

机械强度

JIXIEQIANGDU

声发射技术与应用

专 辑

5

赠阅

机 械 强 度

(限国内发行)

第 5 期

一九七八年八月出版

编 辑: < 机械强度 > 编辑部

出 版: 郑州机械科学研究所

印 刷: 诸 暨 印 刷 厂

发 行: 郑州机械科学研究所

代 销: 中国书店机电样本门市部
(北京市宣武区琉璃厂西街18号)

声发射技术与应用

目 录

声发射技术的基本知识和应用概述	沈阳金属研究所 (1)
声放射检测仪器的的发展	长春材料试验机研究所声放射小组 (23)
SF1—1单通道声发射测定仪 (原理及调试简介)	
.....	合肥通用机械研究所声发射课题组 (38)
SF1—1型单通道声发射测定仪简介	营口市仪器厂技术科 (47)
SFS—106六通道声发射测试系统	沈阳市电子研究所 (49)
声发射技术的应用	合肥通用机械研究所声发射课题组 (77)
用声发射技术研究疲劳裂纹扩展	三机部 621 研究所 (95)
用声发射技术及断裂力学方法研究Ti—6Al—4V在含硫化氢介质中的应力腐蚀行为	
.....	中国科学院上海冶金研究所金属腐蚀室应力腐蚀组 (102)
以声发射技术衡量氮化层的脆性 (第一部分)	
.....	北京钢铁学院金相及热处理专业、沈阳金属研究所一室、北京机床研究所七室 (116)
以声发射技术衡量氮化层的脆性 (第二部分)	
.....	北京机床研究所七室、三机部 621 研究所四室、北京钢铁学院金相及热处理专业 (119)
声发射技术在高压容器安全监控使用中的初步体会	抚顺石油三厂 (132)
声发射技术在岩石力学研究中的应用	中国科学院地球物理研究所 (139)
声发射在监测焊缝延迟裂纹上的初步应用	合肥通用机械研究所 (149)
焊接过程中声发射的探测	西安交通大学声发射小组 (157)

声发射技术的基本知识和应用概述

沈阳金属研究所

前 言

承受载荷的固体往往有热发射(如红外线发射与磨擦发光 Triboluminescence 现象)、电子发射(或称为表面电子发射 exoelectron emission)、声发射(或称为应力波发射)。从能量转换的角度来看,在受力之后,一块固体有如一个换能器把应变能转变成热、电、声能而发射出来。这种热、电、声的发射是由外力引发的固体材料固有的内禀性质。这三种发射的特征和量的大小自然是代表着材料内在的某些特别的属性。为深入研究各种新型材料,掌握材料的特性,以用之安全可靠,因而人们对材料受力的发射极为重视,热发射,表面电子发射和声发射信号都携带着材料的微观和亚微观过程的信息。热发射现象久已知晓,一八四二年 Moser 第一次报道了表面电子发射现象。现在,虽然对引起表面电子发射的物理原因还缺乏深入的了解,然而已知的表面电子发射之因果关系,已开始用于个别类型的无损检验。最近,有人把它用于研究合金化过程、裂纹生长、疲劳、退火和研磨粉碎过程。特别是有人藉助表面电子发射来检测早期疲劳损伤。

声发射是五十年代中期在国外发展起来的新技术。目前,在材料研究和各种工程结构的安全监控方面取得了愈来愈多的应用。声发射第一次成功应用是一九六四年美国对北极星导弹舱的检验。由于声发射在这方面的成功应用,引起了人们广泛的注意。现在有许多国家都先后投入相当的力量从事声发射的研究与发展工作。

1 国内外声发射研究工作开展状况

1965年美国专门成立了一个全国性的声发射工作组,定期开会,商讨声发射的应用和发展以及交流所取得的成果。美国的声发射技术从一九六〇年进入实际应用阶段,并得到迅速发展。现在美国机械工程学会(ASME)和材料试验学会(ASTM)下面都设有声发射委员会这类的机构,材料试验学会并于1975年1月公布了锅炉和压力容器的声发射检验试用标准,作为锅炉和压力容器规范V的附录。除了高压容器压力试验时的破坏预报及运行中的安全监控方面的工作外,在检测疲劳开裂、焊缝开裂、应力腐蚀开裂以及其他原因造成开裂的工作上,也发表了许多文章。在美国重点开展的是声发射技术的实际应用。

1972年欧州也成立了声发射工作者的组织,参加的有来自14个国家的一百名会员,组织过四次大型报告会,英、法、德、意、丹等国都开展了声发射研究工作。

一九六九年于日本京都召开的国际焊接会议上,有人报告了声发射工作,引起了日本有关研究部门的重视。在有关单位的支持下,经日本高压技术协会和日本非破坏检查协会努力,组成了日本全国声发射委员会,于一九六九年未开始活动。这个委员会二月一次定期开展学术活动。在一九七一、一九七三年日本先后两次向美国派出声发射调查团。一九七二年

和一九七四年日本召开了大型的声发射技术座谈会。在第二次座谈会上还邀请了国外的声发射技术工作者出席。

苏联的研究工作者在六十年代初期，曾用听音设备预测矿井坍塌和瓦斯爆炸。目前，在理论上探讨并试制了宽频带的换能器。在材料研究中，报道了裂纹每次跳跃长度的总和与声发射振幅总和的关系，及他们用它研究焊接裂缝、评价材料脆性、监听压力容器的结果。

我们的声发射技术是适应无损检验的需要，遵照毛主席关于“独立自主，自力更生”的方针，从无到有，逐步建立并发展起来的。1973年建成一套声频声发射系统。随后，建成了一套80千周声发射装置，并于1975年10月研制成SFJ—1型声发射监测仪移交工厂生产。另一方面我们和沈阳电子所一起承担研制SFS—106型六通道声发射实验装置，于1976年6月，召开了定型鉴定会。

近几年来，国内有许多兄弟单位制成了单通道声发射实验装置，并在金属和玻璃钢制造的压力容器、应力腐蚀、地音监听、断裂力学、岩石力学研究方面做了很多工作。

声发射既可以作为一项新的研究材料破坏过程的有力工具，也可以对各种材料制成的结构在运行条件下进行现场测量和安全监控，以防止事故发生保证安全。还可以判断材料结构在使用条件下出现的缺陷和损伤，到底是因设计上的缺点还是由于材料本身存在问题引起的，从而既有利材料使用部门找出设计上的薄弱环节，改进设计，又可以使冶金工作者从结构运行或材料使用现场，获得材料行为的第一手资料，这对提高冶金产品的质量很有帮助。

2 声发射技术的主要特点

声发射不同于其他的研究形变过程的方法（例如光学显微镜方法），在声发射方法中，随着形变的发生和发展由形变过程本身提供信息。这相当于，做医生的不是盲目地靠全身检查和全面化验的方法来诊断病情，而是由病人主动诉说他感觉不舒服的部位，使医生得以集中精力注意病变部位。声发射是材料在受载的情况下，主动反映的材料内部损伤活动信息。因此声发射技术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，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超声照射地区缺陷的存在情况。在声发射技术里，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“相对静止的状态”达到了“显著的变动的状态”，把储存的多余的应变能以弹性波（应力波）的形式释放出来，使物体发声。物体内部缺陷或“潜在缺陷”在外力的作用下，主动发声，使探伤工作者能对物体内部活动着的所有缺陷“一目了然”，并且根据所发射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，揭露更为深刻的实质，使我们能够了解缺陷的目前状态，和它将来在实际使用条件下将要发展、增大的趋势。

任何一项技术，都是一分为二的，声发射技术有优点也有缺点。声发射技术的主要优点是只要物体中有声发射事件发生时，在物体任何位置上都能够探测到它们。加之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），这为声发射技术的应用开拓了广阔的前景。该技术的较大的缺点是说明信息的发射源不是一件简单的事。另外，在本征信号发射的过程中，往往伴随着大量的噪音信号，所以，稍不注意就可能导致谬误的结果。

一、声发射基本知识

1 声发射发展的历史情况

历史上声发射的最早使用是出现在地震学的研究中。通过地震时产生的弹性波的分析,了解释放的能量、震源位置和深度,说明断层运动的特征。早年,人们就意识到有可能用它来探测煤矿中岩石的破裂。1923年 Hodyson 用亚声频噪声预测岩石破裂和地震。

“锡鸣”或在变形时的李晶(一般地说,李晶是活跃的声发射源)是最早在金属中观察到的声发射现象。马氏体相变时通常也产生大量的声发射。Crussard 等人报道过在金属毁坏之前的瞬间有声音发出。Mason 等人设想显微结构中的位错引起高频振动。

声发射的第一个深入研究是1950年由Kaiser做的。他报道了研究的全部金属(锌、钢、铝、铜和铅)都有声发射现象。因他用的是多晶样品进行工作,遂误认为声发射起源于晶界是与外加应力感生的界面间交互作用有关,一定的材料,有它的频率和振幅的特征谱并且和应力水平有关。

1955年, Schofield 对声发射现象做了进一步广泛的研究。他发现声发射并不全部发自晶界,因为单晶也有声发射。另外,也没有发现什么频率和振幅的特征谱,由此 Schofield 得出结论,频率和振幅不是表征发射过程的正确的基本量。

1956年, Tatro 探讨了用声发射技术在金属中检测滑移的可能性。从对单晶铝的研究, Tatro 和 Liptai 认为声发射的激活是和位错的塞积与解脱有关。铝单晶的阳极化表面层对在表面上形成位错和滑移带起到有效障碍作用因而改变了发射特征。

绝大多数早期的研究表明,声发射与金属中的范性变形和裂纹的传播有联系。早期研究中所使用的频率范围都低于60KC。后来由 Dunegan, Tatro 和 Harris 才把实验扩展到100KC和1MC的范围,这是实验技术中的重要进展。它免除了因排除外来的噪音的影响而必须有精密的隔音设备的要求。从而,可以使声发射分析技术得以推广于实际应用。

本世纪六十年代中期以后,声发射技术应用于材料研究、产品质量的控制、无损检验和结构件的评价的工作已迅速的增加。此外,声发射技术在真空和流体输送系统中,对漏洩、沸腾和空化的检测也得到了应用。

2 声发射源

固体在外加应力的作用下,由于其内在的各种缺陷和内部结构不均匀区域的应力集中,导致局部的应力分布达到不稳定状态。众所周知,材料系统总是趋向于达到最低能量状态。这种不稳定的应力分布状态积蓄的应变能达到一定程度时,最终要发生应力再分布而重新达到稳定状态。这种应力再分布是以范性流变、微观龟裂、裂缝的发生和发展而完成。实际上,这是一种应变能释放的过程。这种被释放出的应变能的一部分以应力波的形式发射出来,在固体表面用检测器所测到的这种现象称为声发射(图1)。

固体材料内部的局部不稳定状态,往往是在材料整体变得不稳定之前很久就产生了。这些不稳定状态是局部力学运动如滑移带、马氏体小片形成、位错运动、开裂、Luders 线的传播、晶界突然改变取向、以及地震时断裂带内局部断层运动等等的原因。这种局部的力学运动就是声发射源。

在许多构件里,局部失稳常常使整体突然发生灾难性的破坏。例如,在一个金属结构中

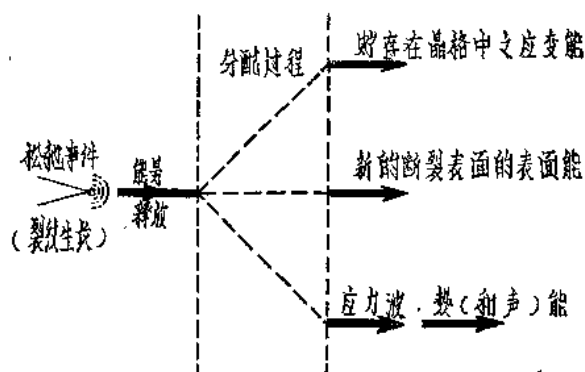


图1 应变能分配情况

的应力从整体上看可能远在弹性极限之下，但在伤的附近，由于应力集中，局部地区有时会发生范性形变，使原有的裂纹扩大甚至导致断裂（例如屈服应力为160公斤/毫米²的高强度材料，曾在平均应力不到70公斤/毫米²的情况下发生破裂）。

综上所述，声发射是固体材料形变、微观开裂、裂纹发生和发展的信息。声发射源是固体材料灾难性毁坏的发源地，但因它的活动出现很早，因而能来得及预防。

3 声发射传播

声发射源可能处于试样的表面或者物体内部，当它们活动的时候，应力脉冲向四面八方辐射，通过体内和沿着表面传播，传播过程中被吸收或反射，只有一部份经过传感器送到探测系统。

声发射脉冲可以认为是由不同频率和不同幅度的波组成的，这些应力（脉冲）波以球形传播者比只在二维传播的波（即表面波）衰减要快。因此，距离愈远的传感器一方面接收到的信号幅度就愈小，并且表面波将变得更主要。波幅度的减小不仅是因为传播过程中能量散播开了，也因为材料中能量耗损机制所引起。这些机制对于不同的材料是不相同的，一般把这些耗损称为内耗。这种内耗对于较高频率的波比低频率的波更显著。散射过程也使应力波进一步衰减。在不均匀的材料中，当波长与不均匀物的大小相仿时，散射作用就不容忽视。

通常在大多数情况下，只接收从源直接传来的应力波是不大可能的，不少接收到的信号是在试样表面受到反射后的那些应力波。例如高压容器壁中的声发射源发出的应力波的传播如图2所示。某一波的能量在其传送到邻近的另一材料中去时，便发生反射衰减。两种材料声学匹配愈好，传送过去的能量就愈多，反射掉的愈少（空气和固体的声学匹配很差，能够使信号发生很大的衰减）。

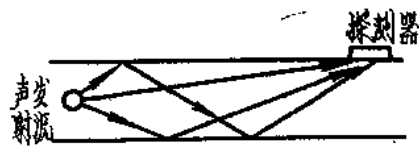


图2 AE源发出之应力波在板中之传播

在固体中传播的弹性波只有纵波和横波。表面波只在固体表面传播。如在半无限体内，声发射源发射出的弹性波传播如图3所示。它们各自有自己的传播速度。横波的传播速度是纵波速度的60%而表面波速度则是横波速度的90%。除了这些类型的波之外，如果试样是棒状或板状的，还能够出现扭转和弯曲波型。即使一个源只能产生一种或两种波型，经表面反射后，也会产生波型转变出现一些新的波型。通常材料的声发射信息是由若干种不同类型的波运载，因此，到达换能器的应力波信号是复杂的。每一个波型都有它自己的特征速度和衰

减速率，而这两者又都与频率有关，因此，我们探测到的声发射信号的大小、形状和频率的含量全都与试样的尺寸，形状，表面条件和源与传感器的相对位置有关。

在传播过程中，声发射信号除经受衰减和波型转换外，还可能产生频散。

根据产生声发射源的性质，一般地讲，可用阶跃函数或称 δ 函数描述声发射，这样声发射便含有一个宽带频谱。如果传播介质没有频散作用，到达传感器的脉冲就不会畸变。然而，假如传播介质会产生频散，某一些频率的脉冲就要比另外频率的到达的迟。脉冲被展开成一个调频信号，这个信号的幅度和频率都随时间而变化。

除在相变温域附近外，大多数金属材料的大块试样都无频散作用。例如，金属除了接近居里温度、超导临界温度、马氏体相变温度、有序无序转变温度等之外，都无频散作用。换句话说，工程材料本身在它们的使用温度下是不致引起频散的。然而，固体的几何边界却会导致频散。特别是棒和板造成的频散现象更为严重。当把一个包含有一定频谱的脉冲加到板上或板内的一点，稍后，传播到板上的另一点，在传播过程中便演变成其幅度和频率内容随时间而改变的波。最大幅度的出现在时标上可能远晚于调频脉冲的前沿，而且先到来的信号可能不是脉冲频谱的中心频率。例如（图4），在12.7mm厚钢板上一点注入脉冲（a原波形）传播760mm后成为b波形。这说明了，为何在距AE源不同距离的地点测量声发射率和振幅会有很大的区别。

板会引起频散这件事，对于声发射工作人员特别重要，因为许多结构件是以板或板形截面的型材制造的，声发射源的定位，又靠的是测量声发射信号到达探头的时差，频散作用使脉冲的形状发生畸变，就使时差不易测准，因而增加了精确确定声发射源位置的困难。

4 声发射检测

为要探测到声发射信号，首先须要把它们从背景噪声中分开。图5以一种浅显的办法给出了背景噪音的几种主要组分。机械噪声，象来自试验机的噪声，大致说来，振幅在0.1兆周以上就迅速减低，而流动及空化噪声一般要到更高的频率（大致说来1—2兆周）才减低。如果我们假定：要探测的付氏变换后的声发射信号是象图里画的那样，那么，对不拘那个频带范围，可供利用的信号就落在探测系统所用的带宽内声发射信号的包络线之下和各种干扰信号强度和之上的区域里。由此可得，比较合乎理想的探测系统应该：（1）稳定，（2）灵敏，（3）带宽可以调节，中心频率可以任意选择。

此外，应该防止，由于周围的电磁干扰而引起要探测的信号的信噪比变坏。Wilson和Fowler曾指出，就单屏蔽同轴电缆而言，在它附近合上240伏的单相电路电闸（这是在随便那个工业或实验室环境里经常碰得到的事），于电缆的谐振频率下，在屏蔽层内可以感生达100毫安的电流。而在电缆芯部产生的电压，则受表面的传输阻抗 Z_t ——屏蔽层内的电流

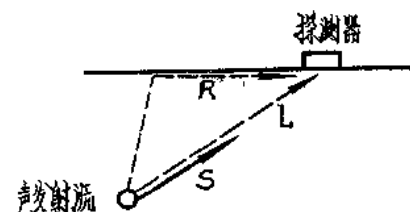


图3 半无限体内AE源发射的弹性波之传播

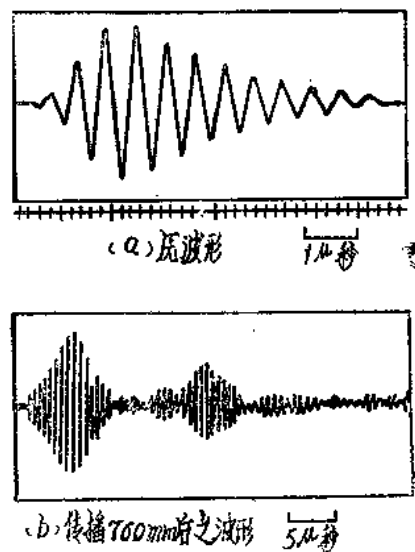


图4

和芯部电压之间的关系——所支配。Wilson等人的观测结果，导致他们设计由高导磁金属

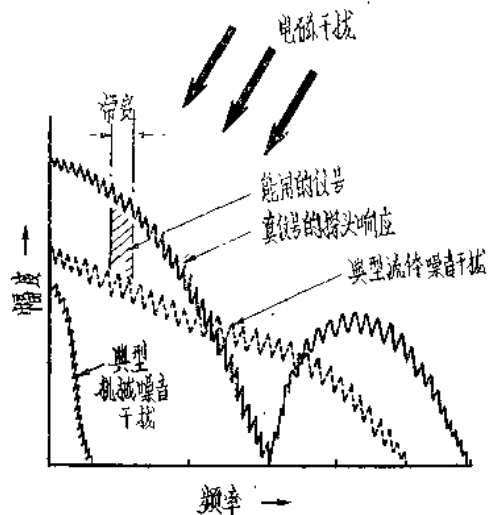


图5 从背景中分离出所要信号时牵涉的问题之图示

与铜屏蔽层合组的多层屏蔽电缆，在图6里可以看到，这种电缆明显的改善了表面的传输阻抗，它比起单屏蔽电缆来，在0.5兆周下要好几万倍，而更为引人注目的是，它比一根厚实屏蔽电缆也要好上千倍。

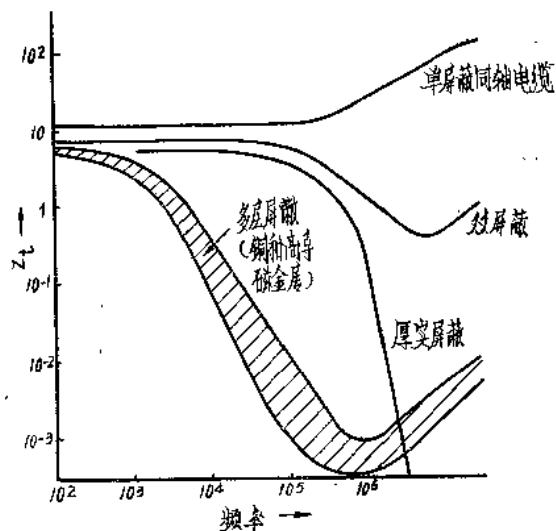


图6 同轴电缆表面传输阻抗

这说明了为什么 AML 缺陷定位系统里，在采用了 Wilson 和 Fowler 发展的电缆 (BICCRPC 4196)，辅以其它保存低电平信号的专门措施后，即使探头与前置放大器之间用了100米长的电缆——这极大地简化了集中检测问题——噪音电平也要比通常在探头与前置放大器之间，仅用一根一米长的平常电缆联接时能达到的排除噪音效果至少好上一千倍。按此办理，就有可能在喧闹厂房内的集中检测点，分辨探头上1.5微伏左右的信号。作为对比，若无上述专门措施，在一间屏蔽相当完善的实验室里，为排除噪音，典型的最低工作电平是10微伏。然而，更为重要的是，这样办了便能够在实验室及工厂的集中检测点上以

相同的放大倍率工作，这有助于信号之间的互相比较。

声发射信号经耦合到试样表面上的换能器收集，这些换能器一般地分为两类：谐振式的例如压电换能器，和非谐振式的例如电磁、应变、或电容换能器。非谐振式换能器能够用于检测频率范围从直流到20兆赫的应力波。压电换能器一般用于检测以某一谐振频率为频带之中心频率的应力波，例如100—300千赫是在试验中常常用的带宽。

大多数的声发射检测主要使用压电换能器，因为它们对所受检测的信号本身灵敏度高，而对机械噪音和干扰灵敏度低。也容易通过设计使它们响应特殊的波型，例如切变波（这种波对某些应用有其优点）（图7）。来自换能器的信号首先送到前置放大器（一般它决定了系统的电噪音电平），随后进行滤波，除去不希望要的低频信号，如象来自机械设备等的低

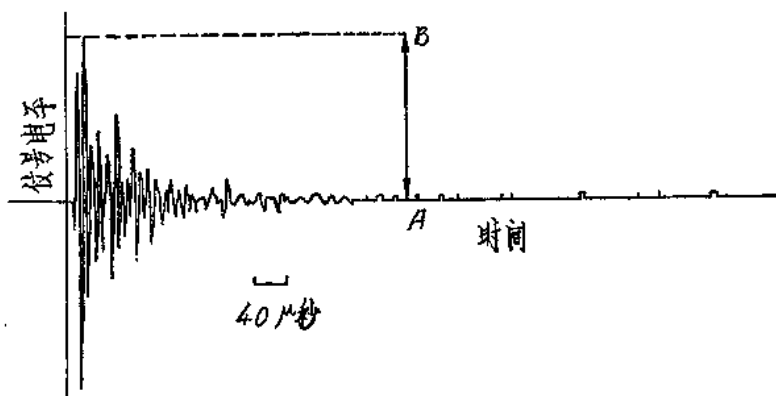


图7 由换能器输出的一个声发射信号，它已由换能器转换成一个交变的电信号，可以进一步处理。

频振动，这个信号可以简单的表示为阻尼振动（图8）。在各种试验情况下，如单轴拉伸试验，声发射信号是由千百次这类突发脉冲组成（图9）。随后把信号送到门限电平检测器，它只通过高于门限电平的信号，对于图8中的假想信号，在所示门限电平下，检测器将只通过过脉冲列中的前三个正半波。如果以后把信号送到计数器，将记录三个计数，于是较大的突发将记录较多的计数，小突发则记较少的计数。大量的小突发，或小量的大突发的累计声发射曲线，分别示于图10和图11。

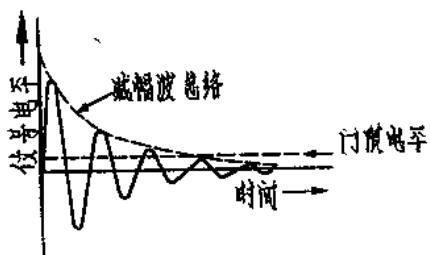


图8 可以把一个声发射事件信号看作为一个阻尼正弦波，它可以不止一次地超过门限。

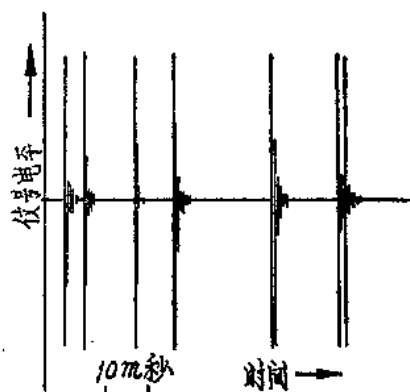


图9 声发射常常在不规则的间隔以突发的形式发生

用换能器的振铃给出脉冲信号大小的测量计数方法，称为振铃记数，这是声发射检测中最广泛应用的方法。也可以应用许多其他计数法，如一个事件信号可以只记一个计数，或者以峰值振幅（图7里的AB之高）来量度脉冲大小，或者对超过门限的振铃时间长短进行计数等。上述的计数方法中所用的仪器是大多数声发射系统中通用的设备，还可以根据需要，增加更多的单元，如频谱分析仪，以研究脉冲的频率内容，以便更好的了解声发射信号所携

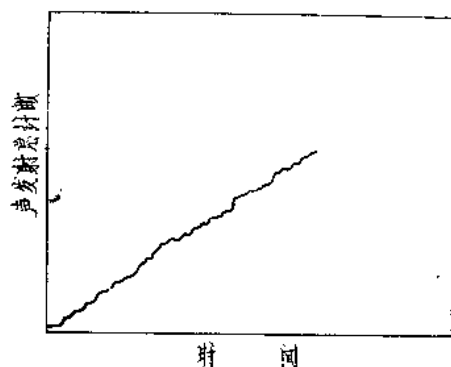


图10 在整个试验时间内大量的小突发的累计曲线将是平稳上升的曲线

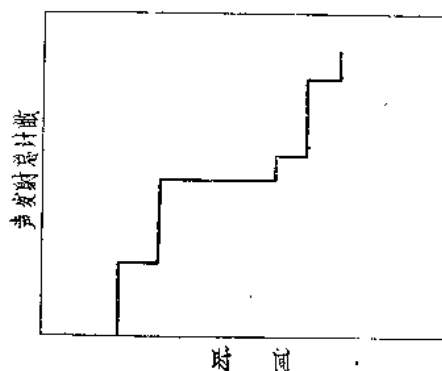


图11 对于少量的大突发，在整个试验期内累计曲线将是台阶式上升的曲线

带的信息。磁带记录仪也常常被列入检测系统中，从而能在不同的增益和滤波条件下回放录音，以便对信号事后处理（图12）。如监听大型结构部件要求及时定出发射源的位置，还需要在多通道声发射试验系统中加入电子计算机，以适时地处理数据。

总之，对应某一工程参量，声发射测量有声发射计数率、声发射累计数、声发射事件计数、频谱分析、幅度分析、波形、声发射信号时差等。

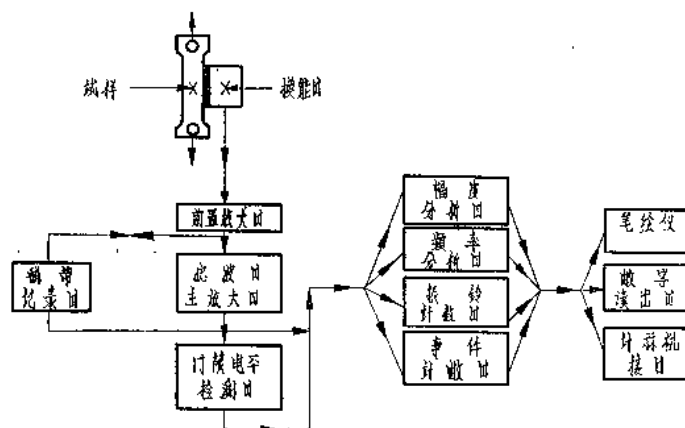


图12 常用的几种处理声发射信号的方法；可根据需要选择你要的仪器和显示器

5 声发射的位错模型及其应用

位错、范性形变、裂纹之间的关系

位错是原子尺度的晶体缺陷。而宏观裂纹可以看成是晶体位错所组成。裂纹的成核是几千柏格斯矢量为 b 的刃型位错合并的结果。另外，晶体中一系列位错塞积群受力时，它的力学行

为和裂纹很相似，因而裂纹可以用受力的位错塞积群来表象。

由于宏观裂纹和晶体位错之间体现总体和部分的辩证关系，因而深入的研究声发射产生的机制，必然会从位错运动的角度来考虑问题。更何况近来 Fleischmann 等人对低碳钢范性形变时发出的声发射信号频率成分的研究表明：一个作等距离一步一步移动着的 Frank-Read 位错源的发射谱和声发射信号的频谱是十分相似的呢！

位错运动引起晶体宏观范性形变。位错运动是产生范性形变的最基本因素，从而也是产生声发射的最基本机制。但是，位错运动引起的声发射是否都可以观测到？这就要取决于晶体材料内部构造和检测系统了。

声发射产生的机制，有人用位错源的开动和其后由于位错塞积的反向应力使位错源关闭的模型去说明。这个模型设想自由位错线长度和位错滑移距离低于某一极限时，就没有可以探测到的声发射。

这个声发射的位错模型在一些纯铝及时效铝合金上做的实验中得到了证实，更因在某些具有 Bauschinger 效应的材料中，观察到外加应力除去后的声发射现象而得到进一步的证实。这个位错模型可以用来解释冷加工、时效硬化、或微观组织条化后的声发射变化。

6 材料中影响声发射响应的因素

各种材料的声发射行为有很大的不同。一些材料受到应力时，产生丰富的声发射；而另外一些材料则比较安静。用光滑的拉伸试样和有一个锐裂缝的拉伸试样作对比时，会观察到它们的声发射特征显著的不同。用预先开有裂纹的低合金钢薄试样做试验时的声发射响应同以同种材料的厚截面试样试验时也是十分不同的。材料的晶体结构对它的声发射响应起着主要作用，在某些情况下，信号的幅度水平会差一个数量级。材料已往的历史，比方说，材料是否受过应力，是铸态还是锻造状态、是复相结构还是不同材料的混合物、以及许多其他的因素将决定该用的仪器之灵敏度、试验的最佳形变速率和对所获得的数据的解释。关于这一方面详细的结合具体材料的工作，请参阅有关文献*。在这里只把影响声发射可探测度的因素列表如下（表1）：

表1 影响声发射可探测度的因素

产生高幅度信号的因素	产生低幅度信号的因素
高强度	低强度
高形变率	低形变率
各向异性	各向同性
不均匀	均匀
厚截面	薄截面
孪晶材料	不生孪晶的材料
解理断裂	切变
低温	高温
有伤试样	无伤试样
马氏体相变	扩散控制的相变
裂缝传播	范性形变
铸造结构	锻造结构
大晶粒	小晶粒

* ASTM STP505 (1972), P.100.

二、声发射技术的应用

声发射技术是观测材料发生范性形变时位错行为和微裂缝发生与发展的新手段,是材料研究中揭示材料内在本质的有力工具;同时又是受载结构件无损检验和安全监视的有效方法。特别是最近,把声发射应用于断裂力学的研究引起工程界广泛的注意。

1 材料的范性形变,断裂过程的研究

各种材料在范性形变和断裂过程中都有它自己的声发射特征。如能掌握这种特征,就有助于了解材料范性形变、裂缝发生和发展的规律,从而能较为深入地评价材料的力学性能。另外,如对构件母材在各种受力状态下的声发射特征没有透彻的了解,就无法对构件进行毁坏预报。因此,有必要先对构件的母材取样研究其声发射特征。

我们研究了一些材料在不同受力阶段的声发射特征。

韧性钢材:这一类以退火状态的低碳钢为代表,图13是它的声发射计数率——应力——应变的关系曲线。这类材料一开始加应力,声发射计数率就不断升高,当达到屈服点前后,声发射计数率出现一个很高的峰值,随应力的继续加大,声发射计数率达到一个安静区,当应力加大到材料的极限强度时,声发射计数率稍有回升,有的甚至这一点回升也隐而不见。

高强度钢材:这一类以一些结构上常用的高强度钢或超高强度钢为代表。图14是它的声发射计数率——应力——应变曲线。这类材料的应力——应变曲线上,裂纹以台阶形式作跳跃式发展。在它的声发射计数率曲线上没有象韧性钢材里十分明显的屈服前后的峰值,而裂纹每次发展,在声发射计数率曲线上有明显峰值出现。

为了更详细的了解材料在不同的受力阶段的声发射特征,我们曾经进行了18MnMoNb钢材三点弯曲试验。除了记录声发射计数率——应力——应变曲线之外,还采用脉冲峰值电压记忆电路及机械式记录仪记录相应阶段的声发射信号的频度和强度,如图15所示。(a)——(f)是实验各阶段声发射事件信号的频度和强度(图中的强度按分贝表示,每格代表5分贝)。一般说来,一个原来未曾加过载的韧性钢材制成的试件,受到不大的应力时就开始出现声发射信号,不过这时信号出现的频度和强度都较小,随着载荷的增加,

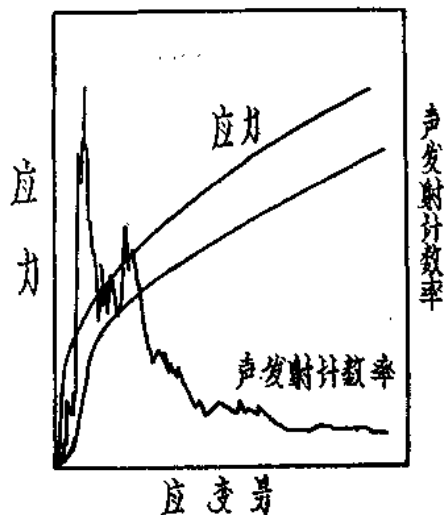


图13 韧性钢的声发射计数率——应力——应变曲线

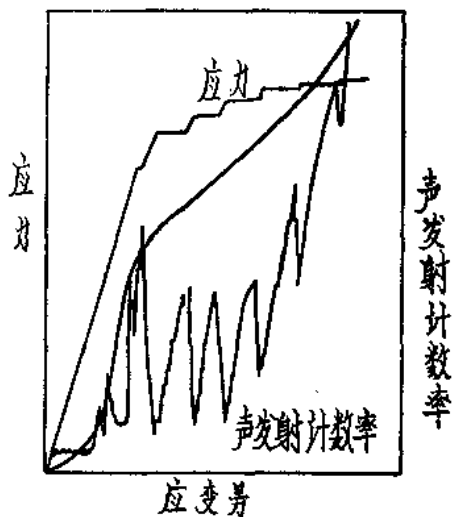


图14 某种超高强度钢的声发射计数率——应力——应变曲线

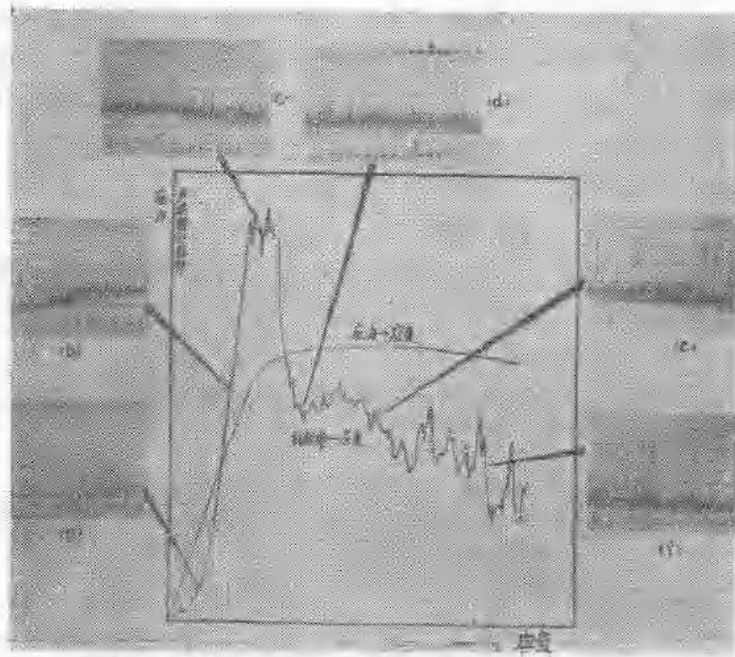


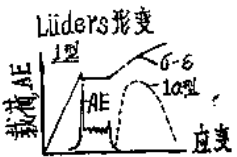
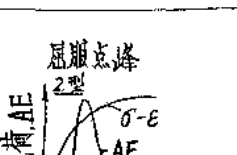
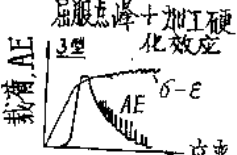
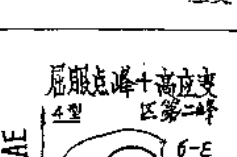
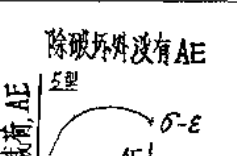
图15 18MnMoNb 三点弯曲试验时声发射计数率——应力
——应变和实验各阶段声发射信号的频度、强度关系

信号的频度和强度逐渐加大，假定所用的阈电压不是太高，这时计数率曲线也开始升起；等到载荷达到材料的屈服载荷，这时信号的强度不再增加，可是声发射信号的频度却大大增加，每个事件之间的时间间隔大为缩短，声发射计数率曲线上出现一个大峰，在机械式记录仪表记下的强度记录上，这时记录笔的运动速度已不足在事件结束时回至零位，当它从峰值位置往回走了一小段，接着便又发生了另一次声发射事件，记录笔重又升到这次事件的峰值强度位置，因此，这阶段的声发射信号强度记录曲线，记录笔只在峰值强度附近徘徊，然而这对分辨每个事件的强度并无妨碍。待发生显著的塑性变形后，平均的峰值强度先开始低落，随着载荷的继续加大，信号的频度随后也开始减小，这时计数率曲线陡降，在一般情况下这时开始出现高强度的突发式信号，一次这样的事件释放的能量比其前后的事件要大几千倍到几万倍，这时剖开试件，可以看到已经产生了百分之几毫米深的小裂纹（参看图23），随着载荷逐渐接近极限载荷，这类一次释放很大能量的声发射突发信号出现次数很快增多，使试件积蓄的应变能渐次过渡到主要以突发的形式来释放。过了极限强度后随着形变区截面的缩小，突发信号出现的频度显著减小，其它峰值强度较小的信号的出现频度也渐次减小，计数率曲线进入安静区，计数率曲线上这阶段出现的小峰一般就对应于每个突发事件，到离断裂不远的时候，声发射信号电压重又变得很小，突发式信号也不再频频出现，这个现象要维持到断裂到来的时候，信号强度才迅速升高直至断裂。我们对韧性钢材各受力阶段声发射事件的幅值的观察结果及利用信号的幅度（其平方值即代表该声发射事件所放出的能量）差别来区分范性形变与开裂的概念，和 Mirabile 近来发表的工作是一致的，他认为范性形变过程（位错增殖以及/或者位错塞积的崩塌）引起的释能大小数量级在 $10^{-11} \sim 10^{-7}$ 焦耳之间，而开裂过程释放的能量要大得多，约为 $10^{-6} \sim 10^{-1}$ 焦耳。即最小的开裂事件比最小的范性形变事件放出的能量要多十万倍，换算成信号幅度的差别正好是五十分贝，这恰恰是我们记录得到的大小。他关于最大计数率不见得与最大能量释放率一致的结论，也是和我们的观

察结果一致的, 例如图 中能量释放率最大的 (e) 阶段的计数率就比计数率最大的 (c) 阶段低落很多, 至于关于屈服点附近的声发射活动不一定是最大的结论, 我们的看法是: 在屈服点附近若是就声发射事件出现的频度而论, 它的确要比其他阶段多得多, 但是正象我们在原文说明里谈到的那样, 由于屈服阶段的声发射信号的幅值很小, 因此它对探头的耦合情况、放大器放大倍率之高低、计数率计所用的阈电压很敏感, 这些因素不仅会影响计数率曲线的峰值高低, 还要影响峰值的位置, 如果耦合不佳、用的放大倍率太小或者阈电压太高, 甚至会使这个峰值隐没不见, 在这种情况下就计数率曲线来判别, 当然就会得到 Mirabile 所谓的屈服点附近的声发射活动不一定最大的结论。因此这个结论代表的是在某一特定条件下的观察结果。

近来 Eisenblätter 更把材料变形时的声发射特征细分成五大类, 见附表 2。

表 2 金属塑性变形时的声发射分类

类型	说明图	声发射种类	原因	材 料
1	1a 	连 续	变形带的形成与传播	碳 钢 工 业 纯 铁
	1b 	连续+突 发 (Lüders应变+第二峰)	珠光体中的碳化物层的破坏	具有层状珠光体组织的碳钢
2	2a 	连 续	均 匀 变 形	fcc金属 (Al, Ag, Cu, 黄铜), 高温 (>250℃) 下的碳钢
	2b 	突 发	双 晶	Sn, Zn
3		连 续	类型 2 + 变形带的形成与传播	黄铜, AlMg3 AlZnMg3, 高温下的碳钢 Ni 基合金
4	4a 	连 续	类型 2 + 微观的不均匀变形	AlCuMg2 (2024) AlZnMgCu(7075) AlSi10Mg
	4b 	连 续	类型 2 + 双晶	Ti, TiAl6V4
5		除破坏外没有AE	滑移途径极短	热处理后之细晶粒钢 冷加工金属 奥氏体钢

2 金属相变的研究

马氏体相变是一种无扩散型相变，相变过程不必依靠相界面上的原子扩散来完成，成排的原子通过类似切变的方式一下子从母相转移到新相，转移过程里由于相界面上的共格性未受到破坏，因而相变具有自触发的特点，转变非常迅速，一片马氏体针叶往往在 $10^{-6}\sim 10^{-8}$ 秒内形成，又因为马氏体相变是低温下固体里发生的相变，在这样的温度下母相已经不能容易地改变它的体积，体积弹性系数又很大，加之母相与新相间的比容差别大，每片马氏体针叶的形成势必在基体内伴生一个短促的应力脉冲。因此马氏体相变是一个很活跃的声发射源。不论是由于温度变化引起还是由于应变引起的马氏体相变声发射都很丰富，声发射技术对于这种相变的研究看来很有前途。图16提供了两个成分相差不多的锻造铜合金拉伸试样的试验结果，这种合金有一特性，即成分稍有变化可在同一应变水平下产生不同的马氏体转变量。

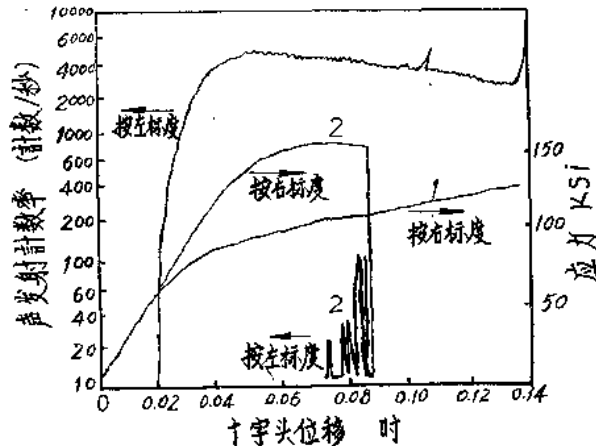


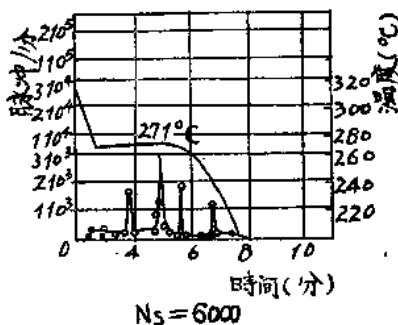
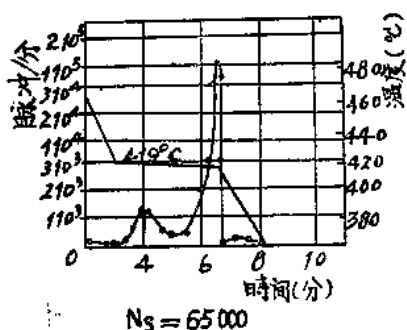
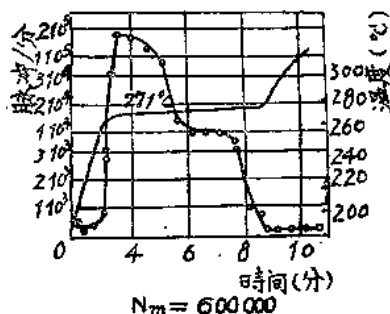
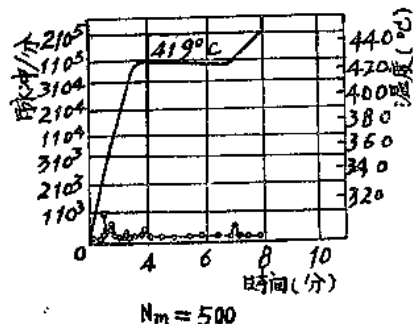
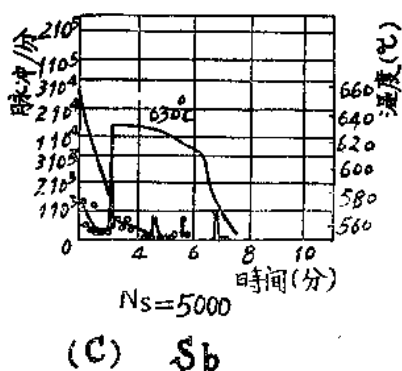
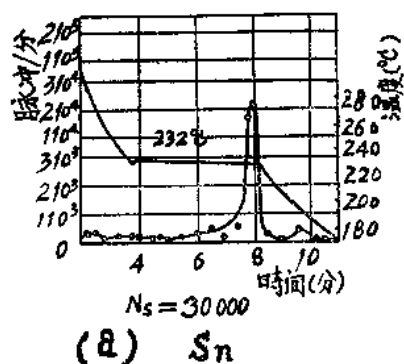
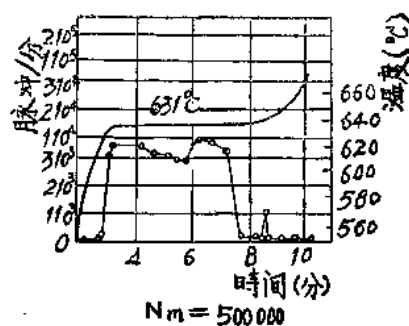
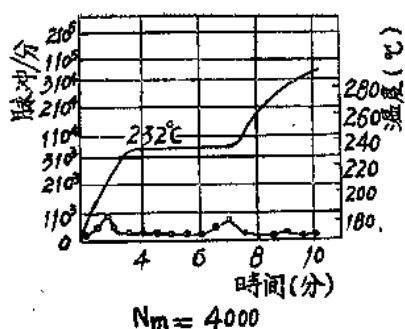
图16 一种锻造铜合金制备的拉伸试样的声发射计数率和应力与十字头位移的关系。它显示应变引起的马氏体转变量

试样1是一个很活跃的发射体，在比例极限附近开始发射并且一直继续到最后断裂。随后做金相观察，发现在试样的整个标长上都发生了马氏体相变。试样2是一个断断续续的发射体，只在最终断裂前才观察到声发射。金相观察证明，相变只限于试样的断裂面上。因此，看来应变诱发的相变量与观察到的声发射图象联系得十分好。在这些试验中，用的增益相当低（80分贝），排除了接收范性形变引起的声发射的可能，因而这些试验里探测到的只能是相变活动引起的“嘈杂”声的大小。

另外，用声发射技术还可以检测金属的熔化和凝固。图17是金属熔化和凝固时声发射的产生情况。Sn、Zn当凝固时体积缩小，有大量的声发射产生，而熔化时则声发射较少。相反，Sb、Bi当熔化时体积缩小，有大量的声发射产生，而凝固时则声发射相当少。

3 焊接的研究

现场实时检查焊接部位裂纹的发生与发展在从前是一个难题，声发射技术的出现有助于



(b) Zn

(d) Bi

图17 熔融和凝固时声发射发生情况

N_m ——熔融时的脉冲总数

N_s ——凝固时的脉冲总数