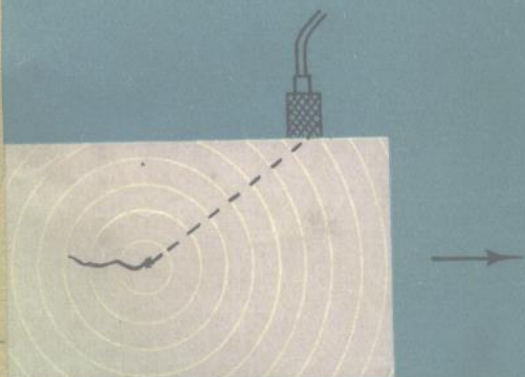


声发射



冶金工业部金属研究所

科学出版社

内 容 简 介

声发射技术是六十年代发展起来的一种先进技术。它的特点是通过外部加力的方式，使材料或部件内部所存在的缺陷或不均匀地区发声(弹性波)。

本书比较详细地介绍了声发射的原理、应用及其发展前景，特别着重声发射在各个方面的实际应用。

本书可供有关方面生产和科研人员参考。

声 发 射

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1972 年 10 月 第 一 版 1972 年 10 月 第 一 次 印 刷

定 价： 0.18 元

D662/11

毛主席语录

古为今用，洋为中用。

但是一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

前 言

伟大领袖毛主席教导说：“我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。”

声发射技术是六十年代发展起来的一种先进技术，它的特点是通过外部加力的方式，使材料或部件内部所存在的缺陷或不均匀地区发声(弹性波)，因而这种技术可用来进行动态无损检验，即在部件的实际操作或运转当中进行现场检验和连续监察。它的应用范围包括：核反应堆的检验，承压容器的检验，焊接过程中的检验，粘胶接合的检验，转动机械和部件的检验等等。在研究工作方面，声发射技术已经用来研究范性形变动力学和断裂力学。

遵循毛主席关于“洋为中用”的教导，在编写这本小册子的过程中，我们调研和总结了国外近年来已发表的关于声发射方面的资料，尽量用浅显的语言来说明声发射的基本原理、应用及其发展前景，特别着重声发射在各个方面的实际应用。

由于编写者水平有限，书中的缺点和错误是难免的，热忱地欢迎广大读者提出宝贵的意见和批评。

目 录

前 言	i
第一章 声发射是无损检验的一种新工具	1
第二章 关于声发射的初步认识	3
2.1 区分两种类型的声学无损检验技术：声发射和声撞 击	3
2.2 声发射无损检验技术的主要特点	4
2.3 声发射的能量和频率	5
第三章 声发射技术目前发展概况	6
第四章 测量和分析声发射数据所用的仪器	8
4.1 任务和要求	8
4.2 外部条件的选定	8
4.3 频率范围和频率“窗口”的选定	9
4.4 探测换能器、滤波器和放大器	10
4.5 记录和分析声发射信号的装置	13
4.6 声发射数据的分析	15
第五章 声发射技术在无损检验工作中的应用	19
5.1 核反应堆的检验	19
5.2 承压容器的检验	22
5.3 焊接过程中的检验	24
5.4 粘胶接合的检验	28
5.5 转动机件的检验	31
5.6 压力测量,超声检漏及其他检验	33
5.6.1 压力换能器	33
5.6.2 超声检漏	34
5.6.3 陶瓷中的裂纹增大	35

5.6.4	复杂结构中的裂缝的探查	36
5.6.5	其他方面的应用	39
第六章	声发射的基本原理	40
6.1	研究声发射机理的实际意义	40
6.2	声发射的基本过程	40
6.3	范性形变与裂缝的形成	42
6.3.1	拉伸加载装置举例	42
6.3.2	拉伸形变过程中的声发射信号类型	45
6.3.3	声发射曲线与应力-应变曲线的对比	46
6.3.4	在周期性加载下的声发射	48
6.3.5	在孪生过程中的声发射	51
6.3.6	关于拉伸形变过程中的声发射的来源	51
6.4	裂缝的增大和传播	52
6.4.1	裂缝声发射信号的特点	52
6.4.2	声发射率与裂缝增大率的关系	53
6.4.3	声发射与断裂力学	53
6.4.4	用声发射技术查知疲劳裂缝的增大	55
6.5	延性材料的声发射和脆性材料的声发射	56
6.6	相变过程及其他	58
第七章	结语和展望	59
参考资料		61

第一章 声发射是无损检验 的一种新工具

无损检验是一种历史悠久的技术，是由广大的劳动群众在社会实践过程中创造出来的。在用光学方法进行无损检验方面，我国的广大农民早就创造了在太阳光下照鸡蛋以判断鸡蛋内部情况的技术。在声学方法方面，广大的劳动群众也创造了各种各样的很巧妙的无损检验技术。在这些声学方法里面，有很大的一部分是借物体内部所发出的声音（声发射），来推知物体内部所出现的异常情况或不完整性。关于地震的探查和记载，是我国广大人民在古代就很熟悉的。地壳中的岩层和岩块受着地球内部运动变化和外界因素的作用，应力逐渐集中，当应力达到足以使岩层破裂或岩块作相对运动时，在岩块的交错带和岩层中那些比较脆弱的地方，就发生错动和震动，这就是地震。地震的形式是地震波（机械振动波）从发生地震的地点向外传播。我们根据对于这种地震波（应力波或声波）的探测，就可以推知发生地震的地点。对于地震来讲，内因是地壳内有岩块的交错带或岩层中有比较脆弱的地区存在，外因则是外界因素的作用，外界因素的作用使本来比较脆弱的地方发生错动和震动。另一个关于声发射的例子是，农民攀登树木时，根据树杈所发生的嚓嚓的声音可判断出这是树杈要折断的先兆。这时如果赶快下来，树杈还不致于折断。这是利用声发射来进行无损检验的根本原理。农民攀登树木时，使树木因受力而发生一定的变形（这是外因），这种变形使树木中的脆弱地区（这是内因）有进一步发展而造成断

裂的趋势。脆弱地区在进一步发展时就发出声音，而发声的地点就是树木中脆弱地区所在的地点。

劳动人民在生产实践中所体验到的声发射现象还有“锡鸣”，即把一块锡片放在耳边加以弯曲时，可以听到锡片发出声音来。机件在转动时发出的响声，有一部分是由于机件的内部缺陷在受力时所引起的声发射。上述这些例子都是由于外部加力而导致物体内部发出声波，但加力只是导致声发射的一种方式。加热(外因)也可以导致声发射，例如烧水时，根据壶内的水所发出的响声可推知水的内部情况(即推知水的温度)，从水发出的声音可推知水就要达到沸腾状态。另外，变压器在通电时会发出嗡嗡声，这是电磁作用(外因)使变压器铁芯材料发生磁致伸缩从而导致声发射。

从上面这些例子可以看出，声发射现象的发现和应⽤，是劳动人民在生产实践中所体验出来的，是唯物论的认识论的具体的体现。在六十年代里，声发射在许多方面，特别是在无损检验工作方面，已经得到了广泛的注意和重视。

第二章 关于声发射的初步认识

2.1 区分两种类型的声学无损检验技术:

声发射和声撞击

上面叙述了劳动人民利用声发射现象来了解物体内部情况的一些例子。实际上,在用声学方法进行无损检验工作方面,还有许多为劳动人民所非常熟悉的生动的例子。用敲打和听声的办法来判定硬币和金属器件的质量和完整性,是一种历史悠久的无损检验技术。劳动人民早就熟知了钟声和锣声的悠扬程度是与钟和锣的内部完整程度紧密相关的。伐木工人轻敲树木就能判定其中是否有虫眼。有经验的养路工人用锤敲打铁轨,就可查知其中是否有疲劳裂缝。而火车每到车站时,检车工人都用小锤敲打车辆上的各个关键部件,从所发出的声音来推断部件中是否有毛病,这是进一步地利用声学无损检验技术来避免发生行车事故的生动事例。如果仅从现象上来看,上述这些例子与声发射无损检验技术似乎并没有什么很大的差别。但是这两种类型的声学无损检验技术在实质上是完全不同的。声发射无损检验技术所根据的原理是,如果物体内部具有某种特点(例如有缺陷存在),则在外部条件的影晌下(例如加力),就由具有特点的部位(例如缺陷部位)发出声波来,对于这种声波的探测,可以推知物体中有缺陷存在。上述另外一类的声学无损检验技术可以称之为声撞击无损检验技术,它所根据的原理是物体受到撞击后由于振

动而发声(声波),而物体内部的特点(例如有缺陷存在)则使物体所发的声波在振幅上、在频率上或在音色上(即谐音数目),与不含缺陷的物体所发的声波不相同。根据这种不相同性就可以推知物体中有缺陷存在。

2.2 声发射无损检验技术的主要特点

声发射无损检验技术的最根本的特点是能够使被检验的对象(缺陷)能动地参加到检验的过程中去。在一般的超声脉冲回波法探伤技术里,由超声换能器所发出的超声信号在遇到缺陷时被反射回来,而缺陷在这个过程中所起的作用只是被动地把超声信号反射回来,因而从所观测到的超声信号里只能推知缺陷的存在和所在的地点。在声发射探伤技术里,从外部对物体施加的力,使物体内部有缺陷存在或有“潜在缺陷”存在的地区从“相对地静止的状态”达到了“显著地变动的状态”,从“数量的变化”达到了“性质的变化”,表现为把这个地区所储蓄的多余的应变能以弹性波(应力波或声波)的形式释放出来,使物体发声。这种声发射是物体内部的缺陷或潜在缺陷(内因)在外力的作用下(外因)能动地发射声波,因而根据所发射的声波的特点以及诱发声波的外部条件,能够推知发声地点(缺陷或潜在缺陷地区)的具体情况,能够揭露它的更为深入的矛盾和实质,这就使我们不但能够了解缺陷的目前状态,也能够了解缺陷的形成历史和它将来在实际使用条件下所将要发展和增大的趋势。

声发射无损检验技术的上述这个最根本的特点,使声发射技术具有一系列的特色。首先是这种技术可用于动态的无损检验,即在结构或部件实际操作或运转中受力的情况下进行现时检验和监视报警。在近代化的工业中,这种特色使声

发射无损检验技术具有广阔的应用前途。第二个特色是这种技术不用发射换能器，用一个接收换能器就能查知周围相距几米远处的伤，这为检验大部件创造了极为优越的条件。第三个特色是声发射现象在固体中普遍发生，在金属与合金，塑料，陶瓷，土壤，木材，混凝土，复合材料，石墨，冰等等固体材料中都曾经观测到声发射，这为声发射技术的使用开拓了广阔的前景。

2.3 声发射的能量和频率

声发射的产生，是由于在缺陷或“潜在缺陷”周围所储蓄的应变能在外力的触发下释放出来成为波动能(应力波或声波)。这种能量通常以脉冲的形式释放出来。所释放的能量大小与缺陷的微观结构特点以及外加应力的大小有关。在每个单位时间内所发射出来的脉冲数目，既与所释放的能量大小有关，也与释放能量的微观过程的速率有关。因此，测量声发射所发射出来的能量大小或每个单位时间内所发射出来的脉冲数目，都能够提供关于声发射源(缺陷或“潜在缺陷”)的微观结构特点的有用知识。

所发射出来的每个脉冲都包含着一个频率谱，这个频率谱所包括的频率范围可以从几赫到几十个兆赫(目前已观测到的最高的声发射频率是 30 兆赫)。一般来说，引起声发射的微观结构特点的尺度越小，或者释放能量的微观过程所进行的速率越快，则所产生的声发射的频率范围越高。

上面所说的频率，指的是在产生声发射的物体中所激发的频率，或在探测换能器中所激发的频率。声发射脉冲和频率之间的关系是比较复杂的，这将在第四章中讨论“测量和分析声发射数据所用的仪器装备”时再详细说明。

第三章 声发射技术目前发展概况

声发射的现象是劳动人民在生产实践中发现的。声发射现象可用于无损检验工作，也是劳动人民在长期生产斗争中总结出来的。在本世纪五十年代和六十年代的初期，一些金属物理学工作者在金属实验的过程中，注意到金属在被拉伸和在进行相变的过程中发出噪声^[1-5]，并对于这种声发射现象进行了一些较有系统的研究。在六十年代里，在声发射用于无损检验方面，有了较快的发展。国外已经有人研究了利用声发射原理的连续的监视装置，以查知核反应堆的初级压力系统中的缺陷或裂缝的增大，并确定裂缝的位置。为了动力工业和宇航工业的需要，他们在六十年代里大力开展了用声发射技术对大部件的焊接结构进行无损监视的工作，例如大的锅炉，火箭发动机的外壳，火箭燃料桶，以及宇宙飞船的其他部件。1967年，他们已经建立了用声发射在焊接结构中进行日常的现时监视的自动化系统。声发射技术还大量地被用来监视各种承压容器的流体静压力试验。在检验粘胶接合结构方面，声发射技术也已经用来指示接合的强度。

在声发射数据记录和分析仪器方面，已经较广泛地应用了磁带记录器，这可以得到声发射的永久记录，并可以随后进行频谱分析。为了连续地现时确定复杂和庞大系统中的缺陷的位置，已经采用了多个接收换能器的装配，用电子计算机进行快速计算^[6]，并把所得的结果现时地放映在监视屏上。

就目前的情况来看，对声发射信号的了解还是极其初步的。外国资料中报道了许多声发射数据，但对于这些数据只

能在对比的基础上来使用,即根据“有没有声发射”以及“声发射的多少”来推断有没有缺陷和缺陷的严重程度,而没有对于这些数据所带来的关于缺陷状况的丰富的内容进行细致的、具体的分析。这就不能充分发挥声发射无损检验技术的主要特点和潜在力量,不能通过声发射数据来指示缺陷的更为深入的矛盾和实质,从而也就不能够充分了解缺陷的过去、现在和将来在实际使用条件下的发展趋势。

第四章 测量和分析声发射 数据所用的仪器

4.1 任务和要求

现在提出的任务是利用声发射这一物理现象来进行无损检验工作。为了完成这个任务,首先必须对声发射现象进行观察和探测,把声发射数据记录下来,并对于这些数据进行分析和综合,从其中引导出关于试样中所含缺陷的性质的正确结论。

4.2 外部条件的选定

如果试件中含有缺陷,则在试件上施加适当的应力使试件发生足够的应变时,试件中的缺陷就会成为声发射源而发出声波来。在检验承压容器的情形下,一般是逐渐增加容器中的流体静压力,同时探测有无声发射出现。在检验部件中的缺陷时,通常是对这种部件进行拉伸或弯曲。用现有的探测仪器已经能够查知,在1磅/平方英寸(7×10^{-4} 公斤/毫米²)的应力的作用下就有声发射出现。有时,部件中的残留应力已经足以引起声发射,例如在焊件冷却过程中的情况。温度变化也能够导致声发射,例如在相变过程中和金属与合金凝固过程中的情况。

有许多工作是在拉伸试验,蠕变试验或疲劳试验的过程

中进行的。为了研究裂缝的生成和增大的过程，常常在试样上附加特定的缺口。

应该指出，应力诱致声发射的现象是不可逆的^[1]，这就是说，如果第一次在试样上施加应力时有声发射出现，那么卸载以后，第二次再施加应力在未达到原来的应力水平以前，并没有声发射或者声发射极少，而只有当施加应力超过了以前的应力水平，才能重新观测到声发射。因此，对于一个部件进行声发射检验时，应该知道这个部件以前的受力情况。

此外，既然叫做无损检验，则在进行声发射检验时所施加的外力使部件产生的变形，不应达到或超过该部件在实际使用中产生的变形。在实际的声发射无损检验事例中，这种条件是能得到满足的。

4.3 频率范围和频率“窗口”的选定

声发射源在外力的诱导下发出一种应力脉冲，这种脉冲在材料中以声速进行传播。当这个脉冲在试样中或在探测换能器中来回反射时，它会引起驻波，从而使这个系统发出一种“回响”。在能量被消耗时，这种“回响”按指数定律而衰减。一般用这种“回响”的频率来描述声发射的频率，这也就是应力脉冲在产生声发射的部件中所激发的频率，或在探测换能器中所激发的频率。

在进行某一具体的检验工作时，首先要知道所要检验的缺陷在一定外力的诱导下的声发射频率范围，然后再从这个总范围内选择一个最适合的频率“窗口”，以便滤去其他过程所发生的噪声的干扰。一般的机械噪声和电气噪声的频率都较低，因而在探伤工作中通常都要首先确定频率“窗口”的下限。在频率“窗口”确定以后，就能够以此为根据来选定所用

的探测换能器和带通滤波器。

声发射的频率可以从低声频到超声频，例如地震波的频率就较低。有人认为“声发射”的频率并不限于声频，因而用“应力波发射”这个名词来代替声发射，但实际上都是说明同一种现象的。

也有人说声发射频率是指单个脉冲的宽度。宽度越大，频率就越低。例如，若这个脉冲的持续时间是1微秒，可以说它是频率为1兆赫的脉冲。

4.4 探测换能器、滤波器和放大器

探测换能器是为了把声发射信号变为电信号，以便随后加以放大和分析。通常所用的探测换能器有加速度计，压电换能器，接触传声器，接触拾声器，电唱头等。最后三种装置一般用来接收声频信号。也有人使用磁致伸缩装置来探测声发射信号^[7]。

加速度计可用于接收30千赫以上的信号，现有商品的最高频率范围是125千赫。加速度计的主要部件是由不锈钢板或钛板所组成的电容器，它所产生的电信号与作用到它上面的加速度成正比。也有用压电晶片作元件的加速度计。接收再高的频率就必须用压电换能器。石英晶片换能器不适用于接收声发射信号，因为它所响应的频率范围太窄。目前应用得最多的压电换能器是由钛酸钡，锆酸铅或锆钛酸铅等陶瓷压电晶片制成的。

在选定和放置换能器时，要注意到所要探测的声波的类型和方向性。

声发射产生纵波，切变波，表面波和它们的组合波。有人研究了用各种信号传送方式作为声发射的载运工具的优缺

点^[8]。实验结果指出,用切变探测器进行探测时,所受到其他方式的干扰最小,并且产生最尖锐的信号。这就能够较准确地判定信号到达的时间,从而能够较准确地测定发射源的位置。图1(甲,乙,丙)所示的例子是用三种不同的探测方式对于同一个声发射事件所查知的信号情况(振幅对于时间的变化)。这些实验都是用钢试样进行的。

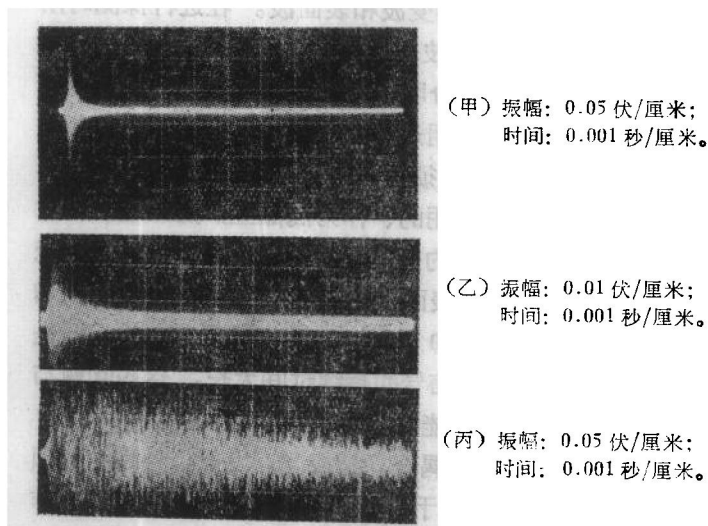


图1 不同探测换能器所查知的声发射信号
(甲)切变探测器; (乙)纵波探测器; (丙)加速度计

图1(甲)是用切变探测器所测得的信号。换能器材料是经过掺杂的锆钛酸铅陶瓷压电晶片,切割到主频率为1.7兆赫,并且沿着切变方向进行极化。这种换能器几乎只对于切变波敏感。在使用时,这种换能器必须放在试样的边缘上或厚度面上,并且最少要在试样表面以下1.6毫米。在进行探测时所使用的增益是100,高通滤波器是1.2兆赫。由图可见,这种切变探测器产生最有希望的信号,它的波阵面十分尖锐,