

中低速冲击载荷作用下 SCT 岩石试样 I 型裂纹的动态扩展行为

董玉清^{1,2}, 朱哲明^{1,2}, 王蒙^{1,2}, 周磊^{1,2}, 应鹏^{1,2}

- (1. 四川大学 深地科学与工程教育部重点实验室, 四川 成都, 610065;
2. 四川大学 四川大学建筑与环境学院, 四川 成都, 610065)

摘要: 为研究侧开单裂纹三角形(SCT)岩石试样的动态扩展行为和断裂韧度, 采用落锤冲击实验系统进行动态加载, 通过裂纹扩展计(CPG)得到裂纹的断裂时间和扩展速度; 用有限差分软件 AUTODYN 进行数值模拟, 验证实验结果的可靠性; 将实验测量的载荷条件代入有限元软件 ABAQUS 建立的数值模型中, 得到动态应力强度因子时程曲线, 通过普适函数修正后, 利用断裂时间得到动态断裂韧度。研究表明: SCT 试件构型能够较好地应用于岩石动态扩展行为的研究; 砂岩的扩展韧度与裂纹扩展速度呈负相关; 数值模拟得到的裂纹扩展路径与实验结果基本一致, 裂纹扩展速度不为常数; 岩石裂纹动态扩展过程中可能存在止裂现象, 止裂韧度大于扩展韧度, 但与起裂韧度相差不大。

关键词: 侧开单裂纹三角形试件; 动态起裂韧度; 动态扩展韧度; 落锤冲击; 数值模拟

中图分类号: TU 45

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2018)11-2821-10

Mode I crack dynamic propagation behavior of SCT specimens under medium-low speed impact load

DONG Yuqing^{1,2}, ZHU Zheming^{1,2}, WANG Meng^{1,2}, ZHOU Lei^{1,2}, YING Peng^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Deep Underground Science and Engineering of Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. School of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to study crack dynamic propagation behavior and rock fracture toughness, single cleavage triangle (SCT) specimens were used. By using these specimens and a drop weight test system, impact experiments were performed, and the crack propagation velocity and the fracture time were measured by crack propagation gauges(CPG). In order to examine the effectiveness of the experiment results, finite difference numerical models were established by using AUTODYN. Finite element code ABAQUS was used to calculate crack dynamic stress intensity factors(SIF) based on numerical models and the measured loading curves, and the curve of crack dynamic SIF versus time was obtained. The fracture toughness was determined according to the correction universal function and the fracture time measured by CPG. The results show that the SCT specimen is suitable for the study of crack dynamic propagation behavior and fracture toughness. Propagation toughness decreases with the increase of the crack propagation velocity. The crack propagation paths obtained from numerical simulation are basically the same with those of the test results, and the crack propagation speed is not a constant. In the process of crack propagation, crack arrest may happen, in which arrest

收稿日期: 2017-12-26; 修回日期: 2018-02-28

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(11672194, 11702181); 四川省安全监管局安全生产科技项目(aj20170515161307); 四川省科技计划项目(2018JZ0036) (Projects(11672194, 11702181) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (aj20170515161307) supported by Safety Production Science and Technology Program of Sichuan Administration of Work Safety; Project(2018JZ0036) supported by Science and Technology of Sichuan Province)

通信作者: 朱哲明, 教授, 博士生导师, 从事岩石力学与采矿工程的研究; E-mail: zhemingzhu@hotmail.com

toughness is higher than crack propagation toughness, and the difference between the initiation toughness and arrest toughness is slight.

Key words: single cleavage triangle(SCT) specimen; dynamic initiation toughness; dynamic propagation toughness; drop weight impact; numerical simulation

岩石是一种典型的工程材料,其内部存在大量的节理、裂隙等缺陷,研究岩石裂纹扩展规律具有重要意义。经典断裂力学理论基本能够解释岩石承受静载荷作用时的破坏行为,但在实际工程中,岩石结构往往承受动载荷的作用,如地震、爆炸等,并且这些动载荷通常伴随着巨大的破坏作用,严重影响了工程结构的稳定性。在动载荷作用时,材料的惯性效应使得应力波的传播十分复杂,经典断裂力学理论和测试方法并不适用^[1]。分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)装置的广泛使用极大地促进了岩石断裂动力学的实验研究^[2-4]。实验-数值法^[5-6]、应变片法^[3, 7]和高速摄影法^[8-10]是当前较为普遍的实验方法。但这些研究大多都停留在裂纹的起裂阶段,对裂纹的动态扩展行为和止裂现象并未进行深入研究。除此之外,SHPB装置入射杆和透射杆的直径限制了试件如中心直裂纹巴西圆盘(CSTFBD)^[11]、巴西半圆盘(SCB)^[12]等的尺寸。由于试件尺寸较小,导致应力波传到边界后又迅速回到裂纹尖端,形成复杂的应力场;同时小试件的裂纹扩展距离也较短,不利于研究裂纹扩展的全过程。采用落锤冲击实验装置作为加载装置,对试件尺寸的限制较小。潘峰等^[13]利用落锤装置对不同加载速率下特殊设计的三点弯曲梁的破坏进行了实验研究;宋义敏等^[14]同样采用落锤实验系统,以数字散斑方法作为观测方法,研究了花岗岩裂尖应力强度因子与预置裂纹长度之间的关系,但其都未对裂纹的动态扩展韧度进行相关研究。试件构型对岩石断裂行为的研究有着至关重要的影响,大尺寸试件能够减小边界反射波对裂纹扩展的影响,从而更利于研究裂纹扩展的本质特征。已有的试件构型如SCDC^[15-16], SCSC^[17-18]和VB-SCSC^[19]满足大尺寸构型的基本要求,但并未得到广泛认可。采用新试件构型即侧开单裂纹三角形(single cleavage triangle, SCT)试件进行岩石的动态断裂力学行为研究,除了能满足大尺寸试件实验的基本要求之外,还具有结构简单、易于加工的特点。本文作者基于SHPB实验原理,对SCT试件进行落锤冲击试验,研究SCT试件I型裂纹的扩展规律;采用有限差分法软件AUTODYN软件进行数值模拟,分析裂纹扩展过程中的试件的应力变化;使用实验-数值法得到岩石的动态起裂韧度和扩展韧

度,并将实验结果与数值模拟结果进行对比。

1 SCT 试件及落锤实验装置

1.1 试件构型

试件构型大小对研究岩石的动态起裂、扩展和止裂现象具有重要意义。已有研究大多集中于裂纹的起裂韧度,但也有不少研究者发现了止裂现象^[16-20]。RAVI-CHANDAR等^[20]认为止裂现象可能是试件边界反射波和原来的应力波叠加所致。因此,为尽量减小边界反射波对裂纹扩展的影响,试件应当足够大。SCT试件示意图如图1所示。试件宽度为200 mm,高度为325 mm,开口为边长为75 mm的等边三角形,预制裂纹为30 mm,由1 mm厚的锯条切割形成,并进行锐化处理。试件预留了足够长的裂纹扩展距离,能够尽量减小边界反射波的对裂纹扩展的影响。

SCT试件选用隆昌青砂岩,隆昌青砂的弹性模量为15.9 GPa,泊松比为0.3,动态抗拉强度为30 MPa,密度为2 265 kg/m³,纵波波速为2 563 m/s, Rayleigh波速为1 338.13 m/s。压缩波通过入射板加载到试件上,由于三角形开口的作用,在裂纹尖端产生拉伸应力,当拉伸应力超过岩石的动态抗拉强度时,裂纹开始扩展。为较好地反映试验测试结果,尽量避免试验的偶然性,本文准备了30个试件进行试验。

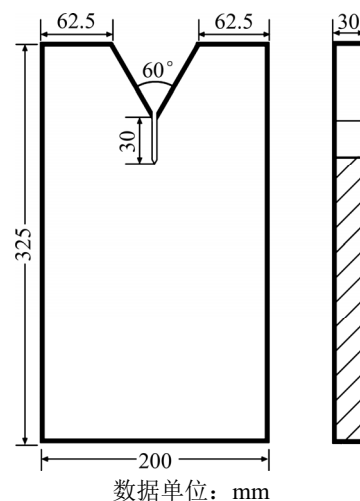


图1 SCT试件示意图

Fig. 1 Diagram of a single cleavage triangle (SCT) specimen

1.2 落锤实验装置

实验采用中低速冲击落锤实验装置,如图 2 所示。由图 2 可知:装置主体由落锤、入射板及透射板 3 部分组成。在落锤与入射板撞击端粘贴黄铜片作为整形器,以减少高频振荡并延长加载时间;透射板底部与水泥阻尼器相接触,将大部分应力波传入大地,尽量消除反射波。

冲击试验装置的入射板和透射板都采用弹性板材料即 LY12CZ 铝合金,弹性模量为 72 GPa,泊松比 ν

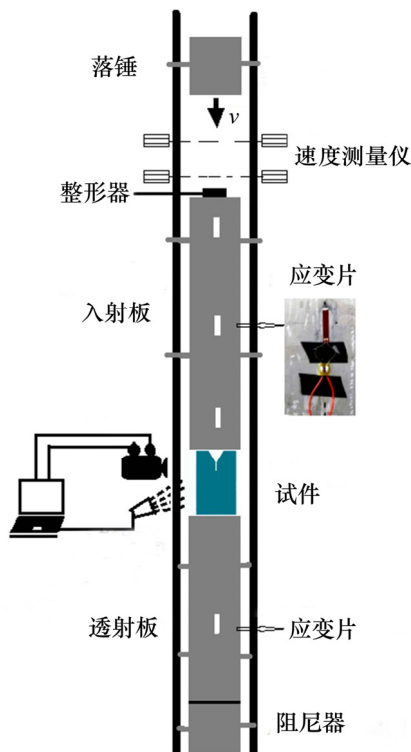


图 2 落锤冲击实验装置

Fig. 2 Drop-weight test system

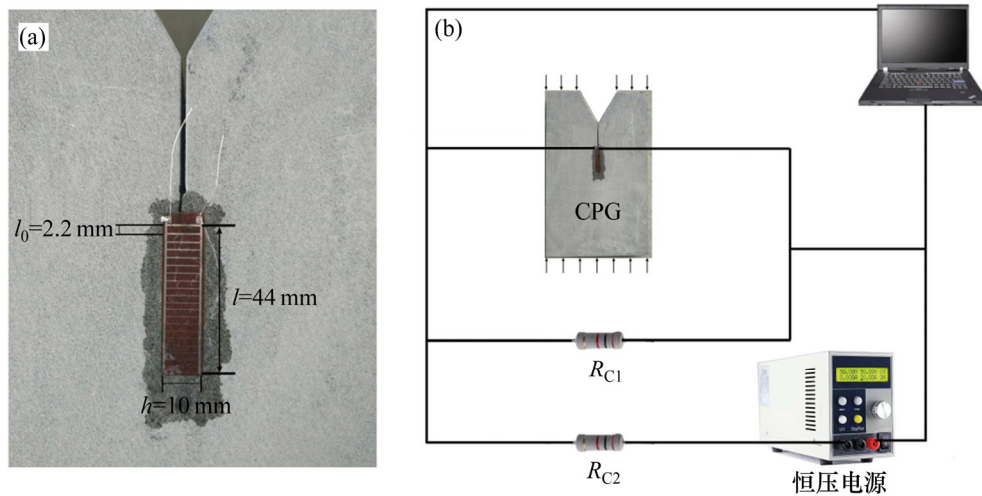
为 0.3;入射板长度 $l_1=3\ 000\ \text{mm}$,宽度为 300 mm,厚度为 30 mm;透射板长度 $l_2=1\ 000\ \text{mm}$,宽度和厚度与入射板的相同。

实验开始前先将试件两端涂抹黄油,然后置于入射板和透射板之间,避免局部摩擦导致试件产生弯折等失稳破坏,并注意保持试件位置居中,保证受力均匀。在入射板和透射板上分别粘贴应变片,在裂纹尖端粘贴裂纹扩展计(crack propagation gauge, CPG)用于测量载荷以及裂纹扩展时间,实验时落锤高度可由红外线高度测量仪测量。当落锤自由落体冲击入射板后,超动态应变仪将采集应变片和 CPG 的电压信号,从而得到入射端和透射端载荷信息以及试件上裂纹的扩展时间。

落锤冲击实验装置能够满足大尺寸试件的试验要求,这对于研究岩石、混凝土等不均匀脆性材料的断裂力学行为具有重要意义。大尺寸试件能够尽可能避免试件因大直径颗粒和裂纹等缺陷造成的试验结果的不稳定,同时还能给裂纹充分的扩展空间,有利于深入研究裂纹的动态扩展规律。

1.3 裂纹扩展计及其工作原理

裂纹扩展计的型号为 BKX3.5-10CY,由玻璃丝布基底和敏感栅丝 2 个部分组成,其中敏感栅丝由 21 根等长度但宽度不同的卡玛铜薄片并联,如图 3(a)所示。裂纹扩展计敏感栅总有效长度 $l=44\ \text{mm}$,宽度 $h=10\ \text{mm}$,相邻 2 根栅丝之间的间距 $l_0=2.2\ \text{mm}$ 。将裂纹扩展计沿着裂纹预计扩展路径粘贴并保证第 1 根栅丝和裂纹尖端重合,当裂纹扩展时,敏感栅丝断裂,裂纹扩展计的电阻发生变化,导致 CPG 两端的电压信号发生突变形成台阶信号。本文 CPG 的初始电阻为 $3.5\ \Omega$,采用 16 V 恒压电源提供电压,数字示波器采



(a) 裂纹扩展计; (b) 测试电路

图 3 裂纹扩展计及其测试电路示意图

Fig. 3 Diagram of crack propagation gauge and its measuring system

集 CPG 在裂纹扩展过程中因栅丝断裂引起的电压台阶信号。为防止 CPG 因电流过大导致电路超过负荷,实验电路中将 CPG 与 1 个 $R_{C1}=50 \Omega$ 的电阻并联,然后与 1 个 $R_{C2}=50 \Omega$ 的电阻串联,如图 3(b)所示。

2 SCT 试件动态断裂实验

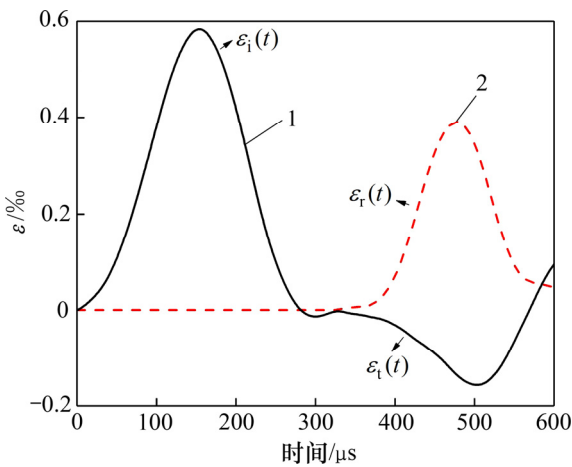
2.1 动态载荷

采用落锤冲击实验装置进行冲击实验,加载高度可通过红外线高度测量仪进行测量并调整,通过预实验发现当测量高度为 1.500~2.500 m 时,实验效果较好。在实验过程中,超动态应变仪对入射板和透射板上应变片的电压信号进行采集,并存储在数字示波器中。实验中电桥单臂测量输出电压 U_0 和应变 ε 之间的关系可表示为

$$\varepsilon = \frac{4U_0}{nEK} \quad (1)$$

式中:供桥电压 $E=2 \text{ V}$;灵敏度系数 $K=2.1$;超动态应变仪的增益系数 $n=1 \text{ 000}$ 。

将超动态应变仪采集的电压信号通过式(1)转化为应变随时间变化的曲线,使用 Origin 软件对曲线进行降噪处理以消除实验过程中外界环境中的声波等对试验数据的影响,最终得到入射端和透射端应变-时间曲线,如图 4 所示(其中 ε_i 为入射波, ε_r 为反射波, ε_t 为透射波)。根据一维弹性应力波假设,入射板对试件的载荷 P_u 为入射波和反射波的叠加,透射板对试件的载荷 P_1 可直接通过透射波得到, P_u 和 P_1 计算公式如下:



1—入射端; 2—透射端。

图 4 入射板和透射板上应变片的应变-时间曲线

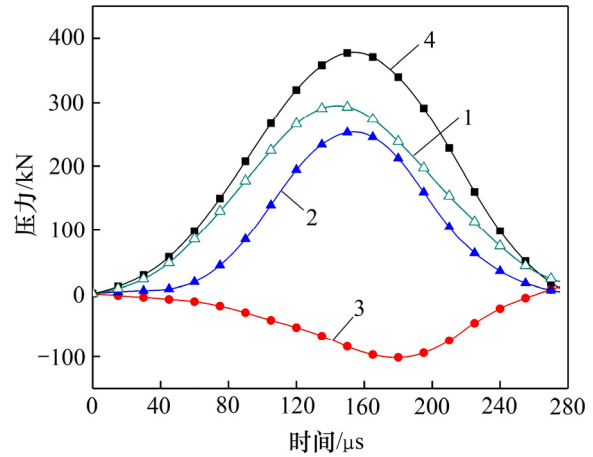
Fig. 4 Curves of strain-time of strain gauge on incident and transmitted bars

$$P_u = EA(\varepsilon_i + \varepsilon_r) \quad (2)$$

$$P_1 = EA\varepsilon_t \quad (3)$$

式中: E 为铝合金弹性模量; A 为入射板和透射板的横截面积。

最终作用在试件上的载荷如图 5 所示。图 5 中的载荷历史曲线将作为相应的载荷条件添加到数值模拟实验中。



1—入射波+反射波(P_u); 2—透射波(P_1); 3—反射波; 4—入射波。

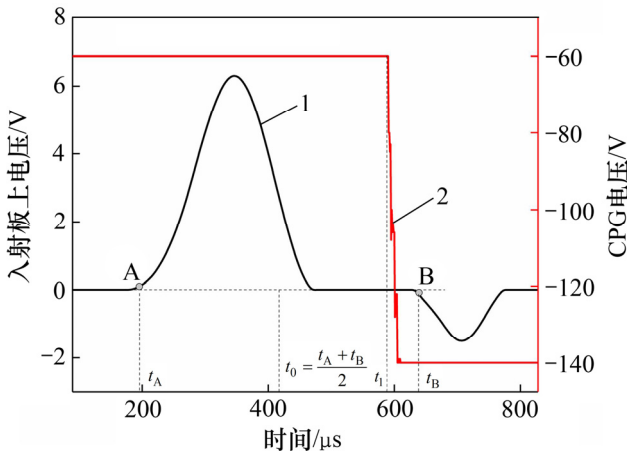
图 5 作用在试件上的载荷

Fig. 5 Loads on the specimens

2.2 动态起裂时间及 CPG 测试结果

落锤冲击实验中的起裂时间是数值-解析法研究岩石断裂韧度的重要参数。当应力波通过入射板传到试件上端时,在接触面上会立即产生反射,因此入射波和反射波波头的中间时刻即为应力波传入试件顶部的时刻。寻找粘贴在入射板上应变片测量的入射波波头 A 和反射波波头 B^[21] 对应的时间 t_A 和 t_B ,应变片和 CPG 的电压信号变化如图 6 所示。其中 t_0 为应力波传到试件顶部的时间, $t_0 = \frac{t_A + t_B}{2}$; t_1 为 CPG 第 1 根丝的断裂时间,则裂纹的动态起裂时间 $t_i = t_1 - t_0$ 。

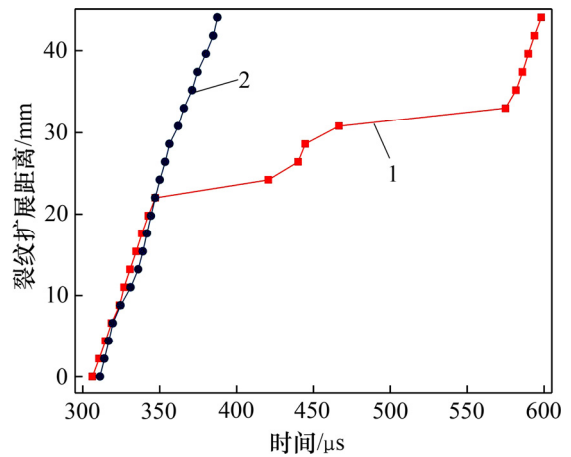
图 7 所示分别为试件 18 和试件 28 的 CPG 电压信号及其对时间的导数。试件 18 和试件 28 落锤的高度分别为 1.732 m 和 2.026 m。将 CPG 的电压信号对时间求导,导数取得极值时即为对应栅丝的断裂时间。相邻栅丝之间距离为固定值 2.2 mm,由此可以得到裂纹扩展速度随扩展距离的变化,如图 8 所示。结合图 7 和图 8 可知:试件 18 在裂纹扩展至第 11 根和第 15 根栅丝时都出现了较长时间的停滞,分别为 73.52 μs 和 108.28 μs ,很可能发生了止裂现象。



1—应变片; 2—CPG。

图 6 应变片和 CPG 的电压信号变化

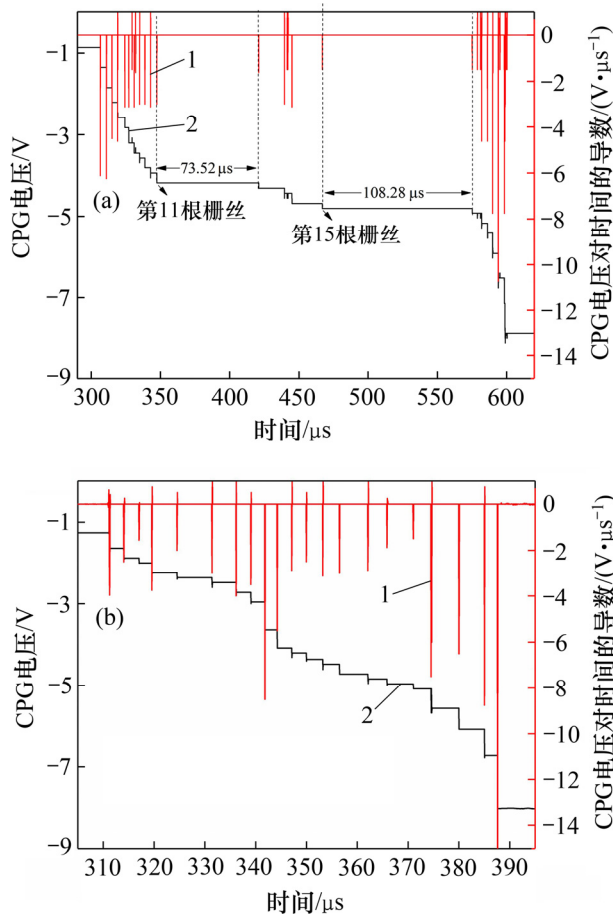
Fig. 6 Change of voltage signal recorded from the strain gauge and CPG



1—试件 18; 2—试件 28。

图 8 试件裂纹扩展距离随时间变化

Fig. 8 Change of sample crack propagated distance with time



(a) 试件 18; (b) 试件 28

1—CPG 电压信号对时间的导数; 2—CPG 电压信号。

图 7 CPG 记录的电压信号及其对时间的导数

Fig. 7 Voltage signal and its derivative with respect to time recorded from CPG

3 数值模拟

3.1 数值模型的建立

为了验证试验结果的合理性, 本文作者采用 AUTODYN 软件进行数值模拟分析。AUTODYN 是一款基于有限差分法的动态数值分析软件, 在岩石动力学研究方面已有广泛应用^[22-25]。

在数值模拟分析中, 建立与落锤冲击实验相同尺寸的模型, 模拟落锤从坠落撞击入射板到试件裂纹扩展破坏的全过程。SCT 试件材料参数在前面已给出, 入射板和透射板相关参数与 LY12CZ 铝合金的一致, 落锤选用 AUTODYN 材料库中 STEEL4340 材料模型, 底部混凝土采用透射边界以消除反射波的影响。

试件划分为 36 300 个四边形网格单元, 并对裂纹尖端部分的网格进行加密, 以保证计算结果的准确性, 提高计算效率。数值模型及其网格如图 9 所示。在 AUTODYN 软件模拟过程中, 材料的本构模型可分为状态方程、强度模型和失效模型这 3 个部分, 其中状态方程主要解决压力带来的体积变形问题。由于在整个落锤冲击实验过程中压力和体积变形均比较小, 因此, 所有材料均采用适合小变形的线性状态方程:

$$P(\rho) = \kappa \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) \quad (4)$$

式中: κ 为体积模量; ρ 和 ρ_0 分别为当前状态材料密度和初始状态材料密度。所有材料均采用适合小变形的线弹性强度模型。

实验中, 落锤、入射板、透射板和混凝土并未破

坏,因此,采用无失效条件,砂岩试件的失效准则为最大主应力准则。当岩石的最大主应力 σ_1 大于岩石的动态抗拉强度 $\sigma_T(\dot{\epsilon})$ 即 $\sigma_1 \geq \sigma_T(\dot{\epsilon})$ 时,材料失效。

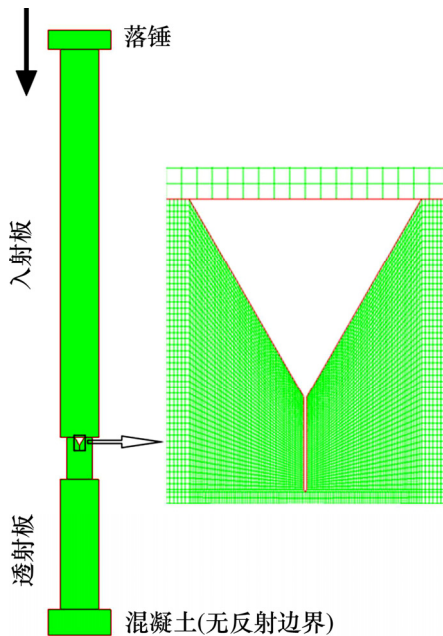


图 9 数值模型及其网格

Fig. 9 Numerical model and its meshes

3.2 数值模拟结果分析

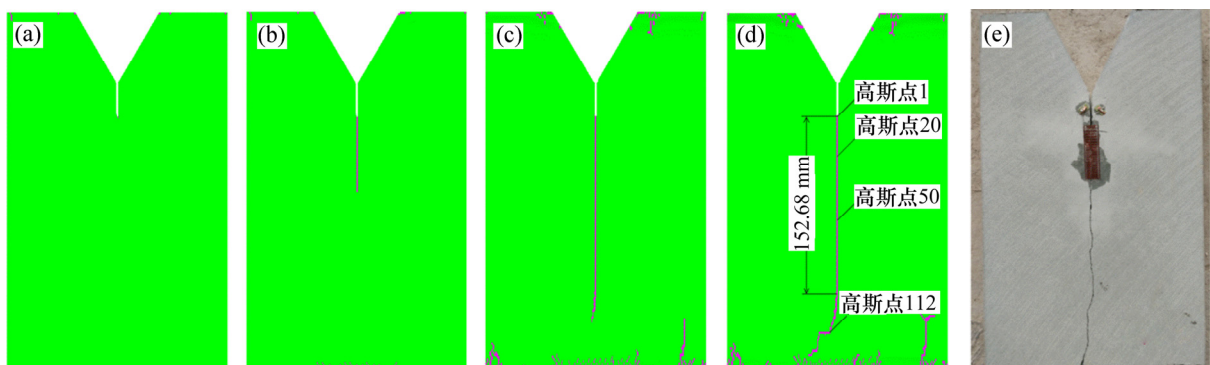
裂纹扩展路径数值模拟结果及实验结果如图 10 所示。从图 10 可以看出:裂纹扩展路径数值模拟结果与实验结果基本一致。试件裂纹为 I 型,因此,裂纹在很长一段距离内沿着预制裂纹方向扩展,但当扩展至 152.68 mm 时,裂纹扩展的方向发生了改变。为探究裂纹扩展方向改变机理以及裂纹扩展是否出现止裂

现象,模拟时沿着裂纹扩展路径设置一系列高斯点(高斯点的位置分布见图 10,其中高斯点 1 设置在裂纹尖端,高斯点 112 设置在预制裂纹开始出现较大幅度水平裂纹处)。4 个高斯点的水平方向应力 σ_x 和垂直方向应力 σ_y 随时间的变化如图 11 所示。分析高斯点 1 可知:随着压缩波向下传播,初始时裂纹尖端的 σ_x 和 σ_y 均为压缩应力,约 114 μs 后, σ_x 转变为拉伸应力;当水平方向拉伸应力 σ_x 达到最大值 29.37 MPa 时,计算得到最大主应力为 30.88 MPa,达到失效条件,单元被破坏,从而裂纹扩展。对高斯点 20 和 50 进行同样分析可以发现:当裂纹沿原来裂纹扩展路径扩展(即竖向扩展)时, σ_x 起主导作用;而对于高斯点 112,起裂时 $\sigma_y=30.17$ MPa,已经超过岩石最大抗拉强度,此时 σ_y 起主导作用,裂纹沿着水平方向扩展。

对比高斯点 1, 20, 50 和 112 中 σ_y 处于压缩应力状态的峰值(见图 11)可知:高斯点 1 和 20 最大压缩应力在 35 MPa 左右;随着时间的推移,高斯点 50 和 112 压缩应力也逐渐增大,这可能是落锤冲击产生的压缩波传播到试件下端后反射回来的压缩波和原来压缩波叠加所致。

可以根据相邻高斯点的距离和破坏时间计算裂纹的扩展速度。在裂纹扩展路径上设置高斯点监测其最大主应力随时间的变化,当裂纹扩展时,高斯点被破坏,最大主应力突然增大并迅速降为 0 MPa,通过对最大主应力进行求导得出高斯点的破坏时间,由相邻高斯点之间的距离和破坏时间可以计算其平均扩展速度。

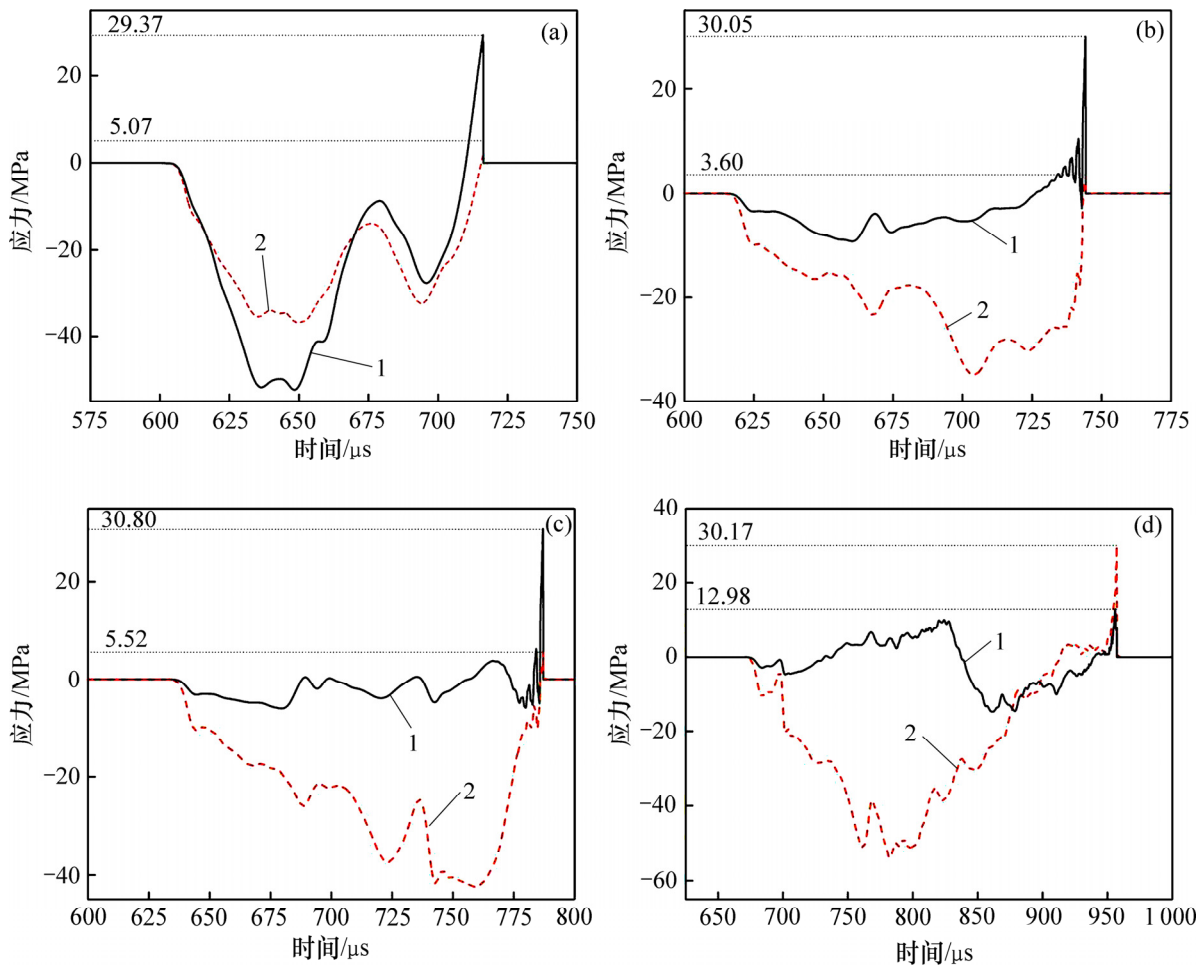
裂纹扩展速度随扩展距离的变化如图 12 所示。由图 12 可知:当裂纹分别扩展至 140 mm 和 160 mm 左右时,裂纹的扩展速度急剧减小,可能存在止裂现象。



时间/ms: (a) 0.717; (b) 0.767; (c) 0.899; (d) 1.019; (e) 实验结果

图 10 裂纹扩展路径数值模拟结果及实验结果

Fig. 10 Simulation results of crack propagation path and test results



(a) 高斯点 1; (b) 高斯点 20; (c) 高斯点 50; (d) 高斯点 112

1— σ_x ; 2— σ_y 。

图 11 裂纹扩展路径上高斯点的 σ_x 和 σ_y 随时间的变化

Fig. 11 Change of stress with time for gauge points

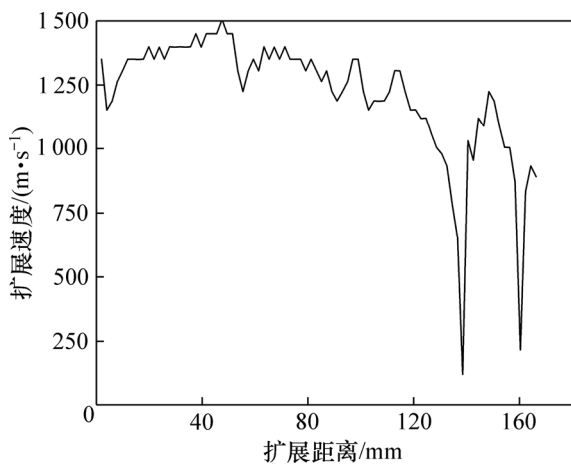


图 12 裂纹扩展速度随扩展距离的变化

Fig. 12 Change of crack propagation speed with crack propagated distance

4 动态断裂韧度的计算方法

将实验得到的载荷条件代入有限元软件 ABAQUS 中进行计算, 得到动态应力强度因子随时间变化的曲线, 并利用普适函数进行修正。

4.1 动态应力强度因子的修正

当裂纹高速扩展时, 其应力强度因子与时间相关, 较难使用理论算法计算。FREUND 等^[26]提出普适函数的概念, 认为动态应力强度因子是普适函数与裂纹静止时应力强度因子的乘积, 即

$$K_1^d(t) = k(v) \cdot K_1^0(t) \quad (5)$$

式中: K_1^d 为 t 时的动态应力强度因子; K_1^0 为静止不

扩展时同等长度裂纹的应力强度因子; $k(v)$ 为裂尖扩展速度为 v 时的普适函数, 其计算公式为^[27]

$$k(v) = \frac{1 - v/c_R}{\sqrt{1 - v/c_d}} \quad (6)$$

式中: c_R 为 Rayleigh 波波速; c_d 为纵波波速。当裂纹扩展速度 $v=0$ m/s 时, $k(0)=1$, 此时, 动态应力强度因子不需要修正; 当 $v=c_R$ 时, $k(c_R)=0$, 这说明当裂纹以 Rayleigh 波波速扩展时, 动态应力强度因子为 $0 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

实验中, 可以通过 CPG 相邻栅丝之间的距离和断裂时间来确定裂纹的扩展速度, 而在静止不扩展条件下, 不同裂纹长度的应力强度因子则通过有限元软件 ABAQUS 进行计算。

4.2 实验-数值法确定动态断裂韧度

采用 ABAQUS 进行数值模拟, SCT 试件的 ABAQUS 网格和六节点三角形单元数值模型如图 13 所示。将实验测得的入射板和透射板上载荷条件转化为应力边界条件对试件上下两端进行加载。试件模型划分为八节点四边形单元 CPS8, 裂纹尖端设置六节点三角形 1/4 奇异单元 CPS6 并进行加密。数值模拟时, 裂纹的动态应力强度因子 K_I 与裂纹尖端面上 A 点和 B 点的位移可表述为^[19]

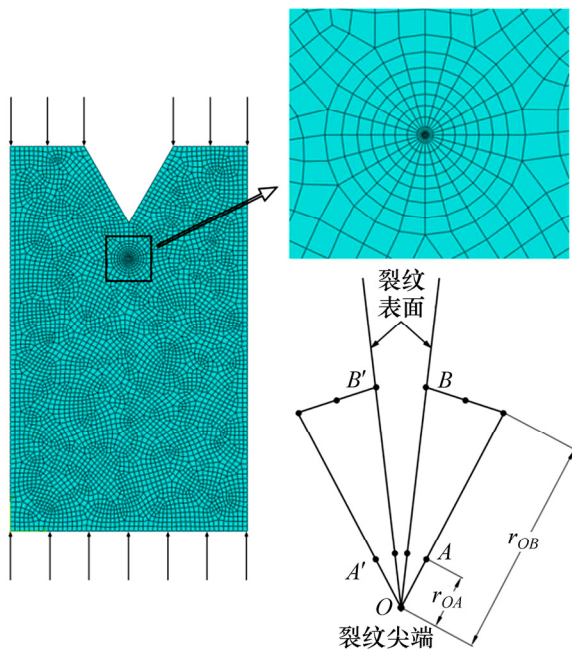


图 13 SCT 试件的 ABAQUS 网格和六节点三角形单元
Fig. 13 Mesh of SCT specimen and CPS6 elements applied in crack tip

$$K_I(t) = \frac{E}{24(1 - \nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{r_{OA}}} [8u(r_{OA}, t) - u(r_{OB}, t)] \quad (7)$$

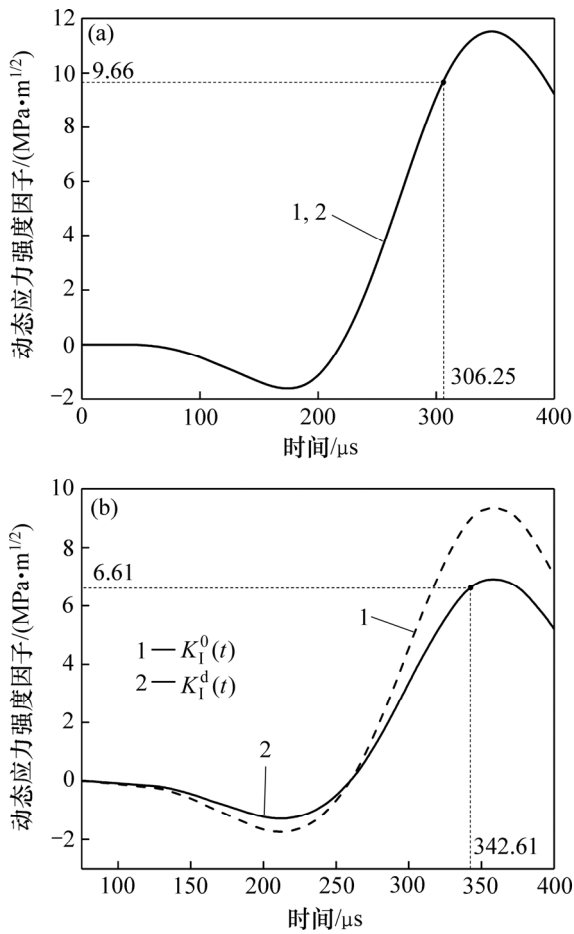
式中: E 为弹性模量; ν 为泊松比; u 为节点的水平位移; r_{OA} 和 r_{OB} 分别为图 13 中 A 点和 B 点与裂纹尖端 O 的距离, $r_{OB}=4r_{OA}$ 。

针对不同裂纹长度建立相应 ABAQUS 数值模型可以得到不同裂纹长度的动态应力强度因子曲线, 再通过 CPG 测得的各敏感栅丝的断裂时间和相邻栅丝之间的距离, 可以计算出裂纹的扩展速度, 将扩展速度代入式(5)和式(6)中得到修正后的动态应力强度因子曲线, 最后根据各栅丝的断裂时间寻找对应曲线上应力强度因子, 即为该时间点的断裂韧度。

图 14 所示为应力强度因子随时间的变化。以试件 18 为例, 起裂时裂纹长度为 30 mm, 扩展速度为 0 m/s, 动态应力强度因子不需要进行修正。在 ABAQUS 中建立相应数值模型, 得到动态应力强度因子曲线(见图 14(a))。CPG 测得的起裂时间为 $306.25 \mu\text{s}$, 在应力强度因子曲线上找到对应时间点的动态应力强度因子即为起裂韧度, 为 $9.66 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

扩展韧度可以通过相同的方法进行求解。如当裂纹扩展至第 10 根丝时, 裂纹长度为 49.8 mm, 建立相应的数值模型, 得到动态应力强度因子曲线如图 14(b) 所示(虚线部分)。根据试件 18 的 CPG 信号可知第 10 根丝和第 11 根丝的断裂时间分别为 $342.61 \mu\text{s}$ 和 $347.17 \mu\text{s}$, 而栅丝之间距离为 2.2 mm, 由此得到裂纹的扩展速度为 482.46 m/s, 代入式(6)得到 $k(v)=0.7107$ 。修正后的动态应力强度因子曲线如图 14(b) 所示(实线部分)。第 10 根丝断裂时刻($342.61 \mu\text{s}$)对应的修正后的应力强度因子即为该时刻的扩展韧度, 为 $6.61 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

在 CPG 测量范围内总共可以确定 20 个数值模型求解断裂韧度(最后 1 根丝的扩展速度无法确定), 得到裂纹扩展过程中的断裂韧度随扩展距离变化, 如图 15 所示。当裂纹扩展至第 11 根丝和第 12 根丝之间、第 15 根丝和第 16 根丝之间时, 扩展速度明显减小, 分别为 29.9 m/s 和 20.3 m/s, 远低于裂纹的平均扩展速度 150.73 m/s, 对应的扩展韧度分别为 $9.21 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 和 $8.84 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 可能为止裂韧度。由此可见, 裂纹的起裂韧度和止裂韧度均高于扩展韧度, 但起裂韧度与止裂韧度相差不大。图 16 所示为动态断裂韧度与裂纹扩展速度之间的关系。从图 16 可以看出: 在裂纹扩展过程中, 裂纹的扩展韧度和扩展速度成反比。

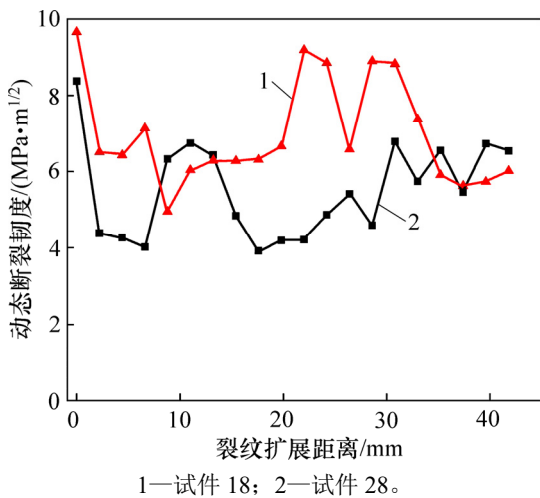


(a) 起裂韧度的应力强度因子曲线;
(b) 扩展韧度的应力强度因子曲线

1—动态应力强度因子; 2—修正后的动态应力强度因子。

图 14 应力强度因子随时间的变化

Fig. 14 Change of stress intensity factor with time



1—试件 18; 2—试件 28。

图 15 动态断裂韧度随裂纹扩展距离变化曲线

Fig. 15 Curves of dynamic propagation toughness versus crack propagated distance

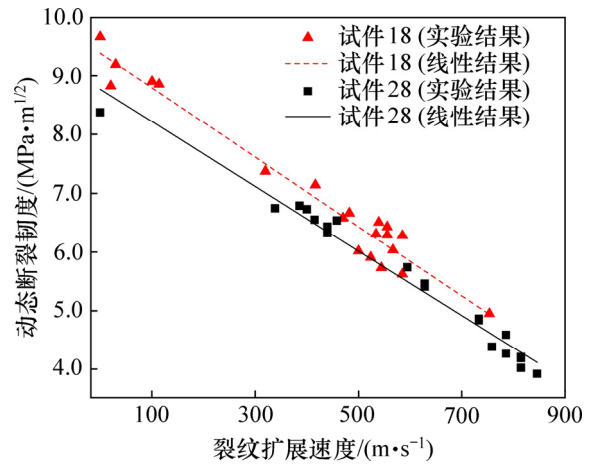


图 16 动态断裂韧度与裂纹扩展速度的关系

Fig. 16 Curves of dynamic propagation toughness versus crack propagation velocity

5 结论

- 1) SCT 构型能够较好地用于研究青砂在中低速冲击载荷作用下裂纹扩展的全过程, 其构型简单, 易于制作, 边界效应小。
- 2) 裂纹的扩展速度不是一个常数。
- 3) 运用普适函数修正应力强度因子, 求解扩展韧度, 得出砂岩材料的断裂韧度和扩展速度呈负相关。
- 4) 起裂韧度和止裂韧度均高于扩展韧度, 但起裂韧度和止裂韧度两者差别不大。

参考文献:

[1] BAŽANT Z P, CANER F C. Impact comminution of solids due to local kinetic energy of high shear strain rate: I. Continuum theory and turbulence analogy[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2014, 64: 223–235.

[2] CHAKRABORTY T, MISHRA S, LOUKUS J, et al. Characterization of three Himalayan rocks using a split Hopkinson pressure bar[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2016, 85: 112–118.

[3] JIANG Fengchun, VECCHIO K S. Hopkinson bar loaded fracture experimental technique: a critical review of dynamic fracture toughness tests[J]. Applied Mechanics Reviews, 2009, 62(6): 1469–1474.

[4] ZHANG Qianbing, ZHAO Jian. A Review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2014, 47(4): 1411–1478.

- [5] WANG Qizhi, YANG Jingrui, ZHANG Caigui, 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.
- [6] HAERI H, SHAHRIAR K, MARJI M F, et al. Experimental and numerical study of crack propagation and coalescence in pre-cracked rock-like disks[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2014, 67(4): 20–28.
- [7] BERTRAM A, KALTHOFF J F. Crack propagation toughness of rock for the range of low to very high crack speeds[J]. *Key Engineering Materials*, 2003, 251/252: 423–430.
- [8] 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 & Mining Sciences*, 2013, 60: 423–439.
- [9] LEE D, TIPPUR H, BOGERT P. Dynamic fracture of graphite/epoxy composites stiffened by buffer strips: An experimental study[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(12): 3538–3545.
- [10] AVACHAT S, ZHOU Min. High-speed digital imaging and computational modeling of dynamic failure in composite structures subjected to underwater impulsive loads[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 77: 147–165.
- [11] 汪坤, 王启智. 中心直裂纹平台巴西圆盘复合型动态断裂实验研究[J]. *实验力学*, 2008, 23(5): 417–426.
WANG Kun, WANG Qizhi. Experimental study of mixed mode dynamic fracture for cracked straight through flattened brazilian disc[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2008, 23(5): 417–426.
- [12] CHEN Rong, XIA Kaiwen, DAI Feng, 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.
- [13] 潘峰, 党发宁, 焦凯, 等. 冲击荷载作用下不均匀脆性材料动态弯拉强度提高机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增刊 2): 3948–3955.
PAN Feng, DANG Faning, JIAO Kai, et al. Mechanism on enhancement of dynamic flexural tensile strength for nonuniform brittle materials under impact loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(Suppl.2): 3948–3955.
- [14] 宋义敏, 何爱军, 王泽军, 等. 冲击荷载作用下岩石动态断裂试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(4): 965–970.
SONG Yimin, HE Aijun, WANG Zejun, et al. Experiment study of the dynamic fractures of rock under impact loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(4): 965–970.
- [15] 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 Jingrui, ZHANG Caigui, 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.
- [16] 张财贵, 曹富, 李炼, 等. 采用压缩单裂纹圆孔板确定岩石动态起裂、扩展和止裂韧度[J]. *力学学报*, 2016, 48(3): 624–635.
ZHANG Caigui, CAO Fu, LI Lian, et al. Determination of dynamic fracture initiation, propagation, and arrest toughness of rock using SCDC specimen[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(3): 624–635.
- [17] WANG Meng, ZHU Zheming, DONG Yuqing, et al. Study of mixed-mode I/II fractures using single cleavage semicircle compression specimens under impacting loads[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 177: 33–44.
- [18] 王蒙, 朱哲明, 谢军. 岩石 I–II 复合型裂纹动态扩展 SHPB 实验及数值模拟研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(12): 2474–2485.
WANG Meng, ZHU Zheming, XIE Jun. Experimental and numerical studies of the mixed-mode I and II crack propagation under dynamic loading using SPHB[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(12): 2474–2485.
- [19] WANG Xiaomeng, ZHU Zheming, WANG Meng et al. Study of rock dynamic fracture toughness by using VB-SCSC specimens under medium-low speed impacts[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 181: 52–64.
- [20] RAVI-CHANDAR K, KNAUSS W G. An experimental investigation into dynamic fracture: I. Crack initiation and arrest[J]. *International Journal of Fracture*, 1984, 25(4): 247–262.
- [21] 刘德顺, 李夕兵. 冲击机械系统动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 40–42.
LIU Deshun, LI Xibing. *Mechanical impact dynamics*[M]. Beijing: Science Press, 1999: 40–42.
- [22] ZHU Zheming, Mohanty B, XIE Heping. Numerical investigation of blasting-induced crack initiation and propagation in rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(3): 412–424.
- [23] ZHU Zheming, XIE Heping, MOHANTY B. Numerical investigation of blasting-induced damage in cylindrical rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2008, 45(2): 111–121.
- [24] ZHU Zheming. Numerical prediction of crater blasting and bench blasting[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2009, 46(6): 1088–1096.
- [25] ZHU Zheming, WANG Chao, KANG Jiming, et al. Study on the mechanism of zonal disintegration around an excavation[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2014, 67: 88–95.
- [26] FREUND L B, HUTCHINSON J W. Dynamic fracture mechanics[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1992, 59(1): 245.
- [27] RAVI-CHANDAR K. *Dynamic fracture*[M]. London, UK: Elsevier, 2004: 49–69.