

疲劳裂纹的声发射信号检测技术

李耀东, 黄成祥, 侯力, 王小龙

(四川大学 制造学院, 四川 成都 610065)

摘要: 疲劳裂纹的萌生和扩展是机械零件在变载荷作用下的主要失效形式。使用近几年来得到迅速发展的模态声发射技术获取疲劳裂纹的声发射波形, 使接收到的声发射信号与声发射源的物理状态相关。在波形分析中采用参数分析法提取波形特征, 建立声发射参数和裂纹扩展速度之间的关系。由于综合采用了多种技术进行信号分析, 由信号特征得到的结果将更为准确。

关键词: 疲劳裂纹; 模态声发射; 参数分析

Detecting Acoustic Emission Signals from Fatigue Crack Propagation

Li Yaodong, Huang Chengxiang, Hou Li, Wang Xiaolong

(College of Manufacturing Sci. and Eng., SCU University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The origination and propagation of fatigue crack in mechanical elements under variable load is the main style of failure. In this paper, the modal acoustic emission (MAE) that has taken rapid development in recent years, is adopted to precisely acquire the AE signal waveform. In this way the received AE signal can be directly related with the genuine physical state of the AE sources. To extract the features of the detected crack, two equations are cited to set up the correlation between AE parameters and crack propagation velocity. Based on the MAE technique and parameter analysis technique, the obtained result is considered to be more accurate.

Key words: fatigue crack; modal acoustic emission; parameter analysis

0 引言

机械零件在受力状态下产生裂纹或塑性变形的时候, 往往伴随有声发射 (AE) 现象的出现。声发射本质上是一种弹性波, 它是以瞬态弹性波的形式迅速释放其内部积累的应变能的过程。裂纹的萌生和不连续扩展产生突发型声波, 而塑性变形产生连续型声波^[1]。声发射监控技术不需发射探测信号, 而只是“被动”监听由于零件结构变化而发射出来的声波信号; 通过分析所接收的信号, 对声发射源的位置、物理状态作出判断, 因而运用声发射技术可以实现零件服役状态的动态监控。传统的声发射仪主要使用谐振式传感器接收声发射信号, 形成了相对成熟的基于声发射参数的检测技术, 但由于共振频率低、频带窄, 表征声发射源特征的许多重要信号被忽略, 导致声发射源定位误差较大, 且判断结果和实际情况有较大出入, 影响了声发射

技术的进一步应用。近年来, 由于模态声发射理论的逐渐成熟和电子技术的飞速发展, 使采用宽带传感器的数字信号处理系统的实现成为可能。文章在对声发射波形进行分析的基础上, 采用参数分析法提取声发射源的特征, 以获得比较准确的评价结果。

1 疲劳裂纹的信号特征

从声发射源发出的声信号以弹性波的形式向四周传播, 由于扩展损失使声波衰减, 频率越高衰减越严重, 同时声发射波碰到界面时会被反射, 反射时会产生波形变换, 因此, 实际上到达传感器的声发射波实际上是经过多次发射和不同模式的波叠加的复杂波形。模态声发射 (MAE) 检测技术的关键是首先要准确地识别表征裂纹特征的声发射信号。

由于很多实际零件具有盘状结构, 因此可以利用基于板波理论的模态声发射技术分析来自此类零件内部的声发射信号。使用模态声发射技术可以在对声发射信号波形进行分析的基础上, 提取声发射源的有关特征, 如裂纹的大小、损伤程度和声发射源的方位等。

根据板波理论, 声发射波 (亦是一种机械波) 在平板内按三种模式传播: (1) 在板平面内沿传播方向运动的扩展波; (2) 垂直于板平面运动的弯曲波; (3) 在板

收稿日期 2003 - 08 - 20

基金项目: 四川省科技厅应用基础基金资助项目
(D302GY029 - 051)

作者简介: 李耀东 (1975 -), 男, 山西省岚县人, 研究生, 主要从事实时信号处理和计算机控制方面的研究。

黄成祥 (1948 -), 男, 四川成都人, 教授, 主要从事超声波检测和信号处理方面的科研和教学工作。

平面内垂直于传播方向运动的剪切波。一般在板状结构中只能检测到扩展波和弯曲波, 剪切波是很难检测到的, 并且其影响可以忽略不计。扩展波的传播速度最快, 且无色散效应, 且具有不同频率分量的扩展波按照相同的速度运动; 弯曲波的传播速度较慢, 有色散效应, 其传播速度与频率的平方根成正比。具有较高频率的弯曲波会先到达传感器, 由于衰减严重, 幅值较低; 具有较低频率的弯曲波会较晚到达传感器, 同时由于不同频率分量的分离, 弯曲波随着时间的推移, 幅度会逐渐衰减。如图 1 所示。

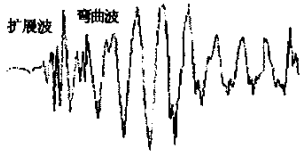


图 1 声发射信号波形

在板平面内的声发射源主要产生扩展波, 而板平面外的声发射源则主要产生弯曲波^[1]。根据经典板波理论, 扩展波的声速可表示为:

$$C_e = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\gamma^2)}} \quad (1)$$

式中, ρ 为被测材料的密度, E 为杨氏弹性模量, γ 为泊松比。

弯曲波的声速可表示为:

$$C_f = \left(\frac{D}{\rho h}\right)^{\frac{1}{4}} \sqrt{\omega} \quad (2)$$

式中, $\omega = 2\pi f$, f 为超声波频率, $D = Eh^3/12(1-\gamma^2)$, h 为板厚。

疲劳裂纹产生的是具有较大高频分量的扩展波分量, 而背景噪声信号和零件塑性变形产生的是频率相对较低的弯曲波分量。由于这两种波的频率范围不同, 波速不同, 波形特征亦存在明显差别, 因而可以通过波形分析的方法, 提取信号波形中表征疲劳裂纹萌生和扩展的扩展波, 同时有效抑制弯曲波的影响。提取出信号中的扩展波后, 根据波速和扩展波信号到达传感器的时间以及零件结构特征便可以计算出零件中疲劳裂纹的距离、位置。

2 信号参数与裂纹的关系

声发射信号的持续时间一般只有几十到数百微秒, 持续时间短, 数据量大, 依靠硬件记录、存储声发射信号的瞬态波形比较困难, 不仅硬件投入较大, 而且很难保证实时性, 于是综合波形分析和参数分析的特点, 用前向通道中的高通滤波器提取出声发射信号中的扩展波后, 用参数分析的方法提取波形特征, 对疲劳裂纹的扩展过程进行预测。

常用的波形分析参数有幅值 (Amplitude)、振铃数 (Counts)、持续时间 (Duration)、上升时间 (Rise time)

和相对能量 (Relative energy), 其特征含义如图 2 所示。

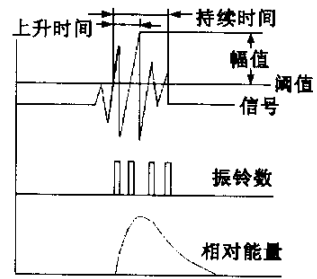


图 2 声发射信号参数

由于传感器每振荡一次就输出一个振铃脉冲, 它随载荷循环次数的变化情况集中反应了疲劳裂纹信号的主要特征, 因此我们使用声发射信号的振铃数来预测裂纹的扩展速度。

由材料的等幅载荷试验表明, 疲劳裂纹的扩展速度 da/dn 随应力密度因子幅度 ΔK 变化, 在双对数坐标上可用图 3 表示^[2]。

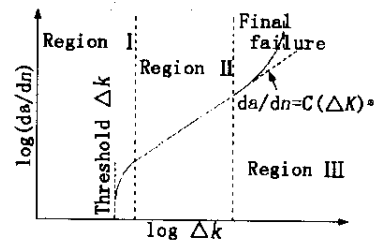


图 3 $da/dn - \Delta k$ 曲线

图 3 中 I 区为初始稳定扩展区, 该区存在一个疲劳裂纹扩展应力强度因子的阈值。III 区为裂纹快速扩展区, 它以平面应变材料的断裂韧性值为渐进线, 在该区内 da/dn 急剧上升而产生瞬间断裂。II 区为裂纹稳定扩展区, 是裂纹扩展的主要部分, 可近视为直线, 该直线满足 Paris - Erdogan 方程^[3]。

根据 Paris - Erdogan 方程, 疲劳裂纹的扩展速度可用式 (3) 表示

$$\frac{da}{dn} = C(\Delta K)^m \quad (3)$$

式中, a 表示裂缝长度, n 为疲劳循环的周期数, ΔK 为应力密度因子幅度, C 和 m 是随材料性质而定的常量。

为了建立声发射信号参数和疲劳裂纹扩展速度的关系, Gong Z 等^[4]提出应用声发射记数率表示应力密度因子幅度, 其方程如下:

$$\frac{d\eta}{d\eta} = B(\Delta K)^p \quad (4)$$

其中, η 表示声发射信号的振铃数 (Counts), B 与 p 为根据材料特性而定的常量。

于是，将式 (4) 代入式 (3) 可得方程 (5)：

$$\frac{da}{dn} = \alpha \left(\frac{1}{B} \frac{d\eta}{dn} \right)^m \quad (5)$$

该方程建立了声发射参数 (振铃率) 与疲劳裂纹扩展速度相互关系的数学模型，是对零件结构完整性进行预测、评价的主要依据。

3 试验结果与分析

单个声发射事件的持续时间很短，频带很宽，高频成分穿过物体时衰减严重，而低频成分又与机械噪声重叠，不易分离，因此用较高的通频带检测声发射信号，并进一步提取出表征疲劳裂纹特征的频率较高的扩展波分量。我们在参考国外同类声发射检测仪的基础上，最后确定声发射传感器的频带范围为 100 kHz ~ 1.2 MHz。

图 4 是我们设计的一种四通道声发射监控仪，用来对零件运行过程中产生的疲劳裂纹进行在线监测，(图中只示出了单一通道的结构)：

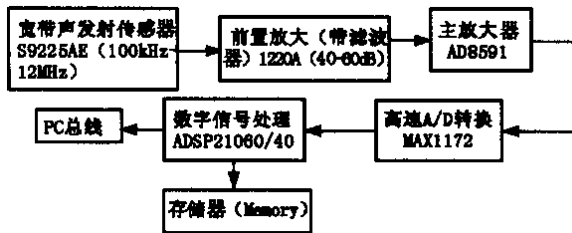


图 4 多通道声发射监控仪结构框图

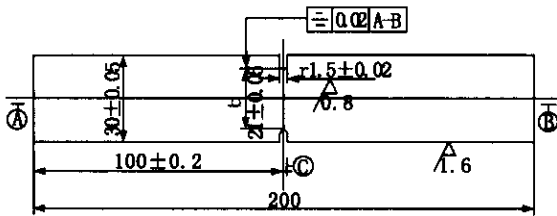


图 5 轴向加载矩形截面 U 形缺口试样

然后，对图 5 所示试样 (材料为 A3) 进行轴向拉伸疲劳实验。声发射传感器安装于 U 形缺口对称面右侧 30 mm 处，同时又处于试样轴向对称面上。

试验在 SCHENCK 250 kN 材料试验机上进行。试验条件如下：

最大载荷 (kN)	最小载荷 (kN)	频率 (Hz)	阈值 (dB)
8	2	8	40

使用该声发射仪记录疲劳裂纹萌生和扩展过程中产生的声发射信号，然后重构采样信号，在使用较高的通频带和用较大的阈值水平滤除背景噪声的基础上，再使用小波分析的方法进一步滤除背景噪声和弯曲波信号的分量，突出表征裂纹的扩展波分量，同时有效抑制其它

信号的影响，最后得到的试件断裂瞬间的信号波形如图 6 所示。

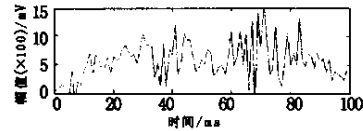


图 6 试件疲劳断裂过程中的 AE 信号

再根据式 (4) 计算裂纹长度随疲劳循环周期数的变化率，而后积分可得整个疲劳循环过程中裂纹长度随时间的变化情况，如图 7 所示。

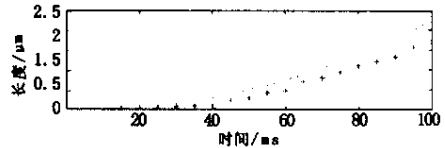


图 7 试件断裂过程中裂纹长度

图中的离散点是由超声波探伤的方式每隔 4 min 测量的裂纹长度值，可认为是裂纹的实际长度值。

由图 7 可见，通过声发射信号参数计算的裂纹长度大于实际长度。这主要是因为疲劳裂纹的闭合以及裂纹面间的摩擦产生声发射信号，导致振铃数增加，进而导致计算误差增大。由此可见，用声发射参数计算的裂纹长度偏大，计算结果偏于保守，但作为工程测量来说，声发射技术不失为一种动态检测零件疲劳裂纹的有效方法。

4 结论

采用模态声发射的基本理论，对采集到的声发射信号的波形进行分析，进而提取反映裂纹特征状态的声发射参数，是实现零件疲劳裂纹状态检测的一种切实可行的方法。但是由于声波在传播界面的反射以及由于传播过程的衰减，有可能使测试结果和实际情况产生一定的出入，因此对于如何有效地减少测量误差，使测量结果尽可能地逼近实际结果，还需要做深入的研究。

参考文献：

[1] 耿荣生, 沈功田, 刘时分. 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.

[2] Parker A P. The mechanics of fracture and fatigue [M]. London: E and F N Spon Ltd, 1981.

[3] Maddox S J. Fatigue strength of welded structures [M]. Cambridge: Abington Publishing, 1991.

[4] Roberts T M, Talebzadeh M. Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(6): 695-712.

疲劳裂纹的声发射信号检测技术

作者: [李耀东](#), [黄成祥](#), [侯力](#), [王小龙](#)
 作者单位: [四川大学, 制造学院, 四川, 成都, 610065](#)
 刊名: [计算机测量与控制](#) **ISTIC** **PKU**
 英文刊名: [COMPUTER MEASUREMENT & CONTROL](#)
 年, 卷(期): 2004, 12(6)
 引用次数: 5次

参考文献(4条)

1. [耿荣生, 沈功田, 刘时分](#) 基于波形分析的声发射信号处理技术[期刊论文]-[无损检测](#) 2002(06)
2. [Parker A P](#) The mechanics of fracture and fatigue 1981
3. [Maddox S J](#) Fatigue strength of welded structures 1991
4. [Roberts T M, Talebzadeh M](#) Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation 2003(06)

相似文献(6条)

1. 期刊论文 [李耀东, 黄成祥, 侯力, Li Yaodong, HUANG Chengxiang, HOU Li](#) 模态声发射技术在构件疲劳裂纹检测中的应用 -[振动与冲击](#)2005, 24(2)

疲劳裂纹的萌生和扩展是机械零件在变载荷作用下的主要失效形式, 在变载荷下出现疲劳裂纹的同时往往伴随着弹性波的扩散, 以迅速释放其内部积累的应变能. 使用近几年来得到迅速发展的模态声发射技术真实地获取疲劳裂纹的声发射波形, 使接收到的声发射信号较完整地反映了声发射源的物理状态. 在波形分析中采用参数分析法提取声发射波形特征, 建立模态声发射参数和裂纹扩展速度之间的数学关系. 由于综合采用了多种技术的优点进行信号分析、处理, 因此根据声发射信号特征得到的结果将更加逼近实际状态.

2. 学位论文 [李海玲](#) 声发射技术在抽油杆疲劳裂纹扩展试验中的应用 2007

抽油杆作为油井采油作业的主要部件, 一旦在井下发生断裂, 将给油田生产带来很大损失. 为了在抽油杆发生断裂之前就检测出业已存在的裂纹缺陷, 避免抽油杆断裂事故的发生, 需要应用无损检测技术. 因此本文尝试在抽油杆试件的疲劳试验中, 利用声发射技术对抽油杆试件进行实时监测. 通过利用AE监测技术可以更早发现裂纹的萌生、位置及扩展情况, 能有效地发现损伤部分和损伤程度. 改进及提高声发射技术对疲劳试验状态下的裂纹检测效率和精度, 是准确评估抽油杆试件疲劳寿命的关键, 因此本文基于将声发射技术应用到抽油杆疲劳裂纹检测中, 对噪声的抑制、合理地参数表达以及声发射源定位问题进行了研究, 主要工作如下:

(1) 分析噪声的来源, 从硬件设置和软件补偿方面对如何抑制环境噪声进行研究. 根据环境中机械噪声和电磁噪声的特点, 首先对传感器的布置进行了研究, 并进行相应的硬件设置, 对采集到的含裂纹信号再进行软件补偿, 最后得出有用信号.

(2) 根据抽油杆的声发射特性, 找出抽油杆疲劳裂纹扩展特征和声发射特征参数之间的关系, 并总结出规律. 并通过分析选择撞击数和能量参数来表征抽油杆试件疲劳裂纹扩展的各个阶段.

(3) 根据抽油杆的声发射特性, 研究检测探头的布置规律, 以提高定位精度. 分析了产生声源定位误差的主要因素: 伪定位、漏定位、时差测量误差、波速测量误差及定位方法引起的误差, 并提出了相应的解决办法. 在试验中采用铅芯作为模拟源来测量波速, 最后通过定位图来分析误差产生的原因.

(4) 对比分析了模态声发射理论与传统声发射理论的不同之处, 以小波分析理论为基础进一步对定位进行了研究, 提高了定位精度. 并将其应用到试验当中, 进一步验证了采用波形分析技术能更有效地进行缺陷定位.

(5) 应用小波分析来识别复杂波形中各种不同模态的波, 以及声发射事件的到时和持续时间.

3. 期刊论文 [刘晶, 陈积懋, Steve Ziolo, Liu Jing, Chen Jimao, Steve Ziolo](#) 应用模态声发射进行自动源识别 -[无损检测](#)2000, 22(2)

疲劳裂纹的生长已成为构件延寿工作关注的焦点. 模态声发射由于无需扫查工件而利用裂纹生长产生的能量来实现检测, 从而显示了极大的优越性. 模态声发射在检测过程中采集几千个波形, 其中只有一部分是裂纹生长所产生的. 讨论了几种数字信号处理方法, 并给出了这些程序的应用结果.

4. 期刊论文 [耿荣生, 沈功田, 刘时风](#) 模态声发射——声发射信号处理的得力工具 -[无损检测](#)2002, 24(8)

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.

5. 期刊论文 [刘松平, 刘晶](#) 疲劳裂纹的模态声发射检测 -[无损检测](#)2000, 22(3)

介绍模态声发射典型信号特征及其在飞机疲劳裂纹监测中的典型应用.

6. 学位论文 [江云飞](#) 声发射技术在直升机动部件疲劳系统研究中的应用 2005

在直升机部件的疲劳试验及强度研究中, 利用声发射技术监测可以更早发现裂纹的萌生、位置及扩展等情况, 能有效地发现损伤部位和损伤的程度. 因而开展声发射技术的研究, 进一步改进和提高疲劳试验状态下裂纹检测的效率和精度, 对准确评估直升机各重要构件寿命是非常关键的. 在本文中, 我在传统的参数式声发射技术的基础上, 应用了模态声发射技术. 通过模态分析手段来分析复合材料损伤破坏过程中声发射信号与损伤程度之间的相关性特征, 并对直升机动部件进行日历延寿技术进行了研究. 主要完成的工作如下: 通过对比试验来验证参数式声发射技术和模态式声发射技术的理论, 分析两种声发射技术的优缺点, 找到各自最佳的应用范围. 应用模态分析技术, 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. 应用声发射技术中凯塞效应理论研究直升机动部件日历延寿技术.

引证文献(5条)

1. [骆志高, 李举, 王祥](#) 声发射技术在疲劳裂纹检测中的应用[期刊论文]-[制造技术与机床](#) 2008(10)
2. [弓满锋, 乔生儒, 姬浩, 张程煜, 韩栋](#) 采用声发射技术测试电镀氧化铝涂层力学性能[期刊论文]-[无损检测](#) 2008(9)
3. [毛汉颖, 曾德良, 黄振峰, 丁金玲](#) 一种疲劳试验机测试系统的设计[期刊论文]-[广西工学院学报](#) 2008(2)
4. [吴艳, 许宝杰, 徐小力](#) 声发射用于旋转机械故障诊断的实验研究[期刊论文]-[北京机械工业学院学报\(综合版\)](#)

2005(3)

5. [孙永兴](#) [钻柱失效的动态断裂力学研究](#)[学位论文]硕士 2005

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_jsjzdclykz200406002.aspx

下载时间: 2010年5月31日