

锅炉压力容器压力管道及特种设备安全系列教材

声 发 射 检 测

沈功田 主编

前 言

本书是锅炉压力容器压力管道及特种设备安全系列教材之一，主要用于从事对这些设备进行声发射检测Ⅱ级资格人员的培训，受全国锅炉压力容器无损检测人员资格鉴定考核委员会委托编写。

本书由沈功田主编。

本书主要编写人为沈功田、刘时风、戴光。第1章、第4章、第5章、第6章第1节和第2节由沈功田编写，第2章和第3章由刘时风编写，第6章第3节和第5节由戴光编写。

本书思考题、试题及答案由李邦宪、关卫和、霍臻和蒋士良编写。

在本书的编写过程中，全国考委会的领导以及秘书处给予了有力的支持和全面的帮助，确保编写工作能够顺利进行。

由于编者水平所限，书中缺点和错误在所难免，欢迎批评指正。

编 者
2002年8月

目 录

第 1 章 绪论

- 1.1 声发射概念
- 1.2 声发射技术发展概述
- 1.3 声发射检测的基本原理
- 1.4 声发射检测的特点
- 1.5 声发射技术的应用领域

第 2 章 声发射检测的物理基础

- 2.1 材料和形变
 - 2.1.1 晶体和非晶体材料的结构
 - 2.1.2 应力和应变
 - 2.1.3 弹性和塑性变形, 裂纹增长
- 2.2 声发射源
 - 2.2.1 突发和连续型声发射
 - 2.2.2 晶体材料中的声发射源
 - 2.2.3 非金属中的源
 - 2.2.4 复合材料中的源
 - 2.2.5 其它源
- 2.3 波的传播
 - 2.3.1 近场脉冲响应
 - 2.3.2 传播模式
 - 2.3.3 模式转换、反射和折射
 - 2.3.4 材料中的波速
 - 2.3.5 复合材料中各项异性传播
 - 2.3.6 几何效应
- 2.4 衰减
 - 2.4.1 几何衰减
 - 2.4.2 色散
 - 2.4.3 散射和衍射
 - 2.4.4 由能量损耗机制引起的衰减
 - 2.4.5 衰减与频率的关系
- 2.5 Kaiser 和 Felicity 效应、Felicity 比
- 2.6 影响声发射特性的因素

2. 声发射波的探测（学时 1 天，课堂教学 4 学时，仪器操作 4 学时）

2.1 转换过程——压电效应等

2.2 探头

2.2.1 结构

2.2.2 转换系数

2.2.3 标定—灵敏度曲线

2.3 探头的耦合和安装

2.3.1 耦合剂

2.3.2 固定装置

2.3.3 波导

2.4 探头的分类及用途

2.4.1 宽带响应的探头

2.4.2 谐振响应的探头

2.4.3 内置电路一体化探头

2.4.4 特殊探头(方向、模式响应)

2.4.5 探头的选择

3 声发射检测仪器系统（学时 2 天，课堂教学 8 学时，仪器操作 8 学时）

3.1 信号电缆

3.1.1 同轴电缆

3.1.2 双绞电缆

3.1.3 光导纤维电缆

3.1.4 电缆中的噪声问题

3.1.5 阻抗匹配

3.1.6 接头

3.2 信号调理

3.2.1 前置放大器

3.2.2 主放大器

3.2.3 滤波器

3.2.4 增益的测量单元，计量单位

3.3 信号探测

3.3.1 阈值比较器

3.3.2 阈值测量单元，计量单位

3.3.3 由增益和/或阈值确定的灵敏度

- 3.4 声发射检测系统
 - 3.4.1 单通道系统
 - 3.4.2 多通道系统：模拟式、数字式、全波形
 - 3.4.3 专用的工业系统：DUNEGAN
- 3.5 数据显示和记录附件
 - 3.5.1 扬声器指示
 - 3.5.2 X-Y 和长条纸记录仪
 - 3.5.3 示波器
 - 3.5.4 磁记录仪
 - 3.5.5 其它技术

4 声发射信号处理方法（学时 1 天）

- 4.1 经典信号处理方法
 - 4.1.1 波形特性参数
 - a. 幅度分析、幅度测量的单位
 - b. 脉冲持续时间分析
 - c. 上升时间分析
 - d. 事件和事件率处理
 - e. 波形包络面积(能量)
 - 4.1.2 识别技术：从单参数判别到模式识别
 - 4.1.3 分布技术
- 4.2 定位技术
 - 4.2.1 单通道定位
 - 4.2.2 线定位
 - 4.2.3 平面定位
 - 4.2.4 其它定位技术(连续声发射源定位、改曲面定位、立体定位等)
- 4.3 高级信号处理技术
 - 4.3.1 信号定义：HDT
 - 4.3.2 信号获取
 - 4.3.3 频谱分析
 - 4.3.4 模式识别

5 声发射检测技术（学时 2 天，课堂教学 8 学时，仪器操作 8 学时）

- 5.1 检测仪器选择的影响因素
 - 5.1.1 被监测的材料
 - 5.1.2 发射源的部位和特征
 - 5.1.3 需要得到的信息类型

- 5.1.4 被检对象的大小和形状
- 5.2 检测仪器的设置和校准
 - 5.2.1 校准信号的产生技术
 - 5.2.2 校准的步骤
 - 5.2.3 探头的选择和布置
 - 5.2.4 仪器调试和参数设置
- 5.3 加载程序
 - 5.3.1 加载型式
 - 5.3.2 最大试验载荷
 - 5.3.3 载荷保持
 - 5.3.4 重复和程控加载
 - 5.3.5 加载速率
- 5.4 特殊检测的程序
 - 5.4.1 高温 / 低温检测
 - 5.4.2 间歇性的检测（包括周期疲劳）
 - 5.4.3 长期监测
 - 5.4.4 高噪声环境检测
- 5.5 数据显示
 - 5.5.1 显示模式的选择
 - 5.5.2 不同种类显示的应用和读取
- 5.6 噪声源和检测前的识别
 - 5.6.1 电磁噪声
 - 5.6.2 机械噪声
- 5.7 噪声的拟制
 - 5.7.1 电磁屏蔽
 - 5.7.2 电子技术
 - 5.7.3 机械运动的预防
 - 5.7.4 衰减材料和应用
- 5.8 数据解释
 - 5.8.1 数据记录中对噪声的标识
 - 5.8.2 采用数据过滤技术对噪声的去除
 - 5.8.3 相关和非相关声发射信号
- 5.9 数据评价
 - 5.9.1 排序、分级、接受/不接受的方法
 - 5.9.2 与校准信号的比较

5.9.3 其它无损检测方法对源的评价

5.10 报告

5.10.1 目的

5.10.2 内容和结构

6 声发射检测技术的应用（学时 3 天，第 1 天现场压力容器声发射检测实际操作演示与培训，后 2 天课堂教学 10 学时，仪器操作 6 学时）

6.1 压力容器

6.1.1 检验前的准备

6.1.2 检验方案的制定

6.1.3 声发射监测和声发射信号采集

6.1.4 声发射数据的分析和源的分类

6.1.5 检验数据记录和报告

6.1.6 应用实例

6.2 压力管道

6.3 起重机械

6.4 实验室研究

6.4.1 裂纹扩展和断裂力学

6.4.2 环境导致的开裂(应力腐蚀开裂、氢脆)

6.4.3 位错运动（金属）

6.4.4 澄清变形机制(复合材料)

6.4.5 相变和相稳定

6.4.6 蠕变

6.4.7 残余应力

6.4.8 腐蚀

6.4.9 疲劳

6.4.10 断裂

6.4.11 韧/脆转变

6.4.12 其它材料特性应用

6.5 其它结构应用

6.5.1 常压储罐

6.5.2 航空器

6.5.3 桥梁

6.5.4 矿山

6.5.5 大坝、地质滑坡

- 6.5.6 泵、阀门
- 6.5.7 焊接过程监测
- 6.5.8 泄漏探测和监测
- 6.5.9 旋转机械
- 6.5.9 其它结构应用

7 声发射检测标准（学时 1 天）

- 7.1 术语（GB/T 12604.4-90 无损检测术语声发射检测, ASTM E1316, ISO）
- 7.2 GB/T18182-2000 《金属压力容器声发射检测及结果评价方法》

第 1 章 绪论

1.1 声发射概念

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 (Acoustic Emission, 简称 AE) , 有时也称为应力波发射。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, 被称为其它或二次声发射源。

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 Hz 的次声频、20 Hz~20K Hz 的声频到数 MHz 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 声发射技术发展概述

声发射和微震动都是自然界中随时发生的自然现象, 尽管无法考证人们何时首次听到声发射, 但逐如折断树枝、岩石破碎和折断骨头等的断裂过程无疑是人们最早听到的声发射信号。可以十分肯定地推断“锡鸣”是人们首次观察到的金属中的声发射现象, 因为纯锡在塑性形变期间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。

现代的声发射技术的开始以 Kaiser 五十年代初在德国所作的研究作为标志。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都有声发射现象。他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”。现在人们称材料的这种不可逆现象为“Kaiser 效应”。Kaiser 同时提出了连续型和突发型声发射信号的概念。

五十年代末, 美国人 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位错的运动所引起^[5], 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伤检测方面具有独特的潜在优势。

六十年代初，Green 等人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。在整个六十年代，美国和日本开始广泛地进行声发射的研究工作，人们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，日本于 1969 年成立了声发射协会。

七十年代初，Dunegan 等人于开展了现代声发射仪器的研制，他们把实验频率提高到 100KHz-1MHz 的范围内，这是声发射实验技术的重大进展，现代声发射仪器的研制成功为声发射技术从实验室的材料研究阶段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，整个七十年代和八十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。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，据他的统计，到 1986 年底世界上发表有关声发射的论文总数已超过 5000 篇。

八十年代初，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，从而推动了八十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。

进入九十年代，美国 PAC 公司、美国 DW 公司和德国 Vallen Systeme 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。

我国于七十年代初首先开展了金属和复合材料的声发射特性研究，八十年代中期声发射技术在压力容器和金属结构的检测方面得到应用，目前我国已在声发射仪器制造、信号处理、金属材料、复合材料、磁声发射、岩石、过程监测、压力容器、飞机等领域开展了广泛的研究和应用工作。

1.3 声发射检测的基本原理

声发射检测的原理如图 1.1 所示，从声发射源发射的弹性波最终传播到达材料

的表面，引起可以用声发射传感器探测的表面位移，这些探测器将材料的机械振动转换为电信号，然后再被放大、处理和记录。固体材料中内应力的变化产生声发射信号，在材料加工、处理和使用过程中有很多因素能引起内应力的变化，如位错运动、孪生、裂纹萌生与扩展、断裂、无扩散型相变、磁畴壁运动、热胀冷缩、外加负荷的变化等等。人们根据观察到的声发射信号进行分析与推断以了解材料产生声发射的机制。

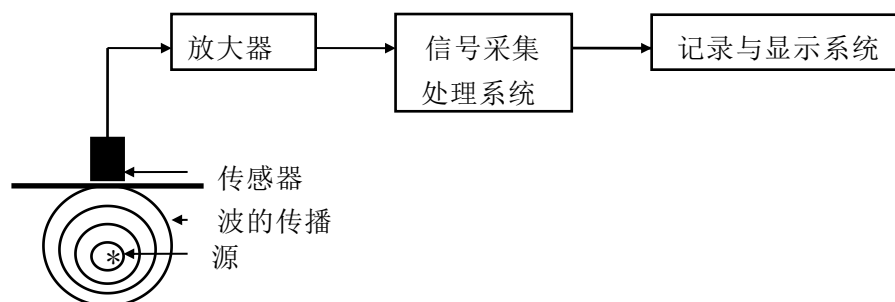


图 1.1 声发射检测原理方框图

声发射检测的主要目的是：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，要用其它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。

1.4 声发射技术的特点

声发射检测方法在许多方面不同于其它常规无损检测方法，其优点主要表现为：

- (1) 声发射是一种动态检验方法，声发射探测到的能量来自被测试物体本身，而不是象超声或射线探伤方法一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) 在一次试验过程中，声发射检验能够整体探测和评价整个结构中缺陷的状态；
- (4) 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；
- (5) 由于对被检件的接近要求不高，而适于其它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；
- (6) 对于在役压力容器的定期检验，声发射检验方法可以缩短检验的停产时间或者不需要停产；

(7) 对于压力容器的耐压试验，声发射检验方法可以预防由未知不连续缺陷引起系统的灾难性失效和限定系统的最高工作压力；

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

由于声发射检测是一种动态检测方法，而且探测的是机械波，因此具有如下的特点：

(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，还需要特作准备；

(3) 声发射检测目前只能给出声发射源的部位、活性和强度，不能给出声发射源内缺陷的性质和大小，仍需依赖于其它无损检测方法进行复验。

表 1 列出了声发射检测方法和其它常规无损检测方法的特点对比。

表 1 声发射检测方法和其它常规无损检测方法的特点对比

声发射检测方法	其它常规无损检测方法
缺陷的增长 / 活动	缺陷的存在
与作用应力有关	与缺陷的形状有关
对材料的敏感性较高	对材料的敏感性较差
对几何形状的敏感性较差	对几何形状的敏感性较高
需要进入被检对象的要求较少	需要进入被检对象的要求较多
进行整体监测	进行局部扫描
主要问题：噪声、解释	主要问题：接近、几何形状

1.5 声发射技术的应用领域

目前人们已将声发射技术广泛应用于许多领域，主要包括以下方面：

(1) **石油化工工业**：低温容器、球形容器、柱型容器、高温反应器、塔器、换热器和管线的检测和结构完整性评价，常压贮罐的底部泄漏检测，阀门的泄漏检测，埋地管道的泄漏检测，腐蚀状态的实事探测，海洋平台的结构完整性监测和海岸管道内部存在砂子的探测。

(2) **电力工业**：变压器局部放电的检测，蒸汽管道的检测和连续监测，阀门蒸汽损失的定量测试，高压容器和汽包的检测，蒸汽管线的连续泄漏监测，锅炉泄漏的监测，汽轮机叶片的检测，汽轮机轴承运行状况的监测。

(3) **材料试验**：复合材料、增强塑料、陶瓷材料和金属材料等的性能测试，材料的断裂试验，金属和合金材料的疲劳试验及腐蚀监测，高强钢的氢脆监测，材料的摩擦测试，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**：航空器的时效试验，航空器新型材料的进货检验，完整结构或航空器的疲劳试验，机翼蒙皮下的腐蚀探测，飞机起落架的原位监测，发动机叶片和直升机叶片的检测，航空器的在线连续监测，飞机壳体的断裂探测，航空器的验证性试验，直升机齿轮箱变速的过程监测，航天飞机燃料箱和爆炸螺栓的检测，航天火箭发射架结构的验证性试验。

(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，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。

第 2 章 声发射检测的物理基础

2.1 材料和形变

2.1.1 晶体和非晶体材料的结构

所有材料都是由原子构成的。

随着金属的凝固，原子要进行规则的排列而形成晶粒。

陶瓷、矿石（钻石）和其它许多材料也是结晶体。

非晶体材料有玻璃（过冷的液体）和塑料（长链的分子）。

大多数金属的典型结晶结构如图 2-1 到 2-4 所示。

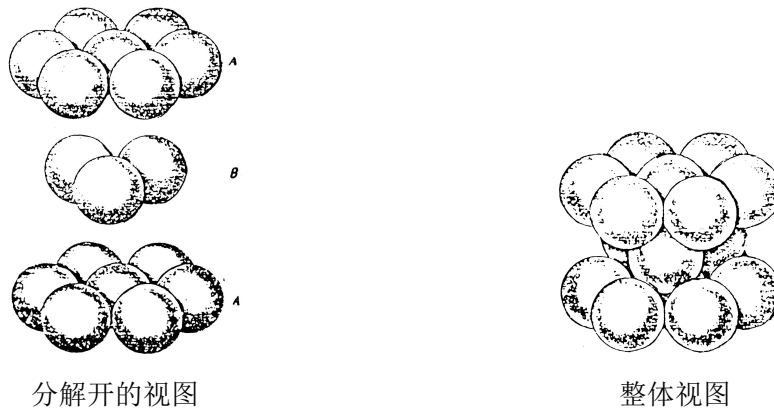


图 2-1 封闭致密六边形

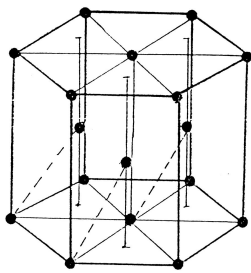


图 2-2 封闭致密的六边形

钴 锰 钛 锌

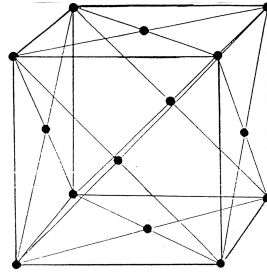


图 2-3 面心立方

铝, 铜, 金, 铅
镍, 银, 不锈钢

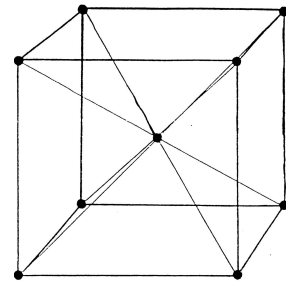


图 2-4 体心立方

铬, 铁, 钨, 钛, 铁素体钢,
体心四方形: 锡

晶体中的原子在排列时会有缺陷产生，一般为图 2-5 所示的点缺陷，或图 2-6 所示的线缺陷-位错。

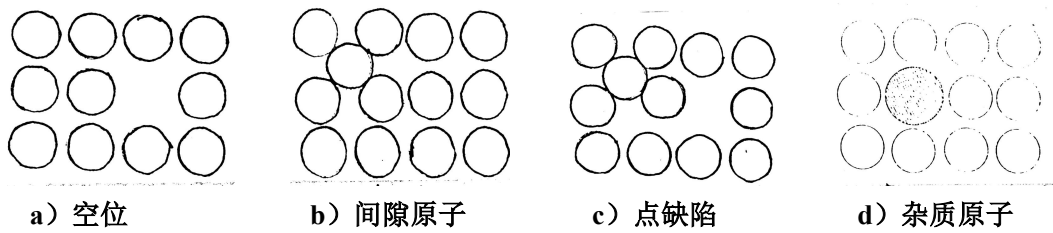


图 2-5 晶体中的点缺陷

位错是结晶格子中原子范围大小的线缺陷。
 结晶中的位错是由熔融状态下固化过程中形成的。
 典型的工程材料在每个微观的晶粒中就有几百万个位错。
 位错有两种不同的型式：刃型位错与螺型位错（如下图所示）。

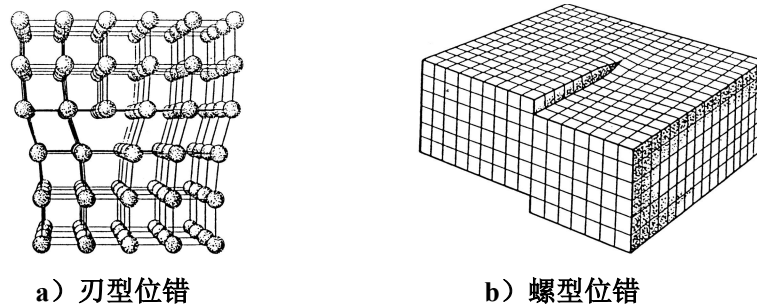


图 2-6

2.1.2 应力和应变

当我们对任何一个结构施加作用力（载荷），或对任何一个容器进行加压时，就会在材料中产生应力。

应力的定义是单位面积上所受的作用力。

甚至我们只能通过某个指定点施加作用力时，也会产生通过整个结构的作用力，因此，我们将讨论有关应力“场”的问题。

应力所产生的变形称为应变，应变通过分数或百分数来表示，例如：

$$\text{应变} = \frac{\text{长度的变化}}{\text{初始长度}}$$

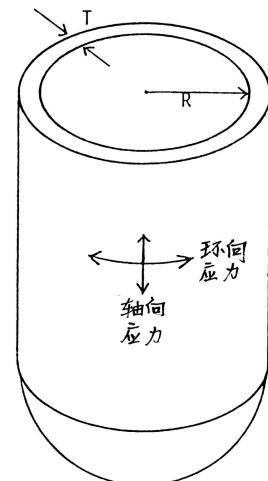
在应力和应变很小的条件下，固体材料是弹性的性质，而且应力与应变成比例：

$$\frac{\text{应力}}{\text{应变}} = \text{弹性模量}$$

当作用应力达到较高值的条件下，材料将要承受塑性（永久的）变形。

根据部件形状的不同，应力场在整个 3 维空间中可以具有拉伸的、压缩的和剪切的分量。

应力的单位与压强的单位相同：Kg/cm² 和 MPa



2-7

应力场—举例

1. 压力容器

内压力 P 作用下的薄壁压力容器要承受两个轴向和 1 个环向方向的应力的作用：

$$\text{轴向应力} = \frac{PR}{2T}$$

$$\text{环向应力} = \frac{PR}{T}$$

以上应力都是拉伸应力。

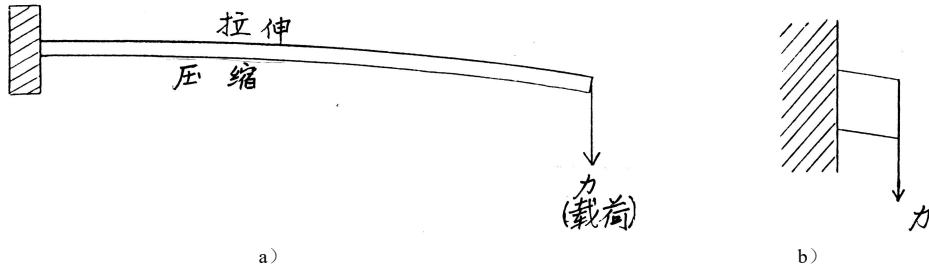


图 2-8

细长梁是通过它的上侧表面上的拉伸应力和下侧表面上的压缩应力的组合作用来支承载荷的.....。

3. 剪切

.....然而对于 1 个很短的块状结构来说，它就是通过剪切作用来承受载荷。

2.1.3 弹性和塑性变形，裂纹增长

材料在应力作用下的行为如图 2-9 所示。

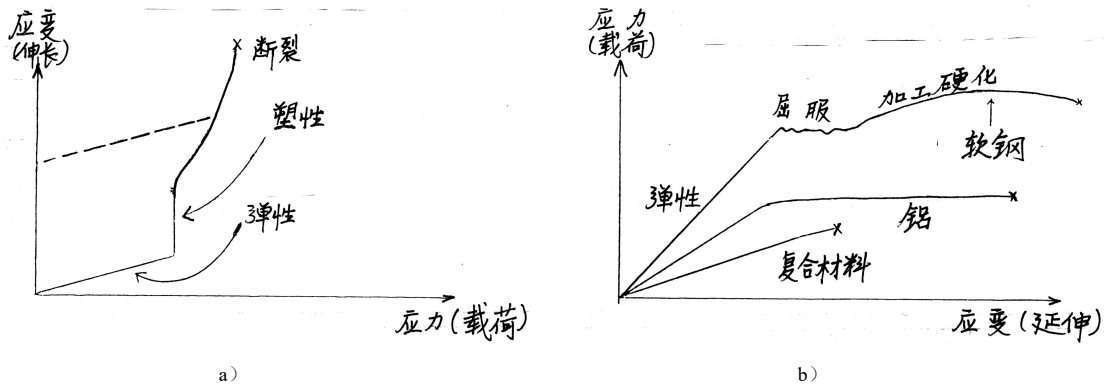


图 2-9

(1) 金属晶格的塑性变形

位错运动是在许多种晶格变形的条件下在原子范围内机理。

- 滑移
- 屈服
- 留德尔斯线 (钢)
- 裂纹尖端塑性区
- 空隙增长和聚结



图 2-10

的

—— 韧性断裂

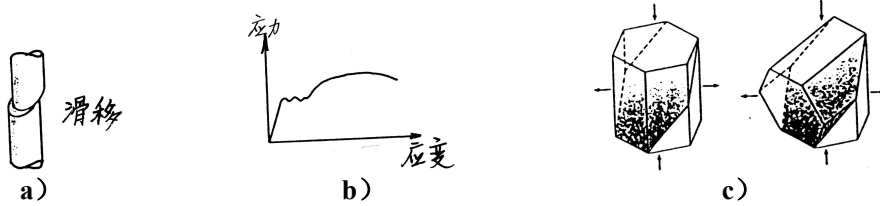


图 2-11

双晶是在晶粒大小范围内整个晶格截面取向改变为两个完全相同的“孪生”（镜面）的方向。双晶提供较高幅值的声发射，双晶发生在锡、锌、钛中，但不发生在钢与铝中。

(2) 塑性变形和位错运动

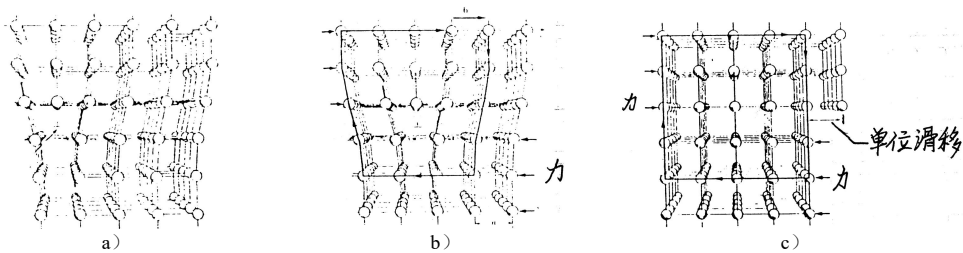


图 2-12

- a) 结晶结构中的位错。
- b) 在剪切力作用下位错移动 1 个晶格的空间距离。
- c) 位错已运动到结晶的边缘。

(3) 结晶结构和沉淀

金属冷却固化过程中形成晶粒。液态金属中，金属开始固化的每 1 点都是晶粒增长的起始点。每个晶粒都要一直增长到它们彼此相互抵触为止，也就形成了晶界。在晶界位置上晶格的方位要发生变化。典型晶粒的大小为 1 寸的千分之几。

在晶粒内部，有可能存在各种不同材料的微小的夹杂物，例如，铁素体钢中的部分碳可以形成 Fe_3C （碳化铁），它具有自己的结晶结构，并在局部位置上代替了铁素体晶格。

夹杂对金属的机械性能具有非常大的影响。

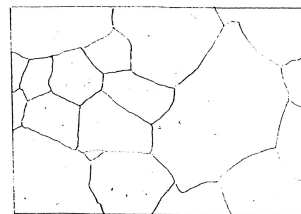


图 2-20

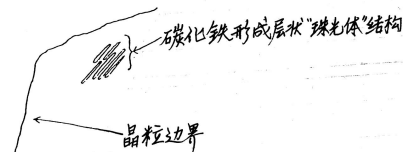


图 2-13

(4) 钢的几项最主要的实用性能

碳在铁中极其稳定的结构是石墨，然而在慢速冷却过程中围绕着铁素体基体周围所得到的珠光体适合于所有的实用要求的目的，珠光体（“共溶体”）中含有 0.8% 的碳。马氏体，贝氏体以及较快冷却过程中所保留下来的原有的奥氏体都是不稳定的，而且在退火处理过程中都有恢复到更稳定的结构形式的趋势。

(5) 几类主要钢材

碳钢：对碳和锰的含量有具体规定的要求，同时对磷和硫的含量也有限制（一般为 0.04%，0.05%）铁素体 / 珠光体钢材的成分和性能的范围如下：

表 2.1

分级	%C	%Mn	拉伸强度	屈服强度	延伸率
超低碳钢	0.06max	0.35max			30%
普通碳钢	0.18/0.23	0.70/1.00			25%
超高碳钢	0.90/1.03	0.30/0.50			20%

高强度低合金钢：通过添加少量元素如 Cu, Mo, Cr, Ni, Nb, V 等来改善性能。

合金钢：添加较多的上述合金元素；例如在极端温度条件下使用的 Ni / Cr / Mo 钢。这些高合金钢具有更复杂的微观结构，而不只是铁素体 / 珠光体结构；例如，含有贝氏体等。与添加上述合金元素的同时，增加碳含量可以得到超高强度的合金钢，或者通过超低碳和高合金含量的办法等等来得到细晶粒加工硬化后的超高强度合金钢。

不锈钢：钢中添加足够的镍、铬合金元素可以使奥氏体晶格在常温条件下非常稳定，具有抗腐蚀的性能。

(6) 裂纹和应力

内部带有裂纹的材料在受到应力作用时，应力场必定要“围绕着”裂纹的边界。

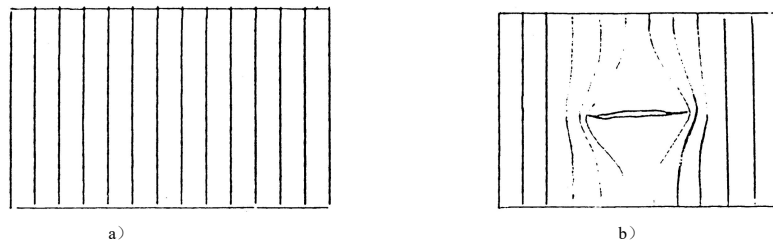


图 2-14

a) 无裂纹的材料 b) 带有裂纹的材料

合成应力的集中作用意味着在裂纹尖端的材料将会变形，甚至破坏，而这时材料的其它部位还都处于弹性范围以内。

这也就是，为什么裂纹是强发射体和为什么在材料的各个部分还处于弹性范围时，材料本身还没有达到发射的条件下而利用声发射（AE）来寻找裂纹和类似的缺陷的原因。

(7) 临界和亚临界裂纹扩展

“临界”是指达到这一点后，裂纹将很快地前进扩展，并且迅速地使部件断裂。

已经证明，在裂纹尖端附近的应力场达到一定值的条件下，裂纹将发生很快的扩展。

裂纹尖端附近的应力场的这个值通过“应力强度因子” K 来描述。

可以根据作用在部件上的载荷和裂纹的大小来计算 K 值，因为以上两个因素都要影响裂纹尖端附近的应力场，所以 K 值与以上两个因素都有关系。

K 的临界值就是用于裂纹张开的力，在这个力的作用下裂纹将很快扩展，同时部件将立刻断裂，用 K_{Ic} 来表示 K 的临界值，通常用于衡量材料的断裂韧性。

如果我们已知某种材料的断裂韧性以及在部件中所设定的应力场，根据上述的概念就能够计算临界裂纹的尺寸。在无损伤检测试验的实际工作中，我们经常遇到的问题就是能否检测到一定大

小的裂纹，因此上述计算临界裂纹大小的概念正好检验的实践相结合。

“亚临界”裂纹扩展就是发生在迅速扩展、最后扩展，临界事件发生以前的扩展。亚临界裂纹扩展能够发生在情况发生变化的条件下，包括：

- 不断上升的载荷作用
- 疲劳（循环或重复载荷）
- 应力腐蚀开裂
- 氢脆开裂
- 腐蚀疲劳

在评定裂纹是否将要扩展以及将要以什么速度扩展过程中，环境效应通常是很重要的因素。在亚临界裂纹扩过程中，声发射主要来自于两种声源：

- (1) 塑性区、主开裂和夹杂的脱层；
- (2) 裂纹前沿本身的向前运动。

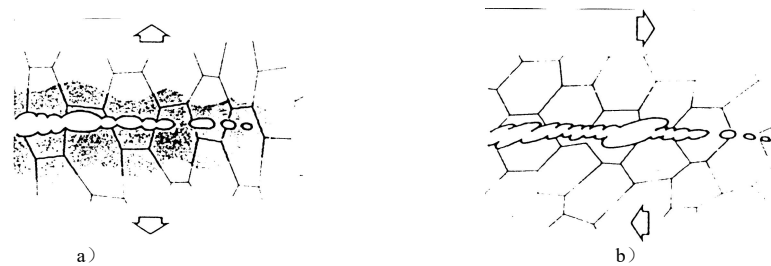
(8) 裂纹增长的各种形式

沿晶断裂



2-15
a) 脆性 b) 塑性

穿晶断裂



2-16
a) 塑性断裂 (拉伸应力) b) 塑性断裂 (剪应力)

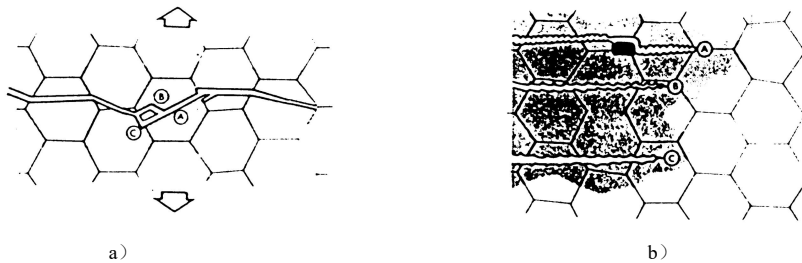


图 2-17

- | | |
|--------|----------|
| A 初始解理 | A 低应用-韧性 |
| B 二次解理 | B 低应用-脆性 |
| C 晶间断裂 | C 高应力 |

表 2.2 重要材料性能

性 能	材料是否具有以下的的能力	衡量相应性能的定义, 单位
刚性	在应力作用下能保持本身几何形状	弹性模量 (应力 / 应变) (Pa, MPa, PSi, KSi)
强度	能抵抗应力不会产生永久性的挠度或断裂	屈服强度 拉伸强度 (Pa, MPa, PSi, KSi)
韧性	抵抗裂纹增长 (迅速断裂)	临界应力强度因子 ($\text{Nm}^{-3/2}$, KSi in)

材料的其它性能也是重要的, 但是比上述一些性能的重要性要差些, 包括:

- 延性
- 可焊性
- 抗腐蚀性
- 抗疲劳裂纹扩展
- 抗应力腐蚀裂纹

这些性能大多数情况下是综合作用的形式, 不像上述的 3 个基本性能那样比较容易判断其作用。

2.2 声发射源

人们经过近 40 年的研究已经查明材料中有许多种机制可以产生声发射源。声发射的能量一般由外加负载、相变潜热、外加磁场等来提供。现在人们所提出的大量声发射源模型大致可分为两大类, 一类将源看作一个能量发射器, 并用应力应变等宏观参量来得到这一问题的稳定解, 叫稳态源模型。另一类是应用局域在源附近随时间变化的应力应变场, 计算与源的行为有关的动力学变化, 叫动态源模型。

图 2-18 给出一个稳态源模型的声发射源事件的能量分配过程。对于裂纹增长这样一个事件, 释放的能量仅有一部分转变为弹性波, 其它大部分转变为新界面的表面能、晶格应变能和热能。由图可见, 如能测得源事件发射的弹性波能量和确定能量分配函数, 就可以算出源事件的能量, 这将提供了解材料微观断裂过程的一种方法。然而, 由于受源周围环境、能量释放速率、材料纵波和横波波速不同、表面波的色散等因素的影响, 每个源的分配函数互不相同, 探测器测量到的弹性能量随不同的位置而变化。

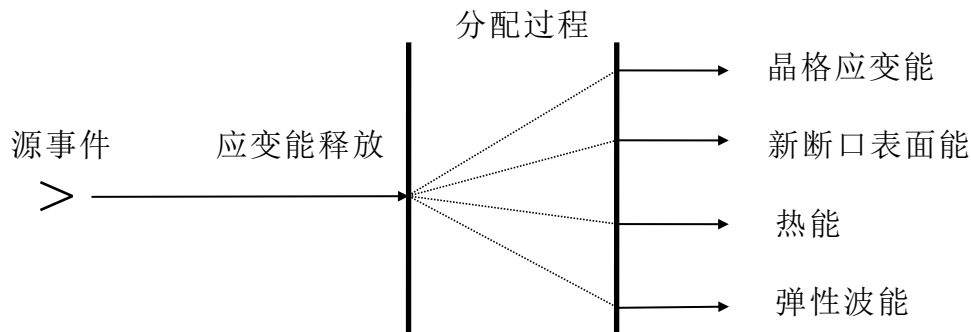


图 2-18 裂纹扩展期间释放应变能的分配过程

2.2.1 突发和连续型声发射

材料内产生的声发射信号具有很宽的动态范围，其位移幅度可以从小于 10^{-15} m 到 10^{-9} m，达到 10^6 量级（120dB）的范围。另外声发射信号的产生率也是变化无常的，所以目前人为地将声发射信号分为突发型和连续型发射。如果信号由区别于背景噪声的脉冲组成，且在时间上可以分开，那么这种信号就叫突发型声发射信号，如图 2-18 所示；如果信号的单个脉冲不可分辨，这些信号就叫做连续型声发射信号，如图 2-19 所示。实际上连续型声发射信号也是由大量小的突发型信号组成的，只不过太密集不能单个分辨而已。

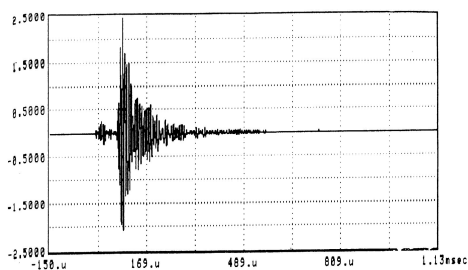


图 2-18 突发型声发射信号

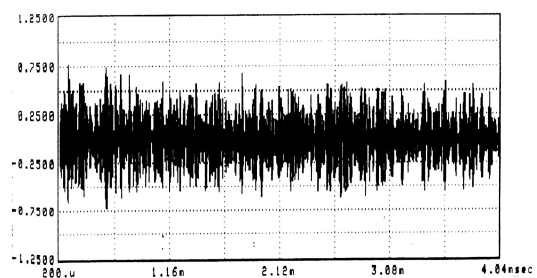


图 2-19 连续型声发射信号

2.2.2 晶体材料中的声发射源

人们经过近 40 年的研究已经查明晶体材料中的声发射源如表 2.3 所示。

(1) 位错—塑性变形

金属材料中声发射与位错运动的密度有关：

$$AE \sim \frac{d}{dt}(N_m) \quad \text{运动位错的密度}$$

N_m 增加：1) 钉扎位错的断开

2) 增殖

N_m 减少：(1) 捕集

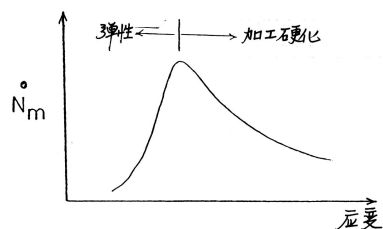
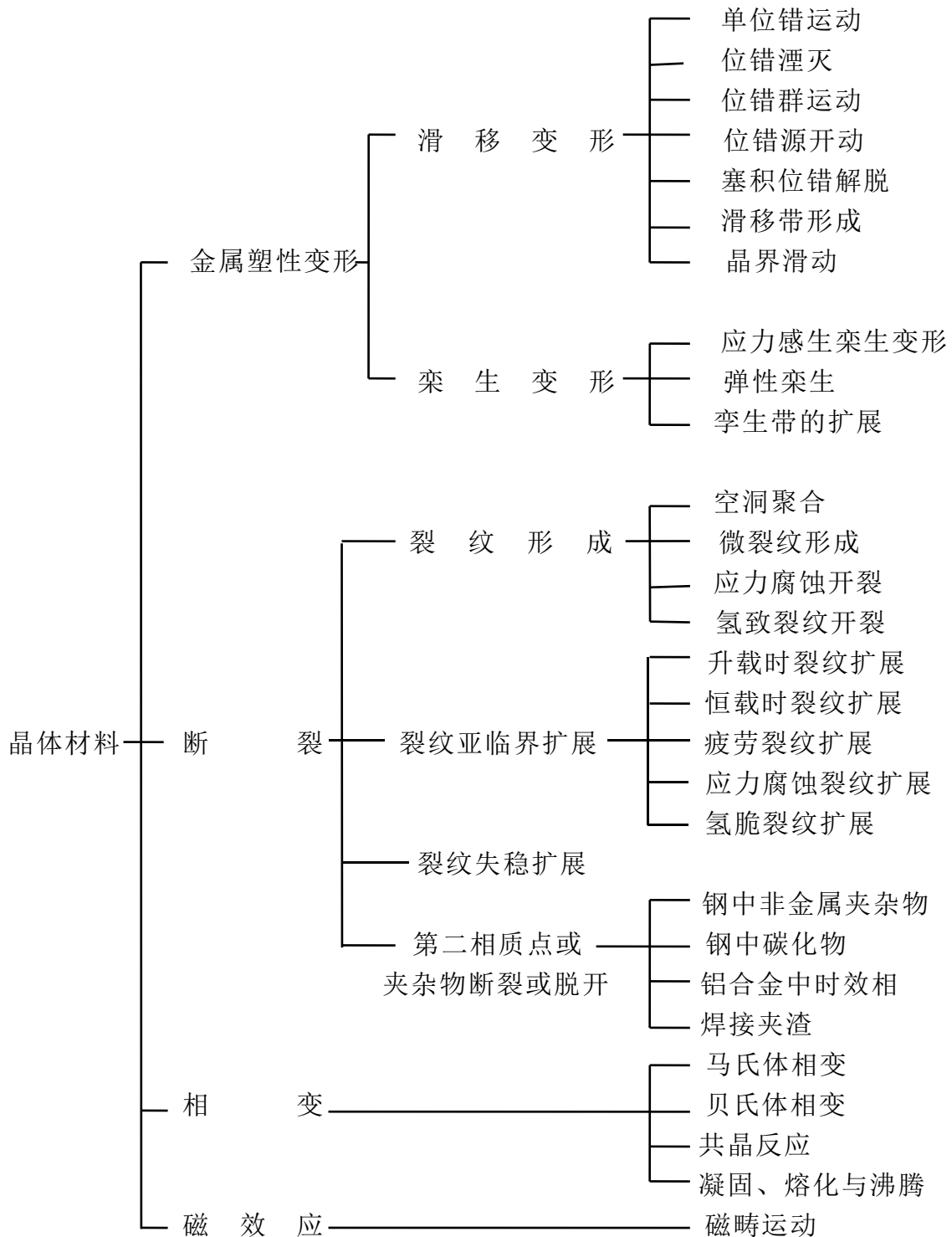


表 2.3



(2)形变孪生

(3)非金属夹杂物

(4)裂纹形成与亚临界裂纹的生长

a. 亚临界裂纹在载荷增加下的生长

b. 载荷增加下的韧性撕裂

- c. 疲劳裂纹的形成和增长
- d. 氢致裂纹
- e. 应力腐蚀开裂

(5)相变

当固体的结晶结构由 1 种排列变为另 1 种排列时固体中就发生了相变。

例如：

钢在 1330°F 以上迅速冷却过程中发生相变。

面心立方结构的奥氏体结晶在剪切的迅速作用下形式完全彼此相同的体心立方针状四面体的马氏体。

只要是在相变过程中产生体积或形状的瞬间改变，就会发生声发射。钢中的马氏体相变就是这样的过程，为所周知的，它也是相当强的声发射源。

在慢速冷却过程中所发生的过程与以上情况正好相反。在这种条件下，面心立方的奥氏体晶格渐渐地转变为体心铁素体晶格，属于原子的逐渐扩散过程。这种由相变来控制的连续的扩散过程只是产生极小的或是产生检测不到的声发射。

在高温条件下陶瓷中的相变是不稳定的。

2.2.3 非金属中的源

- ①微裂纹开裂
- ②宏观开裂
- ③（陶瓷等的）细微开裂
- ④其它

2.2.4 复合材料中的源

(1)复合材料

复合材料是由基体材料和分布于整个基体材料中的第 2 相材料所组成的。概括来说复合材料有 3 类：

1. 扩散增强的

第 2 相是很硬的也是较小的，少于整个体积的 15%，同时当基体材料被加热到接近熔化温度（粉末冶金）时它也不溶解进去。通过限制位错运动来保证强度。

2. 颗粒-增强

第 2 相是很硬的，并且较大，多于 25%，通过颗粒的相对硬度和基体变形的限制来提高强度。

3. 纤维-增强

第 2 相（纤维）的 3 维尺寸中，有 1 维的尺寸与其它 2 维相比要大得多。通过纤维的方向来增强强度。

(2) 纤维增强复合材料

优点：

高强度-按重量比

良好的疲劳性能

良好的抗腐蚀性能

容易制造由少数几个部件组合的结构较复杂的部件。

表 2.4 典型应用的材料

纤维：		
玻璃	热塑性的	聚酯
碳	热固性的	聚酯
KEVLAR		环氧化物
硼	铝	聚酰亚胺
铝	铝	
氮化硅	陶瓷	

不同的制造工艺技术

用手工一层一层地在模子上敷（湿的或经过预处理过的）

缠绕

喷注于模子中

喷涂

复合构架式

蕊轴外绕制

密闭容器和壳体组件（BMC 和 SMC）

不同形式的用于敷制的层状预处理好的材料：

单 1 方向的纤维（壳体或条状）

织物（非定向纤维织成）

断续纤维的层垫（短纤维）

层状复合材料的机械性能

主要决定于纤维分布的方向

复合材料制造过程中的主要问题

纤维起皱和所造成的空洞

纤维之间分布的间隙

孔隙（未能完全排除的蒸汽）

树脂欠缺的位置（强度差）

树酸过多的位置（较脆）

夹杂（其它外来物）

分层（在层间所存留的未能完全排除的蒸汽）

翘曲（由于不适宜的铺制或不适宜的养生处理）

纤维增强复合材料中的声发射源

- ①纤维断裂
- ②基体开裂
- ③纤维和基体的脱开
- ④分层
- ⑤纤维拔出、松弛
- ⑥摩擦

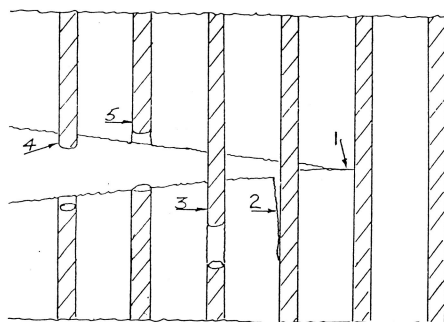


图 2-20

穿透性裂纹 (1)
 撕裂 (2)
 分层破坏

对说明裂纹方向 (x, y, z) 是有实用意义的项目

2.2.5 其它源

- ①压力泄漏
- ②氧化物或氧化层的开裂
- ③夹渣开裂
- ④摩擦源
- ⑤液化和固化
- ⑥元件松动、间歇接触
- ⑦流体和非固体
- ⑧裂纹闭合

2.3 波的传播

材料对于不平衡 / 动态力的响应是……弹性波传播!!!

波的理论解释：波就是材料离开平衡位置的运动。

固体介质中局部变形时，不仅产生体积变形，而且产生剪切变形，因此将激起两种波，即压缩波（纵波）和切变波（横波），它们以不同的速度在介质中传播，当遇到不同介质的界面时会产生反射和折射。任何一种波在界面上反射时都要发生波型转换，同时出现纵波和横波，并各自按反射和折射定律反射和折射。在全内反射时也会出现非均匀波。在固体自由表面还会出现沿表面传播的表面波。因此，声发射波的传播规律与固体介质的弹性性质密切相关。

有根据点声源提出的波的理论（圆形波前——较难理解）和根据平面波所提出的理论（直线波前——较容易理解）。

有连续振荡的理论和短脉冲理论。

在波的理论中进行了大量的“假设的条件”，对于各种各样简单的几何条件才得到了数学的“波方程的解”。我们应用这些理论尽量来理解“实际生活”中所遇到的情况。但是，在实际生活中很少能遇到像上述理论中所的“简单的几何条件”。因此，这些理论也只不过是我们对实际情况的一种初步近似而已。

这是理论与实验相符的唯一的一种情况。这一情况对声发射是很有用的，它通常用于声发射传感器的预标定。

2.3.1 近场脉冲响应

阶跃脉冲力源 $F_0H(t)$ 作用于板时，板表面将产生相当复杂的运动。Knopoff 给出了在力作用点对面的垂直方向质点位移^[2]：

$$U_z(b,0) = \frac{F_0}{2\pi\mu b} \left\{ \frac{w^2(2w^2 - 2 + a^{-2})H(t - b/\alpha)}{(2w^2 - 2 + a^{-2})^2 - 4(w^2 - 1)w(w^2 - 1 + a^{-2})^{\frac{1}{2}}} - \frac{2y(y^2 - 1)(y^2 - 1 + a^2)^{\frac{1}{2}}H(t - b/\beta)}{(2y^2 - 1)^2 - 4(y^2 - 1)y(y^2 - 1 + a^2)^{\frac{1}{2}}} \right\}$$

式中， $w=\alpha t/b$ 、 $y=\beta t/b$ 、 $a=\beta/\alpha$ ，而 β 是切变波速度、 α 是纵波速度、 μ 为剪切模量、 b 为板厚。式中括号内第一项是纵波贡献分量，而第二项是横波贡献，在板中来回反射的波的贡献（第三项之后）在式中略去。其中，最先到达的纵波（P波）的幅度为：

$$U_z = \frac{F_0}{2\pi\mu b} (\beta/\alpha)^2$$

对于具有一般形状的短脉冲力源 $f(t)$ ，该处的速度响应为：

$$v = \frac{\partial U_z}{\partial t} = \frac{1}{2\pi\mu b} (\beta/\alpha)^2 f'(t - b/\alpha) - \frac{4\alpha}{2\pi\mu b^2} (\beta/\alpha)^2 f(t - b/\beta)$$

可以看出，纵波的速度响应与力的变化率成正比，而切变波的速度响应与力的大小成正比。由此获得的厚板正对力源位置的垂直位移应当有如图 2-21 所示的形状，其纵坐标归一化到 $F_0/2\pi\mu b$ 。

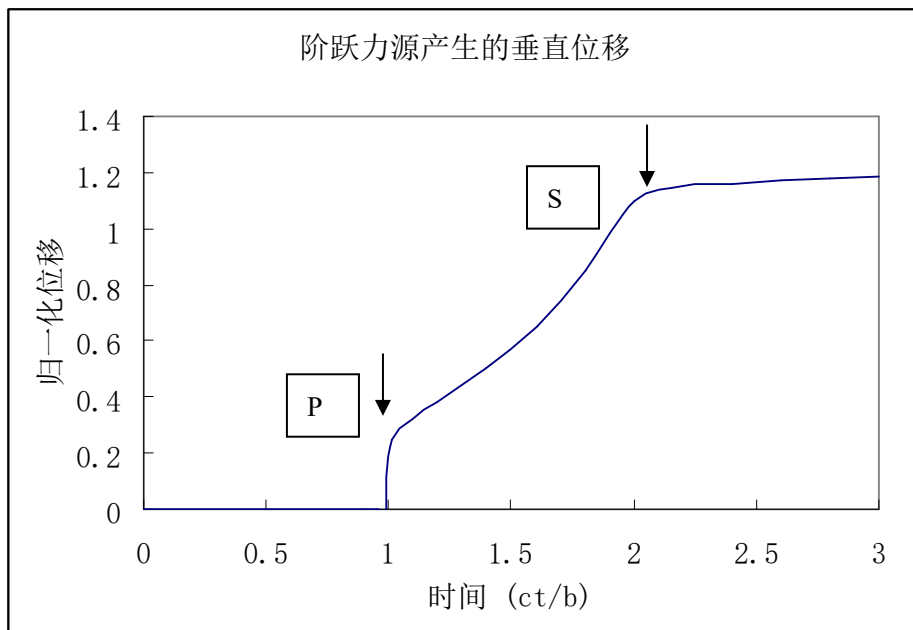


图 2-21 表面阶跃力源在厚板对面产生的垂直位移。P、S 分别相应于纵波、横波到达时刻

质点的位移、速度和加速度

离开平衡位置的距离叫位移（图 1-5）

速度是位移的变化率（不应混淆“质点速度”与“波速”）（图 1-6）

图 1-5

图 1-6

加速度是速度的变化率。（图 1-7）

正弦声波或振动的幅值可以通过位移，速度或加速度的条件来说明。它们互相之间都有关系。（图 1-8）

图 1-7

图 1-8

正弦波

正弦波—正弦和余弦—的波形通过它的名称就可以表示，其表达式：

EMBED Equation.3

上式中：y —— 位移；x —— 位置；t —— 时间；λ —— 波长；f —— 频率。

正弦波之所以重要的原因有两个：

它们在许多不同的有力的数学理论的基础；

许多物理系统（单摆，振动体，旋转系统）的行为都属这一类。

对于正弦波来说，材料中质点的运动可以通过时间的函数来描绘出来：

重要提示：

$$T = 1 / f$$

或者可以取材料的瞬时运动（位移）以观察不同位置上的

1-9

1-10

以上两个图都是正弦曲线；它们之间是通过波的传输公式 $y = f(x \pm Ct)$ 相互联系在一起，其最重要的关系式是：

$$\text{波速} = \text{频率} \times \text{波长} \quad (C = f \lambda)$$

2.3.2 传播模式

声发射波在介质中的传播，根据质点的振动方向和传播方向的不同，可构成纵波、横波、表面波、兰姆波等不同传播模式。

纵波（压缩波）：质点的振动方向与波的传播方向平行，可在固体、液体、气体介质中传播。

横波（剪切波）：质点的振动方向与波的传播方向垂直，只能在固体介质中传播。

表面波（瑞利波）：质点的振动轨迹呈椭圆形，沿深度约为 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。

兰姆波：因物体两平行表面所限而形成的纵波与横波组合的波，它在整个物体内部传播，质点作椭圆轨迹运动，按质点的振动特点可分为对称型（扩展波）和非对称型（弯曲波）两种。

声波的不同型式

纵波

质点运动的方向

波传播的方向

图 1-11

(λ = 波长 A——压缩区域 B——反射区域)
横波(剪切波)

图 1-12

声波的不同型式

表面波(瑞利波)

波传播的整个表面上的各个点都是以椭圆的轨迹进行振动的。

板波(莱姆波)

由于平板上两个表面的影响,所以板中的波是比较复杂的。

板中有两种大家都比较熟悉的波的模式,其特点是:

——质点的运动是椭圆的轨迹

——速度与频率有关(“散射”)

声发射的绝大部分能量是通过以上两种简单的波的模式来传播的,已知:

——S0——最低的“对称的”模式。

——A0——最低的“非对称的”模式。

弹性刚度与波长和板厚之间的关系有关,因此,波速就与厚度/波长有关,或是认为波速与厚度(频率)有关。

运动的特点是:(表 1-2)

莱姆波在板中速度的分散

图 1-14

图 1-15

2.3.3 模式转换、反射和折射

在固体介质中,声发射源处同时产生纵波和横波两种传播模式。它们传播到不同材料界面时,可产生反射、折射和模式转换。两种入射波除各自产生反射(或折射)纵波与横波外,在半无限体自由表面上,一定的条件下还可转换成表面波,见图 2-1。厚度接近波长的薄板中又会发生板波。厚度远大于波长的厚壁结构中,波的传播变得更为复杂,其示意见图 2-2。

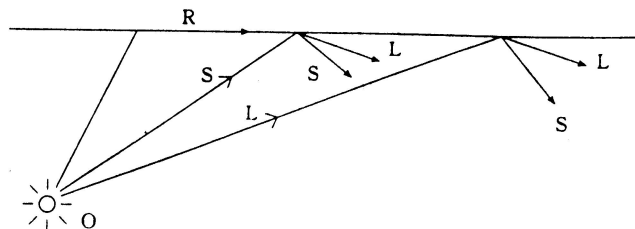


图 2-1 波的反射与模式转换

O—波源 L—纵波 S—横波 R—表面波

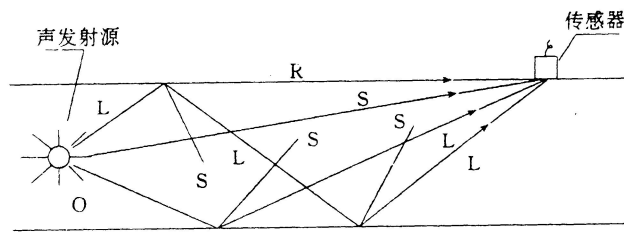


图 2-2 厚板中传播示意图

O—波源 L—纵波 S—横波 R—表面波

声发射波经界面反射、折射和模式转换，各自以不同波速、不同波程、不同时序到达传感器，因而，波源所生一尖脉冲波到达传感器时，可以纵波、横波、表面波或板波及其多波程迟达波等复杂次序，分离成数个尖脉冲或经相互叠加而成为持续时间很长的复杂波形，有时长达数 ms。在钛合金气瓶上，对铅笔芯模拟源的响应波形一例如图 2-3 所示。除外，再加上后述传感器频响特性及传播衰减等的影响，信号波形的上升时间变慢，幅度下降、持续时间变长、到达时间延迟、频率成份向低频偏移。这种变化，不仅对声发射波形的定量分析，而且对波形的常规参数分析也带来复杂的影响，应予以充分注意。

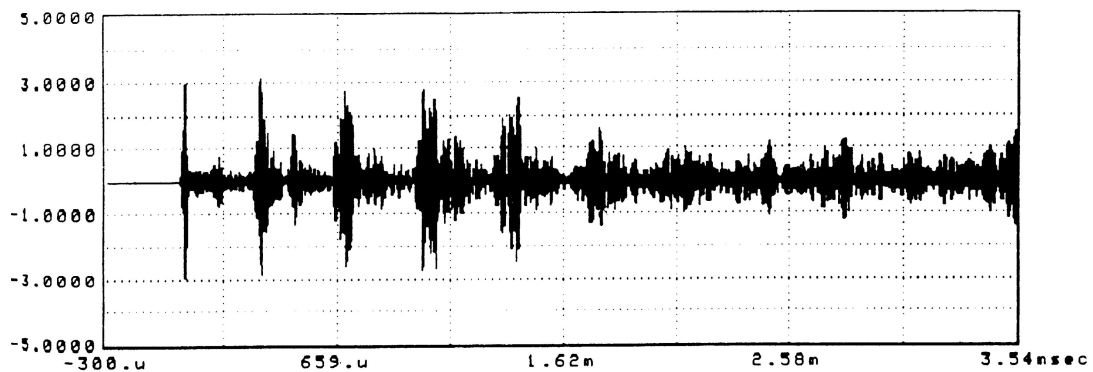


图 2-3 波形的分离与持续

2.3.4 材料中的波速

波速是材料的性质。

弹性力作用到材料的某一部分质量上会产生波的运动，同时也会使这部分质量的材料反向回到它本身原有的位置上，因此

$$\text{波速} = (\text{弹性刚度} / \text{密度})^{1/2}$$

式中 弹性刚度——应力 / 应变。

弹性刚度与材料的变形过程有关。例如：

体积弹性模量 = 体积压缩（例如：液体）

杨氏模量 = 线，细杆在拉伸过程中直径会减小

板模量 = 板在拉伸过程中厚度会减小

剪切模量 = 体积不发生变化过程中的剪切变形

因此，不同形式的波在传播过程中具有不同的速度，而且它的速度决定于所产生的波的运动的形式。

波的传播速度，是与介质的弹性模量和密度有关的材料特性，因而不同的材料，波速也不同。不同的传播模式也具有不同的传播速度。在均匀介质中，纵波与横波的速度分别可用下式表达。

$$V_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\sigma}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}}; \quad v_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\sigma)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2-1)$$

式中 V_l —— 纵波速度；
 v_t —— 横波速度；
 σ —— 泊松比；
 E —— 杨氏模量；
 G —— 切变模量；
 ρ —— 密度。

在同种材料中，不同模式的波速之间有一定比率关系。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，约分布在纵波速度和横波速度之间。在实际结构中，传播速度还受到诸如材料类型、各向异性、结构形状与尺寸、内容介质等多种因素的影响，因而传播速度实为一种易变量。

传播速度，与波的频率和波长成正比，等于频率与波长的乘积。

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源定位精度的主要因素。在实际应用中，波速难以用理论计算，需要用实验测量，例如，在被检件表面上，用笔芯模拟源和声发射仪时差测量功能，测得两个传感器之间的时差，再用时差除以传感器间距即可得到波速。以实测波速算出的定位精度一般可在传感器间距的 1~10% 范围内变化。

就常见容器类二维结构而言，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。多数金属容器中，典型传播速度约为 3000m/s，在无法测得波速的情况下，常可以作为定位计算的初设值。

表 1-1 声速和声阻抗表

材料	纵波速度 In/sec (105Km/sec)	横波速度 In/sec (105Km/sec)	声阻抗 In/sec (105Km/sec)
空气	0.130	0.33	0.0004
铝	2.56	3.12	23.117
铝氧化物	3.99	9.2	35.832
铜	5.11	2.93	58.923
碳化硼	4.31	1.0	26.4
黄铜	1.74	3.0	802.036
镉	1.12	8.0	591.524
铜	1.84	7.0	892.341
玻璃(茶色)	2.15	3.1	23.018
甘油	0.75	1.9	2.42
金	1.33	2.0	471.262
水	1.64	0.0	82.03
钢	2.25	7.1	23.047
铁	2.35	9.1	33.245
铸铁	1.84	6.1	02.633
铅	0.85	2.0	30.724
镁	2.35	8.1	23.010
汞	0.57	1.4	19.6
钨	2.56	3.1	33.464
锰	2.15	4.1	12.747
镍	0.63	1.6	2.1
镍	2.25	6.1	23.049
尼隆	6.61	0.2	60.431
油	0.67	1.7	1.5
铂	1.33	3.0	671.769
有机玻璃	1.12	7.0	431.13
聚乙烯	0.71	9.0	20.51
聚苯乙烯	0.93	2.4	41.12
聚氨酯	0.71	9.0	1.9
石英	2.35	8.0	872.215
橡胶(丁基)	0.71	8.0	2.0
银	1.43	6.0	61.638

(续)

材料	纵波速度 In/sec (105Km/sec)	横波速度 In/sec (105Km/sec)	声阻抗 In/sec (105Km/sec)
钢(软)	2.35	9.1	33.246
不锈钢	2.35	8.1	23.145
聚四氟乙烯	0.61	4.0	3.0
锡	1.33	3.0	71.724
钛	2.46	1.1	23.127
钨	2.05	2.1	12.910
铀	1.33	4.0	82.063
水	0.58	4.1	48
锌	1.74	2.0	92.429

2.3.5 复合材料中各项异性传播

2.3.6 几何效应

试件几何形状的影响
试件中的共振

图 1-19

EMBED Equation.3

2.4 衰减

2.3.1 几何衰减

2.4.2 色散

2.4.3 散射和衍射

2.4.4 由能量损耗机制引起的衰减

2.3.5 衰减与频率的关系

衰减就是信号的幅值随着离开声源距离的增加而减小。衰减控制了声源距离的可检测性。因此，对于声发射检验来说它是确定传感器间距的关键因素。

引起波衰减的原因有很多种，尤其与决定波幅度的物理参数有关。引起波幅下降的衰减机制也有多种，但并非所有的衰减机制都引起能量的损失，某些衰减机制仅引起波的传播模式转变和能量的重新再分布，并无实际的能量损失。下面是波传播的几种主要衰减因素：

1) 几何衰减：当波由一个局域的源所产生时，波动将从源部位向所有的方向传播。即使在无损耗的介质中，整个波前的能量保持不变，但散布在整个波前球面上，随着波传播距离的增加，波的幅度必定下降。

2) 色散衰减：色散是在某些物理系统中波速随频率变化引起的一种现象。由于实际的声发射信号包括多种频率的分量，而波速 C 为频率的函数，波包中不同频率的分量在介质中将将以不同的速度传播，因此随着波传播距离的增加，波包的幅度将下降。

3) 散射和衍射衰减：波在具有复杂边界或不连续(如空洞、裂纹、夹杂物等)的介质中传播将与这些几何不连续产生相互作用产生散射和衍射现象。由于波的散射和衍射都能导致波幅下降(某些情况下增加)，两种情况都可引起波的衰减。最常见的散射原因之一是某些材料中不均匀晶粒引起的。例如粗晶结构的铸铁对 1MHz 以上频率范围的波产生明显的散射，由散射引起的衰减也是十分显著的。

4) 由能量损耗机制(内摩擦)引起的衰减：在上述讨论的波的衰减机制中，如果固体为弹性介质，所有波(原始波、反射波、散射波、衍射波、色散等)的总机械能保持不变。然而，在实际的介质中，波传播的总机械能不能保持不变，而是逐渐衰减。由于热弹效应，机械能可以被转变为热能。如果应力超过介质的弹性极限，塑性变形也引起机械能的损失。裂纹扩展将波的机械能转换为新的表面能，波与介质中位错的相互作用也可引起能量的损失和衰减。塑性材料的粘性行为、界面之间的摩擦和复合材料中非完全结合的夹杂物或纤维都能引起波的能量损耗和衰减。磁

弹相互作用、金属中的电子相互作用、顺磁电子或核子的自旋机制等都能引起波的能量损失和衰减。无论上述那一种机制引起机械能的损耗，波的幅度都将随波通过介质中的传播而下降。

在实际结构中，上述所有机制都使声发射信号得到衰减，但衰减最终只能通过实验来测得。

原因：主要影响：

1. 波的几何扩展

1.1 由于单纯的几何因素

1.2 由于损失到附近的介质中（例如：水）

2. 波的吸附（阻尼，内摩擦）

次要影响：

3. 障碍。例如，容器和贮罐上的接管能够“遮避”声源。焊缝能引起明显的衰减也已经有报导。

4. 不同模式的波以不同的速度传播。

5. 速度的分散（不同的频率以不同的速度传播）。

6. 晶粒边界的散射（在金属中，对超声检验很重要，但有些情况下对声发射也是很重要的）。

声发射信号的衰减

在大多数情况下，在较大的传播介质中，对于信号衰减来说通常最重要的是近场的几何衰减及远场的内摩擦。

波传播材料中的内摩擦的机理对于非金属材料来说是最重要的。**随着频率的增加内摩擦也增加。**能量可以通过结构的表面损失到临近介质中去。如果结构是处于空气中时，通常这一点就可以忽略不计，但是，如果结构是装有液体（或浸没在内）时，这一点就会变得非常重要。（图 1-20，图 1-21）

（4）其它因素：①相邻介质“泄漏”，即由于波向相邻介质“泄漏”而造成波的幅度下降，例如，容器中的水介质，②障碍物，即容器上的接管、人孔等障碍物也可造成幅度下降。

（5）实际结构中的衰减

实际结构中，波的衰减机制很复杂，难以用理论计算，只能用试验测得。例如，在被检件表面上，利用铅笔芯模拟源和声发射仪，按一定的间距测得幅度（dB）～距离（m）曲线。图 2-4 示出了长 12.2m，内径 1.2m，厚度 12.5mm 的气压容器封头上，用不同频率测得的幅度—距离曲线。

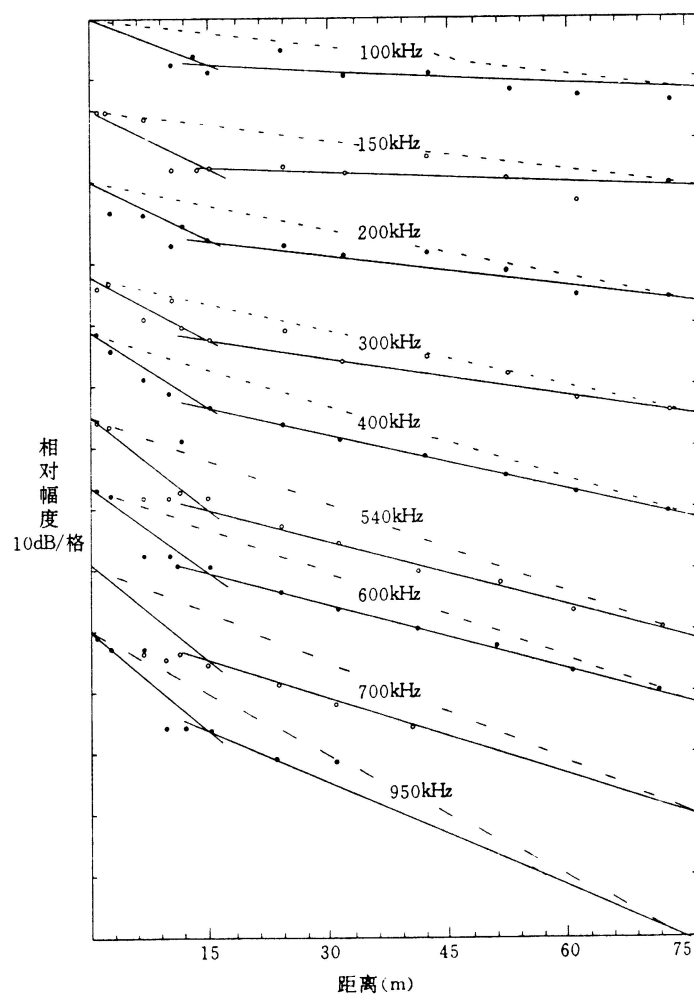


图 2-4 气压容器衰减曲线^[6]

传播衰减的大小，关系到每个传感器可监视的距离范围，在源定位中成为确定传感器间距或工作频率的关键因素。在实际应用中，为减少衰减的影响而常采取的措施包括：降低传感器频率或减小传感器间距，例如，对复合材料的局部监视通常采用 150kHz 的高频传感器，而大面积监视则采用 30kHz 的低频传感器，对大型构件的整体检测，可相应增加传感器的数量。

2.3.5 衰减与频率的关系

随着频率的增加内摩擦也增加，衰减加快。

2.5 Kaiser 和 Felicity 效应、Felicity 比

2.5.1 金属中

2.5.2 复合材料中

2.5.3 其它材料中（岩石等）

2.5.1 凯赛尔效应

材料的受载历史，对重复加载声发射特性有重要影响。重复载荷到达原先所加最大载荷以前不发生明显声发射，这种声发射不可逆性质称为凯赛尔效应。多数金属材料

料和岩石中，可观察到明显的凯赛尔效应。但是，重复加载前，如产生新裂纹或其它可逆声发射机制，则凯赛尔效应会消失。

凯赛尔效应在声发射技术中有着重要用途，包括：①在役构件的新生裂纹的定期过载声发射检测；②岩体等原先所受最大应力的推定；③疲劳裂纹起始与扩展声发射检测，④通过预载措施消除加载销孔的噪声干扰，⑤加载过程中常见的可逆性摩擦噪声的鉴别。

2.5.2 费利西蒂效应和费利西蒂比

材料重复加载时，重复载荷到达原先所加最大载荷前发生明显声发射的现象，称为费利西蒂效应，也可认为是反凯赛尔效应。重复加载时的声发射起始载荷 (P_{AE}) 对原先所加最大载荷 (P_{max}) 之比 (P_{AE} / P_{max})，称为费利西蒂比。

费利西蒂比作为一种定量参数，较好地反映材料中原先所受损伤或结构缺陷的严重程度，已成为缺陷严重性的重要评定判据。树脂基复合材料等粘弹性材料，由于具有应变对应力的迟后效应而使其应用更为有效。费利西蒂比大于 1 表示凯赛尔效应成立，而小于 1 则表示不成立。在一些复合材料构件中，费利西蒂比小于 0.95 作为声发射源超标的重要判据。

2.6 影响声发射特性的因素

声发射技术的应用均以材料的声发射特性为基础。不同材料的声发射特性差异很大。即使对同一材料而言，影响声发射特性的因素也十分复杂，如热处理状态、组织结构、试样形状、加载方式、受载历史、温度环境和气氛等。对同一试样作声发射试验，在同样的内部和外部条件下，由于试样的声发射源不同，也会表现出不同的声发射特性。表 2.2 列出了通常影响材料声发射信号强度的因素，并把它们分为内部因素和外部因素两大类。

表 2.2 影响材料声发射信号强度的因素

条 件	产生高强度信号的因素	产生低强度信号的因素
材料特性 (内部因素)	高强度材料 各向异性材料 不均匀材料 铸造材料 大晶粒 马氏体相变 核辐照过的材料	低强度材料 各向同性材料 均匀材料 锻造材料 细晶粒 括散型相变 未辐照过的材料
试验条件 (外部因素)	高应变速率 无预载 厚断面 低温	低应变速率 有预载 薄断面 高温

	有腐蚀介质	无腐蚀介质
形变和断裂方式 (内外部因素综合作用)	孪生变形 解理型断裂 有缺陷材料 裂纹扩展 复合材料的纤维断裂	非孪生变形 剪切型断裂 无缺陷材料 塑性变形 复合材料的树脂断裂
仪器特性 (外部因素)	通频带宽度 传感器的响应模式和频率 系统总增益 设置的阈值电压	

第 4 章 声发射信号处理方法

目前采集和处理声发射信号的方法可分为两大类。一种为以多个简化的波形特征参数来表示声发射信号的特征，然后对这些波形特征参数进行分析和处理；另一种为存贮和记录声发射信号的波形，对波形进行频谱分析。简化波形特征参数分析方法是自二十世纪五十年代以来广泛使用的经典的声发射信号分析方法，目前在声发射检测中仍得到广泛应用，且几乎所有声发射检测标准对声发射源的判据均采用简化波形特征参数。

4.1 经典信号处理方法

4.1.1 波形特性参数

- a. 幅度分析、幅度测量的单位
- b. 脉冲持续时间分析
- c. 上升时间分析
- d. 事件和事件率处理
- e. 波形包络面积(能量)

图 4.1 为突发型标准声发射信号简化波形参数的定义。由这一模型可以得到如下参数：

- (1) 波击（事件）计数；
- (2) 振铃计数；
- (3) 能量；
- (4) 幅度；
- (5) 持续时间；
- (6) 上升时间；

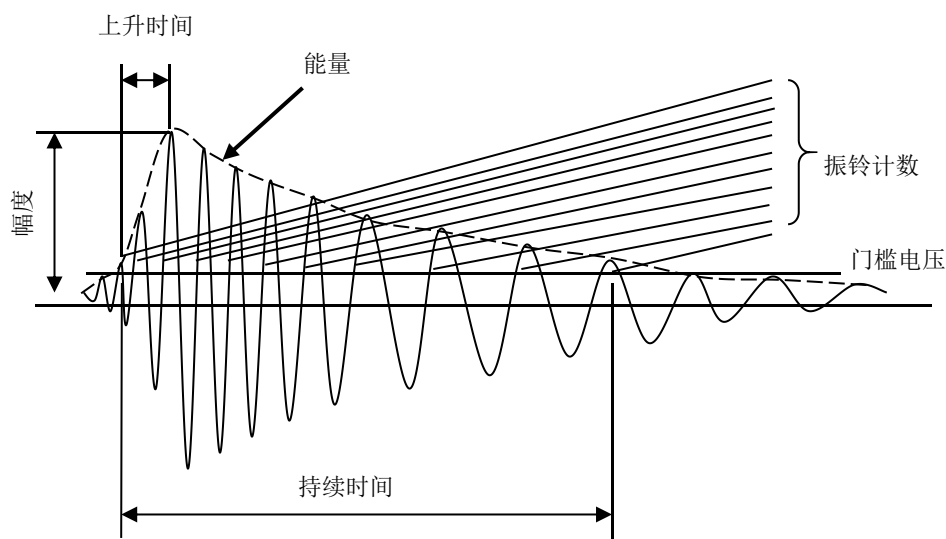


图 4.1 声发射信号简化波形参数的定义

对于连续型声发射信号，上述模型中只有振铃计数和能量参数可以适用。为了更确切地描述连续型声发射信号的特征，由此又引入了如下两个参数：

- (7) 平均信号电平；
- (8) 有效值电压。

声发射信号的幅度通常以 dB 表示，定义传感器输出 $1\mu\text{V}$ 时为 0dB，则幅值为 V_{ae} 的声发射信号的 dB 幅度可由下式算出：

$$\text{dBae} = 20 \lg (V_{ae}/1\mu\text{V})$$

表 4.1 列出了常用整数幅度 dBae 对应的传感器输出电压值。

dBae	0	20	40	60	80	100
V_{ae}	$1\mu\text{V}$	$10\mu\text{V}$	$100\mu\text{V}$	1mV	10mV	100mV

表 4.2 列出了常用声发射信号特性参数的含义和用途。

表 4.2 声发射信号参数

参数	含义	特点与用途
撞击 (Hit) 和撞击计数	超过门槛并使某一通道获取数据的任何信号称之为一个撞击。所测得的撞击个数，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	产生声发射的一次材料局部变化称之为一个声发射事件。可分为总计数、计数率。一阵列中，一个或几个撞击对应一个事件	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	越过门槛信号的振荡次数，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，但受门槛值大小的影响
幅度	信号波形的最大振幅值，通常用 dBae 表示（传感器输出 $1\mu\text{V}$ 为 0dB）	与事件大小有直接的关系，不受门槛的影响，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)	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。对门槛、工作频率和传播特性不甚敏感，可取代振铃计数，也用于波源的类型鉴别
持续时间	信号第一次越过门槛至最终降至门槛所经历的时间间隔，以 μs 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	信号第一次越过门槛至最大振幅所经历的时间间隔，以 μs 表示	因受传播的影响而其物理意义变得不明确，有时用于机电噪声鉴别

有效值电压 (RMS)	采样时间内, 信号的均方根值, 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	提供的信息和用途与 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
到达时间	一个声发射波到达传感器的时间, 以 μs 表示	决定了波源的位置、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, 包括时间、载荷、位移、温度及疲劳周次等	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

这些参数的累加可以被定义为时间或试验参数(如压力、温度等)的函数, 如总事件计数、总振铃计数和总能量计数等。这些参数也可以被定义为随时间或试验参数变化的函数, 如声发射事件计数率、声发射振铃计数率和声发射信号能量率等。这些参数之间也可以任意两个组合进行关联分析, 如声发射事件-幅度分布、声发射事件能量-持续时间关联图等。

4.1.2 分析识别技术

(1) 声发射信号参数的列表显示和分析

列表显示是将每个声发射信号参数进行时序排列和直接显示, 包括信号到达时间, 各个声发射信号参数、外变量、声发射源的坐标等。表 4.3 为压力容器升压过程中采集到的裂纹扩展声发射信号的特征参数数据列表。在声发射检测前对声发射系统进行灵敏度测定和模拟源定位精度测试时, 直接观察数据列表。对声发射源的强度进行精确分析时也经常采用数据列表显示和分析。

表 4.3 声发射信号特征参数数据列表

到达时间	压力	通道	上升时间	计数	能量	持续时间	幅度
MM:SS.mmmuuun	PARA1	CH	RISE	COUN	ENER	DURATION	AMP
01:18.9101730	36.60	3	81	92	57	3222	59
01:18.9103205	36.60	12	133	49	48	6243	51
01:18.9104999	36.60	4	69	62	86	6899	55
01:18.9112070	36.60	8	29	27	53	1947	51

(2) 声发射信号单参数分析方法

由于早期的声发射仪器只能得到计数、能量或者幅度等很少的参数, 因此人们早期对声发射信号的分析 and 评价通常采用单参数分析方法, 最常用的单参数分析方法为

计数分析法、能量分析法和幅度分析法。

1) **计数法**：计数法是处理声发射脉冲信号的一种常用方法。目前应用的计数法有声发射事件计数率与振铃计数率及它们的总计数，另外还有一种对振幅加权的计数方式，称为“加权振铃”计数法。声发射事件是由材料内局域变化产生的单个突发型信号，声发射计数(振铃计数)是声发射信号超过某一设定门槛的次数，信号单位时间超过门槛的次数为计数率，声发射计数率依赖于传感器的响应频率、换能器的阻尼特性、结构的阻尼特性和门槛的水平。对于一个声发射事件，由换能器探测到的声发射计数为：

$$N = \frac{f_0}{\beta} \ln \frac{V_p}{V_t} \quad (4.1)$$

式中 f_0 是换能器的响应中心频率， β 为波的衰减系数， V_p 是峰值电压， V_t 为阈值电压。计数法的缺点是易受样品几何形状、传感器的特性及连接方式、门槛电压、放大器和滤波器工作状况等因素的影响。

2) **能量分析法**：由于计数法测量声发射信号存在上述缺点，尤其对连续型声发射信号更明显，因而通常采用测量声发射信号的能量来对连续型声发射信号进行分析。目前，声发射信号的能量测量是定量测量声发射信号的主要方法之一。声发射信号的能量正比于图 4.1 中声发射波形的面积，通常用均方根电压 (V_{rms}) 或均方电压 (V_{ms}) 来进行声发射信号的能量测量。但目前声发射仪器多用数字化电路，因而也可直接测量声发射信号波形的面积。对于突发型声发射信号可以测量每个事件的能量。

一个信号 $V(t)$ 的均方电压和均方根电压定义如下：

$$V_{ms} = \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} V^2(t) dt \quad (4.2)$$

$$V_{rms} = \sqrt{V_{ms}} \quad (4.3)$$

式中， ΔT 是平均时间， $V(t)$ 是随时间变化的信号电压。根据电子学中的理论，可以得到 V_{ms} 随时间的变化就是声发射信号的能量变化率，声发射信号从 t_1 到 t_2 时间内的总能量 E 可由下式表示：

$$E \propto \int_{t_1}^{t_2} (V_{rms})^2 dt = \int_{t_1}^{t_2} V_{ms} dt \quad (4.4)$$

声发射信号能量的测量可以直接与材料的重要物理参数(如发射事件的机械能、应变率或形变机制等)直接联系起来，而不需要建立声发射信号的模型。能量测量同样解决了小幅度连续型声发射信号的测量问题。另外，测量信号的均方根电压或均方电压也有很多优点。首先， V_{rms} 和 V_{ms} 对电子系统增益和换能器耦合情况的

微小变化不太敏感，且不依赖于任何阈值电压，不象计数技术一样与阈值的大小有紧密关系。其次， V_{rms} 和 V_{ms} 与连续型声发射信号的能量有直接关系，但对计数技术来说，根本不存在这样的简单关系。第三， V_{rms} 与 V_{ms} 很容易对不同应变率或不同样品体积进行修正。

3) 幅度分析法：信号峰值幅度和幅度分布是一种可以更多地反映声发射源信息的处理方法，信号幅度与材料中产生声发射源的强度有直接关系，幅度分布与材料的形变机制有关。声发射信号幅度的测量同样受换能器的响应频率、换能器的阻尼特性、结构的阻尼特性和阈值电压水平等因素的影响。通过应用对数放大器，既可对声发射大信号也可对声发射小信号进行精确的峰值幅度测量。

人们对声发射信号的幅度、事件和计数得到如下经验公式：

$$N = \frac{Pf\tau}{b} \quad (4.5)$$

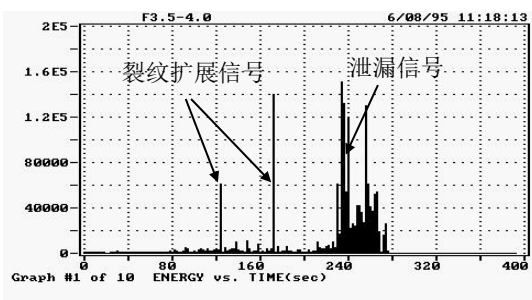
式中：

- N = 声发射信号累加振铃计数；
- P = 声发射信号事件总计数；
- f = 换能器的响应频率；
- τ = 声发射事件的下降时间；
- b = 幅度分布的斜率参数。

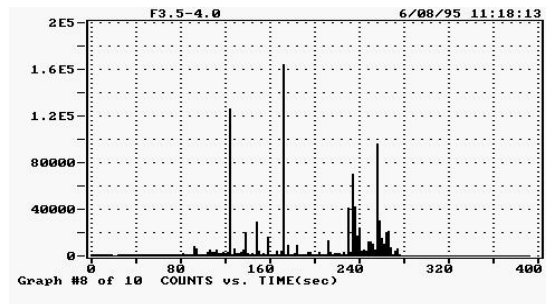
(3) 经历图分析方法

声发射信号经历分析方法是通过对声发射信号参数随时间或外变量变化的情况进行分析，从而得到声发射源的活动情况和发展趋势。最常用和最直观的方法是图形分析，如图 4.2 (a~d) 所示为一台压力容器上的裂纹在加压过程中裂纹扩展并最终导致泄漏的声发射信号随时间的变化图。采用经历图分析方法对声发射源进行分析可达到如下目的：

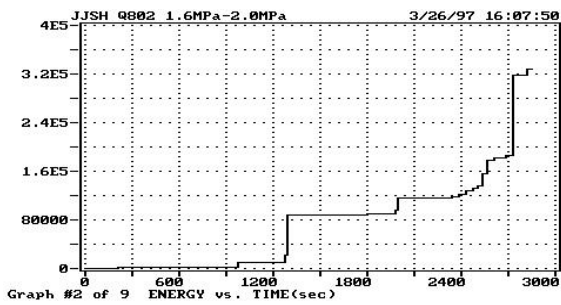
- (1) 声发射源的活动性评价；
- (2) 费利西蒂 (Felicity) 比和凯赛尔 (Kaiser) 效应评价；
- (3) 恒载声发射评价；
- (4) 起裂点测量。



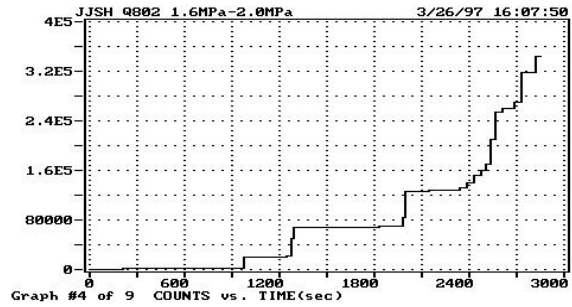
(a) 能量率随时间的变化图



(b) 计数率随时间的变化图



(c) 总能量随时间的变化曲线

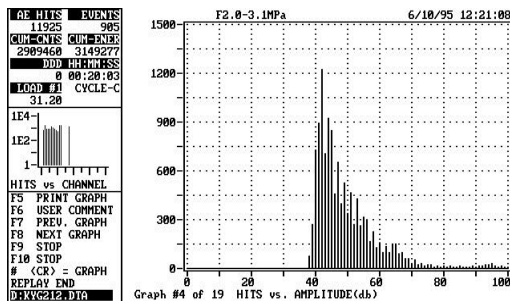


(d) 总计数随时间的变化曲线

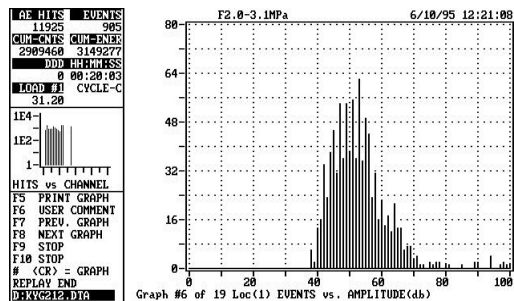
图 4.2 压力容器加压过程中声发射信号随时间的变化经历图

(4) 分布分析方法

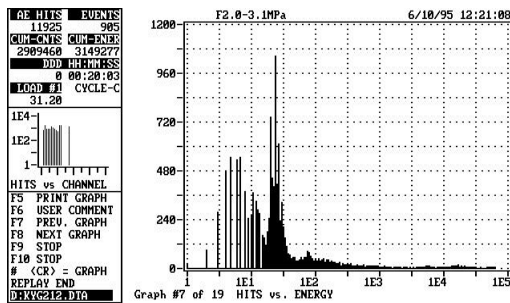
声发射信号分布分析方法是将声发射信号撞击计数或事件计数按信号参数值进行统计分布分析。一般采用分布图进行分析，纵轴选择撞击计数或事件计数，而横轴可选择声发射信号的任一参数。横轴选用某一个参数即为该参数的分布图。如幅度分布、能量分布、振铃计数分布、持续时间分布、上升时间分布等，其中幅度分布应用最为广泛。分布分析可用于发现声发射源的特征，从而达到鉴别声发射源类型的目的，例如金属材料的裂纹扩展与塑性变形、复合材料的纤维断裂与基材开裂等；该方法也经常用于评价声发射源的强度。图 4.3 为一台压力容器在加压过程中裂纹扩展声发射信号撞击数和定位源事件的部分参数分布图。



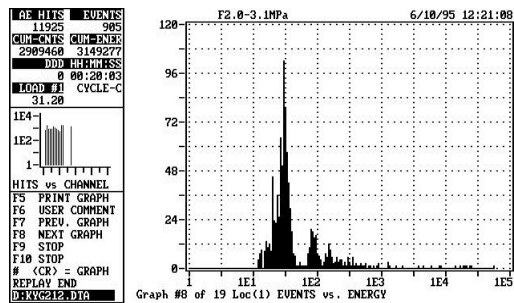
(a) 所有撞击信号的幅度分布图



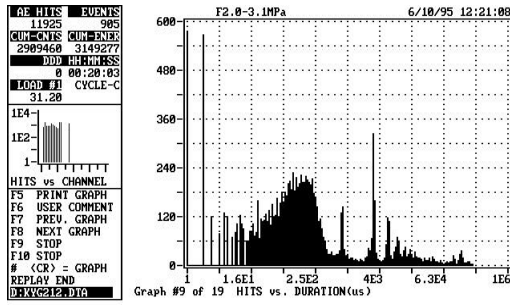
(b) 所有定位源信号的幅度分布图



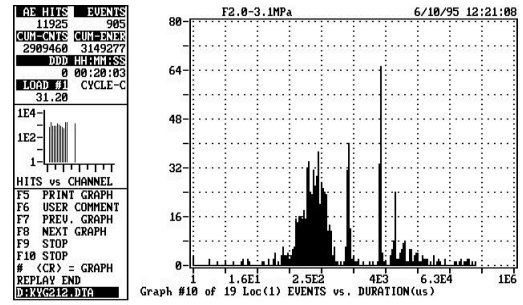
(c) 所有撞击信号的能量分布图



(d) 所有定位源信号的能量分布图



(e) 所有撞击信号的持续时间分布图



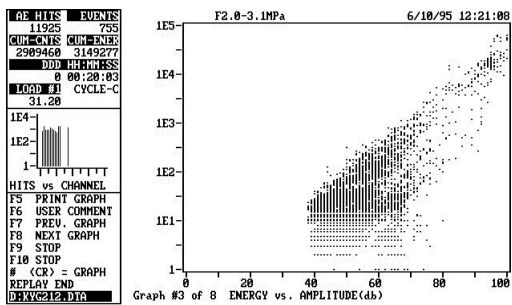
(f) 所有定位源信号的持续时间分布图

图 4.3 压力容器在加压过程中裂纹扩展声发射信号的参数分布图。

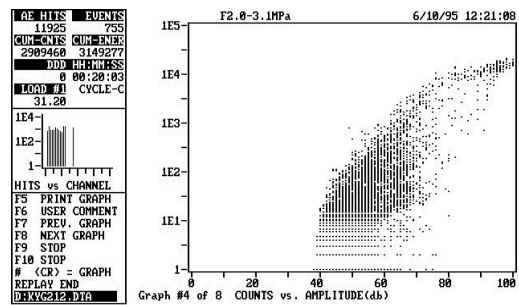
(5) 关联分析方法

关联分析方法也是声发射信号分析中最常用的方法，对任意两个声发射信号的波形特征参数可以作它们之间的关联图进行分析，图中二维坐标轴各表示一个参数，每个显示点对应于一个声发射信号撞击或事件。通过作出不同参量两两之间的关联图，可以分析不同 AE 源的特征，从而能起到鉴别 AE 源的作用。如有些电子干扰信号通常具有很高的幅度，但能量却很小，通过采用幅度—能量关联图即可将其区分出来；对于压力容器来说，内部介质泄漏信号与容器壳体产生的信号相比，具有长得多的持续时间，通过应用能量—持续时间或幅度—持续时间关联图分析，很易发现压力容器的泄漏。美国 MONPAC 声发射检验俱乐部以声发射信号计数与幅度的关联图的形态来评价金属压力容器声发射检验数据的质量。

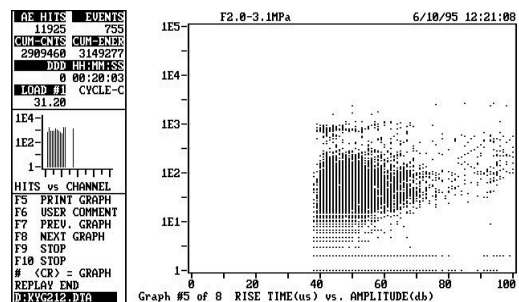
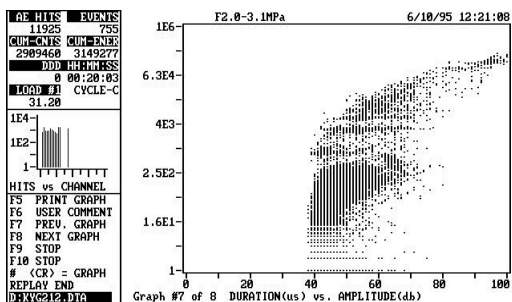
图 4.4 (a~h) 为一台压力容器在加压过程中裂纹扩展声发射信号撞击数的部分典型的关联图。图 4.5 (a, b) 所示为一台压力容器上的裂纹在加压过程中裂纹扩展并最终导致泄漏的声发射信号能量和计数与持续时间的关联图，从图中可见，在同等能量和计数值的情况下，泄漏信号的持续时间比裂纹扩展信号的持续时间大得多。



(a) 能量与幅度的关联图



(b) 计数与幅度的关联图



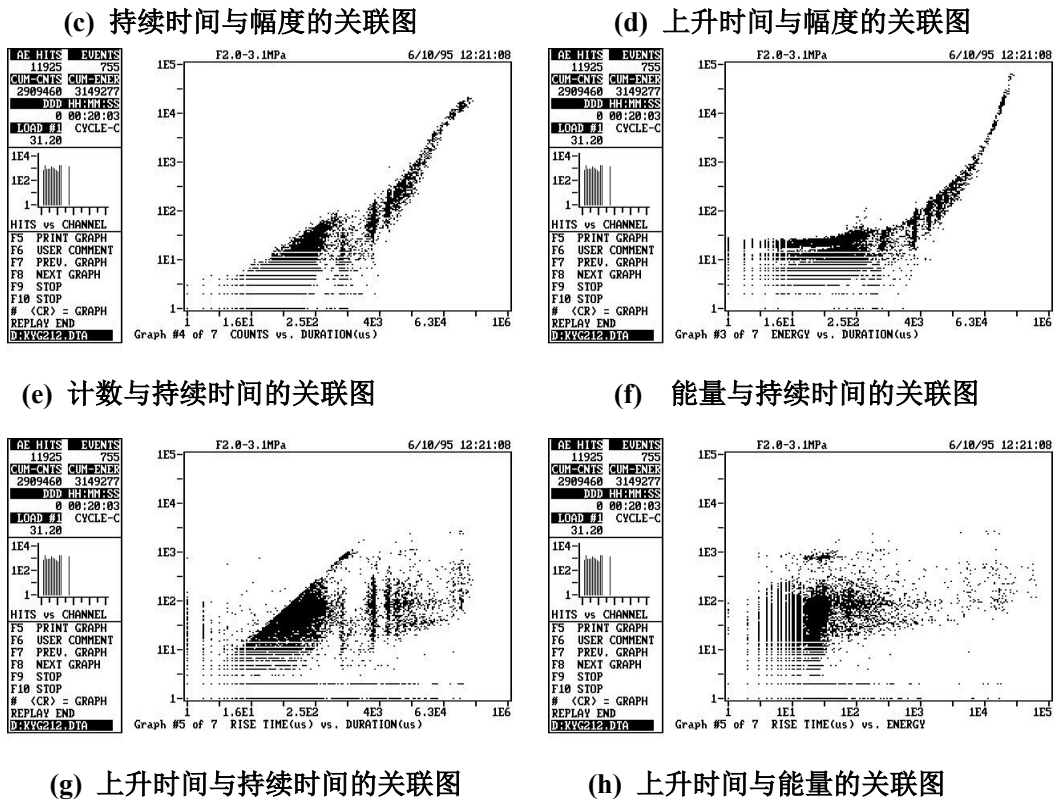


图 4.4 压力容器在加压过程中裂纹扩展声发射信号参数的关联图

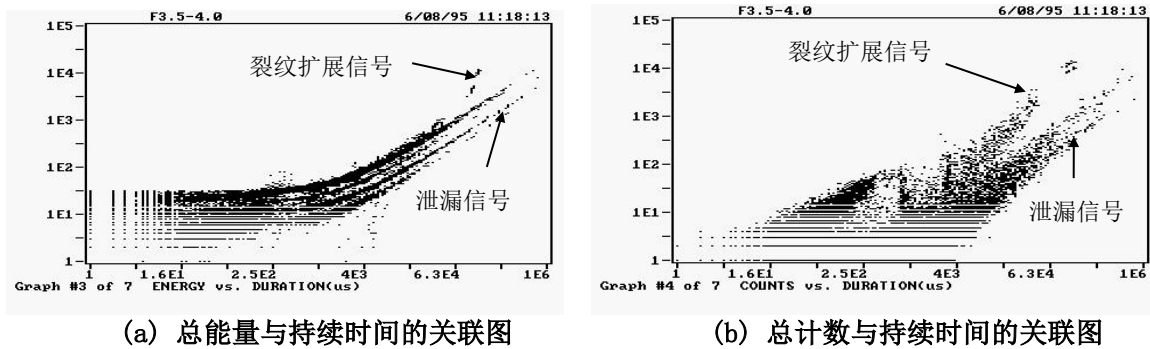


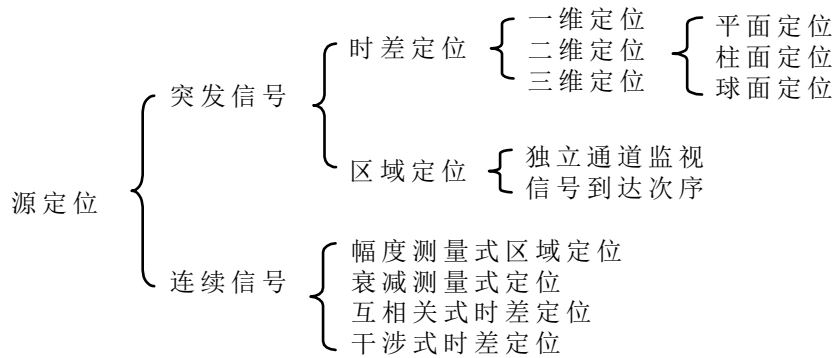
图 4.5 压力容器在加压过程中裂纹扩展和泄漏声发射信号参数的关联图

4.2 定位技术

声发射源的定位，需由多通道声发射仪器来实现，也是多通道声发射仪最重要的功能之一。对于突发型声发射信号和连续型声发射信号需采用不同的声发射源定位方法，表 4.4 列出了目前人们常用的声发射信号源定位方法。

时差定位，是经对各个声发射通道信号到达时间差、波速、探头间距等参数的测量及复杂的算法运算，来确定波源的坐标或位置。时差定位是一种精确而又复杂的定位方式，广泛用于试样和构件的检测。不过，时差定位，易丢失大量的低幅度信号，其定位精度又受波速、衰减、波形、构件形状等许多易变量的影响，因而，在实际应用中也受到种种限制。

表 4.4 声发射源定位方法分类



区域定位，是一种处理速度快、简便而又粗略的定位方式，主要用于复合材料等由于声发射频度过高或传播衰减过大或检测通道数有限而难以采用时差定位的场合。

连续声发射信号源定位，主要用于带压力的气液介质泄漏源的定位。

4.2.1 独立通道定位

由于传播衰减的影响，每个传感器主要接收其周边区域发生的声发射波。区域，是指围绕一传感器的区域，而来自该区的声发射波首先被该传感器接收。区域定位，按传感器各监视各区域的方式或按声发射波到达各传感器的次序，粗略确定声发射源所处的区域。当仅考虑首次到达波击信号时，可提供波源所处的主区域，而该区域以首次接受传感器与临近传感器之间的中点连线为界。当考虑第二次或第三次到达波击信号时，可进一步确定主区中的第二或第三分区。在复合材料检测中常用的区域定位原理示意如图 4.6 所示。

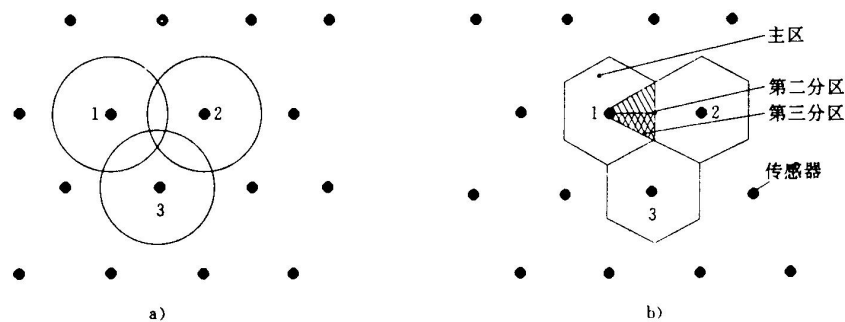


图 4.6 区域定位原理
a) 单通道监视区 b) 到达次序区域定位

4.2.2 线定位

当被检测物体的长度与半径之比非常大时，易采用线定位进行声发射检测，如管道、棒材、钢梁等。时差线定位至少需要两个声发射探头，其定位原理如图 4.7(a)所示。如在 1 号和 2 号探头之间有 1 个声发射源产生 1 个声发射信号，到达 1 号探头的时间为 T_1 ，到达 2 号探头的时间为 T_2 ，因此，该信号到达两个探头之间的时差为： Δt

= $T_2 - T_1$ ，如以 D 表示两个探头之间的距离，以 V 表示声波在试样中的传播速度，则声发射源距 1 号探头的距离 d 可由下式得出：

$$d = \frac{1}{2}(D - \Delta t V) \quad (4.6)$$

由上式可以算出，当 $\Delta t = 0$ 时，声发射信号源位于两个探头的正中间；当 $\Delta t = D/V$ 时，则声发射源位于 1 号探头处；当 $\Delta t = -D/V$ 时，则声发射源位于 2 号探头处。

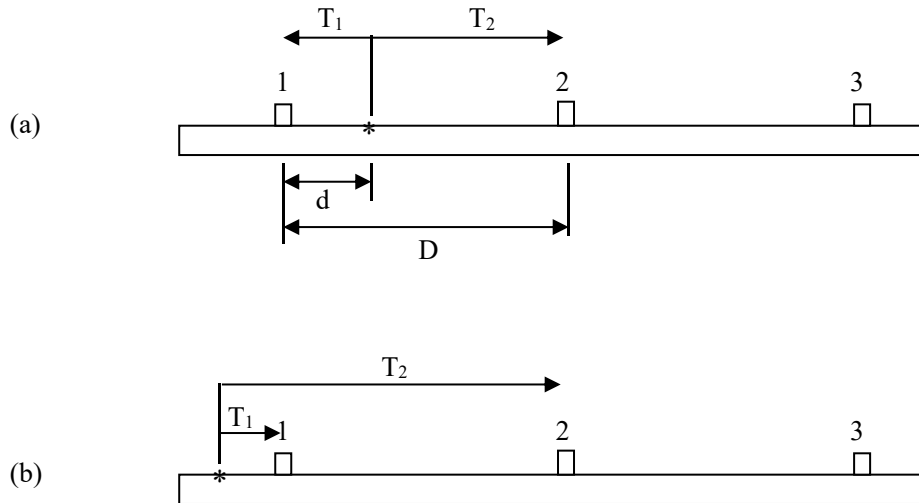


图 4.7 声发射源时差线定位原理图

图 1(b)所示为声发射源在探头阵列外部的情况，此时，无论信号源距 1 号探头有多远，时差均为 $\Delta t = T_2 - T_1 = D/V$ ，声发射源被定位在 1 号探头处。

4.2.3 平面定位

(1) 两个探头阵列的平面定位计算方法

考虑将两个探头固定在一个无限大平面上，假设应力波在所有方向的传播均为常声速 V ，两个探头的定位结果如图 4.8 所示，由此得到如下方程：

$$\Delta t V = r_1 - R \quad (4.7)$$

$$Z = R \sin \theta \quad (4.8)$$

$$Z^2 = r_1^2 - (D - R \cos \theta)^2 \quad (4.9)$$

由上面三个方程可以导出如下方程：

$$R = \frac{1}{2} \frac{D^2 - \Delta t^2 V^2}{\Delta t V + D \cos \theta} \quad (4.10)$$

方程 4.10 是通过定位源 (X_s, Y_s) 的一个双曲线，在双曲线上的任何一点产生的声发射源到达两个探头的次序和时差是相同的，而两个探头位于这一双曲线的焦点上。

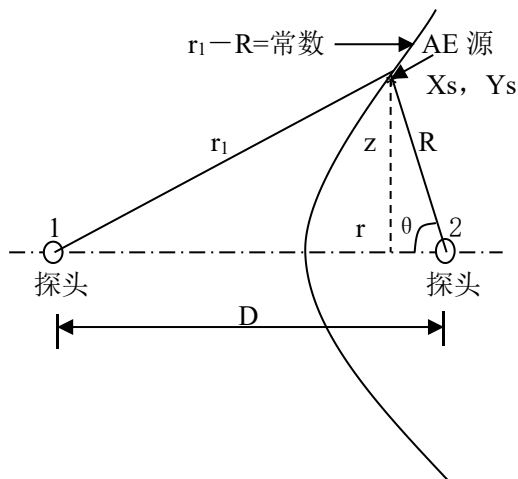


图 4.8 在无限大平面中两个探头的 AE 源定位

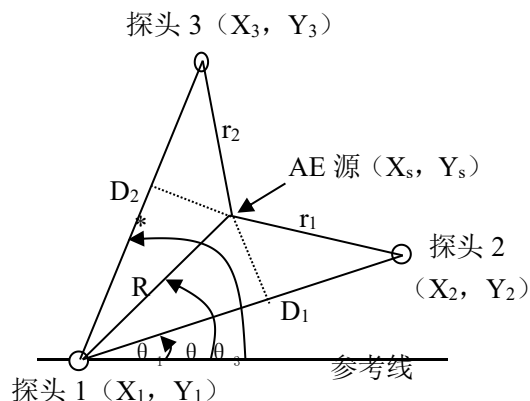


图 4.9 三个探头阵列的 AE 源平面定位

(2) 三个探头阵列的平面定位计算方法

图 4.8 中两个探头的 AE 源定位显然不能满足平面定位的需要，然而，如果增加第三个探头即可以实现平面定位。如图 4.9 所示，可获得的输入数据为 3 个探头的声发射信号到达次序和到达时间及两个时差，由此可以得到如下系列方程：

$$\Delta t_1 V = r_1 - R \quad (4.11)$$

$$\Delta t_2 V = r_2 - R \quad (4.12)$$

$$R = \frac{1}{2} \frac{D_1^2 - \Delta t_1^2 V^2}{\Delta t_1 V + D_1 \cos(\theta - \theta_1)} \quad (4.13)$$

$$R = \frac{1}{2} \frac{D_2^2 - \Delta t_2^2 V^2}{\Delta t_2 V + D_2 \cos(\theta_3 - \theta)} \quad (4.14)$$

方程 4.13 和 4.14 为两条双曲线方程，通过求解就可以找到这两条双曲线的交点，也就可以计算出声发射源的部位。

(3) 四个探头阵列的平面定位计算方法

对任意三角型的平面声发射源定位求解方程 4.13 和 4.14 有时得到双曲线的两个交点，即 1 个真实的 AE 源和 1 个伪 AE 源，但如采用由图 4.10 所示的四个探头构成的菱形阵列进行平面定位，则只会得到一个真实的 AE 源。

若由探头 S_1 和 S_3 间的时差 Δt_x 所得双曲线为 1，由探头 S_2 和 S_4 间的时差 Δt_y 所得双曲线为 2，AE 源为 Q ，探头 S_1 和 S_3 间距为 a ， S_2 和 S_4 的间距为 b ，波速为 V ，那么，AE 源就位于两条双曲线的交点 $Q(X, Y)$ 上，其坐标可表示为：

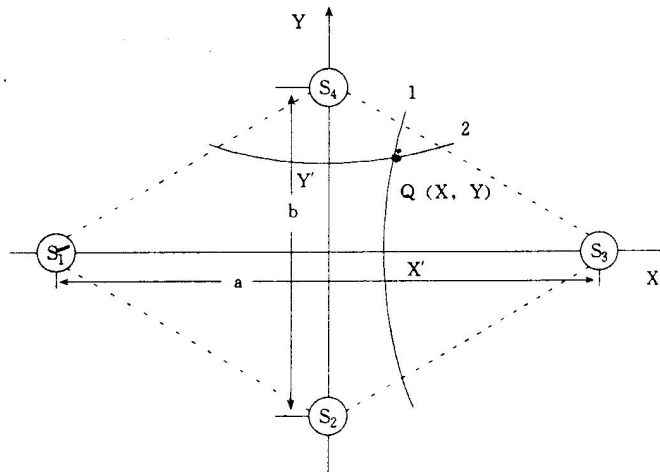


图 4.10 四个探头阵列的 AE 源平面定位

$$X = \frac{L_X}{2a} \left\{ L_X + 2\sqrt{\left(X - \frac{a}{2}\right)^2 + Y^2} \right\} \quad (4.15)$$

$$Y = \frac{L_Y}{2b} \left\{ L_Y + 2\sqrt{\left(Y - \frac{b}{2}\right)^2 + X^2} \right\} \quad (4.16)$$

式中：

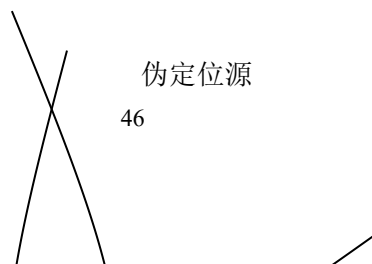
$$L_x = \Delta t_x V, \quad L_y = \Delta t_y V$$

(4) 影响声发射信号定位源精度的因素

引起突发型声发射信号定位源误差的原因有两大类，即信号处理过程产生的误差和自然现象产生的误差。处理过程误差可以通过调整探头的数量和间距、采用合适的时钟频率、用三个以上的通道判断定位源的位置等来进行控制，但诸如波的衰减、波型转换、反射、折射和色散等自然现象引起的误差是不可控制的。总之，由单一源产生的声发射信号逐次计算得到的定位源不是一个单一的点，而是围绕真实源部位的一个定位集团，这一定位集团的大小和集中度依赖于定位源在探头阵列中的位置以及上述提到的所有影响因素。下面分别对一些主要影响因素加以介绍。

1) 不唯一解

对于任何一个给定的由三个探头组成的阵列，解方程 4.13 和 4.14 可能得到双曲线的两个交点，即得到一个真实的声发射定位源和一个伪声发射定位源，如图 4.11 所示。为了判别两个声发射源的真伪，一般采用增加第 4 个探头以到达次序来识别。图中真实定位源的声发射信号到达次序为 1、2、3 号探头，而伪定位源部位如产生声发射信号的到达次序为 1、4、3 号探头。另外，如对整个结构进行整体监测，则可以只考虑三角阵列内部的定位源。



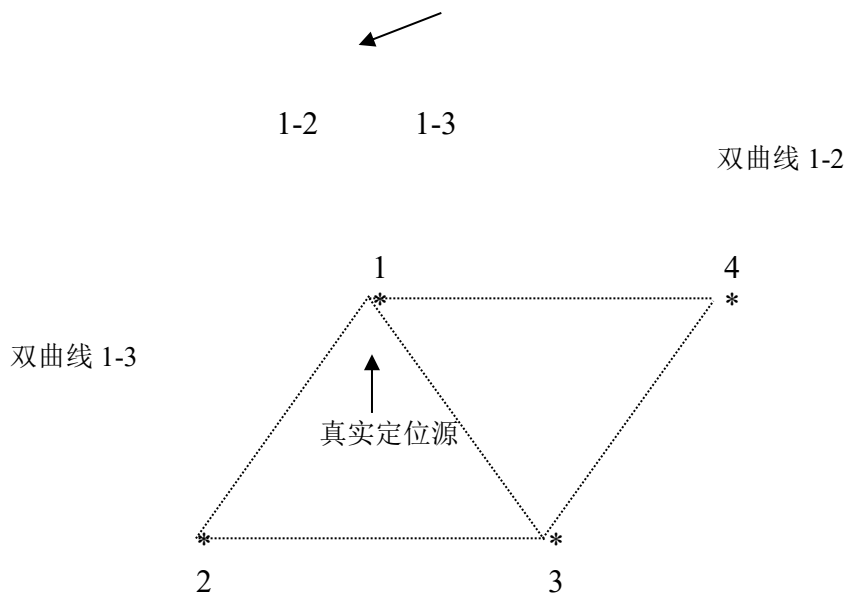


图 4.11 两个双曲线交点产生的真实定位源和伪定位源示意图

2) 图形畸变

进行声发射检测时，通常在计算机内画一个图形来表示真实的被检测物体，除平板和管道等线状结构不产生畸变外，其它大部分三维物体被展开放到二维平面上进行定位都将产生畸变。例如将圆柱形容器或球形容器展开为平面图，上下部位的畸变就很严重。另外，在这些压力容器上还存在着一些人孔、接管等开孔，从而使声波不能按直线进行传播，导致定位源的精度有偏差。

为解决这一问题，在实际检测中一般采用断铅信号等模拟声发射源校核的方法，在被检测物体上找到真实的声发射源部位。

3) 弱声发射源

对于大型结构的声发射检测和监测，声发射探头之间都有一定的间距，例如对于压力容器的检测，声发射探头间距一般为 3 到 5 米。对于弱信号的声发射源，由于衰减的原因，如不能被至少三个探头探测到，则声发射仪器不能计算出声发射定位源。在某些应用情况下，这一因素是导致声发射定位源误差的主要原因。

4) 探头位置

在声发射检测中，探头自身几何尺寸的大小几乎不影响定位精度。然而，探头阵列覆盖了很大的区域，探头部位的精确程度严重影响定位源的精度。因此，在进行声发射检测时，应尽量将声发射探头布置为等腰或等边三角形，而且在探头安放时应尽可能准确。

5) 波速

目前采用所有声发射仪最基本的计算过程是输入一个假设已知的常数波速，比如钢板为 3000 米/秒。如果被检测物体的真实波速为常数，但不同于已输入的波速，计算的位置误差将依赖于测量的时差值。在探头阵列的中间部位，探头间的时差很小，

波速的差异不容易被发现。然而，声发射信号源越靠近探头，时差越大，声发射定位源的误差也越大。为解决这一问题，推荐在进行声发射检测时实测声速。

在实际的声发射检测中，变声速的情况也经常被遇到，例如一个探头收到的是纵波，而另一个探头收到的是瑞利波分量。另一种情况是色散，即波速为声波频率的函数。在波的传播过程中如遇到焊缝、开孔接管、外焊附件等不连续结构，可以引起声波传播路径的变化，并最终引起声速的变化。

总之，目前的多通道声发射系统还不能处理变声速的情况，因此，在检测过程中这必须引起操作者的注意，一般采用折中方案。

6) 时差测量

现代声发射仪的时差测量是基于各通道的到达时间为基础，而每个通道到达时间的测量与触发电平的设置和仪器的时钟频率有关。目前仪器的采样时间可以精确到250纳秒以上，因此对时差测量已不会产生大的影响。然而，仪器触发电平设置的不同，可以引起几微秒到几十微秒以上的误差，从而导致测量时差的误差，最终影响定位源的计算精度。

4.2.4 连续声发射源定位

流体的泄漏和某些材料在塑性变形时均产生连续型声发射信号。对于连续型声发射信号，突发型声发射信号常用的声发射参数（计数、计数率、上升时间、持续时间、幅度分布、时差等）已变得毫无意义。突发型声发射信号采用的时差定位方法，连续型声发射信号也无法应用。根据连续型声发射信号的特点，人们发展了基于信号幅度衰减测量的区域定位方法、基于波形互相关式时差测量的定位方法和基于波形干涉的定位方法。

(1) 幅度衰减测量区域定位方法

区域定位方法只需要确定最大输出信号的探头和第二大输出信号的探头，十分简便，但这种方法的缺点是得到的定位区域太大，有时无法接受。如果除了对声发射信号的大小进行排序之外，还测量声发射信号的幅度及被测物体的衰减特性，则可以得到泄漏源较精确的定位。

连续声发射源定位的幅度测量方法包括如下三个步骤：

(1) 通过识别最高和第二高声发射输出信号，从声发射探头阵列中找到最靠近泄漏源的两个探头。在探头阵列之外的泄漏源不能采用幅度测量法进行定位。

(2) 以分贝来确定两个探头输出的差值，并与被测物体的衰减特征进行比较。

(3) 对于二维平面，两个探头确定了一条通过泄漏源的双曲线，因此需要第三个探头来得到另一条双曲线，两个双曲线的交点即为泄漏源部位。此方法与突发型声发射信号的时差定位原理一致。

下面给出一个一维定位的例子来进一步说明这一过程。被测物体为一个直径150毫米、长84米的充满气体的钢管，图4.12为实测的衰减特征曲线。采用100kHz探

头，两个探头之间的衰减不超过 25dB。实际测量采用 9 个探头，探头之间的间距为 10.5 米，衰减为 24.3dB。图 4.13 给出了 3 号和 4 号探头间几个任意泄漏源的情况，如果泄漏源位于两个探头的正中间，则两个探头输出的信号幅度是相同的，幅度差为 0dB。

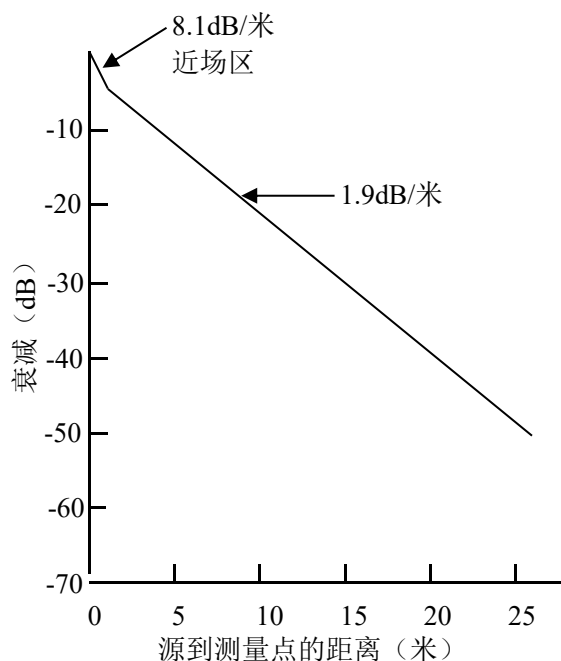


图 4.12 直径为 150 毫米钢管的声衰减特性

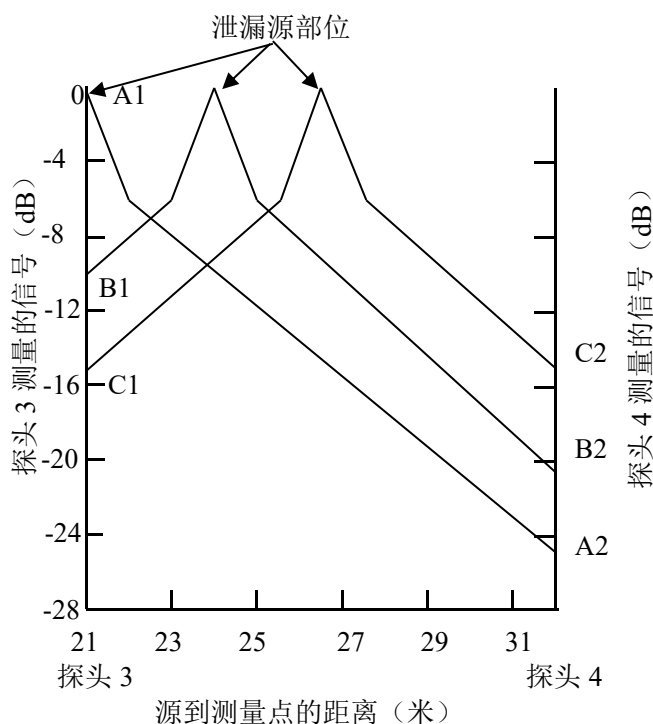


图 4.13 10.5 米探头间距几个泄漏源的衰减模式

幅度测量法定位与两个探头之间的相对幅度值紧密相关，而与探头输出的绝对幅

度值无关。然而，这些测量必须基于如下两个先决条件：

- (1) 必须将所有通道（包括探头和放大器）的灵敏度调整为相同。
- (2) 无任何电子或机械背景噪音。

这两个条件中，将各个通道的灵敏度调整为一致是易于达到的，而彻底消除背景噪音是不可能的。

噪音的存在将引起定位源计算的误差，假设测量信号 $S_{测}$ 的均方根电压值（rms）是噪音 n 的 rms 与信号真实 rms 值 $S_{真}$ 之和，则：

$$S_{测} = (S_{真}^2 + n^2)^{1/2} \quad (4.17)$$

如果噪音已知，则可计算出真实的信号。通常，在泄漏发生前预先测量信号的电平或者观察与泄漏源很远距离的探头都可测到背景噪音信号。后一种方法不适用于仅采用两个探头的情况或者是探头阵列中的背景噪音为不均匀的情况。

(2) 互相关式定位方法

常用的测量两个突发型声发射波之间时差的技术不适用于连续型声发射源，而互相关技术既适用于断续波之间的时差或时间延迟测量，也适用于连续波之间的时差或时间延迟测量，这一技术已被成功地应用于管道声发射检测的泄漏源定位。

任意一个波 $A(t)$ 和另一个延迟时间为 τ 的波 $B(t+\tau)$ 之间的互相关函数（CCF）可由下式给出：

$$R_{AB}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) B(t+\tau) dt \quad (4.18)$$

式中 T 是一个有限的时间间隔。从方程 4.18 可见，如果 τ 是变化的，则互相关函数是 τ 的函数。 $R_{AB}(\tau)$ 的特性可以通过将 $A(t)$ 和 $B(t)$ 分为 n 个小的相等时间段的积来观察。

令 $t = t_i$, $A(t) = a_i$, $B(t) = b_i$, $i = 0, 1, 2 \dots n$, 如果 $B(t)$ 相对于 $A(t)$ 有一时间延迟 τ_j , 当 $j = 0, 1, 2 \dots n$ 时：

$$R_{AB}(\tau_j) = \sum_{i=0}^n a_{i+j} b_i \quad (4.19)$$

当 $j = -1, -2 \dots -n$ 时：

$$R_{AB}(\tau_j) = \sum_{i=0}^n a_i b_{i-j}$$

当 $j = 0$ 时：

$$R_{AB}(\tau_j) = \sum_{i=0}^n a_i b_i$$

方程 4.19 中 a_{i+j} 和 b_{i-j} 的下标随 $R_{AB}(\tau_j)$ 中 τ_j 的变化而变化。

互相关函数是在有限时间范围内的积分。在实际应用中，数据采样仅利用了每个波的有限部分，而在被利用部分之外的波幅为零，即如果 $i > n$, $a_i = b_i = 0$ 。如果 $j > 0$ 且 $i + j > n$, 则 $a_{i+j} = 0$ 。如果 $j < 0$ 且 $i - j > n$, 则 $b_{i-j} = 0$ 。因此，当 $|j|$ 增加时， $i + j$ 增加，方程 3 中的某些求和项将为零。随着 $|j|$ 的增加，求和项数将越来越少， $R_{AB}(\tau_j)$ 的幅值逐渐下降。最终，当 $|j| > n$, 所有 a_{i+j} 和 b_{i-j} 项为 0, $R_{AB}(\tau_j) = 0$ 。当 $\tau_j = \tau'$ 时，由于 A 和 B 为同相位，则 $R_{AB}(\tau')$ 达到最大值。因此，从 $R_{AB}(\tau_j)$ 的最大峰值部位可以获得 B(t) 相对于 A(t) 的时差或时间延迟 τ' 。

下面举一个例子来说明互相关函数的计算步骤和特性。假设 A(t) 和 B(t) 是正弦函数， $A(t) = A_0 \sin \omega t$ 和 $B(t) = B_0 \sin[\omega t - (\pi/6)]$, $A_0 = B_0 = 1$ 。如图 4.14a 和 4.14b 所示，将 A(t) 和 B(t) 的 ωt 轴上的一个周期分为 12 等份，则对应 $A(t) = a_0, a_1, a_2, \dots, a_{12}$ 和 $B(t) = b_0, b_1, b_2, \dots, b_{12}$ 。在 $j = -12, -11, \dots, 0, \dots, 11, 12$ 时，运用方程 3 可以计算出互相关函数 $R_{AB}(\tau_j)$ ，计算结果如图 4.14c 所示。从图 4.14c 可以看出，当 $\omega \tau = \omega \tau_{-1} = -\pi/6$ 时， $R_{AB}(\tau_{-1})$ 为最大值。随着 $\omega \tau$ 的增加， $R_{AB}(\tau)$ 的峰值绝对值下降，当 $-2\pi \geq \omega \tau \geq 2\pi$ 时， $R_{AB}(\tau) = 0$ 。这一例子说明了在有限时间间隔内的互相关函数的特征，如果积分时间的间隔趋于无限大，互相关函数 $R_{AB}(\tau)$ 将成为无最大峰值的连续余弦波，这也是互相关选择有限时间间隔的原因。

对于任意一函数 A(t) 和时间延迟为 τ' 的函数 B(t)，两个函数 A(t) 和 B(t + τ') 在有限时间间隔内的互相关函数 $R_{AB}(\tau)$ 在 $\tau = \tau'$ 肯定包含一个最大值，这一互相关方法可用于连续型声发射源的定位。如探头 A 接收到来自连续 AE 源的波 A(t)，探头 B 接受到来自 AE 源的波 B(t + τ')，相对于波 A(t) 的时间延迟为 τ' ，那么 AE 波从源传播到两个探头间的时差可以从其互相关函数 $R_{AB}(\tau)$ 的最大峰值部位来得到，即 $\Delta t_{AB} = \tau'$ 。

图 4.15 给出了由两个声发射探头探测的来自一个连续声发射源的两个波的典型互相关函数，CCF 从 -40ms 到 40ms 的 80ms 时间间隔内作为 τ 的函数被绘出。当 $\tau = -3.05\text{ms}$ 时，CCF 的峰值最大。另外，为了降低可能存在的噪音的影响，图 4.15 中的曲线实际为来自同一源相同探头的 16 个 CCF 的平均值。

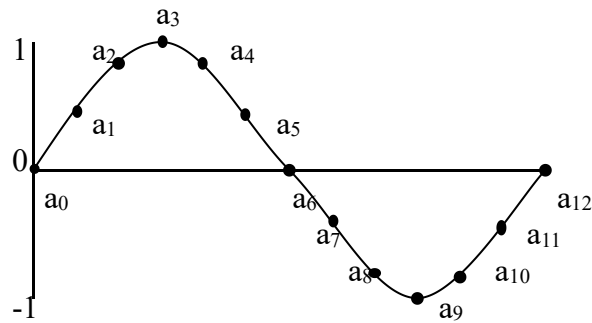
一旦由互相关技术测量得到连续源的时差，对于 AE 源定位的时差计算方法与上一讲中突发型 AE 信号的时差定位方法相同，但应使用正确的波速，尤其需对复杂结构中传播的复合波模式给予注意。

通常可以应用双通道快速傅立叶 (FFT) 变换分析来实现互相关函数分析。从频域 ν 中互相关谱 $G_{AB}(\nu)$ 的逆傅立叶变换可以得到时域 τ 中的互相关函数 $R_{AB}(\tau)$ ：

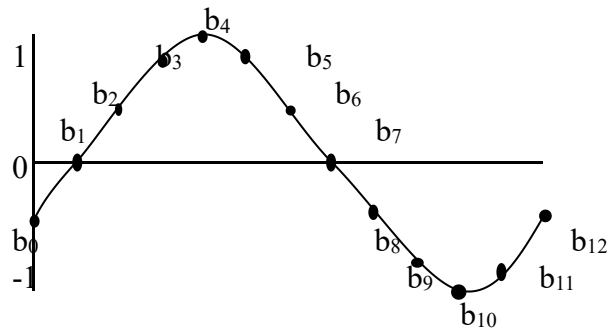
$$1 \int^{+\infty}$$

$$R_{AB}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} G_{AB}(v) \exp(i2\pi v \tau) dv \quad (4.20)$$

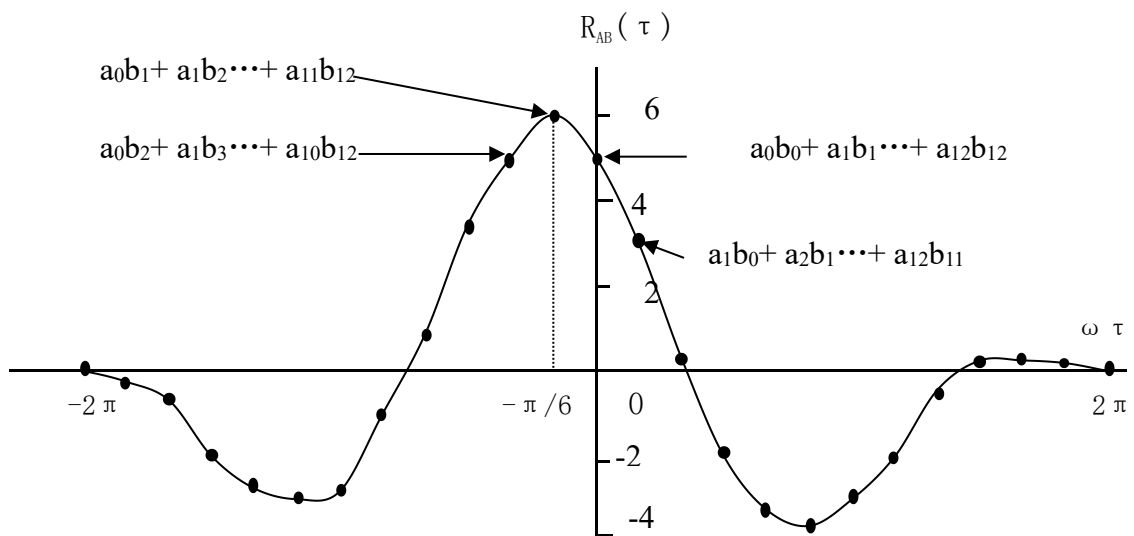
式中 $G_{AB}(v)$ 是 $A(t)B(t+\tau)$ 的傅立叶变换。



(a) 正弦函数 A(t)



(b) $-\pi/6$ 延迟的正弦函数 B(t)



(c) A(t) 和 B(t) 的互相关函数

图 4.14 互相关函数计算示意图

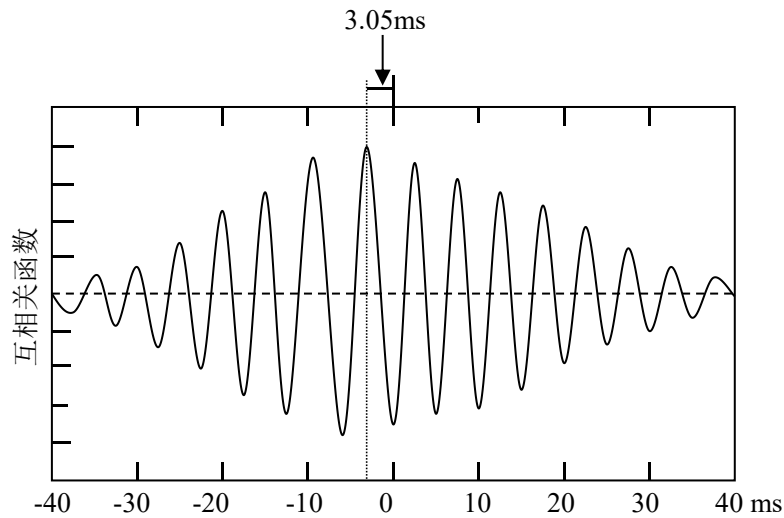


图 4.15 典型的互相关函数图形

(3) 干涉式定位方法

上述介绍的衰减测量方法和互相关方法都是基于先探测到泄漏，然后确定泄漏源的位置。然而，在某些情况下可以反向进行，即通过源定位处理的结果来指示出泄漏的存在。这一方法已被人们用于液态金属热交换器泄漏的定位和探测^[6]。

这一方法假设由探头阵列探测到的泄漏信号是相干的，在无泄漏的情况下探测的信号是噪音，相干性很低。干涉式定位方法的步骤如下：

- (1) 在感兴趣的二维或三维空间内定义一个位置；
- (2) 计算信号从定义位置到所有探头之间的传播路径长度，通过已知波速计算波到达阵列中所有探头的传播时间和各个探头的时间延迟；
- (3) 按预定的时间同时捕捉每一个探头的输出，按照第 2 步计算的延迟时间推迟各通道的采样时间；
- (4) 确定所有延迟的探头间的相干性，高水平的相干性指出在假设的源部位有泄漏发生；
- (5) 如果相干性较低，假设另外一个部位从第 2 步重复进行。

这一处理过程依赖于源位置的预定义，然后在验证声发射信号是否与泄漏一致。

4.2.5 三维立体定位

三维立体定至少需要 4 个传感器。现在建立一个三维的坐标系，以四只传感器中 T_2 为基准，测量其它三只传感器与基准信号的时间差。为了简化说明，假设声发射信号在该三维空间的传播速度已知为恒定值。根据空间的几何关系列方程得出声源到各个传感器的距离差，进而计算出声源的相对空间坐标，如图 4.16 所示。

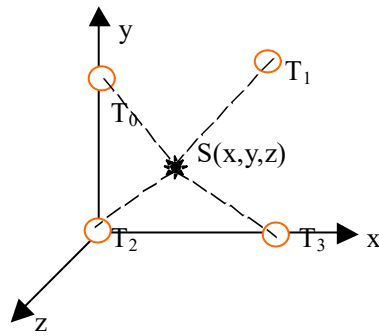


图 4.16 三维坐标系中传感器和声源的位置

其中 $T_0—T_3$ 为四只接收传感器，位于同一平面之内（ z 轴坐标均为 0）， S 为声源位置。设 T_2 位坐标原点 $(0, 0, 0)$ ， T_0 为 (X_0, Y_0, Z_0) ， T_1 为 (X_1, Y_1, Z_1) ， T_3 为 (X_3, Y_3, Z_3) ， S 为 (X, Y, Z) ，则可列出距离差^[8]：

$$|ST_0| - |ST_2| = d_{02}$$

$$|ST_1| - |ST_2| = d_{12}$$

$$|ST_3| - |ST_2| = d_{32}$$

于是有

$$\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = d_{02}$$

$$\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = d_{12}$$

$$\sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = d_{32}$$

化简后可得

$$2(x_0x + y_0y + z_0z) + 2d_{02}\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - d_{02}^2$$

$$2(x_1x + y_1y + z_1z) + 2d_{12}\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - d_{12}^2$$

$$2(x_3x + y_3y + z_3z) + 2d_{32}\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 - d_{32}^2 \quad (4.21)$$

令

$$x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - d_{02}^2 = 2d_0$$

$$x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - d_{12}^2 = 2d_1$$

$$x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 - d_{32}^2 = 2d_3$$

将上两式相比较后得到一组独立方程组

$$(x_0x+y_0y+z_0z-d_0)/(x_1x+y_1y+z_1z-d_1)=c_{01}$$

$$(x_0x+y_0y+z_0z-d_0)/(x_3x+y_3y+z_3z-d_3)=c_{01}$$

$$(x_0-c_{01}x_1)x+(y_0-c_{01}y_1)y+(z_0-c_{01}z_1)z-d_0+c_{01}d_1=0$$

$$(x_0-c_{03}x_3)x+(y_0-c_{03}y_3)y+(z_0-c_{03}z_3)z-d_0+c_{03}d_3=0$$

代入初始条件 $z_0 = z_1 = z_2 = z_3 = 0$ ，得到

$$x=(d_0-c_{01}d_1)(y_0-c_{03}y_3)-(d_0-c_{03}d_3)(y_0-c_{01}y_1)/(x_0-c_{01}x_1)(y_0-c_{03}y_3)-(x_0-c_{03}x_3)(y_0-c_{01}y_1)$$

$$y=(d_0-c_{03}d_3)(y_0-c_{01}y_1)-(d_0-c_{01}d_1)(y_0-c_{03}y_3)/(x_0-c_{03}x_3)(y_0-c_{01}y_1)-(x_0-c_{01}x_1)(y_0-c_{03}y_3)$$

$$z=\{ \{ [d_0-(x_0x+y_0x)]/d_{02} \}^2-(x^2+y^2) \}^{1/2}$$

由以上表达式共可得到两个解，两个解在 z 方向坐标为相反数。可以根据实际情况取得其中一个正确解。虽然以上从空间解析几何关系可以获得推导，但工程应用中因实际存在各种干扰，使得时延估计有偏差。因此由上式往往无法定位。另外，还可以采用牛顿迭代法来解方程 (4. 21)。

由以上我们可以知道该种算法传感器布置需要 4 个，而且在解方程的过程中会出现错误解，所以通过该种传感器布置方法一般来说要布置 7—8 个传感器。因此，根据传感器的个数的选择就可以得到不同的算法和程序。

首先，可以采用固定的传感器布置，这时传感器布置主要有两种方式，如图 4. 17 所示，一种为 4 传感器布置，一种为 8 传感器布置，当然可以根据三维物体的实际尺寸来选择传感器的数目，可以更多的增加传感器的数目，以达到缩小定位传感器之间距离的目的来提高精度。就如下图两种传感器布置方法，4 传感器布置可以使得实验设备简化，同时可以更加容易获得定位信息，因此传感器数目少所以定位解唯一。而第二种方法，可以获得更多的实体内部的信息，因此更精确。

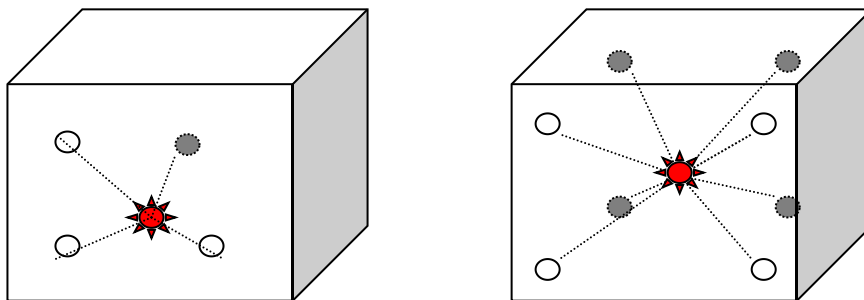


图 4.17 传感器布置示意图

另外，还可以灵活的设置可以自由移动的探头，通过移动的探头来获得不同的初始值，最后逐步达到精确的定位。

4.3 高级信号处理技术

4.3.1 信号定义：HDT

4.3.2 信号获取

4.3.3 频谱分析

4.4.4 模式识别

5 声发射检测技术（学时 2 天，课堂教学 8 学时，仪器操作 8 学时）

5.1 检测仪器选择的影响因素

5.1.1 被监测的材料

5.1.2 发射源的部位和特征

5.1.3 需要得到的信息类型

5.1.4 被检对象的大小和形状

5.2 检测仪器的设置和校准

5.2.1 校准信号的产生技术

5.2.2 校准的步骤

1.2.5 探头的选择和布置

1.2.6 仪器调试和参数设置

5.3 加载程序

5.3.1 加载型式

5.3.2 最大试验载荷

5.3.3 载荷保持

5.3.4 重复和程控加载

5.3.5 加载速率

5.4 特殊检测的程序

5.4.1 高温 / 低温检测

5.4.2 间歇性的检测（包括周期疲劳）

5.4.3 长期监测

5.4.4 高噪声环境检测

5.5 数据显示

5.5.1 显示模式的选择

5.5.2 不同种类显示的应用和读取

5.6 噪声源和检测前的识别

5.6.1 电磁噪声

5.6.2 机械噪声

5.7 噪声的拟制

5.7.1 电磁屏蔽

- 5.7.2 电子技术
- 5.7.3 机械运动的预防
- 5.7.4 衰减材料和应用
- 5.8 数据解释
 - 5.8.1 数据记录中对噪声的标识
 - 5.8.2 采用数据过滤技术对噪声的去除
 - 5.8.3 相关和非相关声发射信号
- 5.9 数据评价
 - 5.9.1 排序、分级、接受/不接受的方法
 - 5.9.2 与校准信号的比较
 - 5.9.3 其它无损检测方法对源的评价
- 5.10 报告
 - 5.10.1 目的
 - 5.10.2 内容和结构

6 声发射检测技术的应用（学时 3 天，第 1 天现场压力容器声发射检测实际操作演示与培训，后 2 天课堂教学 10 学时，仪器操作 6 学时）

- 6.1 压力容器
 - 6.1.1 检验前的准备
 - 6.1.2 检验方案的制定

(4) 声发射检测中常采用的时差平面定位探头阵列

由于目前多通道声发射仪所采用的计算机和软件功能都比较强，因此在实际进行声发射检测过程中，人们最常用的平面 AE 源定位探头阵列为三角形，在被检测对象几何形状规则的情况下，采用等腰三角形探头阵列，如图 4.11 和图 4.12 所示；在被检测对象几何形状不规则的情况下，采用任意三角形探头阵列，如图 7 所示，但一般情况下推荐采用锐角三角形。图 8 为压力容器上焊接表面裂纹和深埋裂纹在升压过程中扩展产生的声发射定位源图，图 9 为 400m³ 石油液化气罐在声发射检测过程中未熔合和未焊透缺陷产生的声发射源定位图。

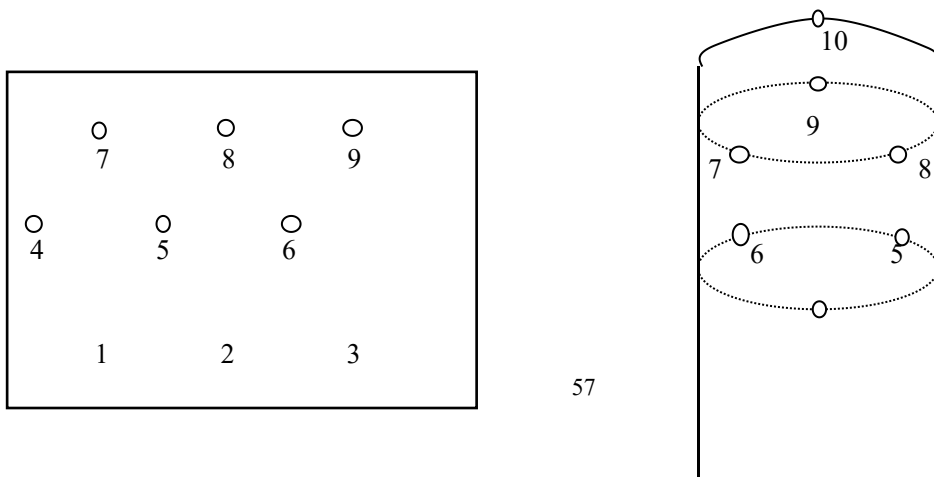




图 5. 平面等腰三角定位探头阵列

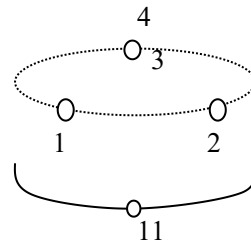


图 6. 圆柱形容器的等腰三角定位探头阵列

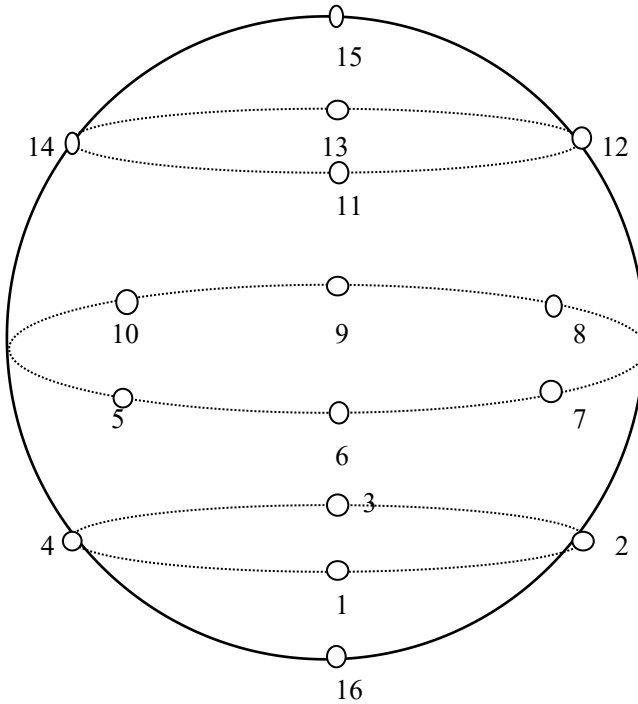
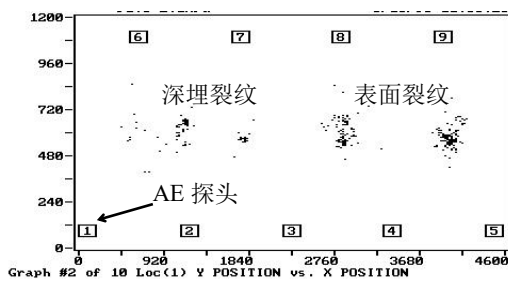
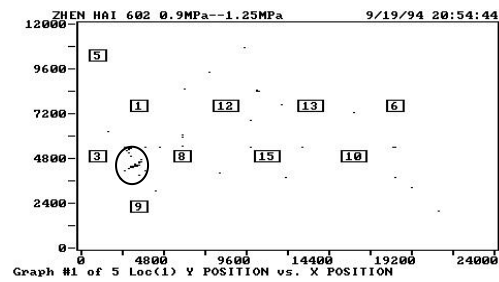


图 7. 球形容器的任意三角定位探头阵列



X 轴与 Y 轴均为距离，单位：mm

图 8 压力容器裂纹扩展 AE 定位源图



X 轴与 Y 轴均为距离，单位：mm

图 9 400m³LPG 球罐的焊接缺陷 AE 源定位图

6.1.3 声发射监测和声发射信号采集

6.1.4 声发射数据的分析和源的分类

6.1.5 检验数据记录和报告

6.1.6 应用实例

6.2 压力管道