

带边缘缺口碳纤维增强环氧复合 材料静态与疲劳破坏特性

先 杏 娟

(中国科学院力学研究所, 北京)

摘 要

本文对碳纤维增强环氧复合材料 0° 和 $\pm 45^\circ$ 铺层无缺口和带直边缺口层板, 进行了静态拉伸和拉-拉疲劳破坏试验研究, 比较和分析了不同铺层材料和有无缺口试件在静态和疲劳的特性以及损伤破坏型式。采用多种方法(声发射装置、两种位移传感器、电影摄影机、光学显微镜和扫描电镜等), 检测层板的损伤。结果表明: 带有垂直于载荷方向直边缺口的该类铺层碳/环氧层板受静态或疲劳拉伸时, 裂缝不是沿缺口长度方向扩展, 而是沿界面(纤维方向)扩展; 缺口的存在基本上不影响其余无缺口部分的应力。并讨论了它的损伤破坏机理。

一、引 言

碳纤维增强环氧复合材料, 是一种高性能的新型材料, 它具有比强度比刚度高、抗疲劳、容伤性好及力学可设计性等力学上的显著优点。自 60 年代研制成功以来应用日益广泛, 从宇航、机械、化工等工业部门到体育器具, 重量比金属材料减轻了 20—50%。碳/环氧作为结构材料应用于承受循环载荷的部件也逐渐增多, 而复合材料的特性、破坏及疲劳损伤与金属等各向同性材料相比, 具有许多新颖的特点。纤维增强复合材料存在裂缝时, 由于纤维与界面起了阻止裂缝扩展的作用, 不会象金属那样引起灾难性的破坏, 但同时它的破坏机理更为复杂, 其性能和损伤型式与材料组分、纤维铺层方向、界面粘结强度以及加载条件有关。对玻璃纤维增强复合材料的破坏特性, 国内外已作了一些工作^[3-5], 但对高性能的碳/环氧带边缘缺口的破坏, 特别是疲劳特性的研究^[6,7]还不多, 国内更少。为了有效而可靠地使用过这种新型材料, 充分发挥其优越性, 为这类结构设计提供依据, 研究它的损伤机理是极其必要的。

本文通过对 120 个试件所进行的一系列试验结果的分析, 研究碳/环氧复合材料 0° 和 $\pm 45^\circ$ 铺层无缺口和带直边缺口层板的静态与疲劳拉伸破坏特性; 比较它们的应力-应变关系、循环应力-循环数的关系、破坏特性、裂缝扩展规律及声发射分析等; 证实这类材料在疲劳出现初始损伤后, 还能承受很久的循环载荷, 有较大的损伤容限和较长的疲劳寿命, 而在达到一定循环数以后, 试件刚度随循环数增加而下降, 裂缝随循环数增加而逐渐扩展, 缺口顶端开始出现裂缝的载荷或循环数远低于断裂时所需; 并探讨了这类材料的静态与疲劳损伤机理。

本文 1983 年 5 月 21 日收到。

二、试件与试验方法

我们将试验材料为 L180 碳纤维增强 648 环氧和 S220 碳纤维增强 648 环氧两种, 碳纤维含量为 61%, 先经热压工艺成层板, 然后加工为长矩条形试件. 按材料组分、铺层和几何尺寸的不同, 分为 A, B, C, D 四类, 每类分无缺口 (A-1 等) 与带边缘缺口 (A-I 等) 两种. 试件的缺口在程序控制切割机上加工, 缺口长度为 3mm, 缺口宽度为 0.2mm, 边缘缺口垂直于载荷方向. 试件缺口形状见图 1, 各类型试件的具体情况见表 1.

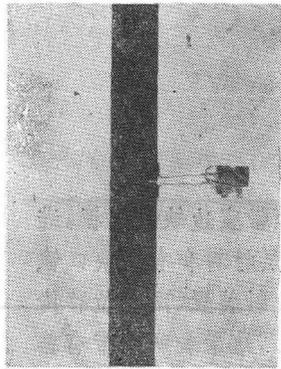


图 1 试件

静态拉伸试验在 INSTRON 1195 型万能试验机上进行, 采用应变片式引伸计测量应变, 自动记录载荷-变形曲线或应力-应变曲线用电影摄影机拍照试件破坏过程, 在 20 倍读数显微镜下观察裂缝扩展情况, 分析破坏模型.

疲劳试验在 PLQ2Z 疲劳试验机上进行, 加载形式为拉-拉循环疲劳, 循环比 $R = 0.1$ 和 0.2 , 频率 $\approx 30\text{Hz}$ 和 60Hz . 刀口式位移传感器与 X-Y 记录仪测量试件的变形, 由此得出疲劳过程中刚度的变化; J 形传感器固定在缺口两侧与记录仪配合显微镜测量缺口张开情况(图 1); 采用光学显微镜观测裂缝扩展情况, 扫描电镜检测断裂截面微结构与界面的破坏形貌.

表 1 碳/环氧试件组分、几何尺寸及强度、模量

试件类型	材料组分	铺层	缺口情况	试件数	宽度 $W(\text{mm})$	厚度 $t(\text{mm})$	截面积 (mm^2)		拉伸强度 (kg/mm^2)			模量 E (kg/mm^2)
							总面积	净面积	σ_{ult}	σ'_{ult}	σ''_{ult}	
A-1	S220/648	[0] ₁₁	无	16	15	1.5	22.5		113			10943
A-I			有	16	15	1.5	22.5	18	88.3	110.4		
B-1	L180/648	[0] ₇	无	12	12	1.2	14.4		86			10069
B-I			有	12	12	1.2	14.4	10.8	67.4	89.9		
C-1	S220/648	[±45] ₅	无	12	18	2.2	39.6		9.8			1160
C-I			有	12	18	2.2	39.6	33	8.6	10.3		
D-1	L180/648	[±45] ₅	无	20	12	1.8	21.6		9.5			1030
D-I			有	20	12	1.8	21.6	16.2	7.4	9.81		

四通道 SFS-4 声发射装置用以监测静态与疲劳损伤过程, 通过复合门槛 (自动门槛与手动门槛) 滤掉试验环境的噪音, 提高了抗干扰的能力, 得到试件损伤时有用的声发射信号, 120 kHz 的探头用油脂固定在试件上保证良好的声耦合, 在 X-Y₁-Y₂ 记录仪上自动给出载荷或循环数与声发射表征参数增量和总数的关系. 它展示了试验中基体开裂、纤维断裂、界面脱胶、分层、缺口张开以及裂缝增长等破坏情况. 并采用半导体测温仪测量疲劳过程中试件温度的变化.

三、碳/环氧应力应变关系及断裂韧性

0° 铺层无缺口试件受拉伸时, 应力应变关系是线性的 (图 2), 由于碳纤维刚度大, 材料中纤维含量高, 0° 铺层试件主要由纤维承载, 是脆性断裂。A-1 类强度平均值为 113kg/mm², 模量值为 10943kg/mm², 当载荷达极限应力 σ_{ult} 的 10% (200 公斤载荷) 时, 树脂微裂出现小能量释放的声发射 (AE) 信号 (2×10^3), 约达 40% σ_{ult} 后, 信号逐渐加强, 并在 200 公斤间隔出现一中强信号 (1.2×10^3), 试件纵向开裂, 在 80% σ_{ult} 以后, 纤维断裂, 强信号出现的间隔缩短, 最后达到 AE 最高值 (2.6×10^3), 试件破坏 (图 3)。

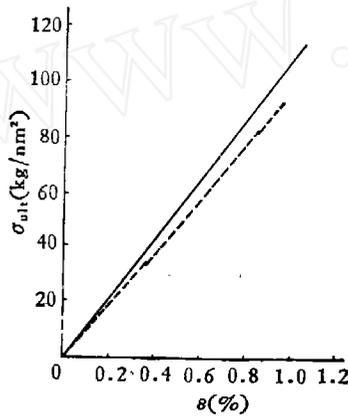


图 2 0° 试件 A-1, A-1 应力应变曲线
(—无缺口, --缺口)

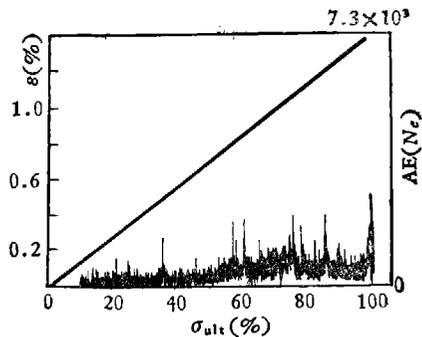


图 3 0° 试件 B-1 应力应变、
声发射曲线

0° 铺层带边缘缺口试件当加载至 25% 的极限载荷时, 由于缺口的初始张开, 应力应变关系稍有抖动, 但应力应变曲线在破坏载荷 90% 前仍是线性的。在继续加载后, 由于缺口明显张开的影响, 更多的纤维断裂, 应力应变关系有所波动 (图 2)。裂缝从缺口顶端沿界面 (纤维) 方向产生并扩展, 沿纵向穿透整个试件, 直至破坏。总截面强度值 σ'_{ult} 为 88.3 kg/mm², 强度值应为除去缺口部分净截面积计算的值 σ''_{ult} (表 1), 与无缺口的 σ_{ult} 比较, 相差 < 7%, σ''_{ult} 为 110.4 kg/mm²。

$\pm 45^\circ$ 铺层试件受偏轴拉伸时, 可以考察其剪切性能。它的应力应变曲线在 40% 破坏载荷前线性很好, 以后由于在剪切下层板树脂开裂, 第一层沿 45° 裂缝出现, 线性有所偏离 (图 4), 此时声发射开始出现中强信号, 约于 30kg 升载间隔后, 又出现第一层沿 45° 界面分离的中强信号, 裂缝扩展相继有小信号伴随出现, 在 80% σ_{ult} 以后, 信号增强加密, 各层完全分离剪切破坏, 累积总数反映了试件破坏时释放的总能量。 $\pm 45^\circ$ C-1 类试件强度为 9.8kg/mm², 模量为 1160 kg/mm²。 $\pm 45^\circ$ 带缺口的试件, 由于缺口的存在, 在 20% σ_{ult} 时即出现小 AE 信号, 随着缺口逐渐张开, 信号逐渐递增, 在 30% σ_{ult} 时, 缺口顶端裂缝出现, 信号加强, 随着裂缝的增多和扩展, 信号稳步出现, 直至破坏点才突然增大。在接近破坏时, 因缺口拉开, 载荷稍有停滞又上升, 应力应变曲线不象无缺口的那样光滑 (图 4, 5)。

纤维增强复合材料的断裂韧性与纤维及基体的性能、粘结强度、纤维方向及缺口的尺寸与

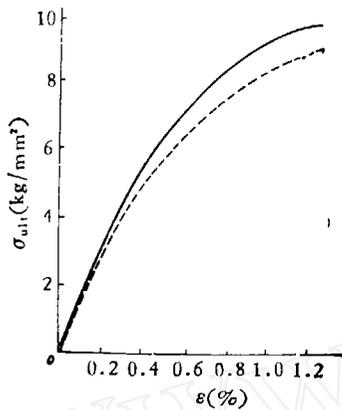


图4 ±45°试件应力应变曲线
(—无缺口, --缺口)

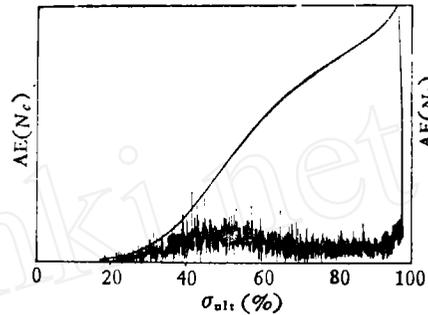


图5 ±45°试件C-I应力-声发射
增量、累积曲线

性质有关,如不加修正地用各向同性线弹性断裂理论来确定纤维增强复合材料的断裂韧性是不合适的。

采用本实验的数据及所得的结果,参考文献[8],初步确定纤维增强环氧复合材料的断裂韧性 K_{θ} 。

对各向异性层板

$$K_I/\sigma\sqrt{c} = Y(c/w \cdot A_{ij} \cdot \alpha). \quad (1)$$

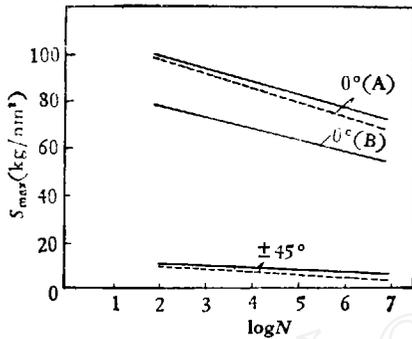
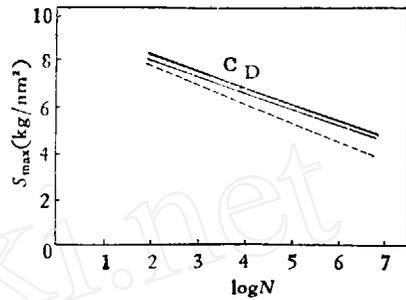
Y 是 K 的修正系数, c/w 是裂缝长度与试件宽度之比, A_{ij} 是材料的弹性常数, α 是试件的几何影响, σ 是给定应力。

由 σ 和 Y 可以确定断裂韧性 K_{θ} 。 Y 值根据本实验试件的 c/w 及纤维铺层角度,从文献[8]的图表中用插入法求得。 0° 铺层单缺口试件的断裂韧性 K_{θ} , $A-I$ 型试件 K_{θ} 为 $398 \text{ kg/mm}^{3/2}$, $B-I$ 型为 $329 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 。 $\pm 45^{\circ}$ 铺层 $C-I$ 型的 K_{θ} 为 $33.1 \text{ kg/mm}^{3/2}$, $D-I$ 型的 K_{θ} 为 $32.2 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 。

可见 0° 铺层的碳纤维增强环氧复合材料的 K_{θ} 值是相当好的,而它的比重又较金属小得多。由于破坏形式主要是界面脱胶,可增加吸收能量而提高 K_{θ} 。提高复合材料的 K_{θ} 值,不用象金属那样要损失其它强度值,而且厚度对纤维增强复合材料断裂韧性的影响不象对金属材料那么重要,比如文献[1]中 $A-I$ 型与 $B-I$ 型试件材料相同,厚度不同,但它们的断裂韧性值是相当接近的。

四、碳/环氧复合材料拉-拉疲劳的 $S-N$ 曲线及疲劳强度

在各个不同最大循环应力水平 S_{\max} 下进行拉-拉疲劳试验,一般在 5 个应力水平下进行,即静拉极限强度 σ_{ult} 的 40%, 50%, 60%, 65%, 70%, 开始在 25%, 后期在 80%, 90% 也试验了部分试件。 0° 铺层试件在应力水平高于 60%, $\pm 45^{\circ}$ 铺层高于 50%, 经受 10^7 循环载荷试件才会破坏。从试验结果可见: 这类材料无论是 0° 或 $\pm 45^{\circ}$ 铺层的试件,在半对数坐标上它们的应力与循环次数的关系都是线性的(图 6),并可看出碳/环氧没有象金属材料那样有明

图 6 碳/环氧 $S-N$ 曲线图 7 碳/环氧 $\pm 45^\circ$ $S-N$ 曲线

显的疲劳极限,一般根据实际使用要求取疲劳强度,通常取 5×10^6 至 10^7 循环数对应的最大应力作为条件疲劳极限. 本试验中 0° 和 $\pm 45^\circ$ 铺层的碳/环氧试件的疲劳极限分别在 60% 和 50% 左右,由于碳/环氧复合材料刚度大,疲劳强度比金属的 (28—40%) 和玻璃钢的 ($\approx 35\%$) 高,比疲劳强度 (S_r/ρ) 更高,可见其疲劳性能之好. 它的剩余强度也很高,一般经受 10^7 循环后剩余强度 $S_r \approx 60\%$,有的 S_r 更高^[2].

对一组试件 (B 类) 进行了较低周 ($f = 34\text{Hz}$) 的拉-拉疲劳试验,应力比 $R = 0.1$,最大循环应力为 60% σ_{ult} ,经受 10^7 循环次数,疲劳强度与 60 Hz 频率, $R = 0.2$ 的结果相似 (图 6),可见在此频率和应力比范围内,对疲劳性能影响不大.

利用 $S-N$ 曲线的线性特征,可用下公式表示

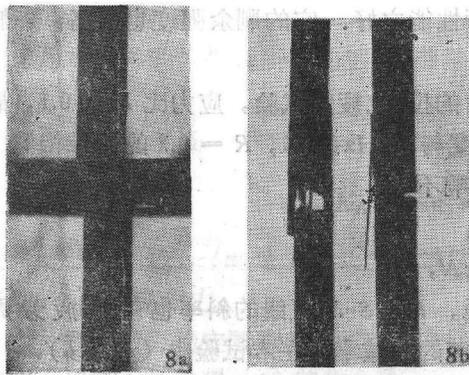
$$S = \sigma_b - b \lg N, \quad (2)$$

σ_b 为静态拉伸强度也就是 $S-N$ 曲线单循环的截距, b 是 $S-N$ 直线的斜率也就是疲劳周数每增加 10 倍循环应力的递减值, σ_b/b 表示材料疲劳的递减率. 在本试验中 (如图 6), 0° 铺层 A-1 类试件 σ_b/b 为 20,表示每增加 10 倍周数循环应力减小 1/20,亦即衰减 r 为 5%. 衰减 r A-I 类为 5.7%, B-1 类为 5.81%, $\pm 45^\circ$ 铺层 C-1 类为 7%, D-1 与 D-I 类分别为 7.14% 与 8.6%,由此 $S-N$ 曲线与公式可估定该材料在任一工作循环下的疲劳允许最大应力. 这些结果表明,纤维增强复合材料由于纤维铺设方向不同,静拉强度相差较大,在拉-拉疲劳中的疲劳衰减也有差别;强度差别不大,疲劳衰减相差也小,如 $\pm 45^\circ$ 铺层试件抗拉强度约比 0° 试件低 10 倍,而循环应力疲劳衰减率比 0° 铺层试件快 2%. 具有相同纤维铺层角而纤维组分不同的材料,视强度值相差值而定. 如 0° 铺层 A 类试件 (S_{220} 碳纤维) 的强度值比 B 类 (L_{180} 碳纤维) 高 24%, 疲劳衰减率慢约 0.81%, 而 $\pm 45^\circ$ 铺层试件拉伸强度主要由基体控制,纤维不同影响很小, D 类比 C 类强度值只差 3%, 疲劳衰减率基本相同,分别为 7.14% 和 7%. 同时也表明,带边缺口试件比无缺口试件的疲劳衰减率稍快,如 A-I 类比 A-1 类快 0.7%, 碳纤维增强环氧复合材料的疲劳衰减率比玻璃纤维增强复合材料慢 (按文献 [9], 玻璃钢拉-拉衰减率为 10), 这也表明碳/环氧的疲劳性能良好.

五、碳纤维增强环氧复合材料破坏特点

由于碳纤维的变形比环氧基体的变形小得多,承受一定拉伸载荷后,这种变形不一致引起

基体裂缝的出现,此类初始损伤不影响静态下继续承载以及疲劳寿命,它还能经受几十万次的循环载荷,这是与金属不相同的特点.当静载或循环数继续增加,纤维与基体间的界面出现脱胶,当裂缝扩展时,层间应力增加,引起分层破坏.对 0° 铺层层板在载荷、循环数增大时,有的纵向纤维发生断裂,疲劳刚度损失,沿试件边缘有小片拉断崩裂,纵向开裂多处而破坏,是复式破坏型式(图8).对 $\pm 45^\circ$ 铺层试件,先是某层出现横向裂缝,一般裂缝与层间界面约成 50° 角,达到界面受到阻挡,裂缝不沿原方向延伸,而是沿层界面扩展,引起分层(图9).约在40%的极限载荷后,沿 45° 方向因受剪切出现裂缝,裂缝逐渐沿宽度通过整个试件,每层各自沿 $\pm 45^\circ$ 方向剪开,层间分离明显,直至所有层都被剪断,试件完全破坏,剪切破坏是 $\pm 45^\circ$ 铺层试件破坏的控制因素.无缺口试件的破坏断面位置是随机的,而带边缺口试件的破坏截面在缺口端部沿 $\pm 45^\circ$ 出现(图10).分层与附近应力集中释放或层内应力再分布有关,疲劳分层增长率与应力水平 S_{max} 有关, S_{max} 大,分层增长率也大.此外,因为疲劳破坏由损伤累积造成,在相当大的循环数后(如 $N = 10^5$,这与应力水平有关),由于材料的局部损伤,模量频率随循环数增大而下降(图12),刚度损失与裂缝相连系是评定疲劳损伤的尺度.当损伤累积至一



(a) 静态(2) (b) 疲劳

图8 0° 试件破坏型式



图9 $\pm 45^\circ$ 试件横向裂缝

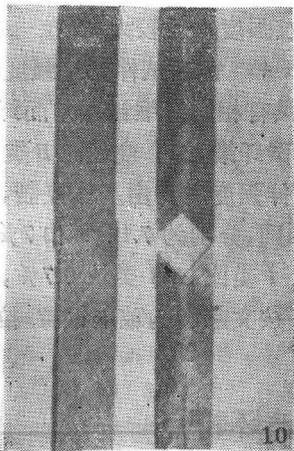


图10 $\pm 45^\circ$ 试件破坏型式

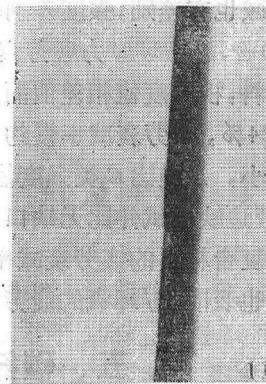


图11 疲劳试件沿厚度分层

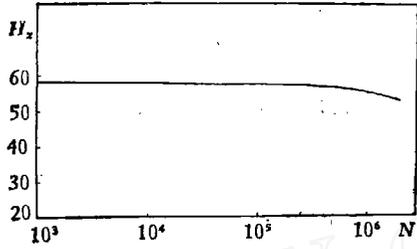


图 12 0° 试件 B-1-7 频率在疲劳试验中的衰减

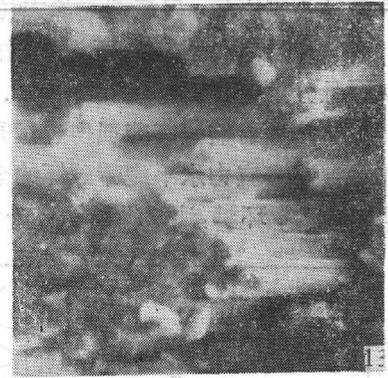
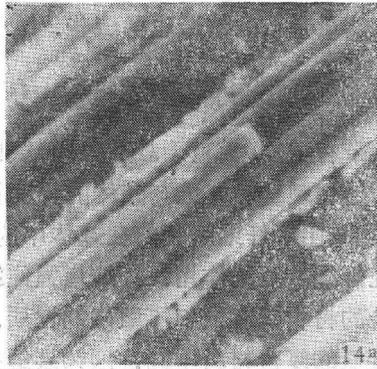


图 13 0° 试件裂缝扩大

定程度,由于能量损耗及纤维摩擦,复合材料在破坏前温度升高,这类材料的温升是与破坏有直接联系的.如试件上部分层破坏而下端完好,则只有上部区域温升较明显,碳/环氧温升时间短,而且温度不高(约升至 30°C),对疲劳性能的影响比玻璃钢小得多.当裂缝逐渐增多,试件往往呈现轻微的疏松状,并表现在沿试件厚度分层破坏最为明显(图 11),这是与静态迅速



(a) 静态



(b) 疲劳

图 14 0° 试件断裂面扫描电子显微镜图象

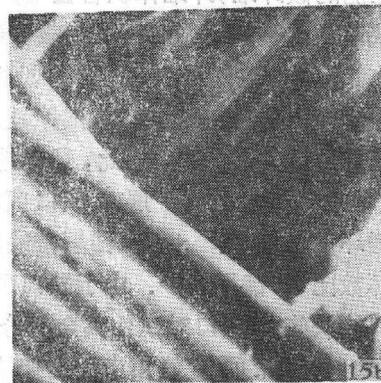


图 15 ±45° 试件断裂面扫描电子显微镜图象

拉断破坏不同之处,但疲劳与静态拉伸破坏的断口并无明显不同。扫描电子显微镜观察断裂面,截面裂缝扩大(图 13),断裂表面出现基体开裂、纤维断裂以及界面分层,疲劳比静态呈疏松状而且分层更加明显(图 14, 15)。

利用声发射监测疲劳损伤过程是一项新技术,由于疲劳试验时间长,一般记录临近破坏一段的情况或高应力水平疲劳破坏的全过程。如 0° 铺层试件 A-1-6, 应力水平为 70%, 在达 1.62×10^6 循环时,边缘纵向已有一条带崩出,随即开始记录(图 16),声发射信号不断出现,当

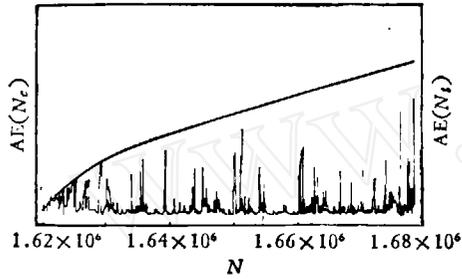


图 16 0° 试件 A-1-6 在疲劳试验中的声发射

$N > 1.63 \times 10^6$ 时,较大能量的声发射信号间歇出现,试件呈疏松状态,这些信号表示纵向裂缝或纤维断裂间歇出现,这是 0° 铺层试件破坏的主要控制因素。与静态的声发射图象(图 3)比较,间歇出现较强能量的信号是一致的,这说明都有纵向裂缝和纤维断裂出现,信号强弱也相似,但不同的是静态是在短期拉断,因此信号密集,而疲劳试件已受 1.6×10^6 的循环载荷,损伤早已出现(一般在疲劳寿命的一半时,大部分疲劳裂纹已经出现),此时已临近破坏,试件在长时间承受载荷后

已呈疏松状,而且破坏过程是较长时间的累积,因此能量释放的信号也稀疏些。

六、带边缘缺口碳/环氧层板断裂机理的探讨

无论是在静态或疲劳载荷下, 0° 或 $\pm 45^\circ$ 铺层带有法向(垂直于载荷方向)缺口试件受拉伸时,初始损伤均从缺口张开及缺口顶端出现裂缝开始,裂缝沿纤维与基体的界面扩展(即纤维方向),而不是沿缺口长度方向扩展(图 8, 10)。这是由于纤维断裂前在基体中的应变能,基体可增加塑性流动,从而提高断裂功,纤维起到阻止裂缝扩展的作用。纤维增强使缺口附近的应力强度降低,提高了复合材料的承载能力,本实验的材料具有缺口不敏感的性质。它与各向同性材料不同,也与纤维模量不够高、纤维体积含量低的复合材料不同。因为裂缝扩展方向与纤维的弹性性能和体积比有关。当高弹性模量纤维所含百分比增多时,由于纤维和树脂间的胶接、摩擦等原因,增加了传递载荷的部位,同时有利于阻止垂直纤维方向的变形。本试验的试件是高性能的碳纤维,纤维体积含量 V_f 为 61%, 所以具有缺口非敏感性。疲劳与静态拉伸不同的是缺口顶端裂缝因循环持续加载而延伸更长,应力集中释放得更多。缺口顶端处裂缝的数量、长度及宽度逐渐增大, 0° 试件沿纵向、 $\pm 45^\circ$ 试件沿 45° 方向穿透整个试件,直至破坏。对于碳纤维复合材料带缺口的试件,层间剪切开裂破坏是主要的,缺口顶端的裂缝很大程度上取决于该处剪切力的大小,因此,适当地提高界面的粘结强度,选取大的剪切强度及摩擦剪切强度,有利于延缓裂缝的扩展。缺口顶端开始出现裂缝的应力或循环数比试件断裂所需要的应力或循环数低得多。 $\pm 45^\circ$ 铺层带缺口试件缺口顶端第一层沿 $\pm 45^\circ$ 出现裂缝后,所能经受的循环数比 0° 铺层的少。由于缺口顶端裂缝的较早出现及扩展,带缺口试件的疲劳衰减率比无缺口的快些。缺口对试件其余部分断裂强度基本没影响,载荷由除去缺口部分的净截面承担,带缺口试件的强度值相当于去掉缺口部分净截面积的强度值。

缺口试件比无缺口试件释放更多的声发射信号,如 $\pm 45^\circ$ 带缺口试件 C-1-7, 应力水平

为 70%，采用声发射装置监测疲劳损伤的全过程（图 17），当试件缺口张开时，出现小能量声发射信号，当 N 达到 5.2×10^4 时，能量释放增大， AE 信号增强；试件界面开始脱胶后，损伤不断出现，声发射信号连续发生，时高时低；达 1.34×10^5 循环时，信号增大一倍，此时缺口顶端出现裂缝，分层开始，逐层扩展，声发射信号丰富，增长很快；接近 2.16×10^5 循环时，信号突然增大，各层完全分层，试件破坏。图 18 是 $C-I-8$ 试件在疲劳破坏阶段的声发射图象，当前者最后阶段相符。疲劳和静态 AE 图象相对照，趋势一致，静态的如疲劳最后一段的情况累积曲线也相似，由于 $\pm 45^\circ$ 铺层试件交叉纤维互相牵制的作用，在疲劳过程中相对能量开始释放少量，逐渐累积，最后释放较为集中。

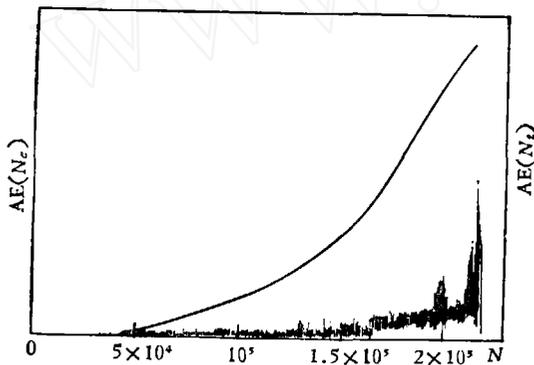


图 17 $\pm 45^\circ$ 试件 $C-I-7$ 在疲劳试验中的声发射

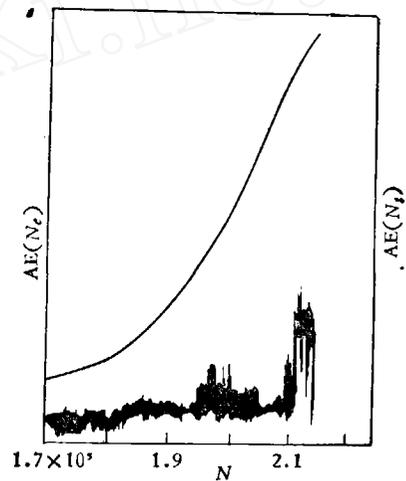


图 18 $\pm 45^\circ$ 试件 $C-I-8$ 在疲劳破坏阶段的声发射

七、结 语

1. 我国的碳纤维增强环氧复合材料 0° 铺层层板的强度、模量和断裂韧性等性能较好， $\pm 45^\circ$ 层板承受剪切有利，两种层板的疲劳强度比金属、玻璃钢的高（约高 30%）， 0° 层板的疲劳条件极限比 $\pm 45^\circ$ 层板约大 10%。碳/环氧材料适用于承受交变载荷的构件，如与玻璃钢纤维或 Kevlar 纤维混合，必将提高它的平均疲劳性能。

2. 碳/环氧材料出现初始损伤，不会很快导致破坏，早期有预兆，可采用无损检测手段监测破坏的发展。声发射技术可鉴别破坏的程度，有可能预测疲劳寿命，保证安全使用。破坏至影响使用时可进行修复。初始损伤后材料具有相当长的疲劳寿命或承受相当大的载荷。在疲劳中当刚度损失明显时，作为主要构件要引起注意。这类材料有良好的损伤容限。

3. 带边缺口的这类碳/环氧层板，不影响缺口外其余部分材料继续承载工作，缺口顶端裂缝的出现不会很快导致材料的破坏，它的强度值可由无缺口材料的值估定，对疲劳性能也无明显的影响。缺口顶端的裂缝沿界面扩展。

李禾、蒋灿兴同志参加了本工作的实验，特致谢意。

参 考 文 献

- [1] Broutman, L. J. & Gaggar, S. R., AD-Ao 15454, 1975.
- [2] Caprino, G., et al., *J. Comp.*, **10** (1979), 223—227.
- [3] Owen, M. J., *Trans. R., Soc. Lond.*, **A294** (1980), 535—543.
- [4] ———, *Fracture and Fatigue*, Vol. **5**, 1974, 342—368.
- [5] ———, AGARRO-ep-163.
- [6] Mandell, J. F., *J. Comp. Mater.*, **8** (1974), 106—116.
- [7] 沈杏娟, *力学学报*, **5**(1981), 493—500.
- [8] Xian, X. J. & Li, He., *Progress in Science & Engineering of Composites (Proc. of ICCM-IV)*, Vol. **1**, 1982, 725—732.
- [9] Mandell, J. F., *Comp. Tech. Review*, **3** (1981), **3**: 96—120.