

信号处理  
专题综述

# 模态声发射

## ——声发射信号处理的得力工具

耿荣生, 沈功田<sup>1)</sup>, 刘时风<sup>2)</sup>

(北京航空工程技术研究中心, 北京 100076)

**摘要:** 模态声发射是声发射信号处理技术的得力工具。介绍它在声发射源定位、复合材料损伤源识别、疲劳裂纹萌生和扩展的声发射监测以及日历损伤声发射评价等工程实践中的应用。

**关键词:** 声发射检验; 定位; 疲劳裂纹; 信号处理

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A 文章编号: 1000-6656(2002)08-0341-05

### MODAL ACOUSTIC EMISSION: A POWERFUL TOOL FOR ACOUSTIC EMISSION SIGNAL PROCESSING

GENG Rong-sheng, SHEN Gong-tian<sup>1)</sup>, LIU Shi-feng<sup>2)</sup>

(Beijing Aeronautical Technology Research Centre, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Detailed case studies have been made for the application of modal acoustic emission (MAE) in engineering fields such as acoustic emission (AE) source location, damage evaluation for composites, identification of AE source produced by fatigue crack initiation and growth, and calendar damage monitoring and evaluation.

**Keywords:** Acoustic emission testing; Location; Fatigue crack; Signal processing

对于声发射(AE)检测而言,其最基本也是最重要的问题是确定AE源的位置和性质,从而能对材料或结构的损伤情况作出判断。参数分析技术在AE信号处理方面一直占主导地位,其主要原因是谐振式传感器的高灵敏度及技术本身的简单、快捷和易于实现。参数分析方法的最大缺点是有关AE源本质的信息往往被谐振式传感器自身的特点所掩盖或被模糊掉,因为由谐振式传感器所获得的AE信号基本是一衰减的正弦波。AE信号的这种外在相似性必然给源机制的识别和信号的处理带来困难。另外,AE信号是突发性瞬态信号,并具有非稳态随机信号的特征,参数分析的结果往往随所用传感器谐振频率和测试系统(放大倍数、阈值的不同)而变化,重复性一般很差。此外,传统的参数分析方法认为AE信号是以某一固定速度传播的假设,与

实际情况有很大出入,它必然会带来定位误差。这些缺点都是参数分析方法所无法克服的,在很大程度上制约了AE技术的发展<sup>[1,2]</sup>。

模态声发射(MAE)究其本质是一种基于波形分析的AE信号处理技术<sup>3,4</sup>。虽然对研究对象作了大量简化处理且技术本身仍在完善之中,但由于着眼于将AE信号波形与AE的物理过程相联系,所以,它已表现出极强的生命力。MAE理论的基本点是,对于工程上大量使用的板状结构,由于板厚远小于声波波长,AE源在板中主要激励起扩展波(最低阶对称波 $S_0$ )、弯曲波(最低阶反对称波 $A_0$ )和水平切变(SH)波三种模式的声波。板平面内(IP)声源主要产生扩展波,而平面外(OOP)声源主要产生弯曲波,两种声源都有可能产生SH波,大量的非AE源或噪声没有这种特征。MAE技术本身要比参数分析复杂,但带来的结果却是使AE信号处理方法简单化。这种基于AE源物理机制的分析可极大地帮助我们区分AE信号和噪声信号,因而,在很多工程应用中,它可以是一种十分有效的AE信号处理方

收稿日期: 2002-06-24

1) 国家质量监督检验检疫总局 锅炉压力容器检测研究中心, 北京 100013

2) 清华大学 机械系, 北京 100084

法。在此将结合一些工程实例说明模态声发射理论在 AE 信号处理中的应用。

## 1 MAE 技术在 AE 源定位中的重要作用

确定声源的位置在 AE 检测中占有很重要的地位, 因为 AE 源总是同损伤源相联系, 确定了 AE 源就等于确定了损伤位置。时差定位是 AE 源定位中用得最多的办法<sup>[3]</sup>, 其前提条件应是材料中的声传播速度  $C$  已知。对超声检测, 这不应成为问题, 因为根据所用声波的种类(纵波、横波和表面波等), 声速很容易确定。但对 AE 检测而言, 情况则完全不同, 即使对可认为是各向同性的航空铝合金构件, 受板厚、声源性质、声源与接收传感器之间的距离等因素影响, 到达传感器的声波可以是纵波、横波、表面波、扩展波和弯曲波等不同型式的声波, 前四种波的传播速度分别是 6 370, 3 110, 2 910 和 5 700 m/s, 而弯曲波速度与频率有关。图 1 示出了一个 OOP 声发射源在薄板中产生的典型信号, 主要是弯曲波, 但并不是没有扩展波, 只是扩展波幅度相对较小而已。显然, 取决于阈值电平  $V_t$  (图中横线), 计算时差的电路有可能采用扩展波, 也有可能利用弯曲波。当考虑介质中的声能量衰减以及不同传感器离声源的距离后, 对同一阈值, 有的(离声源较近)传感器所在通道是被扩展波触发, 而另一些则很有可能是被弯曲波触发。如不加区分地利用同一声速来求时差, 无疑会产生很大的定位误差。因此, 模态声发射的一个最基本的应用是根据同一模态的 AE 波来进行定位, 这样可大大减小定位误差。

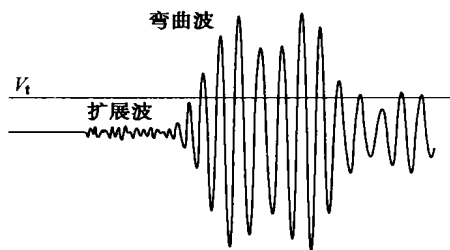


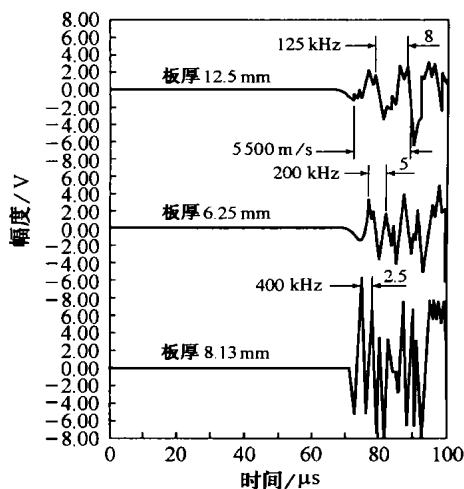
图 1 OOP 声发射源在薄板中产生的典型信号(弯曲波为主)

当然, 解决实际工程应用问题时不可能采用观察波形的办法。由于扩展波和弯曲波的频率成分不同, 在工程上可以采用选取不同频率段信号的办法。经验表明, 经高通滤波器(低频截止频率 100kHz)或高频带通滤波器(带通范围 100 ~ 1 000kHz), 可主要获得扩展波和 SH 波成分, 而经低频带通滤波器

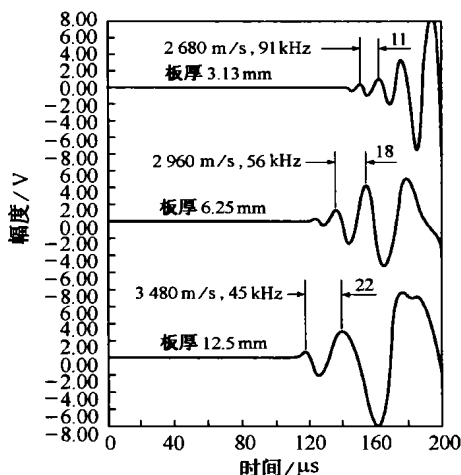
(带通范围 20 ~ 70kHz), 主要获得弯曲波分量。Dunegan 在三种不同厚度钢板上进行了模拟 IP 和 OOP 声发射源试验, 并分别使信号通过高、低通滤波器, 结果见图 2, 验证了上述设想<sup>[9]</sup>。IP 源信号通过高频带通滤波器后, 虽然板厚和主要频率不同, 但主要获得扩展波, 其速度基本不变(5 500m/s)。OOP 源信号通过低频带通滤波器后, 主要成分是弯曲波(零阶反对称波), 频率-板厚积越高(图 2b 中从上到下三条曲线分别对应 0.285, 0.35 和 0.563 MHz·mm), 声速也越高。显然, 利用这样获得的信号来进行定位可大大减小定位误差, 并使定位误差的主要来源变为材料各向异性对声速的影响。

## 2 复合材料的损伤

复合材料的损伤包括纤维断裂、基体破裂、分层



(a) IP 源信号通过高通滤波器



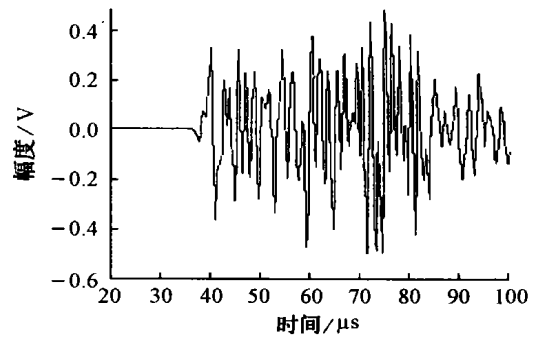
(b) OOP 源信号通过低通滤波器

图 2 钢板中模拟 AE 信号经过滤波器后的波形

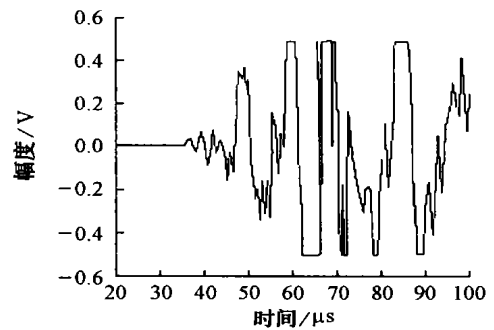
和开胶等。复合材料一般总是强声发射源,因此,利用 AE 来研究和监测复合材料的损伤一直是 AE 检测领域的重点。过去用得较多的是 AE 幅度分布和 Felicity 比等参量,也取得了不少成效。例如, Vaidya 等发现纤维断裂产生低幅度的 AE 信号(40 ~ 60dB),而晶间断裂会产生高幅度的 AE 信号(65 ~ 85dB)<sup>[7]</sup>。金周庚等利用振铃计数、幅度、持续时间、恒载 AE 信号脉宽和 Felicity 比等参量区分碳/环氧复合材料结构件各损伤阶段、损伤类型和材料力学特性<sup>[8]</sup>。参数分析的主要缺点是结果受检测仪器本身参数的影响很大,结果的物理意义不清晰且重复性较差。例如,有学者研究了玻璃纤维复合材料 AE 幅度分布特性,认为幅度分布的三个峰值(从低到高)分别对应于基体破裂、分层和纤维断裂<sup>[9]</sup>,即认为纤维断裂主要产生高幅度 AE 信号,这与上述 Vaidya 的结果显然不一致。

MAE 技术为识别复合材料不同损伤源提供了便利条件。早在 20 世纪 90 年代,不少学者就在这一领域进行了许多富有成效的工作<sup>[10]</sup>。理论分析和试验都表明,对于复合材料,由于纤维的排列一般都是沿板的平面展开,不同层的纤维又在厚度方向通过粘结或其它方式堆积而成,因此,纤维断裂总是在平面内完成,它类似于 IP 作用力源,因此,伴随纤维断裂的声发射信号总是以扩展波为主。分层故障发生在层与层之间,是沿板厚方向完成的,类似于 OOP 激励源,因此,它所激发出的声波应以弯曲波为主。而基体破裂、开胶等故障产生的声发射信号其特征应当介于两典型情况之间,即既有扩展波又有弯曲波。这些分析对识别复合材料中的不同故障源是十分有用的。图 3a 是石墨树脂复合材料纤维断裂产生的 AE 信号,图 3b 是噪声波形<sup>[11]</sup>,两者的区别十分明显,前者有典型的扩展波特征,而后者没有。根据 MAE 理论,上述纤维断裂 AE 信号和噪声的主要频率成分相差很大,因此,在实际应用中只要使用不同频段的滤波器即可较容易地区分。

Dunegan 也对石墨树脂复合材料的损伤进行了研究,提出可利用高、低频分量比 HF/LF (HF 和 LF 分别表示高、低频滤波分量)作为诊断因子来区分是纤维或基体断裂损伤,还是分层损伤。前者的 HF/LF  $\gg 1$ ,而后的比值等于或约等于 1。对于航天器上装液氢用的复合材料瓶, Dunegan 认为可设计一个实时 AE 监测系统,用以确定当该瓶受到流星撞击时的损伤程度。如果流星撞击仅引起表面损伤,



(a) 纤维断裂产生的 AE 信号



(b) 噪声

图 3 复合材料纤维断裂 AE 信号波形与噪声波形的对比 HF/LF 比值应当在 1 左右;如果流星撞击已造成内部复合材料层的损伤,例如出现纤维断裂时, HF/LF 比值应迅速增大,并远大于 1<sup>[12]</sup>。

### 3 疲劳裂纹萌生与扩展

利用 AE 监测飞机疲劳裂纹的形成和扩展一直受到人们的重视,并已取得突破性进展<sup>[13]</sup>。过去利用 AE 参数分析方法时采用的一些除噪、降噪和提高信噪比的技术,如区域定位、护卫传感器技术和载荷闸门控制技术等已被实践证明是有相当效果的,仍然必须使用。笔者等曾对某型飞机机体全尺寸疲劳试验进行了长达 1a(年)的 AE 跟踪监测,通过使用上述方法,并采用相关分析和多参数识别技术,成功地预报了主梁螺孔、机翼机身连接螺栓等处疲劳裂纹的萌生和扩展<sup>[14]</sup>。但是,由于噪声干扰十分严重,传统的参数分析技术用于飞机疲劳裂纹扩展监测面临的困难总是很大。

利用 MAE 技术监测疲劳裂纹扩展是基于对裂纹 AE 信号和噪声信号物理本质的认识,因此,它应使信号处理技术相对简单一些。当然,该方法不应排除上述参数分析方法的一些合理内核。Goman 曾详细分析了疲劳裂纹扩展 AE 信号的特点,认为

它主要是 IP 力源, 因而能产生以扩展波为主的声波, 而大多数干扰噪声源都是 OOP 型, 尽管在非衰减介质中可能有很高的频率分量, 但其主要能量基本都集中在 100 kHz 以下。刘松平等也详细论述了模态 AE 用于检测疲劳裂纹的进展情况<sup>[5]</sup>。归结起来, 在总体上, 利用 MAE 技术识别疲劳裂纹扩展 AE 和本底噪声的工作应当变得简单, 因为一个典型的疲劳裂纹扩展信号应当满足下列基本条件, 人们可以据此实现信号的自动识别。

(1) 它具有典型的扩展波特特性, 高频率(100kHz 以上)分量较大, 无频散效应。

(2) 到达各通道传感器有确定的时差(应符合扩展波速度决定的时差), 表现出声波的传播特性。

(3) 事件应发生在大载荷处(因此载荷闸门控制技术应继续使用), 说明疲劳裂纹扩展产生的 AE 信号服从 Kaiser 效应。

(4) 从(1)引申的结论是 HF/LF 比值应较大。

根据以上分析并利用由高通滤波器(低频截止频率 100kHz)获得的扩展波分量 HF 与由低频带通滤波器(带通范围 20~70kHz)获得的低频弯曲波分量 LF 之比作为诊断(判据)参数的专用仪器已由 Dunegan 工程咨询公司研制出, 这种仪器能在高背景噪声下检测疲劳裂纹扩展声发射信号<sup>[6]</sup>。该 AE 监测系统的原理图在本刊第 6 期中也已作了介绍<sup>[4]</sup>, 本文不再赘述。这里仅需再次指出, 能这样做的前提条件是传感器应当对平面内位移(扩展波)和平面法向方向位移有相同的灵敏度, 并在 20kHz~1MHz 范围内有比较平滑的响应。

#### 4 航空材料日历损伤(腐蚀)的 AE 监测和评估

AE 检测技术在腐蚀损伤研究中的作用一直受到重视, 但由于腐蚀产生的 AE 信号十分微弱, 如何从背景噪声中识别出一直是个难题。过去利用 AE 技术监测腐蚀都是利用参数分析方法, 比较典型的例子是美国 PAC 公司新近研制成功的 TANKPAC 系统<sup>[6]</sup>, 它是利用大量样本(数百个贮罐)获得有关 AE 参数的数据, 然后对这些贮罐进行清罐, 用其它方法获得其腐蚀损伤数据, 再建立 AE(参数)数据同腐蚀损伤的相关关系。在以后的检测中, 可根据这种相关关系, 由 AE 数据确定罐底腐蚀损伤程度。这种方法能以一定的可靠度解决工程上的问题, 但缺乏对腐蚀 AE 源物理本质的认识, 也很难建立 AE

与腐蚀损伤之间的理论联系。

腐蚀过程产生 AE 信号的机制是多种多样的, 如腐蚀生成物的剥落或摩擦、腐蚀产生的氢气泡的破裂及表面钝化膜的破裂等都可能成为 AE 源, 有可能产生能被探测到的 AE 信号。由于点腐蚀和剥蚀的危害最大, 利用 AE 技术监测这两种腐蚀更有意义。一般认为, 点蚀是由于表面钝化膜破裂引起的, 而伴随膜破裂过程必然会产生应力波声发射, 这就为我们用 AE 技术监测点蚀的形成创造了有利条件。MAE 技术可在点腐蚀 AE 信号的识别和处理中起重要作用, 因为研究发现, 真正由点腐蚀产生的 AE 信号可产生明显的扩展波与弯曲波, 并以弯曲波为主, 而各种本底噪声信号在波形特征上与腐蚀 AE 有很大差别<sup>[7]</sup>。真正的 AE 事件虽然是随机发生的, 但具有如下确定的 AE 信号特征, 即①有典型的“突发型”AE 信号特征。②声波到达两传感器一般有明显的时差。③频率范围较宽, 在 100~500kHz 范围内有较丰富的频率成分。图 4 上下图分别是典型的噪声信号及其频谱, 其延续时间短、频率范围窄, 与后面给出的腐蚀 AE 信号有明显区别。

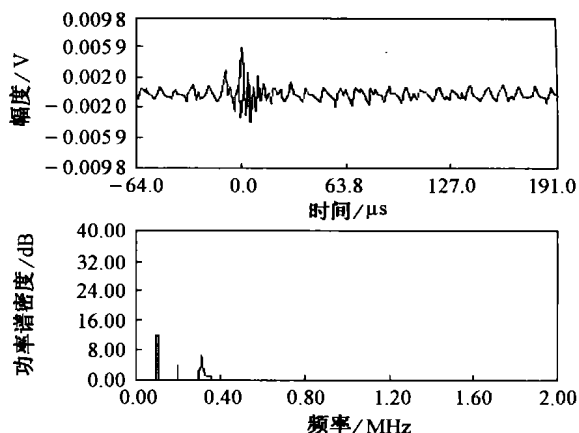


图 4 典型的噪声信号及其频谱

腐蚀过程中的声发射信号具有确定的声波特征, 它到达两传感器有确定的时差。在某一加速腐蚀试验系统中, 第一通道传感器离声源较近, 因此, 声波总是先到达该传感器。实验所用的全数字式声发射仪 Mistras2001 系统提供了由软件控制的同步触发功能。当任一通道先接收到超过阈值电平的信号后, 仪器自动将其它通道的控制闸门打开, 使其接收信号, 从而完成各不同通道之间的同步触发功能(即保证所有通道均同时开始接收信号), 其最大优点是可直接观察各通道信号之间是否有时差, 需要的话, 还可利用光标对时差进行精确测量。如果仪器本身

不能提供这种同步触发功能,可在近腐蚀源处使用一个专用传感器来提供触发信号。这种时差测量功能为识别腐蚀AE信号提供了有利条件。

在加速腐蚀试验中发现,当试件浸泡在腐蚀液中约1~2h后即可观察到AE信号。有研究资料表明<sup>[8]</sup>,在50℃下进行盐水浸泡试验60.44h相当于年平均气温16.5℃的地区1a的大气腐蚀量。以上结果表明,日历时间大约为1~2周的早期腐蚀即可由目前所用的声发射监测设备探测到(图5),而这是用其它无损检测方法所不可能做到的。

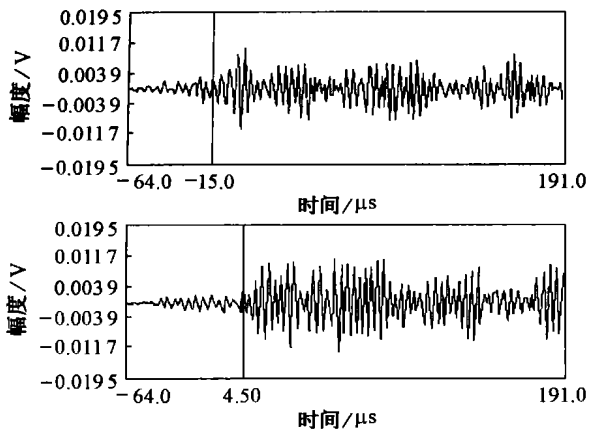


图5 腐蚀试验第七天获得的AE波形

## 5 结论

MAE技术不仅能帮助我们了解声发射源机制,而且也是工程应用中识别AE源信号和噪声信号的有力工具。MAE不仅提供了一种基于波形的分析方法,如应用得当,它有可能大幅度降低AE信号处理的复杂程度,这对于推动AE技术的发展无疑是十分有益的。

MAE技术也面临着难题,它需要对AE源机制有比较深刻的了解,这往往难以做到。另外,常常由于建立的MAE模型过于简单,很难用于解决实际工程问题。该技术还要求所用传感器能对平面内位移(扩展波)和垂直方向位移(弯曲波)有相同的灵敏度,并在20kHz~1MHz范围内有比较平滑的响应,这也是很难做到的。

### 参考文献:

[1] 耿荣生,沈功田,刘时风.声发射信号处理和分析技术

[J].无损检测,2002,24(1):23-28.

- [2] 沈功田,耿荣生,刘时风.声发射信号的参数分析方法[J].无损检测,2002,24(2):72-77.
- [3] Goman MR. Plate wave acoustic emission[J]. JASA, 1991, 90(1): 358-364.
- [4] 耿荣生,沈功田,刘时风.基于波形分析的声发射信号处理技术[J].无损检测,2002,24(6):257-261.
- [5] 沈功田,耿荣生,刘时风.声发射源定位技术[J].无损检测,2002,24(3):114-117.
- [6] Dunegan HL. Modal analysis of acoustic emission signals[J]. Journal of Acoustic Emission, 1998, 15(1): 1-4.
- [7] Vaidya UK, Raju PK. Identification of failure modes of carbon-carbon composites at various processing stages using the acoustic emission technique[J]. J of Vibration and Acoustics 1996, 118(3): 446-453.
- [8] 金周庚,潘向华,宋成,等.碳/环氧复合材料破坏过程的声发射研究[A].中国第五届声发射会议论文集[C].张家界:1993.47-51.
- [9] Wadin JR. Listening to Composite Materials[Z]. San Juan Capistrano, CA: Dunegan/Endevco Corporation, 1978.
- [10] Prosser WH, Goman MR. Plate mode velocities in graphite/epoxy plates[J]. JASA, 1994, 96(2): 902-907.
- [11] Prosser WH, Jackson KE, et al. Advanced waveform-based acoustic emission detection of matrix cracking in composites[J]. Materials Evaluation, 1995, 53(9): 1052-1058.
- [12] Dunegan HL. Acoustic Emission Analysis of a Graphite-Epoxy Honeycomb Panel[EB/OL]. <http://www.deci.com>. 1997.
- [13] Pokorski JR, Fisher BR. Fatigue Damage Sensing Using Acoustic Emission[R]. AD-A243803. 1991.
- [14] 耿荣生,景鹏,等.飞机主梁疲劳裂纹萌生声发射信号的识别方法[J].航空学报,1996,17(3):368-372.
- [15] 刘松平, S Ziola 刘晶.疲劳裂纹的模态声发射检测[J].无损检测,2000,22(3):122-124.
- [16] Physical Acoustics Group. Acoustic Emission Testing of Pressure System and Tanks[Z]. USA: PAC 1996.
- [17] Geng Rong S. Corrosion-related acoustic emission and its identification[A]. Proc of 10th APCNDT[M/CD], Brisbane, Australia, 2001. 1143.
- [18] 张栋.确定飞机日历寿命用的当量环境谱研究[J].航空学报,2000,21(3):128-133.

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告