

钢包耳轴活性缺陷声发射信号特征与定位分析

叶荣耀, 王强, 张维刚, 袁昌明

(中国计量学院 质量与安全工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:钢包耳轴是整个钢包结构的关键部位之一,耳轴根部在长期的高温吊拉作业中会产生活性疲劳裂纹.针对常规超声法难以对耳轴根部焊缝进行无损检测的问题,提出基于声发射(Acoustic emission, AE)平面定位技术对钢包耳轴根部焊缝活性缺陷进行检测的方法.对原始 AE 数据进行滤波处理并结合小波包变换对信号进行分析.实验结果表明该方法能够较准确定位焊缝活性缺陷的位置.经过小波包对 AE 信号进行 3 层分解与重构后,活性缺陷 AE 信号频带主要分布在 62.5 ~ 125 kHz,其能量占总能量的 81.25%,符合一般裂纹扩展的频率特征.

关键词:钢包耳轴;声发射;定位分析;小波包

中图分类号:TG115.28

文献标识码:A

文章编号:1672-9102(2013)04-0027-05

钢包耳轴是起吊钢包的主要部件,承载着整个钢包和钢水的重量并且是在高温下作业,其结构完整性直接影响着整套设备的安全运行.因此,对钢包耳轴进行定期安全检测至关重要.耳轴根部焊缝外部被耳轴块覆盖,内部被一层高温耐火材料覆盖,常规超声检测对这样的焊缝缺陷检测取得的信号信噪比较低,难以取得理想的效果^[1].

声发射技术(Acoustic Emission, AE)是一种重要的无损检测技术,由于其被动检测的特性和全面监测的能力以及对被测物体的几何形状不敏感,这项技术在检测活性缺陷和大型结构复杂构件的整体完整性评价上具有独到的优势.目前已被广泛应用于管道泄漏检测^[2]、压力容器无损检测^[3]、飞机结构的动态监控^[4]等. T. M. Roberts^[5]等人采用先进的声发射源定位检测系统,对钢材焊接处进行疲劳裂纹扩展监测,从而预估疲劳受损结构的剩余寿命. C. Ennaceur^[6]等人以压力容器为研究对象,运用声发射技术检测和显微镜观察两种方法,对裂纹扩展不同阶段的情况进行了具体的分析.

围绕钢包耳轴根部焊缝活性缺陷在线检测问题,本文基于声发射技术对钢包耳轴进行了加载试验.利用平面定位技术结合滤波后的信号,对缺陷进行较准确的源定位并结合小波包能量谱进行分析,得出活性缺陷 AE 信号的频带范围,并和一般缺陷裂纹扩展的特性进行了对比.

1 检测系统

1.1 钢包耳轴

本实验选取某钢铁公司电炉厂使用年限较长的 8[#]钢包作为检测对象,该钢包空载 80 t,荷载 75 t,钢包壁材料为 Q235 钢,耳轴材料为 18MnMoNb.钢包耳轴结构如图 1 所示.

1.2 声发射检测系统

本文采用美国物理声学公司(PAC)的 SAMOS-Ⅱ型声发射检测系统,包括:PCI-8 型信号采集卡, R151-AST 型声发射传感器,该传感器谐振频率 150 kHz,并带有 AST(自动传感器测试功能)的一体化前置放大器.测试校准时,采用直径 0.5 mm HB

收稿日期:2013-03-21

基金项目:浙江省重大科技专项计划项目(2011C11079);浙江省教育厅 2012 年度科研计划项目(Y201224071)

通信作者:王强(1976-),男,湖北应城人,博士,教授,主要从事声发射无损检测技术的应用研究. E-mail: qiangwang@cjlu.edu.cn

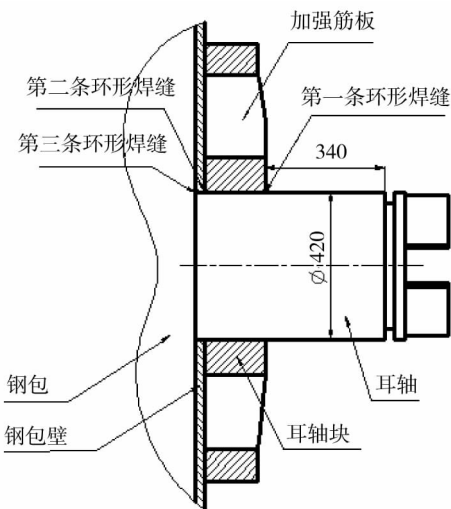


图1 钢包耳轴结构图
Fig. 1 Ladle trunnion structure

铅笔芯断裂源作为模拟声发射源,笔芯与构件表面夹角 30° [7].

平面定位一般需要3个AE传感器和两组时差,传感器阵列可以任意选择,但为运算简便,常采用简单阵列形式,如三角形、方形、菱形等.本文南耳轴布置为矩形阵列定位1,北耳轴布置为等腰三角形阵列定位2.传感器布置如图2所示.

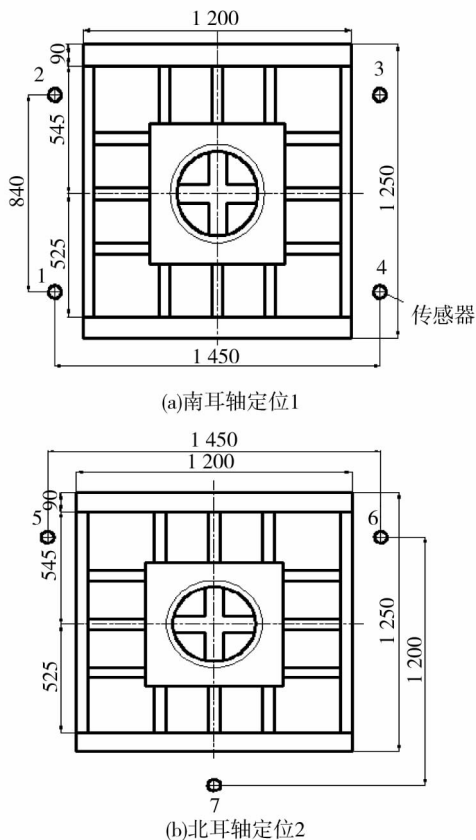


图2 耳轴部位传感器布置
Fig. 2 Ladle trunnion structure

声发射检测是一个动态检测过程,因此需要设计适当的加载程序,并且在第二次加载时提升加载速度,用一定的冲击载荷以便最大化采集到所需信息.本实验的加载程序如表1和图3所示.

表1 加载循环程序

Tab. 1 Cycle loading procedure

提升循 环次数	采样阶 段编号	上升/ 下降	上升及下 降高度/m	悬停时 间/min
第一次	①	1档速度上升	0 m 上升到 3 m	-
	②	-	-	保持 10 min
	③	4档速度下降	下降至 0.5 m	保持 5 min
第二次	④	4档速度上升	0 m 上升至 2 m	-
	⑤	-	-	保持 5 min
	⑥	4档速度下降	下降至 0.5 m	-
	⑦	-	-	保持 5 min

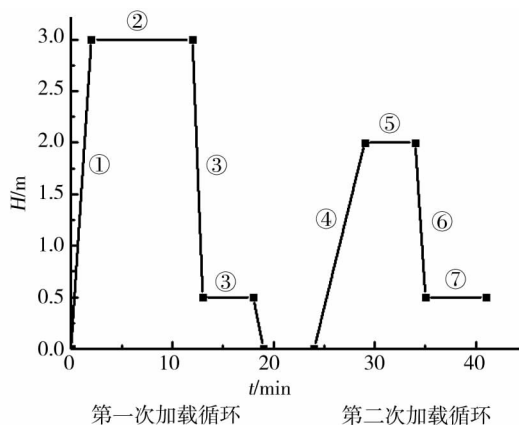


图3 加载循环程序图

Fig. 3 Cycle loading procedure

1.3 基于小波包的 AE 信号处理

小波包变换是目前非平稳信号分析最有力的工具之一,其特点是对信号进行变时频窗分析,在时域和频域同时具有良好的局部分析特性.钢包耳轴焊缝缺陷 AE 信号属于非稳态、短时信号,具有很强的时变性,考虑应用小波包分解处理数据.

信号小波包分解算法 [8]:

$$\begin{cases} d_l(j, 2n) = \sum_{k=0}^{\infty} a_{k-2l} d_k(j+1, n); \\ d_l(j, 2n+1) = \sum_{k=0}^{\infty} b_{k-2l} d_k(j+1, n). \end{cases} \quad (1)$$

式中, d 为小波包分解系数, a_k, b_k 是小波分解共轭滤波器系数, k 为非负整数; $j = 0, 1, \dots$

小波包重构算法为

$$d_l(j+1, n) = \sum_{k=0}^{\infty} h_{l-2k} d_k(j, 2n) + \sum_{k=0}^{\infty} g_{l-2k} d_k(j, 2n+1). \quad (2)$$

式中, d 为小波包分解系数, h_k, g_k 为小波重构共轭滤波器系数, k 为非负整数; $j = 0, 1, \dots$

对 AE 信号进行小波包能量法^[9] 分析. 由帕塞瓦尔(Parseval) 定理可知:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) df \quad (3)$$

式中, $x(t)$ 为时域信号, $X(f)$ 为频域信号.

对信号进行 i 层小波包分解, 计算各子频带信号能量并构造能量特征向量. 其算法如下:

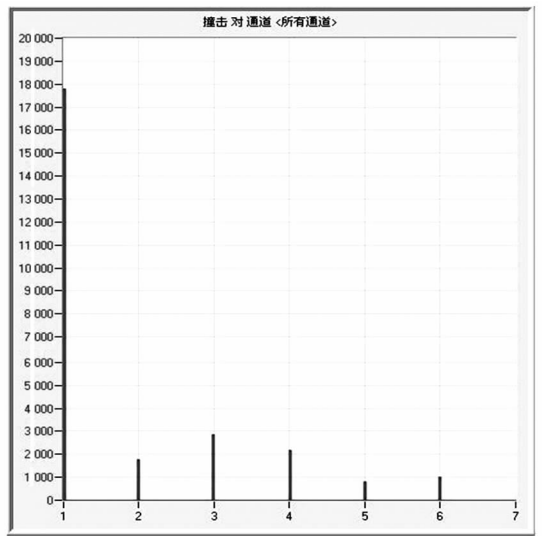
$$E_{ij} = \int |S_{ij}(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^n |x_{jk}|^2 \quad (4)$$

式中, S_{ij} 表示第 i 层重信号, E_{ij} 表示第 i 层重构信号对应的能量, $x_{jk} (j = 1, 2, \dots, 2^i; k = 1, 2, \dots, n)$ 为重构信号的离散点的幅值. 特征向量 $T^{[10]}$ 构造如下: $T = [\frac{E_{i1}}{E}, \frac{E_{i2}}{E}, \dots, \frac{E_{i2^i}}{E}]$, 即构造各重构子频带的能量分布比例, 其中 E 为信号总能量.

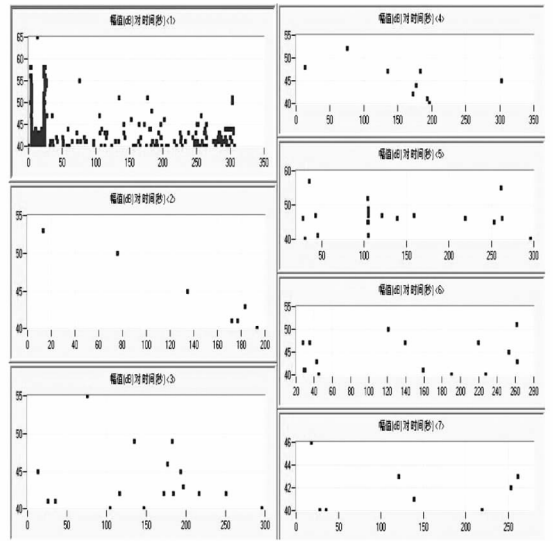
2 实验结果分析与讨论

2.1 定位特征

由于加载循环过程中, 伴随大量无物理意义的声发射撞击, 包括局部应力的释放和机械摩擦噪声, 所以形成的撞击数和定位事件非常多, 很难进行有效的活性缺陷源定位. 因而必须尽量排除加载的 7 个阶段所接收到信号的噪声干扰. 噪声信号通常为低能量、低幅值, 因此通过设置一定的能量值和幅值作为阈值, 尽可能的实现去噪处理. 处理后的结果如图 4, 图 5 所示.



(a) ②阶段各通道撞击数图



(b) ②阶段各通道幅值散点图

图 5 ②阶段各通道参数分布图

Fig. 5 Parameter distribution of each channel in the second stage

图 4 为定位 1, 2 两个阶段的 AE 事件图, 可知南北两耳轴均有不同程度的缺陷存在. 在相同的②阶段事件数比较中, 定位 1 的事件数远大于定位 2, 说明南耳轴焊缝的缺陷程度比北耳轴严重得多. 在②, ⑤2 次降压阶段事件数对比中, 定位 2 在⑤阶段没有声发射事件, 而定位 1 仍有声发射事件, 说明南耳轴焊缝伴随着一定的裂纹扩展, 具有活性裂纹的特性. 因此, 选取这个阶段的 AE 信号进行分析具有一定的典型性.

图 5 为②阶段各通道参数分布图, 可知在所有通道中 1 号传感器接收到的撞击数最多, 产生的信号最聚集且幅值较高, 说明南耳轴焊缝缺陷主要位

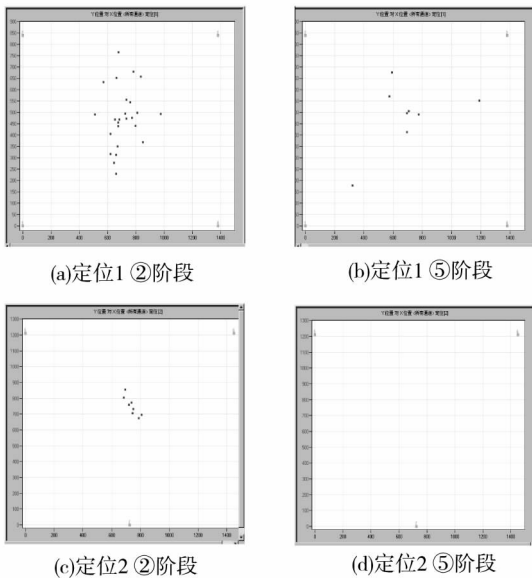


图 4 耳轴 AE 事件定位图

Fig. 4 The position of trunnion AE events

于定位区域的左下角即 1 号传感器附近.

2.2 小波包能量谱

选取定位 1 中第⑤阶段的 AE 信号进行小波包能量谱分析. 该信号的采样频率为 1 MHz, 根据采样定理, 信号的频率范围为 0 ~ 500 kHz. 根据以往的研究经验^[11], 选用 db5 小波基, 基于 Shannon 熵标准^[12], 采用小波包将信号分解到第 3 层, 并进行重构, 具体小波包分解各层重构信号子频带划分如表 2 所示.

表 2 小波包分解重构信号的频率范围

Tab.2 Signal frequency domain of decomposition and reconstruction using wavelet packet

节点	频段/kHz	节点	频段/kHz
(3,1)	0 ~ 62.5	(3,5)	250.0 ~ 312.5
(3,2)	62.5 ~ 125.0	(3,6)	315.5 ~ 375.0
(3,3)	125.0 ~ 187.5	(3,7)	375.0 ~ 437.5
(3,4)	187.5 ~ 250.0	(3,8)	437.5 ~ 500.0

分析得到的能量特征分布情况如图 6 所示, 可见经过 3 层小波包分解重构后, 信号能量主要分布在低频段, 其中第 2 节点即 62.5 ~ 125.0 kHz 频段能量相当集中, 占总能量的 81.25%. 根据相关研究表明, 一般裂纹萌发时的 AE 信号频率较低; 随着裂纹的发展频率逐渐增高, 缺陷频率范围约为 25 ~ 160 kHz^[13]. 因此, 所选取的 AE 信号符合裂纹扩展的频率特征, 表明耳轴内部存在活性缺陷信号.

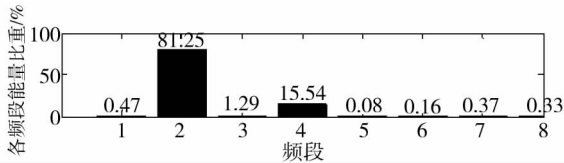


图 6 小波包 3 层分解重构各子频带能量比例分布图

Fig.6 Sub-bands energy ratio distribution after 3-layers decomposition and reconstruction using wavelet packet

3 结论

1) 利用声发射技术对钢包耳轴焊缝活性缺陷进行检测, 通过多通道传感器平面定位及多次的数据滤波, 对钢包耳轴根部的焊接裂纹缺陷源进行较为准确的定位, 具有一定的可行性;

2) 对采集的信号用小波包能量法进行分析, 得出频带主要分布在 62.5 ~ 125 kHz, 其能量占总能量的 81.25%, 符合一般裂纹缺陷扩展的频率特征;

3) 研究表明, 在工程实际应用中可以通过获取、分析钢包耳轴受力过程中声发射信号的主要频带特征, 达到对耳轴部位进行动态监测的目的.

参考文献:

- [1] 胡栋, 王强, 肖琨, 等. 奥氏体不锈钢焊缝的相控阵超声检测[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2013, 34(1): 4-5, 8-11.
Hu D, Wang Q, Xiao K, et al. Ultrasonic phased array testing of austenitic stainless steel welds[J]. Journal of Henan University of Science & Technology (Natural Science), 2013, 34(1): 4-5, 8-11.
- [2] 王朝晖, 张来斌, 辛若佳, 等. 声发射技术在管道泄漏检测中的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2007, 31(5): 87-90.
Wang Z H, Zhang L B, Xin R J, et al. Application of acoustic emission technique in pipeline leakage detection[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, 31(5): 87-90.
- [3] 沈功田, 李金海. 压力容器无损检测-声发射检测技术[J]. 无损检测, 2004, 26(9): 457-463.
Shen G T, Li J H. Nondestructive inspection of pressure vessels: acoustic emission technique[J]. Nondestructive Testing, 2004, 26(9): 457-463.
- [4] Holford K M, Pullin R, Evans S L, et al. Acoustic emission for monitoring aircraft structures[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2009, 223(5): 525-532.
- [5] Roberts T M, Talebzadeh M. Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(6): 695-712.
- [6] Ennaceur C, Laksimi A, Hervé C, et al. Monitoring crack growth in pressure vessel steels by the acoustic emission technique and the method of potential difference[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2006, 83(3): 197-204.
- [7] 国家质量技术监督局, 国家标准化委员会. GB/T 18182-2000. 金属压力容器声发射检测及结果评价方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
The State Bureau of Quality and Technical Supervision, The National Standardization Committee. GB/T 18182-2000. Acoustic emission examination and evaluation of metallic pressure vessels[S]. Beijing: China Standard Press. 2001.
- [8] 王强, 张光新, 周泽魁, 等. 基于声发射的输油管线破坏点定位方法研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(3): 322-329.
Wang Q, Zhang G X, Zhou Z K, et al. Research on acoustic emission location method for oil pipeline breakage[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(3): 322-329.

- [9] 付元杰. 小波包变换和能量分析在声发射信号降噪中的应用[J]. 无损检测, 2011, 33(1): 16 - 18, 22.
Fu Y J. Application of wavelet packet transformation and energy analysis in acoustic emission signal processing[J]. Nondestructive Testing, 2011, 33(1): 16 - 18, 22.
- [10] 吴占稳, 王少梅, 沈功田. 基于小波能谱系数的声发射源特征提取方法研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2008, 32(1): 85 - 87.
Wu Z W, Wang S M, Shen G T. Extraction of acoustic emission resource characteristics based on wavelet transform[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2008, 32(1): 85 - 87.
- [11] 李学军, 廖传军, 褚福磊. 适于声发射信号故障特征提取的小波函数[J]. 机械工程学报, 2008, 44(3): 177 - 181.
Li X J, Liao C J, Chu F L. Wavelet function suitable for fault feature extraction of acoustic emission signal[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(3): 177 - 181.
- [12] 张凯, 庞宝君, 林敏. 碎片云撞击声发射信号能量特征小波包分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(12): 125 - 128.
Zhang K, Pang B J, Lin M. Wavelet packet analysis for acoustic emission signals caused by debris cloud impact[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(12): 125 - 128.
- [13] 李力, 陈向前, 赵美云, 等. 起重机梁活性缺陷的声发射信号特征[J]. 无损检测, 2008, 30(6): 334 - 337.
Li L, Chen X Q, Zhao M Y, et al. Features of acoustic emission signal of active defect in crane beam[J]. Nondestructive Testing, 2008, 30(6): 334 - 337.

Active defects of ladle trunnions acoustic emission signal characteristics and sources location analysis

YE Rong - yao, WANG Qiang, ZHANG Wei - gang, YUAN Chang - ming
(Department of Quality and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Trunnions are one of the core components of a steel ladle, active fatigue cracks may emerge in the trunnion roots for a long time hauling operation under high temperature condition. To overcome the difficulty of conventional ultrasonic method in detecting the weld of the trunnion roots, a inspection scheme based on acoustic emission (AE) plane location for the non - destructive testing(NDT) of the weld active defect of the trunnion roots was proposed. The original AE data was filtered and wavelet packet transform was used for the AE signal analysis. Results showed that the position of the weld active defect is located relatively accurate with the method. 3 - layers decomposition and reconstruction was performed with the AE signal using wavelet packet, the frequency domain of active defect AE signal is mainly distributed from 62.5 to 125 kHz and the signal energy account for 81.25 % of the total energy, agreeing with the general frequency characteristics of the crack propagation.

Key words: steel ladle; acoustic emission; location analysis; wavelet packet