

# 金属压力容器声发射源特性的研究

陈钢 研究员 沈功田 研究员 李邦宪 研究员  
(中国特种设备检测研究中心)

学科分类与代码 620.5040

**【摘要】** 通过对多台报废压力容器进行超压试验的声发射检测和对500多台压力容器现场声发射检验数据的分析,给出了现场压力容器检验可能遇到的多种声发射源的特性。这些声发射源包括裂纹、夹渣、未熔合、未焊透等焊接缺陷的开裂和增长、残余应力释放、氧化皮的剥落、结构摩擦、泄漏、风吹、雨滴撞击和电子噪音等。笔者对这些声发射源的定位、分布和关联特性分别进行了分析与研究,并列举了大量的实例。

**【关键词】** 金属 压力容器 声发射 声发射源 检测

## Investigation of Characteristics of Acoustic Emission Sources for Metallic Pressure Vessels

CHEN Gang Prof. SHEN Gong-tian Prof. LI Bang-xian Prof.  
(China Special Equipment Inspection and Research Center)

Classification and code of disciplines : 620.5040

**Abstract :** According to AE testing data of more than 500 pressure vessels, the characteristics of acoustic emission sources are listed and analyzed which could be encountered during field pressure vessel test. These AE sources include weld defect cracking, residual stress releasing, oxide scales peeling off, structural friction, leakage, electronic noise, and wind blasting et al. The characteristics of AE sources location, distribution and correlation of each acoustic emission source are shown respectively. A number of examples also are given.

**Key words :** Metal Pressure vessel Acoustic emission Acoustic emission source Test

## 1 引言

材料中局域源快速释放能量产生瞬态弹性波的现象称为声发射(AE)<sup>[1]</sup>。现代声发射技术的开始以20世纪50年代初Kaiser在德国所做的研究作为标志。他观察到铜、锌、铝、铅、锡、黄铜、铸铁和钢等金属和合金在形变过程中都有声发射现象。自1963年美国Dunegan首次将声发射技术应用于压力容器的检验<sup>[2]</sup>,到目前声发射技术在压力容器检验中的应用已超过了40多年。在这40年中,声发射检测仪器从全模拟式到全数字式已经更新了5代以上,声发射技术在北美、欧洲、中国、日本、澳大利亚等许多国家的压力容器检验中得到广泛应用<sup>[3,4]</sup>,并制定了许多声发射检验标准<sup>[5,6]</sup>。据有关文献报导,全世界采用声发射技术已检验大型压力容器数万台。有关介绍压力容器声发射检测技术研究和应用的文章也很多,然而,绝大部分文章报导了在试验室内进行压力容器检测声发射试验的结果,少部分文章报道

了现场进行压力容器声发射检测的统计结果,均没有给出现场压力容器检验中可能遇到的各种声发射源的特征和识别方法,从而不能满足新从事声发射检测的人员尽快掌握压力容器声发射检测方法的需要。

声发射技术于20世纪70年代初期引入我国,70年代中期由机械部合肥通用机械研究所最早开展了压力容器的声发射检测应用工作,80年代中国特种设备检测研究中心(原劳动部锅炉压力容器检测研究中心)、冶金部武汉安全环保研究院和大庆石油学院等,对金属压力容器的声发射检测和评定方法进行了较深入的研究和广泛的应用,航天部703所对钛合金气瓶进行了系统的研究和应用工作,航天部44所主要开展了复合材料压力容器的声发射特性研究及检测应用工作。自90年代至今,声发射技术在我国的研究和应用呈快速发展的趋势。90年代初燕山石化、天津石化、大庆油田、胜利油田、辽河油田和深圳锅炉压力容器检验所等石油、石化企业检验单位和专业检验所,相继进口大型声发射仪器

广泛开展压力容器的检验。进入 21 世纪至今,许多技术监督系统和军队系统的锅炉压力容器检验所购买多通道声发射仪开展压力容器的检验工作。2003 年 8 月国家质量监督检验检疫总局颁布的《特种设备检验检测机构管理规定》和《特种设备检验检测人员考核与监督管理规则》,正式将声发射技术作为压力容器检测常用的无损检测方法之一,专业的无损检测公司可以从事压力容器的声发射检测工作。自此,压力容器的声发射检测工作已正式纳入我国的特种设备安全监察法规体系,得到政府的正式认可。据估计,我国目前约有 30 多个专业检验单位、科研院所和大专院校从事压力容器声发射检测技术的研究和检测应用工作,从业人员达 100 多人。具粗略统计,这些单位每年采用声发射检测大型压力容器为 300~500 台。

笔者通过对多台报废压力容器进行超压试验的声发射检测和对 500 多台压力容器现场声发射检验数据的分析,针对现场压力容器检验可能遇到的裂纹、夹渣、未熔合、未焊透等焊接缺陷的开裂和增长、残余应力释放、氧化皮的剥落、结构摩擦、泄漏、风吹、雨滴撞击和电子噪音等多种声发射源,采用声发射源的定位、分布和关联分析等方法进行研究,发现了这些声发射源存在的各自特征,并提出了快捷的识别方法。这一研究成果,对声发射技术在我国的应用和指导我国声发射检测人员进行压力容器声发射检测具有十分重要的意义和作用。

## 2 定位特性

### 2.1 裂纹

#### 2.1.1 焊接表面裂纹和体内深埋裂纹

通过控制焊接工艺在几何尺寸为内径 1 800 mm、筒体长 8 000 mm、壁厚为 14 mm、材质为 16 MnR 的 20 m<sup>3</sup> 石油液化气储罐上制造表面裂纹和深埋裂纹,制造缺陷的长度范围为 150 mm,深埋裂纹位于距外表面 3~10 mm 的范围内,表面裂纹在 0~10 mm 的范围内(见图 1)。加压程序采用分阶段升压、保压、降压的多次循环由 0~4 MPa 逐步进行(见图 2)。在整个试验过程中采用 9 个探头对 5 个缺陷进行三角定位声发射监测,这些表面和深埋裂纹的声发射源定位特征如下:

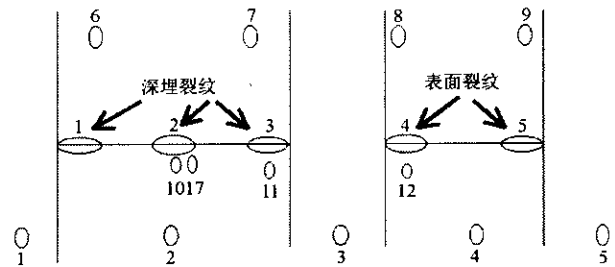


图 1 制造的缺陷位置和声发射探头布置图

○—声发射探头; ○—制造缺陷

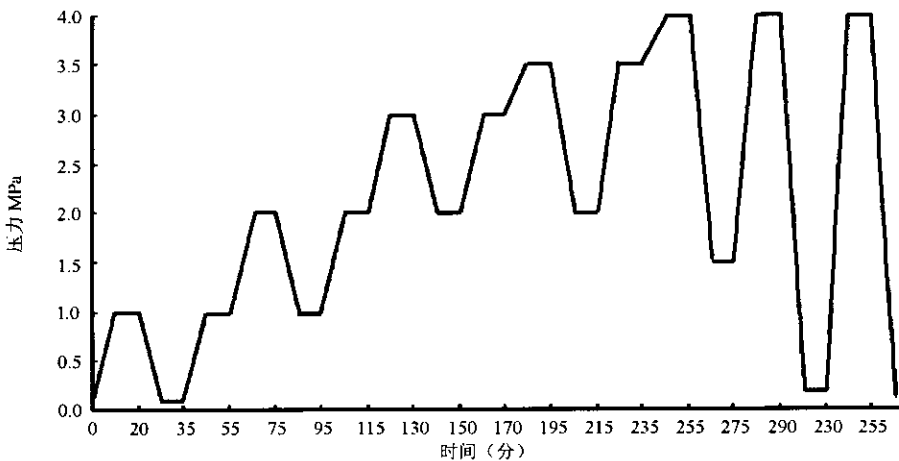


图 2 声发射试验加载曲线

(1) 第一次加压过程中,在裂纹部位均产生大量成团的声发射定位源,对于表面裂纹来说,在 0.2~0.5 MPa 的低压下即出现声发射定位源,在压力为 2.0 MPa 附近,裂纹活动最激烈,声发射定位源信号达到峰值,如图 3 所示;对于深埋裂纹来说,在 1.0~1.5 MPa 的压力下才出现声发射定位源信号,在压力为 3.0 MPa 附近,裂纹活动最激烈,声发射定位源信号达到峰值,如图 4 所示。

(2) 在第一次加压的 10 分钟保压阶段,在裂纹所处的位置也产生许多声发射定位源信号,如图 5 所示。

(3) 在降压过程中表面开口裂纹的闭合可以产生一些声发射定位源,而未开口的深埋裂纹不产生声发射定位源信

号,如图 6 所示。

(4) 在降压后第二次升压和保压的过程中,裂纹部位不产生或只产生少量的声发射定位源信号。

#### 2.1.2 现场实例

图 7 为一台在用 1 000 m<sup>3</sup> 的液化石油气球形储罐在 1.8~2.0 MPa 升压过程中的声发射定位源图,图中所圈声发射源部位经磁粉探伤复查,发现在球罐该部位外表面的母材焊疤上有 3 条长度分别为 15 mm、20 mm、30 mm 的表面裂纹,经打磨测得裂纹的最大深度为 3 mm。

图 8 为另外一台在用 1 000 m<sup>3</sup> 的液化石油气球形储罐在 1.6~2.0 MPa 升压过程中的声发射定位源图,图中所圈声发

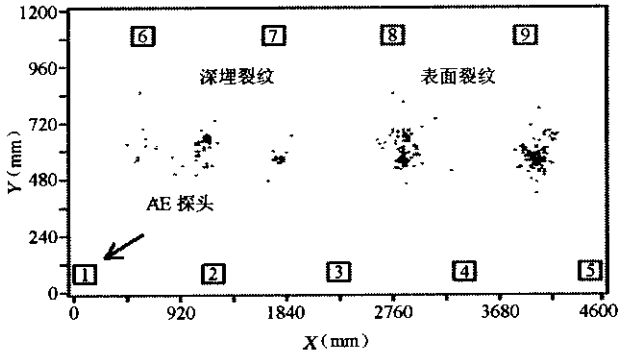


图3 1.0~2.1 MPa 首次加压 AE 平面定位源图

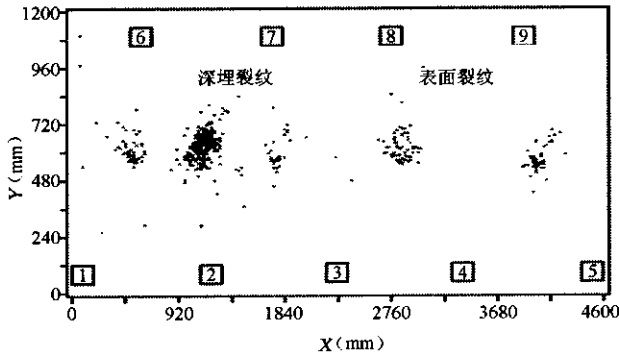


图4 2.0~3.1 MPa 首次加压 AE 平面定位源图

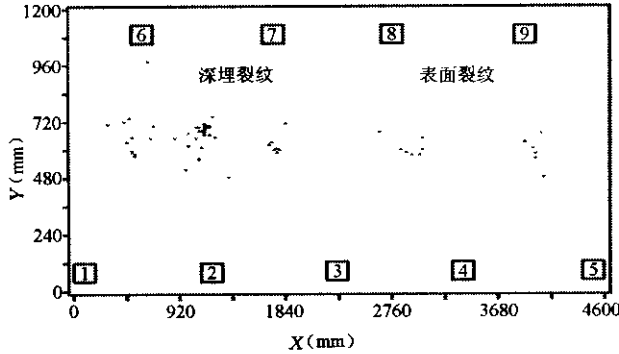


图5 一次升压 3.1 MPa 保压 AE 平面定位源图

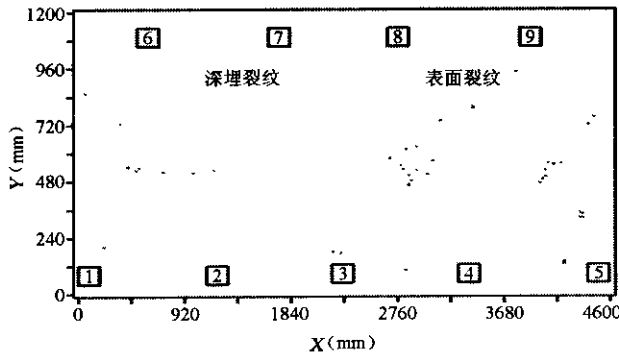


图6 4.0~0.2 MPa 降压 AE 平面定位源图

射源部位经超声波探伤复查和超声波端点衍射测缺陷的自身高,发现在球罐该部位纵焊缝上有一条长度为15 mm、距外表面5 mm、自身高为10 mm的深埋裂纹。

## 2.2 未熔和、未焊透、夹渣、气孔等焊接缺陷

图9 为一台 1979 年制造的 400 m<sup>3</sup> LPG 球罐在压力从 0.90~1.25 MPa 升压的声发射定位源图,图中所圈部位两个声发射定位源集团在 0.9~1.4~1.6 MPa 的 3 个升压和保压过程中均出现声发射定位源。声发射试验后经射线探伤复验一处为断续约 500 mm 长的未焊透和未溶的缺陷,另一处为大量的气孔夹渣缺陷,按射线标准评定均为 IV 级,需返修。

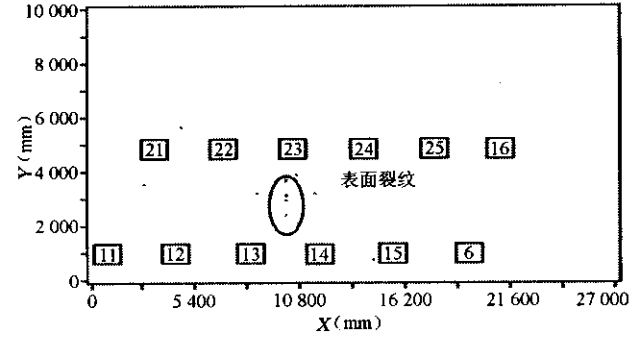


图7 1000 m<sup>3</sup> 球罐上表面裂纹的声发射定位源图

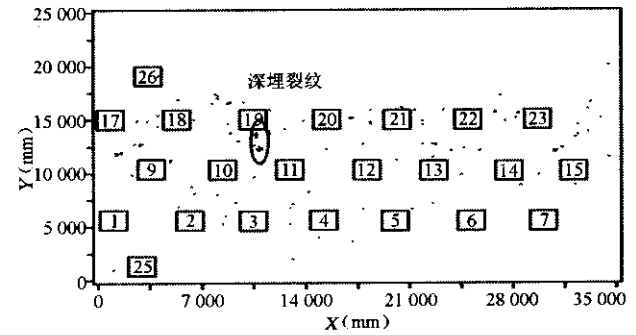


图8 1000 m<sup>3</sup> 球罐上深埋裂纹的声发射定位源图

图9 400 m<sup>3</sup> LPG 球罐的焊接缺陷定位图

## 2.3 结构摩擦

在现场压力容器检验中,遇到结构摩擦产生大量的声发射定位源信号是十分常见的现象。结构摩擦通常由脚手架、容器的支座、裙座、柱腿、平台等焊接垫板引起。结构摩擦产生的声发射定位源散布在较大的范围,而且不满足 Kaiser 效应,即在降压后的第二次升压过程中仍产生大量的声发射信号。图 10 给出了一台 50 m<sup>3</sup> 石油液化气 (LPG) 储罐在升压过程中两个马鞍型支座产生的声发射定位源,图 11 给出了一

台 $\phi 1.4 \times 16$  m立式热交换器(HT)在升压过程中裙座产生的声发射定位源。

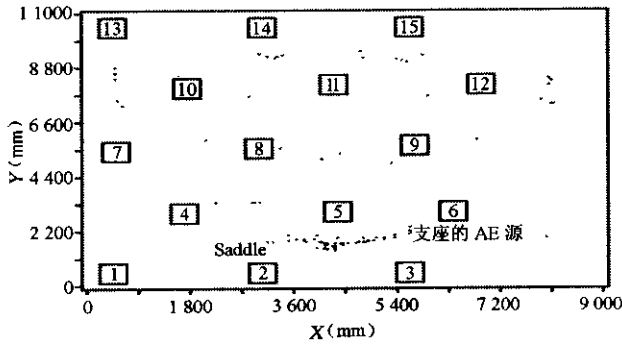


图 10 50 m<sup>3</sup> LPG 储罐 2.2~2.6 MPa 升压的 AE 源

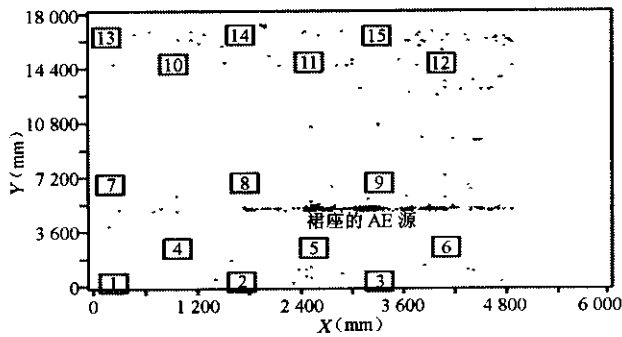


图 11 大型换热器 14.6~15.6 MPa 升压的 AE 源

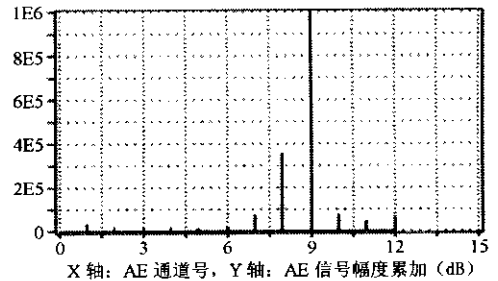
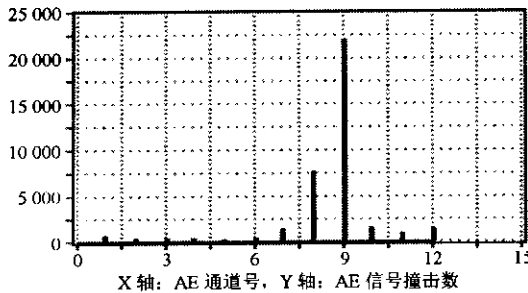


图 12 加氢反应器 8 MPa 气压试验法兰泄漏的声发射撞击数和幅度与通道的分布图

### 2.6 残余应力释放

冷加工、焊接和不均匀加热都可在压力容器壳体上产生残余应力,焊缝错边、机械损伤和壁厚减薄等结构性缺陷在加压过程中也可引起应力集中,这些部位在第一次加压和保压过程中均产生大量的声发射信号。由于残余应力总是位于较大的区域,因此产生的声发射源形成比裂纹、夹渣等缺陷更大的集团。如果残余应力集中部位无裂纹、夹渣等缺陷,第二次升压和保压过程中将不产生声发射信号,完全满足 Kaiser 效应。图 14 为 120 m<sup>3</sup> 氩气球罐带工作介质加压在柱腿角焊缝上残余应力释放产生的 AE 源。

### 2.4 泄 漏

裂纹的穿透、人孔、法兰和阀门的泄漏等都可产生连续的声发射信号。由于由泄漏产生的声发射信号是连续的,因此,不能被时差定位方法进行定位。但是,对于多通道仪器来说,探头越接近泄漏源的通道,采集的声发射信号越多,信号的幅度、能量等声发射参数也越大。通过采用声发射信号撞击数、幅度、能量等与声发射通道的分布图,可以确定泄漏源的区域。图 12 给出的是对一台加氢反应器进行气压试验时出现大量泄漏的声发射信号撞击数和幅度对通道的分布,由图中可见,泄漏源应位于 8 和 9 号探头之间,并接近 9 号探头,后经检查发现在 9 号探头附近有一法兰密封面发生泄漏。

### 2.5 氧化皮剥落

如果压力容器的壳体产生严重腐蚀,在首次加压过程中,氧化皮的剥落将产生大量的声发射信号。声发射定位源散布在氧化腐蚀的位置,但这种声发射信号几乎完全满足 Kaiser 效应,即在降压后的第二次加压中不再产生声发射信号。图 13 为一台 120 m<sup>3</sup> 液氨球罐从 2.5 MPa 到 3.0 MPa 升压过程中大量氧化皮剥落产生的声发射定位源信号。

### 2.7 风吹、雨点和冰雹的撞击

由于大多数大型压力容器都在露天存放,因此天气的好坏对声发射检验有强烈的影响。风吹、雨打、尤其冰雹的撞击均可产生大量的声发射信号。大风可吹动脚手架上的砂子或移动的物体撞击容器的外壳,风吹引起的声发射定位源信号散布在容器迎风面的区域。雨点和冰雹的撞击是很强的声发射源,其产生的声发射定位源信号均匀的分布在容器的上半部分。图 15 为一台 400 m<sup>3</sup> 氧气球罐从 2.2 MPa 到 2.6 MPa 带工作介质加压遇到由雨滴和冰雹产生的声发射定位源。

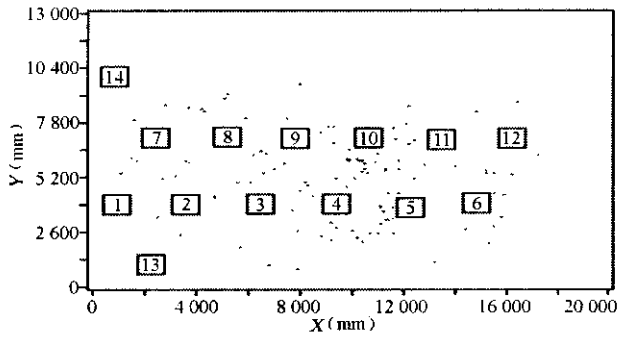


图 13 120 m<sup>3</sup> 氩球罐 2.5~3.0 MPa 加压的 AE 源

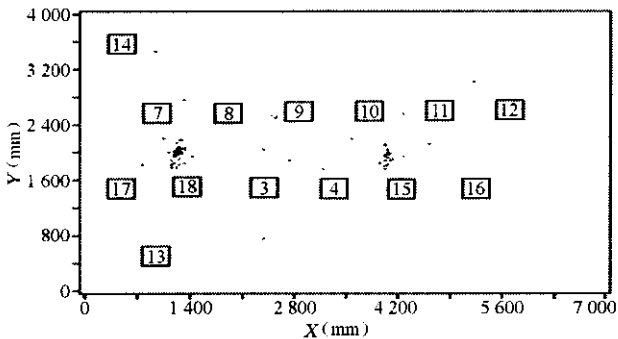


图 14 120 m<sup>3</sup> 氩球罐 2.5~2.8 MPa 加压的 AE 源

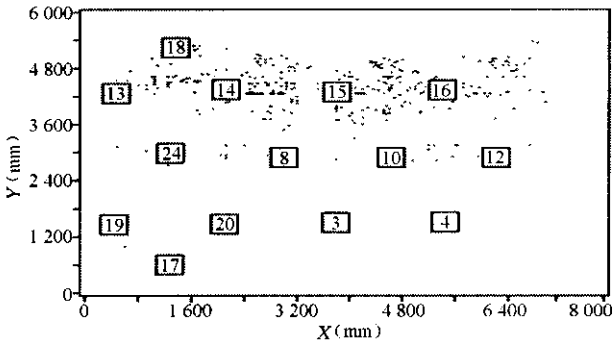


图 15 雨滴和冰雹在 400 m<sup>3</sup> 氧球罐上产生的 AE 源

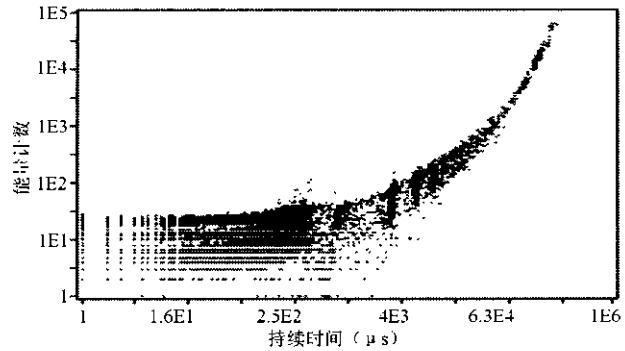


图 16 裂纹扩展能量与持续时间的关联图

### 2.8 电子噪音

由于目前所采用声发射仪器的抗干扰能力较强,根据大量压力容器现场检验的经验发现,采集到的几乎所有的电子噪音信号不是来自于外部环境,而是来自于声发射仪器系统内部。声发射系统内部的电子噪音源主要包括探头、信号线、前置放大器、电缆线、信号采集板等。由于来自不同通道的电子噪音信号是相互不关联的,所以不会产生定位源。

### 3 分布特性

测试结果表明,表面裂纹、深埋裂纹和未熔合、未焊透、夹渣、气孔等焊接缺陷产生的声发射信号参数无较大的区别,除电子噪音和泄漏的声发射信号具有大得多的能量和持续时间之外,其他声发射源信号的声发射参数分布特性几乎是相似的。下表列出了上述所有声发射源产生的声发射信号参数的主要范围,对于裂纹、焊接缺陷、摩擦、氧化皮剥落、残余应力释放、风吹、雨点和冰雹撞击的声发射源采用的是定位源事件的声发射参数,对于泄漏和电子噪音源,采用的是撞击的声发射参数。

不同源产生声发射信号的主要参数范围

AE 源	幅度(dB)	能量(单位)	计数	上升时间(μs)	持续时间(μs)	到峰计数	平均频率(kHz)
裂纹	40~65	10~50	3~40	10~100	100~300	1~20	1~200
焊接缺陷	40~70	10~52	3~41	10~100	100~300	1~20	1~200
摩擦	36~71	40~200	10~100	30~200	150~1000	1~37	60~140
氧化皮	38~75	2~130	1~120	1~160	1~2200	1~30	1~200
残余应力	42~80	16~140	1~70	11~200	18~2000	1~30	1~200
风雨冰雹	40~70	10~100	1~70	1~170	1~2200	1~30	1~200
泄漏	38~75	3~5E4	1~5E4	1~2000	1~5E5	1~48	1~1000
电子噪音	40~92	2~2E4	1~5E4	1~1800	1~5E5	1~100	1~1000

如图 16、图 17 和图 18 所示。

### 4 关联特性

通过进行大量的关联分析发现,裂纹、焊接缺陷、摩擦、氧化皮剥落、残余应力释放、风吹、雨点和冰雹撞击等产生的声发射信号参数关联图无大的区别,但是能量与持续时间的关联图可以明确区分泄漏和电子噪音引起的声发射信号,

### 5 结论

通过对现场大量压力容器声发射检测的数据进行研究和分析,可以得到如下结论:

(1) 声发射检测技术目前是发现压力容器上存在活性缺

陷的最有效的方法。

(2) 笔者提出的现场压力容器声发射源的特征,填补了国内外在这方面的空白,对声发射技术在我国压力容器检验行业的推广应用和指导我国声发射检测人员进行压力容器声发射检测具有十分重要的意义和作用。

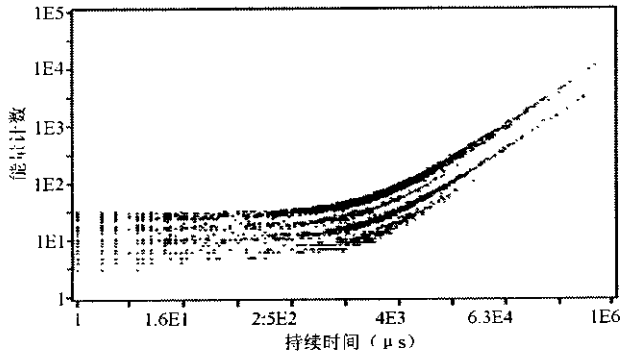


图 17 人孔泄漏能量与持续时间的关联图

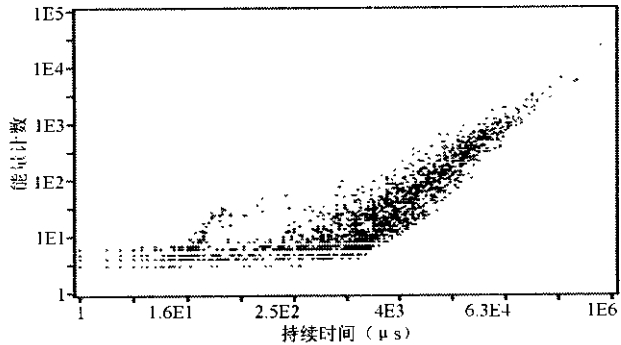


图 18 电子噪音的能量与持续时间的关联图

(3) 进行现场压力容器检验时,裂纹、夹渣、未熔合、未焊透等焊接缺陷的开裂和增长、残余应力释放、氧化皮的剥落、结构摩擦、泄漏、风吹、雨滴撞击和电子噪音等均可产生大量的声发射信号。

(4) 声发射源的平面定位是确定声发射源位置最重要和最直接的方法,通过平面定位分析基本可以区分裂纹、夹渣、未熔合、未焊透等焊接缺陷的开裂和增长与残余应力释放、氧化皮的剥落、结构摩擦、风吹、雨滴和冰雹撞击产生的声发射源,泄漏和电子噪音的声发射信号不能定位。

(5) 除泄漏和电子噪音源外,几乎所有其他源声发射参数的分布特性是相似。

(6) 声发射参数之间的关联图可以明显区分泄漏、电子噪音和其他声发射源,但不能识别裂纹、夹渣、未熔合、未焊透等焊接缺陷的开裂和增长与残余应力释放、氧化皮的剥落、结构摩擦、风吹、雨滴和冰雹撞击产生的声发射源。

(收稿 2004 年 11 月;作者地址:北京市朝阳区和平街西苑 2 号楼,中国特种设备检测研究中心,邮编:100013)

### 参 考 文 献

- 1 Ronnie K. Miller and Paul McIntire eds, Vol.5, Acoustic Emission Testing[M], Nondestructive Testing Handbook, American Society for Nondestructive Testing, 1987
- 2 H. Dunegan, Acoustic Emission: A Promising Technique[R], UCID-4643, Livermore, CA: Lawrence Radiation Laboratory, 1963
- 3 T.J. Fowler, Chemical Industry Applications of Acoustic Emission[J], Materials Evaluation, 1992, 50: 875~882
- 4 沈功田,段庆儒,李帮宪.压力容器声发射技术综述[J].中国锅炉压力容器安全,2000,16(2):5~9
- 5 ASTM E1139-02, Standard Practice for Continuous Monitoring of Acoustic Emission from Metal Pressure Boundaries[S], 2002
- 6 GB/T18182-2000.金属压力容器声发射检测及结果评价方法[S], 2000

# 金属压力容器声发射源特性的研究

作者: 陈钢, 沈功田, 李邦宪, CHEN Gang, SHEN Gong-tian, LI Bang-xian  
作者单位: 中国特种设备检测研究中心  
刊名: 中国安全科学学报 ISTIC PKU  
英文刊名: CHINA SAFETY SCIENCE JOURNAL  
年, 卷(期): 2005, 15(1)  
引用次数: 1次

## 参考文献(6条)

1. Ronnie K Miller, Paul McIntire [Acoustic Emission Testing](#) 1987
2. H Dunegan [Acoustic Emission: A Promising Technique](#), UCID-4643 1963
3. T J Fowler [Chemical Industry Applications of Acoustic Emission](#) 1992
4. 沈功田, 段庆儒, 李邦宪 [压力容器声发射技术综述](#)[期刊论文]-[中国锅炉压力容器安全](#) 2000(02)
5. ASTM E1139-02. [Standard Practice for Continuous Monitoring of Acoustic Emission from Metal Pressure Boundaries](#) 2002
6. GB/T 18182-2000. [金属压力容器声发射检测及结果评价方法](#) 2001

## 相似文献(10条)

1. 期刊论文 吴耀楚, 胡俊, 李鹏 [具有金属内衬的纤维增强复合材料压力容器的应力分析](#) -[化工装备技术](#)2003, 24(5)  
采用纤维增强复合材料缠绕压力容器, 改变了传统压力容器所用的材料全部为优质钢材的状况, 既可以节约大量的钢材, 又可以满足所需要的强度要求. 采用弹性力学的基本原理推导出由纤维与金属这两种材料组合而成的压力容器的筒身段在均匀内压作用下的应力计算公式, 并讨论了应力在容器壁内的分布规律.
2. 期刊论文 王小永, WANG Xiao-yong [航天系统用纤维缠绕/金属内衬压力容器的寿命分析技术](#) -[玻璃钢-复合材料](#) 2007, ""(5)  
本文分析航天系统对纤维缠绕/金属内衬压力容器的寿命要求, 介绍近几年国外航天技术领域对纤维缠绕/金属内衬压力容器普遍采用的寿命分析技术, 同时对各种分析技术在使用时应关注的问题进行讨论, 并对不同技术之间的差异进行比较.
3. 期刊论文 晏飞, 赵和明 [纤维缠绕金属内衬压力容器的设计和分析技术](#) -[上海航天](#)2004, 21(4)  
介绍了纤维缠绕金属内衬压力容器的工艺特点、性能优势和爆破前泄漏(LBB)的安全失效模式, 以及一般设计原则、构形、材料和工艺要求. 分析了金属内衬的厚度、过渡区、焊接区和纤维缠绕层, 以及输入输出极孔的设计技术. 阐明了用于静力分析的解析法和数值法, 以及用于循环寿命预测的断裂力学分析法. 最后概述了一些新技术、新材料的应用情况, 并指出了压力容器设计的发展趋势.
4. 会议论文 晏飞, 戴德海, 朱智春 [面向设计的纤维缠绕/金属内衬压力容器结构分析](#) 2004  
本文针对纤维缠绕/金属内衬压力容器结构模型复杂、参数多和设计困难等问题, 提出了一种面向纤维缠绕/金属内衬压力容器设计的实用结构分析方法, 并通过一个碳纤维缠绕/铝合金内衬圆柱形容器的结构分析和参数研究, 评估了分析方法的有效性, 得出了具有重要工程意义的结论.
5. 会议论文 程勇 [具有金属内衬的纤维缠绕复合材料压力容器固化应力分析](#) 2005  
对具有金属内衬的纤维缠绕复合材料压力容器固化过程的应力进行研究, 分析影响固化应力的因素, 并对压力容器内衬设计提出建议.
6. 会议论文 肖文刚, 郭志峰, 郭丽敏, 何志华, 王浩 [纤维缠绕金属内衬压力容器的疲劳行为分析](#) 2003  
本文论述了纤维缠绕金属内衬压力容器疲劳寿命的分析和设计技术, 并对容器在制造和使用中影响疲劳寿命发挥的因素进行了总结. 应用断裂力学对复合材料压力容器的疲劳行为进行分析, 对保证其在使用中的安全可靠具有极为重要的意义.
7. 会议论文 王南海 [金属爆炸加工技术在低温压力容器制造领域里的应用](#) 1999
8. 会议论文 王南海 [金属高能加工技术在低温压力容器制造领域里的应用](#) 1999
9. 会议论文 李涛, 孙全胜 [压力容器弹性应力红外检测试验研究](#) 2002  
本文通过在实验室内对金属试样和压力容器热弹性应力红外检测试验, 揭示了金属压力容器的冷发射、热发射现象, 讨论了用红外技术检测压力容器缺陷的可能性.
10. 期刊论文 林再文, 李涛, 孙浩伟, 王明寅, Lin Zaiwen, Li Tao, Sun Haowei, Wang Mingyin [几种纤维复合材料压力容器的性能对比研究](#) -[纤维复合材料](#)2005, 22(1)  
本文对玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维三种常用的增强材料及其增强的薄壁金属内衬复合材料压力容器进行了对比研究, 研究了三种纤维复合材料的特性、不同纤维增强的金属内衬压力容器的设计方法、每种纤维的工艺特性, 研制出各种纤维增强的金属内衬压力容器, 并进行了试验对比分析.

## 引证文献(1条)

1. 郑伟 [声发射技术在农牧区电站设备检测中的应用](#)[期刊论文]-[农村牧区机械化](#) 2007(2)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_zgaqxzb200501023.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_zgaqxzb200501023.aspx)

下载时间: 2010年5月31日