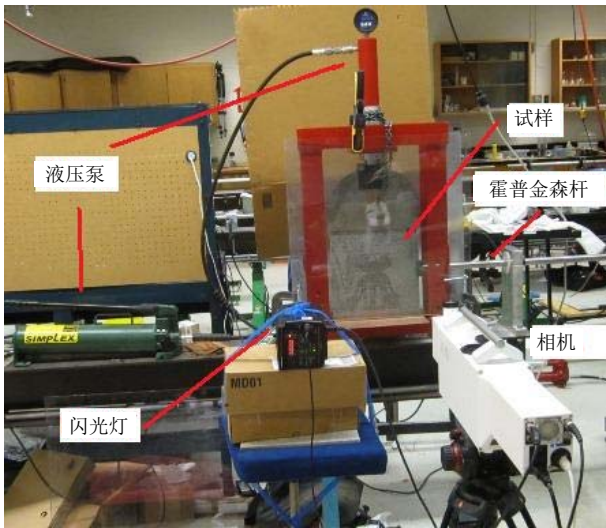


图2 预压岩板试样加载及高速摄像系统照片及原理示意图
Fig.2 Photo and diagram of the dynamic fracture testing system for pre-loaded rock plate

入射杆中波传播时间，杆中波速约为 5 120 m/s，入射波从应变片到试件端的传播时间约 197 μs，因而，相机拍摄相对应应变信号延迟时间设置为 200 μs。相机总共可以拍摄 24 幅图像，为拍摄整个试件冲击破坏过程，相机速度设置为 50 000 fps，即幅间隔为 20 μs。闪光灯需先于相机触发，预触发时间设置为 100 μs，曝光时间为 5 μs，增益值为建议值 67。

如图 2 所示，当子弹撞击入射杆时，在入射杆中造成压缩应力脉冲，所对应的入射波通过应变片测得，记为 ε_i 。入射波跟样品相互作用后，一部分能量进入样品，另一部分能量反射回来被应变片测到，记为 ε_r 。根据一维应力波理论^[30]，入射力、反射力及杆对岩石板的瞬态加载力为 F_i ，计算如下：

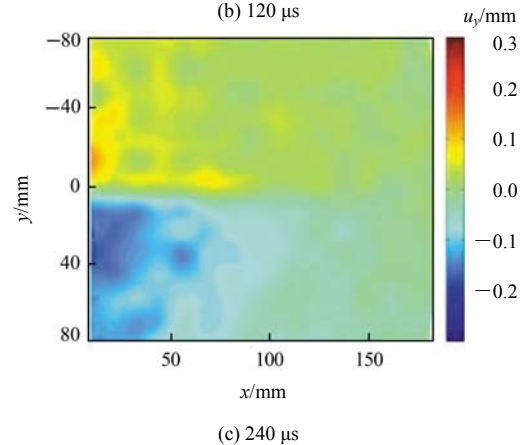
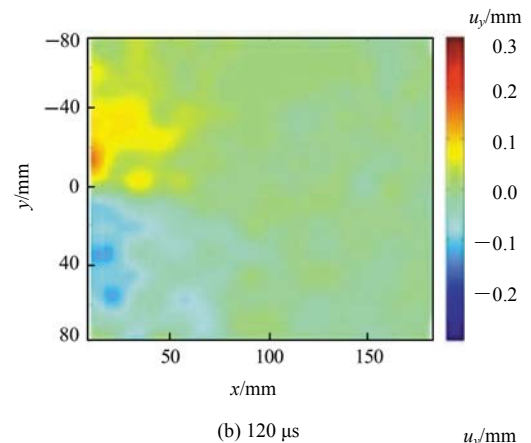
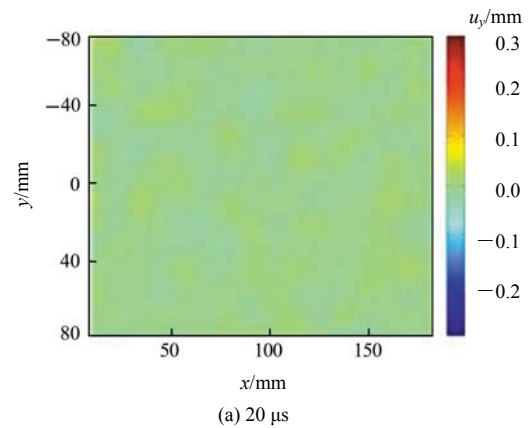
$$F_i = A\varepsilon_i \quad F_r = A\varepsilon_r \quad F = AE(\varepsilon_i + \varepsilon_r) \quad (3)$$

式中：A 为杆的截面积，E 为杆的杨氏模量。

2.3 典型试验结果分析

先进行无预加压力的冲击试验对系统的可行性进行验证。通过超高速摄影系统，拍摄试件在动态冲击破坏过程的 24 幅图像，拍摄总时间为 480 μs，幅间隔为 20 μs。即：第 1 张图片的拍摄时刻为 20 μs，第 2 张 40 μs 时刻，第 3 张 60 μs 时刻，以此类推，第 24 张为 480 μs 时刻。

经过数字图像相关处理，获得岩板全场位移和应变。典型时刻纵向位移场 u_y 变化如图 3 所示。可知，随着加载时间的增加，纵向位移幅值增大，张开位移增大，裂纹起裂，并逐步扩展。应变场变化如图 4 所示。加载后应变场随时间的变化，反映了冲击破坏过程中，岩石变形的局部化效应。



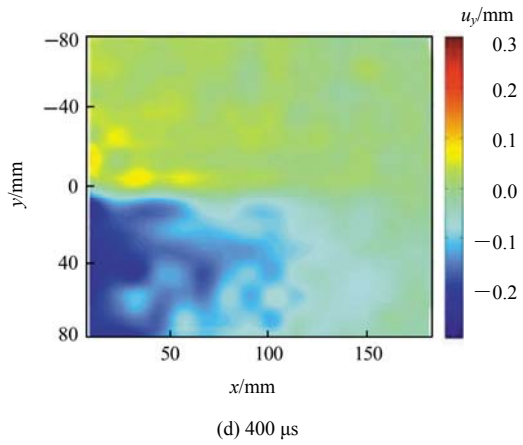


图3 典型 u_y 位移场随时间变化(冲击气压: 68.9 kPa 预压力: 0 MPa)

Fig.3 Typical u_y displacement fields at different times(impact pressure: 68.95 kPa, static pre-loaded pressure: 0 MPa)

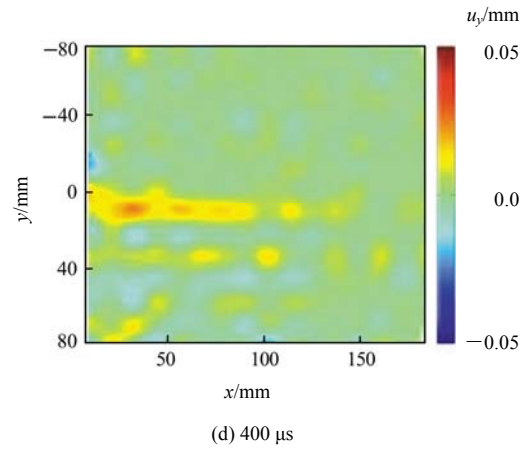


图4 应变场随时间变化(冲击气压: 68.9 kPa, 预压力: 0 MPa)

Fig.4 Typical strain fields at different times(impact pressure: 68.95 kPa, static pre-loaded pressure: 0 MPa)

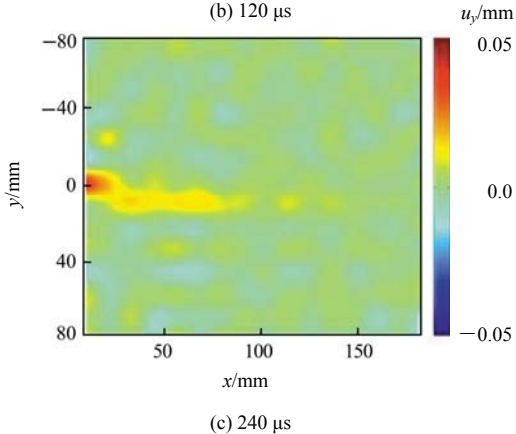
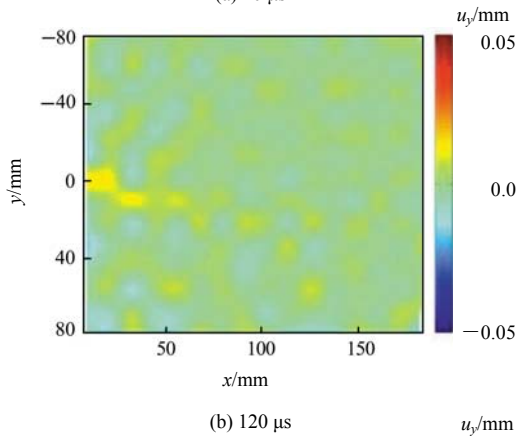
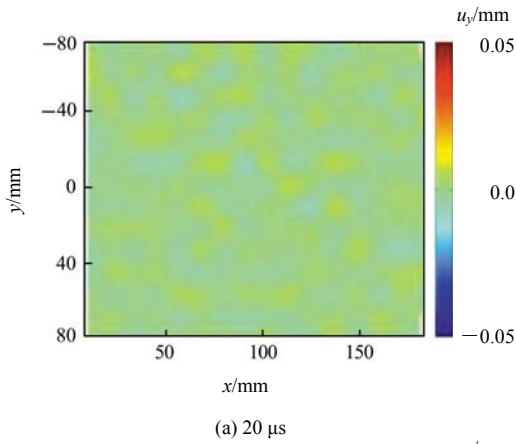


图5 给出了试件最终破裂后裂纹路径, 并与得到的位移场和应变场进行了对比。可见, 变形场突变的区域即是裂纹扩展路径, 同时裂纹路径附近应变最大。因此, DIC 方法能准确表征待测试件在动态破坏过程中的变形及应变集中情况。

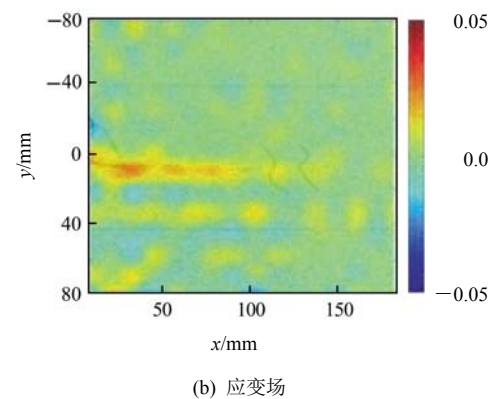
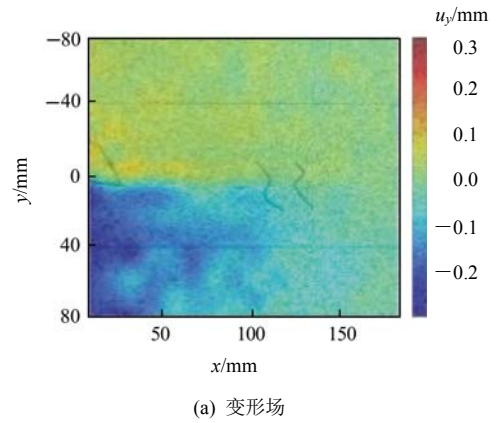


图5 最终破裂路径与变形场

Fig.5 Final crack path compared with u_y deformation field

岩板动态参数中, 裂纹扩展速度是通过虚拟引伸计^[20, 23]来确定, 裂纹动态起裂韧性则通过裂纹张

开位移^[31]测得。裂纹张开位移的提出为裂纹扩展过程提供了一个物理解释^[32]，该模型是基于裂纹尖端位移的弹性奇异性：

$$u_x = \frac{K}{2\mu} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \cos \frac{\theta}{2} \left(\kappa - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (4)$$

$$u_y = \frac{K}{2\mu} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \left(\kappa + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (5)$$

式中： K 为应力场强度因子， κ 为拉梅常数(平面应变： $\kappa = 3 - 4\nu$ ；平面应力： $\kappa = (3 - \nu)/(1 + \nu)$)， ν 为泊松比)， μ 为剪切模量； r ， θ 为裂纹尖端极坐标。若角度 θ 取 180° ，则式(4)和(5)表示裂纹面的错动(u_x)和张开位移量(u_y)：

$$u_x = \frac{(1 + \kappa)K_{II}}{2\mu} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$u_y = \frac{(1 + \kappa)K_I}{2\mu} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \quad (7)$$

通过数字图像相关技术给出的位移场分布，确定裂纹尖端位置及裂纹尖端附近张开位移量，从而可以求得不同时刻的应力强度因子值，而裂纹起裂时刻的应力强度因子值 K_{IC} 即为断裂韧度。

初始裂纹尖端附近及裂纹扩展路径附近张开位移量可以通过数字图像相关技术得到全场位移，然后选取几个代表位置，设置虚拟数字引伸计(见图 6)来获得张开位移量，图 6 中红色小方框为设置的虚拟引伸计示意。当裂纹传播至某个虚拟引伸计时，位移会突然增加。因为引伸计的位置已知，所以通过裂纹到达时间可以估算裂纹扩展的平均速度。

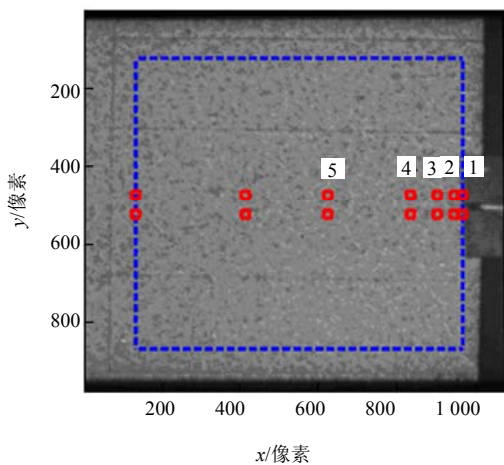


图 6 DIC 计算区域及虚拟数字引伸计布置

Fig.6 The calculation zone of DIC and the arrangement of virtual digital extensometer

对于所施加的静态预压应力为 0 的试件，霍普金森压杆系统采用的冲击气压 68.9 kPa 时，DIC 处理得到的裂纹扩展速度为 241.0 m/s，断裂韧度 $K_{IC} = 1.39 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ，明显大于准静态起裂韧度值，印证了加载率效应的存在。

3 预应力条件下试验结果与讨论

3.1 试验方案设计

上述典型试验验证了加载率的显著效应，由此设计了 5 个级别的冲击速度，以此探讨动态加载效应对裂纹扩展的作用效果。试验中，系统加载率通过改变冲击气压来实现，设置低压空气枪的冲击气压为 68.95~206.85 kPa，增益值为 34.475 kPa，见表 2。对应的冲击速度由位于入射杆与子弹间的激光束来测得，入射力、反射力和加载力由加载脉冲信号通过式(3)计算得到(见图 7)，其幅值结果见表 2。

表 2 不同冲击气压对应的冲击速度、力幅值

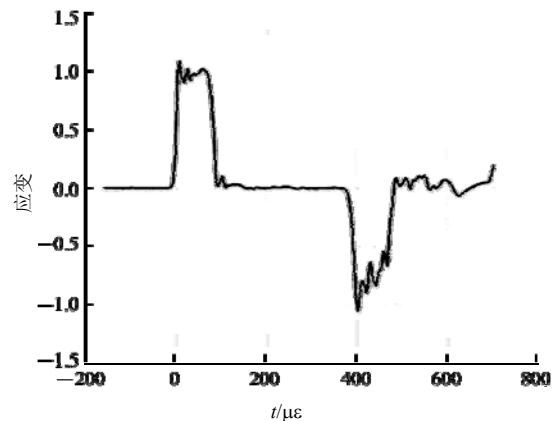
Table 2 The impact velocity and force under different impact pressures

气压/kPa	冲击速度/(m · s ⁻¹)	入射力/kN	加载力/kN
68.95	8.95	100	30.1
103.43	12.60	125	41.6
137.90	15.60	153	53.9
172.25	17.80	168	63.4
206.85	19.30	190	73.5

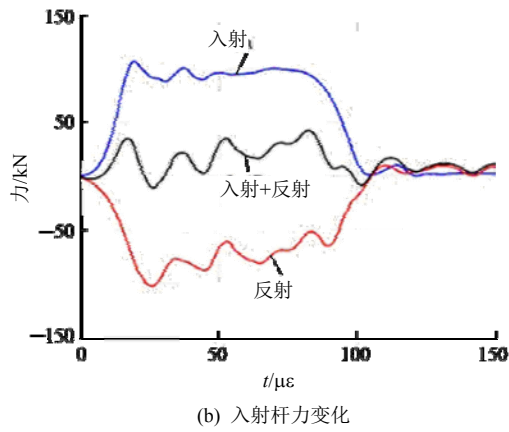
预压力通过改变液压大小来实现，所施加的液压显示压力分别为 0，5，15 和 30 MPa，对应的试件边缘远场压应力约为 0，1.8，5.3 和 10.6 MPa。

3.2 加载率的影响

预应力为 0 MPa 时，经过 DIC 处理得到的不同冲击速度下的裂纹扩展速度见表 3。可见，随着冲



(a) 入射杆上应变



(b) 入射杆力变化
图7 典型加载信号及加载力关系(冲击气压: 68.95 kPa)
Fig.7 Typical incident signal and force(impact pressure: 68.95 kPa)

击速度的增加, 裂纹扩展速度显著增加, 起裂韧度从 $1.39 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 增至 $2.25 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 进一步说明了动态加载率效应的存在。此外, 若瑞利波速为 $C_R = 2\ 027.7 \text{ m/s}$, 裂纹扩展速度从 $0.42C_R$ 增大到 $0.57C_R$, 远高于小试件情况下的裂纹扩展速度, 验证了采用该岩板类试件进行裂纹扩展试验的优势。

表3 不同冲击气压下岩板裂纹扩展速度、断裂韧度
Table 3 The crack propagation velocity and fracture toughness of rock plates under different impact pressures

试件编号	冲击气压/kPa	裂纹扩展速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	断裂韧度 $K_{IC}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$
PS2	68.95	843.6	1.39
PS4	103.43	965.0	1.46
PS5	137.90	1059.6	1.55
PS6	172.25	1110.7	1.76
PS27	206.85	1148.3	2.25

花岗岩岩板最终破裂后形貌见图8。可见, 在无预应力及低冲击气压条件下, 试件由沿预制主裂纹持续扩展, 最终导致试件破坏, 局部压缩破坏现象不明显(图中的局部破坏是拆除适配头所导致的, 而非冲击导致)。当随着加载速率增加, 岩板破裂路

径向偏离预制裂纹方向发展, 最终裂纹形态复杂随机, 直至破碎成多个块体。

3.3 预应力的影响

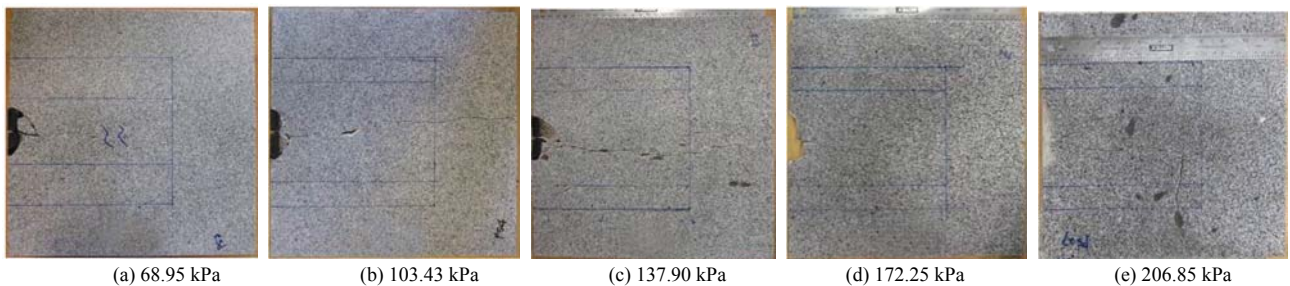
(1) 变形场。通过液压泵施加垂直于预制裂纹方向的静态预应力。图9为边界存在预应力(约5 MPa 液压)情况下纵向变形场变化。可见, 在预应力影响下, 对于纵向变形场 u_y , 随着加载的进行, 预制裂纹张开位移增大, 裂纹开始扩展(裂纹尖端位置见图中黑色十字)。但由于纵向预应力约束, 导致纵向张开位移量有限, 图8(d)所示图像(约200 μs)中裂纹的持续扩张不再明显, 呈现来回振荡状态, 纵向裂纹张开的位移出现明显的上下浮动变化。

(2) 裂纹扩展速率。图10(a)为裂纹尖端张开位移(CTOD)随时间的变化趋势, 同样可看出预压应力对张开位移的抑制作用。图10(b)为裂纹长度随时间的变化, 可见在40 μs时刻裂纹起裂, 之后匀速扩展, 扩展速度为924.4 m/s。扩展到约136.97 mm后, 裂纹扩展速度明显减慢(约200 m/s), 之后出现止裂现象, 岩板未完全断开。

(3) 破坏模式。在相同的冲击气压下, 随着预加压力的增加, 破坏模式由单一主裂纹向局部多条微裂纹扩张的模式发展(见图11)。由于微裂纹的增加, 使得主裂纹尖端应力的集中性降低, 耗散能量, 导致裂纹无法高速扩展, 甚至出现止裂现象。

同时, 裂纹扩展速度也随着预压力的增加而降低(见表4)。例如在冲击气压为103.43 kPa时, 随着预压应力的增加, 裂纹扩展速度迅速降低。在预压为30 MPa 静态液压时, 裂纹扩展速度降低到452.4 m/s, 即约为瑞利波速的0.22倍, 属于低速裂纹扩展范围。

预压应力对应的不同冲击气压下试件破裂后的形貌见图12~14。可见, 在较低的预应力作用下, 较低冲击速度下是单一裂纹扩展; 但随着冲击速度的增加, 在预制裂纹扩展的同时, 由于局部压缩载荷作用, 导致加载端局部碎裂; 裂纹扩展一定距离会产生分叉现象以及自由端反射波导致的剥落现象。



(a) 68.95 kPa (b) 103.43 kPa (c) 137.90 kPa (d) 172.25 kPa (e) 206.85 kPa
图8 不同气枪压力下岩板冲击破裂后形貌
Fig.8 Fracture morphology at different gas gun pressures

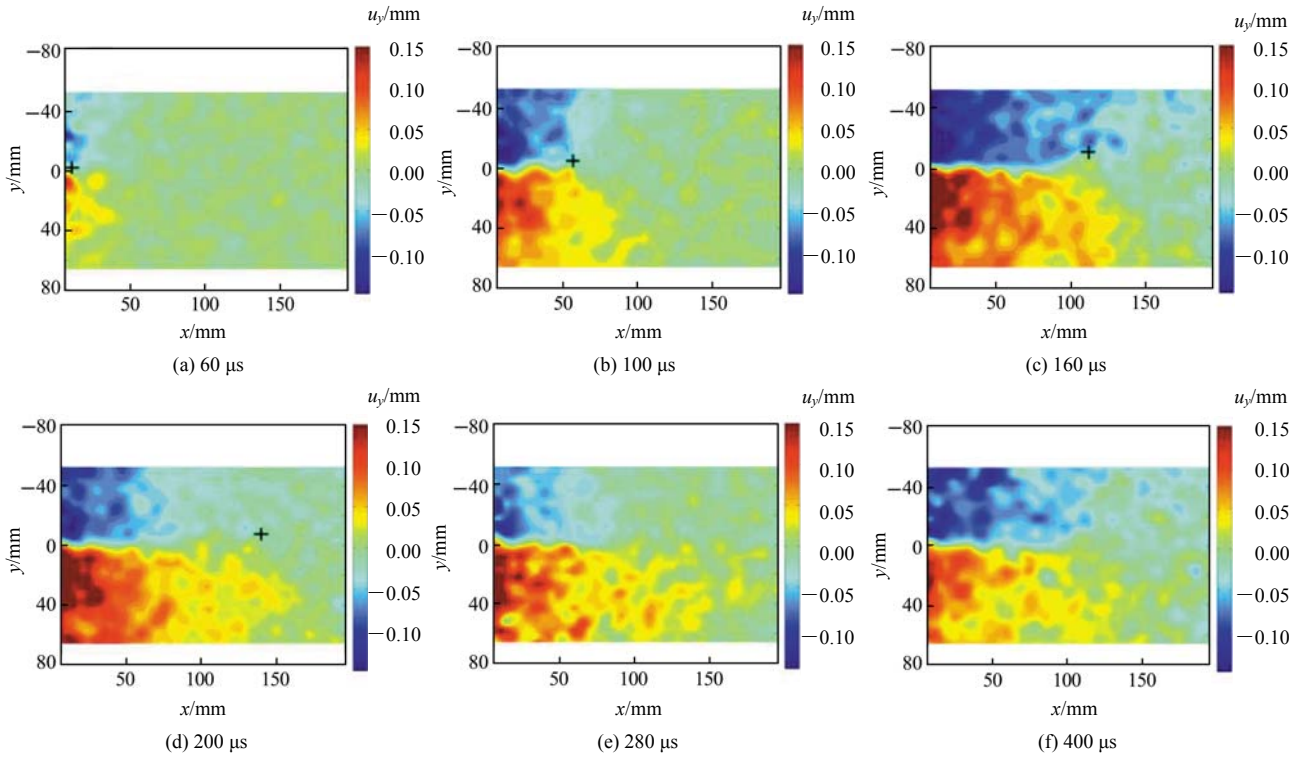
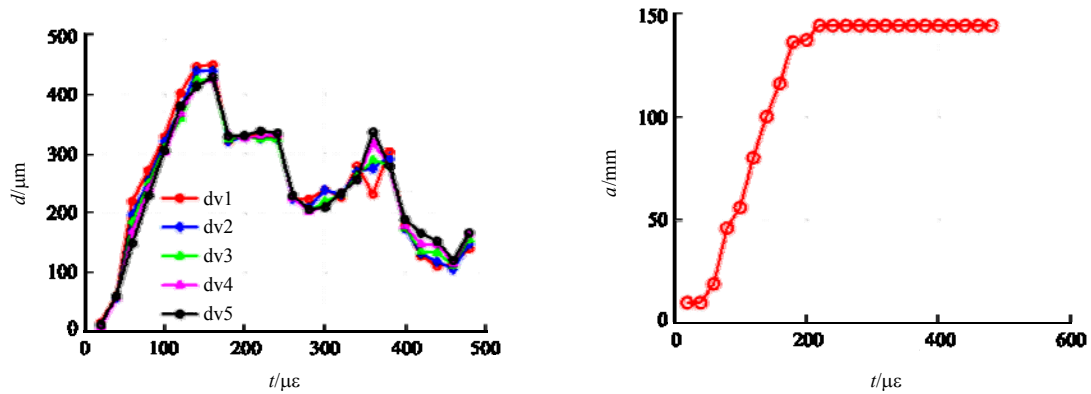


图 9 预应力作用下典型时刻的 u_y 场(所加液压 5 MPa, 冲击气压 103.43 kPa)

Fig.9 Typical u_y displacement fields under static pre-load pressures(static pre-load hydraulic pressure: 5 MPa, impact pressure: 103.43 kPa)

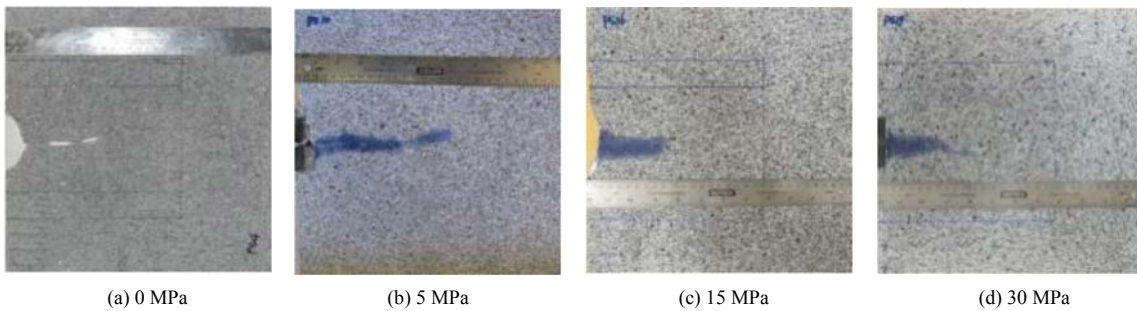


(a) 初始裂纹面附近 5 对监测点相对位移量 d 变化(dv1~dv5 为 5 个测点的张开位移量)

(b) 裂纹长度 a 随时间变化

图 10 预压力 5 MPa 冲击气压 103.43 kPa 下, 裂纹扩展状况

Fig.10 Crack propagation under static pre-loaded pressure of 5 MPa and dynamic impact pressure of 103.43 kPa



(a) 0 MPa

(b) 5 MPa

(c) 15 MPa

(d) 30 MPa

注：裂纹用蓝墨水指示，下图同

图 11 相同冲击气压(103.43 kPa)不同预压力下岩板破坏情况

Fig.11 Fractured surface under different hydraulic pressures

表 4 相同冲击气压不同预应力下裂纹扩展速度(冲击气压 103.43 kPa)

Table 4 The crack propagation velocity under different hydraulic pressures and same dynamic impact pressure of 103.43 kPa

预压力/MPa	裂纹扩展速度/(m · s ⁻¹)
0	965.0
5	924.4
15	767.8
30	452.4

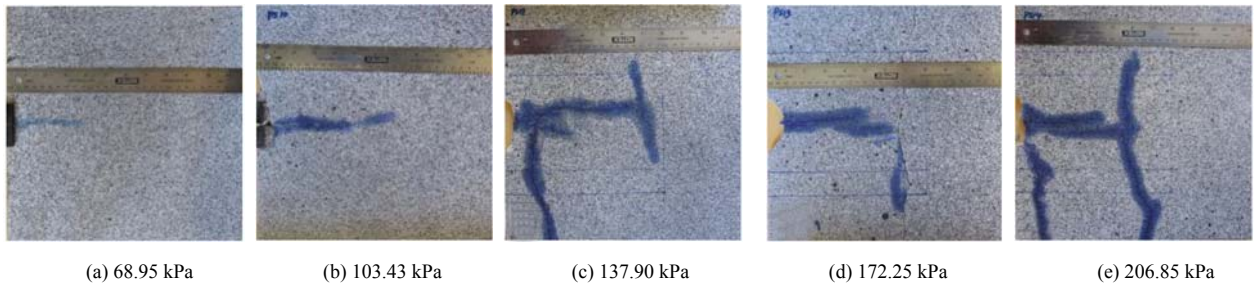


图 12 液压 5 MPa 不同冲击气压下破坏

Fig.12 Fractured surface under 5 MPa static pre-loaded pressure and different impact pressures

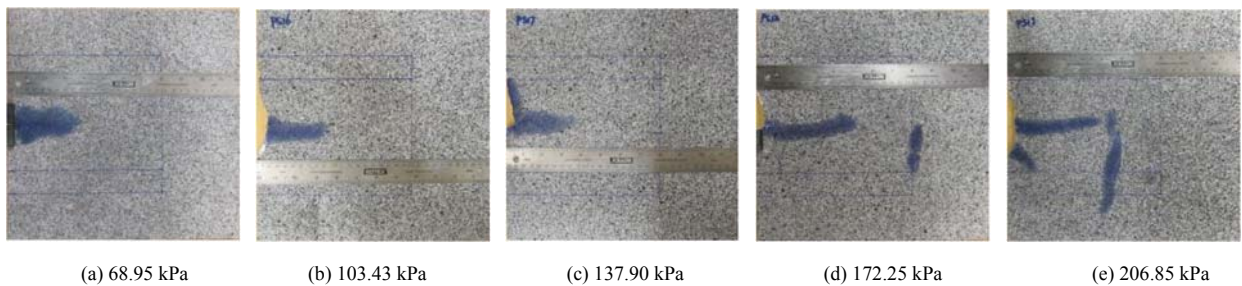


图 13 液压 15 MPa 不同冲击气压下破坏

Fig.13 Fractured surface under 15 MPa static pre-loaded pressure and different impact pressures

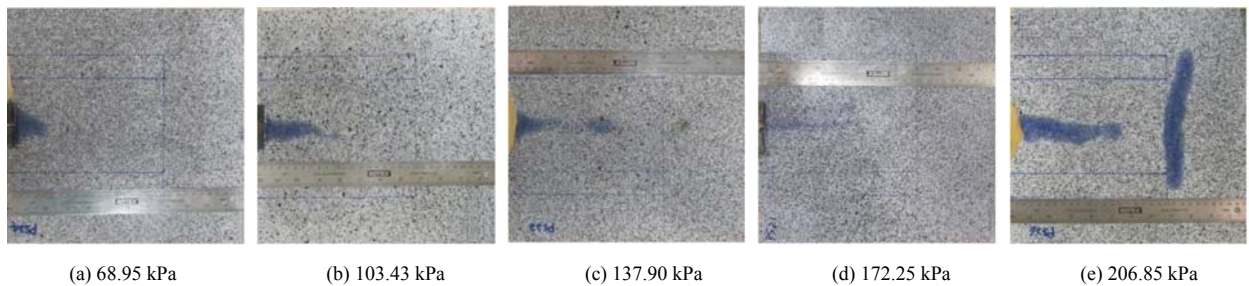


图 14 液压 30 MPa 不同冲击气压下破坏

Fig.14 Fractured surface under 30 MPa static pre-loaded pressure and different impact pressures

在较高的预压力作用下，预制裂纹扩展明显受到抑制，例如，在 30 MPa 预应力下(见图 14)，5 种冲击气压下裂纹均没有扩展到试件另一端，但是局部微裂纹有所增加，由张开裂纹破坏转化为局部的压缩裂纹及微裂纹变化。

综上所述，预应力下裂纹的扩展相对复杂，除了预制裂纹的扩展外，在冲击过程中，还会产生其他裂纹或者微裂纹。由于加载为楔形加载，楔形角度为 60°，因而，在加载过程中，除了拉伸应力外，

还存在沿着裂纹扩展方向的压力作用，从而使得试件在较高冲击气压下，出现局部剪切及压缩破坏，如图 12(e)所示。

随着预应力和加载速率的逐渐增加，裂纹扩展受二者综合影响。提高加载速度可以使得裂纹扩展速度有所提高(见表 4)。而随着预应力的增加，则出现裂纹扩展抑制现象，并出现局部微裂纹，裂纹扩展速度明显降低。

板状试件的选用，使得裂纹扩展可以达到较高

的裂纹扩展速度, 甚至可以达到瑞利波速的 0.57 倍。该研究结果与李地元等^[9]得到的裂纹扩展速度(200~400 m/s)相比较。除去岩石材料因素外, 其主要原因在于本试验的岩石板带有预制裂纹, 并且采用了带楔子头的入射杆加载样品; 而在李地元等^[9]试验中, 采用的是带孔的方形岩石板, 孔应力集中作用比预制裂纹要小。由上所述可知, 研究岩板的破坏行为可以有助于地质体板状结构(例如层状岩体等)的裂纹扩展机制研究。

4 结 论

通过设计合适的液压预加载和霍普金森压杆动态冲击相结合, 实现动、静载荷同时作用。结合 DIC 方法和超高速摄影技术, 实现了不同加载速率和不同预压力下岩板的动态裂纹扩展及断裂行为的研究。通过分析加载速率和预压应力对裂纹扩展速度、断裂韧性及破裂模式的影响, 主要结论如下:

(1) 该岩板试件裂纹扩展速度可达到瑞利波速的 0.57 倍, 验证了采用花岗岩岩板测试的优势。在特定预应力条件下, 岩板的裂纹扩展速率与动态断裂韧性具有明显的率相关性。随着加载速率的增加, 裂纹扩展速度和动态断裂韧性而增加, 试件破裂越严重。

(2) 特定冲击速度条件下, 随着静态预应力的增加, 裂纹扩展速度受到抑制, 裂纹扩展长度减小, 裂纹扩展速度下降, 甚至进入低速裂纹扩展范围。破坏模式由单一裂纹扩展向多条微裂纹萌生等复杂模式转变, 甚至出现止裂现象。

(3) 通过 DIC 方法结合断裂力学理论, 得到断裂韧性、裂纹尖端位置、裂纹扩展速度等重要断裂力学参量, 为复杂条件下岩板破坏研究提供了有力的试验及分析手段。

参考文献(References):

[1] ZHANG Q B, ZHAO J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(4): 1 411 - 1 478.

[2] KURUPPU M. Fracture toughness measurement using chevron notched semi-circular bend specimen[J]. *International Journal of Fracture*, 1997, 86(4): 33 - 38.

[3] GUO H, AZIZ N, SCHMIDT L. Rock fracture-toughness determination by the Brazilian test[J]. *Engineering Geology*, 1993, 33(3): 177 - 188.

[4] ZHOU Y X, XIA K, LI X B, et al. Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 49: 105 - 112.

[5] LI X B, ZHOU Z L, LOK T S, et al. Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(5): 739 - 748.

[6] OUCHTERLONY F. On the background to the formulas and accuracy of rock fracture toughness measurements using ISRM standard core specimens[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1989, 26(1): 13 - 23.

[7] FOWELL R J, HUDSON J A, XU C, et al. Suggested method for determining mode-i fracture-toughness using cracked chevron-notched Brazilian disc(CCNBD) specimens[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1995, 32(1): 57 - 64.

[8] XIA K, YAO W. Dynamic rock tests using split Hopkinson(Kolsky) bar system — A review[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 7(1): 27 - 59.

[9] 李地元, 成腾蛟, 周 韬, 等. 冲击载荷作用下含孔洞大理岩动态力学破坏特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(2): 249 - 260.(LI Diyuan, CHENG Tengjiao, ZHOU Tao, et al. Experimental study of the dynamic strength and fracturing characteristics of marble specimens with a single hole under impact loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(2): 249 - 260.(in Chinese))

[10] HALL W J, MOSBORG R J, MCDONALD V J. Brittle fracture propagation in wide steel plates[J]. *The Welding Journal*, 1957, 36(1): 1 - 8.

[11] FINEBERG J, GROSS S P, MARDER M, et al. Instability in the propagation of fast cracks[J]. *Physical Review B*, 1992, 45(10): 5 146 - 5 154.

[12] DAI F, XIA K, ZHENG H, et al. Determination of dynamic rock mode-I fracture parameters using cracked chevron notched semi-circular bend specimen[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, 78(15): 2 633 - 2 644.

[13] WANG Q Z, YANG J R, ZHANG C G, et al. Sequential determination of dynamic initiation and propagation toughness of rock using an experimental-numerical-analytical method[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, 141: 78 - 94.

[14] GAO G, HUANG S, XIA K, et al. Application of digital image correlation(DIC) in dynamic notched semi-circular bend(NSCB) tests[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(1): 95 - 104.

- [15] 宋义敏, 杨小彬, 金璐, 等. 冲击载荷作用下岩石 I 型裂纹动态断裂试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(11): 49 - 53.(SONG Yimin, YANG Xiaobin, JIN Lu, et al. Dynamic fracture test for rock I-type crack under impact load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(11): 49 - 53.(in Chinese))
- [16] 王怀文, 亢一澜, 谢和平. 数字散斑相关方法与应用研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(2): 195 - 203.(WANG Huaiwen, KANG Yilan, XIE Heping. Advance in digital speckle correlation method and its application[J]. Advance in Mechanics, 2005, 35(2): 195 - 203.(in Chinese))
- [17] 王学滨, 张楠, 潘一山, 等. 单轴压缩湿土样最大剪切应变场数字图像相关方法结果的统计分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 996 - 1 003.(WANG Xuebin, ZHANG Nan, PAN Yishan, et al. Statistical analyses of maximum shear strain fields for wet soil specimens in uniaxial compression using digital image correlation method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 996 - 1 003.(in Chinese))
- [18] ZHANG R, HE L. Measurement of mixed-mode stress intensity of factors using digital image correlation method[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(7): 1 001 - 1 007.
- [19] YONEYAMA S, MORIMOTO Y, TAKASHI M. Automatic evaluation of mixed-mode stress intensity factors utilizing digital image correlation[J]. Strain, 2006, 42(1): 21 - 29.
- [20] ALAM S Y, LOUKILI A, GRONDIN F. Monitoring size effect on crack opening in concrete by digital image correlation[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2012, 16(7): 818 - 836.
- [21] SUTTON M A, ZHAO W, MCNEILL S R, et al. Local crack closure measurements: development of a measurement system using computer vision and a far-field microscope[S]. ASTM Special Technical Publication, 1999, 1343: 145 - 156.
- [22] PATAKY G J, SANGID M D, SEHITOGLU H, et al. Full field measurements of anisotropic stress intensity factor ranges in fatigue[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 94: 13 - 28.
- [23] 郭文婧, 马少鹏, 康永军, 等. 基于数字散斑相关方法的虚拟引伸计及其在岩石裂纹动态观测中的应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3 196 - 3 200.(GUO Wenjing, MA Shaopeng, KANG Yongjun, et al. Virtual extensometer based on digital speckle correlation method and its application to deformation field evolution of rock specimen[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3 196 - 3 200.(in Chinese))
- [24] XIA K, ROSAKIS A J, KANAMORI H. Laboratory earthquakes: The sub-Rayleigh-to-supershear rupture transition[J]. Science, 2004, 303(5665): 1 859 - 1 861.
- [25] XIA K, ROSAKIS A J, KANAMORI H, et al. Laboratory earthquakes along inhomogeneous faults: directionality and supershear[J]. Science, 2005, 308(5722): 681 - 684.
- [26] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 50266—99 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社; 1999.(The National Standards Compilation Groups of the People's Republic of China. GB/T 50266—99 The standard of the engineering rock mass test method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.(in Chinese))
- [27] KURUPPU M D, OBARA Y, AYATOLLAHI M R, et al. ISRM-Suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(1): 267 - 274.
- [28] PAN B, LU Z, XIE H. Mean intensity gradient: An effective global parameter for quality assessment of the speckle patterns used in digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(4): 469 - 477.
- [29] SUTTON M A, LI N, GARCIA D, et al. Scanning electron microscopy for quantitative small and large deformation measurements Part II: Experimental validation for magnifications from 200 to 10, 000[J]. Experimental Mechanics, 2007, 47(6): 789 - 804.
- [30] KOLSKY H. Stress waves in solids[J]. Journal of Sound and Vibration, 1964, 1(1): 88 - 110.
- [31] SHAH S G, CHANDRA KISHEN J M. Fracture properties of concrete-concrete interfaces using digital image correlation[J]. Experimental Mechanics, 2011, 51(3): 303 - 313.
- [32] BURDEKIN F M, STONE D. The crack opening displacement approach to fracture mechanics in yielding materials[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1966, 1(2): 145 - 153.