

文章编号: 1001-1455(2002)02-0111-08

# 冲击载荷下纤维复合材料裂纹起裂的实验研究

刘希国<sup>1</sup>, 蒋元兴<sup>2</sup>, 赵红平<sup>1</sup>, 吴永礼<sup>1</sup>, 张双寅<sup>1</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080;

2. 中国运载火箭技术研究院材料与工艺研究所, 北京 100076)

摘要: 采用 SHTB 技术对纤维增强复合材料裂纹动态起裂行为进行了实验研究。使用应变片方法确定了裂纹的起裂时间, 结合有限元数值模拟得到了裂纹的起裂韧性; 同时观察了裂纹在冲击载荷作用下的裂纹起裂和扩展方式, 分析了纤维的铺层角度对裂纹起裂和扩展的影响。

关键词: 纤维复合材料; 裂纹的动态起裂; 冲击; SHTB 实验 \*

中图分类号: O347.3 文献标识码: A

## 1 引言

纤维增强复合材料以其特有的高比强度和高比刚度广泛应用于军事和民用结构中, 特别在航空、航天、汽车、火车等运载工具中, 其承受冲击载荷的机会很高。由于纤维复合材料在加工、运输和使用中有时不可避免会产生诸如裂纹一类的损伤, 因此有必要研究裂纹在动态载荷作用下的起裂行为。由于纤维复合材料的复杂性, 人们对其动态断裂力学性能的研究还很少, 特别对裂纹在高加载率下的动态起裂行为还知之甚少。目前, 较多的研究集中在低速冲击下 I 型和 II 型层间裂纹的动态断裂韧性的测试方面<sup>[1~3]</sup>, 对高速冲击载荷作用下纤维复合材料的 I 型和 II 型裂纹的起裂行为了解不多。

在本文中, 我们将对高加载率下纤维复合材料平面应力问题 I 型裂纹动态起裂行为进行实验研究。采用实验测量和有限元数值模拟相结合的办法, 确定裂纹起裂的动态断裂韧性。

## 2 实验设备

在冲击加载实验设备中, 分离式霍普金森拉杆 (SHTB) 技术是目前研究高加载率下材料动态力学性能的常用试验设备, 其加载率可高达  $10^8 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$ 。我们采用中科院力学研究所的 SHTB 实验设备, 该设备配备了 CS20000 动态测量分析系统, 信号显示和处理都由计算机完成, 图 1 为所用的 SHTB 实验设备示意图。

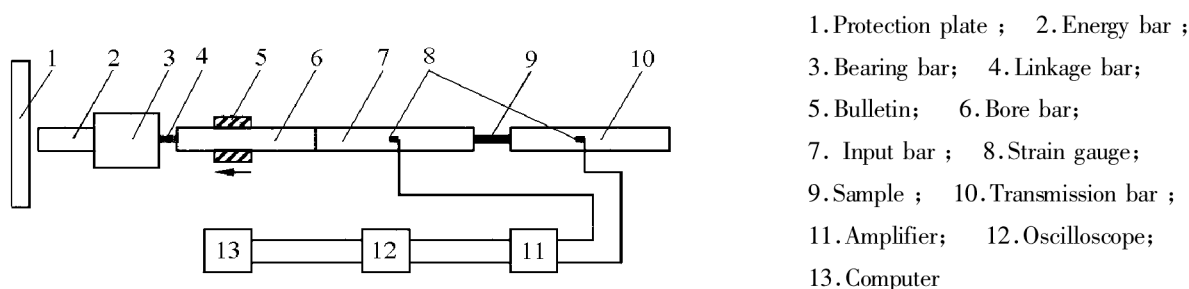


图 1 直拉式 Hopkinson 拉伸杆装置示意图

Fig.1 Schematic configuration of straight Hopkinson tensile bar

\* 收稿日期: 2001-02-28; 修回日期: 2001-07-23

作者简介: 刘希国 (1965—), 男, 博士, 副研究员。

### 3 实验方法

#### 3.1 试 件

饶世国<sup>[4]</sup>曾对用 SHTB 技术表征和测试材料动态断裂韧性的实验方法进行研究,王从约<sup>[5]</sup>则对 SHTB 实验所用试件的尺寸匹配问题进行分析。我们根据它们的研究结果确定实验所用试件的尺寸。

图 2 为实验所用试件的几何形状。试件为单边裂纹试件,裂纹长  $a=7.5\text{mm}$ ,由线切割机床加工而成,裂纹宽  $0.2\text{mm}$ 。图中虚线以外区为试件与杆的粘接区。杆的端部开一深槽,将试件两面和槽内壁涂上抗冲击胶粘剂胶液,插入槽内后固化待用。试件厚度  $\tau=1.45\text{mm}$ ,由 8 层预浸树脂无纬碳/环氧布对称铺排,高温加压固化而成。试件所用的材料为 T300/648,其静态基本性能常数见表 1。

Harding 等<sup>[6]</sup>的实验研究表明,单向碳纤维增强环氧复合材料的模量是率不敏感的,因此我们计算所用的基本性能常数采用静态值。

实验中,对以下两种单向板和三种层合板试件进行了冲击实验: $0^\circ$ 和  $90^\circ$ 单向板、 $[30_2/-30_2]_s$ 、 $[45_2/-45_2]_s$ 和 $[60_2/-60_2]_s$ 层合板。角度是指纤维与裂纹面的交角,即图 6(a)中的  $\theta$  角。

#### 3.2 裂纹起裂时间的确定

采用应变片方法确定裂纹的起裂时间。根据 Dally<sup>[7,8]</sup>和林君山等<sup>[9]</sup>对应变片测定各向同性材料裂纹动态起裂时间的研究结果,结合纤维复合材料的特点,确定如下方法:在裂尖附近粘贴一应变片(见图 2),记录应变片的测量信号,由于裂纹起裂时的卸载波与加载波的叠加将引起信号的突变,因此可根据信号的突变点计算裂纹的起裂时间。计算公式为

$$t_f = t - r/c_s \tag{1}$$

式中: $r$ 为应变片到裂尖的距离; $t_f$ 为裂纹起裂时间; $t$ 为峰值突降点所对应的时间,由实验测得; $c_s$ 为应力波在试件中的传播速度。

需要注意的是, $r$ 应该足够大,以避免裂尖奇异区对应变片的破坏,但又不能离裂尖太远,否则卸载波的传播会带来较大的误差。在实验中,根据经验以及应变片粘贴的方便取  $r=3\text{mm}$ 。第二点需要注意的是,应变片的粘贴方向应该在材料主轴上并且尽量与裂纹的扩展方向垂直。应变片粘贴方式见图 2。图中的纤维方向也是预测的裂纹开裂方向。

图 3 为实验采集的试件上的波形曲线。可以发现,曲线比较光滑,信号突变点很明显,便于确定起裂时间。

### 4 动态应力强度因子的数值模拟计算

#### 4.1 几何模型和初、边值条件

图 4 为计算所用简化的几何模型,模型的初、边值条件如下

表 1 T300/684 复合材料基本性能常数

Table 1 Property constants of composites T300/684		
模量	泊松比	强度
$E_1=137.0/\text{GPa}$		$T_1=1.247/\text{GPa}$
$E_2=9.67/\text{GPa}$	$\nu_{12}=0.32$	$T_2=0.0328/\text{GPa}$
$G_{12}=4.95/\text{GPa}$		$S_{12}=0.062/\text{GPa}$

下标 1 表示材料的纤维方向,2 表示横向。

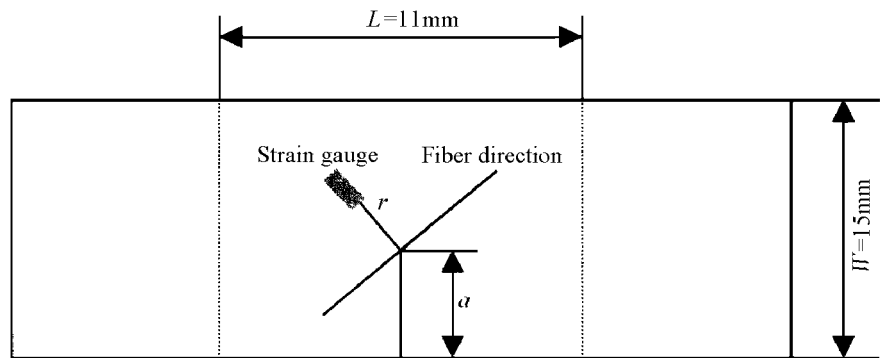


图 2 动态断裂试样示意图

Fig.2 Sample geometry

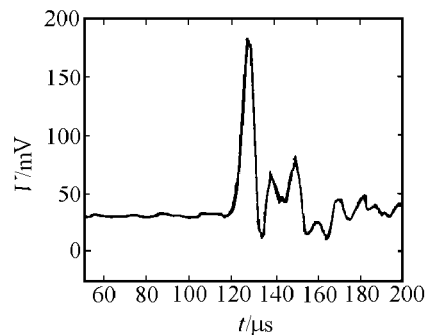


图 3 实验测得的试件上的应力波曲线

Fig.3 Recorded curve of stress wave on the sample

$$\begin{aligned}
 \text{初始条件} \quad & \begin{cases} u(x, y, 0) = 0 & \partial u(x, y, t) / \partial t |_{t=0} = 0 \\ v(x, y, 0) = 0 & \partial v(x, y, t) / \partial t |_{t=0} = 0 \end{cases} & (2) \\
 \text{边界条件} \quad & \begin{cases} \sigma_{xx}(L_1, 0, t) = \sigma(t) & u(L_2, 0, t) = v(L_2, 0, t) = 0 \\ \sigma_{xx}(0, y, t) = \sigma_{xy}(0, y, t) = 0 & -a \leq y \leq 0 \\ \sigma_{yy}(x, \frac{w-a}{2}, t) = \sigma_{xy}(x, \frac{w-a}{2}, t) = 0 & -l_2 \leq x \leq l_1 \end{cases} & (3)
 \end{aligned}$$

式中： $\sigma(t)$ 为试验测得的入射波应力-时间曲线； $w$ 为试件宽度。

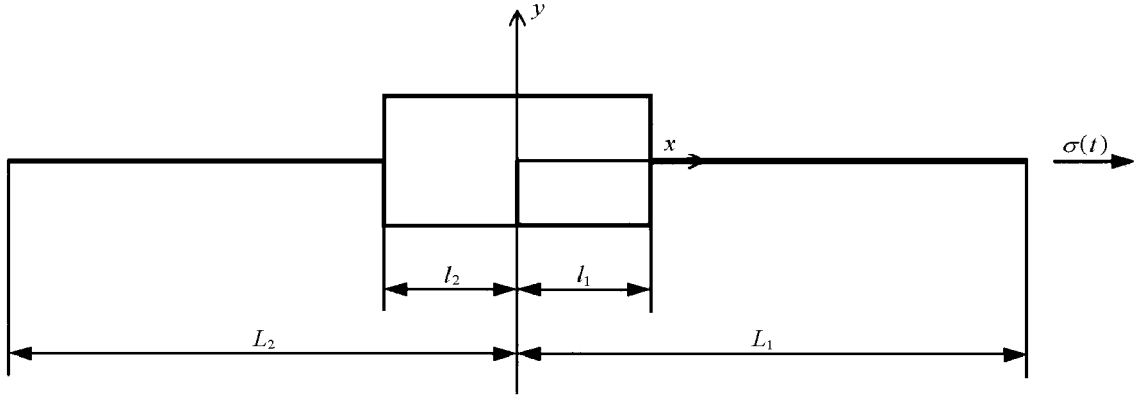


图 4 几何模型  
Fig.4 Geometric model

4.2 有限元模型

实验系统的有限元计算模型包括杆和试件两部分：试件为含裂纹平板，使用二维有限元模型；应力波传导杆为圆柱形杆，采用一维有限元模型；试件与杆的连接段采用混合率进行简化处理。图 5 为有限元模型。

计算采用大型商用有限元程序 ANSYS，用程序提供的 LINK1 二节点线单元模拟输入杆和输出杆。对于单向板试件，采用 PLANE82 八节点面单元；对于层合板试件则采用 PLANE99 八节点层合单元。杆和试件的连接段

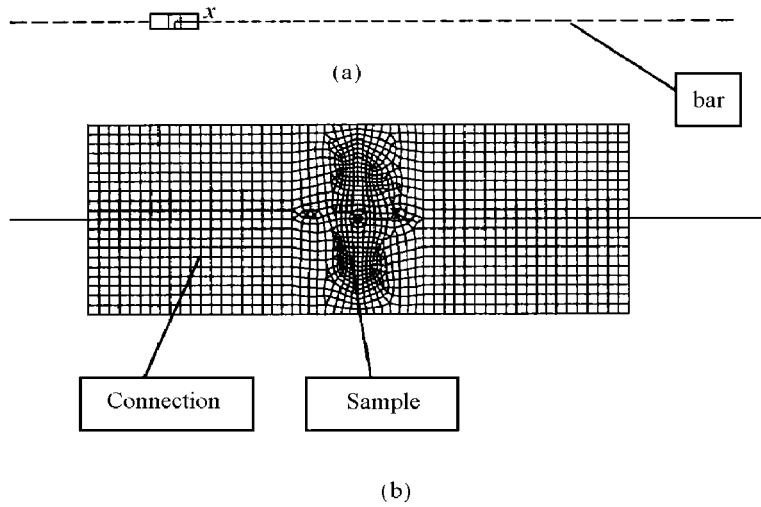


图 5 有限元模型  
Fig.5 Finite element model

采用 PLANE45 四节点面单元，将连接段作为各向同性材料处理，模量和密度按下面的混合率计算

$$Y = Y_b V_b + Y_s V_s \tag{4}$$

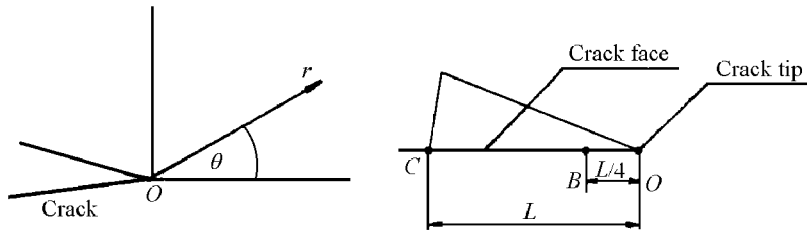
式中： $Y$ 为模量、泊松比和密度； $V$ 为体积分数；下标 b 表示杆，s 表示试件。

为了描述裂尖应力场和应变场的奇异性，裂尖周围采用三角形四分之一点奇异单元。图 6(a)是以裂尖为坐标原点的极坐标系，图 6(b)为裂尖奇异单元示意图， $O$ 点为裂尖， $OC$ 为位于裂纹面上的奇异单元的一条边， $L$ 为奇异单元边长， $B$ 点为离裂尖四分之一边长处节点。应力强度因子的时间历程由节点  $B$  和节点  $C$  的位移根据下式求得<sup>[10]</sup>

$$K_I(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}F_I} \left[ \frac{4U_{\theta}(t)|_B - U_{\theta}(t)|_C}{\sqrt{L}} \right] \tag{5}$$

$$K_{II}(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}F_{II}} \left[ \frac{4U_r(t)|_B - U_r(t)|_C}{\sqrt{L}} \right] \quad (6)$$

式中： $U_\theta(t)|_B$ ,  $U_r(t)|_C$ ,  $U_r(t)|_B$ 和 $U_r(t)|_C$ 分别为图 6(b)中裂纹面上奇异单元角节点  $C$  和离裂尖四分之一边长处边中节点  $B$  在以裂尖为原点的极坐标系中的周向和径向位移,  $L$  为裂纹面上奇异单元的边长,  $F_I$ 和  $F_{II}$ 是与材料性能相关的常数。



(a) 裂尖极坐标系 (b) 裂纹面上的奇异单元  
(a) Coordinate system on crack tip (b) Singular element on crack tip

图 6 裂尖坐标系和奇异单元示意图

Fig.6 Coordinate system on crack tip and singular element near it

## 5 结果与讨论

### 5.1 数值模拟计算结果

图 7 ~ 图 11 为计算的典型应力强度因子时间历程曲线。初期, 当应力波还未传播到裂纹时, 应力强度因子为零, 大约在  $100\mu\text{s}$  左右 ( $99.7 \sim 101.6\mu\text{s}$ ), 曲线开始迅速上升, 达到最大值后开始下降。但是, 在具体的细节方面,  $0^\circ$ 单向板和  $90^\circ$ 单向板的曲

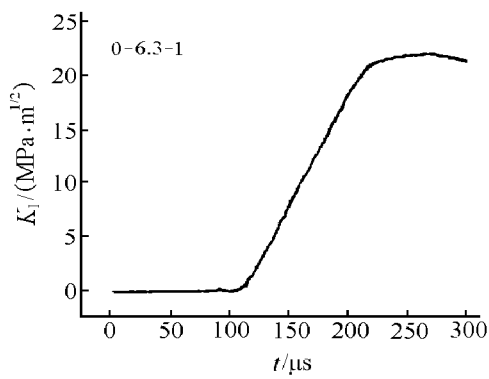


图 7  $0^\circ$ 单向板应力强度因子时间历程曲线

Fig.7 Curve of SIF via time of  $0^\circ$  unidirectional composites

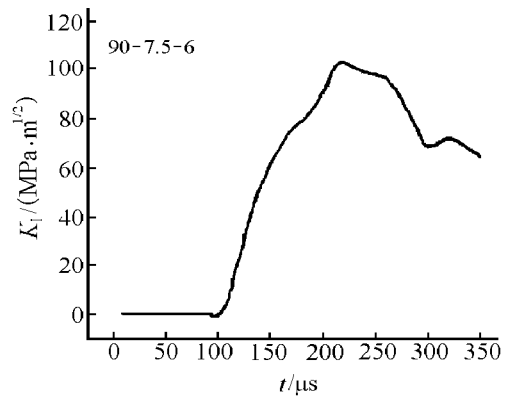


图 8  $90^\circ$ 单向板应力强度因子时间历程曲线

Fig.8 Curve of SIF via time of  $90^\circ$  unidirectional composites

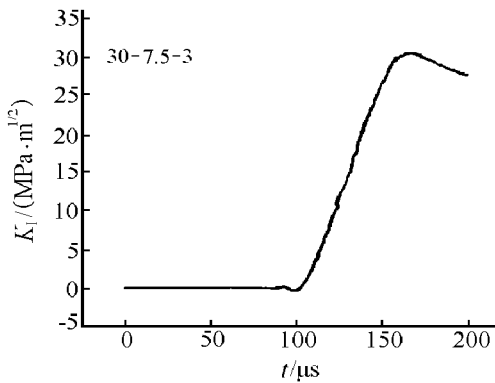


图 9  $[30_2/-30_2]_s$  层合板应力强度因子时间历程曲线

Fig.9 Curve of SIF via time of  $[30_2/-30_2]_s$  laminate

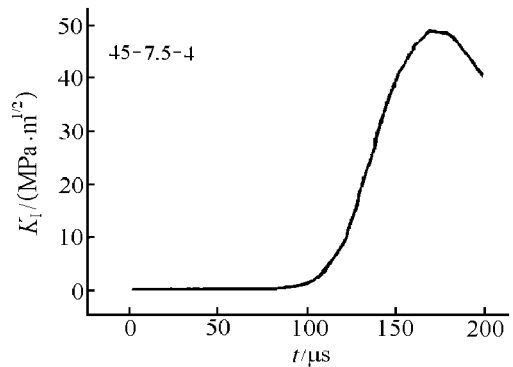


图 10  $[45_2/-45_2]_s$  层合板应力强度因子时间历程曲线

Fig.10 Curve of SIF via time of  $[45_2/-45_2]_s$  laminate

线差别较大： $0^\circ$ 板的曲线没有明显的尖峰，在最大值附近变化缓慢，形成一个平台； $90^\circ$ 板曲线有明显的尖峰，起伏变化剧烈， $90^\circ$ 板的峰值比 $0^\circ$ 试件的峰值大许多。对于三种铺层角的层合板，曲线形状之间的差别不大，但是峰值随着角度从 $30^\circ$ 变到 $60^\circ$ 逐渐增加。 $30^\circ$ 层合板试件的峰值比 $0^\circ$ 单向板试件的大， $60^\circ$ 层合板试件的峰值比 $90^\circ$ 单向板试件的小。

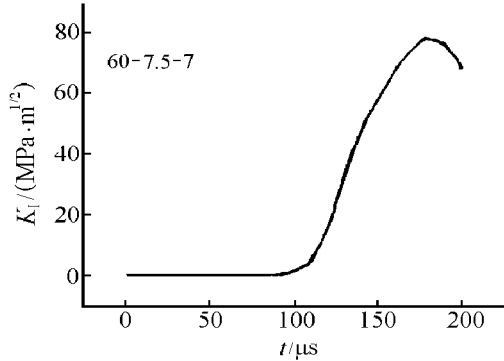


图 11 [60<sub>2</sub>/-60<sub>2</sub>]<sub>s</sub> 层合板应力强度因子  
时间历程曲线  
Fig. 11 Curve of SIF via time of  
[60<sub>2</sub>/-60<sub>2</sub>]<sub>s</sub> laminate

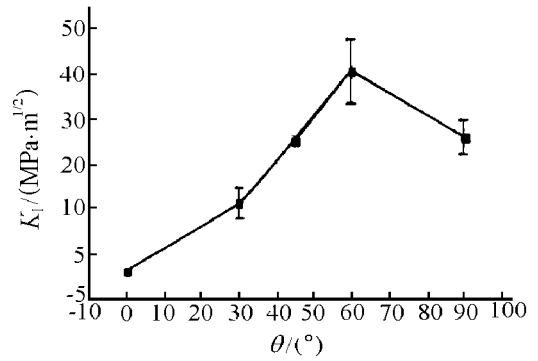


图 12 单向板和层合板的  
起裂韧性  
Fig. 12 Initial fracture toughness of  
unidirectional and laminate plate

### 5.2 实验结果

表 2 列出了从实验中测得的起裂时间以及根据起裂时间从相应的应力强度因子-时间历程曲线确定的起裂时的应力强度因子(起裂韧性)。表中第一列的试件编号说明如下：第一个数字表示纤维与裂纹的夹角，第二个数字表示裂纹长度，第三个数字表示同类试件的序列。例如 90-7.5-3 表示纤维垂直

表 2 实验和计算结果

Table 2 Results of experiments and FEM computation

试件编号	$t_f/\mu\text{s}$	起裂韧性 / (MPa <sup>1/2</sup> ·m <sup>1/2</sup> )	$\dot{K}_I$ / (GPa <sup>1/2</sup> ·m <sup>1/2</sup> /s)	$\bar{K}$ / (GPa <sup>1/2</sup> ·m <sup>1/2</sup> /s)
0-6.3-1	132.5	1.5	145	46
0-5.8-2	117.5	1.1	86	63
平 均		1.30		
90-7.5-4	135.0	29.9	620	854
90-7.5-5	123.5	31.8	1850	1350
90-7.5-6	128.5	35.6	1430	1250
90-7.5-7	138.0	26.5	840	697
平 均		30.95		
±60-7.5-4	159.0	47.3	990	802
±60-7.5-6	141.5	37.5	1340	904
±60-7.5-7	144.0	51.7	1290	1175
平 均		45.50		
±45-7.5-3	144.0	29.1	700	660
±45-7.5-4	148.0	31.0	1000	646
±45-7.5-7	139.0	29.8	990	764
平 均		29.96		
±30-7.5-2	132.5	14.9	799	458
±30-7.5-3	135.0	17.4	660	497
±30-7.5-5	145.0	20.2	470	448
±30-7.5-6	130.5	12.5	710	410
平 均		16.25		

裂纹, 裂纹长度为 7.5mm 的第三号试件。如果最前面带有 ± 号, 表示为层合板, 例如 ±30-7.5-4 表示 4 号裂纹长度为 7.5mm 的  $[30_2/-30_2]_s$  层合板试件。

对于  $0^\circ$  单向板, 因为纤维平行于裂纹方向, 用线切割机床加工时, 切割用钼线沿着纤维方向走线, 而这个方向的导电性能不好, 切割时很困难, 并且出现烧坏试件的现象, 而选择的试件是烧伤程度较轻的试件。因此, 由  $0^\circ$  板测试的断裂韧性将偏小。

表 2 的第二列为起裂时间。表 2 的第三列为根据裂纹起裂时间从应力强度因子时间历程曲线确定的起裂韧性。

表 2 第四列瞬时应力强度因子率由起裂时刻相邻两点的应力强度因子差值与相应的时间差值的比值计算得到, 它表示起裂时刻的应力强度因子变化率。第五列平均应力强度因子率由起裂时刻的应力强度因子除以起裂时间与应力波到达裂纹面时间的差值, 它表示应力强度因子从开始上升到起裂时的平均变化率。从表中可以看出绝大多数的瞬时应力强度因子率都大于平均应力强度因子率, 只有一个例外是试件 90-7.5-4, 从其应力强度因子时间历程曲线看, 起裂点位于曲线上部已接近峰值, 而其余的试件起裂点位于曲线的下部或中部。

从表 2 中可以看出, 加载率随着纤维角的增加而增加。因为, 纤维角度增大, 意味着波传播方向的刚度增加, 加载率应该增加。

从表 2 中可以看见, 除了  $[45_2/-45_2]_s$  层合板, 起裂时刻的应力强度因子的数据分散性比较大, 但仍能说明随着交叉对称铺层层合板的铺层角度数的增加, 裂纹起裂时的应力强度因子也随着增加的基本变化趋势。 $90^\circ$  单向板起裂韧性比  $[60_2/-60_2]_s$  层合板的起裂韧性小。图 12 将  $0^\circ$  和  $90^\circ$  单向板与层合板的结果绘入同一张图, 图中横坐标  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$  分别对应  $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$  和  $\pm 60^\circ$  对称铺层层合板。

### 5.3 试件断口分析

$0^\circ$  单向板的裂纹起裂方向为  $0^\circ$ , 裂纹为自相似扩展;  $90^\circ$  单向板的裂纹起裂方向为  $90^\circ$ , 裂纹扩展方向垂直预制裂纹方向, 裂纹的扩展方向都是沿着纤维方向。

层合板的断裂比单向板的断裂方式复杂得多。图 13 为试件断口照片, 从上到下分别为  $[30_2/-30_2]_s$  和  $[45_2/-45_2]_s$  层合板、 $90^\circ$  单向板和  $[60_2/-60_2]_s$  层合板。

为了更清楚说明层合板的断裂方式, 图 14 绘出了  $[30_2/-30_2]_s$  和  $[45_2/-45_2]_s$  层合板的断裂方式。图中第一层为  $-30^\circ$  或  $-45^\circ$  铺层, 第二层为  $30^\circ$  或  $45^\circ$  铺层, 图中的短线表示纤维的铺排方向。从图中可以看到, 断裂后的左半片试件露出了纤维方向与第一层不同的第二层, 因此可判断第一层裂纹的扩展方向为  $-30^\circ$  或  $-45^\circ$ , 第二层裂纹的扩展方向为  $30^\circ$  或  $45^\circ$ 。裂纹扩展后的不同角度层之间分层脱开。简而言之, 有两种断裂方式: 裂纹沿纤维扩展和各层之间分层脱开。

图 15 为断开后的  $[60_2/-60_2]_s$  层合板示意图, 第一层为  $-60^\circ$  层, 第二层为  $60^\circ$  层。与图 14 不同的是第一层裂纹从裂尖沿着平行于纤维的方向朝两头扩展, 在试件的两个半片都露出了纤维方向与第一层不同的第二层, 因此可以得出第一层扩展方向为  $-60^\circ$  和  $120^\circ$  的结论, 第二层的裂纹扩展方向为  $60^\circ$ 。除了这种断裂方式外, 在内层, 还有局部纤维发生断裂的现象。简而言之, 断裂方式为: 裂纹沿纤维方向向两头扩展、分层脱开和局部纤维断裂。

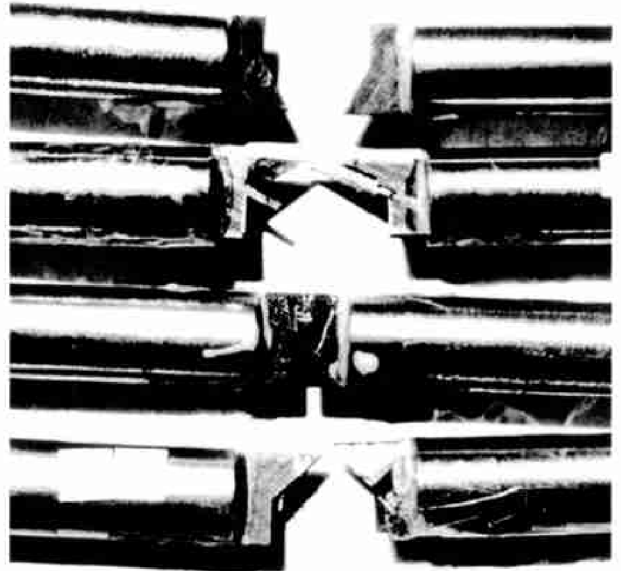


图 13 试件拉断后的断口照片

Fig. 13 Photo of the fractured samples

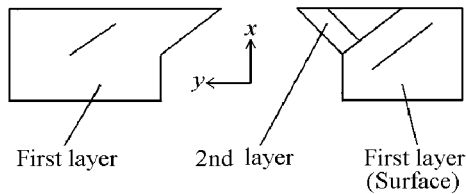


图 14 断开后的  $[30_2/-30_2]_s$  和  $[45_2/-45_2]_s$  层合板示意图

Fig. 14 Schematic diagram of fractured sample of  $[30_2/-30_2]_s$  and  $[45_2/-45_2]_s$  laminate

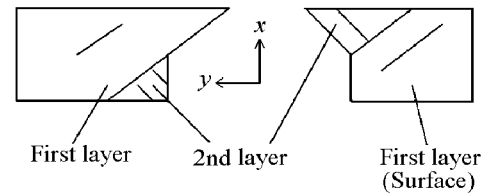


图 15 断开后的  $[60_2/-60_2]_s$  层合板示意图

Fig. 15 Schematic diagram of fractured sample of  $[60_2/-60_2]_s$  laminate

## 6 结 论

在使用 SHTB 技术研究纤维复合材料动态裂纹起裂行为实验中, 在试件上粘贴应变片测量裂纹起裂时间是一种简便可行的办法, 清晰的应力波突变点使得起裂时间的判断简单易行。

通过有限元数值模拟结合试验确定起裂时间从而确定了裂纹的起裂韧性。 $90^\circ$  单向板的起裂韧性比  $0^\circ$  单向板的起裂韧性强, 对于  $\pm\alpha$  角度对称铺层的层合板, 随着铺层角从  $30^\circ$  增加到  $60^\circ$ , 起裂韧性随角度增大而增加。

$0^\circ$  试件的裂纹以自相似方式扩展,  $90^\circ$  试件裂纹沿  $90^\circ$  方向扩展。层合板的裂纹扩展与铺层角度有关, 对于  $[30_2/-30_2]_s$  和  $[45_2/-45_2]_s$  层合板, 最终的断裂形式有裂纹沿着纤维方向单向扩展, 层合板各铺层之间的分层脱开。对于  $[60_2/-60_2]_s$  层合板, 裂纹沿纤维方向双向扩展, 各层分层脱开以及内层铺层局部纤维断裂。

## 参考文献:

- [ 1 ] Aliyu A A, Daniel I M. Effects of Strain Rate on Delamination Fracture Toughness of Graphite/Epoxy[M]. Philadelphia: American Society of Testing and Materials, 1985. 336—348.
- [ 2 ] Mall S, Law G E, Katouzian M. Loading Rate Effect on Interlaminar Fracture Toughness of a Thermo-plastic Composite[J]. J Compos Mater, 1987, 21: 569—579.
- [ 3 ] Smiley A J, Pipes R B. Rate Effects on Mode I Interlaminar Fracture Toughness in Composite Materials[J]. J Compos Mater, 1987, 21: 670—687.
- [ 4 ] 绕世国. 材料动态断裂的理论和实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 1992. 19—55.
- [ 5 ] 王从约. 杆-杆型冲击拉伸试验系统的动力学数值分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 1996. 26—137.
- [ 6 ] Harding J, Welsh L M. A Tensile Testing Technique for Fiber-reinforced Composites at Impact Rates of Strain[J]. J Mater Sci, 1983, 18: 1810.
- [ 7 ] Dally J W, Sanford R J. Strain Gage Methods for Measuring the Opening Mode Stress Intensity Factor  $K_I$ [A]. Proc 1985 SEM Spring Conf On Exp Mech[C]. 1985. 851—860.
- [ 8 ] Dally J W, Barker D B. Dynamic Measurements of Initiation Toughness at High Loading Rates[J]. Experimental Mechanics, 1988, 28 (9): 298—303.
- [ 9 ] 林君山, 鄢文彬, 涂铭旌. Charpy 裂纹试样的起裂点确定与动态断裂韧性[J]. 金属学报(A), 1992, 28(4): 170—175.
- [ 10 ] Shih C F, de Lorenzi H G, Geman M D. Crack Extension Modeling with Singular Quadratic Isoparametric Elements[J]. Inter J Fracturere, 1976, 12: 647—651.

## Experimental Studies on the Initiation of Crack in Fiber-reinforced Composites under Impact Loading

LIU Xi-guo<sup>1</sup>, JIANG Yuan-xing<sup>2</sup>, ZHAO Hong-ping<sup>1</sup>,  
WU Yong-li<sup>1</sup>, ZHANG Shuang-yin<sup>1</sup>

( 1. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China ;*

2. *Division of Material and Process, China Academy of Launch  
Vehicle Technology, Beijing 100076, China )*

**Abstract:** It is investigated that the initiation of crack in fiber-reinforced composites under impact loading by SHTB experimental technology in this paper. The initiation time of crack is measured by strain gauge on the sample. The fracture toughness of the composite material is determined by FEM numerical simulation. The patterns of fracture of the crack under impact are observed and the influence of plies angle on the growth of the crack is analyzed.

**Key words:** fiber-reinforced composites; dynamical initiation of crack; impact; SHTB experimental technology