

复合材料及其结构的 力学、设计、应用和评价

(第二册)

主 编

王震鸣 杜善义 张 恒 黎观生



哈尔滨工业大学出版社

TB33

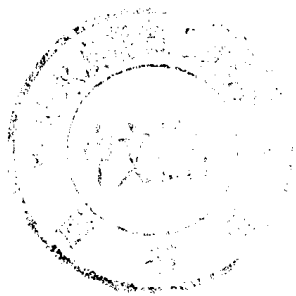
W49
2

462505

复合材料及其结构的 力学、设计、应用和评价

(第二册)

王震鸣 杜善义 张 恒 黎观生
主 编



00462505

哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨

内 容 简 介

EA07/16

本书是一本关于复合材料及其结构的力学、设计、应用和评价的专著,以力学为主。本书涉及复合材料细观损伤过程的声发射实验研究;与复合材料强度理论有关问题的探讨;复合材料汽车的进展;日本先进复合材料的现状与进展;WCF 自行车架的力学问题;层合复合材料低速冲击损伤研究等,共十二章。具有较大的实用价值和理论价值。可供从事复合材料设计和应用等方面的教师、工程师、研究人员、博士生和硕士生参考。

复合材料及其结构的 力学、设计、应用和评价 (第二册)

Fuhe Cailiao jiqi Jiegou de
Lixue、Sheji、Yingyong he Pingjia
王震鸣 杜善义 张 恒 黎观生 主编

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行
哈尔滨市工大节能印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 14 字数 335 千字
1998 年 11 月第 1 版 1998 年 11 月第 1 次印刷
印数 1—1 000

ISBN 7-5603-1351-5/0·93 定价 28.00 元

序 言

到这一册专著为止,我们一共出版了7册专著(前5册当时称为论文集),其中包括《复合材料力学进展》(1册),《复合材料及其结构的力学进展》(1至4册)共5册,后2册为《复合材料及其结构的力学、设计、应用和评价》(1至2册),前2册由我负责约稿,后5册专著仍由我负责组稿。由中国力学学会张志新等负责编审、修改稿件和联系出版事宜。相关作者的大部分为比较有名望的正副教授和研究员,一少部分是博士生。本书还收录了博士论文中的相应内容。在这7册专著(论文集)中,涉及的专题将近100个,既有理论和实验方面的,也有产品开发和应用方面的,尤其对国内外有关方面的进展,介绍得相当详细,因此,这一系列专著具有较大的参考价值。

近几年来,由于各单位(大学和研究所等)经费比较紧张,因此约稿和筹款、开会都相当困难。在此对帮助过本系列专著出版的单位、撰稿人和读者表示谢意。对于出版这7册专著的华南理工大学出版社、武汉工业大学出版社、北京大学出版社和哈尔滨工业大学出版社表示深切的谢意。

本册专著第一章由杜善义、郭艳阳(哈尔滨工业大学,150001)撰写;第二章由王震鸣(中国科学院力学研究所,100080)、杨桂(中华自行车集团复合材料制品公司,广州,518019)撰写;第三章由张恒、张力(洛阳工学院,471039)撰写;第四章由赵稼祥(航天工业总公司北京材料工艺研究所,100076)撰写;第五章由杨桂(中华自行车集团复合材料制品公司,广州,518019)撰写;第六章由陈浩然、孙先念、郭兆璞(工业装备结构分析重点实验室,大连,116024)撰写;第七章由曾庆敦、黄小清、范赋群(华南理工大学,广州,510641)撰写;第八章由江大志、王兴业、肖加余(国防科技大学,长沙,410073)、沈为、黄玉盈(华中理工大学,武汉,430074)撰写;第九章由庞宝君、杜善义、梁军(哈尔滨工业大学,150001)撰写;第十章由张庆明、黄风雷(北京理工大学,100081)撰写;第十一章由张朝晖、张恒、张力(洛阳工学院,471039)撰写;第十二章由朱步银、孙锁泰(江苏理工大学,镇江,212013)撰写。

王震鸣

1998年5月18日

《复合材料及其结构的力学、设计、应用和评价》

(第二册)

编辑委员会

主任委员 王震鸣

副主任委员 杜善义 张 恒 黎观生 张志新

编 委 (以姓氏笔划为序)

王兴业 刘人怀 许陆文 沈大荣 张庆明 李武铨

李思简 陈浩然 苗 冰 杨 桂 庞宝君 范赋群

赵渠森 赵稼祥 黄小清 黄风雷 章怡宁 曾庆敦

韩杰才 蒋咏秋 魏曾甦

目 录

第一章 复合材料细观损伤过程的声发射实验研究	(1)
一、引言	(1)
二、复合材料细观损伤的 AE 特征研究	(1)
三、复合材料单层板细观损伤过程的 AE 特性	(3)
四、复合材料层合板细观损伤过程的 AE 特性	(9)
五、复合材料 AE 信号的神经网络识别	(12)
六、复合材料层合板细观损伤演化过程模拟	(14)
七、利用 AE 技术预报纤维缠绕复合材料壳体剩余强度	(15)
参考文献	(19)
第二章 与复合材料强度理论有关的问题探讨	(20)
一、引言	(20)
二、基本概念和有关问题的探讨	(20)
三、复合材料的强度准则和破坏机理	(30)
四、强度准则与试验数据的比较和讨论	(40)
五、结束语	(58)
参考文献	(60)
第三章 复合材料汽车的进展	(63)
一、引言	(63)
二、复合材料汽车车身	(64)
三、复合材料板弹簧	(66)
四、复合材料油箱	(67)
五、复合材料发动机	(69)
六、其他汽车零部件的复合材料化	(71)
七、发展动向	(71)
参考文献	(72)
第四章 日本先进复合材料的现状与进展	(74)
一、连续纤维增强陶瓷基复合材料	(74)
二、碳/碳复合材料	(76)
三、碳纤维	(79)
第五章 WCF 自行车架的力学问题	(86)
一、自行车架发展概述	(86)
二、WCF 自行车的设计	(87)
三、WCF 自行车架的力学特点	(92)

四、WFC 自行车架的力学标准	(93)
五、结论	(95)
参考文献	(95)
第六章 层合复合材料低速冲击损伤研究	(96)
一、引言	(96)
二、冲击损伤起始、发展及其影响因素	(97)
三、冲击后剩余性能研究	(101)
四、展望	(107)
参考文献	(108)
第七章 单向复合材料的应力集中及强度的细观力学研究	(112)
一、引言	(112)
二、计及基体刚度的单向复合材料应力集中	(114)
三、界面损伤对单向复合材料应力集中的影响	(120)
四、含界面剪切强度效应的单向复合材料统计强度	(125)
参考文献	(130)
第八章 复合材料层合板冲击损伤和破坏过程的数值模拟	(132)
一、引言	(132)
二、弹、靶接触算法	(133)
三、损伤本构方程	(134)
四、非线性大变形增量型本构方程和动力方程	(138)
五、复合材料层合结构宏观破坏准则和破坏过程模型化	(139)
六、玻璃纤维增强环氧层合板对于弹冲击响应的三维数值模拟	(141)
七、结束语	(145)
参考文献	(147)
第九章 三维多向编织复合材料力学性能研究及其细观计算力学分析	(149)
一、引言	(149)
二、三维编织复合材料性能预报的研究进展	(150)
三、三维多向编织复合材料的细观计算力学研究	(155)
四、本构关系非线性行为及细观损伤分析计算力学研究	(158)
五、结束语	(163)
参考文献	(163)
第十章 三维纺织复合材料及其应用	(166)
一、引言	(166)
二、三维织物结构复合材料的一般概念	(167)
三、国内外研究状况	(168)
四、应用前景	(172)
五、结束语	(174)
参考文献	(175)
第十一章 聚合物基复合材料点接触润滑问题的实验研究	(177)

一、计算方法	(177)
二、实验	(178)
三、实验结果及分析	(178)
四、结论	(182)
参考文献	(183)
第十二章 正交各向异性板壳理论的一些改进	(184)
一、引言	(184)
二、正交异性板理论	(184)
三、考虑横向剪切变形的各向异性板的近似理论	(193)
四、各向异性板的另一种近似理论	(196)
五、板的算例	(198)
六、正交异性板的扁壳理论	(203)
七、考虑横向剪切影响的极扁壳的近似理论	(208)
八、极扁壳的另一近似理论	(211)
九、壳体计算举例	(213)

第一章 复合材料细观损伤过程的声发射实验研究

一、引言

复合材料是一种非均质的各向异性材料,细观损伤机理和损伤演化过程极其复杂,给复合材料性能研究工作带来很大的难度。几十年来,一大批学者在这方面做了大量工作,尤其是在理论研究方面。Bailey 及合作者分析了对称正交铺设层板在单向拉伸载荷作用下内部基体裂纹间距和轴向刚度的关系^[1];Laws 等人通过自相容方法和经典层合板理论,推导得出了任意铺层层板刚度和细观损伤关系式^[2];Rosen 提出链式模型,采用统计方法研究层板强度和纤维断裂的关系^[3];Zweben 和 Argon 提出裂纹统计扩展理论,预报复合材料层板强度^[4,5];范赋群依据层板内纤维断裂规律,创立随机临界核理论描述单向复合材料层板细观损伤过程^[6,7],等等。还有许多研究者提出了另外一些理论和方法,研究基体开裂演化、界面失效、分层发展及各种损伤模式相互作用对材料性能的影响^[8-13]。

尽管研究理论、模型和方法众多,但多数是对一些理想化损伤模式下的材料刚度、强度等性能进行的分析论证。这些研究结论涉及的材料参数较多,既不易被实验验证,更不易被工程应用。因此,继续深入研究复合材料细观损伤演化规律,提出便于工程应用的理论和方法,仍然是复合材料研究的重点课题之一。

目前,工程上仍然采用金属材料结构检测方法检验复合材料结构强度。譬如对复合材料压力容器(壳体),即在设定的实验压力下对其进行水压实验,如果通过检测就认为满足工作压力的要求。这种方法忽视了金属和复合材料损伤破坏过程的差异,因此不尽合理。一方面由于水压检测给复合材料结构造成大量内部损伤,为应用留下低压破坏的隐患;另一方面因为检测压力过高,也影响了复合材料优良性能的发挥。

作者立足于复合材料结构安全检测和可靠应用的需要,在参阅大量中外文献的基础上,从复合材料细观损伤声发射信号特征的监测出发,结合多项实验技术和分析手段,探讨复合材料层合结构细观损伤过程的规律性,以及复合材料壳体结构初始检测损伤对剩余强度的影响,为今后改进复合材料结构评价方法提供理论依据和方法。

二、复合材料细观损伤的 AE 特征研究

2.1 声发射技术原理

声发射(AE)是自然界普遍存在的一种物理现象,是指物体由于局部应变能快速释放而发出弹性波的过程。利用机电转换接收仪器和计算机技术,对这种弹性波进行接收、记录、处理和分析的技术就是声发射技术,它是近年迅速发展起来的一种动态无损检测技

术,广泛应用于航空、航天、原子能、冶金、石化、地质、建筑和医学等领域。

利用声发射技术,可以接收到来自复合材料承载过程中的纤维断裂、基体开裂、界面剥离和分层等主要损伤信息,这些细观损伤机理不同,发射的声发射信号特征也不同。在国内外文献中,学者们尝试运用各种方法来接收复合材料细观损伤信号、分析信号的数字参量特征。其中,采用声发射事件幅值、延时、能量和上升斜率来表征不同损伤模式;采用事件计数过程曲线、幅值分布研究损伤机理特征;采用幅值、费利西蒂比和恒载声发射研究复合材料损伤程度、评价结构的可靠性等等。这些方法和结论对深入研究复合材料细观损伤过程的特点,监控复合材料结构的承载可靠性提供了有效途径,是近年复合材料检测研究的一热门课题。

2.2 复合材料细观损伤类型的 AE 特征研究

复合材料细观损伤的声发射特征是突发型的,形成时域上可分离的断续信号,如图 1-1 所示。

复合材料的破坏和金属材料明显不同。金属结构材料通常从单个裂纹萌生、扩展和失稳发展到最后失效。复合材料破坏是从区域微细裂纹的累积开始的,而不是单个缺陷的扩展过程。随着载荷的变化,复合材料内部不断发生纤维断裂、基体开裂、界面分离和分层破坏,这些损伤类型相互作用,相互影响,产生十分丰富的声发射信号。由于不同类型的信号交织在一起,研究者必须分析各类损伤的不同声发射特征。

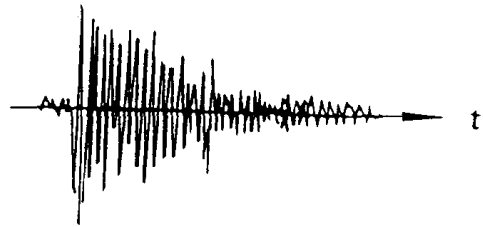


图 1-1 复合材料细观损伤时域声发射信号

利用各种复合材料试件研究不同损伤类型的声发射特征是一个有效的途径,具体过程是对试件进行加载,采用置于物体表面的传感器接收材料内部损伤信息,传感器将接收到的波形转换成电信号,再经信号放大器处理放大,滤波器滤除背景噪声后由计算机处理形成各种声发射信号参数,如图 1-2 所示。

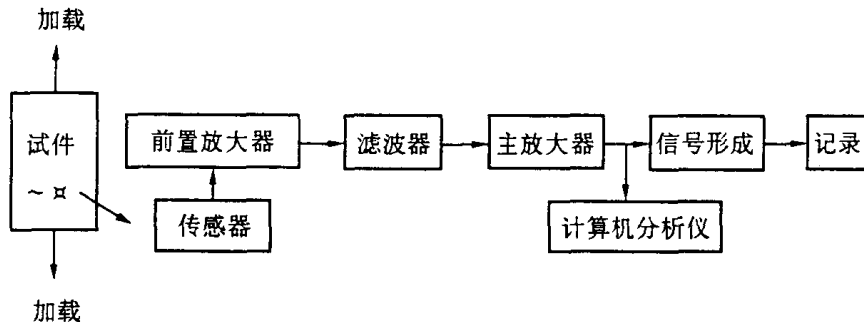


图 1-2 声发射技术检测原理

为了得到具体损伤类型的声发射,铃木惠等^[14]采用 AE 频率参量分析了碳纤维增强层板的破坏机理,借助于电子显微镜和光学显微镜观察,得到了基体开裂、纤维与基体界面剥离、纤维与基体界面摩擦、纤维断裂和分层对应的不同 AE 信号频率范围分别是 50 ~ 100kHz, 150 ~ 250kHz, 270 ~ 390kHz 和 630kHz; Chamiotclerc^[15]对 SIC 增强 AI 基复合材料承载过程中纤维断裂的 AE 特征进行研究,采用重叠法从检测信号中分离出纤维断裂的原

始信号类型;Toshiyuki^[16]基于上升斜率参量从大量信号中区分出界面破坏的信号特征;Hiroaki^[17]通过 AE 信号上升时间参量,区分出玻璃纤维/环氧复合材料中纤维断裂和纤维/基体界面脱粘破坏;Thomas^[18]在石墨/环氧复合材料中发现 AE 幅值是区分试件纵向撕裂和纤维断裂的依据。

我国学者在复合材料细观损伤类型声发射特征研究方面进行了一些探索性基础研究,得到了一些重要结论。袁振明^[19]根据幅度分布曲线斜率的变化判断复合材料的不同损伤阶段机理,经过电镜和扫描观察,得到了一定程度的验证;李兰^[20]利用特殊试件实验,从玻璃纤维/环氧复合材料中发现了基体开裂 AE 幅度较小,界面破坏 AE 幅度较宽,纤维断裂 AE 幅度较高的特点;金周庚^[21]利用 AE 信号幅度、持续时间两参量,定量地给出了复合材料不同损伤类型、不同损伤阶段的声发射特点,作者也给出 APMOC/环氧复合材料损伤类型的不同 AE 参量特征,并结合扫描电镜得到验证。

2.3 复合材料结构内部损伤过程声发射监测

复合材料结构在承载服役过程中内部不断发生各种损伤,研究者依据大量的实验件研究结果认为,那些高幅值、高能量和高活性的 AE 信号是复合材料结构的“危险源”,必须加以重视。为此,工程上尝试应用声发射技术检测复合材料的损伤源部位,评价复合材料结构的可靠性,提高结构的安全保障。

实际上,国外几家火箭发动机制造厂都利用声发射技术确定危险源部位,然后通过超声波技术对缺陷进行判断,认为在水压实验中无异常声发射活动的壳体才能使用。Hamstad^[22]利用 15 个传感器对大型 Kevlar/环氧火箭发动机壳体进行声发射监测,成功地确定出可能发生破坏的损伤活动性区域;McNally^[23]对石墨/环氧复合材料发动机壳体进行声发射探伤,通过加载—恒载—卸载检测程序中声发射事件计数的上升情况,判断结构的安全性;美国莫顿·锡奥科尔公司^[24]对全尺寸纤维缠绕火箭发动机壳体水压实验进行声发射监测,给出了评价结构性能的几个 AE 判据。

鉴于对复合材料损伤模式、破坏过程声发射特征研究还处于探索阶段,许多问题至今仍未得到很好解决,AE 特征是一个值得深入研究的领域。本章在总结前人工作的基础上,针对 APMOC/环氧复合材料进行了大量的声发射监测实验研究,首次得出了一系列重要数据;对水压试验过程中壳体的 AE 活性进行监测,分析得出结构初始水压检测损伤和剩余强度的关系,为工程应用与理论研究提供了新思路。

三、复合材料单层板细观损伤过程的 AE 特性

3.1 实验准备

实验用试件是 APMOC/环氧树脂复合材料,纤维性能见表 1-1,环氧树脂断裂延伸率为 2.5%,纤维含量为 50%。

表 1-1 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	4 210	3.2

APMOC 纤维属芳纶纤维系列,是航空航天结构件的首选材料之一。但是,因其韧性极高,切割非常困难。经过多次试验后,本次实验用试件全部在 RS1700 激光切割机上切割制成,试件两边光滑,平行度高,保证了实验试件尺寸的统一性,也减少了边缘噪声对试验精度的影响。

参考实验标准 ASTM D3039 和 GB3354,制定试件尺寸如表 1-2。

表 1-2 APMOC/环氧试件尺寸

试件编号	铺相角	试件尺寸(mm)	试件数量	加载速度(mm/min)
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

声发射数据采集选用美国 PAC 公司 SPARAN 型声发射仪。在每个试件上用 2 个传感器线阵固定,传感器中心振动频率为 150kHz。使用高级真空脂将传感器耦合固定在试件上,试验前对传感器进行校准。

信号采集系统设定门槛值为 40dB,系统增益 30dB。所有试件均在 Instron - 1186 型万能实验机上进行拉伸加载。实验过程控制加载、卸载速率恒定,保证实验数据的可比性。

3.2 0°铺向单层板细观损伤过程的 AE 特征

首先选用声发射计数参量来研究单层板的损伤阶段性特征。声发射计数是指一个声发射事件超过门槛的振荡次数,可以表征材料的损伤模式和损伤活性特点。

图 1-3 记录了 0°铺向单层板声发射计数与时间关系曲线。从图中可以明显看出,0°铺向单层板的声发射特性可以分为三个不同声发射阶段:第一个阶段计数峰较高,事件频率较大,说明有大量损伤产生;第二个阶段计数峰非常低,频率也较第一个阶段低得多,说明损伤趋于稳定,进入平稳期;第三个阶段材料接近破坏,声发射突然变得异常丰富,计数峰不断攀高,计数频率也更快,直至试件破坏。

为了分析单层板三个不同阶段的 AE 信号特点,对这三个阶段信号分别进行了幅值分布研究,结果分别见图 1-4、图 1-5 和图 1-6。

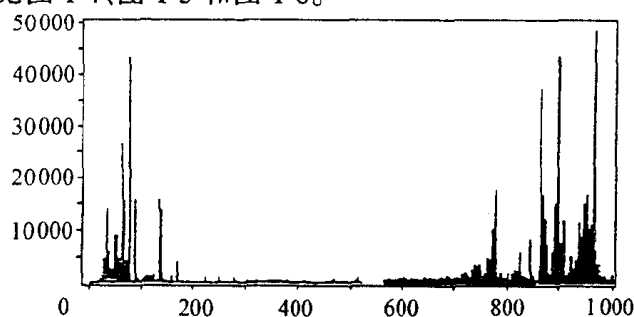


图 1-3 0°铺向单层板声发射计数与时间关系

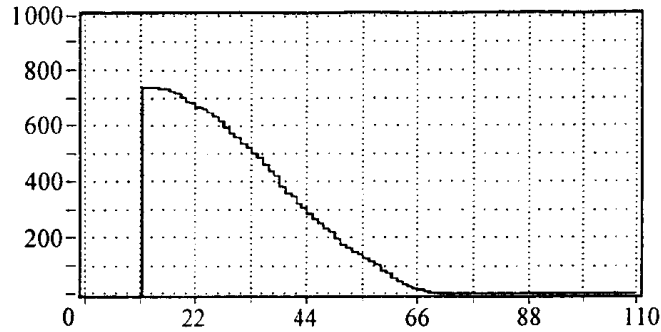


图 1-4 第一阶段声发射信号幅值分布

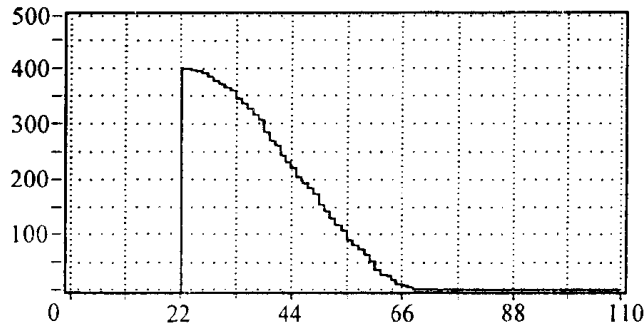


图 1-5 第二阶段声发射信号幅值分布

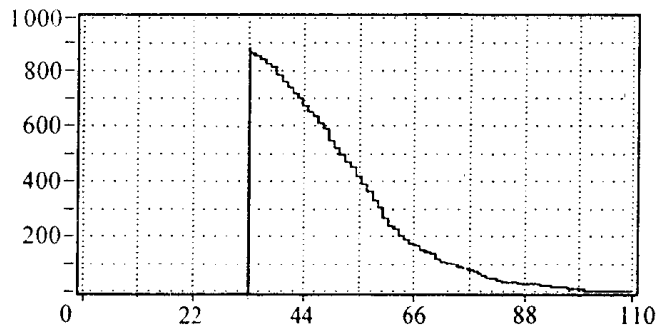


图 1-6 第三阶段声发射信号幅值分布

在最初的幅值分布图 1-4 中显示,声发射信号的幅值峰在 11dB,信号最高幅值是 70dB,所有信号平均幅值是 40dB。考虑到基体的断裂延伸率远小于纤维的断裂延伸率,所以有理由推测第一阶段的声发射信号主要来自基体开裂。另外,由于制作过程造成的局部纤维/基体界面粘结不牢也会导致界面发生开裂破坏,产生声发射信号。0°铺向单层板最后因撕裂而破坏,在沿着试件轴向撕裂的断口中发现了一些破碎纤维。

第二阶段声发射信号幅值分布见图 1-5,信号表现为低幅值特征,最高幅值不到 70dB。与第一阶段相比,这里接收的信号最低幅值增高到 22dB,平均事件幅值增加到 45dB。

在试件损伤进入最后阶段前卸载,截取小块试件进行电镜扫描分析,材料细观损伤形貌见图 1-7。从照片可以看到有大量基体发生了碎裂,部分纤维与基体分离,但纤维没有断裂。由此,可以断定,最初两个阶段声发射代表了基体开裂和界面剥离特征。

第三阶段幅值分布图 1-6 中声发射幅值明显增高,从 33dB 到 100dB,事件幅值峰为 33dB,平均幅值增高到 55dB,出现了许多大于 70dB 的声发射信号。从试件最后断口可以

推测这里的高幅值信号来自纤维断裂和界面撕裂破坏。

对高幅值信号延时参量分析发现,这里的高幅值信号($> 70\text{dB}$)对应两个延时范围:一是延时小于 $1\,000\mu\text{s}$,二是延时大于 $2\,000\mu\text{s}$ 。

统计7个 0° 铺向 APMOC/环氧复合材料单层板拉伸过程的细观损伤演化声发射规律性特征,发现了如下几点特性:首先是初始声发射都在 $4\% \sim 6\%$ 破坏载荷水平开始;在 $15\% \sim 30\%$ 的破坏载荷之间进入损伤平稳期;其次是这两个阶段信号幅值均小于 70dB ,第二阶段信号延时较第一阶段长。根据第二部分,研究者对复合材料损伤机理声发射特性研究得知,基体开裂、纤维/基体界面分离对应的声发射信号幅度小于 70dB ,延时小于 $2\,000\mu\text{s}$ 。表 1-3 给出了 0° 铺向单层板损伤过程的声发射特征。



图 1-7 0° 铺向单层板内的损伤情况

0° 铺向单层板损伤过程大体分三个阶段,最后由于纤维断裂,纤维/基体界面撕裂导致试件失稳破坏。

表 1-3 0° 铺向单层板损伤的声发射特征

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)	第三损伤阶段起始载荷(N)	最终破坏载荷(N)	第一损伤阶段 AE 幅度(dB), 延时(μs)	第二损伤阶段 AE 幅度(dB), 延时(μs)	第三损伤阶段 AE 幅度(dB), 延时(μs)
1	29.4	127.4	402	568.4	$< 70, < 2\,000$	$< 70, < 2\,000$	$< 100, < 3\,000$
2	29.4	107.8	410.4	588	$< 70, < 2\,000$	$< 70, < 2\,000$	$< 100, < 3\,000$
3	27.44	186.2	453	666.4	$< 70, < 1\,500$	$< 70, < 2\,000$	$< 100, < 3\,000$
4	24.5	166.6	436	588	$< 60, < 1\,500$	$< 70, < 2\,000$	$< 100, < 3\,000$
5	29.4	88.2	380	539	$< 70, < 2\,000$	$< 70, < 2\,000$	$< 100, < 3\,000$
6	29.4	127.4	375.8	548.8	$< 60, < 1\,500$	$< 70, < 2\,000$	$< 100, < 3\,000$
7	28.42	117.6	452	607.6	$< 70, < 2\,000$	$< 70, < 2\,000$	$< 100, < 3\,000$

3.3 $60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$ 铺向单层板的 AE 特性

尽管工程上使用的都是复合材料层合板和缠绕结构,但为了便于观察复合材料层板的细观损伤过程 AE 特性,将层合板看作由不同铺向单层板构成,先考虑各铺向单层在偏轴拉伸载荷下的损伤 AE 特性,分别对 $60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$ 铺向板的破坏特性进行声发射监测。

从记录到的声发射计数与时间关系曲线来看,依偏轴拉伸角不同,损伤过程的声发射活动情况各不相同,如图 1-8、图 1-9 和图 1-10 所示。

首先, 60° 铺向单层板随载荷增加,计数频率及声发射计数峰值越来越高,直到试件破坏; 45° 铺向单层板计数是一个离散过程,试件破坏之前产生几个断续事件计数峰,到最后

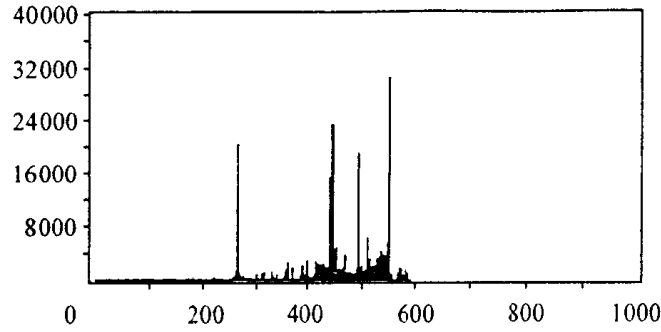


图 1-8 60°铺向单层板声发射计数与时间关系

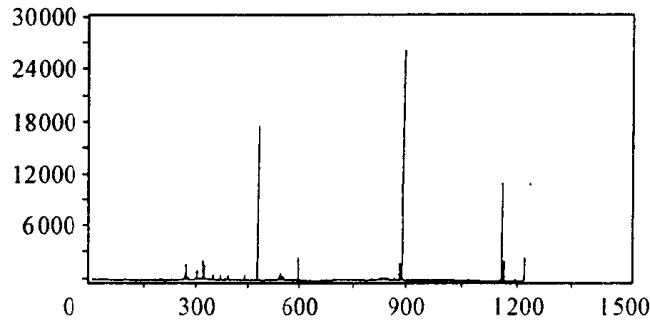


图 1-9 45°铺向单层板声发射计数与时间关系

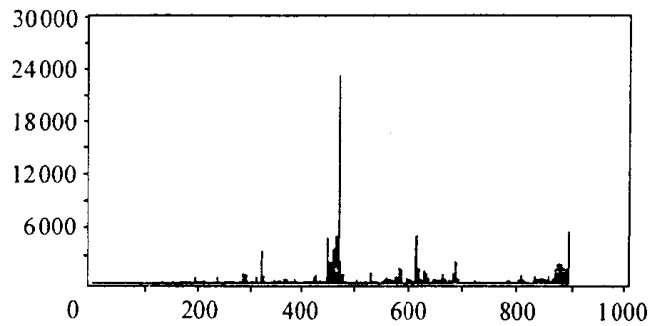


图 1-10 30°铺向单层板声发射计数与时间关系

破坏前也未发现急剧的声发射现象;30°铺向单层板破坏之前也出现计数峰,最高的计数峰在加载至破坏载荷 1/2 时刻,声发射计数频率介于 60°和 45°之间,临近破坏时产生连续声发射。

这三种偏轴角拉伸试件在承载过程中记录到的声发射事件幅值分布如图 1-11、图 1-12 和图 1-13。图 1-11 显示的事件幅值最高为 60dB,最低是 11dB,平均事件幅值为 35dB。试件最后破坏载荷非常小,不可能引起纤维断裂,所以这里记录到的声发射信号主要来自基体开裂。

图 1-12 中声发射事件非常少,幅值分布在 22 ~ 60dB 之间,平均事件幅值是 40dB,较图 1-11 中高了 5dB。这主要是因为随着拉伸偏轴角的缩小,纤维开始承载,基体开裂需要更高的载荷所致。除此以外,这里记录到的声发射特征和图 1-11 几乎相同。

图 1-13 显示的幅值分布情况和前两者略有不同,事件幅值增高,最高幅值达到 70dB,平均幅值接近 45dB。

对试件断口附近取样进行扫描电镜分析,观察细观损伤破坏机理。电镜照片如图 1-

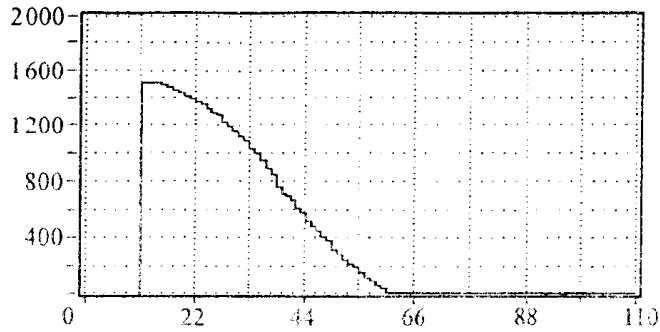


图 1-11 60°铺向单层板的幅值分布

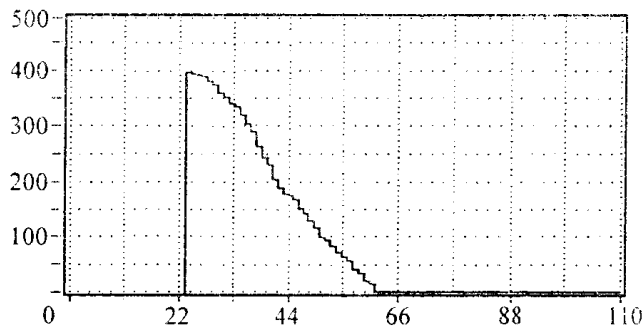


图 1-12 45°铺向单层板的幅值分布

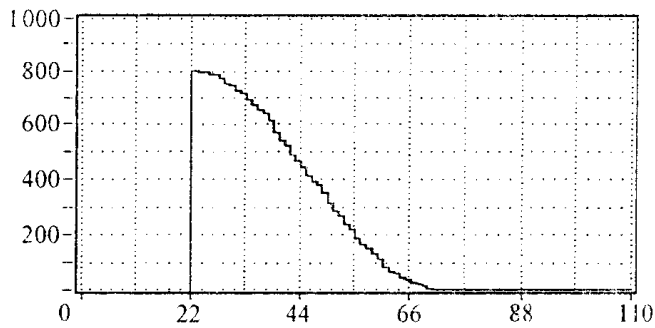


图 1-13 30°铺向单层板的幅值分布

14、图 1-15 和图 1-16。60°基本上是基于基体承载破坏;45°承剪能力最弱,试件最终强度由纤维/基体界面强度控制,破坏时只有少量基体开裂,这和图 1-15 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,说明计数能够反映单层板偏轴拉伸的损伤过程特征。

三种偏轴拉伸角单层板声发射信号的幅度小于 70dB,延时小于 500 μ s。随偏轴拉伸角的增加,初始声发射出现滞后,对应载荷水平分别为其破坏载荷的 20% ~ 30%,30% ~ 40%和 40% ~ 60%。这是由于偏轴拉伸角越小,纤维与基体之间承受拉伸载荷份额的差别越大,导致基体裂纹较早出现的缘故。

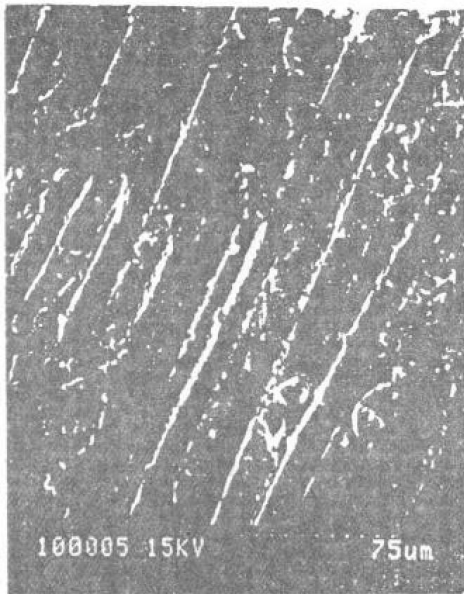


图 1-14 60°铺向单层板断口附近损伤形貌



图 1-15 45°铺向单层板断口附近损伤形貌

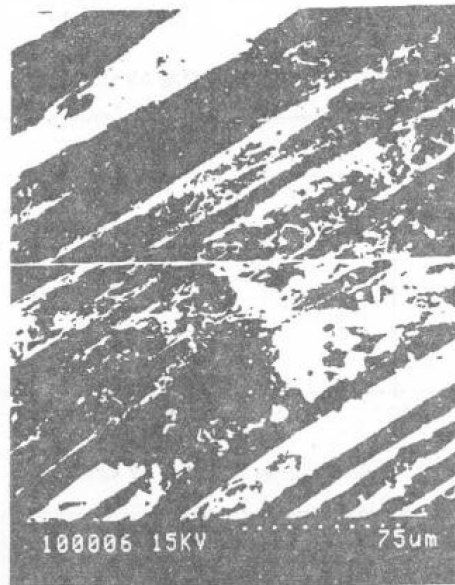


图 1-16 30°铺向单层板断口附近损伤形貌

四、复合材料层合板细观损伤过程的 AE 特性

4.1 0°/90°层合板声发射特性

图 1-17 给出了 0°/90°层合板从细观损伤开始到试件最后宏观破坏全过程的声发射计数与时间关系。大约在 10%破坏载荷左右记录到初始声发射,在 30%破坏载荷时声发射活动趋于平静,从临近 70%破坏载荷时起,声发射突然变得异常活跃,材料进入最后破坏阶段。0°/90°层合板对应三个损伤破坏阶段声发射幅值分布特征如图 1-18 ~ 图 1-20。

比较三张图表发现,随着拉伸载荷不断提高开始出现越来越高的幅值声发射信号。