

机械结构在役缺陷危害性的声发射 定量评价方法

李 力, 李秀娟, 桑小冲

(三峡大学 机械与材料学院, 宜昌 443002)

摘 要:水力发电厂起重机械是用于起吊转子和闸门等大型零部件的关键特种设备, 主要支撑部分为金属结构, 一般为非标准设计, 结构庞大, 利用超声或射线等常规无损检测技术很难对它们进行全面有效的定期检测。探讨了利用声发射技术对其进行检测的可行性, 通过对带裂纹缺陷的金属结构加载试验, 采集活性缺陷发生发展的声发射信号。应用统计参数方法分析, 提出评价裂纹缺陷的活度和强度的定量指标, 进而定量评定出在役裂纹缺陷的危险性, 为重大机械的定检和安全评价提供理论指导和试验数据。

关键词:金属结构; 裂纹; 声发射; 危害性; 定量评价

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2009)07-0538-03

In-Service Defect Hazard Quantitative Evaluation Method of Acoustic Emission for Large Metal Structure

LI Li, LI Xiu-Juan, SANG Xiao-Chong

(College of Mechanical & Material Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In hydropower station lifting machines are a key specific device, which are used to lift the heavy parts, such as turbine rotor, draw-gate. Lifting machines are very large and heavy, the main supporting structures are made of metal and by non-standard design. It is difficult to perform routine examinations using conventional nondestructive testing technology such as ultrasonic and radiographic testing. Thus, an alternative method, the acoustic emission(AE) technology was introduced to test active cracks in the structures of lifting machines. The AE signals of in-service defect were collected from a load-bearing metal beam with seeded cracks. Based on statistic parameter analysis, two quantitative indexes were proposed to assess the activity and intensity of active cracks. Furthermore, the hazard degree of the defect could be evaluated. The method could provide both theoretical guide and experimental data for the routine examination and safety evaluation of large and heavy machine.

Keywords: Metal structure; Crack; Acoustic emission; Hazard; Quantitative evaluation

水力发电厂大型起重机械是电厂设备安装、运行或检修工作中用于起吊转子和闸门等大型零部件的关键设备, 属于纳入国家法定监督管理和检验检测的特种设备。根据起吊件的不同, 起重机械都设计有专用的金属结构和吊具, 这些结构大多为非标

准设计, 服役年限都会超过 10 年。金属结构使用一定年限后, 在其应力集中处、焊接热影响区域和焊接缺陷处等会产生裂纹或裂纹扩展, 但由于缺乏相关检测技术和标准, 电厂起重机械很少按特种设备进行专项检测(定检), 存在很大的安全隐患。

目前起重机械定期检测的常规无损检测方法主要有^[1]: 射线检测、超声检测、磁粉检测、渗透检测和电磁检测等。由于这些方法存在对几何形状敏感、需要接近被检对象、只能进行局部扫描、需要停机测试以及容易造成漏检等不足, 检测结果很难对设备

收稿日期: 2008-07-16

基金项目: 湖北省教育厅科技资助项目(Q200713004); 三峡大学科学基金资助项目(0620070124)

作者简介: 李 力(1964—), 女, 教授, 博士, 研究方向为机械监测与故障诊断。

进行有效的安全评价。

机械结构发生失效时,材料内部会迅速以瞬态弹性波方式释放应变能量,产生声发射(简称 AE)现象,而利用声发射信号推断缺陷的技术称为声发射技术。与常规无损检测方法不同,声发射技术是一种动态检测方法,它按缺陷危险程度分类,非常适合对压力容器、压力管道和起重机械等关键设备的检测。并且使用若干个 AE 传感器就可以获得整个设备的状态,这对不可能完全接触或大型设备的检验特别有利,如桥机梁和高架门机等起重机械^[2]。

笔者探讨利用声发射技术检测和定量评价起重机械等重大机械金属结构裂纹缺陷的可行性。通过对带人工裂纹的模拟金属结构梁进行的加载试验,得到结构活性裂纹发生发展的 AE 信号。然后对裂纹 AE 信号进行特征参数分析,参照 GB/T 18182—2000《金属压力容器的声发射检测和评价方法》标准,提出评价起重机械金属结构裂纹缺陷的活度和强度的定量指标,为声发射技术应用于重大机械的定检和安全评价提供理论基础和试验数据。

1 典型缺陷 AE 信号采集

采用带裂纹的梁模拟试验。梁为 4 000 mm(长)×130 mm(宽)×150 mm(高)的矩形截面,材料型号为 K235。在梁的 A、B、C 三处制作不同程度的裂纹缺陷(图 1)。AE 信号采用美国 PAC 公司的四通道声发射信号采集系统采集。主要仪器包括 PCI-2 AE 信号采集卡,R15a 共振型声发射传感器,2/4/6 前置放大器。3 个声发射谐振传感器布置在位置 1~3。系统的参数设置为:采样频率 2 MHz,采样频带 20~400 kHz,门槛电压 45 dB,触发采样。

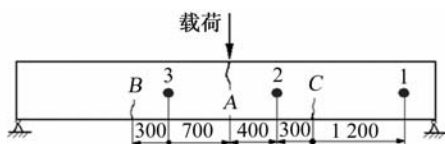


图 1 缺陷和传感器布置

采用压力试验机给梁加载,加载点为 A,加载方案见图 2 所示,按 0~250~500~750~950 kg 顺序加载,每次加载时间约 1 min,保载时间约 5 min。结构裂纹缺陷自加载 250 kg 开始发生和发展,直到 750 kg,当加载到 950 kg 时,A 点处裂纹发展至最大。试验采集各加载过程和保载过程的 AE 信号作为分析数据。

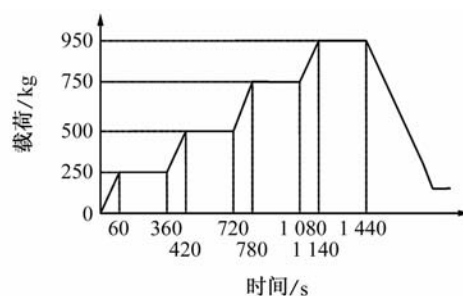


图 2 加载示意图

2 裂纹强度和活度评价指标

2.1 强度的定量指标

使用统计特征参数分析方法确定强度指标,主要参数有撞击计数、事件计数、幅值和能量计数等。计算不同载荷下的主要统计特征参数,结果见表 1。从表中数据可知:随着载荷的增加,撞击计数、能量计数和幅值等参数均不断增加,至 950 kg 时达最大值,此时裂纹扩展的程度最大。但在相同载荷下,各测点的幅值平均值基本相等,说明幅值平均值不受声源与传感器之间距离的影响,并且不同载荷和裂纹发展阶段此参数比较稳定。因此,确定所有事件幅值平均值作为评价声发射强度的定量指标。

表 1 不同载荷时不同测点测得的声发射参数值

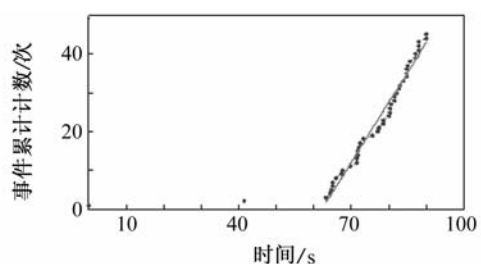
| 载荷/ kg | 撞击计数/次 | | | 最大幅值/dB | | | 幅值平均值/dB | | |
|-----------|--------|-------|-------|---------|-----|-----|----------|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 0~250 | 8 | 9 | 8 | 72 | 74 | 70 | 53 | 53 | 53 |
| 250~500 | 637 | 816 | 702 | 92 | 95 | 93 | 53 | 53 | 53 |
| 500~750 | 1 248 | 1 414 | 1 314 | 94 | 97 | 94 | 54 | 54 | 54 |
| 750~950 | 6 051 | 7 274 | 6 779 | 100 | 100 | 100 | 53 | 53 | 53 |

取裂纹开始萌发时的幅值平均值(53 dB)和测点最大幅值(74 dB)为活性裂纹缺陷强度等级划分的两个定量指标。

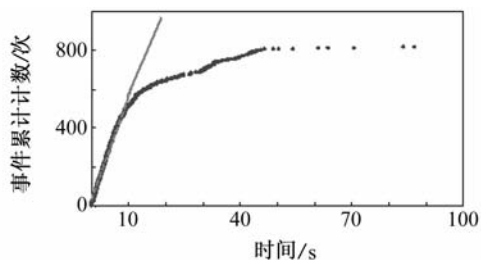
2.2 活度的定量指标

根据定义,可以采用事件累计计数曲线斜率来表达缺陷的活性。具体方法是取加载与保载之间约 100 s 的数据作出事件累计计数曲线图。图 3 为测点 2 在不同载荷下的事件累计计数图。利用最小二乘法对快速增长部分曲线(即加载过程)进行直线拟合,得到事件累计计数曲线的斜率。表 2 为所有通道的事件累计计数曲线的拟合直线斜率值。

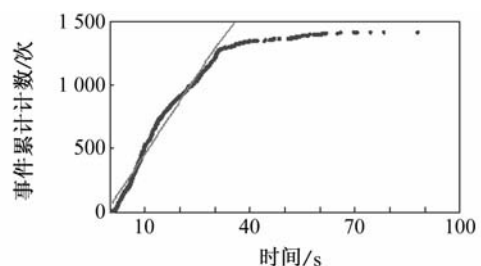
从表中数据可知,在裂纹缺陷发生发展中,事件累计计数曲线的斜率是不同的。从图 3(b)和(c)可见,曲线的变化趋势大致相同,即加载时曲线的斜率



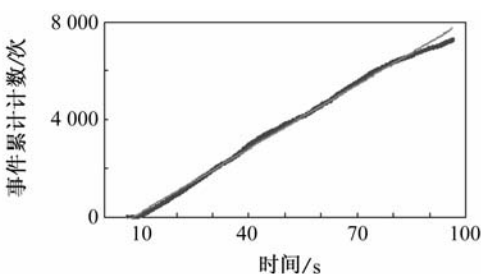
(a) 0~250 kg



(b) 250~500 kg



(c) 500~750 kg



(d) 750~950 kg

图3 测点2的事件累计计数图

表2 事件累计计数曲线的拟合直线斜率

| 载荷/kg | 测点1 | 测点2 | 测点3 |
|---------|------|------|------|
| 0~250 | 1.0 | 1.5 | 1.1 |
| 250~500 | 42.0 | 53.0 | 47.0 |
| 500~750 | 36.0 | 41.0 | 39.0 |
| 750~950 | 74.0 | 87.0 | 83.0 |

较大,保载时曲线的斜率变小。在相同载荷下,各测点曲线的斜率也不同,离声源越近的测点,单位时间接收到的事件数越多,反之越少。因此,缺陷的活度用事件计数变化率来定量评价,应该规定传感器之

间的距离,因为事件计数与传感器-声源距离有关。由表2得,如果设置传感器之间距离分别小于等于0.5、1.0和2.0 m,可分别参考测点2、3和1的斜率来确定缺陷活性定量指标。

3 裂纹的危险性评价方法

参考 GB/T 18182 规定,缺陷危害性等级可以基于缺陷的强度和活度等级进行评价。评价步骤为① 确定缺陷活度和强度的定量指标。② 根据定量指标评定缺陷活度等级和强度等级。③ 根据缺陷活度等级和强度等级确定其危险性等级。④ 确定缺陷是否需要采用其它方法复检。

裂纹强度等级确定标准见表3。其中弱强度定量指标为声发射幅值平均值,即53 dB;高强度定量指标为声发射最大幅值74 dB的110%,即81 dB。

表3 裂纹强度等级划分标准

| 强度等级 | 平均幅值 Q | 强度等级 | 平均幅值 Q |
|------|-----------------------------------|------|-------------|
| 弱强度 | $Q < 53$ dB | 高强度 | $Q > 81$ dB |
| 中强度 | $53 \text{ dB} \leq Q \leq 81$ dB | | |

由于活度与设置传感器之间距离有关,因此不同的传感器设置方案,活度等级划分的定量指标值不同。假设传感器之间距离 ≤ 0.5 m,可取表2中测点2的事件累计计数斜率53.0的90%(即48.0)为缺陷具有活度的定量指标,具体标准见表4。

表4 裂纹活度等级划分标准

| 活度等级 | 加载 | 保载 | 活度等级 | 加载 | 保载 |
|------|----|----|------|----|----|
| 非活性 | × | × | 活性 | × | ○ |
| 弱活性 | ○ | × | 强活性 | ○ | ○ |

注:○表示声发射事件累计计数斜率 >48 ;×表示 <48 。

得到裂纹缺陷强度等级和活度等级后,可根据表5确定裂纹危害性等级评价。A级声发射源不需要复验;B、C级声发射源由检验人员决定是否复验;其它级别的声发射源应采用其它方法进行复验^[3]。

表5 裂纹危险度等级划分方法

| 强度等级 | 强活性 | 活性 | 弱活性 | 非活性 |
|------|-----|----|-----|-----|
| 高强度 | F | E | D | C |
| 中强度 | E | D | C | B |
| 弱强度 | D | C | B | A |

4 结论

(1) 通过带裂纹的金属结构模拟梁加载试验,

(下转第550页)

3 试验分析

(1) 表1中显示,蜗壳焊缝上的三种方法缺陷检出率都较低,这是因为受到现场条件限制、焊缝板厚的不同以及表面粗糙度的影响,特别是丁字缝处几何形状较为复杂,对UT和TOFD检测有较大的影响。

(2) RT采用 ^{192}Ir 型 γ 源检测,底片不够清晰,对RT的缺陷检出率有较大影响。

(3) 现场蜗壳只能用碳弧气刨进行解剖,对于自身高度较小的缺陷,在气刨时可能被刨除。而焊接试板的解剖方式与现场蜗壳焊缝不同,其经过机械加工精细的解剖,能够更真实地反映各种检测方法的检测能力。

(4) TOFD对缺陷性质的判定不够准确,需要借助常规UT等方法进一步判定。

(5) 在制定具体的检测工艺时,应采取减小检测盲区的具体措施。确保TOFD检测技术的可靠性和有效性。

4 TOFD的检测应用

八台蜗壳现场安装焊缝在UT检测合格后用TOFD检测代替RT。由于对比试验中三种方法在蜗壳焊缝检验中都有一定程度的漏检,因此先由常规UT检测,并将不合格缺陷返修后再用TOFD对所有焊缝进行复验。这样由于残余缺陷大大减少,可以减少TOFD数据分析时间。TOFD仍然采用与对比试验相同的双面检测工艺。

丁字缝处几何形状过于复杂,基本上是三种板厚,而且碟形边有折弯,TOFD扫描需要对焊缝做大量修磨,费时费工,修磨后也会损伤部分母材金

~~~~~

(上接第540页)

得到缺陷发生发展的声发射信号。提出采用裂纹萌发时声发射事件平均幅值和最大幅值作为确定强度的定量指标,划分出裂纹缺陷的强度等级。

(2) 提出利用事件累计计数变化率作为评价金属结构裂纹缺陷的活度定量和等级划分指标。分析表明该指标与声源和传感器之间距离有关。

(3) 评价指标中定量值的确定、放大和缩小比例(百分比确定)等参考了相关的国家标准。当其应用于大型起重机械金属结构评价时,准确性和适用性还需更多的实践验证。

提出的在役裂纹缺陷危害性等级评价方法已应

属,因此仍然采用RT。

### 5 结论

(1) TOFD检测技术的缺陷检出率明显高于常规UT和RT检测技术,对面状危害性缺陷灵敏,并且不受缺陷方向限制,检测速度快,扫描图显示的缺陷较为直观,并可永久保存。在石化装置反应器、高压蒸汽管道等中厚板焊缝的检测中代替RT检测时具有速度快、综合成本低且无辐射的优点,值得推广。

(2) 由于TOFD技术对缺陷深度的测量采用时间差法,可以精确地测量缺陷的深度和自身高度,对缺陷的定性难度和准确性介于RT和常规UT之间,可以为石化装置等在役特种设备的安全评定提供准确可靠的分析数据。

(3) 对于体积状缺陷,因为缺陷大小及缺陷的形状对声波的衍射能力不同,TOFD技术可能会有漏检,并且对直径小的气孔定量困难。

#### 参考文献:

- [1] ASME VIII 锅炉压力容器规范第八卷[S].
- [2] ASME CODE CASE-2235 锅炉压力容器规范案例[S].
- [3] ASTM-2373-04 超声衍射波时差技术(TOFD)标准[S].
- [4] BS 7706—1993 用于缺陷检测、定位和定量的超声衍射波时差方法的校正和设置[S].
- [5] ENV 583-6 2000 超声衍射波时差法用于缺陷检测和尺寸测定[S].
- [6] NEN 1822—2005 超声衍射波时差法检测技术验收规范[S].
- [7] CEN/TS 14751 超声衍射波时差法(TOFD)检测焊缝[S].

用于葛洲坝电厂的一套起重机械专用吊具检测中,未发现活性裂纹缺陷,与实际情况相符,取得较好效果。该方法为利用声发射技术定量检测其它类型的活性缺陷提供了有效途径。

#### 参考文献:

- [1] 吴彦,沈功田,葛森.起重机械无损检测技术[J].无损检测,2006,28(7):367—372.
- [2] 吴占稳,沈功田,王少梅,等.声发射技术在起重机无损检测中的现状[J].起重运输机械,2007,47(10):1—4.
- [3] 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.