第 14 卷 第 1 期
1997 年 2 月

复 合 材 料 学 报
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA

Vol. 14 No. 1
February 1997

APMOC/环氧复合材料层板破坏过程声发射特征

郭艳阳 杜善义 王殿富 张富琪

(哈尔滨工业大学复合材料研究所，哈尔滨 150001) (大庆石油学院，安达 1514000)

摘 要 本文利用声发射测试技术，对 APMOC/环氧复合材料各种铺层的单层板、层合板的损伤机理和破坏过程进行了详细的研究。结果表明，在不同的声发射信号参量特征与不同的损伤机理之间存在对应关系。声发射信号参量的变化过程能够描述层板的动态损伤过程，不同的声发射参量表征层板的不同损伤过程与机理。

关键词 声发射，复合材料损伤，层板，APMOC/环氧复合材料

中图分类号 TB332

对纤维增强复合材料破坏过程、损伤机理的研究一直是复合材料及其结构研制、设计与质量检验的重大课题[1]。在对玻璃/环氧、碳/环氧和 Kevlar/环氧复合材料的破坏过程研究中，人们发现声发射技术是一项有效的工具[2]，它能够实时监测材料破坏的全过程。为此，世界各国普遍采用声发射技术研究复合材料的损伤机理、破坏过程、损伤严重性等基本问题。实践表明，计数、恒载声发射、费利西蒂比、幅度和延时等声发射参量是复合材料损伤机理、损伤阶段的重要表征[3][4]。

APMOC 纤维属芳纶纤维系列。由 APMOC 纤维缠绕制成的容器结构不仅能获得实际所需要的高强度、高模量特性，而且要比同样尺寸的玻璃纤维结构减轻重量三分之一。因此，APMOC/环氧复合材料正在被固体火箭发动机壳体等航空航天结构件所采用，对其破坏过程和损伤机理研究无疑是十分迫切的。本文对 APMOC/环氧复合材料不同铺向的单层板、层合板试件拉伸过程中的声发射特性进行了大量的试验分析，通过辅助验证试验得出了不同应力水平下层板的损伤机理，表征了破坏过程的声发射特征。本文给出的声发射数据有可能成为 APMOC/环氧复合材料损伤的判据。

1 试件制备与试验仪器

1.1 组分材料

本次试验用试件由航天部第四研究院提供。APMOC 纤维性能见表 1。环氧树脂基体断裂延伸率为 2.5%。

本文于 1996 年 7 月 26 日收到修改稿，1996 年 1 月 4 日收到初稿

表 1　APMOC 纤维性能参数

密度/g·cm^{-3}	线密度/Tex	复丝抗拉模量/MPa	复丝抗拉强度/MPa	断裂延伸率/%
1.45	100×6	142.2	4210	3.2

将浸胶带缠绕在板状模具上,剪为两块后放在平台上封装起来,送热压罐固化成型。胶带参数见表 2。

表 2　胶带参数

胶带股数	树脂重量百分比/%	胶带宽度/cm
6	33～50	3.3～4.2

1.2　试件加工及尺寸

本次试验用复合材料单层板、层合板全部使用 RS1700 激光切割机切割制成。切割后的试件两边光滑,平行度高,最大限度地防止了试验过程中边缘噪声进入声发射分析仪,影响试验结果精度。

考虑到试件的尺寸效应,本次试验件参考标准 ASTM D3039 和 GB3354 制定,确定试件具体尺寸如下表:

试件编号	铺向角/°	试件尺寸/mm	试件数量	加载速度/mm·min^{-1}
1	0	250×25×2	11	0.2
2	30	250×25×2	10	0.1
3	45	250×25×2	10	0.1
4	60	250×25×2	10	0.1
5	0/90	250×25×2	10	0.2
6	±45	250×25×2	10	0.1

1.3　加强片粘结

在对多种粘结剂进行比较后,本次试验用试件均采用进口高强粘结胶在室温下固化粘结铝加强片。试验表明,这种粘结剂既防止了 0° 铺向角单层板试件拉伸过程中加强片脱粘导致试验失败,又保证了各种铺向角层板声发射数据可比性,得到了较真实的试验数据。

1.4　试验仪器

选用美国 PAC 公司生产的 SPARAN 型声发射仪,采集、记录、分析试验数据。试验用 2 个传感器中心共振频率为 150KHz,使用高级真空脂耦合固定在试件上。试验前对传感器进行校准。

设定信号采集门槛为 40dB,增益 30dB。试件拉伸在 Instron-1186 型万能实验机上进行,控制加载、卸载速度恒定。

2　实验结果分析

2.1　单层板声发射特性

2.1.1　0°铺向单层板声发射特性

声发射计数是指声发射信号超过门槛的振荡次数,它与材料内部的损伤机理、损伤程度有密切的关系,是广泛采用的声发射参量之一。

为防止损坏传感器,对 0°铺向单层板,我们只记录到 70%破坏载荷的声发射,其典型计数与时间关系如图 1。图中显示,0°铺向单层板的声发射特性大致可分为两个阶段。第一个阶段计数峰较高,频率大,形成连续声发射。第二个阶段,计数峰、频率较第一个阶段低得多。

进一步分析两个阶段不同的损伤机理发现，由于基体的断裂延伸率小于纤维的断裂延伸率，所以第一阶段的声发射主要来自基体开裂。另外，局部纤维/基体界面粘结不牢也会发生开裂，产生声发射[4]。加载到 70%破坏载荷卸载后进行扫描电镜观察，大量的纤维已从基体中分离，但纤维 尚未发生断裂，如电镜照片图 2 所示。

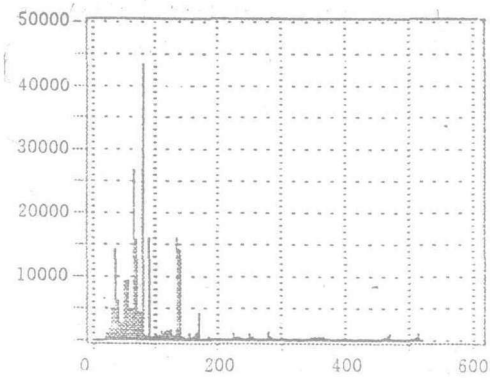

图 1 0°铺向单层板声发射计数与时间(sec)关系

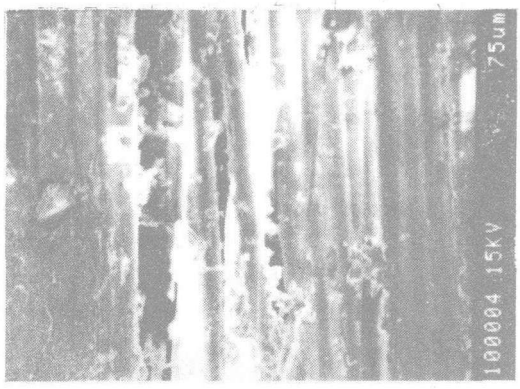

图 2 70%破坏载荷时 0°铺向单层板损伤状况

试件最后沿纤维方向撕裂破坏，表面有拉断纤维丝和纤维束，见试件破坏形貌图 3。

对 7 个试件的声发射信号特征进行统计分析，我们发现有一定的规律性，详见表 3。其一是，初始声发射载荷大约是破坏载荷的 4%～6%；第二个损伤阶段起始载荷大约是破坏载荷的 15%～30%。其二是，第一阶段信号延时较第二阶段长，两阶段信号幅度均小于 80dB，延时小于 3000μs。根据人们对碳纤维/环氧复合材料损伤机理的研究得知，基体开裂、纤维/基体界面分离产生的声发射信号幅度小于 80dB，延时小于 3000μs[4]。图 2 的情况与此相符合。

表 3 0°铺向单层板的声发射特征

试件编号	第一损伤阶段起始载荷/N	第二损伤阶段起始载荷/N	最终破坏载荷/N	第一损伤阶段 AE 幅度/dB	第一损伤阶段 AE 延时/μs	第二损伤阶段 AE 幅度/dB	第二损伤阶段 AE 延时/μs
1	29.4	127.4	568.4	<70	<3000	<70	<1000
2	29.4	107.8	588	<70	<3000	<70	<1000
3	27.44	186.2	666.4	<70	<3000	<70	<1000
4	24.5	166.6	588	<60	<2500	<70	<1000
5	29.4	88.2	539	<70	<3000	<70	<1000
6	29.4	127.4	548.8	<60	<3000	<70	<1000
7	28.42	117.6	607.6	<70	<3000	<70	<1000

恒载声发射、费利西蒂比是表征复合材料损伤程度的另外两个重要判据。前者能够很好地反映蠕变性能，后者可以衡量第二次加载时材料内部损伤发展情况。在 30%、50%、70%破坏载荷下分级恒载，结果只在恒载瞬间有 AE 活动，并迅速停止。这说明 0°铺向单层板在上面三个载荷水平下没有发生蠕变。另外，在对应上述三个载荷水平下卸载再加载，其费利西蒂比分别是 0.99、0.97 和 0.94，说明费利西蒂比明显与载荷水平有关。

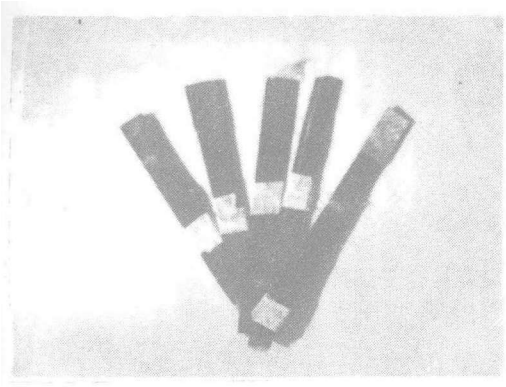

图 3　0°铺向角单层板最后破坏形貌

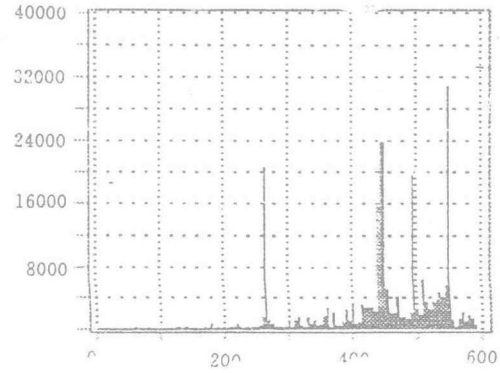

图 4　60°铺向单层板声发射计数与时间(sec)关系

2.1.2　60°、45°、30°铺向单层板声发射特性

60°、45°、30°铺向单层板的计数与时间关系没有明显的阶段性特征,依据铺向角不同而各异,如图 4、图 5 和图 6。首先,60°铺向单层板随载荷增加,计数频率越来越高,峰值越来越高;45°铺向单层板计数是一个离散过程,破坏之前产生断续峰。30°铺向单层板破坏之前也出现计数峰,计数频率介于 60°层板和 45°层板之间。

由此可见,0°铺向单层板损伤过程大致分三个阶段,由纤维断裂导致试件最终破坏。

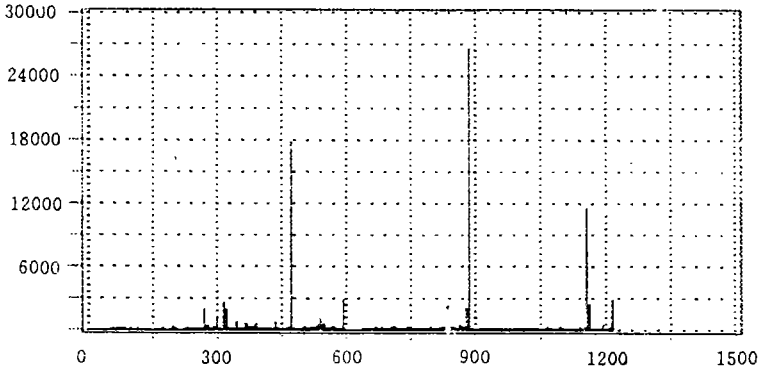

图 5　45°铺向单层板声发射计数与时间(sec)关系

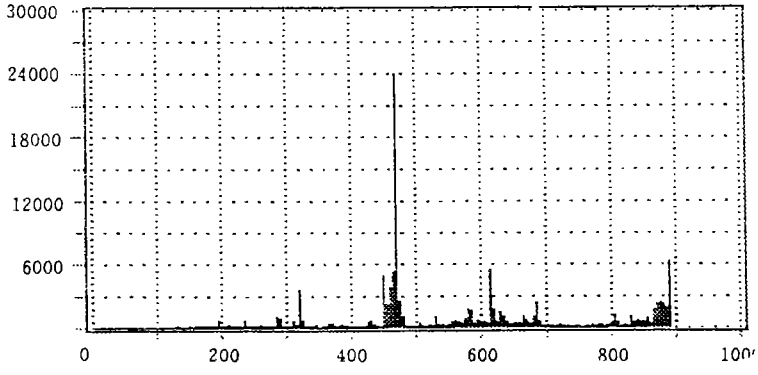

图 6　30°铺向单层板声发射计数与时间(sec)关系

扫描电镜观察和断口分析表明，60°、45°、30°铺向单层板均沿纤维铺向破坏，但内部损伤情况各不相同，如图 7、图 8、图 9。60°基本上是基体承载。45°承剪能力最弱，试件最终强度由纤维/基体界面强度控制，最后破坏时只有少量基体开裂，这和图 8 是一致的。30°基体开裂情况介于上述两者之间，这正好和计数特征相对应，说明声发射计数能够反映单层板偏轴拉伸的损伤机理。

分析三种铺向单层板声发射信号特征发现，幅度小于 70dB，延时小于 500μs，恒载没有声发射活动，卸载后再加载满足凯塞尔效应。

初始声发射载荷随铺向角不同各异。随铺向角的增加，声发射出现滞后，对应载荷分别为其破坏载荷的 20%～30%，30%～40%和 40%～60%。这是由于铺向角越小，纤维与基体之间承载能力差别越大，引起基体裂纹较早出现所致。

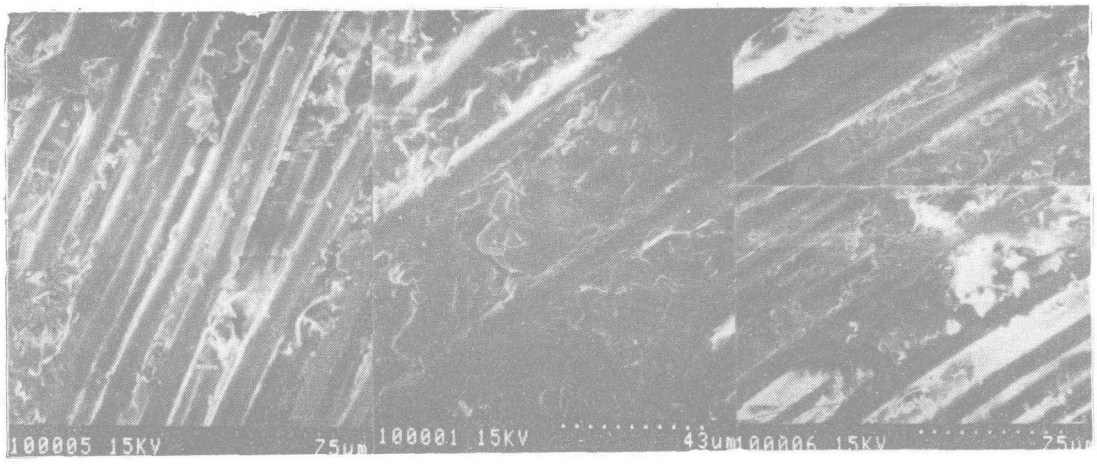

图 7 60°铺向单层板断口附近损伤形貌

图 8 45°铺向单层板断口附近损伤形貌

图 9 30°铺向单层板断口附近损伤形貌

2.2 层合板声发射特性

复合材料层合板的损伤机理极为复杂。实时监测各种铺向层合板的损伤过程，是对复合材料结构进行设计、理论分析的基础。

2.2.1 0°/90°层合板声发射特性

图 10 显示出三个阶段的声发射计数与时间关系。在 10%破坏载荷左右开始出现声发射，进入初始声发射阶段；大约在 30%破坏载荷时，声发射趋于平静，这一阶段属于平稳阶段；在 70%破坏载荷时起，声发射异常活跃，进入最后破坏阶段。三阶段声发射特征如表 4 所示。

根据表 4 和上述对单层板的分析得出，初始阶段大部分信号来自基体开裂；平稳阶段基体已基本失去承载能力，纤维承载但尚未达到破坏强度，大部分信号由纤维/基体开裂产生，延时、幅度都较小；最后破坏阶段，记录到的部分信号幅度较高，大于 80dB，延时大于 3000μs。断口显示纤维被拉断，说明最后记录到的部分信号来自纤维断裂。

AE 初始载荷与载荷位移曲线的非线性起始点相对应，表示所示开始；恒载声发射时间长短、费利西蒂比大小与材料内部破坏类型、程度密切相关。

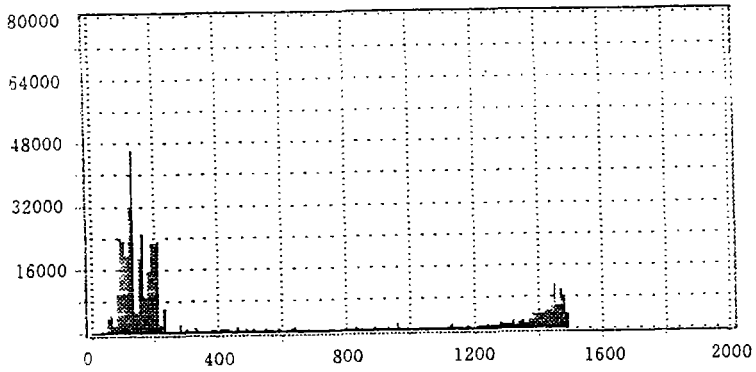

图 10　0°/90°层合板声发射计数与时间(sec)关系

表 4　0°/90°层合板声发射特征

声发射特征	初始阶段	平稳阶段	最后阶段
AE 初始载荷/破坏载荷	0.10	0.30	0.70
幅度/dB	<80	<70	>80
延时/μs	<3000	<2000	>3000
恒载声发射/min	<1	<3	>4
费利西蒂比	0.99	0.93	0.83

2.2.2　±45°层合板声发射特性

与 0°/90°层合板破坏过程分成明显的三个阶段不同,±45°层合板声发射活动没有形成几个阶段。从加载开始到 80%破坏载荷,记录到的声发射呈离散的峰,如图 11。大约在 20%破坏载荷左右出现初始声发射,比 0°/90°层合板迟一些。

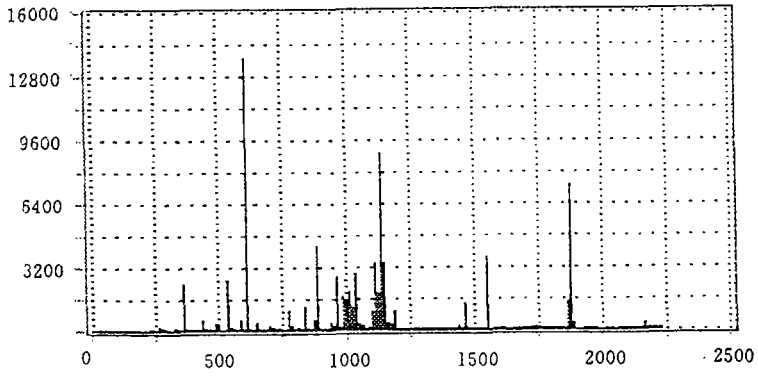

图 11　±45°层合板声发射计数与时间(sec)关系

3 结　论

(1) 0°铺向单层板、0°/90°层合板破坏过程有三个阶段。第一阶段大体以基体开裂为主;第二阶段计数较低,以纤维/基体界面断续分离为主;第三阶段纤维开始断裂,导致最后破坏。

(2) 60°、45°、30°层合板和±45°层合板破坏过程没有明显的阶段，断口均沿纤维铺向破坏，破坏以界面分离为主。

(3) 声发射幅度、延时和损伤机理有关。

(4) 恒载声发射、费利西蒂比可以表明复合材料的损伤状况。

(5) 由于单层板、层合板纤维铺向不同，其声发射计数与时间关系不同。

参 考 文 献

1 周履，王震鸣，范斌群. 复合材料及其结构的力学进展. 广州：华南理工大学出版社，1991. 243～258

2 铃木惠，孙峰，自念荣. 用 AE 法研究破坏机理. 日本机械学会论文集(A 篇)，53 卷 492 号

3 郭艳阳，王殿富，杜善义. APMOC-Ⅱ/环氧复合材料层板断裂特性声发射研究. 第五届青年材料科学研讨会，哈尔滨工业大学. 1995. 10

4 金周庚. 碳/环氧复合材料破坏类型声发射表征. 第四届全国声发射会议，1989

ACOUSTIC EMISSION CHARACTERISTICS OF DAMAGE PROCESS FOR APMOC/EPOXY COMPOSITE LAMINATES

Guo Yanyang Du Shanyi Wang Dianfu

(Institute of Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Zhang Baoqi

(Daqing Institute of Petroleum, Anda 151400)

Abstract A detailed study of damage mechanism failure process for APMOC/epoxy composite laminates in different stacking sequences was conducted by use of acoustic emission monitoring. The results showed that the relationship between AE signal parameters and damage mechanisms can be established. Obviously, AE signal parameters being recorded can reveal the dynamic damage process of the laminates. The different AE parameters relate to the different damage process and mechanisms in the laminates.

Key words acoustic emission, composite damage, laminates, APMOC/epoxy

(上接第 47 页)

(4) Ogorodor L 等(俄罗斯)：自体心包力学性能及其在心脏外科上的应用。用不同溶液(水、盐溶液和生理溶液)加工心包及这些溶液对组织力学性能的影响。

(5) Prendergast P J 和 Huiskes R(荷兰)以及 Adamcvich I 等(拉脱维亚)两份报告中利用有限单元法于硬组织生物力学。前者提出计算植入物和骨之间的骨形成过程系数，后者提出胫骨在动荷载下的刚性参数。

(6) Knets I 等(拉脱维亚)：分析骨胼胝的生物力学。对骨-胼胝-骨体系试样沿纵轴拉伸直到破坏的力学试验。在有限单元法基础上理论分析骨再生物的应力-应变状态。

(7) Saulgozis J 等(拉脱维亚)：提出 4 份报告。

① 分析股骨的相邻部分是从其不均匀性和对荷载的动能适应出发的。

② 分析人的坚实胫骨拉伸时超声速率的变化。象超声速率一样，应变和应力的最大值随着人年龄的加大而减小。

(下转第 75 页)