

西北工业大学

---

硕士学位论文

---

声发射技术在编织C/SiC复合材料损伤检测中的应用

---

姓名：潘文革

---

申请学位级别：硕士

---

专业：固体力学

---

指导教师：矫桂琼

---

20030301

## 摘 要

本文利用声发射技术,对 C/SiC 复合材料在拉伸过程中损伤发展、演化进行了实验研究。实验采集了单纤维束、二维编织、三维编织三种 C/SiC 复合材料的声发射相关特征参数和波形。运用多参数分析法,分析了 C/SiC 复合材料拉伸损伤的声发射特性,宏观上揭示了材料拉伸损伤的发展、演化过程和规律。通过声发射波形信号的频谱分析,研究了 C/SiC 复合材料拉伸损伤的细观机理。利用声发射累积相对能量表征材料损伤,建立损伤模型,给出材料破坏判据。

实验研究表明:

单纤维束、二维编织和三维编织 C/SiC 复合材料由于结构形式不同,损伤机理和发展过程不同,表现出的声发射参量的特性也不同;试件初始状态和断口的显微观察证实了该推断。声发射累积相对能量和 C/SiC 复合材料的损伤演化有较好的相关性。尤其对三维编织 C/SiC 复合材料,损伤可分为两个主要阶段,损伤初始阶段和损伤严重阶段。C/SiC 复合材料的频谱分析,给出了材料不同类型损伤的频率特性,揭示了材料每一时刻的损伤基本上是由不同类型损伤的组合,很少有单一损伤独立发生。利用声发射累积相对能量定义损伤变量,通过单纤维束模型、平均杆元模型以及体积平均化模型初步建立了纤维束、二维编织、三维编织 C/SiC 复合材料拉伸损伤演化方程。通过弹性模量衰减与应力变化的关系,确定了二维编织、三维编织 C/SiC 复合材料拉伸损伤的修正系数,初步定量给出了该材料拉伸损伤演化方程的经验公式并通过实验验证。

关键词:声发射技术(AE)、编织 C/SiC 复合材料、频谱分析、损伤演化

# APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE IN DAMAGE INSPECTION OF BRAIDED C/SiC COMPOSITE

## Abstract

The acoustic emission technology (AE) was used to investigate the damage mechanism of C/SiC composite under tensile tests. The tensile and load /unload /reload tensile tests of single fiber bundle, 2-D woven and 3-D braided C/SiC composites were performed. AE characteristic parameters and waveforms were collected over the entire stress/strain curve. AE characteristic of C/SiC composite damage evolution was analyzed using multi-parameters analytical method. features of C/SiC composite damage evolution were also found. Spectrum analysis was performed to determine the micro-mechanism of damage evolution of C/SiC composites. A damage model was applied to describe the C/SiC composite damage with AE relative energy, and a damage criterion was present for the C/SiCs.

Experimental results indicate that:

The AE characters of single bundle, 2-D woven and 3-D braided C/SiC composite are different because of their different structures, damage mechanisms and developing progress, which can be verified by micrographic examination on specimens' initial state and fractography.

AE accumulative relative energy is related to the damage evolution of C/SiC composites closely. Especially for 3-D braided composites. Damage process includes two main stages: damage initiate period and badly damage period. The spectrum analysis shows different frequency characteristics for different damage patterns of C/SiC composite. And through all the damage process, many damage modes co-exist, never in a pure mode.. Damage evolution equations in the tensile process were formulated, using AE accumulative relative energy as a damage variable, based on single bundle model, average rod model and volume-averaged model, for single bundle, 2-D woven and 3-D braided C/SiC composites respectively. Modification factors were given according to the relationship between elastic modulus reduction and tensile stress. The empirical elementarily formulas of damage evolution in tensile loading were given quantitatively, and verified by experiments.

**Key words:** acoustic emission (AE), braided C/SiC composite, spectrum analysis, damage evolution

## 第一章 概 述

### 第一节 研究的工程背景

现代复合材料自问世以来,由于它具有重量轻、高比刚度、比强度、性能可设计等优良性能,在各门例如航空、宇航、汽车、造船、建筑、桥梁、车辆、化工设备、医学以及运动器材等方面的应用愈来愈广泛,在现代材料体系中占有越来越重要的地位<sup>[1]</sup>。编织复合材料是编织技术和现代复合材料技术结合的产物,它与普通复合材料具有较大的区别。普通复合材料是通过把纤维束按一定的角度和一定的顺序进行铺成或缠绕而制成的,基体材料和纤维材料于铺层或缠绕同时组合而成,形成层状结构,因此也称层合(压)复合材料。而编织复合材料是利用编织技术,首先以纤维束造成所需结构的形状,然后进行固化直接形成复合材料结构。正是这种工艺的变革,消除了层板复合材料因层的薄弱所带的诸多弱点,如分层、开裂和损伤容限低等,使三维编织复合材料与普通复合材料相比具有了许多突出的优点。

在20世纪20年代,波音公司(Boeing Aircraft Co.)就使用编织结构来增强飞机机翼。50年代,美国通用电气公司(General Electric)也选择编织结构作为碳/碳复合材料鼻锥的增强形式。70年代初,在缠绕工艺的影响下,二维编织工艺得到了迅速的发展,并为制造复杂形状复合材料开辟了一条成功之路。80年代,通过编织界与复合材料界的合作,编织技术由二维发展到三维,从而为制造高性能复合材料提供了新的途径。三维编织结构复合材料由于其增强体为三维整体结构,大大提高了其厚度方向的强度和抗冲击损伤的性能,因而倍受重视并获得迅速发展。创造不补充加油而连续环球飞行一周记录的“航行者”(Voyager)飞机与美国比奇公司的“星舟”(Starship)1号公务机,都采用一些编织结构件。英国道蒂公司的复合材料螺旋桨,其桨叶为编织结构,获得1991年英国女王技术成果大奖。美国航空航天局(NASA)也大力开展三维编织结构复合材料研究工作,其中包括三维编织技术、自动化加工和开发热塑性树脂等重要内容。正是编织结构优越的力学性能,特别是不同的织造技术所形成的纤维束的微观构型,适应了十分广泛的载荷环境作用下的工程结构的要求,广泛应用于军用、民用飞机上<sup>[2]</sup>。

编织C/SiC复合材料是一种先进的复合材料,它具有较好的常温、高温力学性能和理化性能,特别是高温力学性能和理化性能。目前许多国家正抓紧对其研制开发,以提高其应用水平。在美国等西方发达国家,编织C/SiC结构复合材料已在航空航天领域得到广泛应用,

高温、烧蚀和高速冲刷的导弹头锥、火箭发动机喉衬、裙、尾喷管等大多采用编织 C/SiC 结构<sup>[2, 3, 4]</sup>。

我国的编织 C/SiC 复合材料应用研究起步比较晚,但经过大跨度的发展,已取得一定的效果。然而编织 C/SiC 复合材料的力学性能研究尚处于起步阶段,这主要是由于陶瓷基复合材料组织的多样性、三维编织结构的复杂性以及检测手段的局限性等因素的影响。对于采用 CVI、CVD 工艺制备的 C/SiC 复合材料,由于材料本身以及编织结构的特性,材料制备后其表面和内部不可避免存在微裂纹和孔洞<sup>[5, 6]</sup>,这给材料的力学行为研究带来了许多困难。目前对这类材料的损伤演化过程及其破坏形式还缺乏有效的检测手段,这主要是由于这类材料的各向异性以及本身存在的微裂纹和小孔洞,一般成像式无损检测手段如 X 射线法、超声波法很难满足要求,另外这类检测手段都无法实现试验过程中实时的动态的损伤检测。检测手段的缺乏制约了这类材料力学行为的研究,材料力学行为研究的滞后,大大限制了材料应用水平的提高。为了进一步推动 C/SiC 编织复合材料应用在我国的发展,提高编织 C/SiC 复合材料在航空航天领域中的应用水平,需要通过某种有效或较为有效的检测手段和方法,了解这类材料在不同应力状态下的损伤演化过程和其破坏形式,为后续力学研究提供实验依据。

本论文选题就是从编织 C/SiC 复合材料力学行为研究的需要出发,考虑这类材料自身特性以及声发射技术优势,利用 MISTRAS-2001 AE SYSTEM 装置对 C/SiC 复合材料的单纤维束、二维编织、三维编织三种试件拉伸实验进行全程动态检测并存储分析,再辅以显微观察等其它检测手段,研究编织 C/SiC 复合材料的损伤演化规律和破坏机理。

## 第二节 声发射技术的发展及应用现状

材料或结构受外力或内力作用产生变形或断裂,以弹性波形式释放应变能的现象称为声发射<sup>[7]</sup>。各种材料声发射的频率范围很宽,从次声频、声频到超声频,所以,声发射也称为应力波发射。声发射是一种常见的物理现象,如果释放的应变能足够大,就产生可以听得见的声音,如在耳边弯曲锡片,就可以听得见劈啪声,这是由于锡受力产生孪生变形而发声。大多数金属材料塑性变形和断裂时也有声发射发生,但声发射信号强度很弱,人耳不能直接听见,需要藉助灵敏的电子仪器才能检测出来。用仪器检测、分析声发射信号和利用声发射信号推断声发射源的技术称为声发射技术。

近年来,声学检测方法有很大的发展,它在检测技术中占有重要地位。声发射检测是声

学检测中的重要方法，它必须由外部条件的作用，使材料或构件发声，如力、温度等因素的作用；另一方面，由于这些因素的作用，使材料内部结构发生变化，如滑移变形、裂纹扩展等，发声是在材料内部结构发生变化过程中产生的，也只有内部结构变化，才能引起能量释放，才能发声。因此，声发射检测是一种动态检测方法，即：使结构和材料内部结构、缺陷或潜在缺陷处于运动变化的过程中进行检测。因此，裂纹等缺陷在检测过程中主动参与检测。如果缺陷在检测过程中没有发生结构或状态的变化，就没有声发射发生，也就无法实现声发射检测。声发射检测过程中的声发射信号是来自缺陷本身，它反映缺陷对外部作用的响应，因此，用声发射法可以判断缺陷的严重性。一个同样大小、同样性质的缺陷，当它所处的位置和所受的应力状态不同时，对结构的损伤程度也不同，所以它的声发射特征也有差别。声发射检测的这一特点是其区别超声、X射线、涡流等其它无损检测方法。

声发射技术在地震学方的应用无疑是最早的例子之一，但是，声发射技术作为一门技术和有科学价值的研究工作是德国凯塞<sup>[8]</sup> (Kaiser) 在 1950~1953 年开始进行的。他观察到金属锌、铜、铝、铅都有声发射现象，并发现了声发射的不可逆效应，或称凯塞效应。五十年代后期，声发射技术研究的重点转到美国，六十年代在美国形成研究高潮。美国的 B. H. 斯科菲尔德<sup>[9]</sup> (Schofield) 对声发射现象进行了广泛的研究，认为声发射来自材料内部的机制，表面状态对声发射有一定影响，他还注意到连续型信号对应变速率是敏感的，它来源于位错钉扎和交叉滑移；突发型信号与堆垛层错的形成和机械孪晶的快速变形机构有关。Tatro<sup>[10]</sup> 从 1956 年开始寻找以声学技术检测金属滑移变形的可能性，它对铝单晶体的研究表明，声发射活动性与位错的塞积和解脱有关；试件表面的阳极化薄膜能改变声发射的频谱，而且成为位错运动和变形带形成的障碍。Dunegan 对声发射技术的研究也做过开拓工作，在他的研究之前，声发射检测多数都在声频范围进行，在排除噪声干扰方面遇到了困难。Dunegan<sup>[11]</sup> 等人把实验频率提高到 100kHz~1MHz，这是实验技术的重要进展，这种进展为声发射技术从实验室的材料研究阶段走向在生产现场用于监视大型构件的结构完整性创造了条件。1964 年，美国通用动力公司把声发射技术用于北极星导弹壳体的水压试验，这是声发射技术用于评价大型构件结构完整性的第一个例子，它标志着声发射技术开始进入生产现场应用的新阶段。在随后的几十年里，随着电子技术和计算机技术的发展，以及声发射技术在理论、试验方面研究的进一步加深，商用声发射仪也由早期的单通道模拟声发射仪发展到今天的多通道全数字声发射仪，声发射技术应用范围也不断扩大<sup>[12]</sup>。

我国从 1973 年起开始有关声发射技术的研究工作，近三十年来，我国声发射技术在研究、应用的深度和广度上都有较大的发展。从研究的范围来看，以从最初的压力容器、金属

疲劳和断裂力学应用等,发展目前的金属材料、复合材料、岩石和磁声发射等领域,并已覆盖航空、航天、铁路运输、工业制造过程监测、建筑、石油化工、电力等几乎所有工业领域。已研制出单通道、八通道、三十二通道等各种型号的声发射仪器<sup>[13-14]</sup>。

### 第三节 声发射技术在材料检测中应用现状

目前国内外研究者对声发射技术在材料损伤检测方面的应用作了大量工作,涉及的材料几乎涵盖了所有工程材料,从岩石、混凝土到金属、非金属以及复合材料、生物材料<sup>[15-16]</sup>。由于复合材料组份和结构形式的多样性以及应力状态的不同,其损伤机理和破坏模式也各不相同,对此类材料的损伤描述也多采用不同的 AE 参数进行多参数综合分析法。复合材料损伤模式主要有:基体开裂和扩展、纤维与基体界面剥离、纤维和纤维束的断裂、纤维拔出。对复合材料损伤演化和破坏形式的检测,主要就是选取合适 AE 参数或 AE 波形特征描述不同的损伤模式,建立损伤演化方程,揭示材料损伤演化规律。Jonathan Awerbuch<sup>[17]</sup>对碳纤维增强树脂基复合材料层合板损伤进行了 AE 研究,试验采用缺口试样和含冲击损伤的试样,通过对试样在疲劳载荷作用下的 AE 信号的分析,利用 AE 事件振幅值判断基体摩擦和裂纹扩展。王健<sup>[18]</sup>等人对 C/E 复合材料声发射信号进行了小波分析,通过对比三点弯曲状态下不同损伤模式 AE 波形和 FFT 波形,给出纤维断裂、基材开裂、界面分离、分层、界面摩擦、劈裂损伤的 AE 参数(幅度、计数、上升时间、持续时间、频带)特征。M. Surgeon<sup>[19]</sup>等人对 SiC/BMAS 复合材料层合板在单向拉伸作用下的损伤作了 AE 研究,利用 AE 事件数、幅值、能量以及持续时间等参数描述了不同铺层试件损伤演化模式和破坏机理。Gregory N. Morscher<sup>[20]</sup>对二维编织 SiC/SiC 复合材料进行了单向拉伸、卸载、再加载试验。试验过程采用双探头线定位全程动态 AE 检测,给出不同载荷下试件损伤 AE 波形及其 FFT 变换,通过 AE 波形 FFT 描述不同损伤模式,并且探讨了损伤对材料弹性模量和声波传播速度影响,指出了一些 AE 参数对 SiC/SiC 复合材料检测的不足。杜伟坊<sup>[21]</sup>等利用声发射计数率对陶瓷材料的断裂进行了预测,建立了材料损伤模型,给出了材料断裂预测的经验公式。W. A. Green<sup>[22]</sup>等研究了弹性波在正交铺层中传播的特性,给出了声波传播衰减和反射、折射方程。Y. M. LIU<sup>[23]</sup>等对 0°/90° 铺层陶瓷基复合材料在单向静态拉伸状态下的各向异性损伤演化进行了研究,利用声发射事件数结合显微观察描述试件损伤演化过程,给出了材料三个方向的模量下降与声波传播速度的关系以及裂纹密度与应力的关系,利用模量衰减定义损伤变量,建立损伤演化模型给出经验公式。Dae-Un Sung<sup>[24]</sup>等利用声发射波形对树脂基层合板进

行了实验研究,给出了不同冲击损伤的声发射波形形态。Mikael Johnson<sup>[25]</sup>等利用声发射事件数和波形特征对复合材料层合板拉伸损伤进行了实验研究,利用声发射累积事件数和波形形态描述了损伤发展和不同类型的损伤。J. Bohse<sup>[26]</sup>利用声发射幅值、相对能量、事件数等参数对 HDPE/PP 复合材料弯曲、纤维束 (glass/epoxy, carbon/epoxy glass/polycarbonate), 拉伸的声发射特性进行了研究,给出了损伤的声发射特性。

#### 第四节 本文工作

##### 研究内容:

本论文是基于工程应用背景,将主要工作围绕如何应用声发射技术描述编织 C/SiC 复合材料拉伸损伤演化过程和破坏形式问题而展开,其主要研究内容包括:

- (1) 确定试件形状、加载方式、AE 检测方式以及检测区域大小。
- (2) 研究试件形状和试件材料对弹性波传播的影响,确定 AE 装置的系统参数。
- (3) 通过试验确定描述损伤的声发射特征参数。
- (4) 通过纤维束、二维编织、三维编织 C/SiC 复合材料拉伸实验,研究纤维束、二维编织、三维编织 C/SiC 复合材料拉伸声发射特性,确定其损伤演化规律。
- (5) 断口观察分析。
- (6) 二维编织、三维编织 C/SiC 复合材料声发射信号的频谱分析。
- (7) 建立纤维束、二维编织、三维编织 C/SiC 复合材料拉伸损伤模型,利用声发射特征参数表征 C/SiC 复合材料拉伸损伤。

##### 研究方法:

C/SiC 三维编织复合材料损伤模式主要有:基体开裂和扩展、纤维与基体界面开裂、纤维和纤维束的断裂、纤维拔出。本论文将通过实验分析对比纤维束、二维编织、三维编织 C/SiC 复合材料拉伸实验声发射各参数历程图,筛选出适合反映材料损伤变化的声发射特征参数,结合多参数历程图分析法,揭示 C/SiC 复合材料宏观拉伸损伤演化过程和发展规律;通过 C/SiC 复合材料拉伸声发射信号的频谱分析,确定不同类型损伤的频谱特性,在细观上分析研究 C/SiC 复合材料拉伸损伤机理和演化,辅以显微观察加以验证。在上述研究基础上,选取合适的声发射特征参数描述材料损伤,定义损伤变量,构造简单的材料损伤模型,结合有关损伤理论初步给出材料的损伤演化方程。

## 第二章 声发射技术与损伤检测试验

### 第一节 声发射技术的理论基础

声发射技术在材料检测中的应用,实际上就是声发射源发出的信号经介质传播后到达换能器,由换能器接收,输出电信号,根据这些电信号对声发射源做出正确的解释和描述。因此,必须了解声发射源产生条件以及声波在介质中传播规律等。这是本节的主要内容。

#### 一、 声发射产生的条件

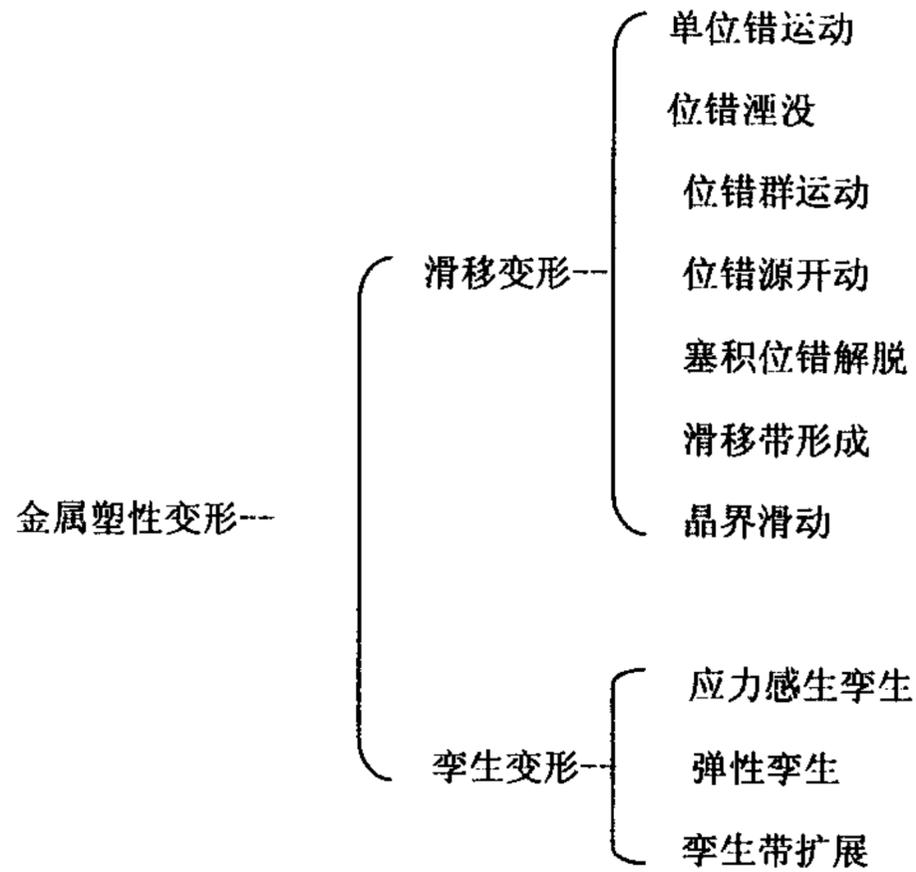
在固体材料中,声发射的产生是材料局部区域快速卸载使弹性能得到释放的结果。材料局部区域快速卸载相当于在该点加了一个扰动,扰动在弹性材料中传播产生波动,简称弹性波。实际的物体是具有一定的尺寸和表面的,弹性波到达表面,导致物体形状的变化表现为振动,换能器接收此振动转换成电信号输出。从物体振动的条件分析我们可以得到以下结论:

声发射源快速卸载的时间决定声发射信号的频率,卸载时间越短,能量释放速度越快,声发射信号的频率扩展到更高的频率。能量释放的速度取决于声发射源的机构。

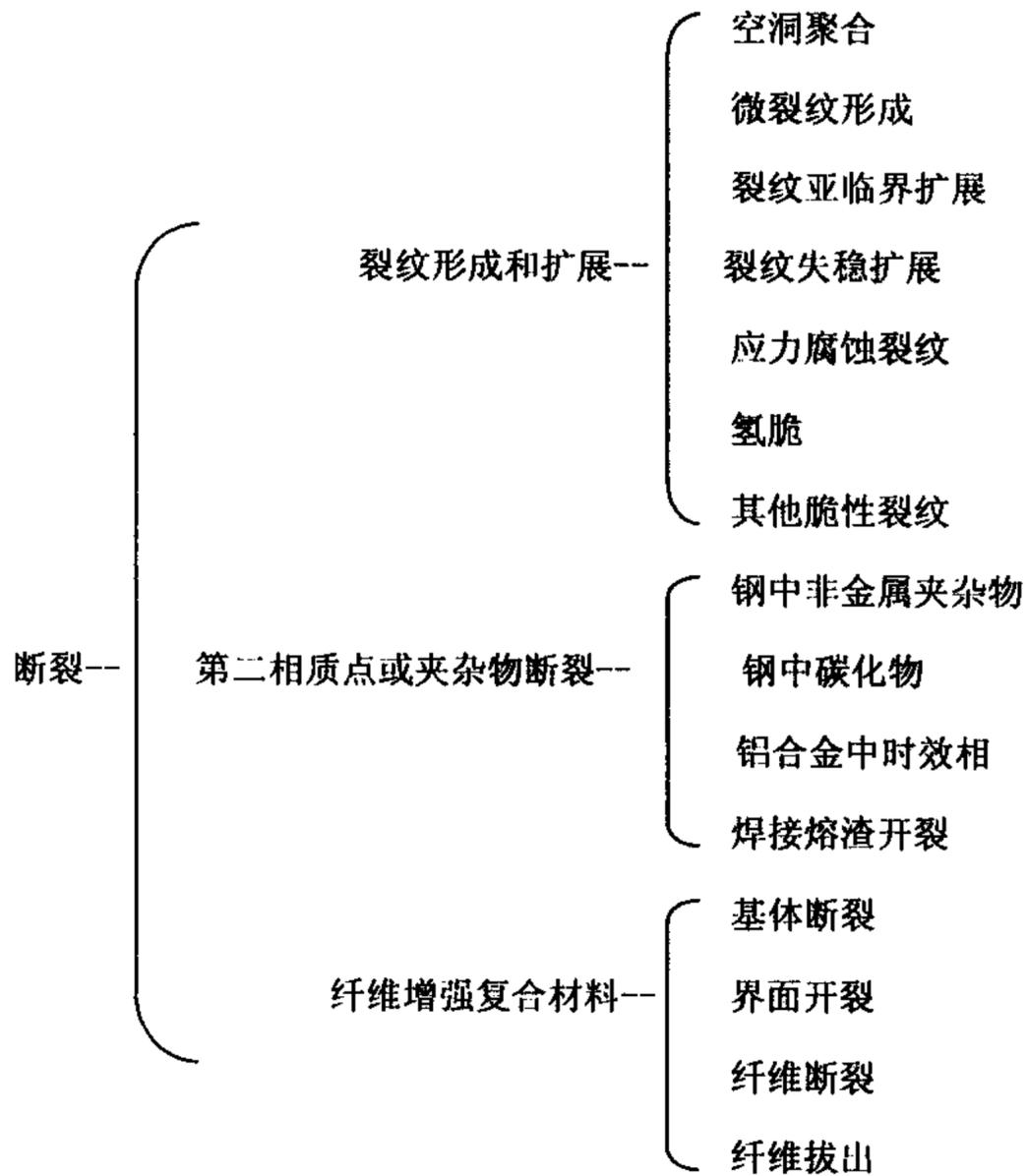
当材料或结构受外力或内力作用时,由于其微观结构的不均匀,内部缺陷的存在,导致了局部应力集中,造成不均匀的应力分布。当这种不稳定应力分布状态下的应变能积累到一定程度时,不稳定的高能状态一定要向稳定的低能状态过渡,这种过渡是以塑性变形、快速相变、裂纹的产生、裂纹发展直至断裂等形式来完成。在此过程中,应变能被释放,其中一部分是以应力波的形式快速释放出来的弹性能产生声发射。根据声发射信号的特点,可以把声发射信号分为突发型和连续型两种。连续型信号由一系列低幅值和连续信号组成,这种信号对应变速率敏感,主要与材料的位错和交叉滑移等塑性变形有关。突发型信号是由高幅值的、不连续、持续时间为微秒级的信号组成,主要与材料的堆垛层错的形成和机械孪晶以及裂纹形成、扩展和断裂过程有关。

二、工程材料声发射源<sup>[27]</sup>

金属塑性变形:



断 裂:



相 变:

相 变—

- 马氏体相变
- 贝氏体相变
- 共晶反应
- 凝固和熔化

其它:磁效应、表面效应。

### 三、 弹性波的传播

声发射源的机理十分复杂,所以,声发射波传播的许多细节还难以准确地分析,我们可按弹性波的传播规律处理声发射波。

不改变波形的纵波、横波只在无限、各向同性、均质的理想弹性介质中存在。在这样的非频散介质中,脉冲波形不在传播过程中改变。然而在实际结构中,波的传播受到下列诸因素的影响<sup>[28]</sup>:

1. 固体表面。弹性波在表面形成反射、透射并可形成表面波、板波(在介质分界面上产生的波型转换)。
2. 固体中不同介质的界面。弹性波在此发生反射、透射并可形成表面波、板波(在介质分界面上产生的波型转换)。
3. 固体中孔洞、微裂纹、夹杂等不规则物质。它们使波发生散射。
4. 固体各向异性。由于在传播方向上波速的差异,使波阵面变形,例如使球形变为椭圆形。
5. 固体非均质性。它使波阵面畸变。
6. 固体的非线性弹性状态。表现在频散与阻尼两个方面。

在有限截面的固体中弹性波的实际传播路径是很难跟踪的,但可以指出能量传输的总方向是在与边界面平行方向,我们说的波在波导中传播。声发射波的传播规律与固体介质的弹性性质密切相关。下面简单介绍一下弹性波在理想弹性各向同性材料中传播的结论。

#### a) 固体中的纵波和横波

根据弹性力学知识,我们知道固体各向同性弹性介质振动位移的波动方程式<sup>[29]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \end{aligned} \right\} \quad (2-1-1)$$

式中  $\Delta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$  ;  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  。

若以向量表示,则有

$$\left. \begin{aligned} \nabla = \text{divs}, \mathbf{s} = iu + jv + kw \\ \rho \frac{\partial^2 \mathbf{s}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \text{grad}(\text{divs}) + \mu \nabla^2 \mathbf{s} \end{aligned} \right\} \quad (2-1-2)$$

式(2-1-1)和式(2-1-2)即为介质中质点振动状态传播的波动方程。由式(2-1-1)解出位移分量函数  $u(x, y, z, t)$ 、 $v(x, y, z, t)$  和  $w(x, y, z, t)$ ，也就确定了介质中各点振动位移的瞬时值。

根据波动方程式(2-1-1)，可以得出固体弹性介质中两种不同类型的波动方程。

首先，把式(2-1-1)中第一式对  $x$  求微分，第二式对  $y$  求微分，第三式对  $z$  求微分，然后三式相加，得到

$$\rho \frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla^2 \Delta + \mu \nabla^2 \Delta \quad (2-1-3)$$

或 
$$\frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} = \frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho} \nabla^2 \Delta = V^2 \nabla^2 \Delta$$

这里， $\Delta$  是体积的相对变形，即在固体弹性介质主要是变形  $\Delta$  以波动形式传播，称为弹性介质中的压缩波，其传播速度

$$V = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho} \text{ 或 } V = \sqrt{(k + \frac{4}{3}\mu)/\rho} \quad (2-1-4)$$

式中  $k$  为体积弹性模量。

特殊情况，令  $u = u(x, t)$ ， $v = w = 0$ ，即考虑一维空间的纯压缩量。设质点只有  $X$  方向振动位移，由此  $\Delta = \partial u / \partial x$ ，由式(3)可得：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2-1-5)$$

即  $u = u(x, t)$  是以波速  $V = \sqrt{(k + \frac{4}{3}\mu)/\rho}$  沿  $X$  方向传播的平面波。由于  $u = u(x, t)$  是质点沿  $X$  方向的振动位移，所以，质点振动位移和波的传播方向一致，压缩波即为纵波。图 2-1a 为固体中纵波传播的示意图。

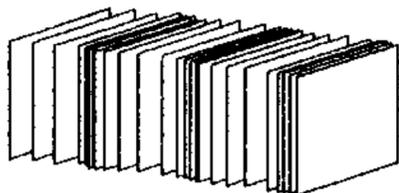


图 2-1a

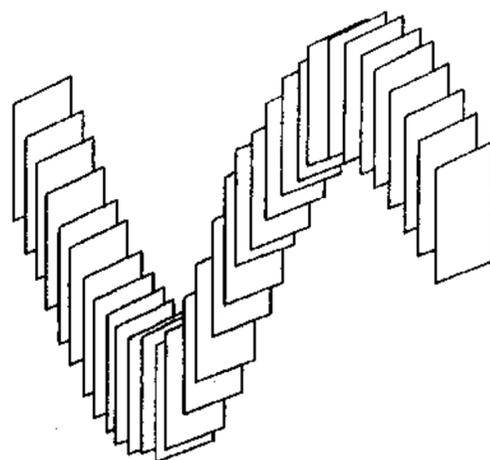


图 2-1b

设  $\Delta = 0$ , 即介质体积没有变化, 亦即没有压缩变形, 属纯剪切变形。由式 (2-1-1) 得:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 u \quad \text{或} \quad \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = b^2 \nabla^2 u, \quad b = \sqrt{\mu/\rho} \quad (2-1-6)$$

以及

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = b^2 \nabla^2 v \quad (2-1-6a)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = b^2 \nabla^2 w \quad (2-1-6b)$$

式 (2-1-6) 表明弹性介质中还存在着以波速  $V = \sqrt{\mu/\rho}$  传播的波。波速决定于切变模量, 因此, 反映了纯切变波的传播。

特殊情况, 令  $v(x, t), u=w=0$ , 即只考虑 Y 方向的位移不同而产生的纯剪切变形。将此式代入式 (2-1-6a), 并且式 (4) 和式 (4b) 皆为零, 得:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = V^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}, \quad x = w = 0$$

由此可见, Y 方向的位移  $v(x, t)$  以波的形式沿 X 方向传播, 即切变波, 也就是横波。

图 2-1b 为纯切变波传播示意图。

一般情况, 固体中会同时出现纵波和横波。质点位移  $u, v, w$  都是  $(x, t)$  的函数, 于是形成沿 X 方向振动并沿 X 方向传播的压缩波和在 Y、Z 方向垂直振动沿 X 方向传播的切变波, 合成所谓“纵横波”。

引入两个位移势函数  $\phi$  和  $\psi$ , 就可以把用位移表示的波动方程式变成以  $\phi$  和  $\psi$  换上表示的波动方程式。于是可用位移势的波函数表示固体中的弹性波,  $\phi$  函数表示纵波位移势, 其传播速度为  $V_L$ , 而  $\psi$  函数表示横波位移势, 其波速为  $V_S$ 。

在一般情况下，向量场可以表示成标量梯度和向量旋度和的形式。令位移向量

$$\begin{aligned} \mathbf{s} &= \text{grad } \Phi + \text{rot } \Psi \\ (\mathbf{s} &= \nabla \Phi + \nabla \times \Psi) \end{aligned}$$

代入 (2-1-2) 式，可以把位移的方程式变成两个势的方程式

$$\rho \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \Phi \quad (2-1-7)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = -\mu \nabla \times (\nabla \times \Psi) \quad (2-1-8)$$

对于平面问题，位移只在  $xoz$  平面中，则只有  $y$  轴方向旋量  $\Psi_y$ ，即

$$\Psi = \mathbf{j} \Psi_y$$

于是得到平面问题的两个势函数的波动方程式

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = V_L^2 \nabla^2 \Phi, \quad V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2-1-8)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial t^2} = V_s^2 \nabla^2 \Psi_y, \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2-1-9)$$

$\Phi(x, z, t)$  式压缩波的位移势函数，其传播速度  $V_L = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$ ； $\Psi(x, z, t)$  是切变波的位移势函数，其传播速度为  $V_s = \sqrt{\mu/\rho}$ 。

### b) 波动方程的解

解波动方程通常是指找到满足这个方程的特殊的波动，或者求出波动声源传播形式的数学表达式。作为特殊波动的解有平面波、柱面波和球面波等。

#### 1. 平面波的解

研究固体中的纵波，在一维情况下有（横波也一样）：

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = \frac{1}{V_L^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (2-1-10)$$

其解为  $\Phi = f(x - V_L t) + f(x + V_L t)$

右边第一项是沿  $x$  正方向传播的波，第二项是反向传播的波。 $f$  任意函数，考虑正弦波时，可用下式表达。

$$\Phi = A \sin(kx - \omega t)$$

$$\text{或指数形式 } \Phi_1 = Ae^{j(kx - \omega t)} \quad (2-1-11)$$

在二维空间, 倾斜于坐标轴传播的波如下:

$$\Phi_2 = Ae^{-j\omega t} e^{jk(x \cos \theta + y \sin \theta)} \quad (2-1-12)$$

在三维空间, 倾斜于坐标轴传播的波如下:

$$\Phi_2 = Ae^{-j\omega t} e^{jk(x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma)} \quad (2-1-13)$$

## 2. 柱面波的解

将(2-1-8)式做柱坐标变换

$$x = r \cos \theta, \quad y = r \sin \theta$$

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \frac{1}{V_L^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (2-1-14)$$

如果考虑  $Z$  和  $\theta$  方向一样的对称柱面波

$$\frac{\partial^2 \Phi_c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi_c}{\partial r} = \frac{1}{V_L^2} \frac{\partial^2 \Phi_c}{\partial t^2}$$

$$\text{若令 } \Phi_c = \Phi / \sqrt{r}, \quad \text{则} \quad \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} = \frac{1}{V_L^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}$$

$$\text{得} \quad \Phi_c = \frac{A}{\sqrt{r}} \sin(kr - \omega t) \text{ 或 } \Phi_c = \frac{A}{\sqrt{r}} e^{j(kr - \omega t)} \quad (2-1-15)$$

式(2-1-14)的解为

$$\Phi_{cr} = e^{-j\omega t} [CJ_n(k_r r) + DN_n(k_r r)] * [A \cos n\theta + B \sin n\theta] * [Ee^{jk_z z} + Fe^{-jk_z z}] \quad (2-1-16)$$

式中  $k_r = \sqrt{k^2 - k_z^2}$ ;  $k = \frac{\omega}{V}$ ;  $k_z$  ——  $Z$  方向的波动常数;

$J_n$  —— 贝塞耳函数;  $N_n$  —— 诺埃曼函数;  $A, B, C, D, E$  和  $F$  是由初始条件和边界条件决定的常数。

## 3. 球面波的解

将(5a)式做球面坐标变换,

$$x = \rho \sin \alpha \cos \beta, \quad y = \rho \sin \alpha \sin \beta, \quad z = \rho \cos \alpha$$

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \rho^2} + \frac{2}{\rho} \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2 \sin \alpha} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left( \sin \alpha \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2 \sin^2 \alpha} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta^2} = \frac{1}{V_L^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (2-1-17)$$

考虑在  $\alpha$  与  $\beta$  方向为同样对称球面波  $\Phi_s$ ，则

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \rho^2} = \frac{1}{V_L^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}$$

$$\text{所以, } \Phi_s = \frac{A}{\rho} \sin(k\rho - \omega t) \text{ 或 } \Phi_s = \frac{A}{\rho} e^{j(k\rho - \omega t)} \quad (2-1-18)$$

式 (2-1-17) 的一般解为

$$\Phi_{sr} = \sum_{n=0}^{\infty} [c_n j_n(k\rho) + d_n n_n(k\rho)] \left[ a_{n0} P_n(\cos \theta) + \sum_{m=1}^n (a_{nm} \cos m\Phi + b_{nm} \sin m\Phi) P_n^m(\cos \theta) \right] e^{-j\omega t} \quad (2-1-19)$$

### c) 波的衰减

声波在固体中传播时，除由于波前扩展而产生的扩散损失外，也由于内摩擦及组织界面的散射使在规定的方向传播的声能衰减。一般地说，平面波在介质中向 X 方向传播时的衰减可用下列式子表示。

$$P_x = P_0 e^{-ax}$$

式中， $P_0$  为  $x=0$  位置的声压， $P_x$  为传播至 X 距离后的声压， $a$  称为衰减系数。

造成声波在固体中、尤其在金属中衰减的原因很多，主要有散射衰减、粘性衰减、位错运动引起的衰减、铁磁性材料磁畴壁运动引起的衰减、由于存在残余应力和声场紊乱引起的衰减。此外，还有由于与电子的相互作用引起的衰减及其他各种内摩擦（也称内耗）引起的衰减。波在复合材料中的衰减主要是由于散射引起的，高频衰减尤其严重。

## 第二节 声发射信号分析方法

目前声发射信号分析方法可分为两大类<sup>[30, 33]</sup>，一类是声发射信号波形分析法；另一类是声发射信号特征参数分析法。

### 一、声发射信号主要特征参数简介

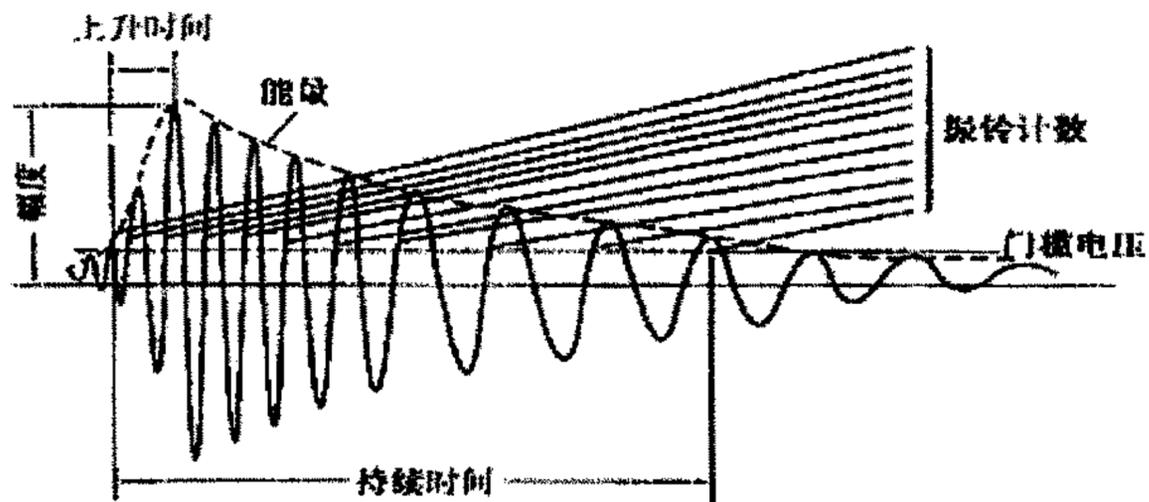


图 2-2 声发射信号简化波形参数的定义

图 2-2 为突发型标准声发射信号简化波形参数的定义<sup>[31]</sup>。由这一模型可得到波击(事件)计数、振铃计数、相对能量、幅度、持续时间、上升时间等参数。对于连续型声发射信号,上述模型中只有振铃计数和相对能量参数可以适用。为了更确切地描述连续型声发射信号的特征,又引入了平均信号电平和有效电压两个参数。表 1 列出了常用声发射特征参数的含义和用途。

表 1 常用声发射特征参数的含义和用途<sup>[32]</sup>

参数	含义	特点和用途
波击 (Hit) 和波击计数	超过声发射门槛并使某一通道获取数据的任何信号称之为一个波击,所测得的波击个数可分为总计数和计数率。	反映声发射活动的总量和频度,常用于声发射活动性评价。
事件 (Event) 计数	产生声发射的一次材料局部变化称之为一个声发射事件,可分为总计数和计数率。一阵列中,一个或几个波击对应一个事件。	反映声发射事件的总量和频度,常用于声发射源活动性和定位集中度评价。
振铃计数	越过门槛信号的振荡次数,可分为总计数和计数率。	信号处理简便,适于两类信号,能粗略反映信号强度和频度,广泛用于声发射活性评价,但受门槛值大小的影响。
信号幅度	信号波形的最大振幅值,通常用 dB 表示(传感器输出 $1\mu\text{V}$ 为 0dB)。	与事件大小有直接关系,不受门槛的影响,直接决定事件的可测性,常用于声发射源类型识别、强度及衰减的测量。
相对能量	信号检波包络线下的面积,可分为总计数和计数率。	反映事件的相对能量或强度,对于门槛、工作频率和传播特性不甚敏感,可取代振铃计数,也用于波源的类型鉴别。
持续时间	信号第一次越过门槛至最终将至门槛所经历的时间间隔,以 $\mu\text{S}$ 表示。	与振铃计数相似,但常用于特殊波源类型和噪音的鉴别。

上升时间	信号第一次越过门槛至最大振幅所经历的时间间隔, 以 $\mu\text{S}$ 表示。	因受传播的影响而物理意义变得不明确, 有时用于机电噪声鉴别。
有效电压值	采样时间内信号的方均根 (RMS) 值, 以 V 表示。	与声发射大小有关, 便于测量不受门槛影响, 适于连续型信号, 主要用于连续型声发射活动性评价。
平均信号电平	采样时间内信号电平的均值, 以 dB 表示。	提供的信息与 RMS 相似, 对幅度动态范围要求高而时间分辨力要求不高的连续型信号尤为有用, 也用于背景噪声水平测量。

## 二、声发射信号波形分析法

波形分析方法包括经典谱分析、现代谱分析方法、小波分析方法、人工神经网络模式识别分析方法。波形分析方法一般要求采用宽频探头采集声发射信号, 这样可以相对不失真地采集和记录整个频率范围内的波形信号。但由于宽频带探头的灵敏的较低, 探头与声发射源的距离较大时不能采集到完整的声发射波形, 而且存贮的数据量较大, 波形分析一般无法实现实时处理。随着计算机软硬件水平的提高, 全波形数字化记录全部声发射信号已成为可能, 再借助现代信号处理手段, 可以对波形信号进行特征提取, 运用神经网络或其它模式识别方法进行声发射源的判别, 做到对缺陷或损伤进行定性分析。

目前大部分波形分析是采用谱分析法, 利用快速傅里叶变换把声发射波形信号从时域变换到频域, 然后对比不同波形的波峰个数以及各波峰的频率值, 再辅以理论分析或其他检测手段对声发射源类型进行判别。由于声发射波形几乎包含了声发射源的所有信息 (虽有畸变但无丢失), 所以利用波形分析法对声发射源类型识别比较准确, 但工作量较大。

## 三、声发射信号特征参数分析法<sup>[34, 35]</sup>

声发射信号特征参数法是指从声发射波形信号中提取具有代表性的量作为特征参数进行分析。这些特征参数相对波形信号来说已经损失了许多声发射源的信息, 但这些参数所需存贮空间较小, 便于计算和后续处理, 这样可以对被检测对象进行动态实时长时间检测。特征参数按用途又可分为: 过程参数和状态参数。

过程参数是对整个声放射过程或某个子过程的描述, 是过程总体行为的反映, 而状态参数反映的则是在声发射过程中某一状态下 (瞬时) 的声放射行为, 是瞬态量。在常用的声放射基本参数中, 累积参数 (如累积事件数、振铃计数和累积能量释放等) 和统计参数 (如幅度

分布、频率分布和持续时间分布等)都等于过程参数。而声发射事件率、振铃计数率和能量释放率等应属于状态参数。

声发射特征参数分析法常采用特征参数随时间变化分析法(经历图分析法)、参数分布分析法和参数关联分析法。除此之外,声发射的凯撒(Kaiser)效应、费利西蒂(Felicity)比和恒载声发射收敛时间以及声发射源定位等参数的分析对材料损伤评价也具有重要意义。

### 第三节 试验材料、试样以及试验仪器设备

#### 一、 试验材料

试件所用材料为编织 C/SiC 复合材料,纤维体积含量 40%,纤维束采用日本东丽 T300 碳纤维束。试件制备采用 CVI 工艺成型。纤维束、SiC 基体主要参数如下:

T300-3K 纤维主要参数<sup>[36]</sup>

材料	纤维根数 $N_f$	纤维直径	密度	次泊松比
T300-3K	3000	7.6( $\mu\text{m}$ )	1.77( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0.25
	纵向拉伸模量	横向拉伸模量	纵向剪切模量	横向剪切模量
	221 (GPa)	13.8 (GPa)	9.0 (GPa)	4.8 (GPa)
	纵向导热系数	横向导热系数	纵向热膨胀系数	横向热膨胀系数
	84 (W/(m·k))	8.4 (W/(m·k))	-0.3 ( $10^{-6}/\text{K}$ )	3.1 ( $10^{-6}/\text{K}$ )
	纵向拉伸强度		横向拉伸强度	
	3528 (MPa)		2070~2877 (MPa)	

SiC 基体室温主要参数

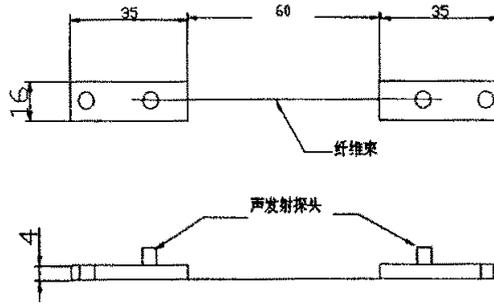
材料	密度	硬度	热膨胀系数
S/SiC	3.21/ $\text{cm}^3$	2500~2540	2.2( $10^{-6}/\text{k}$ )
	弯曲强度(四点)	弹性模量	泊松比
	415~460 (MPa)	466~468 (GPa)	0.21

#### 二、 试件描述

试件有三类:

1. 纤维束拉伸试件:采用 T300-3K 纤维束,气相沉积热解碳 30 小时后沉积 C/SiC。

试件形式、尺寸以及探头安装位置如图所示：



纤维束拉伸试件

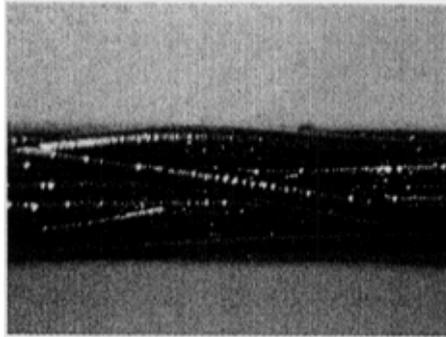
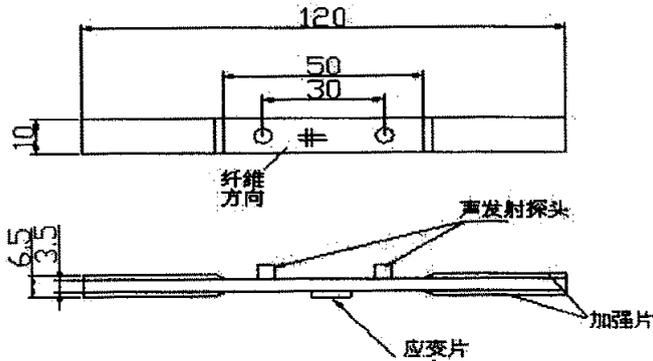


图 2-3-2a 纤维束外观照片

2. 二维编织拉伸试件：试件采用 T300-1K 纤维束，二维编织成  $[0^\circ / 90^\circ]_{60}$ ，然后采用 CVI 工艺沉积热解碳和碳化硅制成试样，试件纤维体积含量 40%。试件形式、尺寸以及探头安装位置如图所示：



二维编织拉伸试件图

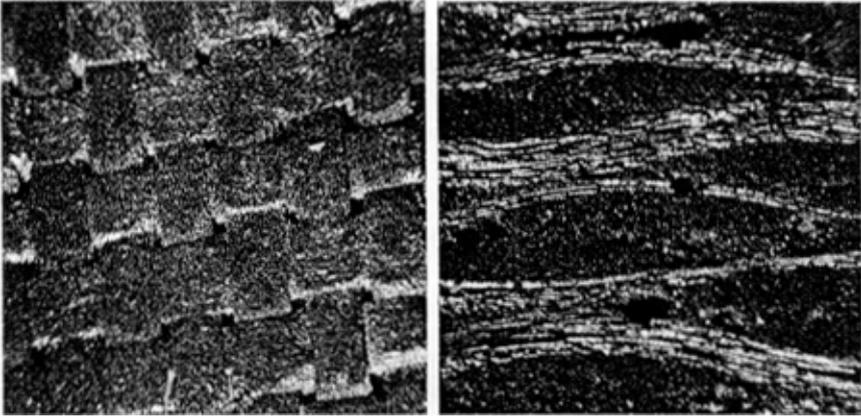
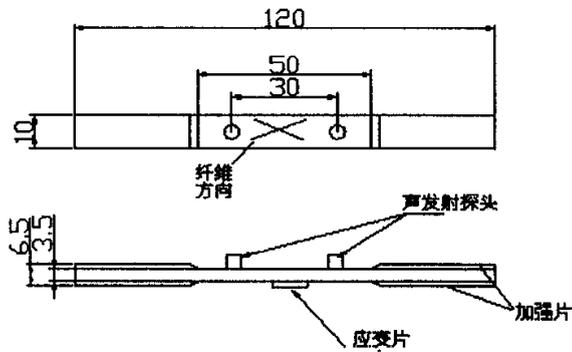


图 2-3-2b 二维编织拉伸试件表面照片 图 2-3-2c 二维编织拉伸试件侧面照片

3. 三维编织拉伸：试件采用 T300-3K 纤维束经三向四步编织而成，然后采用 CVI 工艺沉积热解碳和碳化硅制成试样。试件纤维体积含量 40%，体编织角  $22^\circ$ 。试件形式、尺寸以及探头安装位置如图所示：



三维编织拉伸试件图

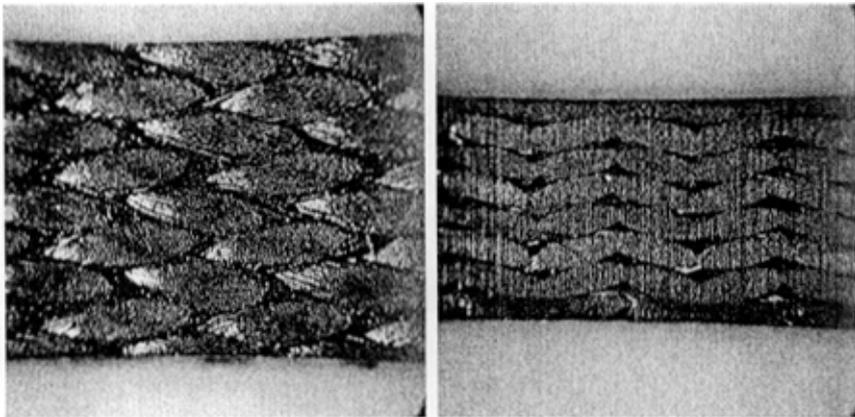


图 2-3-2d 三维编织拉伸试件表面照片 图 2-3-2e 三维编织拉伸试件侧面照片

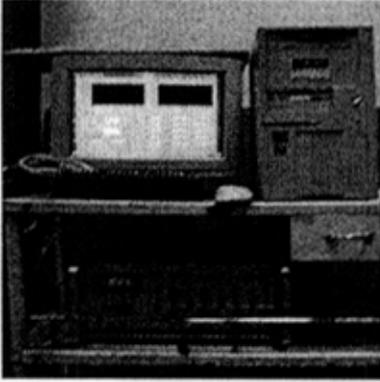
### 三、 试验仪器设备

加载设备：CSS-1101 电子拉力试验机（长春试验机研究所）。

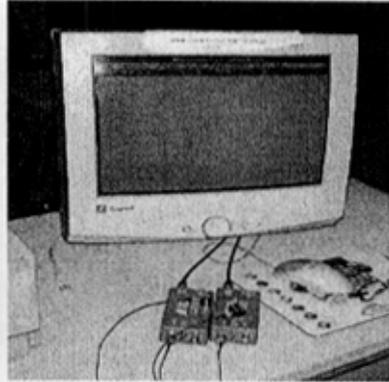
INSTRON1196 电子拉力试验机（美国 INSTRON 公司）。

应变采集设备：JY25 动态应变仪（华东电子仪器厂）+ADLINK 数据采集卡（台湾 ADLINK 公司）。

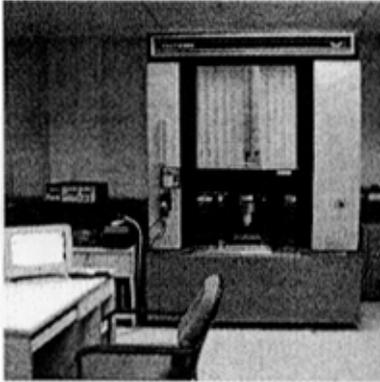
声发射监测设备：MISTRAS-2001 AE SYSTEM 装置（美国 PAC 公司）。



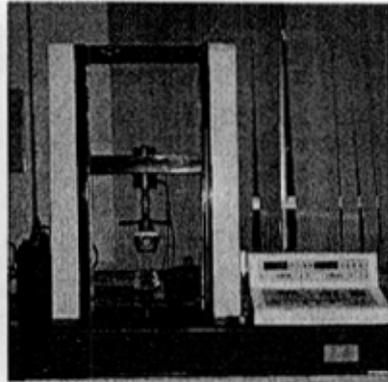
数据采集设备



MISTRAS-2001 AE SYSTEM 装置



INSTRON1196 电子拉力试验机



CSS-1101 电子拉力试验机

## 第四节 试验过程

### 一、 单纤维束拉伸试验

把沉积好的 T300-3K 一束纤维截断成 100mm 长，然后用 502 胶把纤维束粘在夹持片（45 号钢）上，夹持片与试验机夹头夹持连接。在试件两夹持片上用胶带固定两个声发射探头，

探头与夹持片之间用硅油作耦合剂，两探头相距 80mm。加载设备为 CSS-1101 电子拉力试验机，试验采用拉伸位移控制加载，夹头移动速度为 1mm/min，试验过程记录载荷一位移曲线并进行全程双探头声发射监测。

声发射仪器有关参数如下：双探头线定位，定位距离 80mm，探头型号 R15（谐振频率 150KHz）；前置放大器增益 60dB，声发射门限值 30dB；采样频率 4MHz，数据长度 2K，带通滤波 20~1200KHz。

## 二、 二维和三维编织拉伸试验

试件打磨、清洗后用环氧树脂贴加强片（LZ12 铝片），实验前一天用 502 胶贴应变片。

试验加载设备为 INSTRON1196 电子拉力试验机。试验采用拉伸位移控制加载，夹头移动速度为 0.2mm/min，试验过程记录载荷一位移曲线、采集应变片应变并进行全程双探头声发射监测。

试验有两种类型：

1. 试件定速加载直到破坏。
2. 加卸载试验（试件定速到某一应力水平后快速卸载，然后再次加载到更高应力水平，如此反复直至破坏。）

声发射仪器有关参数如下：双探头线定位，定位距离 30mm，探头型号 R15（谐振频率 150KHz）；前置放大器增益 40dB，声发射门限值 45dB；采样频率 4MHz，数据长度 1K，带通滤波 20~1200KHz。

### 第三章 试验结果与分析

#### 第一节 C/SiC 复合材料单纤维束拉伸试验结果及分析

##### 一、 C/SiC 复合材料单纤维束拉伸实验

##### 1. 典型载荷-位移曲线

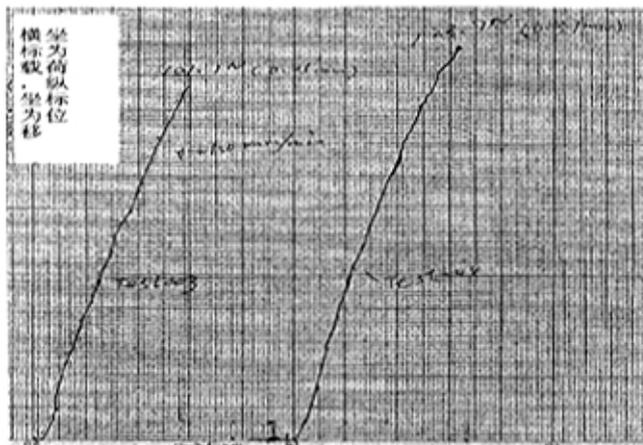


图 3-1-1.1 载荷-位移曲线

##### 二、 声发射典型数据分析

##### 1. 线定位分析

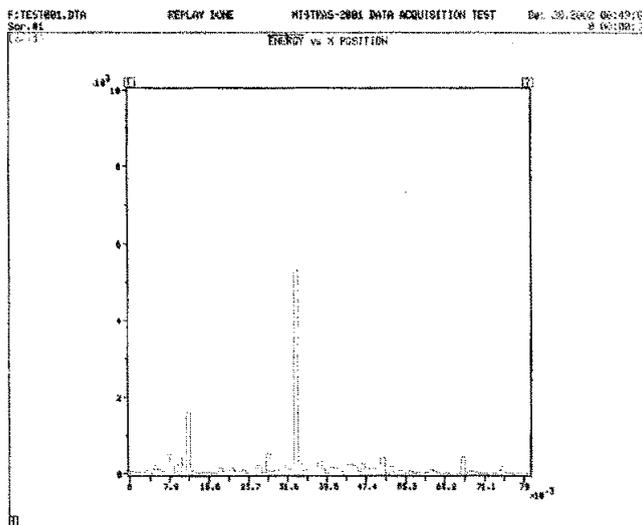


图 3-1-2.1 声发射线定位图

图 3-1-2.1 是典型的 C/SiC 复合材料的单纤维束试件在整个拉伸实验过程的损伤声

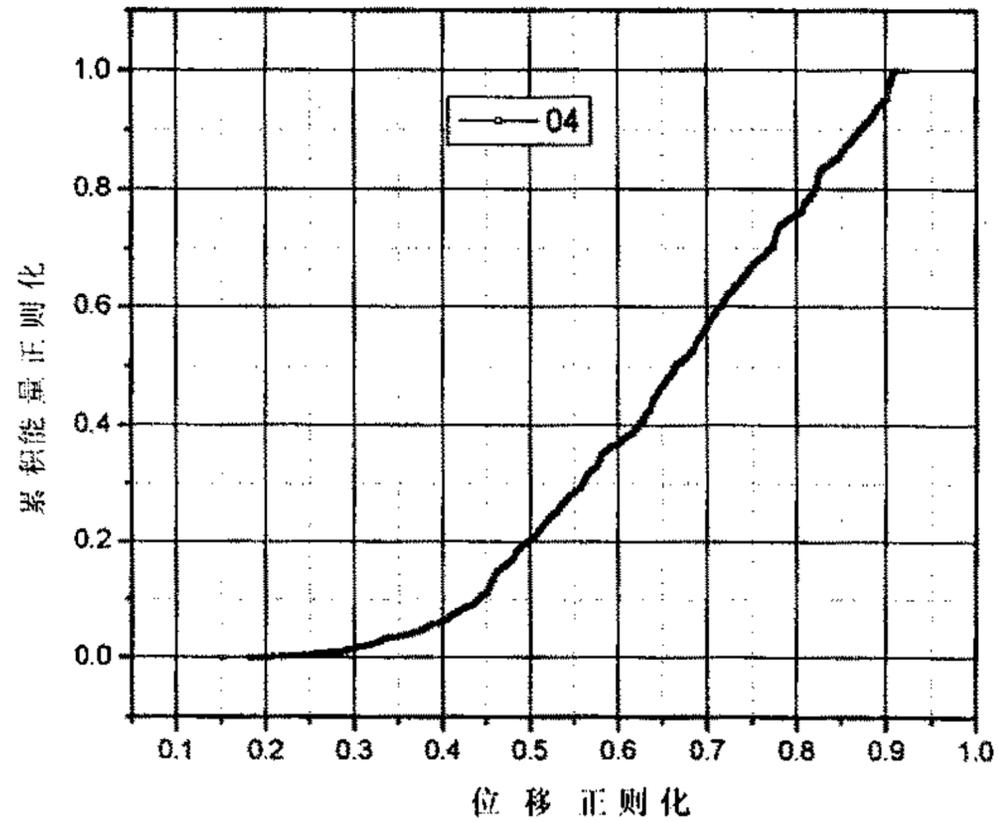


图 3-1-2.3b 正则化的声发射累积相对能量—位移曲线

由图 3-1-1.2a、b 可见，纤维束拉伸声发射累积相对能量与位移变化基本上成分段线性关系（以 50%破坏位移为分界点），50%破坏位移以前为损伤初始阶段，50%破坏位移以后为损伤稳定发展阶段，这时损伤已经加速发展了，约 80%破坏位移处曲线开始出现斜率波动，表明大量纤维开始断裂。

## 第二节 二维编织 C/SiC 复合材料拉伸试验结果及分析

### 一、二维编织拉伸实验

#### 1. 典型应力—应变曲线

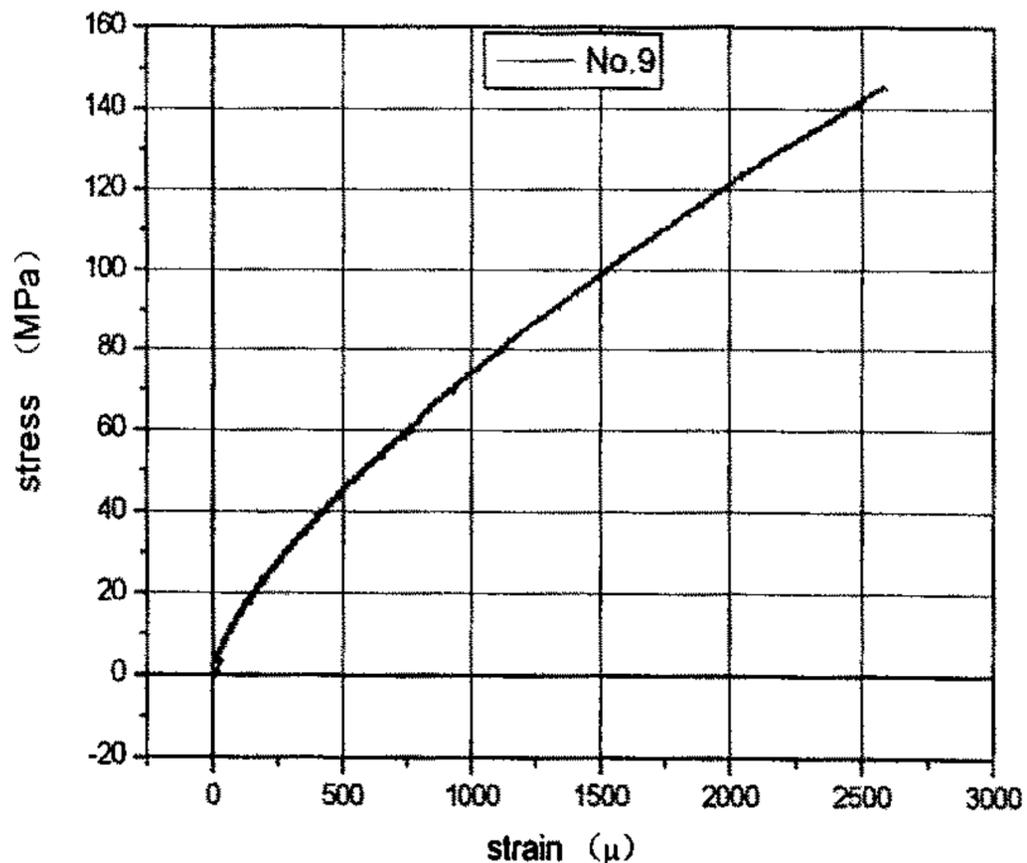


图 3-2-1.1a 应力-应变曲线

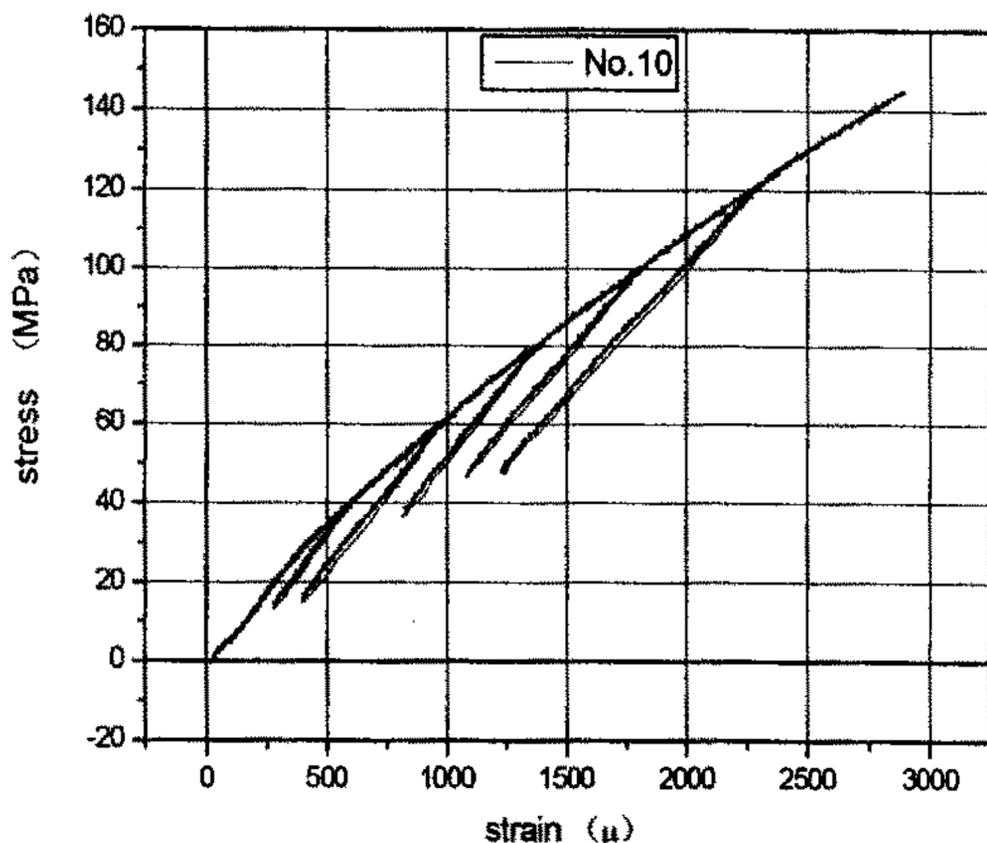


图 3-2-1.1b 不同应力水平卸载的应力-应变曲线

从图 3-2-1.1a、b 中可以看出应力-应变曲线呈现非线性，并且随着载荷的增加，卸载线斜率逐步下降，卸载后存在残余变形并且残余应变随着卸载应力增加而逐步增加。这说明随着载荷的增加，损伤逐步加剧，导致材料弹性模量逐步下降和残余应变逐步增加。

2. 残余变形随着载荷的变化

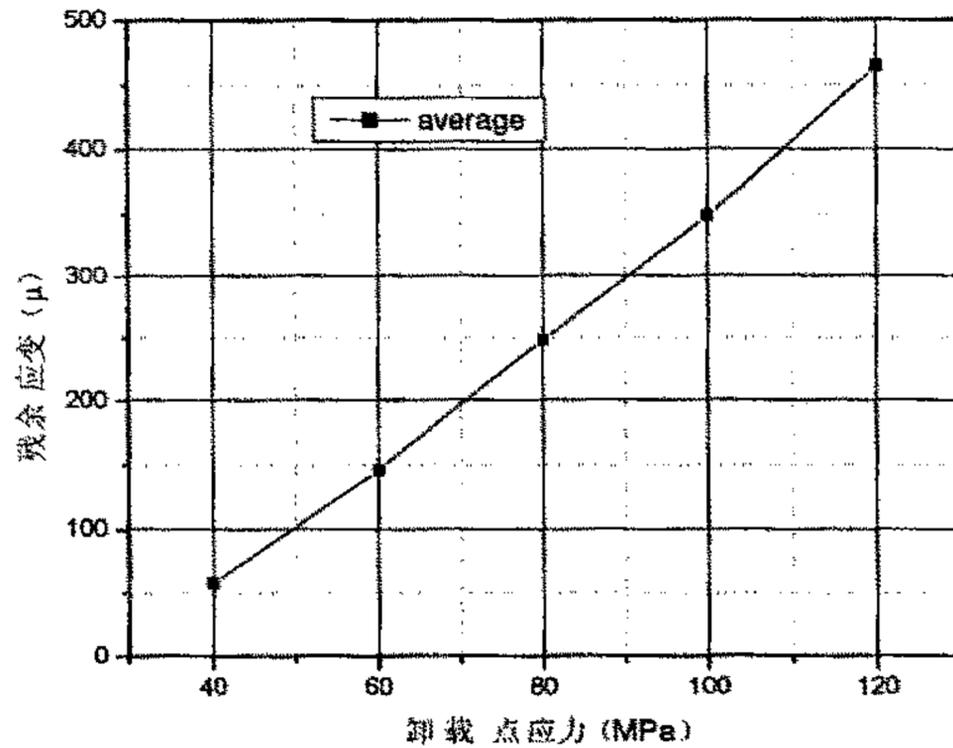


图 3-2-1.2 残余应变随载荷变化曲线

图 3-2-1.2 是不同载荷下卸载后的残余应变变化曲线，从图中可以看出，残余应变随载荷的增加基本上线性增加。

### 3. 卸载弹性模量的变化

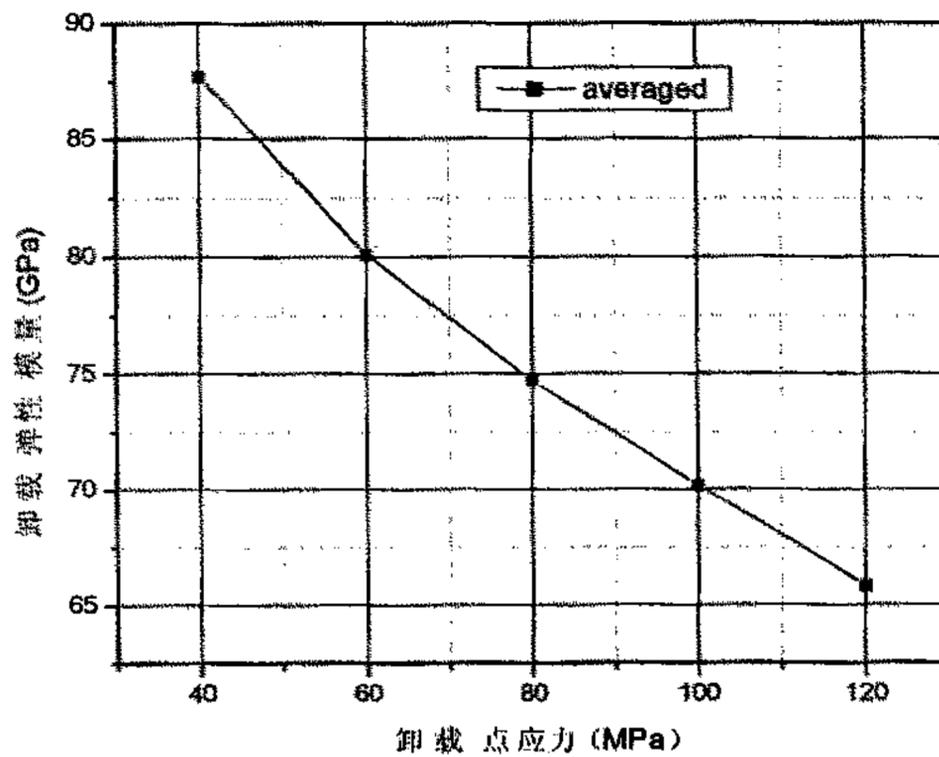


图 3-2-1.3 卸载弹性模量随载荷变化曲线

图 3-2-1.3 是不同载荷下的卸载弹性模量变化曲线，从图中可以看出，材料刚度随载荷的增加基本上线性下降。

## 二、典型声发射数据分析

## 1. 线定位分析

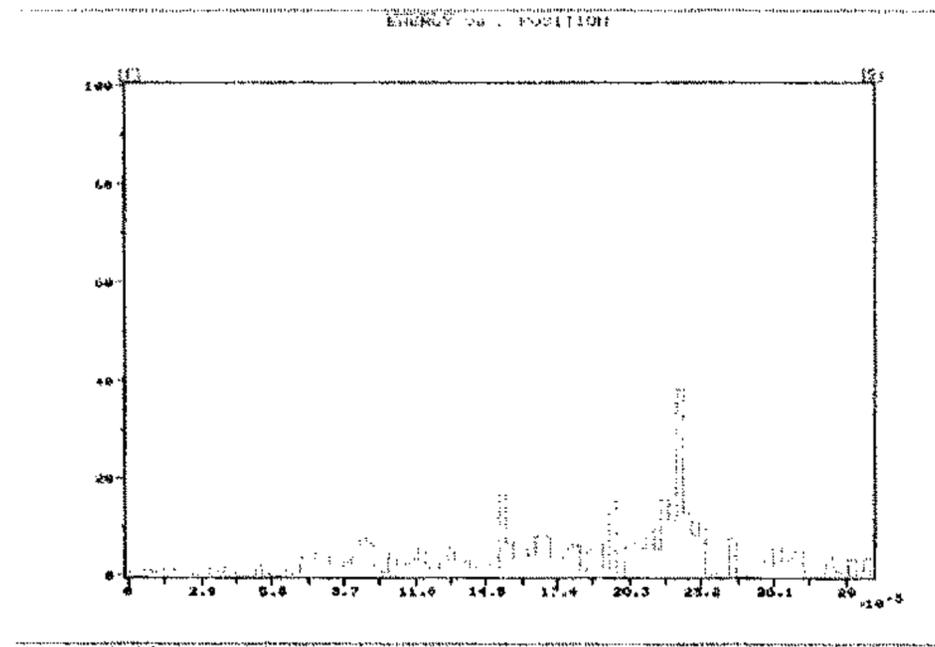


图 3-2-2.1 声发射线定位图

图 3-2-2.1 是典型二维编织 C/SiC 复合材料试件在整个拉伸实验过程的损伤声发射线定位图，图中横坐标为距离 (mm)，纵坐标为声发射平均相对能量。

从图中可以看出，在整个定位区间均有声发射产生，声发射相对能量在距离 1 号探头 15mm、20mm、22mm 处有尖峰，其中在距离 1 号探头 22mm 处为声发射相对能量最大值。这说明试件定位区间均有损伤产生，在距离 1 号探头 15mm、20mm、22mm 处损伤较为严重，试件最终断口位置基本上与声发射相对能量最大值的位置相对应。

## 2. 损伤演化过程分析

## a) 基体沉积良好的试件

图 3-2-2.2a 给出了典型的二维编织 C/SiC 复合材料试件拉伸过程声发射特征参数曲线图。图中包含四个小图，左上角的图为声发射事件数—时间(HITS vs TIME)，左下角的图为声发射平均相对能量—时间(ENERGY vs TIME)，右上角的图为声发射事件平均持续时间—时间(DURATION vs TIME)；右下角的图为声发射上升时间—时间(RISE TIME vs TIME)。

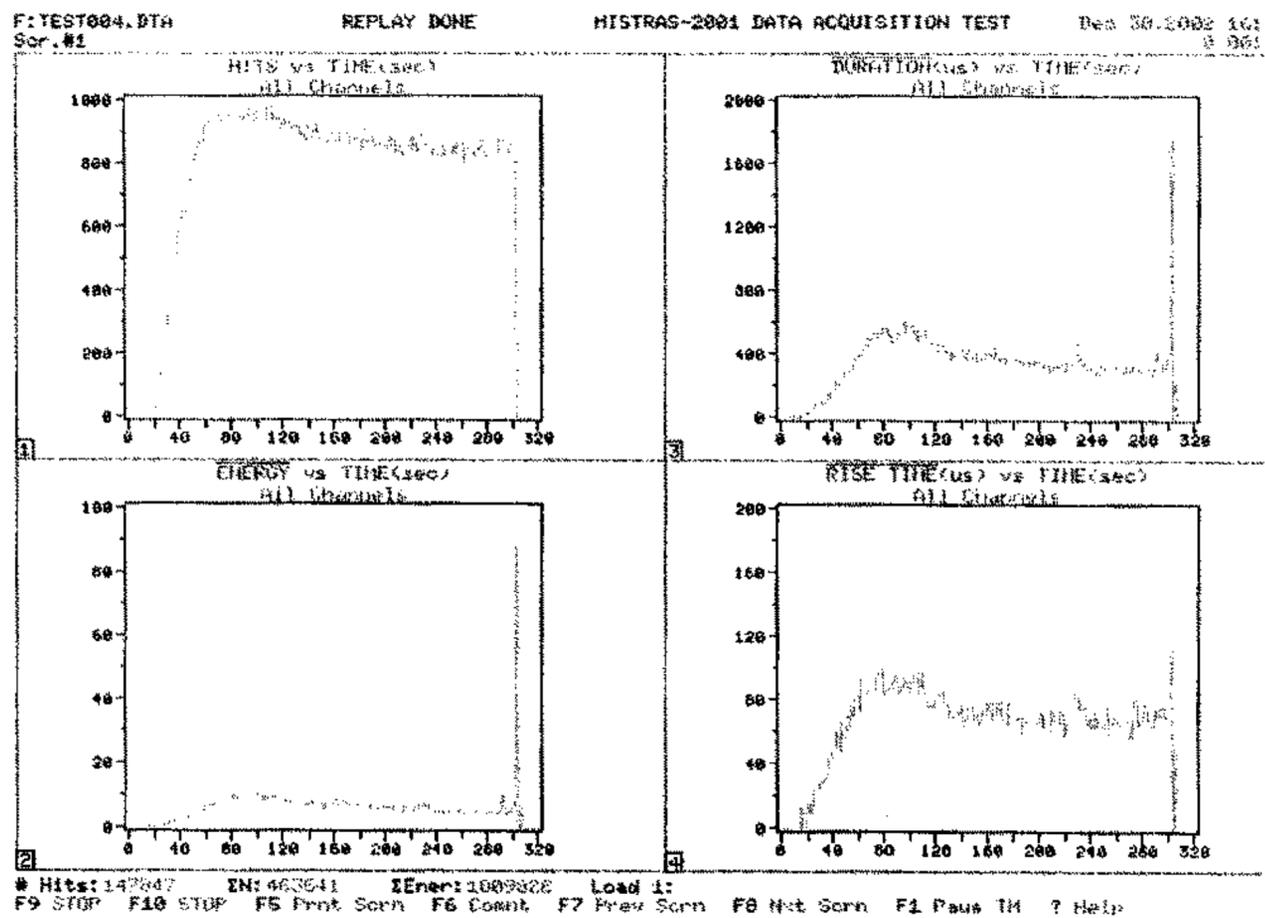


图 3-2-2.2a 加载过程中典型声发射特征参数图

从图中可以看出，二维编织 C/SiC 复合材料试件拉伸损伤基本分为三个阶段：

第一阶段从加载开始~加载后 80 秒，此阶段声发射事件数快速上升并达到最大值，相对应的声发射平均能量、持续时间、上升时间也逐步上升，但上升速度明显弱于声发射事件数的上升速度，这表明试件在加载初期有大量损伤产生，每个损伤（声发射事件）的能量较小，损伤在整个试件上产生，主要是试件原生微裂纹的裂纹面摩擦和弱连接界面开裂以及少量原生微裂纹扩展。

第二阶段是加载后 80 秒~290 秒之间，声发射事件数随着加载进行略有下降并趋于稳定，这表明试件产生大量稳态发展的损伤，其发展速度基本不变。声发射事件数小幅波动表明损伤发展是渐进的；从声发射相对能量图上可以看出产生的损伤属于小能量级的损伤；通过声发射持续时间、上升时间参数基本稳定可以断定损伤类型基本相同，曲线的小幅波动也说明了损伤发展的渐进性。这阶段损伤主要是能量较小的基体原生微裂纹稳态扩展、横向纤维束间界面以及横向纤维束内纤维界面的开裂。由于材料制备方法、工艺以及设备状况等原因，材料的原生微裂纹和孔洞主要集中在材料的编织节点处（试件照片上可见），因此损伤基本上均匀发生在编织节点处并沿着横向纤维束间界面或者横向纤维束内纤维界面发展，也可能两者同时进行，这一点可以从试件断口照片上看出，试件断口沿横向纤维较平齐，基本没有发生纵向纤维拔出和分层，说明裂纹扩展没有沿着纵向纤维扩展，原因主要为二维编织的形式使得纤维束直线段很短，每个纤维束界面扩展因纤维束的相互制约无法持续发展，也

没有出现纵向连通，最后断裂时也就无法出现纤维束拔出。这阶段损伤在多处发生，不会集中在某一区域，这一点可以从图 3-2-2.1 得到证实。如果材料基体致密度较差，基体中存在大量孔洞或微裂纹，或者界面较弱，那么这阶段声发射参数曲线会出现密集的、大幅度的波动，基体裂纹会发生较多连通和扩展或者界面裂纹多处开裂，这种现象在 SiC 沉积不致密的试件中可以看到。

第三阶段是加载后 290 秒~断裂，这阶段声发射事件数与第二阶段变化不大，也就是说损伤数量没有太大变化，但声发射平均相对能量出现突变，这说明纵向纤维出现大量断裂。试件整体破坏时声发射平均相对能量急剧升高（约升高 5 倍），说明损伤是大能量的损伤；通过声发射持续时间、上升时间的变化分析，也可认为损伤类型与第二阶段不同。这个阶段只出现一次声发射平均相对能量突变，说明纤维束不是逐步被拉断，主要原因可能是基体裂纹扩展遇到纤维束阻挡时无法沿界面继续扩展，材料应变能没有释放，裂纹尖端应力集中无法缓解，最终纤维束一起被拉断。

b) 基体沉积不致密的试件

图 3-2-2.2b 给出了典型二维编织 C/SiC 复合材料试件的拉伸过程声发射特征参数曲线图。图中包含四个小图，左上角的图为声发射事件数—时间(HITS vs TIME)，左下角的图为声发射平均相对能量—时间(ENERGY vs TIME)，右上角的图为声发射事件平均持续时间—时间(DURATION vs TIME)；右下角的图为声发射上升时间—时间(RISE TIME vs TIME)。

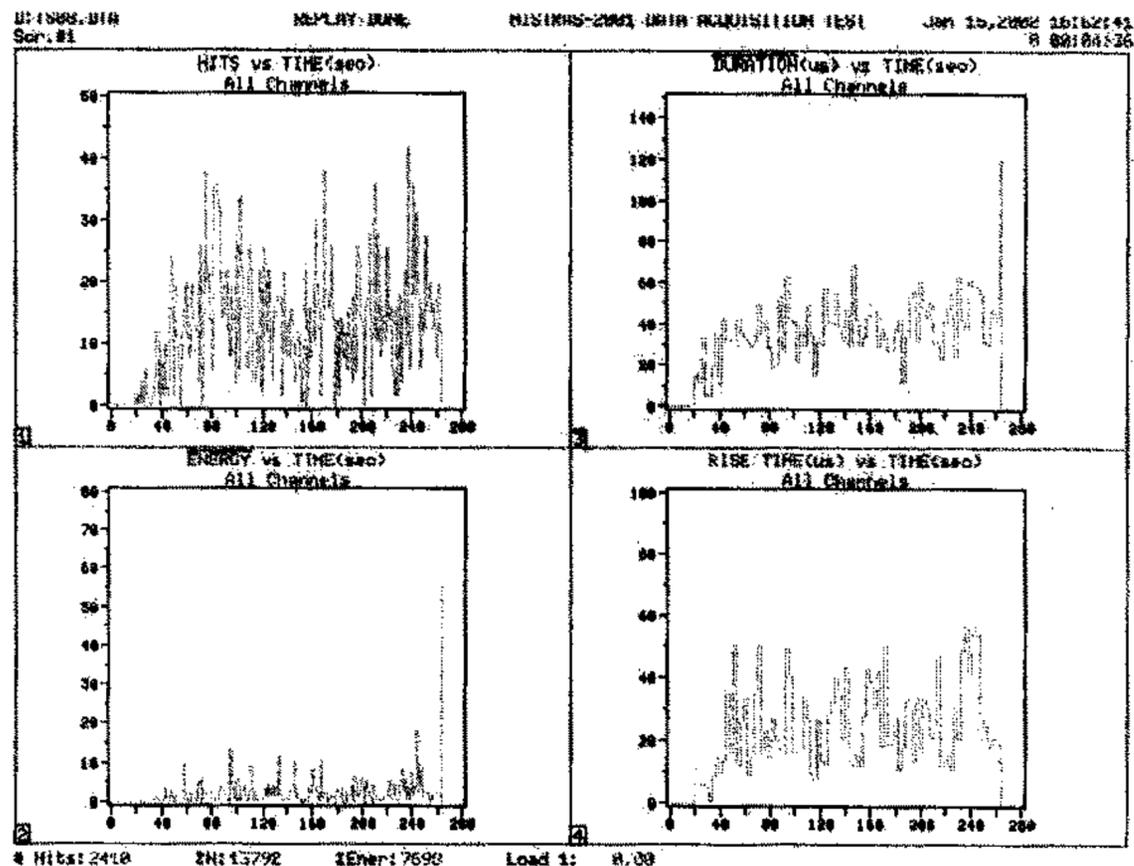


图 3-2-2.2b 加载过程中典型声发射特征参数图

图 3-2-2.2b 中声发射特征参数曲线与沉积致密试件的 (图 3-2-2.2a) 明显不同, 曲线波动较大。根据声发射平均相对能量-时间曲线, 二维编织 C/SiC 复合材料试件拉伸损伤基本分为三个阶段:

第一阶段从加载开始~加载后约 50 秒 (在声发射平均相对能量出现第一突变之前), 此阶段声发射事件数、持续时间、上升时间出现快速上升和大幅波动, 相对应的声发射平均能量稍有上升, 未出现大幅波动。这表明试件在加载初期有大量损伤产生, 每个损伤 (声发射事件) 的能量较小, 声发射源主要是原生微裂纹扩展和疏松基体开裂。

第二阶段是加载后 50 秒~260 秒之间, 此阶段声发射事件数、声发射上升时间以及持续时间出现大幅波动, 损伤发展呈现间歇性, 发展速度忽快忽慢。声发射平均相对能量也出现间歇性突变。这阶段主要是基体微裂纹和孔洞的局部失稳性扩展和连通, 其中声发射平均相对能量的突变就是基体裂纹和孔洞失稳性扩展产生的。由于基体孔洞较多、致密度较差以及界面性能较弱等原因, 裂纹与裂纹之间或者裂纹与孔洞之间的贯穿连通无需长时间的能量积累就能完成, 因此声发射平均相对能量的突变较为频繁。这阶段的损伤仍主要集中在编织节点处, 并沿着横向纤维束内纤维界面和横向纤维束间界面以及层间发展, 由于编织纤维束的相互制约, 分层只会小范围内进行。

第三阶段是试件整体断裂, 这阶段最明显的特征是声发射平均相对能量巨幅突变, 其幅度相当于在此之前的声发射平均相对能量突变幅度的四倍, 说明损伤是大能量的损伤。这个阶段持续的时间很短, 主要是纤维束一起被拉断。

### 3. 声发射累积相对能量

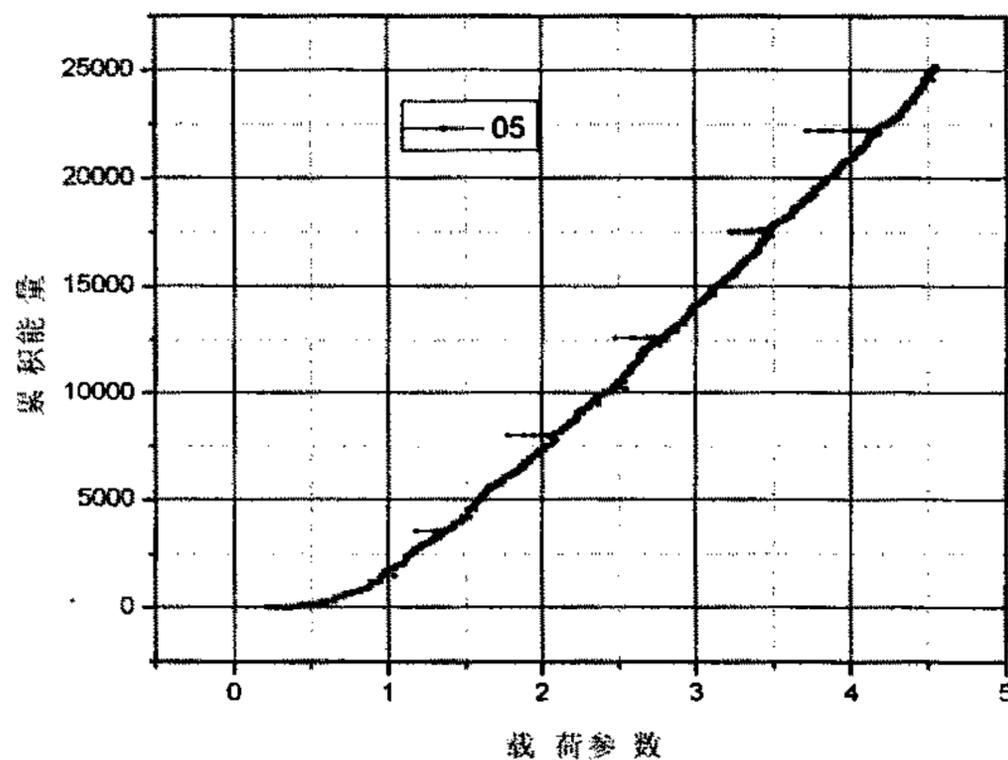


图 3-2-2.3a 声发射累积相对能量随载荷变化曲线

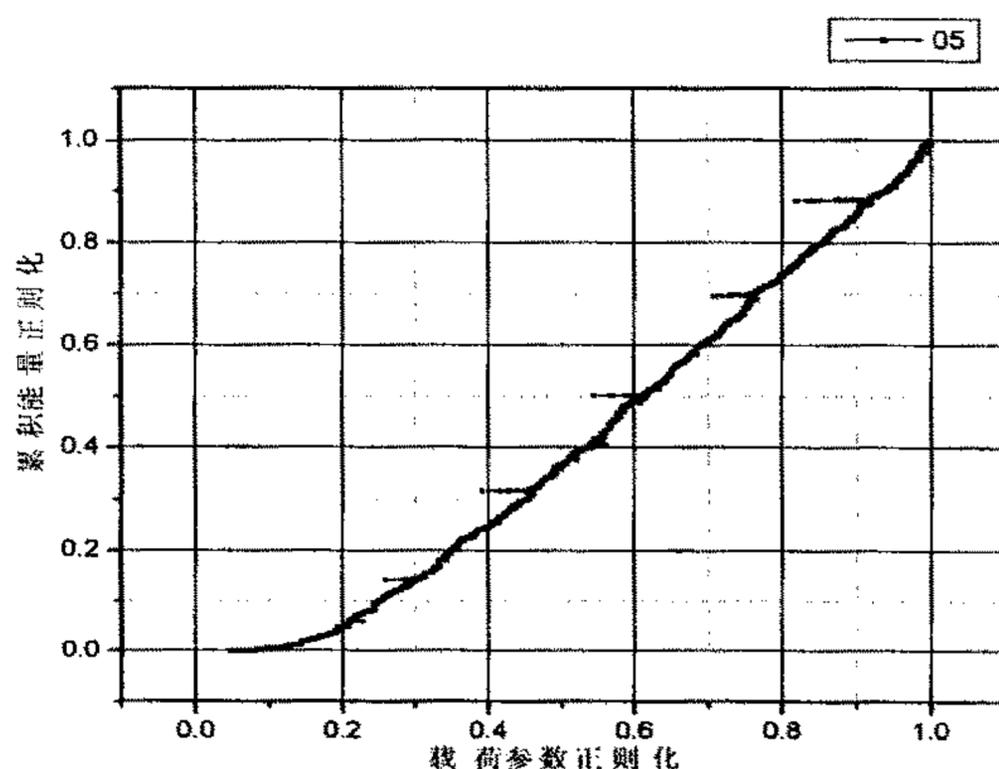


图 3-2-2.3b 声发射累积相对能量随载荷变化曲线

从加卸载试验声发射累积相对能量曲线（图 3-2-2.3a）上，我们可以看出二维编织 C/SiC 复合材料试件拉伸声发射累积相对能量随载荷变化基本成线性。这说明了损伤基本上是匀速发展的，无法区分损伤初始阶段和损伤严重阶段，原因主要是：一方面，由于编织方式的影响，纵向、横向纤维束相互制约，限制了横向纤维和纤维束界面开裂，限制了损伤加速发展，并且这种限制随载荷增加而增加。另一方面，随着载荷增加，损伤也加剧发展。在损伤发展、演化过程中两方面相互制约、相互限制，直到损伤突破纤维束制约，引起纤维束断裂，最终导致试件整体破坏。另外，试件卸载时仍有声发射产生，表明二维编织陶瓷基复合材料的声发射凯塞（Kaiser）效应不明显。产生这种现象的原因可能有两个：

1. 卸载过程中材料确实有损伤产生，损伤引起声发射；
2. 卸载过程中材料无损伤产生，声发射是由材料内部摩擦产生的；

在高载荷卸载过程中材料才可能发生新的损伤，低载荷卸载过程中材料不大可能发生新的损伤，而此时产生的声发射应该是由材料内部裂纹面摩擦引起的。由于裂纹面摩擦引起的声发射信号的能量相对较低，那么是否可以以声发射的相对能量作为凯撒效应的判断依据？如果可以，其阈值应取多少？这些需要进一步实验摸索研究。对于费利西蒂比（Felicity）存在同样的问题。

### 第三节 三维编织 C/SiC 复合材料拉伸试验结果及分析

#### 一、 三维编织 C/SiC 复合材料拉伸实验

##### 1. 典型应力—应变曲线

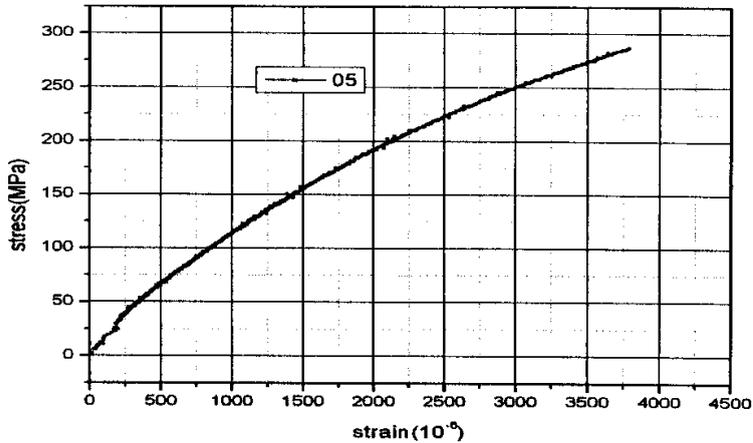


图 3-3-1.1a 应力—应变曲线

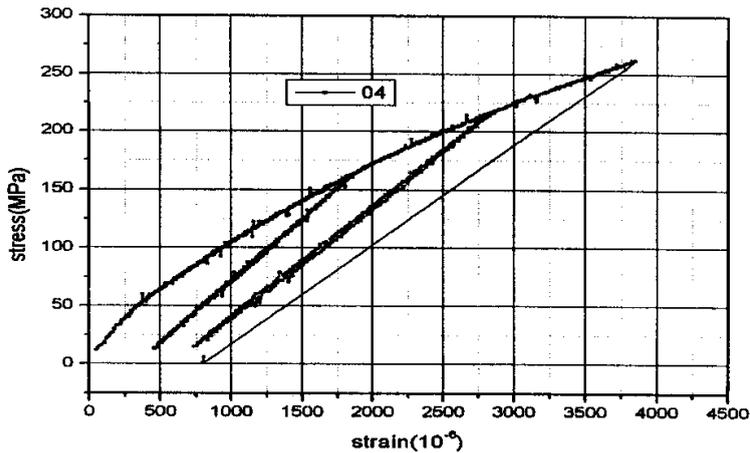


图 3-3-1.1b 不同应力水平卸载的应力-应变曲线

从图 3-3-1.1a、3-3-1.1b 中可以看出应力—应变曲线呈现非线性，并且随着载荷的增加，卸载线斜率逐步下降；卸载后存在残余变形并且残余变形随着卸载应力增加而逐步增加。这说明随着载荷的增加，损伤逐步加剧，导致材料弹性模量逐步下降，残余应变逐步增加，这一点和二维编织试件的特点相似。

2. 残余变形随着载荷的变化

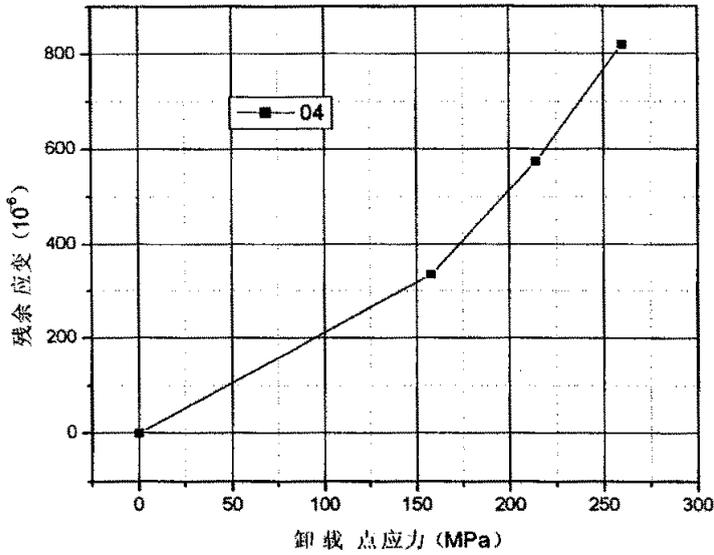


图 3-3-1.2 残余应变随载荷变化曲线

图 3-3-1.2 是不同应力水平下卸载后的残余应变变化曲线，显示了随加载应力增加试件残余应变增加的趋势不同于二维编织试件，近似呈指数函数的关系。较低应力时增加较慢，较高应力时增加较快，表明损伤发展具有不同的阶段和特征。

3. 卸载弹性模量的变化

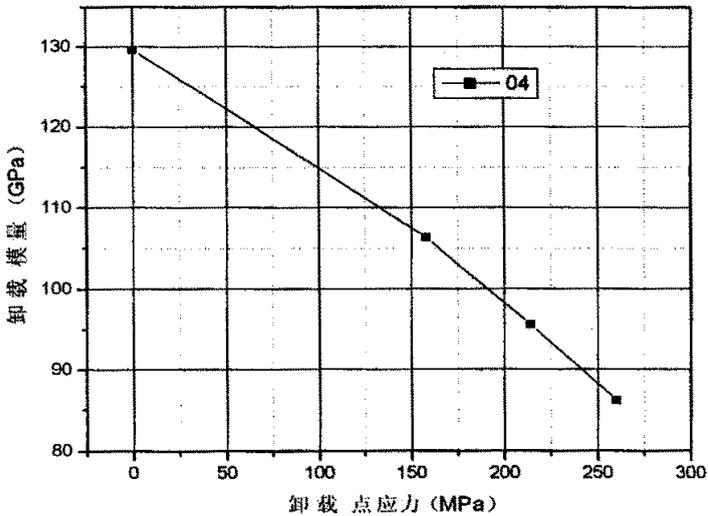


图 3-3-1.3 卸载弹性模量随载荷变化曲线

图 3-3-1.3 是不同应力下的卸载弹性模量变化曲线，从图中可以看出，弹性模量随载

荷的增加基本上线性下降，这与二维编织试件的情况相同。

## 二、典型声发射数据分析

### 1. 线定位分析

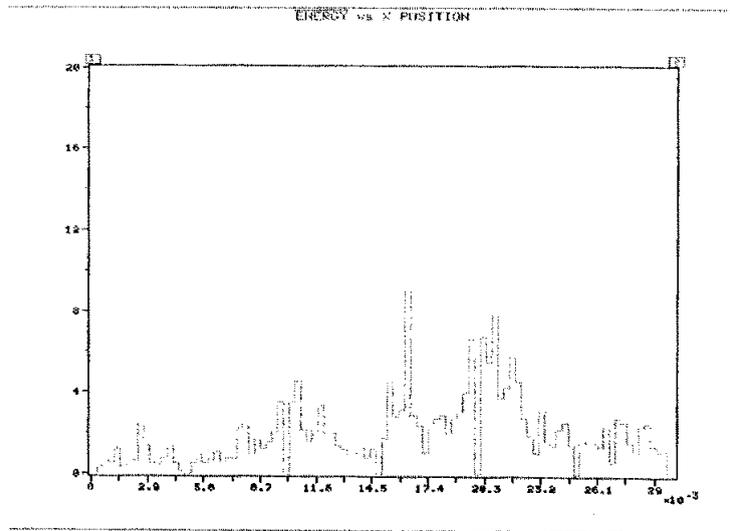


图 3-3-2.1 声发射线定位图

图 3-3-2.1 为三维编织 C/SiC 复合材料试件在整个拉伸实验过程中的损伤声发射线定位图，图中横坐标为距离 (mm)，纵坐标为声发射平均相对能量。

通过图中声发射事件平均相对能量在定位区间内的分布情况，可以了解到定位区间内试件拉伸损伤的分布情况以及严重程度。从图中可以看出，在整个定位区间均有损伤产生，但损伤主要集中在距离 1 号探头 16mm 和 21mm 处，这与试件破坏位置基本相同。

### 2. 损伤演化过程分析

图 3-3-2.2 给出了典型三维编织 C/SiC 复合材料试件拉伸过程的声发射特征参数曲线图，图中包含四个小图，左上角的图为声发射事件数—时间(HITS vs TIME)，左下角的图为声发射平均相对能量—时间(ENERGY vs TIME)，右上角的图为声发射事件平均持续时间—时间(DURATION vs TIME)；右下角的图为声发射上升时间—时间(RISE TIME vs TIME)。

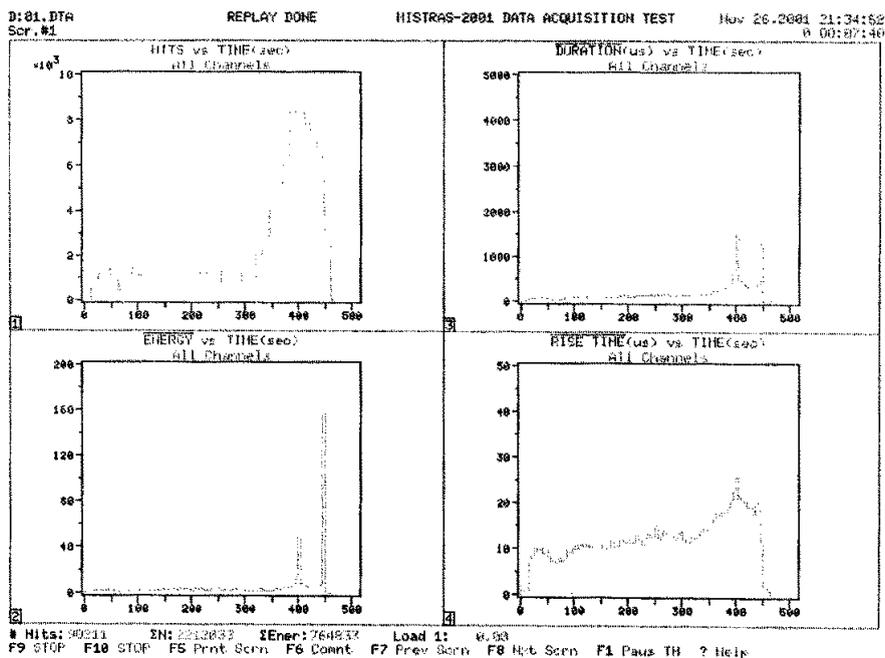


图 3-3-2.2 加载过程中典型声发射特征参数图

从图中可以看出，损伤发展基本上分为四个阶段。

第一阶段为初始损伤阶段（开始加载~加载后 320 秒），声发射事件数相对较少并趋于稳定，声发射平均相对能量、平均持续时间维持在较低的水平，声发射平均上升时间也变化不大。这些现象说明了试件加载初期有损伤产生，但损伤发展缓慢，不随加载进行而变化，并且损伤基本上为小能量级、同种类型的损伤。此阶段图中曲线（声发射事件数、平均上升时间）随载荷增加出现微小波动，说明损伤是渐进的。这阶段的损伤主要是基体原生微裂纹、弱连接基体和界面的稳定开裂和扩展。由于原生微裂纹、孔洞主要集中在编织节点处，所以此阶段损伤也基本上在试件长度方向上均匀分布，对试件最终破坏形式和位置影响不大。

第二阶段为过渡阶段（加载后 320~380 秒），此阶段声发射事件数开始快速上升，但声发射平均相对能量、持续时间、上升时间上升较慢，这阶段是初始损伤到严重损伤阶段的过渡期，损伤主要是编织节点处基体裂纹扩展、界面开裂以及纤维束内纤维界面开裂加快并在其它区域产生新的裂纹源。

第三阶段为严重损伤阶段（加载后 380 秒~试件整体断裂前），试件进入严重损伤区，声发射事件数达到最大值并开始下降，声发射相对能量、平均持续时间发生突变，然后恢复较低水平。这表明基体损伤加剧，局部裂纹发生失稳性扩展，部分纤维束开始断裂。这些损

损伤使局部应力集中大大缓解，再次发生裂纹失稳性扩展或纤维束断裂需要进一步的能量积累。裂纹失稳扩展主要沿纤维束和纤维的热解碳涂层与碳化硅界面进行，损伤主要集中在断口处的局部区域，并且部分纤维束开始逐步断裂、拔出。试件断口照片也表明了这点。

第四阶段为试件整体快速断裂阶段（加载后 440 秒），这阶段损伤主要为剩余纤维束瞬间被拉断。

### 3. 声发射累积相对能量

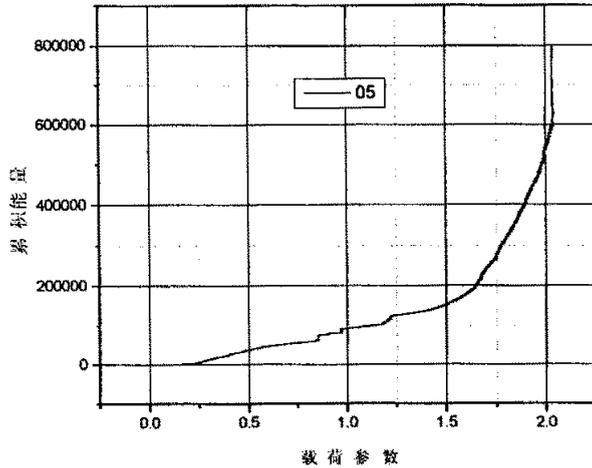


图 3-3-2.3a 声发射事件累积相对能量—载荷参数曲线

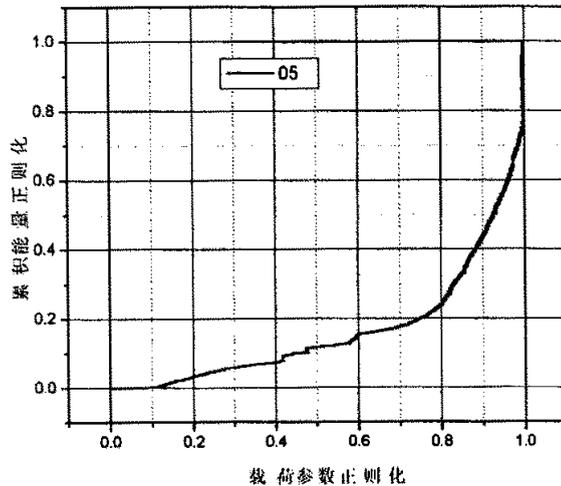


图 3-3-2.3b 正则化的声发射事件累积相对能量—载荷参数曲线

图 3-3-2.3a、b 是三维编织 C/SiC 复合材料拉伸损伤的声发射事件累积相对能量—载

荷曲线和相应的正则化曲线,根据图中曲线斜率的拐点可以把三维编织 C/SiC 复合材料拉伸损伤发展分为三个阶段:初始损伤阶段、严重损伤阶段和快速断裂阶段,这三个阶段的曲线斜率越来越大。在初始损伤阶段(0~80%断裂载荷),损伤发展缓慢,声发射累积相对能量上升幅度不大,这阶段损伤主要发生在整个试件内的编织节点处,以原生裂纹、弱连接基体和界面开裂为主。严重损伤阶段(80~100%断裂载荷),声发射累积相对能量上升加快,损伤发展加剧,损伤主要为纤维束及纤维束内纤维界面快速开裂扩展,纤维束内纤维开始断裂和拔出,试件断口局部区域基体裂纹、纤维束界面裂纹开始贯通,损伤集中在试件断口处局部区域内。第三阶段为快速断裂阶段(100%断裂载荷),载荷略有下降,声发射累积相对能量跳跃上升,试件整体破坏。

纤维束开始断裂对复合材料来讲是灾难性的,我们可以将声发射累积能量发生突变时的 80%断裂应力定义为材料的临界损伤强度,并可以考虑将该强度用于结构设计。

#### 第四节 显微观察

通过显微镜和扫描电镜对纤维束、二维编织、三维编织 C/SiC 试件及拉伸断口进行了观察。

##### 一、纤维束拉伸

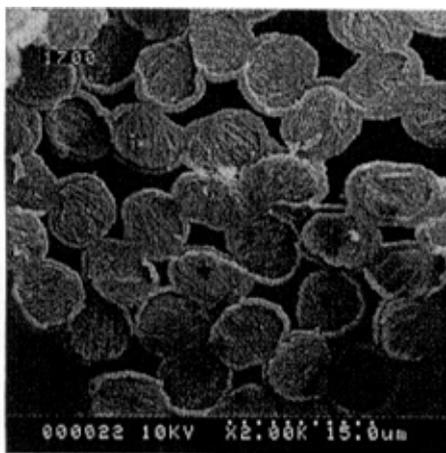


图 3-4-1a



图 3-4-1b

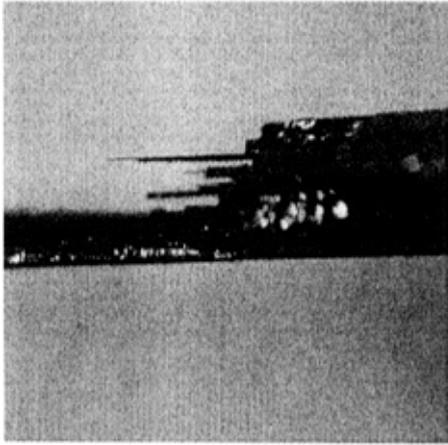


图 3-4-1c

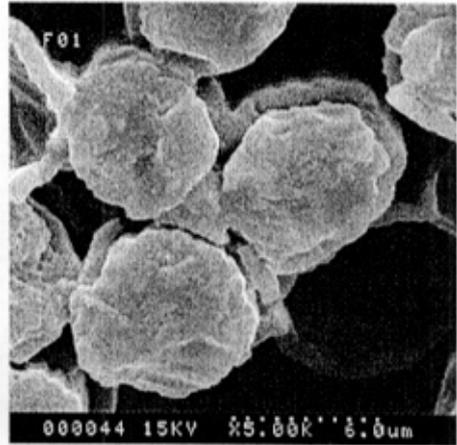


图 3-4-1d

图 3-4-1a、b 为试验前纤维束照片。图 3-4-1a 照片中可以看出纤维束内部纤维上有一圈碳化硅，纤维间存在许多孔洞没有沉积上碳化硅；图 3-4-1b 是纤维束周围局部放大，图中可以看到碳化硅组织不均匀。从第二章第三节的 2-3-2a 图纤维束照片上可以看到，纤维束外表面碳化硅生长成条状，这使纤维束受载后产生应力集中。

图 3-4-1c 为试件断口照片。照片中可以看出纤维束被拉断，断口有纤维簇拔出，产生这一现象的原因是裂纹沿纤维界面纵向扩展，或者是基体中纵向孔洞连通，也可能两者并存。图 3-4-1d 为拉伸断口截面电镜照片。从照片中可以看到残留的碳化硅空壳，表明存在纤维从碳化硅中拔出现象。

## 二、 二维编织复合材料拉伸

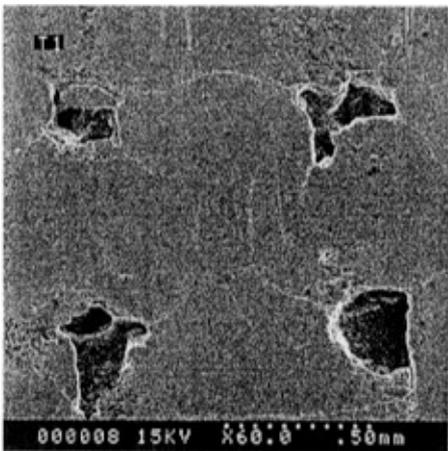


图 3-4-2a

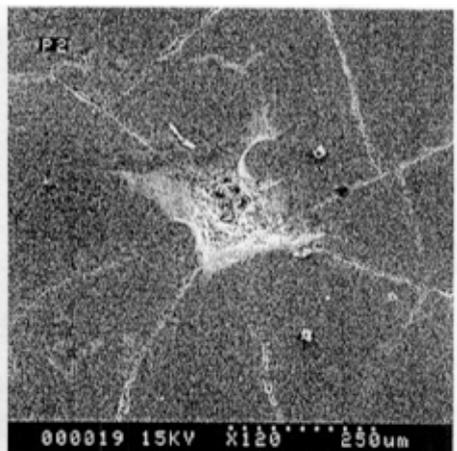


图 3-4-2b

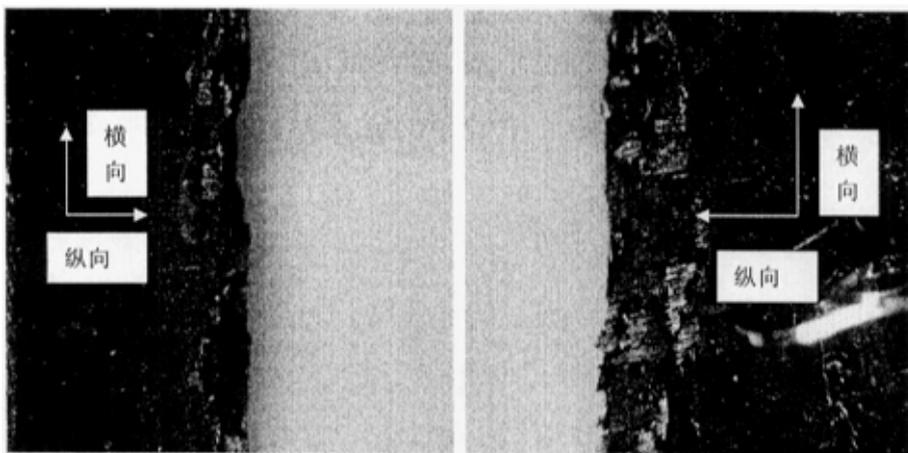


图 3-4-2c

图 3-4-2d

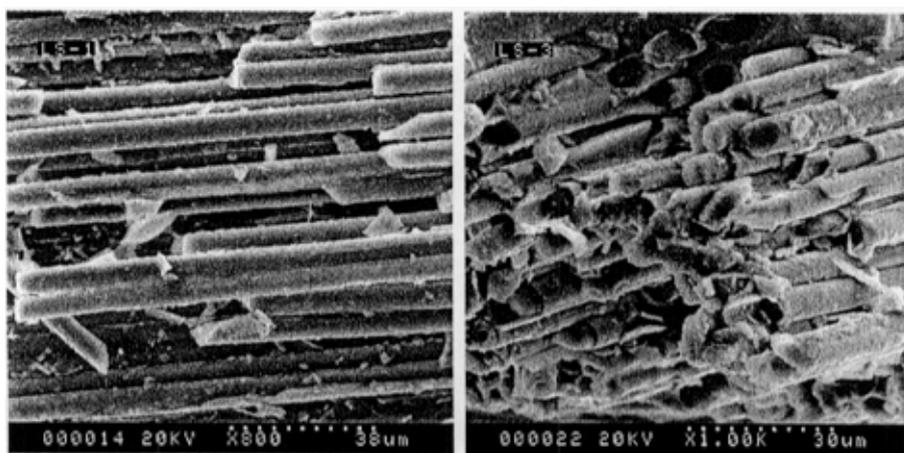


图 3-4-2e

图 3-4-2f

图 3-4-2a、b 为试件表面两种原生微裂纹的照片。从照片中可以看出，无论试件表面状态如何，原生裂纹大多集中于编织节点处，并以编织节点为原点向四周发散，有的与其它节点裂纹相连通，裂纹形状、排列无规律。试件原始损伤主要为基体孔洞、裂纹和纤维束界面脱粘，它们主要集中在编织节点处。从第二章第三节 2-3-2c 图的试件照片中可以看到，纤维束在编织节点处还出现了部分纤维断裂。

图 3-4-2c 为试件断口照片。从照片中可以看出，纤维是被拉断的，断口较为平齐，没有纤维束拔出和分层。图 3-4-2d 为有少量分层的试件断口照片。从照片中可以看出，纤维是被拉断的，断口宽度方向较为平齐，厚度方向呈现少量台阶状，表明发生少量分层。这与试件基体含孔洞多少、大小、排布方式有关。

图 3-4-2e、f 为试件断口纤维束照片。从照片中可以看出，纤维束被拉断，许多纤

维上只留下一段碳化硅，或者只留下纤维周围的碳化硅壳而没碳纤维，这表明纤维束内纤维热解碳涂层与碳化硅产生界面开裂、扩展并从碳化硅中拔出。

### 三、 三维编织复合材料拉伸

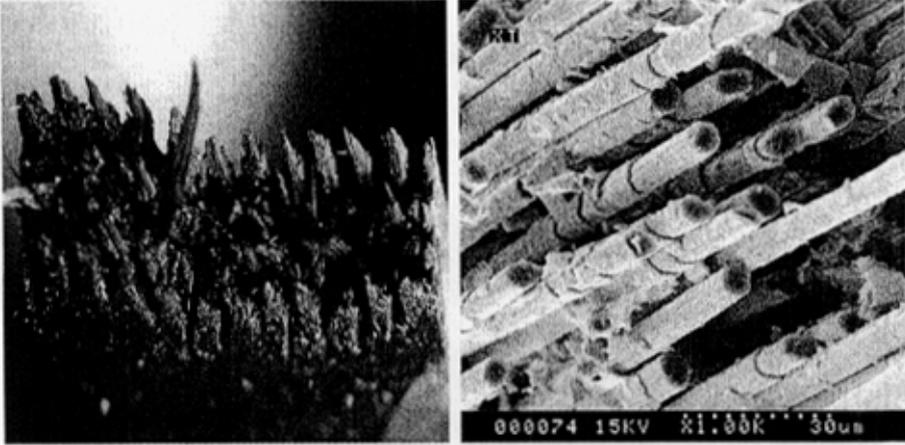


图 3—4—3a

图 3—4—3b

图 3—4—3a、b 为试件断口照片。从图 3—4—3a 照片中可以看出，断口处纤维束参差不齐，纤维束被拉断拔出，说明了损伤曾经沿纤维束界面发展，纤维束的断点集中在编织节点上，主要是因为编织节点处基体空洞集中并且纤维束在节点处弯曲改变走向造成纤维束损伤，使节点处的应力集中，最终引起纤维束断裂的缘故。图 3—4—3b 是断口处纤维束电镜照片，从照片中可以看出纤维束内有的纤维之间没有沉积上碳化硅，纤维断口一般有一段没有碳化硅，可能是纤维破坏时，纤维上的碳化硅基体被崩掉，也有可能是纤维热解碳涂层与碳化硅发生界面开裂和扩展，纤维断裂后从中拔出，或者是两者都有。另外，有些纤维上的碳化硅是一段一段不连续的，这说明热解碳与碳化硅界面之间曾经发生了裂纹扩展，最后纤维断裂时碳化硅被崩掉。

## 第五节 C/SiC 复合材料频谱分析

声发射的事件数、幅值、能量和损伤的大小，扩展的快慢有直接的关系，用于表征试件宏观损伤十分有用。但这些信号受到传播衰减和反射波的叠加等影响，很难与损伤的形式建立直接的联系。声发射频率特性是通过对一个声发射波形进行频率分布的分析得到的，即频谱。声发射的频谱特性一般受其他因素的干扰较小，不同细观损伤源发出声波的能量、事件

数、振幅可能相同，但频率一般不同。因此声发射的频谱特性的分析可能成为判断损伤类型的有效方法。

声发射信号的波形几乎无损失的含有声发射源的全部信息，波形信号的分析更适合细观损伤机理的描述。采用宽频探头对二维、三维编织试样拉伸实验进行全程动态监测，获取全部声发射波形信号，信号经过快速 Fourier 变换处理，提取其实部参数进行分析。

下面给出典型声发射信号波形和快速 Fourier 变换实部参数波形,如图 3-5a、b、c、d、e 所示，每一个图中上半部分为声发射波形图，纵轴为振幅（伏特），横轴为时间（微秒）；下半部分为声发射波形信号快速 Fourier 变换后的实部参数波形，纵轴为快速 Fourier 变换后实部参数幅值（分贝），横轴为声发射信号频率（兆赫）。

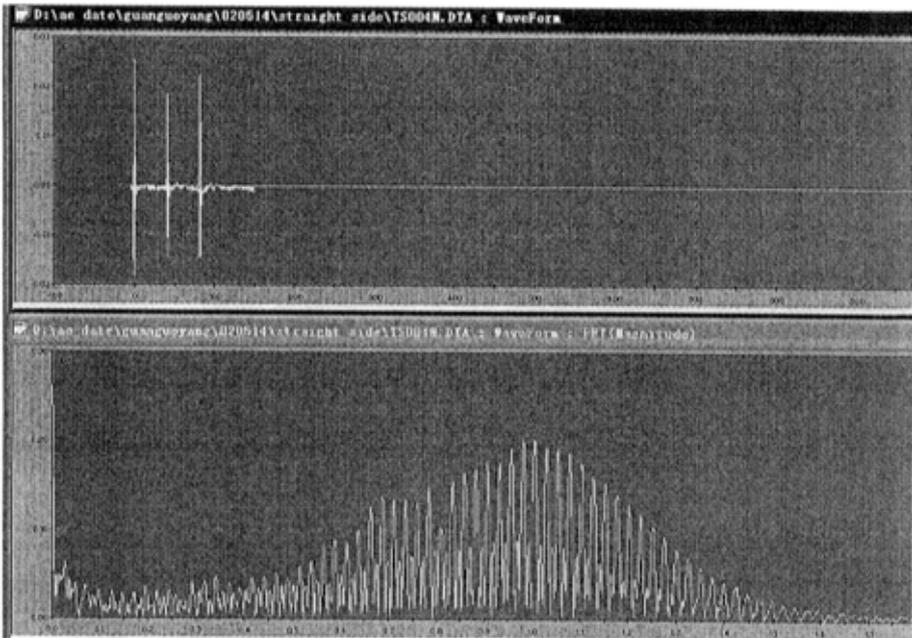


图 3-5a

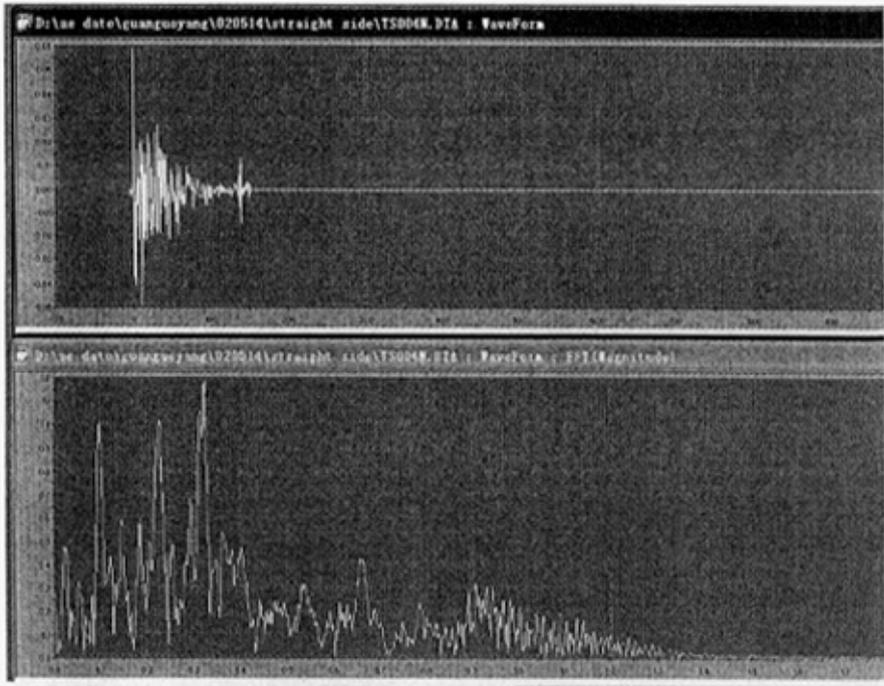


图 3-5b

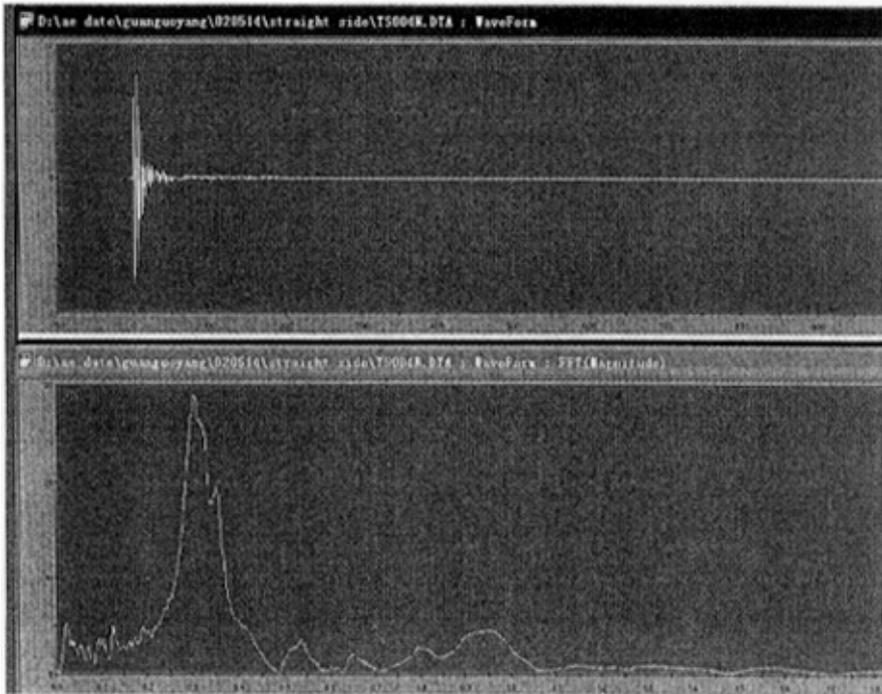


图 3-5c

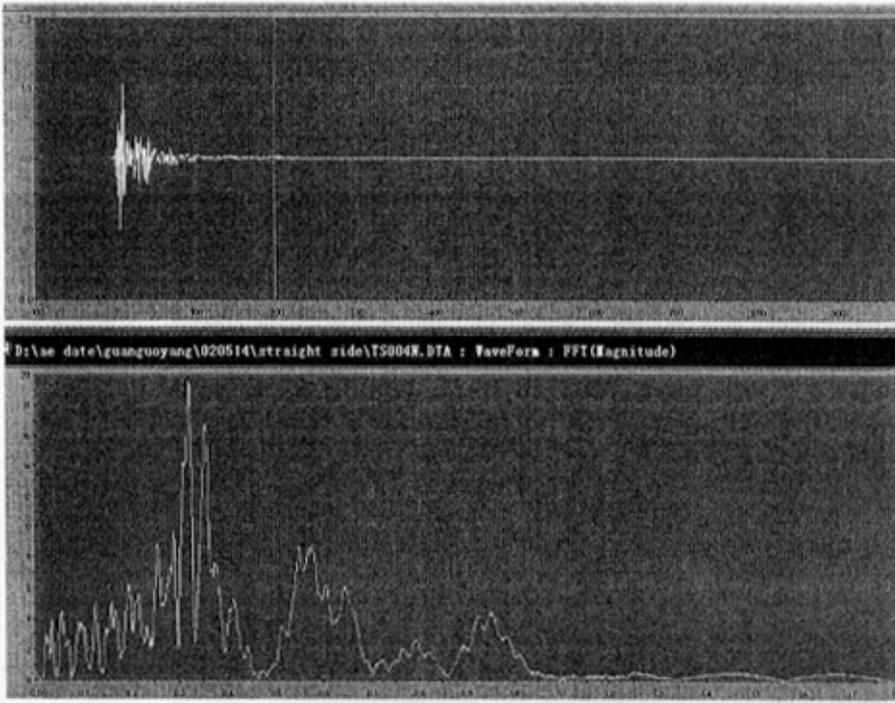


图 3-5d

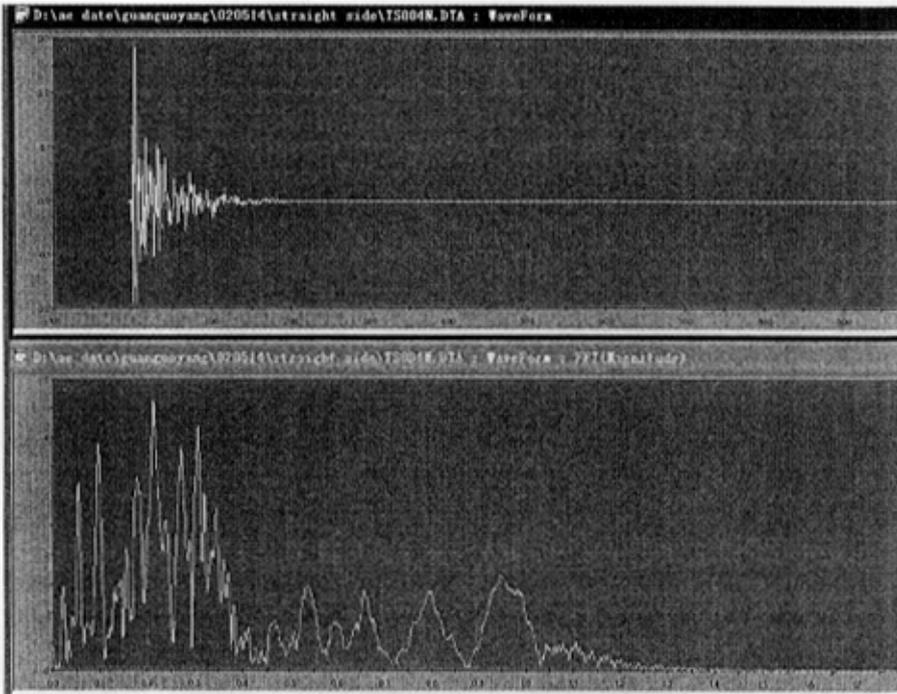


图 3-5e

图 3-5a 中的声发射信号是在加载最初阶段采集的, 这种信号在整个实验过程出现次数很少, 主要集中在加载最初阶段出现。从图中可以看出, 快速 Fourier 变换的实部参数主要集中在高频区域, 幅值不大, 主峰在 1 兆赫左右, 幅频范围较宽, 主要是弱连接碳化硅基体以及应力集中严重的原生微裂纹尖端基体的开裂。

图 3-5b 中的声发射信号是在加载初期阶段采集的, 这种信号在整个实验过程出现次数较多, 主要集中在加载的初期和中后期。信号快速 Fourier 变换实部参数呈现多峰, 主要为热解碳层开裂和裂纹面摩擦, 0.32 兆赫的峰为热解碳层开裂, 0.3 兆赫以下的峰为裂纹面摩擦, 0.4 兆赫以上的峰是碳化硅基体开裂产生的。

图 3-5c 信号采集在加载后期, 数量较少, 主要集中在加载后期。信号快速 Fourier 变换实部参数呈现单峰, 幅值较大, 主峰频率在 0.3 兆赫左右, 主要是纤维束断裂。

图 3-5d 信号采集在加载后期, 信号快速 Fourier 变换实部参数呈现多峰, 主要是纤维束断裂、热解碳、碳化硅开裂和纤维束拔出。0.32~0.35 兆赫的峰是纤维束断裂和热解碳开裂, 大于 0.5 兆赫的峰是碳化硅基体开裂, 小于 0.3 兆赫的峰为界面摩擦或纤维拔出。

图 3-5e 信号采集在加载最后阶段, 信号快速 Fourier 变换实部参数呈现多峰, 多集中在 0.3 兆赫以下, 是纤维束断裂后拔出和界面摩擦引起的, 大于 0.5 兆赫的峰是碳化硅基体开裂。

通过对比不同载荷段的声发射信号波形和快速 Fourier 变换实部参数波形, 得到不同类型损伤的频率特性。刚度高的材料破坏时声发射信号频率一般都高, 碳化硅基体的强度、刚度比碳纤维高, 热解碳最低, 因此碳化硅开裂时的声发射频率最高, 根据这一判断, 可以初步给出各种类型损伤声发射频率区间:

碳化硅基体开裂频率在 0.45 兆赫以上。

碳化硅与热解碳界面开裂频率在 0.3~0.4 兆赫之间。

纤维束断裂频率在 0.3~0.4 兆赫之间。

纤维束拔出、界面摩擦在 0.3 兆赫以下。

快速 Fourier 变换实部参数在各频段的幅值大小取决于该时刻某一频段所对应损伤发生的多少和大小。

纵观二维、三维编织 C/SiC 复合材料拉伸实验的声发射波形和快速 Fourier 变换实部参数波形, 发现基本上每个声发射信号快速 Fourier 变换实部参数都是多峰形态, 这说明二维、三维编织 C/SiC 复合材料基本上每一时刻的拉伸损伤都是多种类型损伤的组合, 只是各种类型损伤占的比例不同, 可以根据不同频率峰值的大小, 判断出损伤的主要类型和次要类

型, 很少有单一损伤独立发生。

## ● 本章小结

本章主要分析了单纤维束、二维编织、三维编织 C/SiC 复合材料的拉伸的典型应力-应变曲线和实验过程的声发射数据, 得到了二维编织、三维编织 C/SiC 复合材料的残余应变和模量衰减的有关规律以及单纤维束、二维编织、三维编织 C/SiC 复合材料的拉伸声发射特性。声发射历程图表明了 C/SiC 复合材料损伤良好的可测性; 通过声发射的事件数、平均相对能量、持续时间、上升时间等特征参数, 采用多参数历程图分析法可以描述 C/SiC 复合材料拉伸损伤发展过程, 揭示 C/SiC 复合材料拉伸损伤发展和演化规律。利用声发射累积相对能量可以宏观上有效地描述 C/SiC 复合材料的损伤发展过程。通过二维编织、三维编织 C/SiC 复合材料的拉伸声发射信号的频谱分析, 得出了不同类型损伤的频谱特性。本章还对单纤维束、二维编织、三维编织 C/SiC 试样和断口进行了显微观察, 以辅证声发射对材料损伤的描述。主要结论:

- a) 声发射技术对于 C/SiC 复合材料损伤研究和安全性、完整性评估非常有效。
- b) 二维编织 C/SiC 复合材料拉伸实验的残余应变、模量衰减与应力变化呈线性关系。
- c) 三维编织 C/SiC 复合材料拉伸实验的残余应变与应力变化呈指数关系, 模量衰减与应力变化近似线性关系。
- d) 单纤维束 C/SiC 复合材料拉伸损伤宏观上分为两个阶段。50%破坏位移以前为损伤初始阶段, 损伤发展缓慢; 50%破坏位移以后为损伤发展阶段, 损伤发展加快, 80%破坏位移时出现纤维簇断裂。
- e) 二维编织 C/SiC 复合材料的拉伸损伤宏观上是一个均匀发展的状态, 无法区分损伤初始阶段和损伤发展阶段。
- f) 三维编织 C/SiC 复合材料的拉伸损伤宏观上与载荷变化呈现三段线性,  $0.8\sigma_b$  左右纤维束开始断裂, 之后纤维束逐步断裂, 在  $\sigma_b$  时发生整体快速断裂。  $0.8\sigma_b$  被定义为临界损伤强度, 并可以考虑将该强度用于结构设计。
- g) C/SiC 复合材料试样的显微观察表明: 单纤维束、二维编织、三维编织 C/SiC 复合材料试样都存在不同程度的原始损伤; 试样断口的显微观察表明了试件经历的损伤与声发射揭示的损伤是相符的。

- h) 二维编织、三维编织 C/SiC 复合材料试样频谱分析, 揭示了试件每一时刻的损伤基本上是由不同类型损伤的组合, 很少有单一损伤独立发生。初步给出了各损伤的频率区间。

## 第四章 C/SiC 复合材料损伤表征

对于 C/SiC 复合材料损伤来说, 由于损伤机理复杂, 材料内部的微细缺陷形态、分布都具有随机性。因此, 统计损伤模型也是分析 C/SiC 复合材料损伤的有效方法之一。

对于复合材料损伤的声发射表征可以采用不同的声发射特征参数来进行, 刘学文<sup>[37]</sup>等采用声发射累积振铃计数定义了铝合金疲劳的两个阶段, 提出了材料疲劳损伤模型; 金周庚<sup>[38]</sup>等采用声发射振幅值表征材料不同阶段的损伤, 并研究了材料临界破坏的声发射 FR 值 (Felicity 比); 杜伟坊<sup>[39]</sup>等采用声发射事件数表征陶瓷裂纹源的不同类型; 陈兵<sup>[40]</sup>等考察了三种类型水泥块的三点弯曲试验声发射特性, 采用 Weibull 函数方法定量分析了材料特性对声发射、断裂特性以及脆性的影响, 给出了经验公式; 阳建红<sup>[41]</sup>利用声发射相对能量定义损伤变量, 建立损伤演化的数学模型, 并通过实验进行验证; 杨光松<sup>[42]</sup>采用损伤力学的纤维束模型, 利用声发射的事件数结合统计分析表征了玻璃纤维束的拉伸损伤, 建立了纤维束的损伤演化方程。本章利用声发射事件的相对能量 ( $E$ ) 表征 C/SiC 复合材料的损伤发展规律。对表征参数的选取主要是出于以下考虑:

1. 声发射相对能量是声发射事件数、声发射振幅和声发射持续时间等参数的综合反映, 它包含有声发射事件数、声发射振幅和声发射持续时间等参数的信息。
2. 由于不同类型的损伤释放的声发射相对能量不同, 因此用声发射相对能量更适合描述复合材料损伤。
3. 试验监测采用双探头线定位技术, 用两个探头的声发射相对能量之和表征损伤克服了由于声发射源位置不同而引起声波能量传播衰减的影响。

### 第一节 C/SiC 单纤维束拉伸破坏的损伤表征

C/SiC 单纤维束拉伸破坏损伤表征采用纤维束模型<sup>[43]</sup>, 假设纤维束有大量相互平行的、具有相同的长度的纤维组成, 且各纤维相互独立。设纤维束中纤维总根数为  $N$ , 每根纤维横截面积均为  $dA$  (基体均匀折入), 外载荷为  $F$ , 则作用在每根纤维上的力为

$$f_i = \frac{F}{N} \quad (i=1,2,3,\dots,N) \quad (4-1-1)$$

设每根纤维的刚度系数均为  $k_0$ , 位移为  $\delta$ , 则每根纤维受力为

$$f_i = \begin{cases} k_0 \delta, & 0 \leq k_0 \delta \leq f_{R_i} \\ 0, & k_0 \delta > f_{R_i} \end{cases} \quad (4-1-2)$$

式中  $f_{R_i}$  —— 第  $i$  纤维断裂强度。

已断  $n$  根纤维时的平衡方程为

$$F = \sum_{i=n+1}^N f_i = \sum_{i=n+1}^N k_0 \delta = (N-n)k_0 \delta \quad (4-1-3)$$

将表观刚度系数记为  $k$ , 有

$$k = Nk_0 \quad (4-1-4)$$

定义损伤变量  $\omega$  为

$$\omega = \frac{n}{N} \quad (4-1-5)$$

载荷与位移的关系为

$$F = k(1-\omega)\delta \quad (4-1-6)$$

实际上的纤维断裂强度通常为分布函数, 当  $N$  充分大时, 纤维断裂强度值位于区间  $[f_R, f_R + df_R]$  内的纤维数与总纤维数之比为  $p(f_R)df_R$ , 则 (4-1-3) 式可化为

$$F(\delta) = k\delta \int_{k_0\delta}^{\infty} p(f_R)df_R \quad (4-1-7)$$

式中  $p(f_R)$  —— 纤维断裂强度的概率密度函数。

$$\int_0^{\infty} p(f_R)df_R = \int_{F_0}^{F_R} p(f_R)df_R = 1 \quad (4-1-8)$$

式中  $F_0$  —— 纤维最小断裂强度 ( $\geq 0$ );

$F_R$  —— 纤维最大断裂强度 ( $\leq \infty$ )。

根据 (4-1-2)、(4-1-5) 式, 纤维束拉伸破坏时的损伤分布规律为

$$\omega = 1 - \int_{k_0\delta}^{F_R} p(f_R)df_R = \int_{\delta_0}^{\delta} p_1(\delta)d\delta \quad (4-1-9)$$

式中  $\delta_0$  —— 纤维初始断裂时的位移值。

$$p_1 = p(k_0\delta)k_0$$

剩余强度的概率为

$$R(x) = 1 - \omega = \int_x^{F_R} p_1(x)dx \quad (4-1-10)$$

式中  $\delta_f$  ———— 纤维完全断裂时的位移值。

损伤破坏准则为

$$\omega = \omega_c \quad (4-1-11)$$

纤维完全断裂。

式中  $\omega_c$  ———— 材料临界断裂值,  $\omega_c$  由实验数据确定。

通过材料的单向拉伸实验,在不同应力水平下卸载,获得一组卸载点应力和相应模量值,把这组实验数据进行拟合,得到  $E_b$ , 代入 (4-1-14) 式中计算出  $\omega_c$ 。

由应变等效理论可知<sup>[44]</sup>

$$\sigma = E_0 \varepsilon (1 - \omega) \quad (4-1-12)$$

则有

$$E = E_0 (1 - \omega)$$

$$\omega = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (4-1-13)$$

$$\omega_c = 1 - \frac{E_b}{E_0} \quad (4-1-14)$$

式中  $E_0$  ———— 初始弹性模量;

$E_b$  ———— 破坏时弹性模量。

由 (4-1-9) 式可见,有了纤维断裂强度的分布函数之后,损伤发展规律即可确定。

在 C/SiC 纤维束单向拉伸实验中,由图 3-1-2.3a、图 3-1-2.3b 可见累积声发射相对能量与位移近似成双线性关系。

这里主要讨论 50% 破坏位移以后的线性阶段。

累积声发射相对能量与变形线性关系为:

$$n_e = A\delta + B \quad (4-1-15)$$

$$\text{且当} \quad \begin{aligned} \delta = \delta_0, & \quad n_e = n_0 \\ \delta = \delta_f, & \quad n_e = N_e \end{aligned} \quad (4-1-16)$$

式中  $\delta$  ———— 纤维束变形值 ( $\delta \geq \delta_0$ );

$\delta_0$  ———— 纤维初始断裂时的变形值;

$\delta_f$  ———— 纤维完全断裂时的变形值;

$n_e$  ———— 声发射累积相对能量值  $n_e \geq n_0$ ;

$n_0$  ———— 纤维束初始损伤时声发射累积相对能量值;

$N_e$  ———— 声发射总累积相对能量值;

$A, B$  ———— 常数。

将 (4-1-16) 式代入 (4-1-15) 式, 得

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{N_e - n_0}{\delta_f - \delta_0} \\ B &= \frac{n_0 \delta_f - N_e \delta_0}{\delta_f - \delta_0} \end{aligned} \right\} \quad (4-1-17)$$

因此, 有

$$n_e = \frac{N_e (\delta - \delta_0) + n_0 (\delta_f - \delta)}{\delta_f - \delta_0} \quad (4-1-18)$$

假设声发射相对能量与纤维断裂根数成线性关系, 即

$$\left. \begin{aligned} n &= \beta n_e \\ N &= \beta N_e \end{aligned} \right\} \quad (\beta \geq 1) \quad (4-1-19)$$

损伤分布规律为

$$\omega = \frac{n}{N} = \frac{n_e}{N_e} = \frac{N_e (\delta - \delta_0) + n_0 (\delta_f - \delta)}{(\delta_f - \delta_0) N_e} \quad (4-1-20)$$

损伤概率密度函数为

$$p_1(\delta) = \frac{N_e - n_0}{N_e (\delta_f - \delta_0)} \quad (4-1-21)$$

纤维束拉伸损伤演化方程为

$$F(\delta) = k\delta(1 - \omega) = k\delta \frac{(N_e - n_0)(\delta_f - \delta)}{N_e (\delta_f - \delta_0)} \quad (4-1-22)$$

由纤维束拉伸实验得到各材料常数

$$k = 380 N/mm$$

$$\delta_0 = 0.5\delta_f$$

$$\delta_f = 0.37 mm$$

$$n_0 = 0.2N_e$$

$$N_e = 5638182$$

将各材料常数代入 (4-1-22) 式中, 得到纤维束损伤演化方程:

$$F(\delta) = k\delta(1 - C\omega) = 380\delta \left[ 1 - C \left( 0.2 + \frac{1.6\delta}{\delta_f} \right) \right] \quad (4-1-23)$$

式中  $C$  ——修正系数由实验数据拟合而成, 这里  $C$  取 0.2。

加入修正系数  $C$  是使得理论预测的拉伸模量折减与实验值相吻合, 其中包含了对声发射相对能量与杆元破坏按线性处理产生偏差的修正, 试件形式、编织方式、纤维体积含量、试件孔隙率等参数的影响, 以及模型按宏观各向同性处理产生偏差的修正。

由于修正系数  $C$  和材料临界断裂值  $\omega_c$  都是利用实验值通过模量折减处理方法计算得到的, 所以修正系数  $C$  和材料临界断裂值  $\omega_c$  实际上是一个值, 只不过提法不一样。

理论预测曲线与实验相差不大 (如图 4-1 所示)。

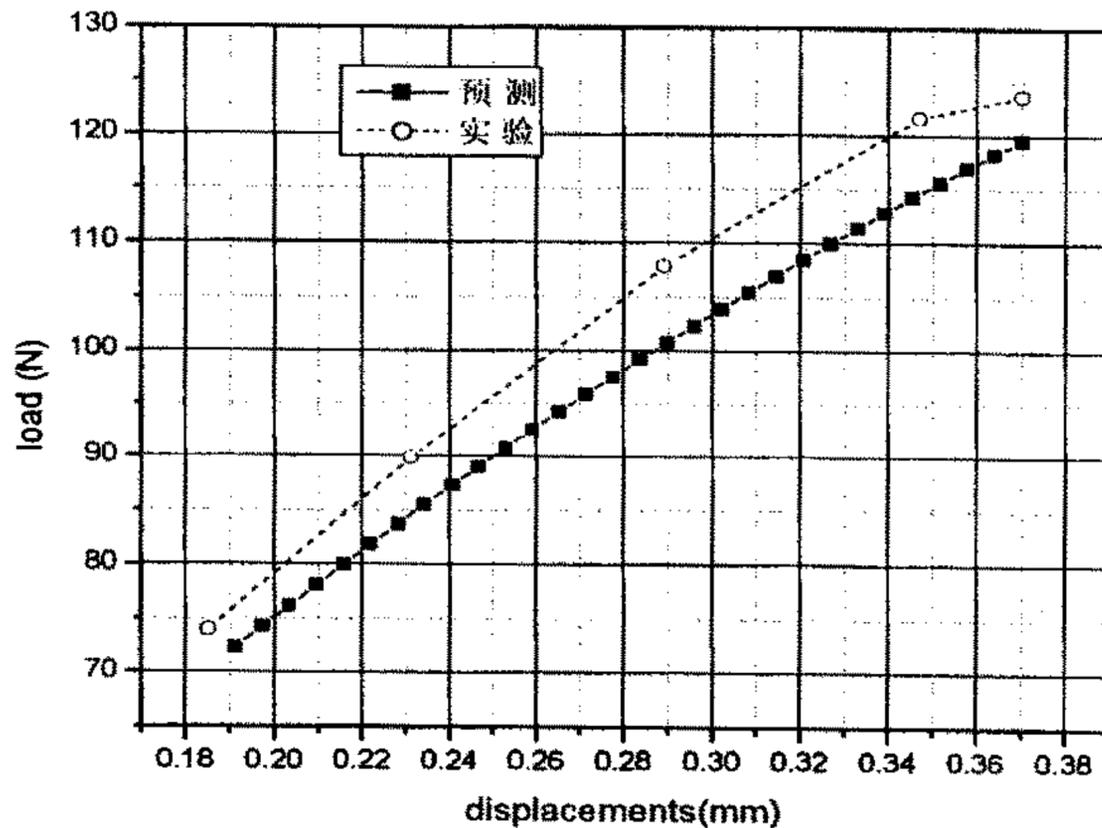


图 4-1

## 第二节 二维编织 C/SiC 复合材料拉伸破坏的损伤表征

Krajcinovic<sup>[44]</sup>利用 Iwin<sup>[45]</sup> 讨论复合材料破坏特性的并联分布元素模型, 建立了一种简便形象的能动统计模型, 用来描述复合材料简单拉伸时的损伤破坏规律。它反映了内力重新分布与损伤演变之间的相互作用。

假设二维编织 C/SiC 复合材料单向拉伸试件可由一组  $N$  根平行杆元来模拟 (横向纤维和基体作均匀化处理), 每个杆元长度相等, 模量相同。试件无损伤时横截面积为  $A_0$

$$A_0 = NdA_0 \quad (4-2-1)$$

式中  $N$ ——杆元总数;

$dA_0$ ——每根杆元的横截面积。

定义损伤变量为

$$\omega = \frac{A_1}{A_0} = \frac{ndA_0}{NdA_0} = \frac{n}{N} = \frac{n_0 + n_1}{N} = \omega_0 + \omega_1 \quad (4-2-2)$$

式中  $A_1$ ——已断裂的横截面积;

$n$ ——已断杆元数;

$n_0$ ——实验前已断的杆元数;

$n_1$ ——载荷引起的杆元断裂数;

$\omega_0$ ——试件加载前初始损伤;

$\omega_1$ ——载荷引起的损伤。

假设试件在受力为  $F$  时发生脆性破坏的强度分布密度函数为  $p(F)$ , 当  $N \rightarrow \infty$  时, 由

(4-2-2) 式定义的损伤变量可用破坏强度分布密度函数化为

$$\omega_1 = \frac{\int_0^F p(F)dF}{\int_0^{F_b} p(F)dF} = P(F) \quad (4-2-3)$$

式中  $F_b$ ——试件最大断裂载荷值。

损伤材料的断裂准则为

$$\omega = \omega_c \quad (4-2-4)$$

试件完全断裂。

式中  $\omega_c$  —— 材料临界断裂值。 $\omega_c$  的确定方法同上一节。

由图 3-2-1.4a、图 3-2-1.4b 可见，试件拉伸累积声发射相对能量与载荷近似成线性关系。

假设累积声发射相对能量与载荷线性关系为：

$$n_e = AF + B \quad (4-2-5)$$

$$\begin{aligned} \text{且当} \quad & F = F_0, \quad n_e = 0 \\ & F = F_b, \quad n_e = N_e \end{aligned} \quad (4-2-6)$$

式中  $F$  —— 试件载荷值；

$F_0$  —— 试件初始损伤的载荷值；

$F_b$  —— 试件最大断裂载荷值；

$n_e$  —— 声发射累积相对能量值；

$N_e$  —— 声发射总累积相对能量值；

$A, B$  —— 常数。

将 (4-2-6) 式代入 (4-2-5) 式，得

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{N_e}{F_b - F_0} \\ B &= \frac{-N_e F_0}{F_b - F_0} \end{aligned} \right\} \quad (4-2-7)$$

因此，有

$$n_e = \frac{N_e(F - F_0)}{F_b - F_0} \quad (4-2-8)$$

假设声发射相对能量与杆元破坏根数成线性关系，即

$$\left. \begin{aligned} n &= \beta n_e \\ N &= \beta N_e \end{aligned} \right\} (\beta \geq 1) \quad (4-2-9)$$

损伤分布规律为

$$\omega_1(F) = \frac{n}{N} = \frac{n_e}{N_e} = \frac{F - F_0}{F_b - F_0} \quad (4-2-10)$$

损伤概率密度函数为

$$p(F) = \frac{1}{F_b - F_0} \quad (4-2-11)$$

假设每个杆元无损伤时拉伸弹性模量均为  $E_0$ ，各杆元符合虎克定理，那么试件无损伤时拉伸弹性模量也为  $E_0$ 。

试件承受的载荷可表示为

$$F = E_0(N - n)dA_0\varepsilon = E_0N(1 - \omega)dA_0\varepsilon = E_0A_0(1 - \omega)\varepsilon \quad (4-2-12)$$

(4-2-12) 式两边同除以  $A_0$  得

$$\sigma = E_0\varepsilon(1 - \omega) = E_0\varepsilon(1 - \omega_0 - \omega_1) \quad (4-2-13)$$

(4-2-13) 式即为 C/SiC 复合材料的损伤演化方程。

不考虑试件的初始损伤，C/SiC 复合材料的损伤演化方程可以写成

$$\sigma = E_1\varepsilon(1 - C\omega_1) \quad (4-2-14)$$

式中  $E_1$  为试件初始模量；

$C$  修正系数，由实验确定。

由 (4-2-14) 式可得到

$$E = E_1(1 - C\omega_1) = E_1\left(1 - C\frac{F - F_0}{F_b - F_0}\right) \quad (4-2-15)$$

由二维编织 C/SiC 复合材料拉伸试验得到以下参数

$E_1 = 87.5GPa$		$F_2 = 1.3KN, E_2 = 85.88GPa$
$F_0 = 0.5KN$		$F_3 = 2.1KN, E_3 = 77.31GPa$
$F_b = 4.58KN$	卸载点载荷及实测模量	$F_4 = 2.8KN, E_4 = 71.48GPa$
$E_b = 56GPa$		$F_5 = 3.44KN, E_5 = 65.25GPa$
		$F_6 = 4.16KN, E_6 = 60.64GPa$

将上述参数代入 (4-2-15) 式中进行计算确定修正系数  $C$ ，得

$$C = 0.36,$$

$$\omega_c = 0.36$$

把修正系数  $C$  代入 (4-2-14) 式中，得到

$$\sigma = E_1\varepsilon(1 - 0.36\omega_1) \quad (4-2-16)$$

实验与预测比较如图 4-2 所示:

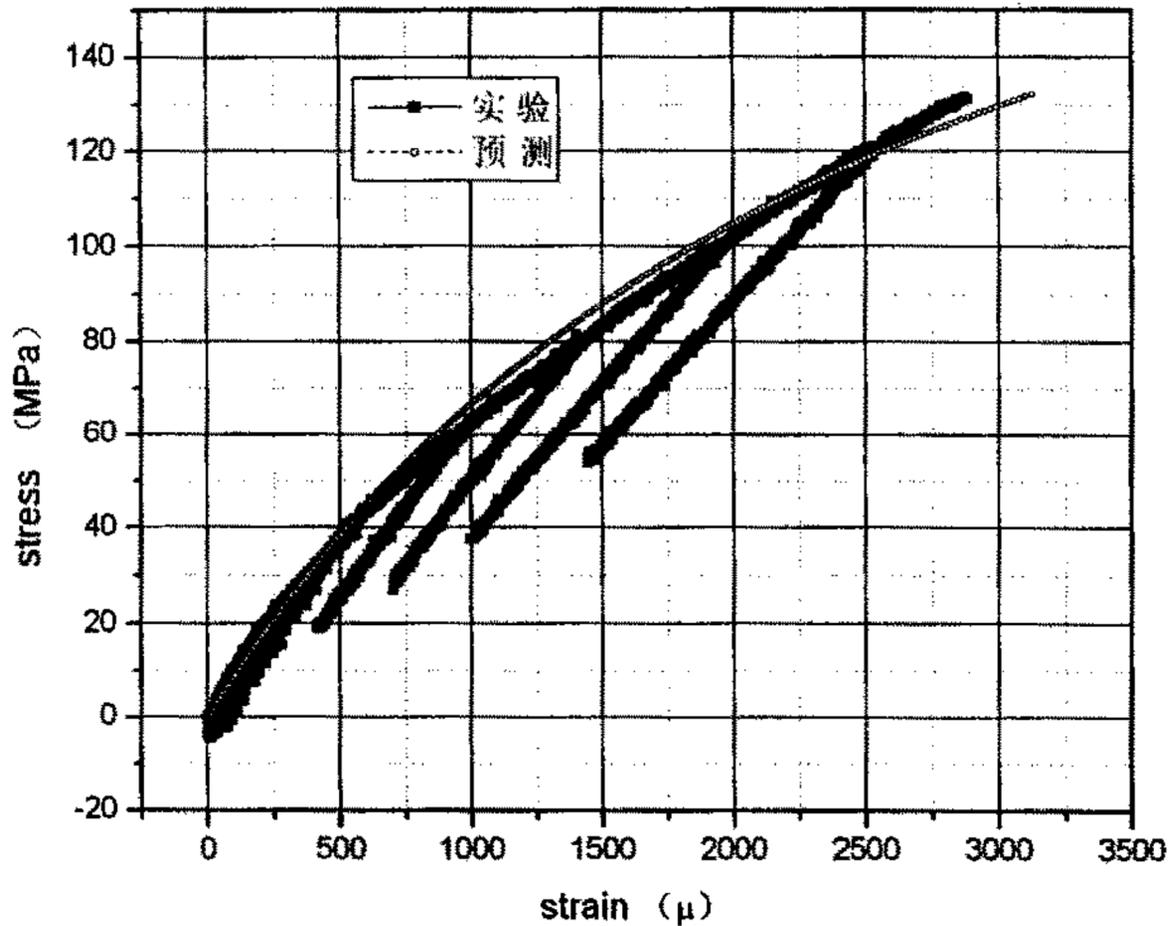


图 4-2 实验与预测比较

### 第三节 三维编织 C/SiC 复合材料拉伸破坏的损伤表征

在三维编织 C/SiC 单向拉伸实验中, 声发射累积相对能量与载荷的关系可分成三个阶段, 每一阶段中声发射累积相对能量随载荷的变化近似成线性关系如图 4-3a 所示。这说明了试件拉伸过程中的三个损伤阶段:

1. 初始损伤阶段 (A~B 阶段): 这个阶段损伤主要是基体、界面开裂。
2. 严重损伤阶段 (B~C 阶段): 这个阶段损伤主要是纤维束稳态断裂。
3. 失稳破坏阶段 (C~D 阶段): 这个阶段是试件整体失稳断裂。

初始损伤阶段为断裂载荷的 80%以下, 此阶段损伤发展缓慢, 80%断裂载荷产生的 AE 累计能量只占总 AE 累计能量的 20%; 严重损伤阶段, 载荷增加 20%断裂载荷, 损伤产生的 AE 累计能量却占总 AE 累计能量的 60%; 失稳破坏阶段, 载荷基本不变, 产生声发射累计能量占总 AE 累计能量的 20%。

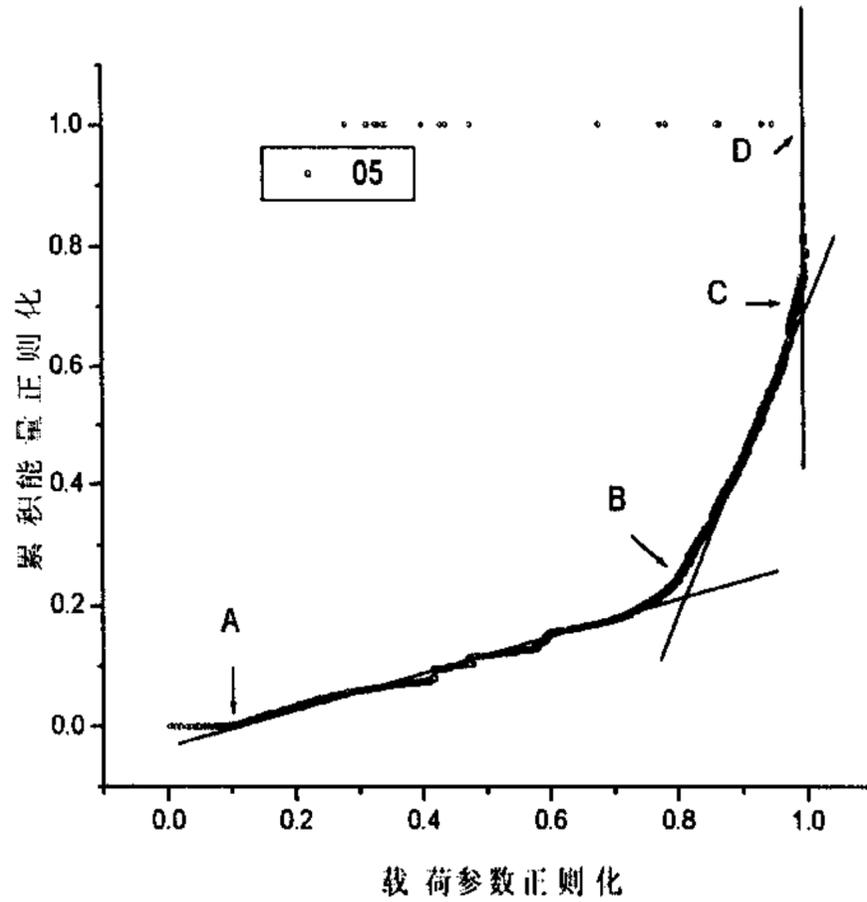


图 4-3a

三维编织 C/SiC 单向拉伸损伤表征时，不再区分基体和纤维，把纤维束的影响均匀折入基体中。

#### A~B 阶段

假设基体中原生孔洞和微裂纹均匀分布，则

$$dA_0 = dA_\omega + dA_e \quad A_0 = A_\omega + A_e \quad (4-3-1)$$

式中  $A_0$  ———— 基体表观面积；

$A_\omega$  ———— 基体缺陷面积；

$A_e$  ———— 基体有效面积；

$dA_0$  ———— 单位表观面积；

$dA_\omega$  ———— 单位缺陷面积；

$dA_e$  ———— 单位有效面积。

不考虑原始损伤，定义损伤变量  $\omega$  为

$$\omega = \omega_1 = \frac{A_{\omega 1}}{A_0} \quad (4-3-2)$$

假设声发射相对能量与单位基体面积破坏成线性关系, 即

$$\left. \begin{aligned} A_{\omega 1} &= \beta n_e \\ A_0 &= \beta N_e \end{aligned} \right\} (\beta \geq 1) \quad (4-3-3)$$

则

$$\omega_1 = \frac{A_{\omega 1}}{A_0} = \frac{n_e}{N_e} \quad (4-3-4)$$

损伤破坏准则为

$$\omega = \omega_c \quad (4-3-5)$$

基体完全破坏。

由图 4-3 可知

$$n_e = \frac{F - F_0}{F_{bm} - F_0} N_e \quad (4-3-6)$$

式中  $F$  ——— 试件载荷;

$F_0$  ——— 基体初始损伤的载荷;

$F_{bm}$  ——— 基体破坏载荷;

$n_e$  ——— 声发射累积相对能量值;

$N_e$  ——— 声发射总累积相对能量值。

(4-3-6) 式中的  $F$  还可以换成应力。

由图 4-3 已知  $F_0 = 0.1\sigma_b$ ,  $F_{bm} = 0.8\sigma_b$  ( $\sigma_b$  为破坏应力) 则

$$\omega_1 = \frac{A_{\omega 1}}{A_0} = \frac{n_e}{N_e} = \frac{F - 0.1\sigma_b}{0.7\sigma_b} \quad (4-3-7)$$

把  $\omega_1$  代入损伤演化方程

$$\sigma = E_1 \varepsilon (1 - C\omega_1) \quad (4-3-8)$$

式中  $E_1$  ——— 为试件初始模量;

$C$  ——— 修正系数。

$$E = E_1(1 - \omega_1) = E_1 \left( 1 - C \frac{F - 0.1\sigma_b}{0.7\sigma_b} \right) \quad (4-3-9)$$

由三维拉伸实验得到卸载点载荷及实测模量

$$E_1 = 128 \text{GPa}$$

$$F_2 = 0.6\sigma_b, E_2 = 106 \text{GPa}$$

将上述参数代入 (4-3-9) 式中进行计算确定修正系数  $C$ ，得

$$C = 0.25$$

$$\omega_c = 0.25$$

把修正系数  $C$  代入 (4-3-8) 式中，得到 A~B 阶段的材料损伤演化方程

$$\sigma = E_1 \varepsilon (1 - 0.25\omega_1) = E_1 \varepsilon \left( 1 - 0.25 \frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_{bm} - \sigma_0} \right) \quad (4-3-10)$$

式中  $E_1$  ———— 为试件初始模量；

$\sigma$  ———— 试件拉伸应力 ( $0 \leq \sigma < 0.8\sigma_b$ )；

$\sigma_0$  ———— 基体初始损伤的应力；

$\sigma_{bm}$  ———— 基体破坏应力，一般取 80% 破坏应力。

#### B~C 阶段

与 A~B 阶段处理方法相类似，可得到这阶段的材料损伤演化方程如下：

$$\sigma = E_1 \varepsilon (1 - C\omega_1) = E_1 \varepsilon \left( 1 - 0.125 \frac{\sigma - 0.8\sigma_b}{\sigma_b - 0.8\sigma_0} \right) \quad (4-3-11)$$

式中  $E_1$  ———— 为应力为  $0.8\sigma_b$  (破坏应力) 时的卸载模量；

$\sigma$  ———— 试件拉伸应力 ( $0.8\sigma_b \leq \sigma < \sigma_b$ )；

$$C = 0.125$$

$$\omega_c = 0.125$$

#### C~D 阶段

试件发生快速断裂。

实验值和理论预测值比较如图 4-3b 所示：

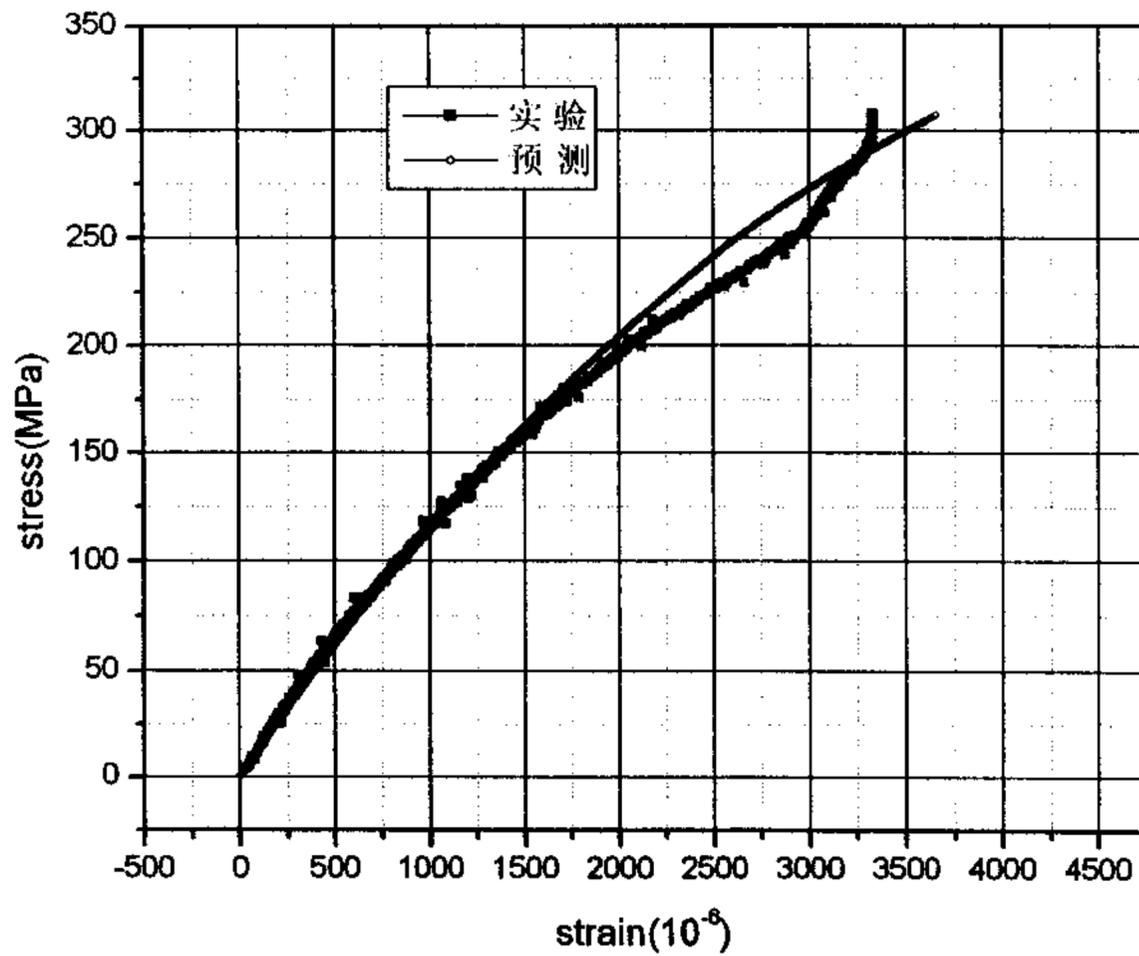


图 4-3b 实验与预测比较

### ● 本章小节

本章利用声发射相对能量表征单纤维束、二维编织、三维编织 C/SiC 复合材料的拉伸损伤。以声发射相对能量为中间变量定义了材料的损伤变量，从损伤统计分析的角度建立了材料的损伤模型，给出了 C/SiC 复合材料的破坏判据。

单纤维束 C/SiC 复合材料损伤表征采用纤维束模型，分两段建立单纤维束 C/SiC 复合材料的拉伸损伤演化方程，给出了单纤维束 C/SiC 复合材料的拉伸损伤演化方程的经验公式。

二维编织 C/SiC 复合材料的拉伸损伤表征采用平行杆元模型，建立二维编织 C/SiC 复合材料的拉伸损伤演化方程，给出了二维编织 C/SiC 复合材料的拉伸损伤演化方程的经验公式。

## 第五章 总结与展望

### 一、 主要结论

本文利用声发射技术,对 C/SiC 的纤维束、二维编织、三维编织单向拉伸实验进行了全程动态监测,探索性的研究了 C/SiC 材料的声发射特性以及损伤发展和演化过程。得到如下主要结论:

1. 确定了在诸多声发射特征参数中,声发射的事件数和声发射相对能量是表征 C/SiC 复合材料宏观损伤最有效的参数。
2. 单纤维束、二维编织和三维编织 C/SiC 复合材料由于结构形式不同,损伤机理和发展过程不同,表现出的声发射参量的特性也不同;试件初始状态和断口的显微观察证实了该推断。
3. 声发射累积相对能量和 C/SiC 复合材料的损伤演化有较好的相关性。尤其对三维编织 C/SiC 复合材料,拉伸主要过程(不包括最终断裂阶段)的声发射累积相对能量与应力的关系具有双线性,显示了该材料主要具有两种基本损伤阶段,即基体裂纹扩展和界面初步开裂阶段和界面大量开裂和纤维断裂阶段。拐点对应着试件最终强度的 80% 应力水平。本文将该应力定义为临界损伤强度。
4. 二维编织、三维编织 C/SiC 复合材料试样频谱分析,揭示了试件每一时刻的损伤基本上是由不同类型损伤的组合,很少有单一损伤独立发生。给出了各种类型损伤的频率特性。
5. 利用声发射累积相对能量和弹性模量衰减与应力变化的关系,确定了二维编织、三维编织 C/SiC 复合材料拉伸损伤的修正系数,初步定量给出了该材料拉伸损伤演化方程的经验公式并通过实验验证。

### 二、 展望

由于材料制备工艺的局限,材料内部存在大量的空洞和原生裂纹,再加上 C/SiC 编织复合材料结构的复杂性,使得材料损伤机理和失效模式变得非常复杂,这给 C/SiC 复合材料的损伤检测带了许多困难。经过本文的初步探索研究,发现以下方面还可以进行进一步的研究。

究:

1. 二维、三维编织 C/SiC 复合材料损伤与声发射传播速度的关系。论文中虽然没有涉及这方面的内容，但实际做了一些这方面的研究，只是数据量较少且分散没有使用。理论上讲，损伤的产生和发展肯定会影响声波的传播和衰减，但由于材料组份和结构的复杂性以及试件的分散性，需要大量试件进行试验研究，总结其规律。
2. 二维、三维编织 C/SiC 复合材料损伤与声发射费利西蒂 (Felicity) 比的关系。论文研究表明二维、三维编织 C/SiC 复合材料凯塞 (Kaiser) 效应不明显，主要是裂纹面摩擦引起的。如果能通过试验加载过程的显微观察，确定裂纹面摩擦的声发射相对能量，合理调整声发射仪的相关参数，屏蔽掉裂纹面摩擦的声发射相对能量，从而可以用费利西蒂 (Felicity) 比这一简单的声发射参数作为材料的失效判据，这对工程应用是非常有用的。
3. 二维、三维编织 C/SiC 复合材料损伤的频谱分析，可以更好地描述不同类型的损伤模式，还可以进一步细化各峰值的频段，对损伤类型和机理做出更详细的解释。
4. 显微观察与声发射特征参数的对应关系。“耳听为虚，眼见为实”，声发射“听”到的损伤需要有其他检测加以辅证，可以通过加载过程的显微观察确定声发射各特征参数与损伤类型的对应关系。
5. 充分考虑原生损伤、纤维方向、材料不同组份损伤的影响，建立各向异性材料损伤演化方程。

## 致谢

本文在导师矫桂琼教授的悉心指导下，经本人刻苦努力完成的。值此论文完成之际，特向矫老师表示最诚挚的感谢。矫老师渊博的知识、严谨的治学态度、不断进取的科研精神、正直的品德及宽广博大的胸怀使我受益匪浅，必将使我终身受益。

本文研究所用试件均由超高温复合材料实验室张立同院士课题组提供，在此对张院士课题组相关人员表示感谢。

论文完成过程中得到了材料力学实验室的卢智先高工、耿晓亮工程师、黄涛讲师以及王波博士、管国阳博士、陶亮博士、郭辉硕士、高峰硕士等师兄学弟的帮助和支持，在此对他们的无私的帮助和支持表示感谢，此外，我要深深地感谢我的妻子和家人，她们在我攻读硕士学位期间给予我理解和大力的支持，为我顺利完成学业提供了可靠的保证。

最后，向给予本人关心和支持的朋友表示衷心感谢。

## 参考文献

- [1] 张振瀛. 复合材料力学基础. 航空工业出版社, 1990 P1
- [2] 曲乃琴. 先进复合材料的研究现状与应用. 纤维复合材料, 1995. 3 [1] P45~54
- [3] 吴德隆 沈怀荣. 纺织结构复合材料的力学性能. 国防科技大学出版社, 1998 P2~4
- [4] 邹武 张康助. 陶瓷基复合材料在火箭发动机上的应用. 固体火箭技术, 2002. 6[23] 2 P60~68
- [5] 徐永东 张立同 成来飞. 三维碳 / 碳化硅复合材料显微结构与力学性能. 航空学报, 1997. 3 [18] 2 P197~203
- [6] 侯向辉 李贺军 刘应楼等. 先进陶瓷基复合材料制备技术-CVI 法现状及进展. 硅酸盐通报, 1999 [2] P32~36
- [7] 李光海. 声发射检验技术进展. 南昌航空工业学院学报, 2001. 6 [15] 2 P39~43
- [8] J. Kaiser ,Ph. D. Thesis, Technische Hochschule Munchen Munich. Germany, 1950
- [9] B. H. Schofield, Report ARL-150, Aeronautical Research Laboratory office of Technical Service, U. S, Dept. of Commerce, Washington, 1961
- [10] C. A. Tatro and R. G. Liptai, In proceedings symposium on physics and Non-destructive testing, Southwest Research institute, San Antonio, Tex(1962), p145
- [11] H. Dunegan, Acoustic Emission: A promising Technique, UCID4643, Livermore, CA:Lawrence Radiation Laboratory 1963
- [12] 胜山邦久著 冯夏庭译. 声发射(AE)技术的应用. 冶金工业出版社, 1997
- [13] 中国无损检测学会声发射专业委员会. 全国第八届声发射会议论文集. 北京 1999
- [14] 中国无损检测学会声发射专业委员会. 全国第七届声发射会议论文集. 北京 1997
- [15] 戴光 徐彦廷 李伟等. 声发射技术的应用与研究进展. 大庆石油学院学报. 2001. 9 [25] 3 P95~98
- [16] 张凤林 韩维 胡国才等. 声发射技术在航空领域的应用研究. 无损检测. 2000. 4 [22] 4 P157~161
- [17] Jonathan Awerbuch, Shahrokh Ghaffari EFFECT OF FRICTION-GENERATIONED EMISSION ON MONITORING DAMAGE IN COMPOSITE LAMINATES THROUGH ACOUSTIC EMISSION. Progress in Acoustic Emission III The Japanese Society of NDI. 1986 P638~652
- [18] 王健 金周庚 刘哲军. C/E 复合材料声发射信号小波分析及人工神经网络模式识别. 宇航材料工艺, 2001. [1] P49~57
- [19] M. Surgeon, E. Vanswijgenhoven, Mm. Wevers and O. Van Der Biest. Acoustic emission during tensile testing of SiC-fiber-reinforced BMAS glass-ceramic composites. Composites Part A 1997. [28A] P473-480
- [20] Gregory N. Morscher. Modal acoustic emission of damage accumulation in a woven SiC/SiC composite. Composites Science and Technology 1999. [59] P687~697
- [21] 杜伟坊 杜青海 李玉书. 用声发射预测静疲劳下陶瓷材料的断裂. 硅酸盐学报, 1994. 2 [22] 1 P51~56

- [22] W. A. Green, E. Rhian Green. Elastic waves in fiber composite laminates. *Ultrasonics*. 2000. [38] P228~231
- [23] Y. M. LIU, T. E. MITCHELL and H. G. WADLEY. ANISOTROPIC DAMAGE EVOLUTION IN A  $0^\circ/90^\circ$  LAMINATED CERAMIC-MATRIX COMPOSITE. *Acta materialia*. 2000[48] P4841~4849
- [24] Dea-Un Sung, Chun-Gon Kim, Chang-Sun Hong. Monitoring of impact damages in composite laminates using wavelet transform. *Composite*. 2002 Part B [33] P35~43
- [25] Mikael Johnson, Peter Gudmundson. Broad-band transient recording and characterization of acoustic emission events in composite laminates. *Composites Science and Technology*. 2000 [60]:P2803~2818
- [26] J. Bohse. Acoustic emission characteristics of micro-failure processes in polymer blends and composites. *Science and Technology*. 2000 [60] P1213~1226
- [27] 袁振明 马羽宽 何泽云. 声发射技术及其应用. 机械工业出版社, 1985 P. 10
- [28] 阿肯巴赫[美]著 徐植信 洪锦如译. 弹性固体中波的传播. 同济大学出版社, 1992. 4 P4~6
- [29] 铁摩辛柯 古地尔著 徐芝纶译 弹性理论. 高等教育出版社, P594
- [30] 沈功田 耿荣生 刘时风. 声发射信号的参数分析方法. *无损检测*, 2002. 2 [24] 2 P72~77
- [31] Miller Ronnie K. McIntire Paul. eds. *Nondestructive Testing Handbook (Vol. 5) Acoustic Emission Testing [M]*, Second edition, Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 1987.
- [32] ASTM E1316-1996, Standard Terminology for Nondestructive Examinations[S].
- [33] 耿荣生 沈功田 刘时风. 声发射信号处理和分析技术. *无损检测*, 2002. 1 [24] 1 P23~28
- [34] 纪洪广 张天森 张志勇等. 无损检测中常用声发射产生的分析与评价. *无损检测*, 2001. 7 [23] 7: P289~291
- [35] 杨盛良等. 复合材料损伤过程的声发射研究方法. *无损检测*, 2000. 7 [22] 7 P303~306
- [36] 航空航天工业部科学技术研究院编. 复合材料设计手册. 航空工业出版社, 1990
- [37] 刘学文 林吉中 元祖贻. 应用声发射技术评价材料疲劳损伤的研究. *中国铁道科学* 1997. 12 [18] 4 P74~81
- [38] 金周庚 刘哲军 王健等. B/AL 复合材料变形和断裂过程声发射特性. *稀有金属*, 1999. 5 [23] 3 P161~166
- [39] 杜伟坊 杜青海 李玉书. 陶瓷材料断裂源的声发射表征. *硅酸盐学报*, 1994. 10 [22] 5: P480~483
- [40] 陈兵 张东 姚武. 用声发射技术研究水泥基复合材料脆性. *无损检测*, 2001. 10 [23] 10 P421~423
- [41] 阳建红 王芳文 覃世勇. HTPB 复合固体推进剂的声发射的特性及损伤模型的验证和理论研究. *固体火箭技术*, 2000. 9 [23] 3: P37~40
- [42] 杨光松. 玻璃纤维束的声发射特征及统计损伤分析. *强度与环境*, 1989(2) P45~49
- [43] 余寿文 冯西桥. 损伤力学清华大学出版社. 1997. 12, P37~38

- [44] 余寿文 冯西桥. 损伤力学清华大学出版社. 1997. 12, P48~49
- [45] Krajcinovic D. Statistical Aspects of the Continuous Damage Theory. Int. J. Solid Structures. 1982 [18] 7 P551~562
- [46] Iwan W D. On a Class of Modles for the Yielding Behaviour of Continuous and Composite Systems. J. Appl. Mech. 1967 34 P612~617

作者:

潘文革

学位授予单位:

西北工业大学

## 相似文献(10条)

1. 期刊论文 李思辉,张慧萍,晏雄,LI Si-hui,ZHANG Hui-ping,YAN Xiong 声发射技术在防弹用复合材料检测上的应用-纺织科技进展2007,“(2)

介绍了利用声发射技术来检测防弹用复合材料的方法,阐述了声发射技术的原理、防弹复合材料防弹机理,并从小波分析、特征参数分析以及声发射源的定位分析几个方面进行了综述,指出了声发射技术检测防弹用复合材料的优势以及声发射技术对防弹复合材料检测所应攻克的重点。

2. 期刊论文 徐磊,王瑞,洪彩虹,杨秋红,XU Lei,WANG Rui,HONG Cai-hong,YANG Qiu-hong 声发射技术在复合材料振动性能测试中的应用-天津工业大学学报2008,27(6)

利用声发射技术对玻璃纤维/环氧树脂复合材料基臂梁的振动性能进行研究.采集基臂梁自由振动下的声发射(AE)信号,并对信号进行快速傅里叶变换(FFT)和频谱分析.结果表明:复合材料声发射持续时间较长,其主频率为108.5 Hz、阻尼系数为0.113.这一结果同电阻应变传感系统测得的梁的实际频率10.1 Hz、阻尼系数0.119非常接近,说明该方法用于复合材料固有频率测试时精确度高;而且同应变传感系统相比,能够反映复合材料的微观变化,对其振动损伤有重要意义.

3. 学位论文 周晓鸣 声发射技术在PE/PP层合板复合材料拉伸损伤分析中的应用 2007

本文通过声发射技术对UD/PP/PP复合材料在拉伸过程中的损伤发展、演化进行了试验研究.试验针对各组分单元(PP基体、UD/PP纤维束)、[0°]、[90°]单层板和(0°/90°)层合板的拉伸性能,运用多参数分析法,分析了PE/PP复合材料拉伸损伤的声发射特性,宏观上揭示了材料拉伸损伤的发展、演化过程和规律;并通过聚类分析和判别分析讨论了六种不同拉伸破坏形式的声发射参数特征和判别函数,定量讨论了不同破坏阶段的特征.

试验研究表明:

根据对声发射参数的定性分析,基体的声发射事件相对较少,活动性也较弱.[90°]单层板由于破坏集中在纤维与界面的粘结处,界面的强度也较弱.[0°]单层板则不同于[90°]单层板,由于加工工艺过程中,张力和平行度不均匀,材料热压和冷却固化导致的界面的初始应力和基体分布不均匀,界面粘胶不良等,[0°]单层板的破坏点数量多、信号的数量多,活动性强,层合板聚集了来自其中各个组份的破坏的特点.

从定量的角度描述了六种典型破坏的声发射特征:基体裂纹、界面横向开裂和纤维原生裂纹/弱节等细观破坏,具有幅度小(<50dB),振铃次数少(<15次),持续时间(<500 us)的特征;而基体断裂、纤维断裂、界面分离等宏观破坏具有幅度高(>50dB),振铃次数多(>40次),持续时间(>900us)的特征;根据定量和定性分析相结合,[0°/90°]层合板从破坏类型看,损伤主要来自于界面破坏,而基体破坏、纤维断裂的信号都占较小比例,最终材料发生突发性整体断裂.

根据六种基本拉伸破坏形式的声发射参数特征,对[0°/90°]层合板进行判别分析,其破坏机理大致为:拉伸开始阶段,几乎没有破坏,随着应力的不断加大,产生大量的界面破坏;材料进入破坏的主要阶段,部分开始纤维已经发生断裂,加速了周围基体的进一步破坏;起到抑制破坏作用的横向纤维束也与基体脱粘,层间分现象很严重;到了破坏的后期,纵向纤维束起到主要的承拉作用.随着纵向纤维的不断断裂,使得剩余纤维无法承受过大的拉伸载荷,而发生破坏.纵向单层板是层合板拉伸强度的主要控制因素,横向纤维的存在对整体的破坏起到了抑制的作用.

4. 期刊论文 刘怀喜,张恒,闫耀辰 声发射技术在复合材料中的应用及研究进展-纤维复合材料2002,19(4)

本文介绍了声发射的发展史和当前国内外声发射技术在复合材料方面的应用及发展现状,最后介绍了声发射技术应用于检测复合材料飞轮的损伤与断裂的研究情况.

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

超高相对分子量聚乙烯(简称为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,由于加工工艺的不合理以及加工条件的不尽理想必然会造成复合材料的缺陷,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.

声发射检测技术是对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、弹性变形相当较高,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/PP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特征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研究声发射信号,它是基于板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/PP复合材料层板中的最低阶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于层板的弹性特征.

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了解.分析可知最低阶反对称模式的信号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)所主要研究的对象.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/PP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依据.

利用断口实验研究了声发射信号在PE/PP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;进而研究了断口模拟信号以及试样拉伸断裂损伤定位问题.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与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;断口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,纤维铺层方式和铺层角度对材料拉伸破坏模式有较大的影响.PE/PP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. 会议论文 李小明,崔岩 声发射技术在SiCp/Al复合材料损伤及断裂研究中的应用 1996

应有声发射技术研究SiCp/Al复合材料的损伤及断裂微观机制,并成功地实现了对该材料早期损伤现象实时监测.

7. 期刊论文 董伟锋,朱建勋,张建钟,肖军 基于声发射技术的2.5维机织复合材料损伤机理研究-航空制造技术2009,“(z1)

利用声发射技术对2.5维交错机织复合材料在整个拉伸过程的各种损伤发展、演化进行了试验研究.结果表明:2.5维机织复合材料拉伸损伤演化可分为损伤初始、损伤严重和快速断裂3个阶段.

8. 期刊论文 潘文革,矫桂琼,管国阳,王波,PAN Wen-ge,JIAO Gui-qiong,GUAN Guo-yang,WANG Bo 三维编织C/SiC复合材料拉伸损伤演化-机械科学与技术2005,24(3)

利用声发射技术,对三维编织C/SiC复合材料在拉伸过程中损伤发展、演化进行了实验研究.实验采集了三维编织C/SiC复合材料拉伸过程的声发射信号,运用多参数分析法,分析了三维编织C/SiC复合材料拉伸损伤的声发射特性,宏观上揭示了材料拉伸损伤的发展、演化过程和规律.研究表明:三维编织C/SiC复合材料拉伸损伤演化可被分为两个主要阶段,损伤初始阶段和损伤严重阶段.

9. 期刊论文 江云飞 声发射技术在复合材料损伤模式识别中的应用-直升机技术2005,“(1)

应用模式分析技术,分析复合材料拉伸破坏试验中的声发射信号,提取复合材料不同破坏阶段下的声发射源信号的特征,进行了有关复合材料损伤模式识别的工作.

10. 期刊论文 方鹏,成来飞,张立同,栾新刚,梅辉,FANG Peng,CHENG Lai-Fei,ZHANG Li-Tong,LUAN Xin-Gang,MEI Hui C/SiC复合材料高温蠕变的声发射特性-无损检测2008,30(2)

利用声发射技术(AE)对C/SiC复合材料高温蠕变试验过程进行动态监测.通过声发射参数分析法对蠕变过程中的声发射能量随蠕变时间变化进行了分析;同时对蠕变过程中典型AE信号的频率特征进行了分析,揭示了C/SiC复合材料蠕变损伤的演化过程及规律,给出了材料蠕变损伤发展的不同阶段以及各阶段损伤类型.

## 引证文献(1条)

1. 张增光 2D-C/SiC复合材料的弹性常数预测及失效模式研究[学位论文]硕士: 2005

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis\\_Y525610.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y525610.aspx)

下载时间: 2010年5月27日