

基于小波能量系数的海洋平台管节点 疲劳裂纹扩展 AE 信号识别

刘贵杰,徐萌,李思乐,吴乃龙

(中国海洋大学工程学院,青岛 266100)

摘要:提出一种海洋平台管节点疲劳裂纹扩展状况识别方法,将小波分配尺度谱和小波能量系数应用于海洋结构构件的典型疲劳裂纹扩展和断裂声发射信号的特征提取,提高了尺度图像的聚集性,排除了噪声干扰;通过海洋平台典型管节点模型断裂试验,运用 PXWAE 声发射检测仪对试件断裂全过程进行监测,成功提取到裂纹扩展和断裂过程中的声发射信号。结果表明,小波能量系数的变化与裂纹发展状态的变化呈现良好的一致性,能够准确、直观、清晰地表征出裂纹扩展不同阶段 AE 信号的特征,能够有效应用于海洋平台管节点疲劳损伤状态的在线实时监测和故障诊断。

关键词:海洋平台管节点;裂纹扩展;声发射;小波分析;能量系数法

中图分类号:TP391.9;TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2013)02-0001-07

AE Signal Identification of Offshore Platform Tubular Joints Crack Propagation Based on Wavelet Energy Coefficient

LIU Gui-Jie, XU Meng, LI Si-Le, WU Nai-Long

(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: An identification method of the offshore platform tubular joints fatigue crack propagation was proposed. Wavelet allocation scalogram and wavelet energy coefficient method were applied for the feature extraction of acoustic emission(AE) signal of marine structures typical fatigue crack propagation and fracture at the same time. The method could improve the aggregation of scalogram by excluding noise. By making the typical tubular joints model fracture experiments of the offshore platforms and using PXWAE AE detector to monitor the whole process of the specimen fracture, the paper successfully extracted the AE signals of crack propagation and fracture process. The analysis results demonstrated that the variation of wavelet energy coefficient and the change of crack propagation state were in a good consistency and could characterize the AE signals characteristics of different stages of crack propagation accurately, intuitively, and clearly. It could be used effectively in online real-time monitoring and fault diagnosis of offshore platform tubular joints fatigue crack.

Keywords: Offshore platform tubular joints; Crack propagation; AE; Wavelet analysis; Energy coefficient method

海洋平台广泛应用在海洋油气资源的勘探和开发领域。由于长时间受到海风、海浪、海冰以及潮汐等各种随机载荷综合作用,加之海洋环境腐蚀、材料老化及材料缺陷和多种累积损伤的影响,降低了平台构件的整体抗力,严重影响了结构的安全性和耐

久性^[1]。管节点作为导管架海洋平台的重要连接方式,在复杂载荷作用下,交贯线焊缝焊趾处易产生裂纹及扩展等破坏现象,严重影响结构的稳定性。因此,探索动态裂纹的声发射信号特征,对于研究海洋结构构件管节点在线健康监测及损伤评估具有重要意义。

声发射技术具有监测导管架海洋平台结构裂纹的能力,可在裂纹发展早期进行监测和定位,灵敏度很高,特别适合在线、连续和远程监测^[2]。Rogers^[3]等研究了 T 型接头疲劳裂纹发展时的声发射现象,用电位差方法得到了疲劳裂纹声发射和裂纹扩展的

收稿日期:2011-02-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175485);山东省自然科学基金资助项目(ZR2009FM011)

作者简介:刘贵杰(1968—),男,教授,硕士研究生导师,主要从事机械加工过程智能监控、海洋机电装备技术等方面研究。

关系,第一次阐明了裂纹闭合声发射比裂纹增长声发射的幅度要低。Harris 和 Dunegan^[4]利用声发射技术对疲劳裂纹的扩展现象进行了连续监测,探索了裂纹扩展特征与声发射参数之间的关系,包括阈值设置和传感器频率选择等。Wang^[5]等研究了海洋平台 A537 钢在疲劳裂纹扩展过程中的声发射现象,认为声发射事件率和应力强度因子对数存在着一定的线性关系。林丽等^[6-7]将局域波方法运用到导管架海洋平台模拟声发射信号的特征提取中,通过对预制裂纹的平台模型试验,分析声发射信号特征。

目前,在导管架海洋平台声发射监测研究中主要采用传统的参数分析方法进行特征提取,不能全面、清晰、快速地表述声发射信号的特征,不能很好地应用于海洋平台疲劳损伤的在线监测及损伤程度评估。基于裂纹扩展理论,采用小波分配尺度谱和小波能量系数法进行海洋结构件管节点疲劳裂纹扩展过程 AE 信号的特征提取,以提高尺度图的聚集性,降低噪声污染,通过典型管节点断裂试验,建立小波能量系数与裂纹扩展过程之间的关系,从而实现清晰、快速的裂纹扩展状态识别,为管节点裂纹健康状况在线监测及损伤程度评估奠定基础。

1 理论分析

1.1 小波及小波包分析理论

具有零均值、在时域和频域内能量局部化的函数称为小波,表现为两端衰减为零的小波波形^[8]。小波分析可以同时从时域和频域两个方面表征信号局部特征,而且可以根据信号的具体形态灵活调整时间窗和频率窗的大小。

对于能量有限的函数空间 $L^2(R)$ 内,如果存在可允许小波(基小波) $\psi(t) \in L^2(R)$,满足容许性条件 C_ψ :

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

式中: $\hat{\psi}(\omega)$ 为 $\psi(t)$ 的傅里叶变换; ω 为圆频率。

由基小波通过伸缩、平移后得到的小波函数可表示为:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

式中: a 为非 0 的尺度因子或伸缩因子,表征频率参数; b 为平移因子,表征时间或者空间位置。

尺度因子和平移因子是连续变化的,所以 $\psi_{a,b}(t)$ 是连续小波基函数^[9]。

设时域信号 $f(t) \in L^2(R)$,针对连续小波函数

$\psi_{a,b}(t), f(t)$ 的连续小波变换(Continue Wavelet Transform,CWT)定义为^[9]:

$$(W_\psi f)(a,b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中: $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示内积; $(W_\psi)(a,b)$ 为小波系数。

如果得出信号在小波函数 $\psi_{a,b}(t)$ 上的分量,通过展开参数 (a,b) 便可以实现不同时刻和精度的频谱分析。信号通过小波变换计算出小波系数,小波系数是尺度 a 和位置 b 的函数。

小波包的定义:设 $\varphi(x)$ 和 $\psi(x)$ 分别是尺度函数和小波函数:

$$\text{令 } \psi_0(x) = \varphi(x) \quad \psi_1(x) = \psi(x) \quad (4)$$

$$\psi_{2i}(x) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h_k \psi_i(2x-k) \quad (5)$$

$$\psi_{2i+1}(x) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} g_k \psi_i(2x-k) \quad (6)$$

式中: h_k, g_k 为多分辨分析中的滤波器系数。

定义的函数 $\{\psi_n\}$ 称为关于尺度函数 $\varphi(x)$ 的小波包。

小波包变换提供了一种更为精细和灵活的分析方法,对频带进行多层次划分,对小波分析没有细分的高频信号进行深层次的分解,提高了时频分辨率。

1.2 小波能量系数法

k 层小波分解后的结果是将原始信号分解为 $k+1$ 个频率范围的分量,因此信号的总能量可以通过各层小波系数的能量来表示:

$$E_f = E_{a_k} + \sum_{j=1}^k E_{d_j} \quad (j = 1, 2, \dots, k, k \in \mathbb{Z}) \quad (7)$$

式中: E_f 为信号总能量; E_{a_k} 为 k 尺度分解时,近似小波系数的能量; E_{d_j} 为第 j 层细节小波系数的能量。

为了更好地体现信号的变化规律,把量纲归一化后的系数称作小波能量系数,即:

$$\gamma_a = \frac{E_{a_k}}{E_f}, \quad \gamma_d = \frac{E_{d_j}}{E_f} \quad (j = 1, 2, \dots, k, k \in \mathbb{Z}) \quad (8)$$

小波能量系数表现了各频率区间内信号的能量分布情况,分布不同则声发射源的特征不同,损伤状况也就不同,因此,通过比较各层小波系数的变化,获取不同阶段裂纹扩展的时频特征,建立小波能量系数与裂纹扩展过程之间的对应关系,小波能量系数可以有效地表征管节点裂纹扩展过程中的声发射特征。

2 裂纹扩展试验

根据断裂力学理论,裂纹从形成到断裂需要三个阶段,即裂纹萌生、裂纹扩展、失稳断裂。裂纹的形成和扩展与材料的塑性变形有关,一旦裂纹形成,材料局部地区的应力集中得到卸载,产生声发射,这三个阶段都可产生强烈的声发射源。

选用典型海洋平台结构 T 型管节点进行疲劳试验,对管节点进行有限元分析找出管节点最容易破坏的位置并预制裂纹,使用 WE-60 型液压式材料疲劳试验机对试件进行疲劳试验,采用鹏翔科技全波形声发射检测仪进行声发射信号提取。

2.1 T 型管节点几何模型及参数

管节点的材料选用综合力学性能较好的高强度结构钢 D36,支管与主管的焊缝尺寸遵循美国焊接协会(AWS)几何特征参数:

$$\alpha = \frac{2L}{D}, \quad \beta = \frac{d}{D}, \quad \gamma = \frac{D}{2T}, \quad \tau = \frac{t}{T} \quad (9)$$

式中: α 为弦管长度系数; β 为支弦管直径比; γ 为弦管壁厚系数; τ 为支弦管壁厚比; d 为支管直径; D 为弦管直径; L 为弦管长度; t 为支管厚度; T 为弦管厚度。

典型的 T 型管节点几何模型及其几何参数符号如图 1。

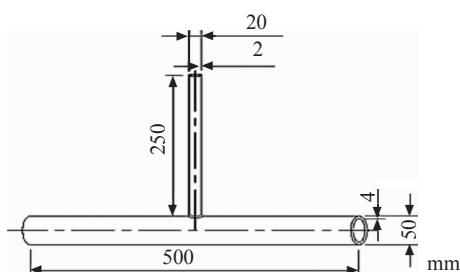


图 1 T 型管节点的几何模型

焊接后对试件预制裂纹位置及大小通过有限元分析确定(图 2),在管节点支管端部,沿弦管的轴线方向施加 10 kN 的载荷,确定最易破坏的位置在距离弦管轴线 30.5 mm 处,与焊缝熔线相距 2.5 mm。用 0.18 mm 的钼丝沿支管的径向方向在该位置线切割预制深 1 mm 的裂纹。

2.2 试验数据采集

将谐振频率为 150 kHz、灵敏度大于 65 dB 的 PRX15 声发射传感器用耦合剂粘贴在 T 型管节点焊缝两侧(如图 3),用以拾取管节点裂纹扩展 AE 信号;选用频率响应为 0.01~4 MHz,±0.2 dB 的

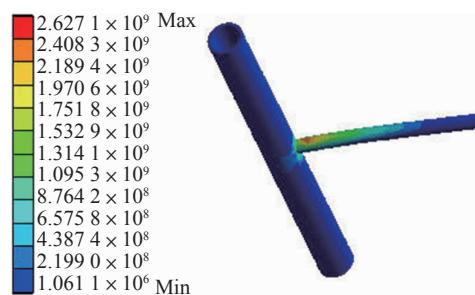


图 2 T 型管节点有限元分析

PXDAQ 声发射采集卡;频率带宽为 15 kHz~2 MHz,增益为 40 dB 的 PXRA 前置放大器以及可实时全波形显示声发射信号及特征参数的信号采集软件 PWAE-S 进行声发射信号采集及分析。



图 3 传感器布置及试件断裂实物图

设定声发射检测仪采样频率为 1 024 kHz,单波形采样时间为 16 ms,触发方式为上升沿软件触发。对裂纹扩展声发射信号采取全波形采集,由于试验环境噪声影响,将对采集到的信号进行滤波,去除背景噪声以达到裂纹扩展信号的准确识别。使用压力机对试件进行加载,试验加载至 2 kN 时,压力机显示载荷下降,此时已经超过试件的极限载荷,裂纹开始扩展。当载荷下降至 0.75 kN 时,试件发生断裂。全过程声发射信号的总采样时间为 160 s。

3 声发射信号小波分析

3.1 裂纹扩展信号的背景噪声滤波

由图 4 可知,采集到的声发射信号背景噪声非

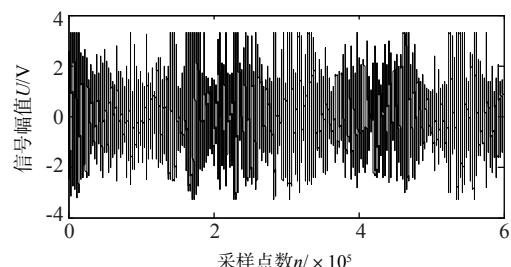


图 4 裂纹扩展试验声发射信号

常严重,导致无法准确识别裂纹扩展激发的声发射信号,因此,需要滤除背景噪声,还原真实的裂纹扩展信号,即通过小波包分解、重构和滤除低频噪声。图 5 为小波包重构后真实裂纹扩展的声发射信号及频谱图。

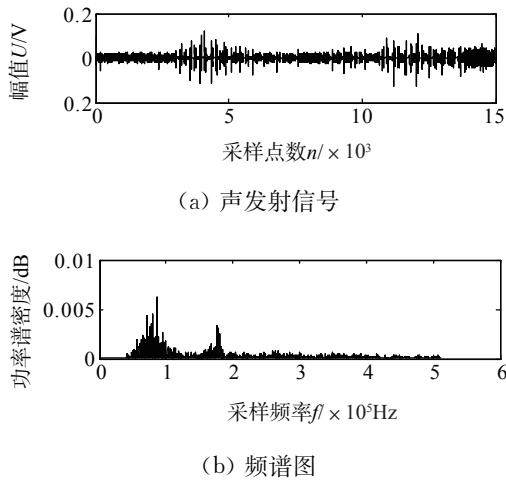


图 5 裂纹扩展声发射信号及其频谱图

3.2 裂纹扩展信号小波变换尺度分配谱的确定

裂纹扩展过程中产生的声发射信号数据量比较大,且属于非平稳信号,在选择小波基时应尽量减少或者避免数据失真,准确实现小波分解;进行离散小波变换以尽量减少小波变换时的计算量;各尺度的小波变换应能够较好地包含和反映缺陷信息;为了凸显声发射信号特征,要有一定阶次的消失矩;小波基在时域和频域上均应具有一定的局部分析能力,即在时域上具有紧支集,在频域的频带上具有快速衰减特性。

综合考虑以上各方面的要求,结合各小波函数的特点,选择 Daubechies 小波作为小波分析的小波基,消失矩阶数一般选择 4~7 左右。根据采样定理,若采样频率为 f ,则所采集信号的频率区间为 $[0, f/2]$ 。由小波变换的基本理论,在进行小波分解时,低频部分和高频部分的频率分布是对称的。尺度为 k 时,原始信号可分解为 $k+1$ 个频率区间,第 k 层的频率区间为 $\left[0, \frac{f}{2^{k+1}}\right]$ 和 $\left[\frac{f}{2^{k+1}}, \frac{f}{2^k}\right]$ 。在确定分解尺度时,应该保证识别频率不大于最低的信号频率^[8]。

由图 5 可知,试验中声发射信号的活动频率分布都在 10 kHz 以上,设定采样频率为 1 024 kHz,由公式:

$$\frac{f}{2^{k+1}} \geq 10 \quad (10)$$

得分解尺度:

$$k \leq \log_2 \frac{f}{20} = \log_2 \frac{1024}{20} = 5.6781 \quad (11)$$

选用 dB5 小波分别对试验中采集的声发射信号进行 5 层和 6 层分解,根据实际的分解效果来确定具体的分解尺度。图 6 为 5 层和 6 层的小波分解结果。比较图 6(a)和 6(b)可知,6 尺度分解时,第六层低频系数主要在 0 附近作微小波动,对信号分析和能量提取意义甚微,而 5 尺度分解时,各层高频小波系数和低频近似系数都能有效地体现该频率段的信号特征,因此,选用 5 尺度小波分解,可以提高小波尺度图的聚集性,降低噪声干扰,清晰、快速地建立裂纹扩展信号与小波能量系数的关系,实现裂纹扩展及损伤程度的识别。

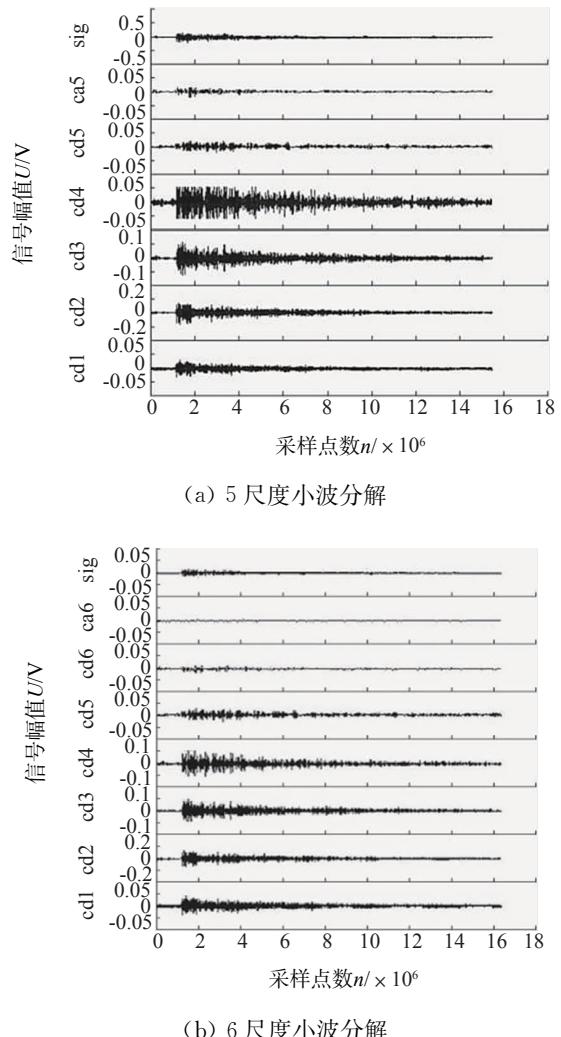


图 6 声发射信号多尺度小波分解

3.3 裂纹扩展信号小波分析及特征提取

运用 Matlab 小波分析工具,分别对疲劳裂纹扩展三个阶段的声发射信号进行小波分解和重构,滤

除与背景噪声相对应的小波系数,分析裂纹扩展各阶段信号时频特征,建立小波能量系数与裂纹扩展之间的对应关系。

3.3.1 塑性变形阶段

图7为塑性变形阶段声发射信号。加载前,由于预制裂纹造成的影响,试件发生屈服所需的作用力较小,裂纹萌生的塑性变形阶段相对较短,此时的声发射活跃程度比较低。随着外力的不断作用,试件的形状发生变化,材料内部发生位错运动和滑移运动,预制裂纹尖端的应力集中得到卸载,声发射信号逐步加强,在达到屈服后,声发射信号会减弱。

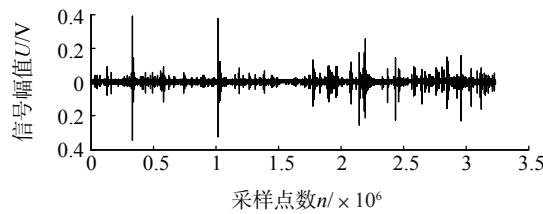
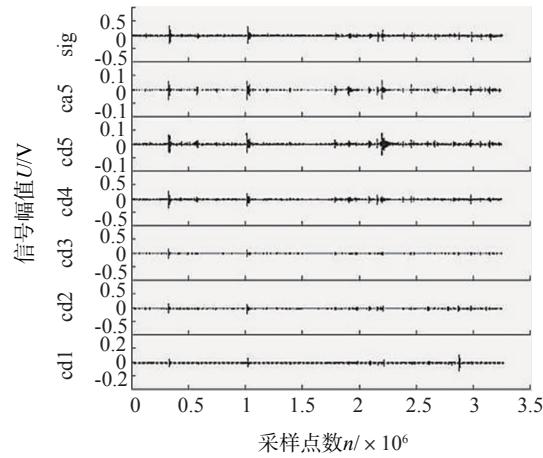


图7 塑性变形阶段声发射信号

图8为塑性变形阶段产生的声发射信号小波分解结果及小波能量系数分布。在塑性变形区内,声发射信号主要集中在高频部分的第二层、第三层和



(a) 声发射信号多尺度分解

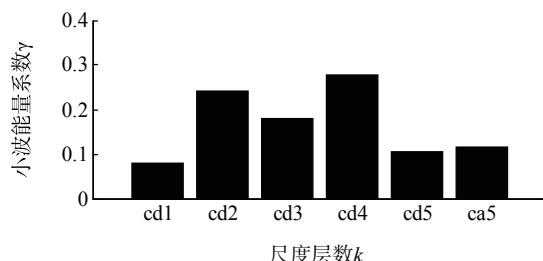


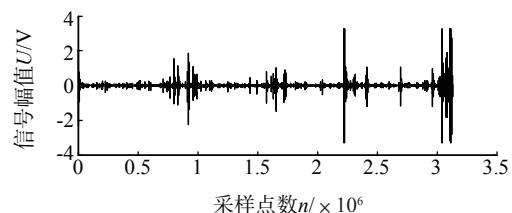
图8 塑性变形阶段声发射信号小波能量系数分析

第四层,分别占总能量的24.07%,18.07%,27.77%,而频率分布在0~32,32~64 kHz以及256~512 kHz内的声发射信号比较弱,所占比例分别为10.57%,11.50%和8.02%。

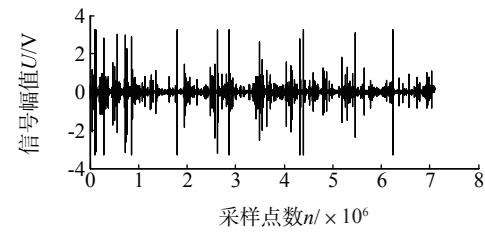
3.3.2 裂纹扩展阶段

经过塑性变形区后,试件进入裂纹扩展阶段,此时微观裂纹已发展为宏观裂纹,在外力的作用下,裂纹进一步扩展,不断产生新的位错滑移,材料不断释放弹性波,声发射更加活跃,信号强度显著增加,而且由连续型发展为突发型信号,并呈现出一定的周期性。

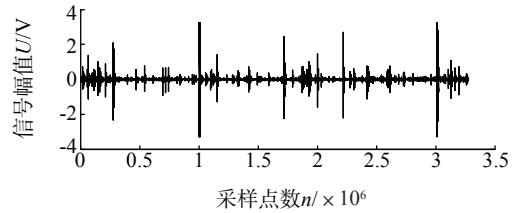
在连续单向加载时,裂纹在扩展产生的声发射信号要经历“弱-强-弱”三个阶段,这是由于裂纹在扩展开始后,在载荷的作用下,会经历裂纹尖端钝化、扩展、再次钝化的过程。随着载荷的进一步增加,这三个过程重复发生,因此,为了能够对裂纹的发展过程进行更加具体、全面的分析,将第二阶段再细分为三个过程,即裂纹扩展初期阶段、裂纹稳定扩展阶段及裂纹扩展后期阶段。此时的声发射信号来源于新形成的塑性区和裂纹扩展区。图9~12分别为这三个阶段的声发射信号及其对应的小波多尺度



(a) 裂纹扩展初期

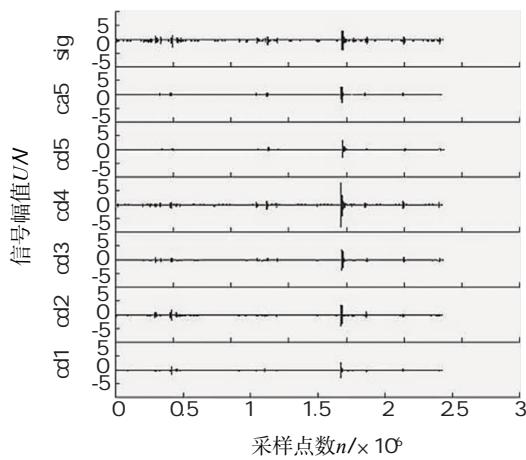


(b) 裂纹稳定扩展阶段

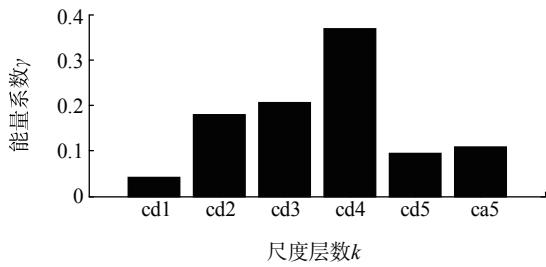


(c) 裂纹扩展后期

图9 裂纹扩展各阶段声发射信号

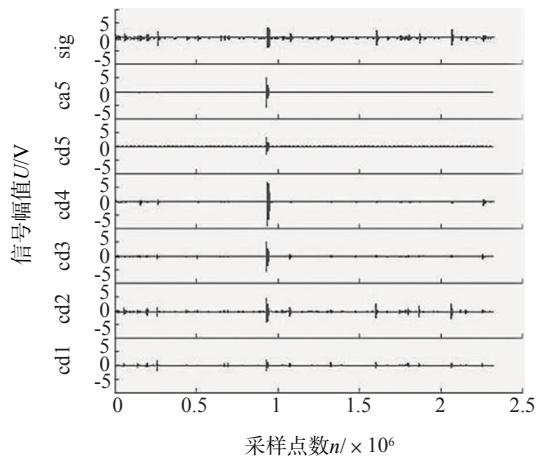


(a) 声发射信号多尺度分解

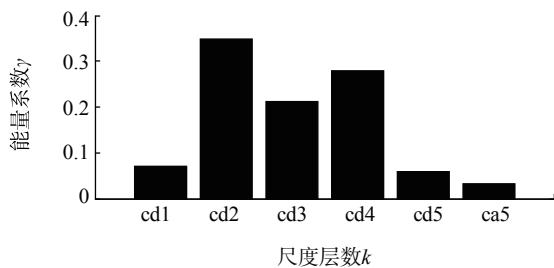


(b) 发射信号能量系数分布

图 10 裂纹扩展初期声发射信号小波能量系数分析



(a) 声发射信号多尺度分解



(b) 声发射信号能量系数分布

图 12 裂纹扩展后期声发射信号小波能量系数分析

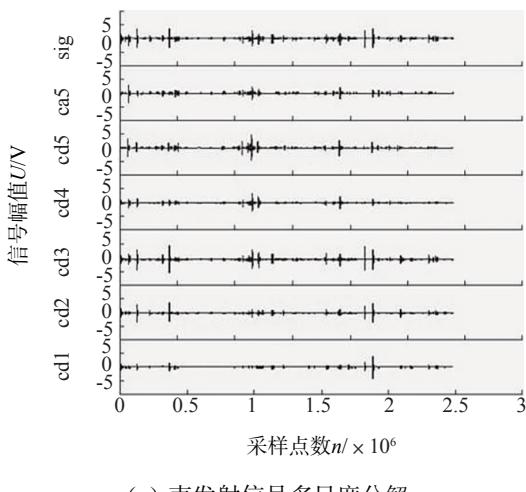
分解和能量系数分布。

综合上述裂纹扩展的小波分解结果以及小波能量系数分布可知,三个阶段的高频细节系数发生显著变化,其中 $cd1$ 所占的能量比重较初期增加了近 14%, $cd2$ 所占比重增加了 28%,但进入后期后,这两层细节系数的能量比重分别降低了近 11% 和 10%,因此,通过 $cd1$ 和 $cd2$ 可以有效地识别裂纹扩展时声发射信号特征。

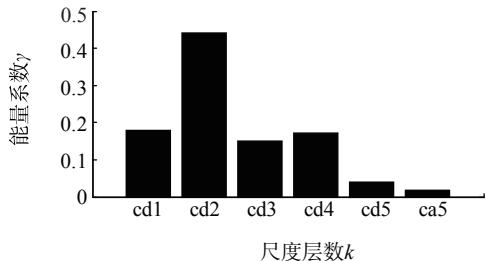
表 1 裂纹扩展时小波能量系数分布

小波系数	频率范围 /kHz	小波能量系数		
		裂纹扩展初期	裂纹稳定扩展	裂纹扩展后期
cd1	256~512	0.042 4	0.180 1	0.070 3
cd2	128~256	0.179 1	0.441 8	0.347 3
cd3	64~128	0.205 4	0.149 2	0.212 2
cd4	32~64	0.368 8	0.171 8	0.279 1
cd5	16~32	0.095 2	0.040 1	0.057 6
ca5	0~16	0.109 1	0.017 1	0.033 5

图 11 裂纹稳定扩展阶段声发射信号小波能量系数分析



(a) 声发射信号多尺度分解



(b) 声发射信号能量系数分布

图 11 裂纹稳定扩展阶段声发射信号小波能量系数分析

3.3.3 裂纹失稳断裂阶段

当裂纹扩展至临界裂纹长度时,发生失稳断裂,

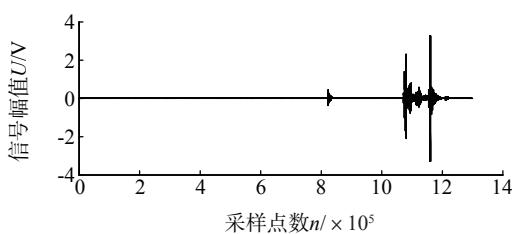


图 13 试件失稳断裂阶段声发射信号

在断裂瞬间会产生强烈的突发型声发射信号。图 13 所示为试件失稳断裂产生的声发射信号。裂纹扩展后期,材料内部产生的声发射现象显著减弱,并进入短暂的间歇期,基本检测不到声发射信号,这是由于裂纹扩展的间歇性决定的。另外,由于受到外载荷的作用,裂纹尺寸逐渐增大,进入失稳阶段后,裂纹扩展速率快速增加,并瞬间发生断裂,能量瞬间释放,在这过程中产生剧烈的突发型声发射信号,并迅速衰减。图 14 为试件失稳断裂声发射信号的小波分解及能量系数分布。

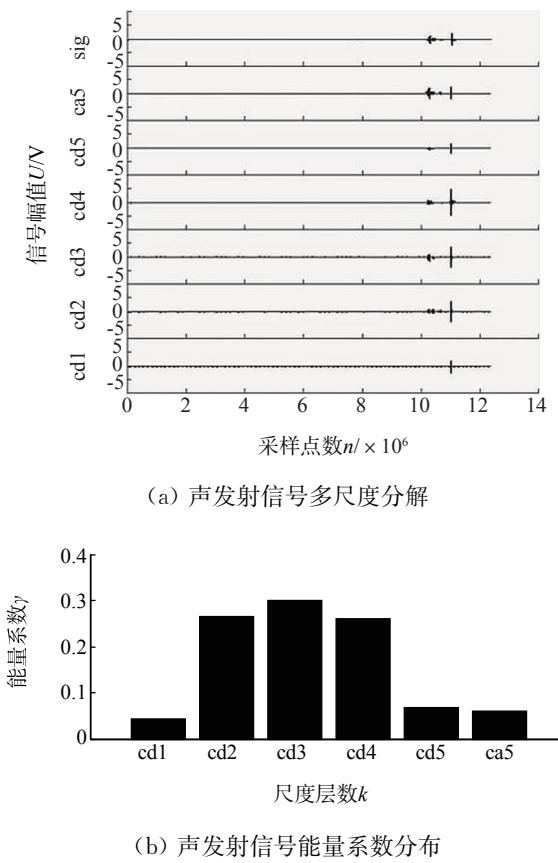


图 14 试件失稳断裂声发射信号小波能量系数分析

由图 14 可知,失稳断裂瞬间声发射信号主要由三种频率区间的信号组成,占主要地位的是第三层小波系数 cd_3 。当 cd_3 层能量系数占主要地位时,可确定为失稳断裂状态。综上,裂纹发展过程中所

激发的声发射信号是多种高频信号叠加而成,其信号特征也会随着裂纹状态的不同发生显著的变化,而小波能量系数可清晰地体现信号特征变化规律,因此,通过小波能量系数分析方法,可以有效地判断不同的裂纹发展阶段。

4 结论

(1) 通过模拟疲劳加载过程,提取了裂纹扩展时的声发射信号参数,根据声发射信号活动特点,将裂纹发展过程划分为五个阶段:裂纹萌生阶段、扩展阶段、稳定扩展阶段、后期扩展阶段和试件失稳断裂阶段。

(2) 选用 db5 小波对各阶段的声发射信号进行五尺度小波分解,并提取小波能量系数。在信号波形特征方面,扩展初期和后期声发射活跃程度相对较弱,稳定扩展时最强;在时频特征方面,可以发现三个阶段的声发射信号都主要集中在 cd_2 , cd_3 , cd_4 三层小波系数之中,但是所占的能量比重会随着裂纹扩展阶段的不同而发生变化,初期主要集中在 cd_4 层,稳定扩展阶段主要集中在 cd_2 层,后期则以 cd_3 层为主, cd_2 层和 cd_4 层稍弱。

(3) 小波能量系数清晰地体现了 AE 信号特征变化规律,可以有效地进行裂纹扩展状态识别。为海洋平台的健康监测及裂纹的智能识别提供了新的方法。

参考文献:

- [1] YANG He-Zhen, LI Hua-Jun. Damage localization of offshore platform under ambient excitation[J]. China Ocean Engineering, 2003, 17: 495—504.
- [2] TONOLINI F, FONTANA E. Acoustic emission researches for an application surveillance of offshore platforms[C]// 5th offshore Inspection Repair and Maintenance Conference, Aberdeen, Scotl, [s. n], 1984.
- [3] ROGERS L M, HANSEN J P, WEBBORN T J C. Christopher. Application of acoustic emission analysis to the integrity monitoring of offshore steel production platforms[J]. Materials Evaluation, 1989, 38(8): 39—49.
- [4] ROBERTS T M, Talebzadeh M. Fatigue life prediction based on crack propagation and acoustic emission count rates[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59: 679—694.

(下转第 41 页)

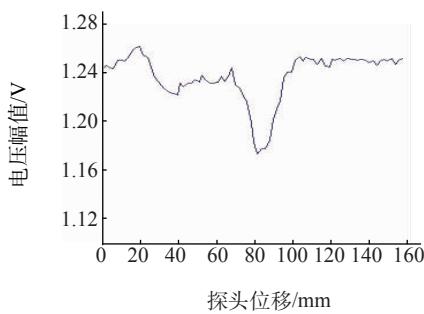


图 7 外力 0.9 MPa 时无凹槽钢板的电压采样曲线

验。当钢板所受拉力分别为 0, 0.6, 0.9 MPa 时, 电压的采样曲线如图 8 所示。

由图 8 可以得出,在没有明显外伤的情况下,由于钢板内部材质分布的不均匀或者钢板内部有缺陷等客观因素的存在,随着外力加载的逐渐增大,钢板在弹性形变的范围内时,其内部会出现应力集中的现象。

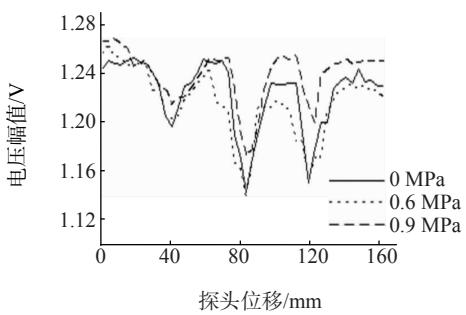


图 8 不同外力时有凹槽钢板的电压采样曲线

通过对试验数据的分析,得出在不同拉力作用下,各个缺陷处对应的电压变化情况,如表 1 所示。

表 1 不同加载拉力下缺陷与电压的关系

加载拉力 大小/MPa	不同缺陷深度处的电压变化值/mV		
	1 mm 处	2 mm 处	3 mm 处
0	59	135	96
0.6	50	117	83
0.9	41	98	69

由图 8 和表 1 可以看出：① 钢板的应力集中区与钢板的缺陷部位相对应，说明应力集中区域容易发生在钢板有缺陷的位置。② 对于同一块钢板，随着加载拉力的逐步增加，检测线圈的输出电压变化量以近似于线性的关系在减小。③ 在相同拉力的作用下，随着缺陷深度加大，传感器检测线圈的输出电压变化量也随着增大。

4 结论

(1) 钢板表面的应力集中区域的磁检测信号随

着钢板所受应力的改变而改变，在同一缺陷处，随着加载拉力的不断变化，检测线圈上的输出电压的变化量在误差允许的范围内近似成线性关系，即钢板所受的应力越大，检测线圈的输出信号峰值越小。

(2) 钢板表面的应力集中区域的磁检测输出信号跟钢板表面的缺陷大小也有关系。在所受应力一定的情况下,缺陷深度大的地方比缺陷深度小的地方的检测线圈输出信号峰值要大;随着拉力的加大,检测线圈输出电压的变化量也增加。

参考文献：

- [1] 周德强,田贵云,王海涛,等.脉冲涡流技术在应力检测中的应用[J].无损检测,2010,31(7):1558—1593.
 - [2] 石延平,周庆贵.一种新型动态轨道衡应力检测方法[J].仪器技术与传感器,2011(4):76—79.
 - [3] 李济民,张亦良.Q235 钢材料拉伸时磁记忆效应的试验研究[J].试验研究,2008,25(7):10—12.
 - [4] 姜保军.磁测应力技术的现状及发展[J].无损检测,2006,28(7):362—366.
 - [5] NIZHANKOVSKII V I. Classical magnetostriction of nickel in high magnetic field[J]. The European Physical Journal,2006(53):1—4.
 - [6] 石延平,刘成文,张永忠.一种差动压磁式扭矩传感器的研究与设计[J].仪器仪表学报,2006,27(5):508—511.
 - [7] DAVID T, JAPHA Y, DIKOVSKY V. Magnetic interactions of cold atoms with anisotropic conductors [J]. The European Physical Journal D,2008,48:321—332.
 - [8] 叶果,李威,王禹桥,等.基于 PCI-1716 的高速数据采集系统设计[J].微计算机信息,2009,25(1/2):86—88.

~~~~~

(上接第 7 页)

- [5] ROGERS LM, LEONARD M. Crack detection using acoustic emission methods-fundamentals and applications[J]. Key Engineering Materials, 2005, 293/294: 33–46.
  - [6] 林丽,赵德有. 导管架海洋平台声发射信号识别系统[J]. 无损检测, 2009, 31(1): 42—47.
  - [7] 林丽,赵德有. 局域波法在海洋平台结构声发射信号监测中的应用[J]. 振动与冲击, 2009, 28(6): 71—74.
  - [8] 程正兴. 小波分析算法与应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
  - [9] 董长虹. Matlab 小波分析工具箱原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.