

# [ $\pm\theta/90_2$ ]碳/环氧层板横向裂缝与 分层的测试及分析

洗杏娟 敖 明\* 李重庵

(中国科学院力学研究所, 北京100080) (兰州铁道学院)

**摘 要** 本工作对[ $\pm\theta/90_2$ ]<sub>s</sub>和[0<sub>n</sub>/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub>两系列碳/环氧层板在拉伸载荷下的横向裂缝与分层损伤, 进行了实验研究和有限元分析。采用声发射技术跟踪配合显微观测多向层板损伤过程, 分析了 $\theta$ 角变化与力学性能、初始损伤、累积等的关系。表明实测横向开裂与分层结果和采用能量判据有限元计算预测比较, 符合良好。同时在扫描电镜内进行各类层板压缩试验, 动态观测破坏形貌, 讨论了不同 $\theta$ 铺层角的微观破坏机理。

**关键词** 碳/环氧复合材料, 分层, 横向开裂, AE测试, 有限元分析

## 1 前 言

先进复合材料应用作结构件, 一般是多向层板, 它的损伤断裂较复杂, 需要用实时的测试技术研究它的各种破坏形式的出现, 同时也要研究预测这些破坏产生的计算方法, 以便进行设计计算分析时有着实的基础。

本工作从实验和计算两方面测算多向层板横向裂缝和分层破坏发生的应变值—载荷值, 采用声发射实时测试和显微观测方法测定, 并与采用能量判据结合有限元计算的预报结果作比较, 符合良好。

具体研究了两种系列的碳/环氧层板: [ $\pm\theta/90_2$ ]<sub>s</sub>系列和[0<sub>n</sub>/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub>系列, 采用 $\pm\theta$ 方向纤维对称铺层, 可减少多向复合材料层板的附加应力。研究 $\theta$ 角变化对力学行为与断裂破坏的影响。

## 2 试验件与试验方法

试验材料是上海碳纤维增强648环氧树脂, 纤维体积含量 $V_f$ 约为60%。铺层设计分两个

系列: 一是  $[\pm\theta/90_2]_s$ ,  $\theta$ 变化角度为  $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 。二是  $[0_n/90_2]_s$  系列,  $n=1, 2, 3$ 。

声发射监测的拉伸试验在Instron 1195型万能试验机上进行。用SFS-4声发射装置<sup>[1]</sup>测量不同 $\theta$ 角铺层试件的损伤破坏过程, 选择加强振铃为表征参数, 测试结果与有限元计算预测破坏作比较。试验段长100mm, 试件长200mm, 宽为15mm, 厚度为2mm。

为了实时测量并观察碳/环氧不同 $\theta$ 角度铺层的动态破坏, 在HITACHI S570 扫描电镜内进行小尺度试件的压缩试验, 采用自行设计的夹具<sup>[2]</sup>。配合联接的录相机实时录相跟踪观测复合材料微结构损伤破坏过程。试件名义尺寸为22mm长, 3mm宽, 2mm厚, 经计算保证破坏前不出现失稳。

### 3 $[\pm\theta/90_2]_s$ 、 $[0_n/90_2]_s$ 层板拉伸断裂及声发射测试

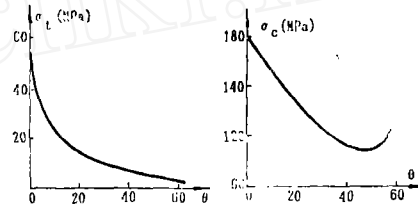
由于碳纤维铺层的角度不同, 纤维、基体和界面在层板中承载的作用大小不同, 随着载荷的增加, 有普遍弹性变形, 高弹变形和塑性变形的差异。因此, 不同 $\theta$ 角试件的应力应变关系, 具有不同的特点。拉伸强度、模量和最大百分应变 $\epsilon_{0.1}$ , %均随纤维铺层 $\theta$ 角的增大而减小。图1给出拉伸强度与铺设角 $\theta$ 的关系。

$[0_n/90_2]_s$ 系列层板的拉伸强度、模量、最大应变均随 $0^\circ$ 层数的增加而提高。

声发射技术配合显微镜测试表明, 当层板受拉伸时, 层板无损伤时, 没有声发射(AE)信号出现, 声发射小能量释放AE信号起始发生, 是 $90^\circ$ 层内垂直于载荷方向的横向裂缝出现。当 $-\theta/90$ 分层出现, AE信号突发产生, 声发射最大增量、声发射累积AEt等都和铺层角 $\theta$ 变化有一定规律(表1、图2)。一般情况, 小能量AE出现, 横向裂缝出现随 $\theta$ 角增大而推迟, 即横向裂缝出现在逐渐增大的应力应变水平。从 $\theta$ 为 $0^\circ$ 的7%应变范围至 $\theta$ 为 $60^\circ$ 的73%应变范围。这是由于 $\theta$ 角小时, 纤维的承载能力(即最大应力)与 $0$ 层承载能力相差很大, 因此横向裂缝较早出现; 当 $\theta$ 增大, 纤维与 $90^\circ$ 层承载能力相距逐渐减小, 横向裂缝出现逐渐后移。

$-\theta$ 层与 $90^\circ$ 层层间脱层时, 是较大的能量释放声发射突发信号(图4),  $-\theta/90^\circ$ 脱层出现随 $\theta$ 的变化较复杂, 但也有它的规律(表1)。当 $\theta < 30^\circ$ 时, 分层出现随 $\theta$ 增大而前移, 自 $\epsilon_{0.1}$ 的96%移至51.7%; 当 $\theta > 30^\circ$ 时, 分层出现随 $\theta$ 增大而后移, 自51.7%移至79.5%, 呈抛物线变化。原因是分层主要由界面粘结失效, 剪切破坏产生, 而剪切应力是呈抛物线变化的。

声发射累积曲线所包络的面积 $F_{AE}$ 反映了碳/环氧层板损伤破坏总的能量释放 $U$ , 此值一般随 $\theta$ 增大而减少(表1, 图2), 这是符合损伤能释放率的规律, 其中 $[\pm 30/90]_s$ 层板出现奇异点。



左图1 拉伸强度 $\sigma_L$ - $\theta$ 关系试验曲线

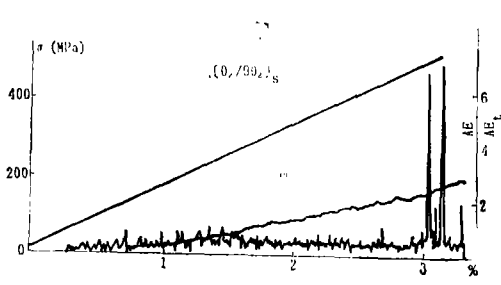
右图3  $[\pm\theta/90_2]_s$ 层板压缩性能

表1 多向铺层碳/环氧层板拉伸性能及断裂现象预测

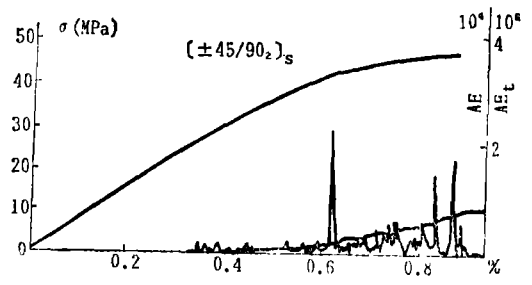
试件铺层	试件号	强度 $\sigma$ (MPa)	模量 E(MPa)	泊桑比 $\nu$	最大百分 应变	AE初始 出现的百 分之 $\epsilon_{ult}$ %
$[0_3/90_2]_s$	C <sub>1</sub>	574	59.9	0.102	3.84	7
$[0_1/90_2]_s$	C <sub>2</sub>	317	42.8	0.032	3.15	8.7
$[0_2/90_2]_s$	C <sub>3</sub>	547	32.7	0.058	2.21	9.8
$[\pm 10/90_2]_s$	C <sub>4</sub>	230	42.3	0.115	1.8	18
$[\pm 25/90_2]_s$	C <sub>5</sub>	113	37.7	0.179	1.01	29.2
$[\pm 30/90_2]_s$	C <sub>6</sub>	111.5	38.0	0.175	0.8	34
$[\pm 45/90_2]_s$	C <sub>7</sub>	53	19.1	0.15	0.94	36.2
$[\pm 60/90_2]_s$	C <sub>8</sub>	28.4	14	0.12	0.41	73

横向裂缝出现时 $\epsilon_T$ 实验值 ( $\times 10^{-4}$ )	横向裂缝出现时 $\epsilon_T$ 预测值 ( $\times 10^{-4}$ )	横向裂缝 $\epsilon_T$ 预报- $\epsilon_T$ 实验 $\epsilon_T$ 实验	AE突发出 现的百分 之 $\epsilon_{ult}$ %	脱层出现的 $\epsilon_D$ 实验值 ( $\times 10^{-4}$ )	脱层出现的 $\epsilon_D$ 预测值 ( $\times 10^{-4}$ )	$\epsilon_D$ 预测- $\epsilon_D$ 实验 $\epsilon_D$ 实验	AE累积面积 (总能量释放)
27.4	30.2	10%	96	3.02	218.2	28%	153
32.4	30.1	7%	69	1.23	78.8	36%	69
29.5	30.5	3%	51.7	55	46.4	16%	45
27.2	31.6	16%	52	41	46.2	13%	66
34.1	32.3	4%	62	87	65.1	-3%	35
29.9	37.7	26%	79	33			31.3



(a)  $[0_2/90_2]_s$  AE~ $\epsilon$ 曲线



(b)  $[\pm 45/90_2]_s$  AE~ $\epsilon$ 曲线

图2  $[\pm\theta/90_2]_s$  碳/环氧层板声发射(AE)~应变( $\epsilon$ )关系

#### 4 $[\pm\theta/90_2]_s$ 碳/环氧层板SEM压缩试验及微结构破坏形貌

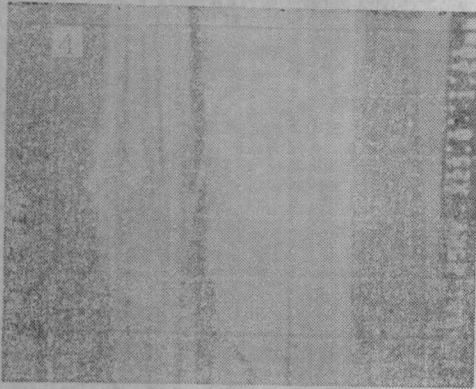
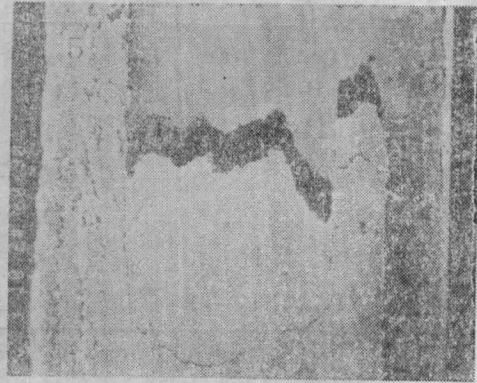
$[\pm\theta/90_2]_s$  层板的压缩试验是在扫描电镜内进行的。表2是 $[\pm\theta/90_2]_s$  碳/环氧层板的压缩性能,图3表示压缩强度 $\sigma$ 随 $\theta$ 铺层角度变化的关系, $\sigma$ 随 $\theta$ 增大先下降后有所增加,呈抛物线变化。 $\theta < 45^\circ$ 时,主要由纤维承载,随着 $\theta$ 增大试件承受正应力下降;当 $\theta > 45^\circ$ 时,是剪

表2  $[\pm\theta/90_2]_s$ 层板SEM压缩性能

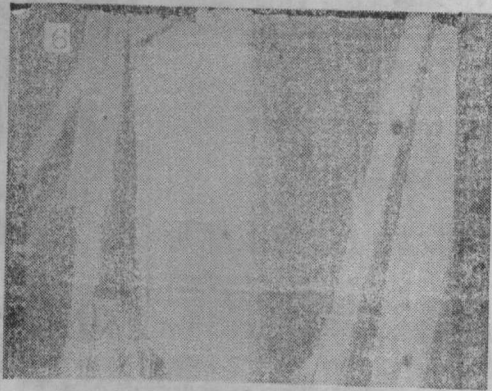
试件种类	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>
铺 层	$[0_2/90_2]_s$	$[\pm 10/90_2]_s$	$[\pm 25/90_2]_s$	$[\pm 30/90_2]_s$	$[\pm 45/90_2]_s$	$[\pm 60/90_2]_s$
压缩强度 (MPa)	170	150	112	106	86.3	120

切破坏为主, 基体承载比例增大, 而剪切应力是呈抛物线变化的。 $\sigma_c \sim \theta$  曲线的变化规律与蔡一希准则估算的一致。

多向复合材料的强度不完全由纤维断裂强度决定, 它的破坏型式是多种多样的, 包括基体开裂、纤维与基体界面脱粘、层间破坏及纤维断裂等形式。不同 $\theta$ 角主要破坏形式不同并与性能有密切关系。 $\theta$ 为 $0^\circ$ 的 $[0_2/90_2]_s$ 层板受拉伸时, 主要是纤维承载至最后断裂。图4为 $[0_2/90_2]_s$ 层板压缩破坏形貌。 $90^\circ$ 层先出现横向裂缝, 载荷增大当基体受压达到剪切屈服不稳定时, 失去支撑纤维的能力, 导致纤维压缩断裂。

图4  $[0_2/90_2]_s$ 试件压缩破坏形貌图5  $[\pm 60/90_2]_s$ 层板拉伸破坏形貌

$\theta$ 为 $10^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 和 $60^\circ$ 时, 破坏形貌具有相近的特征。从侧面(沿厚度方向)观察, 拉伸和压缩有很大的区别。受拉时, 破坏主要发生在承载能力弱的凹层 $90^\circ$ 层内(图5)受压时, 铺层角 $\theta$ 的变化对承载能力的影响远比受拉时小, 例如 $\theta$ 自 $0^\circ$ 变化到 $10^\circ$ , 压缩

图6a  $[\pm 45/90_2]_s$ 层板压缩破坏形貌图6b  $[\pm 45/90_2]_s$ 试件压缩裂缝扩展

强度 $\sigma_c$ 只下降了12%, 而拉伸强度 $\sigma_T$ 下降了58%。图6a, 6b是 $(\pm 45/90_2)_s$ 层板受压, 各层都产生了明显破坏的形貌, 中间较厚的是四层 $90^\circ$ 层横裂, 其它层层间分离破坏明显。以上图象呈现层间起阻挡裂缝扩展的作用, 裂缝沿层间扩展有的引起分层。

从试件表面观察, 受拉压载荷均沿 $\pm\theta$ 方向破坏, 呈剪切破坏特征。图7、8分别为 $(\pm 45/90_2)_s$ 板受拉和 $(\pm 30/90_2)_s$ 板受压的破坏表面形貌。 $\pm\theta$ 层受力沿 $\theta$ 方向产生界面和基体的剪切分离。

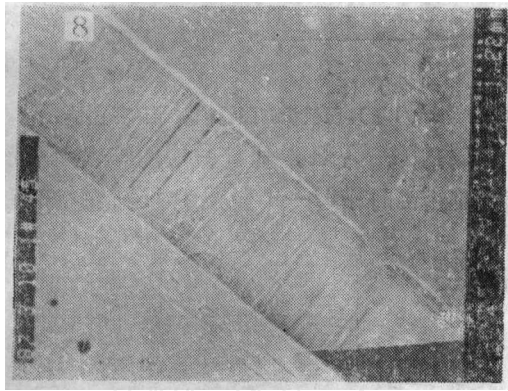


图7  $(\pm 45/90_2)_s$ 试件受拉破坏表面

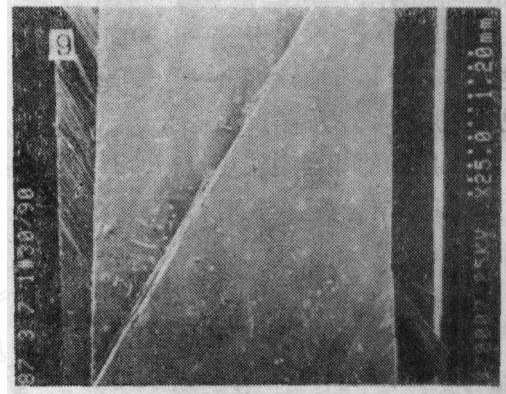


图8  $(\pm 30/90_2)_s$ 试件受压破坏形貌

## 5 分析与计算

以断裂力学的能量判据作为预测破坏的计算依据, 即认为裂缝扩展的条件是裂缝扩展时的应变能释放率 $G$ 达到材料的相应临界值。对于复合材料层板, 此判据可表示为<sup>[3]</sup>:

$$(\sqrt{C_c} \cdot \varepsilon_0 + \sqrt{C_T} \cdot \Delta T)^2 t = G_c \quad (1)$$

式中 $\varepsilon_0$ 为机械载荷引起的远场应变,  $\Delta T$ 为无热残余应力的温度与工作温度之差,  $t$ 为单层厚度,  $C_c$ 和 $C_T$ 分别是机械载荷和温度载荷下, 某一具体层板和裂纹形成的能量释放率特性函数, 在材料、铺层、载荷、开裂形式等因素确定的情况下, 它们只是裂纹尺寸的函数。用二维或三维有限元分析方法, 并采用双节点技术模拟开裂过程, 同时计算每步开裂的能量释放率, 就得到 $C_c$ - $a$ 和 $C_T$ - $a$ 曲线, 从而由有效原始裂纹尺寸 $a_0$ 确定相应的 $C_c$ 和 $C_T$ 数值。对于确定的开裂形式(包括裂纹面上纤维方向和开裂方向),  $G_c$ 为材料常数, 应由实验确定。这样就可以用(1)式求出 $\varepsilon_0$ , 即预测对某特定的铺层, 开裂形式下裂纹扩展时的载荷(以应变形式给出)。

### 1. $(\pm\theta/90_2)_s$ 层板 $90^\circ$ 层内横向裂缝产生的预测

测得 $\Delta T$ 为 $120^\circ\text{C}$ , 单层厚度为 $0.25\text{mm}$ , 文献[5]对同种材料的实验和计算得出, 对应 $0-0$ 开裂的 $G_{Ic}$ 为 $107\text{J/m}^2$ 。文献[6]给出同类材料 $0-0$ 与 $90-90$ 方向开裂的 $G_{Ic}$ 之比为 $158:228$ 。本材料 $90-90$ 开裂的 $G_{Ic}$ 为 $154\text{J/m}^2$ , 用前面提到的有限元方法计算出 $\theta$ 为 $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 的 $(\pm\theta/90_2)_s$ 层板对应于 $90^\circ$ 层横向裂纹的 $C_c$ - $a$ 及 $C_T$ - $a$ 曲线, 如图9所示, 取 $C_c$ 与 $C_T$ 值代入(1)式, 便可计算出 $(\pm\theta/90_2)_s$ 层板受单向拉伸时开始出现横向裂纹

的载荷预测值(以远场应变 $\varepsilon_0$ 表示)见表1。 $\varepsilon_0$ 预测值与表征横向裂缝产生的声发射即初始产生实测值相差3~26%,除 $[\pm 45/90_2]$ 层板相差26%,其余有三种层板相差在10%以内,两种在26%以内,符合良好。

2.  $[\pm\theta/90_2]$ 层板中 $-\theta/90$ 间脱层,用类似的有限元方法计算出 $-\theta/90$ 层间边缘脱层扩展时 $C_c$ 及 $C_T$ 随 $a$ 变化的关系(图

10)。设原始的相当裂纹长度为 $0.6t$ ,由此确定相应的 $C_c$ 、 $C_T$ 值,确定脱层的 $G_c$ 。则比较复杂,文献[5]结合实验与分析计算得出 $\alpha$ 在 $0\sim 30^\circ$ 范围变化时 $+\theta/-\theta$ 脱层的 $G_c$ 值。用线性

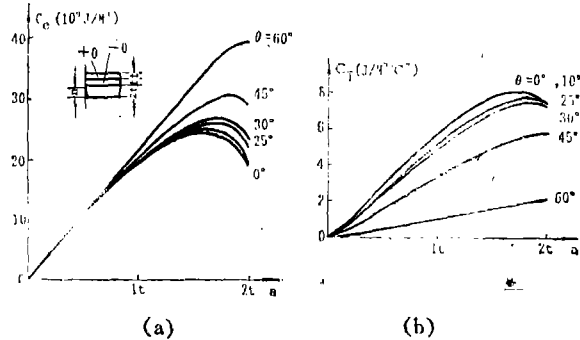


图9  $[\pm\theta/90_2]$ 层板横向裂缝扩展能量释放率

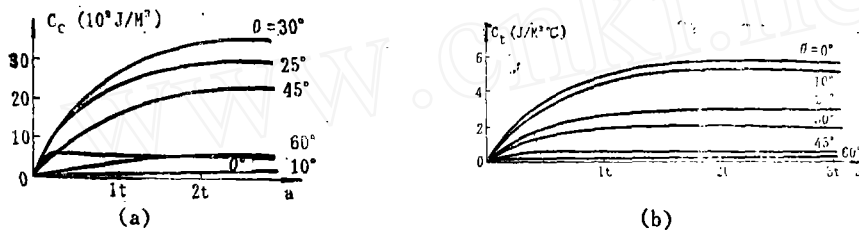


图10  $[\pm\theta/90_2]$ 层板中 $-\theta/90$ 脱层能量和效率

拟合并推广到 $0^\circ\sim 45^\circ$ 范围(相当于本文中 $\theta$ 从 $90^\circ$ 到 $0^\circ$ ),假定当脱层面两侧纤维方向夹角相同时,对应的 $G_c$ 也相同,便可得到对应各 $\theta$ 值的 $-\theta/90$ 脱层的 $G_c$ 值,从而求出脱层发生时应变的预测值(表1)。

除 $\theta=60^\circ$ 的情况外,其余五种情况的预测值与实验值相差3~36%。

## 6 讨论与结语

1.  $[\pm\theta/90_2]$ 复合材料层板的拉伸强度、模量、最大百分应变均随 $\theta$ 角的增大而减小,泊松比随 $\theta$ 角增大而增大。压缩强度随 $\theta$ 角增大呈抛物线变化。拉伸和压缩实测的 $\sigma-\theta$ 关系曲线与蔡-希尔准则估算的规律一致。

2. 采用声发射技术配合显微镜监测复合材料层板的损伤破坏是可行的。实测横向裂缝与用能量准则的有限元计算结果符合较好。六种层板平均偏差 $D$ 为13%, $-\theta/90$ 间脱层的实测与计算结果偏差 $D$ 为19.2%,预测值可作参考。

3. 从实测和预测的本实验六种层板的横向裂缝和脱层出现情况看,横向裂缝均先脱层出现,随着 $\theta$ 增大,相距缩短。 $\theta < 30^\circ$ 的层板,横向开裂远早于脱层出现, $\theta > 30^\circ$ 层板相距减少,其中 $[\pm 60/90_2]$ 层板的横向开裂与脱层较接近,均在70%~80% $\varepsilon_{0.1}$ 间出现,是符合规律的。

4. 铺层角 $\theta$ 不同的六种层板的拉伸压缩破坏形貌各具特点。 $[0_2/90_2]$ 试件以纤维断裂为主, $\theta$ 不为 $0^\circ$ 的五种试件,均沿 $\theta$ 方向界面和基体剪切破坏,压缩破坏呈粉碎性。横向裂

缝先在 $90^\circ$ 层出现, 裂缝受层间阻挡沿层间扩展引起脱层, 这也正是脱层出现在横向裂缝之后的原因。

**感谢:** 李端义、绳钢同志参加了实验工作。

### 参 考 文 献

- 1 洗杏娟, 蒋灿兴. 航空学报. 1984, 5(2):241~247
- 2 洗杏娟, 洗定国等. 复合材料学报. 1988, (3):7~16
- 3 洗杏娟, 李重庵. 宇航学报. 1988, (4):80~86
- 4 洗杏娟, 郑维平. 力学与实践. 7(6):29~34
- 5 Li C A, et al. ICCM-VII. 1989, (4):83~82
- 6 Wang A S D, et al. Composites Science and Technology. 1986, 24:1~31

## EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY ON TRANSVERSE CRACKING AND DELAMINATION OF $[\pm\theta/90_2]$ CARBONEPOXY LAMINATES\*

Xian Xingjuan Ao Ming

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China 100087)

Li Chongan

(Lanzhou Railway Institute, Lanzhou, China, 730002)

**Abstract** The transverse cracking and delamination damage of the two series (i.e.  $[\pm\theta/90_2]$ , and  $[\theta_n/90_2]$ ) of carbon/epoxy laminates induced by tensile loading were studied experimentally and analysed with finite element method (FEM). In experiments, the damage process of the multi-layer laminates were monitored with acoustic emission (AE) technique and observed by using scanning electron microscope (SEM). The relationship of mechanical behaviour, initial damage and damage accumulation with lay-up angle  $\theta$  were analysed. This study indicates that the results measured for transverse cracking and delamination are in good agreement with those of predictions by FEM calculations, in which the energy criterion was used. In addition, compression tests were conducted on the testing stage in the SEM and so were the failure processes dynamically observed. Finally, the microscopic failure mechanisms of the laminates having different  $\theta$  were discussed.

**Key words** carbon/epoxy, AE experiment, FEM analysis, transverse/cracking, delamination