

无损检测技术应用丛书

○ 宋天民 主编

无损检测新技术

WUSUN JIANCE XINJISHU

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

无损检测技术应用丛书

无损检测新技术

宋天民 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书是“无损检测技术应用丛书”之一。本书系统介绍了声发射、声振、红外、激光、微波、漏磁、磁记忆等无损检测新技术的原理、仪器设备、工艺规范及应用,对其他无损检测新技术也作了相应介绍。

本书可作为企业无损检测人员系统培训用书,也可作为高等院校无损检测专业及相关专业的参考教材,还可作为从事无损检测研究、工程应用的技术人员及相关质检人员、安全监察人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

无损检测新技术 / 宋天民主编. —北京: 中国石化出版社, 2012. 1
(无损检测技术应用丛书)
ISBN 978 - 7 - 5114 - 1160 - 0

I. ①无… II. ①宋… III. ①无损检验 IV. ①TG115. 28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 229139 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com.cn

北京宏伟双华印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 19.25 印张 480 千字

2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

定价: 56.00 元

前 言

本书是“无损检测技术应用丛书”之一。无损检测技术是在现代科学基础上产生和发展起来的检测技术，它借助先进的仪器和设备，在不损坏、不改变被检对象的外观状态和理化状态情况下，对被检对象的内部结构和表面状态等进行检查和检测，借以评价它们的连续性、完整性、安全性以及其他性能。作为一种有效的检测手段，无损检测在我国已广泛应用于经济建设的各个领域，尤其在特种设备的制造检测和在用检测方面，显得特别重要。本书着重介绍了无损检测新技术，全书共分8章：第1章声发射检测；第2章声振检测；第3章激光检测；第4章微波检测；第5章红外检测；第6章漏磁检测；第7章磁记忆检测；第8章其他检测技术。本书不包括射线检测新技术和超声检测新技术等内容，这两部分内容分别在《射线检测》和《超声检测》分册中介绍。

本书对每种检测技术，重点介绍检测原理、仪器设备、工艺规范和应用，突出介绍各种检测新技术在石油化工设备检测中的应用。本书的特点主要有以下三点：

1. 突出一个“新”字，力求把国内外无损检测常用新技术介绍全。
2. 立足于实用，力求使读者一看就懂，读完能用。
3. 着力介绍应用，突出介绍各种检测技术在石化企业中的应用。

本书由辽宁石油化工大学编写。参加本书编写的人员有宋天民、张国福、苏辉、尹成江、管建军、王国庆、闫萍、孔祥军、张瑞十、宋尔明，全书由宋天民统稿。

本书在编写过程中，研究生姜吉兴、孙久冰和刘磊负责书稿的录入和复印等工作，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中肯定会有错误和不当之处，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第1章 声发射检测	(1)
1.1 概述	(1)
1.1.1 声发射	(1)
1.1.2 声发射检测原理	(2)
1.1.3 声发射检测的特点	(2)
1.2 声发射检测方法	(3)
1.2.1 声发射信号特征	(3)
1.2.2 声发射信号参数	(4)
1.2.3 声发射信号处理	(6)
1.2.4 声发射检测程序	(8)
1.3 声发射检测仪器	(10)
1.3.1 模拟式声发射仪	(10)
1.3.2 数字式声发射仪	(12)
1.4 缺陷的判定与评价	(14)
1.4.1 缺陷位置确定	(14)
1.4.2 缺陷评价	(14)
1.4.3 压力容器缺陷检测与评价	(17)
1.4.4 声发射检测可靠性评价	(18)
1.5 声发射检测应用	(18)
1.5.1 压力容器的检测	(18)
1.5.2 焊接质量的检测	(24)
1.5.3 材料研究中的应用	(27)
1.5.4 评价构件的完整性	(30)
1.5.5 核反应堆检测	(33)
第2章 声振检测	(37)
2.1 概述	(37)
2.1.1 声振检测的技术基础	(37)
2.1.2 声振检测的分类	(37)
2.2 整体声振检测	(38)
2.2.1 整体人工敲击检测	(38)
2.2.2 单点激振单点测量	(38)
2.2.3 多点激振多点测量	(40)
2.3 局部声振检测	(48)
2.3.1 局部人工敲击检测	(48)
2.3.2 声阻法检测	(51)

2.3.3	声谐振检测	(58)
2.3.4	定距发送/接收检测	(67)
2.3.5	综合声学检测技术	(69)
2.3.6	局部声振检测的应用	(72)
第3章	激光检测	(74)
3.1	概述	(74)
3.1.1	激光检测的特点	(74)
3.1.2	激光检测的应用范围	(75)
3.2	激光检测原理	(76)
3.2.1	全息照相	(76)
3.2.2	数学定量分析	(78)
3.3	激光全息检测技术	(80)
3.3.1	全息检测技术的特点	(80)
3.3.2	实时全息干涉计量技术	(81)
3.3.3	双曝光全息干涉计量技术	(81)
3.3.4	时间平均全息干涉计量技术	(82)
3.3.5	夹层全息干涉计量技术	(83)
3.3.6	激光检测加载方法	(83)
3.3.7	激光检测方法	(86)
3.4	激光检测设备	(88)
3.4.1	激光器	(88)
3.4.2	防振工作台	(91)
3.4.3	全息照相光学元件	(92)
3.4.4	记录与再现像读出系统	(93)
3.4.5	全息照相系统	(97)
3.5	激光检测的应用	(98)
3.5.1	夹芯结构脱黏检测	(98)
3.5.2	叠层结构脱黏检测	(100)
3.5.3	金属工件裂纹检测	(101)
3.5.4	涡轮与螺旋桨叶片的振动分析	(103)
3.5.5	压力容器检测	(104)
3.5.6	应力腐蚀裂纹检测	(105)
3.5.7	复合材料检测	(107)
3.5.8	用全息照相画等高线	(108)
3.6	激光散斑干涉计量技术	(112)
3.6.1	散斑现象	(112)
3.6.2	散斑干涉原理	(112)
3.6.3	散斑干涉定量分析	(113)
3.6.4	散斑干涉技术的应用	(114)
第4章	微波检测	(118)

4.1	概述	(118)
4.1.1	微波	(118)
4.1.2	微波检测特点	(120)
4.1.3	微波的物理特性	(120)
4.2	微波检测原理	(121)
4.2.1	微波检测的物理基础	(121)
4.2.2	反射与折射	(123)
4.2.3	吸收与色散	(124)
4.2.4	驻波	(124)
4.2.5	散射	(124)
4.2.6	各种检测原理比较	(125)
4.3	微波检测技术	(126)
4.3.1	穿透技术	(126)
4.3.2	反射技术	(127)
4.3.3	驻波技术	(129)
4.4	微波检测设备	(129)
4.4.1	微波检测器件	(130)
4.4.2	测厚仪	(134)
4.4.3	探伤仪	(136)
4.5	微波检测的应用	(142)
4.5.1	金属表面裂纹检测	(142)
4.5.2	介电材料化学成分检测	(143)
4.5.3	微波湿度检测	(143)
4.5.4	金属应力腐蚀检测	(143)
4.5.5	厚复合材料的无损评定	(144)
4.6	微波涡流检测技术	(147)
4.7	微波全息照相技术	(151)
第5章	红外检测	(154)
5.1	概述	(154)
5.1.1	红外检测原理	(154)
5.1.2	红外检测方法	(154)
5.1.3	红外检测要求	(155)
5.2	红外诊断技术	(157)
5.2.1	红外诊断技术原理	(157)
5.2.2	红外诊断技术构成	(158)
5.2.3	红外简易诊断技术	(159)
5.2.4	红外精密诊断技术	(160)
5.2.5	红外诊断方法	(160)
5.2.6	影响红外诊断的因素	(161)
5.3	红外检测仪器	(165)

5.3.1	红外点温仪	(166)
5.3.2	红外行扫仪	(172)
5.3.3	红外热电视	(174)
5.3.4	红外热像仪	(177)
5.4	红外检测的应用	(182)
5.4.1	在石化设备中的应用	(182)
5.4.2	在电力设备中的应用	(188)
5.4.3	在冶金设备中的应用	(191)
第6章	漏磁检测	(195)
6.1	漏磁检测的磁化	(195)
6.1.1	磁化方式分类	(195)
6.1.2	磁化强度选择	(195)
6.1.3	永磁励磁磁路	(197)
6.1.4	线圈励磁磁路	(197)
6.2	漏磁检测信号处理	(199)
6.2.1	漏磁场检测信号处理	(199)
6.2.2	漏磁信号的时空域采样	(201)
6.2.3	数字信号处理技术	(202)
6.2.4	磁电信号的定量解释	(204)
6.3	漏磁检测探头	(209)
6.3.1	漏磁检测基本要素	(209)
6.3.2	漏磁场测量原理	(209)
6.3.3	漏磁场测量方法	(210)
6.3.4	漏磁检测探头设计	(211)
6.4	漏磁检测应用	(216)
6.4.1	储罐底板检测	(216)
6.4.2	钢管、钢棒检测	(218)
6.4.3	钢丝、钢丝绳、钢绞线检测	(222)
6.4.4	高压输电线检测	(224)
第7章	磁记忆检测	(227)
7.1	概述	(227)
7.1.1	铁磁物质的基本特性	(228)
7.1.2	铁磁物质的技术磁化	(233)
7.2	磁记忆检测原理	(236)
7.2.1	磁致伸缩	(236)
7.2.2	磁机械效应	(237)
7.2.3	磁记忆检测原理	(239)
7.3	磁记忆检测仪器	(240)
7.3.1	传感器	(240)
7.3.2	磁记忆检测仪器的计算机系统	(246)

7.4 磁记忆检测应用	(249)
7.4.1 管道的磁记忆检测	(249)
7.4.2 汽轮机叶片的磁记忆检测	(252)
7.4.3 高压汽缸的磁记忆检测	(253)
7.4.4 航空构件的磁记忆检测	(254)
7.4.5 对接焊缝的磁记忆检测	(255)
第8章 其他检测技术	(257)
8.1 噪声检测	(257)
8.1.1 噪声及其度量	(257)
8.1.2 噪声测量与评价	(257)
8.1.3 噪声检测仪器	(259)
8.1.4 噪声检测应用	(261)
8.2 巴克豪森(Barkhausen)噪声检测	(264)
8.2.1 检测原理	(264)
8.2.2 应力和显微组织的影响	(265)
8.2.3 检测仪器	(267)
8.2.4 检测参数选择	(268)
8.2.5 检测应用	(271)
8.3 磁声发射检测	(275)
8.3.1 检测原理	(275)
8.3.2 应力的影响	(276)
8.3.3 MAE 检测	(276)
8.3.4 应用示例	(278)
8.4 工业内窥镜检测	(279)
8.4.1 检测原理	(280)
8.4.2 检测的实施	(282)
8.4.3 检测应用	(283)
8.5 电流微扰检测	(284)
8.5.1 检测系统	(284)
8.5.2 信号特征	(285)
8.5.3 应用示例	(286)
8.6 光声光热检测	(289)
8.6.1 光热光束偏移法	(289)
8.6.2 光声法	(293)
参考文献	(298)

第1章 声发射检测

1.1 概述

1.1.1 声发射

材料或结构受外力或内应力作用变形或断裂时，或内部缺陷状态发生变化时，以弹性波方式释放出应变能的现象称为声发射(Acoustic Emission, AE)。各种材料的声发射频率很宽，从次声频、声频到超声频，所以声发射也称为应力波发射。

声发射是一种常见的物理现象。材料在释放应变能时，都会产生声发射。如果释放的应变能足够大，就会产生听得到的声音。日常生活中，对于树枝的弯折、玻璃器皿的撞击，我们可以凭声音知道是否发生了折断或破碎，这是由于材料在破坏的瞬间，释放的应变能比一般变形时更大。

材料除了在受力变形和破坏时会产生声发射外，材料受电、磁和热的作用时也会产生声发射，如变压器通电时，材料的磁致伸缩和电磁场的涡流作用都会使材料产生噼啪声。金属材料温度变化时会使内部结构由一种结构变为另一种结构，也有能量的释放，因此也会产生声发射。

用仪器代替人耳检测、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。

从无损检测的角度纵观声发射技术的发展要解决以下四个问题：

- (1) 构件或材料何时出现了损伤；
- (2) 是什么性质的损伤；
- (3) 是什么地方出现了损伤；
- (4) 损伤的严重程度如何。

声发射技术应从以下几个方面深入开展研究工作：

(1) 研究声发射的发声机理及不同的发声机理与接收到的信号之间的联系，以判断声发射源的性质，评价它的有害度。

(2) 因各种材料在不同条件下的声发射特性差别很大，应研究声发射信号与声源之间的联系。

(3) 发展新型仪器和声发射源定位技术，发射源定位就是利用声发射信号的特征找出缺陷所在的位置。

(4) 要解决声发射检测系统的标定方法和试验方法的规范化问题。如换能器的标定方法和耦合方法、检测系统的现场标定方法和检测程序、统一缺陷有害度的评价方法等。

产生声发射的外部条件及其使用范围参见表1-1。

表1-1 产生声发射的外部条件及其使用范围

外部条件	适 用 范 围
外加载荷	各种机械试验(如拉伸、弯曲、疲劳等)，压力容器和管子的水压试验，胶接检验

外部条件	适 用 范 围
内应力	焊后裂纹, 应变时效
介质	腐蚀, 应力腐蚀
热	马氏体相变, 金属的熔化和凝固, 热处理
电场(电压、电流)	变压器、电容器等电子元件试验
磁场	测量铁磁性材料的残余应力
燃烧	测量火焰柱的燃速
旋转	探测转动机械的损伤

1.1.2 声发射检测原理

声发射检测技术是一种评价材料或构件损伤的动态无损检测技术, 它通过对声发射信号的处理和分析来评价缺陷的发生和发展规律, 并确定缺陷的位置。

声发射现象的实质是物体受到外力或内力作用时, 由于内部结构的不均匀及各种缺陷的存在造成应力集中, 从而使局部的应力分布不稳定。当这种不稳定应力分布状态所积蓄的应变能达到一定程度时, 就会发生应力的重新分布, 重新达到新的稳定状态。这一过程中往往伴随有范性流变、微观龟裂、位错的发生与堆积、裂纹的产生与发展等, 实际上这就是应变能释放的过程。这种被释放的应变能, 一部分以应力波的形式发射出去, 由于最先注意到应力波发射现象的是人耳听觉领域内的声波, 所以称它为声发射。其实, 应力波发射的大部分频率范围要比声频广泛得多, 包括人耳听不到的次声和超声频率。金属材料的应力波发射大部分处于超声范围, 检测频率处在 100 ~ 300kHz。

具体来说, 声发射就是指物体在外界条件作用下, 缺陷或物体异常部位因应力集中而产生变形或断裂, 并以弹性波形式释放出应变能的一种现象。声发射要具备两个条件: 第一, 材料要受外载作用; 第二, 材料内部结构或缺陷要发生变化。

基于以上原理, 对于材料的微观形变和开裂以及裂纹的发生和发展, 就可以利用声发射来提供它们的动态信息。声发射源往往是材料灾难性破坏的发源地。由于声发射现象往往在材料破坏之前就会出现, 因此只要及时捕捉这些信息, 根据其 AE 信号的特征及其发射强度, 就可以推知声发射源的目前状态以及它形成的历史, 并对其发展趋势进行预报。

1.1.3 声发射检测的特点

1. 声发射检测的特点

1) 优点

(1) 几乎不受材料限制 除极少数材料外, 无论是金属还是非金属材料, 在一定条件下都有声发射发生, 因此, 声发射检测几乎不受材料限制。

(2) 声发射检测是一种动态无损检测技术 声发射检测是利用物体内部缺陷在外力或残余应力作用下, 本身能动地发射出的声波来对发射地点的部位和状态进行判断。根据声发射信号的特点和诱发 AE 波的外部条件, 既可以了解缺陷的目前状态, 也能了解缺陷的形成过程和发展趋势, 这是其他无损检测方法很难做到的。

(3) 灵敏度高 结构或部件的缺陷在萌生之初就有声发射现象, 因此, 只要及时对 AE 信号进行检测, 就可以判断缺陷的严重程度, 即使很微小的缺陷也能检测出来, 检测灵敏度非常高。

(4) 可检测活动裂纹 声发射检测可以显示裂纹增量(零点几毫米数量级), 因此可以检测发展中的活动裂纹。

(5) 可以实现在线监测 对压力容器等人员难以接近的场合和设备, 如用 X 射线检测则必须停产, 但用声发射则不需要停产, 可以减少停产损失。

2) 局限性

声发射检测技术的局限性如下: 结构必须承载才能进行检测; 检测受材料的影响很大; 测量受电噪声和机械噪声的影响很大; 定位精度不高; 对裂纹类型只能给出有限的信息; 测量结果的解释比较困难。

2. 声发射检测的应用范围

声发射检测技术的应用范围很广, 主要有以下几个方面:

(1) 机械制造过程中的在线监控;

(2) 压力容器的安全性评价;

(3) 油田应力测量;

(4) 结构完整性评价

(5) 复合材料特性研究;

(6) 泄漏检测;

(7) 焊接构件疲劳损伤的检测。

除以上应用外, AE 技术还可用于材料的脆断、应力腐蚀、疲劳、蠕变和焊接过程的监测, 也可用于桥梁、混凝土大坝、海洋石油钻采平台等的安全监测, 还可用来预报矿井崩塌和意外事故的发生。总之, AE 技术的应用前景是非常广阔的。

1.2 声发射检测方法

1.2.1 声发射信号特征

1. 声发射信号的分类

声发射信号是物体受到外部条件作用使其状态发生改变而释放出来的一种瞬时弹性波, 这种弹性波的波形可分为连续型和突发型两类, 如图 1-1 所示。

突发型声发射信号表现为脉冲波形, 脉冲的峰值可能很大, 但衰减很快。金属、复合材料、地质材料等裂纹的产生和扩展, 材料受到冲击作用等都会产生突发型声发射信号。

连续型声发射信号的特点是: 波幅没有很大的起伏, 发射的频度高、能量小。材料的屈服过程、液压机械和旋转机械的噪声、充压系统的泄漏等产生的都是连续型的声发射信号。

需要指出的是, 把声发射信号分为连续型和突发型并不是绝对的, 当突发型信号的频度大时, 其形式类似于连续型信号。另外, 实际测量得到的声发射信号非常复杂, 可能是连续型和突发型两类基本信号的复合。

2. 声发射信号的基本特征

实验表明, 声发射信号有以下几个特征:

(1) 声发射信号是上升时间很短的振荡脉冲信号, 上升时间为 $10^{-4} \sim 10^{-8} \text{s}$, 信号的重复速度很高。

(2) 声发射信号的频率范围很宽, 通常可以从次声频一直到 30MHz。

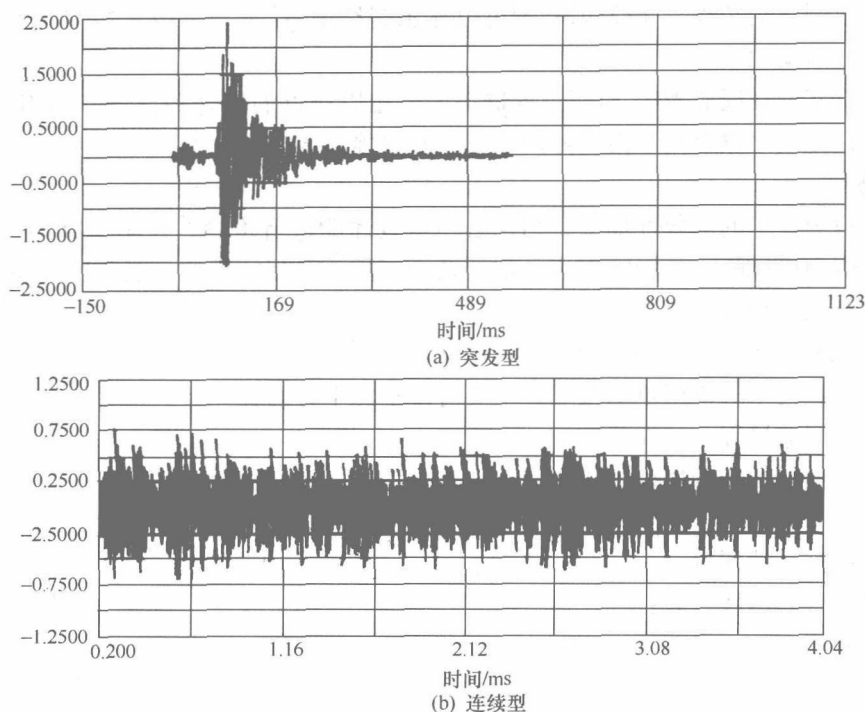


图 1-1 声发射信号类型

(3) 声发射信号一般是不可逆的，具有不复现性。同一试件在同一条件下产生的声发射只有一次，这就是所谓的凯塞(Kaiser)效应，如图 1-2 所示。

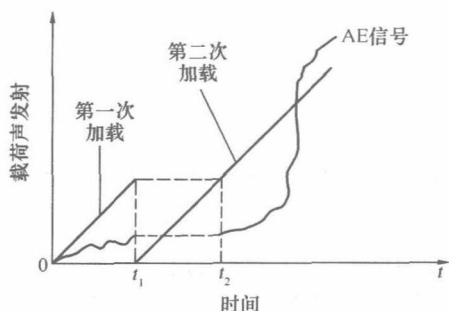


图 1-2 Kaiser 效应示意图

从图 1-2 可以看出，对试件开始加载时，有声发射产生。卸去载荷后再进行第二次加载时，在载荷没有超过第一次加载的最大载荷时没有声发射信号出现，只有当第二次加载的载荷超过第一次的最大载荷值时，才开始产生声发射信号，这一现象称为声发射的不可逆效应。这是由材料的变形和裂纹扩展的不可逆性决定的。

需要说明的是，如果两次加载的方式和方向不同，则 Kaiser 效应就不存在。另外，有些材料（如木材）的 Kaiser 效应并不是永久性存在的，放置一段时间后内部结构发生变化，就会使声发射恢复。

(4) 声发射信号产生的影响因素复杂，不仅与外部因素有关，也与材料的内部结构有关。因此，声发射信号具有随机性，即使对同一类试件在同一条件下进行观测，所得数据的分布范围也可能差异较大。

(5) 由于产生声发射信号的机理各式各样，且频率范围很宽，因此声发射信号具有一定的模糊性。

声发射信号的上述特性主要由材料的强度、应变速率、晶体结构、温度等决定。

1.2.2 声发射信号参数

单个声发射信号的特征参数如图 1-3 所示。

声发射信号的表征参数主要有声发射振幅值、声发射事件、事件持续时间、上升时间等。

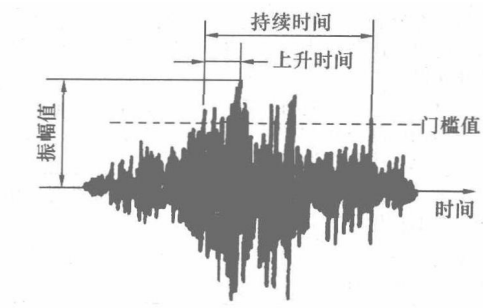


图 1-3 声发射信号的表征参数

1. 声发射事件

一个声发射脉冲激发声发射传感器所造成的一个完整振荡波形称为一个声发射事件，如图 1-3 就是一个声发射事件。

2. 声发射振幅值

一个完整的 AE 振荡波形中的最大幅值称为声发射振幅值，它反映了该 AE 事件所释放的能量大小。

3. 事件持续时间

一个 AE 事件所经历的时间称为事件持续时间。通常用振荡曲线与阈值值的第一个交点到最后一个交点所经历的时间来表示。阈值有固定和浮动两种。事件持续时间的长短反映了声发射事件规模的大小。单个 AE 事件的持续时间很短，通常在 0.01 ~ 100 μ s。

4. 上升时间

振荡曲线与阈值值的第一个交点到最大幅值所经历的时间称为 AE 信号的上升时间。上升时间一般在几十到几百微秒的范围内。上升时间的大小反映了 AE 事件的突发程度。

声发射振幅、事件持续时间和上升时间三个参数从不同角度描述了一个 AE 事件，测得这三个参数，就可以知道该 AE 事件的大致规模。

声发射信号参数参见表 1-2。

表 1-2 声发射信号参数

参 数	含 义	特点与用途
波击 (Hit) 和波击计数	一通道上一声发射信号的探测与测量和所测得波击个数，可分为总计数、计数率	反映声发射活动的总量和频度，常用于声发射活动性评价
事件计数	由一个或几个波击鉴别所得声发射事件的个数，可分为总计数、计数率。一阵列中，一个或几个波击对应一个事件	反映声发射事件的总量和频度，用于源的活动性和定位集中度评价
振铃计数	越过阈值信号的振荡次数，可分为总计数和计数率	信号处理简便，适于两类信号，又能粗略反映信号强度和频度，因而广泛用于声发射活动性评价，但受阈值的影响很大
幅度	事件信号波形的最大振幅值，通常用 dB 表示	与事件大小有直接的关系，不受阈值的影响，直接决定事件的可测性，常用于波源的类型鉴别、强度及衰减的测量
能量计数 (MARSE)	事件信号检波包络线下的面积，可分为总计数和计数率	反映事件的相对能量或强度，对阈值、工作频率和传播特性不太敏感，可取代振铃计数，也用于波源的类型鉴别
持续时间	事件信号第一次越过阈值到最后阈值所经历的时间间隔，以 μ s 表示	与振铃计数十分相似，但常用于特殊波源类型和噪声的鉴别
上升时间	事件信号第一次越过阈值至最大振幅所经历的时间间隔，以 μ s 表示	因受传播的影响很大，其物理意义变得不明确，有时用于机电噪声鉴别

续表

参 数	含 义	特点与用途
有效值电压 (RMS)	采样时间内, 信号电平的均方根值, 以 V 表示	与声发射的大小有关, 测量简便, 不受门槛的影响, 适用于连续型信号, 主要用于连续型声发射活动性评价
平均信号电平 (ASL)	采样时间内, 信号电平的均值, 以 dB 表示	提供的信息和应用与 RMS 相似, 对幅度动态范围要求高而时间分辨率要求不高的连续型信号, 尤为有用。也用于背景噪声水平的测量
时差	同一个声发射波到达各传感器的时间差, 以 μs 表示	决定于波源的位置、传感器间距和传播速度, 用于波源的位置计算
外变量	试验过程外加变量, 包括经历时间、载荷、位移、温度及疲劳周次	不属于信号参数, 但属于波击信号参数的数据集, 用于声发射活动性分析

1.2.3 声发射信号处理

声发射信号的检测过程如图 1-4 所示。

传感器用来接收声发射信号; 前置放大器对传感器输出的非常微弱的信号(有时只有十几微伏)进行放大, 以实现阻抗匹配; 滤波器用来选择合适的频率窗口, 以消除各种噪声的影响; 主放大器对滤波后的声发射信号进一步放大, 以便进行记录、分析和处理。

声发射信号的处理方法通常有振铃法、事件法、能量分析法、振幅分析法以及频谱分析法等几种。

1. 振铃法

一个声发射脉冲激发传感器后, 其输出波形是一种开始急剧上升然后又按指数衰减, 犹如振铃信息那样的波形, “振铃”(ringdown)之意即由此而来。对记录到的声发射信号中超越门槛值的峰值数进行计数, 这种方法称为振铃法。

振铃法的示意图见图 1-5。

由图 1-5 可以看出, 图中的声发射信号超越门槛值的峰值数为 6, 故它的声发射计数值 $N=6$ 。

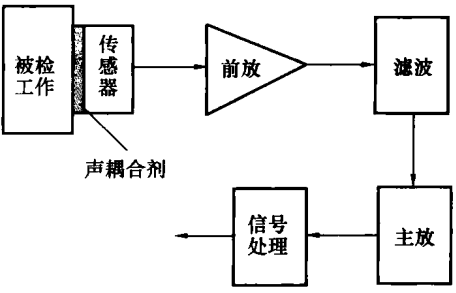


图 1-4 声发射信号的检测过程

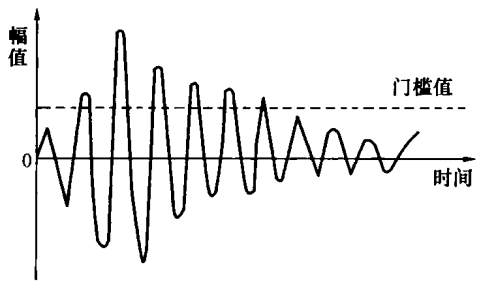


图 1-5 振铃法计数示意图

振铃法是最简单的一种处理声发射信号的方法。由于该方法简单而且容易实现, 因此被广泛应用, 特别是用于疲劳裂纹扩展规律的研究, 以建立声发射活动与裂纹扩展之间的关系。从振铃法本身来看, 在给定的门槛值条件下, 随着声发射事件的增大, 由该事件中得到的计数值 N 也增大。因此可以说这种方法对较大的事件有某些加权作用, 虽然不是直接的度量, 但却可以间接地反映声发射的大小。

应该指出, 用振铃法获得的计数值与门槛值的大小有关, 因此在试验中或在处理实验数据时, 必须注意到门槛值这个条件。

用振铃法获得的声发射数据中,除计数值 N 外,还可采用计数率(单位时间的计数值)来表示,计数率可以间接地反映发生声发射的频繁程度。

2. 事件法

事件法是指将一次声发射造成一个完整的传感器振荡输出视为一次事件。处理数据时用事件数或单位时间的事件数(即事件率)来表示。

事件法着重于事件的个数,不注重声发射信号振幅的大小。因此,该法在解释声发射信息方面有很大的局限性,因此很少单独使用,常与振铃法联用,以反映出不同阶段声发射规模的相对大小程度。

3. 能量分析法

振铃法虽然简单、方便,但在解释声发射信息时却有一定的局限性,因为计数值只是声发射振幅的定性反映,且计数值随信号频率的变化而变化。按照古典力学的观点,振动所具有的能量与振幅之间有直接的关系,基于这种观点,出现了能量分析法。

能量分析法是直接对传感器中的振幅(或有效值)和信号的持续时间进行度量的一种方法,可以直接反映声发射能量的特性。图 1-6 给出了能量测量的示意图。

能量分析法通常以能量值和能量率二种数据形式给出。能量值是指在给定的测量时间间隔范围内所测量到的能量大小,能量率则为单位时间的能量值。

在对裂纹开裂过程进行声发射的研究中发现,能量分析法比振铃法更能反映裂纹的开裂特征。

4. 振幅分析法

振幅分析法是一种基于统计概念基础上的方法,是按信号峰值的大小范围分别对声发射信号进行事件计数。由于计数的方式不同,振幅分析法又分为两种不同的统计分析方法:事件分级幅度分布法和事件累计幅度分布法。

(1) 事件分级幅度分布法 将测得的声发射信号振幅的变化范围以线性或对数的形式按一定规律分成若干个等级,每一等级有一定的振幅变化范围,然后对声发射事件按分类的等级进行计数。图 1-7 给出的是事件分级幅度分布法的一个具体应用实例。

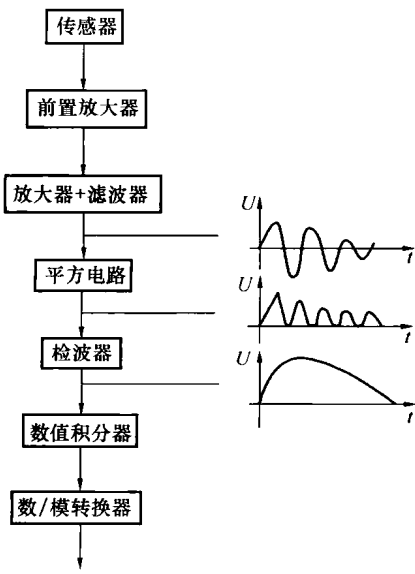


图 1-6 能量测量示意图

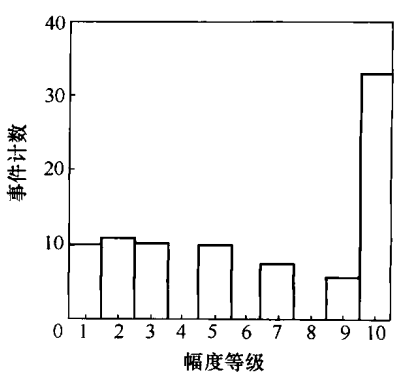


图 1-7 事件分级幅度分布法应用实例

(2) 事件累计幅度分布法 与事件分级幅度分布法类似,事件累计幅度分布法也是将声发射信号振幅的最大变化范围按一定的方式分为数个等级(或称振幅带),每一个等级中都有自己的最小振幅值 A_i ,将幅值超过 A_i 的各等级中的事件数累加,得到累计事件的计数值 N ,并得到 N 和 A_i 之间的变化关系,这一关系在对数坐标中可用一直线来描述,如图 1-8 所示。

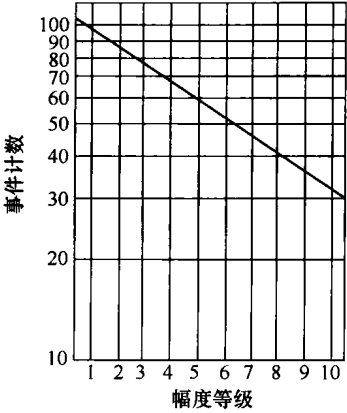


图 1-8 事件累计幅度分布图

振幅分析法以振幅作为测量参数并进行统计分析,可以从能量的角度来观察不同材料声发射特性的变化,或同种材料在不同阶段声发射特性的差异,这对于研究变化过程的机理是非常有价值的。例如,某些钢材在裂纹扩展成脆断之前,由于裂纹前缘局部弹性开裂,会造成高振幅的声发射信号的比例增加。弹性开裂产生的声发射振幅比在低应力水平下塑性区扩大所产生的声发射振幅大。利用声发射监测振幅的这种变化就可以判断破坏是否即将临近。

5. 频谱分析法

前面 4 种方法中,声发射信号的振幅是主要的测量参数,因为它表证了声发射的能量大小。声发射的频率成分和振幅一样,也包含着声发射微观过程的重要信息,也应作为测量的参数。这样便产生了声发射信号处理的频谱分析法。

根据频谱分析可知,任一瞬态的信号,如某单一的声发射事件,可以看成是大量稳态成分的叠加,可以用时间域或频率域来表示此种信号。时间域和频率域的变换可以用傅里叶积分来表示:

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} G(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1-1)$$

式中 ω —— $\omega = 2\pi f$, f 为频率;
 $G(t)$, $S(\omega)$ ——时间域和频率域内信号的幅值;
 t ——时间。

通常,函数 $G(t)$ 与信号的波形有关,而 $S(\omega)$ 与信号的频谱有关。频谱分析法就是通过测量各种频率成分来对声发射信号进行分析的。

另外,在检测与处理声发射信号时还要考虑如下的因素:

- (1) 要对检测信号的类型进行分析。对连续型信号,能量参数最有意义;对突发型信号,振铃参数则最为常用。
- (2) 能量参数对高幅值的信号显得更有特色,但却会受到频率范围与动态范围的限制。
- (3) 在某些情况下,时间常数较小的快速峰值检测仪可给出声发射活动的良好指示,其输出还可用来进行幅值分析。

1.2.4 声发射检测程序

根据声发射检测的目的、对象、选定的外部加载方法及所用的仪器的不同,声发射检测的程序也有很大差别。这里以压力容器升压过程的声发射检测为例,说明声发射检测的一般程序。

1. 准备工作

关于被检测的压力容器,声发射检测人员必须了解以下情况: