



军队“2110”工程三期建设教材

基于声发射的材料 损伤检测技术

JIYU SHENGFASHE DE CAILIAO SUNSHANG JIANCE JISHU

阳能军 姚春江 袁晓静 龙宪海 © 著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



军队“2110”工程三期建设教材

基于声发射的材料 损伤检测技术

阳能军 姚春江 袁晓静 龙宪海 著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书总结了作者多年来在声发射技术领域取得的研究成果,重点讲述了声发射技术在金属材料裂纹损伤、腐蚀损伤以及复合材料拉伸损伤检测中的应用。全书分为6章,包括绪论、声发射检测技术的原理、材料损伤过程声发射信号处理与分析、金属材料裂纹损伤的声发射检测、金属材料腐蚀损伤的声发射检测、纤维增强型复合材料拉伸损伤的声发射检测等。

本书既可作为高等院校相关专业硕士研究生的教材,也可作为从事材料检测和声发射技术领域研究的工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

基于声发射的材料损伤检测技术 / 阳能军等著. --

北京:北京航空航天大学出版社,2016.8

ISBN 978-7-5124-2222-3

I. ①基… II. ①阳… III. ①声发射技术—应用—材料工程—损伤—检测 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 198657 号

版权所有,侵权必究。

基于声发射的材料损伤检测技术

阳能军 姚春江 袁晓静 龙宪海 著

责任编辑 冯 颖

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(邮编100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京兴华昌盛印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:10 字数:256千字

2016年8月第1版 2016年8月第1次印刷 印数:2 000册

ISBN 978-7-5124-2222-3 定价:29.00元

前 言

声发射技术是近几十年发展起来的无损检测技术,在工业制造、石油化工以及航空航天等领域有着广阔的应用前景。与其他检测技术相比,声发射检测几乎适用于所有材料的检测,并可获得材料损伤过程的动态信息,能够探测出材料或构件中的“活性”缺陷,从而为评价材料或构件的使用安全性提供可能。基于此,声发射检测技术日益受到各国学者的重视,并在工程上得到广泛应用。但是,不同材料、不同损伤过程有着不同的声发射机理,并且许多机理尚不十分明确,因此,针对典型材料、典型损伤过程的声发射检测研究具有非常重要的学术价值和指导意义。

本书总结了作者多年来在声发射技术领域取得的研究成果,重点讲述了声发射技术在金属材料裂纹损伤、腐蚀损伤以及复合材料拉伸损伤检测中的应用。全书内容分为6章,主要包括:绪论、声发射检测技术的原理、材料损伤过程声发射信号处理与分析、金属材料裂纹损伤的声发射检测、金属材料腐蚀损伤的声发射检测、纤维增强型复合材料拉伸损伤的声发射检测。

本书中的许多研究成果是在导师王汉功教授的指导下完成的,在此向王教授表示深切的怀念。感谢龙宪海博士在复合材料损伤检测方面的大力帮助,书中关于复合材料损伤检测的大部分试验是龙宪海博士完成的。本书涉及的研究成果还得到了国家自然科学基金委员会资助的青年基金项目“缠绕复合材料结构低能量冲击损伤表征与剩余强度研究”(11302249)的资助,在此一并表示感谢。

由于作者理论水平有限,以及所做研究工作的局限性,书中难免存在不妥之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2016年4月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 声发射现象与声发射检测技术	1
1.2 声发射技术的发展历程	1
1.2.1 国外发展概况	1
1.2.2 国内发展概况	2
1.3 声发射检测的特点	3
1.4 声发射检测技术的应用领域	4
1.5 声发射技术在材料损伤检测领域的研究现状与发展趋势	5
第2章 声发射检测技术的原理	7
2.1 声发射的物理基础	7
2.1.1 声发射的产生机理	7
2.1.2 声发射源	8
2.1.3 声发射波的传播	9
2.1.4 Kaiser 效应和 Felicity 效应	12
2.2 声发射检测的原理	12
2.3 声发射源的定位方法	13
2.3.1 直线定位法	14
2.3.2 任意三角形定位法	14
2.3.3 球面三角形定位法	16
第3章 材料损伤过程声发射信号处理与分析	19
3.1 传统声发射信号处理方法	19
3.1.1 表征参数分析法	19
3.1.2 波形分析法	20
3.2 基于小波分析的声发射信号降噪技术	21
3.2.1 小波分析技术简介	21
3.2.2 小波分析理论基础	22
3.2.3 基于小波分析的声发射信号剔噪方法	26
3.2.4 小波剔噪效果分析	29
3.3 基于关联图分析法的声发射信号降噪技术	30
3.4 材料损伤声发射信号的模式识别	32
3.4.1 模式识别的概念	32
3.4.2 模式识别方法分类	33

3.4.3 模式识别技术在声发射信号处理中的应用概况	34
3.5 材料损伤声发射信号处理中的神经网络技术	34
3.5.1 神经网络技术及 BP 网络简介	34
3.5.2 BP 网络算法原理	35
3.5.3 BP 算法改进	38
第 4 章 金属材料裂纹损伤的声发射检测	41
4.1 金属材料裂纹损伤的声发射检测模拟试验	41
4.1.1 试验方案	41
4.1.2 试验仪器与设备	42
4.1.3 试样材料	42
4.1.4 试样制备	43
4.1.5 参数设置	43
4.1.6 消噪措施	45
4.1.7 试验过程	45
4.1.8 试验结果	46
4.2 金属材料裂纹损伤的声发射特性	46
4.2.1 裂纹损伤过程的信号撞击数/振铃计数变化规律	49
4.2.2 金属材料裂纹损伤的演化过程	50
4.2.3 声发射振铃计数与载荷的关系	51
4.2.4 声发射技术在金属材料断裂韧性测试中的应用	51
4.3 基于声发射表征参数的金属材料裂纹损伤模式识别	54
4.3.1 裂纹损伤模式识别系统设计	54
4.3.2 裂纹损伤声发射信号的近邻识别法	58
4.3.3 模式识别测试	59
4.3.4 关于近邻识别中模式距离计算方法的改进	59
第 5 章 金属材料腐蚀损伤的声发射检测	61
5.1 金属材料腐蚀损伤的声发射的相关机理	61
5.1.1 铝合金 5A03 在浓硝酸中发生腐蚀损伤的机理	61
5.1.2 金属材料腐蚀损伤声发射的机理	61
5.2 金属材料腐蚀损伤的声发射检测试验	62
5.2.1 试验方案	62
5.2.2 试样制备	63
5.2.3 腐蚀介质	64
5.2.4 参数设置	64
5.2.5 试验过程及现象	65
5.3 金属材料腐蚀损伤的声发射特性分析	66
5.3.1 腐蚀声发射信号表征参数分析	66
5.3.2 腐蚀声发射信号频谱分析	70

5.4 基于声发射的金属材料腐蚀损伤神经网络识别	72
5.4.1 腐蚀损伤级别的划分	72
5.4.2 BP神经网络模型的构建	74
5.4.3 基于神经网络的腐蚀声发射信号模式识别	74
第6章 纤维增强型复合材料拉伸损伤的声发射检测	76
6.1 复合材料及其损伤检测方法简介	76
6.2 复合材料声发射源的时差定位	78
6.2.1 时差定位法在复合材料检测中的局限性	78
6.2.2 复合材料平板不同方向上的声速测量与拟合	78
6.2.3 单向纤维增强复合材料平板声发射源时差定位方法	80
6.3 碳/环氧复合材料拉伸损伤的声发射检测试验	81
6.3.1 试验设备	81
6.3.2 试样制备	82
6.4 组分材料及[90]、[45]单向板拉伸损伤过程及声发射特性	83
6.4.1 环氧树脂基体试样拉伸损伤过程及声发射特性	83
6.4.2 碳纤维束试样拉伸损伤过程及声发射特性	86
6.4.3 浸胶碳纤维束拉伸损伤过程及声发射特性	89
6.4.4 [90]单向板拉伸损伤过程及声发射特性	92
6.4.5 [45]单向板拉伸损伤过程及声发射特性	96
6.5 碳/环氧复合材料[0]单向板拉伸损伤过程分析	98
6.5.1 [0]单向板拉伸损伤过程及声发射特性	99
6.5.2 [0]单向板拉伸损伤过程的电阻变化特性	106
6.6 碳/环氧复合材料拉伸损伤模式识别	107
6.6.1 基于波形分析的模式识别方法	108
6.6.2 碳/环氧复合材料拉伸损伤声发射信号模式识别方案	110
6.6.3 聚类分析算法	111
6.6.4 碳/环氧复合材料单向板拉伸过程声发射信号模式识别实现	113
6.7 碳/环氧复合材料在不同拉伸条件下的损伤行为及评估	117
6.7.1 碳/环氧复合材料在不同加载速度下的拉伸损伤过程	117
6.7.2 碳/环氧复合材料的恒载声发射效应研究	120
6.7.3 碳/环氧复合材料的 Felicity 效应研究	123
6.7.4 基于声发射的复合材料加卸载效应研究	128
6.8 碳/环氧复合材料拉伸损伤临界失效载荷及损伤模型的探讨	133
6.8.1 复合材料临界失效载荷	134
6.8.2 复合材料拉伸损伤模型研究	139
6.8.3 基于可靠性分析的复合材料使用寿命探讨	143
附 录	147
参考文献	148

第1章 绪论

1.1 声发射现象与声发射检测技术

在外界条件(应力、温度、磁场等)作用下,材料或构件的局部缺陷(或异常)部位因应力集中而产生变形或开裂,以弹性波形式释放出应变能的现象,称为声发射(Acoustic Emission, AE)。声发射是自然界普遍存在的一种现象。例如:机械设备内部零部件形成裂纹或裂纹扩展时会产生声发射;地壳的地质运动(如地震)会发生声发射;树木折断时也会产生声发射现象。但是,不同的现象和过程,产生的声发射波的频率和幅值差别很大,其频率范围可从次声波、可听声直至 50 MHz 左右的超声波,幅值可从几微伏到数百伏。

声发射弹性波能反映出材料或零部件的某些物理性质及损伤,因此采用检测声发射信号的方法,可以判断材料或零部件的某种状态。利用仪器检测、记录、分析声发射信号,并通过声发射信号对声发射源的状态做出判断,进而推断材料或零部件状态的技术,就是声发射检测技术。

1.2 声发射技术的发展历程

1.2.1 国外发展概况

人们观察到声发射现象已有很长的历史。公元 8 世纪,阿拉伯炼金术士 Jabir ibn Hayyan 对“锡鸣”现象进行了描述,这是人类对声发射现象所做的最早文献记载。20 世纪上半叶,各国科学家开始将声发射作为一门技术加以研究、开发和利用。1950—1953 年,德国金属物理学家 Kaiser J 完成了常用工程材料声发射现象的首创性研究,发现金属材料的声发射现象具有“记忆性”,从而提出了声发射领域最重要的概念——Kaiser 效应,并对金属材料中的声发射现象进行了科学而系统的论述,为声发射研究奠定了基础,同时也是现代声发射技术诞生的标志。1954 年, Schofield B H 将声发射技术引入美国,并在美国特别是在原子能机构中掀起了研究热潮。

20 世纪 60 年代,声发射技术在德国、美国受到重视并得以发展。这一时期所取得的最大成就,是超声频段声发射检测信号的确定以及声发射技术在压力容器中的成功应用。1960 年, Dunegan 发现声发射技术在检测压力容器损伤情况方面有明显的优势,经过反复试验研究,首次把声发射试验频率由声频提高到超声范围(100 kHz~1 MHz),并通过窄带滤波的方法消除机械背景噪声,从而为声发射技术从试验研究阶段走向现场检测大型构件的结构完整性创造了条件。1964 年,美国通用动力公司将声发射技术成功地用于“北极星”导弹壳体的结构完整性检验,这是该技术第一次用于工程实际检测,标志着声发射技术的研究进入了现场应用的新阶段。1966 年,声发射技术被成功地用于裂纹扩展的监测与定位。1968 年,声发射技

术在监测大型压力容器方面开始进入商业领域。这些事实表明,声发射技术已开始进入实用阶段。

20 世纪 60 年代末至 70 年代,美国、日本及西欧经济高速发展,在“追求高质量”经济理念的支配下,各国工业界及政府对声发射技术领域给予了大力支持,使声发射技术的研究与应用进入了一个黄金时期。这期间,关于声发射源机制的研究进展顺利,在声发射源的位错研究方面,以及在确定声发射与断裂机制的关系方面取得了长足进步。从 1968 年开始,商业化的声发射测试仪器逐渐在世界范围内得到应用。人们借助于仪器,对声发射源机制和声发射波的传播过程开展了深入而系统的研究。

20 世纪 80 年代,由于对声发射源机理缺乏合理的解释,声发射技术发展陷入低潮阶段。但是这期间也取得了一些可喜的成就:在材料性能方面,声发射技术研究的对象从金属拓展到多种材料;特别是在对纤维增强塑料容器管道的监测过程中,Dr. Fowler 发现了复合材料声发射的重要准则——Felicity 效应。

进入 20 世纪 80 年代中期以后,随着微处理器、高速 A/D 转换和信号处理技术的发展,声发射技术在仪器研制、信号处理、基础性实验等方面都取得了重大进展,逐渐进入工程应用与理论研究全面发展阶段,并在无损检测及材料研究中扮演着越来越重要的角色。1987 年 12 月到 1990 年 9 月,美国 Wright 实验室与 McKonnell - Douglas 公司采用声发射成功地对 F-15 飞机疲劳裂纹扩展过程进行了监测。1991 年,美国学者 Gorman 提出板波声发射理论之后,模态声发射开始应用于工程检测,并取得了较好的效果。20 世纪 90 年代后期,美国 DW 公司将模态声发射(MAE)理论用于飞机结构件疲劳裂纹检测,并根据检测结果指出疲劳裂纹扩展主要产生最低阶对称板波,从而可以利用宽带传感器捕捉这种裂纹信息,实现裂纹声发射信号与背景噪声的识别。

20 世纪 90 年代,声发射检测技术得到进一步发展,美国物理声学公司(PAC)、德国 Vallen 公司等仪器生产厂家分别研究、开发并生产了功能强大的多通道声发射检测系统,使 AE 技术的应用范围不断拓宽,涉及工业生产安全、交通安全、航空安全和材料力学试验研究等领域。与此同时,声发射信号分析方法也日益完善,并推动声发射信号处理软件趋于成熟,为声发射源定位和材料损伤检测提供了有力的技术手段。

近年来,随着信号采集与分析技术的进步,以及神经网络、小波分析、模式识别等方法的引入,进一步推动声发射检测技术向更广阔的领域、更深入的方向发展,声发射技术迎来了欣欣向荣的新局面。

1.2.2 国内发展概况

我国声发射技术是在引进、消化国外技术(主要是仪器应用方面)的基础上,紧密结合工程应用实际发展起来的。

1973 年,中国特种设备检测研究中心(当时称“劳动部锅炉压力容器检测研究中心”)在国内率先开展了声发射技术的研究和应用。随后,中国科学院沈阳金属研究所、航天部 621 所、武汉大学、上海交通大学等单位也相继开展了金属和复合材料的声发射特性研究。但由于当时声发射仪器的性能和声发射信号处理技术方面的不足,以及人们对声发射源性质和声发射波传播特性缺乏全面了解,加之实验结果的重复性和可靠性方面存在不少问题,导致我国声发射技术在其后十余年时间里处于停滞状态。

20世纪80年代后期,国内相关单位开始尝试把声发射检测技术应用于实际工程的检测中。这期间,中国特种设备检测研究中心从美国物理声学公司(PAC)引进了新一代24通道声发射分析仪(Spartan-AT),并在石油化工行业开展了大型储罐、气瓶等压力容器检测,取得了很好的经济效益和社会效益。冶金部武汉安全环保研究所、大庆石油学院、航空航天部第四研究院等单位也先后引进了Spartan和Locan等型号的声发射仪器,开展了压力容器、飞机、金属及复合材料的检测和应用研究。

20世纪90年代以后,我国声发射技术的研究和应用进入快速发展阶段。燕山石化、大庆油田、胜利油田、辽河油田、深圳锅炉压力容器检验所等石油化工企业 and 专业检验单位广泛应用声发射仪器开展压力容器的检验。航天动力研究所的耿荣生利用声发射技术跟踪检测了某型飞机疲劳试验过程中的疲劳裂纹形成和扩展,及时预报了飞机隔框、主梁螺栓孔等处的疲劳裂纹扩展情况,该项成果被认为已与国外在该领域的研究保持了同步先进水平。北京交通大学秦国栋、刘志明、王文静等用不同的试验方案采集16MnR钢材料疲劳过程中的声发射信号特征参数,对该材料疲劳过程中的声发射特性进行了分析,得出了16MnR钢材料在低周疲劳全过程中释放的声发射信号表征参数的变化规律,建立了16MnR钢材料的损伤程度声发射评估模型。

据统计,我国目前有150多家科研院所、高校和专业检验单位从事声发射技术的研究、应用及仪器开发工作,600余人取得了声发射检测的从业资格证书。

1.3 声发射检测的特点

声发射检测通常是在动态下进行的。与其他无损检测方法相比,声发射检测具有以下几方面的特点:

① 能够对检测对象进行动态实时监测,并可根据声发射信号的特性评价缺陷的危害程度以及结构的完整性和预期使用寿命。

② 检测区域面积大,效率高,特别适用于对大型结构的检测。利用多通道声发射仪可在一次检测中对大型、复杂设备做出结构完整性评价,并确定缺陷位置,操作简便、快速,经济效益十分显著。在大、中型压力容器检测方面,声发射检测与常规检测方法所需的工作时间之比为1:2~1:4,费用之比为1:2~1:5。

③ 应用面广。声发射检测适用于几乎所有的材料,并且不受检测对象的几何形状、尺寸、工作环境等因素的影响。

④ 可提供声发射信号随载荷、时间、温度等外部变量变化的动态信号,从而预防由未知不连续缺陷引起的系统灾难性失效,并确定系统的最高工作载荷,特别适用于过程监控以及早期或临近破坏的预报。

⑤ 声发射检测是一种被动式检测。声发射信号能量来自被检测对象本身,因此,检测过程不会对设备的正常工作造成影响,特别适用于在用设备的定期检验,可以缩短检验的停产时间甚至不需要停产。

声发射检测技术的缺点也很明显:由于声发射检测到的是电信号,根据这些电信号来解释材料结构内部的损伤往往比较复杂,要求检测人员具备相应的理论知识和实践经验;另外,声发射检测技术是一种被动检测手段,检测得到的信号十分微弱,且经常伴有较强的环境噪声干

扰,从而增加了分析声发射检测结果的困难程度;声发射信号的随机性和模糊性,以及声波在材料介质中传播的复杂性,也限制了声发射检测技术的应用和发展。

1.4 声发射检测技术的应用领域

作为一种新兴的、优势明显的无损检测技术,声发射技术从诞生之时起就受到各国学者、政府部门和工业界的高度重视,并加以推广应用。目前,该技术主要应用于以下领域:

① 石油化工工业。该领域是声发射技术目前应用最成功、最普遍的领域。主要用于各种石油化工设备(如压力容器、管道、海洋石油平台)的检测和结构完整性、安全性评价以及泄漏检测等。尤其在压力容器、油罐等大型构件的在役检测方面,声发射技术已经成为最重要的检测手段之一。研究表明,声发射检测对管道泄漏具有较高的灵敏度,当传感器距泄漏源 0.85 m 时,可检测到 8×10^{-4} ml/s 的流量。若将声发射技术全面推广应用于管道泄漏检测,可将平均每年 1 000 m³/km 的泄漏量减小到 500 m³/km。

② 航空航天工业。主要用于航空器壳体和主要构件的检测与结构完整性评价、航空器材料检验和疲劳试验、机翼蒙皮下的腐蚀探测、飞机起落架的原位监测以及发动机叶片和直升机叶片的检测。我国学者曾对某型飞机机体全尺寸疲劳试验进行了长达一年的声发射跟踪监测,成功地预报了主梁螺栓孔、机翼机身连接螺栓等处疲劳裂纹的萌生和扩展。

③ 金属加工工业。主要用于机械制造过程的监测与控制、工具(如车刀、钻头)磨损和断裂的探测、焊接过程监测、振动探测等。

④ 电力工业。主要用于高压蒸汽汽包、管道和阀门的检测,汽轮机叶片的检测,汽轮机轴承运行状况的监测,以及变压器局部放电的检测等。国外已研制成功能监测 400 kV 高压设备漏电的专用声发射系统。我国广东电力试验研究所林介东等人运用声发射技术对两台 500 kV 变压器的局部放电成功地进行了检测。

⑤ 地质探测。主要用于岩石的变形和破坏监测、现代岩石力学中的微破裂过程分析、山体滑坡监测以及岩石声发射源定位等。

⑥ 材料试验。主要用于材料的性能测试、断裂试验、疲劳监测和摩擦测试,铁磁性材料的磁声发射测试,以及复合材料的性能研究等。声发射技术可检测到单根纤维的断裂及载荷的分布,从而准确地评价纤维的质量,并且能够区分复合材料层板在不同阶段(如基体开裂、纤维与树脂界面开裂及裂纹层间扩展等)的断裂特性,目前已成为研究复合材料性能的重要手段。

⑦ 交通运输业。主要用于拖车、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,车辆轴承状态监测,以及火车车轮和轴承的断裂探测。

⑧ 民用工程。主要用于楼房、桥梁、隧道、大坝的检测,以及水泥结构裂纹开裂和扩展的连续监测等。

⑨ 其他。如:煤炭行业中的安全检测,生物学上的骨骼和关节的状态监测,带压气瓶的完整性检测,核工业中核反应堆的安全监测,机械零件摩擦磨损状态监测及摩擦系数测量,发动机的状态监测,转动机械的在线过程监测, Li/MnO₂ 电池的充放电监测,硬盘的干扰探测等。

1.5 声发射技术在材料损伤检测领域的研究现状与发展趋势

作为一种有效的无损检测方法,声发射技术于20世纪60年代开始应用于材料损伤检测领域。至今,经过半个世纪的发展,其相关理论和技术日趋成熟。

目前,声发射技术在材料损伤检测领域的研究主要集中在以下两方面。

一是不断拓展声发射技术在材料损伤检测领域的应用范围。

随着声发射技术的不断完善,其在材料损伤检测领域的应用不再局限于传统金属材料,越来越多的材料尤其是新型材料(如复合材料、耐火材料)亦可用声发射技术来检测。Dmitry S Ivanov^[10]应用声发射技术检测了碳/环氧树脂基复合材料拉伸破坏状态;Surgeon M^[11]运用声发射技术对SiC/BMAS复合材料层合板在单轴拉伸作用下的损伤进行了研究,利用AE事件数、幅值、能量以及持续时间等参数,描述不同铺层的试件损伤演化模式和破坏机理;郑洁^[12]利用声发射技术对陶瓷基复合材料及树脂基复合材料的静拉伸试验进行了全程监测,分析了材料的损伤形式及其演化过程;Choi N S^[13]等人研究了短纤维增强热塑性树脂基复合材料的破坏过程的声发射特性,得出了纤维断裂、界面破坏及基体损伤声发射信号的特点;Nat Ativitavas^[14]运用声发射技术研究了纤维增强塑料拉伸断裂过程中纤维断裂的情况,取得了良好的效果;赵尧杰^[15]等人对MgO-C耐火材料受压损伤过程进行了声发射检测,并对声发射信号功率谱的质心频率和声发射能量历程图进行了分析,结果表明MgO-C耐火材料受载的主要损伤形式为基质损伤和界面损伤。

二是声发射信号分析方法的不断改进和完善,技术更加成熟。这些技术主要体现在声发射源定位技术、声发射信号滤波技术和基于声发射的材料状态表征技术。

判断声发射源位置是声发射检测的主要目的之一,声发射源位置的确定有助于对材料损伤做出准确评估。目前,声发射源定位方法主要有时差定位法和区域定位法。但是,由于声发射波在传播过程中受到反射、折射和波形转换的影响,使得准确定位声发射源存在一定困难。针对该问题,相关学者对声发射源定位方法进行了更改和不断完善,提高了定位的精度。Dilem Ozevin^[16]等人采用任意三角形定位探头阵列对航天系统的推进剂储罐进行了水压结构声发射完整性测试。Song Lin^[17]等人采用四探头平面定位法对碳纤维增强聚合物复合材料压力容器试验过程进行了声发射监测,取得了良好的效果。Jeong-Rock Kwon^[18]等人采用平面等腰三角定位法对修复后的储罐进行了水压试验,有效检测了焊接缺陷。胡平^[19]等人探讨了声发射双曲面定位法及球面定位法用于大型电力变压器中绝缘故障的监测技术。Surgeonl M^[11]等人利用一个传感器通过计算两种不同的波(扩展波、弯曲波)到达同一个传感器的时间差,对碳纤维增强聚合物的拉伸和弯曲破坏损伤进行了线性源定位。Jing Pin Jiao^[20]等人运用模态声发射理论分析了金属薄板中弹性波的传播特性,运用小波变换的幅度来决定不同的波到达同一传感器的时间差,从而对损伤破坏进行线性源定位。目前,这些方法在金属材料的声发射源定位中取得了良好的效果。但是,对于复合材料等结构复杂的材料,声发射信号传播过程复杂,外界的干扰也给信号的定位带来了麻烦,定位分析时不仅需要考虑声发射波的频率,还要考虑传播模式和干扰因素,因此相关定位技术与方法还有待进一步研究。

声发射检测主要是通过建立声发射信号特征与结构损伤的关系,并根据检测得到的声发

射信号,推断出与结构损伤相关的信息。然而,检测环境通常伴随着各种噪声,而声发射源产生的信号强度较弱,在传播过程中容易受到噪声的干扰,因此声发射仪器检测到的信号往往比较复杂,其中含有大量的干扰噪声信号。这就需要对声发射信号进行过滤处理,以获取真正的声发射信号。常用的声发射信号滤波方法有:频率滤波、幅值滤波、空间滤波等。Chandra^[21]等分析了飞机飞行过程中面临的干扰噪声类型,并在实验室条件下对不同类型的声发射信号进行了采集,运用人工神经网络对声发射信号进行了噪声分离;姜长泓^[22]采用小波变换对声发射信号进行了去噪研究,效果良好;邓艾东^[23]等针对旋转机械声发射监测中的噪声干扰,提出基于小波熵的去噪算法,通过调整阈值可以有效提高识别的正确率。Christian Grosse^[24]运用离散小波变换对声发射信号进行了七尺度分解,对信号进行了分类,并利用设置阈值去除噪声。上述各种滤波方法通常仅适用于特定的检测环境或条件,这也是目前声发射信号处理方法纷繁复杂的主要原因。因此,研究开发具有较广泛适用性甚至普遍适用性的通用声发射信号滤波方法是今后一段时间的研究重点。

进行声发射检测时,通常需要对声发射仪采集的原始信号进行必要的处理,提取信号的特征值,并运用这些特征值来表征材料的结构状态,以便对检测过程中发生的一些物理现象进行合理的解释。为此,各国学者进行了大量研究。Sasikumar^[25]等采用BP神经网络对单向碳纤维/环氧树脂拉伸失效模式进行了预测,选取声发射峰值幅值、持续时间、能量作为特征值,取得了较好的预测结果。Drummond^[26]等研究了钢索拉伸过程中的声发射信号特征,建立了声发射信号总能量与钢索直径减少比之间的关系,表明声发射能量是钢索失效最有效的鉴别器。Lee H S^[27]等应用神经网络对VVER-40压力容器封头可能的泄漏位置以及泄漏量进行了预测。Gang Qi^[28]采用小波方法对复合材料在拉伸破损过程中的声发射信号进行了多尺度分解,选用三种尺度信号作为分析对象,并运用于损伤模式识别,效果良好。Biancolini^[29]等在研究钢中疲劳裂纹形核和传播时建立了基于分形理论的声发射信号处理方法,并通过分形维-疲劳循环次数(D-N)曲线识别疲劳裂纹形核和传播导致的钢的早期失效状态。Piotrkowski^[30]等对热浸镀锌试样不同腐蚀程度获取的声发射信号进行了小波变换,采用双谱特征识别了热浸镀锌试样不同的损伤机制。由上述研究成果可以看出,针对不同声发射源机制,相应的声发射信号处理方法存在很大的差别,由此导致的材料(或结构)状态表征方法也各不相同。因此,研究有效的识别方法是今后声发射技术研究的热点之一。

第 2 章 声发射检测技术的原理

2.1 声发射的物理基础

2.1.1 声发射的产生机理

机械零件或材料受力时,在微观结构上将产生位错、滑移、变形等,并在这些部位积蓄一定的能量,当位错、滑移、变形发展到一定程度时,零件或材料将发生损伤,并以弹性波的形式释放积蓄的能量,从而产生声发射现象。这一过程可以看成弹性形变储能器中某一位置能量的局部释放,并可利用弹簧-质量块模型(如图 2-1 所示)来加以描述。

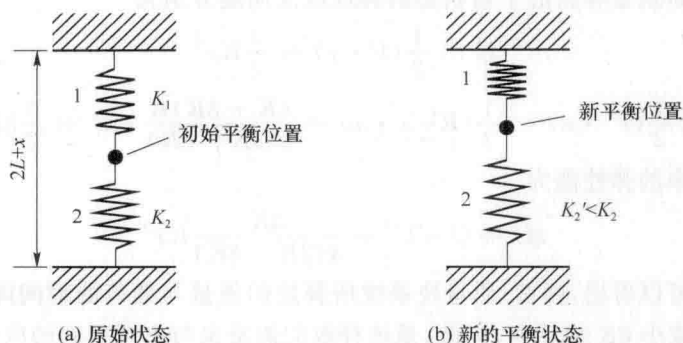


图 2-1 弹簧-质量块模型

如图 2-1(a)所示,两个长度相同(均为 L)、刚度相等(均为 K)的弹簧通过一个质量块相连接,并固定于距离为 $2L+x$ 的两个固定物上。此时,两个弹簧的伸长量均为 $x/2$,各自受到大小相等的拉力:

$$F = \frac{1}{2}Kx \quad (2-1)$$

这样,上述两个弹簧就构成了一个组合系统,其组合刚度 $K_{\Sigma} = K/2$ 。

令弹簧 2 的刚度突然减弱,降低为 $K - \delta K$,导致弹簧受到的拉力相应地降低 δF 。这时,两个弹簧所受的拉力为 $F' = F - \delta F$ 。下面计算 δF 和质量块的位移 ξ 。

在新的平衡状态下(如图 2-1(b)所示),系统中两个弹簧的组合刚度为

$$K'_{\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{1}{K - \delta K}} = \frac{K - \delta K}{2} \quad (2-2)$$

设弹簧 1、2 在新的平衡状态下的伸长量分别为 x_1 、 x_2 。由于力的传递,两个弹簧受到相同的拉力,即

$$Kx_1 = (K - \delta K)x_2 = F - \delta F \quad (2-3)$$

并且

$$F - \delta F = K'_{\Sigma} x \quad (2-4)$$

由式(2-1)和式(2-2)、式(2-4)解得

$$\delta F = \frac{\delta K}{2(2K - \delta K)} Kx \quad (2-5)$$

代入式(2-3),解得

$$x_1 = \frac{(K - \delta K)x}{2K - \delta K}, \quad x_2 = \frac{Kx}{2K - \delta K} \quad (2-6)$$

由图 2-1 可得,质量块质心平衡位置位移 $\xi = \frac{x - x_1}{2} = \frac{x_2 - x}{2}$,即

$$\xi = \frac{\delta K}{2(2K - \delta K)} x \quad (2-7)$$

从能量守恒的角度来看,上述由两个弹簧构成的组合系统的应变储能等于拉长弹簧做的功。于是,系统初始状态和新的平衡状态的弹性应变储能分别为

$$U = \frac{1}{2}(F \cdot x) = \frac{1}{4}Kx^2 \quad (2-8)$$

$$U' = \frac{1}{2}(F' \cdot x) = \frac{1}{2}(K'_{\Sigma} x \cdot x) = \frac{(K - \delta K)K}{2(2K - \delta K)} \cdot x^2 = \frac{1}{2}\delta F \cdot x \quad (2-9)$$

因此,释放出来的弹性能为

$$\delta U = U - U' = \frac{\delta K}{4(2K - \delta K)} Kx^2 \quad (2-10)$$

从式(2-10)可以看出,弹簧-质量块系统所释放的能量与载荷的瞬间降落 δF 成正比,而 δF 与刚度的瞬间减小 δK 成比例,因此,系统释放的能量也与出现事件的应变 ξ 成比例。

从这里可以得出结论,声发射的产生是材料中局部区域快速卸载使弹性能得到释放的结果。如果固体中所有的点在某一时间受到同一机械力的作用,那么这个物体将做整体运动,而不会产生弹性波,也就没有声发射现象;只有在局部作用时,物体各部分之间有相对速度变化和力的作用,才会出现弹性波,即产生声发射。

声发射源快速卸载的时间决定了声发射信号的频率。卸载时间越短,能量释放速度越快,则声发射信号的频率越高。在实际构件或材料中,能量释放的速度取决于声发射源的机构。

2.1.2 声发射源

声发射检测的目的是找出材料或构件中的声发射源,并确定声发射源的性质,进而评价构件或材料的安全性。不同的材料或构件存在不同的可能成为声发射源的机构。因此,在声发射检测中必须了解各种可能的声发射源。

声发射源涉及的范围非常广,图 2-2 中给出了各种不同的材料中可能的声发射源类型。

在实际工程中,有两类重要的声发射源:一是位错运动(微观)和塑性变形(宏观),二是裂纹的形成和扩展。

位错运动是滑移变形的元过程,当位错以足够高的速度运动时,其周围存在的局部应力场即成为声发射源。孪生也是金属材料塑性变形的一种基本方式,但孪生变形所需要的切应力

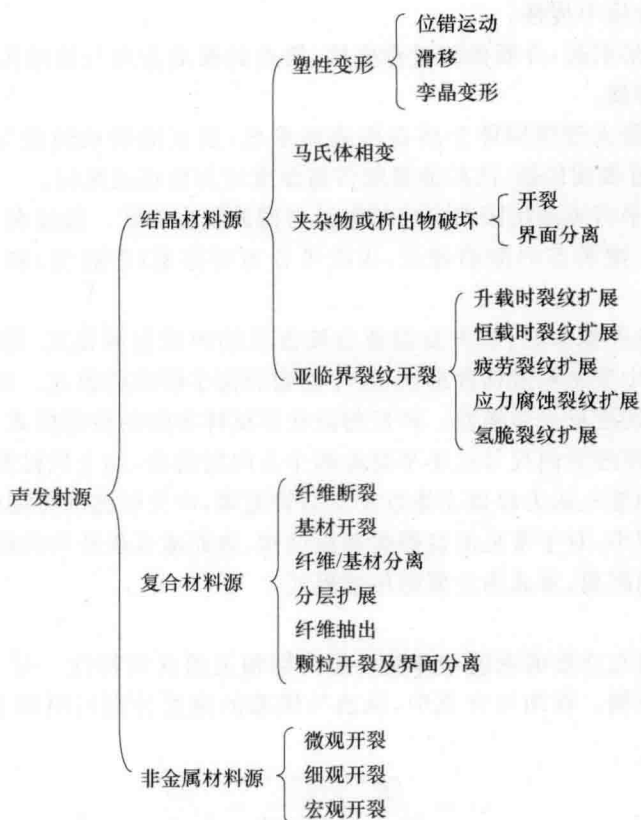


图 2-2 各种材料中的声发射源

通常比滑移变形大。滑移引起的声发射信号是连续性的，而孪生引起的声发射信号是突发性的，孪生变形会产生比滑移变形更强烈的声发射。

裂纹的形成和扩展与塑性变形有关，裂纹一旦形成，材料局部的应力集中得到卸载，产生声发射。材料断裂的三个阶段——裂纹成核、稳定扩展、失稳断裂都可以产生强烈的声发射。理论计算表明，裂纹扩展所需要的能量比裂纹形成所需要的能量高 100~1 000 倍，因而裂纹扩展的声发射强度要比裂纹形成的声发射强度大得多。当裂纹扩展到接近临界长度时，开始失稳扩展，快速断裂，这时的声发射强度更大，甚至会产生人耳能听得见的声音。

金属材料的应力腐蚀导致裂纹的形成和扩展，也是一种典型的声发射源，它不仅取决于材料本身的状态和裂纹尖端的应力场，还与材料所处的环境有关。另外，金属材料的马氏体相变、凝固时的热裂、夹杂或第二相粒子的开裂以及表面腐蚀产物的剥离等，也都是便于检测的声发射信号源。

2.1.3 声发射波的传播

1. 传播模式

根据质点的振动方向和传播方向的相互关系，声发射波在介质中的传播模式可分为纵波（又称压缩波）、横波（又称剪切波）、表面波（又称瑞利波）、板波（又称兰姆波、Lamb 波）等。

纵波：由体积变化产生，介质有压缩变形，质点的振动位移与波的传播方向平行。纵波可

在固体、液体、气体介质中传播。

横波:由剪切变形引起,介质体积没有变化,质点的振动方向与波的传播方向垂直。横波只能在固体介质中传播。

表面波:在半无限大理想固体介质自由表面形成,质点的振动轨迹呈椭圆形,沿深度为1~2个波长的固体近表面传播,波的能量随传播深度增加而迅速减弱。

板波:因物体两平行表面所限而形成的纵波与横波组合的波。板波在整个物体内部传播,质点做椭圆轨迹运动。按质点的振动特点,板波可分为对称型(膨胀波)和非对称型(弯曲波)两种。

纵波和横波是两种基本的、由声发射源直接激发的声发射波模式,而表面波和板波是纵波、横波在传播过程中受材料或构件形状、尺寸影响而衍生形成的模式。固体介质的体积变形(压缩)产生纵波;剪切变形产生横波。声发射波在厚试样表面的传播模式主要是表面波;对于工程中大量使用的、厚度方向尺寸远小于其他两个方向的薄板,如飞机机翼、隔框、复合材料舵面(平尾、垂尾和方向舵)、压力容器壳体以及压力管道等,声发射波的传播模式主要是板波。

在实际工程检测中,对于常见的容器类薄板结构,表面波或板波的传播衰减远小于纵波和横波而可传播更远的距离,常成为主要的传播模式。

2. 传播速度

波的传播速度是与介质的密度和弹性模量密切相关的材料特性。对于不同的材料,声发射波的传播速度也不同。在均匀介质中,纵波与横波的速度分别可用如下的式(2-11)和式(2-12)表示:

$$v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\sigma)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2-11)$$

$$v_S = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (2-12)$$

式中: v_L ——纵波速度;

v_S ——横波速度;

σ ——泊松比;

E ——弹性模量;

G ——切变模量;

ρ ——材料密度。

在同种材料中,不同模式的波速之间有一定的比例关系。例如,横波速度约为纵波速度的60%,表面波速度约为横波的90%。纵波、横波、表面波的速度与波的频率无关,而板波的速度则与波的频率有关,即具有频散现象,其速度介于纵波速度和横波速度之间。在实际结构中,传播速度还受到材料类型、各向异性、结构形状与尺寸、内容介质等多种因素的影响,具有一定的不确定性。

传播速度主要用于声发射源的时差定位计算,而其不确定性成为影响声发射源定位精度的主要因素。实际应用时,波速通常难以用理论方法计算得出,需要进行实际测量。对于大多数铁基金属材料容器,声发射波的典型传播速度约为3 000 m/s。在不便事先测得波速的情况下,可以将此值作为定位计算的初设波速。

3. 反射、折射与模式转换

在固体介质中,声发射源产生的声发射波同时按纵波和横波两种模式向周围传播。当这