



# 声发射检测技术及应用

Acoustic Emission Technology and Application

---

沈功田 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 声发射检测技术及应用

Acoustic Emission Technology and Application

沈功田 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统论述了声发射检测技术的基本原理、信号处理和分析方法、检测仪器系统及其应用,主要内容包括声发射检测仪器系统、声发射信号处理和分析方法、常用金属材料的声发射特性以及几种典型设备的声发射检测应用等。全书共8章,第1章介绍声发射检测技术的基础知识,第2章论述声发射检测仪器系统,第3章论述声发射信号的处理和分析方法,第4章论述金属材料的声发射特性,第5~8章分别论述压力容器、大型常压储罐、压力管道和起重机械的声发射检测技术及应用案例。

本书是作者对其三十年来声发射检测技术理论和应用研究成果的总结,可供无损检测及相关技术人员参考,也可作为无损检测人员的资格培训和高等院校相关专业的参考教材。书中有关声发射检测仪器系统的具体实现对无损检测仪器开发人员也具有借鉴意义。

图书\*版编(CIP)数据

声发射检测技术及应用—Acoustic Emission Technology and Application/  
沈功田著. —北京:科学出版社,2015

ISBN 978-7-03-041123-3

I. ①声… II. ①沈… III. ①声发射-无损检测 IV. ①TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 121889 号

责任编辑:裴 育 耿建业/ 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩/ 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015年6月第一版 开本:720×1000 1/16

2015年6月第一次印刷 印张:26 3/4

字数:520 000

定价:168.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

现代声发射技术始于 20 世纪 50 年代,并于 70 年代引入我国,目前已发展成为较成熟的无损检测新方法。声发射检测技术的特点使其特别适用于机械设备结构的动态安全检测、监测、完整性评价、早期损伤预警和失效预防等。

自 20 世纪 80 年代至今,中国特种设备检测研究院一直致力于将声发射技术应用于我国压力容器、压力管道、大型常压储罐和起重机械等设备的安全检测与评价。作者课题组组织全国十多个单位先后承担并完成了八项国家科技攻关、国家科技支撑和国家自然科学基金重点项目课题,取得了一系列达到国际领先和先进水平的科研成果。通过攻克这些设备常用材料的典型焊接缺陷、环境导致的开裂、疲劳损伤、腐蚀以及现场干扰噪声等各种声发射信号的获取、特征提取和模式识别等一系列关键技术,研究建立了这些设备的声发射检测及结果评价方法,制定了八项国家和行业技术标准,填补了国内空白,在常压储罐和起重机械检测标准方面填补了国际空白。这些成果已在全国范围内得到很好的推广应用,为企业带来了巨大的经济效益,并取得了良好的社会效益。

本书系统集成和总结了作者及课题组近三十年的研究成果。其中,第 1 章介绍声发射的基本概念、原理和基础知识,并对声发射技术的国内外主要应用领域进行综述;第 2 章介绍声发射检测仪器系统的硬件模块和软件基本功能,并展示课题组最新研发的声发射检测仪器;第 3 章为声发射信号的处理方法,重点介绍课题组研究建立的声发射源性质模式识别的新方法;第 4 章介绍材料的声发射特性,并给出我国机械设备常用金属材料声发射特性的最新研究成果;第 5~8 章分别系统介绍已建立的压力容器、大型常压储罐、压力管道和起重机械等设备的声发射安全检测与评价技术方法、检测标准及声发射源特性,并给出大量的应用案例。

本书是以中国特种设备检测研究院为首的声发射课题组全体科研技术人员近三十年心血的结晶及科研成果的精华荟萃。在撰写过程中,课题组成员给予作者热情的帮助和大力支持,特别是刘时风、戴光、耿荣生、李邦宪、李光海、吴占稳、李丽菲、闫河、秦先勇、张君娇等,参加了许多课题的研究工作,并提供了有关技术资料。在此表示衷心的感谢!

由于本书部分内容是最新科研成果,在理论与技术上都有需要完善之处,加之作者水平有限,书中如有不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2015 年 2 月于北京

# 目 录

## 前言

第 1 章 声发射检测技术基础	1
1.1 声发射的概念	1
1.2 声发射技术发展历程和现状	1
1.3 中国声发射技术发展历程	3
1.4 中国声发射技术主要研究和应用领域	5
1.4.1 压力容器的声发射检测	5
1.4.2 航空航天工业中的应用	5
1.4.3 复合材料的声发射特性研究	6
1.4.4 声发射信号的处理技术	6
1.4.5 岩石的监测和应力测量	6
1.4.6 机械制造过程中的监控应用	7
1.4.7 铁路焊接结构疲劳损伤的监测	7
1.4.8 泄漏监测	7
1.4.9 磁声发射研究	7
1.4.10 其他研究工作	8
1.5 声发射检测的基本原理	8
1.6 材料的声发射源	8
1.6.1 突发型和连续型声发射	9
1.6.2 金属材料中的声发射源	10
1.6.3 非金属材料中的声发射源	11
1.6.4 复合材料中的声发射源	11
1.6.5 其他声发射源	11
1.7 波的传播	11
1.7.1 近场脉冲响应	12
1.7.2 波的传播模式	13
1.7.3 模式转换、反射和折射	13
1.7.4 材料中的波速	15
1.7.5 几何效应	16
1.7.6 衰减	16

1.8	凯塞效应和费利西蒂效应	18
1.8.1	凯塞效应	18
1.8.2	费利西蒂效应和费利西蒂比	18
1.9	声发射检测技术的特点	19
1.10	本章小结	20
<b>第2章</b>	<b>声发射检测仪器系统</b>	<b>21</b>
2.1	声发射检测仪器概述	21
2.2	声发射信号的探测	22
2.2.1	压电效应	23
2.2.2	传感器	23
2.2.3	传感器的耦合和安装	26
2.2.4	传感器的分类及用途	27
2.3	信号电缆	30
2.3.1	同轴电缆	30
2.3.2	双绞线电缆	30
2.3.3	光导纤维电缆	31
2.3.4	电缆中的噪声问题	31
2.3.5	阻抗匹配	31
2.3.6	接头	31
2.4	信号调理	32
2.4.1	前置放大器	32
2.4.2	主放大器	33
2.4.3	滤波器	33
2.4.4	门限比较器	33
2.5	声发射检测系统	34
2.5.1	单通道声发射检测仪	34
2.5.2	多通道声发射检测系统	36
2.6	选择检测仪器需考虑的因素	44
2.7	检测仪器的调试和校准	44
2.7.1	传感器的选择和安装	44
2.7.2	仪器调试和参数设置	45
2.7.3	仪器校准信号的产生技术	47
2.7.4	仪器的校准	47
2.8	本章小结	48

<b>第 3 章 声发射信号处理和分析方法</b> .....	50
3.1 声发射信号处理和分析方法概述 .....	50
3.2 经典声发射信号处理和分析方法 .....	51
3.2.1 声发射波形特征参数的定义 .....	51
3.2.2 声发射信号参数的列表显示和分析方法 .....	54
3.2.3 声发射信号单参数分析方法 .....	54
3.2.4 声发射信号参数经历分析方法 .....	56
3.2.5 声发射信号参数分布分析方法 .....	56
3.2.6 声发射信号参数关联分析方法 .....	57
3.3 声发射源定位技术 .....	59
3.3.1 独立通道区域定位技术 .....	60
3.3.2 线定位技术 .....	60
3.3.3 平面定位技术 .....	61
3.3.4 影响声发射源定位精度的因素 .....	63
3.3.5 连续声发射源定位技术 .....	65
3.3.6 三维立体定位技术 .....	70
3.4 现代信号处理和分析技术 .....	71
3.4.1 模态声发射分析技术 .....	72
3.4.2 频谱分析技术 .....	74
3.4.3 小波分析技术 .....	79
3.4.4 模式识别技术 .....	80
3.4.5 人工神经网络模式识别技术 .....	83
3.5 本章小结 .....	85
<b>第 4 章 金属材料的声发射特性研究</b> .....	87
4.1 影响声发射特性的因素 .....	87
4.2 金属材料形变过程的声发射特性 .....	88
4.3 金属材料断裂过程的声发射特性 .....	91
4.3.1 理论模型 .....	91
4.3.2 试验测试结果 .....	93
4.4 Q235 钢的声发射特性研究 .....	94
4.4.1 Q235 钢母材试样拉伸过程的声发射特性研究 .....	94
4.4.2 Q235 钢带焊缝试样拉伸过程的声发射特性研究 .....	98
4.5 Q345 钢的声发射特性研究 .....	100
4.5.1 Q345 钢母材试样拉伸过程的声发射特性研究 .....	100
4.5.2 Q345 钢带焊缝试样拉伸过程的声发射特性研究 .....	102

4.5.3	Q235 钢和 Q345 钢母材拉伸过程声发射信号特征对比	103
4.5.4	Q235 钢和 Q345 钢带焊缝试样拉伸过程声发射信号特征对比	104
4.5.5	Q235 钢和 Q345 钢母材与带焊缝试样拉伸过程声发射信号特征对比	104
4.6	15CrMo 钢常温和高温状态下的声发射特性研究	105
4.7	2-1/4Cr1Mo 钢常温和高温状态下的声发射特性研究	106
4.8	304 不锈钢的声发射特性研究	108
4.9	S31803 双相不锈钢的声发射特性研究	112
4.10	TA2 工业纯钛材料的声发射特性研究	116
4.11	R702 工业纯锆材料的声发射特性研究	120
4.12	HT200 灰口铸铁材料的声发射特性研究	125
4.13	QT500 球墨铸铁材料的声发射特性研究	129
4.14	本章小结	133
<b>第 5 章 压力容器声发射检测技术研究及应用</b>		135
5.1	压力容器声发射检测技术国内外研究现状	136
5.2	典型压力容器声发射信号衰减特性研究	137
5.2.1	50m <sup>3</sup> 液化石油气储罐的声发射信号衰减测量	137
5.2.2	200m <sup>3</sup> 液化石油气球罐的声发射信号衰减测量	138
5.2.3	1000m <sup>3</sup> 液化石油气球罐的声发射信号衰减测量	139
5.2.4	结论	140
5.3	压力容器焊接裂纹的声发射特性研究	141
5.3.1	试验用压力容器的基本概况	141
5.3.2	表面裂纹和深埋裂纹缺陷的制造	141
5.3.3	声发射仪器及工作参数设置	142
5.3.4	声发射试验加载步骤	143
5.3.5	试验结果及分析	143
5.3.6	结论	164
5.4	现场压力容器的声发射源特性研究	165
5.4.1	现场压力容器的声发射源	165
5.4.2	压力容器典型声发射源的定位特性	166
5.4.3	压力容器典型声发射源的分布特性	175
5.4.4	压力容器典型声发射源的关联特性	175
5.4.5	结论	182
5.5	压力容器声发射检测关键技术	183
5.5.1	检测前的准备	183
5.5.2	特殊检测技术	184



5.5.3	加载程序的确定	185
5.5.4	声发射传感器的安装	186
5.5.5	声发射检测仪器的调试	186
5.5.6	检测数据采集与过程观察	187
5.5.7	噪声源的识别	187
5.5.8	噪声的抑制和排除	187
5.5.9	检测数据分析和解释	188
5.5.10	检测结果评价和分级	189
5.5.11	声发射定位源的验证	191
5.5.12	检测记录和报告	192
5.6	典型压力容器声发射传感器阵列布置	193
5.7	本章小结	194
<b>第6章</b>	<b>大型常压储罐声发射检测技术研究及应用</b>	<b>196</b>
6.1	大型常压储罐声发射检测技术国内外研究现状	196
6.2	液体介质中声发射源的定位特性研究	197
6.2.1	试验目的及方案	197
6.2.2	试验所用设备及设施情况	198
6.2.3	水中定位试验	198
6.2.4	空罐底板和壁板的衰减测定	201
6.2.5	结论	202
6.3	金属常压储罐底板腐蚀声发射信号特征研究	202
6.3.1	储罐底板腐蚀声发射检测的原理及特点	202
6.3.2	常压储罐底板腐蚀声发射检测方法研究	203
6.3.3	定位声速的确定及声发射信号处理方法研究	205
6.3.4	结论	212
6.4	常压储罐底板腐蚀声发射检测结果评价方法研究	212
6.4.1	声发射检测结果评价技术的国内外研究现状	212
6.4.2	声发射检测结果分级与评价方法的研究	213
6.4.3	对储罐底板腐蚀检测结果的评价	214
6.5	常压储罐底板腐蚀声发射检测应用	215
6.5.1	检测应用案例结果统计	215
6.5.2	典型检测应用案例数据分析	216
6.6	本章小结	221
<b>第7章</b>	<b>压力管道泄漏声发射检测技术研究及应用</b>	<b>223</b>
7.1	压力管道泄漏检测监测技术国内外研究现状	224

7.1.1	压力管道泄漏外检测技术 .....	224
7.1.2	压力管道泄漏内检测技术 .....	227
7.1.3	压力管道泄漏监测技术 .....	229
7.1.4	压力管道泄漏检测监测技术发展趋势 .....	234
7.2	管道泄漏点定位的理论基础 .....	235
7.2.1	管道泄漏的物理模型 .....	235
7.2.2	管道泄漏声波传播的数学模型 .....	237
7.2.3	管道泄漏相关分析定位计算方法 .....	237
7.3	管道泄漏点定位检测仪的开发研制 .....	238
7.3.1	管道泄漏点定位检测仪的总体设计原则 .....	238
7.3.2	管道泄漏点定位检测仪的总体设计方案 .....	239
7.3.3	开发的埋地管道泄漏点定位检测仪 .....	239
7.3.4	管道泄漏点定位检测分析软件的开发 .....	241
7.4	管道泄漏声发射信号传播速度试验研究 .....	242
7.5	管道泄漏声发射信号衰减试验研究 .....	243
7.6	埋地管道泄漏定位检测方法试验研究 .....	244
7.6.1	65m埋地管道泄漏定位试验 .....	245
7.6.2	150m埋地管道泄漏检测试验 .....	252
7.6.3	基于小波变换的泄漏声发射信号特征分析方法研究 .....	256
7.6.4	结论 .....	260
7.7	现场压力管道泄漏检测应用 .....	260
7.7.1	某市中低压天然气管道泄漏检测 .....	260
7.7.2	某市热力管道泄漏检测 .....	261
7.7.3	某市燃气管道 1 泄漏检测 .....	262
7.7.4	某市燃气管道 2 泄漏检测 .....	263
7.7.5	某市燃气管道 3 泄漏检测 .....	264
7.7.6	某市燃气管道 4 泄漏检测 .....	266
7.8	本章小结 .....	267
<b>第 8 章</b>	<b>起重机械声发射检测技术研究及应用</b> .....	<b>269</b>
8.1	起重机械声发射检测技术国内外研究现状 .....	270
8.2	Q235 钢结构件表面焊接裂纹扩展的声发射特性研究 .....	272
8.2.1	试验目的 .....	272
8.2.2	试验装置及试件 .....	272
8.2.3	试件的加载过程 .....	274
8.2.4	Q235 钢箱形试件三点弯曲试验声发射监测结果及分析 .....	276

8.2.5	Q235 钢槽形试件三点弯曲试验声发射监测结果及分析 .....	285
8.2.6	结论 .....	287
8.3	起重机箱形梁破坏性试验过程的声发射特性研究 .....	288
8.3.1	试验目的 .....	288
8.3.2	试件制备、检测设备及传感器布置 .....	288
8.3.3	箱形梁声发射模拟源衰减及声速测量 .....	289
8.3.4	声发射试验加载步骤 .....	290
8.3.5	箱形梁声发射试验结果及分析 .....	291
8.3.6	结论 .....	299
8.4	起重机械的声发射源特性研究 .....	300
8.4.1	起重机主梁结构模拟声发射源衰减特性测试 .....	300
8.4.2	起重机主梁结构声发射线性定位方法研究 .....	302
8.4.3	起重机工作过程的典型声发射源及特征分析 .....	305
8.4.4	结论 .....	314
8.5	起重机械声发射检测的结果评定 .....	315
8.5.1	声发射源区的确定 .....	315
8.5.2	声发射源的活性划分 .....	315
8.5.3	声发射源的强度划分 .....	316
8.5.4	声发射源的综合等级评价 .....	316
8.5.5	声发射源的复检 .....	317
8.6	起重机械声发射现场检测应用案例 .....	317
8.6.1	QD20/10t-22.5m 桥式起重机声发射检测结果及评价 .....	317
8.6.2	QD100/20t-22m 通用桥式起重机声发射检测结果及评价 .....	323
8.6.3	10t-28.8m 桥式起重机检测结果及评定 .....	327
8.6.4	结论 .....	331
8.7	本章小结 .....	331
	参考文献 .....	333
	附录 1 GB/T 12604.4—2005《无损检测 术语 声发射检测》 .....	337
	附录 2 GB/T 26644—2011《无损检测 声发射检测 总则》 .....	349
	附录 3 JB/T 10764—2007《无损检测 常压金属储罐声发射检测及评价方法》 .....	359
	附录 4 NB/T 47013.9—2011《承压设备无损检测第 9 部分:声发射检测》 .....	384
	附录 5 桥式和门式起重机金属结构声发射检测及结果评定方法 .....	401

# 第 1 章 声发射检测技术基础

## 1.1 声发射的概念

材料中局域源能量快速释放而产生瞬态弹性波的现象称为声发射(acoustic emission, AE)。材料在应力作用下的变形与裂纹扩展,是结构失效的重要机制。这种直接与变形和断裂机制有关的源,被称为声发射源。近年来,流体泄漏、摩擦、撞击、燃烧等与变形和断裂机制无直接关系的另一类弹性波源,被称为其他或二次声发射源。

声发射是一种常见的物理现象,各种材料声发射信号的频率范围很宽,从几赫兹的次声频、20Hz~20kHz 的声频到数兆赫兹的超声频;声发射信号幅度的变化范围也很大,从  $10^{-13}$  m 的微观位错运动到 1m 量级的地震波。如果声发射释放的应变能足够大,就可产生人耳听得见的声音。大多数材料变形和断裂时有声发射发生,但许多材料的声发射信号强度很弱,人耳不能直接听见,需要借助灵敏的电子仪器才能检测出来。用仪器探测、记录、分析声发射信号和利用声发射信号推断声发射源的技术称为声发射技术,人们将声发射仪器形象地称为材料的听诊器。

## 1.2 声发射技术发展历程和现状

声发射和微振动都是自然界中随时发生的自然现象,尽管无法考证人们在何时首次接收到声发射信号,但诸如折断树枝、岩石破碎和折断骨头等断裂过程无疑是人们最早观察到的声发射现象。可以推断,“锡鸣”是人们首次观察到的金属材料的声发射现象,因为纯锡在塑性形变期间其机械孪晶产生可听得到的声发射,而铜和锡的冶炼可追溯到公元前 3700 年。

现代声发射技术的开始以 Kaiser 于 20 世纪 50 年代初在德国所做的研究工作为标志。Kaiser 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。其最有意义的发现是材料形变声发射的不可逆效应,即“材料被重新加载期间,在应力值达到上次加载最大应力之前不产生声发射信号”。材料的这种不可逆现象被称为“凯塞效应”(Kaiser effect)。同时, Kaiser 也提出了连续型和突发型声发射信号的概念。

20 世纪 50 年代末,美国学者 Schofield 和 Tatro 经大量研究发现,金属塑性形变的声发射主要由大量的位错运动引起,而且还得到一个重要的结论,即声发射主

要是体积效应而不是表面效应。Tatro 进行了导致声发射现象发生的物理机制方面的研究工作,首次提出声发射可以作为研究工程材料行为疑难问题的工具,并预言声发射在无损检测方面具有独特的潜在优势。

20 世纪 60 年代初,Green 等首先开始了声发射技术在无损检测领域方面的应用,Dunegan 首次将声发射技术应用于压力容器方面的研究。在整个 60 年代,美国和日本开始广泛地进行声发射的研究工作,除开展声发射现象的基础研究外,还将这一技术应用于材料工程和无损检测领域。美国于 1967 年成立了声发射工作组(AEWG),日本于 1969 年成立了声发射学会。

20 世纪 70 年代初,Dunegan 等开展了现代声发射仪器的研制,他们把声发射信号的探测频率从声频提高到 100kHz~1MHz 的超声频率范围,这是声发射试验技术的重大进展。现代声发射仪器的成功研制为声发射技术从实验室的材料研究阶段走向在生产现场用于大型构件的结构完整性检测和监测阶段创造了条件。

随着现代声发射仪器的出现,整个 70 年代和 80 年代初人们从声发射源产生机制、波的传播到声发射信号分析方面开展了广泛和系统的研究工作。在生产现场也得到了广泛的应用,尤其在化工容器、核容器和焊接过程的控制方面取得了成功。Drouillard 于 1979 年统计出版了 1979 年以前世界上发表的声发射论文目录,据其统计,到 1986 年年底世界上发表有关声发射的论文总数已超过 5000 篇。

20 世纪 80 年代初,美国物理声学公司(PAC)将现代微处理计算机技术引入声发射检测系统,设计出了体积和重量较小的第二代源定位声发射检测仪器,并开发了一系列多功能检测和数据分析软件,通过微处理计算机控制,可以对被检测构件进行实时声发射源定位监测和数据分析显示。由于第二代声发射仪器体积和重量小,易携带,从而推动了 80 年代声发射技术进行现场检测的广泛应用;同时,由于采用 286 及更高级的微处理计算机和多功能检测分析软件,仪器采集和处理声发射信号的速度大幅度提高,仪器的信息存储量巨大,从而提高了声发射检测技术的声发射源定位功能和缺陷检测准确率。

20 世纪 90 年代,美国 PAC 和德国 Vallen 公司先后开发生产了计算机化程度更高、体积和重量更小的第三代数字化多通道声发射检测分析系统。这些系统除了能进行声发射参数实时测量和声发射源定位外,还可直接进行声发射波形的观察、显示、记录和频谱分析。

目前声发射技术作为一种成熟的无损检测方法,在世界上已被广泛应用于许多领域,主要包括以下方面。

- (1) 石油化工工业:各种压力容器、压力管道和海洋石油平台的检测和结构完整性评价,常压储罐底部、各种阀门和埋地管道的泄漏检测等。
- (2) 电力工业:高压蒸汽汽包、管道和阀门的检测和泄漏监测,汽轮机叶片的检测,汽轮机轴承运行状况的监测,变压器局部放电的检测。

(3) 航空航天工业:航空器壳体和主要构件的检测和结构完整性评价,航空器的时效试验、疲劳试验检测和运行过程中的在线连续监测等。

(4) 交通运输业:长管拖车、公路和铁路槽车的检测,铁路材料和结构的裂纹探测,桥梁和隧道的检测和结构完整性评价,卡车、火车滚珠轴承和轴颈轴承的状态监测,火车车轮和轴承的断裂探测等。

(5) 机械制造业:工具磨损和断裂的探测,打磨轮或整形装置与工件接触的探测,修理整形的验证,金属加工过程的质量控制,焊接过程监测,振动探测,锻压测试,加工过程的碰撞探测和预防等。

(6) 民用工程行业:楼房、桥梁、起重机、大型游乐设施、客运索道、隧道、大坝的检测、监测和结构完整性评价,水泥结构裂纹开裂和扩展的连续监测等。

(7) 科研和材料测试行业:各种材料的性能测试、断裂试验、疲劳试验、腐蚀监测和摩擦测试,铁磁性材料的磁声发射测试等。

(8) 其他:硬盘的干扰探测,庄稼和树木的干旱应力监测,磨损摩擦监测,岩石探测,地质和地震上的应用,发动机的状态监测,转动机械的在线过程监测,钢轧辊的裂纹探测,汽车轴承强化过程的监测,铸造过程监测,电池的充放电监测,人骨头的摩擦、受力和破坏特性试验,骨关节状况的监测等。

### 1.3 中国声发射技术发展历程

声发射技术于20世纪70年代初开始引入我国,当时正是我国断裂力学发展的高峰,人们希望利用声发射预报和测量裂纹的开裂点,随后中国科学院沈阳金属研究所、航空621所、原合肥通用机械研究所、武汉大学等一些科研院所和大学主要开展了金属和复合材料的声发射特性研究。

20世纪80年代初期,人们开始尝试采用声发射技术进行压力容器的检测等工程应用,然而鉴于当时声发射仪器的性能和声发射信号处理方面的能力限制,以及人们对声发射源性质和声发射波产生后到达传感器过程中的传输特性等认识缺少应有的深度,在试验结果的重复性和可靠性等方面存在不少问题,因此声发射技术的应用曾陷入低谷。

20世纪80年代中期,原劳动部锅炉压力容器检测研究中心率先从美国PAC引进当时世界上最先进的采用Z80微处理计算机技术制造的SPARTAN源定位声发射检测与信号处理分析系统,并在全国一些石化和煤气公司开展了大量球形储罐和卧罐等压力容器的检测研究工作,取得了成功的应用案例,得到了用户的认可。随后,武汉安全环保研究院、大庆石油学院(现为东北石油大学)、航天44所和中国石油大学等许多单位相继从美国PAC引进先进的SPARTAN和LOCAN等型号的声发射仪器,开展了压力容器、飞机、金属材料、复合材料和岩石的检测和应用。1989年

召开的全国第四届声发射会议指出,“我国声发射技术的研究、应用和仪器队伍不断扩大,技术水平不断提高,表明我国声发射技术发展已经走出低谷,开始向新的高峰攀登”。

自 20 世纪 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、辽河油田和原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。90 年代中期,原空军第一研究所和航天 703 所从美国 PAC 引进了第三代可以存储声发射信号波形的 Mistras2000 多通道声发射仪,从而开展了以波形分析为基础的航空航天设备的声发射检测与信号处理分析。2002 年,原国家质量监督检验检疫总局锅炉压力容器检测研究中心从德国 Vallen 公司引进了该公司当时的最新型号——ASM5 型 36 通道声发射仪,该仪器既可对声发射信号进行基于波形的模式识别分析,又具有大型常压油罐底板腐蚀的检测能力。目前声发射技术已在我国石油、石化、电力、航空航天、冶金、铁路、交通、煤炭、建筑、机械制造与加工等领域开展了广泛的研究和应用工作。

在声发射检测人员培训和资格认证方面,原航空航天工业无损检测人员资格考试委员会于 1998 年率先开展了声发射检测 II 级人员的培训和认证工作,国家质量监督检验检疫总局特种设备无损检测人员资格考试委员会于 2002 年首次开展了声发射检测 II 级人员的培训和认证工作。到目前为止,国防科技无损检测人员资格考试委员会已培训和考核声发射检测 II 级人员 300 多人、III 级人员 10 多人,特种设备无损检测人员资格考试委员会已培训和考核声发射检测 II 级人员 800 多人、III 级人员 23 人。

在声发射仪器的研制和生产方面,我国的起步并不算太晚,原沈阳电子研究所于 20 世纪 70 年代末即研制出单通道声发射仪,原长春试验机研究所于 80 年代中期研制出采用微处理计算机控制的 32 通道声发射定位分析系统,原劳动部锅炉压力容器检测研究中心于 1995 年成功研制出世界上首台硬件采用 PC-AT 总线、软件采用 Windows 界面的多通道(2~64)声发射检测分析系统,2000 年声华公司研制出基于大规模可编程集成电路(FPGA)技术的全波形全数字化多通道声发射检测分析系统,2002 年原国家质量监督检验检疫总局锅炉压力容器检测研究中心研制出基于信号处理集成电路(DSP)技术的全数字化多通道声发射检测分析系统,2008 年声华兴业公司研制出基于 USB 技术的全波形全数字化多通道声发射检测分析系统,同年声华兴业公司和中国特种设备检测研究院合作研制出基于 GPS 时钟、CDMA 无线和网络的无线声发射泄漏检测仪,2012 年声华兴业公司和中国特种设备检测研究院合作研制出基于 GPS 时钟和 WiFi 技术的多通道无线声发射检测仪。

在学术交流方面,1978 年随着全国无损检测学会的建立,成立了声发射专业委员会,并于 1979 年在黄山召开了第一届全国声发射会议。近二十年来,已

固定每年召开一次声发射专业委员全体会议；每两年召开一次全国学术会议进行大规模的学术交流活动 and 仪器演示活动，到目前为止学术会议已召开了 14 届，且每届均有论文集出版，收集论文 40~50 篇，最近几次与会代表多达 80~130 人。

## 1.4 中国声发射技术主要研究和应用领域

### 1.4.1 压力容器的声发射检测

压力容器检测是目前声发射技术在我国开展应用最成功和普遍的领域之一，有关科研人员及机构已经对现场压力容器的声发射源进行了系统研究，通过大量的试验和现场应用，这一方法已达到成熟，制定了国家和行业标准，并编写了声发射检测 II 级人员培训教材，对 800 多人进行了培训和 II 级资格认证。目前国内有 60 多家专业检验机构从事压力容器的声发射检测，国内的大部分多通道声发射仪由这些单位拥有。据粗略统计，这些单位每年采用声发射技术检测大型压力容器 1000 台左右。

压力容器的声发射检测包括新制造压力容器水压试验时的声发射监测、在用压力容器的声发射检测和缺陷评价、压力容器运行状态下的声发射在线监测和安全评价。由于我国在 20 世纪 70 年代投入使用的压力容器绝大部分存在各种各样的焊接缺陷，在定期检验过程中对采用超声波和射线方法发现的大量超标缺陷的处理十分困难，如全部返修，其工程造价甚至与更新的费用差不多，而采用声发射检测可以快速发现这些超标缺陷中存在的活性缺陷，仅需对这些活性缺陷进行返修处理，压力容器即可重新投入使用。另外，在运行过程中，许多压力容器虽已到了检验周期，但由于生产工艺的需要不能停产，而声发射技术是目前较成熟的在线无损检测方法，采用声发射进行在线监测，可以对容器的安全性进行评价，从而决定是否延长压力容器的检验周期。

声发射技术及其大量的科研成果在我国压力容器检测中被成功地推广和应用，一方面及时排除了大量带缺陷运行的压力容器的爆炸隐患，降低了恶性事故的发生，确保了这些容器的安全运行，取得了重大的社会效益；另一方面，声发射检测大大缩短了容器的检验周期，并减少了盲目返修和报废压力容器所带来的损失，为广大压力容器用户带来了巨大的经济效益，深受用户的欢迎。

### 1.4.2 航空航天工业中的应用

我国学者在这一领域进行了广泛和深入的研究，并取得了一些重要成果。早在 20 世纪 80 年代初，国内有关单位就进行了飞机机翼疲劳试验过程中的声发射监测研究，并在信号处理和识别技术方面积累了宝贵经验。空军第一研究所在某型飞机的全尺寸疲劳试验过程中（飞行长达 16000h），用声发射技术对其主梁螺孔



和隔框连接螺栓等部位疲劳裂纹的形成和扩展进行了跟踪监测,历时之长和积累数据之丰富都是前所未有的。他们利用了声发射参数组成多维空间的一个特征矢量,成功进行了疲劳裂纹产生的声发射信号识别。除利用这种多参数识别方法外,还利用趋势分析和相关技术等方法对信号进行处理,建立了一套较完整的信号识别和处理体系。

#### 1.4.3 复合材料的声发射特性研究

声发射技术目前已成为研究复合材料断裂机理和检测复合材料压力容器的重要方法。中国科学院沈阳金属研究所、航空 621 所、航天 703 所和 44 所在这些领域做了大量工作,尤其是航天 44 所开展了大量复合材料压力容器的声发射检测工作,并起草了内部的检测与评价标准。目前,采用声发射技术已能检测每根碳纤维或玻璃纤维丝束的断裂及丝束断裂载荷的分布,从而评价它们的质量。声发射技术还可以区分复合材料层板不同阶段的断裂特性,如基体开裂、纤维与基体界面开裂、分层和纤维断裂等。另外,我国也有学者采用声发射技术研究碳纤维增强聚酰亚胺复合材料升温固化的特性。

#### 1.4.4 声发射信号的处理技术

声发射检测的最主要目的之一是识别产生声发射源的部位和性质,而声发射信号的处理是解决这一问题的唯一途径。在声发射信号的处理和分析方面,除常用的经典声发射信号参数和定位分析方法之外,我国目前开展了处于世界前沿的基于波形分析的模态分析、经典谱分析、现代谱分析、小波分析和人工神经网络模式识别技术研究;此外,也对声发射信号参数采用了模式识别、灰色关联分析和模糊分析等先进的处理技术;还自主开发了进行各种信号分析和模式识别的软件包。通过采用这些信号处理与分析技术,可以在不对声发射源部位进行其他常规无损检测方法复检的情况下,直接给出声发射源的性质及危险程度。

#### 1.4.5 岩石的监测和应力测量

声发射现象的观测起源于地震的监测,现已广泛应用于岩石的监测和地质与石油钻探中的应力测量。武汉安全环保研究院近二十年来一直开展矿山和大型水坝岩石塌方的监测研究和应用工作,在长江三峡大坝建设期间,对一些关键部位的岩石活动情况进行监测,为三峡大坝的建设提供了重要依据。中国科学院地质研究所利用岩石的凯塞效应测量古岩石的应力,以研究远古时期地质的变化情况。北京石油勘探开发设计院和北京石油大学采用声发射技术测量岩芯的主应力方向,达到确定油田最大水平应力方向的目的。这些成果已应用在我国油田生产和开发上,取得了明显的经济效益。