

*无损检测 *声发射技术 *超声 C-扫描 *压力容器检测 *泄漏检测

声发射技术在复合材料发展中的应用

美国物理声学公司 (PAC) 北京办事处 许凤旌
中国复合材料学会性能测试与检测专业委员会主任 陈积懋

一、声发射技术机理及特征

声发射(Acoustic emission 简称 AE)又称应力波发射,是材料或零部件受力作用产生变形、断裂,或内部应力超过屈服极限 σ_s 而进入不可逆的塑性变形阶段,以瞬态弹性波形式释放应变能的现象。

在外部条件作用下,固体(材料或零部件)的缺陷或潜在缺陷改变状态而自动发出瞬态弹性波的现象亦为声发射。

通常意义上的声发射源,一般是指材料受力的作用所产生的各种变形和断裂机制,例如:金属材料中的裂缝扩展、位错运动、滑移带的形成、孪生变形、晶界滑移、夹杂物的分离与开裂;复合材料中的基体开裂、层间分离、纤维和基体间界面分离和纤维断裂等,这些无损检测的主要对象,都是重要的声发射源。

声发射波的频率范围很宽,从次声频、声频直到超声频。它的幅度动态范围亦很广,从微弱的位错运动直到强烈的地震波。然而,声发射作为无损检测与无损评价手段,则是采用高灵敏度传感器,在材料或构件受外力的作用,且又远在其达到破损以前,接收来自这些缺陷与损伤开始出现或扩展时所发射的声发射信号,通过对这些信号的分析、处理来检测、评估材料或构件缺陷、损伤等内部特征。

从而,通过声发射检测,可以确定: [1]

1. 材料或构件何时出现损伤;
2. 材料或构件出现损伤的部位;
3. 材料或构件出现损伤的严重程度及其危害性,对构件作出结构完整性评价。

作为一种新的无损检测技术,声发射检测技术与常规无损检测技术:渗透、磁粉、涡流、射线、超声检测相比较具有两个基本性的特点:Ⅰ敏感于动态缺陷,而不是静态缺陷;即不像其他无损检测技术只是在缺陷出现后,事后静态检测时才能发现,而是在缺陷萌生和扩展过程中,即能实时发现。Ⅱ声发射波来自缺陷的本身而不是外部;从而可以得到有关缺陷的丰富的信息以及检测的高灵敏度与高分辨率。

以上两大特点导致该项技术具有了以下不同于常规无损检测技术的优点:

- 1) 可获得关于缺陷的动态信息,并据以评价缺陷的实际危害程度,以及结构的整体性和预期使用寿命;
- 2) 对大型构件,不需要移动传感器做繁杂的扫查操作,只要布置好足够数量的传感器,经一次加载或试验过程,即可大面积检测确定缺陷的位置和监视缺陷的活动情况,操作简便,

省工、省时；

3) 可提供随载荷、时间、温度等处施变量而变化的实时瞬态或连续信息，因而适用于过程监控，以及早期或临近破坏的预报；

4) 对被检工件的接近要求不高，因而适用于其它无损检测方法难以或不能接近的，如高低温、核辐射、易燃、易爆和极毒等环境下的检测；

5) 对构件的几何形状不敏感，适于检测其他方法所不能检测的形状复杂的构件；

6) 几乎所有材料在变形和断裂时均产生声发射，适用范围广。

二、声发射技术在复合材料领域中的应用

复合材料是一种多相材料，由两种或多种性质不同的材料组成，其主要组分是增强材料和基体材料，基本的结构形式是层压件和缠绕件。

复合材料因高的比强度和比模量以及良好的抗疲劳性和成形工艺性，而在航空、航天、造船、建筑、桥梁等工业部门得到了大量的应用，并在压力容器、管道，以及某些关键部位代替金属材料。但是，纤维增强复合材料具有导电性差、热传导率低、声衰减高等特点，在机械和物理性能方面呈显著的各向异性，这使得它对无损检测的波传播所起的作用与金属材料迥异，因而，其无损检测也与金属材料显然不同。

复合材料结构由于制造工艺的特殊性，许多工艺参数的微小差异会导致其产生诸多缺陷，使产品质量呈现明显的离散性。这些缺陷严重地影响构件的机械性能、结构完整性和使用寿命。

复合材料结构缺陷的类型繁多，但大致可以分为两大类：

1) 通常表现为损害构件的机械性能和物理性能的有：气孔、夹杂、分层、纤维断裂或不平直、纤维与基体的比值不正确、纤维和基体的结合状况不佳、基体疏松、基体裂缝、基体固化状态不良等；

2) 通常表现为损害构件的整体完整性的有：脱粘、横向断裂、龟裂、缺胶、胶层厚度不均匀、结构内部损伤等。

面对上述种类繁多的缺陷，迄今，还没有一种无损检测方法可以检测各种复合材料构件的所有缺陷。在实际应用中，往往需根据复合材料构件的形状、类型、使用要求，要求检测的缺陷类型、大小、位置、取向及检测设备检测能力等因素，选用几种不同的方法互相补充。

然而，我们对每一复合材料构件无损检测的目标是在于：检测它的结构的完整性、强度和承载能力，评估它的使用寿命和使用安全性。

由于复合材料构件不同于金属构件的特殊性，且对它的破坏机理还缺乏系统的了解，因而对它的主要缺陷类型仍是众说纷纭，还不能用一、两种主要类型的缺陷来决定其使用性能，评估预期寿命。例如，高性能的金属结构，相对来说，是用不包含所不希望存在的缺陷的材料制成的。在使用中，破损往往起源于裂缝开始扩展为可辩认的缺陷的时候，而且发生于裂缝继续扩展以后。所以，在大多数金属结构中，我们所查找的基本缺陷是裂缝，一旦用无损检测方法确定了有缺陷的结构，就可以利用断裂力学的基本概念，计算出使用条件下金属构件的预期寿命。

正如上文所述，复合材料至今尚不能以少数的几种类型缺陷确定为损伤起源的主要缺陷。大量实验证明：有些具有明显宏观缺陷的架件，加载试验到破坏，其疲劳寿命不一定就短；相反，有些无明显宏观缺陷的构件，若隐含有常规无损检测难以检出的、基体微裂纹等缺陷，在实验中发现其所具有的疲劳寿命则远短于正常构件。

由于声发射对缺陷起始和扩展的特有的敏感性，以及其所具有动态检测强度和评估使用寿命的独特功能，从而近年来，复合材料无损检测与评价技术已经把重点转移到，利用声发射技术检测材料与构件的缺陷（包括微观缺陷）与损伤的萌生与扩展，并据以评估缺陷的危害程度，测定结构强度、整体性和预期使用寿命。对复合材料的发展而言，声发射技术不仅仅是内部缺

陷和损伤的无损检测手段，且已成为材料性能（包括断裂性能和力学性能等）研究、强度检测与使用寿命评估的必不可少的方法。

声发射技术作为一种检测技术起步于 50 年代初的德国，60 年代，该项技术在美国原子能和宇航技术中迅速兴起，并在玻璃钢固体发动机壳体的检测方面出现工业应用的首例[2]。70 年代，在日、欧及我国相继得到发展，但因当时的技术和经验所限，仅只获得有限的成功。80 年代，声发射技术开始获得较为正确的评价，并获得迅速发展，已在金属和玻璃钢压力容器、储罐、管道等重要领域进入工业应用和标准化阶段。随着计算机技术和信号处理技术的迅猛发展，以美国 PAC 公司为代表的国际先进声发射设备研制公司在声发射技术软/硬件方面的一些重大技术突破，以及新的数字化声发射系统和相应的商业化实用软件包的推出，已能获得复合材料缺陷与损伤，在其萌生和发展中，甚为丰富的和极其活跃的信息，使声发射技术成为在复合材料等先进的、新型材料研究和生产中不可替代的动态无损检测技术。

声发射技术在这一领域的应用大致可分如下几个方面：

在复合材料性能研究方面的应用；

在复合材料结构完整性检测方面的应用；

在复合材料结构制造过程监测方面的应用。

三、在复合材料性能研究方面的应用

复合材料与传统的金属材料相比，在航空航天以及军用和民用领域得到越来越广泛应用的最重要因素是其强度高、重量轻、机械性能优越，而这些卓越性能则来自于复合材料中各构成成份本身的优越性能和合理搭配。对于复合材料的强度、韧性方面的研究，离不开实验手段，而声发射技术在这些实验研究中扮演极其重要角色。复合材料的损伤形式很复杂，大致可分纤维断裂，基体开裂、脱粘、分层等几种主要形式，每种损伤形式对复合材料的整体性能都有不同程度的影响和作用，所以对于复合材料性能的研究离不开对这些损伤形式的研究。实际上，由于复合材料本身的复杂性，使得关于复合材料破坏机理方面的研究一直处于探索阶段，许多问题还没有被人们所揭示。多年来人们采用了各种手段从事这些方面的研究，但这些手段都很困难且都有很大局限性。

大量研究表明，尽管复合材料的几种损伤形式都有各自不同的复杂性，但几乎都有一个共同特点，那就是这些损伤缺陷发生和发展时都有很明显的声发射特征，而且声发射手段对于这些损伤过程的分析都非常及时和有效，所以声发射技术是复合材料破坏机理研究及强度性能研究的最有效手段之一。在这方面，国内外学者们进行了大量研究实践，取得了许多可贵的成果。

表 1 为两种金属基复合材料在液压伺服恒位移拉伸载荷下各种失效过程所对应的应变值。

表 1 脆性相机械特性

金属基复合材料	脆性化合物	失效应变(%)
B(B ₄ C)/Ti-6Al-4V	二硼化钛	0.25
	碳化硼	0.57
	硼	0.80
SiC/Ti-6Al-4V	碳化钛	0.28
	硅化钛	0.66
	碳化钛	0.91

图 1 为声发射计数率与应变的对应曲线[3]。

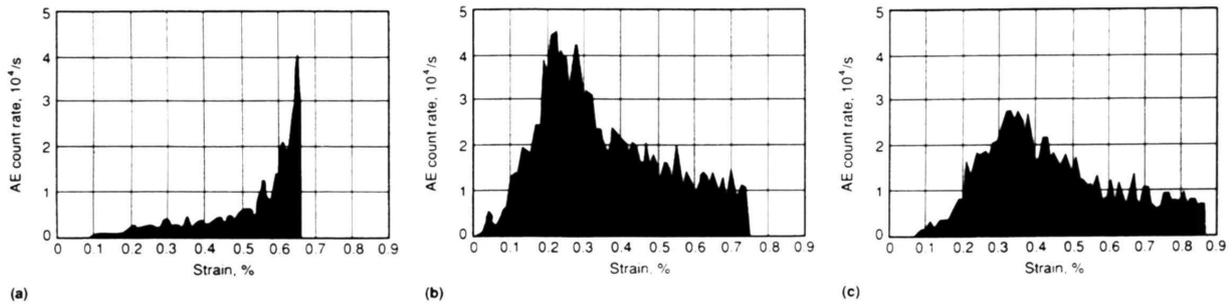


Fig. 16 Area plot of AE count rate versus strain. (a) Longitudinal tension test of a B(B₂C)/Ti-6Al-4V specimen. (b) Transverse tension test of a B(B₂C)/Ti-6Al-4V specimen. (c) Transverse tension test of a SiC/Ti-6Al-4V specimen

图 1 AE 计数率—应变曲线

从表 1 和图 1 可看出各种失效应变都对明显的 AE 计数率的突变，说明各种失效形式发生时，其 AE 计数率显示出明显的变化特征。

在复合材料的声发射特征中，振铃计数、幅度、持续时间、恒载声发射延续时间、Felicity 比是区别复合材料构件各损伤阶段、损伤类型、力学特性的主要参数。

表 2 为碳/环氧复合材料各损伤阶段的声发射特性[4]；

表 2 碳/环氧复合材料各损伤阶段的声发射特性

损伤阶段	声发射特性	08试样	多向试样
起始损伤	P_1/P_f	0.3	0.3
	幅度(dB)	<80	<80
	持续时间(μ S)	<3000	<3000
	恒载声发射(min)	<2	<2
	费利西蒂比	>0.95	>0.95
严重损伤	P_2/P_f	0.65	0.5
	持续时间(μ S)	>6000	>6000
	恒载声发射(min)	>2	>2
	费利西蒂比	<0.95	<0.95
破坏	P_3/P_f	>0.9	>0.9
	幅度(dB)	>80	>80
	持续时间(μ S)	>6000	>6000
	恒载声发射(min)	>6	>6
	费利西蒂比	<0.4	<0.4

注：P₁、P₂、P₃为声发射振铃计数—应变曲线的三个拐点

表 3 为该材料各种损伤类型对应的声发射幅度和持续时间的特征。

表 3 碳/环氧复合材料各种损伤类型对应的声发射特征

损伤类型	幅度(dB)	持续时间(μ S)
树脂显微开裂	<60	<500
单丝断裂	<70	<1000
纤维/基材界面分离	<70	<3000
丝束断裂	<80	<3000
层间分层扩展	-	>3000
束间分离	-	>3000
树脂脆性裂纹扩展	-	>3000
损伤界面摩擦	<80	<1000

国内学者通过对 SiC 纤维铝基复合材料声发射研究发现用 AE 技术能准确测定单纤维金属基复合材料中纤维断枝数和纤维断枝的平均长度，由此能测定 SiC 纤维的断裂强度和纤维与铝基体间的界面强度[5]。

J.G.BAKVCKAS 等人通过对钛基复合材料损伤过程的声发射研究，也揭示了几种主要的损伤形式发生时所对应的 AE 事件幅度的关系，见表 4 及图 2[6]。

表 4 损伤主要形式与 AE 事件幅度的对应关系

样式形式	损伤主要形式	AE 事件幅度(dB)
无槽钛金属-21S	基体塑性变形	低于 60 dB (低幅度)
带中心槽钛金属-21S	基体开裂	60 dB ~80 dB (中幅度)
无槽[90] ₄ SCS-6/钛金属-21S	纤维-基体脱粘	60 dB ~80 dB (中幅度)
带中心槽[90] ₄ SCS-6/钛金属-21S	脆性作用区开裂	80 dB ~99 dB (上限中幅度)
带中心槽[90] ₄ SCS-6/钛金属-21S	纤维断裂	高于 99dB (高幅度)

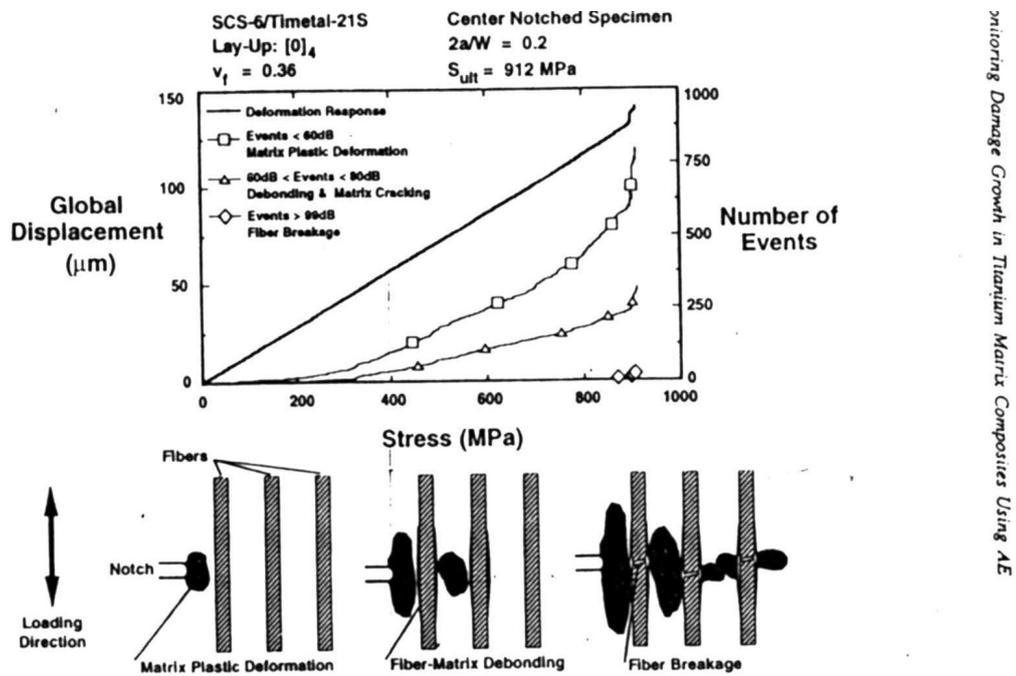


图 2 各破坏过程的声发射计数——应力关系曲线

Thomas M.Ely 等人对石墨环氧树脂复合材料纵向开裂与纤维断裂的声发射特征研究进一步发现纵向开裂(Longitudinal Splitting)对应的 AE 特征为低幅度、短持续时间、低计数和低能量；而高幅值、长持续时间、高计数及高能量的 AE 信号则来自于纤维断裂[7]。

JYI-JIIN LUO 等通过陶瓷基复合材料纵向拉伸试验的深入研究进一步发现：

在应力水平超过应力应变关系的比例极限时，开始出现基体裂纹并产生对应 AE 信号；在比例极限与应变硬化阶段前的非线性阶段，AE 计数与相应应变值呈非常明显的线性关系；在应变硬化开始点，基体裂纹及对应产生的 AE 信号达到饱和；在此后开始出现中等水平的 AE 信号及对应的纤维/基体脱粘现象；在刚度逐渐减弱时开始纤维断裂或拉出，此时 AE 信号以稳定的数率连续减少[8]。

总之，AE 技术在复合材料性能研究方面起了十分重要作用，也取得许多突破性的进展，但这方面的许多工作还处于探索之中。

四、在复合材料结构完整性检测方面的应用

由于复合材料强度高、重量轻的特点，近年来，被广泛用于压力容器、管道、飞机及航天器的某些部件上，声发射技术对这些受力结构的完整性检测和安全寿命评估提供了可靠方法。对于复合材料结构的无损检测，其它常规无损检测方法，像超声、射线、涡流等手段对某些复杂缺陷或微小缺陷诸如基体微裂纹、纤维/基体脱粘及单束纤维裂纹等很难发现，且很难做到动态、实时监测，而只有声发射手段能动态、实时发现这些缺陷。现代声发射技术像美国 PAC 公司的全数字化声发射技术不但能定性发现上述缺陷，而且通过多参数分析、相关分析等方法，尤其基于瞬态波形记录的 FFT 分析手段更能对上述缺陷进行定量识别。

声发射用于压力容器检测方面，对于金属压力容器，声发射手段已应用很广、也很成熟，有关这方面的检测规范及标准也已非常完美和可靠。对于复合材料压力容器的检测正是基于金属压力容器检测基础及复合材料 AE 研究基础上开展起来的。如前所述，由于复合材料在损伤过程中其 AE 特征非常明显，使用声发射对复合材料压力容器的检测非常有效，同时由于复合材料不同于金属材料，它本身是各向异性、非线性，以及几种破坏形式的复杂性、不连续性，其缺陷检测及安全评估方面又有很大的特殊性。

美国 ASME、ASNT、CARP、ASTM 等学会都制订了用声发射技术检测压力容器的标准和规范。声发射检测已成为欧美等国家关于复合材料压力容器检测不可缺少的手段之一。

声发射技术用于复合材料压力容器检测及结构完整性研究，不仅可用于对缺陷的发现，更能有效地用于对缺陷的危害性进行评估与分析，最终对压力容器进行安全可靠性及寿命评估。通过对 AE 源声发射参数的分析，比如可提供注意监视、立即降载复检、事后复检或复检次序等信息，这是其他无损检测技术所难以做到的。

表 5 是近年来采用的先进的声发射多级分类法：

表 5 声发射源严重性分类方法

分类方法	简要说明	参考文献
活动性法	基于振铃、事件、能量等计数随载荷的变化率，可将声源分成为：安静的、活动的、临界活动的等级别	[1]
恒载声发射法	基于恒载声发射的延续特性，可将声源分成为：稳定的、较稳定的、不稳定的等几种级别	[2]
强度法	基于事件平均幅度或能量大小，可将声源分成为：弱、强、很强等级别；也可与活动性法相结合成为新的严重性级别	[1]
综合评价法	分别对声源的活动性、平均能量、定位集中度加以分级，又将其综合成四级严重性级别	[3]
数据指数法	对恒载声发射、费利西蒂比、累积持续时间、高幅度事件计数等数据，基于超标程度分别打分，总计 10 分，又根据分数的多少分成五级	[4]
强度分析法	以历程指数为横坐标，以严重性为纵坐标，制成声发射强度图，并分隔成具有不同结构意义的五个强度区。其中，历程指数指近期发生事件的信号强度对所有事件信号强度之比；严重性指最大的信号强度的事件平均；信号强度指信号的包络内面积	[5]

关于复合材料结构的声发射检测主要用于飞机结构和航天器。在飞机结构方面，由于近年国外先进的军、民用飞机大都不同程度地选用复合材料结构，所以复合材料结构的强度和寿命问题尤为重要。对于飞机设计师来说，除关心其结构是否有缺陷外，更关心的是缺陷何时出现的以及何时达到寿命极限。复合材料又不同于金属材料，各向异性，几种破坏形式，简单地以缺陷大小作为安全评估并不很有效，这样作为一种动态监测手段的声发射技术就扮演了十分重要角色。在这方面国内外都有许多成功应用，比如美国波音公司 90 年代初期就与 PAC 公司合作开始对波音 777 飞机等复合材料部件及整机进行声发射研究[9]； SAAB 已用 PAC 公司的

72 通道声发射系统对 JAS-39 飞机的复合材料部件及整机进行声发射研究；我国在海豚直升机的碳纤维复合材料涵道大垂尾结构组件及歼七飞机复合材料垂尾上成功地进行了声发射研究 [10][11]。此外，在火箭壳体等用复合材料制成的航天器构件也都大量采用声发射检测技术。

五、在复合材料结构制造过程监测方面的应用

复合材料是由纤维与基体材料熔融固化而制成的，基体材料的熔融状态和凝胶固化状态的情况不同直接影响复合材料质量，而这些制造中的中间过程都会产生不同的声发射信号，声发射信号从另一角度反映了这些状态过程，故可以用声发射技术来监测复合材料的制造过程以实现质量控制。

国内学者曾对碳纤维增强聚酰亚胺复合材料的加热固化过程进行声发射监测研究，结果发现：

在该复合材料加温固化过程中亚胺化反应和凝胶固化两个过程均产生大量的连续型声发射信号；

在亚胺化反应完全结束，酒精和水充分挥发之后，凝胶固化开始之前，亚胺熔融不产生声发射信号[12]。

进而推出声发射方法是监测碳纤维增强聚酰亚胺复合材料凝胶点的可靠方法。

对于金属基复合材料，由于金属熔炼相变过程及冷却固化过程都有不同的声发射特征，对于金属基复合材料同样可用声发射手段进行质量控制。

六、展 望

随着国内外复合材料研究、制造水平的提高以及复合材料在工程构件上的广泛应用，人们对复合材料的性能尤其是强度、力学等性能的检测要求日益迫切，声发射技术必将在这一领域发挥越来越大的作用，并将成为不可缺少的手段之一。随着未来技术的发展，声发射技术在复合材料方面的研究在如下几方面将成为研究热点：

其一，声发射实时波形记录和瞬态 FFT 分析等信号处理手段的应用将给进一步研究和区分复合材料损伤破坏形式中的纤维断裂、基体开裂、分层、脱粘等破坏形式及损伤机理提供更准确手段。现在以美国 PAC 公司为代表的当今最新水平的数字化声发射系统可以使传统的声发射参数采集和瞬态波形记录、FFT 分析同时实现和同时处理。

其二，作为现代处理技术的神经网络及模态识别技术应用到声发射研究，在传统的声发射研究中开辟了一个新领域，也给复杂条件下复杂结构的复合材料研究提供了新的可靠手段，美国 PAC 公司在这方面已推出商业化的实用软件包。由于复合材料损伤，不但声发射特征明显，而且声发射信号非常丰富和复杂。神经网络分析技术给解决这些复杂问题提供了新的手段。

其三，声发射技术与现代断裂力学、损伤力学的结合将给复合材料构件的损伤容限设计提供依据，而且将更有效地揭示复合材料的损伤破坏机理和寿命规律。

总之，声发射技术将是复合材料研究领域不可多得的有生力量。

参考文献：

1. 《航空制造工程手册》总编委会主编，《航空制造工程手册—工艺检测》，航空工业出版社，北京，1993
2. A. T. Green et al, Acoustic Verification of Structural Integrity of Polaris chambers, Modern Plastics, MOPLAY,41(11)

3. Adrian A pollock <<Acoustic emission Inspection>> physical Acoustic Corporation
4. 金周庚, 潘向华, 朱成, 宋国贵
碳/环氧复合材料破坏过程的声发射研究
第五届全国声发射学术年会 1993.9
5. 朱祖铭, 石南林, 王中光, 梁量
SIC 单纤维钴基复合材料界面的声发射研究
第六届全国声发射学术年会 1995.10
6. J. G. BAKUCKAS, JR
Monitoring damage Growth in Titanium Matrix Composites Using Acoustic Emission
Journal of composite MATERIALS,
VOL.28 NO. 4/1994
7. Thomas M. ELY and Eric V. K. Hill
Longitudinal splitting and Fiber Breakage Characterization in Graphite Epoxy Using
Acoustic Emission Data .
Materials Evaluation/February 1995
8. JYI-JIIN LUO, SHI-CHANG WOOH AND ISAAC M. DANIEL,
Acoustic Emission Study of Failare Mechamsmsin Ceramic Matnix Composite under
Longitudinal Tensile Loading
Journal of Composite METERIALS,
VOL.29 NO.15/1995
9. B. C. Dykes, W. T. Hardrath, D. S. VLM
An Acoustic Emission Pre-Failure Warning System for Composite Structural Tests
Boeing Commercial/Airplanes
10. 袁振明: 我国声发射技术近期研究和应用的进展
第五届全国声发射学术年会 1993.9
11. 魏文慧: 复合材料飞机垂尾静力试验中的声发射检测
第五届全国声发射学术年会 1993.9
12. 沈功田, 秦平彦等, 碳纤维增强聚酰亚胺复合材料升温固化的声发射研究
第六届全国声发射学术年会 1995.10
13. Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring of Structures During Controlled
Stimulation, ASTM E 569-85, American Society for Testing Materials.
14. Jin Zhou Geng et al, Inspection of TCA High Pressure Vessels by Acoustic Emission
Technique, Tenth World Conference on Non-Destructive Testing, Vat 4, Moscow, 1982,
P208.
15. Acoustic Emission Testing of Spherical Pressure Vessels and Classification of Test Restuts,
NDIS 2410-80, gapanese Society For Non-Destructive Inspection, Tokyo, 1980.
16. T. J. Fowler et al, Intensity Analysis, Fourth International Symposium on Acoustic Emission
From Comopile Materials, American Society For Non destructive Testing, Seattle,
1992, P237.
17. J. eisenblatter et al, Survey of Acoustic Emission Research in Europe and investigation
Conducted at Battelle Frankfurt, 2nd Acoustic Emission Symposiam, Tokyo, 1987, Session
7-1/99