

# 冲击荷载下岩石裂纹动态扩展全过程演化规律研究

王飞<sup>1</sup>, 王蒙<sup>1</sup>, 朱哲明<sup>1</sup>, 邱豪<sup>1</sup>, 应鹏<sup>1</sup>, 王勖雅<sup>2</sup>

(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. 绵阳师范学院, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为研究岩石裂纹全过程扩展规律及扩展行为中的定区域止裂问题, 提出修正侧开半孔板(improved single cleavage semi-circle specimen, ISCSC)构型构件。通过大直径分离式霍普金森压杆试验系统进行冲击试验, 使用裂纹扩展计测试系统测定了裂纹扩展速度, 同时引入拉伸断裂软化损伤破坏模型进行数值模拟, 通过试验-数值法, 深入分析动荷载下岩石裂纹全过程扩展演化行为及双空心孔对于裂纹扩展的影响。结果显示, ISCSC 构型实现了裂纹扩展中的定区域止裂, 可以精准预测止裂区域; 预制双空心孔的构型分布对裂纹扩展行为影响巨大, 裂纹扩展速度受到明显抑制; 裂纹扩展至双孔中心连线区域时, 裂纹尖端拉应力场与双孔形成的叠加应力场相互作用, 导致主裂纹扩展速度急剧降低, 甚至出现止裂现象; 裂纹扩展至叠加场时, 极易受到物质不均匀性影响, 产生偏折或分叉; 同时, 数值计算的结果和试验吻合, 验证 ISCSC 构型用于研究裂纹起裂、扩展及止裂全过程演化行为的有效性。

**关键字:** 岩石力学; ISCSC 构型; 分离式霍普金森压杆; 裂纹扩展; 裂纹止裂; 数值模拟

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2019)06 - 1139 - 10

## Study on evolution law of rock crack dynamic propagation in complete process under impact loading

WANG Fei<sup>1</sup>, WANG Meng<sup>1</sup>, ZHU Zheming<sup>1</sup>, QIU Hao<sup>1</sup>, YING Peng<sup>1</sup>, WANG Xuya<sup>2</sup>

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

2. Mianyang Normal University, Mianyang, Sichuan 621000, China)

**Abstract:** In order to study the mechanism of crack propagation in complete process and crack arrest behavior in set area between two holes, an ISCSC(improved single cleavage semi-circle specimen) configuration specimen was proposed. By using split Hopkinson pressure bar, the impact experiment was conducted with the crack propagation velocity detected by the crack propagation gauge. Meanwhile, the damage failure model combining principal stress failure criteria with crack softening failure criteria was introduced in the numerical simulation. With Experiment-Numerical method, the evolution law of rock crack dynamic propagation in complete process was investigated elaborately and the effect of two empty holes on crack propagation behavior was sophisticated demonstrated. The results show that the ISCSC configuration specimen could realize the crack arrested in set area

**收稿日期:** 2018 - 10 - 11; **修回日期:** 2019 - 01 - 11

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(11672194, 11702181); 中国博士后科学基金项目(2016M602689)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos.11672194 and 11702181) and China Postdoctoral Science Foundation(Grant No. 2016M602689)

**作者简介:** 王飞(1988 -), 男, 2012年毕业于四川大学土木工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事岩石断裂力学方面的研究工作。E-mail: sirbuer@163.com。通讯作者: 王蒙(1987 -), 男, 博士, 现任助理研究员。E-mail: wangmengscu@hotmail.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1172

and that the arrest zone can be predicted accurately. Two empty holes have huge influence on the behavior of crack propagation, restraining crack propagation velocity obviously. The interaction of the superimposed stress field between two empty holes and the tensile stress field of the crack tip could slow down the crack propagation speed sharply and even cause arrest when the running crack rushes into the set area between two holes. When the running crack goes across the set area between two holes, the crack propagation behavior could be influenced by inhomogeneity of material easier than before, which could cause crack deflecting and branching. It is also shown that numerical simulation outputs agree well with the results of experiment, confirming that ISCSC configuration specimen has great ability to be applied in researching the behavior of crack propagation in complete process.

**Key words:** rock mechanics; ISCSC configuration; split Hopkinson pressure bar; crack propagation; crack arrest; numerical simulation

## 1 引言

在采矿、隧道和深地等诸多岩土工程中,利用冲击波加载实现岩石断裂破坏的方式得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>,该方式十分有效地提高了工程效率,同时保障了施工过程中的安全性。岩石作为一种十分重要的工程材料,其内部含有大量不同规模、形态的节理和裂隙等缺陷,表现出十分典型的非均质性和非连续性。在冲击荷载作用下,这些缺陷将扩展、分叉和聚集,而岩石缺陷自身的几何形态和材料性质,对其扩展、贯通过程有着显著的影响。岩石裂纹的全过程扩展行为分为起裂、扩展和止裂3个阶段,对含裂纹岩石在动荷载作用下的全过程破坏特征及扩展规律探讨已成为热点<sup>[3-10]</sup>。

为了研究裂纹扩展特征,李清等<sup>[11-12]</sup>基于PMMA纯I型试件和动态焦散线测试系统进行了试验研究,发现在动态荷载作用下PMMA试件纯I型裂纹扩展速度并非恒定值,在裂纹扩展过程中存在加速和减速现象。D. Gregoire等<sup>[13]</sup>发现冲击荷载作用下预制裂纹扩展过程中存在短暂停止并再次起裂的现象。朱婷等<sup>[14]</sup>采用在预制裂纹附近区域布置空心孔的方法,证实在冲击荷载作用下空心孔的存在对于裂纹扩展行为会产生影响。K. Ravi-Chandar和W. G. Knauss<sup>[15]</sup>提出裂纹止裂是一种突发现象,当裂纹止裂发生时,其止裂时的应力强度因子远小于裂尖起裂时的强度因子。M. Wang等<sup>[16]</sup>使用大直径分离式霍普金森压杆试验装置(split Hopkinson pressure bar, SHPB)对SCSC构型砂岩试件进行冲击试验时发现,在裂纹扩展过程中有可能发生止裂现象。而X. M. Wang等<sup>[17]</sup>使用VB-SCSC构型构件利用落锤冲击装置,发现应力波在V型边界反射形成的压缩波会促使裂纹止裂。试验构型的选择对裂纹扩展会产生显著影响,因此,一个合适

的试验构型,对研究岩石裂纹扩展具有重要意义。

目前,已有多种构型试件被提出并应用于该领域的理论和试验研究。例如:CSTFBD构型试件<sup>[18]</sup>,SCB构型试件<sup>[19]</sup>,SCDC构型试件<sup>[20]</sup>,SCT构型试件<sup>[21]</sup>,VB-SCSC构型试件<sup>[22]</sup>,SCSC构型试件<sup>[23]</sup>。上述大部分构型试件多被用于研究裂纹的起裂、扩展角和扩展行为等问题,对于裂纹从起裂、扩展、高速扩展到止裂的全过程定量研究却应用较少,特别是SCSC构型构件和VB-SCSC构型构件,两构型虽已具备研究全过程裂纹扩展的条件,却无法实现定区域进行止裂问题的量化分析。为此,本文基于王蒙等提出的SCSC构型试件进行改进,提出修正侧开单裂纹半孔板(improved single cleavage semi-circle specimen, ISCSC)构型试件,使之不仅可以研究裂纹扩展全过程行为,又实现定区域止裂问题的定量化分析,深度研究裂纹扩展演化行为及双空心孔对裂纹扩展的影响,裂纹的止裂现象及机制。

由于动荷载作用下的材料力学参数受加载率的影响巨大<sup>[24-25]</sup>,尤其是对于岩石材料,其动态抗拉强度比之静态增加6~8倍<sup>[26]</sup>,有时甚至增大一个数量级,导致冲击荷载作用下的裂纹扩展及止裂机制变得尤为复杂。目前,试验和数值的结合已成为一种研究和解决岩石动态断裂问题的有效工具。AUTODYN软件是一款高效的有限差分法计算平台<sup>[27-29]</sup>,具备有效解决高度非线性问题的能力。为此,本文提出并使用ISCSC构型构件进行岩石裂纹动态扩展全过程演化规律研究,通过SHPB试验装置对ISCSC构型构件进行冲击加载,采用裂纹扩展计,定量测定裂纹的扩展速度,同时借助AUTODYN软件平台对裂纹扩展全过程进行数值模拟。通过试验数据和数值模拟结果的分析探讨,研究冲击荷载下岩石裂纹扩展全过程行为规律及ISCSC构型定区域止裂的有效性,并对双空心孔对裂纹扩展行为

的影响机制进行了深入分析探讨。

## 2 试验研究

本试验研究了冲击荷载作用下 ISCS C 构型的预制裂纹的扩展行为。

### 2.1 ISCS C 构型

为了研究裂纹扩展的定区域止裂问题，本文提出了修正侧开单裂纹半孔板构型，该构型合理简洁，工艺简单，便于生产；在冲击荷载作用下预制裂纹易于起裂、扩展空间充足，且裂纹动态扩展行为清晰，便于裂纹全过程扩展行为的观测研究。同时，该构型通过双空心孔的合理布置，能够在特定区域研究岩石裂纹扩展从起裂到止裂的全过程行为。

ISCS C 构型如图 1 所示，试件总长度为 145 mm，宽度为 80 mm，厚度为 30 mm，侧开半圆孔直径为 30 mm，预制裂纹长度为 10 mm，裂尖锐化处理。两预制空心孔对称布置于试件中轴线两侧，预制空心孔直径为 6 mm，两预制空心孔中心连线与裂尖位置间距为 55 mm，两预制空心孔圆心距为 16 mm。

本文研究岩石裂纹扩展问题，考虑到岩石材料骨料密度及大小会影响裂纹扩展行为，应选用材料致密且无明显大颗粒的岩石材料。砂岩是一种沉积岩，且致密砂岩的研究对矿业工程有重要意义。故本文试验选取材质均匀致密、强度较高的雅蒙黑砂岩，其材料力学性质参数如表 1 所示。

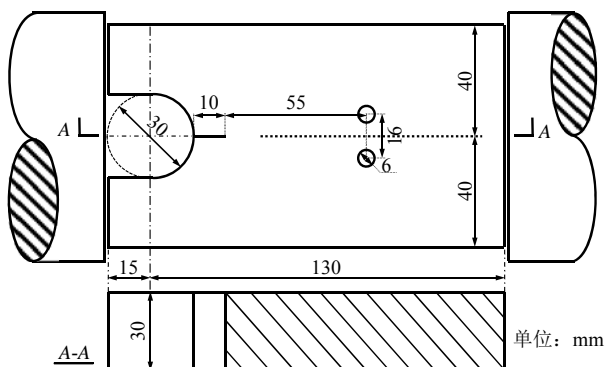


图 1 ISCS C 构型示意图

Fig.1 ISCS C specimen sample geometry

表 1 雅蒙黑砂岩材料参数

Table 1 Material parameters of Yameng black sandstone

膨胀波 $C_d / (m \cdot s^{-1})$	畸变波 $C_s / (m \cdot s^{-1})$	瑞雷波 $C_r / (m \cdot s^{-1})$	弹性模量 $E_d / GPa$	泊松比 $\mu_d$	密度 $\rho / (kg \cdot m^{-3})$
4 008	2 344	2 153	20.14	0.18	2 797

### 2.2 SHPB 试验装置

本文采用大直径分离式霍普金森压杆<sup>[30]</sup>装置

进行试验研究，如图 2 所示。该装置撞击杆、入射杆和透射杆的长度分别为 800，4 000 和 4 000 mm，杆直径均为 120 mm。杆材质为 LY12CZ 铝合金，密度为 2 700 kg/m<sup>3</sup>，弹性模量为 72 GPa，泊松比为 0.25，弹性杆实测纵波波速为 5 164 m/s。

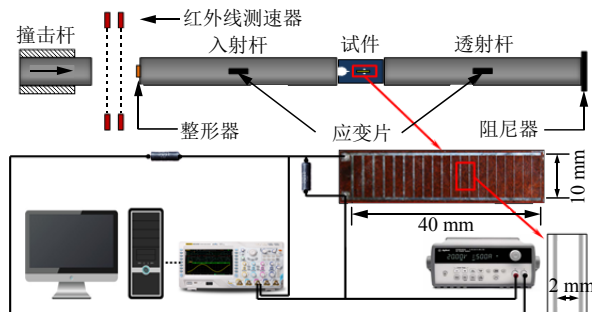


图 2 SHPB 试验系统及 CPG 采集系统示意图

Fig.2 Schematic of the SHPB test system and CPG test system

入射杆和透射杆的监测应变片位于杆件中间位置，距杆件两端距离均为 2 000 mm。应变信号通过超动态应变仪进行采集，并使用数据采集系统将电压信号转换为应变数据。该系统采用光电测速装置测量撞击杆撞击速度。

在撞击杆和入射杆接触面，布置整形器，整形器材质为紫铜。整形器的使用可以有效降低试验过程中波形弥散效应，并且可以降低波形中的高频震荡影响，有效延长加载波形上升沿区段，满足试验需要。

同时，在试验开始前需在试件两端或入射杆和透射杆与试件接触端面涂抹润滑剂，如二硫化钼等，可以避免试件产生由摩擦造成的非正常破坏。因在 SHPB 冲击试验中，撞击杆产生的压缩应力脉冲会使得试件端部产生横向膨胀变形，若弹性杆端面与试件间润滑不足，则在端面产生摩擦阻碍试件横向变形，改变试件应力状态，引起非正常破坏。试验需选取加工精度较高的试件，保证构件前后端面与弹性杆水平贴合，并在试验过程中保证试件位置恒定不变，避免试件滑动导致受力不均产生的非正常破坏。

本试验中使用裂纹扩展计(crack propagation gauge, CPG)测量裂纹扩展速度，型号为 BKX3.5 - 10CY，其布置及采集系统如图 2 所示，该型号 CPG 共有 21 根丝栅。CPG 是一种以玻璃丝为基底、覆盖等间距卡玛铜敏感丝栅的测量装置，用于裂纹扩展速度的测量。在使用过程中，将 CPG 紧密粘贴于试件表面，且位于裂纹扩展路径上，随着裂纹的扩展过程，丝栅有序断裂，则 CPG 的总阻值不断

发生变化，从而 CPG 两端监测电压发生有序变化，呈现为阶梯状电压信号。丝栅断裂的时刻为 CPG 局部电压变化率最大的时刻，因此可以通过求解电压信号的一阶导数，其极值为丝栅断裂时刻，并且由于 CPG 基底和试件的紧密黏贴，可以认为基底的断裂和裂纹扩展同步。此时，丝栅的断裂时刻即为裂纹扩展到丝栅处的时刻。通过两丝栅的断裂时间差，可以计算出丝栅间裂纹扩展的局部平均速度。相较于传统应变片，单根丝栅宽度细，可以更精确地测定裂纹扩展至某处的断裂时间，并且不需要占用大量的数据通道，单片 CPG 即可满足试验连续测定断裂时刻的需求。

2.3 结果分析

本文共对 16 个 ISCS 构型试件进行了冲击试验。试验中，撞击杆冲击速度保持为 4.7 m/s。同时为排除外界因素对试验的干扰，依据对比筛选原则，剔除误差较大的数据组，对效果较好的数据进行信号处理。基于入射杆和透射杆上的应变片采集到的电压信号，将其转换为应变信号，其计算式为

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

式中： $\varepsilon$  为微应变， $U_0$  为实测电压， $E_g$  为供桥电压， $K$  为应变片灵敏系数(本试验取值为 2.1)， $n$  为放大器增益系数(本试验取值为 1 000)。

根据一维弹性应力波理论，试件入射端的荷载  $P_i(t)$  波形(由入射波和反射波叠加)和透射端的荷载  $P_t(t)$  波形可以通过下式进行求解：

$$\left. \begin{aligned} P_i(t) &= A_1 E [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)] \\ P_t(t) &= A_1 E \varepsilon_t(t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： $\varepsilon_i(t)$  为入射波应变时程曲线， $\varepsilon_r(t)$  为反射波时程曲线， $\varepsilon_t(t)$  为透射波时程曲线， $P_i(t)$  为入射端荷载， $P_t(t)$  为透射端荷载。入射端及透射段的加载波形如图 3 所示。本文使用 ISCS 构型试件进行动态裂纹扩展行为研究，试件的两加载端荷载会存在差异，属于试验和数值结合的研究方法，因此不需要满足准静态法中关于试件两端力平衡的假定。

图 4 展示了 2 种典型 ISCS 构型的预制裂纹裂纹扩展特征。试件中从预制裂纹尖端到空心孔区内，裂纹均呈现为典型的纯 I 型裂纹，路径唯一且趋于直线。裂纹扩展至两空心孔中间区域时，空心孔孔壁均发生了不同程度的破坏，尤其在空心孔前后区域都产生了次生裂纹。由于岩石材料的微观区别，其破坏特征可以区分为是否存在横向贯穿裂纹。

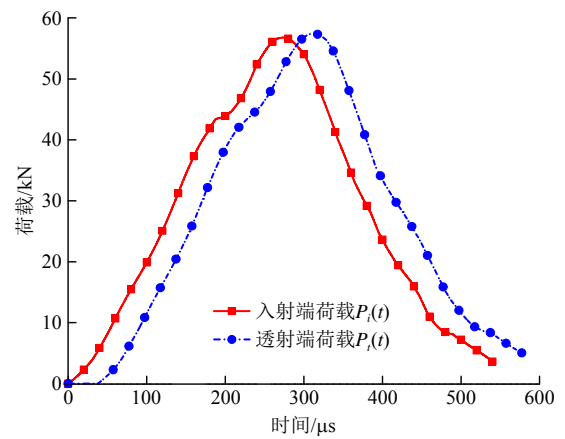
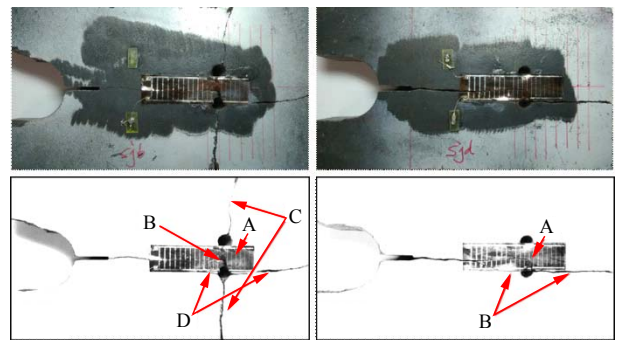


图 3 入射端及透射段的加载波形

Fig.3 Incident and transmitted loading waves of specimen



(a) ISCS-SJB 号试件 (b) ISCS-SJD 号试件

图 4 ISCS 试件裂纹扩展行为试验现象

Fig.4 Crack propagation patterns of ISCS specimens

当岩石材料分布均匀时，裂纹扩展路径居中，此时以图 4(a)中的裂纹扩展特征为主；当岩石材料分布差异性明显时，裂纹扩展路径偏移，此时以图 4(b)中的裂纹扩展特征为主。图 4(a)中发生横向裂纹的主要原因为试验后期，试件破坏完成后，扰动二次冲击造成试件二次断裂。

虽然 2 个试件表现出了不同的破坏形貌，但发现其裂纹扩展均在双空心孔附近区域发生剧烈变化，且由预制裂尖起裂、扩展的主裂纹均未贯穿试件。

所有试验试件均布置了 CPG，其贯穿两孔中间区域且全覆盖，如图 4 所示，2 组试件 CPG 监测数据如图 5 所示。图 5(a)为 ISCS-SJB 号试件监测结果，主裂纹扩展至第 11 根丝栅位置处开始减速，第 13 根丝栅起存在明显的减速行为，此时裂尖瞬时位置位于两空心孔中心连线前方 3 mm 处；图中丝栅断裂时间差最大的 2 根丝栅为第 14 和 15 根丝栅，其断裂时间间隔为 72.5 μs，此间隔时间远超整个试件丝栅断裂平均时间差，也远大于无预制空心孔 ISCS 试件裂纹扩展的最大停滞时间 60 μs<sup>[31]</sup>，可判定为在第 14 和 15 丝栅之间发生裂纹扩展止裂现象。



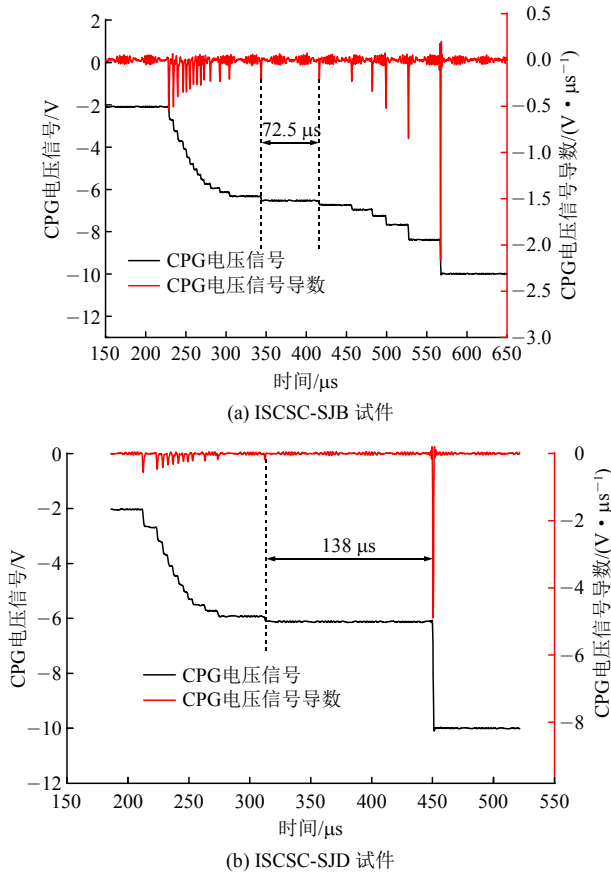


图 5 CPG 记录的电压信号和其对时间的导数

Fig.5 Voltage signal and derivative with respect to time recorded from the CPG

图 5(b)为 IS CSC-SJD 号试件监测结果,主裂纹扩展至第 9 根丝栅位置处开始减速,自第 11 根丝栅起存在明显的减速行为,此时裂尖瞬时位置位于两空心孔中心连线前方 3 mm 处;图中丝栅断裂时间差最大的 2 根丝栅为第 12 和 13 根丝栅,其丝栅断裂时间间隔为 138 μs,可判定为在第 12 和 13 根丝栅之间发生裂纹扩展止裂现象。

本文将 CPG 监测数据与裂纹扩展特征相结合,进行了深入分析。以 IS CSC-SJB 号试件为例,预制裂纹起裂并扩展至双空心孔前时,其扩展行为与 SCSC 构型试件裂纹扩展行为无明显差别;但在裂纹扩展至临近预制双空心孔区域时(尤其是扩展至其中心连线前方 3 mm 处时),裂纹扩展行为受到明显影响,其扩展速度显著降低(即第 13 根丝栅对应位置),如图 6(a)所示;在第 14 和 15 根丝栅之间,裂纹平均扩展速度为 27.58 m/s,远小于整体平均速度 253.36 m/s。第 14 和 15 根丝栅之间为本试件的止裂点所在区域,即为图 4(a)中标示的 B 区域。由图 5(a)中监测到第 20 根丝栅的断裂,说明主裂纹扩展距离已超过第 20 根丝栅,局部观察为对应图 4(a)中 A 区域之后,因为末端裂纹过于细微,故图中不易直接观察。

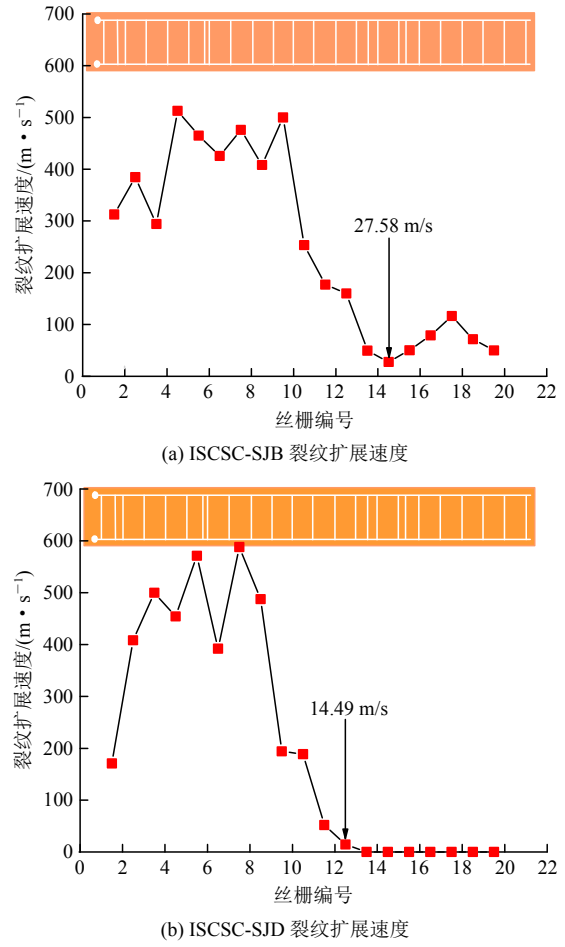


图 6 裂纹扩展速度示意图

Fig.6 Schematic of crack propagation speed

将 IS CSC-SJB 号试件最终形成的裂纹扩展路径分为 A, B, C, D 四个特征区域,现对其断裂顺序进行分析。假定裂纹止裂后再次起裂,其扩展路径为裂纹尖端直接向下偏折贯通小孔,此时 CPG 的丝栅两侧连接桥臂断裂,根据 CPG 工作原理,则终止采集数据,因此只可以监测到 14 根丝栅的断裂信号;而图 5(a)明显可以观察到第 15~20 根丝栅的断裂信号,得出主裂纹一直扩展至第 20 根丝栅处后才止裂。因此 B 区域偏折贯通小孔的裂纹是主裂纹止裂之后,由于二次冲击造成。对于 C 区域的裂纹,其产生于试件破坏完成之后,为扰动后二次冲击造成试件二次断裂,并未对试验采集结果产生影响。关于 D 区域形成的裂纹,其起裂时间不能通过测量确定,随着主裂纹扩展,下方小孔后侧的裂纹将继续扩展,直至贯穿试件,而该裂纹的扩展将释放能量,这也是主裂纹在 A 区域止裂后不再扩展的主要原因。

同上,以 IS CSC-SJD 号试件为例。试件裂纹扩展至临近预制双空心孔区域时(尤其是扩展至其中心连线前方 3 mm 处时),裂纹扩展行为受到明显

影响。在第 12 和第 13 根丝栅之间裂纹平均扩展速度为 14.49 m/s, 远小于平均速度 335.20 m/s, 因此图 4(b)中 A 区域为试件止裂所在区域。裂纹止裂后, 驱动裂纹再次扩展的能量不足以支持裂纹继续沿直线扩展, 此时受两空心孔的影响, 裂纹向下偏折贯穿小孔。同时笔者注意到 ISCSC-SJD 的主裂纹扩展路径并非沿着两空心孔中轴线, 其扩展路径更偏向下方小孔, 这也是主裂纹止裂后直接向下偏折贯穿下侧小孔的原因。因此推测, 当裂纹扩展至两空心孔之间时, 如果裂纹裂尖偏向一侧孔, 该孔对于裂纹扩展有引导作用。对比 ISCSC-SJB 号试件, ISCSC-SJD 号试件也在下方小孔前后壁(即图 4(b)中 B 区域)形成了新的裂纹, 该裂纹起裂时间不能确定, 且同 ISCSC-SJB 号试件相似, 下侧空心孔后方裂纹在主裂纹止裂后, 能够继续扩展。

### 3 数值模拟研究

为进一步分析岩石裂纹扩展行为及深入研究定区域止裂问题, 本文借助 AUTODYN 软件平台, 进行数值模拟研究。其在具有几何和材料非线性的动力学问题分析领域得到了广泛应用, 特别有利于解决动荷载作用下岩石的大变形和损伤破坏问题, 其平台计算有效性已经得到验证<sup>[27-29]</sup>。

#### 3.1 数值模型

雅蒙黑砂岩是一种典型的脆性材料, 且在高速冲击试验中体积变形较小, 故本文选取 Liner 状态方程。该 EOS 状态方程假设压力和内能无关, 且变化过程等熵可逆, 材料密度变化小, 能够很好地描述岩石材料变形问题。其方程为

$$\left. \begin{aligned} P(\rho) &= \kappa\mu \\ \kappa &= E_d / [3(1 - 2\mu_d)] \\ \mu &= (\rho / \rho_0) - 1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $P(\rho)$  为压力,  $\kappa$  为材料体积模量,  $\rho$  为材料当前密度状态,  $\rho_0$  为材料初始密度,  $E_d$  为动态弹性模量,  $\mu_d$  为泊松比。砂岩在冲击荷载下, 基础微裂纹将起裂、聚集和扩展, 进而形成宏观裂纹, 这是一个渐进过程。为此数值计算模型以弹性强度模型为基础, 以拉伸断裂软化损伤模型作为失效模型。该失效模型包含最大拉应力破坏准则和软化损伤破坏模型, 通过 2 个模型的协同作用描述岩石的破坏行为。并规定: 当单元的最大主应力  $\sigma_1$  达到材料动态抗拉强度  $\sigma_T$  时, 认为该单元中微裂隙开始起裂, 此时进入软化损伤阶段, 在此阶段引入损伤因子

$D$  来描述这种行为过程, 其方程为

$$\left. \begin{aligned} D &= \frac{\varepsilon^{cr}}{\varepsilon^u} = \frac{\varepsilon^{cr} \sigma_T L}{2G_c} \\ \varepsilon^u &= \frac{2G_c}{\sigma_T L} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\sigma_{max} = \sigma_T(1 - D) \quad (5)$$

式中:  $\varepsilon^{cr}$  为单元起裂时的应变;  $\varepsilon^u$  为单元完全断裂时的应变;  $\sigma_T$  为材料的动态抗拉强度;  $L$  为单元最大主应力方向的特征尺寸;  $G_c$  为裂缝扩展单位长度的断裂能;  $\sigma_{max}$  为损伤阶段单元所能承受的最大主应力, 随着单元损伤程度的增加, 单元所能承受的最大主应力持续降低, 直至为 0。满足下述条件时, 单元持续破坏, 公式为

$$\sigma_1 \geq \sigma_{max} \quad (6)$$

当单元完全失效后, 将无法承担拉力和剪力, 但仍可以承担压力。

基于图 1 所示 ISCSC 构型试件尺寸, 建立数值模型。荷载加载模式及数值模型的单元分布图, 如图 7 所示。试件两端使用试验采集到的数据进行加载, 波形如图 3 所示。数值模拟中所采用参数均为材料实际物理参数, 经试验测定雅蒙黑砂岩动态抗拉强度为  $\sigma_T = 15.2$  MPa, 其余具体参数如表 1 所示。为保证计算精度, 并实现预制裂纹裂尖起裂的随机性, 在处理裂纹尖端时, 在裂纹尖端预留 0.2 mm 平台, 用 2 排 0.1 mm 尺度单元网格沿裂尖延长线布置, 其相邻区域网格均保持相似尺度逐步过渡, 以避免网格尺度不同引起的计算误差, 同时对于两空心孔周边区域和试件中间区域网格单元进行加密布置, 以便更精细化模拟裂纹扩展路径并进行高精度数值分析。

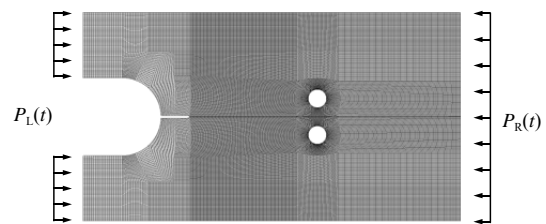


图 7 ISCSC 试件网格示意图  
Fig.7 Mesh of the ISCSC specimen

#### 3.2 数值模拟结果

ISCSC 构型试件数值模型裂纹扩展结果如图 8 所示, 预制裂纹起裂后, 呈现出典型的纯 I 型裂纹扩展规律, 沿试件中轴线传播, 并穿过双空心孔中心区域, 主裂纹在距离裂尖 76 mm 处停止扩展。同时, 在双空心孔前后壁均出现次生裂纹。

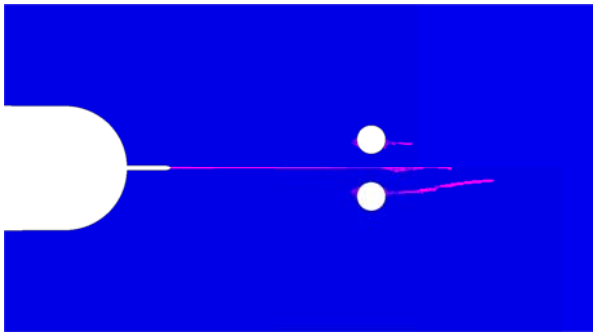


图 8 裂纹扩展路径模拟结果

Fig.8 Simulation result of crack propagation paths

对比试件数值模拟和试验结果，可得出预制裂纹尖端到空心孔区间内，裂纹的扩展路径基本一致，并且主裂纹均在通过双空心孔中心区域一段距离后止裂；在双空心孔区域，孔洞前后壁均有明显断裂破坏现象，形成了次生裂纹，尤其是孔后方的次生裂纹得到了充分的扩展演化。上述路径对比，直观的验证了模拟参数的有效性。

数值计算结果不会出现试验结果中如图 4(b)所示的止裂后直接偏折行为。试验所用雅蒙黑砂岩材料内部构造并非完全均匀对称，且内部含有不规则的裂隙和大小不均的颗粒，导致裂纹扩展过程中易于向材料局部强度较低的区域发展，因此裂纹的扩

展路径会有部分偏离轴线的现象。而数值模型中网格均匀分布，且整体属性一致，属于理想材料分布状态，主裂纹位于试件轴线上，前期裂纹扩展中受到小孔的引导作用一致，不会出现偏折。同时试验中，裂纹面非闭合，裂纹尖端存在宽度，起裂时裂纹靠近预制裂纹面边侧，并非从中轴线起裂，也导致裂纹扩展路径的随机变化。

当裂纹扩展至两孔中心轴线后方时，两孔壁产生次生裂纹，并且存在能量损失，单元的大小将影响局部能量变化，此时数值模型将中两孔的次生裂纹将发生不同的裂纹扩展现象；随着局部能量不平衡的加剧，裂纹扩展演化也将发生差异，最终裂纹将向局部损伤较大的区域急剧扩展。同时，观测到次生裂纹在扩展后期，将朝着试件中轴线的方向偏折，此现象也发生在试验中，但是在数值模拟结果中更加明显。偏折后，该裂纹的扩展方向呈现为与波传播方向一致的特性，趋向平行于主裂纹。

### 3.3 定区域止裂结果分析

主裂纹起裂至扩展前期，受预制空心孔影响极小，为进一步研究双空心孔对裂纹扩展行为的影响机制，现对两孔周边区域进行深入分析。

图 9 中展示了主裂纹穿过两孔中心轴线时 3 个重要时刻的状态，提取了裂纹扩展路径图、第一主

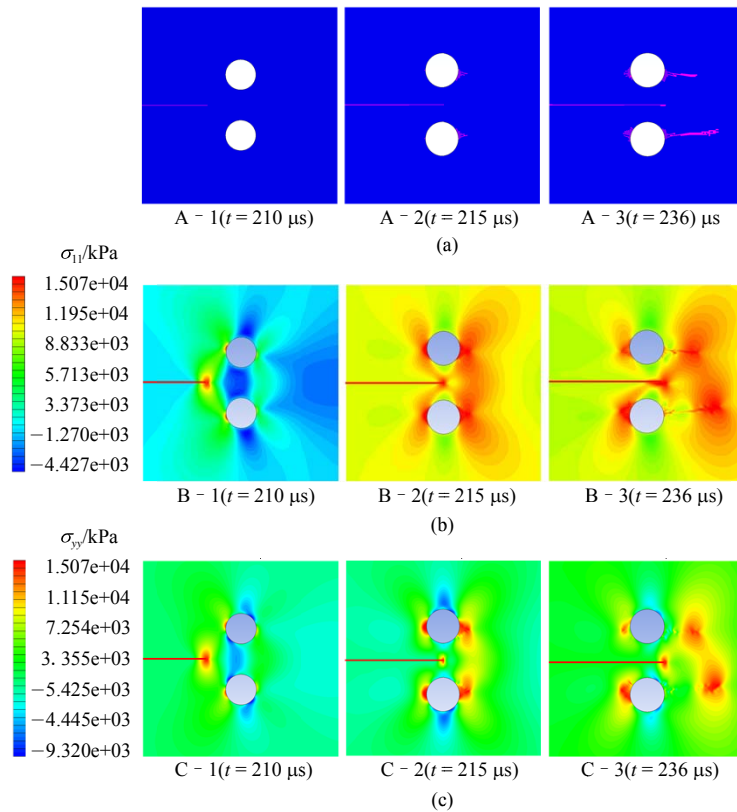


图 9 数值模拟裂纹扩展路径图，主应力  $\sigma_{11}$  云图和压应力  $\sigma_{yy}$  云图

Fig.9 Numerical simulation results of crack propagation paths, contour plot of the principal stress  $\sigma_{11}$  and contour plot of the compressive stress  $\sigma_{yy}$

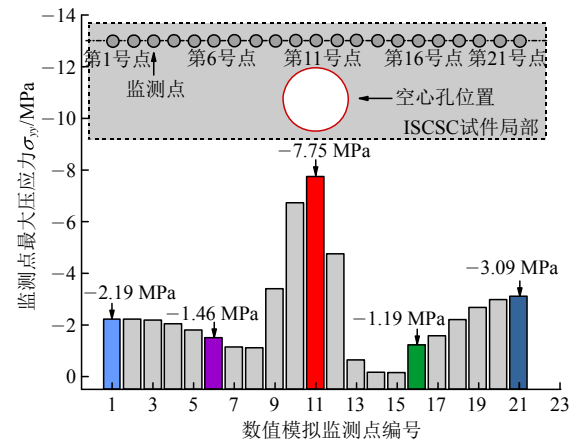
应力云图和横向压应力云图。当  $t = 210 \mu\text{s}$  时，裂纹扩展至两孔中心连线前方  $3 \text{ mm}$  处。由于预制双空心孔的存在，应力波在空心孔左侧孔壁发生反射，反射后的应力波形成拉伸波，此时双空心孔左壁质点向孔内侧移动，孔发生压缩变形，引起两孔的曲率改变，在两孔中间局部区域形成了远超周边区域的压应力场。同时，由于裂纹扩展至双孔前方区域，引起构型自由边界的改变，从而双孔前壁的拉应力场发生偏向于试件边界的侧移。随着拉应力区的侧移，引起了孔间核心压缩区朝裂纹尖端方向移动。

该压应力场，是一个复杂的叠加场，随着应力波的持续传播而持续叠加，并呈现出压应力  $\sigma_{yy}$  自近孔壁向远孔壁强烈衰减的特征，同时该压应力场是一个变化的场，压应力场的位置和大小随着裂纹扩展的行为的改变而改变，如图 9(c)所示。该压应力场阻碍了裂纹扩展，其扩展动能势必降低，扩展速度将随之减缓，并产生止裂现象。

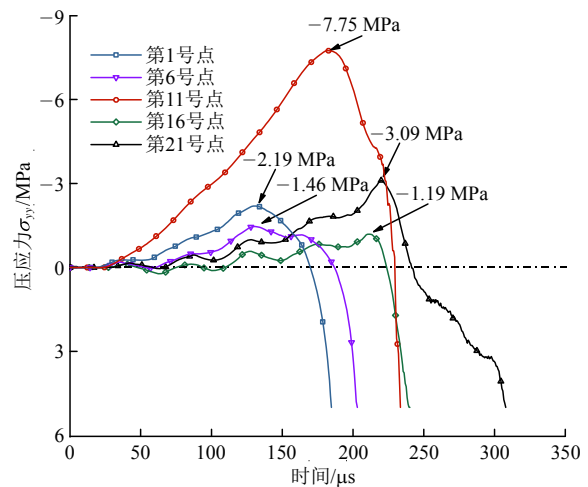
当  $t = 215 \mu\text{s}$  时，主裂纹已扩展至两孔中心连线位置，同时，双空心孔前后壁存在典型的拉应力场(如图 9(b)中 B-2 所示)，局部拉应力达到材料动态抗拉强度，故此在双空心孔前后孔壁均产生次生裂纹(如图 9(a)中 A-2 所示)。此时，该应力场分布形貌十分典型，上下对称，孔后的分布范围和强度均明显大于孔前，则孔后局部更容易起裂；最终，次生裂纹的扩展演化更剧烈。同时，双空心孔影响下产生的压应力场，分布位置及强度较之前时刻有明显的改变，随着裂纹尖端进入双孔叠加应力场，双孔间的压应力区域急速缩小，裂纹尖端的拉应力与孔间压应力叠加，主裂纹的扩展效应受到抑制。该状态下，次生裂纹得到充分发育，使得整体模型的能量释放损耗，而导致主裂纹最终停止扩展(见图 8)。

为进一步验证该压应力场的影响作用，在 ISCS C 数值模型中，于预制孔轴线(模型对称线)布置监测点，共计 21 个，间距为  $2 \text{ mm}$ ，并自左向右进行编号，第 11 号点位于两孔中心连线上。5 个典型的监测点随时间变化的压应力  $\sigma_{yy}$  如图 10 所示。

由图 10 可得，冲击荷载施加后，随着应力波的传播，监测区域压应力持续增大，当到达监测点峰值后，急剧下降，此时拉应力迅速增加，直至达到材料抗拉强度后产生损伤。该过程是伴随着裂纹扩展而进行的，裂尖接近两孔中心连线时，孔前方监测点均达到各自最大值，对裂纹的扩展作用达到最大，并且提取各监测点的峰值压应力，同时将其柱



(a) 监测点最大压应力分布图



(b) 监测点压应力曲线

图 10 高斯点最大压应力  $\sigma_{yy}$  分布曲线

Fig.10 Curves of the maximum compressive stress  $\sigma_{yy}$  detected by gauge

状图标识在图 10 中，可以明显的得出第 11 号点的峰值压应力远超周边区域，也反映出该区域对裂纹的抑制作用最大。同时也是裂纹在该区域止裂的最大原因。两孔连线后方监测点峰值压应力急剧降低后，又开始升高的主要因素为模型右侧介质边界的反射压缩波。

为验证数值模拟的准确性，本文将数值模拟高斯监测点测得的裂纹扩展速度和试验 ISCS C-SJB 号试件 CPG 测定的裂纹扩展速度做对比，由于 CPG 丝栅位置和高斯点布置位置编号有所不同，故此本文以 CPG 丝栅位置为基准，将高斯监测点和对应丝栅编号进行匹配。具体结果如图 11 所示。该对比显示出，试验和数值计算中裂纹扩展速度整体变化趋势基本一致，数值上的差异主要来自于试验材料的颗粒及不均匀性影响。同时，裂纹扩展速度曲线则呈现出同  $\sigma_{yy}$  峰值分布相反的趋势。裂纹扩展速度在双孔中心连线前方急剧减小，在扩展至两孔



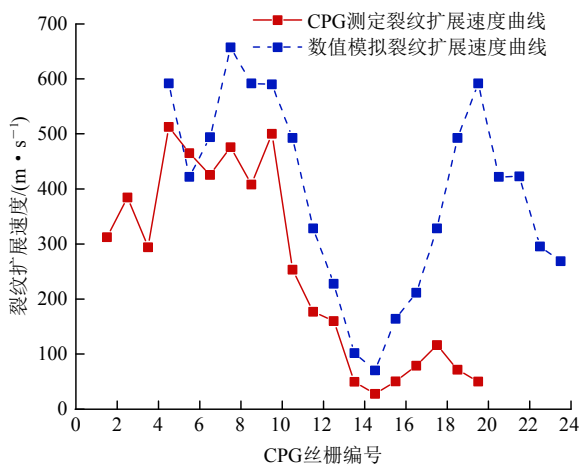


图 11 裂纹扩展速度对比图

Fig.11 Contrast diagram of crack propagation velocity

中心连线位置时, 扩展速度达到最小值(该位置  $\sigma_{yy}$  峰值为最大值), 随后扩展速度有瞬间增大趋势。可得,  $\sigma_{yy}$  直接影响裂纹的扩展速度, 压应力场的存在, 是引起裂纹扩展速度降低和裂纹止裂现象发生的主要原因。该结果也验证了数值模拟的有效性, 也进一步佐证了 ISCS C 试件裂纹扩展的行为具备一定的规律性和普适性。

## 4 结 论

本文基于大直径分离式霍普金森压杆设备和 ISCS C 构型, 研究了冲击荷载作用下裂纹的扩展行为。借助于 CPG 及其信号采集系统定量测量了裂纹扩展速度, 并通过 AUTODYN 软件进行数值分析, 得到以下重要结论:

(1) ISCS C 构型试验结果稳定, 适用于研究岩石裂纹起裂、扩展及止裂的全过程行为, 并可实现裂纹定区域止裂, 其止裂区域位于双孔中心连线前方区域。

(2) 在动荷载作用下, 双空心孔对裂纹扩展行为影响巨大, 裂纹扩展至双孔中心连线区域时, 应力波会在双孔之间形成叠加压应力场, 抑制裂纹扩展, 使得裂纹扩展速度急剧降低, 甚至出现止裂现象。

(3) 运动裂纹扩展至双空心孔间叠加场时, 极易受到物质不均匀性影响, 造成裂纹直接偏折或发生分叉, 造成穿孔破坏。

(4) 通过对 ISCS C 试件 SHPB 试验与数值计算的裂纹扩展路径及裂纹扩展速度对比, 其破坏现象较吻合, 验证了拉伸断裂软化损伤破坏模型用以模拟岩石类材料动态破坏问题的可行性。

## 参考文献(References):

- [1] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地科学领域的若干颠覆性技术构想和研究方向[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(1): 1 - 8.(XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Novel idea and disruptive technologies for the exploration and research of deep earth[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(1): 1 - 8.(in Chinese))
- [2] BAZANT Z P, CANER F C. Comminution of solids caused by kinetic energy of high shear strain rate, with implications for impact, shock and shale fracturing[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(48): 19 291 - 19 294.
- [3] LINK R E, JOYCE J A, ROE C. Crack arrest testing of high strength structural steels for naval applications[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(3): 402 - 418.
- [4] CROSLLEY P B, RIPLING E J. Significance of crack arrest toughness (K<sub>Ia</sub>) testing[J]. Astm Special Technical Publication, 1980, 711: 321 - 337.
- [5] YANG R, DING C, YANG L, et al. Behavior and law of crack propagation in the dynamic-static superimposed stress field[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2018, 46(6): 20170271.
- [6] 张盛, 鲁义强, 王启智. 用 P-CCNBD 试样测定岩石动态扩展韧度和观察动态止裂现象[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3 095 - 3 105. (ZHANG Sheng, LU Yiqiang, WANG Qizhi. Measurement of dynamic fracture propagation toughness of rock and observation of dynamic arrest phenomenon using P-CCNBD specimens[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(11): 3 095 - 3 105.(in Chinese))
- [7] 李炼, 杨丽萍, 曹富, 等. 冲击加载下的砂岩动态断裂全过程的试验和分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1 912 - 1 922.(LI Lian, YANG Liping, CAO Fu, et al. Complete dynamic fracture process of sandstone under impact loading: Experiment and analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 1 912 - 1 922.(in Chinese))
- [8] AMANN F, ÖMER Ü, KAISER P K. Crack initiation and crack propagation in heterogeneous sulfate-rich clay rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(5): 1 849 - 1 865.
- [9] YU J, ZHANG H C, DENG D, et al. Simulation and experiment for crack arrest in remanufacturing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(5 - 8): 1 547 - 1 556.
- [10] ZHAO Y, GONG S, ZHANG C, et al. Fractal characteristics of crack propagation in coal under impact loading[J]. Fractals-complex Geometry Patterns and Scaling in Nature and Society, 2018, 26(2): 1840014.
- [11] 李清, 杨仁树, 李均雷, 等. 爆炸荷载作用下动态裂纹扩展试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 912 - 2 916.(LI

- Qing, YANG Renshu, LI Junlei, et al. Experimental study on propagation of dynamic cracks under blasting loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 912 - 2 916.(in Chinese)
- [12] 岳中文, 杨仁树, 郭东明, 等. 爆炸应力波作用下缺陷介质裂纹扩展的动态分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 949 - 954.(YUE Zhongwen, YANG Renshu, GUO Dongming, et al. Dynamic analysis of crack propagation in media containing flaws under the explosive stress wave[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 949 - 954.(in Chinese))
- [13] GREGOIRE D, MAIGRE H, COMBESURE A. New experimental and numerical techniques to study the arrest and the restart of a crack under impact in transparent materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(18 - 19): 3 480 - 3 491.
- [14] 朱婷, 胡德安, 王毅刚. PMMA材料裂纹动态扩展及止裂研究[J]. 应用力学学报, 2017, 34(2): 230 - 237.(ZHU Ting, HU Dean, WANG Yigang. Study on dynamic crack propagation and arrest of PMMA materials[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2017, 34(2): 230 - 237.(in Chinese))
- [15] RAVI-CHANDAR K, KNAUSS W G. An experimental investigation into dynamic fracture: I. Crack initiation and arrest[J]. International Journal of Fracture, 1984, 25: 247 - 262.
- [16] WANG M, ZHU Z M, DONG Y Q, 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.
- [17] WANG X M, ZHU Z, WANG M, 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.
- [18] AWAJI H, SATO S. Combined mode fracture toughness measurement by disk test[J]. Journal of Engineering Materials and Technology Transactions of the ASME, 1978, 100(2): 175 - 182.
- [19] CHONG K P, KURUPPU M D. New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials[J]. International Journal of Fracture, 1984, 26(2): 59 - 62.
- [20] 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.(in Chinese))
- [21] DONG Y Q, ZHU Z M, ZHOU L, et al. Study of mode I crack dynamic propagation behaviour and rock dynamic fracture toughness by using SCT specimens[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2018, 41: 1 810 - 1 822.
- [22] 汪小梦, 朱哲明, 施泽彬, 等. 基于 VB-SCSC 岩石试样的动态断裂韧度测试方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(2): 302 - 311.(WANG Xiaomeng, ZHU Zheming, SHI Zebing, et al. A method measuring dynamic fracture toughness of rock using VB-SCSC specimens[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(2): 302 - 311.(in Chinese))
- [23] 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): 2 474 - 2 485.(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): 2 474 - 2 485.(in Chinese))
- [24] ZHU W C, NIU L L, LI S H, et al. Dynamic Brazilian test of rock under intermediate strain rate: Pendulum hammer-driven SHPB test and numerical simulation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48: 1 867 - 1 881.
- [25] FUNATSU T, KURUPPU M, MATSUI K. Effects of temperature and confining pressure on mixed-mode(I-II) and mode II fracture toughness of Kimachi sandstone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 67(2): 1 - 8.
- [26] SAKSALA T, HOKKA M, KUOKKALA VT. Numerical modeling and experimentation of dynamic Brazilian disc test on Kuru granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 59: 128 - 138.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] ZHU Z M. Numerical prediction of crater blasting and bench blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(9): 1 088 - 1 096.
- [30] ZHANG Q B, ZHAO J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(4): 1 411 - 1 478.
- [31] 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 crack under impacting loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1 323 - 1 332.(in Chinese))