

• 无损检测 •

# 集束式高压氢气钢瓶的声发射在线监测和安全评定

沈功田 万耀光 段庆儒 李邦宪 刘时凤

(劳动部锅炉压力容器检测研究中心 北京 100027)

**摘要** 介绍了采用声发射技术对 76 只集束式高压氢气钢瓶在带氢介质下升压进行在线检验和安全评定的方法。检测结果表明,72 只钢瓶连续工作时间可延长 3 年,4 只钢瓶出现 B 级或 C 级声发射定位源,需第二年再进行一次声发射在线检验以确定其延长工作的年限。

**Abstract** The acoustic emission on-line monitoring method and safety evaluation result of 76 bunchy hydrogen gas are introduced. The monitoring results showed that there was no active AE sources for 72 cylinders and there were level B or C low active AE sources for 4 cylinders. The evaluating results gave that 72 cylinders could continuously operate next 3 years and 4 cylinders need to be monitored again by AE after operating one year.

**关键词** 声发射 压力容器 钢瓶 在线检验 安全评定

对于某些在用压力容器,作为其它装置的气源,由于生产工艺的需要,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检验和安全评定,以确保压力容器运行的安全和确定必需停产的检验日期。声发射检验方法在新制造压力容器的水压验证性试验和在用压力容器的定期检验及缺陷评定方面已应用得相当普遍。根据其技术特点,它也是适用于压力容器在线检验的最好的方法。深圳中宏公司拥有的一套集束式贮氢压力容器装置是八十年代中期由美国引进的退役设备,这批容器从 1987 年 4 月投入使用到 1991 年 11 月已运行 4.5 年,已超出上次检验给出的 3 年的使用周期。然而,由于邻厂要求必需连续供气,因此只能采用在线检验的方法。本文介绍采用声发射技术对这些高压氢气瓶进行在线监测的方法和辅助以高压氢腐蚀实验对它们进行安全评定的结果。

## 1 高压贮氢压力容器装置的概况

该装置由 76 只高压氢气瓶组成,其设计参数、材料状况、结构形式和运行状况如下:

(1)单个气瓶的设计参数: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。

(2)钢瓶材料的有关参数:钢瓶的热处理状态为淬火加回火,材料的化学成分如表 1 所示,材料的机械性能如表 2 所示。

表 1 A372 钢瓶材料的化学成分(%)

C	Mn	P	S	Si	Mo
0.40	1.40	0.04	0.04	0.15	0.17
~0.50	~1.80			~0.35	~0.27

表 2 A372 钢瓶材料的力学性能

$\sigma_s$ (MPa)	$\sigma_b$ (MPa)	$\psi$ %	$\delta$ %	E×103GPa
最小 551	最小 723	最小 51	最小 15	202

(3)整套贮氢装置的几何结构:每 8 只气瓶为 1 束,1 个在中间,7 个在外围,1 个主管道与 8 只钢瓶的进出口相联。钢瓶的尾端以螺栓平行地固定在垂直的钢板支座上,而钢瓶的头部套入并焊接在垂直的钢架上。每束钢瓶的主管道并联汇入总管线上,每 5 束钢瓶(共 40 只钢瓶)构成一组,由 1 个阀门控制氢气的进出。该套贮氢装置共有 2 组高压贮氢气瓶。

(4)容器的操作运行情况:自 1987 年投入运行以来,工作压力一直控制在 14MPa 至 16MPa 之间,正常

工作压力为 15MPa 左右,系统安全阀起跳压力为 16.8MPa。

### 2 声发射检验方案

采用氢气作升压介质,由于每 40 只钢瓶由 1 个阀门控制,在升压过程中 40 只钢瓶同时受载,因此进行声发射检验时,必须对 40 只钢瓶同时监测,由于当时国内声发射仪最多为 32 个通道,因而采用 2 台仪器以第 1 次升压每个钢瓶 1 个通道采集声发射信号进行普查、第二次升压时对个别的钢瓶进行 2 通道线定位检验的方式进行。在现有生产条件下,检测过程中压力的变化范围为 14MPa~16MPa。

### 3 声发射检验结果

(1)声发射检测仪器设备:本次检验第一次升压使用两台声发射仪器同时进行,一台为美国 PAC 公司生产的 3000/SPARTAN 32 通道声发射信号采集分析系统,另一台为美国 AET 公司生产的 4900 16 通道声发射信号采集分析系统。在第一次升压信号分析的基础上对选择出需要待查的钢瓶进行第二次升压并以 SPARTAN 仪器进行线定位检测。

(2)钢瓶上声发射信号衰减特性的测量:由于每只钢瓶的材质、几何尺寸和表面状态都相同,因而任意选取一只钢瓶测试声发射信号的衰减特性。模拟信号采用  $\varphi 0.5\text{mmHB}$  铅芯折断信号。测量将探头耦合在钢瓶的一端。两台声发射仪器的衰减测量结果分析如表 3 和表 4 所示。

表 3 SPARTAN 仪器衰减测量结果

距探头的距离(m)	0.1	1	2	3	4	5	6
测试信号幅度(dB)	78	70	66	64	63	62	62

表 4 AET 仪器衰减测量结果

距探头的距离(m)	0.1	1	2	3
测试信号幅度(dB)	48	33	32	31

(3)第一次压力循环独立通道声发射检验结果:由于第一次升压过程每只钢瓶只有一个声发射探头监测,因此只能以每个通道声发射事件的多少来评价钢瓶安全状况的优劣,将三个压力状态采集的声发射信号叠加在一起的检验结果可以发现,A 组以 SPARTAN 仪器测试的相对事件数较高的通道为 3、4、6 和

24 号,AET 测试的为 35 和 39 号通道;B 组以 SPARTAN 仪器测试的相对事件数较高的通道为 3、4、5、6 和 10 号,AET 测试的为 30 号通道;这两组通道相对应的钢瓶编号列于表 5 中。由此选择这 12 只钢瓶需要在第二次 15~16MPa 压力循环过程中进行双通道声发射射线定位复验。

表 5 第一次压力循环声发射信号较多并需要进行第二次声发射射线定位复验的钢瓶

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

(4)第二次压力循环 12 只钢瓶声发射射线定位检验结果:第二次压力循环使用 SPARTAN 仪器进行监测。进行了监测后发现 A 组 6 只钢瓶和 B 组 B5、B30 号钢瓶虽有少量声发射信号出现,但在容器壳体上无任何定位源出现。B 组其它 4 只钢瓶在壳体上都有定位源信号出现,其结果如图 1 所示。

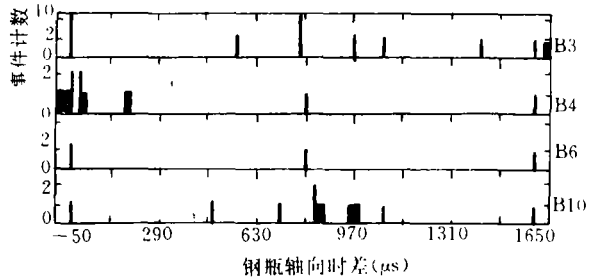


图 1 第二次 15~16MPa 压力循环 B 组 4 只钢瓶的声发射源线定位图

表 6 以声发射定位源为基础的声发射源级别评定

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

说明:不定位的声发射信号源均为 A 级

### 4 声发射检验结果分析

(1)压力容器声发射信号源分类和处理方法:声发射定位源分类如表 6 所示,共分为 12 种类型 6 个级别,一般认为 D、E、F 三级为具有潜在危险的声发射

源,需要再进行其它常规无损检测方法复验;C级源如在容器的第二次加压过程中出现,则认为是具有潜在危险的,需进行其它常规无损检测方法复验;A、B级声发射源被认为是安全的,不需进行其它方法复验。

(2)76只钢瓶声发射检验结果分析和分级:第二压力循环检验后发现A组全部6只钢瓶和B组B5、B30号钢瓶虽有少量声发射信号出现,但在钢瓶壳体上无任何定位源出现,因此认为这些钢瓶在第一和第二次升压阶段出现的声发射信号不是来自钢瓶的壳体而是来自固定钢瓶两头的加套和螺栓产生的,它们应属于干扰声发射源,可以不予以考虑。B3、B10号钢瓶第二次升压过程中声发射信号的幅度均在40~50dB之间,属于低强度范围;B4、B6号钢瓶声发射信号的幅度在40~60dB之间,部分信号属于强度范围。B3、B4、B10的定位源在一个部位均有少量重复出现,属于弱活性源,而B6号钢瓶仅一个定位源为非活性源。按照表6中的分类方法和上述分析结果可将76只高压氢气的声发射源评定为如下级别:B4为C级源,B6、B3、B10为B级源,A1~A40和B组其它为A级源。

(3)B、C级声发射源部位的外观检查和测厚检验:对B、C级声发射源部位进行外观检查,未发现腐蚀、开裂或臃包变形等异常现象,也没发现有任何干扰源存在;对这些部位进行测厚检验,也未发现有壁厚减薄现象发生。

### 5 常温高压氢环境下 A372 钢 $K_{IH}$ 的测定实验结果

为了补充声发射检验,确定这些钢瓶的检验周期,从这批一只报废的钢瓶上取试样进行了  $K_{IH}$  的测定。测试试样采用疲劳预裂纹的楔型张开加载(WOL)试样;测试条件为常温、压力为  $15 \pm 0.1$ MPa 氢气环境,充入 99.999% 高纯度的氢气,时间为 1104 小时(46 天);实验后对经打断的 WOL 试样断面肉眼及低倍显微镜观察,未发现有氢致裂纹,800 倍显微镜下观察,发现有裂纹尖端与疲劳裂纹成  $45^\circ$  角方向仅有一条显微裂纹,经计算裂纹扩展速率大约为  $5 \times 10^{-13}$  m/s,远小于确定氢致开裂临界应力强度因子  $K_{IH}$  时所对应的  $da/dt$ ,经测定 WOL 试样裂纹尖端初试应力强度因子  $K_I$  为 113.5MPa m。

结果表明,在该测试条件下,A372 钢的  $K_{IH}$  大于 113.5MPa m。

### 6 76 只高压氢气钢瓶的综合评定结论

综合声发射检验和分析结果及氢腐蚀  $K_{IH}$  测定结果,对这 76 只钢瓶给出如下结论:具有 C 级或 B 级源的 B3、B4、B6 和 B10 四只钢瓶,在正常操作压力下继续工作一年后,即 1992 年 11 月 30 日需要再进行一次声发射在线检验来确定它们是否继续服役;评定为 A 级的 A 组 40 只和 B 组 32 只钢瓶,可以在正常操作压力下继续工作三年,即到 1994 年 11 月 30 日进行下一次试验。

### 7 工作一年后 B3、B4、B6 和 B10 号钢瓶的声发射线定位复查检验

工作一年后,于 1992 年 11 月又对上述 4 只钢瓶进行了第二次声发射在线定位检验。检验设备采用 SPARTAN AT 18 通道声发射分析仪;压力范围仍为 15~16MPa 升压;表 7 列出了这一升压过程中它们的声发射定位源数和声发射信号幅度。根据声发射定位源分类方法,B3 和 B10 号钢瓶为低强度弱活性声发射定位源,属于 B 级源;B4 和 B6 号钢瓶为强度弱活性声发射定位源,属于 C 级源。这四只钢瓶与一年前的声发射检验结果相比声发射信号并无明显的增加,因此可以在正常操作压力下再连续工作二年,然后与其它钢瓶一并进行下一轮检验。

表 7 B 组 4 只钢瓶第二次声发射在线检验的定位源数和信号幅度范围

钢瓶编号	B3	B4	B6	B10
定位源数	2	5	7	4
信号幅度(dB)	45,49	58~60	41~60	41~51

### 8 结论

到 1994 年 12 月底,该批钢瓶自第一次声发射在线检验后已连续安全使用三年,到达下一个检验周期。通过对这批钢瓶的检验我们得到如下结论:

(1)声发射检验方法是压力容器在线检验的一种较方便和可靠的方法;

(2)采用声发射在线检验,既不影响生产,又保证了容器的安全使用和延长了容器停产开罐检验的周期,可为用户带来较高的经济效益。

(收稿日期 1996-06-03)