DOI: 10.11883/bzycj-2017-0132
文章编号: 1001-1455(2018)06-1247-08

Ⅰ型裂纹中低速冲击荷载下起裂韧度测试新方法*

施泽彬,朱哲明,汪小梦,王 雄
(四川大学建筑与环境学院能源工程安全与灾害力学教育部重点实验室,四川 成都 610065)

摘要: 为了探寻更加合理的构型试件来研究纯Ⅰ型裂纹在冲击荷载下的起裂及扩展行为,提出一种新构型试件,即双倾斜底边中心裂纹试件(double inclined bottom central cracked, DIBCC)。借助于中低速落锤式冲击实验装置进行冲击实验,通过应力波来使试件内预制裂纹起裂并扩展,同时利用应变片测试系统监测裂纹起裂时刻,并采用 AUTODYN 有限差分软件对实验过程进行数值模拟,最后计算裂纹的动态应力强度因子,利用实验测得的起裂时刻,确定试件的起裂韧度。结果表明:(1)在反射拉伸波作用下,预制裂纹两侧会产生垂直于裂纹面向外的位移,使预制裂纹扩张,从而使裂纹起裂。(2)数值模拟结果与实验结果在裂纹扩展路径上具有一致性,说明本文中提出的 DIBCC 构型试件有效,可以用来测试裂纹在冲击载荷下的断裂韧度。

关键词: 纯Ⅰ型裂纹;双倾斜底边中心裂纹(DIBCC);应力波;冲击荷载;AUTODYN;起裂韧度
中图分类号: O346;TU45 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

脆性材料在动荷载作用下的断裂问题是当前研究领域的前沿,在该领域已有一系列的研究。在理论方面,一些学者尝试通过复变函数法、傅里叶变换法等来分析动荷载作用下脆性材料的断裂问题[1-2],但由于动态问题需考虑材料惯性和数学研究手段的限制,解析法求解依然很困难,有意义的理论解不多。目前针对脆性材料断裂动力学的研究方法主要集中在准静态法、应变片法[3]、高速摄影法[4]和实验-数值法[5-6]等。Zhang 等[7]采用准静态法对切槽半圆盘三点弯曲试样进行加载,得到了大理岩在动荷载作用下的起裂韧度和扩展韧度;Zhang 等[8]利用分离式霍普金森压杆装置,运用准静态法测量了不同加载速率下岩石的动态断裂韧度;王蒙等[9-10]基于侧开单裂纹半孔板在分离式霍普金森压杆装置上进行动态断裂实验,借助于 AUTODYN 有限差分软件进行数值模拟,通过实验-数值法对脆性材料的动态断裂机制进行分析;徐文涛等[11]、Zhu 等[12]利用带裂纹的水泥砂浆试样进行爆破加载研究,通过实验得到试件承受的荷载和裂尖起裂时刻,再采用实验-数值方法确定了试样的动态断裂韧度。

材料的动态断裂韧度作为动力学的一个关键参数,是预测材料发生断裂破坏的临界值。目前人们研究的动态断裂主要为纯Ⅰ型、纯Ⅱ型及Ⅰ/Ⅱ复合型,其中纯Ⅰ型动态断裂方式由于在工程中的广泛存在而成为现阶段研究的重点。实验研究过程中,研究人员尝试通过使用不同的构型试件和加载方式来测试脆性材料的纯Ⅰ型动态断裂韧度。在试样构型选择上,学者们利用如巴西圆盘(CSTFBD)、巴西半圆盘(SCB)、压缩单裂纹圆孔板(SCDC)等经典构型对岩石、有机玻璃(PMMA)等脆性材料进行动态实验[13],加载方式通常采用霍普金森压杆(SHPB)冲击[14-16]或炸药爆炸加载。上述两种实验加载方式各有优点,但也有其自身的适用性:爆破加载由于加载率高,加载时间极短,致使一些参数的测试不易控制,且实验过程中存在一定危险,因而爆破加载对设备和场地的要求较高;SHPB 冲击加载则由于冲击杆尺寸的限制,导致试件尺寸很小,而较小试件尺寸往往会受到自由边界反射拉伸波的影响。

本文中选择中低速落锤冲击实验设备及双倾斜底边中心裂纹(double inclined bottom central cracked, DIBCC)试件进行实验研究,中低速冲击实验设备是基于 SHPB 原理设计,利用冲击产生的应力波来使试件中的预制裂纹起裂。通过测试入射板、透射板的应变信号和裂纹尖端的起裂信号,得到试

* **收稿日期**: 2017-04-26; **修回日期**: 2017-09-16
基金项目: 国家自然科学基金项目(11672194,11702181);
四川省安全监管局安全生产科技项目(aj20170515161307)
第一作者: 施泽彬(1992—),男,硕士研究生; **通信作者**: 朱哲明,zhemingzhu@hotmail.com。

样的入射荷载和起裂时刻。该冲击实验装置能很好地测试较大尺寸试样的动态断裂行为，避免了SHPB 冲击实验对试样尺寸的限制等缺陷。

数值研究部分则采用 AUTODYN 有限差分软件，该软件能很好地分析具有材料和几何非线性的动力学问题，且已被 Zhu 等[17-20]成功应用于脆性材料在冲击和爆炸荷载下的动态断裂研究。通过对裂纹动态起裂和扩展进行数值模拟研究，分析冲击荷载下预制裂纹的起裂机理，并与实验结果进行对比分析。最后利用实验得到的入射荷载和试件尺寸等参数建立计算模型，计算裂尖张开位移，通过位移外推法和最小二乘法拟合等手段计算得到裂纹动态起裂韧度，该方法计算脆性材料断裂韧度的合理性已有证明[21]。

为了更好地观察冲击动荷载作用下裂纹的扩展状态，脆性材料选用透光性极好、强度适中的有机玻璃(PMMA)，并且有机玻璃和岩石材料在动荷载下具有相似的断裂行为[22-23]。

1 实 验

1.1 实验原理及试件制备

有机玻璃材料的断裂破坏特征与岩石的相似[22-23]，为了便于观察裂纹扩展状态，本文中采用有机玻璃进行实验研究。

DIBCC 构型试件如图 1 所示，该构型由于结构对称，在冲击动荷载下试件内主要是竖直方向的压应力，而剪应力很小，试件底部的钢板会给试件一个反作用力，产生压力波并朝向预制裂纹传播，当该压力波与裂纹自由表面接触后会反射成拉伸波，当预制裂纹尖端拉伸应力超过其动态拉伸强度时，裂纹即将起裂。裂纹起裂后，加载端和预制裂纹尖端之间有足够空间以供裂纹扩展，因此该构型试件也可用于研究裂纹的动态扩展韧度及扩展规律，且该构型试件造价低廉、几何简单，因而能更好地分析脆性材料的纯Ⅰ型动态断裂过程。

图 2 中给出了 DIBCC 试件的几何尺寸，为避免较小尺寸引起的尺寸效应，试件尺寸设计为 300 mm×250 mm×30 mm，试件底部两倾斜边夹角 150°，每条倾斜边与底部水平边夹角 165°，预制裂纹设置在试件的对称轴线上，长度为 100 mm，且预制裂纹上端距离试件顶部 75 mm。预制裂纹的制备采用激光切割的方式，可以达到实验测试的要求。为避免动态荷载实验误差对实验测试结果的影响，本实验制作了 20 个模型试件进行实验数据采集。

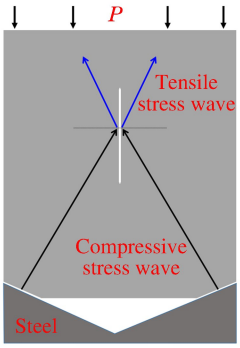


图 1 DIBCC 构型实验方法示意图

Fig. 1 Test method of DIBCC specimen

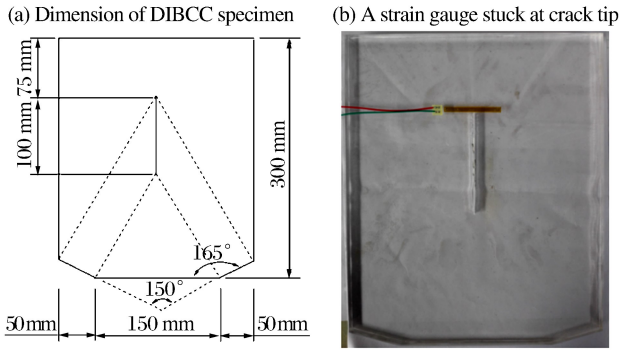


图 2 DIBCC 构型模型示意图

Fig. 2 Sketch of DIBCC specimen

1.2 中低速冲击实验设备

本实验装置采用的中低速落锤式冲击实验装置如图 3 所示。入射板采用弹性模量为 72 GPa、泊松比 $\nu=0.33$ 的弹性材料 LY12CZ 铝合金，透射板采用高强度钢材，入射板长度 $L_1=3\,000$ mm，透射板长度 $L_2=2\,000$ mm，宽度均为 300 mm，厚度则与试样厚度相同，材料实测纵波波速为 $c=5\,936$ m/s。入射板上粘贴 3 张应变片，透射板上粘贴 1 张应变片，入射板上的应变片距离试件加载端分别为 160、1 500、2 840 mm，透射板上的应变片距离试件底部 160 mm。在预制裂纹尖端粘贴应变片，如图 2(b)所

示。实验数据采集系统根据 SHPB 装置采集系统原理进行设置，如图 4 所示。实验过程中，通过应变片采集入射端、透射端和预制裂纹尖端的应变信号，再通过超动态应变仪将电压信号放大 1 000 倍输出到高速数据采集记录仪进行存储，最后通过对实验数据进行处理得到各部分应变时程曲线。

在落锤和入射板之间粘贴黄铜片以延长加载时间、增大入射波波长，另一方面充当波形整形器过滤入射的高频波，降低波形弥散效应对实验的影响。相比于 SHPB 的冲击加载，该加载系统中试件的应变率较小，在该应变率范围内，材料满足一维应力波基本假定中关于应力只是应变的单值函数的假定，因而该实验装置满足一维应力波的基本假定。

在透射板底部设置了与大地相接触的吸能板，最终应力波将传入地面。为了保证应力波在不同材料之间的正常传播，在试件与入射板和透射板的接触面均涂抹一层凡士林作耦合剂，并用夹具固定试件，防止实验中震荡产生干扰信号。

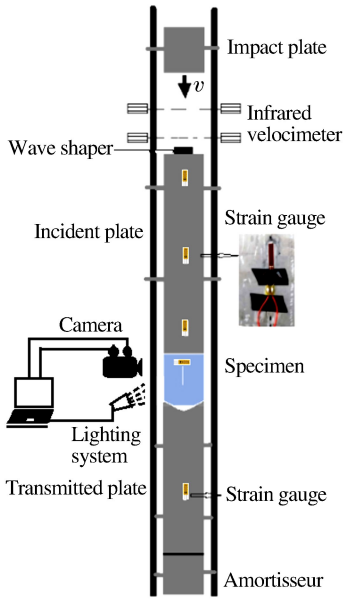


图 3　中低速冲击加载装置

Fig. 3　Middle-low impact loading device

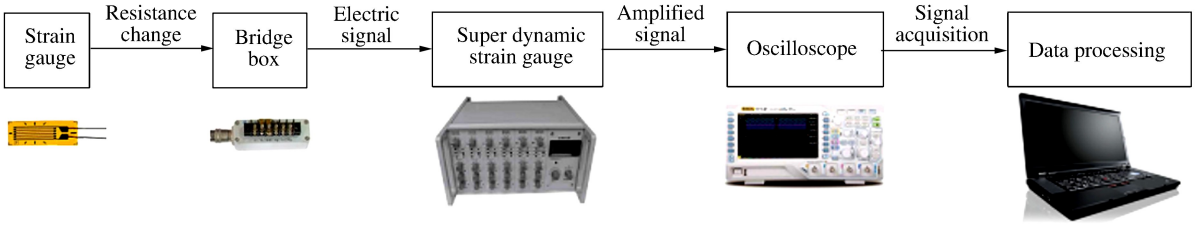


图 4　数据采集系统

Fig. 4　Data collection system

值得注意的是，在 SHPB 实验中，假设试件很短，应力应变沿其长度均匀分布，此为准静态法的基本假定，但当试件较长时，这种假定是不合理的。本文中采用 DIBCC 试件进行实验研究，不仅研究裂纹的起裂，还研究应力波在试件内传播过程中裂纹的扩展过程，并结合数值手段进行模拟研究，是一种新型的研究方法，即实验-数值法[6,21,24]，不属于准静态法的研究范畴，不需要满足上述应力平衡的假定。

1.3　入射板和透射板上的压力时程曲线

由于实验过程中外界声波的干扰，在信号曲线的起始段可能产生一小段锯齿波形，要采取适当的整形措施来获取最终实验的加载波形。经分析，采用 ORIGIN 软件对实测电压信号进行降噪处理来获取实验中入射端和透射端的应变信号时程曲线。经过对多组测试数据和实验效果的综合分析，选择试件 2 作为研究对象，其入射端与透射端的应变信号如图 5 所示。

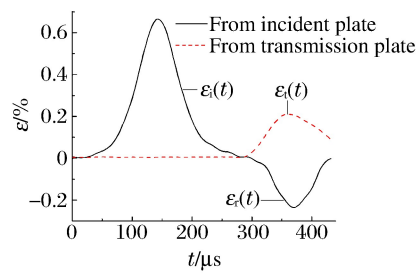


图 5　入射端与透射端应变时程曲线

Fig. 5　Curves of strain versus time recorded from incident and transmitted plates

图 5 中入射端和透射端信号曲线分别由入射板上距试件顶部加载端 160 mm 处的应变片和透射板上距试件底端 160 mm 处的应变片采集得到。由一维应力波理论可知，试件上端面的荷载可由入射波和反射波叠加得到，而试件下端面的荷载则可直接由透射波计算得到[25]：

$$\sigma_i(t)=E_i[\varepsilon_i(t)+\varepsilon_r(t)],\quad \sigma_t(t)=E_t\varepsilon_t(t) \tag{1}$$

式中：$\sigma_i(t)$、$\sigma_t(t)$ 为入射板和透射板作用于试件上下端

面的压应力，E_i为入射板弹性模量，E_t为透射板弹性模量；$\varepsilon_i(t)$、$\varepsilon_r(t)$、$\varepsilon_t(t)$分别为入射波、反射波和透射波的应变。基于图 5 所示应变时程曲线，利用式(1)，可以计算得到冲击动荷载下试件上的压应力时程曲线，进而得到相应的加载波形。

1.4 裂纹起裂时刻的测试

为了得到起裂时刻，我们对裂纹尖端上应变片的信号进行监测，通过电压信号来确定裂尖起裂时刻。图 6 为该应变片的电压信号时程曲线，从图 6 可知，裂纹尖端应变片的电压信号在 823 μs 开始骤然增加，之后保持最大值不变，通常认为此时刻应变片被拉断破坏，裂纹尖端开始起裂，对采集到的电压信号求导，其导数峰值所对应的时刻即为应变片断裂时刻，即裂纹的起裂时刻。

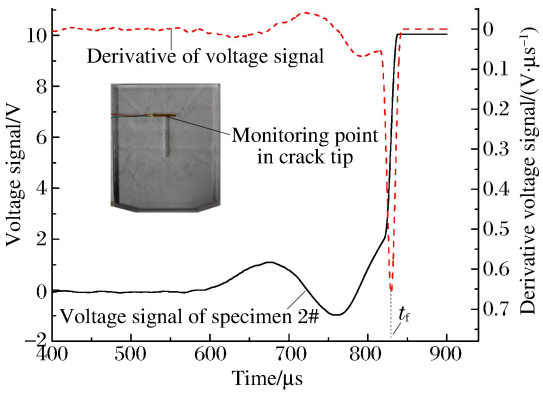


图 6 裂纹尖端应变片的电压信号时程曲线

Fig. 6 Curves of voltage signal versus time recorded from strain gauges stuck at the crack tip

2 数值模拟

2.1 算法简介和模型建立

采用 AUTODYN 软件对冲击动态实验进行数值模拟。模拟过程中，对于有机玻璃等脆性材料，一般采用 AUTODYN 的拉格朗日算法，该算法能很好地适用于小变形的动荷载问题。

采用与文献[26]同一型号的有机玻璃作为数值模拟材料。由于采用的是冲击动态加载方式，试件变形量较小，因此材料状态方程采用更适用于小变形的线性状态方程；强度模型采用适用于有机玻璃等脆性材料的线弹性强度模型；失效准则采用修正后的最大主应力准则，该准则表明当一个单元的最大主应力 σ_1 达到材料的抗拉强度 $\sigma_T(\dot{\varepsilon})$ 或最大剪应力 τ_{max} 达到材料的抗剪强度 $\tau_C(\dot{\varepsilon})$ 时，则该单元破坏，即

$$\sigma_1 \leqslant \sigma_T(\dot{\varepsilon}), \qquad \tau_{max} \leqslant \tau_C(\dot{\varepsilon}) \tag{2}$$

数值模型中试件和冲击装置的尺寸均按照实验实际尺寸进行设置，透射板下方吸能板边界条件设置为透射边界来反映实际实验情况。

2.2 模拟结果及分析

利用上述计算模型及 AUTODYN 软件对冲击过程进行数值模拟研究，图 7 为预制裂纹起裂前 3 个时刻的 y 方向应力(σ_y)云图(图中红色区域为拉，蓝色区域为压)。从图 7 可知，试件上端受到冲击动荷载作用后，试件内部会形成压缩波，试件下端的透射板会对试件底部两倾斜的边界产生压力波，该压力波向预制裂纹方向传播，到达预制裂纹两侧自由边时发生反射，形成反射拉伸波，并在该应力波反射区域形成一定范围的拉应力区。在反射拉伸波作用下，预制裂纹会起裂扩展。

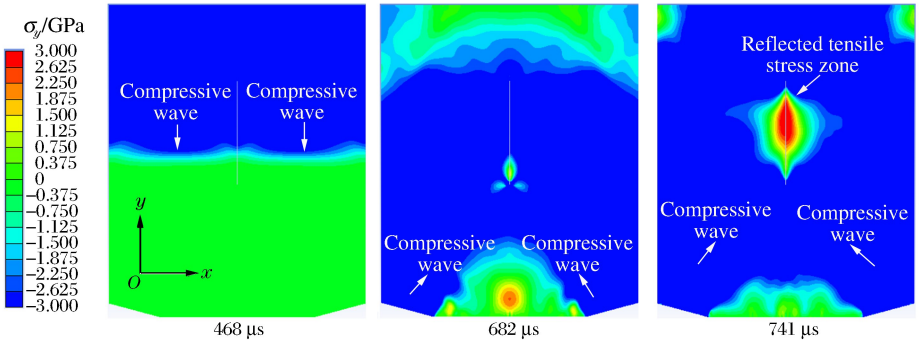


图 7 3 个时刻 y 方向应力云图

Fig. 7 Nephograms of stress in y-direction at three moments

为进一步证明本文中所提出的应力波起裂方法的准确性，对数值模拟结果继续作如下分析：在预制裂纹右侧及其尖端的竖向对称轴线上设置 20 个监测点，用以记录这些点上的应力及位移变化情况。监测点 19 位于预制裂纹尖端，其 x 方向应力时程曲线如图 8(a)所示。由于模拟材料的抗拉强度为 9 MPa，而在 823 μs 的时候监测点 19 的 x 方向拉应力达到最大值 9.233 MPa，大于材料的抗拉强度，由此导致监测点 19 所在单元破坏，预制裂纹发生起裂。

从图 7 可知，透射板作用于试件底部产生的压缩应力波到达预制裂纹两侧自由边时会发生反射形成拉伸波，并在预制裂纹两侧形成局部范围的拉应力区，在上述拉压应力作用下，单元会发生位移。预制裂纹右侧设置的监测点 5 在 x 方向的位移时程曲线如图 8(b)所示，在 450 μs 时，单元开始产生位移，由于受到上部竖向压缩波及底部斜向压缩波作用，监测点 5 产生左右摆动的位移，当从试件底部传来的压缩波转换成拉伸波后，监测点 5 发生向右的位移。

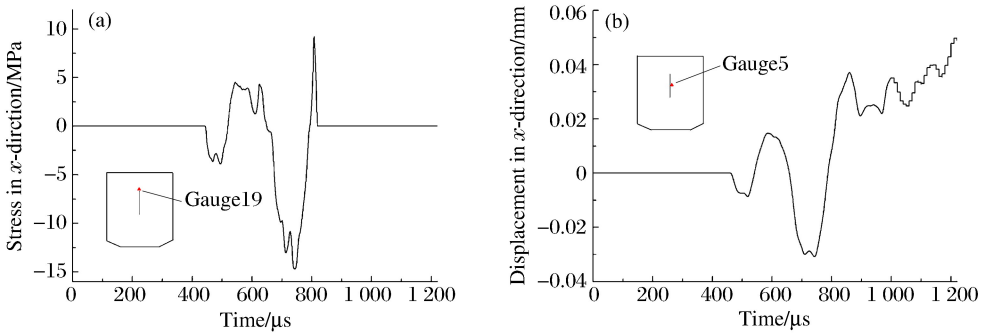


图 8　裂纹尖端应力时程曲线及其右侧点的位移曲线

Fig. 8　Curves of stress in x-direction versus time at gauge 19 and displacement in x-direction versus time at gauge 5

从图 8 可知，预制裂纹尖端在 823 μs 时起裂，而裂纹中部监测点监测点 5 在反射拉伸波的作用下在 823 μs 时的向右位移为 0.028 mm，并由于在反射拉伸波持续作用下继续向右偏移，直到 850 μs 时达到向右的第 1 个峰值 0.042 mm，即在反射拉伸波作用下，预制裂纹中部会发生垂直于裂纹面向外的位移，导致预制裂纹尖端受拉起裂。在预制裂纹起裂后，由于反射拉伸波持续作用，预制裂纹中部继续向外扩张，裂纹持续向远处扩展。

图 9 分别为数值模拟结果和实验结果，从图中可以清晰地看到数值模拟结果和实验结果在裂纹扩展路径上具有一致性，验证了上文分析结果的准确性，同时也证明了 DIBCC 构型试件的有效性。

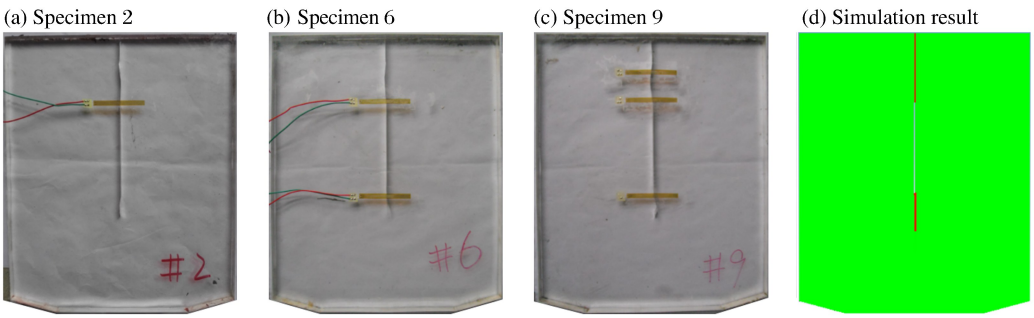


图 9　数值模拟结果及实验得到的试件破坏结果

Fig. 9　Test results of specimen fracture patterns and numerical simulation result

3　实验-数值法计算起裂韧度

3.1　利用裂纹张开位移确定应力强度因子

依据断裂力学理论，图 10 所示裂纹尖端的张开位移可表示为：

$$\delta(r,t)=\frac{2K_{\mathrm{I},n}(t)(1+\kappa)(1+\nu)}{E}\sqrt{\frac{r_n}{2\pi}} \tag{3}$$

式中：E 为弹性模量，ν 为泊松比，$K_{\mathrm{I},n}(t)$ 为Ⅰ型裂纹应力强度因子，$\delta(r_n,t)$ 为裂纹在距离裂尖 r_n 处、在 t 时刻的张开位移；平面应力状态下 $\kappa=(3-\nu)/(1+\nu)$。由式(3)可得：

$$K_{\mathrm{I},n}(t)=\frac{E\,\delta(r_n,t)}{2(1+\kappa)(1+\nu)}\sqrt{\frac{2\pi}{r_n}} \tag{4}$$

式中：$\delta(r_n,t)$ 可直接从数值模拟计算结果中得到。

每一个 r_n 都有一个 $K_{\mathrm{I},n}(t)$ 与其对应，这样可以得到多组(r_n，$K_{\mathrm{I},n}(t)$)数据。最后采用最小二乘法拟合求得Ⅰ型应力强度因子：

$$K_{\mathrm{I}}(t)=\frac{\sum_{n=1}^{m}r_n\sum_{n=1}^{m}r_nK_{\mathrm{I},n}(t)-\sum_{n=1}^{m}r_n^2\sum_{n=1}^{m}K_{\mathrm{I},n}(t)}{\left(\sum_{n=1}^{m}r_n\right)^2-n\sum_{n=1}^{m}r_n^2} \tag{5}$$

式中：m 为设置的观测点个数，显然，应力强度因子的精确度随着 m 的增大而增大。

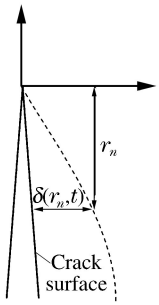


图 10 裂纹张开位移示意图

Fig. 10 Deformation of crack opening displacement

3.2 依据起裂时刻确定起裂韧度

在计算起裂韧度过程中使用实验测得的入射端荷载，确定起裂韧度的过程如下：首先进行冲击实验，通过应变片测得入射板和透射板的应变时程曲线，再利用公式(1)得到试件的加载波形曲线，利用该曲线及试件参数建立计算模型，并在裂纹表面设置监测点 1、2、3，利用 AUTODYN 软件计算所设监测点的水平方向的位移，其时程曲线如图 11 所示。运用最小二乘法拟合得到裂纹的动态应力强度因子曲线如图 12 所示。该试件裂纹的起裂时刻由图 6 给出，即 $t_{\mathrm{f}}=828\ \mu\mathrm{s}$。因此在图 12 中与该起裂时刻对应的动态应力强度因子值为 4.35 MPa·$\mathrm{m}^{1/2}$，即为该试件的动态起裂韧度。

将本实验所有的试件(20 个)的动态起裂韧度结果进行平均，其均值为 4.306 MPa·$\mathrm{m}^{1/2}$。

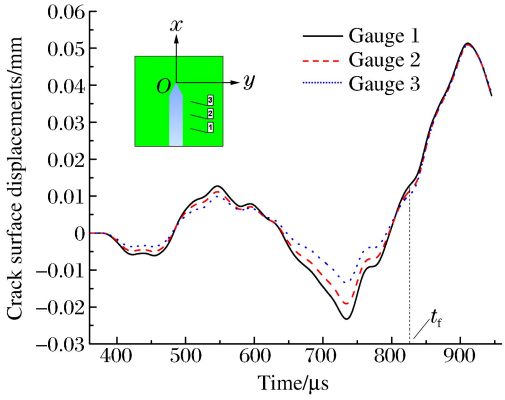


图 11 裂纹面三个点的水平位移时程曲线

Fig. 11 Displacement of three points on crack surface as a function of time

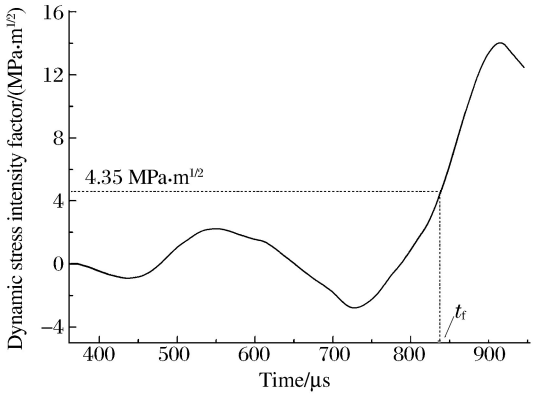


图 12 动态应力强度因子时程曲线

Fig. 12 Curve of dynamic stress intensity factor versus time

4 结 论

(1)DIBCC 构型试件的基本原理是：在试件底部斜面处产生压缩波，该压缩波朝向中心预制裂纹传播，遇到裂纹两侧自由面反射成拉伸波，在该拉伸波作用下，预制裂纹起裂，起裂后的裂纹会沿着裂纹面向上及向下扩展。

(2)实验结果和数值模拟结果对比可知，两者的裂纹扩展路径具有一致性，说明本文中提出的 DIBCC 构型试件是有效的，可以用来测试脆性材料的动态断裂韧度。

参考文献：

[1] LOEBER J F, SIH G C. Diffraction of antiplane shear waves by a finite crack[J]. Acoustical Society of America, 1968,44(1):90-98.

[2] HARRIS J G. Diffraction by a crack of a cylindrical longitudinal pulse[J]. Journal of Applied Mathematics and Physics, 1980,31(3):367-383.

[3] BERTRAM A, KALTHOFF J F. Crack propagation toughness of rock for the range of low to very high crack speeds[J]. Key Engineering Materials, 2003,251/252:423-430.

[4] LEE D, TIPPUR H, BOGERT P. Dynamic fracture of graphite/epoxy composites stiffened by buffer strips: an experimental study[J]. Composite Structures, 2012,94(12):3538-3545.

[5] 胡柳青，李夕兵，龚声武. 冲击载荷作用下裂纹动态响应的数值模拟[J]. 爆炸与冲击，2006,26(3):214-221.
HU Liuqing, LI Xibing, GONG Shengwu. Simulation on dynamic response of crack subjected to impact loading [J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(3):214-221.

[6] 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.

[7] ZHANG Q B, ZHAO J. Effect of loading rate on fracture toughness and failure micromechanisms in marble[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013,102(6):288-309.

[8] ZHANG Z X, KOU S Q, YU J, et al. Effects of loading rate on rock fracture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999,36(5):597-611.

[9] 王蒙，朱哲明，胡荣. 基于 SCSCC 试样的岩石复合型裂纹动态扩展特征研究[J]. 四川大学学报(工程科学版)，2016(2):57-65.
WANG Meng, ZHU Zheming, HU Rong. Rock experiments study of crack propagation under Ⅰ mode and Ⅰ-Ⅱ mixed-mode dynamic loading using SCSCC specimens[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016(2):57-65.

[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):1323-1332.
WANG Meng, ZHU Zheming, WANG Xiong. Study on the growth rule of mixed-mode Ⅰ/Ⅱ crack under impacting loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016,35(7):1323-1332.

[11] 徐文涛，朱哲明，曾利刚. 爆炸载荷下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(增刊1):2767-2772.
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(suppl 1):2767-2772.

[12] 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]. Experimental Techniques, 2016,40(3),889-905.

[13] Chong K P, Kuruppu M D. New specimen for fracture toughness determination of rock and other materials[J]. International Journal of Fracture, 1984,26:59-62.

[14] 李清，杨仁树. 爆炸载荷裂纹扩展的应力强度因子及其断裂行为[J]. 煤炭学报，2002,27(3):290-293.
LI Qing, YANG Renshu. Stress intensity factor and fracture behavior for crack propagation under blasting load [J]. Journal Of China Coal Society, 2002,27(3):290-293.

[15] WANG Q Z, XING L. Determination of fracture toughness KIC by using the flattened Brazilian disc specimen for rocks[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1999,64(2):193-201.

[16] YANG S, TANG T X, ZOLLINGER D, et al. Splitting tension tests to determine concrete fracture parameters by peak-load method[J]. Advanced Cement Based Materials, 1997,5:18-28.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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):1157-1167.
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):1157-1167.

[20] ZHU Z M, WANG C, KANG J M. Study on the mechanism of zonal disintegration around an excavation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014,67(4):88-95.

[21] 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.
WANG Meng, ZHU Zheming, XIE Jun. 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.

[22] ROSSMANITH H P, DAEHNKE A, KNASSMILLNER R E K, et al. Fracture mechanics applications to drilling and blasting[J]. Fatigueand Fracture Engineering Materials and Structures, 1997,20(11):1617-1636.

[23] KUTTER H K, FAIRHURST C. On the fracture process in blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1971,8:181-202.

[24] WANG M, ZHU Z M, DONG Y Q, et al. Study of mixed-mode Ⅰ/Ⅱ fractures using single cleavage semicircle specimens under impacting loads[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017,177:33-44.

[25] 宋力,胡时胜.SHPB 数据处理中的二波法与三波法[J].爆炸与冲击,2005,25(4):368-373.
SONG Li, HU Shisheng. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(4):368-373.

[26] 岳中文.缺陷介质爆生裂纹扩展规律的动态焦散线试验研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2009.

[27] 郭伟国.应力波基础简明教程[M].西安:西北工业大学出版社,2007:44-52.

A new testing method for mode Ⅰ crack initiation fracture toughness under middle-low speed impacts

SHI Zebin, ZHU Zheming, WANG Xiaomeng, WANG Xiong

(*Key Laboratory of Energy Engineering Safety and Disaster Mechanics, School of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu* 610065, *Sichuan, China*)

Abstract: In this work, we proposed a specimen with a new configuration specimen, i. e. double inclined bottom central cracked specimen (DIBCC) to explore a more suitable configuration specimen for the study of the behavior of Mode I crack under impacts, by conducting tests using a middle-low speed drop hammer impact test device, and by driving the initiation and propagation of the prefabricated crack inside the DIBCC specimens using stress waves. Meanwhile, we measured the crack initiation time using a strain gauge test system and carried out the corresponding numerical simulation using the AUTODYN finite difference code. Then we calculated the dynamic stress intensity factors and determined the initiation toughness of the specimens using the initiation time measured from the experiments. The results show that, under the action of the reflected tensile waves, the prefabricated crack surfaces have outward displacements perpendicular to the crack surface, making the prefabricated crack expand and thus induce the crack to initiate, and that the numerical result of the crack propagation path agrees well with the test result, indicating that the DIBCC configuration specimen proposed is effective and can be used to test the fracture toughness under impacts.

Keywords: mode Ⅰ crack; double inclined bottom central cracked specimen(DIBCC); stress wave; impact load; AUTONYN; initiation fracture toughness

(责任编辑 曾月蓉)