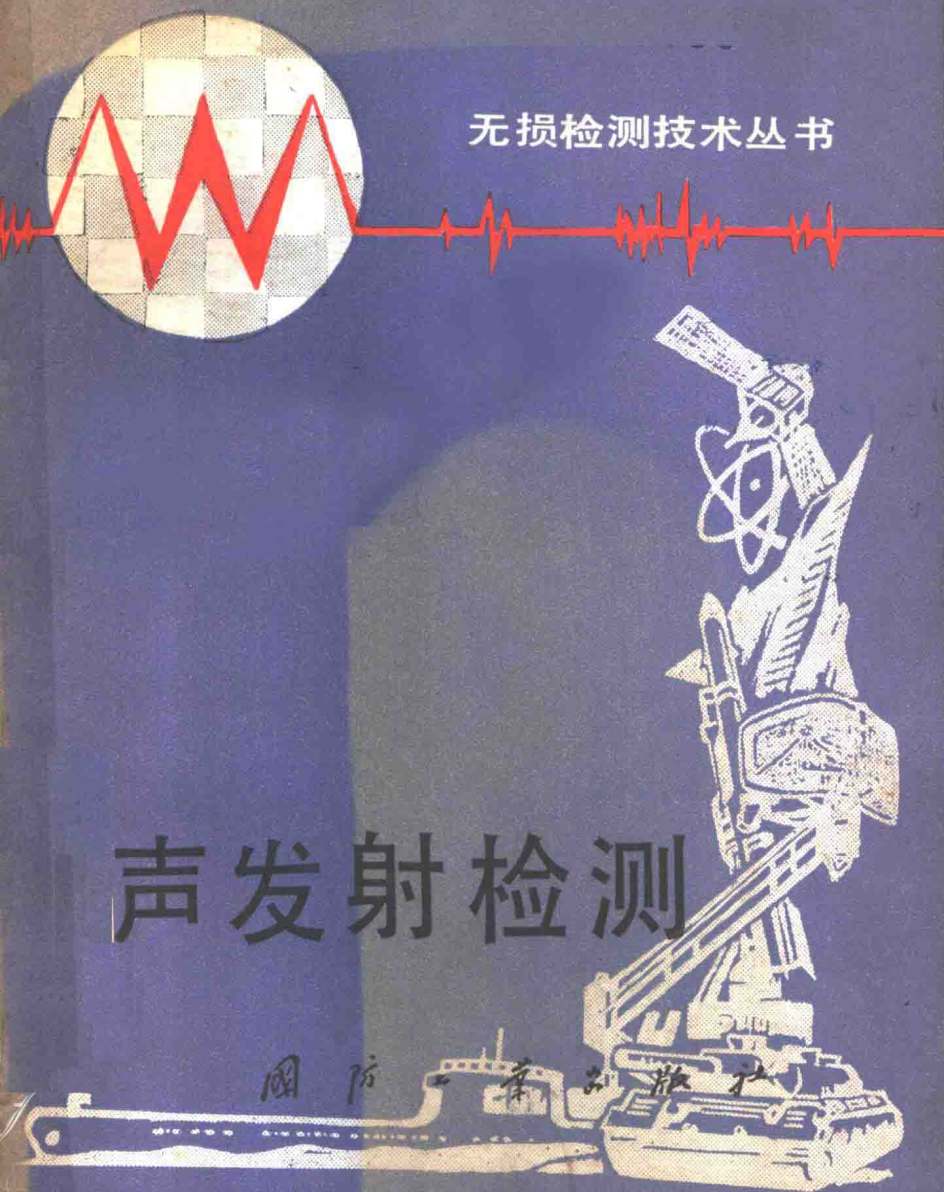


无损检测技术丛书

声发射检测

国防工业出版社



无损检测技术丛书

声发射检测

袁振民 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

声发射技术是六十年代发展起来的新的动态无损检测技术，它不同于超声、X射线和磁粉等检验方法。声发射检测的特点是由外部施加载荷使构件或固体材料发声，利用接收到的声信号探测构件的缺陷扩展，评价它的完整性和材料特性。

本书简要地介绍了声发射技术的主要内容，包括声发射检测的基本原理、声发射仪器和声发射技术的应用。

本书文字简明，深入浅出，适合于具有初中以上文化程度从事无损检测专业工作的工人和技术人员阅读，也可供有关专业技术人员参考。

无损检测技术丛书

声 发 射 检 测

袁振民 编著

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张3¹/₈ 64千字

1981年9月第一版 1981年9月第一次印刷 印数：0,001—3,100册

统一书号：15034·2275 定价：0.27元

前 言

无损检测是一门新兴的综合性科学技术。它以不损坏被检对象的使用性能为前提，应用物理和化学现象，对各种工程材料、零部件和产品进行有效的检验和测试，借以评价它们的完整性、连续性、安全可靠性及物理性能。无损检测是实现质量控制、节约原材料、改进工艺、提高劳动生产率的重要手段，目前已成为产品制造和使用中不可缺少的组成部分。

现代科学技术的发展，为无损检测提供了新的理论和物质基础。目前已经有五十多种检测方法，并且在一些领域中还实现了电子计算机控制的自动化检测。在我国实现四个现代化的进程中，无损检测技术的应用和发展日益受到重视，并有着广阔的前景。

为普及和推广无损检测技术，决定编写这一套《无损检测技术丛书》。编写组由丑维恭、张鄂、关云隆、杨新荣、潘炳勋、戴树椿、李林、郑文仪、袁振民、王永保、周在杞、陈积懋、方志成等同志组成。这套丛书包括如下十个分册：

超声检测；

射线检验；

磁粉检验；

涡流检测；

渗透检验；

声发射检测；
激光全息检验；
微波与红外检测；
胶接结构与复合材料无损检验；
无损检测自动化与信息处理。

编写这套丛书的资料一部分来自生产、科研实践，一部分是参阅了国内外有关的技术书刊。在编写过程中曾得到编写组各成员所在单位的大力支持。本分册的编写得到了编者所在单位声发射小组和洪时藏同志的大力协助，邓日红同志审阅了书稿，在此一并表示感谢。

由于水平所限，书中缺点错误在所难免，欢迎读者批评指正。

《无损检测技术丛书》编写组

一九八〇年十二月

目 录

声发射检测的基本原理

- 一、什么叫声发射..... 1
- 二、声发射技术的发展..... 3
- 三、声发射检测的基本原理..... 7
- 四、声发射的来源..... 9
- 五、声发射信号.....13
- 六、声发射检测的特点.....22

声发射仪器

- 一、对声发射仪器的基本要求.....25
- 二、声发射测量参数.....28
- 三、单通道声发射仪.....35
- 四、排除噪声的方法.....44
- 五、声发射源定位及多通道声发射仪.....47
- 六、模拟声发射源.....51

声发射技术的应用

- 一、声发射检测的操作程序.....52
- 二、材料研究中的应用.....55
- 三、用声发射分析断裂.....64
- 四、评价构件的结构完整性.....79

声发射检测的基本原理

一、什么叫声发射

从字面上讲，声发射就是发出声音的意思，它是一种常见的物理现象。例如，弯曲一根竹筷子，在开始弯曲时我们听不见声音，随着施加的力增大，可以听到噼噼啪啪的响声，如果继续增加弯曲力，筷子就会折断，在折断时可以听见更大的响声。弯曲筷子发出的声音就是一种声发射。我们利用这种声音，可以推断筷子受弯曲后所处的状态和折断是否即将到来。类似筷子受弯曲后发声的现象，在日常生活中是常见的，如打破窗户玻璃可以听见响声，根据听见的响声也可以推断玻璃是否被打破。地震伴有极强烈的声发射。地壳中的岩层受地球内部运动规律的控制和外部因素的影响，地应力增大，使地壳中的岩层错动以致破裂产生地震。地震时，从地震中心发出的地震波向外传播，我们只要把地震波接收到，就可以推知地震发生的地点和深度，研究和分析地震的成因，地震仪就是根据这一原理制造的。

在机械制造业中大量使用金属，金属受力后也会发声，“锡鸣”就是一个例子。当我们将一块锡片在耳边反复弯曲时，可以听到噼啪声。锡受力后能够发声是由于锡在外力作用下特殊的变形机构决定的，这种变形机构称为孪生。与其它金属的变形机构相比，孪生过程释放的应变能较大，产生

较强的声发射，使人耳能听见。大多数金属，如铜、铁、铝和钢等受力变形也有声发射，但是，由于它们的变形机构与锡不同，声发射比较微弱，人耳听不见，只能借助灵敏的仪器才能探测出来。

以上是物体受力后发声的例子。热、电磁也能使物体发声。譬如，烧开水时，由于炉火使水的温度升高，出现上下对流，这种对流也伴有声发射。随着温度升高，对流加剧，声发射增强。因此，只要仔细听水壶内水的响声，就可以推知水是否已达到沸腾状态。给变压器通电，由于变压器材料的磁致伸缩和电磁场的涡流作用也会发声，有经验的工人可以根据这种声音推知变压器的工作状态。

综上所述，声发射就是材料受外力或内力作用产生变形或断裂时，以弹性波的形式释放出应变能的现象。声发射也指固体内部的缺陷或潜在缺陷，在外部条件作用下改变状态而自动发声。从声发射源发出的弹性波传至材料表面，表现为极微弱的机械振动。对于这种振动波，人耳能否听见取决于波的频率和强度（即振幅）。人耳能听到的声音频率范围是从二十赫兹到两万赫兹，在这个频率范围内的振动波称为可听声波。频率低于二十赫兹和高于两万赫兹的振动波，分别称为次声波和超声波。这种声波不能引起声音感觉，所以听不见。各种材料声发射波的频率范围很宽，从次声频、声频到超声频，所以，声发射也称为应力波发射。声发射技术扩大了我们的听力，使我们能探测超声波和强度很低的声音。

声发射这一名词在不同国家和不同专业领域略有不同。与声发射或应力波发射含义相同或相近的名词有超声发射、

声辐射、声放射。在地震学中还使用微地震、地震辐射、地震活动性、声学活动性和岩石噪声等名词。

二、声发射技术的发展

压力容器制造好后要作验证试验。验证试验就是使压力容器经受比使用压力更高压力的考核试验，通常认为在考核试验后于较低压力使用时不会导致破坏。可是，实际情况往往不是这样。例如，有一批直径 107 毫米、由高强度钛合金制造的固体火箭发动机壳体，进行三次水压试验，每次 90 秒钟，达到的压力为平均工作压力的 1.1 倍。设计技术文件规定，如果这批容器中，有容器在首次水压试验时破坏，则要求对所有容器进行第四次水压试验。在第四次水压试验时，有一个容器受压到 40 秒时破坏。压力容器制造者在故障分析报告中指出：破坏发源于内壁表面中心圆环焊缝和热影响区。验证试验前进行了无损检验，没有发现裂纹。在水压试验过程中，裂纹的亚临界扩展是这次破坏的唯一可能的原因。

这一例子说明，压力容器在水压验证试验中缺陷尺寸可能增大。这不仅关系到压力容器在验证试验中失效，更主要的是那些在验证试验中已存在裂纹的亚临界扩展的压力容器，在使用中裂纹的亚临界扩展可能导致事故。但是，如果用声发射来监视压力容器在验证试验中裂纹扩展的情况，则可获得很多有用数据，以便控制压力容器质量，保证安全使用。虽然声发射技术已有效地用于各种高压容器的考核验证试验和现场使用中的监视，但是，声发射技术的发展并不是从容器的应用开始的，而在压力容器试验中的应用却又

是声发射技术发展的重要阶段和结果。

最早应用声发射技术是地震学的研究，通过对地震波的分析，推断地震源的位置、地壳运动和破裂的特征。声发射应用在金属方面具有科学价值的研究是从一九五〇年开始的。德国凯塞研究了锌、铝、铜、铅和钢等金属材料变形时的声发射现象，他以多晶体金属材料为研究对象，认为金属材料的声发射来源于晶粒边界，声发射与应力和晶粒边界的相互作用有关，并认为对特定的材料有一个频率和振幅的特征谱。虽然后来对单晶体材料和多晶体材料的研究表明，声发射来源于晶粒边界的认识是片面的，因为单晶体材料也有声发射。实验证明，声发射与晶体中位错的运动、阻塞和解脱有关；而且也不存在表征材料的频率和振幅的特征谱。但是，凯塞却发现了一个重要的现象，即声发射的不可逆性，这个现象对今天声发射技术的应用和发展仍有重要价值。

在五十年代初期，电子技术尚未高度发展，加之对材料的声发射特性还缺乏基本了解，声发射实验是在声频范围进行。这一频率与大多数情况下各种机械噪声的频率范围重合，实验只能在声隔离区进行。当时噪声干扰是声发射技术的严重困难。后来发现声发射的频率成分可从几赫兹扩展到 30 兆赫兹。大约在六十年代初期，将声发射的检测频率从声频提高到 100 千赫兹到 300 千赫兹，这就初步克服了机械噪声的干扰，为设计新型的声发射仪器和使声发射技术从实验室过渡到现场应用打下了良好的基础。

一九六四年，有人研制成功实用的声发射监视系统，并用于纤维增强塑料制造的固体火箭发动机壳体的水压试验，这是声发射技术用于压力容器现场水压监听试验成功的第一

个例子。由于这一成功，引起了材料研究者和工程界对声发射技术的广泛兴趣，也显示了声发射技术作为动态无损检测工具的生命力。

此后，为了促进声发射技术的发展，首先在美国，后来在日本和欧洲，相继成立了有关组织，制订规划，交流情报，充实人员，加强实验研究，发展新型仪器，建立标准试验方法，分别在理论研究、应用研究和工业实用三个方面广泛地进行工作，发表了大量文献。表 1 列出每隔两年声发射技术的发展和新的应用概况。

由于声发射技术用作现场评价结构完整性的价值日益显示出来，从事声发射技术研究的人员愈来愈多，发展更为迅速。近十年来，声发射技术发展的特点更加突出。

首先，十分重视关于声发射源的研究。声发射作为动态无损检测的工具用于现场评价构件的结构完整性，应当建立声发射信号与构件中缺陷性质的关系，建立声发射信号与缺陷有害度的关系，这就必须了解声发射源及从声发射源发出的信号的特征。

第二，重视各种材料声发射特性的研究。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，为了利用检测到的声发射信号推知材料内部的状态，就必须了解在各种条件下不同材料的声发射信号的特征，以便利用这种特征进行材料和构件的无损检测。

第三，发展声发射源定位技术和评定缺陷有害度。源定位就是利用声发射信号的特点找出缺陷所在位置，这是声发射检测的重要内容，对大型构件的现场动态监视更为重要。只有找出缺陷位置，才能评价它的有害度，才能用其它无损

表1 声发射技术应用的发展概况

年份	1966	1968	1970	1972	1974	1976	1978
应用实例和进展	房间声学试验 拉伸试验 隔板试验	应力腐蚀试验 发明新型仪器 发明新型传感器 评价结构件断裂力学试验 压力容器试验 提出校准传感器的方法	蠕变试验 检测马氏体相变 生产过程监视 复合材料试验 低频疲劳	冰的声发射试验 频谱分析 反应堆监视 飞机强度试验 管道监视 焊接应用 缺陷定位	钢索寿命估计 发明鉴别噪声的新方法 合金熔化和燃速测定 涂层测厚 转动机械 高温疲劳 腐蚀疲劳	光探针应用 叶片裂纹 耐火材料 飞行监视 高频疲劳 制订压力容器检验标准	合金氧化研究 渗层脆性评价 缺陷有害度评价 推析声源 固体存储器的应用 仪器的改进

检验方法加以验证。

第四，发展新型仪器。近年来发展了不少多用途的通用声发射仪器和用于某一目的的专用声发射仪器，其主要特点是多功能、多参数、多通道、小型化、计算机高速处理数据和实时显示。

第五，扩大应用范围。声发射技术作为动态无损检测的手段弥补了像超声、X射线、磁粉检验等常规无损检测方法的不足，成了保证产品安全性、可靠性的有效工具。

虽然对声发射技术已经进行了大量的研究，但对声发射信号进行深入细致的分析仍很不够，从声发射信号中取得关于缺陷的性质和状态的信息仍很有限。这就难以充分发挥声发射无损检测的特点和潜在力量，难以充分了解缺陷的状态和在使用中的可能发展趋势。

三、声发射检测的基本原理

声发射检测的基本原理就是由外部条件(如力、温度等)的作用而使物体发声，根据物体的发声推断物体的状态或内部结构的变化。利用外部条件的作用使物体发声的现象进行无损检测早已为广大劳动人民所熟知和运用。采矿工人根据矿井里的坑木发出声音来推断矿井是否有崩塌的可能；变压器通电试验，用听到的噼啪声来判断变压器内部是否有放电击穿；有经验的点焊工人根据在焊接过程中来自焊点的声音判断焊点是否有飞溅现象。这些例子中，发声基于宏观过程，能量较大，无需利用仪器，人耳可直接听到。今日的声发射技术，不仅要探测那些宏观过程，更主要是通过外部条件的作用探测物体内部的微观过程，这就需要借助灵敏的电子

仪器。例如，为了研究金属的腐蚀过程，就要将探测到的反映腐蚀过程本质的声信号放大一百万倍，才能听到腐蚀的声音。这个例子中，腐蚀介质是外因，金属受腐蚀是状态的变化，是内因。如果升高金属的温度，加剧金属的腐蚀过程，使释放的声信号也加强，那么，只要放大十万倍就能听到。这就是说，温度这个外部条件又诱发了内部状态的变化。表2列出声发射检测中已采用的外部条件及其适用范围。

表2 声发射检测使用的外部条件及其适用范围

外部条件	适用范围
外加载荷	各种机械试验，如拉伸、弯曲、疲劳试验等；压力容器和管子水压检验；胶接检验
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	测量火药柱的燃速
旋转	探测转动机械的损伤

材料在外部条件作用下，内部的缺陷由“相对静止状态”进入“变动状态”，或者材料内部由一种状态变到另一种状态，这种状态的变化改变了材料中能量分布，使一部分能量以弹性波的形式释放出来。所以，由材料发射出来的每一个声信号都包含着反映材料内部或缺陷性质和状态变化的丰富信息。声发射检测就是接收这些声信号，加以处理、分析和研

究，从而推断材料内部的性态变化。这如同 X 射线检验一样，利用 X 射线穿透零件所摄得清晰的照片，然后根据照片中所包含关于缺陷的信息作出判断。

产生声发射的单个事件的持续时间很短，通常在 10^{-4} 到 10^{-8} 秒。事件的持续时间愈短，其频率分量愈高。由于发声的微观过程不同，产生每一个声发射事件的阶跃时间也不同。因此，一般说来，声发射信号具有很宽的频率分量。声发射信号穿过材料和构件时，高频成分衰减比较严重，其幅度随着传播距离增大而下降，而低频成分又与机械噪声重叠在一起，不易分离。因此，通常的声发射检测都选择在某一频率范围内进行，这一频率范围称为声发射检测“频率窗口”。频率窗口的选择取决于检测对象材料的声发射频率分量和背景噪声的折衷。图 1 示出不同材料和研究领域常用的声发射检测的频率范围。若要有效和合理地选择频率窗口，应当对检测的环境和特定试验条件下材料的声发射特性进行频率分析，但是频率分析需要特殊的仪器，往往难以办到。

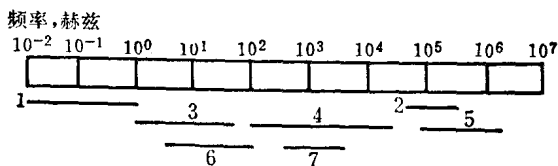


图 1 声发射检测的频率范围

- 1—远震研究；2—地质材料有限声发射研究；3—地震勘探；
4—最近地质材料声发射实验；5—金属材料声发射研究；6—
微震研究；7—地质材料早期声发射研究。

四、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，有哪些过程和机理。这是一个比较复杂且尚不清楚的问题。因为，至今声发射检测还不能直接测到从缺陷发出的原始声发射信号，这就给声发射源的研究带来了明显的困难。尽管如此，由于声发射技术的应用不断扩大，促使人们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。

声音是由振动引起的。人发出声音时会感到自己喉头的声带振动；用手拨动琴弦会听到悦耳的乐声。在外部应力作用下，金属中的缺陷附近或微观不均匀地区应力集中，处于高能状态，这种高能状态是不稳定的，必然要过渡到稳定的低能量状态。如果这种过渡在瞬间快速进行，则将多余的能量中的一部分以弹性波的形式放出而产生声发射。声发射的这个过程可以用机械系统的瞬间不稳定来比拟。如图 2 所示，有一个小球被两个拉紧的弹簧悬在中间，在原始状态，两个弹簧的倔强系数 H 相等，小球处于平衡状态(图 2 (a))。

如果下面的弹簧以非常缓慢的速度减弱，则小球慢慢向上移至新的平衡位置(图 2 (b))，小球在新的平衡位置具有的能量比在原始位置时低，因为小球移动很慢，能量的转变也以很慢

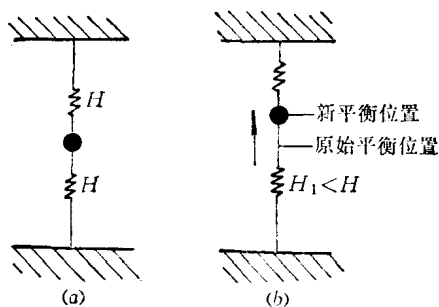


图 2 用弹簧-小球模型比拟声发射的发生过程
(a) 原始状态；(b) 新的平衡状态。

的速度进行。现今下面的弹簧瞬间变弱，倔强系数 H_1 小于 H ，则小球就会在新的平衡位置振荡，小球振荡所具有的动能正比于 $H-H_1$ 的平方。由于空气的阻尼，小球的振荡逐渐趋向静止。这个比喻中，我们把小球振荡的动能比拟为一个声发射事件所具有的能量。

材料中有哪些机构可能产生类似于机械不稳定的瞬变过程呢？对于这个复杂的问题，在目前声发射技术发展水平上，只对金属材料作过初步的研究。关于金属材料声发射的来源可能有以下几个方面：

(1) 金属塑性变形和位错运动。在理想情况下，金属中的原子以一定次序有规则的排列。但实际金属中却存在着各种缺陷，其中位错就是由于原子错排了位置而形成的一种线缺陷。在外部应力作用下，位错在滑移面上运动使金属塑性变形。有人曾经认为，单个位错运动发射出“声音”。一个位错从低能的点阵位置运动到另一个位置，在新的点阵位置振动。计算表明，高速运动的位错发射高频率低幅度的声发射信号，而慢运动的位错则发射低频率高幅度的信号。一个位错发射出的信号能量太小，以致不能为高灵敏度的声发射仪器检测到。因此，设想许多位错或位错群同时运动，据估计，大约 100 个到 1000 个位错同时运动才能产生被仪器检测到的连续型信号，几百个到几千个位错同时运动可产生突发型信号(在下一节进一步介绍连续型和突发型信号)。位错运动产生声发射的另一种机构是位错的湮没和塞积位错的解脱。一个位错移至金属表面，产生一个原子间距的滑移台阶，位错消失；在同一滑移面上正位错和负位错相遇而抵销，这两个过程均称为位错的湮没，位错湮没产生声发射。在同一滑