

DOI: 10.11779/CJGE201909008

含倾斜弱面介质中动态裂纹扩展行为研究

许鹏¹, 杨仁树^{2,3}, 鞠杨¹, 夏开文⁴, 郭洋³

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083; 3. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 4. 天津大学水利仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为研究冲击荷载下运动裂纹遇到介质中倾斜弱面后的动态断裂行为, 采用霍普金森杆作为冲击加载装置, 利用高速相机记录倾斜弱面介质中运动裂纹的扩展过程, 并结合数字图像相关方法对裂纹周围应变场的演化过程、裂纹尖端的开裂应变以及裂纹的扩展速度进行了分析。结果表明, 在冲击荷载下, 运动裂纹在遇到弱面后易偏向弱面扩展, 裂纹偏转后的开裂应变和扩展速度都显著提高。此外, 应力加载率对运动裂纹的扩展有显著影响。随着加载率的提高, 动态裂纹沿弱面扩展一定距离后将再次进入基质扩展, 且运动裂纹沿弱面扩展的偏移距离逐渐减小。在高加载率下, 裂纹沿弱面扩展的速度基本保持稳定, 但再次穿过弱面后的裂纹数量和长度不断增加。在相同加载率下, 弱面的强度越低, 裂纹沿弱面扩展的距离越长。

关键词: 霍普金森杆; 弱面; 裂纹偏转; 应变场; 开裂应变

中图分类号: O383; TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)09-1645-08

作者简介: 许鹏(1987—), 男, 博士, 主要研究岩石动态断裂与工程爆破。E-mail: pxcmtd@163.com。

Experimental study on influences of inclined weak interface on the dynamic crack propagation behavior

XU Peng¹, YANG Ren-shu^{2,3}, JU Yang¹, XIA Kai-wen⁴, GUO Yang³

(1. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, Beijing 100083, China; 3. Civil and Resource Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 4. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to study the dynamic fracture behavior of layered materials with weak plane under impact loads combined with the split Hopkinson pressure bar, which is applied as an impact loading configuration, the dynamic fracturing process is recorded using the high speed camera, and the digital image correlation method is adopted to evaluate the strain fields around crack, failure strain and crack velocity. The results show that the running crack is more favorable to deflection after the crack encounters a weak plane under dynamic loading conditions, and the failure strain drops slightly after it deflects, while the crack velocity jumps to a high stage. Besides, the loading rate plays a significant role in crack propagation when passing through the weak interface. The crack length along the weak plane decreases with the increase of loading rate, and the running crack will expand to the matrix after it propagates to a certain distance along the weak plane. The crack velocity along the weak interface remains constant under a high loading rate, whereas both the number and the length of the crack increase after it passes through the weak plane. Moreover, the crack length along the weak plane increases with the decrease of the strength of the weak plane at a given loading rate.

Key words: split Hopkinson pressure bar; weak interface; crack deflection; strain field; fracturing strain

0 引言

长期以来, 固体材料在动载作用下裂纹的扩展行为一直是材料动态断裂理论研究中的一个重要内容, 引起了学者的广泛关注。例如, 在动载作用下, 由于岩体中含有大量的节理、弱面等结构面, 改变了裂纹在岩体中扩展的断裂特征, 对岩体中隧(巷)道掘进、

页岩气开采等有显著影响^[1-2]。因此, 研究裂纹在穿越弱面时的断裂特性对于研究预测裂纹在含弱面介质中

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0600903); 高等学校学科创新引智计划项目(B14006)

收稿日期: 2019-01-23

*通讯作者(E-mail: kaiwen@tju.edu.cn)

的扩展,改善含弱面介质的力学性能等方面具有重要的理论研究和现实意义。

一些学者对此进行了研究。Siegmund等^[3]采用数值模拟方法研究了动态裂纹穿越界面时裂纹尖端应力场的变化特征,发现裂纹在遇到弱面后,可能出现沿弱面扩展和穿越弱面扩展两种形式。He等^[4]研究了动态裂纹在界面材料中的扩展情况,分析了裂纹在穿越界面时尖端动态能量释放率的变化规律。Parmigiani等^[5]围绕复合材料中界面的强度和黏聚力对裂纹扩展行为的影响进行了研究。Xu等^[6]利用动光弹性试验研究了不同扩展速度的I型裂纹在遇到弱面后发生偏转的内在机制。Alam等^[7]试验研究了静载下不同角度的弱面对裂纹扩展的影响,发现存在临界角度使裂纹由偏向层理扩展转变为直接侵入层理扩展。Sundaram等^[8]分析了双介质材料中裂纹扩展的动态断裂特性。Yang等^[9-10]采用焦散线方法研究了圆孔、裂隙等缺陷对运动裂纹扩展的影响规律。岳中文等^[11]开展了爆生裂纹与介质中层理的相互作用的试验,分析了不同角度层理对裂纹扩展行为的影响。然而,由于动态荷载的复杂性,至今对于裂纹穿越弱面时尖端应变场的变化特征仍不甚清楚,且较少涉及研究不同加载率下裂纹穿越弱面时的扩展规律。因此,有必要进一步研究裂纹穿越层理等弱面时的变形破坏机理。

霍普金森杆作为实现高加载率的一个有效方法,已被广泛应用于研究材料在动载作用下的动态断裂问题^[12-13]。杨井瑞等^[14]利用霍普金森杆试验定量分析了加载率和裂纹扩展速度对岩石动态断裂的影响。陈静静^[15]采用霍普金森杆结合数字图像相关方法对 Al_2O_3 陶瓷、PMMA和聚合物材料凝胶以及聚四氟乙烯等材料在动载作用下的变形场进行了研究。

本文利用霍普金森杆开展了不同加载率下含弱面介质中运动裂纹扩展行为研究工作,通过高速数字相机建立图像采集系统,分析了运动裂纹在遇到弱面后的应变场演化特征,并对裂纹尖端的张开位移和裂纹扩展速度进行了分析,揭示不同加载率下弱面对动态裂纹扩展的影响规律。

1 试验系统

1.1 试验测试装置

霍普金森杆-数字图像相关法(split hopkinson pressure bar-digital image correlation, SHPB-DIC)综合测试系统如图1所示。该系统主要由气室、子弹、入射杆、透射杆和吸收装置组成的霍普金森杆以及高强度光源和高速数字相机组成的数字图像实时监测系统两部分组成。试验中所用的入射杆和透射杆选用直径为

25 mm的马氏体高强度钢,其弹性模量为200 GPa,屈服强度为2.5 GPa,能够对待测试件施加较高的加载率。子弹长度为200 mm;入射杆长度为1500 mm,入射杆上的应变片距离试件加载端787 mm;透射杆长度为1000 mm,透射杆上的应变片距离试件端522 mm。

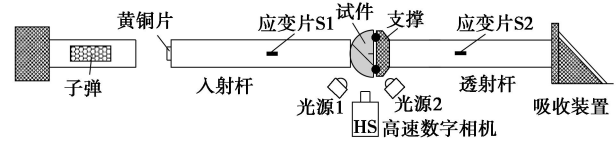
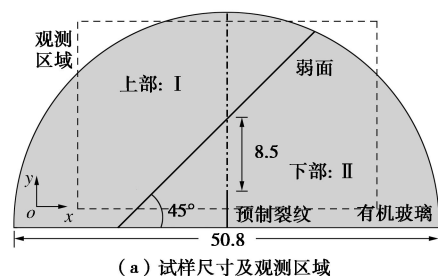


图1 试验系统装置图

Fig. 1 Experimental set-up of SHPB-DIC

数字图像实时监测系统用于记录试件变形的全过程,利用数字图像相关方法得到试件破坏过程中位移场的变化。数字图像相关法(digital image correlation, DIC)的核心思想是识别参考图像与变形后图像之间匹配性的一种运算算法^[16]。试验前,预先在试件表面制作散斑。试验时,利用预先设定的匹配算法追踪物体表面在加载过程中数字图像上的散斑点,获得散斑点的位移情况,进而得到材料表面的变形信息。结合拍摄裂纹可能的扩展速度以及观测区域的大小,本文设置相机的采样幅间隔为 $7.4 \mu\text{s}$,图像观测区域如图2(a)中所示。



(a) 试样尺寸及观测区域



(b) 观测区域的散斑图

图2 试验试件图

Fig. 2 Schematic graph of specimen

1.2 试验模型

由于半圆盘试件制作方便,断裂形式简单,在动态断裂测试中得到了广泛的应用,且已被国际岩石力学学会(ISRM)推荐为动态断裂测试的标准试件。因此,本文采用半圆盘试件进行试验测试,选用有机玻璃作为试验材料。图2(a)为试验试件简图。为研究

倾斜弱面对运动裂纹的影响,本文中设置倾斜弱面的倾角为45°。此外,为了避免裂纹沿弱面首先起裂,同时,确保预制裂纹在起裂后有足够的距离达到失稳扩展阶段,设置的预制裂纹的长度为4 mm,沿预制裂纹方向上,预制裂纹尖端到弱面的距离为8.5 mm。

制作试件时,首先,采用激光切割的方法分别在有机玻璃板上切割出试件的第I、第II两部分;然后,采用高强度速凝胶均匀的涂抹在试件的两个断面上,再将试件的I, II两部分沿试件的短边方向缓慢的闭合,这样有效避免了粘贴过程中在黏胶中出现气泡,同时保证了黏胶的均匀性;最后,在试件四周施加一定的均匀围压,防止试件两部分分开,并在室温下放置24 h,待达到黏结剂的最终强度后,即可去掉围压,制成一个完整的含弱面的带裂纹半圆盘试件。有机玻璃和黏结剂的基本物理力学参数见表1所示。预制裂纹设置在试件的第II部分,位于半圆盘的圆心处,制作时先切割出一个长度为3 mm的裂纹;再使用厚度为0.3 mm的锯条沿裂纹面继续切割1 mm。这样有效保证了裂纹尖端足够尖锐,确保了测试结果的可靠性。

最后,利用工业喷墨打印技术,在制作好的试件表面上喷涂预先设定好的圆形散斑,散斑直径在0.25~0.50 mm之间随机分布。通过设置变直径的散斑有效提高了数字图像相关方法的识别精度,提高了测试结果的准确度。观测区域的散斑图样如图2(b)所示,图中的实线表示弱面。

表1 材料物理力学参数表

Table 1 Physical and mechanical parameters of materials

名称	密度 (kg·m ⁻³)	弹性模量 (GPa)	泊松比	抗拉强度 (MPa)
有机玻璃	1190	3.1	0.32	70.3
黏结剂	1430	—	—	23

1.3 加载率计算

根据国际岩石力学学会(ISRM)提出的采用半圆盘试件确定材料I型动态断裂韧度的方法,对于带裂纹的半圆盘试件而言,预制裂纹尖端的应力强度因子可表示为^[17-18]

$$K_I = \frac{P_1 S}{dR^{3/2}} Y_1(a/R) \quad (1)$$

式中 P₁ 为入射杆作用于试件上的力, R 为半圆盘试件的半径,本文中取 R=25.4 mm; d 为半圆盘试件厚度,本文中取 d=12 mm; a 为预制裂纹长度,本文中取 a=4 mm; S 为两支撑的间距,本文中取 S=38 mm; Y₁ 为无量纲系数,其值与裂纹的几何参数 a/R 有关,可采用数值计算方法求出。当 S/2R=0.748, 且 a/R ∈ (0.1, 0.9) 时, 计算得到 Y₁ 可表示为^[18]

$$Y_1 = 0.763 - 1.407 \frac{a}{R} + 25.966 \left(\frac{a}{R}\right)^2 - 63.692 \left(\frac{a}{R}\right)^3 + 62.995 \left(\frac{a}{R}\right)^4 \quad (2)$$

式中, a 为裂纹长度, R 为半圆盘试件的半径。

由文献[17]可知, 试件加载率可通过试件断裂前裂纹尖端应力强度因子直线上升段的斜率得到, 如图3所示。

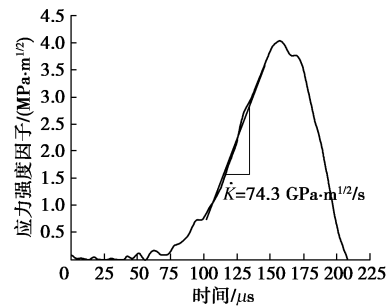


图3 试件加载率计算方法

Fig. 3 Method for calculating loading rate of specimen

2 应力平衡验证

试验利用霍普金森杆装置, 通过不同的充气气压来控制气腔压力, 调节子弹的撞击速度, 从而对试件施加不同的加载率。当子弹与入射杆相撞后, 入射杆端部产生弹性压缩波并沿杆轴向向前传播, 当弹性压缩波传递到试件端处时, 由于试件与入射杆的波阻抗不同, 入射波在界面处会产生一个反射波在入射杆内传播, 以及一个透射波在透射杆中传播。这样, 入射杆上的应变片 S1 就先后记录了入射应变 ε_i(t) 和反射应变 ε_r(t), 透射杆上的应变片 S2 记录了透射应变 ε_t(t)。对于 SHPB 试验系统, 入射杆和透射杆的材质和横截面积一般相同, 由于本文中采用的入射杆和透射杆的直径和材质相同, 因此, 根据一维弹性应力波理论, 作用在试件两端的力可表示为

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= AE[\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)] \\ P_2 &= AE\varepsilon_t(t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, A, E 分别表示入射杆和透射杆的横截面积和弹性模量。

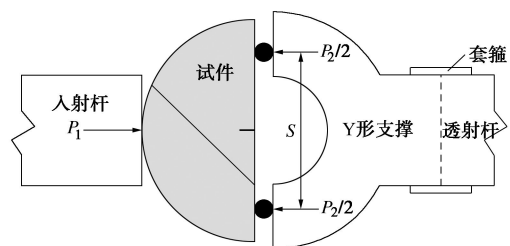


图4 试件受力简图

Fig. 4 Force diagram of specimen

试件的受力简图如图 4 所示。根据 SHPB 试验技术的基本假定，要保证试验结果的准确性，首先要保证试件两端的力满足动态力平衡条件，即

$$P_1 = P_2 \quad (4)$$

本文采用在与子弹碰撞的入射杆端部粘贴一个黄铜片作为波形整形器，通过延长入射波加载段的时间，保证入射波在加载时间段内在试件中来回反射 5 次以上，可以使试件两端的载荷基本满足动态力平衡状态^[18]。黄铜片的尺寸和厚度根据试验需要进行选取。图 5 表示加载率为 74.3 GPa·m^{1/2}/s 时，试件两端的动态力平衡曲线。从图 5 中可以看出，作用在试件两端的入射杆上的载荷 P_1 和 P_2 在整个变化过程中基本相等，保证了试验测试结果的可靠性。

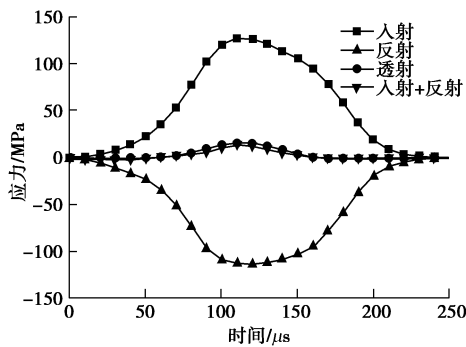


图 5 力平衡曲线

Fig. 5 Curves of dynamic force balance

3 试验结果

3.1 弱面对裂纹扩展行为的影响

(1) 应变场分析

采用数字图像相关方法分析了试件观测区域全场

的应变情况。图 6 和图 7 分别表示加载率为 40.8 GPa·m^{1/2}/s 时，观测区域内 x 方向和 y 方向的名义观测应变系列图像。观测应变既包含了试件真实变形所产生的应变，也包含了由于试件平移、转动而引起的观测位移，因而结果中显示的应变并非材料真实的应变。由于 y 方向为入射杆长度方向，试件在受到入射杆撞击后会沿入射杆方向移动，因此， y 方向观测的应变主要为因试件平移产生的， x 方向的应变受试件平移和转动的影响较小。因此，下文主要研究试件 x 方向的观测应变。

从图 6, 7 中可以看出，在加载初期，试件内 x 方向和 y 方向观测应变较大的区域分布较为分散，呈弥散状，其最大值分别约为 0.00145 和 0.0035，说明随着入射波在试件内部的多次反射，试件内部的应力逐渐达到动应力平衡状态（如图 6 (a)）。随后，试件内 x 方向的观测应变值逐渐增大，且其分布也由弥散状向预制裂纹尖端聚集，并呈带状分布（如图 6 (b)），当预制裂纹尖端 x 方向的最大应变值增加到 0.0152 时，裂纹沿预制裂纹端部起裂，并向前扩展，同时，观测区域内的 x 方向的应变也随着裂纹的扩展而沿裂纹面的两侧发展（如图 6 (c) ~ 6 (d)），而此时 y 方向的应变没有明显应变集中（7 (c) ~ 7 (d)），表明裂纹是在拉应力作用下的扩展。当运动裂纹与弱面相遇后，运动裂纹迅速转为沿弱面方向向上扩展（如图 6 (e) ~ 6 (f) 和图 7 (e) ~ 7 (f)），此时， x 方向和 y 方向的应变都有显著的应变集中，说明裂纹尖端的应力场已由拉伸应力场转变为拉剪复合应力场。

需要说明的是，由于本文中的分析区域包含了裂纹断裂后产生的缝隙，由于在对观测区域进行分析时

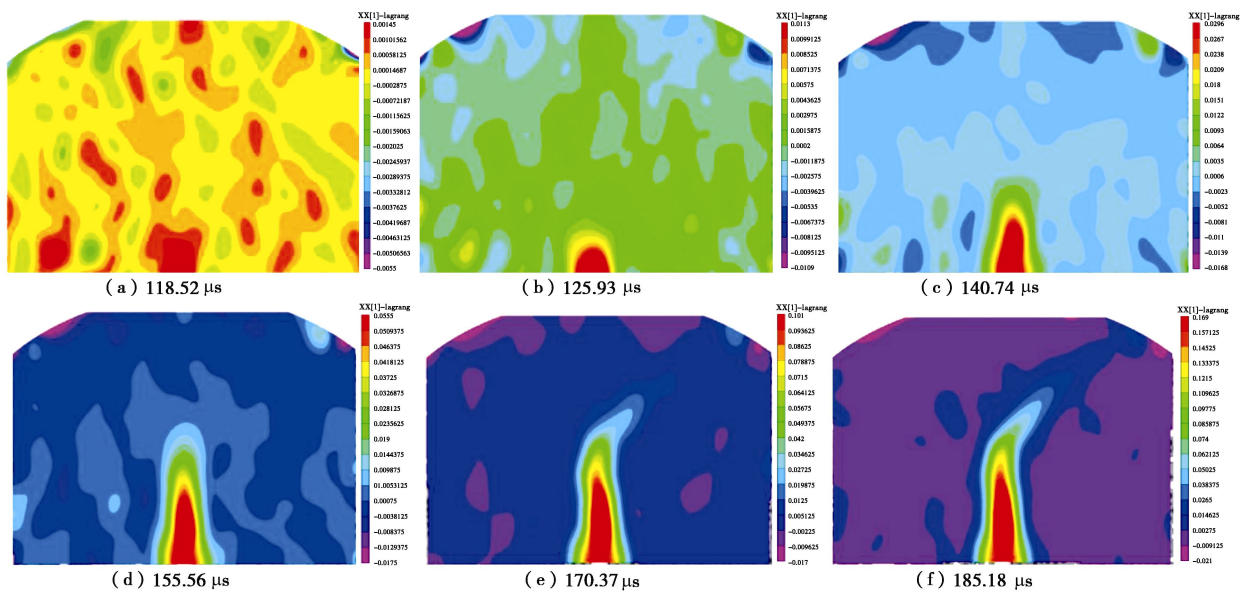


图 6 不同时刻试件观测区域内 x 方向的名义应变云图

Fig. 6 Measured strain fields of zone in x direction

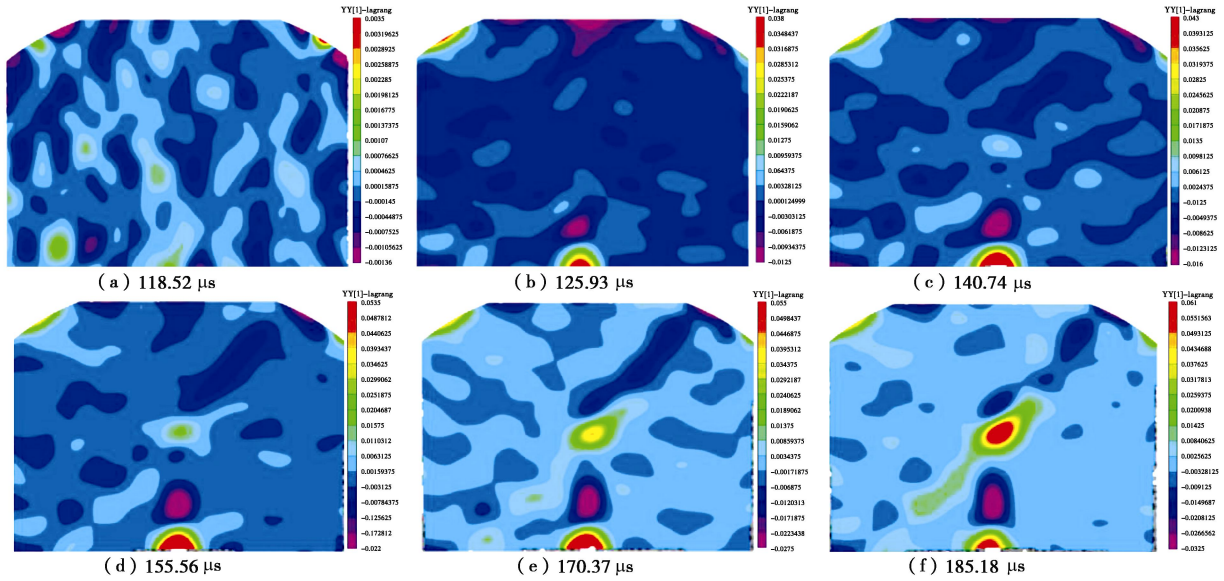


图 7 不同时刻试件观测区域内 y 方向的名义应变云图

Fig. 7 Measured strain fields of zone in y direction

无法扣除这部分缝隙,因而,当裂纹扩展以后,由于试件左右两半的转动,裂纹两侧的位移几乎呈线性变化,因而造成观测结果中显示的裂纹尖端后侧的应变值最大。因此,裂纹尖端的位置并非图中观测到的最大应变处,而是在最大应变前方的某一位置,为此,笔者认为采用 DIC 测试方法进行动态断裂问题的研究时,裂纹尖端宜采用开裂应变加以确定。

(2) 开裂应变分析

从裂纹扩展的角度看,脆性材料中裂纹形成的本源是连续体材料出现了变形不协调的问题,使材料受到的拉应变超出了材料所能承受的极限应变值。因此,可通过分析材料是否达到开裂应变来判定裂纹的起裂。本文采用数字图像相关方法得到了含弱面介质中运动裂纹在扩展过程中应变场的演化情况,并对动态裂纹断裂过程中材料的开裂应变进行了研究。如图 8 所示,通过在基质和弱面中裂纹扩展路径上分别设置 6 个应变引伸计,为了表示方便,将基质中设置的主应变监测点自下往上分别命名为 M-1, M-2, ..., M-6,如图 8 中的虚线包围着的监测点;将弱面中设置的主应变监测点自下往上分别命名为 W-1, W-2, ..., W-6,如图 8 中的实线包围着的监测点。

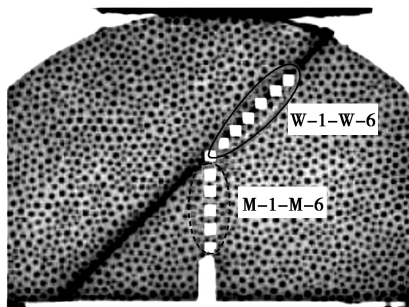


图 8 应变引伸计监测位置

Fig. 8 Set-up of strain-measuring devices

图 9 和图 10 分别表示基质中弱面上各监测点的主应变变化曲线。由图 9, 10 可知:当入射波作用在试件上时,裂纹尖端前缘因受到拉应力作用而产生变形,裂纹前缘的张开应变逐渐增大,此时应变引伸计测得的应变呈非线性增长;当裂纹尖端的张开应变达到材料所能承受的裂纹开裂应变之后,裂纹开始扩展,试件产生绕裂纹尖端的刚体转动,此时应变引伸计测得的应变呈线性增长。因此,本文将监测点处的主应变由非线性增长转化为线性增长时对应的主应变值作为材料的开裂应变。基于以上分析方法,得到基质中的引伸计 M-1, M-2, ..., M-6 处裂纹的开裂应变依次为 $6440\mu\epsilon$, $2722\mu\epsilon$, $3497\mu\epsilon$, $4675\mu\epsilon$, $1724\mu\epsilon$, $2374\mu\epsilon$ 。由开裂应变的变化可知,裂纹起裂时的开裂应变一般高于裂纹扩展中的开裂应变,这与裂纹的起裂韧度大于裂纹传播韧度的规律相同。

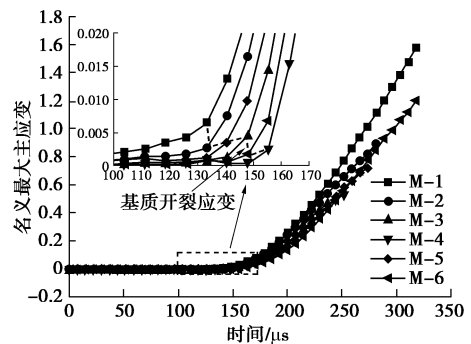


图 9 基质开裂应变 ($\dot{K}=40.8 \text{ GPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$)

Fig. 9 Failure strains of PMMA matrix at loading rate of $40.8 \text{ GPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$

基于以上方法可以确定裂纹在基质和弱面中扩展时的开裂应变。由图 9 和图 10 分析可知,当加载率为

40.8 GPa·m^{1/2}/s 时, 裂纹在基质体和弱面中扩展时的平均开裂应变分别为 2998μ ϵ 和 4921μ ϵ 。

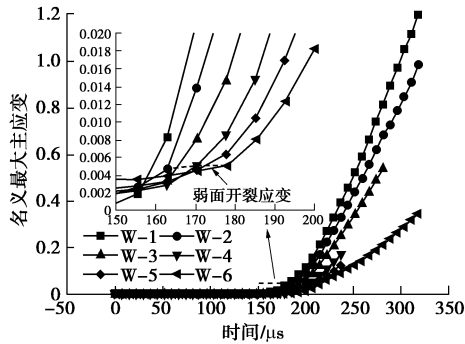


图 10 弱面开裂应变 ($\dot{K} = 40.8 \text{ GPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$)

Fig. 10 Failure strains of weak plane at loading rate of 40.8 GPa·m^{1/2}/s

3.2 加载率对动态裂纹扩展行为的影响

(1) 动态裂纹扩展行为分析

采用霍普金森杆试验系统, 通过改变充气气压可以对试件施加不同的加载率。在不同的加载率下, 扩展裂纹在遇到弱面后表现出的断裂行为有所不同。根据裂纹扩展轨迹, 将裂纹的扩展过程划分为 3 个阶段, 第 1 阶段为裂纹从预制裂纹尖端起裂失稳扩展阶段; 第 2 阶段为失稳裂纹在遇到弱面后沿弱面扩展阶段; 第 3 阶段为沿弱面扩展的运动裂纹再次由弱面进入基质扩展的阶段。

图 11 表示不同加载率下试件最终的断裂效果图。由图 11 可知, 节理弱面对运动裂纹扩展轨迹的影响主要体现在以下两个方面。一方面, 运动裂纹与节理弱面相遇后, 裂纹没能直接穿过弱面扩展, 而是迅速沿弱面倾斜扩展, 此时裂纹将受到拉剪复合应力场的影响; 另一方面, 当试件受到的加载率较低时 (小于 40.8 GPa·m^{1/2}/s), 裂纹只能沿弱面扩展, 而不能穿过弱面。

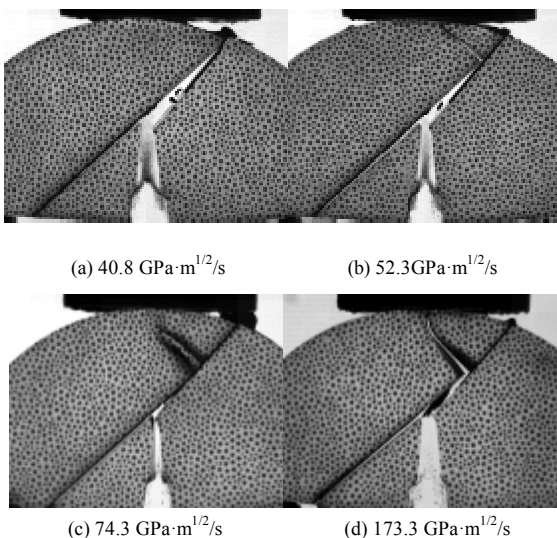


图 11 试件最终断裂效果图

Fig. 11 Fractured results of specimen with different loading rates

随着加载率的提高, 运动裂纹沿弱面扩展一段距离后会再次进入材料基体, 且裂纹沿弱面扩展的距离随着加载率的提高而有所减小, 同时, 裂纹再次由弱面向基体扩展时产生的数量和长度也随加载率的提高而有所增加。

结合试验结果, 不难发现, 随着加载率的提高, 在基体中扩展的运动裂纹穿透弱面继续扩展的能力也不断增强, 加载速率越高, 穿透弱面扩展的裂纹的数量越多, 长度也越长。造成这一现象的原因主要是因为随着加载率的提高, 裂纹尖端释放能量的速率相应提高, 因而裂纹扩展速度增大。当裂纹扩展速度达到极限时, 裂纹将形成分叉, 并偏向最大能量释放率的方向扩展。这一现象可以较好地解释爆破后岩体的破碎机制。当炸药在炮孔中起爆后, 离炮孔越近的区域, 材料受到的加载率也就越高, 爆生裂纹在运动过程中遇到节理、裂隙等弱面时, 往往会首先沿弱面扩展一段距离后再穿过弱面扩展, 因而, 炮孔近区的岩体被切割成许多碎小的岩块, 即传统爆破理论中的粉碎区。随着爆炸应力波由炮孔处向外传播, 爆炸应力波幅值不断衰减, 材料受到的加载率也迅速下降, 运动裂纹穿过弱面扩展的能力减弱, 裂纹沿节理弱面扩展, 形成较大的裂隙网络。

(2) 裂纹扩展速度分析

图 12 为不同加载率时, 运动裂纹扩展速度随时间的变化曲线。图中★表示从预制裂纹尖端起裂的运动裂纹与弱面贯通时所对应的时刻。从图 12 中可以看出, 在相同加载率下, 在基质中传播的裂纹扩展速度较在弱面中传播的裂纹扩展速度小。当加载率为 40.8 GPa·m^{1/2}/s 时, 从预制裂纹尖端起裂的裂纹在基质中传播的裂纹扩展速度较低, 其最大值为 216 m/s, 随后, 当运动裂纹遇到弱面后立即沿弱面扩展, 其扩展速度很快上升到 381 m/s 后基本呈匀速扩展直至完全断裂。当加载率增大到 52.3 GPa·m^{1/2}/s, 运动裂纹在基质体中扩展的速度呈现快速上升的特点, 并达到最大值 288 m/s。由于相机的拍摄幅间隔较大, 试验中未能观察到裂纹在基质体中的稳定扩展。随后, 运动裂纹与倾斜弱面相遇, 并沿弱面扩展, 此时裂纹在弱面中的扩展速度基本稳定在 470 m/s。随着加载率的继续增大, 基质体中裂纹的上升速率逐渐增加, 并最终均基本稳定在 300 m/s; 当裂纹扩展至弱面后, 裂纹的扩展速度再次升高, 并基本稳定在 540 m/s。造成弱面中裂纹扩展速度上升的原因与裂纹尖端携带的能量有关。当裂纹扩展到弱面时, 由于裂纹在弱面中传播所消耗的能量较裂纹在基质中传播消耗的能量低, 因此, 当裂纹与弱面贯通后, 裂纹更易沿弱面扩展。同时, 由于裂纹扩展单位长度消耗的能量减少, 更多的能量转

化为裂纹扩展的动能,因而,裂纹的扩展速度有所提高。

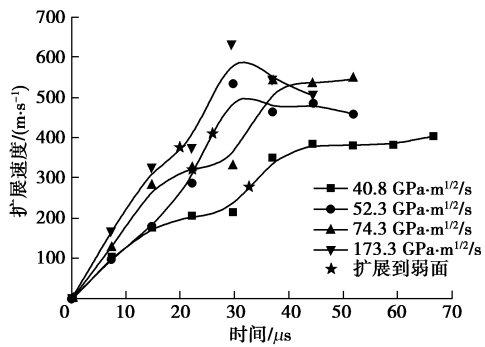


图12 裂纹扩展速度随时间变化曲线

Fig. 12 Curves of crack velocity versus time with different loading rates

随着加载率的提高,裂纹尖端携带的能量增加,促使在基质和弱面中传播的裂纹的扩展速度相应增大。需要指出的是,裂纹的扩展速度不会无限增大,当裂纹的扩展速度达到某一极限值后,裂纹的速度不再增加,更多的能量引起再次向基质中扩展的裂纹数量增多,这与图11中观察到的试验现象相吻合。

最后,需要指出的是,当裂纹朝向某一特定角度的弱面扩展时,除加载率外,弱面的强度对运动裂纹在弱面中偏转的距离也有较大影响,在相同的加载率下,弱面强度越弱,裂纹更倾向于沿弱面扩展。在工程爆破中,层理越发育的岩体越难形成较好的爆破效果。因此,通过改善炮孔布置、调整装药结构以及裂纹与弱面界面之间的关系等,能够显著改善隧(巷)道周边成型质量。这对于工程施工尤为重要。

4 结 论

(1) 在含弱面介质中,裂纹在遇到弱面后易偏向弱面扩展,裂纹尖端的应力场由拉应力场转变为拉剪复合应力场,且偏转后裂纹的开裂应变和扩展速度均迅速增大。

(2) 在动态荷载下,加载率对裂纹穿越弱面时的扩展行为有显著影响。随着加载率的提高,裂纹沿弱面偏转的距离逐渐减小,表现为裂纹沿弱面扩展一定距离后再次进入基质扩展。

(3) 在一定范围内随着加载率的提高,裂纹穿越弱面后的扩展速度逐渐增大。但存在极限速度,使裂纹尖端的能量无法迅速释放,多余的能量迫使裂纹再次穿过弱面向基质中扩展。

(4) 随着加载率的提高,从弱面向基质中再次扩展的裂纹数量和长度不断增多。

参考文献:

[1] 孙可明,张树翠.含层理页岩气藏水力压裂裂纹扩展规律

解析分析[J].力学学报,2016,48(5):1229-1237.(SUN Ke-ming,ZHANG Shu-cui. Hydraulic fracture propagation in shale gas bedding reservoir analytical analysis[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(5): 1229-1237. (in Chinese))

- [2] 刘刚,姜清辉,熊峰,等.多节理岩体裂纹扩展及变形破坏试验研究[J].岩土力学,2016,37(增刊1):151-158.(LIU Gang,JIANG Qing-hui,XIONG Feng,et al. Experimental study of crack propagation and deformation failure of multiple-jointed rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1): 151-158. (in Chinese))
- [3] SIEGMUND T, FLECK N A, NEEDLEMAN A. Dynamic crack growth across an interface[J]. International Journal of Fracture, 1997, 85(4): 381-402.
- [4] HE Ming-Yuan, HUTCHINSON J W. Crack deflection at an interface between dissimilar elastic materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(9): 1053-1067.
- [5] PARMIGIANI J P, THOULESS M D. The roles of toughness and cohesive strength on crack deflection at interfaces[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2006, 54(2): 266-287.
- [6] XU L R, HUANG Y Y, ROSAKIS A J. Dynamic crack deflection and penetration at interfaces in homogeneous materials: experimental studies and model predictions[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2003, 51(3): 461-486.
- [7] ALAM M, PARMIGIANI J P, KRUSIC J J. An experimental assessment of methods to predict crack deflection at an interface[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 181: 116-129.
- [8] SUNDARAM B M, TIPPUR H V. Dynamics of crack penetration vs branching at a weak interface: an experimental study[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2016, 96: 312-332.
- [9] YANG R, XU P, YUE Z, et al. Dynamic fracture analysis of crack-defect interaction for mode I running crack using digital dynamic caustics method[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, 161: 63-75.
- [10] 杨仁树,丁晨曦,杨国梁,等.微差爆破的爆生裂纹扩展特性试验研究[J].振动与冲击,2017,36(24):97-102.(YANG Ren-shu,DING Chen-xi,YANG Guo-liang,et al. Tests for blasting induced crack propagation characteristics of short-delay blasting[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(24): 97-102. (in Chinese))

- [11] 岳中文, 宋耀, 王煦, 等. 不同倾角预制裂纹缺陷与运动裂纹的相互作用[J]. 爆炸与冲击, 2017, **37**(1): 162 - 168. (YUE Zhong-wen, SONG Yao, WANG Xu, et al. Interaction between a pre-existing crack defect with different angles and a running crack[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, **37**(1): 162 - 168. (in Chinese))
- [12] LINDHOLM U. Some experiments with the split Hopkinson pressure bar[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1964, **12**(5): 317 - 35.
- [13] WANG Q Z, FENG F, NI M, et al. Measurement of mode I and mode II rock dynamic fracture toughness with cracked straight through flattened Brazilian disc impacted by split Hopkinson pressure bar[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, **78**(12): 2455 - 2469.
- [14] 杨井瑞, 张财贵, 周妍, 等. 用 SCDC 试样测试岩石动态断裂韧度的新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(2): 279 - 292. (YANG Jing-rui, ZHANG Cai-gui, ZHOU Yan, et al. A new method for determining dynamic fracture toughness of rock using SCDC specimens[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(2): 279 - 292. (in Chinese))
- [15] 陈静静. 基于高速 DIC 方法的脆性材料动态力学性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014. (CHEN Jing-jing. Study on the dynamic mechanical properties of brittle materials by high-speed DIC[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014. (in Chinese))
- [16] CHU T C, RANSON W F, SUTTON M A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics[J]. Experimental Mechanics, 1985, **25**(3): 232 - 244.
- [17] CHEN R, XIA K, DAI F, et al. Determination of dynamic fracture parameters using a semi-circular bend technique in split Hopkinson pressure bar testing[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, **76**(9): 1268 - 1276.
- [18] ZHOU Ying-xin, XIA Kai-wen, LI Xi-bing, et al. Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and Mode-I fracture toughness of rock materials[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2012, **49**(1): 105 - 112.