

# 金属压力容器的声发射在线监测和安全评定

## Acoustic Emission on-line Monitoring and Safety Assessment for Metallic Pressure Vessels

劳动部锅炉压力容器检测研究中心  
沈功田 李邦宪 段庆儒 刘时凤

本文报导了采用声发射技术进行压力容器在线监测和安全评定的方法,给出了高压乙烯球罐、集束式高压氩气瓶、120m<sup>3</sup>液氩和氩气球罐等典型案例的检测方案和检测数据。检验结果表明,水压试验和在线监测交替进行是声发射检测较合理的搭配;声发射在线监测,既不影响生产,又可保证容器的安全使用和延长容器开罐检验周期,可为用户带来较高的经济社会效益。

**关键词:** 压力容器 声发射 在线监测 安全评定

### 1 前言

《压力容器安全技术监察规程》和《在用压力容器检验规程》规定,在用压力容器必须进行定期检验以保证压力容器的安全运行。然而,在生产实际中常常遇到,某些压力容器作为其它装置的气源,由于整体生产工艺的需要,即使到达检验周期也不能停止运行,因而需要一种可靠的在线检验方法对压力容器在运行过程中进行在线监测和安全评定,以确保压力容器运行的安全和确定必须停产的日期。生产中遇到的另一种情况是,大量1985年以后制造、安装和使用的压力容器,在花费大量人力、物力进行停产全面开罐检验后,没有发现任何严重缺陷,然后重新投入下一个检验周期的运行使用,这实际上为用户造成了一定的经济损失。因此,发展一种可靠的压力容器在线监测检验技术,在不影响容器正常使用的前提下对其进行安全评价是十分有意义的。

声发射技术是六十年代开始应用,目前仍

在逐步成熟的一种新的无损检测技术,它是利用材料在受载过程中内部缺陷产生裂纹萌生或扩展的释放应力应变波的原理对材料进行检测和评价的<sup>[1~4]</sup>。因此,采用声发射技术对压力容器进行在线检测,只需用工作介质进行升压加载即可进行。本文根据我们近10年来从事150多台压力容器在线检测的数据和经验,总结出了压力容器声发射在线检测和安全评定的方法,并报导了一些典型的检测案例和检测结果。

### 2 声发射检测技术和评定方法

#### 2.1 声发射检测技术

材料受外力或内力作用,引起材料内应力集中局部源迅速释放能量产生瞬态弹性应力波的现象称为声发射(AE)。金属材料中的声发射源主要为裂纹的萌生和扩展、屈服和塑性变形、夹杂物的断裂和脱开等。声发射检验技术的基本原理就是利用耦合在材料表面上的压电陶瓷探头将受载过程中材料内部声发射源发射的弹性波转换为相应的电信号,然后应用电子设备

将这些电信号加以放大和处理使之特性化, 并进行显示和记录, 从而获得材料内部声发射源的特性参数, 达到检验的目的。反之, 通过分析检验过程中声发射仪器获得的声发射信号的各种参数, 可以了解和掌握材料内部缺陷的活动情况, 从而进行缺陷的安全评定。

由于许多声发射源都表现为点源, 可以认为以球面波的形式发射能量, 通常探头位于声发射源的任意方位上都能探测到有关的声发射信号, 因此一个声发射探头的检验只能探测一定的范围而无取向性, 两个声发射探头间通过时差计算可以对两个探头之间的声发射源进行一维线定位, 而三个声发射探头通过时差计算可以对这一三角形探头阵列内的声发射源进行二维面定位。由于材料内的应力波在传播过程中其能量是逐渐衰减的, 因此对于一般现场压力容器检测来说, 探头之间最合适的距离为 3 至 5 米, 显然对于大型压力容器的整体声发射检测, 需要多通道声发射信仪。

## 2.2 压力容器的声发射安全评定方法

对压力容器来说, 声发射检测通常是在耐

压试验过程中进行的。在整个检测过程中, 声发射仪器系统采集了容器上产生的声发射信号, 并用微机将其永久地储存下来以便进行事后处理。按照声发射定位源在升压和保压的不同阶段出现的次数, 先将声发射定位源分为强活性、活性、弱活性和非活性声发射定位源, 然后再按照声发射定位源信号的幅度和能量大小, 将其分为高强度、强度和低强度声发射源, 最终即可将所有的声发射定位源分为如表 1 所示的 12 种类型 6 个级别。

表 1 声发射源的分类和级别评定

活 度 性	强	强活性	活性	弱活性	非活性
	中				
	高强度	F	E	C	B
	强度	E	D	B	A
	弱强度	C	B	A	A

一般认为 D、E、F 三级为危险的声发射源, C 级源如仅在第一次升压过程中出现则可以不予考虑, 如在容器的第二次加压过程中出现, 则认为是危险的声发射源, A、B 级声发射源被认为是安全的。

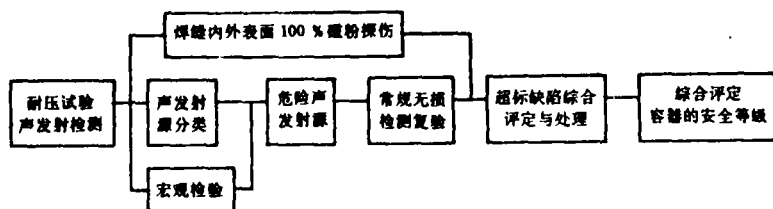


图 1 可进行全面常规无损检测复验的压力容器声发射检验和评定程序框图

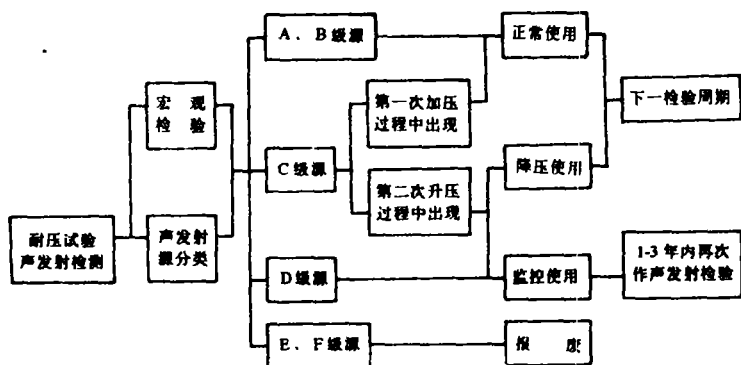


图 2 无法进行常规无损检测复验的压力容器声发射检验安全评定结果

在声发射检验和数据分析结束后, 将确认的危险声发射源标定在容器的壳体上, 然后对

其进行宏观和常规无损检测复验。由于产生声发射源的因素很多,有些被认为是危险的声发射源往往是由于机械摩擦、表面氧化皮剥落和局部应力释放等因素产生的,因此通过宏观检验可以首先排除一些干扰因素引起的所谓伪声发射源。对于可以进行焊缝射线或超声波探伤以及内外表面磁粉或渗透探伤检验的压力容器,其安全评定结论要按对危险声发射源进行无损检测复验的结果来进行,如发现超标缺陷应进行返修处理,其检验评定程序框图如图1所示。对于无法进行焊缝射线或超声波探伤检验的压力容器,除进行宏观和外表面磁粉或渗透探伤检验排除部分干扰源外,对容器的安全评定结论可直接按声发射源的级别来进行,其评定结果如图2所示。

### 3 声发射在线检测应用实例

#### 3.1 高压乙烯球罐

##### 3.1.1 球罐的基本情况

球罐的基本设计参数为内径:2800mm;壁厚:125~140mm;设计压力:21.5MPa;设计温度:常温;工作介质:乙烯气;材质:19MnR。该球罐于1985年安装后经超声波检验发现在环焊缝内距外表面70mm处存在一个长45mm自身高4mm的超标缺陷,由于该缺陷返修异常困难,最后确定采用声发射监测和断裂力学评定相结合的方案,以确定安全工作压力。

##### 3.1.2 断裂力学计算结果

以超声波探伤测量的缺陷尺寸长45mm高4mm为依据,按CVDA-84标准进行断裂力学计算得到该缺陷的有关参数为,寿命:3年;断裂韧性:0.04mm;应力差:12MPa;脆断最大工作压力:>21.5MPa;疲劳分析最大工作压力:17MPa。

##### 3.1.3 声发射检测和在线监测结果

自1986年10月到1995年12月共对该球罐进行了6次声发射在线监测、3次水压试验声发射检测。声发射在线监测以乙烯介质直接升压,最大试验压力按 $p_t=1.05p_0$ 确定,式中 $p_0$ 为推荐最大工作压力。水压试验时最大试验

压力 $p_t=1.25p_0$ 。推荐最大工作压力由用户根据生产需要或参考断裂力学计算结果给出。声发射试验时,采用三角时差定位对球罐进行整体监测(1~6号探头)或仅对缺陷部位进行定点监测(7~9号探头),如图3所示。为了保证在线监测的安全,试验过程中,任何随压力增加声发射参数显著增加的情况都要暂停试验,查明原因。

表2列出了对该球罐进行9次声发射检验的结果,在所有的检验过程中,缺陷部位均无声发射定位源出现,而裙座与球罐壳体的角焊缝部位则多次重复出现声发射定位源,但经无损检测复验均没有发现任何缺陷,这些声发射源是由于升压过程中球罐壳体膨胀与裙座摩擦而产生的。1990年进行第二次水压试验声发射检测,在接管部位出现2处C级声发射源,经表面磁粉探伤,发现1处存在两条5mm长的表面裂纹。

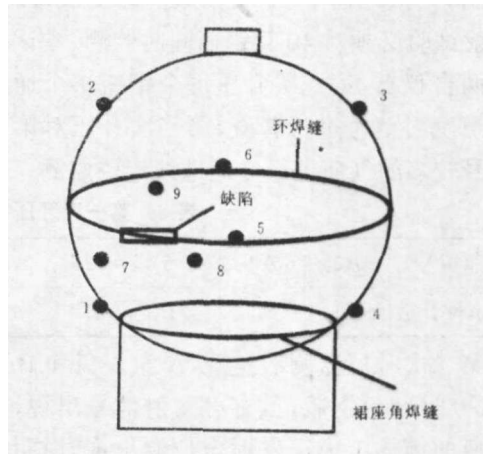


图3 乙烯球罐声发射检测探头布置示意图

#### 3.2 集束式高压氢气瓶

##### 3.2.1 基本情况

该批气瓶总共76只,为从美国引进的二手设备,工作3年后应停产进行全面检验,但用户必须连续供气,因此采用在线检验的方法。单个气瓶的设计参数为:设计压力16.7MPa;试验压力22MPa;设计温度常温;外径600mm;筒长6000mm;材质A372-58;设计壁厚20.8mm;实测壁厚22~24mm;结构形式无缝锻造;工作介质氢气。每8只钢瓶构成一束,每5束构成一

组,由一个阀门控制氢气的进出。该套贮氢装置 共有两组气瓶。

表 2

检验日期	加载方式	监测方式	最高工作压力 (MPa)	试验压力 (MPa)	声发射定位源	源部位	处理结果
1986年10月	在线	整体	17	18	C级1个	接管	复验无缺陷
1987年7月	在线	整体	15	16	C级2个	裙座角缝	复验无缺陷
1987年10月	水压	整体	15	18.5	C级3个	环焊缝1 裙座角缝2	复验无缺陷 复验无缺陷
1989年5月	在线	定点	15	15.5	无	—	不处理
1990年6月	水压	整体	17	21.3	C级5个	接管2处, 裙座角缝3处	1处2个5mm裂纹 复验无缺陷
1992年6月	在线	整体	15	16	A级1个	裙座角缝	不处理
1993年7月	水压	整体	17	21.3	C级3个	裙座角缝	复验无缺陷
1994年12月	在线	定点	15	15.5	A级3个	母材	不处理
1995年12月	在线	定点	15	16	B级1个	母材	不处理

### 3.2.2 检验方案

由于这些气瓶的原设计工作介质为氧气,现改为氢气介质,因此需要进行这种材料的常温高压氢腐蚀试验。由于每40只钢瓶由一个阀门控制,升压过程中40只钢瓶同时受载,因此声发射试验必须对40只钢瓶同时监测。本试验采用两台仪器,第一次升压每个钢瓶1个通道采集声发射信号进行普查,第二次升压对第一次信号较多的气瓶进行2通道线定位监测。压

力变化范围为14~16MPa。

### 3.2.3 常温高压氢环境下 A372 钢 $K_{III}$ 的测定试验结果

采用 WOI. 试样,断面经低倍显微观察,未发现氢致裂纹,实测  $K_{III} > 113.5$  MPa。

### 3.2.4 声发射检验结果

第一次压力循环测得有12只钢瓶声发射信号较多,如表3所列,他们需要进行第二次升压双通道声发射定位监测。

表 3 第一次升压 12 只钢瓶的声发射试验数据

钢瓶编号	A3	A4	A6	A24	A35	A39	B3	B4	B5	B6	B10	B30
AE 事件计数	195	80	71	67	14	77	81	26	43	58	49	7

第二次升压监测后发现,A组6只和B组B5、B30号8只钢瓶,虽有声发射信号出现,但在钢瓶的筒体上无声发射定位源出现,说明这些信号来自气瓶两端的支架上。B3、B4、B6和B10钢瓶出现了一些声发射定位源信号。

根据表1对这些钢瓶的检验结果进行分类得到:B4为C级源,B3、B6、B10为B级源,A1~A40和B组其它为A级源。对B、C级声发射源部位进行外观及测厚检查均未发现异常。最后确定B3、B4、B6、B10四只气瓶工作一年后再进行一次声发射在线监测,其它气瓶可再延长3年工作期限。

### 3.2.5 一年后的复验结果

一年后,对上述4只气瓶进行声发射线定

位监测,发现他们仍出现一些声发射定位源。B3和B10号钢瓶为低强度弱活性声发射源,分类B级;B4和B6号钢瓶为强度弱活性声发射源,分类为C级。由于这些数据与一年前的检测结果无明显增加,因此这4只钢瓶可以在正常压力下连续工作2年,与其它钢瓶一并进行下一轮检验。

表 4 B 组 4 只钢瓶一年后复验的声发射数据

钢瓶编号	B3	B4	B6	B10
定位源数	2	5	7	4
幅度(dB)	45.49	58~60	41~60	41~51
源评级	B	C	C	B

### 3.3 液氨球罐

#### 3.3.1 球罐的基本情况

设计参数为:设计压力 2.5MPa;设计温度 < 40℃;壁厚 38mm;内径 6100mm;容积 120m<sup>3</sup>;材质 16MnR。该球罐于 1979 年制造,1980 年投入运行,使用时实际工作压力小于 2.1MPa。1984 年对其进行开罐检验,100%磁粉探伤未发现表面裂纹,X 射线拍片抽查,发现焊缝内有 10%为超标缺陷,大部分为夹渣,1992 年开罐检验,采用水压试验声发射检测对这些超标缺陷进行安全评定,1995 年采用工作介质液氨升压,进行在线声发射监测,对球罐的运行状况进行安全评定。

### 3.3.2 1992 年水压试验声发射检测结果

水压试验最高试验压力 3.0MPa,根据 Kaiser 效应采用两次加压的方式以排除大量氧化皮剥落引起的声发射干扰信号。在压力大于 0.5MPa 对球罐的整个升压和保压过程进行了声发射监测和试验数据采集,发现有三外 D 级源 S1~S3 位于球罐的焊缝上,如图 4 所示,其它出现的声发射源均为 A、B 级源,不需进行处理。

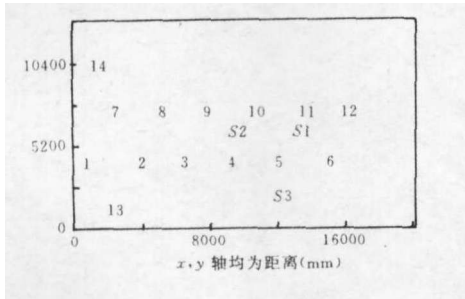


图 4 氨罐声发射源定位图

对 S1~S3 三个 D 级源的焊缝部位进行内外面磁粉和超声波探伤发现,S3 处有一长 80mm、深 30mm 的埋藏超标缺陷。由于其它缺陷部位无声发射定位源出现,对 S3 处的活性超标缺陷返修处理后,该球罐即可投入正常运行。三年后进行下次检验。

### 3.3.3 1995 年在线声发射检测结果

由于该球罐焊缝内仍然存在大量的超标缺陷,因此在工作三年后进行在线声发射检测以观察这些缺陷是否有活动。由于最高工作压力为 2.1MPa,介质升压到 2.3MPa 即可。在 1.9~2.3MPa 的两次升压和保压过程中,仅出现

少量随机的一次性声发射定位源,分类为 A 或 B 级,不需对其进行无损检测复验或进一步处理,该球罐可再连续运行 3 年。

## 3.4 氩气球罐

### 3.4.1 球罐的基本情况

设计参数为:设计压力 3.06MPa;设计温度 < 50℃;壁厚 32mm;内径 6100mm;容积 120m<sup>3</sup>;材质 16MnR。该球罐于 1990 年制造,1991 年投入运行,使用时实际工作压力小于 2.7MPa。按规定新球罐在运行一年后需进行停产开罐检验,但由于该罐需为炼钢厂连续供气,无法停产进行检验,因此采用声发射在线监测的方式进行检验,监测过程中的最高试验压力为 3.0MPa,监测得到的源定位图如图 5 所示。

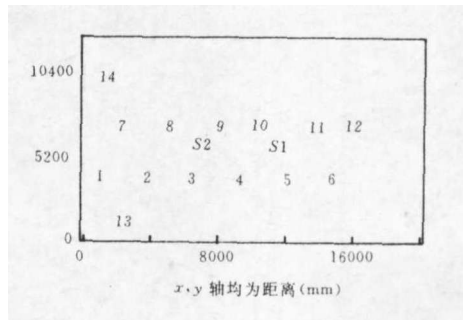


图 5 氩气球罐声发射源定位图

### 3.4.2 声发射在线监测结果

总共 14 个探头均匀布置在球罐的外壳上以三角定位对球罐进行整体监测,压力从 1.94MPa 升到 3.0MPa。整个监测过程中出现一个 D 级强度活性源 S1、一个 C 级弱强度活性源 S2 和若干个一次性分散的 A、B 级源,如图 6 所示。S1 和 S2 均位于球罐不同支柱的角焊缝上,经磁粉复查发现 S1 处有两条 10mm 长的裂纹。

将 S1 部位的裂纹打磨处理后,该球罐即可再连续工作 2 年,然后进行下一次检验。

## 4 结论

(1) 声发射在线监测是压力容器在线检验的一种方便可靠的方法;

(2) 声发射检测可以对已知缺陷进行评定;

(3) 声发射检测可以用来确认和提高压力

容器的安全工作压力；

(4)声发射在线监测,既不影响生产,又可保证容器的安全使用和延长容器开罐检验的周期,可为用户带来较高的经济社会效益；

(5)水压试验和在线检测交替进行是声发射检测较合理的方法。

#### 参 考 文 献

1. T. J. Fowler. Experience with Acoustic Emission Monitoring of Chemical Process Industry Vessels, Progress in Acoustic Emission ■ Proceedings of the 8th International Acoustic Emission Symposium, Japanese Society of NDT, 1986
2. 沈功田等. 新制造球罐水压试验的声发射检测. 无损检测, 1992; 14(3)
3. 沈功田等.  $\varnothing 2.8\text{m}$  合成氨水洗塔的声发射检测和评定. 无损检测, 1994; 16(11)
4. Shifeng Liu etc. Acoustic Emission Inspection and Defect Assessment for Metallic Vessel, Int. J. Pres&Piping, 38, 1989