

# 新制球罐水压试验的声发射检测

劳动部锅炉压力容器检测研究中心 沈功田 万耀光 刘时风 段庆儒

【摘要】介绍了用多通道声发射仪对大型球罐水压试验进行的声发射监测和焊接缺陷的检验。

关键词：声发射检测 球罐

## ACOUSTIC EMISSION TESTING OF NEW SPHERICAL VESSELS DURING HYDROSTATIC TESTS

Shen Gongtian Wan Yaoguang Liu Shifeng Duan Qingru

【Abstract】Acoustic emission monitoring of large spherical vessels during hydrostatic tests and detection of welding defects are carried out by multichannel acoustic emission analyzer.

声发射(AE)技术已成为金属压力容器的重要无损检测方法之一<sup>[1,2]</sup>，由于能对活动性缺陷进行动态检测，因此在压力容器水压试验过程中经常用AE技术进行监测。它既可监视缺陷的活动状态，预防缺陷失稳扩展造成罐体的泄漏；又可以找出漏检的缺陷。某石油化工总厂1984~1987年期间，新制了10台400m<sup>3</sup>液化石油气储罐，在制造过程中，由于施工单位质保体系的失控，在组装焊接时出现了大量的超标缺陷、错边以及外观尺寸的超差。其中G03、G05两台球罐由于射线拍片部件混乱，造成多次返修，在整体热处理时G05号球罐又有一区域超温达710℃。我们从实际安全使用考虑，决定对其中质量较低的三台球罐在水压试验时进行AE监测和评价，以便对这些球罐给以科学的处理意见。

### 检测原理及程序

#### 1. 原理

图1给出了声发射技术的检测原理。声发射探头将声发射源发射的弹性波转变为电信号，然后进行放大和处理，从而得到一些声发射特征参数，根据这些特征参数即可推测材料内部声发射源的特征或所处的状态，如果用多通道声发射检测系统，还可以确定声

发射源即缺陷的具体部位。声发射技术是一种动态无损检测方法，它区别于超声、X射线、涡流等其它无损检测技术。

#### 2. 程序

压力容器声发射检测一般需要采用多通道声发射检测分析仪，检验程序如下：

##### (1) 审查资料

在进行声发射检验前，为制订合适的检验方案应首先审查被检验压力容器的原始资料，内容包括：

- a. 该压力容器的外形特征，组装后的整体尺寸图，表示焊缝位置和安装情况的整体装配图，从而预计容器可能存在的薄弱部位；
- b. 该容器的材料特性和焊接特性，包括母材和焊缝的化学成分、机械性能、热处理状态和声发射特性；
- c. 该容器的应力水平和受载历史；
- d. 预计实验过程中可能产生的噪音源及消除方法。

##### (2) 加压程序

压力容器一般以水、空气或工作介质(液态或气态)进行耐压试验，考虑到缺陷产生的信号与噪音信号不同阶段的活动情况，我们采用分步加压和保压的方式进行耐压试验和声发射数据的收集。利用金属的Kaiser和Felicity效应，在第一次达到考核压力后，需泄压到容器的工作压力再进行第二次升压，以识别真正的缺陷信号。采用的加压方式如图2所示。如施工单位和用户有特殊要求，根据需要还可在任意压力下进行保压测试。

##### (3) 声发射仪器的安装和调试

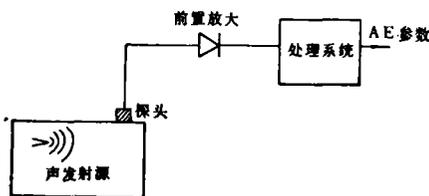


图1 声发射检测原理图

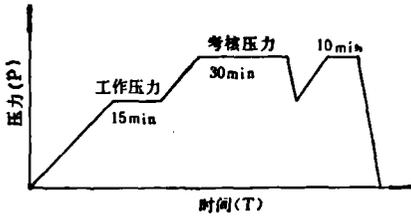


图2 声发射检测加压曲线

a. 根据被检测压力容器的几何尺寸及材料的声发射特性来确定声发射探头的布置图和使用的通道数, 探头布置得越均匀合理, 声发射源定位的准确度就越高。

b. 根据测量的系统背景噪音值, 设置仪器增益、门檻等声发射系统参数, 确保每个通道的灵敏度尽可能一致。

c. 精确测定探头之间的时差, 然后设置声发射参数及其关联图。检测过程中最重要的三个关联图为声发射源定位图、声发射事件通道关联图和事件振幅分布图。

d. 以折断 $\phi 0.5\text{mm}$  HB 铅芯为标准声发射源模拟信号, 在压力容器表面进行标定, 然后调整声发射系统的空间参数和时间参数, 最后使模拟源在计算机屏幕上的显示达到完全一一对应的位置, 而且无盲区, 即在容器上被检测部位的任意位置发出一模拟信号, 在定位图上必有一对应的定位源显示, 此时系统即可进入检测状态。

#### (4) 耐压试验声发射监测及信号的采集

在低压的情况下, 仅观察容器的声发射信号, 检查加压设备是否会带来噪声干扰或有其它外来噪声干扰, 如有干扰应设法排除。当压力达到三分之一最大考核压力之后, 应连续正式收集和记录容器的声发射信号。在试验过程中, 如发现异常的声发射信号, 应首先停止加压, 在保压情况下看其活动情况, 并决定是否降低载荷或卸载以查明原因。

#### (5) 声发射数据的分析与分类

在加压试验过程中, 仪器仅能实时监测和快速收集大量的声发射数据, 但无法进行详细处理和分类; 试验结束后, 可以对收集到的数据进行详细分析和处理, 以便从大量的声发射数据上找出有潜在危险的声发射源。

a. 按加压过程中声发射定位源活动频繁程度可将声发射定位源分为如下三类: 强活性源, 即升压和保压过程中频繁出现的定位源; 活性源, 即升压和保压过程中出现两次或几次的定位源; 非活性源, 即升压和保压过程中仅出现一次的定位源。

b. 按声发射信号的强度也可将声发射定位源信

号分为三类: 高强度源, 即声发射信号的振幅或能量很高(不同材料的标准不同); 强度源, 即声发射信号的振幅或能量较高(大于平均值); 低强度源, 即声发射信号的振幅或能量较低(小于平均值)。

c. 对声发射定位源从活性和强度两方面考虑进行综合分类, 即可将所有的声发射定位源分为如表1所示的九种类型六个级别。

表1 声发射源的分类和级别评定

活性	强度		
	高强度	强度	低强度
强活性	F	E	C
活性	E	D	B
非活性	C	B	A

d. 一般认为 D、E、F 级为危险的声发射源, 必需予以标定和复验; B、C 级源如在低压阶段出现可以不予考虑, 但如在工作压力以上出现, 则认为是危险的声发射源, 必需进行标定和复验; A 级声发射源被认为是安全的, 不需作进一步的处理。

#### (6) 危险声发射源的标定

将仪器置于工作状态, 通过在容器表面上发射模拟信号可以找到上述选定的危险声发射源在容器上所对应的具体部位, 从而确定此区域即是危险声发射源所处的部位。考虑到声波的传播特性, 我们所选声发射源区域的直径为该组声发射探头之间距离的20%。

#### (7) 危险声发射源的 NDT 复验

首先对上述已标定出的声发射源部位进行宏观检验, 检查是否有产生噪音源的因素; 其次采用磁粉或着色作表面探伤检验, 确定是否有表面裂纹; 第三步采用超声波对源区域内的焊缝进行检验; 第四步对超声波检验发现的缺陷进行 X 射线拍片检验。另外, 也可以不用超声波, 而直接用 X 射线对声发射源区域内的焊缝进行拍片检验。

#### (8) NDT 复验结果的处理

经 NDT 检验, 在声发射源区域内发现的超标缺陷被认为是活动性的, 因此必需进行返修处理。

### 检验结果及分析讨论

#### 1. 三台 400m<sup>3</sup> 球罐的技术参数

设计压力为 1.89MPa; 水压试验压力为 2.36 MPa; 工作介质为石油液化气; 材质为 SPV36(日本); 内径为 9200mm; 壁厚为 34mm; 结构形式如图 3 所示, 整个球罐由两极、两个温带和一个赤道带组成, 每一个温带或赤道带又由 16 块球壳板组成。SPV36 制

材的化学成分为(%)：C 0.17, Si 0.45, Mn 1.38, P 0.009, S 0.02; 钢材的机械性能为： $\sigma_b$  539N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_s$  382.2N/mm<sup>2</sup>,  $\delta_5$  30%;  $\alpha_k$  值分别为 173.5、186.2 和 182.3 N·m/cm<sup>2</sup>。

## 2. 声发射检测系统及工作状态

检验所用声发射仪为美国 PAC 公司生产的 SPARTAN 型 26 通道声发射检测系统, 该系统由计算机控制, 能够实时显示和存储检验数据, 并具有试验后数据处理的功能。检测用探头为 PAC R15 型宽频带响应探头, 前置放大器为 PAC 1220A 型, 前置增益设置为 40dB。检测用软件为 SPP/DAQ.COM 和 SPP/DAQ.PRQ。总共 26 个探头布置在球壳的外表面上, 探头的阵列可以显示在仪器屏幕上(图 3、4)。探头之间以三角阵列进行时差声发射源定位, 探头之间的最小间距为 2.6m, 最大间距为 4m。试验实测背景噪音小于 30dB, 系统门槛设定为 40dB。主放大器的增益设置为 45dB, 系统总增益为 85dB。

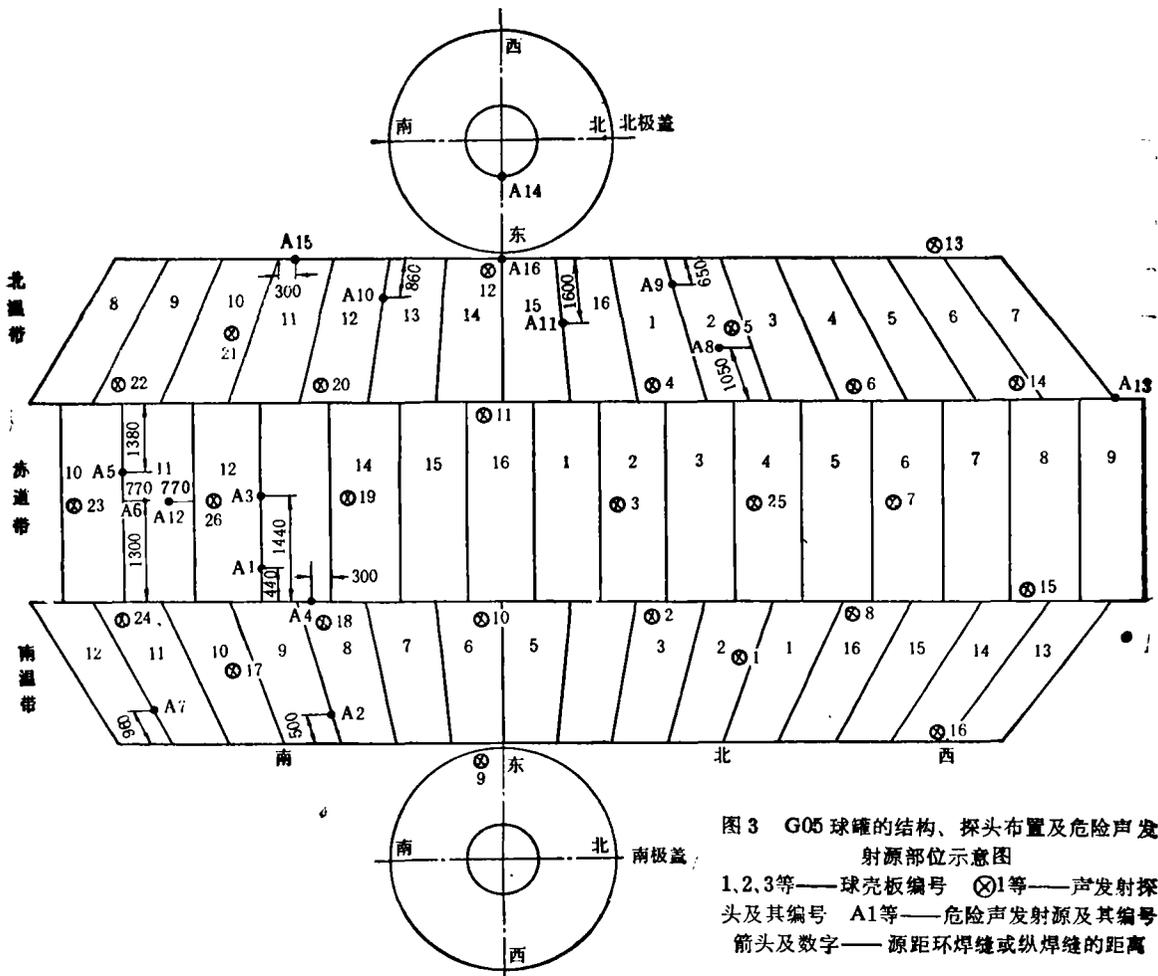
## 3. 声发射检测结果

在整个水压试验声发射检测过程中, 由于声发射仪器的灵敏度很高, 探测到的声发射信号不完全是缺陷活动所产生的。因此, 水压试验结束后应对大量的试验数据进行分析, 筛选出真正有潜在危险的声发射源。参照美国现行标准及我们自己的经验, 根据信号的强度及活性分析得到 G03、G05 和 G06 号球罐分别有 31、16 和 24 个危险的声发射源。图 4 为 G05 号球罐在整个水压试验过程中的声发射定位源总图, 图 3 标出了 G05 号球罐 16 个危险声发射源在球罐上的具体部位。与此类似 G03 和 G06 号球罐的危险声发射源也被标定在球壳上。

另外, 在整个水压试验声发射检测过程中, 对于 G03 和 G05 两台球罐在多次返修部位和超温区域都没有发现活性的声发射源, 这说明球罐整体热处理后焊接应力消除良好, 并且超温区域在考核压力下也是安全的。

## 4. 常规无损检测复验结果

声发射检测只能提供某些部位有潜在危险的声发



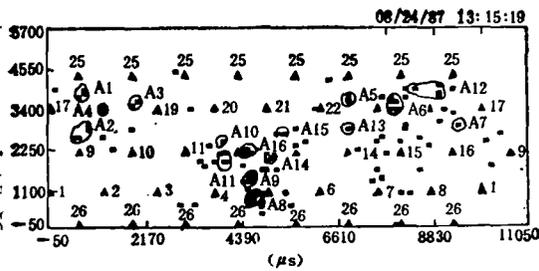


图4 仪器显示探头布置及声发射定位源总图  
(右上角数字为试验日期)  
X、Y轴——声波传播时间(μs) ▲1等——声发射  
探头及编号 ■——声发射定位源 ●A1等——  
危险声发射定位源及编号

表2 危险声发射源部位分布及复验结果统计表

球罐号	G03	G05	G06	
危险声发射源数(个)	31	16	24	
源部位分布	纵环焊缝(处)	19	12	17
	支柱角焊缝(处)	5	2	1
	垫板(处)	4	1	2
	母材或焊疤(处)	2	—	4
	人孔(处)	1	1	—
焊缝上有超标缺陷的源数(个)	7	6	4	

射源,而且能判断该源的活动程度,但不能确定该处是否一定有缺陷以及缺陷性质和尺寸,另外对于源的具体位置只能给定一个小的区域,并不能给出源的精确位置。因此,要弄清产生声发射的原因及确定缺陷的具体部位和尺寸还必需借助于常规无损检测方法复验。我们采用磁粉及超声波对位于源区域内的焊缝进行检验,采用着色对柱腿角焊缝进行检验。三台球罐的复验结果如表2、3所示。经过声发射检验后确定G03号球罐有31个危险的声发射源,经实际标定后,位于焊缝上的为19处,经磁粉和超声复验,在这

19个源中发现七处有超标缺陷。G05号球罐有16个危险的声发射源,其中12个位于纵环焊缝上,这12个源中六个有超标缺陷。G06号球罐有24个危险的声发射源,其中17个位于纵环焊缝上,在这17个源中发现四处有超标缺陷。另外,水压试验后对整个球罐进行100%磁粉探伤,没有发现其它部位有表面裂纹。

### 5. 检验结果的分析 and 讨论

从上述复验结果可以看到,三台球罐声发射检测共检出有危险性的声发射源71处,其中48处位于球罐的纵环焊缝上,在48处源中发现17处有超标缺陷。这一检验结果并不意味着声发射检验不准确,这是由

表3 声发射源内超标缺陷的部位及尺寸统计表

球罐编号	G03			G05			G06		
	AE源号	长度	深度	AE源号	长度	深度	AE源号	长度	深度
表面裂纹	A20	20,20		A7	10		A12	5	
	A21	30,50					A17	5	
	A23	10,30							
	A24	50							
	A25	15							
	A30	5							
体内裂纹				A4	10	10~15 (内表面)*	A9	20	14(内表面)
				A5	10	5(内表面)			
				A7	10	15(外表面)			
				A13	10	3(内表面)			
				A15	10	14(外表面)			
未熔合	A30	15	8(外表面)						
	A31	300	15(外表面)						
条状夹渣				A1	10	15(外表面)	A1	15	10(内表面)

\* 表示焊缝内缺陷距内表面或外表面的深度

(下转第74页)

显:

c. 温热工件可提高工件表面渗透剂的温度, 从而使其粘度下降, 增加其流动性, 可提高渗透能力;

d. 根据分子物理学理论, 气体的平均平动能 $W$ 只与温度有关, 并与绝对温度成正比。

$$W = 3/2KT$$

当工件温度升高时, 既使裂纹内残留水分得以挥发, 又提高了裂纹中空气的平均平动能 $W$ 。这时, 空气分子运动加剧, 内压升高, 部分气体分子排出裂纹。

根据阿伏伽德罗定律, 即 $P = n_0 kT$ , 随着温度 $T$ 升高, 裂纹中单位体积内所含气体分子数 $n_0$ 急剧减少。一旦温度偏低的渗透液封闭了裂纹开口, 裂纹内的气体温度开始下降, 导致 $P$ 下降, 形成轻度负压, 从而提高了渗透能力。

### (2) 搅拌、涂刷工艺

当采取喷涂法渗透时, 我们往往用毛刷在工件表面涂刷几遍, 目的亦是使裂纹内局部压强改变。

如图10所示, 当毛刷运行时, 使工件左上方渗透液堆积, 从而使裂纹左上方压强增加了一个量, 即 $P =$

$\rho gh$ 。根据  $P = \frac{4\sigma}{R}$  (式中 $R$ 为封闭气体的曲率半径) 则

$R$ 变小, 以致于裂纹内左边空气体积变小。同时右方压强减小, 从而右边裂纹内空气体积变大。

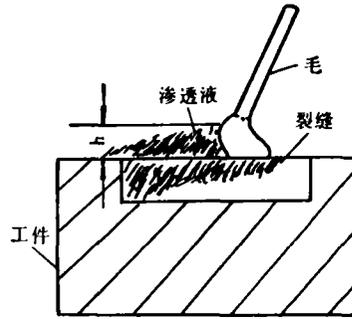


图10

由于左边气隙压强始终大于右边气隙中气体压强, 致使左边气体体积不断缩小, 右边体积不断扩大。结果, 空气从右边溢出裂纹。

当采用浸渍法渗透时, 定时翻动工件或适当搅拌渗透液, 亦可达到同样效果。

(上接第68页)

于声发射技术本身的特点所决定的。声发射仪的灵敏度很高, 它所探测到的声发射信号绝大部分都不是裂纹扩展和开裂所产生的, 象加压过程中表面氧化皮的大量剥落, 局部焊接内应力的释放和重新再分布, 以及脚手架与罐体的摩擦等都产生大量的声发射信号。另外, 危险的声发射源除定位在焊缝上之外, 还有23处定位在球罐支柱角焊缝、垫板、母材或人孔上。柱腿产生声发射信号是由于柱腿与球壳在焊接组装过程中下部角焊缝虚焊, 球壳在加压时膨胀与柱腿摩擦产生大量的声发射信号。垫板产生大量声发射信号的原因也是由于虚焊和摩擦的结果。人孔上的结构比较复杂, 加压时螺栓的松动、微渗漏等都有可能产生声发射信号。

值得注意的是, 将体内有裂纹或未熔合部位的射线探伤底片重新审查, 结果发现全部为 I 级或 II 级合格底片, 没有发现裂纹或未熔合等超标缺陷, 这可能是由于射线的拍摄方向对裂纹或未熔合不敏感引起的, 这也说明声发射检测可以弥补射线探伤方法的不足。

## 结 论

1. 三台球罐共测得危险声发射源 71 个, 其中位

于纵环焊缝上 48 处, 经常规无损检测复验, 发现有超标缺陷的为 17 处。

2. 声发射检测找出了射线探伤无法发现的危险缺陷, 弥补了常规无损检测方法的不足, 也找出了其它人为造成的漏检缺陷。

3. 水压试验声发射检测过程中没有发现多次返修部位和超温区域有活性声发射源, 说明这些部位在考核压力下是安全的, 从而解决了疑难问题。

4. 按照常规无损检测探伤标准, 将超标缺陷进行返修处理后, 球罐即可投入正常使用, 这既减少了巨大的经济损失, 也提高了球罐的安全可靠性能。

## 参考文献

- 1 T. J. Fowler in: Experience with Acoustic Emission Monitoring of Chemical Process Industry Vessels, Progress in Acoustic Emission II, Proceedings of the 8th International Acoustic Emission Symposium, Japanese Society of NDI. 1986
- 2 G. T. Shen et al in: the Correlation Between Active Defects and Source Location in Acoustic Emission Test of Metal Pressure Vessels, Progress in Acoustic Emission IV, Proceedings of the 9th International Acoustic Emission Symposium, Japanese Society of NDI. 1988