

# 用矩形双臂梁测定岩石动态断裂韧度\*

李战鲁<sup>1</sup> 王启智<sup>1,2</sup>

(1. 四川大学土木工程及应用力学系, 成都 610065) (2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

**摘要** 参考美国材料试验学会及国际岩石力学学会推荐的人字形切槽短棒试样. 提出适合于分离式霍普金森压杆高速加载测试岩石动态断裂韧度  $K_{IId}$  的矩形双臂梁 (Rectangular Double Beam-RDB) 试样. 霍普金森入射杆高速撞击试样的切槽端面. 使切槽前沿产生拉伸加载. 记录入射杆入射应力波和反射应力波及透射杆上的透射应力波的应变片电压变化信号. 同时在试样表面切槽顶点附近粘贴应变片以得到从试样开始受到载荷作用到裂纹起裂的时间. 将入射波、反射波及透射波叠加得到试样载荷. 输入有限元计算模型. 得到试样应力强度因子的时间历程. 再通过试样的裂纹起裂时间. 得到岩石的动态起裂断裂韧度. 在加载速率  $\dot{K}$  为  $1.68 \times 10^4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$  时. 大理岩的动态断裂韧度  $K_{IId}$  为  $2.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

**关键词** 动态断裂韧度, 分离式霍普金森压杆, 矩形双臂梁试样

## 引言

随着分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar-SHPB) 技术发展<sup>[1-5]</sup>. 高速加载下岩石动态断裂韧度的研究逐渐变得可行. 国际岩石力学学会 (International Society for Rock Mechanics - - ISRM) 于 1988 年推荐测试岩石 I 型断裂韧度的两种试样<sup>[6]</sup> -- 人字形切槽弯曲梁试样 (Chevron Bend Specimen) 和短圆棒试样 (Short Rod Specimen) (图 1(a)). 后者在 1989 年也被美国材料试验学会 (American Society for Testing and Materials -- ASTM) 推荐为测量金属材料平面应变断裂韧度的标准试样<sup>[7]</sup>. 短圆棒试样后又被称为双臂圆梁 (Round Double Beam) 试样. 张宗贤<sup>[8]</sup> 采用劈裂加载的形式进行了短圆棒岩石动态断裂韧度的测试 (图 1(b)). Hanson 和 Ingraffea<sup>[9-10]</sup> 改进了加载的方式使短棒试样适用于大尺寸试样断裂韧度的测试 (图 1(c)).

借鉴 ASTM 提出作为测试金属材料平面应变断裂韧度的另一种矩形截面短棒标准试样 (见图 2(a))<sup>[7]</sup>. 为了使试样表面上粘贴应变片的信息能更加真实地反映试样切槽裂纹前沿的状态. 放弃人字形切槽而采用贯穿的直切槽. 提出矩形截面的双臂梁试样 (Rectangular Double Beam-RDB) (图 2(b)).

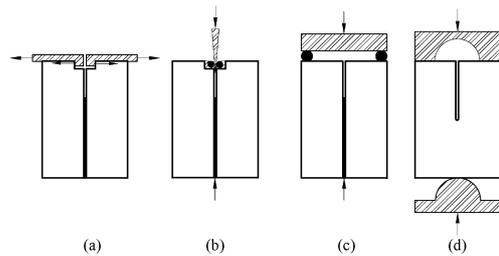


图 1 短棒试样加载方式(a)拉伸<sup>[6-7]</sup>, (b)劈裂<sup>[8]</sup>, (c)弯曲<sup>[9-10]</sup>和(d)矩形双臂梁弯曲加载(本文)  
Fig. 1 Short Bar specimen loading mode (a)tension<sup>[6-7]</sup>, (b)wedging<sup>[8]</sup>, (c)bending<sup>[9-10]</sup> and (d)RDB bending (present paper)

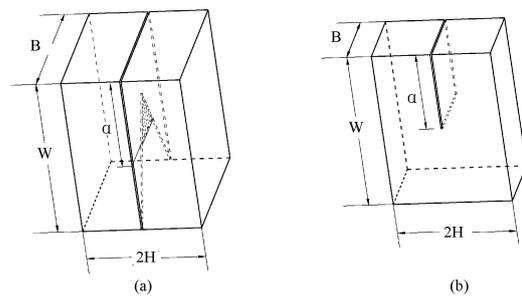


图 2 (a)ASTM 矩形短棒试样<sup>[7]</sup> (b)矩形双臂梁试样  
Fig. 2 (a) ASTM rectangular short bar specimen<sup>[7]</sup> (b)RDB specimen

## 1 实验过程

### 1.1 试样制作

试样具体尺寸见图 3: 长度 (既图 2 中高度) W 为 110 mm. 厚度 B 为 50mm. 宽 2H 为 80mm. 无量纲

2007-02-08 收到第 1 稿, 2007-09-20 收到修改稿.

\* 国家自然科学基金(10472075), 国家重点实验室创新基金(0503)

切槽深度 ( $a/W$ ) 为 0.5、0.6、0.7 和 0.8。采用超薄 1mm 的线锯先在试样上切出无量纲深度为 0.4、0.5、0.6、0.7 预制切槽。切槽宽度为 2.0mm 左右。并留出 0.1 的加工余量。之后采用 HD300 × 10.7 × 1.0 钢锯片进行切槽顶端二次加工。增切无量纲深度为 0.05。切出的切槽宽度在 1.0mm ~ 1.4mm 之间;最后采用 0.35mm 超薄细齿钢锯片将切槽顶端打细。

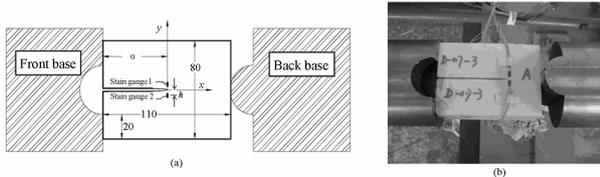


图 3 试样尺寸及应变片的粘贴(a)与实验加载图(b)

Fig. 3 Specimen dimension and strain attached (a) and experiment set-up (b)

### 1.2 试样上应变片的粘贴

考虑到裂纹尖端附近的高应变梯度。本实验采用型号为 BF120-2AA 的小标距应变片。将应变片的粘贴在垂直于切槽方向上距切槽尖端中心  $h = 2 \text{ mm}$  的对称位置上<sup>[4]</sup>。在实验中将试样 A 面切槽线左边的应变片编号为应变片 1。切槽右边的应变片编号为应变片 2。如图 3 (a) 所示。当试样受到载荷作用时。应变片记录的信号随载荷的增大而增大。但当试样起裂时。产生卸载。使应变片信号急剧减小。试样的裂纹起裂时间的起始点确定为:

$$t_f = t_c - h/c_s \quad (1)$$

其中。  $t_c$  为试样上应变片开始感受拉伸信号的时刻点。  $h$  为应变片离切槽尖端的距离。  $c_s$  为应力纵波在大理岩中的传播的波速。

为了更好地得到平滑的三角形入射波。选用长度为 188 mm 的圆柱型炮弹。并选用直径为 45 mm。厚度为 1mm 的铝片作为波形整形器。在入射杆两侧面距加载端面  $l_1 = 100 \text{ mm}$ 。透射杆两侧距加载端面  $l_2 = 80 \text{ mm}$  处均贴有应变片。以测量加载过程中的入射波、反射波及透射波。

压杆辅助加载基座材料选用 A4 低碳钢。前端基座高为 150 mm。截面贯穿凹沟圆弧半径为 20 mm;后基座高为 150 mm。截面贯穿凸脊半径为 20 mm;为了增加劈裂效应并减弱由于高速撞击而在试样底部产生局部屈服效应。特将后基座贯穿凸脊的顶部削平。形成一个接触平面。平面宽度为 5 mm。将前后基座分别附加在入射杆和透射杆上。再将试样放入两基座之间。实验加载见图 3(b)。

### 1.3 SHPB 实验设备

加载设备为直径 100 mm 的 SHPB 杆<sup>[2]</sup> (见图 4)。撞击杆长为 2370 mm。入射杆长 4500 mm。透射杆长 2500 mm。各杆材料相同。弹性模量  $E_H$  为 210GPa。应力波在杆中传播的波速  $c_H$  为 5170m/s。超动态应变仪截止频率  $f_c$  为 300kHz。为了保证采样信号无失真地反映超动态应变仪中的模拟信号。设置瞬态记录仪的采样频率  $f_s$  为 2MHz。实验中炮弹的加载装置为空气炮。弹速的控制依赖空气炮的加载气压。

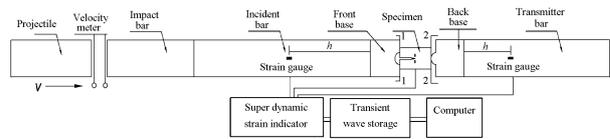


图 4 SHPB 及实验加载图

Fig. 4 SHPB and experimental set-up sketch

### 1.4 SHPB 的基本方程

在冲击载荷作用下岩石变形性质接近于线性弹性体<sup>[11]</sup>。在高应变率下。岩石脆性增加的主要原因是由于岩石内部的应变状态和应力结构来不及调整所致<sup>[12]</sup>。设试样端面 1-1 和端面 2-2 受力分别是  $P_1$ 、 $P_2$ 。根据作用力与反作用力相等的原理有<sup>[13~16]</sup>:

$$P_1 = E_H A_H (\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)) \quad (2)$$

$$P_2 = E_H A_H \varepsilon_t(t) \quad (3)$$

其中。  $A_H$  为压杆的横截面面积。  $\varepsilon_i(t)$  为入射杆中由入射波引起的应变。  $\varepsilon_r(t)$  为入射杆中由反射波引起的应变。  $\varepsilon_t(t)$  为透射杆中由透射波引起的应变。将试样两端所受力的平均值看成试样整体的外加载荷:

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{E_H A_H}{2} (\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)) \quad (4)$$

### 1.5 实验系统的可靠性

证明 SHPB 实验系统所纪录的数据是准确的操作步骤如下:(1)只有单纯的一个入射杆条件即空炮作用下的入射杆上的应变信号。即在 SHPB 系统中将透射杆拿掉。将入射杆的后端加载面形成一个自由面。测定其在空炮作用下入射波及反射波信号。(2)复原整个 SHPB 系统。但在入射杆和透射杆之间不加任何试样。测试此时在空炮作用下的入射杆中的入射波和反射波及透射杆中的透射波信号。比较这两次测试中的入射杆中的入射波和反射波的差异。即可测定 SHPB 系统的可靠性及其测试精度。其原因如下:当入射杆加载端面为自由面时。入射杆中

的入射波与第一个反射波应波形大小完全相同,且相位差为  $2l_1/c_H$ ; 其中,  $l_1$  为入射杆上应变片到入射杆加载端面(1-1面)的距离; 当加入透射杆后, 由于入射杆与透射杆之间没有试样而且入射杆和透射杆的材料和横截面积完全一样, 应力波可以完全遵照一维波的传播理论, 即入射波从入射杆直接传入透射杆, 透射杆中的第一个透射波的波形大小应与入射杆中的入射波相同, 并其与入射波的相位差为  $(l_1 + l_2)/c_H$ , 且入射杆中没有反射波, 其中,  $l_2$  为透射杆上的应变片到透射杆加载端面(2-2面)的距离,  $l_1, l_2$  见图4. 图5中(a)为没有透射杆时的系统第一个入射波和反射波波形, (b)为含有透射杆时系统的第一个入射波和相应的第一个透射波波形.

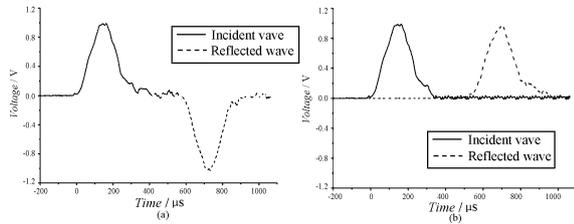


图5 SHPB系统测试信号对比图  
Fig. 5 Test signal comparison of the SHPB system

## 2 实验数据处理

### 2.1 应力波波头及外载荷的确定

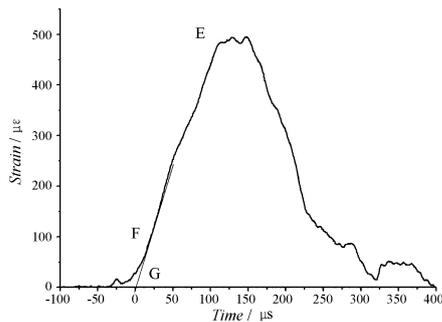


图6 应力波波头的确定  
Fig. 6 The point judged of wave inception

参照文[17]中的波形处理方法, 对于压杆上的信号(图6), 先找出压杆上波的第一个波峰点E, 计算出  $1/5$  波峰值点前沿点F, 找出该前沿点前后附近各10个点的斜率, 求出其平均斜率做为该前沿点处的理论斜率, 作一直线交基线于点G, 点G即为入射波的波头起点, 同理得到反射波透射波的波头位置点, 为了消除在实验过程中的应力不均匀性的影响, 依照公式(4), 将三者迭加, 得出施加

在试样上的载荷曲线.

### 2.2 裂纹起裂时间确定

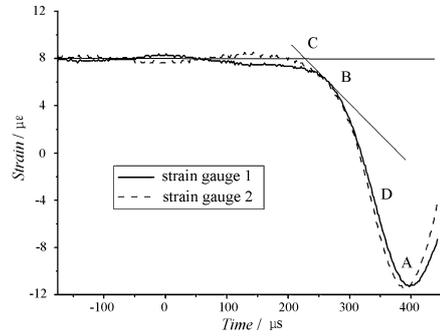


图7 试样上应变片点的拉伸应变时间历程  
Fig. 7 Tensile strain history of specimen

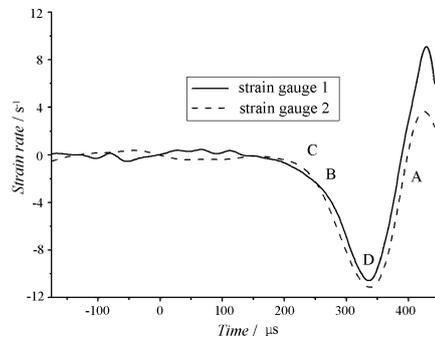


图8 试样应变片点的拉伸应变率时间历程  
Fig. 8 Strain rate history of gauge points on specimen

裂纹起裂时间  $t_f$  的确定依赖试样切槽顶点感受到拉伸应变信号的变化, 仍先找出试样上应变片信号(图7)的波谷点A应变值, 因为试样切槽顶端的应变梯度较大, 并考虑到试样的脆性, 取点A值  $1/8$  的B点作为确定波头的关键点, 在该关键点前后各取10个点, 计算出这21个点的平均斜率值, 作为该关键点的斜率, 做一直线相交于基准线点C处, 点C即为试样应变片感受到外界载荷的起始点, 这样要比取  $1/5$  点的波头有所提前, 更能及时找到拉伸波头的起始点, 从而使裂纹起裂时间更加趋近真实, 从图8可以看出, 试样切槽顶端附近的应变率变化总趋势为先增大, 到达谷底, 在谷底有瞬时震荡, 再迅速上扬, 裂纹扩展结束时间点也应依据应变变化率决定, 由于本实验是在SHPB的高速撞击下完成的, 考虑高速劈裂中试样的惯性效应, 既在边切槽圆盘试样起裂过程中, 试样的切槽顶端附近的应变不断增大, 应变率也增大; 但到边切槽试样起裂完成, 裂纹高速向前扩展时, 由于惯性效应此时试样切槽顶端附近的应变还要继续增

大. 但是应变率已经有所跌落. 所以在高速加载的动态测试中. 试样应变片感受到试样起裂不应该由点 D 确定. 应该由可能产生裂纹附近的应变率来决定. 而不应该完全依赖于应变信号. 因此试样的裂纹起裂时间  $t_f$  应为 C 点开始 D 点结束的时间

段. 依据上述波形处理方法. 以入射波到达入射杆上的应变片的时刻点为时间参照基点. 得到实验中所有应变片信号的时序点见表 1, 表中试样编号 D-0.5-1 中. D 表示动态测试. -0.5 表示无量纲切槽深度. -1 表示分组中的编号.

表 1 实验应变信号时刻点的判定

Table 1 Judgment of strain time points in the experiment

Specimen number	Incident strain wave		Reflected strain wave		Transmitted strain wave		Strain gauge 1		Strain gauge 2	
	Start/ $\mu\text{s}$	Peak/ $\mu\text{s}$	Start/ $\mu\text{s}$	Peak/ $\mu\text{s}$	Start/ $\mu\text{s}$	Peak/ $\mu\text{s}$	Start/ $\mu\text{s}$	End/ $\mu\text{s}$	Start/ $\mu\text{s}$	End/ $\mu\text{s}$
D-0.5-1	0	177.5	468	640.5	461.5	639	239	426	232.5	419
D-0.5-2	0	180.5	478	654.5	470	640.5	238.5	420	234.5	416
D-0.5-3	0	183	454	633	453.5	626.5	237	406	237.5	406
D-0.5-4	0	176	460	632	450	626	238.5	407.5	237.5	406
D-0.5-5	0	174.5	450.5	620	475	642.5	242	423	235	416
D-0.6-1	0	171.5	459.5	630	453.5	605	238	407	--	--
D-0.6-2	0	175.5	453.5	624	453.5	589	248	415	241	408
D-0.6-3	0	174	454.5	622	451.5	605.5	244.5	420.5	243.5	419
D-0.6-4	0	169.5	452.5	627	452	591.5	244.5	407.5	242.5	405
D-0.6-5	0	169.5	454.5	624	449	608.5	240	395	249	404
D-0.7-1	0	171.9	454.5	626	446.5	578.4	246.5	397	249.5	400
D-0.7-2	0	193	451.5	644.5	469.5	632.5	247.5	395	249.5	397
D-0.7-3	0	181.5	455	631.5	472	623.5	231.5	390	230.5	389
D-0.7-4	0	183	459	628	457	600	247	385.5	249	387
D-0.7-5	0	173.5	453.5	617	464	607.5	257	403.5	243	389
D-0.8-1	0	166.5	450.5	627	458	594.5	253	377.5	253	377
D-0.8-2	0	180	453	630.5	455.5	605.5	257.5	384	249.5	376
D-0.8-3	0	174.2	453.2	627	456.5	590.7	254.7	375.7	253.7	374
D-0.8-4	0	188.5	452.5	645	456	584.5	247	371	258	382
D-0.8-5	0	171	454	629.5	461.5	587	234.5	356.5	273.5	395.5

2.3 动态断裂韧度  $K_{I,d}$  的计算

在裂尖区域离裂纹顶点距离为  $r$  的点的位移公式为:

$$u = \frac{K_I}{2G\sqrt{r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) [\kappa - 1 - 2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)] \quad (5)$$

$$v = \frac{K_I}{2G\sqrt{r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) [\kappa + 1 + 2\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)] \quad (6)$$

其中  $G$  为剪切模量,  $\kappa = (3 - \mu)/(1 + \mu)$ .  $\kappa = 3 - 4\mu$ . 本文取平面应变计算模型,  $\mu$  为材料的泊松比.  $\theta$  为该点到裂尖之间的射线与裂纹延长线方向之间的夹角.

裂尖周围采用三角形四分之一奇异单元. 图 9 为该奇异单元的示意图.  $O$  点为裂尖.  $OA$  为裂纹面上奇异单元的一条边.  $r$  为奇异单元的边长.  $B$  为离裂尖四分之一边长处. 计算出劈裂加载下该点在垂直于裂纹面方向即  $\theta = \pi$  的位移为  $v$  的时间历程; 则裂纹顶点的应力强度因子时间历程可以表示如下:

$$K_I(t) = \sqrt{2\pi} \frac{2G}{1 + \kappa} \frac{8v(t) \Big|_B - v(t) \Big|_A}{3\sqrt{r}} \quad (7)$$

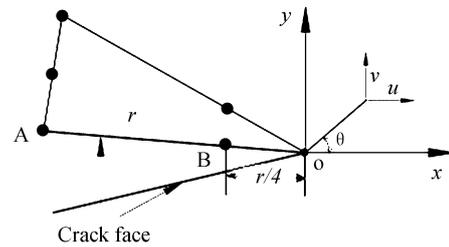


图 9 裂纹面上的 1/4 奇异单元

Fig. 9 Quarter-point singular element on crack tip

对文[18]中静态下花岗岩边切槽圆盘数据做了验证. 计算的结果和该文中结果的最大相对误差为 3%. 然后对中心裂纹有限宽板受阶跃冲击载荷作用下的应力强度因子时间历程曲线<sup>[19]</sup>进行了验证. 得到与 Itou<sup>[20]</sup> 几乎一样的结果. 整条曲线中最大相对误差为 5%. 对矩形截面的双臂梁试样尚无简化模型

的理论结果可以比较. 起裂动态断裂韧度  $K_{I_d}$  就是起裂时间  $t_f$  对应的动态应力强度因子  $K_I(t)$  的值.

### 2.4 加载速率的计算

加载速率定义为裂纹尖端应力强度因子的时间变化率( $\dot{K}$ ). 试样从受到外界加载到试样裂纹起裂的裂纹起裂时间为  $t_f$ . 试样的动态起裂断裂韧度为  $K_{I_d}$ . 则实验的加载速率  $\dot{K}$  由下式得到:

$$\dot{K} = \frac{K_{I_d}}{t_f} \tag{8}$$

## 3 实验结果分析

### 3.1 试样劈裂作用分析

试样在高速加载下被劈裂成两半. 典型的试样破坏模式见图 10.

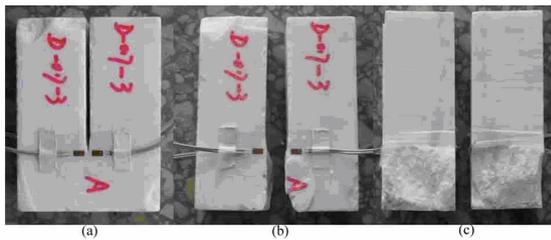


图 10 试样的破坏模式(a)完整,(b)破裂,(c)断裂面

Fig. 10 The failure pattern of specimen (a) intact,(b)broken,(c) fracture area

我们还做了加载速度为 0.05mm/min 的矩形双臂梁静态断裂测试. 特将动静态下试样断面的电镜扫描图做一比较. 图 11、12 为采用 SHPB 高速率加载下试样断面部分图. 作为对比. 图 13、14 为静态加载下矩形双臂梁试样断裂相应位置的断面图. 图 11 和 13 为试样断裂韧带的前部区域即切槽顶点线附近区域. 从图 11 和图 13 中看出来. 该区都有较大的域凹凸起伏. 并伴有棱状突起. 蜂窝状花样突出. 但图 11 中的凹凸状况明显大于图 13. 即试样均表现出明显的拉伸断裂特征. 但动态下的断裂面比静态下的断裂界面表现出更为粗糙; 并且两者都有别于由剪切破坏面的明显特征<sup>[21]</sup>. 表现出明显的由于受到拉伸而破坏的特征. 属于拉伸破坏区域<sup>[22]</sup>. 图 12 和图 14 为试样断裂韧带尾部即试样与后基座接触面附近区域. 从图 12 和图 14 中可以看出. 试样与后基座接触线棱边区域有明显的压缩破坏区域. 且有明显

拉压台阶过渡. 整个压缩小区域只占整个区域的 1/5. 且除去该区域. 断裂韧带上又表现出明显的拉伸破坏.

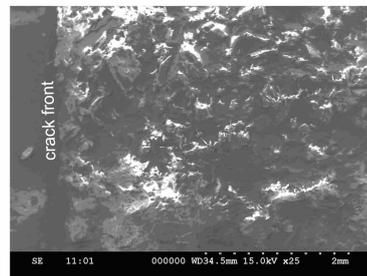


图 11 动态断裂韧带切槽顶端附近区域

Fig. 11 Dynamic fracture area near the crack front of the ligament

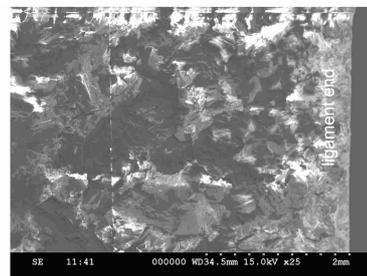


图 12 动态断裂韧带尾部附近区域

Fig. 12 Dynamic fracture area at the tail of the ligament

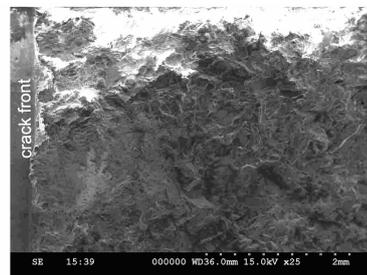


图 13 静态断裂韧带切槽顶端附近区域

Fig. 13 Static fracture area near the crack front of the ligament

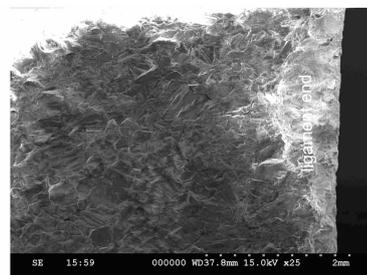


图 14 静态断裂韧带尾部附近区域

Fig. 14 Static fracture area at the tail of the ligament

### 3.2 断裂韧度的计算结果

边切槽大理岩圆盘试样在不同加载率下的动态断裂韧度见表 2.

表 2 矩形双臂梁试样动态断裂韧度的计算结果

Table 2 The calculation results of  $K_{Id}$  using RDB specimen

Specimen number	Crack initiation time / $\mu\text{s}$	The voltage at crack initiation time			Maximum load/kN	Loading rate/ $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$	Dynamic fracture toughness/ $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$
		Incident wave/V	Reflected wave/V	Transmitted wave/V			
D-0.5-1	186.5	1.231	-0.641	0.362	785.59	$1.37 \times 10^4$	2.548
D-0.5-2	181.5	1.292	-0.775	0.376	736.06	$1.32 \times 10^4$	2.387
D-0.5-3	169	1.253	-0.649	0.272	722.54	$1.39 \times 10^4$	2.344
D-0.5-4	169	1.306	-0.568	0.326	876.59	$1.68 \times 10^4$	2.843
D-0.5-5	181	1.279	-0.634	0.348	818.48	$1.47 \times 10^4$	2.655
D-0.6-1	165	1.062	-0.524	0.243	643.41	$1.60 \times 10^4$	2.643
D-0.6-2	167	1.085	-0.459	0.212	691.71	$1.70 \times 10^4$	2.842
D-0.6-3	176	1.060	-0.490	0.214	645.96	$1.51 \times 10^4$	2.654
D-0.6-4	163	1.050	-0.458	0.162	622.14	$1.57 \times 10^4$	2.556
D-0.6-5	155	1.097	-0.516	0.187	633.11	$1.68 \times 10^4$	2.601
D-0.7-1	150.5	0.734	-0.394	0.142	397.62	$1.57 \times 10^4$	2.361
D-0.7-2	147.5	0.745	-0.324	0.156	475.02	$1.91 \times 10^4$	2.820
D-0.7-3	158.5	0.715	-0.312	0.166	469.08	$1.76 \times 10^4$	2.785
D-0.7-4	138	0.700	-0.310	0.188	476.09	$2.05 \times 10^4$	2.827
D-0.7-5	146	0.794	-0.390	0.177	478.07	$1.94 \times 10^4$	2.838
D-0.8-1	124	0.430	-0.158	0.055	269.69	$2.27 \times 10^4$	2.817
D-0.8-2	126.5	0.410	-0.185	0.032	211.75	$1.75 \times 10^4$	2.212
D-0.8-3	120	0.455	-0.193	0.027	238.79	$2.08 \times 10^4$	2.494
D-0.8-4	124	0.428	-0.185	0.038	231.45	$1.95 \times 10^4$	2.417
D-0.8-5	122	0.466	-0.182	0.028	257.74	$2.21 \times 10^4$	2.692

### 4 结论

在 SHPB 高速撞击试样切槽端面的作用下, 矩形双臂梁试样的切槽前沿产生拉伸加载断裂, 可以得到 I 型(张开型)岩石动态断裂韧度  $K_{Id}$ 。图 15 可以看出: 同种切槽深度比的试样动态断裂韧度的测试数据较为集中, 随着切槽的加深, 动态断裂韧度没有明显的变化, 说明本试样的测试是成功的。

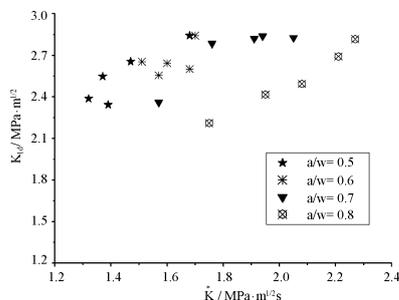


图 15 加载速率和动态断裂韧度值

Fig. 15 The loading rate  $\dot{K}$  and corresponding value of  $K_{Id}$

### 参 考 文 献

1 胡时胜. Hopkinson 压杆实验技术的应用进展. 实验力

学, 2005, 20(4): 589 ~ 594 (Hu Shisheng. The application development of experimental technique of Hopkinson pressure bar. *Journal of Experimental Mechanics*, 2005, 20(4): 589 ~ 594 (in Chinese))

2 陈德兴, 胡时胜, 张守保, 巫绪涛, 余泽清. 大尺寸 Hopkinson 压杆及其应用. 实验力学, 2005, 20(3): 398 ~ 402 (Chen Dexing, Hu Shisheng, Zhang Shoubao, Wu Xutao, Yu Zeqing. Large dimension Hopkinson pressure bar and its application. *Journal of Experimental Mechanics*, 2005, 20(3): 398 ~ 402 (in Chinese))

3 陈大年, 王涣然, 陈建平, 俞宇颖, 刘国庆. 高加载率 SHPB 试验分析原理的再研究. 工程力学, 2005, 22(1): 82 ~ 87 (Chen Danian, Wang Huanran, Chen Jianping, Yu Yuying, Liu Guoqing. Re-examination of split Hopkinson pressure bar analysis at high loading rate. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(1): 82 ~ 87 (in Chinese))

4 钟卫洲, 罗景润, 徐伟芳, 郭历伦. 三点弯曲试样动态应力强度因子计算研究. 实验力学, 2005, 20(4): 601 ~ 604 (Zhong Weizhou, Luo Jingrun, Xu Weifang, Guo Lilun. A computational study on dynamic stress intensity factor of three-point bending specimen. *Journal of Experi-*

- mental Mechanics*, 2005, 20(4): 601 ~ 604 (in Chinese))
- 5 李伟, 谢和平, 王启智. 大理岩动态拉伸强度及弹性模量的 SHPB 实验研究. 实验力学, 2005, 20(2): 200 ~ 206 (Li Wei, Xie Heping, Wang Qizhi. Experimental study for dynamic tensile strength and elastic modulus of marble using SHPB. *Journal of Experimental Mechanics*, 2005, 20(2): 200 ~ 206 (in Chinese))
- 6 ISRM Testing Commission (coordinator: Ouchterlony F.). Suggested method for determining mode I fracture toughness of Rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1988, 25: 71 ~ 96
- 7 ASTM Task Group E24.01.04 (chairman: Brown KR). Standard Test Method for Plane-Strain (Chevron-Notched) Fracture Toughness of Metallic Materials (ASTM E 1304), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989
- 8 Zhang, ZX. Kou, SQ. Jiang, LG. Lindqvist, PA. Effects of loading rate on rock fracture: fracture characteristics and energy partitioning. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(5): 745 ~ 762
- 9 Hanson, JH. Ingraffea, AR. Compression loading applied to round double beam fracture specimens. I: Application to materials with large Characteristic Lengths. *Journal of Testing and Evaluation*, 2002, 30(6): 508 ~ 514
- 10 Hanson, JH. Ingraffea, AR. Compression loading applied to round double beam fracture specimens. II: Derivation to geometry factor. *Journal of Testing and Evaluation*, 2002, 30(6): 515 ~ 523
- 11 沈明荣. 岩体力学. 上海: 同济大学出版社, 1999: 44 (Shen Mingrong. *Rock Mass Mechanics*. Shanghai: Tongji University Press, 1999: 44 (in Chinese))
- 12 谢和平, 陈忠辉. 岩石力学. 北京: 科学出版社, 2004: 100 (Xie Heping, Chen Zhonghui. *Rock Mechanics*. Beijing: Science Press, 2004: 100 (in Chinese))
- 13 Frew, DJ. Forestal, MJ. Chen, W. A split Hopkinson pressure bar technique to determine compressive stress-strain data for rock materials. *Experimental Mechanics*, 2001, 41(4): 40 ~ 46
- 14 Lifshitz, JM. Leber, H. Data processing in the split Hopkinson pressure bar tests. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 33(23): 3363 ~ 3375
- 15 Tedesco, JW. Ross, CA. Brunair, RM. Numerical simulation of high strain rate concrete compression tests. *Computers & Structures*, 1994, 51(1): 65 ~ 77
- 16 刘剑飞, 胡时胜, 王道荣. 用于脆性材料的 Hopkinson 压杆动态实验新方法. 实验力学, 2001, 16(3): 283 ~ 290 (Liu Jianfei, Hu Shisheng, Wang Daorong. A novel experimental method of Hopkinson pressure bar system for brittle material. *Journal of Experimental Mechanics*, 2001, 16(3): 283 ~ 290 (in Chinese))
- 17 刘德顺, 李夕兵. 冲击机械系统动力学. 北京: 科学出版社, 1999: 42 (Liu Deshun, Li Xibing. *Mechanical Impact Dynamics*. Beijing: Science Press, 1999: 42 (in Chinese))
- 18 Donovan, JG. Karfakis, MG. Adaptation of a simple wedge test for the rapid determination of mode I fracture toughness and the assessment of relative fracture resistance. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(4): 659 ~ 701
- 19 范天佑. 应用断裂动力学基础. 北京: 北京理工大学出版社, 1992: 35 (Fan Tianyou. *Foundation of Applied Fracture Dynamics*. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1992: 35 (in Chinese))
- 20 Itou S. Transient response of a finite crack in a strip with stress-free edges. *Journal of Applied Mechanics*, 1980, 47(3): 801 ~ 805
- 21 王桂尧, 孙宗顺, 徐纪成. 岩石压剪断裂机理及强度准则的探讨. 岩土工程学报, 1996, 18(4): 68 ~ 74 (Wang Guiyao, Sun Zongqi, Xu Jicheng. Investigation of the compression-shear fracture mechanism and strength criteria in rock. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 18(4): 68 ~ 74 (in Chinese))
- 22 张宗贤, 俞洁. 岩石动静态断裂面的微观特征. 中国有色金属学报, 1995, 5(4): 21 ~ 24 (Zhang Zongxian, Yu Jie. Micro characterization of static and dynamic fracture surface in rock. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1995, 5(4): 21 ~ 24 (in Chinese))

## TEST ON DYNAMIC FRACTURE TOUGHNESS OF ROCK USING RECTANGULAR DOUBLE BEAM SPECIMEN\*

Li Zhanlu<sup>1</sup> Wang Qizhi<sup>1,2</sup>

(1. Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract** According to the static fracture toughness test method using short bar specimen presented by both American Society for Testing and Materials (ASTM) and International Society for Rock Mechanics (ISRM), the rectangular double beam (RDB) specimen for dynamic rock fracture toughness ( $K_{Id}$ ) test was introduced. Split Hopkinson pressure bar (SHPB) was used to get the tensile loading at the crack tip of specimen by incident bar impacting the end surface of the specimen. Strain gauges were attached on the incident bar and transmitter bar to get the strain voltage change of the incident wave, reflection wave and transmission wave, and strain gauges were also attached near the crack tip of the specimen to get the time interval from the beginning of loading to the crack initiation. Then the incident wave, reflection wave and transmission wave were used to calculate the loading history, which was put into the finite element model to calculate the history of the stress intensity factor  $K_I$ , and the dynamic fracture toughness ( $K_{Id}$ ) was determined with the crack initiation time. The dynamic fracture toughness of marble was  $2.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  when the loading rate was  $1.68 \times 10^4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$ .

**Key words** dynamic fracture toughness, split Hopkinson pressure bar, rectangular double beam

## 《动力学与控制学报》征稿启事

经国家新闻出版署批准,由中国力学学会、湖南大学共同主办的《动力学与控制学报》于2003年创刊,编辑部设在湖南大学.该刊为季刊,中文版,国际标准16开本,国内刊号:CN 43-1409/02,国际刊号:ISSN 1672-6553.

《动力学与控制学报》是一般力学与控制学科的学术性刊物,它遵循理论与实际并重、理论与工程实际紧密结合的方针,主要刊登该学科各个分支及其相关领域具有创造性的能够反映学科水平的理论、实验和应用研究论文,并适量刊登综述性专题论文,以促进科学的发展.读者对象主要为从事动力学与控制以及相关工作的科研与工程技术人员、高等院校师生等.征稿要求与注意事项:

1. 本刊采用网络接收、送审、处理稿件.简体字及科技名词术语以国家正式公布的为准.插图放在文中相应位置,图题用中文书写同时附英文译文,图中文字用英文书写.投稿信箱:dlxykzxb@hnu.cn 或 dlxykzxb@yahoo.com.cn

2. 来稿要求内容充实、论点明确、数据可靠、逻辑严密、文字图表精练,论文一般不得超过6页.稿件需附英文题目、作者姓名(按汉语拼音书写)、工作单位(详细至系、所)的英文译名、英文摘要和3~5个关键词.凡属国家和省(部)级各类基金资助项目的论文需在文稿首页说明,并注上项目批准号,基金资助项目要附英文译文.

3. 采用国际单位制,文中的量和单位一律以GB3102.1-86~GB3102.13-86为准.稿中外文字母和符号的大小写、正斜体、上下角、黑白体应区分明显.图序、图注、物理量、单位、坐标值要完整.表格用三线表,表序、表题、物理量、单位要完整.

4. 参考文献置于文末,录入项目力求齐全(凡引中文参考文献均需后附英译文),未公开发表的文献勿列入,以编号1,2,……为序,格式如下:

期刊:作者.题目.刊名,年份,卷(期):页

书籍:作者.题目.出版地:出版社,年份.页

5. 稿末要注明真实姓名、工作单位、职称与职务、E-mail、电话及详细通讯地址和邮政编码.

6. 来稿请勿一稿两投,如曾在会议上宣读或已在不公开发行的报刊文集上发表,务请说明.稿件自收稿之日起超过半年没有收到录用或退稿通知,作者有权自行处理,但需通知编辑部.

7. 凡被本刊录用的论文,版权归《动力学与控制学报》编辑部所有.编辑部有权将期刊内容输入光盘版、网络版和国际、国内检索及文献数据库.

编辑部地址:湖南省长沙市湖南大学逸夫楼东203室

邮编:410082

电话:0731-8822722

传真:0731-8822722

E-mail:dlxykzxb@hnu.net.cn 或 dlxykzxb@yahoo.com.cn

编辑部网址: <http://jdc.hnu.net.cn>