


 DINDT

声发射检测

《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会 编

国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材

声发射检测

《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会 编

主 编 杨明纬

主 审 耿荣生



机械工业出版社

本书是国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材之一，内容包括：声发射技术概论、声发射检测物理基础、声发射源定位、声发射信号采集系统、声发射信号分析、声发射检测规程、声发射检测应用、声发射检测试验操作、声发射检测标准与规范。全书内容全面、深入浅出，既重点突出又注重实用。

本书可供声发射检测Ⅱ、Ⅲ级人员培训班师生使用，也可供从事无损检测的技术人员及大专院校师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

声发射检测/《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会编. —北京：机械工业出版社，2005.1
国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材
ISBN 7-111-15772-9

I. 声... II. 国... III. 声发射检验—技术培训—教材
IV. TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2004）第 128623 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：吕德齐 武江 责任印制：石冉

三河市宏达印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16 · 8 印张 · 182 字

0 001 - 4 000 册

定价：18.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话（010）68993821、88379646

68326294、68320718

封面无防伪标均为盗版

编审委员会

主任：马恒儒

副主任：陶春虎 郑 鹏

成 员：（以姓氏笔画为序）

王自明 王任达 王跃辉 史亦韦 叶云长 叶代平 付 洋
任学冬 吴东流 吴孝俭 何双起 苏李广 杨明纬 林猷文
郑世才 徐可北 钱其林 郭广平 章引平

审定委员会

主任：吴伟仁

副主任：徐思伟 耿荣生

成 员：（以姓氏笔画为序）

于 岗 王海岭 王晓雷 王 琳 史正乐 任吉林 朱宏斌
朱春元 孙殿寿 刘战捷 吕 杰 花家宏 宋志哲 张京麒
张 鹏 李劲松 李荣生 庞海涛 范岳明 赵起良 柯 松
宫润理 徐国珍 徐春广 倪培君 贾慧明 景文信

编委会办公室

主任：郭广平

成 员：（以姓氏笔画为序）

任学冬 朱军辉 李劲松 苏李广 徐可北 钱其林

序 言

无损检测技术是产品质量控制中不可缺少的基础技术，随着产品复杂程度增加和对安全性保证的严格要求，无损检测技术在产品质量控制中发挥着越来越重要的作用，已成为保证军工产品质量的有力手段。无损检测应用的正确性和有效性一方面取决于所采用的技术和设备的水平，另一方面在很大程度上取决于无损检测人员的经验和能力。无损检测人员的资格鉴定是指对报考人员正确履行特定级别无损检测任务所需知识、技能、培训和实践经历所作的验证；认证则是对报考人员能胜任某种无损检测方法的某一等级资格的批准并作出书面证明的程序。对无损检测人员进行资格鉴定是国际通行做法。美国、欧洲等发达国家都建立了有关无损检测人员资格鉴定与认证标准，国际标准化组织 1992 年 5 月制定了国际标准 ISO 9712，规定了人员取得等级资格与所能从事工作的对应关系，通过人员资格鉴定与认证对其能力进行确认。无损检测人员资格鉴定与认证对确保产品质量的重要性日益突出。

改革开放以来，船舶、核能、航天、航空、兵器、化工、煤炭、冶金、铁道等行业先后开展了无损检测人员资格鉴定与认证工作，对提高无损检测人员素质，确保产品质量发挥了重要作用。随着社会主义市场经济体制不断完善，国防科技工业管理体制逐步深化，技术进步日新月异，特别是高新技术武器装备科研生产对质量工作提出的新的更高要求，现有的无损检测人员资格鉴定与认证工作已经不能适应形势发展的要求。未来十年是国防科技工业实现跨越发展的重要时期，做好无损检测人员资格鉴定与认证工作对确保高新技术武器装备研制生产的质量具有极为重要的意义。

为进一步提高国防科技工业无损检测技术保障水平和能力，“国防科工委关于加强国防科技工业技术基础工作的若干意见”提出了要研究并建立与国际惯例接轨，适应新时期发展需要的国防科技工业合格评定制度。2002 年国防科技工业无损检测人员的资格鉴定与认证工作全面启动，各项工作稳步推进，2002 年 11 月正式颁布 GJB 9712—2002《无损检测人员的资格鉴定与认证》；2003 年 8 月出版了《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试大纲》；2003 年 9 月国防科工委批准成立国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证委员会，授权其统一管理和实施承担武器装备科研生产的无损检测人员资格鉴定与认证工作，标志着国防科技工业合格评定制度的建立开始迈出了重要的第一步。鉴于国内尚无一套能满足 GJB 9712 和《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试大纲》要求的教材，为了做好国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考核工作，国防科工委科技与质量司组织有关专家编写了这套国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材。

本套教材比较全面、系统地体现了 GJB 9712—2002《无损检测人员的资格鉴定与

认证》和《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试大纲》的要求，包括了对无损检测 I、II、III 级人员的培训内容，以 II 级要求内容为主体，注重体现 III 级所要求的深度和广度，强调实际应用；同时，教材体现了国防科技工业无损检测工作的特色，增加了典型应用实例、典型产品及事故案例的介绍，并力图反映无损检测专业技术发展的最新动态。全套教材共 11 册，包括《无损检测综合知识》、《涡流检测》、《渗透检测》、《磁粉检测》、《射线检测》、《超声检测》、《声发射检测》、《计算机层析成像检测》、《全息和散斑检测》、《泄漏检测》和《目视检测》。

由于无损检测技术涉及的基础科学知识及应用领域十分广泛，而且计算机、电子、信息等新技术在无损检测中的应用发展十分迅速，教材编写难度较大。加之成书比较仓促，难免存在疏漏和不足之处，恳请培训教师和学员以及读者不吝指正。愿本套教材能够为国防科技工业无损检测人员水平的提高和促进无损检测专业的发展起到积极的推动作用。

本套教材参考了国内同类教材和培训资料，编写过程中得到许多国内同行专家的指导和支持，谨此致谢。

《国防科技工业无损检测人员
资格鉴定与认证培训教材》编审委员会
2004 年 3 月

前 言

根据国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材的编写要求，我们承担了《声发射检测》教材的编写，并贯彻以下编制原则：一是紧密围绕考试大纲，强调解决实际问题；二是突出体现国防科技工业无损检测工作特色，适当增加典型应用及案例的介绍；三是教材内容编排应按照基础理论、相关标准、编制检测规程和实验与操作四大部分安排章节。

《声发射检测》教材共设9章。第1、2、3章由杨明纬编写，第4、5、6章由马云中编写，第7、8、9章由刘哲军编写，全书由杨明纬整理定稿，耿荣生担任主审，刘时风参加了审查。

本教材主要特点，一是在基本理论方面，内容全面、深入浅出，既重点突出又方便实用。二是在应用方面，结合国防科技工业声发射检测的要求，选取了一些具有一定国防科技工业应用特点的工作，介绍了它们的声发射检测技术要点。教材目录中带“*”的章节仅适用于III级人员。

本教材在编写中，除了参考国内外公开出版的一些文献外，还特别参考了金周庚主编的航空、航天工业内部培训教材，编写组对有关作者表示衷心感谢。

限于编者水平，错误和疏漏恐在所难免，热诚欢迎培训教师、培训学员、读者提出宝贵意见。

《声发射检测》编写组

2004年7月

目 录

序言
前言

第1章 声发射技术概论 1	4.1.1 单通道声发射仪 22
1.1 声发射技术概念 1	4.1.2 多通道声发射系统 23
1.2 声发射技术的发展史 2	4.1.3 全数字式多通道声发射系统 ... 24
1.3 声发射技术的特点 4	4.2 声发射检测仪器的组成 27
复习题 6	4.3 声发射传感器 27
第2章 声发射检测物理基础 7	4.3.1 传感器工作原理 27
2.1 声发射的产生 7	4.3.2 类型与选择..... 28
2.2 声发射波的传播 9	4.3.3 结构形式..... 30
2.2.1 波的传播模式 9	4.3.4 传感器灵敏度校准方法 31
2.2.2 波的传播速度 11	4.4 电缆 32
2.2.3 波的反射、折射与模式转换 12	4.5 信号调节 33
2.2.4 衰减..... 13	4.6 时差测量 34
2.3 影响声发射特性的因素 14	4.7 声发射模拟源 35
2.4 凯塞效应和费利西蒂效应 15	4.8 检测系统选择 36
2.4.1 凯塞效应..... 15	4.9 国内外先进声发射仪器简介 37
2.4.2 费利西蒂效应和费利西蒂比 15	复习题..... 40
复习题 16	第5章 声发射信号分析 41
第3章 声发射源定位 18	5.1 声发射信号的类型 41
3.1 源定位类型 18	5.2 信号特性参数 42
3.2 区域定位 18	5.3 信号波形特征 44
3.3 时差定位 19	5.4 数据显示 46
3.3.1 一维(线)定位..... 19	5.5 声发射噪声的排除 48
3.3.2 二维(平面)定位..... 19	5.6 现代信号处理方法 49
3.3.3 柱形、球面的定位..... 20	5.6.1 频谱分析方法..... 49
3.3.4 3-D空间定位..... 20	*5.6.2 神经网络分析方法 49
3.3.5 时差定位的局限性..... 21	*5.6.3 小波分析方法 50
复习题 21	复习题..... 51
第4章 声发射信号采集系统 22	第6章 声发射检测规程 52
4.1 声发射检测仪器的类型 22	6.1 声发射检测程序 52
	6.2 设置与校准 53

6.2.1 检测门槛设置	53	7.3.3 声-超声技术在胶结结构检测中 的应用	89
6.2.2 定时参数设置	53	7.4 其他应用	90
6.2.3 通道灵敏度调整	55	7.4.1 声发射泄漏检测	90
6.2.4 传感器间距	55	7.4.2 燃速测定	93
6.2.5 源定位校准	56	7.4.3 放电检测	93
6.3 传感器安装	56	7.4.4 焊接质量检测	95
6.4 加载程序	57	复习题	96
6.5 检测方法	58	第 8 章 声发射检测试验操作	98
6.6 缺陷有害度评价及分类方法	59	8.1 声发射检测试验的准备	98
6.7 数据解释与评价	63	8.2 区域定位试验	100
6.8 安全防护	65	8.3 两通道线定位试验	101
复习题	66	8.4 四通道平面定位试验	103
第 7 章 声发射检测应用	67	8.5 复合材料平板试件声发射 衰减测量	105
7.1 材料表征应用	67	8.6 声发射传感器相对校准试验	106
7.1.1 塑性变形的声发射	67	8.7 声发射检测工艺卡样式	108
*7.1.2 检测马氏体相变	69	复习题	109
7.1.3 评价表面渗层的脆性	70	第 9 章 声发射检测标准与规范	110
7.1.4 断裂韧性试验的声发射 分析	70	9.1 GB/T 12604.4—1990《无损检测术语 声发射检测》	110
7.1.5 检测疲劳裂纹的扩展	71	9.2 GJB 2044—1994《钛合金压力 容器声发射检测方法》	110
7.1.6 检测应力腐蚀和氢脆裂纹	72	9.3 QJ 2914—1997《复合材料结构件 声发射检测方法》	113
7.1.7 复合材料损伤和断裂过程 分析	73	9.4 JB/T 7667—1995《在役压力 容器声发射检测评定方法》	114
7.1.8 岩石力学的应用	75	9.5 其他国内外标准方法目录	114
7.2 结构件应用	75	复习题	115
7.2.1 适用范围	75	参考文献	117
7.2.2 金属结构件应用	76		
7.2.3 复合材料构件应用	83		
7.3 声-超声检测技术应用	87		
7.3.1 声-超声检测原理	87		
7.3.2 检测仪器及方法	88		

第 1 章 声发射技术概论

1.1 声发射技术概念

声发射 (AE) 是指材料局部因能量的快速释放而发出瞬态弹性波的现象。声发射也称为应力波发射。声发射是一种常见的物理现象, 大多数材料变形和断裂时有声发射发生, 如果释放的应变能足够大, 就产生可以听得见的声音, 如在耳边弯曲锡片, 就可以听见劈啪声, 这是由于锡受力产生孪晶变形的发声。大多数金属材料塑性变形和断裂时也有声发射发生。

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。声发射技术是一种新兴的动态无损检测技术, 涉及声发射源、波的传播、声电转换、信号放大、信号处理、数据显示与记录、解释与评定等基本概念, 基本原理如图 1-1 所示。

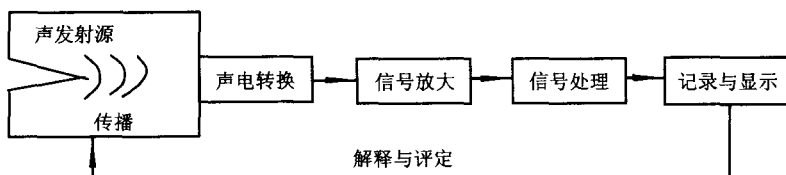


图1-1 声发射技术基本原理

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, 通常称为传统意义上或典型的声发射源。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, 也划到声发射源范畴, 称为其他声发射源或二次声发射源。

声发射波的频率范围很宽, 从次声频、声频直到超声频, 可包括数 Hz 到数 MHz; 其幅度从微观的位错运动到大规模宏观断裂, 在很大的范围内变化, 按传感器的输出可包括数 μV 到数百 mV, 不过, 多数为只能用高灵敏传感器才能探测到的微弱振动。用最灵敏的传感器, 可探测到约为 10^{-11}mm 表面振动。

声发射源发出的弹性波, 经介质传播到达被检物体表面, 引起表面的机械振动。经声发射传感器将表面的瞬态位移转换成电信号。声发射信号再经放大、处理后, 形成其特性参数, 并被记录与显示。最后, 经数据的解释, 评定出声发射源的特性。

声发射检测的主要目标是: ①确定声发射源的部位; ②分析声发射源的性质; ③确定声发射发生的时间或载荷; ④评定声发射源的严重性。一般而言, 对超标声发射源, 要用其他无损检测方法进行局部复检, 以精确确定缺陷的性质与大小。

近年来，声发射检测方法有很大发展，它在无损检测技术中占有重要地位。它必须有外部条件的作用，例如力、电磁、温度等因素的作用，使材料或构件发声；另一方面，由于这些因素的作用，使材料内部结构发生变化，如晶体结构的变化、滑移变形、裂纹扩展等，发声是在材料内部结构变化过程中产生的，也只有内部结构变化，才能引起能量释放，才能发声。因此，声发射检测是一种动态无损检测方法，即：使构件或材料的内部结构、缺陷或潜在缺陷处于运动变化的过程中进行无损检测。裂纹等缺陷在检测中主动参与了检测过程。如果裂纹等缺陷处于静止状态，没有变化和扩展，就没有声发射发生，也就不能实现声发射检测。声发射检测的这一特点使其区别超声、X射线、涡流等其他无损检测方法。

由于声发射检测是一种动态无损检测方法，而且，声发射信号来自缺陷本身，因此，用声发射法可以判断缺陷的严重性。一个同样大小、同样性质的缺陷，当它所处的位置和所受的应力状态不同时，对结构的损伤程度也不同，所以它的声发射特征也有差别。明确了来自缺陷的声发射信号，就可以长期连续地监视缺陷的安全性，这是其他无损检测方法难以实现的。

除极少数材料外，金属和非金属材料在一定条件下都有声发射发生，所以，声发射检测几乎不受材料的限制。

由于材料变形、裂纹扩展等的不可逆性质，声发射也有不可逆性。因此，要进行声发射检测，必须知道材料的受力历史，或者在构件第一次受力时进行检测。

利用多通道声发射装置，可以确定缺陷所在位置。声发射检测的这一特点对大型结构如锅炉等检测特别方便。在利用声发射技术检出缺陷后，还可以用其它无损检测方法加以验证。

声发射检测到的是一些电信号，根据这些电信号来解释结构内部的缺陷变化往往比较复杂，需要丰富的知识和其它试验手段的配合。另一方面，声发射检测环境常常有强的噪声干扰，虽然声发射技术中已有多种排除噪声的方法，但在某些情况下还会使声发射技术的应用受到限制。

把声发射技术用于无损检测，自然会涉及材料中声发射的来源问题，也就是材料在外部应力作用下，为什么会产生声发射，有哪些机构和过程产生声发射。这是一个很复杂的问题，因为，至今还不能直接测到从声发射源发出的原始声发射信号，这就给声发射源的研究带来一定困难。但是，在应用声发射技术进行无损检测时，其目的就是要找出声发射源的位置，了解它的性质，判断它的危险性。正是由于声发射源的研究在声发射技术应用中的重要性，促使许多研究者不得不去研究声发射源问题，以便为声发射技术用于无损检测建立理论基础。

1.2 声发射技术的发展史

现代声发射技术起始于凯塞（Kaiser）20世纪50年代初在德国所做的研究工作。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。凯塞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”。现在人们称声发射的这种不可逆现象为“凯塞效应”。凯塞同时提出了连续型和突发型声发射信号的概念。

20世纪50年代末和60年代,美国和日本许多声发射工作者在实验室中做了大量工作,研究了各种材料声发射源的物理机制,并初步应用于工程材料的无损检测领域。美国 Dunegan 对声发射技术的研究做过开拓性的工作,在他的研究工作之前,声发射检测多数都在声频范围进行,在排除噪声干扰方面遇到了困难。Dunegan 等人把仪器测试频率提高到 100kHz~1MHz,这是声发射实验技术的重大进展,这种进展为声发射技术从实验室走向在生产现场用于监视大型构件的结构完整性创造了条件。1964年,美国通用动力公司把声发射技术用于北极星导弹壳体的水压试验,这是声发射技术用于评价大型构件的结构完整性的第一个例子,它标志着声发射技术开始进入生产现场应用的新阶段。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,现代声发射仪器的研制成功为声发射技术从实验室走向在生产现场用于监视大型构件的结构完整性创造了条件。

随着现代声发射仪器的出现,整个20世纪70年代和80年代初人们从声发射源机制、波的传播到声发射信号分析方面开展了广泛和系统的深入研究工作。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。

20世纪80年代初,美国 PAC 公司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高级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20世纪80年代声发射技术进行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,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。

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

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。随后中科院沈阳金属研究所、航空部621所、机械部合肥通用机械研究所、航天部44所、航天部703所、上海交通大学、武汉大学等一些科研院所和大学开展了金属和复合材料的声发射特性研究。20世纪80年代初航空部621所、623所、成都飞机公司、航天四院等先后引进美国 Dunegan 公司1032D三十二通道的源定位声发射检测与信号处理分析系统用于飞机和压力容器的检测。20世纪80年代中期劳动部锅炉压力容器检测研究中心从美国 PAC 公司引进的 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。随后,冶金部武汉安全环保研究院、大庆石油学院、航天部44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、复合材料和岩石的检测和应用。20世纪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。20世纪90年代中期空军第一研究所和航天部703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Mistras2001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,广州锅炉所购买了声华科技有限公司40通道全波形声发射检测系统。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得到了广泛的应用。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。

在声发射仪器的研制和生产方面,我国的起步并不算太晚。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20世纪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,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)技术基础上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(DSP)技术基础上的全数字化多通道声发射检测分析系统。在仪器制造和销售方面,国内主要有沈阳电子所、科海恒生公司、声华公司等。沈阳电子所主要制造和销售2~8通道的多通道声发射仪,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,声华公司制造和销售2~56通道WAE2000系列的数字化全波形多通道声发射仪。另外一些单位针对具体设备的工程检测,基于声发射技术的原理研制出具有单一功能的专用检测仪器,这些仪器主要包括轴承故障检测仪、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(声华公司)、固体推进剂药条声发射燃速测试仪(航天四院43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(北京理工大学)等。

1.3 声发射技术的特点

声发射技术与其他无损检测方法相比,具有两个基本差别:①检测动态缺陷,如缺陷扩展,而不是检测静态缺陷;②缺陷本身发出缺陷信息,而不是用外部输入对缺陷进行扫查。这种差别导致该技术具有以下优点和局限性。

声发射检测技术的主要优点有:

1) 可检测对结构安全更为有害的活动性缺陷。由于提供缺陷在应力作用下的动态信息,适于评价缺陷对结构的实际有害程度。

2) 对大型构件, 可提供整体或范围快速检测。由于不必进行繁杂的扫查操作, 而只要布置好足够数量的传感器, 经一次加载或试验过程, 就可以确定缺陷的部位, 从而易于提高检测效率。

3) 可提供缺陷随载荷、时间、温度等外变量而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。

4) 由于被检件的接近要求不高, 而适于其他方法难于或不能接近环境下的检测, 如高低温、核辐射、易燃、易爆及极毒等环境。

5) 由于对构件的几何形状不敏感, 而适于检测其他方法受到限制的形状复杂的构件。声发射检测技术的主要局限性有:

1) 声发射特性对材料甚为敏感, 又易受到机电噪声的干扰, 因而, 对数据的正确解释要有更为丰富的数据库和现场检测经验。

2) 声发射检测, 一般需要适当的加载程序。多数情况下, 可利用现成的加载条件, 但有时还需要特殊准备。

3) 由于声发射的不可逆性, 实验过程的声发射信号不可能通过多次加载重复获得, 因此, 每次检测过程的信号获取是非常宝贵的, 不可因人为疏忽而造成宝贵数据的丢失。

4) 声发射检测所发现缺陷的定性定量, 仍需依赖于其他无损检测方法。

由于上述特点, 现阶段声发射技术主要用于: ①其他方法难以或不能适用的对象与环境; ②重要构件的综合评价; ③与安全性和经济性关系重大的对象。因此, 声发射技术不是替代传统的方法, 而是一种新的补充手段。

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, 常压贮罐底部、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) 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、大坝的检测, 水泥结构裂纹开裂和扩展的连续监视等。

5) 航天和航空工业: 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, 固体推进剂药条燃速测试等。

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, 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, 卡车和火车滚子轴承和轴连轴承的状态监测, 火车车轮和轴承的断裂探测。

8) 其他: 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, 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，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，骨关节状况的监测。

复 习 题

1. 什么是声发射、声发射事件、声发射源？
2. 什么是典型声发射源？什么是其他声发射源？
3. 简述声发射波的频率范围和传感器输出幅度范围。
4. 简述声发射检测的基本原理。
5. 列出声发射检测的主要目标。
6. 声发射技术与其他无损检测方法的两个主要差别是什么？
7. 列出声发射检测的主要优点和局限性。

第2章 声发射检测物理基础

2.1 声发射的产生

引发声发射的材料局部变化称为声发射事件，而声发射源，是指声发射事件的物理源点或发生声发射波的机制源。在工程材料中，有许多种损伤与破坏机制可产生声发射源，概括起来如图 2-1 所示。

可以看出，声发射源涉及的范围非常广泛，这里我们着重讨论三种声发射源。

1. 塑性变形

一切固体在受到外力作用时，体积和形状都要发生变化，我们把这两种变化统称为形变。单位长度和单位体积的形变叫应变，而单位面积上所受的力叫应力。对于绝大多数的变形固体，当外力不超过各自的一定范围时，它去除外力后，将完全恢复（或者说几乎完全恢复）原有形状和尺寸，这种性质称为弹性。去除外力后能够消失的变形称为弹性变形。但当外力过大时，在外力去除后，变形只能部分地消失而残留一部分不能消失的变形，材料的这种性质称为塑性。去除外力后不能消失而残余下来的变形称为塑性变形。

晶体材料的塑性变形是形成声发射源的一个重要机制之一，当许多金属材料在拉伸变形时，可以看到在屈服点附近出现声发射计数率高峰，在进入加硬化阶段，声发射计数率急剧减少，其典型结果如图 2-2 所示。图中的虚线是计算出来的塑性变形曲线，与声发射计数率曲线符合得相当好。

塑性变形包括位错运动、滑移、孪晶变形。

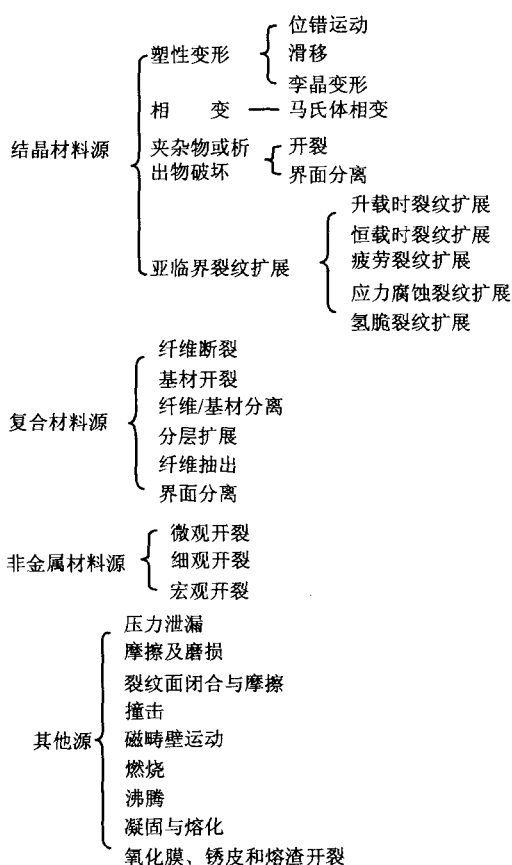


图2-1 声发射源

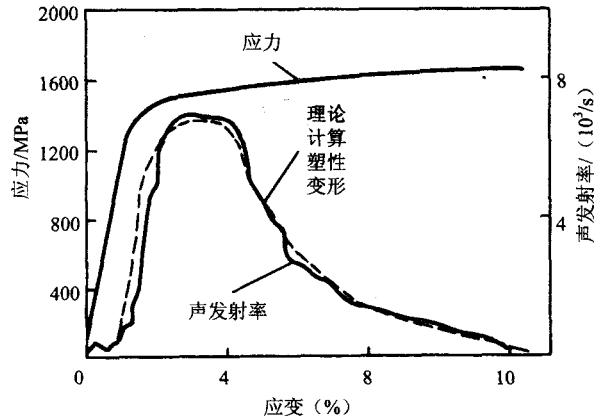


图2-2 7075-T₆铝合金拉伸试样的声发射与理论计算结果的比较

2. 裂纹的形成和扩展

裂纹的形成和扩展也是一种主要的声发射源，尤其对无损检测更为重要。裂纹的形成和扩展与材料的塑性变形有关，一旦裂纹形成，材料局部地区的应力集中得到卸载，产生声发射。

材料的断裂过程大体上可分为三个阶段：①裂纹成核；②裂纹扩展；③最终断裂。这三个阶段都可以成为强烈的声发射源。

关于裂纹的形成已经提出过不少模型，如位错塞积理论、位错反应理论和位错消毁理论等，这些模型都得到一部分实验事实的支持。

在微观裂纹扩展成为宏观裂纹之前，需要经过裂纹的慢扩展阶段。理论计算表明，裂纹扩展所需要的能量比裂纹形成需要的能量约大 100 倍到 1000 倍。裂纹扩展是间断进行的，大多数金属都具有一定的塑性，裂纹向前扩展一步，将积蓄的能量释放出来，裂纹尖端区域卸载。这样，裂纹扩展产生的声发射很可能比裂纹形成的声发射还大得多。当裂纹扩展到接近临界裂纹长度时，就开始失稳扩展，成为快速断裂。这时产生的声发射强度更大，如断裂韧性试验时，产生人耳可以听得见的声音。

3. 纤维增强复合材料的声发射源

高强度、高模量、脆性的增强剂（纤维）均匀地与低强度、低模量、韧性的基体相结合而组成的纤维增强型复合材料，由于它能发挥材料的综合优良性能，以其高的强度和比模量以及良好的抗疲劳性和成形工艺性而在航空航天工业中得了大量应用，并在某些关键部位代替了金属材料。

但是，复合材料通常是以交错叠层的形式构成整体来承受使用载荷的。高的比强度和比模量是用复杂而高价的三维编织技术来达到的，从而构成了复合材料的各向异性。

纤维增强复合材料在受力并产生破坏的过程中会出现大量的声发射，其强度和数量都比金属材料的声发射大得多。

纤维增强复合材料的声发射源包括纤维断裂、基材开裂、纤维/基材分离、分层扩展、纤维抽出及界面分离。