

## 纤维和颗粒增强复合材料中的裂纹扩展

毛天祥

P. W. R. Beanmont and W. C. Nixon

(中国科学院力学研究所)

(英国剑桥大学工程系)

### 摘 要

颗粒和纤维增强复合材料中的裂纹扩展,是用双扭试件(*Double-Torsion*) 在扫描电子显微镜下,直接观察裂纹扩展,并同时进行力学测量的方法来进行研究的。这些结果加深了对裂纹尖端应变场、裂纹扩展机理和影响复合材料韧性因素等的理解。

### 前 言

复合材料中裂纹扩展的方式,依赖于复合材料各组成成份的力学特性、基体和增强物之间的粘着力和应力状态。为了弄清这些问题,必须对复合材料的断裂特性和破坏模式有深入的理解。

用扫描电子显微镜检验断口<sup>[1,2]</sup>,对裂纹形成、缓慢生长和快速扩展等,仅能给出有限的信息。最近报道的在扫描电子显微镜下进行的工作<sup>[3,4]</sup>,对纤维增强复合材料裂纹扩展机理作了新的探讨。本文采用双扭试件,在扫描电子显微镜下进行加载,并研究了裂纹的动态扩展过程,还用录像把它记录下来。

规则的微型点阵(点子直径 $1\mu\text{m}$ ,点子间距 $8\mu\text{m}$ )布置在试样表面裂纹尖端附近,由点阵的变形可以测量裂纹张开位移(*COD*)。用测量的临界裂纹张开位移计算的临界应力强度因子,与用力学试验直接得到的结果符合得很好。

### 一 试验方法

使用的环氧树脂是 *Ciba-Geigy XD927* 和相应的固化剂,环氧树脂和固化剂是按重量 100比36调配。玻璃球是“*Ballotini*”,其中80%的直径是在 $53\sim 105\mu\text{m}$ 的范围内。试

本文1983年8月收到。

~ 74 ~

件是由环氧树脂加上体积比为0.1, 0.2和0.3玻璃球制造的。单向碳纤维布和单向玻璃布用来制造单层纤维复合材料。

碳纤维布 (Type. I) 和玻璃纤维布 (Type. E) 的纤维直径分别是  $8\mu m$  和  $13\mu m$ 。每股中包含的纤维数目分别是5000根和1600根。纤维布置在试件的中间层, 在试件的上、下表面是树脂层。

采用双扭试件来研究复合材料的断裂特性。试验是在 Instron 1195 试验机上进行的。在长方形试件 ( $70 \times 35 \times 3$ ) 的短边中点处开一个裂缝, 并用刀片使其加锐。为观察裂纹扩展, 加载装置装在扫描电镜下, 可以加载到200N。

感光药液喷洒在试件表面以形成感光薄层, 用照像的方法在感光薄层上布上规则点阵。由点阵的变形可以测量裂纹张开位移和裂纹尖端附近的应变场。

试验件有环氧树脂、玻璃微粒增强环氧树脂以及玻璃纤维或碳纤维增强环氧树脂。纤维增强复合材料中包含有纤维平行于初始裂纹方向以及纤维与初始裂纹方向成 $5^\circ$ 或 $10^\circ$ 角的试件。

## 二 試驗結果

在双扭试件中, 裂纹尖端的应力强度因子与裂纹长度无关, 可表示为<sup>[6]</sup>,

$$K = P \cdot W_m \left[ \frac{3[1 + \nu]}{W \cdot t^4} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

这里  $P$  是载荷,  $t$  和  $W$  是试件的厚度、宽度,  $W_m$  是力臂 (图1),  $\nu$  是泊桑比; 在这里取0.3。

每种材料至少试验五件试样, 加载速率恒定为0.5毫米/分。裂纹以一系列的离散跳跃的方式扩展 (所谓 *Stick-Slip* 扩展) 形成锯齿形的载荷位移曲线。裂纹起始扩展和停止扩展时的载荷用  $P_i$  和  $P_a$  表示。将  $P_i$  和  $P_a$  值代入公式 (1), 得到各种材料的裂纹起始扩展和停止扩展时的应力强度因子  $K_{Ic}$  和  $K_{Ia}$ 。每种材料的  $K_{Ic}$  和  $K_{Ia}$  的平均值以及它们对环氧树脂的  $K_{Ic}$  和  $K_{Ia}$  的比值列于表1。

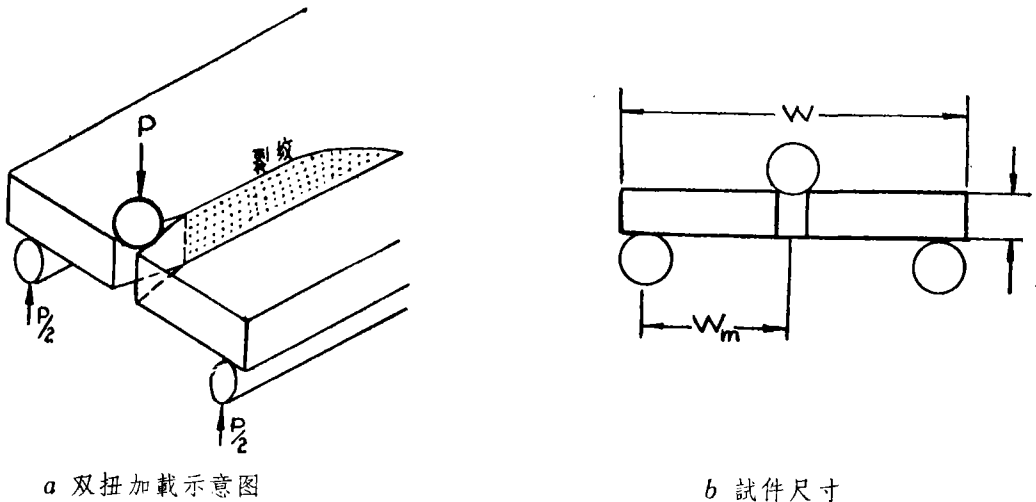


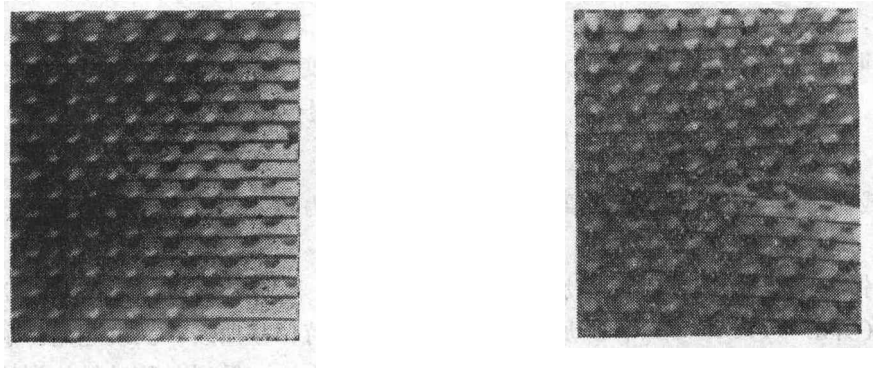
图 1

表1 双扭试验测量的 $K_{Ic}$ ,  $K_{Ia}$ 和 $\bar{K}_{Ic}$ ,  $\bar{K}_{Ia}$

	$K_{Ic}(MNm^{-\frac{3}{2}})$	$K_{Ia}(MNm^{-\frac{3}{2}})$	$\bar{K}_{Ic}$	$\bar{K}_{Ia}$
环氧树脂	0.78	0.58		
玻璃纤维(5°)	1.09	0.89	1.4	1.5
碳纤维(5°)	1.10	0.99	1.4	1.7

表中： $\bar{K}_{Ic}=K_{Ic}/K_{Ic}$  (树脂)， $\bar{K}_{Ia}=K_{Ia}/K_{Ia}$  (树脂)。

利用试件表面的点阵，可以相当精确地测量裂纹张开位移。图 2 的照片是在扫描电镜下，逐渐增加载荷时拍摄的。加载前，点阵组成平行网格。加载后，在裂纹尖端处网格变形。反复测量裂纹尖端上、下方与裂纹平行线之间点阵距离的变化，具有极好的重复性（精确到 $0.2\mu m$ ）。



(a) 未变形的点阵  
(500×)

(b) 载荷为51N时裂纹尖端的点阵  
(500×)

图 2

图 3 给出裂纹张开位移 $\delta$ 与载荷 $P$ 的关系曲线。如断裂力学指出的[6]， $\delta$ 与 $P^2$ 成正比。将曲线外推到临界载荷 $P_{crit}$ ，可以得到临界的裂纹张开位移 $\delta_{crit}$ 。对试验中的两个试样，结果是

$$\delta_{crit(1)}=5.9\pm 1\mu m$$

和

$$\delta_{crit(2)}=4.8\pm 1\mu m$$

用临界裂纹张开位移，可以独立地计算材料的 $K_{Ic}$ ，由文献[6]可知：

$$K_{Ic}^2=\delta_{crit}\cdot E\cdot\sigma_y$$

其中 $E$ 和 $\sigma_y$ 是材料的杨氏模量和屈服强度。对本文使用的材料，其近似值是： $E=3$ 到 $4GN/m^2$ ， $\sigma_y=55MN/m^2$ 。由此可得相应的：

$$K_{Ic(1)}=1.05\pm 0.15MN/m^{3/2}$$

和

$$K_{Ic(2)} = 0.95 \pm 0.15 \text{ MN}/\text{m}^{3/2}$$

这里得到的值与表 1 中的数值很接近。

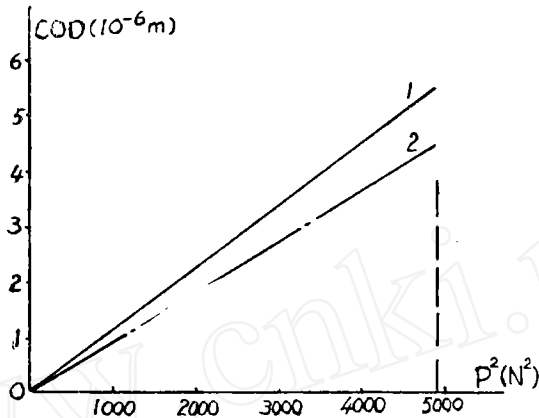
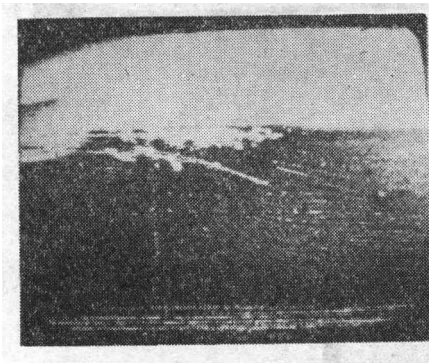


图 3 裂纹张开位移与  $P^2$  关系图

### 三 裂纹动态扩展的观察

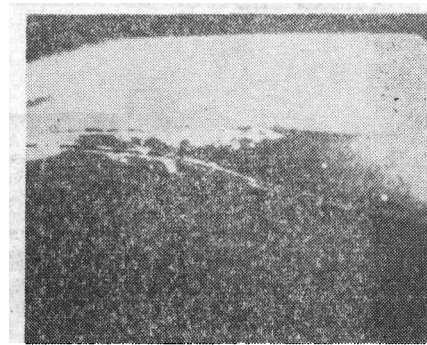
当试件在扫描电子显微镜中加载时，用录象带把裂纹的动态扩展记录下来，现将观察到的现象综述如下：

1. 感光药膜薄层随着试件一起变形，因此裂纹尖端附近的点阵变形即表征那里的应变场。另一方面，当载荷达到一定值时，在脆性的感光薄层上将出现表面裂纹。而裂纹尖端附近表面裂纹的形状可能表征那里的应变场特性。而且表面裂纹还随着裂纹的扩展向前移动，当裂纹尖端扩展后，表面裂纹即将消失。这些现象表明，表面裂纹出现在裂纹尖端附近的受张力区中，随着张力释放而消失。而且裂纹扩展时，这个区域也向前推移。图 4 (a) 所表示的



(a)

(a) 裂纹尖端附近的表面 (药膜) 裂纹  
(10×)



(b)

(b) 裂纹扩展后表面 (药膜) 裂纹消失的情况  
(10×)

图 4

是裂纹尖端周围的表面裂纹，图 4 (b) 则是当裂纹扩展后，试件上表面裂纹消失的情况。图 5 的两幅照片表明随着裂纹的扩展，表面裂纹的变化情况。值得指出的是，图 4 (a) 中表面裂纹的走向、形状和文献 [7] 中的图 7、8 所表示的测量所得的裂纹周围应变场极为相似。



图 5 (a) (b) 主裂纹扩展时表面裂纹的变化 (250×)

2. 有时，裂纹前方发现有几个小裂缝（小孔洞）（图 6）。这些小裂缝（孔洞）逐渐长大，最终与主裂缝连在一起使裂纹向前扩展。在某些碳纤维增强环氧树脂的试件中，裂纹尖端前方发现有直径约为  $100\mu\text{m}$  的“损伤区”。在此“损伤区”内，有许多长度为  $2\mu\text{m}$  至

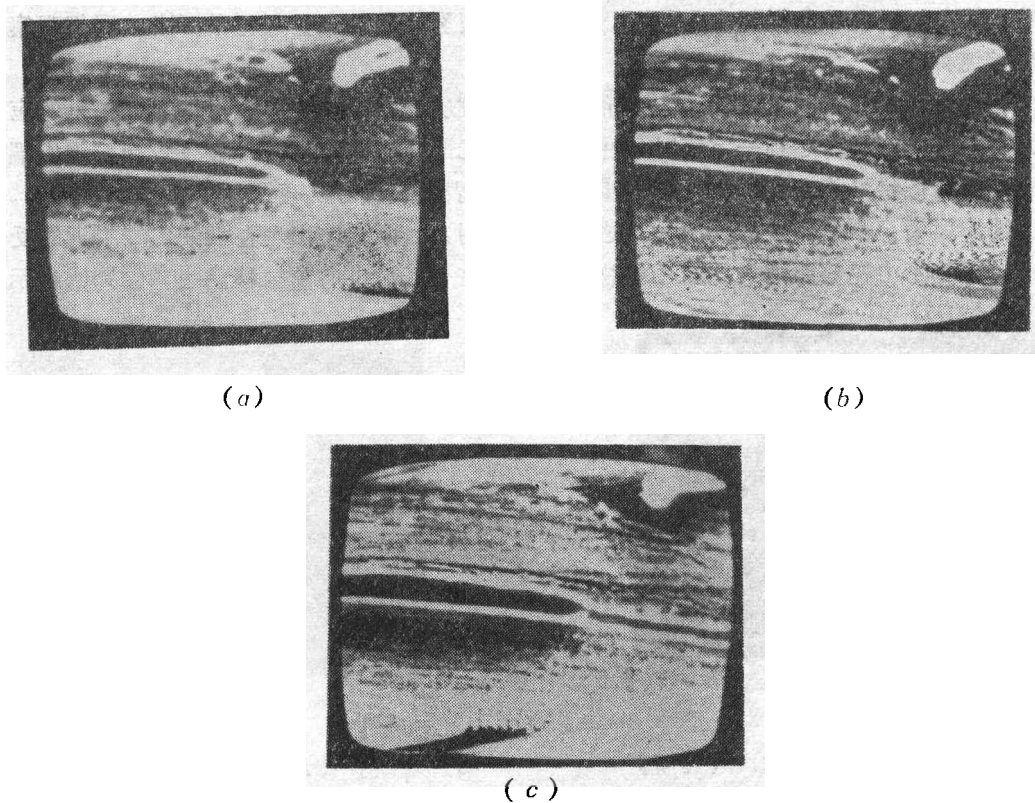


图 6 (a) (b) (c) 主裂纹前尖端小裂缝的形成以及随后连成一体的情况 (250×)

60 $\mu\text{m}$ 的小裂缝。图7给出的照片表明在此区域内，微裂纹和主裂纹的扩展情况。

3. 在裂纹快速跳跃扩展之前，也可以观察到裂纹的缓慢生长。当缓慢但是连续地加载时，裂纹先保持稳定，随着载荷增加，裂纹尖端变钝，当载荷大到某一值时，裂纹快速地跳跃前进。本试验中发现裂纹快速扩展的时间小于一幅画面的间隔时间（50分之一秒）。

4. 当纤维增强复合材料的初始裂纹与纤维方向平行时，裂纹沿着纤维方向扩展。通常，裂纹扩展引起纤维与基体之间的剥离。在扫描电镜中可以看到一些原来不太平行的纤维，横跨在裂缝的两边。当裂纹再次扩展时，需要克服裂纹前沿基体与纤维的阻力，并使裂纹后方的纤维断裂。

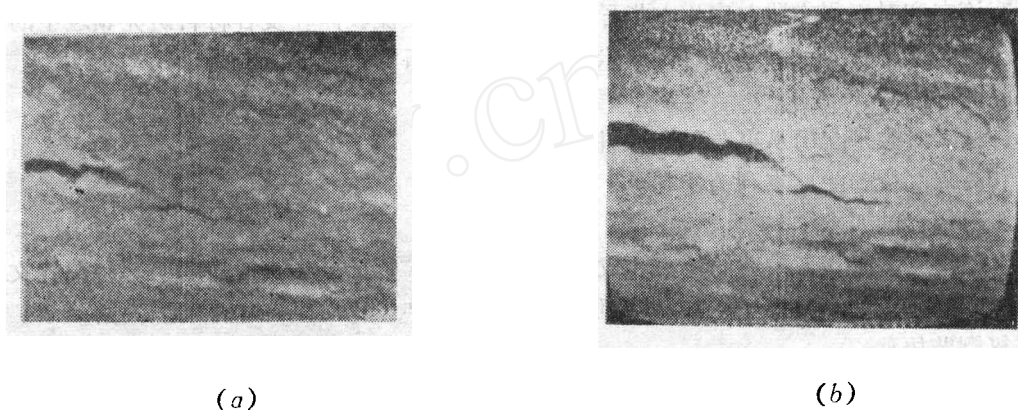


图7 (a) (b) 裂纹尖端“损伤区”中的微裂纹（碳纤维，0°）（250 $\times$ ）

当试件含有与裂纹成5°和10°角的纤维时，断裂现象更加复杂。在某些情况，裂纹沿着纤维方向扩展。而另一些情况，裂纹一开始并不沿纤维方向扩展，即裂纹横跨纤维（成5°或10°角）扩展几次，每次扩展的距离不大，最后是裂纹沿纤维方向扩展相当大的距离导致试件破坏。这后一情况的试件破坏断口呈阶梯状。

#### 参 考 文 献

- [1] Puyslow, D., “Some fundamental aspects of fractography”, Composites Vol. 12 (1981) p.241.
- [2] Veloshin, A. and Arcan, L. “Failure of glass-epoxy lamina fractographic study” J. of Composite Materials, Vol. 13, (1979) p.240.
- [3] Theocaris, P.S. and Stas-inakis, C.A. “Crack Propagation in fibrous Composite materials Studied by SEM”, J. of Composite Materials Vol.15 (1981) p.133.
- [4] Williams, S. unpublished work, Cambridge University Engineering Department.
- [5] Evans, A.G. “A Simple methods for evaluating slow crack growth in brittle materials”, Int.J. of Fracture. Vol.9, (1973) p. 267.
- [6] Knatt, J.F. “Fundamentals of Fracture Mechanics” Butterwoths (1973).
- [7] 伍小平 “用激光散斑照像放大技术和夹层散斑研究裂纹尖端应变场” 力学学报 1982第1期 p. 90.