

## 芳纶纤维/环氧树脂复合材料损伤与断裂过程的声发射特性\*

刘怀喜<sup>1</sup> 马润香<sup>2</sup> 张恒<sup>1</sup>

(1 郑州大学机械学院, 郑州 450052; 2 郑州大学物理工程学院, 郑州 450052)

**摘要** 研究了芳纶/环氧复合材料在承受拉伸载荷时的损伤与断裂行为。发现不同损伤类型表现出不同的声发射特性,从声发射信号的某几种关联图中可以较好地判断损伤发生的类型,并可根据某些声发射特征参量值对临界承载值进行合理的确定。

**关键词** 复合材料 声发射 损伤与断裂

## The Feature of Acoustic Emission on the Damage and Fracture in Composite of Kevlar-fiber/ Epoxy

LIU Huaixi<sup>1</sup> MA Runxiang<sup>2</sup> ZHANG Heng<sup>1</sup>

(1 School of Mechanical Technology of Zhengzhou University;

2 School of Physical Science and Technology of Zhengzhou University, Zhengzhou 450052)

**Abstract** The damage and fracture of composite material of epoxy-matrix reinforced by Kevlar-fiber in the state of trending is researched in this paper. It is discovered that different damage has different acoustic emission (AE) feature, different stage of damage in composite can be differentiated by some relational graphs of signal acoustic emission, and critical loading value can be decided reasonably by some AE parameters.

**Key words** composite, acoustic emission, damage and fracture

## 0 前言

纤维增强复合材料比强度高、比模量高等优良性能得到许多领域的重视。对其破坏过程和损伤机理的研究是复合材料及其结构研制、设计与质量检验的重大课题<sup>[1]</sup>。在这方面,声发射技术以实时监测破坏过程为特点,是一种有效的检查动态缺陷的无损检测方法。世界上许多国家在利用声发射技术研究环氧复合材料的声发射特性,进行了大量实验研究之后<sup>[2]</sup>,人们发现声发射计数、恒载声发射、费利西蒂比、幅度和延时等是反映复合材料损伤阶段、损伤机理的重要参量<sup>[3]</sup>。

声发射技术是通过检测记录材料结构在受力状态下突然释放的应力波,判断结构内部损伤部位、损伤阶段、损伤机理和严重程度等。它的基本原理是利用材料结构表面布置传感器,将应力波转换为电信号,通过放大器将电信号放大进入声发射仪,再对这些信号进行数字处理,形成声发射参数。

纤维增强复合材料其损伤类型复杂(常有基体开裂、界面脱粘、纤维断裂等),声发射信号极其丰富。如何从丰富的声发射信号中一一区分与各种断裂类型相对应的信号,并发现各自的特点与规律,是声发射技术应用于复合材料损伤检测中需要解决的重要问题。在这方面,不少科技工作者已做了很多工作,有过一些报道,但数据很分散,并且往往是对某一种材料的某一种状态进行检测数据报道,缺乏系统性和全面性,基于此情况,本文作者拟对现在常用的多种纤维(玻璃纤维、C 纤维、芳纶纤维)增强的复合材料进行大量的系统的声发射实验,从而找出各种损

伤类型的声发射信号的规律,以便可以区分损伤类型、判别损伤严重程度。本文所报道的是芳纶纤维/环氧树脂复合材料损伤与断裂时的声发射特性。

## 1 试验方案、试件制备与实验仪器

## 1.1 试验方案

为了达到能识别各种损伤模式的目的,首先必须设计合理的试验方案,我们设计了如表 1 所示的实验方案。

表 1 声发射实验方案

序号	取样方式	加载方式	损伤形式
1	基体	弯曲	基体开裂
2	纤维束	拉伸	纤维断裂
3	90 复合材料	弯曲	基体/纤维开裂,基体开裂
4	0 复合材料	拉伸	基体/纤维开裂,基体开裂,纤维断裂

注:在电子拉压试验机上加载,加载的同时用声发射仪检测其声发射信号

由表 1 的 4 种试样可知,其损伤形式是由简单到复杂,由单一到多种并存。在声发射检测的基础上同时借目测、体视显微镜等方法,将声发射信号与损伤类型对应起来。

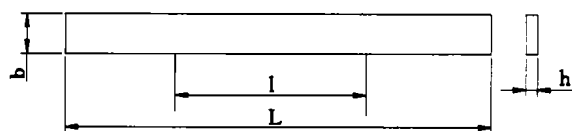
## 1.2 试验材料及试样的制备

本次所用的试验材料是:美国产的 1100d 的芳纶纤维;环氧树脂(E44),固化剂(乙二胺),增韧剂(磷苯二甲酸二丁酯)。

\* 国家自然科学基金(批准号:19972063)资助项目

刘怀喜:女,博士生,主要从事材料表面改性、复合材料断裂与损伤方面的研究 Tel:0371-7763842 E-mail:liuhuaixi@zzu.edu.cn

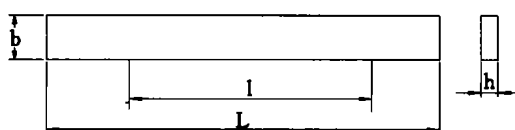
试样制备:①将树脂、固化剂、增韧剂按一定比例配制后注入模型制成纯基体(树脂)的弯曲试样(如图1b);②将纯纤维绕于一硬纸板上形成如图1a所示拉伸试样(加载前将试样中的纸板剪断,使其不受力);③将纤维与配制好的树脂经手糊成型制成一定厚度的复合材料板,然后按不同的取样方式切割成90°的复合材料弯曲试样(如图1b)和0°的复合材料拉伸试样(如图1a)。



L—试样总长 230mm; l—工作段长度 100mm;

b—试样宽度 12.5mm; h—试样厚度 3mm

(a) 拉伸试样



L—试样总长 210mm; l—试样跨距 130mm;

b—试样宽 15mm; h—试样厚度 3mm

(b) 弯曲试样

图1 拉伸和弯曲试样

所用主要设备是:北京科海恒生科技有限公司生产的CSAE-2001型声发射仪;深圳新三思试验设备有限公司生产的ANS电子式万能试验机(型号:CMT5104)。

### 1.3 有关参数的确定

电子拉伸机拉伸速度为1mm/min。

声发射仪的有关参数,根据资料<sup>[4]</sup>及反复实验后设为:增益:40dB;阈值:40dB;PDT(信号峰值定义时间):40ms;HDT(撞击定义时间):180ms;HLT(撞击闭锁时间):300ms。

## 2 实验结果及其分析

### 2.1 对声发射原始数据的分析

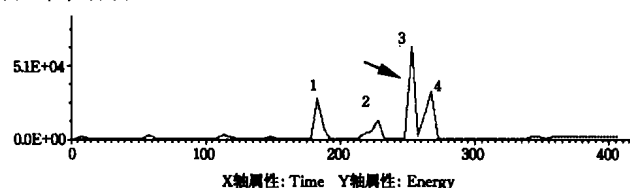
用声发射仪对表1中各类试样在拉伸或弯曲过程中的声发射信号进行了全程采集,所采集到的原始声发射数据有:Amplitude(振幅)、Energy(能量)、Counts(振铃计数)、Duration(持续时间)、Rise time(上升时间)和Fre(频率)。通过对所有原始数据进行分析及借助目测、体视显微镜和理论分析,发现如下规律:①各类试样在承载发生损伤时,有明显的声发射现象发生,其中特征参量:Energy(能量)、Counts(振铃计数)、Duration(持续时间)、Fre(频率)显示很强的规律性。②所有各种损伤形式出现时,幅度值(Amp)没有变化。③基体开裂与纤维断裂信号的特征参量的数值较为接近,难以从数值大小上进行区分,但在芳纶/环氧复合材料中,这2类信号出现的时间是不同的,早期的信号主要是基体开裂,后期的主要是纤维断裂。④基体/纤维界面开裂信号在某些特征参量上较前2种具有明显的不同,最为突出的是:在基体剧烈开裂时,出现大Energy(能量)、大Counts(振铃计数)、长Duration(持续时间)的信号,均会较前2个信号的对值大1个数量级以上,且基体/纤维界面开裂在芳纶/环氧复合材料中通常为中期损伤,它出现在基体开裂之后,纤维断

裂之前(各损伤类型的特征参量值总结于结论中的表2)。

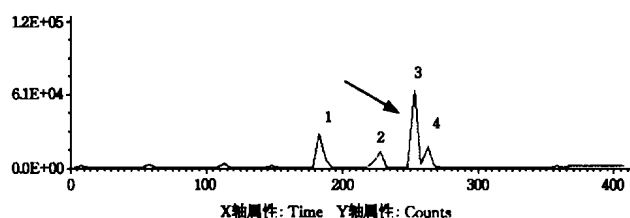
### 2.2 对声发射特征曲线的分析

根据声发射原始数据我们利用专用软件生成了如下多种关联图:Time-Energy, Amplitude-Hits, Duration-Energy, Duration-Counts, Duration-Energy, Frequency-Hits, Time-Amplitude, Time-Counts, Time-Duration, Time-Frequency。但发现上述各种关联图能比较有特征地对应于各种损伤阶段的是:Time-Energy, Time-Counts, Time-Duration。

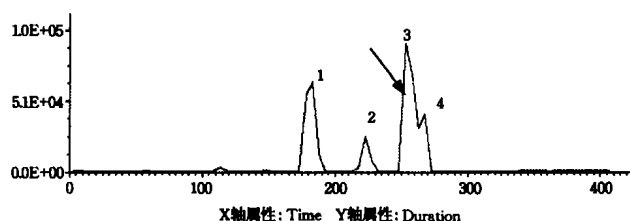
图2为芳纶/环氧0度复合材料拉伸过程中的Time-Energy, Time-Counts, Time-Duration声发射特征曲线,曲线中出现了4个声发射信号峰(分别以1、2、3、4表示)。通过其它的辅助手段进行分析,得知这4个峰对应着4个不同的损伤阶段,分别为:基体开裂、基体/纤维界面少量开裂、基体/纤维界面剧烈开裂、纤维断裂。



A 时间与能量的关系曲线



B 时间与振铃计数的关系曲线



C 时间与持续时间的关系曲线

图2 芳纶/环氧0度复合材料试样拉伸时的声发射特征曲线

### 2.3 拉伸曲线的分析

图3为芳纶/环氧0度复合材料拉伸时的拉伸曲线,从该曲线可知,该材料在断裂前能发生一定的变形,但它不像典型的低碳钢拉伸曲线:具有屈服现象和缩颈现象,存在明显的塑性变形。而该拉伸曲线较接近于高碳高合金钢的拉伸曲线,断裂时所发生的变形主要为弹性变形,没有明显的塑性变形,比较接近脆性断裂。对于这种接近脆性断裂的材料,确定其临界承载状态非常重要,通过实验,我们发现:结合拉伸时的声发射特征曲线可以合理地确定临界承载值,其临界承载值应为图2中箭头所示位置所对应的载荷,即图3中箭头所示位置所对应的载荷。此时所发生的损伤行为为基体/纤维界面开裂阶段的后期,在声发射事件中会出现能量(E)、振铃计数(C)、持续时间(D)剧增( $E > 31000$ ,  $C > 5677$ ,  $D > 12760$ ),我们以  $E = 31000$ ,  $C = 5677$ ,  $D =$

12760 作为判据,达此值时卸载,然后重新加载,在加载至原载荷值时没有明显的声发射事件出现,即说明没有新的损伤出现,材料可以在此载荷之下安全使用,如载荷继续增大,原有损伤将扩展或有新的损伤出现,进而导致最后阶段的损伤——纤维大量断裂的发生,从而导致材料完全断裂。所以用上述声发射特征参量作为临界许用载荷判据是较为合理的。

### 3 结论

对上述 4 类试样进行大量实验得出如下结论:

(1)所有各种损伤形式出现时,幅度值(Amp)均恒为 17。

(2)各种损伤所对应的各特征参量规律如表 2:

(3)芳纶/环氧复合材料在承载过程中主要的损伤类型是:基体开裂、纤维/基体界面开裂、纤维断裂。损伤在载荷远低于实际破坏载荷时就开始,前期的损伤形式主要为基体开裂,而后期的损伤形式主要是纤维断裂。

表 2 各种损伤所对应的各特征参量规律

损伤类型	幅度(Amp)	能量(Energy)	振铃计数(Counts)	持续时间(Duration)	上升时间(Rise time)	频率(Fre)
无损伤	17	1910~1914	8~11	1005~1008	5~6	7~17
基体开裂	17	1960~5838	11~173	903~11627	0~613	0~55
纤维/基体开裂	17	11001~65535	106~11244	24901~163946	0~589	4~66
纤维断裂	17	2171~8282	9~409	2031~17462	0~774	2~26

(4)在基体剧烈开裂时,出现大 Energy(能量)、大 Counts(振铃计数)、长 Duration(持续时间)的信号,上述参量均会较其它两种损伤信号的各对应值大 1 个数量级以上。临界承载状态可以以基体/纤维界面开始剧烈开裂为判据来确定。声发射参量可以以  $E=31000$ ,  $C=5677$ ,  $D=12760$  为判据。

### 参考文献

1 周履. 复合材料及其结构的力学进展. 广州:化南理工大

(上接第 92 页)

表 5 腐蚀率对比试验结果(60%纳米合金)

镀层	Ni-Co 纳米合金	Ni-Co 晶态合金	Cr 晶态
腐蚀电流 $i_{corr}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	0.0281	0.01244	0.0120
腐蚀率 $V$ (g/m <sup>2</sup> ·h)	0.03093	0.13693	0.03881

表 6 腐蚀率对比试验结果(60%纳米合金)

镀层	Ni-Co 纳米合金	Ni-Co 晶态合金	Cr 晶态
磨损率 $W$ (10 <sup>-17</sup> m <sup>3</sup> /N·M)	111.581	517.33	245.11
磨擦系数	0.12	0.26	0.18
硬度 $Hv_{50}$	850	540	900

调整至纳米比例为 60%左右的纳米 Ni-Co 合金其耐腐蚀性能(在相同体系中)仍是镀铬的 1.26 倍,但耐磨性是镀铬的 2.2 倍,其耐腐蚀性是晶态 Ni-Co 的 4.4 倍,耐磨性是其 4.6 倍。

一般来说,随着晶粒尺寸的增大,常规金属材料的强度下降,韧性上升<sup>[5]</sup>,对比表 3 与表 6 可知随着晶粒尺寸增大,强度和韧性同步提高,这说明纳米晶金属材料的力学性能与传统的金属材料不同<sup>[6]</sup>,具有新的性能和新的规律。

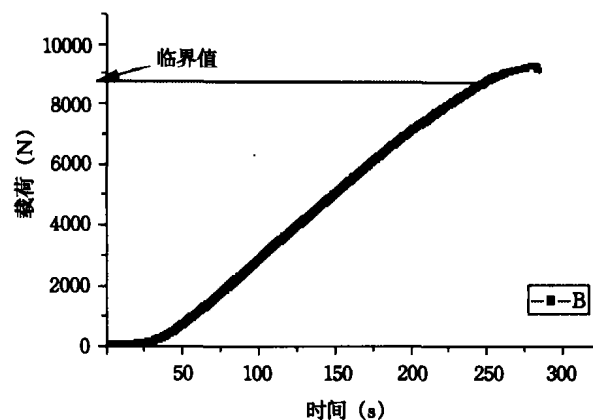


图 3 芳纶/环氧 0 度复合材料试样拉伸时的时间-载荷曲线

注:因加载方式为 1mm/min,故拉伸曲线(变形-载荷曲线)与时间-载荷曲线形状相同

学出版社,1991.243

- 郭艳阳. APMOC/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讨论会. 湖南,1995.50
- 金周庚. 碳/环氧复合材料破坏类型声发射表征. 全国第四届声发射会议论文集,1989.89
- CSAE-2001 声发射仪用户操作说明书

(责任编辑 林 芳)

### 3 结论

(1)用小角 X 射线散射方法能比较正确地测量出镀层中非晶与纳米晶粒的百分比例。

(2)用此方法调整出不同比例结构以适应不同的用途,通常增加纳米结构的比例可提高强度和耐磨性,增加非晶结构的比例可增强抗腐蚀性能。

### 参考文献

- Strigner J, Stallings J. Materials issues in Circulating fluidized bed Combustors. 11th Cnf. on Fluidized Bed Combustion, 1991, 589
- Hui Wenhua, Zhang Yuanming, Zhang Zhenling, et al. A study of electrochemical behaviors of substitute chromium brush plating deposits. Chemistry, 1993, (4): 52
- Hui Weihua, Liu Jiajun, Dennis J K. A study of wear resistance of a new brush-plated alloy Ni-Fe-W-S. Wear, 1996, 192: 165
- Lake J A. An iterative method of silt-correcting small angle X-ray data. Acta Crgst, 1967, 23: 191
- De Heer W. Deformation mechanisms and microstructure of polycrystals. A Rev Modern Phys, 1993, 3: 65
- Burch R, et al. Processing and properties of nano crystalline materials. J Mater Chem, 1998, 8: 227

(责任编辑 石 咏)