

声发射技术及其应用

袁振明 马羽宽 何泽云 编著



机械工业出版社

声发射技术及其应用

袁振明 马羽宽 何泽云 编著



机械工业出版社

声发射技术是近二十年来迅速发展起来的动态无损检测新技术，本书对其比较系统地进行了介绍。内容包括：声发射检测原理、检测仪器（声发射信号的表征参数、声发射源定位、检测仪器的组成、声发射换能器、信号处理、排除噪声的方法等）及在材料研究、焊接、评价压力容器的结构完整性等的应用情况。

本书供从事声发射技术研究、应用及对材料、机械产品探伤的工程技术人员使用，也可供焊接、地质力学工作者参考。

声发射技术及其应用

袁振明 马羽宽 何泽云 编著

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本850×1168 1/32·印张8³/₈·字数218千字

1985年8月重庆第一版 1985年8月重庆第一次印刷

印数0.001—3.560 定价2.50元

*

统一书号：15033·5675

前 言

声发射技术是根据结构内部发出的应力波判断结构内部损伤程度的一种新的无损检测方法，它与超声、X射线等常规无损检测方法主要区别在于声发射技术是一种动态无损检测方法，它能连续监视结构内部损伤的全过程。由于这一主要特点，近二十年来，声发射技术已在原子能、航空、航天、冶金材料、地震、地质、石油、化学、电力、矿业和建筑等工业领域得到了应用。

我国开展声发射技术的研究时间还不长，应用的领域有限。为了促进我国声发射技术的研究，扩大它的应用范围，我们总结了近年来国外声发射技术的发展概况和我国开展声发射技术应用研究的经验，编写成《声发射技术及其应用》这本书，供从事声发射技术研究和应用的工作者、无损检测人员和其它专业需要应用声发射技术的工作者参考。

本书在编写方法上力求内容的完整性和系统性。全书共分六章，第一章介绍声发射检测的基本原理、声发射的来源和声发射波的传播。第二章介绍声发射检测仪器的组成、仪器各部分的工作原理和性能要求，排除噪声的方法和声发射源定位技术。后四章分别讨论声发射技术在材料研究、焊接裂纹检测、评价压力容器结构完整性和在飞机、海洋采油设备及地质力学方面的应用，并列举了一些应用实例。鉴于实验技术在声发射检测中的重要性，书中对一些实验技术的细节，如试样设计、夹具设计、换能器选择和实验步骤等尽可能地进行了详细介绍。

本书编写过程中得到了作者所在单位的大力支持，仅此致谢。由于作者学识所限，书中缺点错误在所难免，诚恳欢迎读者批评指正。

作者

一九八四年十二月

目 录

绪论	1
第一章 声发射现象的物理基础	5
一、声发射产生的条件	5
二、声发射的来源	9
1. 位错运动和塑性变形	9
2. 裂纹的形成和扩展	15
三、固体的弹性性质	17
1. 固体弹性介质中的应力与应变	17
2. 应力和应变的关系 广义虎克定律	20
3. 固体弹性介质中的波动方程	22
四、声发射波传播	24
1. 固体中的纵波和横波	24
2. 波动方程的解	27
3. 波的反射和衰减	29
4. 表面波的传播	32
五、实际声发射波	34
参考文献	36
第二章 声发射检测仪器	37
一、声发射信号的表征参数	37
1. 声发射信号	37
2. 声发射事件与振铃计数率和总数	38
3. 振幅及振幅分布	40
4. 能量	44
5. 有效值电压	45
二、声发射源定位	46
1. 直线定位法	46
2. 归一化正方形定位法	47
3. 平面正方形定位法	49

4. 平面正三角形定位法	50
5. 任意平面三角形定位法	51
6. 球面三角形定位法	54
7. 区域定位法	58
三、声发射检测仪器的组成	59
四、声发射换能器	62
1. 换能器类型	62
2. 换能器灵敏度的表示方法	67
3. 影响换能器灵敏度的因素分析	69
4. 换能器的标定方法	71
五、信号处理部分	75
1. 前置放大器	75
2. 滤波器	79
3. 主放大器	79
4. 阈值整形器	91
六、表征参数的计数部分	82
1. 声发射率计和总数计数器	82
2. “加权振铃”计数器	83
3. 能量计数器	83
七、声发射源定位系统	84
1. 时差测量单元	84
2. 接口控制器	85
3. 软件	88
八、排除噪声的方法	89
1. 前沿鉴别	89
2. 主副鉴别	90
3. 符合鉴别	90
4. 电压控制门	91
5. 数据统计排除噪声的方法	91
九、模拟声发射源	91
1. 磁致伸缩换能器式声发射脉冲发生器	92
2. 压电换能器式声发射脉冲发生器	92
3. 火花放电式声发射脉冲发生器	92

参考文献	93
第三章 材料研究中的应用	96
一、加载装置和试验方法	96
二、影响材料声发射特性的因素	101
1. 外部因素	101
2. 内部因素	102
三、塑性变形的声发射	104
1. 塑性变形的声发射特性	104
2. 屈服效应	108
3. 不可逆效应及其影响因素	114
四、断裂分析	115
五、监视疲劳断裂	126
六、评价表面渗层的脆性	136
七、监视应力腐蚀和氢脆	138
八、检测马氏体相变	145
参考文献	149
第四章 焊接质量的监视	155
一、引言	155
二、焊接时的声发射特性	157
三、焊接过程的监视	160
1. 氩弧焊	160
2. 电子束焊接	166
3. 电阻焊	171
四、焊后裂纹的监视	175
参考文献	179
第五章 监视压力容器的结构完整性	183
一、压力容器升压试验时声发射检测操作程序	183
1. 准备工作	184
2. 声发射检测	187
3. 检测结果的分析与评价	188
4. 试验报告	188
二、声发射检测适用性的判别	189
三、声发射检测的可靠性	193

四、声发射检测的压力容器范围	201
五、缺陷有害度评价及分类方法	203
1. 按升压过程声发射频度分类	203
2. 按声发射源活动性和强度分类	203
3. 按保压期间的声发射特性分类	204
4. 缺陷有害度综合评定法	206
六、压力容器水压试验应用实例	210
1. 直径18米球形容器	210
2. 直径20米球形容器在线检测	216
七、压力容器定期检查时的应用	218
1. 定期检修进行水压试验时声发射检测的原理	218
2. 定期检修水压试验时声发射检测应用实例	219
八、核反应堆压力容器的应用	222
1. 反应堆压力容器声发射监测时的噪声及排除方法	223
2. 热冲击状态(紧急停堆)下的声发射检测	230
3. 反应堆运转中的监测	231
九、监视压力容器疲劳裂纹的扩展	232
1. 连续监视法	233
2. 间歇过载监视法	240
参考文献	243
第六章 评价其它构件的完整性	248
一、监视飞机结构完整性	248
二、评价海洋采油设备结构的完整性	254
三、在岩石力学中的应用	257
1. 测量岩石的地应力	257
2. 研究地震序列	258
3. 井崩预报	258
参考文献	259

绪 论

材料或结构受外力或内力作用产生变形或断裂，以弹性波形式释放出应变能的现象称为声发射。各种材料声发射的频率范围很宽，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，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生变形而发声。大多数金属材料塑性变形和断裂时也有声发射发生，但声发射信号的强度很弱，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。

近年来，声学检测方法有很大发展，它在无损检测技术中占有重要地位。声发射检测是声学无损检测中的重要方法，它必须有外部条件的作用，使材料或构件发声，如力、电磁、温度等因素的作用；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。因此，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于超声、X射线、涡流等其它无损检测方法。

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,这是其它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涉,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。

由于声发射技术具有上述一系列特点,近年来有许多科学家和工程技术人员致力于发展和应用声发射技术。声发射技术在地震学方面的应用无疑是最早的例子之一,但是,声发射技术作为一门技术和有科学价值的研究工作是德国Kaiser在1950~1953年开始进行的。他观察到金属锌、铜、铝及铅都有声发射现象,并发现了声发射的不可逆效应,或称凯塞效应。如果说对于声发射的研究工作五十年代初期从德国开始,那么在五十年代后期,则研究的重点转到了美国,六十年代在美国出现了声发射技术的研究高潮。美国的Schofield对声发射现象进行了广泛的研究,认为声发射来自材料内部的机制,表面状态对声发射有一定影响。他还注意到连续型信号对应变速率是敏感的,它来源于位错钉扎和交叉滑移;突发型信号与堆垛层错的形成和机械孪晶的快速变形机构有关。Tatro从1956年开始寻找以声学技术检测金属滑移变形的可能性,他对铝单晶体的研究表明,声发射活动性与位错

的塞积和解脱有关，试样表面的阳极化薄膜能改变声发射的频谱，而且成为位错运动和变形带形成的障碍。Dunegan对声发射技术的研究也做过开拓工作，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等人把实验频率提高到100kHz~1MHz，这是实验技术的重要进展，这种进展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。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。声发射技术现场应用首先着眼于各类压力容器、航空和航天工业中的某些重要构件。因为原子能工业的特殊需要，后来的声发射研究工作中，相当部分是针对原子反应堆进行的。

随着声发射技术应用范围的扩大，在六十年代后期出现了商品声发射仪器。经不断改进后，已由单通道发展到多通道，由简单的信号处理方法发展到采用电子计算机进行声发射源定位。这一事实说明，声发射技术已开始进入比较广泛的应用阶段。

七十年代，声发射技术的发展热潮转到了日本，后来，欧洲的许多国家也相应开展了声发射技术的研究工作。

我国声发射技术的研究工作是从1973年开始的，其特点是首先着眼于应用，到目前为止，在材料研究、压力容器评价、飞机构件的强度监视和测定燃料燃速等方面已取得了明显的效果。在扩大应用范围的基础上，已生产出五、六种商品声发射仪器。

从无损检测的角度综观声发射技术的发展，无非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) 在什么地方出现了损伤；
- 4) 损伤的严重程度如何。

在过去的二十多年中，对这些问题都作了一些回答，但尚有

许多问题需要进一步研究。为了使声发射技术更好地发挥动态无损检测这一特点，全面回答上述四个问题，扩大它的应用范围，我们认为，声发射技术还应从以下几个方面深入开展研究工作：

1) 声发射技术是从接收到的声发射信号判断声发射源的性质，评价它的有害度。所以必须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。目前，由于还不能直接接收到从声源发出的原始声发射信号，因此，如何从接收到的信号反推声源就成为重要的问题。

2) 各种材料在不同实验条件下表现出的声发射特性差别很大，应广泛研究各种材料的声发射特性，丰富人们对材料声发射特性的认识，为寻找接收到的声发射信号与声源之间的联系提供依据。

3) 由于对声发射检测结果的影响因素比较多，统一声发射检测系统的标定方法和试验方法就成为急待解决的问题。这里，首先要研究的问题是声发射换能器的标定方法、声发射换能器的耦合方法、检测系统的现场标定方法和检测的程序，并统一缺陷有害度的评价方法。

4) 发展声源定位技术，寻找排除噪声的新方法和研究缺陷有害度评价的新方法，从而研制出适合于严重噪声环境下应用的新仪器，扩大声发射技术的应用范围。

第一章 声发射现象的物理基础

声发射检测过程可以归纳为：从声发射源发出的信号经介质传播后到达换能器，由换能器接收，输出电信号，根据这些电信号对声发射源作出正确的解释。对声发射源作出正确的解释是应用声发射技术的目的。因此，研究和应用声发射技术就应当研究声源是如何发声的；声波在介质中的传播规律。这也就是本章的主要内容。

随着声发射技术应用的进展，对于声发射理论、声发射源的机构和声发射波的传播等问题的研究工作也已逐渐展开起来。由于声发射源机构本身的复杂性，以及声发射波传播过程中出现的复杂情况，使这一理论问题中还有许多问题尚未解决，这里只介绍一些主要的研究结果。

一、 声发射产生的条件

我们用机械的不稳定来比拟声发射的产生，用一个简单的质量块-弹簧模型来模拟材料中发生的断裂事件。一个断裂事件的出现产生应力波发射，把应力波所负载的能量比拟为弹性应变贮能容器中某一个位置能量的局部释放^[1]。如图 1-1 所示，假定两个拉长的弹簧中间有一个质量块，如果每个弹簧的初始刚度是 K ，拉长 $\frac{1}{2}x$ ，那么弹簧所受到的初始拉力 P 为

$$P = \frac{1}{2} K x$$

两个弹簧构成了组合系统，其组合刚度 K_1 是

$$K_1 = \frac{1}{2} K$$

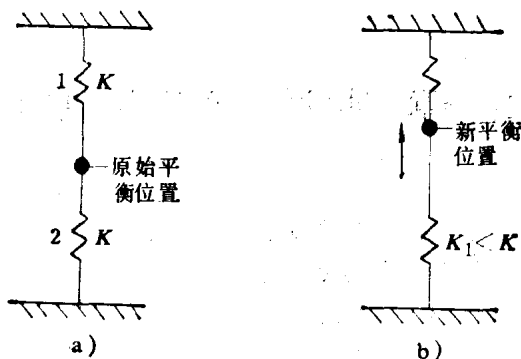


图1-1 用弹簧-质量块模型比拟声发射事件的发生过程
a) 原始状态 b) 新的平衡状态

现在，令弹簧2突然减弱，它的刚度降低到 $K - \delta K$ ，那么，弹簧受到的拉力降低了 δP 。现在，两个弹簧的平均拉力是 $P - \delta P$ ，下面求 δP 和位移 ξ 。此时，系统中两个弹簧的组合刚度为

$$K_2 = \frac{K(K - \delta K)}{2K - \delta K}$$

质量块在离原来位置 ξ 远的平衡位置开始振荡，一直到阻尼使质量块静止。由于力的传递，两个弹簧受到相同的拉力，那么

$$P - \delta P = \frac{1}{2} K x_1 = \frac{1}{2} (K - \delta K) x_2 \quad (1-1)$$

即
$$\frac{x_1}{x_2} = 1 - \frac{\delta K}{K}$$

因
$$x_1 = \frac{2(K - \delta K)x}{2K - \delta K}$$

$$x_2 = \frac{2Kx}{2K - \delta K}$$

把 x_1 和 x_2 代入方程式(1-1)得到

$$P - \delta P = \frac{(K - \delta K)Kx}{2K - \delta K}$$

$$\delta P = \frac{K \delta K x}{2(2K - \delta K)} \quad (1-2)$$

从图1-1可以看出，位移

$$\xi = \frac{1}{2}(x - x_1) = \frac{1}{2}(x_2 - x)$$

因此，

$$\xi = \frac{\delta K x}{2(2K - \delta K)} \quad (1-3)$$

下面求两种状态的应变贮能。应变贮能应当等于拉长弹簧作的功，那么，初始状态的弹性应变贮能为

$$U = \frac{1}{4} K x^2$$

最终状态的贮能

$$U - \delta U = (P - \delta P) \frac{x}{2} = \frac{(K - \delta K) K x^2}{2(2K - \delta K)}$$

$$\text{则得到} \quad \delta U = \frac{K \delta K x^2}{4(2K - \delta K)} \quad (1-4)$$

从(1-2)、(1-3)和(1-4)式可以看出，质量块-弹簧系统所释放的能量与载荷的瞬间降落 δP 成比例，而 δP 与刚度的瞬间减小 δK 成正比，因而释放的能量也与出现事件的应变成比例。从这里可以引出结论，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同一时间受到同一机械力作用，那么这个物体在时间和空间上将同时发生运动变化，当这个物体作为一个整体而运动，这个过程就不会产生波的过程。只有在局部作用时，物体各部分有速度变化，才出现波的过程。

现在，再进一步分析快速卸载的条件。实际的物体是具有一定的尺寸和表面的，应力波到达表面时，导致物体形状的变化表现为振动。因此，从物体振动的条件可以分析产生声发射的卸载条件。

在简单的情况下，可以研究两个刚性球相撞时的相互作用。力学分析指出，两刚性球相撞，振动能量与总能量之比等于

$$\alpha = \frac{1}{50} v_0 \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (1-5)$$

式中 v_0 ——两球撞击速度，
 ρ ——球的密度，
 E ——球的弹性模量。

撞击时两球的接触时间是

$$\tau = \frac{2.9432}{\sqrt[5]{v_0}} \left(\frac{5}{4} \frac{1}{k_1 k_2} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (1-6)$$

式中 $k_1 = \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}$;

m_1 、 m_2 ——相撞两球的质量，

k_2 ——两球的接触刚度。

从(1-5)和(1-6)式可以看出，在其它条件相同时，随着撞击速度的减小和接触时间的延长，波的能量减小。那么，接触时间 τ 取多大才能激发起周期为 T 的振动呢？可以简单地表示为

$$\tau \leq T$$

只有当撞击的接触时间小于产生振动的周期时，才能激发起周期更短的振动。例如，一根刚性杆的纵振动的周期可表示为

$$T = 2l \sqrt{\frac{\rho}{E}}$$

如果取杆的长度 $l=0.1$ 米，则 T 大约为40微秒。这就是说，要激发起周期比40微秒更短的振动，撞击的持续时间应当小于40微秒，这也就相当于产生声发射的卸载时间。

从(1-5)和(1-6)式来看，增大 τ ，振动的能量并不变为零，只是减小。这与采用的测量仪器的灵敏度有关，所以可表示为

$$\tau \leq \beta T$$

β 是系数，通常大于1，取决于仪器的灵敏度。可见，声发射源快速卸载的时间决定声发射信号的频谱，卸载时间越短，能量释放

速度越快，声发射信号的频谱扩展到更高的频率。能量释放的速度取决于声发射源的机构，理论计算表明，不同的材料和不同的声源机构，声发射信号的频率分量可以从次声频扩展到 50 兆赫。

二、 声发射的来源

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。

业已查明，工程材料中有许多种机构成为声发射源，概括起来示于表1-1。可以看出，声发射源涉及的范围非常广泛，这里着重讨论与无损检测有关的两种声发射源。

1. 位错运动和塑性变形

滑移变形是金属和合金形状不可逆变化的基本机构之一。滑移的元过程是位错运动。位错以足够高的速度运动时，位错周围存在的局部应力场成为产生声发射的条件。图 1-2 示出包含一个刃型位错的一块晶体，可以看到垂直于纸面的位错线使周围的原子排列产生畸变。在外切应力作用下，刃型位错沿滑移面运动，图 1-3 示出位错运动的几个阶段。当位错移出这块晶体时，在晶

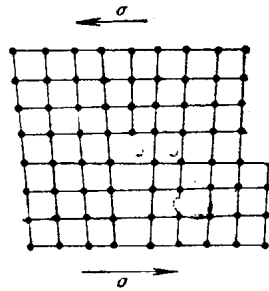


图1-2 刃型位错的结构