

声发射测试法简介

AN INTRODUCTION TO ACOUSTIC EMISSION INSPECTION METHOD

林 恩 可

序 论

随着科技的进步,人们设计制造的各种组件结构愈来愈复杂。由于这些组件结构的用途往往非常重要,它们的耐用性和安全性必须符合很严格的要求,以避免任何意外造成的严重的人力或物力损失。为了改进安全性和耐用性,一个直觉的想法是选用最好的材料,增加结构的厚度,或者缩短使用的期限。可是在今天材料和能源都很昂贵的情况下,这些想法很明显不符合经济的原则。因此在这既要可靠性高又要符合经济原则的要求下,工程师们除了做最佳的设计之外,还要仰赖周密的质量控制(quality control)。不仅制造的成品在出厂时需要详细地检查,以保证质量符合规定,在使用中的组件结构也要定期检验或甚至连续地监控,以确定性能没有因为长时间的使用而降低。这些校验的方法和技术,综合称为“非破坏性检验”(Nondestructive Testing或NDT),已经构成今天工程技术中不可或缺的一门专门学问。有效地使用这些检验技术,可以减少材料的损耗,增加生产的速度,保证质量规格,进而增加产品市场上的竞争能力。

最早最简单的检查方法,可能

是凭人的双眼,看看组件结构的表面有没有裂痕,尺寸有没有变形,或者相对位置有没有移动。由于肉眼的鉴别能力有限,人们开始用各种辅助工具来增进检查的精确度,于是发展了象液体渗透法,磁粒法等方法来检验材料的表面,或者用X—光来透视它们的内部。超声波探伤法将高频率声波传送到材料内部来决定是否有缺陷,基本上也是在“看”组件结构的好坏。

除了可以看东西的好坏之外,人们也常利用听觉来判定是否有不寻常的情况存在。树的枝干要折断之前往往发出纤维断裂的声音就是很常见的例子。此外在地震或地层变动之前,人们也可能听到岩石在压力下移动的声音。一般而言,所有的材料在某种外力或内应力作用下,都会从内部发出声波讯号(事实上应该称为弹性波,不过我们还是依惯常的用法叫它声波),不过声波的强弱和发生的频繁程度则直接和材料结构的种类及好坏有关。通常结构中有问题的部位,譬如焊接不良或遭到腐蚀,都会成为主要的声源。由于只在很少数的情况下这些声波的频率和大小适中,用耳朵就可以听到,大多数情形下它们的频率太高而振幅又太低,必须借助特殊的仪器来侦测。声发射探测法

(Acoustic Emission Detection, 或简称AE)就是借这种侦测到的声波来决定材料或结构是否有问题。它和超声波探伤法不同,因为侦测到的声波是发自材料本身,而非由外部传送进去。它属于非破坏性检验的一种,因为所加的外力并不要很高,不致影响组件结构的原本用途。

和其它方法比较,系统地使用AE探测法的历史较短。第一个作系统研究的是联邦德国的凯撒(Kaiser, J.)。1950年他根据在实验室中观察到的多种金属的声波发射特性,发表了他的博士论文⁽¹⁾。在他之后又有几位美国学者继续类似的研究,以求了解声波发射的原理。到了六十年代中期之后,人们才逐渐利用声波发射探测的原理来检查结构是否安全完整。由于愈来愈多的人将这种技术应用到不同的组件结构及制造过程,声发射探测法已经在不到20年的时间内发展成最重要的非破坏性检验方法之一。

下面我们将简单地介绍这种技术的测试原理,它的优点,以及常见的应用例子,以期让读者对这一技术有概括的了解。

基本原理

声发射法的基本原理和地震活

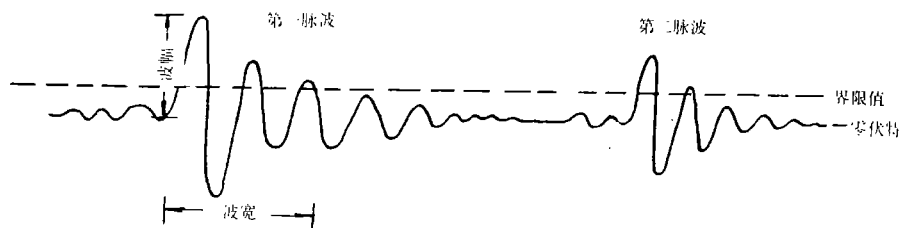


图1. 声发射脉波信号

动的监听十分类似。当材料受到外力或内应力时，内部或表面有问题的地方往往成为声源，发射出较强的声波，就象地壳内部的震源一样：所产生的声波先在材料的内部向四方扩散传播，当到达表面后，再沿着表面向前传播。如果有一个能测量微量的表面位移或速度的仪器，就可以测量到这声波的特性，就如同地震仪侦测地球表面的震波一样。假如有数个地震观测站，可以利用震波到达时间的不同来决定地震的震中。用同样的原理，也可以同时使用数个测量仪器来决定声波是从结构材料的哪个部位发出来的。一般最常用的测量仪器是用具有压电效应（piezoelectric effect）的晶体做成的传感器放在要测试的结构材料表面，这种晶体能将声波通过时引起的表面位移转换成电压输出，然后先经过一个前置放大器，再用各种电子仪器来量度它的特性。如果接在一个示波器上，输出的电压脉波（pulses）如图1所示：

在图1中可以看到，有两个脉波先后通过传感器。它们可能发自同一声源，也可能发自不同的地方。要决定脉波的特性，最常量度的参数包括振幅的大小及波幅超过界限值的次数。譬如第一个脉波振幅较大，有三次超过界限值；第二个脉波较小，只有两次超过界限值。其它特性，例如脉波的宽度及组成频率等也都十分有用。记录下材料在外力作用下发出的总脉波数及每个脉波的特性，就可以进而分析出现声源的原因或判断问题的严重性。前面已经提到，可以用数个传感器来决定声源的位置。一般要正确决定在一个平面上声源的位置，必须使用四个传感器。当离声源最近的

一个传感器收到讯号后，记录其它三个收到同一声波信号时和第一个信号之间的时差。如果声波在材料中传播的速度已经知道，就可以利用时差及速度算出位置。由于一个声源可能在很短的时间内发射出许多声波，通常都需要利用电子计算机来决定声源的位置，然后显示在屏幕上或列出它的位置坐标。在测试大的高压容器及很长的油管等结构时都使用这种能决定声源位置的仪器，以便及时找出问题的所在。

应用声发射测试法最常遇到的困难是四周环境产生的杂声。比如结构中两个组件间的摩擦，马达的振动，流体流动的涡流及电磁波的干扰等，都会产生不必要的讯号，而影响整个测试的准确性。为解决这些问题，工程师们想出各种不同的方法来排除这些杂声。下面是几种目前正在使用的方法：

1. 选择传感器中晶体的频率响应范围。由于机械振动、摩擦等产生的声波频率都不高，一般选用频率响应在100千赫以上的晶体可以有效地排除这一类的杂声。通常用在声发射探测法的晶体，频率约在100到1,000千赫之间。

2. 使用差动晶体传感器（differential transducer）。这种传感器由Dunegan首先设计使用，可以有效地滤掉电磁波引起的干扰。

3. 使用有方向性的传感器（directional transducer）。这种传感器由Dunegan/Endevco首先使用，它只对某一特定方向来的声波特别灵敏。假如事先知道想要侦测的声源会从哪个方向来，可以用这种传感器排除大部份其它方向来的讯号。

4. 设置隔离传感器。如果先已决定要探测材料结构的某一部份，

那么可以把数个隔离传感器放在要测区域的四周。从区域以外产生的声波会先被隔离传感器探测到，然后才传到放在区域中的传感器。这样就可以忽略这些外来的声波而专注于那些先被区域中传感器侦测到的讯号。

5. 利用讯号选通（signal gating）方法。当材料结构受到外力时，可以利用电子仪器，把在某一时间范围内产生的讯号记录下来，而排除在其它时间产生的声波讯号。譬如在做疲劳试验时，疲劳裂缝往往是在外力达到最高值时增长。如果想测到裂缝增长时发出的声波讯号，可以选定外力在最大值左右的一定范围，只让在这范围之内发生的讯号被记录下来。

6. 利用凯撒效应（Kaiser effect）。多数材料在第一次受到外力时会发出声波，但是如果重复和第一次相同大小的外力，材料会变得非常“安静”。这种现象称为凯撒效应，在金属材料中最为明显。利用这种效应，可以事先把容易产生杂声的部份加力到某一程度，那么在真正做到测试加力时这些部分就不会再成为杂声的声源了。

在对声发射的测试方法有了概括认识后，回头来看看除了不必要的振动或摩擦等杂声外，哪些声发射讯号可以让传感器侦测到。虽然到目前为止被证实的声源不下十数种，负责测试的人往往可以在实验之前了解到哪几种是最可能的声源，然后针对这些情况设置测试仪器。下面是最常受人注意的几种声源：

1. 位错移动（dislocation motion）每一个位错移动都会发出声波，不过它的振幅太小，无法侦测到。当材料在足够大的外力作用下产生塑性形变时，由于无数的位错同时移动，它会产生足够大的信号。这种信号由于是由无数的小脉波叠合而成，在示波器上它看来象放大后的电子噪声（electronic noise）。一般称这种信号为连续信号（continuous signals），而把如图1所示可以分辨出各个脉冲的信号称

为脉冲串信号 (burst signals)。

2. 裂纹发生及增长 (crack initiation and propagation) 这种信号是在一般结构做声发射测试时最受重视的一种。这是因为如果可以及时找出裂缝的位置, 就能避免严重的意外发生。引发裂缝的原因很多, 包括过负荷 (overloading)、材料疲劳及各种的腐蚀断裂 (corrosion cracking) 等。

3. 相态转变 (phase transformation) 液体固化、碳钢高温淬火形成马氏体 (martensite) 及固体内新相析出等过程均会产生声波讯号。这些侦测到的讯号主要是在相态转变时材料内部产生的内应力引起的。

4. 磁畴移动 (magnetic domain movement) 铁磁材料在外加磁场作用下会引起磁畴的移动。这种移动可以成为声源而由传感器侦测到。抗磁性材料自然没有这种现象。

5. 异样材料接面 材料往往利用焊接或粘合剂连接在一起, 或者镀上保护层来改进它的性能。如果接合镀层的程序方法不当, 这些接面往往会在外力作用下成为很活跃的声源。

6. 复合材料 纤维增强塑料受到外力时, 可能会发生纤维断裂或纤维和树脂之间的剥离 (delamination)。在外力作用下, 一般金属材料所含的脆性异相粒子也会破裂或与本体分离。这些过程都会发出足够大的声波讯号由传感器接收。

7. 流体渗漏 如果一个盛装高压流体的容器如锅炉、油管、高压气瓶等发生渗漏现象, 流体在漏孔处所产生的涡流足以产生声波, 沿着容器的表面传播到传感器。这种现象的声发射讯号在示波器上也是连续信号, 很象塑性形变时位错移动所产生的。

应用实例

在对声发射原理有了基本认识之后, 现在来看看在今天的工程界有哪些地方在运用这种新技术。由于发展日新月异, 新的应用几乎

不停地出现, 下面所列举的只是一些比较具有代表性的例子。

声发射技术的用途大致可以分为两大类。第一类是用它作为研究材料基本性质的工具。从前面列举的几种声源可以看出, 材料内部极细微的变化可以影响测到的声发射讯号。科学家于是经由量到的声发射讯号来研究材料的性质, 如塑性形变、断裂力学、相态转变、腐蚀原理等。由于这种信号是材料在真正受力时记录下来的, 它能帮助我们对各种现象的动态特性有更好的了解。此外如果能把不同声源发出的声波归类, 在做非破坏性试验时就可以根据测到的声波确定产生声发射的原因。目前许多做材料性质实验的人都同时测它的声发射特性, 然后尝试找出和其它测到的性质如应力、应变、电阻、温差等的关系。第二类用途是直接用来做非破坏性试验或质量控制的工具。这方面的应用例子可以说是数以千计, 要想一一列出是不大可能的。下面先根据应用的目的分为数类, 然后再看看目前哪些工业部门最常利用这种技术来检验它们的设备及产品。

根据使用的目的来分, 目前使用声发射技术的场合有下列几种:

1. 产品出产时的验收检验 (proof test) 这种产品包括压力容器、高压气瓶、火箭推进器的外壳及其它需要承受重力的组件如高压线绝缘子 (瓷瓶) 等。由于这些验收检验都需把产品组件加压加力到相当程度, 所以很适合利用声发射高灵敏度的特性做验收工作。

2. 使用中组件结构的定期检验 一般使用非破坏检验方法如X光及超声波等都需要先停止组件的正常工作才能进行检验, 声发射法则没有这个缺点。传感器都装设在组件结构的外表面, 只要增加容器内的压力约百分之十左右往往就可以侦测到重要的声源讯号。

3. 使用中组件结构的持续监听 由于传感器可长时间固定在结构上, 而声波讯号是由材料本身产生的, 就可以长时间监听结构在外力

下的任何变化。曾经利用这技术监听的结构包括桥梁、飞机机翼、海上钻井台、高压容器、流体阀门以及矿坑等。

4. 制造过程的质量控制 这种测试的目的是希望及早发现有问题的组件或工序, 以避免在工序或产品完成后再去检修。在这方面最佳的例子是监听焊接过程。另外, 一些集成电路的生产过程也利用这种方法做百分之百的质量检验和控制。

以上四类用途可以说包括了目前大部分使用声发射法的场合。下面大致介绍一下各主要工业部门使用的情形:

1. 石油化工工业 由于石化工业需要无数的高压容器及输送管道, 这恐怕是目前使用声发射技术最广泛的地方。根据调查, 声发射测试法用在重要石化工业设备上已超过500次, 监听的输送管道超过15万米^[2]。此外近年海上钻井愈来愈普遍, 钻井台在海浪冲击下往往容易发生裂痕, 影响安全。由于多数检验方法费时费钱, 英美数家公司都在发展利用声发射的方法来长期监听海平面下钻井台的结构。

2. 核能发电工业 核能电厂的安全规格要求很高, 许多重要的组件及焊接处需要百分之百的详细检查。由于声发射法的优点之一是它能用少数的传感器在一次加压试验下侦测到很大面积内发射声波的声源, 很早就有人注意它在核能电厂方面的应用。近十年来欧美以及日本在这方面都在积极研究, 积累了不少宝贵的经验。根据近年的统计^[3], 欧美商用核能电厂曾经利用声发射法测试过的接近50座。大部分的测试是用来保证承受主压力的组件结构的完整以及监听流体阀门及管道是否有渗漏现象。后者的效用尤其显著, 几个成功的例子证实了这种技术经济有效。另外, 针对核电厂的应用, 还研究了高温传感器及辐射作用对材料声发射性质的影响等。

3. 航空工业 航空工业和核能工业一样, 都要求很高的可靠性。

声发射法在这方面的应用分为两类。第一类是用于飞机组件制造或维护保养。除了象对发动机喷嘴等的验收测试外,这种技术也用来侦测腐蚀问题及蜂窝结构的胶合质量。美国空军已使用声发射法检验其F-111飞机的尾翼平衡器。航天飞机上绝热片的胶合也用这方法测试。另一类用途是将仪器装置在飞机上,在飞行中侦听声波讯号,以决定是否有疲劳裂痕增长的迹象。一个例子是澳大利亚空军对Macchi喷气教练机机翼内的裂痕的监听。另一个较大规模的试验是美国空军对C 5 A及KC 135的监听。KC 135加油机有600架装置了声发射监听设备,每架在机翼上装有20个传感器,另外还有一个信号处理器及一个指示器。

4. 焊接质量 这是声发射法很有发展潜力的应用之一。通常有三种情况可以利用这技术侦测。第一个是正在焊接的时候,第二是对焊接后延迟破裂(delayed cracking)现象的侦测,第三个是在焊接后加热消除内应力时破裂的侦听。虽然理想的是能对所有三种情况下所产生的讯号进行监听,而事实上某些焊接程序在焊接时会产生很多的杂声,因而不适合做第一种情况的监听。从积累的经验看,电子束焊、电阻焊、点焊及TIG焊等都可以做焊接过程中的声发射探测。第二及第三情况均很适合应用声发射技术,以节省检验的时间及费用。

5. 土木工程 桥梁、机场跑道及预应力混凝土都曾利用这一技术进行测试。侦测过的桥梁包括公路铁路桥梁焊接处的裂痕以及吊桥的缆绳等。甚至举世闻名的狄斯耐乐园也曾使用这技术来检查结构的安全性。

6. 地质稳定 这方面的应用发展和地震学有很密切的关系。由于声波在地层中都要传播很长的距离,它的频率范围要比一般声发射实验低得多。矿层陷落、斜坡不稳、雪崩、落石等都曾经利用这技术做侦测预警的工具。读者可参阅近年两次有关这方面会议的论文^[4]作

较深入的了解。

7. 电子工业 近年来声发射技术在电子零件生产方面的应用日广,包括小零件焊接质量及集成电路基片(substrate)的破裂等^[5]。

结 语

声发射测试法和它非破坏性试验相比有许多优点:

1. 它能够在一次加压情况下测试到分布在整个组件结构中的可能声源。其它方法往往只能做部分区域的检验。

2. 由于声源发出的讯号能向外传播,因而能把传感器放在够得到的地方而测到不易接近部份的缺陷。

3. 它往往对组件结构的正常操作影响很小。

4. 它能测到组件在真正受外力作用时的响应。假如裂痕在加压时不增长,不影响结构的安全,也不会发出声波讯号。

从另一方面看,声发射法也有它的缺点,例如外界噪声的干扰,不容易做定量的分析来确定声源的重要程度等。它在某些地方可能是唯一经济可行的测试法,在其它情

况下也可以用来弥补其它传统非破坏试验法的不足。

参考文献

- (1) Kaiser, J.: "An Investigation into the Occurrence of Noises in Tensile Test", Ph. D. Thesis, Technische Hochschule, München, 1950
- (2) Spanner, J. C.: "Acoustic Emission: Who Needs It—And Why?", Advances in Acoustic Emission, ed. by Dunegan and Hartman, Dunhart publication, 1981, pp. 1-14
- (3) Pollock, A. A.: "Progress in Acoustic Emission Monitoring of Nuclear Plant—A Review", Dunegan/Endevco Technical Report DE 78-2, 1978
- (4) Proceedings First (Second) Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, ed. by Hardy Jr. and Leighton, Trans. Tech. Publications, 1977(1980)
- (5) "The Western Electric Engineer", Oct. 1979, Vol. 23, No 4, pp2-37

陈省身和他的 南开数学研究所

国际著名数学家陈省身教授,去年在他的母校南开大学创办了南开数学研究所。当今年六月陈省身风尘仆仆来到南开园时,他为之捐款并提出设计的我国第一座现代化水平的数学楼已基本落成了。

这个数学所每年将围绕一个数学重点方向,由陈省身协助聘请十名世界一流数学大师,来所作最新成果的系统讲学;从全国各地选拔一百名优秀的数学研究生与青年教师来所听讲。同时,邀请国内有关专家(硕士、博士、导师)作辅助性讲学,并在外国专家来此前后,帮助预习及消化。在此基础上,对数学中的前沿课题进行有组织的攻关。世界著名的Springer-Verlag出版社将向全

世界出版发行由陈省身担任主编的南开数学所刊物。陈省身教授今秋将亲自讲授“近代微分几何”的研究课。

现在,北京大学、复旦大学、科技大学等各高等院校与科学院数学所有关“偏微分方程”的研究生均纷纷申请前来,其中包括十八名博士研究生、五名博士后研究员。南开数学所除培养最高层次——硕士、博士、博士后研究生外,还将与南开数学系合作开设大学及大学预科(少年班),对数学优秀生进行特殊培养。学生毕业后,将分别负责输送到国内外纯粹数学与应用数学方面以及其他与数学关系密切的专业(如计算机科学、经济数学、信息管理科学等)深造。





声发射法监听著名
的美国自由钟的裂纹

声发射 测试法



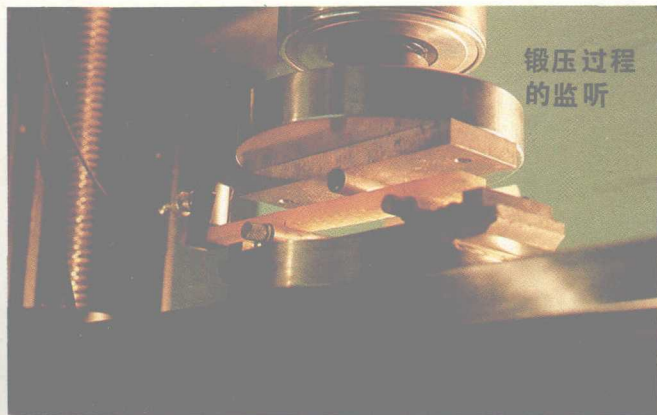
登尼根研究应用部外景



焊接过程监听



石油化工设备的监听



锻压过程
的监听



高压容器验收检验

地中海果蝇



成熟幼虫所作圆形出孔

受果蝇为害的李子由于细菌感染而溃烂。



果蝇幼
虫或蛹

果蝇所作
形下卵穿刺



果蝇成虫

果蝇蛹