

应用声发射检测复合材料桨叶 疲劳损伤的技术研究

刘炉山¹, 夏国旺²

(1. 南京航空航天大学,南京,210016;2. 中国直升机设计研究所,景德镇,333001)

TECHNIC RESEARCH OF APPLY ACOUSTIC EMISSION IN CRACK DETECTION DURING COMPOSITE ROTOR BLADES FATIGUE TEST

LIU Lu-shan¹, XIA Guo-wang²

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016;

2. China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen, 333001)

摘要 随着材料技术的发展,复合材料在直升机上运用越来越广泛。由于复合材料的损伤模式与金属材料有很大的区别,因此,了解复合材料破坏判据对复合材料零部件的定寿具有决定性的作用。本文介绍了声发射技术的基本理论、应用现状和声发射技术在复合材料桨叶疲劳试验中的应用研究。

关键词 声发射;复合材料;桨叶;直升机;疲劳试验

Abstract With the development of material technique, composite is applied more and more extensively in helicopter. Due to damage of composite difference from that of metal, so finding out destroy criterion of composite is important in determining life of helicopter. This paper describes the recent application state and basic theory of Acoustic Emission, and the application of Acoustic Emission in crack detection during composite rotor blades fatigue test of helicopter.

Key words acoustic emission; composite; blade; helicopter; fatigue test

1 前言

目前,在我国直升机疲劳试验中,用于判定部件是否破坏的手段还比较原始,主要以目测出现宏观裂纹为主。这在金属构件疲劳试验中有其合理性和实用性。但从疲劳裂纹的形成机理来看,这远不能代表复合材料零部件的寿命。如一般的金属材料的疲劳极限只是拉伸强度的45%~50%,而碳纤维/聚酯树脂复合材料的疲劳极限可达抗拉强度的70%~80%^[1]。金属结构的主要损伤模式为裂纹,裂纹以相当明确的方式传播并与所加的力有关,其临界裂纹尺寸和裂纹传播速率与通过断裂力学分析获得的试验数据有关。在复合材料中,很少有单一

的损伤模式,即使复合材料构件由于产生宏观裂纹而破坏,裂纹传播也不会像金属材料那样以预想的方式进行。因此,复合材料的损伤研究比金属材料更加困难。为了能够清楚地了解疲劳裂纹的萌生、扩展的全过程,我们必须引入一种有效的对裂纹进行实时监测的技术手段,它要能在试验状态下实时发现复合材料构件的起始破坏,结合其他一些有效的无损检测手段对破坏模式进行识别,找到破坏点和破坏模式,这样才能够对复合材料的破坏过程有个全面的了解。而声发射技术正好满足了我们这种需要。通过运用声发射技术,可以对正在试验中的动部件进行实时的监测,对疲劳破坏的萌生点、扩展速度和扩展时间都有较全面的了解。这一技术的运

用,将给判定疲劳试验件是否破坏带来更准确、客观的依据,从而为直升机动部件和结构件的准确定寿提供科学的技术保障。

2 声发射的基本理论

2.1 声发射形成机理

当材料或零部件受外部力的作用时,由于材料或零件内部有缺陷存在或微观的不均匀性,使该处所在部位承担的应力高度集中,继而导致了该区域应变能量的高度集中。由于材料总是力图趋于能量最低状态,即由不稳定的高能状态必然过度到稳定的低能状态。当外部条件作用增大到一定程度时,局部能量的高度集中使材料缺陷部位产生微观屈服或变形,并通过如滑移、位错、开裂、晶界突然改变取向等方式将集中的多余能量释放出来,在能量释放过程中,其中一部分以应力波的形式快速释放的弹性能,应力波向外传播就形成声发射信号^[2]。

2.2 声发射信号分析理论

传感器参数分析技术假设声发射信号是一种阻尼正弦波(见图1),声波是以某一固定的速度传播的。对声发射信号波形进行包络检波,并假定 V_t 为检测门槛电压, t_1 到 t_2 为声发射事件的持续时间;在信号处理中,为了防止同一信号的反射信号作为另一事件处理,再设置事件间隔时间,既信号幅度低于门槛电压后延长一段设定的时间(从 t_2 到 t_3),则从 t_1 到 t_3 可计为一个声发射事件。振铃计数是声发射信号超越门槛电压的振荡次数。事件计数和振铃计数又可用总计数和计数率两种形式表示。总计数是计从试验开始到一特定时间总的事件数或振铃数,分别为事件总计数或振铃总计数;计数率是单位时间内的事件数或振铃脉冲数,分别为事件计数率或振铃计数率。输出波形达到最大幅值 V_p 所需的时间称为上升时间。另外还可用能量、幅度等参数对声发射信号进行表征。由于复合材料在破坏时都有很强的声信号发出,因此,用声发射设备对复合材料进行检测就成为可能。

3 复合材料的损伤与损伤特征

复合材料是由两种或两种以上的材料经过物理方法组合而成的,它通常是一种多相非均质的各向异性材料,因此,复合材料的损伤机制和损伤扩展机制要比各向同性的材料复杂得多。一般来说,纤维复合材料的基本损伤类型可分为四种:基体开裂、纤

维与基体界面脱胶开裂、分层和纤维断裂。各种损伤破坏模式可能单独地或结合在一起发生;其主要的破坏模式取决于复合材料系统中基体、纤维、界面三者的相对强度、刚度、以及纤维取向、铺层方式和环境载荷等条件。“复合材料损伤”的概念是由美国 K. L. Reifsnider 教授于 1977 年在研究复合材料疲劳破坏时明确提出来的,复合材料疲劳破坏过程如图 2 所示。在疲劳加载初期(疲劳寿命的 15% 以下),复合材料内部出现。

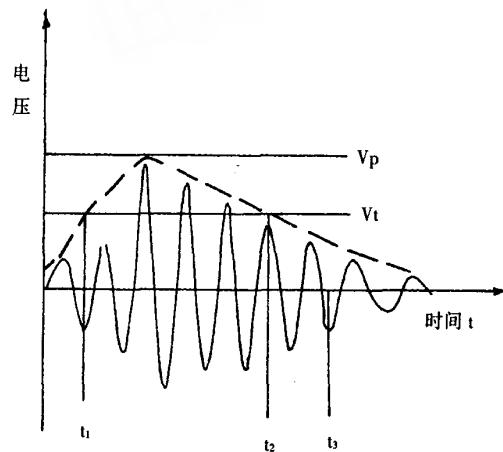


图 1 声发射信号的表征图

4 复合材料桨叶疲劳过程中的实时监测

复合材料桨叶,特别是碳纤维型和玻璃纤维型复合材料桨叶,由于重量轻、强度大、抗疲劳性能好等优点,现在已经逐步取代了金属桨叶。但由于复合材料在制造过程中有很多的不确定性,它的结构的完整性和安全性的检测就被提了出来。由于复合材料性能和结构的特殊性,在现有的无损检测方法中能有效地对复合材料完整性进行检测的并不多,要在疲劳试验过程中进行实时监测就只有声发射了。声发射设备通过固定在桨叶上的传感器接收声发射信息,通过声发射设备对信号进行处理和分析,然后对桨叶的完整性进行判别。

声发射监测的作用主要表现在:确认主桨叶的结构完整性和可疑区域;确认结构损伤的起始载荷;为局部复检提供结构损伤和结构缺陷的区域;为损伤过程分析提供加载或试验过程的声发射时序特征;加载过程中提供临近破坏预警。

4.1 声发射传感器布置

4.1.1 声发射传感器定位方式设置

声发射的定位方法分为驻点定位、线定位、面定位、区域定位等几种。考虑到桨叶宽度有限,因此可选用线定位的方式进行定位。在桨叶加载的两端面由于摩擦和撞击,将会有许多的噪声传入传感器阵列,为了消除噪声,在靠近两端接头的地方设置两个

警卫探头,在两个探头以外来的信号其它传感器拒绝接受,这样可以减少大量的噪声传入。当然,用这种方法将会把接头上的真正的裂纹信号也排除了,为了弥补这一缺陷,在两个接头位置布置两个传感器,它们采用驻点定位方式。

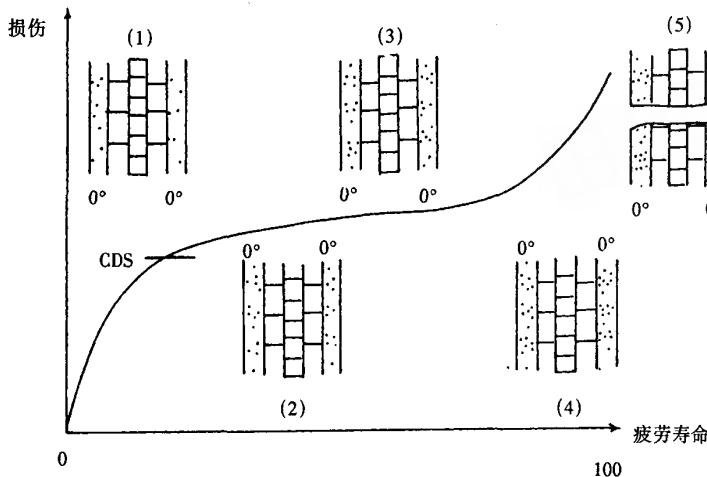


图2 复合材料疲劳损伤破坏模式

(1) 基体开裂;(2)裂纹与界面脱粘耦合;(3)分层;(4)纤维断裂;(5)断裂破坏

4.1.2 声发射传感器距离的设置

由于复合材料的声阻很大,因此声波在材料中的传播衰减也很大,为了能够对桨叶进行尽可能的覆盖,声发射传感器距离的设置就显得很重要。由于复合材料设计的多样性,使得其传播距离也不尽相同,为了能确定比较准确的传感器布置距离,可以通过在桨叶表面做一些断铅试验(模拟声发射信号),以确定最佳距离。由于在桨叶中间充满了发泡塑料这一强声阻材料,因此必须在桨叶的两面都布上传感器,试件加载和传感器布置图见图3。

4.2 声发射参数的选择

声发射参数包括有能量、幅度、振铃计数、事件计数、持续时间、上升时间、平均频率、绝对频率等,要在试验过程中对所有的参数进行采集和分析,在多通道时是很困难的,并且数据量非常大,不利于长时间的监测。因此,选择一两个或几个具有代表性的参数对试件是否破坏进行表征就显得很必要。但是由于试验件的材料、结构等都是不太相同的,所以这种参数的选择只有在做一些基础的材料或构件试验后,经过事后分析才可能找到。当然,找到具体的参数以后,对试验件的破坏判定将有一个判断标准,它将大大简化试验件检测的步骤,并为批量检测产

品提供了可能。

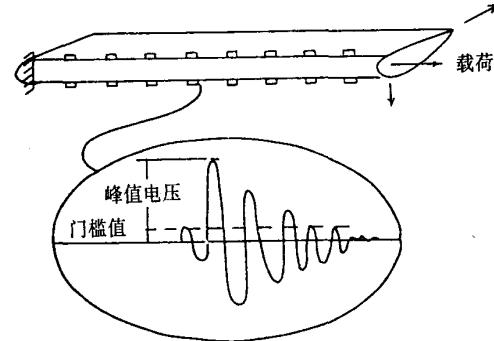


图3 试件加载和传感器布置图

在复合材料桨叶试验时,我们也必须做一些基础的复合材料试验,并充分利用多件(一般是6件)试验件的优势,利用前面一到两件试验件对参数进行修正,这样后面的试验件的破坏判断将会有个较为准确的判据。

4.3 费利西蒂(Felicity)效应的应用

复合材料的声发射损伤检测有一个著名的 Felicity 效应,它是指复合材料在循环加载过程中,卸载后重新加载,当载荷达到原先加载最大载荷的某

一百分比时(通常为 90% 左右)即会产生明显声发射信号。重复加载时的声发射起始载荷(P_{AE})对原先所加最大载荷(P_{MAX})之比(P_{AE}/P_{MAX}),称为费利西蒂(Felicity)比^[4]。

费利西蒂比作为一种定量参数,较好地反映了材料中原先所受损伤和结构缺陷的严重程度,它已成为复合材料缺陷严重性的重要评定判据,在一些复合材料构件中,费利西蒂比小于 0.95 已作为声发射指标超标的重要判据,它预示着试验件可能已有缺陷或已经开始破坏。

由于复合材料桨叶疲劳试验(高周疲劳试验)是一个多循环加载过程,我们可以充分利用好费利西蒂效应和费利西蒂比。在每天开始试验前对桨叶进行静加载(不超过最大载荷),检查费利西蒂比,如果费利西蒂比小于 0.95,就说明桨叶可能已经有缺陷存在。利用声发射设备对声发射源进行初步定位,通过超声 C 扫描等其它无损检测方法,对桨叶怀疑存在缺陷的位置进行复查。通过这种方法将大大减轻详细检查的工作量,并能比较有效地掌握桨叶的破坏情况。

5 结束语

声发射技术是近几十年,特别是本世纪五十年代后才迅速发展起来的一种动态的无损检测方法,它的出现,为技术人员进行无损检测提供了一种崭新的手段。它与常规无损检测方法相比,声发射具有动态监测,预先警报和覆盖面大的优势。经过几十年的研究和发展,声发射技术已越来越广泛地在各个无损检测、故障动态监测领域及其它相关领域中扮演着重要角色,其运用和服务范围已涵盖了从石油、化工、铁路、电力、航空、航天、建筑、交通、制造等各个领域。在航空界已把研制机载声发射监测系统作为航空全机安全性实时监测中的“梦幻技术”。

目前,虽然困难很大,但有大批的机构和学者为了这一目标正在不断地探索和研究,并在一些方面取得了突出的成就。例如,美国 GRUMAN 航空公司曾在飞机疲劳试验时用声发射仪器监测了飞机结构的损伤情况,并用声发射技术监测了裂纹的形成和扩展的全过程。他们发现,在隔框处,声发射能比其他的探伤方法更早探测到裂纹,美国麦道公司利用声发射对 F15、F111 飞机的疲劳裂纹进行了监测,并取得了一定的成果。另外,美国空军 P-3、A4、F14、F15、F16、RAH66;海军 CH47、SH60;英国空军 VC-10;波音的 707、720B、737、747、777 等都已将声发射技术作为一种常规的无损检测手段。从事直升机研制生产的 BOEING VERTOL 公司, BELL HELICOPTER 公司, SIKORSKY 飞机公司等都将声发射技术大量用于直升机的研制和生产中^[5]。在国内,空一所利用声发射技术对歼教七飞机机体全尺寸疲劳试验进行裂纹监测,并成功地发现主梁螺孔疲劳裂纹。

近年来,声发射技术的运用和研究随着计算机技术的进步有了较大的突破。数字式的声发射仪器的问世及相应的信号与噪声处理技术的进步,使得原来在声发射运用上的障碍(剔除噪声干扰)也得到了较大的解决,工程应用也越来越广泛。

参考文献:

- [1] 田秀云,杜洪增.复合材料结构及维修.北京:中国民航出版社,1996 年.
- [2] 袁振明,马羽宽,何译云.声发射技术及其应用.北京:机械工业出版社,1985 年.
- [3] 杨光松.损伤力学与复合材料损伤.北京:国防工业出版社,1995 年.
- [4] 蒋福棠.航空航天无损检测人员资格鉴定与培训参考教材第三册(内部资料),1998 年.
- [5] 耿荣生.声发射技术发展状况.中国第七届声发射学术研讨会论文集,1997 年 10 月 PPI-10.

应用声发射检测复合材料桨叶疲劳损伤的技术研究

作者: 刘炉山, 夏国旺
 作者单位: 刘炉山(南京航空航天大学, 南京, 210016), 夏国旺(中国直升机设计研究所, 景德镇, 333001)
 刊名: 直升机技术
 英文刊名: HELICOPTER TECHNIQUE
 年, 卷(期): 2003, ""(1)
 引用次数: 0次

参考文献(5条)

- 田秀云, 杜洪增. 复合材料结构及维修. 北京: 中国民航出版社, 1996年.
- 袁振明, 马羽宽, 何译云. 声发射技术及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1985年.
- 杨光松. 损伤力学与复合材料损伤. 北京: 国防工业出版社, 1995年.
- 蒋福棠. 航空航天无损检测人员资格鉴定与培训参考教材第三册(内部资料), 1998年.
- 耿荣生. 声发射技术发展状况. 中国第七届声发射学术研讨会论文集, 1997年10月PP1-10.

相似文献(10条)

1. 会议论文 王怡之, 程琦, 孔凡公 碳—铝复合材料的声发射研究 1985

该文介绍了应用AE信息的计数分析, 研究碳—铝复合材料拉伸过程的初步结果。拉伸试验中用电测法测定载荷和应变量, 并以电压量分别作为模拟参数1和模拟参数2直接输入声发射系统。通过用计算机化的声发射系统测试和事件计数分析表明, 不同强度纤维增强的试样和三种状态(基体、横向、纵向)试样拉伸过程的声发射特性有明显的区别; 复合材料的拉伸强度与声发射特性和断口形貌是相对应的; 碳—铝复合材料的声发射现象符合凯塞尔效应, 是不可逆的, 事件的产生取决于材料的应力历史; 声发射事件计数分析是复合材料强度水平、工艺稳定性评价的有效方法。(唐玺摘)

2. 学位论文 彭永超 PE/PE复合材料拉伸断裂过程声发射源特性之研究 2006

复合材料以其高比强度、高比模量、损伤容限高和性能可设计等优异特性而广泛应用于各个方面, 但复合材料本身所具有的不均匀性、各向异性、损伤破坏模式复杂等特点, 使得其产品质量性能差异很大, 在使用前和使用过程中的安全检验和强度预报显得尤为重要。复合材料主要的损伤破坏形式有: 纤维断裂、基体开裂、界面脱粘或分层等, 而每一种损伤破坏形式对复合材料的整体性能都有不同程度的影响。所以目前对于复合材料的损伤破坏和性能预测研究显得越来越重要。

本文首先论述了超高相对分子质量聚乙烯(Ultra-highMolecular Weight Polyethylene, 简写为UHMWPE)纤维及其复合材料的发展和应用现状, 介绍了声发射技术检测的基本原理以及现代对于声发射信号的分析和处理方法。接着采用熔融膜压法(Film Stacking)并结合复合材料缠绕成型工艺, 制备出UHMWPE/LDPE复合材料层合板。利用声发射技术分别对纤维和基体的拉伸断裂过程进行了实时在线监控, 找出声发射曲线及参数与断裂类型、特征之间的关系, 为复合材料的声发射特征和断裂机理研究提供依据。继而分析了单向UHMWPE/LDPE复合材料的声发射特征和断裂类型, 并比较了几种典型铺设角度的UHMWPE/LDPE复合材料的声发射特性和断裂机理, 总结出纤维铺设角度与UHMWPE/LDPE复合材料的拉伸强度以及拉伸断裂过程中的声发射特性之间的近似关系。给出了UHMWPE/LDPE复合材料拉伸断裂过程中的各种损伤及破坏的SEM照片。

采用声发射技术研究复合材料的损伤模式和破坏机理是近年来的热点, 但是在对于诸如碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维增强环氧基复合材料及金属基复合材料等的研究中, 却鲜见有关于超高分子质量聚乙烯纤维增强复合材料的报道。本文就是以UHMWPE纤维增强LDPE树脂复合材料层合板为研究对象, 对其在拉伸直至断裂过程中的声发射特性进行研究, 探讨了声发射特性与复合材料的损伤破坏类型和特征之间的关系, 建立了声发射幅度参数与复合材料损伤破坏模式之间的联系。并对复合材料的纤维铺设角度与复合材料的强度和声发射特征参数之间的关系进行了探索, 这也是本文的创新点之一。

研究结果表明: UHMWPE/LDPE复合材料的声发射源主要有基体开裂、界面脱胶(粘)、裂纹扩展、纤维抽拔及断裂等。不同的声发射源对应着各自的声发射幅度值, 纤维和基体间的界面脱粘或分层是单向UHMWPE/LDPE复合材料层合板损伤破坏的显著特征。对于0°复合材料, 其破坏机理主要是材料的韧性复式破坏, 包括基体开裂、界面脱粘或分层、纤维纵向劈裂和丝束断裂; 10°复合材料主要发生纤维之间的摩擦和界面的分层破坏; 45°复合材料破坏则是纤维抽拔和界面脱粘的结果; 而90°复合材料的破坏机理主要是界面脱粘、分层以及纤维的横向剥离。UHMWPE/LDPE复合材料的拉伸强度和声发射总能量随着纤维铺设角度θ的增大而减小, 声发射事件计数则随θ的增大而增大。材料的主要损伤破坏形式对应着较大的声发射能量和较低的声发射事件数。

用声发射技术去研究UHMWPE/LDPE复合材料拉伸过程中的损伤演化规律以及损伤类型是一种行之有效的手段, 能清晰直观地反映材料的损伤特征。

3. 会议论文 马学宏, 陈以蔚 用声发射技术探讨复合材料层压板的临界损伤 1988

复合材料或构件受载后, 往往由于内部缺陷的扩展而引起损伤。临界损伤是反映材料抗损伤扩展的能力。该文通过对复合材料层压板在拉伸载荷下, 用声发射技术动态监测其过程。通过应力曲线和声发射记数曲线的对比, 获得损伤产生及其扩展的初步规律, 其应力曲线的拐点与声发射记数曲线的起点很接近。若与应变曲线相结合用以判断其临界损伤, 是可行的。对选择树脂或研究树脂的刚性有重要意义, 对评价复合材料构件的坚固性, 能提供可靠的基本数据。(本刊录)

4. 会议论文 沈功田, 张敏, 张家骏 碳纤维增强聚酰亚胺复合材料加热固化过程的声发射监测 1996

对碳纤维增强聚酰亚胺复合材料的加热固化过程进行了声发射监测, 试验结果表明, 加热温度在130℃保温10分钟后随着亚胺化反应开始出现大量声发射信号, 这种信号一直持续到260℃酒精和水充分挥发的亚胺溶融流动状态, 260℃保温10分钟几乎无任何声发射信号, 随着进一步升温, 亚胺开始凝胶固化, 随之产生更强烈的声发射信号, 这些声发射信号一直持续到固化结束。

5. 学位论文 张同华 基于声发射技术的PE/PE自增强复合材料损伤检测研究 2007

超高相对分子质量聚乙烯(简写为UHMWPE)纤维具有拉伸强度高、模量高、韧性、耐磨性好以及抗冲击性能强等特点, 其自增强复合材料可获得优良的综合性能, 在许多工程领域得到广泛的应用。但是, 由于加工工艺的不尽合理以及加工条件的不尽理想必然会造成本材料的缺陷, 如孔隙、裂纹、疏松、界面结合不好等。复合材料在服役过程中承受的载荷、机械损伤、疲劳、蠕变以及复杂环境等因素都会因缺陷而引起材料的损伤, 严重的损伤会形成材料的整体破坏而造成重大事故。因此, 对材料在服役过程中进行实时检测, 做好安全预警是防止重大事故产生的前提。

声发射检测无疑是对于材料损伤过程进行实时检测最好的方法之一, 对预防重大事故的发生起到重要的作用。前人对碳纤维/环氧树脂、玻璃纤维/环氧树脂等热固性材料声发射的研究较多, 而对热塑性复合材料损伤破坏声发射检测研究较少。热固性材料由于其塑性差、弹性变形低、材料损伤破坏过程中信号比较明显, 而热塑性材料可塑性强、弹性变形相当高, 声发射信号的发生有着与热固性材料的很大差异。复合材料的损伤破坏过程伴随着信

号的发生、传播，复杂的材料结构也会对信号的传播产生影响，每一破坏又会因破坏模式的不同而表现出不同的信号特征。因此，对热塑性复合材料破坏过程中进行实时检测，掌握不同结构PE/PE自增强复合材料受载破坏过程中信号的活跃情况，研究信号在材料中的传播特征，分析不同类型的信号的波形是进一步揭示材料损伤破坏模式、确定声源位置以及声源特征具有重要的意义。

本文首先对纤维材料、基体材料、[0°]层合板、[+45°]/[-45°]层合板和[90°]层合板等五种试样拉伸破坏过程进行声发射全程监测，以参数分析的方法对试样不同的破坏特征加以区分。结果表明，不同的试样在拉伸过程表现出明显不同的应力应变关系，而声发射历程中所表现出来的信号活动情况以及信号特征（包括幅度、能量、持续时间）也有着明显的不同，而且从声发射信号的参数特征来看材料的损伤破坏具有阶段性，不同的阶段信号的特征有所区别。同时，利用扫描电镜（SEM）观察材料的破坏断口，发现复合材料层合板的损伤破坏存在多种机制（如，纤维断裂、基体开裂、界面分离和分层），声发射信号参数的不同正是由于材料的不同损伤破坏所致。声发射检测是研究材料拉伸过程中损伤演化规律以及损伤类型行之有效的手段，能清晰直观地反映材料的损伤特征。

为了克服参数分析方法的缺点和不足，本文引入了被广泛接受的模态声发射技术来研究声发射信号，它是基于板波理论上大量用于对板状结构材料损伤检测的分析技术。基于板波理论建立了Lamb波传播模型，计算了薄板中信号的传播。先应用层板理论对单向板和对称铺层的复合材料层合板的弹性特征进行建模，根据不同弹性特征给出最低阶对称模式和最低阶反对称模式的Lamb波频散控制方程。结合Lamb波波动方程和边界条件，理论预测了给定材料参数下的不同铺层的PE/PE复合材料层板中的最低价Lamb波频散曲线，计算结果表明Lamb波在板中的传播与波的传播方向、纤维的铺层方向密切相关，Lamb波传播速度的大小依赖层板的弹性特征。

掌握层合板中信号的传播规律为实际声发射检测过程提供了理论依据，对板中Lamb波模式的出现情况进行了解。分析可知最低价反对称模式的信号AO在薄板中占有重要的地位，这正是声发射检测中（特别是模态声发射理论下声源定位）所要研究的对象。本文实验验证了理论预测，运用小波变换的方法进行了声源定位，同时研究PE/PE复合材料层合板中信号的衰减特征，为声发射检测中传感器的布置提供了依据。

利用断铅实验研究了声发射信号在PE/PE复合材料层板中的衰减特征，得到了信号的衰减规律；同时讨论了Gabor小波分析在信号时频分析中的作用。利用Gabor小波分析实验验证了层板理论控制方程的正确性；进而研究了断铅模拟信号以及试样拉伸断裂损伤源定位问题。研究结果表明：信号在层板中的衰减比较严重，尤其是在距声源50mm的范围内，高频信息大部分都被滤掉，较低频率（低于200kHz）较长波长的信号能够在较长范围内传播，这一试验为声源定位中传感器布置提供了依据。

Gabor小波适用于对瞬态非平稳信号的分析，小波变换的小波系数峰值对信号的传播时间相对应，利用小波分析可以验证控制方程的正确性，并且Gabor小波变换能够提供声源精确定位的工具。断铅实验和拉伸实验均表明，Gabor小波变换能够较精确地确定声发射源的位置。

最后，本文利用小波技术对声发射信号进行了识别。用正交多分辨Laplace相关滤波的方法对具有单边衰减特征的模拟信号及复合材料损伤过程声发射信号进行了多分辨相关滤波，对信号的参数进行了识别；同时，提出了运用小波多分辨分析和小波时频能量分析的方法来研究复合材料声发射信号。试验研究了基体材料、[0°]试样、[+45°]/[-45°]试样和[90°]复合材料层合板试样拉伸破坏过程中的特征信号。对复合材料层合板不同损伤机制进行了识别和归纳。

分析表明，多分辨相Laplace相关滤波方法能够准确地识别出瞬态响应信号特征，同时可以减少相关滤波运算过程的计算量，提高运算速度。这一方法能够有效地对热塑性复合材料损伤破坏中的声发射信号进行识别；小波多分辨分析和重构能提取原始信号中的有用信息，除掉不利于分析的噪声信号；小波时频能量分析方法能够有效地区分复合材料不同的损伤机制，对材料不同的损伤破坏进行鉴别；复合材料其损伤破坏存在多种机制，纤维铺层方式及铺层角度对材料拉伸破坏模式有较大的影响。PE/PE复合材料的拉伸破坏过程AE信号复杂，材料损伤破坏机制对声发射信号特征有显著的影响，不同破坏的信号在波形特征、频谱特征方面存在不同。

6. 期刊论文 庄兴民. 张慧萍. 晏雄. ZHUANG Xingmin. ZHANG Huiping. YAN Xiong 聚乙烯自增强复合材料损伤过程的声发射特征 -复合材料学报2006, 23 (2)

复合材料在承受外载时，声发射可产生于基体破裂、纤维-基体界面脱粘和纤维断裂等。测定了UHMWPE/HDPE复合材料在拉伸载荷作用下的声发射（AE）振幅信号。对特殊试样，即预测到断裂有明确方式，如纤维-基体界面脱粘、基体破裂、纤维断裂和分层等的试样，实施加载直至破坏。用扫描电子显微镜（SEM）观测试样的断裂表面，对产生于若干特殊损伤类型的AE信号进行了鉴别。在相同加载条件下，完成了不同种类的UHMWPE/HDPE准各向同性层合板声发射检测，结果在特殊试样损伤类型与声发射信号事件振幅之间建立了对应关系，揭示了上述各种准各向同性层合板损伤扩展过程的AE特征与损伤破坏机制。各种准各向同性层合板试样的声发射事件累计数对拉伸应力关系曲线相异，其相同损伤类型发生时所对应的拉伸载荷水平不等，表明它们的铺设角度和铺设顺序对损伤演变过程有显著的影响。结果证实了它们的最终破坏由严重层间分层造成。

7. 期刊论文 C/SiC复合材料拉伸过程的声发射研究 -无损检测2006, 28 (7)

利用声发射（AE）技术对C/SiC复合材料试样拉伸试验过程进行动态监测，通过声发射多参数分析法对拉伸过程中的声发射累计能量和平均持续时间随载荷或时间的变化进行了综合分析；同时对拉伸过程中典型AE信号的频率特征进行了分析，揭示了C/SiC复合材料拉伸损伤的演化过程及规律，给出了材料拉伸损伤发展的不同阶段以及各阶段损伤类型。通过声发射累计能量随载荷变化的斜率突变定义了材料临界损伤强度。

8. 学位论文 沈毅 压电正交异性复合材料用于AE传感的初步研究 2005

众所周知，声发射（AE）是材料在受到形变或外力作用时，迅速释放能量而产生的瞬态应力波，是进行结构诊断的重要依据。声发射的检测过程可以归纳为：从声发射源发出的应力波信号经介质传播后达到声发射传感器，输出电信号，根据这些电信号对声发射源作出正确的解释，从而达到对结构的损伤检测的目的。声发射信号的频率分量可以从次声频扩展到50MHz，因此需要传感器具有较宽的频带，高的灵敏度才能有效地抓住结构损伤的特征信号。

目前人们一般用压电材料研制传感器，因为压电材料感应应力波时具有响应速度快、频带宽、测量精度高、性能稳定等优点。然而普通压电材料作为传感元件它将同时感受所有方向应力波，不具备测定特定方向应力波的能力[1]，因此也不能分辨不同方向的AE信号。

压电正交异性复合材料OPCM（Orthotropic Piezoelectric Composite Materials，简称OPCM）传感器除了具有普通压电复合材料柔韧性好、强度高、极限应变大、重量轻等优点外，还具有平面横观各向异性的特点，可以区分平面结构中的各个应力波分量。本文用OPCM研制AE传感元件，通过有限元方法对传感元件的构造方式、尺寸和性能等进行设计和优化，包括（1）研究在有限元中压电元件电极模拟方法，讨论了读取电压自由度值的可行性和优越性；（2）通过数值方法模拟结构中一种特定的AE源评价传感元件的特性，该方法具有简单、无噪声干扰的特点；（3）基于MATLAB的信号处理方法对传感元件模拟输出信号进行分析。

通过设计相关的实验方法对传感元件的正交异性特性进行检测，并把所得信号和数值模拟结果进行分析比较，在验证理论方法可行的基础上，对影响传感元件传感特性的因素作了详细的研究；并同时研究了OPCM传感元件的加工制作工艺。最后对该传感元件的应用前景作了阐述。

9. 期刊论文 刘怀喜. 马润香. 张恒 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 -材料导报

2004, 18 (6)

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。

10. 期刊论文 崔建伟. 王旭. 张同华. 晏雄. CUI Jian-wei. WANG Xu. ZANG Tong-hua. YAN Xiong UHMWPE/LDPE复合材料拉伸破坏的声发射特性研究(II) -玻璃钢/复合材料2006, 22 (3)

本文续“UHMWPE/LDPE复合材料拉伸破坏的声发射特性研究(I)”，进一步研究了UHMWPE/LDPE复合材料拉伸破坏的声发射特性，具体研究了[0°]、[90°]在拉伸破坏过程中声发射参数特征，并对拉伸破坏机理进行了初步的研究。

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_zsjjs200301009.aspx

下载时间: 2010年5月27日