DOI: 10.11883/bzycj-2017-0122 文章编号: 1001-1455(2018)06-1218-13

岩石偏心圆孔单裂纹平台圆盘的动态裂纹扩展与止裂*

李 炼[1,4],罗 林[2],吴礼舟[3],王启智[1,2,3]

(1. 四川大学土木工程及应用力学系,四川 成都 610065;
2. 重庆交通大学山区桥梁与隧道工程国家重点实验室,重庆 400074;
3. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川 成都 610059;
4. 中铁二院工程集团有限责任公司,四川 成都 610031)

摘要: 针对平台圆环构型的优点,提出偏心圆孔单裂纹平台圆盘(cracked eccentrically holed flattened disc, CEHFD),该试样具有更长的断裂路径。利用霍普金森压杆加载系统,径向冲击 CEHFD 试样,完成Ⅰ型动态断裂实验。砂岩试样表面粘贴应变片和裂纹扩展计,用于监测裂纹动态起裂、扩展和止裂的全过程。实验表明,在整个断裂过程中,裂纹非匀速扩展,裂纹扩展速度在裂纹起裂后加速上升,在裂纹止裂前有明显的减速,与地震时断层的动态破裂全过程完全吻合。采用实验-数值-解析法得到动态应力强度因子,其时间历程呈现先增大后减小的趋势。根据断裂过程不同时刻,得到相应的动态起裂韧度、扩展韧度及止裂韧度。在动态断裂全过程中,动态扩展韧度为速度的函数,变化趋势与速度一致,随着时间先增大后减小;动态起裂韧度大于动态止裂韧度,止裂韧度随着裂纹最大扩展速度的增大而降低,并且有较大的离散性。

关键词: 偏心圆孔单裂纹平台圆盘;动态应力强度因子;裂纹加速扩展;裂纹减速扩展;动态止裂;动态止裂韧度

中图分类号: O348.3; TU435 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

Brian 等[1]认为预测材料的失效是工程中最古老的问题之一,也是解决得最不完美的问题之一。余寿文[2]把在外载荷及环境作用下,材料和构件中缺陷的受力与变形视为使裂纹起裂与扩展的推动力,比喻为“矛”;把材料抵抗裂纹扩展的能力比喻为“盾”,认为这一用断裂准则联系着的矛盾两体,决定了裂纹的力学行为,从而也就确定了构件和结构的安全及寿命。这一比喻不管对静态断裂,还是动态断裂而言都是非常贴切的。岩石动态断裂研究涉及土木、矿业、能源、军事和防护等许多工程学科,以及地质学、地球物理学等科学领域。例如,地球物理学研究地震断层的高速扩展,需要了解岩石的动态断裂力学参数及其在地震断裂带上岩性的分布。

动态断裂全过程包括裂纹的动态起裂、快速扩展和止裂过程。Das[3]认为由地震产生的地面加速度,导致了地震破裂速度的剧烈变化,从而影响地震灾害的程度,这是地震学家研究地震断裂动力学的主要动机。在另一篇文章中,Das[4]则明确表示更快的破裂速度将会导致更为严重的地震破坏,地震带来的灾害程度很大程度上与岩石破裂速度到底有多快相关,因此在进行抗震结构设计时,必须加以考虑。Robinson 等[5]研究 2011 年的昆仑山地震,发现地震破裂起始时速度较为缓慢,加速到超剪切波速后,以接近 6 km/s 的速度扩展近 100 km,在裂纹止裂前,速度减速扩展。在涉及到裂纹传播速度与裂纹止裂时,存在着两方面的分歧。一方面认为:裂纹止裂之前观察到了裂纹传播速度的减速[6-7];而另一

* **收稿日期**: 2017-04-14; **修回日期**: 2017-09-16
基金项目: 国家自然科学基金项目(41672282);
四川大学高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130181130013);
成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(SKLG2016K015);
重庆交通大学山区桥梁与隧道工程国家重点实验室开放基金项目(CQSLBF-Z16-1)
第一作者: 李 炼(1988—),女,硕士,助理工程师; **通信作者**: 王启智,qzwang2004@163。

方面则观察到突然快速止裂[8-10]。Ravi-Chandar 等[9]详细说明了造成这种分歧的可能原因，即实验室中实验的试样相对来说是比较小的，在裂纹扩展过程中应力波的边界反射、加载波与卸载波的相互交叉都会给裂纹尖端造成一个非常复杂的应力历程，并且会随试样构型而改变，这就可能造成观测到不同的速度历程。然而，随着实验技术的发展，更多的学者倾向于认为裂纹在止裂前存在减速的过程，但是是否由反射应力波的影响造成，其影响多大却有待更深入的研究。

在动态断裂研究中，动态应力强度因子(dynamic stress intensity factor)表征了动态断裂过程中裂纹尖端的应力应变场，为了研究脆性材料的动态断裂行为，许多学者将研究的重点放在了动态应力强度因子上。理论分析表明：裂纹尖端的应力分布与裂纹速度有关，动态应力强度因子也就与速度有关。当裂纹在以某一速度匀速扩展时，动态应力强度因子可以表示成裂纹速度的函数，Freund[10]给出了这一复杂的表达式。实验研究发现，动态应力强度因子和裂纹扩展速度之间存在一定的关系，不同的实验得到不同的结论[11-13]。Fineberg 等[14]研究带裂纹板静态加载下的裂纹扩展速度，认为由于边界应力波反射的影响，线弹性动态断裂力学有局限性，在公式中引入加速度的概念。Arakawa 等[15]研究静态加载下动态应力强度因子与裂纹速度的关系，发现裂纹在扩展过程中，速度有加速上升和减速下降的变化，并且同一速度对应 2 个不同的动态应力强度因子。Singh 等[16]研究动态加载下双材料界面间的断裂过程，得到裂纹快速扩展的速度变化和动态应力强度因子的时间历程，认为裂纹速度的减速现象是由反射应力波造成的。通常，裂纹速度随着时间变化，其影响改变了裂纹尖端的动态应力场，研究裂纹的速度变化是理解动态裂纹扩展的关键。

岩石材料一般为准脆性材料，通常其抗拉强度比抗压强度要低一个数量级[17]。与金属材料不同，对岩石进行直接拉伸实验较难，因此多采用间接拉伸的方式进行实验，圆盘类试样也多用于测试岩石的动态断裂韧度[18-21]。周妍等[22-23]采用圆孔内单边裂纹平台巴西圆盘(holed single cracked flattened Brazilian disc，HSCFBD)新试样，分别对其进行了静态和动态断裂韧度的测试，得到砂岩的静态、动态断裂韧度值。李炼等[24]采用 HSCFBD 试样首次研究了砂岩的动态断裂全过程，实验成功检测到试样的破裂历经裂纹的动态起裂、扩展和止裂。

本文中，在采用 HSCFBD 试样研究岩石动态断裂的全过程的基础上，进一步研究裂纹的快速扩展与止裂过程。结合平台圆环类试样的优点，提出偏心圆孔单裂纹平台圆盘(cracked eccentrically holed flattened disc，CEHFD)这一新型试样，内圆孔偏离圆心一定距离，使其断裂带加长，增加其断裂扩展路径和检测范围，且可使止裂点远离边界减小其反射应力波相互作用带来的影响。

1　动态断裂实验

1.1　偏心圆孔单裂纹平台圆盘

CEHFD 试样构型如图 1 所示。图中 R 为外圆半径，r 为内圆孔半径，2β 为平台加载角度。圆盘圆心为 O，内圆孔圆心为 O'，O 与 O' 之间的距离为内圆孔偏离外圆心的距离，本文定义为偏心距离 d；a_0 为预制裂纹长度；断裂带长度 $L=R+d-r$。$p(t)$ 为动态载荷，是时间的函数。

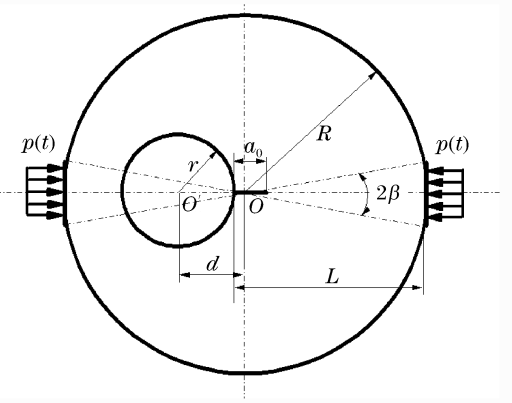


图 1　CEHFD 试样示意图

Fig. 1　Sketch of CEHFD specimen

实验中所有试样均由青砂岩材料制作，颗粒细致且紧密，如图 2 所示。经测定该产地青砂岩的泊松比 $\mu=0.21$，弹性模量 $E=17.67$ GPa，密度 $\rho=3.055$ g/cm^3。膨胀波波速 $c_d=2\,551.6$ m/s，畸变波波速 $c_s=1\,546.0$ m/s，Rayleigh 波波速 $c_R=1\,411.0$ m/s。

实验选用试样的尺寸具体为:厚度 $B=(30\pm0.2)$ mm,$R=(75\pm0.2)$ mm,$r=(15\pm0.2)$ mm,$a_0=(8\pm0.1)$ mm,平台角 $2\beta=30^\circ$,$d=(20\pm0.2)$ mm,$L=R+d-r=80$ mm。采用裂缝加工系统预制裂纹,选用直径为 0.15 mm 超细精钢砂切割线。使用塞尺测量预制裂纹宽度,裂缝宽度为 0.2 mm,满足国际岩石力学学会规定的采用岩石试样测量断裂韧度对裂纹尖端宽度尺寸的要求。



图 2 预制裂纹试样

Fig. 2 Precracked specimens

1.2 实验加载装置及测量仪器

动态实验采用直径为 100 mm 的分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)作为冲击加载装置,其装置如图 3 所示。SHPB 压杆材料为 42CrMo,弹性模量 $E_b=210$ GPa,泊松比 $\mu_b=0.3$,密度 $\rho_b=7\,850$ kg/m^3,一维纵波的理论波速 $c_0=5\,172$ m/s。入射杆的长度 $l_i=4\,500$ mm,透射杆的长度 $l_t=2\,500$ mm。入射杆上应变片与试样接触左端面的距离 $l_1=1\,500$ mm,透射杆上应变片与试样接触右端面的距离 $l_2=1\,000$ mm。实验均在 0.1 MPa 加载气压下进行,产生的压缩应力波由入射杆上应变片和透射杆上应变片测量,信号经超动态应变仪进行记录后,转化为电压信号并由瞬态记录仪进行采集,分别为入射波 $\varepsilon_i(t)$、反射波 $\varepsilon_r(t)$ 和透射波 $\varepsilon_t(t)$。

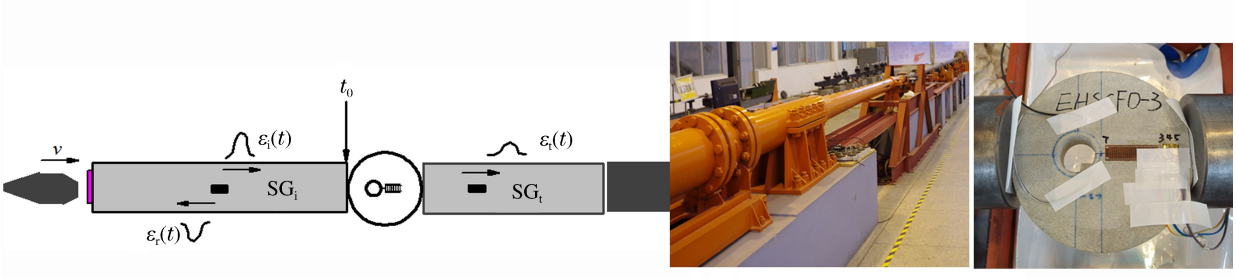


图 3 SHPB 实验装置和 CEHFD 试样

Fig. 3 SHPB setup and CEHFD specimen

为了在动态加载的条件下有效地检测到裂纹扩展的完整过程,采用裂纹扩展计(crack propagation gauge, CPG)检测装置[23-24],并进行了改进,使其既能完整地对整个断裂带进行检测,又能准确地获得实验数据,如图 4 所示。同时,在试样的特殊位置设计粘贴应变片(strain gauge, SG),有利于实验数据和实验现象的分析。CPG 具体尺寸及 SG 粘贴位置见图 4。

将 CPG 粘贴在裂纹前端,为了研究应力波边界反射对裂纹动态断裂过程的影响,在距离加载端面 $d=5$ mm 的位置每间隔 5 mm 粘贴 3 个应变片 SG1、SG2、SG3。在试样另外一面裂纹尖端粘贴 2 mm × 2 mm 的应变片 SG4。实验选用 CPG 共有 25 根金属丝,并联总电阻 $R=1.5\ \Omega$。随着裂纹的扩展,金属丝依次发生断裂,CPG 的并联总电阻就会增加 ΔR,CPG 两端电压发生变化,通过监测电压阶跃变化的起跳点即可确定裂纹扩展到该位置的时刻,已知 2 根金属丝间距,可以计算出 2 根金属丝间的裂纹扩展速度,从而得到 CPG 检测范围内裂纹扩展的速度历程。

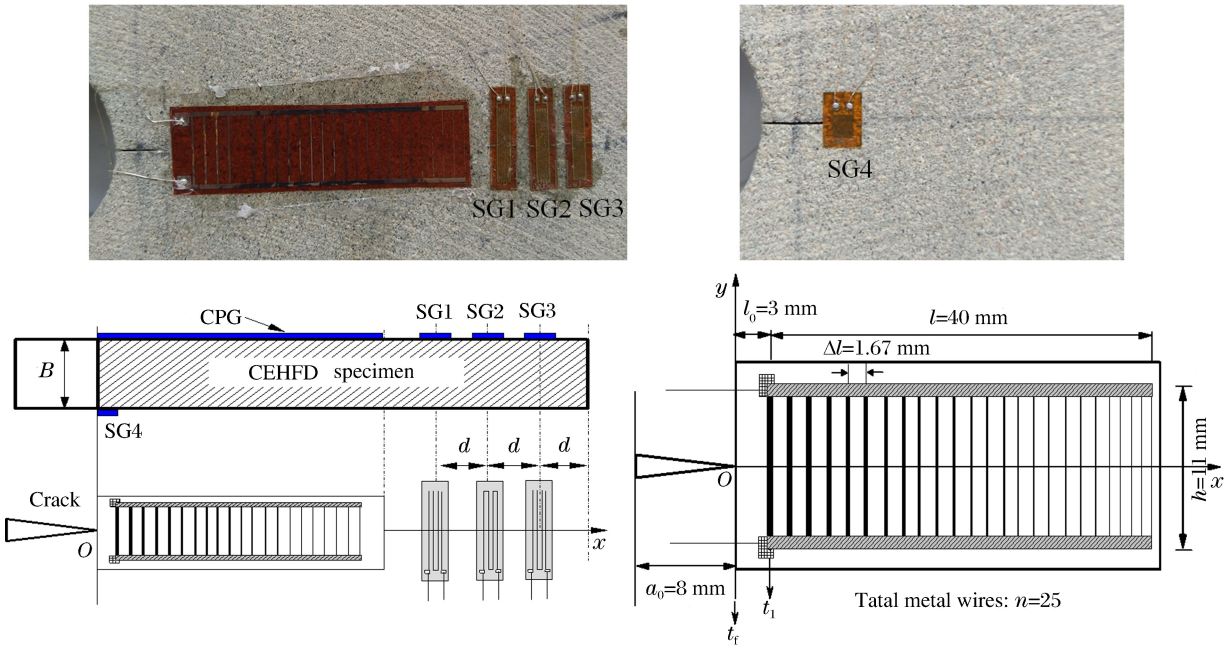


图 4　应变片粘贴位置及构造图

Fig. 4　Position and structure of CPG and SG

1.3　动态断裂全过程

图 5 所示为动态实验中试样在第 1 次加载波作用下完全断裂时的入射杆上 SG_i 和 CPG 电压信号 U，简称为一次断裂，以 CEHFD-2 试样为例。SG_i 记录了加载应力波在入射杆中传播的 3 个来回，1 个来回即为一次应力波加载。

图 6 所示为动态实验中试样在第 2 次加载波作用下才完全断裂时的入射杆上 SG_i 和 CPG 的电压信号，简称为二次断裂。以 CEHFD-3 试样为例。可知，在 CPG 的检测范围内，试样在第 1 次加载波的作用下起裂扩展，CPG 金属丝并未完全断裂，表明裂纹在 CPG 检测范围内的某一个点不再扩展，即止裂。将这一阶段裂纹的起裂、扩展和止裂定义为阶段Ⅰ。随后，当第 2 次加载波到达试样时，试样再次受到加载波的作用，裂纹再次起裂扩展，剩余未断裂的金属丝全部断裂，超出 CPG 的检测范围。将这一阶段定义为阶段Ⅱ。阶段Ⅰ的裂纹起裂-扩展-止裂即为完整的动态断裂全过程。

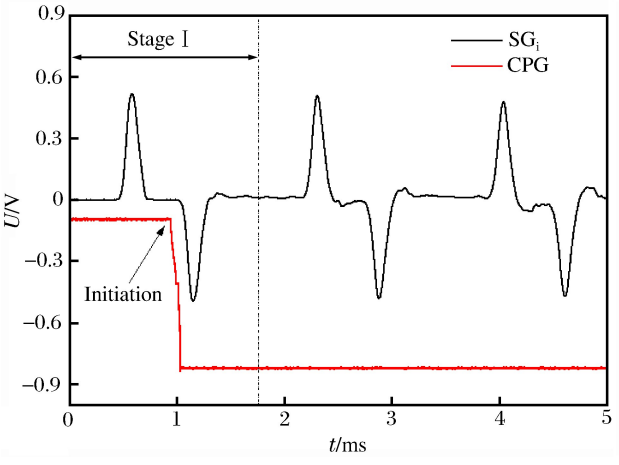


图 5　CEHFD-2 试样入射杆信号和 CPG 信号

Fig. 5　The voltage signal of incident bar and CPG in specimen of CEHFD-2

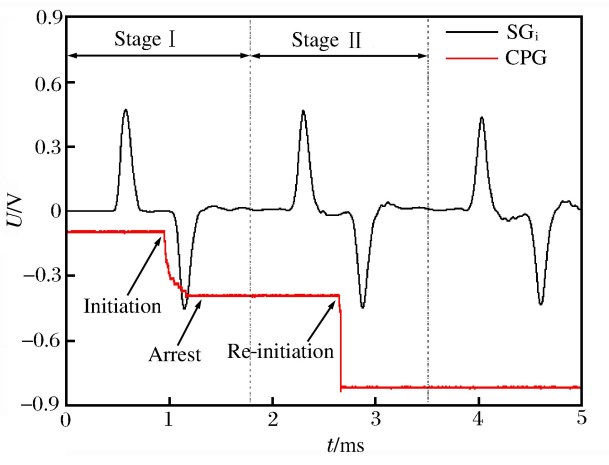


图 6　CEHFD-3 试样入射杆信号和 CPG 信号

Fig. 6　The voltage signal of incident bar and CPG in specimen of CEHFD-3

由于实验试样尺寸有限，需要有较长裂纹扩展距离，才有可能检测到裂纹的止裂现象，因而检测止裂的前提条件是有足够的断裂带长度，断裂带太短，其裂纹扩展距离短，导致裂纹尚在扩展阶段，试样已经完全断裂，且接近试样边界区域，应力波和卸载波反射后较为复杂，即使出现止裂，若止裂点太靠近这一区域，复杂应力波也将使止裂难以研究。同时，较长的断裂带增大了裂纹扩展速度的检测范围，有利于研究裂纹扩展阶段的速度变化历程。在距离试样透射端 5 mm 处等距离贴有 3 个应变片，即 SG1、SG2 和 SG3，电压信号如图 7 所示。应变片受到应力波作用，产生应变，检测到应力波最大值均在裂纹止裂以后，可知，裂纹止裂过程，没有受到反射应力波的影响。止裂前的速度变化也没有受到反射应力波的干扰。

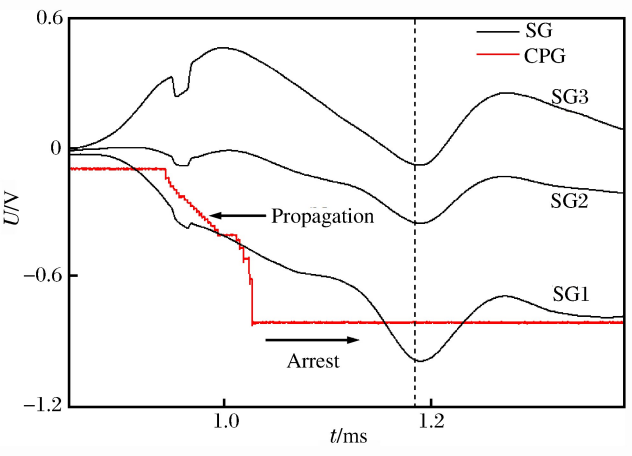


图 7 CEHFD-3 试样上 SG 和 CPG 信号

Fig. 7 The voltage signals of SG and CPG in specimen of CEHFD-3

1.3.1 裂纹起裂和止裂时刻

将加载应力波开始作用于试样时的时刻定义为初始时刻 t_0，且：

$$t_0 = \frac{t_i + t_r}{2} \tag{1}$$

根据文献[25-26]中的方法确定入射波和反射波的波头，分别为 t_i 和 t_r。

由于 CPG 第 1 根金属丝距离裂纹尖端有一段距离，即金属丝与基底前沿之间的距离 l_0，第 1 根丝断裂对应的时刻 t_1 并不是裂纹的起裂时刻，而是裂纹扩展 l_0 距离后第 1 根金属丝断裂的时刻，如图 4 所示。文献[23-24]在求起裂时刻时均假设裂纹起裂后以某一速度匀速扩展，通过 CPG 求出这一平均速度 v_a，起裂时刻 $t_f = t_1 - l_0/v_a$。

但是实验证明，裂纹扩展的初始阶段并非是匀速的，采用这一方法得到的起裂时刻有较大偏差，本文中采用应变片破裂法确定试样的起裂时刻[27-28]，在试样裂纹尖端粘贴应变片 SG4，测得裂尖处的应变波形，将应变波形对时间进行求导，得到裂尖处应变率最大的时刻，图 8 所示为 CEHFD-2 试样和 CEHFD-3 试样的 SG4 记录的应变率 $\dot{\varepsilon}$ 信号，其峰值所对应的时刻作为裂纹通过该应变片所在位置的时刻，此时刻即为试样的起裂时刻 t_f[20]。

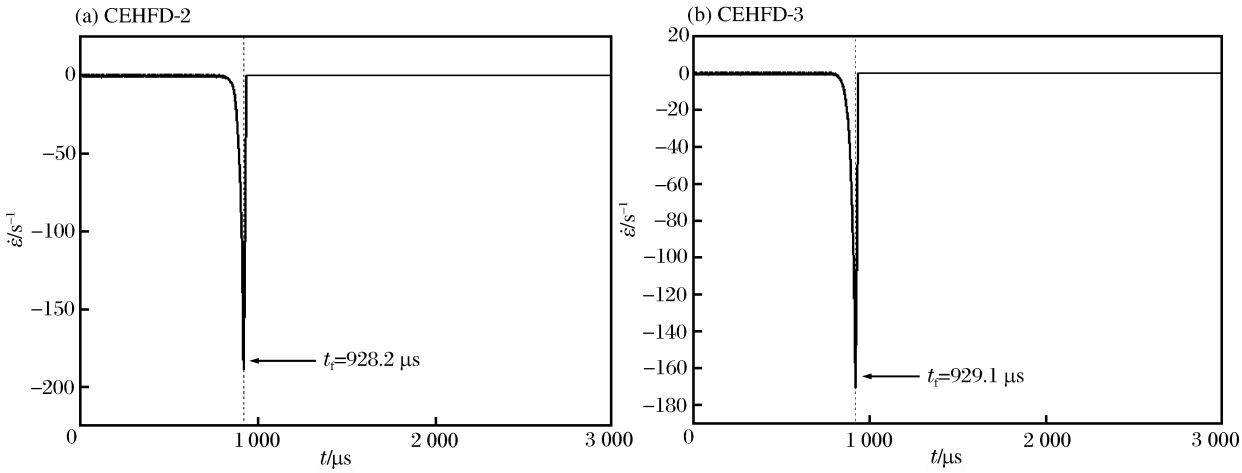


图 8 试样应变率时程曲线

Fig. 8 History curves of strain rate for specimens

图 9(a)所示为 CEHFD-2 试样在阶段Ⅰ的 CPG 电压信号，即图 5 中该试样裂纹起裂-扩展过程，CPG 的 25 根金属丝全部断裂，试样一次断裂，未有止裂。图 9(b)所示为 CEHFD-3 试样在阶段Ⅰ的 CPG 电压信号，即图 6 中该试样裂纹起裂-扩展-止裂过程，CEHFD-3 试样在第 18 根丝后止裂。经计算得到 CEHFD-3 试样的 $t_0=846.3\ \mu s$，其它时间参量均以这一时刻作为起点计算。以 t_0 作为起点，CEHFD-3 试样的起裂时刻 $t_f=(929.1-846.3)\ \mu s=82.8\ \mu s$，CPG 断裂第 1 根丝断裂时刻为 $t_1=103.6\ \mu s$，阶段Ⅰ最后一根丝断裂时刻 $t_{18}=309.8\ \mu s$，这一时刻后裂纹止裂，因此假设这一断裂点为裂纹的止裂点，这一时刻即为止裂时刻 t_a。

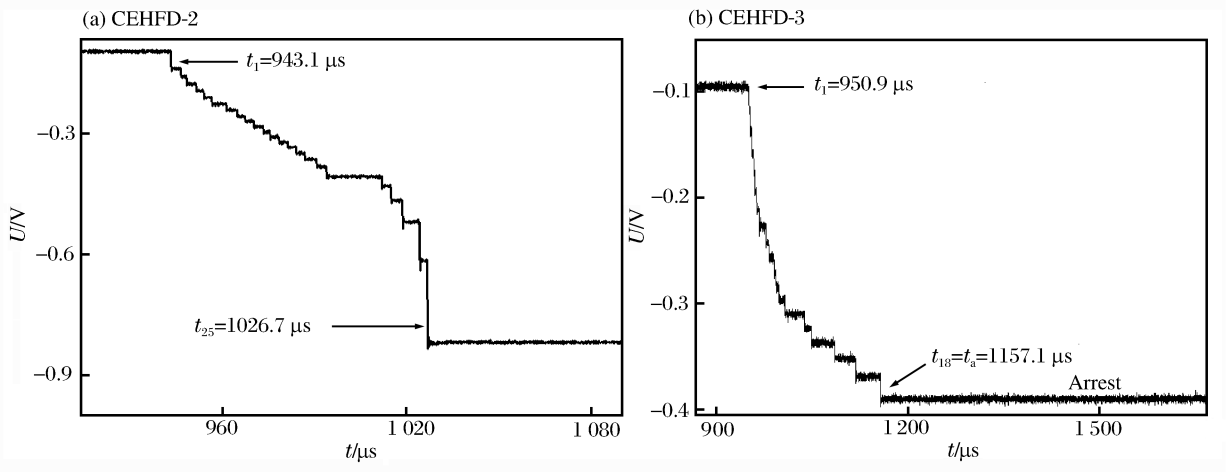


图 9　阶段Ⅰ CPG 测得的电压信号

Fig. 9　Voltage signal measured by CPG in stage Ⅰ

在阶段Ⅱ，CEHFD-3 试样裂纹在第 2 次加载波作用下再次起裂，如图 10 所示，即图 6 中该试样裂纹再起裂后 CPG 电压信号放大图。将再起裂时 CPG 第 1 根金属断裂的时刻规定为试样的再起裂时刻 t_f'，直到第 25 根金属丝断裂，超出 CPG 检测范围。以 t_0 为起点，CEHFD-3 试样的再起裂时刻 $t_{19}=t_f'=(2\,643.3-846.3)\ \mu s=1\,797.0\ \mu s$。应力波在 SHPB 中传播速度按理论一维纵波波速 c_0 进行计算，应力波在入射杆上传播一个来回需要的时间为 $2l_i/c_0=1\,740.1\ \mu s$，2 次起裂时间间隔为 $(t_f-t_f')=(1\,797.0-82.8)=1\,714.2\ \mu s$，2 个时间有所差异，说明再次起裂所用的起裂时间较短，这是因为自然裂纹较之人工预制裂纹更为尖锐。动态实验数据见表 1。

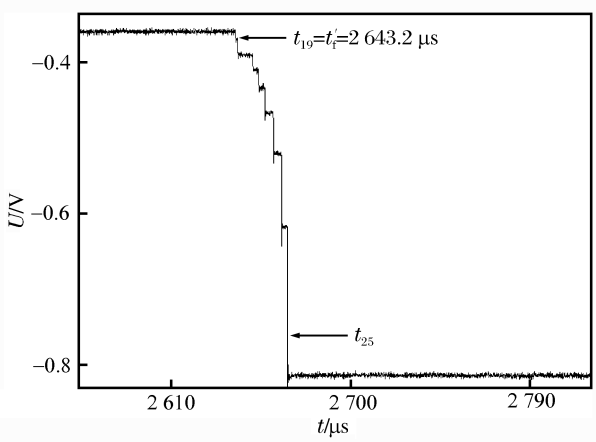


图 10　阶段Ⅱ CPG 测得的电压信号

Fig. 10　Voltage signal measured by CPG in stage Ⅱ

表 1　动态实验数据

Table 1　Dynamic experimental data

试样编号	t_0/μs	t_4/μs	t_f/μs	t_a/μs	t_f'/μs	(t_f-t_f')/μs
CEHFD-1	840.9	916.9	76.0	253.6	1 781.8	1 705.8
CEHFD-2	846.4	928.2	81.8			
CEHFD-3	846.3	929.1	82.8	309.8	1 797.0	1 714.2
CEHFD-4	838.0	923.7	85.7	327.5	1 804.2	1 718.5
CEHFD-5	844.1	916.9	72.8	282.8	1 793.0	1 720.2
CEHFD-6	844.0	923.5	79.5	252.6	1 774.6	1 695.1

1.3.2 裂纹扩展速度

CEHFD-2 和 CEHFD-3 试样阶段Ⅰ裂纹在起裂后快速扩展，其裂纹长度、裂纹扩展速度与时间关系曲线如图 11～12 所示。这里做了一个假设，假设裂纹在 2 根 CPG 两根金属丝间的速度是匀速且是直线扩展，其每 2 根金属丝间的速度按下式计算：

$$v=\frac{\Delta l}{(t_{n+1}-t_n)} \tag{2}$$

式中：Δl 为 2 根金属丝间的间距，$\Delta l=l/24=1.67$ mm。这里需要注意的是 t_f 与 t_1 之间裂纹扩展距离为 $l_0=3$ mm。

可知，由于一次断裂情况下，裂纹没有止裂过程，其 $a(t)$ 曲线可近似为直线，如图 11(a)所示，其裂纹速度增大到最大值后发生振荡，如图 11(b)所示，可近似将裂纹扩展阶段的运动看作匀速，其平均速度为 $v_a=527.97$ m/s ($0.37c_R$)。二次断裂情况下的裂纹扩展在阶段Ⅰ，经历了裂纹的起裂-扩展-止裂的过程，随着时间的增加 $a(t)$ 曲线并不是均匀变化，如图 12(a)所示，这就意味着不可将裂纹作匀速扩展进行处理。可以明显看到，在裂纹开始起裂后，裂纹加速上升达到最大速度，在裂纹止裂前，速度缓慢下降，直至速度为零，裂纹止裂，如图 12(b)所示。CEHFD-3 最大速度为 $v_{max}=666.67$ m/s ($0.47c_R$)，最小速度为 $v_{min}=42.19$ m/s ($0.03c_R$)。

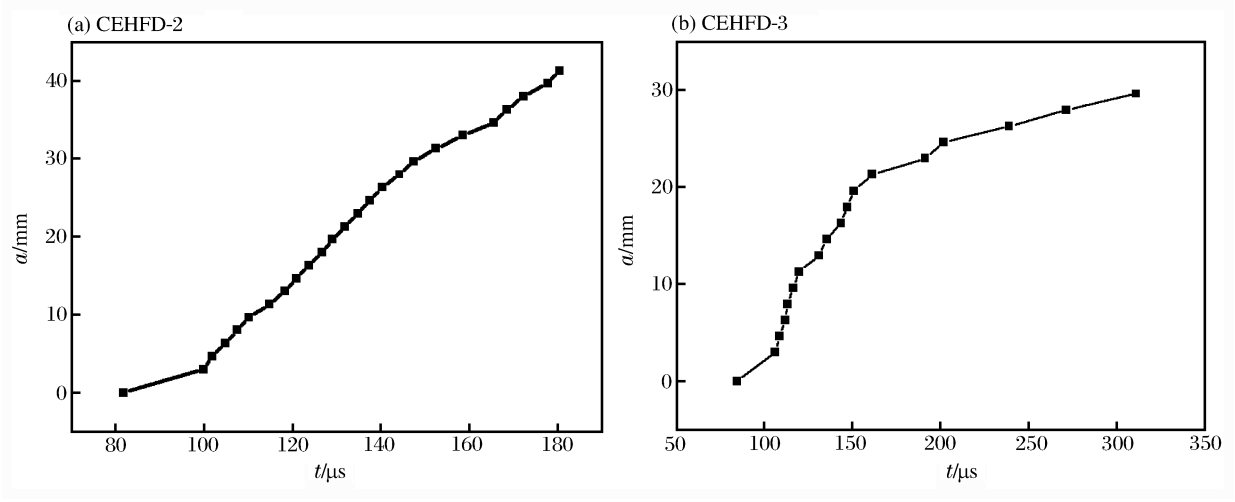


图 11 阶段Ⅰ裂尖位置时程曲线

Fig. 11 History of crack tip position in stage Ⅰ

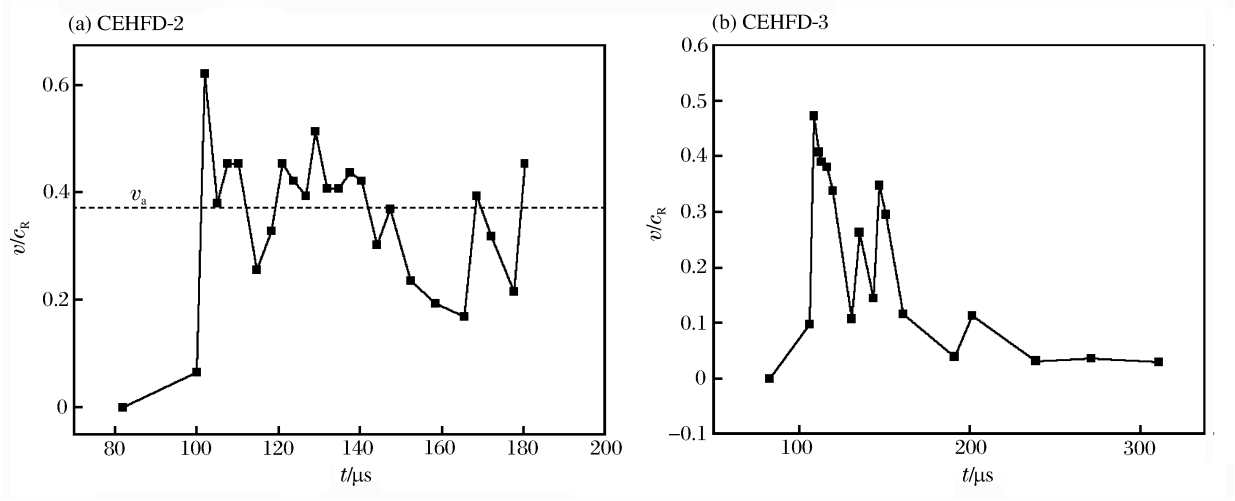


图 12 阶段Ⅰ裂纹扩展速度时程曲线

Fig. 12 History of crack propagation velocity in stage Ⅰ

2　动态应力强度因子

实验-数值-解析法是一种将实验记录、数值模拟和解析公式相结合的研究方法[29]，综合考虑材料惯性效应和裂纹扩展速度对动态应力强度因子的影响，该方法避开了动态应力强度因子难以直接进行测量和计算的问题，将原本对实验设备的苛刻要求分担到动态实验、数值模拟和近似解析 3 方面，使实验中的重点变为动态荷载历程、裂纹起裂止裂时刻和扩展速度等易于检测的信号的记录测量，而动态应力强度因子等难以直接检测的力学参数则通过有限元等动态数值模拟分析，并结合解析公式得到。

2.1　实验动态荷载

压缩空气炮驱动炮弹撞击 SHPB 入射杆，入射杆上应变片 SG_i 采集的信号，即入射波 $\varepsilon_i(t)$；弹性压缩波向前传播到达界面后一部分反射回入射杆，再次通过应变片 SG_i 时采集的信号，即反射波 $\varepsilon_r(t)$。另一部分弹性压缩波通过试样，造成试样的高速变形后传播进入透射杆，透射杆上应变片 SG_t 采集的信号，即透射波 $\varepsilon_t(t)$。根据 SHPB 的一维弹性应力波假设，由入射端的加载波波形可以得到入射端荷载 $p_i(t)$，由透射端的加载波波形可以得到透射端荷载 $p_t(t)$：

$$\begin{cases} p_i(t) = E_b A_b [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)] \\ p_t(t) = E_b A_b \varepsilon_t(t) \end{cases} \tag{3}$$

式中：E_b、A_b 分别为 SHPB 弹性模量及横截面面积。如图 13 所示得到 CEHFD-3 试样的 $p_i(t)$ 曲线。其左端动载荷 $p_i(t)$ 最大值 $p_{max}=37.98$ kN，时间 $t_{max}=44.7$ μs。由于本次实验试样为尺寸较大的圆孔圆盘类试样，应力波传播反射的路径长且次数多，因而传播时间较长；试样带有预制裂纹，岩石动态断裂时会消耗能量，作用于试样两端的载荷存在显著的时间与空间不均匀性，即左端的加载载荷 $p_i(t)$ 与右端的加载载荷 $p_t(t)$ 在时间和数量上差异性较大。本文的研究方法为实验-数值-解析法，不需要满足准静态法研究中的应力均匀性假设，入射波 $\varepsilon_i(t)$ 和反射波 $\varepsilon_r(t)$ 是在近乎一维线弹性的 SHPB 压杆中传播的，在荷载叠加方法合理的情况下，$p_i(t)$ 更接近试样入射端的真实荷载[30]，将 $p_i(t)$ 作为实验的动态加载荷载 $p(t)$。

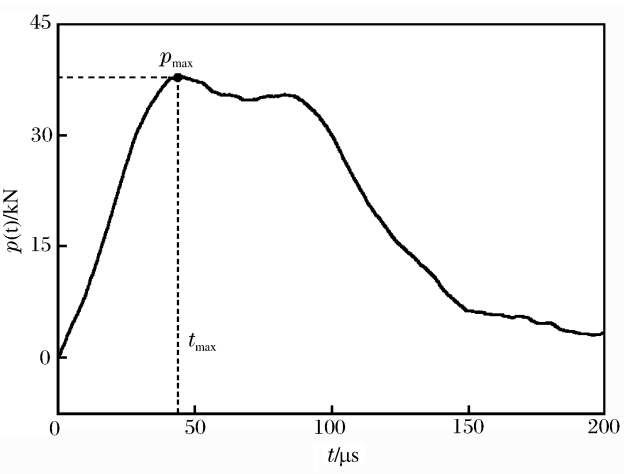


图 13　CEHFD-3 试样的动态加载载荷

Fig. 13　Dynamic loading on specimen of CEHFD-3

2.2　数值-动态有限元模拟

高加载率情况下，快速扩展裂纹尖端附近质点受到裂纹尖端应力集中区影响，因此，对于裂纹尖端的运动，裂纹速度的影响很重要[10]。Freund[10] 认为可以将裂纹速度对动态应力强度因子的影响分离出来，对该时刻静止裂尖的动态应力强度因子时间历程进行普适函数的修正：

$$K_I^{(d)}[t, v(t), a(t)] = k(v) K_I^{(0)}[t, a(t)] \tag{4}$$

式中：$K_I^{(d)}$ 为动态应力强度因子，$K_I^{(0)}$ 为静止裂尖的动态应力强度因子，裂纹扩展速度 v 和裂纹长度 a 是时间 t 的函数，$k(v)$ 为普适函数。

采用 ANSYS 软件动态模拟静止裂纹受外加动荷载时，其裂尖的动态应力强度因子为 $K_I^{(0)}(t)$。首先对经典的“Chen 问题”[31] 进行分析，利用位移外推法[32]，计算出一定裂纹长度下的 $K_I^{(0)}(t)$，与 Chen 的有限差分结果基本一致，验证了采用这一方法的有效性以及高准确率。

CEHFD 试样 1/2 有限元模型如图 14 所示，采用 PLANE82 平面应变单元，裂纹尖端应力场和应变场的奇异性采用 1/4 节点奇异单元，模型共有 3 860 个单元和 11 837 个节点，选用时间子步步长为 0.1 μs。对试样端面进行位移耦合，使其在加载过程中始终保持一个平面，以模拟实验过程中 SHPB 压

杆对试样端面的平面加载。起裂时裂纹尺寸 $a(t_f)=a_0=8$ mm；扩展时裂纹尺寸：

$$a(t_n)=a_0+l_0+(n-1)\Delta l \tag{5}$$

可令：$a(t_n)=a_n$，止裂时裂纹尺寸 $a(t_a)=a_a$。

将实验得到的动态载荷时间历程 $p(t)$ 输入有限元计算程序，设定其裂纹尺寸为 t 时刻时的 $a(t)$，将得到载荷 $p(t)$ 作用下静止裂纹的 $K_{\mathrm{I}}^{(0)}(t)$。

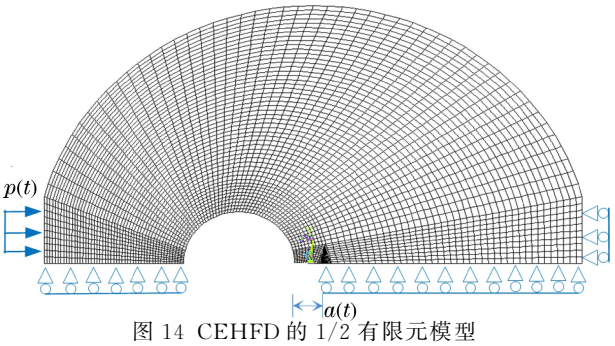


图 14 CEHFD 的 1/2 有限元模型

Fig. 14 FEM model of CEHFD

2.3 解析-普适函数修正

普适函数是由 Freund[10] 基于 Green 函数基本解的概念，认为在一般荷载作用下的Ⅰ型裂纹，在不超过瑞雷波速 c_R 时，以任意速度扩展的动态应力强度因子等于适用于具有该处静止裂尖的动态应力强度因子与瞬时裂纹速度的普适函数的乘积。其近似计算公式为：

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

式中：c_R 为材料的瑞雷波速，c_d 为材料的膨胀波速。

根据上一节得到静止裂纹的 $K_{\mathrm{I}}^{(0)}(t)$，利用式(4)、(6)得到 $K_{\mathrm{I}}^{(d)}(t)$，如图 15 所示。采用实验-数值-解析法得到 CEHFD-3 试样整个断裂过程中的动态应力强度因子，在图中以圆圈表示。实线为 $K_{\mathrm{I}}^{(d)}(t)$ 的四次多项式拟合曲线，可以看出，$K_{\mathrm{I}}^{(d)}(t)$ 随着裂纹的扩展呈现先增大后减小的趋势。

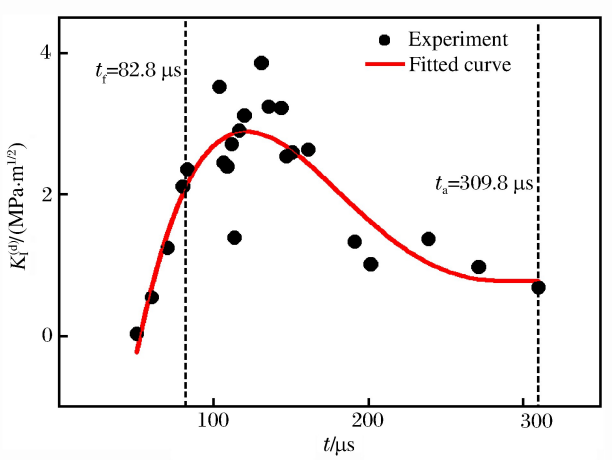


图 15 CEHFD-3 试样的动态应力强度因子

Fig. 15 History curve of dynamic stress intersity factor of CEHFD-3 specimen

3 结果分析

3.1 动态断裂韧度的确定

不考虑外界温度影响，动态起裂准则为：

$$K_{\mathrm{I}}^{(d)}(t_f)=K_{\mathrm{IC}}^{(D)}(\dot{K}) \tag{7}$$

式中：$K_{\mathrm{I}}^{(d)}(t_f)$ 表示 $t=t_f$ 时刻的动态应力强度因子，$K_{\mathrm{IC}}^{(D)}$ 为动态起裂韧度，是抵抗裂纹起裂的材料参数，$\dot{K}=K_{\mathrm{IC}}^{(D)}/t_f$ 表示动态加载率。当驱动力的 $K_{\mathrm{I}}^{(d)}(t_f)$ 超过材料阻力的 $K_{\mathrm{IC}}^{(D)}$ 时，裂纹起裂。CEHFD-3 试样的 $t_f=82.8$ μs，根据图 15 得到 $K_{\mathrm{IC}}^{(D)}=2.65$ MPa·m$^{1/2}$，$\dot{K}=3.20\times10^4$ MPa·m$^{1/2}$/s。

动态扩展韧度与速度有关，是抵抗动态裂纹扩展的材料参数。动态扩展准则为：

$$K_{\mathrm{I}}^{(d)}(t)=K_{\mathrm{IC}}^{(d)}(v) \tag{8}$$

式中：$K_{\mathrm{I}}^{(d)}(t)$ 表示 $t_f<t<t_a$ 时的动态应力强度因子，$K_{\mathrm{IC}}^{(d)}$ 为动态扩展韧度。

由图 15 可知，CEHFD-3 试样扩展阶段的 $K_{\mathrm{I}}^{(d)}(t)$ 即为 $K_{\mathrm{IC}}^{(d)}$，$K_{\mathrm{IC}}^{(d)}$ 随着时间的增加先增大后减小。$K_{\mathrm{IC}}^{(d)}$ 与速度有关，而裂纹扩展速度 $v(t)$ 为时间的函数，见图 12(b)，在裂纹快速扩展阶段，CEHFD-3 试样裂纹扩展速度在起裂后加速上升，止裂前减速下降，速度随着时间先增加后减小。而对于未止裂的 CEHFD-2 试样，见图 11(b)，其裂纹扩展速度加速上升后在平均速度 v_a 上下波动，得到的 $K_{\mathrm{I}}^{(d)}(t)$ 也在某一平均值上下波动，CEHFD-2 试样的 $K_{\mathrm{IC}}^{(d)}$ 值为一常数，$K_{\mathrm{IC}}^{(d)}=3.37$ MPa·m$^{1/2}$。

Freund[10] 和 Ravi-Chandar[33] 提出动态止裂韧度定义：不能维持裂纹继续扩展的最大动态应力强度因子即为动态止裂韧度。动态扩展准则为：

$$K_{\mathrm{I}}^{(\mathrm{d})}(t_{\mathrm{a}}) \leqslant K_{\mathrm{IC}}^{(\mathrm{a})} \tag{9}$$

式中：$K_{\mathrm{I}}^{(\mathrm{d})}(t_{\mathrm{a}})$表示 $t=t_{\mathrm{a}}$时刻的动态应力强度因子，$K_{\mathrm{IC}}^{(\mathrm{a})}$为动态止裂韧度，CEHFD-3 试样 $t_{\mathrm{a}}=309.8\ \mu\mathrm{s}$，根据图 15 得到 $K_{\mathrm{IC}}^{(\mathrm{a})}=0.69\ \mathrm{MPa}\cdot\mathrm{m}^{1/2}$。

砂岩动态起裂韧度和止裂韧度见表 2，可知，动态起裂韧度与加载率有关，随着加载率的增大而增大；动态止裂韧度小于动态起裂韧度，且止裂韧度随着裂纹最大扩展速度的增加而降低，并且有较大的离散性。

表 2 砂岩的动态起裂和止裂断裂韧度

Table 2 Dynamic initiation and propagation toughness of sandstone

试样编号	$\dot{K}_{\mathrm{I}}$/(GPa·m$^{1/2}$·s^{-1})	$K_{\mathrm{IC}}^{(\mathrm{d})}$/(MPa·m$^{1/2}$)	$v_{\max}/c_{\mathrm{R}}$	$K_{\mathrm{IC}}^{(\mathrm{a})}$/(MPa·m$^{1/2}$)
CEHFD-1	27.4	2.08	0.44	0.72
CEHFD-2	36.1	2.95	0.51	
CEHFD-3	32.0	2.65	0.47	0.69
CEHFD-4	41.5	3.56	0.35	1.52
CEHFD-5	24.3	1.77	0.40	1.07
CEHFD-6	26.9	2.14	0.51	0.61

3.2　裂纹止裂过程

假定材料性能值 K_{IC}或(G_{IC})，即为“盾”；结构提供的裂纹驱动力 K（或 G），即为“矛”。裂纹的力学行为决定于矛盾两体的较量，当“盾”作用大于“矛”作用时，显然没有足够的驱动力使裂纹扩展。一般来说，止裂的量度有两种[10]：一种是从结构的角度考虑。“盾”不变，而“矛”随着裂纹尺寸的增大其作用减弱，“矛”小于“盾”时产生止裂。另一种是从材料的角度考虑。“盾”随着裂纹尺寸的增大而增大，当“盾”明显超过“矛”时实现止裂。

通过实验-数值-解析的方法，得到了 CEHFD-3 试样随时间变化的动态应力强度因子，如图 15 所示，并且通过拟合，得到 $K_{\mathrm{I}}^{(\mathrm{d})}(t)$变化趋势曲线，可视作其裂纹动态扩展的驱动力。$K_{\mathrm{I}}^{(\mathrm{d})}(t)$值变化曲线如图 16 所示。假设阻力 R 为常数，随着裂纹的扩展，驱动力的 $K_{\mathrm{I}}^{(\mathrm{d})}(t)$先增大后减小。

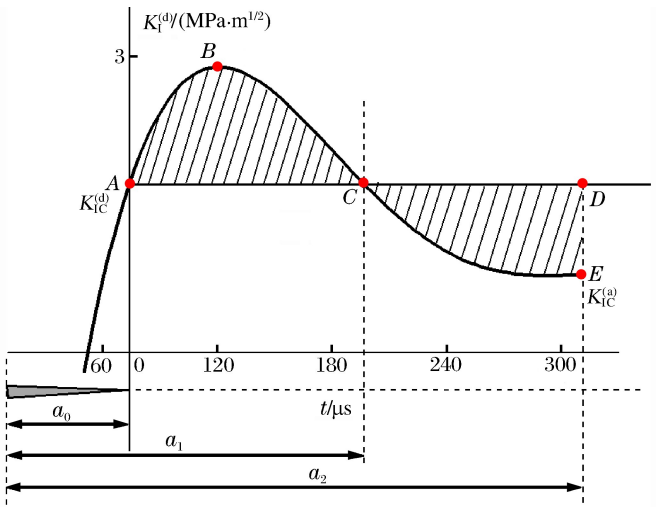


图 16 试样动态止裂过程

Fig. 16 Dynamic crack arrest process of specimen

在裂纹开始扩展之后，在 B 点以前 $K_{\mathrm{I}}^{(\mathrm{d})}$是增加的，随后开始减小。到达 C 点时，$K_{\mathrm{I}}^{(\mathrm{d})}$重新等于阻力 R，如果忽略动能不计，则该时刻可能发生止裂。此时裂纹扩展长度为 a_1。C 点后有 $K_{\mathrm{I}}^{(\mathrm{d})}$小于 R，裂纹仍然能够扩展，因为在 C 点裂纹扩展速度不为零，动能不可忽略，这部分能量可用于裂纹扩展，这时观察到的现象就是裂纹速度的降低，最后在 E 点动能减小为零，从而裂纹扩展速度为零，在 E 点止裂，裂纹最终扩展长度为 a_2。因为瞬时的 $K_{\mathrm{I}}^{(\mathrm{d})}$值比 K_{IC}更小，因此在速度变为零后，裂纹止裂，这一较小的 $K_{\mathrm{I}}^{(\mathrm{d})}$值即为动态止裂韧度 $K_{\mathrm{IC}}^{(\mathrm{a})}$。因此，不能将裂纹止裂看作是裂纹起裂在时间上的逆过程。Ravi-Chandar 指出裂纹止裂是不考虑加载条件的瞬时动态问题，不能简单的将其看作裂纹起裂的逆过程[33]。

实际当中，对某些材料，R 通常不是常数且与裂纹速度有关，而快速奔跑裂纹的所有动能都用于裂纹扩展也不太可能。对于许多材料来说，K 和 R 都与裂纹长度和速度有关，止裂时刻的 K 并不是一个材料常数[33]。实验结果止裂韧度的离散性也证明了这一点。

4 结 论

(1)为了更好地研究岩石材料的Ⅰ型动态断裂行为,特别是裂纹的快速扩展与止裂过程中裂纹尖端的运动情况,本文提出一种利用岩芯的新型试样 CEHFD,成功地检测到裂纹的动态起裂-扩展-止裂这一完整的动态断裂过程。

(2)实验表明,在整个断裂过程中,裂纹并非匀速扩展,裂纹扩展速度在裂纹起裂后加速上升,在裂纹止裂前有明显的减速现象,裂纹并非突然止裂。在试样透射端附近粘贴应变片,检测到应力波最大值均出现裂纹止裂以后,可知,止裂前的减速过程并不是由反射应力波造成的,裂纹止裂过程并没有受到反射应力波的影响。

(3)采用实验-数值-解析法得到动态应力强度因子 $K_{\mathrm{I}}^{(\mathrm{d})}(t)$,其时间历程呈现先增大后减小的趋势,并得到砂岩的动态起裂韧度、扩展韧度及止裂韧度。在完整的动态断裂全过程中,裂纹扩展速度随着时间先增大后减小,动态扩展韧度为速度的函数,变化趋势与速度一致,随着时间先增大后减小;动态起裂韧度大于动态止裂韧度,且止裂韧度随着裂纹最大扩展速度的增大而降低,并且有较大的离散性。

参考文献:

[1] BRIAN C, YANG Qingda. In quest of virtual test for structural composite[J]. Science, 2006,314(5802):1102-1107. DOI:10.1126/science.1131624.

[2] 余寿文.断裂力学的历史发展和思考[J].力学与实践,2015,39(3):390-394. DOI:10.6052/1000-0879-15-164.
YU Shouwen. The historical development of fracture mechanics and rethinking[J]. Mechanics in Engineering, 2015,39(3):390-394. DOI:10.6052/1000-0879-15-164.

[3] DAS S. Dynamic fracture mechanics in the study of the earthquake rupturing process: Theory and observation[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2003,51(11/12):1939-1955. DOI:10.1016/j.jmps.2003.09.025.

[4] DAS S. The need to study speed[J]. Science, 2007,317(5840):905-906. DOI: 10.1126/science.1142143.

[5] ROBINSON D P, BROUGH C, DAS S. The M_{w} 7.8, 2001 Kunlunshan earthquake: Extreme rupture speed variability and effect of fault geometry[J]. Journal of Geophysical Research, 2006(111): B08303. DOI: 10.1029/2005JB004137.

[6] KALTHOFF J F, BEINERT J, WINCKLER S. Experimental analysis of dynamic effects in different crack arrest test specimens [J]. ASTM STP 1980,711:109-127. DOI: 10.1520/STP27443S.

[7] KOBAYASHI T, DALLY J W. In fast fracture and crack arrest[J]. ASTM STP 1977,627:257-273.

[8] SCHARDIN H. Velocity effects in fracture[M]. 1959:297-330.

[9] 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.

[10] FREUND L B. Dynamic fracture mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

[11] DALLY J W. Dynamic photo elastic studies of fracture[J]. Experimental Mechanics, 1979,19(10),349-361.

[12] KALTHOFF J F. On some current problems in experimental fracture dynamics[C]// Workshop on Dynamic Fracture. Pasadena: California Institute of Technology, 1983:11-35.

[13] RAVI-CHANDAR K, KNAUSS W G. An experimental investigation into dynamic fracture: Ⅲ. On steady state crack propagation and crack branching[J]. International Journal of Fracture, 1984,26(2):141-154. DOI:10.1007/BF01157550.

[14] FINEBERG J, BOUCHBINDER E. Recent developments in dynamic fracture: some perspectives[J]. International Journal of Fracture, 2015,196(1):33-57. DOI: 10.1007/s10704-015-0038-x.

[15] ARAKAWA K, MADA T. Unsteady dynamic crack propagation in a brittle polymer[J]. Experimental Mechanics, 2007,47(5):609-615. DOI:10.1007/s11340-006-9020-x.

[16] SINGH R P, KAVATURU M, SHUKLA A. Initiation, propagation and arrest of an interface crack subjected to controlled stress wave loading[J]. International Journal of Fracture, 1997,83(3):291-304.

[17] 王自强,陈少华.高等断裂力学[M].北京:科学出版社,2009.

[18] LEVENT T, CIGDEM K. Effects of geometric factors on mode I fracture toughness for modified ring tests[J].

International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012,51(1):149-161.

[19] IUNG T, PINEAU A. Dynamic crack propagation and crack arrest investigated with a new specimen geometry: Part Ⅰ: Experimental and numerical calculations[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 1996,19(11):1357-1367.

[20] 杨井瑞，张财贵，周妍，等. 用 CSTBD 试样确定砂岩的动态起裂和扩展韧度[J]. 爆炸与冲击，2014,34(3):264-271.
YANG Jingrui, ZHANG Caigui, ZHOU Yan, et al. Determination of dynamic initiation toughness and propagation toughness of sandstone using CSTBD specimens[J]. Explosion and Shock Waves, 2014,34(3):264-271.

[21] 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. DOI:10.11883/1001-1455(2008)06-0544-08.
ZHANG Sheng, WANG Qizhi, XIE Heping. Size effect of rock dynamic fracture toughness[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(6):544-551. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)06-0544-08.

[22] 周妍，张财贵，杨井瑞，等. 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.
ZHOU Yan, ZHANG Caigui, YANG Jingrui, et al. Comprehensive calibration of stress intensity factor for flattened Brazilian disc with holed inner single or double cracks[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2015,36(1):16-30.

[23] 周妍，张财贵，王启智. 用圆孔内单边裂纹平台巴西圆盘和实验-数值-解析法确定砂岩的动态起裂和扩展韧度[J]. 振动与冲击，2017,36(5):37-47.
ZHOU Yan, ZHANG Caigui, WANG Qizhi. Determination of dynamic initiation toughness and dynamic propagation toughness of sandstone[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017,36(5):37-47.

[24] 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.
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):1912-1922.

[25] 唐志平，王礼立. SHPB 实验的电脑化实验处理系统[J]. 爆炸与冲击，1986,6(4):320-327.
TANG Zhiping, WANG Lili. A computerized system of data processing used in SHPB experiments[J]. Explosion and Shock Waves, 1986,6(4):320-327.

[26] 李夕兵，古德生，赖海辉. 冲击荷载下岩石动态应力-应变全图测试中的合理加载波形[J]. 爆炸与冲击，1993,13(2):125-130.
LI Xibing, GU Desheng, LAI Haihui. On the reasonable loading stress waveforms determined by dynamic stress-strain curves of rocks by SHPB[J]. Explosion and Shock Waves, 1993,13(2):125-130.

[27] GUO W G, LI Y L, LIU Y Y. Analytical and experimental determination of dynamic impact stress intensity factor for 40Cr steel[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 1997,26(1):29-34.

[28] WEISBROD G, RITTLE D. A method for dynamic fracture toughness determination using short beams[J]. International Journal of Fracture, 2000,104(1):89-103.

[29] WANG Q Z, YANG J R, ZHANG C G, et al. Determination of dynamic crack initiation and propagation toughness of a rock using a hybrid experimental-numerical approach[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2016,142(12):04016097. DOI:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001155.

[30] 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.

[31] CHEN Y M, WILKINS M L. Stress analysis of problems with a three-dimensional, time-dependent computer program[J]. International Journal of Fracture, 1976,12(4):607-617. DOI:10.1007/BF00034646.

[32] CHEN L S, KYANG 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.

[33] RAVI-CHANDAR K K. Dynamic fracture[M]. Elsevier, 2004.

Dynamic crack propagation and arrest investigated with a cracked eccentrically-holed flattened disc of rock

LI Lian[1,4], LUO Lin[2], WU Lizhou[3], WANG Qizhi[1,2,3]

(1. *Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, Sichuan University, Chengdu* 610065, *Sichuan, China*;
2. *State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing* 400074, *China*;
3. *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059, *Sichuan, China*;
4. *China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu* 610031, *Sichuan, China*)

Abstract: Expanding the advantages of flattened ring geometry, a new test specimen geometry with a longer fracture path was advised to investigate the complete dynamic fracture process. This geometry was cracked eccentrically holed flattened disc (CEHFD) which was more conducive to study the unstable dynamic crack propagation and dynamic crack arrest. In order to study the mode Ⅰ (opening mode) dynamic fracture process of a rock, CEHFD specimens with strain gauges and crack propagation gauge glued on the specimen's surface were diametrically impacted by a split Hopkinson pressure bar. The experiment investigated crack initiation, rapid crack propagation, and crack arrest, all in one specimen. In a single complete fracture event, the crack accelerated after initiating and decelerated before arresting. The process monitored by the laboratory is completely consistent with the whole process of the dynamic rupture of faults in earthquake. A hybrid experimental-numerical-analytical method was used to determine the dynamic stress intensity factor that increased with increasing time. The dynamic fracture toughness was obtained with the fracture time information. Crack propagation velocity was first increased and then decreased with the time, and the dynamic propagation toughness had the same variation tendency with time as it was the function of velocity. The dynamic arrest toughness was smaller than the dynamic initiation toughness, and decreased when the maximum crack propagation speed increased.

Keywords: cracked eccentrically holed flattened disc (CEHFD); dynamic stress intensity factor; crack propagation acceleration; crack propagation deceleration; dynamic arrest; dynamic arrest toughness

(责任编辑 王易难)