

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0516

爆炸荷载下青砂岩动态起裂韧度的测试方法*

肖定军^{1,2}, 朱哲明³, 蒲传金^{1,2}, 陆路¹, 胡荣¹

(1. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010;

2. 西南科技大学工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010;

3. 四川大学建筑与环境学院, 四川 成都 610065)

摘要: 为了研究爆炸荷载下青砂岩 I 型裂纹动态断裂韧度的测试方法, 利用内部中心单裂纹圆盘 (internal center single crack disc, ICSCD) 试样进行了爆炸试验研究。试样由外径为 400 mm、内部加载孔径为 40 mm、预制裂纹长为 60 mm 的青砂岩制成。利用同步触发器实现圆盘中心起爆, 并同步触发超动态应变仪, 通过径向应变片获取爆炸应变曲线、裂纹尖端的环向应变片获取裂纹起裂时刻。以实测爆炸应变曲线为参量, 应用 Laplace 变换推导出试样加载孔壁应力时程曲线表达式, 并用数值反演法得出其数值解。利用 ANSYS 有限元软件, 建立数值计算模型, 通过相互作用积分法得出了在爆炸荷载作用下砂岩的 I 型动态应力强度因子曲线。研究表明: (1) ICSCD 试件能够很好地用来测试岩石的动态起裂韧度; (2) 炮孔周边的应力可以通过拉普拉斯变换的数值反演方法得到; (3) 通过试验-数值法能稳定计算出 ICSCD 砂岩构型的动态起裂韧度, 其最大误差仅为 7%。

关键词: 爆炸荷载; 应变测试; 动态起裂韧度; 数值反演法

中图分类号: O389

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

Study of testing method for dynamic initiation toughness of blue sandstone under blasting loading

XIAO Dingjun^{1,2}, ZHU Zheming³, PU Chuanjin^{1,2}, LU Lu¹, HU Rong¹

(1. College of Environment and Resources, Southwest University Science and Technology,

Mianyang 621010, Sichuan, China;

2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province,

Mianyang 621010, Sichuan, China;

3. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: In this paper, an internal central single-cracked disk (ICSCD) specimen was proposed for the study of dynamic fracture initiation toughness of sandstone under blasting loading. We conducted blasting tests on an ICSCD specimen fabricated from a blue sandstone disc (400 mm in diameter) with a crack (60 mm in length), obtained a blasting strain-time curve from the radial strain gauges fixed around the blast hole, determined the fracture initiation time with the circumferential strain gauges placed around the crack tip, and then derived the stress history on the blast hole of the sandstone specimen from the measured strain curve through the Laplace transform. Furthermore, we obtained the numerical solutions using numerical inversion, establishing a numerical model using the finite element software ANSYS, and derived Type I dynamic stress intensity factor curves of the sandstone under blasting loading by the mutual interaction, with the results achieved: (1) the ICSCD specimen can be used to measure the dynamic initiation fracture

* 收稿日期: 2018-12-26; 修回日期: 2019-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(11702181, 11802255); 西南科技大学博士基金(19ZX7168)

第一作者: 肖定军(1982—), 男, 博士, 讲师, xhemers@sina.com

通信作者: 蒲传金(1979—), 男, 硕士, 副教授, puchuanjin@sina.com

toughness of rocks; (2) the stress on the blast hole wall can be obtained by the Laplace numerical inversion method; (3) the dynamic initiation fracture toughness of the ICSCD sandstone specimen can be calculated by the experimental-numerical method with an error below 7%.

Keywords: blasting loading; strain test; dynamic initiation fracture toughness; numerical inversion method

钻眼爆破技术是目前最普遍、经济、高效的岩体开挖与破碎技术之一,被广泛用于工程建设之中,在服务于工程建设的同时也会引起大量的工程稳定与安全问题,引起广泛关注^[1-3]。弄清楚岩石在爆破荷载作用下动态断裂行为,实现高效破碎岩体与保护保留岩体都意义重大^[4-6]。爆破荷载作用下岩体如何破碎、破碎块度如何、保留岩体损伤如何,这些问题都是学者们研究的重点内容^[7-9]。岩石动态断裂韧度是评价岩石抵抗裂纹动态起裂、扩展和止裂性能的重要参数,是研究岩石动态断裂的基础。大量的学者以 Hopkinson 压杆作为动态加载手段,结合数值计算在岩石动态断裂方面取得一定的成绩:张财贵等^[10]、杨井瑞等^[11]、Wang 等^[12]对圆盘和圆环形岩石试样进行改进,利用 Hopkinson 压杆作为加载平台,对石动态断裂韧度测试方法与影响因素进行了大量有益的研究。Zhou 等^[13]以 Hopkinson 压杆为加载平台,提出中心直裂纹半圆盘试样测试岩石动态起裂韧度,并被国际岩石力学学会(international society for rock mechanics and rock engineering, ISRM)推荐为标准测试方法。Dai 等^[14]通过对 ISRM 推荐的 4 种试样断裂机理进行数值研究,研究表明其真实临界裂纹与基于穿透直裂纹假设所得临界裂纹相差较远,人字形切槽巴西圆盘标准试样有大量破裂偏离理想裂纹面,该测试方法有待完善。Hopkinson 压杆加载有着原理清晰、测试可靠、重复性好等优点,但其荷载特征明显有别于爆炸荷载且其无法考虑钻爆法中爆生气体作用。而钻孔爆破时,岩石恰恰受到爆炸应力波与爆生气体共同作用^[15-17],因此研究爆破荷载下岩石断裂韧度对解决工程爆破问题更加贴切。本文中从岩石钻眼爆破角度出发设计了爆炸荷载下动态断裂韧度测试的构型并分析其合理性,提出一套获取爆破荷载作用下岩石动态起裂韧度的方法,丰富了岩石动态断裂韧度测试方法,该方法流程如图 1 所示。

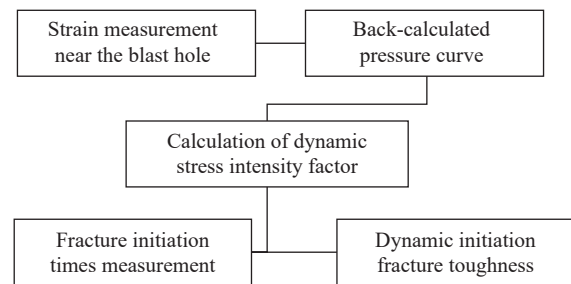


图 1 实验数值方法流程图

Fig. 1 Flow chart of experimental numerical method

1 爆炸荷载加载与试件构型设计

1.1 爆炸荷载加载装置

高压加载装置是研究材料在高应变率下动态性能的主要手段,随着对材料动态性能的深入研究,研究人员越来越重视高压加载技术,如落锤^[18]、霍普金森杆^[19]、轻气炮^[20]和炸药爆炸^[21]等加载技术被广泛应用于材料动态性能研究。与其他动态加载手段相比,炸药爆炸加载有着简单、方便成本低、不受试样尺寸限制等优点,然而其缺点在于加载机理复杂、重复性与稳定性较差,因此很多学者使用炸药平面波发生器^[22]、爆炸膨胀环^[23]等稳定的炸药加载技术来研究材料的动态性能。

本文中从工程钻眼爆破角度考虑设计爆炸荷载的加载结构,利用工业导爆索获取稳定可靠的爆炸荷载,使用的导爆索装药的线密度为 12 g/m,外径为 5 mm,爆速为 6 690 m/s。为了增大应力波作用范围,避免岩石试样中出现粉碎区,加载孔的直径应大于(3~7)倍药包直径即取加载孔直径为 40 mm。导爆索与加载孔壁之间采用水介质进行耦合来传递爆炸应力波。为了防止爆轰气体过早逸出以及约束 z 方向的位移实现准平面应变状态,在试样两侧各覆盖一层与试样材料一致的覆盖板,炮孔与覆盖板之间用高强度防爆管耦合减少导爆索对覆盖板的破坏,图 2 所示为加载示意图。

根据文献 [24-25] 中试样在动荷载作用时当其 z 方向应变值小于 x 或者 y 方向应变值的 1/5 时可视为准平面应变, 为了验证其为准平面应变模型, 在距炮孔中心 80 mm 处贴 x 与 z 方向应变片进行应变测试, 其结果与加载示意图如图 2~3 所示, 其 z 方向应变峰值仅为 x 方向应变值的 1/6, 符合准平面应变要求。

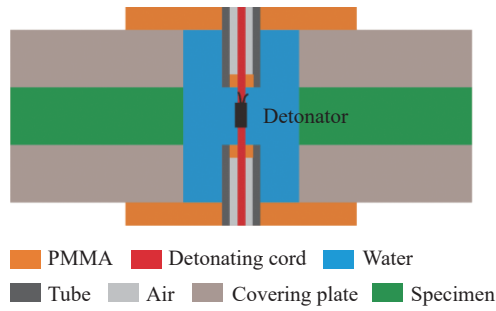


图 2 爆炸加载示意图

Fig. 2 Sketch of specimen under explosive loading

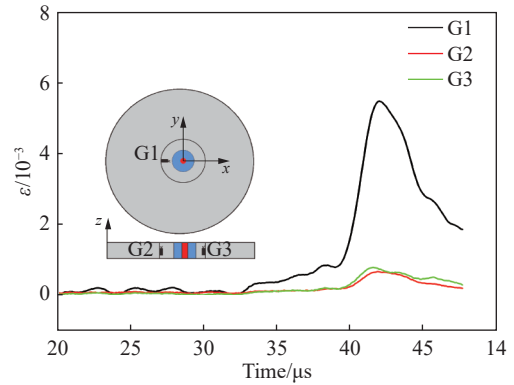


图 3 x 与 z 方向应变曲线对比

Fig. 3 Contrast of strain curves for x and z directions

1.2 试样的构型设计及测点的布置

ISRM 在 1955 年提出了建议采用人字形切槽巴西圆盘测试岩石的静态断裂韧度, 然而直到 2012 年才首次推出岩石动态测试方法, 包括岩石动态压缩、动态拉伸及动态断裂方法 [26]。岩石动态测试的复杂性不言而喻, 几乎所有试样构型的设计都是围绕着霍普金森杆这一加载手段进行的, 这种加载形式一般只考虑了应力波的作用, 与实际爆破工程中的应力波与爆生气体破岩是有一定区别的, 且试样大小会受霍普金森杆尺寸限制。因此, 针对现场常用钻眼爆破荷载的特点, 选择大尺寸试样, 炮孔直径为导爆索外径 5 mm, 在距炮孔中心 80 mm 处预制长度为 60 mm, 宽度约为 0.5 mm 的缝, 并对缝尖端进行精细加工, 使裂尖宽度不超过 0.1 mm, 中心加载孔选择 40 mm, 使爆破冲击波作用于耦合水介质之中, 进而避免裂隙区与粉碎区出现在岩石试样中, 参考文献 [27] 提出的中心圆孔与圆盘直径比值 (0.1~0.3), 确定试样的外径为 400 mm, 试样构型如图 4 所示。在同一块青砂岩原岩块中选取岩样, 按照图 4 所示利用水刀等工具制成 4 个相同内部中心单裂纹圆盘 (internal center single crack disc, ICSCD) 试样。

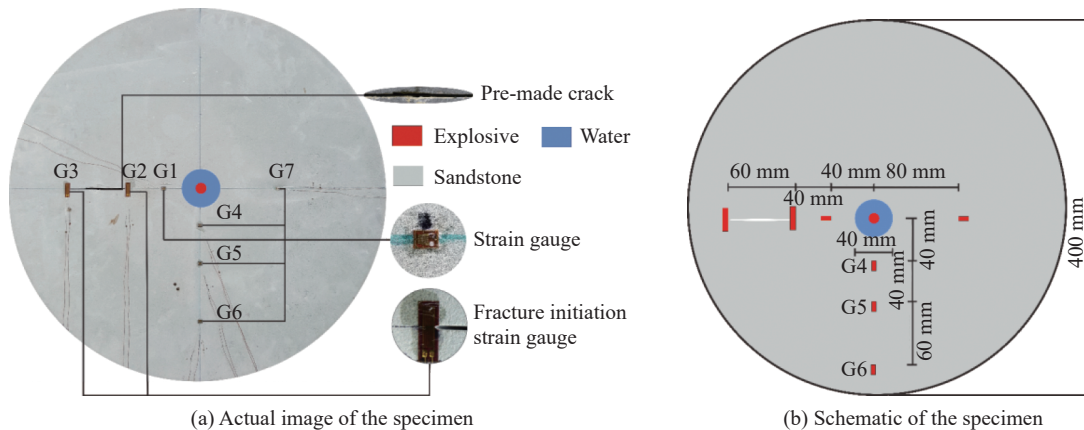


图 4 试样构型

Fig. 4 Sketch map of specimens

所选择导爆索直径为 5 mm, 炸药爆炸后产生的爆轰波传播到药包与岩石的接触面时, 在距离炮孔中心 $(3\sim 7)r$ ($7.5\sim 17.5$ mm, r 为药包半径) 区域内的岩体内激发一种波峰压力值很高的冲击波, 一般超过岩石的动态抗压强度, 使岩石产生塑性变形或粉碎, 消耗大部分能量。通过该区域后, 冲击波衰减为应力波, 波振面上的状态参数变化比较缓慢, 该区域为应力波作用区, 作用范围可达到 $120\sim 150r$ ($300\sim 375$ mm), 其冲击波作用区最远为 17.5 mm, 因此将应力波测点布置在距离炮孔中心 40 mm 的位置既能够很好地避免冲击波对测试的影响, 又能较为准确地测量出爆炸应变时程曲线, G4、G5、G6 对爆炸应变波衰减规律进行测试, G1、G7 分别为 G4、G5 的对应片以防止数据丢失, G2、G3 为裂纹起裂时间测试片。

反射波达到 G2 的最短距离为 320 mm, 由测得其纵波速度为 2 339 m/s, 计算得到达 G2 裂纹尖端时间为 136.8 μ s, 试验测得 G2 点的起裂时间最长为 86.4 μ s, 小于反射波到达时间, 反射波到达时 G2 点时裂纹尖端已经起裂, 故反射波对起裂韧度测试无影响。

试样厚度只有达到一定程度才能满足平面应变^[28], 根据式(1)计算试样厚度 $d\geq 10$ mm, 根据试样的获取的方便以及大量动态断裂试验, 本次选择 20 mm 厚度试样以满足平面应变假设。

$$d \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_s} \right)^2 \quad (1)$$

式中: d 为试样的厚度, σ_s 为试样的屈服极限, 岩石类材料没有屈服强度以岩石材料动态强度^[29] 代替取 $\sigma_s = 100$ MPa, 参考杨井瑞等^[11] 测得的砂岩断裂韧度 $K_{IC} = 6.5$ MPa/m^{1/2}。

2 砂岩的动态断裂测试

2.1 爆炸荷载作用下砂岩动态应变测试

爆炸试验往往是破坏性试验, 且其近区会产生高温高压对测试会带来很大的困难, 测试成本也非常之高。因此, 学者们通过粘贴应变片这种低成本高效的测试方式来对其动态应变进行测试。本次试验测试中采用 DH5939 高速数据采集系统, 采样频率为 10 MHz, 应变放大器频响频率为 0~1 MHz, 测试应变系统如图 5 所示。

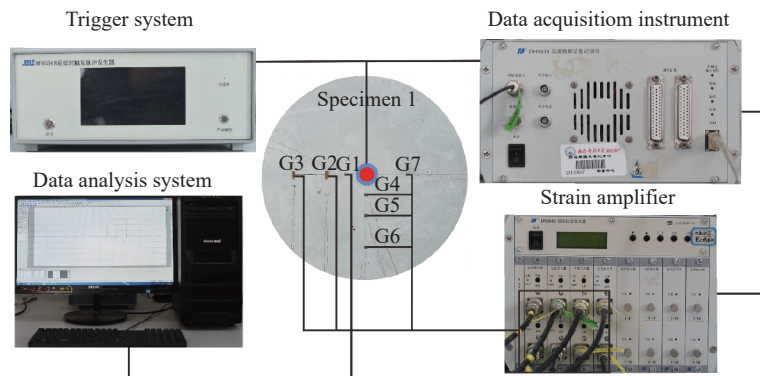


图 5 应变测试系统示意图

Fig. 5 Strain test system

确定裂纹的动态断裂时间是试验的关键。采用两种应变片进行测试: 一种应变片尺寸为 9.8 mm×3.0 mm、另一种应变片尺寸为 1.0 mm×2.2 mm, 小尺寸应变片有着较高的频率响应用于测试近区的弹性应变波, 大尺寸应变片用于确定裂纹断裂起始时间。在爆炸近区应变测试时采用 BA120-1AA 型箔式应变片, 远区的裂纹尖端起裂时间测试采用 BA120-10AA 型箔式应变片, 应变片参数见表 1。

2.2 砂岩动态应变测试结果分析

定义距装药中心距离与药包半径的比值为比例距离 $\bar{r} = r/r_0$, 应变测试容易受电磁干扰, 应变曲线表现为零线上下波动因此选择应变起始点会非常困难, 因此以应变曲线曲率最大点对应的时刻作为应变

的起始作用时刻; 爆炸应变曲线峰值衰减至零为应变作用终止时间; 加载时间为应变峰值对应时间与应变作用起始时间之差, 卸载时间为应变作用终止时间与应变峰值对应时间之差。爆炸径向应变峰值 ε_r 与比例距 r 呈幂指数衰减, 随着比例距离的增加应变峰值衰减非常快, 平均衰减系数为 0.8。但应变峰值过后, 应变值在较长一段时间内才会逐渐降低为零, 应变测试典型时程曲线如图 6 所示。

表 1 电阻应变片尺寸及参数
Table 1 Parameters of strain gauge

型号	敏感栅尺寸	基底尺寸	电阻值/ Ω	灵敏度/%
BA120-10AA	9.8 mm×3.0 mm	15.0 mm×5.0 mm	120±0.2	2.21±1
BA120-1AA	1.0 mm×2.2 mm	4.3 mm×3.5 mm	120±0.2	2.21±1

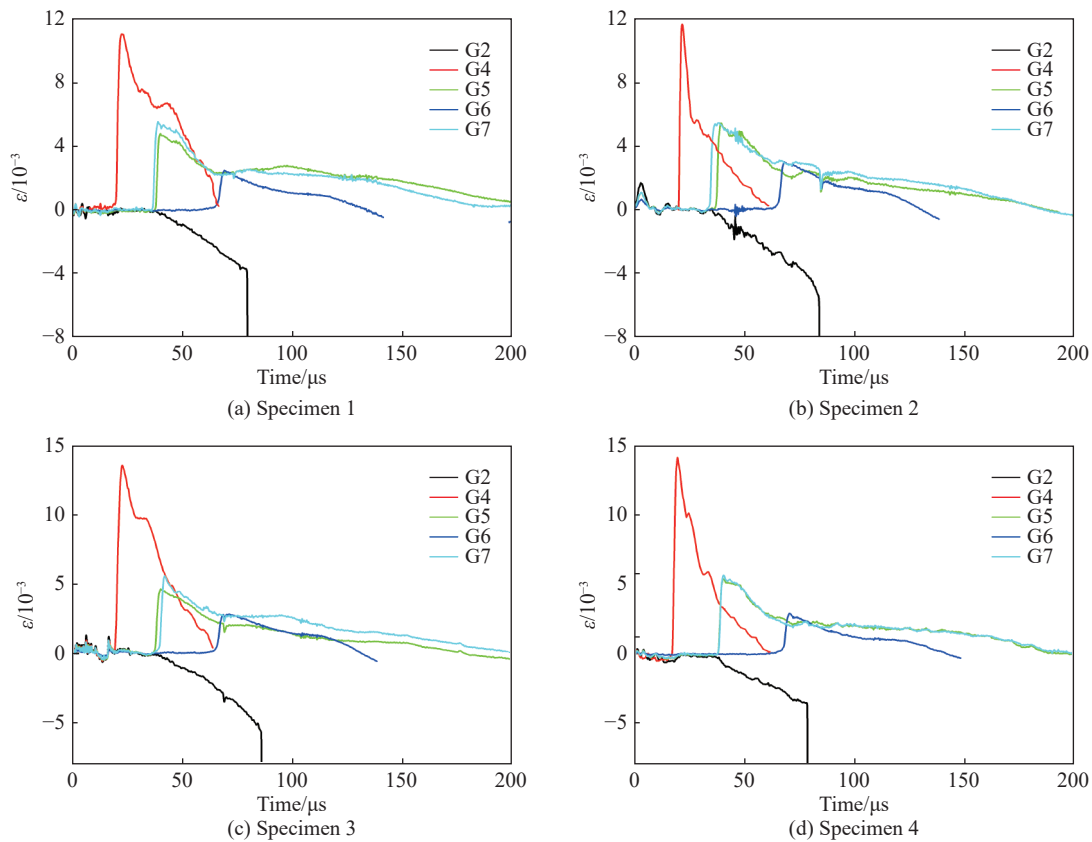


图 6 炮孔近区典型应变波形
Fig. 6 Typical histories of strain near blast holes

随着比例距离增大, 应变波形的加载时间也逐步增长, 但其卸载时间随着比例距离的增大先增长在裂纹近端处获得极值, 随着裂纹的起裂其压力迅速下降导致应变卸载时间缩短。在比例距离为 16 时, 4 个测试试样应变起始最大时差仅为 0.4 μs , 说明试样一致性与测试系统的同步性较好; 在比例距为 16~32 的范围内, 爆炸应变波形加载时间在 1.3~4.6 μs 之间, 卸载时间在 49.1~175.2 μs 之间, 其测试时间参数及应变峰值见表 2。

对长应变片进行如图 4 所示的处理, 将应变片基底用美工刀片切割成小三角缺口至应变片敏感栅位置, 使得当裂纹一开始起裂就记录下起裂时间, 断裂时间的记录通道与爆炸荷载的信号记录通道同步采集, 即断裂信号与爆炸荷载信号有着相同的零时刻。由图 7(a) 所示应变片记录了裂纹断裂信号, 为了获取应变信号急剧变化的时刻即为裂纹尖端起裂时刻, 可以对断裂信号进行求导, 得到起裂时刻^[30-32], 如图 7(b) 所示, 其数值见表 3。将 G5、G7 应变起始时间的平均值作为 G2 应变起始时间。

表 2 应变测点位置与测试值
Table 2 Location of Strain gauge point and test value

试样序号	测点号	\bar{r}	应变时间/ μs					应变峰值/ 10^{-3}
			起始时间	峰值时间	终止时间	加载时间	卸载时间	
1	G4	16	20.5	22.8	72.4	2.3	49.6	11.1
	G5	32	38.6	40.3	208.1	1.7	167.8	4.8
	G6	56	67.2	69.3	133.8	3.3	64.5	2.5
	G7	32	37.4	39.1	201.1	1.7	162.0	5.6
2	G4	16	20.7	22	71.1	1.3	49.1	11.7
	G5	32	38.9	40.6	204.8	1.7	164.2	5.4
	G6	56	67.5	69.3	132.4	1.8	63.1	3.0
	G7	32	36.0	39.7	204.9	3.7	165.2	5.5
3	G4	16	20.5	22.9	78.6	2.4	55.7	13.6
	G5	32	38.5	40.3	210.2	1.8	169.9	4.6
	G6	56	67.1	71.7	137.5	4.6	65.8	2.8
	G7	32	40.4	42.1	205.6	1.7	163.5	5.6
4	G4	16	20.9	22.6	70.9	1.7	48.3	14.1
	G5	32	38.7	41.5	215.8	2.8	174.3	5.3
	G6	56	68.5	70.7	148.3	2.2	77.6	2.9
	G7	32	38.7	40.6	215.8	1.9	175.2	5.6

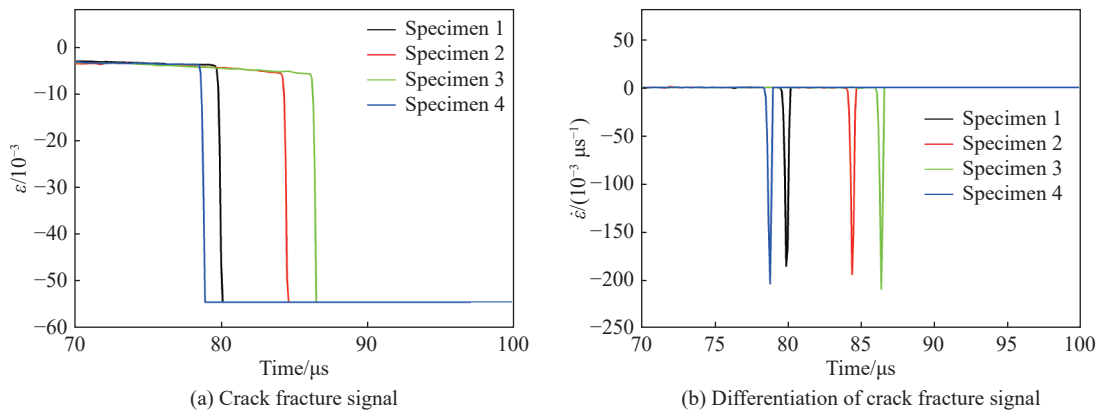


图 7 断裂信号与起裂时间确定
Fig. 7 Fracture signal and initiation time

表 3 裂纹断裂时间
Table 3 Time of the crack fracture

试样序号	测点号	\bar{r}	应变时间/ μs		
			起始时间	断裂时间	断裂积累时间
1	G2	32	38.0	79.9	41.9
2	G2	32	37.5	84.4	46.9
3	G2	32	39.5	86.4	47.0
4	G2	32	38.7	78.8	40.1
平均值		32	38.4	82.4	44.0

试样1~4的应变起始时间分别为38.0、37.5、39.5、38.7 μs ,平均断裂时间为38.4 μs ;试样1~4的断裂时间分别为79.9、84.4、86.4、78.8 μs ,平均断裂时间为82.4 μs ;试样1~4断裂累积时间分别为:41.9、46.9、47、40 μs ,平均断裂累积时间为44.0 μs ,可见,4个相同试样的应变起始时间一致性较好,最大时差仅2 μs 。但是由于预制裂纹的存在以及岩石试样的不均匀性,其断裂时间与断裂累积时间均有几个微秒的时差,其爆破后断裂失效如图8所示。

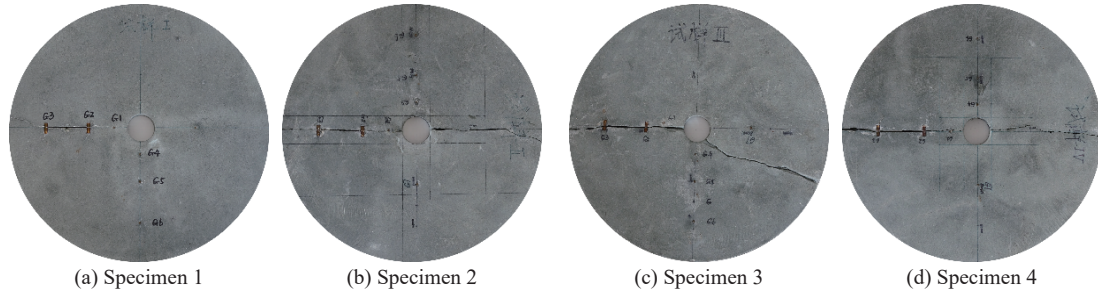


图8 爆破后试样形态

Fig. 8 Specimen failure patterns after blasting

2.3 砂岩的基本动态力学参数

岩石是由矿物颗粒组成,内部存在弱面、裂隙等结构的非线性弹性材料,试样的高度非均匀性是动态试验的难点,超声波测试是获取试样基本动态参数手段之一,在岩石力学领域得到广泛应用^[33]。本次试验采用RSM-SY5(T)非金属声波检测仪测定试件的纵波与横波速度: $c_p = 2\,339\text{ m/s}$, $c_s = 1\,430\text{ m/s}$,测得岩石密度 $\rho = 2\,163\text{ kg/m}^3$ 。根据弹性波理论^[34-35],通过下式:

$$\nu_d = \frac{c_p^2 - 2c_s^2}{2(c_p^2 - c_s^2)} \quad (2)$$

$$E_d = \frac{\rho c_p^2 (1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)}{1 - \nu_d} \quad (3)$$

$$G_d = \frac{E_d}{2(1 + \nu_d)} \quad (4)$$

$$K_d = \frac{E_d}{3(1 - 2\nu_d)} \quad (5)$$

计算得到试件的动态泊松比、动态弹性模量、动态剪切模量、动态体积模量,可得本次试样的动力学参数: $\nu_d = 0.2$, $E_d = 10.6\text{ GPa}$, $G_d = 4.4\text{ GPa}$, $K_d = 4.4\text{ GPa}$ 。

3 加载孔径向应力反演

3.1 加载孔壁应力的理论推算

为了简化问题,可以将砂岩上钻孔的爆破问题简化为均匀、弹性介质中圆柱形空腔受到突加载荷 $p(t)$ 作用,使得柱腔周围产生径向位移,于是此问题简化为轴对称线弹性平面应变问题。根据弹性动力学理论,其波动方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \phi(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi(r,t)}{\partial r} = \frac{1}{c_p^2} \frac{\partial^2 \phi(r,t)}{\partial t^2} \\ \phi(r,0) = \dot{\phi}(r,0) = 0 & r \geq r_0 \\ \lim_{r \rightarrow \infty} \phi(r,t) = 0 & t > 0 \\ \sigma_r(r_0,t) = p(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\phi(r,t)$ 为势函数, c_p 为纵波波速, c_s 为横波波速, $\sigma_r(r,t)$ 为径向应力, $\sigma_\theta(r,t)$ 为切向应力, $p(t)$ 为炮孔载

荷, r_0 为炮孔半径。对式(6)中第一个式子进行关于 t 的 Laplace 变换得:

$$\frac{d^2\bar{\phi}(r,s)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\bar{\phi}(r,s)}{dr} = k_d^2 \bar{\phi}(r,s) \quad (7)$$

式中: $k_d = s/c_p$, s 为 Laplace 变换参数。式(7)有以下通解^[36]:

$$\bar{\phi}(r,s) = A(s)I_0(k_d r) + B(s)K_0(k_d r) \quad (8)$$

$\lim_{r \rightarrow \infty} \bar{\phi}(r,s) = 0$, 为满足这一条件, 需 $A(s) = 0$, 其中 I_0 、 K_0 分别为变形后的零阶第一类和第二类 Bessel 函数, 则由式(8)以及位移与势函数之间关系 $u = u_r = \frac{\partial \phi}{\partial r}$ 可得:

$$\bar{\phi}(r,s) = B(s)K_0(k_d r) \quad (9)$$

$$\begin{cases} \sigma_r = \lambda \nabla^2 \phi + 2\mu \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \\ \sigma_\theta = \lambda \nabla^2 \phi + (2\mu/r) \frac{\partial \phi}{\partial r} \\ \sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\nabla^2 \phi$ 由式(6)中第一个式子的左边给出。对式(10)中 σ_r 进行 Laplace 变换, 并代入式(8)可得:

$$\bar{\sigma}(r,s) = \left[(\lambda + 2\mu)k_d^2 K_0(k_d r) + \frac{\lambda}{r} k_d K_1(k_d r) \right] B(s) \quad (11)$$

由在炮孔处需满足 $\bar{\sigma}(r_0,s) = L(p(t)) = \bar{p}(s)$, 可得:

$$B(s) = \frac{\bar{p}(s)}{(\lambda + 2\mu)F(s)} \quad (12)$$

式中: $F(s) = k_d^2 K_0(k_d r_0) + \frac{2}{r_0 D^2} k_d K_1(k_d r_0)$, $D^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\mu} = \frac{c_p^2}{c_s^2}$, 其中 λ 、 μ 为拉梅常数, r_0 为炮孔半径, c_s 为横波波速, K_1 为一阶第二类 Bessel 函数。由式(9)与式(12)可得:

$$\bar{\phi}(r,s) = \frac{\bar{p}(s)}{(\lambda + 2\mu)F(s)} K_0(k_d r) \quad (13)$$

$$\bar{\varepsilon}(r,s) = \frac{\partial^2 \bar{\phi}(r,s)}{\partial r^2} \quad (14)$$

在试样弹性区上任意径向位置, 测量径向应变-时间曲线 $\varepsilon(r_b,t)$, 对其做 Laplace 变换得 $\bar{\varepsilon}(r_b,s)$, 然后代入式(13)和式(14), 经过整理就可以获得 Laplace 域内压力:

$$\bar{p}(s) = \frac{\bar{\varepsilon}(r_b,s)(\lambda + 2\mu)F(s)}{k_d^2 \left[K_0(k_d r_b) + \frac{K_1(k_d r_b)}{k_d r_b} \right]} \quad (15)$$

式中: r_b 为测试点到炮孔中心的距离, 对式(15)进行 Laplace 逆变换可得压力-时间表达式:

$$p(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} \bar{p}(s) e^{st} ds \quad (16)$$

3.2 数值反演法求解炮孔径向应力

拉普拉斯变换的数值反演方法很多, 如 Stehfest 算法、Dubner 和 Abate 算法、Crump 算法等, 本文中采用 Stehfest 算法, 通过 MATLAB 程序对式(16)进行数值反演, 通过反演应变曲线与实测应变曲线对比, 验证反演方法的正确性。距离炮孔中心 80 mm 应变测试曲线与反演曲线如图 9 所示, 可见数值反演方法会产生一些数据震荡, 但总体与实测曲线吻合较好。

本文用距炮孔中心相同距离 G5 与 G7 方向应变曲线进行应力反演, 砂岩的动力学参数由声波测试给出, 反演出加载孔壁压力曲线如图 10 所示, 可见通过 G5 反演应力曲线在 87.5 μ s 后离散性大。由图 6 可知, 尽管 G5 与 G7 距加载孔中心距离相同, 但其测得的应变曲线不尽相同, 且由于 G5 应变片更靠近于裂纹尖端, 因此裂纹尖端起裂时对其影响更大。

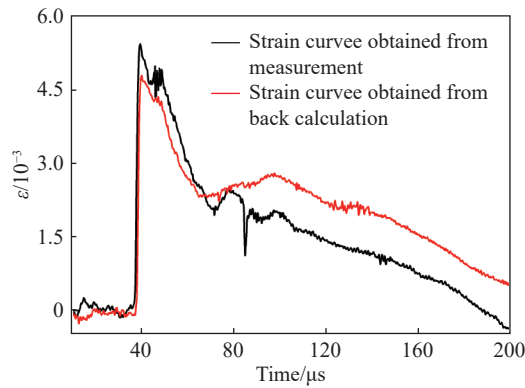


图 9 反演与实测应变对比曲线

Fig. 9 Contrast of strain curves for inversion and testing

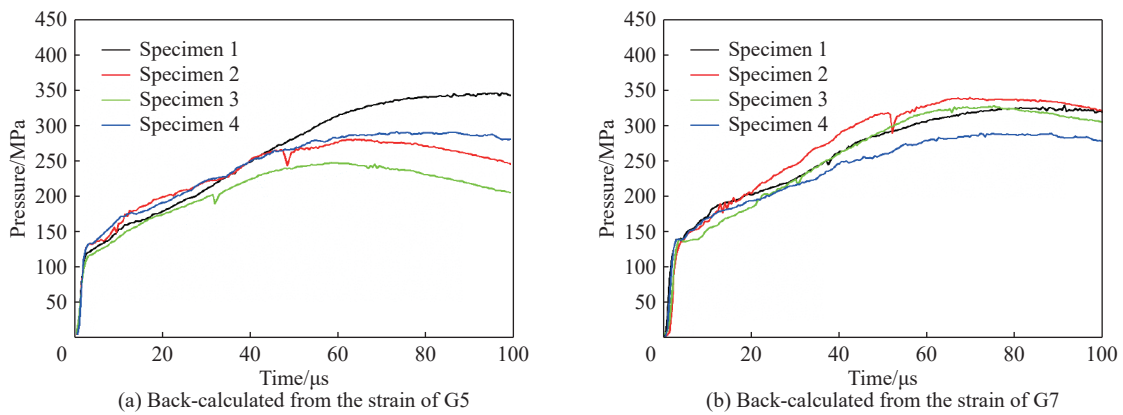


图 10 炮孔应力回推曲线

Fig. 10 Histories of pressure on wall of borehole

4 砂岩动态应力强度因子的计算

4.1 相互作用积分法计算应力强度因子

根据断裂力学基本原理以及 Rice^[37] 对 J 积分的定义:

$$J_1 = \int_{\Gamma} \left(W dx_2 - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x_1} dx \right) \quad (17)$$

式中: Γ 是积分回路, 是从裂纹下表面上一点起, 沿逆时针方向, 绕过裂纹端点, 止于裂纹上表面上一点的任意光滑曲线如图 11 所示, 相互作用积分 I 的定义:

$$I = \frac{\int_V q_{i,j} (\sigma_{ki} \varepsilon_{ki}^{(a)} \delta_{ij} - \sigma_{kj}^{(a)} u_{k,i} - \sigma_{kj} u_{k,i}^{(a)}) dV}{\int_{\Gamma} \delta q_n ds} \quad (18)$$

式中: σ_{ij} 、 ε_{ij} 、 u_i 分别为真实应力、真实应变、真实位移; $\sigma_{ij}^{(a)}$ 、 $\varepsilon_{ij}^{(a)}$ 、 $u_i^{(a)}$ 分别为辅助应力、辅助应变、辅助位移; q_i 是裂纹扩展矢量。采用相互作用积分法求解应力强度因子时, 引入辅助应力-位移场、真实应力-位移场, 则其共同作用 J 积分为真实应力场 J_1 积分与辅助应力场积分 J_2 及二者相互作用积分 I 之和:

$$J = J_1 + J_2 + I \quad (19)$$

不考虑岩石的非线性, 可由各项同性材料

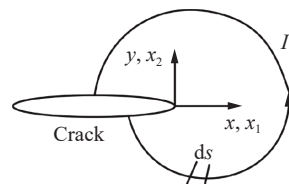


图 11 J 积分的定义简图

Fig. 11 Definition of the J integral

的平面应变模型 J 积分与 G 能量释放率和应力强度因子 K 的关系 $J = G = (K_I^2 + K_{II}^2)/E$, 可得:

$$J = \frac{1}{E} \left[(K_I + K_I^{(a)})^2 + (K_{II} + K_{II}^{(a)})^2 \right] \quad (20)$$

由式(20)分离出辅助场与真实场 J 积分, 可得相互作用积分为:

$$I = \frac{2}{E} (K_I K_I^{(a)} + K_{II} K_{II}^{(a)}) \quad (21)$$

可以取恰当的辅助应力场强度因子 $K_I^{(a)} = 1, K_{II}^{(a)} = 0$, 则 $K_I = EI_I/2$; 若 $K_I^{(a)} = 0, K_{II}^{(a)} = 1$, 则 $K_{II} = EI_{II}/2$ 。因此可以通过两次相互作用积分, 分别得到 K_I 和 K_{II} 。

4.2 动态应力强度因子数值计算

由于在裂纹尖端会产生应力场突变, 因此要准确计算出裂纹尖端的应力变化必须对其进行加密网格计算。大量的网格会降低计算效率, 因此 Ansys 有限元计算中提供了奇异单元来模拟裂纹尖端应力奇异性。计算模型如图 12 所示, 选择八节点的 PLANE183 四边形单元, 奇异单元的角度、奇异单元的长度、裂纹尖端绕线积分条数对计算应力强度因子均有影响^[38]。本次奇异单元角度控制在 30° , 单元长度控制在 0.1 mm , 裂纹尖端绕线积分条数为 8 条, 单元数量为 14 万。

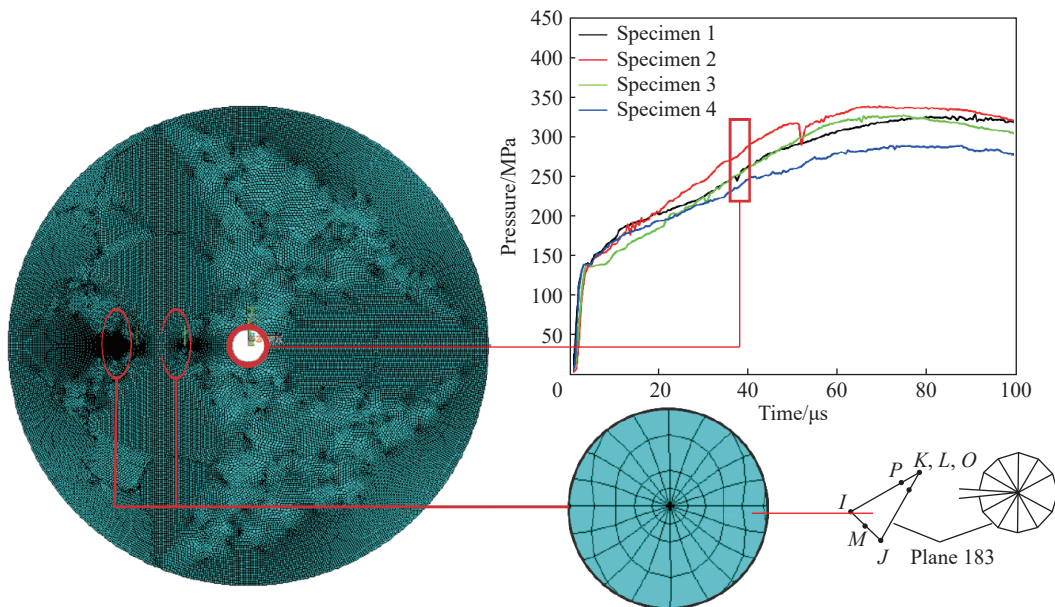


图 12 有限元计算加载模型

Fig. 12 Finite element calculation loading model

4.3 砂岩动态起裂韧度

通过相互作用积分法分别计算 4 个砂岩试样的起裂韧度, 并加载两组回推的炮孔壁压力曲线, 进行计算可得应力强度因子曲线如图 13 所示。由测得的 80 mm 处裂纹的起裂时间, 可得砂岩的起裂韧度, 见表 4。可见, G5 与 G7 方向回推应力曲线计算出的应力强度因子不尽相同, 垂直于裂纹方向计算的起裂韧度普遍小于沿裂纹方向。4 个砂岩试样的起裂韧度分别为 $5.0、5.5、5.2$ 和 $4.8 \text{ MPa/m}^{1/2}$, 平均起裂韧度为 $5.1 \text{ MPa/m}^{1/2}$ 。

表 4 不同试样起裂韧度

Table 4 Fracture toughness of different specimens

试样	回推点	起裂韧度/ ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$)	平均值/ ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$)
1	G5	4.7	5.0
	G7	5.2	
2	G5	5.1	5.5
	G7	5.9	
3	G5	4.8	5.2
	G7	5.5	
4	G5	4.8	4.8

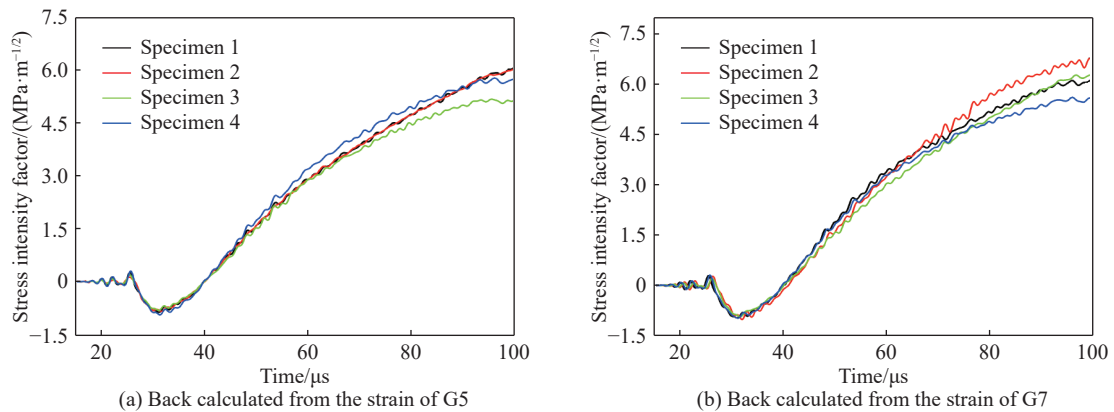


图 13 应力强度因子时程曲线

Fig. 13 Histories of the stress intensity factor

5 结 论

针对岩石钻孔爆破的特点,提出了以导爆索为加载源、水作为耦合介质的加载方式避免了在岩石试样中出现粉碎区,并对其进行了试验验证。以加载孔近区的径向应变曲线为基本参量,反演了加载孔壁的应力时程曲线表达式,通过相互作用积分法得到了青砂岩试样的动态起裂韧度,得到了以下结论:

(1)爆炸荷载与其他动荷载有显著的不同,爆生气体的存在是它的显著特征之一,正是由于爆炸荷载的特殊性其近区的应力时间历程曲线很难测得,本文中提供了一种采用数值反演法获取炮孔壁处反演应力时程曲线的方法。

(2)爆生气体延长了应力波的作用时间,在比例距离 16~56 范围内测得的应变曲线卸载时间是加载时间的 37 倍,在预制裂纹起裂时获得极值;加载时间为 1.9~3.0 μs ,随着比例距离的增大略微增长;应变峰值随着比例距离的增大呈幂指数衰减,平均衰减系数为 0.8。

(3)由于岩石材料本身的不均匀性,其起裂时间也存在一定的差异,本文试验中 4 个试样的起裂时间分别为 79.9、84.4、86.4、78.8 μs ,平均起裂时间为 82.4 μs ,断裂平均积累时间为 44.0 μs ;通过相互作用积分法,得到了 4 个砂岩试样的起裂韧度分别为 5.0、5.5、5.2、4.8 $\text{MPa}/\text{m}^{1/2}$,平均起裂韧度为 5.1 $\text{MPa}/\text{m}^{1/2}$ 。

参考文献:

- [1] ZHOU L, ZHU Z M, DONG Y Q, et al. The influence of impacting orientations on the failure modes of cracked tunnel [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 125: 134–142. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.11.010.
- [2] HU Y G, LIU M S, WU X X, et al. Damage-vibration couple control of rock mass blasting for high rock slopes [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 103: 137–144. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.01.028.
- [3] HASANIPANAH M, AMNIEH H B, ARAB H, et al. Feasibility of pso-anfis model to estimate rock fragmentation produced by mine blasting [J]. *Neural Computing and Applications*, 2018, 30(4): 1015–1024. DOI: 10.1007/s00521-016-2746-1.
- [4] YUE Z W, QIU P, YANG R S, et al. Stress analysis of the interaction of a running crack and blasting waves by caustics method [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 184: 339–351. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.08.037.
- [5] WANG Y B, YANG R S. Study of the dynamic fracture characteristics of coal with a bedding structure based on the NSCB impact test [J]. *Engineering fracture mechanics*, 2017, 184: 319–338. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.09.006.
- [6] SEGARRA P, SANCHIDRIAN A, CASTEDO R, et al. Coupling of blasting seismographs to rock and its effectiveness for horizontal ground motion [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 92: 81–90. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.12.012.
- [7] ZHOU L, ZHU Z M, DONG Y Q, et al. Study of the fracture behavior of mode I and mixed mode I/II cracks in tunnel

- under impact loads [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 84: 11–21. DOI: 10.1016/j.tust.2018.10.018.
- [8] YI C P, SJÖBERG J, JOHANSSON D. Numerical modelling for blast-induced fragmentation in sublevel caving mines [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 68: 167–173. DOI: 10.1016/j.tust.2017.05.030.
- [9] SIM Y, CHO G, SONG K. Prediction of fragmentation zone induced by blasting in rock [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(8): 2177–2192. DOI: 10.1007/s00603-017-1210-6.
- [10] 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. DOI: 10.6052/0459-1879-15-349.
- ZHANG C G, CAO F, LI L, 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. DOI: 10.6052/0459-1879-15-349.
- [11] 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. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.02.007.
- YANG J R, ZHANG C G, ZHOU Y, 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. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.02.007.
- [12] WANG Q, YANG J, ZHANG C, 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. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2015.04.025.
- [13] ZHOU Y, 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(1): 105–112. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2011.10.004.
- [14] DAI F, WEI M D, XU N W, et al. Numerical investigation of the progressive fracture mechanisms of four ISRM-suggested specimens for determining the mode I fracture toughness of rocks [J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, 69: 424–441. DOI: 10.1016/j.compgeo.2015.06.011.
- [15] 赵新涛, 刘东燕, 程贵海, 等. 爆生气体作用机理及岩体裂纹扩展分析 [J]. *重庆大学学报*, 2011, 34(6): 75–80. DOI: 10.11835/j.issn.1000-582x.2011.06.014.
- ZHAO X T, LIU D Y, CHENG G H, et al. Analysis of blasting gas mechanism and rock crack growth [J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 34(6): 75–80. DOI: 10.11835/j.issn.1000-582x.2011.06.014.
- [16] 杨小林, 王梦恕. 爆生气体作用下岩石裂纹的扩展机理 [J]. *爆炸与冲击*, 2001, 21(2): 111–116.
- YANG X L, WANG M S. Mechanism of rock crack growth under detonation gas loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2001, 21(2): 111–116.
- [17] 杨仁树, 丁晨曦, 王雁冰, 等. 爆炸应力波与爆生气体对被爆介质作用效应研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(S2): 3501–3506. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0066.
- YANG R S, DING C X, WANG Y B, et al. Action-effect study of medium under loading of explosion stress wave and explosion gas [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(S2): 3501–3506. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0066.
- [18] 李清, 薛耀东, 于强, 等. 含预制裂纹 L 形梁柱试件动态断裂过程 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(3): 491–500. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0255.
- LI Q, XUE Y D, YU Q, et al. Dynamic fracture processes of L-shaped beam-column specimens with prefabricated cracks [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(3): 491–500. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0255.
- [19] 邱加冬, 李地元, 李夕兵, 等. 预制缺陷对花岗岩层裂破坏的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(3): 665–670. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0310.
- QIU J D, LI D Y, LI X B, et al. Effect of pre-existing flaws on spalling fracture of granite [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(3): 665–670. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0310.

- [20] 张柱, 赵慧, 于晖. 混凝土材料动态力学性能实验与数值模拟研究 [J]. *高压物理学报*, 2011, 25(6): 533–538. DOI: 10.11858/gywlb.2011.06.00.
ZHANG Z, ZHAO H, YU H. Experiments and numerical simulations of concrete dynamic mechanical properties [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2011, 25(6): 533–538. DOI: 10.11858/gywlb.2011.06.00.
- [21] 张培文, 李世强, 王志华, 等. 爆炸荷载作用下具有可折叠芯层夹芯梁的动态响应 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(1): 140–147. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0017.
ZHANG P W, LI S Q, WANG Z H, et al. Dynamic response of sandwich beam with foldable core under blast loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(1): 140–147. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0017.
- [22] 胡刚, 郝传波, 景海河. 爆炸作用下岩石介质应力波传播规律研究 [J]. *煤炭学报*, 2001, 26(3): 270–273. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2001.03.010.
HU G, HAO C B, JING H H. Study of the laws of stress wave propagation in rock bar under blasting loading [J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(3): 270–273. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2001.03.010.
- [23] 刘明涛, 汤铁钢, 郭昭亮, 等. 膨胀环实验平台及其在材料动力学行为研究中的应用 [J]. *实验力学*, 2016, 31(1): 47–56. DOI: 10.7520/1001-4888-15-022.
LIU M T, TANG T G, GUO Z L, et al. Expanding ring experimental platform and its application in material dynamic mechanical behavior investigation [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2016, 31(1): 47–56. DOI: 10.7520/1001-4888-15-022.
- [24] SHI F F, MERLE R, HOU B, et al. A critical analysis of plane shear tests under quasi-static and impact loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 74(9): 107–119. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.06.012.
- [25] CHOUDHRY S, LEE J K. Dynamic plane-strain finite element simulation of industrial sheet-metal forming processes [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 36(3): 189–207. DOI: 10.1016/0020-7403(94)90069-8.
- [26] XIA K, HUANG S, DAI F. Evaluation of the frictional effect in dynamic notched semi-circular bend tests [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 62(9): 148–151. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2013.06.001.
- [27] 张盛, 李新文. 中心孔径对岩石动态断裂韧度测试值的影响 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(8): 1660–1666. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.1404.
ZHANG S, LI X W. Influence of diameter of center holes on measured values of dynamic fracture toughness of rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(8): 1660–1666. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.1404.
- [28] 徐世娘. 混凝土断裂试验与断裂韧度测定标准方法 [M]. 北京: 机械工业出版社出版, 2010.
- [29] 洪亮, 李夕兵, 马春德, 等. 岩石动态强度及其应变率灵敏性的尺寸效应研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(3): 526–533. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2008.03.012.
HONG L, LI X B, MA C D, et al. Study on size effect of rock dynamic strength and strain rate sensitivity [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(3): 526–533. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2008.03.012.
- [30] 周妍, 张财贵, 杨井瑞. 圆孔内单边 (或双边) 裂纹平台巴西圆盘应力强度因子的全面标定 [J]. *应用数学和力学*, 2015, 36(1): 16–30. DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2015.01.002.
ZHOU Y, ZHANG C G, YANG J R. Comprehensive calibration of the stress intensity factor for the holed flattened brazilian disc with an inner single crack or double cracks [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2015, 36(1): 16–30. DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2015.01.002.
- [31] 樊鸿, 张盛, 王启智. 用应变片法确定混凝土动态起裂时间的研究 [J]. *振动与冲击*, 2010, 29(1): 153–156. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2010.01.033.
FAN H, ZHANG S, WANG Q Z. Determining dynamic fracture initiation time for concrete with strain gauge method [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(1): 153–156. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2010.01.033.
- [32] WEISBROD G, RITTEL D. A method for dynamic fracture toughness determination using short beams [J]. *International Journal of Fracture*, 2000, 104(1): 89–103. DOI: 10.1023/a:1007673528573.
- [33] 闫长斌, 徐国元, 杨飞. 爆破动荷载作用下围岩累积损伤效应声波测试研究 [J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(1): 88–93. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2007.01.014.

- YAN C B, XU G Y, YANG F. Measurement of sound waves to study cumulative damage effect on surrounding rock under blasting load [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(1): 88–93. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2007.01.014.
- [34] 张培源, 张晓敏, 汪天庚. 岩石弹性模量与弹性波速的关系 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(6): 785–788. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2001.06.006.
- ZHANG P Y, ZHANG X M, WANG T G. Relationship between elastic moduli and wave velocities in rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(6): 785–788. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2001.06.006.
- [35] 尹尚先, 王尚旭. 弹性模量、波速与应力的关系及其应用 [J]. *岩土力学*, 2003(S2): 597–601. DOI: 10.16285/j.rsm.2003.s2.143.
- YIN S X, WANG S X. Relation of stresses with elastic modulus and velocities and its application [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003(S2): 597–601. DOI: 10.16285/j.rsm.2003.s2.143.
- [36] 杨桂通, 张善元. 弹性动力学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988.
- [37] RICE J R. A path integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1968, 35(2): 379–386. DOI: 10.1115/1.3601206.
- [38] 宫经全, 张少钦, 李禾, 等. 基于相互作用积分法的应力强度因子计算 [J]. *南昌航空大学学报 (自然科学版)*, 2015, 29(1): 42–48. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4926.2015.01.007.
- GONG J Q, ZHANG S Q, LI H, et al. Computation of the stress intensity factor based on the interaction integral method [J]. *Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences)*, 2015, 29(1): 42–48. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4926.2015.01.007.

(责任编辑 王易难)