第5卷 第2期
1984年6月

航 空 学 报
ACTA AERONAUTICA ET
ASTRONAUTICA SINICA

Vol. 5 No. 2
June 1984

多向铺层碳/环氧复合材料特性及声发射分析

中国科学院力学研究所 冼杏娟 蒋灿兴

摘 要

本文对六种多向铺层的碳纤维增强环氧复合材料的拉伸破坏性能进行了研究，并采用声发射技术监测其损伤扩展过程，分析了它们的破坏机理。

新型的高性能碳纤维增强环氧复合材料应用于宇航、机械及体育器具等，由于工作条件及受力情况是复杂的，采用多向铺层才能满足受拉、压、弯、剪、扭等不同载荷的分别组合，具体铺层设计要针对主要承力情况来确定。多向铺层复合材料的损伤破坏比单向铺层的情况复杂，更需要采用试验的手段来研究它们的力学性能和破坏机理。在非破坏性测试中[1]声发射技术的特点在于能够配合加载装置在进行试验过程中检测并记录复合材料的破坏过程，而且不移动探头的位置即可监测材料的较大区域，因此应用愈来愈多。声发射技术是利用材料或构件受力变形或损伤过程中应变释放产生弹性波这一原理来检测材料的缺陷、退化和破坏，评定材料的性能。声发射技术可以检测复合材料的剪切破坏及拉伸屈服破坏、分层及纤维断裂、粘接强度等。

本工作对六种多向铺层碳/环氧复合材料（包括0/90、±45°、30/60和三种碳布）进行拉伸试验，确定了它们的强度、模量、最大应变率及泊松比，给出六种不同铺层的应力应变关系以及声发射信号量的关系。采用声发射技术配合显微镜观测手段分析不同铺层的碳/环氧材料的声发射表征量与复合材料组分破坏、裂缝扩展及应力水平的对应关系，研究了它们的破坏特征及机理。

一、材料与试件

试验材料为碳纤维增强环氧（L180/648）复合材料，包括〔±45°〕$_s$、〔30/60〕、〔0/90〕，它们的纤维体积含量V_f约为60%。三种碳布：B-a类为六层，两外侧两层纵向布、中间两层横向布〔11=11〕，顺纵向切取试件；B-I类为五层碳布，两外侧各一层横向布，中间三层纵向碳布〔—111—〕，顺纵向切取试件；B-I类为横向碳布试件。每层碳布有经纬向及45°纤维铺层。试件加工为矩形。试件的几何尺寸与试验结果见表1。

1983年5月收到。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表1 六种铺层碳/环氧材料性能及声发射实验结果

Talle 1 Ihe Experimental Result of Properties and AE of Six Ply Carbon/Epoxy

铺层	试件类型	试件数	截面积 $F(mm^2)$	强度 $\delta_{ult}(kg/mm^2)$	模量 $E(kg/mm^2)$	泊桑比 ν	开始出现 AE_r 信号的 $\delta_{ult}\%$	突发 AE_r 信号时的 $\delta_{ult}\%$	出现最大 AE_r 的 $\delta_{ult}\%$	相对 AE 最大值 AE_r	AE_{rt}
$[0/90]_s$	C-正-1	5	27	41.6	4268	0.018	40	50	100	9.6×10^2	1.9×10^4
$[\pm45°]_s$	$C-\pm45°-1$	5	18.12	9.25	1033	0.54	65	85	95	8.3×10^2	10^4
[30/60]	$C-I-1$	5	53.5	7.76	1459	0.84	40	60	92	9.8×10^2	5.85×10^4
布[11=11]纵	$B-a$	4	15.31	73.2	8095	0.39	15	40	100	10^3	6.1×10^4
布[—111—]纵	$B-I$	4	17.5	74.4	8499	0.295	35	60	87	2.8×10^3	1.4×10^5
横向碳布	$B-1$	4	20	5.97	1282	0.083	40	45	86	2.2×10^2	2.25×10^4

二、试验装置与测试方法

试验在Instron1195试验机上进行，加载速度1毫米/分，采用引伸计测量变形，用应变片测量泊松比，自动记录载荷-位移或应力-应变曲线，显微镜观察试件破坏情况。

SFS-4四通道声发射装置用以监测试件承载时的损伤破坏过程，通过复合门槛，提高了抗干扰的能力，得到了试件损伤时有用的声发射信号。120KHz的压电谐振式探头用油脂固定在试验件上保证良好的声耦合，由传感器接收的声发射转换为电信号，通过放大、鉴别、信号分析，得到各种声发射表征参数（如试件、振铃、能量、铃宽、加权振铃等），在记数器上显示，并在X-Y_1-Y_2仪上分别自动记录声发射增量和累积量对时间的关系[2]。由于加权振铃（以下简称权铃）代表声发射信号整个原始振铃面积的脉冲信号，即包含了声发射振铃信号的幅度和振铃时间两个因素，权铃比其它表征参数能更好地反映材料变形与破坏的能量。因此本工作选择了加权振铃作为表征参量。图中AE_r为加权振铃增量，AE_{rt}为权铃累积量。试验条件：前置放大器为40db，主放大增益为35db，门槛电压为2V。

三、实 验 结 果

1. 正交铺层碳/环氧试件

$[0/90]_s$铺层试件承受拉伸载荷时，应力-应变线性关系达40%极限强度（σ_{ult}）时斜率有微小的下降，此时声发射信号开始出现，权铃量为2.1×10^2，达最大应变1/3（图1），自此至60%σ_{ult}过程中相似大小的权铃在较稀的间隔出现，这是90°纤维之间开裂脱胶，达60%σ_{ult}，纵向裂缝开始出现，声发射权铃信号（AE_r）加密出现，达3.5×10^2，更强的AE_r达$4\sim4.6\times10^2$，约5%σ_{ult}的间隔出现一次，是纵向纤维断裂，在间隔内，脱胶及纵向裂缝越来越多地产生，AE_r也随之加密，最后断裂时AE_r达9.6×10^2，加权振铃总计数AE_{rt}达1.9×10^4。极限强度σ_{ult}为40.18kg/mm²，模量为4190kg/mm²，该类试件的泊松比为0.018，实验结果见表1（表中所列为平均值）。正交铺层试件的断裂破坏有两种型式（图2），一种断裂面为横向（90°）断开，但纵向纤维多数没有断裂，只有少量断开，由于90°方向的开裂，应力集中的影响沿纵向出现许多纵向裂缝，整个试件

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

没有断开，此类破坏型式较多；另一种是完全横断，断口一般较整齐，有的断口有纵向纤维的小条带。

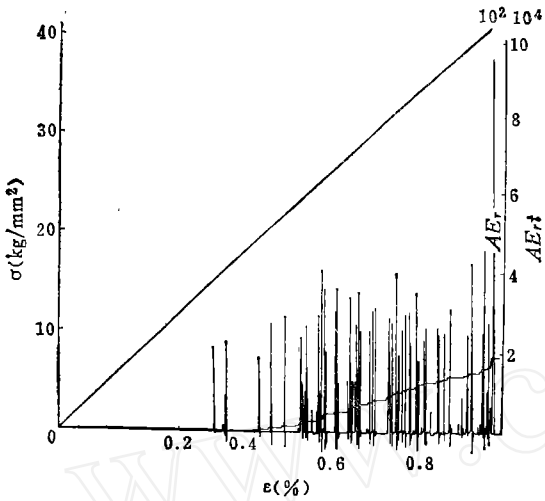

图1 〔0/90〕s应力-应变、声发射-应变曲线

Fig. 1 Stress-Strain, AE-Strain Curves of 〔0/90〕s Specimen

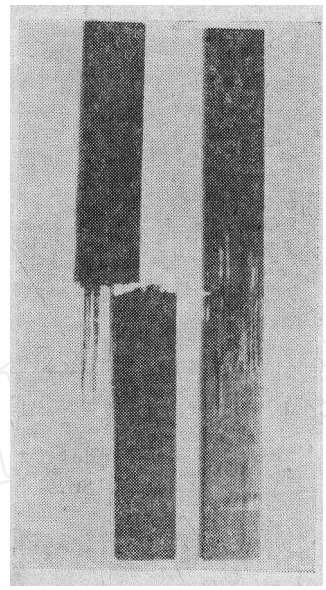

图2 〔0/90〕试件破坏型式

Fig. 2 Failure Mode of 〔0/90〕Specimen

2. ±45°铺层碳/环氧试件

±45°铺层试件加载达35%σ_{ult}，前应力-应变曲线是线性的，继续加载，偏离线性，这是由于受拉伸后沿45°产生层间剪切（图3），加载至65%σ_{ult}达最大应变1/2时，AE_r出现大小约为2.5×10^2的信号，这时一层沿45°脱胶，每一层沿45°分层脱胶时出现一较大的信号。由于沿45°裂缝的扩展，中间有微弱的AE_r(2×10)，达95%σ_{ult}以后，信号加强增密，较密集的中强AE_r值为界面分离；强的AE_r达6.7×10^2，各层全剪坏，最后断裂；最强的AE_r为8.3×10^2，权铃最大总数为10^4。由于±45°相互牵制，一般试件破坏不能承载时试件没有完全断开（图4），但可见每一层都沿±45°方向分别开裂。平均强度值为9.24kg/mm²，模量为1033kg/mm²，最大应变率为2.1%，泊松比为0.54。

3. 30/60铺层碳/环氧试件

〔30/60〕；试件加载至35%σ_{ult}，应力-应变曲线出现转折（图5），直线斜率下降，但随后仍是直线至95%σ_{ult}试件接近破坏时，曲线有一抖动，载荷下降2公斤后又继续上升至7.24kg/mm²破坏。声发射在40%σ_{ult}时开始出现一信号（10^2），60°的一层沿60°开始脱胶，在60%σ_{ult}时，30°的一层沿30°开裂，出现中强AE_r(3.2×10^2)，信号加密，界面分离拉开（图4），达80%σ_{ult}又一层界面分离，AE_r达4.3×10^2，信号逐步加强并密集，加载至90%σ_{ult}时，强的AE_r(9×10^2)相继出现，各层相继开裂，裂缝扩展拉开引起中强的AE_r夹在其中，最后在7.24kg/mm²极限强度断裂，最大AE_r为9.8×10^2，最大的AE_{rt}为5.85×10^4。模量为1280kg/mm²，最大应变率为1.4%，泊松比为0.3。

4. 碳布B-a类试件

〔11=11〕纵碳布B-a试件的应力-应变关系一直是线性的（图6），由于主要由四

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

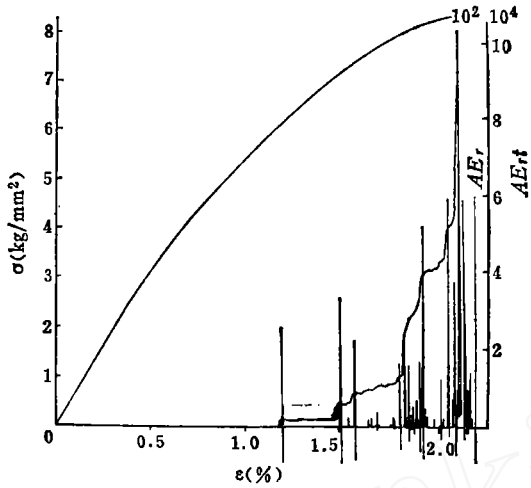

图3 〔±45°〕s试件应力-应变、声发射-应变曲线

Fig. 3 Stress-Strain, AE-Strain Curves of 〔±45°〕s Specimen

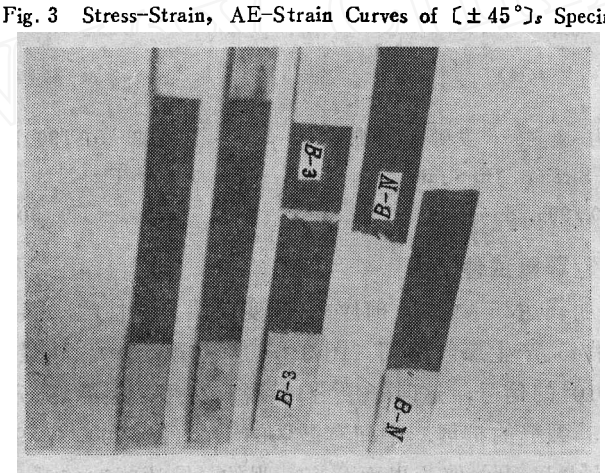

图4 〔±45°〕、〔30/60〕、B-Ⅰ、B-1类试件破坏型式

Fig. 4 Failure Mode of 〔±45°〕, 〔30/60〕, B-Ⅰ, B-1 Type Specimen

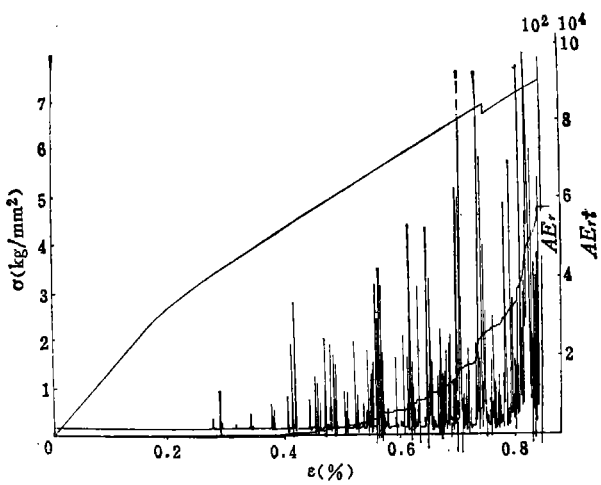

图5 〔30/60〕试件应力-应变、声发射-应变曲线

Fig. 5 Stress-Strain, AE-Strain Curves of 〔30/60〕Specimen

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

层径向碳布起作用，性能接近0°铺层试件，强度达73.5kg/mm²，模量达8333kg/mm²，泊松比为0.33。但由于碳布纤维虽以径向为主但夹有纬向，因此应变率较大，而且较早（15%σ_{ult}）即出现小的AE_r(10^2)，这时纬向层开始脱胶，在25%σ_{ult}以后，声发射信号稍有增加，达40%σ_{ult}时径向纤维断裂，突发一强信号AE_r达9.4×10^2，然后继续出现中强及小的AE_r，分别为径向裂缝扩展及纬向脱胶，至最后AE_r达满标（$>10^3$），试件断裂。最大权铃总量为6.1×10^4。

5. 碳布B-Ⅰ类试件

B-Ⅰ〔—111—〕纵碳布试件的应力-应变曲线（图7）在40%时出现一不很明显的转折，斜率稍有改变，但仍是线性直至破坏，强度σ_{ult}为75.14kg/mm²，模量E为8580 kg/mm²，最大应变ε_{max}为0.98%，泊松比ν 0.27。当加载至35%σ_{ult}，2/5的最大应变时，纬向层脱胶，出现AE_r(4×10^2)，直至50%σ_{ult}时又出现另一相当的AE_r，约在5%σ_{ult}间隔，又出现另一纬向层，碳布格子松开，至60%σ_{ult}时AE_r增至1.1×10^3，径向开裂，最强AE_r(2.8×10^3)出现，径向纤维断裂，在最后断裂前有密集的中强信号，断裂截面基本脆断，但看到有分层的断裂表面（图4），最大权铃总量为1.4×10^5。

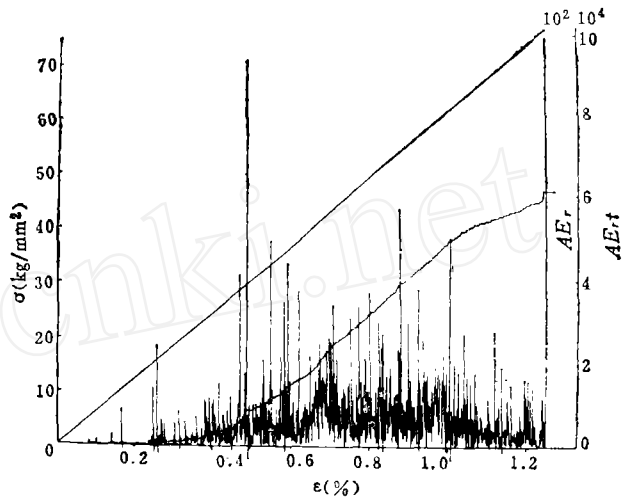

图6　B-a试件应力-应变、声发射-应变曲线

Fig. 6　Stress-Strain, AE-Strain Curves of B-a Specimen

6. 碳布B-1类试件

B-1横向碳布试件的应力-应变关系在40%σ_{ult}线性有所偏离（图8），此时声发射信号开始出现，AE_r为7×10，纬向有界面分离，信号连续出现，达45%σ_{ult}载荷，纬向层继续拉开，受剪呈45°，径向出现裂缝，出现较强的能量释放，AE_r达1.4×10^2，并且在间隔4%的σ_{ult}出现相当的AE_r，最大AE_{rt}为2.25×10^4，σ_{ult}为5.25kg/mm²，E为1308kg/mm²，ε为0.61%，ν为0.07，断口较齐（图4）。

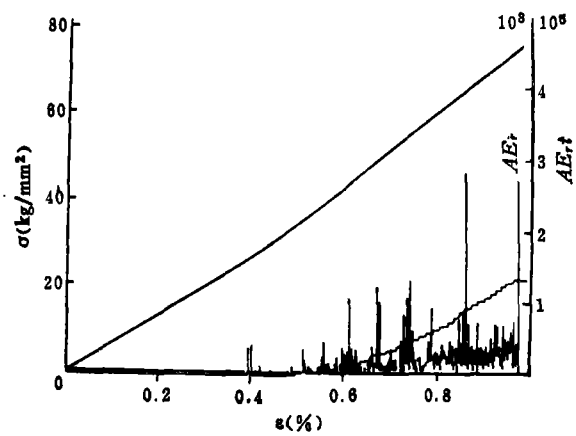

图7　B-Ⅰ试件应力-应变、AE-应变曲线

Fig. 7　Stress-Strain, AE-Strain Curves of B-Ⅰ Specimen

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

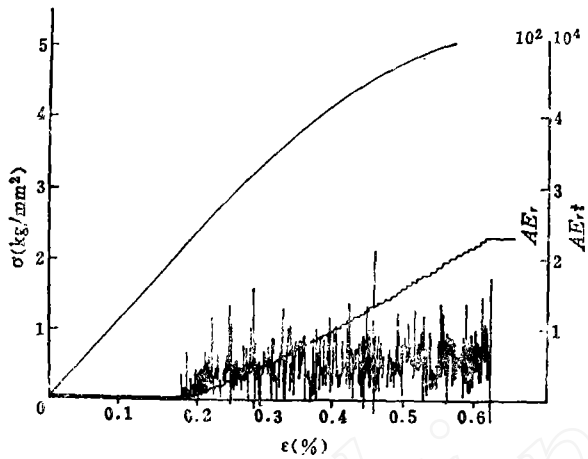

图8 B-1 试件应力-应变、AE-应变曲线

Fig. 8 Stress-Strain, AE-Strain Curves of B-1 Specimen

四、讨论与结语

（1）本实验从六种铺层的碳/环氧复合材料的拉伸力学性能中看，两种纵向碳布（B-Ⅰ类与B-a类）最好，σ_{ult}、E值约为0°铺层85%，ν也接近（0.3），横向碳布B-Ⅰ类的σ_{ult}最低，ε_{max}最小（0.6%），ν也小(0.083)。正交铺层试件的强度值约为0°铺层的50%，可见主要由0°层承受拉伸载荷。±45°试件的σ_{ult}和ε与〔30/60〕试件相似。

（2）声发射技术可以用以监测复合材料的破坏及鉴别不同铺层复合材料的特点，它们有共同的规律也各有特征，声发射加权振铃信号的出现反映了材料的初始损伤释放的应变能，一般出现在应力-应变的拐点处，通常在40%σ_{ult}附近（但此批±45°试件却在较高的应力下才出现，作者做过其它种±45°试件AE也出现在拐点处），约在2/5的最大应变处（只有B-a类在1/5处），对〔±45°〕、〔30/60〕和横向碳布试件，AE_r出现在材料屈服时，由于出现基体受剪开裂脱胶而产生的AE_r值一般在1～4×10²范围内（只有横向布B-1类稍低），裂缝扩展在60%σ_{ult}附近（表1），纵向断裂一般发生在90%时，最大的AE_r一般在10³附近（B-a较大，B-1较小），但最大权铃总数差别较大，说明不同铺层材料破坏时释放的总能量是不同的，纵向碳布B-Ⅰ最高（1.4×10⁵），其余在10⁴～8.6×10⁴范围内。从声发射图象看，碳布由变形和损伤释放的能量是连续的，纵向布信号较丰富，而双向铺层的试件，AE信号不连续，开始间隔较宽，60%σ_b后信号才逐渐增多。正交铺层在比较均匀的间隔出现，权铃量的大小变化不大，这反映了〔0/90〕$_s$铺层具有均质正交各向异性的规则情况，而±45°试件破坏主要在后期产生，能量释放集中在最后阶段，因此AE_r累积曲线上升很陡，30/60试件也有类似情况。断裂截面相对传感器位置的不同，AE量也稍有不同。碳纤维种类不同或所选用的声发射表征量不同，AE的图象也有区别。

（3）多向铺层的碳/环氧材料的损伤从基体受剪开裂发展到纤维基体间的界面脱胶，裂缝产生并扩展，当裂缝增多并扩大到相当程度，引起相当高的应力以致引起附近的纤维破断，最后试件完全破坏。不同铺层材料破坏型式不一，纵向碳布以脆性破坏为主，断裂截面较整齐，应力-应变关系线性，〔±45°〕$_s$和〔30/60〕铺层试件以剪切破坏

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为主，裂缝沿界面方向（即纤维方向）产生并扩展，逐步破坏，最后不能承载，但试件往往不断开。应力-应变关系前一段呈线性，40%以后出现屈服（微屈）。而正交铺层兼有以上二者的特点，有时出现脆断，但更多的是90°层断开引起明显分层，0°层出现较多纵向裂缝但不完全断开。

根据结构的受力情况进行铺层设计，就可以充分利用复合材料的力学设计特点，发挥各向铺层纤维承载能力。采用声发射技术可以鉴别不同铺层复合材料的特性，分析损伤过程，预测破坏，是一种研究复合材料破坏机理的有效手段。

郑维平、刘金珍、谢长春同志参加了试验工作，特此致谢。

参考文献

〔1〕 冼杏娟"复合材料非破坏性测试"力学进展 1 (1982)280-286。
〔2〕 陈西虹等"SFS-4 声发射装置介绍"电子技术应用 1 (1981) 1-20。
〔3〕 R. Teti, A. D. Ieio, I. C. Visconti, Progress in Science & Engineering of Composites (Proc. of ICCM-IV)1507-1514.

FAILURE BEHAVIOUR AND ACOUSTIC EMISSION ANALYSES OF MULTI-PLY CARBON/EPOXY COMPOSITE MATERIALS

Xian Xingjuan and Jiang Conxing
(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

The tensile failure behaviours of six multi-ply carbon/epoxy composites ([0/90]$_s$, [±45]$_s$, [30/60] and three kinds of carbon cloths) have been investigated. Acoustic emission technique was employed in monitoring their damage process together with microscopical observation.

The occurrence of acoustic emission weighted ringdown signals indicate the release of strain energy at the initial damage of the composite materials. Generally, for [±45]$_s$, [30/60] ply and transverse carbon cloths specimens whose stress-strain curves all have an inflection, initial damage acoustic emission signals occur at this location, for most of them in the vicinity of 40% ultimate strength and maximum strain. Their maximum weighted ringdown counts are of the same order of magnitude, but their total A. E. weighted ringdown counts differ magnificantly. This shows that the total energy of damage released is quite different for the differently plied composites. Due to deformation and damage, the A. E. pattern of the carbon cloth specimen demonstrates continuous energy release, but that of bidirectionally plied specimen shows discontinuity. The A. E. signals of cross-ply specimen occur at regular intervals with little change in the amplitudes of the weighted ringdown signals. This indicates homogeneous orthotropy for[0/90]$_s$ specimens. However, for [±45]$_s$ and [30/60] specimens energy release is concentrated at the final stage.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net