

# 声发射技术在锅炉泄漏检测中的应用

张延兵<sup>1</sup>, 张文斌<sup>2</sup>, 许飞云<sup>2</sup>, 顾建平<sup>1</sup>

(1. 江苏省特种设备安全监督检验研究院 南通分院, 南通 226011;

2. 东南大学 机械工程学院, 南京 211189)

**摘要:**针对锅炉所存在的泄漏缺陷,提出了一种声发射逐点监测方法,然后结合声发射信号幅度历程和波形频谱分析法,通过现场检测实例验证了该方法用于锅炉泄漏缺陷声发射检测的可行性与准确性。

**关键词:**锅炉; 泄漏; 声发射检测

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2014)02-0021-04

## Application of Acoustic Emission Technology in Boiler's Leak Detection

ZHANG Yan-bing<sup>1</sup>, ZHANG Wen-bin<sup>2</sup>, XU Fei-yun<sup>2</sup>, GU Jian-ping<sup>1</sup>

(1. Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute of Jiangsu Province, Branch of Nantong, Nantong 226011, China; 2. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** For the leak defects of boiler, a point by point monitoring method with acoustic emission testing is firstly presented. Afterwards, through the combination of amplitude and waveform analysis method of acoustic emission signal, the feasibility and accuracy of the method for acoustic emission testing of boiler's leak defects are verified with a field test.

**Keywords:** Boiler; Leak; Acoustic emission testing

锅炉是将燃料在炉膛内进行燃烧并释放出热量的能量转换设备。燃油锅炉、废气锅炉以及电站锅炉等在工作当中一般都承受高温、高压、腐蚀等恶劣的工作条件,存在可能发生爆炸事故的危险<sup>[1]</sup>,对其实施无损检测,是确保其安全运行、保障人民生命财产安全至关重要的一环。声发射(Acoustic Emission, 简称 AE)是指材料局部因能量快速释放而发出瞬态弹性波的现象。用声发射仪器探测、记录、分析声发射信号,并利用声发射信号对声发射源的状态做出正确判断的技术称为声发射技术。声发射技术作为一种新型的无损检测方法,相对于传统无损检测方法具有实时监测、覆盖范围广等优势,目前已

被广泛应用于锅炉、压力容器等设备的缺陷检测和结构完整性评价中。

### 1 锅炉声发射检测

#### 1.1 锅炉声发射检测系统

声发射检测的原理是利用耦合在结构表面上的传感器,将材料内部声发射源产生的瞬态弹性波转化为电信号,采集并分析声发射信号的特征参数,推知材料内部的缺陷状态及严重程度。锅炉一般会在出厂时进行耐压试验,可以通过采集升压和保压过程中的声发射信号,判断锅炉是否有泄漏或活性缺陷存在。检测系统如图 1 所示。

#### 1.2 锅炉声发射检测信号分析方法

声发射信号包括突发型和连续型两种,如图 2 所示。锅炉中的典型声发射源有泄漏、裂纹扩展、机械摩擦以及电子噪声等,其中泄漏产生的是连续型 AE 信号,而裂纹扩展产生的是突发型信号。

目前声发射信号的常用分析方法包括参数分析

收稿日期: 2013-06-21

基金项目:江苏省质量技术监督局资助项目(KJ(Y)2012014);国家自然科学基金资助项目(51175079);江苏省研究生创新基金资助项目(CXLX12-0079)

作者简介:张延兵(1981—),工程师,主要从事特种设备检验和化工设备安全评估工作。

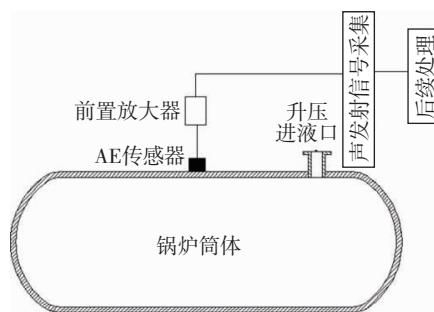
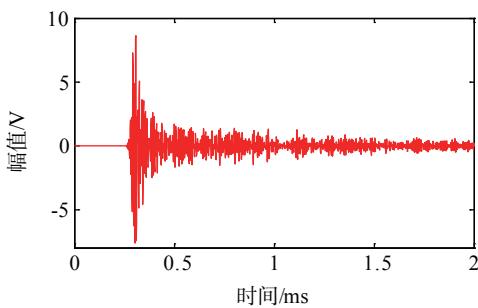
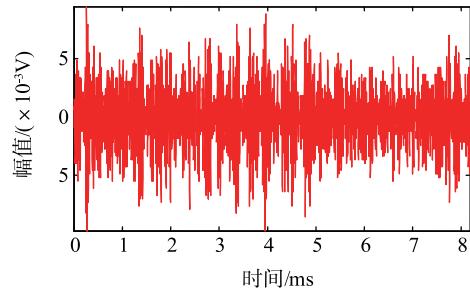


图 1 锅炉声发射检测系统



(a) 突发型



(b) 连续型

图 2 声发射信号类型

法和波形分析法。AE 信号参数分析<sup>[2]</sup>中常用的特征参数主要是幅值、能量、计数、持续时间等,分析方法主要有历经图分析、分布图分析、相关图分析等。历经图可以反映声发射源在检测过程中的活动情况和发展趋势;分布图和相关图可用于鉴别不同声发射源,比如噪声信号一般具有高幅度低能量特征,通过幅度-能量相关图分析可以区分 AE 源信号和噪声信号。

由于缺乏对 AE 源机制以及 AE 信号传播特性的认识,波形分析法没有参数分析法成熟和广泛。但是,波形及其频谱分析仍可作为参数分析的辅助手段。通过观察波形和频谱的异常值,结合参数分析的初步结论,可以确定是否存在缺陷。

## 2 锅炉泄漏声发射逐点监测法

锅炉“四管”(水冷壁管、过热壁管、再热器管和省煤器管)泄漏是锅炉的常见故障<sup>[3]</sup>。在水压试验过程中,锅炉上接管、法兰、人孔以及缺陷穿透部位的泄漏,可产生大量的声发射信号。相对于其他声发射源,泄漏 AE 信号具有连续性特点,频谱分布范围比较宽,易于与其他声发射源信号区分。

由于锅炉整体结构非常复杂(如各种对流管束、冷却管道等),一般的定位方式如线性定位、柱面定位等已经不再适用,无法对泄漏源位置实现精确定位。笔者提出一种针对锅炉泄漏缺陷的声发射检测方法:逐点监测法。其基本原理是在可能存在泄漏的位置(如阀门、接管及人孔等)布置传感器,通过局部监测的方式,结合后续的信号分析,最终确定泄漏缺陷位置。

## 3 某型号锅炉泄漏的声发射现场检测

按锅炉水压试验规程<sup>[4]</sup>对某公司型号为 SZL10-1.25-A II 的锅炉进行水压试验并辅以声发射监测,该锅炉额定蒸发量为 10 t/h,额定蒸汽压力为 1.25 MPa,额定蒸汽温度为 194 ℃,燃料为Ⅱ类烟煤。采集水压试验过程中的声发射信号,现场检测如图 3 所示。



图 3 锅炉现场检测

### 3.1 锅炉泄漏声发射检测过程

声发射检测设备采用美国 PAC 公司的 SAMOS 型 48 通道声发射仪,传感器型号为 DP15I。基于声发射逐点监测法,分别在上锅筒轴向等间隔布置五个传感器,在右侧封头圆周方向均匀布置四个传感器,实现对筒体接管和阀门泄漏的监控,如图 4 所示。

试验开始前,需要进行通道灵敏度测试、背景噪声测量、波速以及 AE 信号衰减测量等准备工作,并确定声发射仪器的设置参数为:门槛值 43 dB,预触发 256 μs,模拟滤波 100 ~ 400 kHz,采样频率

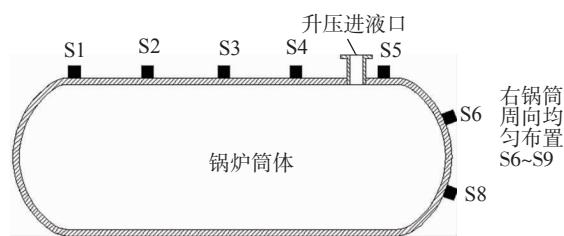


图 4 声发射传感器布置

1 MHz, 采样点数 2 K, PDT1 000  $\mu$ s, HDT 2 000  $\mu$ s, HLT20 000  $\mu$ s。

水压试验按加载曲线分为两个过程,分别是升压和保压,循环进行两次。用声发射仪器采集整个过程的声发射信号,监测锅炉在试验过程中的声发射源分布及其活性状况,如图 5 所示。

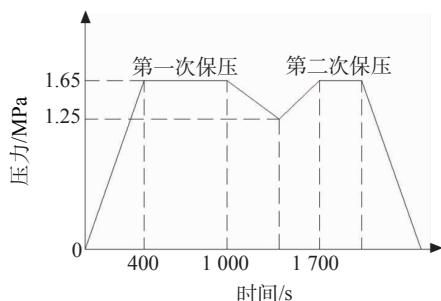


图 5 水压试验循环加载曲线

### 3.2 锅炉声发射检测数据分析处理

根据各通道信号的特点,提取 1 号和 5 号两个有异常信号的通道数据进行对比分析。整个试验过程 1、5 通道所监测的幅度历程图如图 6。结合图 5,水压试验过程主要分为四个阶段:0~400 s 为第一次升压,400~1 000 s 为第一次保压,1 400~1 700 s 为第二次升压,1 700~2 000 s 为第二次保压。从图 6 中可以观察到各阶段声发射信号的密集程度。

#### 3.2.1 幅值分析

##### 3.2.1.1 升压阶段

图 7 为前后两次升压过程的声发射幅度历程图。

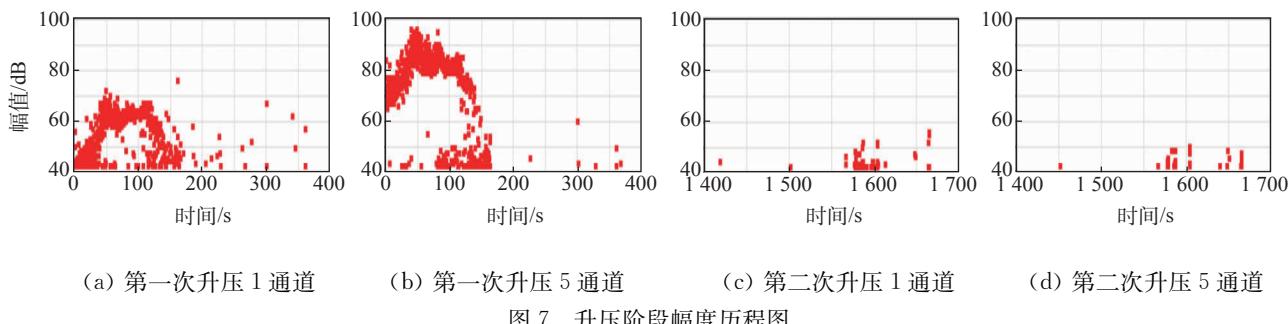
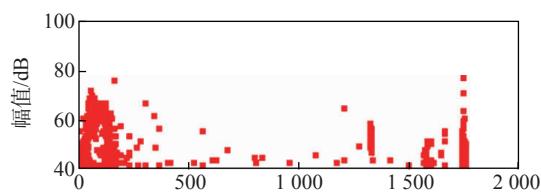
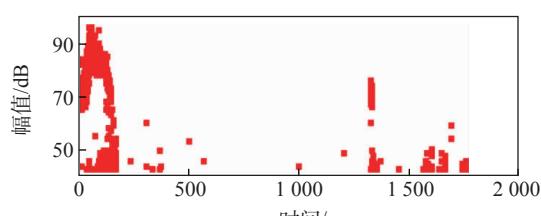


图 7 升压阶段幅度历程图



(a) 通道 1



(b) 通道 5

图 6 通道 1、5 幅度历程图

锅炉在第一次升压过程中,声发射非常活跃,产生密集的 AE 撞击信号。随着压力的逐渐上升,AE 信号幅度呈线性趋势增加,当达到一个临界点后又随压力的上升而平稳下降。这是因为从 0 开始逐渐增加压力的过程中,打压进入的液体对锅炉的不均匀扰动会非常大;随着压力的逐渐增大,容器内的压力增速逐渐降低,整个容器所承受的压力也趋于稳定,扰动减少,AE 信号量降低。另外,通道 5 的信号幅度明显高于通道 1,其原因是通道 5 旁边是升压进液口,如图 4 所示。升压过程对通道 5 所造成的信号干扰是最大的,所以其所接收的 AE 信号具有很高的幅度。

锅炉在第二次升压过程中,其 AE 信号量明显少于第一次升压过程,其原因有两个方面:首先,第二次加压过程从 1.25 MPa 开始,相对于从 0 开始加压,锅炉内压力增加趋于平缓,压力增速降低,干扰信号减少;其次,由于锅炉本身存在凯撒(Kaiser-J)效应,而第二次加压并未超过第一次所加的最高压力,材料结构变形保持在稳定状态,所以因材料变形应力释放所产生的 AE 信号减少。

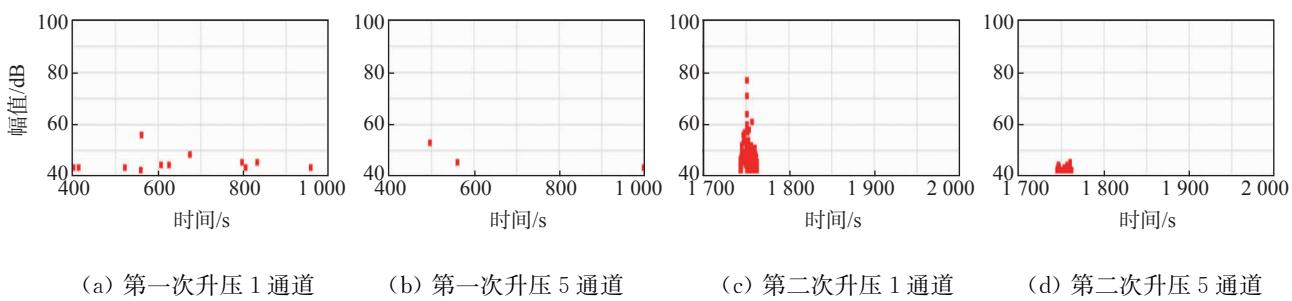


图 8 保压阶段幅度历程图

### 3.2.1.2 保压阶段

图 8 为前后两次保压阶段的声发射幅度历程图。由于保压阶段无外界扰动信号进入,所以如果没有活性缺陷,将不会产生 AE 信号(噪声除外),通过分析这个阶段各通道所接收到的 AE 信号就可以对锅炉的缺陷状态做出初步判断。

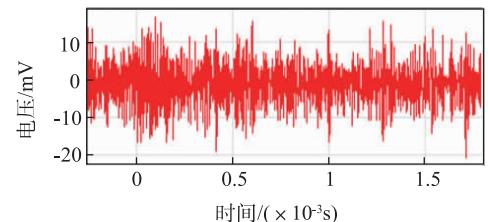
分别观察两次保压过程 1、5 通道的 AE 幅度历程图,可以发现 1 号通道的 AE 信号量明显多于 5 号通道,从 1 号通道到 5 号通道,AE 信号量和幅度有一个明显的递减特点,这是由于 AE 信号传播衰减所引起的。另外,第二次保压过程所产生的 AE 信号幅度与密度明显高于第一次,从这两个现象可以初步判定 1 号通道附近存在泄漏缺陷。

锅炉中的典型声发射源主要是泄漏、裂纹扩展、机械摩擦以及电子噪声等。其中机械摩擦和电子噪声属于稳定的 AE 源,其所产生的 AE 信号会伴随试验过程一直存在,从图 6 可以排除这种 AE 源的存在。而裂纹扩展等材料内部缺陷,其在升压过程中的 AE 信号为典型的突发型信号,根据 Kaiser 效应,即对材料进行反复卸加载试验时,材料在超过先前所施加的应力之前,不出现可探测到的声发射。由图 7 和图 8 可以看出,在第二次升压及保压过程中均出现了较多的 AE 信号,且第二次保压过程相对于第一次保压,在 1 750 s 出现了更为密集的 AE 聚集信号,其幅值也较高,这显然不符合 Kaiser 效应。另一方面,依据裂纹扩展机理,在第一次保压过程中裂纹在扩展时已经将累积的能量释放,即使在二次保压过程中,由于载荷超过临界值或缺陷的活性较强再次出现扩展现象,在载荷和加载时间相同的情况下,没有致使其产生更为强烈活度的能量来源,其缺陷扩展信号的幅值和聚集程度不会超过一次保压过程中的信号。考虑到加载压力波动和现场工况条件等,两次加载过程的信号应该相同或相差无几,而从图 7 可以看出,第二次保压的信号幅值已远超过第一次保压过程,这显然与理论不符。综合

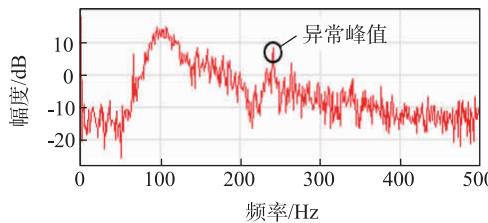
上述两方面的原因基本可以排除此信号来源为裂纹类缺陷。考虑泄漏的成因及现象,由于一次加载导致泄漏点冲破阻塞,在后续连续加载循环中,泄漏孔径增大导致二次保压信号超过第一次是完全可能的。

### 3.2.2 波形频谱分析

图 9 为保压阶段 1 号通道所接收到 AE 信号波形图和频谱图。可以看出该信号为连续型信号,频谱分布范围较宽,其特点与泄漏产生的 AE 信号一致。另外,从频谱图可以发现,在 250 kHz 附近出现了异常峰值。2 号通道也出现此现象,但没有 1 号明显,而在其他几个通道均未发现此现象,结合上述 3.2.1 对幅值历程图的分析,可以判定在 1 号通道附近存在泄漏缺陷。



(a) 时域波形



(b) FFT 频谱

图 9 保压阶段 1 号通道 AE 信号波形频谱图

### 3.2.3 检测结果

检测结束后,依据声发射信号的分析结果,对 1 号通道附近区域进行复查,发现在 1、2 号通道之间靠近 1 号通道处的壁管确实存在泄漏,验证了声发

(下转第 28 页)

表 3 超声波探伤长度评定区缺陷等级评定

mm

评定等级	板厚	单个缺陷指示长度	多个缺陷的累积指示长度
对接焊缝 I 级		$t/4$ , 最小可为 8	在任意 $9t$ 焊缝长度范围不超过 $t$
对接焊缝 II 级		$t/2$ , 最小可为 10	在任意 $4.5t$ 焊缝长度范围不超过 $t$
全熔透角焊缝 I 级	10~68	$t/3$ , 最小可为 10	—
部分熔透角焊缝 II 级		$t/2$ , 最小可为 10	—

定,如对波形不能准确判断时,应辅以其他检验做综合判定。

最大反射波幅位于Ⅱ区(长度评定区)的缺陷,其指示长度小于 10 mm 时按 5 mm 计。

相邻两缺陷各向间距小于 8 mm 时,两缺陷指示长度之和作为单个缺陷的指示长度。

## 6 检验结果的等级分类

最大反射波幅位于Ⅱ区的缺陷,根据缺陷指示长度和多个缺陷的累计长度按表 3 进行分级。满足表 3 质量等级要求的判为合格,不满足表 3 质量等级要求的判为不合格。表 3 中  $t$  为板厚,母材板厚不同时,可按薄板评定。

反射波幅位于弱信号评定区(I 区)的非裂纹性缺陷,均评为 I 级。超声波探伤判定为裂纹、未熔合、未焊透(对接焊缝)等危害性缺陷者,应判为不合格。反射波幅位于判废区(Ⅲ区)的缺陷,无论其指示长度如何,应判为不合格。

不合格的缺陷,应以返修,返修区域修补后,返修部位及补焊受影响的区域,应按原探伤条件进行复验。

(上接第 24 页)

射技术用于检测锅炉泄漏缺陷的可行性和准确性。

## 4 结论

(1) 采用声发射技术检测锅炉的泄漏缺陷,由于其本体和附属结构的复杂性,无法对锅炉的泄漏位置进行精确定位,应该采用逐点监测的方法,根据需要在锅炉上布置传感器进行局部监测。现场检测结果验证了该方法的可行性与准确性。

(2) 锅炉水压试验在升压过程中 AE 扰动信号较多,而保压阶段 AE 信号干净平稳,所以在实际检测中应主要关注保压阶段的 AE 信号,升压过程的 AE 监测可以作为缺陷判定的辅助参考。

(3) 对保压阶段声发射信号幅值历程图进行分

## 7 结论

根据每条焊缝的受力状况,确定出其所需的超声检测技术等级、缺陷评定等级、检测比例、熔深要求。每条焊缝的具体要求得以明确,使得检测各方具有统一的标准,达到标准细化且统一的目的。

平行四边形截面整体节点超声检测的难点在于特殊角接接头的检测。根据 8 种不同的角接接头形式,拟定了针对性较强的超声检测方法,采用斜探头进行直射法和一次反射法检测,采用直探头沿焊接接头检测。选定适当的超声检测灵敏度,对位于Ⅱ区的非危害性缺陷进行评定,不合格缺陷按规定返修并复探。按照本检测方案对黄冈桥总计 186 根,总重约 11 000 吨的平行四边形截面整体节点杆件进行了超声波检测。实践证明检测结果准确可靠,能够满足工艺规范要求。

## 参考文献:

- [1] TB 10212—2009 铁路钢桥制造规范[S].
- [2] GB 11345—1989 钢焊缝手工超声波探伤方法和探伤结果分级[S].

析,比较各通道的 AE 信号量和幅度,可以初步判定泄漏缺陷位置。另外,泄漏的 AE 信号是连续型信号,而且当锅炉存在泄漏缺陷时,其 AE 信号频谱会在某个频率范围出现异常值,所以可以综合幅值历程图和波形频谱图对检测结果进行分析判断。

## 参考文献:

- [1] 李兵,沈功田,周裕峰,等.电站锅炉无损检测技术[J].无损检测,2006,28(8):426-430.
- [2] 沈功田,耿荣生,刘时风.声发射信号的参数分析方法[J].无损检测,2002,24(2):72-77.
- [3] 任恒昌.声发射技术在锅炉监控检验中的应用[J].电力安全技术,2000(6):23.
- [4] TSG G0001—2012 锅炉安全技术监察规程[S].