

爆炸载荷下砂岩动态断裂特性的试验研究

刘瑞峰^{1,2}, 朱哲明^{1,2}, 刘 邦^{1,2}, 万端莹^{1,2}, 李 盟^{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 建筑与环境学院, 四川 成都 610065)

摘要: 为研究爆炸载荷下砂岩的断裂特性, 对3种砂岩试件进行爆炸试验, 借助XRD(X-ray diffraction)衍射图谱分析测试和SEM(scanning electron microscope)电镜扫描, 研究砂岩的成分、预制裂纹的扩展断裂面微观结构等, 利用有限元软件ABAQUS建立数值计算模型, 通过试验-数值法得出I型裂纹的裂纹扩展速度、动态断裂韧度等参数。试验结果表明: (1) 炮孔周围的砂岩主要以塑性破坏为主, 扩展裂纹断面的破坏形态主要以脆性断裂为主, 3种砂岩成分的不同表现出微观晶体破坏形式、裂纹扩展速度、断裂韧度等的不同; (2) 动态裂纹的扩展速度不是一个定值, 在扩展过程中有起伏变化, 黑砂岩的速度要高于红砂岩和青砂岩; (3) 黑砂岩的动态起裂韧度要高于红砂岩和青砂岩, 并且动态扩展韧度与扩展速度基本成反比关系。

关键词: 岩石力学; 爆炸载荷; 砂岩; 扩展速度; 断裂韧度

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2019)03-0445-10

Experimental study on dynamic fracture characteristics of sandstones under blasting

LIU Ruifeng^{1,2}, ZHU Zheming^{1,2}, LIU Bang^{1,2}, WAN Duanying^{1,2}, LI Meng^{1,2}

(1. MOE Key Laboratory Deep Underground Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

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

Abstract: In order to study the fracture characteristics of sandstones under blasting loads, blast tests were carried out on three kinds of sandstone specimens. By X-ray diffraction analysis and scanning electron microscope, the composition of the sandstones and the microstructure of the propagation fracture surface of pre-cracks were studied respectively. A numerical calculation model was established by ABAQUS code and the parameters of mode I crack such as the crack propagation speed and the dynamic fracture toughness were obtained by using experimental-numerical method. The test results show that the main failure mode of the sandstone around the borehole is plastic failure, that the main failure mode of the crack propagation section is brittle fracture and that the different compositions of the three sandstones result in different failure modes of microcrystal, different crack propagation speeds and different fracture toughnesses. The propagation speed of the dynamic crack is not a constant, and the propagation speed and the dynamic initiation toughness of the black sandstone are higher than those of the red and green sandstones. It is also shown that the dynamic propagation toughness is inversely proportional to the

收稿日期: 2018-09-06; **修回日期:** 2018-12-03

基金项目: 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)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 11672194 and 11702181) and Sichuan Administration of Work Safety(Grant No. aj20170515161307)

作者简介: 刘瑞峰(1988-), 男, 2011年毕业于华北理工大学采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石断裂力学方面的研究工作。E-mail: liuruifeng19880209@163.com。通讯作者: 朱哲明(1965-), 男, 博士, 现任教授、博士生导师。E-mail: zhemingzhu@hotmail.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1066

propagation speed.

Key words: rock mechanics; blasting loads; sandstone; propagation speed; fracture toughness

1 引言

在实际施工过程中, 由于震动或者爆炸等形成的应力波会使缺陷岩体, 如裂隙、孔洞^[1], 发生起裂扩展, 进而使整个岩体发生破坏, 如隧道爆破扰动围岩破碎、井下冲击地压发生岩爆以及瓦斯爆炸造成临近巷道的破坏等。岩石是由一种或几种矿物组成的具有稳定外形的固态集合体, 不同种类岩石的断裂行为也不尽相同。K. Thuro^[2]通过岩石的特定破岩做功得到新的韧性指标, 对比了不同岩石的韧性。岩石的宏观脆性断裂是由众多微裂纹的萌生、扩展、增殖和聚结组成的一个渐进过程^[3], J. J. Gallagher 等^[4]分析了砂岩的微观断裂, 指出石英颗粒的断裂基本是沿晶破坏。H. P. Xie 和 Z. D. Chen^[5]对岩石的微观断裂分形计算得出, 岩石中颗粒发生穿晶破坏比沿晶破坏更困难。因此, 不同种类的岩石其动态断裂行为与断裂韧度也存在着差异^[6-7], 这与岩石的微观结构和空隙等有一定的关系^[8], 因此对于动态载荷下不同岩石的断裂行为与扩展规律的研究是非常必要的。

岩石在动态破坏常常是在一瞬间发生的, 这个过程中伴随着岩石裂纹的起裂、扩展从而使整体发生失稳而导致破坏, 岩石的动态断裂韧度是反映岩石在动态载荷下抵抗裂纹起裂与扩展性能的重要参数和指标^[9], 对于评价岩体强度与质量有着重要的作用。

分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)被较为普遍地运用于冲击载荷下的岩石动态断裂韧度和断裂行为的研究。如 single cleavage semi circle-SCSC 试件^[10]、single cleavage drilled compression-SCDC^[11-12]试件的冲击试验, 试验表明裂纹扩展计能够准确地测试动态裂纹的扩展速度, 并且它不是一个恒定值。但由于试件尺寸的限制^[13], 在试验过程中裂纹的动态扩展受反射波和透射波的影响, 为了减小这些影响, 落锤试验系统得以运用。L. Zhou 等^[14]利用单径向裂纹的隧道试件, 获得了隧道周围裂缝的裂纹萌生和扩展规律, 并指出了临界应力强度因子与速度成反比。X. M. Wang 等^[15]提出 VB-SCSC 试件, 研究了裂纹的动态止裂现象, 并通过试验-数值法结合 ABAQUS 计算了起裂、扩展以及止裂的临界应力强度因子。

与冲击载荷相比, 爆炸载荷在岩石工程中更为频繁, 因此, 相应的研究更为重要。爆炸载荷比冲击载荷更复杂, 主要表现在 2 个方面: 一是其动态加载率明显高于冲击载荷, 二是爆炸波是发散的球面波或柱面波, 而冲击波则是由 SHPB 或落锤系统引起的一维 P 波。因此, 与冲击载荷相比, 爆炸载荷作用下的材料断裂行为与特性是不同的。L. Y. Yu 等^[16]借助单轴加速计收集了应变信号数据, 指出在爆炸载荷下砂岩的变形特征从延性逐渐增加到脆性, 这可能是由于爆炸引起的应力与峰值粒子速度随传播距离呈非线性衰减。借助动态焦散试验系统, 杨仁树和王雁冰^[17]研究了开槽药包解耦爆破过程的有机玻璃的断裂行为, 分析了主裂纹与次生裂纹的扩展速度、动态应力强度因子以及能量释放率等主要断裂参数, 指出能量优先沿槽口方向释放, 径向裂纹在开槽方向上在拉伸应力下快速传播, 并且会抑制其他方向上的裂纹扩展。李盟等^[18-19]研究了对称的孔洞对爆炸载荷作用下裂纹扩展的止裂作用, 指出孔洞间存在的压缩应力场会作用于动态扩展裂纹, 并且孔洞之间的距离越小, 止裂效果越明显。Z. M. Zhu 等^[20-22]利用雷管加载的贯穿边裂纹试件, 通过试验-数值法测得了脆性材料的起裂韧度与扩展规律, 描述了脆性材料在爆炸载荷下的断裂行为与特性。

虽然从试验与数值模拟的角度来看, Z. M. Zhu 等^[23-25]一直致力于爆炸中岩石动态断裂的研究, 并取得了许多显著的成果, 但仍有一些未知的方面需要探究, 比如岩石为何在爆炸载荷下主要呈现的是脆性断裂, 为何不同岩石在相同的爆炸载荷下的断裂特性不同, 爆炸后裂纹在砂岩中的扩展规律是怎样的。本文着重介绍了不同岩石的成分、性质、爆破后断口的微观结构、爆破中的裂纹扩展行为以及不同脆性材料在爆破作用下动态临界应力强度因子的测试方法等。

2 试验研究

本文采用了 3 种砂岩, 即黑砂岩、红砂岩和青砂岩的大尺寸内部单裂纹圆盘(single internal crack circular disc, SICCD)试件进行爆炸动态断裂试验, 通过 XRD(X-ray diffraction)衍射图谱分析测试了 3 种砂岩的成分, SEM(scanning electron microscope)

观察了试件预制裂纹断口的微观断裂形态，借助示波器、超动态应变仪与裂纹扩展计搭建的数据采集系统，对 I 型裂纹扩展过程中的动态断裂参数进行了监测，并借助于 ABAQUS 有限元程序进行数值模拟计算，运用试验 - 数值法得到 3 种砂岩在爆炸过程中的动态参数。

2.1 SICCD 试件

图 1 为 SICCD 试件，试验中的边界为自由边界，距离炮孔 30 mm 处贴有径向和环向应变片用以测试爆炸载荷，雷管放置在炮孔处，试件的厚度为 15 mm，而雷管的主装药长度大于这个值，这就使得爆炸载荷能够完全加载于试件。预制裂纹的尖端黏贴了裂纹扩展计(crack propagation gauge, CPG)，宽度为 10 mm，长度为 40 mm，在预制裂纹扩展方向有 21 根敏感栅并联成电阻，每当预制裂纹从一根敏感栅扩展到下一根敏感栅，CPG 的电压就会改变，从而产生台阶信号来确定裂纹扩展到此处的时刻，每根敏感栅之间的距离为 2 mm。试件的预制裂纹长度 $a = 100$ mm，炮孔半径 $r = 3.5$ mm，圆板半径 $R = 250$ mm，试样采用高精度机械加工而成，精确度有可靠的保证。

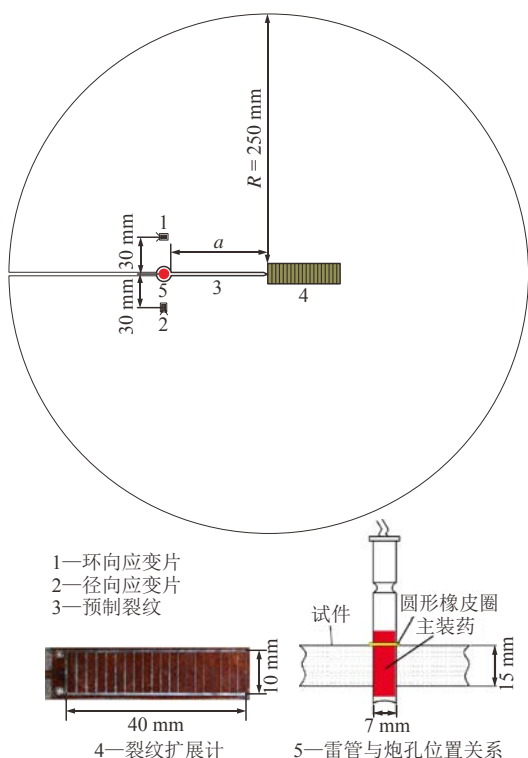


图 1 带有预制裂纹与炮孔的 SICCD 试件示意图

Fig.1 Sketch of a SICCD specimen with a prefabricated crack and a blast hole

Sonic Viewer-SX 是一款岩样超声波波速测试仪器(见图 2)，包含高压(500 V)脉冲发射器和接收

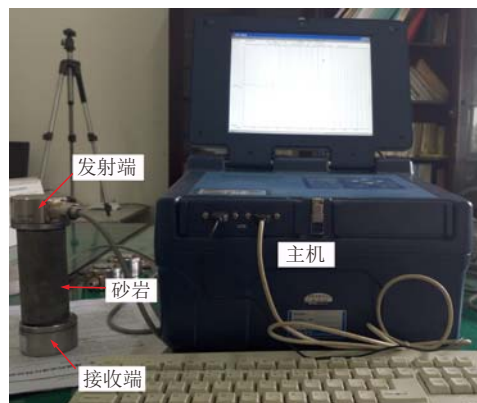


图 2 Sonic Viewer-SX 岩样超声波波速测试系统

Fig.2 Ultrasonic speed testing system for rock sample of Sonic Viewer-SX

器，接收器内带有 12 位/50 ns 的 A/D 转换器，可以高精度读取 P 波、S 波的传播情况，内置的软件可以计算动态泊松比 μ_d 、动态弹性模量 E_d 等参数。通过测试得到砂岩的动态参数(见表 1)。

表 1 3 种砂岩的动态参数

Table 1 Dynamic parameters of three kinds of sandstone

岩性	P 波波速 $C_p/(m \cdot s^{-1})$	S 波波速 $C_s/(m \cdot s^{-1})$	动态弹性模量 $E_d/(G \cdot N \cdot m^{-2})$	动态泊松比 μ_d	密度 $\rho / (kg \cdot m^{-3})$
黑砂岩	3 724	2 364	33.8	0.21	2 475
红砂岩	2 897	1 758	24.5	0.19	2 317
青砂岩	2 430	1 260	12.5	0.26	2 370

2.2 XRD 测试砂岩成分

X 射线衍射，是通过对材料进行 X 射线衍射，分析其衍射图谱，获得材料的成分、材料内部原子或分子的结构或形态等信息的一种研究手段。将试样制备成粉末状，细度控制在 $45 \mu m$ 左右，即应过 325 目筛。通过 X 射线衍射测试，得到了黑砂岩、红砂岩以及青砂岩 3 种岩石的成分组成(见表 2)。

表 2 砂岩的成分及化学式

Table 2 Ingredient and chemical formulas of three kinds of sandstone

材料	主要成分
黑砂岩	石英: SiO_2
	斜绿泥石: $(Mg, Fe)_{4.75}Al_{1.25}[Al_{1.25}Si_{2.75}O_{10}](OH)_8$
	方解石: $Ca[CO_3]$
红砂岩	白云母: $K\{Al_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2\}$
	石英: SiO_2
	方沸石: $Na[AlSi_2O_6] \cdot H_2O$
青砂岩	钠长石: $Na[AlSi_3O_8]$
	白云母: $K\{Al_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2\}$
	石英: SiO_2

从 X 射线衍射测试结果可以看出，3 种砂岩的主要矿物成分中均有石英(SiO₂)，石英是一种非可塑性材料且质地坚硬，其破坏往往表现为脆性破坏，因此 3 种砂岩的破坏特征也均表现为脆性断裂，这与有缺陷有机玻璃的断裂特性是相似的。

黑砂岩和红砂岩的主要成分中均有白云母(K{Al₂[AlSi₃O₁₀](OH)₂}₂)，其中羟基 OH⁻性质较为活泼，易与水分子以及其他物质结合，这也进一步提高了材料颗粒之间的胶结度。黑砂与其他 2 种岩石相比，其成分更为复杂，其中的斜绿泥石((Mg, Fe)_{4.75}Al_{1.25}[Al_{1.25}Si_{2.75}O₁₀](OH)₈)含有多种金属元素，多见于金属矿石中，质地密实；含有的方解石(Ca[CO₃])是灰岩的主要成分，灰岩具有很好的胶结性能和一定的强度，这也能进一步提高黑砂岩本身的强度。

2.3 爆炸试验结果分析

试验的测试系统的数据采集部分主要由 CS - 1D 超动态电阻应变仪和 DS1104 示波器组成，如图 3 所示，恒压电源为 CPG 与电阻 R₁，R₂ 组成的电路提供稳定的电压，保证合理分压可以测试到更加准确的电压台阶信号，为后续的研究提供可靠数据。试验中为保证数据传输的可靠，采用电气连接抗干扰软电缆线，接线处均要进行焊锡丝焊接来减少线头之间摩擦造成的信号干扰，之后用绝缘胶布添加屏蔽层，减少外界对电缆线的电磁干扰。由于爆炸试验的测试时间非常短暂，达到了微秒级，因此这些工作必须要一一进行检查，保证信号的准

确传输，具体的介绍操作流程可见刘瑞峰等^[22]中节 2.2 描述。

2.4 爆炸试验载荷的测量

为了测量炮孔周围的爆炸引起的应变，它可以用来计算炮孔周围的压力，由于爆炸后炮孔周围会有 20.6~23.7 mm 半径的塑性破坏区，因此径向和环向应变片被黏贴在距炮孔中心 30 mm 处(见图 1)。通过使用图 3 中的测试系统，可以测量到应变片的电压信号，并通过下式将电压信号转换成应变：

$$\varepsilon = \frac{4\Delta U}{n\bar{E}K} \quad (1)$$

式中： ε 为应变； ΔU 为测量电压； n 为动态应变仪的放大倍数， $n = 1\ 000$ ； \bar{E} 为供桥电压， $\bar{E} = 2V$ ； K 为应变计灵敏度系数， $K = 2.1$ 。

$\varepsilon_c(t)$ 与 $\varepsilon_r(t)$ 分别为由距离炮孔中心处的应变片测得的环向应变和径向应变，这 2 个应变与时间的函数关系见图 4。可以看出，环向的应变的峰值大于径向压缩应变的峰值(绝对值)，但对应于环向应变峰值出现的时间比径向应变的峰值晚。

根据平面应力状态的应力 - 应变关系，爆炸应力可以通过下式求得

$$p(t) = \frac{E_d}{1 - \mu_d^2} [\varepsilon_r(t) + \nu_d \varepsilon_c(t)] \quad (2)$$

式中： $p(t)$ 为作用在距炮孔中心 30 mm 处的压应力， E_d 为动态弹性模量， μ_d 为动态泊松比。根据图 4 所示的应变随时间变化的曲线，可以用式(2)计算压应力。

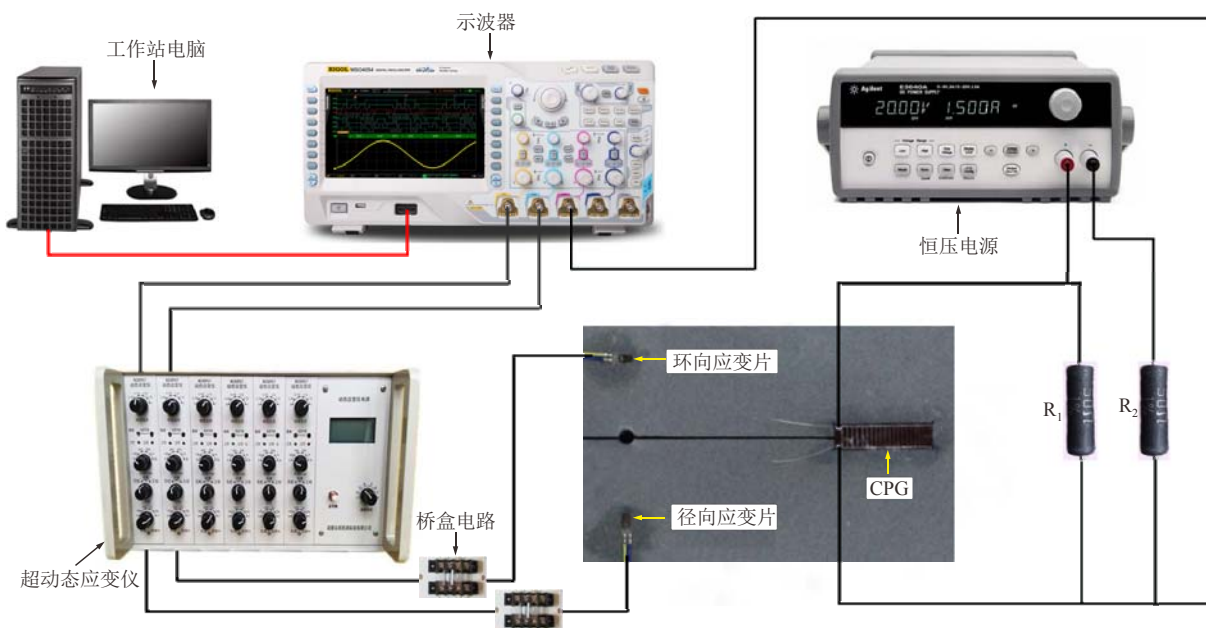


图 3 测试系统示意图

Fig.3 Diagram of the test system

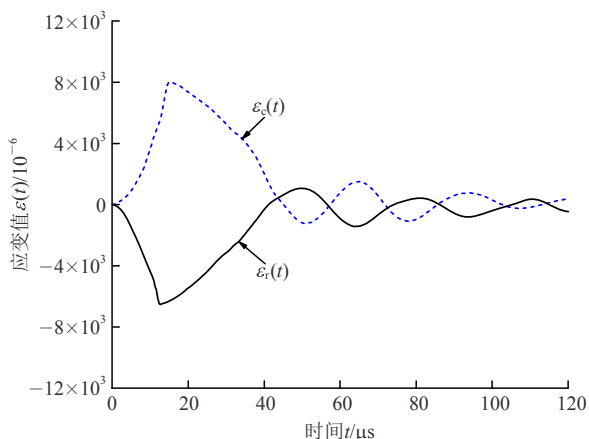


图 4 距离炮孔中心 30 mm 处的应变值

Fig.4 Strain values at 30 mm distance from the center of the borehole

在图 5 中，试件在爆炸应力波作用下的压应力峰值为 62.9 MPa。对于典型的商用炸药，在起爆时刻施加在孔壁上的爆轰压力可以很容易超过 10 GPa^[26]，但在本研究中，仅使用雷管，考虑到爆炸后炮孔周围形成塑性破坏区会使这个区域的应变片破坏，从而无法测试出完整的应变值，因此，2 个应变片被黏贴在距炮孔中心 30 mm 的地方，故本试验中测量的压应力相对较低。

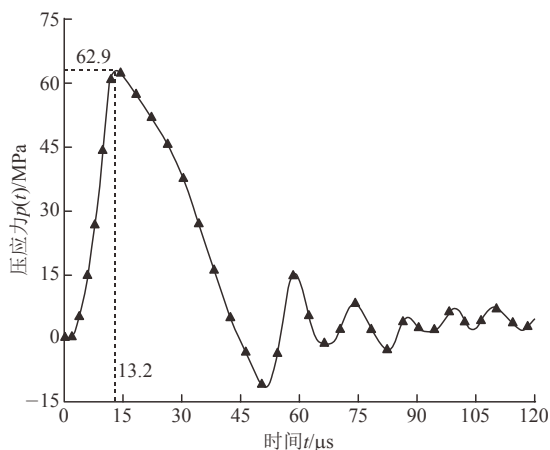


图 5 距离炮孔中心 30 mm 处的压应力

Fig.5 Pressure values at 30 mm distance from the center of the borehole

2.5 试验结果与分析

从图 6 可以看出，3 种砂岩的传播路径不是完全的直线，而黑砂岩比红砂岩和青砂岩更弯曲。这可能是由于砂岩材料的非均质性，使得材料应力场分布不均匀，由于黑砂岩的成分更复杂，且胶结性能与强度更好，因此裂纹在扩展过程中也会产生更大的偏转。此外，爆炸瞬间会产生巨大的能量，而能量在试件中的传递也不可能是完全对称的，这也

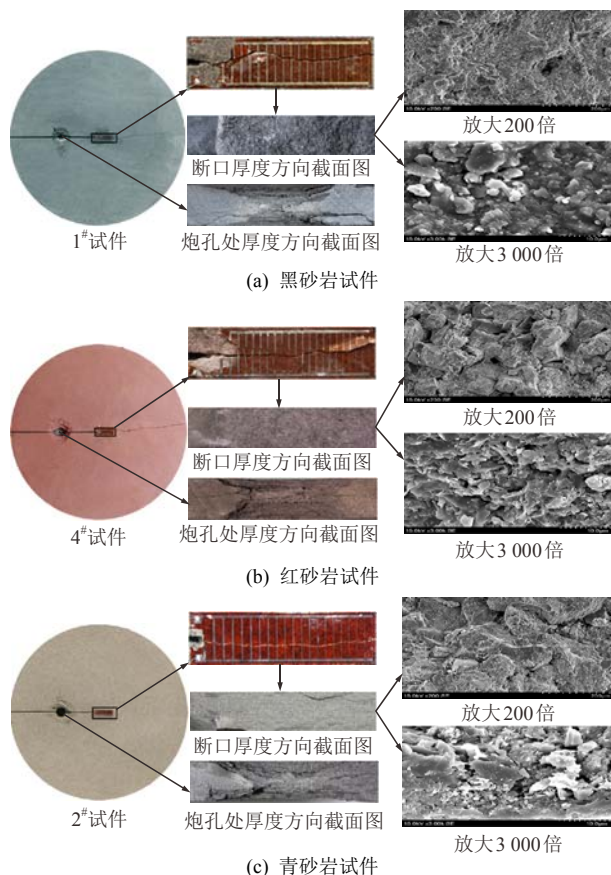


图 6 试件断裂模式及断口电镜扫描图

Fig.6 Fracture mode and scanning electron microscope of the specimens

可能导致裂纹尖端附近应力场的不平衡，最终，裂纹可能偏离原始的纯直线传播路径，但偏差小，在 CPG 的测试范围内。

从图 6 中炮孔处厚度方向截面图可以看出，雷管起爆之后在炮孔处产生了塑性破坏区，爆轰波初期产生很高的压力，此时的塑性破坏以压剪为主；之后随着爆轰波的传播，在破裂面上产生了一定的反射，此时多以拉剪破坏为主，而后衰减为应力波继续在岩石中高速传播。

从塑性区看出，黑砂岩的破坏半径为 20.6~21.7 mm，相比红砂岩的 22.1~23.2 mm 和青砂岩的 22.6~23.7 mm 要小一些，破坏的深度也相对较小，说明黑砂抵抗塑性破坏的能力要强得多；从截面可以看出岩石的塑性破坏伴生了沿爆轰波传播方向的层裂纹，其中黑砂岩的层裂纹在扩展过程中发生了偏折，说明在裂纹扩展过程中能量的释放受到了一定程度的阻碍，而红砂岩和青砂岩的层裂纹则基本是沿直线扩展。

从图 6 断口厚度方向截面图中可以看出，这种破坏与炮孔处的塑性破坏不同，主要以脆性拉伸破

坏为主。在起裂后的一段扩展过程中，黑砂的表面较为粗糙，说明应力波的能量在释放过程不均匀，材料抵抗能量的释放，而红砂岩和青砂岩断面相对较为光滑，能量的传递较为顺利，表现为黑砂岩扩展过程中的动态临界应力强度因子值基本大于后两者。不同的砂岩试件在宏观上表现出不同的断裂行为，而对于其成分和微观结构的分析能对宏观现象加以解释。

不同砂岩试件在爆炸试验之后，其微观破坏特征也需要进一步进行研究。当爆炸发生后，应力波从炮孔壁开始传播，扩展至预制裂纹尖端，开始作用于岩石中的微观颗粒，使之发生变形，当能量累积到临界值，最终导致胶结的颗粒失稳破坏。红砂岩与青砂岩颗粒间的破坏以沿晶为主，黑砂岩颗粒的破坏以沿晶为主。谢和平和陈至达^[27]在岩石断裂的分形研究中提出穿晶破坏要比任何一种沿晶破坏耗散更高的能量，因此在岩石破坏中沿晶破坏要先于穿晶破坏，当岩石的颗粒间胶结程度更高，换言之韧度更强时，微裂纹无法沿晶扩展，便发生穿晶破坏。图6中，将3种试件放大到200倍时，可以看到每种岩石颗粒的微观结构，其中黑砂岩的断裂面较为平整，微裂纹的扩展形式主要以穿晶破坏为主，而红砂岩与青砂岩的微裂纹扩展形式主要以沿晶破坏为主；放大到3000倍时，黑砂岩的孔隙比红砂岩与青砂岩要少，其胶结程度较好，也解释了黑砂岩的颗粒多以穿晶破坏为主，沿晶破坏较少，表明黑砂岩在起裂时具有更高的动态断裂韧度。

2.6 裂纹断裂时刻与扩展速度的确定

CPG由21根导线组成，随着裂纹的扩展，CPG的栅丝将逐一断开，并可测量电压信号与时间的梯形曲线。CPG电压信号的导数峰值是敏感栅的断裂时间，即动态裂纹的扩展时间，第一个峰值是裂纹起裂时间。

当动态裂纹每扩展一段距离，CPG的敏感栅就会被拉断一根，示波器的屏幕上就产生了一个电压信号，之后每断一根就对应一个电压台阶信号，然后将电压信号对时间进行一阶求导，导数峰值所对应的时刻即是裂纹的扩展时刻。以青砂岩试件为例，图7为预制裂纹尖端的裂纹扩展计CPG测试得到的电压信号。

从图8中可以看出，3种砂岩的裂纹扩展速度不是恒定的，以黑砂岩为例，在第3根敏感栅与第5根敏感栅之间，即动态裂纹扩展到6mm时，裂

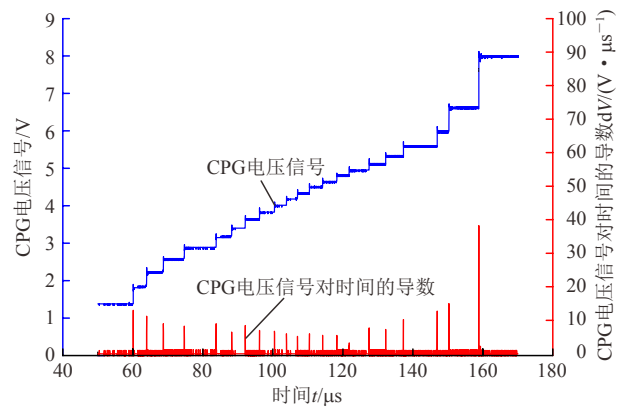


图7 CPG断裂电压信号(以青砂岩为例)

Fig.7 CPG voltage signal of a green sandstone specimen

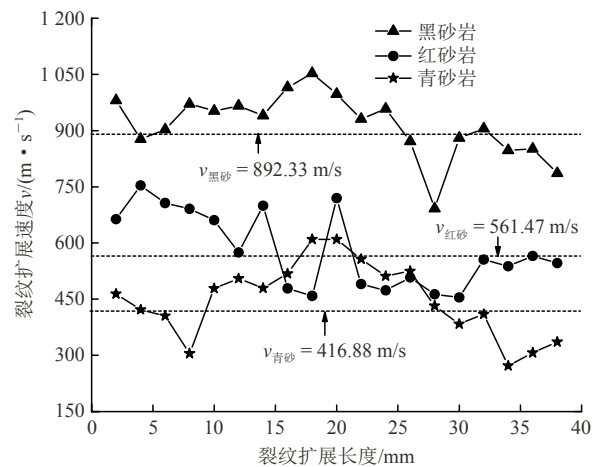


图8 3种砂岩的裂纹扩展速度对比

Fig.8 Comparison of the crack propagation speeds of three kinds of sandstones

纹扩展速度约为902.54 m/s，从第13根敏感栅开始，即扩展长度为24mm时，裂纹扩展速度开始变得缓慢。在第14根敏感栅与第16根敏感栅之间的值大约为692.04 m/s。此外，还得到了3种砂岩的平均扩展速度，黑色砂岩试件、红砂岩试件与青砂岩试件的值分别为892.33，561.47和416.88 m/s。

同样，对于其他砂岩试件，其裂纹扩展时刻与裂纹扩展速度均可以求得，并将其结果应用于动态裂纹扩展过程中临界动态应力强度因子的后续计算中。

2.7 试件尺寸合理性验证

K. Ravi-chandar和W. G. Knaus^[28]在应力波载荷下研究了Homalite 100的裂纹扩展行为，并指出应力波反射可能存在于尺寸相对较小试样的边界处，而反射波对于裂纹扩展的影响不能够忽略。因此，爆破试验中的试样尺寸应足够大，以避免反射拉伸应力波对裂纹扩展行为的影响。根据试样边界反射的拉伸波到达动态扩展裂纹尖端的方法，可以确定

试样尺寸的合理性，当裂纹扩展活动完成后，反射的拉伸应力波的影响可以忽略不计。

雷管起爆后，应力波先以压缩波的形式传播，遇到边界后形成反射拉伸波。3 种岩石预制裂纹之后的扩展长度均从 CPG 的第 1 根敏感栅到最后 1 根敏感栅，因此以青砂岩试件为例说明，如图 9 所示。左侧边界形成拉伸波的路径长度为 $(L + R + 40) = 150 + 250 + 40 = 440 \text{ mm}$ ，而右侧边界的则为 $(L' + R') = 460 \text{ mm} > 440 \text{ mm}$ ，其中 $L' = a + R = 350 \text{ mm}$ ， $R' = R - 40 = 210 \text{ mm}$ ，因此左侧的发射拉伸波最先到动态扩展裂纹的尖端。

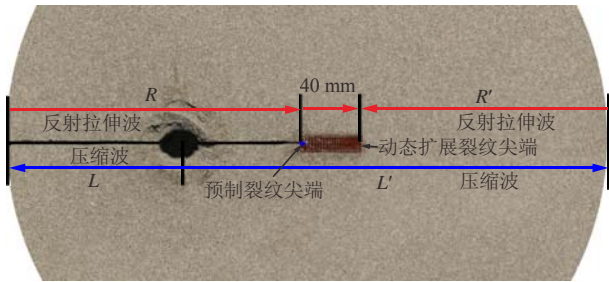


图 9 试件尺寸合理性验证(以青砂岩试件为例)
Fig.9 Rationality of SICCD specimen dimensions-taking (the green sandstone sample as an example)

对于青砂岩而言，其 P 波波速为 2 430 m/s，CPG 监测到青砂岩的起裂时间 $t_0 = 60.10 \mu\text{s}$ ，反射拉伸波到达预制裂纹尖端的时间为 $t_3 = (L + R)/2\ 430 = 164.61 \mu\text{s}$ ；CPG 扩展结束的时间 $t_1 = 157.16 \mu\text{s}$ ，拉伸波到达动态扩展裂纹尖端的时间为 $t_4 = (L + R + 40)/2\ 430 = 181.07 \mu\text{s}$ 。由于 $t_3 > t_0$ ， $t_4 > t_1$ ，在左侧边界的反射拉伸波到达时，被监测的动态裂纹扩展已经结束，试验测试的数据不受反射拉伸波的影响，是准确的。同理，对于红砂岩与黑砂岩，其试件的尺寸也是合理的，所测试得到的数据不会受到边界反射拉伸波的影响，是准确可靠的。

3 动态应力强度因子的计算

3.1 ABAQUS 的应力强度因子的计算

ABAQUS 数值软件已广泛应用于动态应力强度因子的计算，有效性得到了良好的验证^[14-15]。为此，本文应用 ABAQUS 数值软件的隐式动态分析数值模块进行求解，建立了 SICCD 试件在爆破作用下的有限元模型。用 1/4 点三角形单元 CPS6 对裂纹尖端附近区域进行网格划分，如图 10 所示，对其它区域应用四边形单元 CPS8，模型边界均采用与试验对应的自由边界。目前对于动态裂纹应力强度

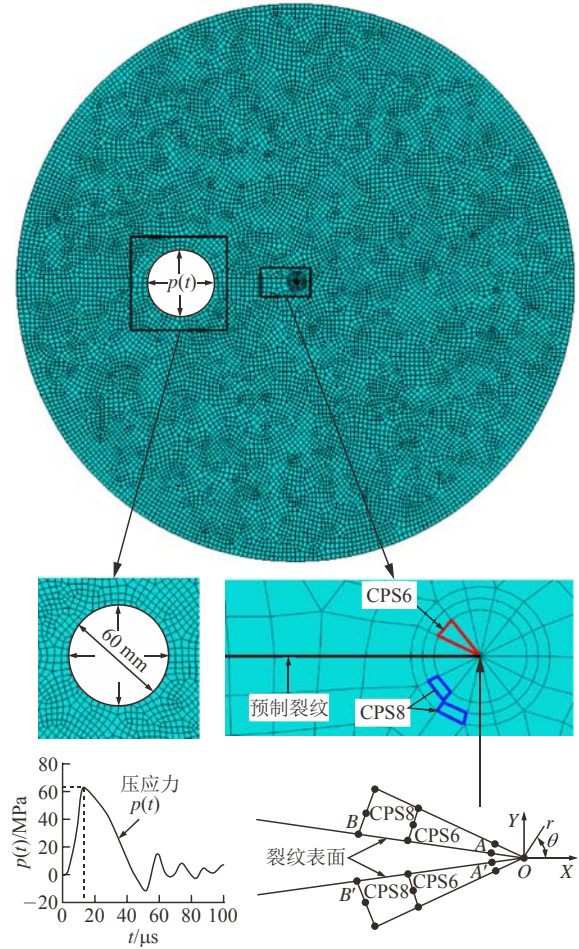


图 10 ABAQUS 数值计算模型
Fig.10 Numerical calculation model by ABAQUS

因子的计算是利用普适函数对准静态下裂纹尖端的应力强度因子进行动态修正得到的，准静态状态下，裂纹尖端的应力场与位移场可以表述为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ u_x &= \frac{K_I}{E} (1 + \mu) \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} (\kappa - \cos \theta) \\ u_y &= \frac{K_I}{E} (1 + \mu) \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} (\kappa - \cos \theta) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

采用相对位移外推法计算准静态下 I 型裂纹尖端应力强度因子：

$$u_y(r, \theta, t) = K_I^0 \frac{1+\mu}{2E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2\kappa+1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (4)$$

图 6 所示的压力是在距炮孔中心 30 mm 的位置利用应变片测量的，因此在图 10 所示的有限元数值

计算模型中, 炮孔直径被扩大到 60 mm(原始钻孔直径是 7 mm), 并且图 6 所示的加载曲线以该模式施加在炮孔壁上。预制裂纹被认为是理想的尖锐裂纹, 裂纹附近的网格被细化。根据断裂力学理论, 由图 10 点 A 和 B 处的位移可以计算裂纹的应力强度因子 $K_I(t)$, 关系式^[29]可以写成:

$$K_I(t) = \frac{E}{24(1-\mu_d^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{r_{OA}}} [8u_A(t) - u_B(t)] \quad (5)$$

式中: $u_A(t)$, $u_B(t)$ 分别为点 A 和 B 处的位移; E 为弹性模量; r_{OA} 为点 O 到 A 的距离。

3.2 动态应力强度因子的普适函数修正

动态扩展裂纹的动态应力强度因子与静止裂纹的动态应力强度因子不同。动态扩展裂纹的动态应力强度因子应该是静止裂纹的动态应力强度因子和普适函数 $k(v)$ 的乘积^[30], 即

$$K_I^d(t) = k(v)K_I^0(t) \quad (6)$$

式中: v 为瞬时裂纹速度; $k(v)$ 为普适函数, 可以近似为

$$k(v) = \frac{1-v/C_R}{\sqrt{1-hv}} \quad (7)$$

其中,

$$h = \frac{2}{C_d} \left(\frac{C_S}{C_R} \right)^2 \left(1 - \frac{C_S}{C_d} \right)^2 \quad (8)$$

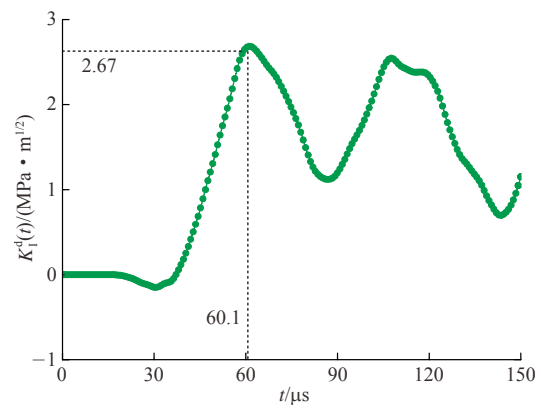
式中: C_d 为 P 波波速, C_R 为瑞利波波速, C_S 为 S 波波速。当 $v = 0$, $k(0) = 1$ 时, 这意味着对于处于起始和停止状态的裂纹, 普适函数等于 1.0, 相应的动态应力强度因子不需要乘以普适函数。当 $v = C_R$, $k(C_R) = 0$ 时, 这意味着裂纹以瑞利波波速传播时, 相应的动态应力强度因子等于 0。

3.3 动态断裂韧度的确定

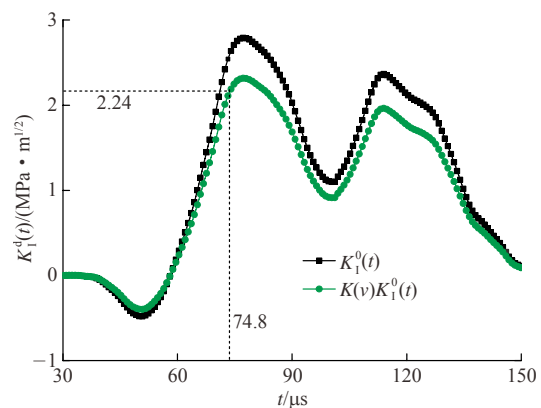
以青砂岩试件 1 为例, 说明动态扩展裂纹的起裂和扩展状态下的临界动态应力强度因子的确定过程。

对于预制裂纹, 根据爆破试验中测得的 SICCD 试样尺寸与图 6 所示的加载曲线, 利用 ABAQUS 程序建立数值模型, 根据动态应力强度因子—时间的时程曲线, 计算裂纹动态应力强度因子, 并将计算结果显示在图 11 中。可以看出, 动态应力强度因子随时间而变化, 在爆炸应力波传播的初始阶段, 曲线由于压缩应力波到达裂纹尖端而呈负值, 然后开始增加并变为正值。

试验结果表明, 青砂岩试件 2 的裂纹起裂时刻为 60.1 μs , 图 11(a)中, 垂直轴上的 2.67 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$



(a) 起裂时刻的临界动态应力强度因子(起裂韧度)



(b) 扩展时刻的临界动态应力强度因子(扩展韧度)

图 11 动态裂纹的临界动态应力强度因子的确定(以青砂岩为例)

Fig.11 Determination of critical dynamic stress intensity factors for a dynamic crack(a green sandstone specimen as an example)

是裂纹起裂时刻的临界动态应力强度因子, 与水平轴上的 60.1 μs 相对应, 可以认为是青砂岩的动态起裂韧度^[31]。

当动态裂纹扩展达到 CPG 的第 4 根敏感栅时, 裂纹长度为 106 mm, 裂纹扩展到第 4 根敏感栅时的裂纹扩展速度为 265.60 m/s, 根据式(7)计算普适函数值 $k(265.60) \approx 0.83$ 。图 11(b)中, 矩形点画线代表静止裂纹的应力强度因子, 圆形点画线代表动态裂纹的应力强度因子, 其关系见式(5)。试验结果表明, 在图 11(b)中, 第 4 根长丝在 74.8 μs 时断裂, 然后对垂直轴上的临界动态应力强度因子, 即此刻的动态扩展韧度为 2.24 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

通过相同的方法分别得到黑砂岩试件 1 和红砂岩试件 4 的动态断裂韧度(见图 12), 黑砂岩的起裂韧度 > 红砂岩的起裂韧度 > 青砂岩的起裂韧度, 扩展过程中黑砂岩的扩展韧度也略高于红砂岩, 远高于青砂岩, 这与黑砂岩的成分组成中含有大量矿物成分、胶结程度较好以及微观破坏以穿晶破坏为主有一定关系, 见表 1 及图 6 的相关分析。

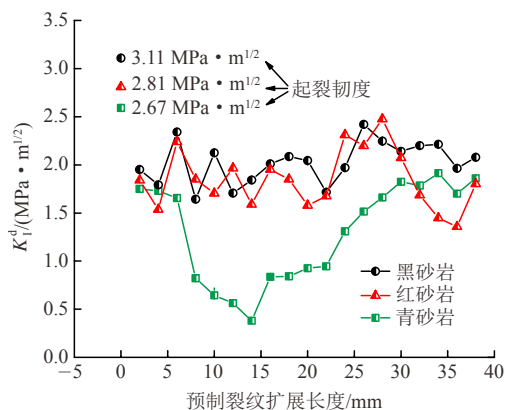


图 12 3 种砂岩的动态断裂韧性对比

Fig.12 Comparison of the dynamic fracture toughnesses of three kinds of sandstones

同样地，爆炸试验的动态加载率 $\dot{K} = K_I^d(t_i) / (t_i - t_r)$ ，其中 t_i 为裂纹的起裂时刻， t_r 为应力波传播到裂纹尖端的时刻。通过计算砂岩的动态加载率的范围为 $(4.05 \sim 8.24) \times 10^4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，L. Zhou 等^[14]中冲击载荷下砂岩的动态加载率为 $7.5 \times 10^3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此可见，爆炸载荷的动态加载率要远高于冲击载荷。

砂岩试件的动态扩展韧度与扩展速度的关系如图 13 所示，作出每种砂岩的扩展韧度与速度的回归曲线，其关系成反比。从 3 种砂岩的回归曲线在水平轴上范围可以看出，黑砂岩的扩展速度集中在较高的数值范围，其扩展速度远高于红砂岩与青砂岩，这与试验中 CPG 测得的 3 种砂岩的扩展速度是吻合的；从 3 种砂岩的回归曲线在垂直轴上范围可以看出，黑砂岩与红砂岩的扩展韧度集中在较高的数值范围，大于青砂岩。

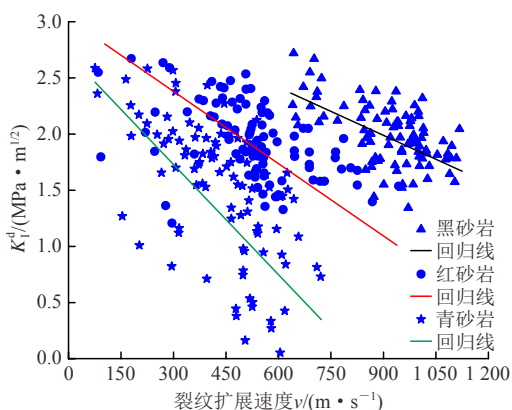


图 13 3 种砂岩的动态扩展韧度对比

Fig.13 Comparison of dynamic fracture toughnesses of three kinds of sandstones

4 结 论

(1) 在炮孔处的砂岩主要以塑性破坏为主，塑

性区半径为 20.6~23.7 cm，预制裂纹在起裂扩展过程中，断裂面主要以脆性破坏为主，根据 XRD 的测试结果可知砂岩材料是非均质的，这也导致了动态裂纹在扩展过程中发生了偏折。

(2) 3 种砂岩的主要成分以石英为主，石英属于脆性材料，因此在爆炸载荷下，砂岩的断裂形式主要以脆性断裂为主，黑砂岩含有金属矿物成分，胶结程度更好并且微观结构中孔隙更少，其晶体破坏以穿晶破坏为主，而红砂岩与青砂岩主要以沿晶破坏为主。

(3) 借助裂纹扩展计可以准确计算出动态裂纹在扩展过程中的实时速度，试验结果表明，裂纹的扩展速度不是一个定值，扩展速度是动态变化的。从微观结构来看，更加致密的黑砂岩的平均裂纹扩展速度、起裂韧度均高于红砂岩与青砂岩，黑砂岩与红砂岩的扩展韧度较为接近但要高于青砂岩，并且动态扩展韧度与扩展速度基本成反比关系。

参考文献(References):

- [1] 朱哲明, 李元鑫, 周志荣, 等. 爆炸荷载下缺陷岩体的动态响应[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1 157 - 1 167. (ZHU Zheming, LI Yuanxin, ZHOU Zhirong, et al. Dynamic response of defected rock under blasting load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1 157 - 1 167. (in Chinese))
- [2] THURO K. Prediction of drillability in hard rock tunnelling by drilling and blasting[C]// World Tunnel Congress. [S. l.]: [s. n.], 1997: 103 - 108.
- [3] ZHAO Y, HUANG J, WANG R. Real-time SEM observations of the microfracturing process in rock during a compression test[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1993, 30(6): 643 - 652.
- [4] GALLAGHER J J, FRIEDMAN M, HANDIN J, et al. Experimental studies relating to microfracture in sandstone[J]. Tectonophysics, 1974, 21(3): 203 - 247.
- [5] XIE H P, CHEN Z D. Fractal geometry and fracture of rock[J]. Acta Mechanica Sinica, 1988, 4(3): 255 - 264.
- [6] 张 盛, 王启智, 梁亚磊. 裂缝长度对岩石动态断裂韧度测试值影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1 691 - 1 696. (ZHANG Sheng, WANG Qizhi, LIANG Yalei. Research on influence of crack length on test values of rock dynamic fracture toughness[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1 691 - 1 696. (in Chinese))
- [7] 张 盛, 王启智, 谢和平. 岩石动态断裂韧度的尺寸效应[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(6): 544 - 551. (ZHANG Sheng, WANG Qizhi, XIE Heping. Size effect of rock dynamic fracture toughness[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(6): 544 - 551. (in Chinese))
- [8] MINDESS S, DIAMOND S. SEM investigations of fracture surfaces

- using stereo pairs: II. Fracture surfaces of rock-cement paste composite specimens[J]. *Cement and Concrete Research*, 1992, 22(4): 678 - 688.
- [9] ZHANG Q B, ZHAO J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behavior of rock materials[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(4): 1 411 - 1 478.
- [10] 王 蒙, 朱哲明, 王 雄. 冲击荷载作用下的 I/II 复合型裂纹扩展规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(7): 1 323 - 1 332. (WANG Meng, ZHU Zheming, WANG Xiong. The growth of mixed-mode I/II under impacting loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(7): 1 323 - 1 332.(in Chinese))
- [11] 倪 敏, 苟小平, 王启智. 霍普金森杆冲击压缩单裂纹圆孔板的岩石动态断裂韧度试验方法[J]. *工程力学*, 2013, 30(1): 365 - 372.(NI Min, GOU Xiaoping, WANG Qizhi. Test method for rock dynamic fracture toughness using single cleavage drilled compression specimen impacted by split Hopkinson pressure bar[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(1): 365 - 372.(in Chinese))
- [12] 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 determine dynamic fracture toughness of rock using SCDC specimens[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(2): 279 - 292.(in Chinese))
- [13] AYATOLLAHI M R, AKBARDOOST J. Size and geometry effects on rock fracture toughness: Mode I fracture[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(2): 677 - 687.
- [14] ZHOU L, ZHU Z M, WANG M, et al. Dynamic propagation behavior of cracks emanating from tunnel edges under impact loads[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 105: 119 - 126.
- [15] WANG X M, ZHU Z M, WANG M, et al. Study of rock dynamic fracture toughness by using VB-SCSC specimens under medium-low speed impacts[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, 181: 52 - 64.
- [16] YU L Y, SU H J, JING H W, et al. Experimental study of the mechanical behavior of sandstone affected by blasting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 93(2): 234 - 241.
- [17] 杨仁树, 王雁冰. 切缝药包不耦合装药爆破爆生裂纹动态断裂效应的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(7): 1 337 - 1 343. (YANG Renshu, WANG Yanbing. Experimental study of dynamic fracture effect of blasting crack in slotted cartridge decoupling charge blasting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(7): 1 337 - 1 343.(in Chinese))
- [18] 李 盟, 朱哲明, 肖定军, 等. 煤矿岩巷爆破掘进过程中周边眼对裂纹扩展止裂机理[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(7): 1 691 - 1 699.(LI Meng, ZHU Zheming, XIAO Dingjun, et al. Mechanism of crack arrest by peripheral holes during mine rock roadway excavation under blasting[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(7): 1 691 - 1 699. (in Chinese))
- [19] LI M, ZHU Z M, LIU R F, et al. Study of the effect of empty holes on propagating cracks under blasting loads[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 103(1): 186 - 194.
- [20] ZHU Z M, XU W T, FENG R Q. A new method for measuring mode - I dynamic fracture toughness of rock under blasting loads[J]. *Experiment Techniques*, 2015, 40(3): 899 - 905.
- [21] 徐文涛, 朱哲明, 曾利刚. 爆炸荷载下 I 型裂纹动态断裂韧度测试方法初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增 1): 2 767 - 2 772. (XU Wentao, ZHU Zheming, ZENG Ligang. Testing method study of mode - I dynamic fracture toughness under blasting loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(Supp.1): 2 767 - 2 772.(in Chinese))
- [22] 刘瑞峰, 朱哲明, 李 盟, 等. 爆炸荷载下 I 型裂纹的起裂及扩展规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(2): 392 - 402.(LIU Ruifeng, ZHU Zheming, LI Meng, et al. Initiation and propagation of mode I crack under blasting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(2): 392 - 402.(in Chinese))
- [23] ZHU Z M, XIE H P, MOHANTY B. Numerical investigation of blasting-induced damage in cylindrical rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(2): 111 - 121.
- [24] ZHU Z M, WANG C, KANG J M, et al. Study on the mechanism of zonal disintegration around an excavation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 67(4): 88 - 95.
- [25] ZHU Z M. Numerical prediction of crater blasting and bench blasting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(6): 1 088 - 1 096.
- [26] ZHU Z M, MOHANTY B, XIE H P. 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.
- [27] 谢和平, 陈至达. 分形(fractal)几何与岩石断裂[J]. *力学学报*, 1988, (3): 264 - 271.(XIE Heping, CHEN Zhida. Fractal geometry and fracture of rock[J]. *Chinese Journal of Mechanics*, 1988, (3): 264 - 271.(in Chinese))
- [28] 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.
- [29] ROSE LRF. Recent theoretical and experimental results on fast brittle fracture[J]. *International Journal of Fracture*, 1976, 12(6): 799 - 813.
- [30] FREUND LB. *Dynamic fracture mechanics*[M]. Edinburgh: Cambridge University Press, 1990: 231 - 235.
- [31] RAVI-CHANDAR K. *Dynamic Fracture*[M]. Oxford: Elsevier, 2004: 49 - 177.