

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0448

基于圆弧底试件的动态裂纹扩展及止裂规律研究*

郎林^{1,2}, 朱哲明^{1,2}, 邓帅^{1,2}, 牛草原^{1,2}, 万端莹^{1,2}, 王磊^{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: 为了研究脆性材料的动态裂纹扩展及止裂规律, 设计了一种带圆弧形底边的梯形开口边裂纹 (trapezoidal opening crack with arc bottom, TOCAB) 构型的试件。在落锤冲击设备加载下, 对圆心角为 0°、60°、90° 和 120° 的 TOCAB 试件进行了冲击实验, 并采用裂纹扩展计 (crack propagation gauge, CPG) 监测裂纹起裂和扩展时间, 从而获得裂纹扩展速度。采用有限差分软件 AUTODYN 对落锤冲击设备和试件进行数值模拟, 研究了裂纹的动态扩展过程及止裂规律。还基于实验和数值方法, 计算了裂纹的临界动态应力强度因子。实验和数值结果均表明: 3 种弧度的 TOCAB 试件都可以实现运动裂纹止裂, 该构型可用于研究动态裂纹止裂问题; 数值计算的裂纹扩展路径与实验结果基本一致, 验证了数值模型的有效性; 裂纹起裂和止裂时刻的临界动态应力强度因子大于裂纹动态扩展过程中的临界动态应力强度因子。

关键词: 冲击加载; 动态裂纹扩展; 裂纹止裂; 圆弧底; 临界动态应力强度因子

中图分类号: O346.1; TU45 国标学科代码: 1301540 文献标志码: A

Dynamic crack growth and crack arrest law based on arc bottom specimen

LANG Lin^{1,2}, ZHU Zheming^{1,2}, DENG Shuai^{1,2}, NIU Caoyuan^{1,2}, WAN Duanying^{1,2}, WANG Lei^{1,2}

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

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

Abstract: In order to study the crack growth and crack arrest law of the brittle materials, a large-sized trapezoidal opening crack with arc bottom (TOCAB) configuration specimen was proposed. The impact tests were carried out on the TOCAB specimens with radians of 0°, 60°, 90° and 120° under the drop hammer impact device. The crack growth speed was obtained by using the distance between the two resistance wires divided by the break time of the resistance wire of the crack propagation gauge, and crack propagation gauge (CPG) was used to monitor the crack initiation time and expansion time. The crack growth behavior of the TOCAB specimen was numerically simulated by using the finite difference software AUTODYN. And the crack growth process and the crack arrest law were numerically studied. The critical dynamic stress intensity factor of the moving crack was calculated based on the experimental-numerical method and the finite element software ABAQUS. Both experimental and numerical results show that the three arc-bottom specimens have a crack-stopping effect on the moving crack, and the TOCAB configuration specimen is suitable for studying the crack arrest problem. And the crack growth path obtained in the numerical calculation is basically consistent with the experimental results, which verifies the validity of the numerical model. And the critical dynamic stress intensity factor at the time of crack initiation and crack arrest is greater than that at the time of the crack growth.

Keywords: impact loading; dynamic crack growth; crack arrest; arc bottom; critical dynamic stress intensity factor

* 收稿日期: 2019-11-23; 修回日期: 2020-02-24

基金项目: 国家自然科学基金 (11672194, U19A2098); 四川省科技计划 (2018JZ0036)

第一作者: 郎林 (1984—), 男, 博士研究生, 高级工程师, langlinww@163.com

通信作者: 朱哲明 (1965—), 男, 博士, 教授, zhemingzhu@hotmail.com

岩石和混凝土等脆性材料作为建筑材料,已在现代工程结构中得到广泛应用。虽然它们的基本力学性质已有大量研究和应用,但工程实践中,脆性材料常因其内部的微裂纹、孔洞、夹杂等缺陷导致结构出现宏观裂纹,严重时甚至导致隧道、桥梁、地下人防设施等重要工程结构损坏或完全失稳。因此,迫切需要开发裂纹止裂技术,防止工程结构中的已有裂纹继续扩展,尤其对某些重要工程结构^[1-3]。

裂纹止裂技术先在金属材料中得到开发和应用,通常在裂纹尖端前部钻一个止裂孔来防止疲劳载荷下的静态裂纹萌生和扩展^[4-6]。止裂孔的作用是使裂纹尖端变钝,减小裂纹尖端的应力集中^[7-9]。为了研究爆炸荷载下圆形钻孔对运动裂纹扩展的影响,李萌等^[10]在岩石试件的裂纹扩展路径上预先设置了两个圆孔,实验结果表明双圆孔对爆炸波引起的运动裂纹有抑制作用。杨仁树等^[11]利用三点弯曲梁试件研究了 I 型运动裂纹与圆孔缺陷的相互作用机理,结果表明圆孔对裂纹扩展速度和裂纹的应力强度因子有抑制作用。

对裂纹扩展行为和止裂规律有一些有意义的研究:张财贵等^[12]用压缩单裂纹圆孔板试样(SCDC)研究了裂纹的萌生、扩展和止裂行为,指出裂纹止裂是一种突发现象;王蒙等^[13-14]采用 SCSC 试样、高速摄影系统和软件 AUTODYN 研究了 I/II 型裂纹扩展特性,实验结果表明,裂纹扩展路径是弯曲的,在裂纹止裂处有明显的转折点;Gregoire 等^[15]采用透明有机玻璃和高速摄像机进行了冲击实验,指出裂纹扩展过程中存在止裂和再起裂现象。这些研究说明脆性材料存在裂纹止裂现象,深入研究和合理设计,可以开发适合于脆性材料的裂纹止裂技术。

止裂现象发生是随机出现的,且摄影技术、应变片技术等现有测试技术仅对测试试样的一定区域进行监测,有可能监测的区域没有发生止裂而观测不到止裂现象。那么,就需要开发一种构型的试件使裂纹能够在监测区域出现止裂。为此,汪小梦等^[16]、Lang 等^[17]采用 V 形底试样研究冲击加载下的裂纹止裂行为,试图通过改变试样的形状来发展在冲击荷载下的脆性材料裂纹止裂技术。其原理是,试件的 V 形底部反射的压应力波抑制了运动裂纹,使裂纹停止继续扩展。对角度 120°和 150°的 V 形底试件进行实验和数值模拟,结果表明两种试样对运动裂纹均有一定抑制作用。

另外,在断裂力学分析中,常采用临界动态应力强度因子描述动态荷载作用下裂纹的动态特征。在冲击荷载作用下,裂纹扩展过程中临界动态应力强度因子不是一个常数,它与裂纹扩展速度成反比^[13-15, 18];而在爆炸荷载下,临界动态应力强度因子随时间频繁波动^[11, 19-21]。

为了进一步了解裂纹动态扩展及止裂规律,本文中设计一种带圆弧形底边的梯形开口边裂纹(trapezoidal opening crack with arc bottom, TOCAB)构型的试件。基于落锤加载实验装置和 TOCAB 构型试件进行冲击实验,采用裂纹扩展计(crack propagation gauge, CPG)监测裂纹扩展时间并计算裂纹扩展速度。采用有限差分软件 AUTODYN 对裂纹的萌生、扩展和止裂全过程进行数值模拟,结合实验和数值模拟对临界动态应力强度因子进行计算。通过实验和数值模拟,对裂纹的动态扩展行为和圆弧底部对裂纹的止裂机理进行分析探讨。

1 实验

1.1 试件构型

在冲击实验中发现,SCDC 构型^[12]、SCSC 构型^[13-14]和 SCT 构型^[22]的试样在裂纹动态过程中存在止裂现象。为了进一步探究裂纹止裂机理和开发止裂技术,本文中设计了一种带圆弧形底边的梯形开口边裂纹(TOCAB)构型的试件,如图 1(a)所示。在竖向冲击荷载作用下,TOCAB 试件弧形底部与透射杆之间会产生反射压缩波,在裂纹尖端前部形成的压缩应力水平分量减缓了运动裂纹的扩展,如图 1(b)所示,最终导致裂纹停止扩展。

4 种 TOCAB 试件的圆弧所对应的圆心角分别为 0°、60°、90°和 120°,如图 2 所示。试件的宽度、高度和厚度均相同,分别为 260、350 和 30 mm;上部梯形开口宽度为 80 mm,高度为 100 mm;预制裂纹长度为 100 mm、宽度为 1.5 mm。120°的 TOCAB 试件的几何尺寸如图 1(a)所示,其底部圆弧的圆心角 θ 为

120°, 所对应弦长为 260 mm, 预制裂缝起始于梯形开口底边中点且平行于试件中轴线, 这是典型的 I 型断裂裂纹。为保证裂纹从预制裂缝尖端有效起裂, 实验前对裂纹尖端采用 0.1 mm 薄钢锯条进行锐化处理。

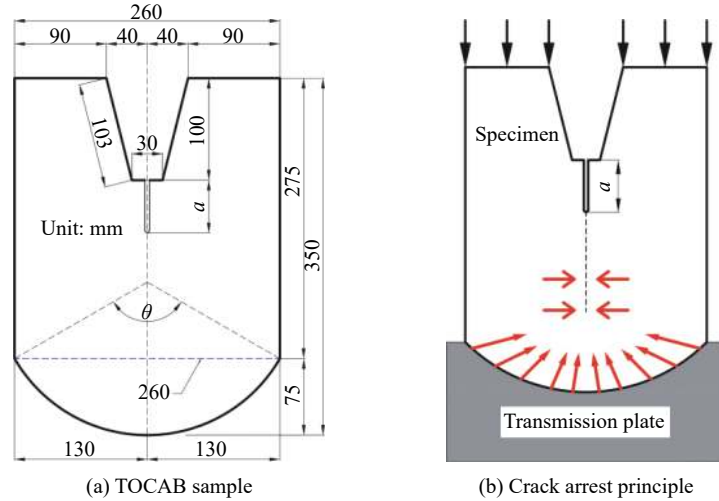


图 1 试件几何尺寸和裂纹止裂机理

Fig. 1 Dimension of sample and crack arrest principle

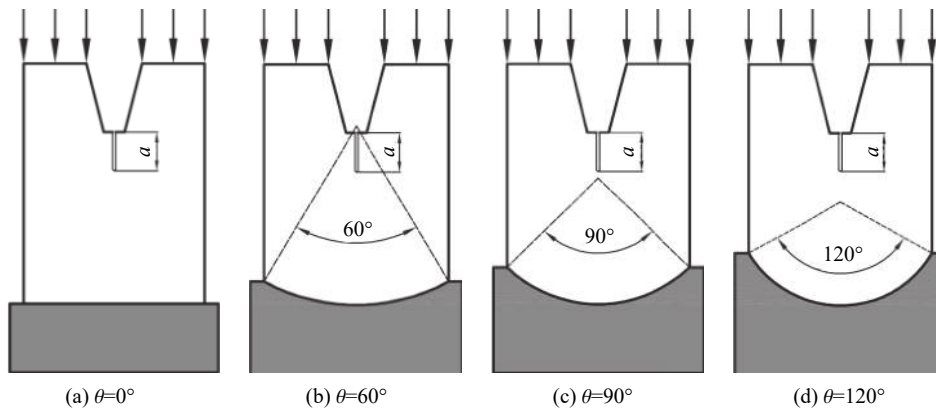


图 2 4 种用于研究动态断裂行为的大尺寸试件的构型

Fig. 2 Four samples were used to measure dynamic fracture toughness

1.2 材料准备和试件浇筑

以水泥粉煤灰砂浆作为模型材料, 砂浆中各成分质量配比为: $m(\text{水泥}) : m(\text{水}) : m(\text{砂}) : m(\text{粉煤灰}) = 1.000 : 0.688 : 3.013 : 0.118$ 。水泥为普通硅酸盐水泥 P.O 42.5R, 水为自来水, 砂为本地河砂, 粉煤灰为前锋电厂 II 级粉煤灰。测试 8 个边长 15 cm、长度 30 cm 的长方体试块和 12 个边长 10 cm 的立方体试块, 其力学参数分别为: 泊松比 $\mu=0.22$, 弹性模量 $E=30.31 \text{ GPa}$, 密度 $\rho_0=2\ 159 \text{ kg/m}^3$, 膨胀波波速 $c_d=4\ 003.5 \text{ m/s}$, 畸变波波速 $c_s=2\ 398.6 \text{ m/s}$, 瑞利波波速 $c_R=2\ 187.9 \text{ m/s}$ 。

检测参数所用的试块和实验所用试件都在塑料模具中浇筑而成, 在实验室常温环境下放置 24 h 后, 将试样取出并移入具有温度 23 °C 和相对湿度 95% 的养护室中, 直至达到需要的实验龄期, 再取出进行实验。从同一批搅拌的砂浆中选材, 浇筑了 80 个构件, 每种构型 20 个。

1.3 落锤加载装置和 CPG 测量技术

实验采用基于 SHPB 实验原理设计的落锤冲击实验装置, 如图 3 所示, 它由混凝土减震器、透射杆、

砂浆试样、入射杆、波形整合器、冲击杆、红外线测速仪等组成。它的优点是入射杆和透射杆的尺寸比 SHPB 杆大,可以对大尺寸的试件进行测试。为保证入射杆、透射杆与试件有良好接触并减少摩擦,实验前将试样上下端面打磨光滑、抹上凡士林润滑剂。实验时,将试样放置在入射杆与透射杆之间,并采用厚 20 mm 的钢板夹住试件前后面,以防止试件屈曲,再将冲击杆从预设高度自由下落,采用红外线测速仪监测冲击速度。

如图 3 所示,冲击加载装置的入射杆和透射杆都采用 LY12CZ 铝合金材料,密度 $\rho_1=2800 \text{ kg/m}^3$,泊松比 $\mu_1=0.3$,弹性模量 $E_1=71.8 \text{ GPa}$,铝合金杆的实测纵波波速为 5 005 m/s。落锤采用钢铁,密度 $\rho_2=7850 \text{ kg/m}^3$,泊松比 $\mu_2=0.25$,弹性模量 $E_2=205 \text{ GPa}$ 。安装在入射杆上端面的波形整合器采用紫铜材料。

在实验中,采用 CPG(见图 3) 监测裂纹起裂和扩展到某处的时间。CPG 主要由间距相等的卡玛铜电阻丝并联布置于玻璃丝布基底上,再由两根主电阻丝连接至数据采集装置。CPG 长度和宽度分别为 44 和 18 mm,两根相邻电阻丝の間隔距离为 2.2 mm。采用长 35 mm 的灵敏电阻应变片记录入射杆和透射杆上的入射波、反射波和透射波。所有测试数据都通过超动态电阻应变仪收集,再由高精度、高增益、低漂移的放大器放大信号,以便高性能计算机记录保存。值得注意的是,CPG 测量线路中需要连接提供恒定电压的稳压源,所测量的电压信号才能被超动态应变仪读取收集,同样,电阻应变片测量线路中则需要连接集成了惠更斯电路的桥盒。

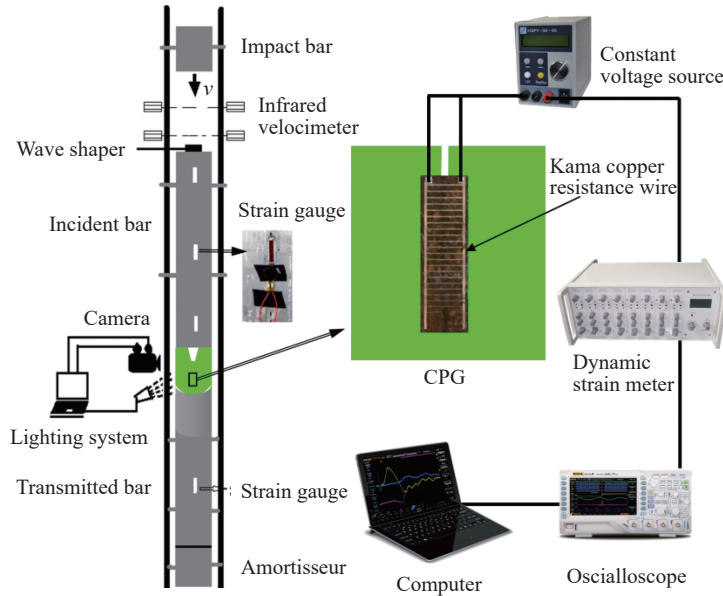


图 3 落锤装置和数据采集系统

Fig. 3 Drop hammer device and data acquisition system

1.4 应变片和 CPG 监测的数据

在实验中,在入射杆和透射杆中间点分别粘贴一个电阻应变片,监测实验过程中加载荷载。利用软件 ORIGIN 对数字示波器采集的信号进行降噪处理,经计算得到相应的应变信号。试件上下端的动态荷载 $p_i(t)$ 和 $p_t(t)$ 为:

$$\begin{aligned} p_i(t) &= E_i A_i [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)] / A_s \\ p_t(t) &= E_t A_t \varepsilon_t(t) / A_s \end{aligned} \quad (1)$$

式中:下标 i、r、t 和 s 分别表示入射、反射、透射和试件, E 为杨氏模量, ε 为应变, A 为横截面面积。在冲击速度 4 m/s 下,测试的荷载曲线如图 4 所示。在随后的数值模拟中,将他们用作试件上的加载条件。动态荷载 $p_i(t)$ 随时间变化,其曲线弹性部分的斜率为加载率,可由软件 ORIGIN 计算得到^[23]。当冲击速度为 4 m/s 时,其加载率为 208.75 GPa/s。

将 CPG 粘贴于裂纹扩展路径上, 第 1 根电阻丝与预制裂缝尖端对齐, 以便监测裂纹起裂时刻。在竖向冲击荷载作用下, 随着裂纹起裂, CPG 的电阻丝逐根断裂, 超动态应变仪收集的电压信号呈台阶状跳跃。在加载率 273.64 GPa/s 的冲击荷载作用下, 4 种 TOCAB 试件的电压信号如图 5 所示。将电压对时间求导, 对应的极值时间即是电阻丝断裂时刻。由相邻两根电阻丝的间距 2.2 mm 和其断裂时间间隔, 可计算两根电阻丝之间的裂纹平均扩展速度。

由图 5 可知, 3 种圆弧底试件的裂纹在扩展过程中均存在延迟或止裂现象。对于 60° 的 TOCAB 试件 60-3, 动态裂纹扩展至第 4 根丝后停止了 73.66 μs; 对于 90° 的 TOCAB 试件 90-3, 动态裂纹扩展至第 15 根丝后停止了 126.32 μs; 对于 120° 的 TOCAB 试件 120-2, 动态裂纹扩展至第 20 根丝后停止了 78.76 μs。图 6 为 3 种 TOCAB 试件底部产生的反射压缩应力波的传播路径。对于 60° 的 TOCAB 试样, 反射压缩波能够传播到预制裂纹尖端, 因此动态裂纹在扩展早期发生止裂。而对于 120° 的 TOCAB 试件, 反射压缩波能够传播到试件中部或下部, 因此与 60° 和 90° 的 TOCAB 试件相比, 120° 的 TOCAB 试件的动态裂缝的止裂时间较晚。

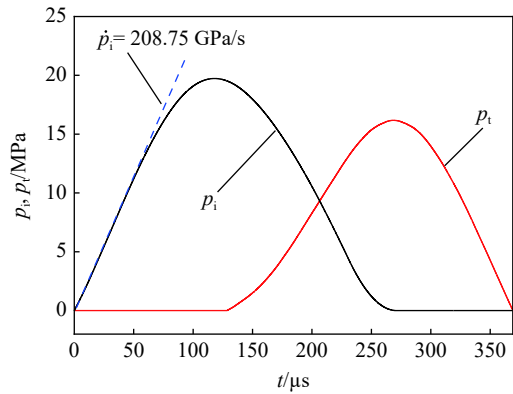


图 4 由入射杆和透射杆测量的的荷载曲线
Fig. 4 Loading curves measured from incident bar and transmission bar

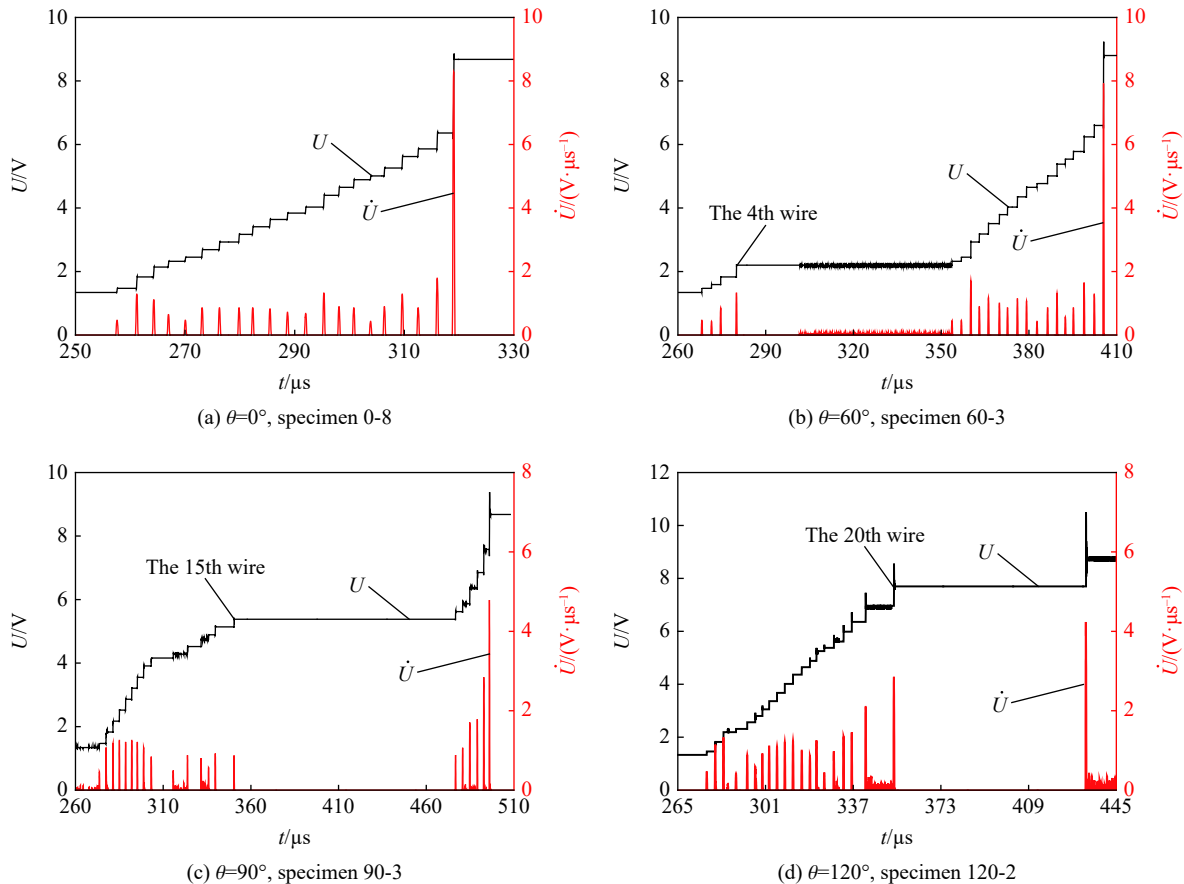


图 5 电压信号及其对时间的导数

Fig. 5 Voltage signal history and its derivative with respect to time

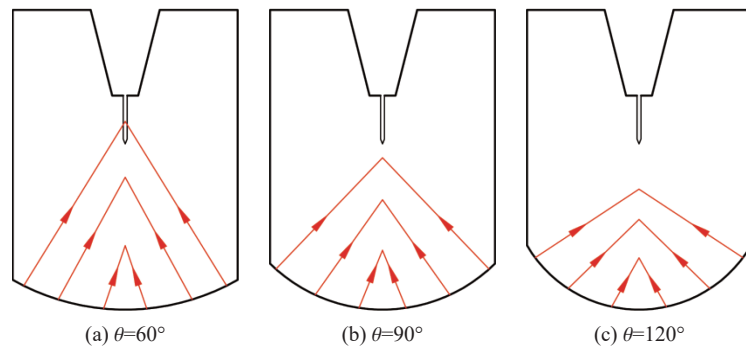


图 6 圆弧底试件的反射压缩波

Fig. 6 Reflected compression wave of arc bottom specimen

1.5 裂纹扩展速度和裂纹尖端位置

相邻两根电阻丝的间隔距离除以两根丝断裂时间差,可得裂纹扩展速度。图 7 为 4 种 TOCAB 试件在相同加载速率 273.64 GPa/s 下裂纹尖端位移和裂缝扩展速度的测试结果。由图 7 可见,裂纹尖端的位置随时间增加而增长,尤其在试件 0-8($\theta=0^\circ$) 中几乎呈线性增加,在其他 3 种圆弧底试件中各有一段平台,此时裂纹尖端停止扩展。裂纹扩展速度随时间波动,并不恒定。圆弧试件裂纹扩展速度的离散性比平底试件的大,裂纹扩展速度一般小于瑞利波波速的 1/2。

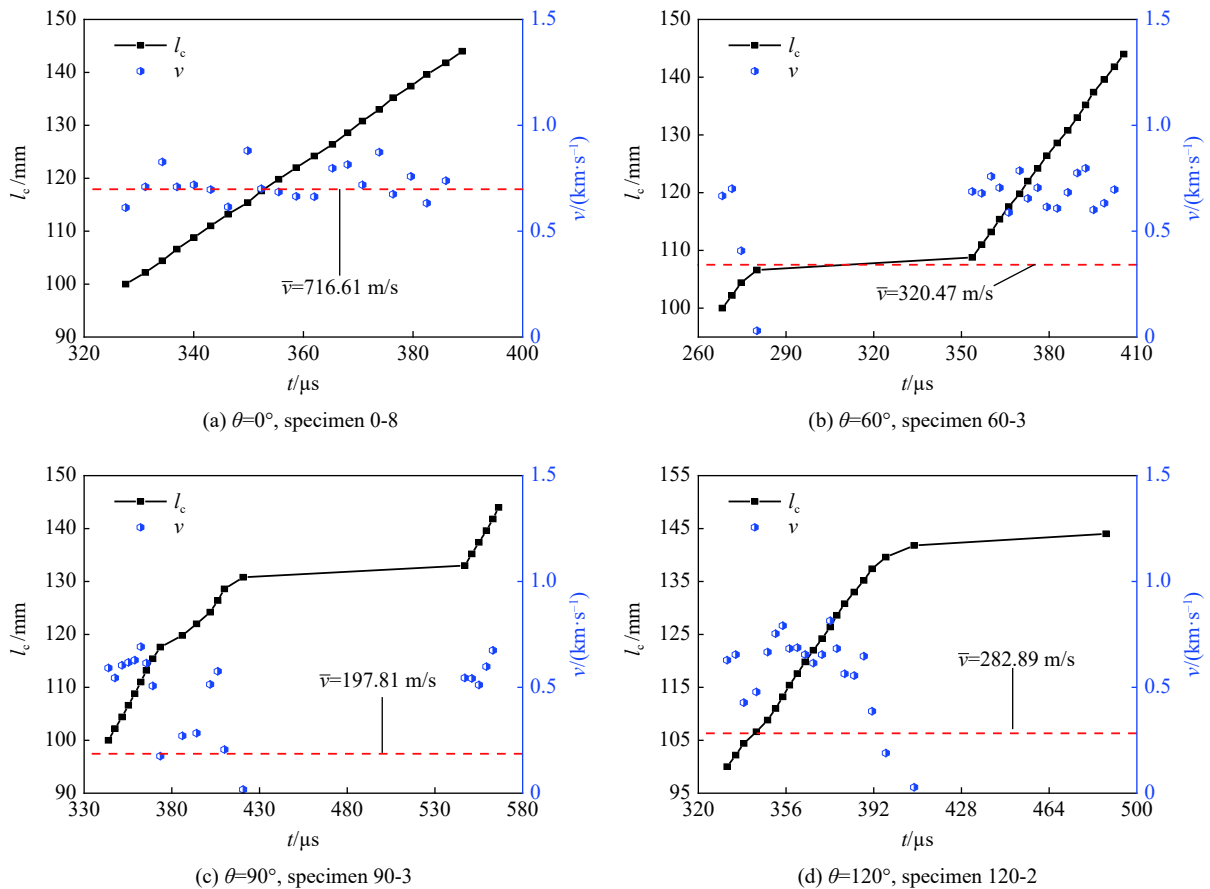


图 7 裂纹尖端位置和裂纹扩展速度

Fig. 7 Crack tip locations and crack growth velocities

对于试件 0-8($\theta=0^\circ$), 最小裂纹扩展速度为 611.11 m/s, 最大裂纹扩展速度为 880.00 m/s。由图 5(a) 可知, CPG 第 1 根丝的断裂时刻 $t_1=257.58 \mu\text{s}$, 第 21 根丝断裂时刻 $t_{21}=318.98 \mu\text{s}$, CPG 的总长度 $l=44 \text{ mm}$, 所以试件 0-8 的裂纹平均扩展速度 $\bar{v}=716.61 \text{ m/s}$ 。同样, 可得 $\theta=60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ 的 TOCAB 试件的裂纹平均扩展速度分别为 320.47、197.81、282.89 m/s。圆弧底试件的裂纹平均扩展速度远小于平底试件的裂纹平均扩展速度, 这说明, 圆弧试件底部产生的反射压缩应力波对裂纹扩展速度有明显的抑制作用。

2 数值模拟

2.1 有限差分模型

为了进一步研究裂纹的动态扩展行为和裂纹止裂机理, 采用有限差分软件 AUTODYN 进行了数值模拟。软件 AUTODYN 适用于冲击载荷作用下的脆性材料^[13-14, 16-17, 22]。

在落锤冲击实验中, 由于加载率较低, 且材料的变形和压力较小, 因此, 将线性状态方程应用于砂浆材料。表示为:

$$p(\rho) = K \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) \quad (2)$$

式中: p 为压力, ρ_0 和 ρ 分别为材料的初始状态的密度和当前状态的密度, K 为体积模量。

Persson^[24] 提出了描述脆性材料宏观非弹性变形的累积损伤失效准则, 累积损伤失效准则的有效性已被多位研究者证实^[25-27]。在本文中, 用累积损伤失效准则描述水泥粉煤灰砂浆材料的断裂行为, 通过损伤因子 D 描述材料的渐进性断裂, 它与材料所经历的有效塑性应变相关。在软件 AUTODYN^[28] 中, 损伤因子为:

$$D = D_{\max} \frac{\varepsilon_{\text{ep}} - \varepsilon_{\text{ep1}}}{\varepsilon_{\text{ep2}} - \varepsilon_{\text{ep1}}} \quad (3)$$

式中: ε_{ep} 为有效塑性应变, ε_{ep1} 为损伤因子为零时的有效塑性应变, ε_{ep2} 为损伤因子达到最大值时的有效塑性应变。

根据落锤冲击装置(见图 3)和试件的几何尺寸, 建立了二维有限差分数值模型, 在模型中为了使相邻的两个构件之间有效传递应力波, 设置了如图 8 所示的间隙。在混凝土阻尼器的底部, 设置一个透射边界, 它可以将应力波传递到地面且没有反射。

采用四边形非结构网格, 对落锤冲击加载系统进行网格划分。全局单元大小设置为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 对裂纹尖端区域和沿裂纹扩展路径上的单元网格进行加密, 其尺寸为 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$, 并将裂纹尖端设置成一个单元大小的平台, 如图 8 所示。试件划分单元网格总数为 189 000 个, 预制裂缝宽度为 1.5 mm, 裂缝长度为 100 mm。

2.2 裂纹动态扩展特征

在加载率 273.64 GPa/s 的冲击荷载作用下, 对不同弧度的圆弧底试件进行了冲击实验和数值模拟。图 9 为不同圆弧底试件的裂纹扩展路径的实验结果和数值模拟结果。可以看出, 裂纹路径的数值计算结果与实验结果基本一致, 但仍有轻微偏差, 这可能由材料的不均匀性造成。 $\theta=0^\circ$ 试件的裂纹扩展到了试件的底端, 而其他 3 种圆弧底试件, 裂纹没有扩展到试件的底端, 这表明, 试件底部与透射杆之间产生的反射压缩应力波对运动裂纹起到了抑制作用。在其他 3 种试件中, $\theta=90^\circ$ 试件的裂纹扩展长度最短, 而 $\theta=120^\circ$ 试件的裂纹扩展长度最长。

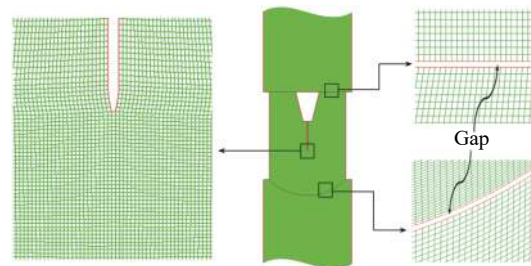


图 8 落锤冲击装置和试件的网格划分
Fig. 8 Grid division diagram of drop hammer impact device and specimen

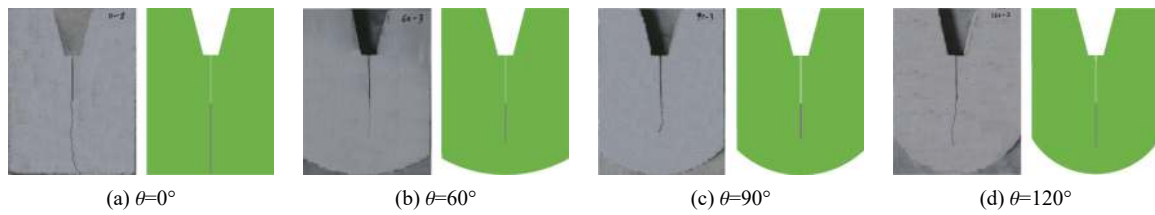


图 9 裂纹扩展路径的实验结果和数值模拟结果

Fig. 9 Experimental results and numerical simulation results of crack growth paths

2.3 裂纹扩展路径上的水平压应力

为了进一步研究圆弧底试件的止裂机理,在裂纹扩展路径上设置了一组间距 1 mm 的监测点,图 10 为裂纹路径上监测点分布和监测点的最大水平压应力。可以看出,圆弧底试件的最大水平压应力 σ_x 始终大于平底试件的最大水平压应力,这是因为,圆弧底与透射板相互作用产生的反射压缩波对裂纹路径上的监测点施加了额外的压力。在裂纹扩展的早期阶段, $\theta=60^\circ$ 试件的最大水平压应力 σ_x 略大于其他两种弧度的圆弧底试件,这是因为, $\theta=60^\circ$ 试件的反射压缩波能够到达预制裂缝尖端。然而,当裂纹扩展至试件中部后,即距离预制裂缝尖端约 80 mm 后,在 3 种圆弧底试件中, $\theta=120^\circ$ 试件的最大水平压应力 σ_x 最大,这也与图 6 中对圆弧底试件的反射压应力的分析一致。

2.4 加载率对裂纹扩展长度的影响

图 11 为 4 种 TOCAB 试件在不同加载荷载作用下的裂纹扩展长度。在加载率 150~350 GPa/s 范围,3 种圆弧底试件的裂纹长度均小于平底试件的,随着加载率的增加裂纹扩展长度的增大较小。这说明,加载率对圆弧底试件裂纹扩展长度的影响较小,水平压应力对裂纹扩展的抑制作用显著。

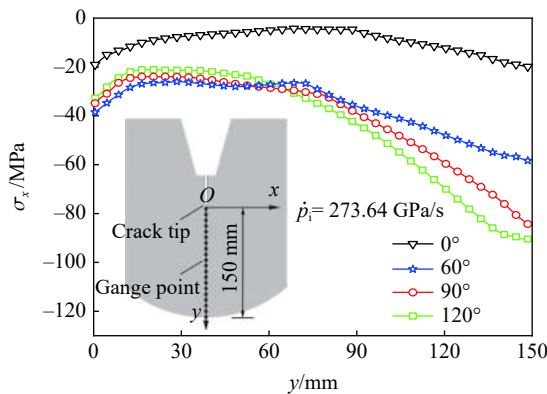


图 10 试件最大水平压应力沿裂纹路径的变化
Fig. 10 Maximum horizontal compressive stresses along crack paths of specimens

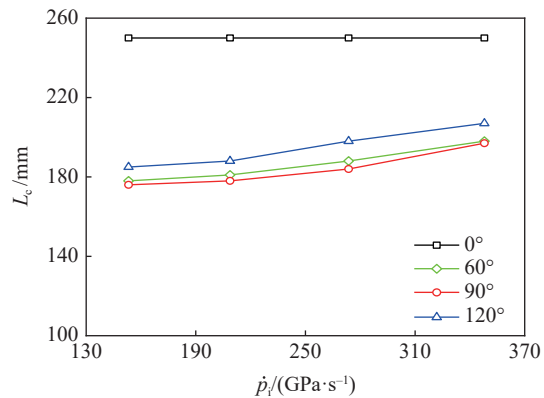


图 11 裂纹长度随加载率的变化
Fig. 11 Crack lengths varying with loading rates

3 临界动态应力强度因子

在裂纹动态断裂研究中,除了研究裂纹动态扩展行为,还需计算裂纹的动态应力强度因子 (dynamic stress intensity factor, DSIF)。DSIF 是描述裂纹动态扩展的一个重要断裂参数,通常不能直接测量到,而有限元软件 ABAQUS 已经广泛应用于计算裂纹应力强度因子,因此采用实验-数值方法^[13, 16-17] 计算裂纹扩展过程中的临界 DSIF。为此,根据实验加载状况,建立了 4 种 TOCAB 试件的有限元数值模型。

3.1 ABAQUS 有限元模型

为了计算裂纹的 DSIF,建立了落锤冲击加载下 TOCAB 试件的有限元模型,如图 12 所示。裂纹尖端附近区域采用 1/4 三角形单元 CPS6 进行离散化,其他区域采用四边形单元 CPS8 进行网格划分。

TOCAB 试件的网格单元数为 12 303 个。水泥砂浆的材料参数见第 1.2 节。在试件上下端分别施加动态荷载 $p_i(t)$ 和 $p_o(t)$, 如图 4 所示。

基于断裂力学理论^[29] 和位移外推法^[30], 平面应变问题中的 SIF 为:

$$K_I^0(t) = \frac{E}{24(1-\mu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{r_{OM}}} [8u_M(t) - u_N(t)] \quad (4)$$

式中: E 和 μ 分别为杨氏模量和泊松比, u 为 x 方向的位移, r 为半径; 在一个单元中, r_{ON} 为 r_{OM} 的 4 倍, 如图 12 所示。

动态荷载下的应力强度因子与静载荷下的应力强度因子是不同的, Freund 等^[31] 指出 DSIF 与裂纹速度有关:

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

式中: v 为裂纹扩展速度, $K_I^0(t)$ 为相应的静力作用下裂纹的应力强度因子, $k(v)$ 为裂纹速度的普适函数。裂纹速度的普适函数 $k(v)$ 为^[31]:

$$k(v) \approx \frac{1 - v/c_R}{(1 - v/c_d)^{1/2}} \quad (6)$$

式中: c_R 为瑞利波波速, c_d 为膨胀波波速。

3.2 临界 DSIF 的确定

根据实验测得的 CPG 电阻丝断裂时间和数值计算, 可以确定裂纹扩展过程中的临界 DSIF, 即实验-数值计算方法。以 $\theta=0^\circ$ 试件的起始时刻为例, 根据有限元模型的计算结果, 可得到不同时刻的裂纹位移 $u_M(t)$ 和 $u_N(t)$ 。将他们代入式(4), 计算裂纹的静态应力强度因子 $K_I^0(t)$, 并得到相应的 $K_I^0(t)$ 变化曲线, 如图 13(a) 所示。因此, 对于裂纹起始时刻, 由式(5)可得 $K_I^d(t)=K_I^0(t)$ 。

对于试件 0-8($\theta=0^\circ$), 根据实验结果可知, 当 $t=257.58 \mu\text{s}$ 时裂纹萌生。如图 13(a) 所示, 由 $257.58 \mu\text{s}$ 时所对应的值即为裂纹起裂时的临界 DSIF, $K_I^d(t)=3.052 \text{ MPa}/\text{m}^{1/2}$, 它可当作砂浆的起裂韧度。

在裂纹扩展过程中, 任意选取 CPG 的一根电阻丝的断裂来描述临界 DSIF 的计算方法。例如, 当 CPG 的第 10 根电阻丝断裂时, 裂纹扩展速度和裂纹长度由计算可得, 假设此时的裂纹长度为试件的预制裂缝长度, 并建立相应的数值模型。计算得到的 $K_I^0(t)$ 曲线, 如图 13(b) 所示。

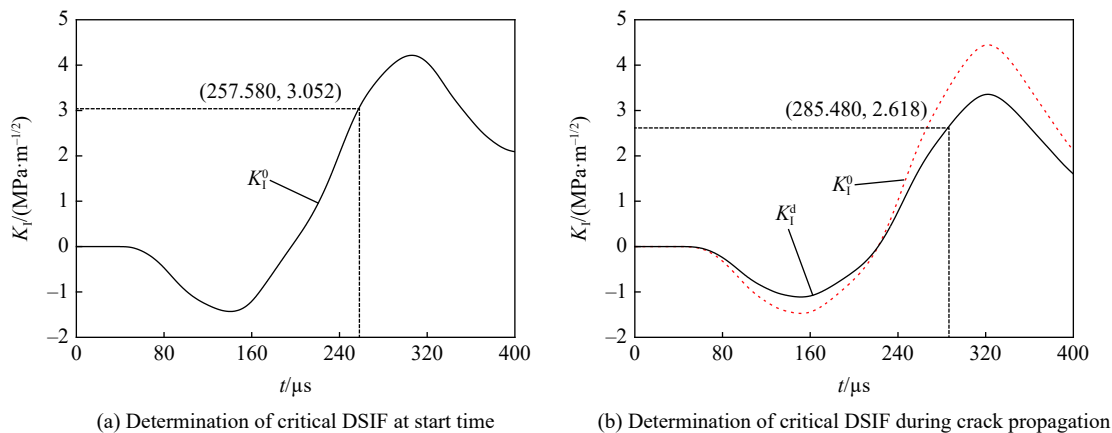


图 13 在裂纹起始和扩展过程中临界 DSIF 的计算方法
Fig. 13 Calculation method of critical DSIF during crack initiation and propagation

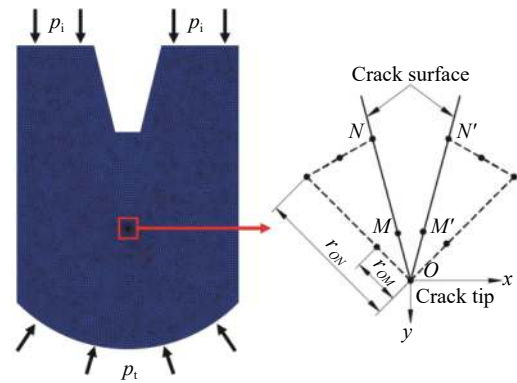


图 12 有限元模型网格划分
Fig. 12 Finite element model meshing

对于试件 0-8($\theta=0^\circ$), 在第 10 和 11 根电阻丝间的平均裂纹扩展速度为 685.36 m/s。通过式(6)得到普适函数 $k(v) = 0.7543$, 图 13(b) 为 $K_I^d(t)$ 曲线。第 10 根电阻丝断裂时间为 285.48 μs , 其相对应的临界 DSIF 为 $2.618 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$ 。

3.3 裂纹扩展中的临界 DSIF

对于 4 种不同弧度的 TOCAB 试件, 通过实验-数值法得到了每根电阻丝断裂处的临界 DSIF。图 14 为 4 种试件的临界 DSIF、裂纹速度 v 与瑞利波波速 c_R 的比率随裂纹长度的变化关系。

由图 14 容易看出, 4 种试件在起裂和止裂时的临界 DSIF 均高于扩展过程中的临界 DSIF。这是因为, DSIF 随着裂纹扩展速度的增加而减小。由式(6)可知, 当裂纹速度 v 达到瑞利波波速时, DSIF 为零。在止裂点, 即图 14(b) 中的第 4 根丝、图 14(c) 中的第 15 根丝和图 14(d) 中的第 20 根丝, 临界 DSIF 略大于裂纹起始点。这是因为, SIF 与裂纹长度有关, SIF 一般随裂纹长度的增加而增大, 因此随着裂纹长度的增加, 止裂时刻的 DSIF 大于起始时刻的 DSIF。

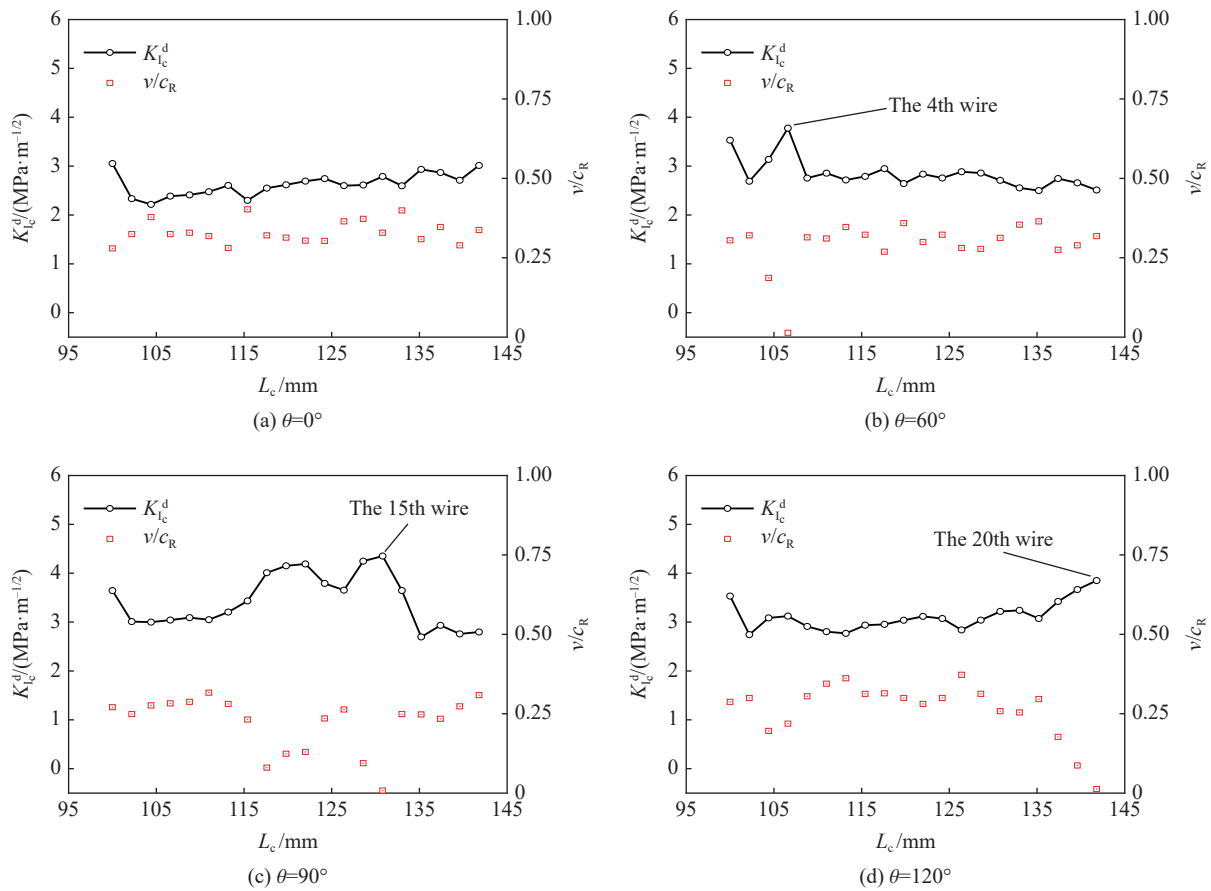


图 14 临界动态应力强度因子、裂纹速度与瑞利波波速之比与裂纹长度的关系

Fig. 14 Critical dynamic stress intensity factors, ratios of crack velocity to Rayleigh wave velocity varying with crack lengths

4 结论

(1) 圆心角为 60° 、 90° 和 120° 的 3 种圆弧底试件都可对运动裂纹止裂。其止裂机理为, 从试件的圆弧底部产生的反射压缩波, 在裂纹尖端前部形成的压缩应力水平分量抑制了运动裂纹的扩展。如需早期止裂可采用 60° 试件, 如需后期止裂可采用 120° 试件。

(2) 数值计算的裂纹扩展路径与实验结果基本一致, 验证了数值模型的有效性。在 $150 \sim 350 \text{ GPa/s}$ 范围, 加载率对裂纹扩展长度的影响较小, 说明水平压应力对裂纹扩展的抑制作用显著。

(3)平底试件的平均裂纹扩展速度比圆弧底试件的大得多。在4种TOCAB试件中,90°试件的裂纹平均扩展速度最低。

(4)在起裂和止裂时的临界DSIF均大于扩展过程中的临界DSIF,且由于应力强度因子随裂纹长度的增加而增大,因此在止裂时刻的临界应力强度因子高于起裂时的临界应力强度因子。

参考文献:

- [1] YANG R S, DING C X, YANG L Y, et al. Behavior and law of crack propagation in the dynamic-static superimposed stress field [J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2018, 46(6): 2540–2548. DOI: 10.1520/JTE20170271.
- [2] 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): 3095–3105. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.11.003.
ZHANG S, LU Y Q, WANG Q Z. 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): 3095–3105. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.11.003.
- [3] 李炼, 杨丽萍, 曹富, 等. 冲击加载下的砂岩动态断裂全过程的实验和分析 [J]. *煤炭学报*, 2016, 41(8): 1912–1922. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0161.
LI L, YANG L P, CAO F, et al. Complete dynamic fracture process of sandstone under impact loading: experiment and analysis [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(8): 1912–1922. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0161.
- [4] VULIĆ N, JECIĆ S, GRUBIŠIĆ V. Validation of crack arrest technique by numerical modelling [J]. *International Journal of Fatigue*, 1997, 19(4): 283–291. DOI: 10.1016/S0142-1123(97)00008-X.
- [5] SONG P S, SHIEH Y L. Stop drilling procedure for fatigue life improvement [J]. *International Journal of Fatigue*, 2004, 26(12): 1333–1339. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2004.04.009.
- [6] WU H, IMAD A, BENSEDDIQ N, et al. On the prediction of the residual fatigue life of cracked structures repaired by the stop-hole method [J]. *International Journal of Fatigue*, 2010, 32(4): 670–677. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2009.09.011.
- [7] MURDANI A, MAKABE C, SAIMOTO A, et al. A crack-growth arresting technique in aluminum alloy [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2008, 15(4): 302–310. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2007.02.005.
- [8] NATECHE T, MELIANI M H, MATVIENKO Y G, et al. Drilling repair index (DRI) based on two-parameter fracture mechanics for crack arrest holes [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 59: 99–110. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.08.035.
- [9] CHEN N Z. A stop-hole method for marine and offshore structures [J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 88: 49–57. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.03.010.
- [10] 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): 1691–1699. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.1226.
LI M, ZHU Z M, XIAO D J, 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): 1691–1699. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.1226.
- [11] 杨仁树, 许鹏, 岳中文, 等. 圆孔缺陷与I型运动裂纹相互作用的试验研究 [J]. *岩土力学*, 2016, 37(6): 1597–1602. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.06.009.
YANG R S, XU P, YUE Z W, et al. Laboratory study of interaction between a circular hole defect and mode I moving crack [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(6): 1597–1602. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.06.009.
- [12] 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.
- [13] 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. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0010.
WANG M, ZHU Z M, XIE J. Experimental and numerical studies of the mixed-mode I and II crack propagation under dynamic loading using SHPB [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(12): 2474–2485. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0010.

- [14] 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. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.03.042.
- [15] GRÉGOIRE 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): 3480–3491. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2009.06.003.
- [16] 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. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0351.
WANG X M, ZHU Z M, SHI Z B, 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. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0351.
- [17] LANG L, ZHU Z M, ZHANG X S, et al. Investigation of crack dynamic parameters and crack arresting technique in concrete under impacts [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 199: 321–334. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.029.
- [18] 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): 230–236. DOI: 10.11776/cjam.34.02.B017.
ZHU T, HU D A, WANG Y G. Study on dynamic crack propagation and arrest of PMMA materials [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2017, 34(2): 230–236. DOI: 10.11776/cjam.34.02.B017.
- [19] 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. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.09.002.
- [20] ZHU Z M. Numerical prediction of crater blasting and bench blasting [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(6): 1088–1096. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2009.05.009.
- [21] 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: 88–95. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2013.12.017.
- [22] 董玉清, 朱哲明, 王蒙, 等. 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 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2018, 49(11): 2821–2830. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2018.11.024.
DONG Y Q, ZHU Z M, WANG M, et al. Mode I crack dynamic propagation behavior of SCT specimens under medium-low speed impact load [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(11): 2821–2830. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2018.11.024.
- [23] DAI F, XIA K W, TANG L Z. Rate dependence of the flexural tensile strength of Laurentian granite [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(3): 469–475. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2009.05.001.
- [24] PERSSON A. CM1—a simple model for the dynamic deformation and failure properties of brittle materials [C] // CARLSSON R, JOHANSSON T, KAHLMAN L. 4th International Symposium on Ceramic Materials and Components for Engines. Dordrecht: Springer, 1992. DOI: 10.1007/978-94-011-2882-7_106.
- [25] WONG L N Y, LI H Q. Numerical study on coalescence of two pre-existing coplanar flaws in rock [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2013, 50(22–23): 3685–3706. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2013.07.010.
- [26] WONG L N Y, EINSTEIN H H. Systematic evaluation of cracking behavior in specimens containing single flaws under uniaxial compression [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(2): 239–249. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2008.03.006.
- [27] BROOKS Z, ULM F J, EINSTEIN H H. Role of microstructure size in fracture process zone development of marble [C] // Proceedings of the 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. Chicago: American Rock Mechanics Association, 2012: 1748–1757.
- [28] Century Dynamics Inc. AUTODYN theory manual [M]. Pittsburgh: Century Dynamics Inc, 2005.
- [29] ZEHLER A T. Fracture mechanics [M]. New York: Springer, 2012.
- [30] CHEN L S, KUANG J H. A modified linear extrapolation formula for determination of stress intensity factors [J]. *International Journal of Fracture*, 1992, 54(1): R3–R8. DOI: 10.1007/BF00040859.
- [31] FREUND L B. Dynamic fracture mechanics [M]. New York: Cambridge University Press, 1990.

(责任编辑 丁峰)