

综 述

中国声发射检测技术进展

——学会成立 25 周年纪念

沈功田, 戴 光, 刘时风

(无损检测学会 声发射专业委员会)

摘 要: 介绍国内外声发射检测技术的发展历程和现状, 综述我国无损检测(NDT)学会活动情况、标准、仪器、人员及主要研究和应用领域的现状, 提出了我国目前声发射检测急需解决的问题和发展趋势。

关键词: 声发射检验; 综述; 压力容器; 复合材料; 岩石; 焊接结构; 应力测定

中图分类号: TG115. 28 文献标识码: A 文章编号: 1000-6656(2003)06-0302-06

ACOUSTIC EMISSION TESTING PROGRESS IN CHINA: CELEBRATION FOR THE 25th ANNIVERSARY OF CHINESE SOCIETY FOR NDT

SHEN Gong-tian DAI Guang LIU Shi-feng

(AE Committee, Chinese Society for NDT)

Abstract: The history and present situation of acoustic emission (AE) technique at home and abroad were introduced. The state-of-art of AE standards, instrument, personnel, main research and applying fields was outlined. Some challenging problems and developing tendency were also described.

Keywords: Acoustic emission testing; Review; Pressure vessel; Composite; Rock; Welded structure; Stress measurement

1 声发射技术的发展和现状

1.1 声发射技术的发展

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)^[1]。声发射是一种常见的物理现象, 大多数材料变形和断裂时均伴有声发射, 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、记录和分析声发射信号以及利用声发射信号推断声发射源的技术称为声发射检测技术。

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有声发射现象, 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即为 Kaiser 效应, 他同时还提出连续型和突发型声发射信号的概念。

20 世纪 50 年代末到 60 年代间, 美国和日本许多学者在试验室中做了大量工作, 研究各种材料声发射源的物理机制, 并初步应用于工程材料无损检测领域。Dunegan 首次将声发射技术应用于压力容器检测, 美国于 1967 年成立了声发射工作组, 日本于 1969 年成立了声发射协会。

20 世纪 70 年代初, Dunegan 等人开展了现代声发射仪器的研制, 他们把试验频率提高到 100kHz ~ 1MHz, 这是声发射试验技术的重大进展。现代声发射仪器的研制成功为声发射技术从试验室的材料研究阶段走向在生产现场监视大型构件的结构完整性应用创造了条件。

随着现代声发射仪器的出现, 20 世纪 70 年代和 80 年代初人们从声发射源机制、波的传播和声发射信号分析方面开展了广泛和深入的系统研究。在生产现场也得到了广泛的应用, 尤其在化工容器、核

收稿日期: 2003-03-03

容器和焊接过程的控制方面取得了成功。根据 Drouillard 统计的声发射论文目录^[2,3], 到 1986 年有关声发射的论文已超过 5 000 篇^[3]。

20 世纪 80 年代初, 美国 PAC 公司将现代微处理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高级检测和数据分析软件, 通过微处理机控制, 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。由于第二代声发射仪器体积小、重量轻且易于携带, 大大推动了声发射技术在现场检测的广泛应用; 另一方面, 由于采用 286 及更高级的微处理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, 信息存储量增加, 提高了声发射源的定位功能和缺陷检出准确率。

20 世纪 90 年代, 美国 PAC 公司、DW 公司、德国 Vallen Systeme 公司和中国广州声华公司先后开发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, 除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。

1.2 声发射技术的应用领域

目前声发射技术作为一种成熟的无损检测方法已被广泛应用, 主要应用领域和方面有:

(1) 石油化工行业 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) 电力行业 高压蒸汽汽包、管道和阀门的检测和泄漏监测, 汽轮机叶片检测, 汽轮机轴承运行状况监测, 变压器局部放电检测。

(3) 材料试验 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。

(4) 民用工程 楼房、桥梁、起重机、隧道和大坝的检测, 水泥结构裂纹开裂和扩展的连续监视等。

(5) 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、疲劳试验和运行过程中的在线连续监测等。

(6) 金属加工 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、锻压测试以及加工过程的碰撞探测和预防。

(7) 交通运输业 长管拖车、公路和铁路槽车及船舶的检测和缺陷定位、铁路材料和结构的裂纹

探测、桥梁和隧道的结构完整性检测、卡车和火车滚珠轴承和轴颈轴承的状态监测以及火车车轮和轴承的断裂探测。

(8) 其它 硬盘的干扰探测, 带压瓶的完整性检测, 庄稼和树木的干旱应力监测, 摩擦磨损监测, 岩石探测, 地质和地震应用, 发动机状态监测, 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, Li/MnO₂ 电池的充放电监测, 人骨头的摩擦、受力和破坏特性试验以及骨关节状况的监测。

1.3 声发射检测技术的优点

(1) 声发射是一种动态检测方法, 声发射探测到的能量来自被测试物体本身, 而不是像超声或射线探伤那样由无损检测仪器提供。

(2) 声发射检测方法对线性缺陷较为敏感, 它能探测到在外加结构应力下这些缺陷的活动情况, 稳定的缺陷不产生声发射信号。

(3) 在每次试验过程中, 声发射检测能够整体探测和评价结构中的活性缺陷状态。

(4) 可提供活性缺陷随载荷、时间和温度等变化的实时或连续信息, 因而适用于工业过程在线监控及早期或临近破坏预报。

(5) 由于对被检件的接近要求不高, 因此适用于其它方法难以或无法接近情况下的检测, 如高低温、核辐射、易燃、易爆及剧毒等。

(6) 用于在役设备的定期检验, 可以缩短设备停产时间或者无需停产。

(7) 用于设备加载试验, 可预防由未知不连续引起的系统灾难性失效和限定系统最高工作载荷。

(8) 由于对构件的几何形状不敏感, 因此适用于检测其它方法受到限制的形状复杂的构件。

2 中国声发射技术发展历程和学会活动

声发射技术在 20 世纪 70 年代初引入我国^[4], 正值我国断裂力学发展的高峰, 人们希望利用声发射进行预报和测量裂纹的开裂点。中科院沈阳金属研究所、北京航空材料研究所、机械部合肥通用机械研究所和武汉大学等一些科研院所和大学开展了金属和复合材料方面的声发射特性研究。

20 世纪 80 年代初国内开始尝试将声发射技术用于压力容器检验等工程, 鉴于当时声发射仪器的性能和信号处理方面的限制, 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

性等认识的欠缺,在试验结果的重复性和可靠性方面存在很多问题,因此声发射技术曾陷入低谷。

20 世纪 80 年代中期劳动部锅炉压力容器检测研究中心率先从美国 PAC 公司引进当时世界上最先进的采用 Z80 微处理机技术制造的 SPARTAN 源定位声发射检测与信号处理分析系统,并在石化和煤气公司开展了球形储罐和卧罐等压力容器的检测,取得了成功,得到了用户的认可。随后,冶金部武汉安全环保研究院、大庆石油学院、西安 44 研究所和石油大学等许多单位相继从 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、复合材料和岩石方面的检测应用。1989 年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(见第 4 届声发射年会论文集)。

从 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,详情见第 5~9 届声发射年会论文集。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并广泛开展压力容器的检验。90 年代中期北京航空工程技术研究中心和北京材料及工艺研究所从美国 PAC 公司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,从而开始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。2002 年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 公司引进了最新型号的 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,又能检测大型常压油罐底部泄漏。目前声发射技术已经在我国石油、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得到广泛的研究和应用。

在声发射仪器的研制和生产方面,我国的起步并不算晚。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,长春试验机研究所于 80 年代中期研制出采用微处理机控制的 32 通道声发射定位分析系统,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 年广州声华公司研制出基

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技术的全数字化多通道声发射检测分析系统。

在学术交流活动方面,随 1978 年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 1 届全国声发射会议;近 10a(年)来每年召开一次声发射专业委员全体会议,并进行小规模学术交流活动,每两年召开一次全国学术会议,进行大规模的学术交流和仪器演示,到目前为止已召开了九届会议(表 1),每次学术会议均出版论文集,收集论文 40~50 篇,与会代表 60~80 人。

表 1 中国历届声发射学术会议

| 届次 | 年份 | 地点 | 届次 | 年份 | 地点 | 届次 | 年份 | 地点 |
|----|------|----|----|------|-----|----|------|----|
| 1 | 1979 | 黄山 | 4 | 1989 | 青岛 | 7 | 1997 | 北京 |
| 2 | 1983 | 桂林 | 5 | 1993 | 张家界 | 8 | 1999 | 上海 |
| 3 | 1986 | 长春 | 6 | 1995 | 峨眉山 | 9 | 2001 | 成都 |

3 人员和仪器现状

据估计,我国目前约有 60 多个科研院所、大专院校和专业检验单位在各个部门和领域从事声发射技术的研究、检测应用、仪器开发、制造和销售工作,从业人员 200 多人。在人员培训方面,已有至少 5 人以声发射检测技术的有关研究内容为论文题目获得博士学位,有 50 多人获得硕士学位。在检测人员资质方面,航天工业无损检测人员资格考试委员会自 20 世纪 90 年代末起已培训 II 级检验人员 30 多人,国家质量监督检验检疫总局锅炉、压力容器、压力管道和特种设备无损检测人员资格考试委员会于 2002 年已培训 II 级检验人员 80 多人。

在仪器制造和销售方面,国内主要有科海恒生公司、广州声华公司和沈阳电子所等。科海恒生公司制造和销售 2~32 通道 CFAE-2001 系列的参数式多通道声发射仪器;广州声华公司制造和销售 2~32 通道 WAE2000 系列数字化全波形多通道声发射仪;沈阳电子所主要制造和销售 2~8 通道声发射仪。还有一些单位针对具体工程,基于声发射技术的原理研制出专用检测仪器,如轴承故障检测仪、阀门泄漏检测仪(沈阳电子所)、高压变压器局部放电检测仪(沈阳变压器厂和北京电力科学研究院)、摩擦声发射检测仪(北京航空航天大学)、岩石状态监

测仪(广州声华公司)、声发射燃条燃速测试仪(航天总公司 44 所)、高精度声发射对刀装置(国防科技大学)以及刀具破损监测仪等。

在现有声发射仪器设备的拥有量方面,估计 32 通道及以上的声发射仪 20 多台,8~24 通道声发射仪 40 多台,1~4 通道声发射仪 100 多台。主要仪器型号为美国 PAC 公司的 LOCAN, SPARTAN 和 MIS-TRAS 系列,德国 VALLEN 公司的 AMSY 系列,国内科海恒生公司的 CFAE 系列,广州声华公司的 WAE 系列和沈阳电子所的声发射仪。

4 标准状况

我国声发射检测标准在制订上迟于其它常规无损检测方法,与美国也有很大差距,但目前在许多方面已取得进展,分别颁布检测术语、检测仪性能测试、金属压力容器检测方法、钛合金压力容器检测方法、复合材料构件检测方法和在役金属容器检测方法等国家标准、国家军用标准和行业标准,其余为企业或内部标准。目前已颁布的主要声发射标准有

GB/T 12604.4—1990 声发射检测术语

GB/T 18182—2000 金属压力容器声发射检测及结果评价方法

GJB 2044—1994 钛合金压力容器检测方法

JB/T 8283—1995 检测仪性能测试方法

JB/TQ 753—1989 在役容器检测方法

QJ 2914—1996 复合材料构件检测方法

5 主要研究和应用领域^[5~10]

5.1 压力容器的声发射检测

压力容器检测是声发射技术在国内应用最成功和普遍的领域之一,已经对现场压力容器的声发射源进行了详细的研究^[9],通过大量的试验和现场应用,该方法已经成熟,制订了国家标准,并编写了 II 级检测人员声发射培训教材^[9],对 80 多人进行了培训和 II 级检验资格认证。目前国内有近 30 家拥有声发射仪器的单位从事压力容器的声发射检测,每年检测大型压力容器 200~300 台。

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、在役压力容器的声发射检测和缺陷评价、压力容器工作状态下的声发射在线监测和安全评价^[7]。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焊接缺陷,在定期检验过程中对超声波和射线检测发现的大量超标缺

陷的处理十分困难,如全部返修费用昂贵,而采用声发射检测可以快速发现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即可使压力容器重新投入使用。另外,在压力容器的运行过程中,可以用声发射技术对到了检验周期但不能停产的设备进行在线监测,对压力容器的安全性进行评价,从而决定是否延长其使用周期。

声发射技术及其科研成果在我国压力容器检测中的成功推广应用,一方面及时排除了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,取得了重大的社会效益;另一方面,声发射检测大大缩短了压力容器的停产检验时间,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,深受用户欢迎。

5.2 航空航天工业中的应用

我国航空航天领域学者也对声发射技术进行了广泛和深入的研究,取得了一些重要成果。早在 20 世纪 80 年代初,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^[8,9],在信号处理和识别技术方面积累了宝贵经验。北京航空工程技术研究中心在某型飞机的全尺寸疲劳试验过程中(飞行长达 16 000h),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^[10,11]。他们利用声发射参数组成多维空间的特征矢量,成功地进行了疲劳裂纹产生的声发射信号识别。除多参数识别外,他们还利用趋势分析和相关技术进行了信号处理,建立了一套较为完整的信号识别和处理体系。

5.3 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。中科院沈阳金属所、北京航空材料研究所、北京材料及工艺研究所和航天 44 所在该领域做了大量工作,尤其是 44 所进行了大量复合材料压力容器的声发射检测,起草了检测与评价内部标准。目前已能用声发射技术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,从而评价其质量。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。另外,我国也有人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^[12]。

5.4 声发射信号处理技术

声发射检测的主要目的之一是识别产生声发射源的部位和性质,而声发射信号处理是解决该问题的唯一途径。在声发射信号处理和分析方面,除普遍采用的经典声发射信号参数和定位分析外,我国目前还开展了处于世界前沿的基于波形分析基础之上的模态分析、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,另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技术,我国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常规无损检测复验的情况下,直接给出声发射源的性质及危险程度^[13~27]。

5.5 岩石的监测和应力测定

声发射现象的观测起源于地震监测,现今广泛应用于岩石的监测和地质与石油钻探中的应力测定。冶金部武汉安全环保研究院近 20a 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,近几年一直在长江三峡大坝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 Kaiser 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,来确定油田最大水平应力方向。这些成果已用在我国油田生产和开发上,取得了明显的经济效益。

5.6 机械制造过程中的监控

声发射应用于机械制造过程或机加工过程的监控始于 20 世纪 70 年代末,我国在这一领域起步早、发展快。早在 1986 年国防科技大学等单位就进行了用声发射监测机加工刀具磨损的研究。现在,一些单位已研制成功车刀破损伤监测系统 and 钻头折断报警系统,前者的检测准确率 $> 99\%$ 。根据刀具与工件接触时挤压和摩擦产生声发射的原理,我国还成功研制了高精度声发射对刀装置,用以保证配合件的加工精度。90 年代,有些部门已开始用人工神经网络进行刀具状态监控、切削形态识别与控制以及磨削接触与砂轮磨损监测等。

5.7 铁路焊接结构疲劳损伤的监测

我国铁路部门对高速列车转向架构架模拟梁的焊接结构进行了声发射监测试验,采用声发射多参数分析技术监测了焊接梁疲劳的全过程,得到了构件疲劳损伤各阶段与声发射特征之间的关系,准确

地监测到焊接梁中焊缝和应力集中处的裂纹萌生及扩展过程。所用方法可进一步用来确定构件的损伤程度,并有可能应用于铁路桥梁疲劳损伤监测。

5.8 泄漏监测

带压力流体介质的泄漏检测是声发射技术应用的一个重要方面,国家质量监督检验检疫总局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清华大学无损检测中心在国家“八五”和“九五”期间合作对压力容器和压力管道气、液介质泄漏的声发射检测技术进行了研究,其科研成果已在一些石化企业的原油加热炉和城市埋地燃气管道的泄漏监测中得到成功应用。核工业总公司武汉核动力运行研究所于 20 世纪 90 年代中期从美国进口了 36 通道声发射泄漏检测仪器,专门用于我国核电站的泄漏检测,目前已完成了大量研究和应用工作。国家质量监督检验检疫总局锅炉压力容器检测研究中心和大庆石油学院也分别开展了大型油罐底部声发射泄漏检测的研究和应用工作,取得了初步成功。

5.9 磁声发射研究

1984 年,武汉大学首先开展铁磁性材料磁声发射研究,随后北京科技大学和华中科技大学也相继开展磁声发射研究。武汉大学以多晶和单晶硅钢材料对磁声发射机制进行了研究,并在世界上首次提出 180°磁畴壁的运动可产生很大的磁声发射信号,提出了磁畴壁内磁化矢量的逐渐旋转运动产生的弹性波模型,是对公认的磁声发射产生机制的完善和补充^[28]。北京科技大学将磁声发射与巴克豪森效应相结合,开发出可测量焊缝残余应力的仪器^[29]。

6 目前急需解决的问题和发展趋势

学会成立 25a 来,我国声发射技术经历了从实验室研究到目前在许多工业领域的成功应用,从最初电子管技术的模拟式单通道声发射仪到目前全数字化全波形的多通道声发射仪,从为数不多的声发射技术研究人员到目前数百人的科研和检验队伍等方面都有了巨大发展,取得了显著的成就,所有这些都是我国声发射研究和检测人员共同努力的成果,同时学会在组织学术交流、加强我国科研人员的信息交流与合作方面也起到了很大的促进作用。

目前,我国的声发射技术取得了很大进展,但应当承认与欧美等工业发达国家相比,在很多方面还有差距,考虑到我国当前科研和工程检测对声发射技术的需求,特提出以下急需解决的问题和声发射

技术的发展趋势:

(1) 对波的传播等基础理论开展研究, 为声发射技术的工程应用提供理论依据。

(2) 在仪器开发方面, 进一步完善和提高现有机型的功能和可靠性, 开发适用于各种工程检测声发射信号数据分析与处理软件包, 尤其是适用于埋地管道和油罐底部泄漏检测的商品化仪器和软件。

(3) 在传感器制造方面, 进一步完善和提高现有共振型传感器的制造水平, 开发低频和高温传感器, 并形成商品销售。

(4) 加快声发射检测标准的制订和修订步伐, 建立我国声发射检测的标准体系, 为进一步推广声发射检测的工程应用打下基础, 尽快赶上工业发达国家的水平。

(5) 加强各部门的协调, 建立我国一致的检验人员培训和资质认证体系, 扩大声发射检测人员的队伍, 降低声发射检测人员取得资格证书的成本。

(6) 进一步拓展声发射检测技术的应用领域, 重点开展桥梁、建筑、埋地管道和大型常压油罐的声发射检测技术研究和应用。

(7) 进一步开展声发射信号处理分析技术和神经网络模式识别的研究, 提高压力容器、压力管道和各种大型机械装备的在线检测应用水平。

参考文献:

[1] American Society for Nondestructive Testing. Acoustic Emission Testing. in: Nondestructive Testing Handbook[M]. Miller Ronnie K, McIntire Paul, eds. Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 1987.

[2] Drouillard T. Acoustic Emission: A Bibliography with Abstracts[M]. Frances Laner, ed. New York:IFI Plenum Data Company, 1979.

[3] Drouillard TF. Acoustic emission——the first half century [A]. Progress in Acoustic Emission VII[C]. Sapporo, Japan: The Japanese Society for NDI, 1994.

[4] 耿荣生. 声发射技术发展现状——学会成立 20 周年回顾[J]. 无损检测, 1998, 20(6): 151—154.

[5] 沈功田, 周裕峰, 段庆儒, 等. 现场压力容器检验的声发射源[J]. 无损检测, 1999, 21(7): 321—325.

[6] 沈功田, 刘时风, 戴光. 声发射检测(锅炉压力容器压力管道及特种设备安全系列试用教材)[Z]. 2002.

[7] 沈功田, 段庆儒, 李邦宪. 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.

[8] 袁振明, 任荣镇, 等. 飞机机翼疲劳试验的声发射检测

[A]. 全国第二届声发射会议论文集[C]. 桂林: 1983.

[9] 魏文慧. 声发射技术在飞机部件疲劳试验中裂纹监测的应用[A]. 全国第二届声发射会议论文集[C]. 桂林: 1983.

[10] 耿荣生, 等. 飞机主梁疲劳裂纹萌生声发射信号的识别方法[J]. 航空学报, 1996, 17(3): 368—372.

[11] Geng Rongsheng, et al. Prediction of fatigue crack initiation of aircraft using AE[A]. Proc of International Conference on Failure Analysis and Prevention[C]. Beijing: 1995.

[12] 沈功田, 秦平彦, 等. 碳纤维增强聚酰亚胺复合材料升温固化的声发射特性研究[J]. 无损检测, 1998, 20(5): 126—128.

[13] 耿荣生, 沈功田, 刘时风. 声发射信号处理和分析技术[J]. 无损检测, 2002, 24(1): 23—28.

[14] 沈功田, 耿荣生, 刘时风. 声发射信号参数分析方法[J]. 无损检测, 2002, 24(2): 72—77.

[15] 沈功田, 耿荣生, 刘时风. 声发射源定位技术[J]. 无损检测, 2002, 24(3): 114—117.

[16] 沈功田, 耿荣生, 刘时风. 连续声发射信号的源定位技术[J]. 无损检测, 2002, 24(4): 164—167.

[17] 金钟山, 刘时风, 耿荣生, 等. 曲面和三维结构的声发射源定位方法[J]. 无损检测, 2002, 24(5): 205—211.

[18] 耿荣生, 沈功田, 刘时风. 基于波形分析的声发射信号处理技术[J]. 无损检测, 2002, 24(6): 257—261.

[19] 耿荣生, 沈功田, 刘时风. 模态声发射基本理论[J]. 无损检测, 2002, 24(7): 302—306.

[20] 耿荣生, 沈功田, 刘时风. 模态声发射——声发射信号处理的得力工具[J]. 无损检测, 2002, 24(8): 341.

[21] 陈玉华, 刘时风, 耿荣生, 等. 声发射信号的谱分析和相关分析[J]. 无损检测, 2002, 24(9): 395—399.

[22] 张平, 施克仁, 耿荣生, 等. 小波变换在声发射检测中的应用[J]. 无损检测, 2002, 24(10): 436—439.

[23] 易若翔, 刘时风, 耿荣生, 等. 神经网络在声发射检测中的应用[J]. 无损检测, 2002, 24(11): 488.

[24] 李光海, 刘时风, 耿荣生, 等. 声发射源特征识别的最新方法[J]. 无损检测, 2002, 24(12): 534—538.

[25] 刘时风. 焊接缺陷声发射检测信号谱估计及神经网络模式识别研究[D]. 北京: 清华大学, 1996.

[26] 戴光. 在用压力容器活性缺陷的声发射特性与模糊综合分析[D]. 杭州: 浙江大学, 1996.

[27] 沈功田. 金属压力容器的声发射源特性及识别方法的研究[D]. 北京: 清华大学, 1998.

[28] 徐约黄, 沈功田. 磁声发射现象及其影响因素的探测[J]. 武汉大学学报(自然科学版), 1985, (4): 119.

[29] 徐约黄, 沈功田, 刘时风. 磁声发射现象及其机制的探讨[J]. 金属学报, 1988, 24(增刊 II): SB86—SB91.