声发射检测(AE)技术

第1章 概论

1.1 声发射技术概念

声发射技术,是一种新兴的动态无损检测技术,涉及声发射源、波的传播、声电转换、 信号处理、数据显示与记录、解释与评定等基本概念,基本原理如图 1-1 所示。



图 1-1 声发射技术基本原理

声发射,是指材料局部因能量的快速释放而发出瞬态弹性波的现象。材料在应力作用下 的变形与裂纹扩展,是结构失效的重要机制。这种直接与变形和断裂机制有关的源,通常称 为传统意义上或典型的声发射源。近年来,流体泄漏、摩擦、撞击、燃烧等与变形和断裂机 制无直接关系的另一类弹性波源,称为其它或二次声发射源。

声发射波的频率范围很宽,从次声频、声频直到超声频,可包括数 Hz 到数 MHz;其幅 度从微观的位错运动到大规模宏观断裂在很大的范围内变化,按传感器的输出可包括数 μV 到数百 mV,不过,多数为只得用高灵敏传感器才能探测到的微弱振动。用最灵敏的传感器, 可探测到约为 10⁻¹¹mm 表面振动。

声发射源发出的弹性波,经介质传播到达被检体表面,引起表面的机械振动。经声发射 传感器将表面的瞬态位移转换成电信号。声发射信号再经放大、处理后,形成其特性参数, 并被记录与显示。最后,经数据的解释,评定出声发射源的特性。

声发射检测的主要目标是:①确定声发射源的部位;②分析声发射源的性质;③确定声 发射发生的时间或载荷;④评定声发射源的严重性。一般而言,对超标声发射源,要用其它 无损检测方法进行局部复检,以精确确定缺陷的性质与大小。

1.2 声发射技术的特点

与其它无损检测方法相比,声发射技术具有两个基本差别:①检测动态缺陷,如缺陷扩展,而不是检测静态缺陷;②缺陷本身发出缺陷信息,而不是用外部输入对缺陷进行扫查。

这种差别导致该技术具有以下优点和局限性。

优点:

(1)可检测对结构安全更为有害的活动性缺陷。由于提供缺陷在应力作用下的动态信息,适于评价缺陷对结构的实际有害程度;

(2)对大型构件,可提供整体或大范围的快速检测。由于不必进行繁杂的扫查操作, 而只要布置好足够数量的传感器,经一次加载或试验过程,就可确定缺陷的部位,从而易于 提高检测效率;

(3)可提供缺陷随载荷、时间、温度等外变量而变化的实时或连续信息,因而适用于 工业过程在线监控及早期或临近破坏预报;

(4)由于对被检件的接近要求不高,而适于其它方法难于或不能接近环境下的检测, 如高低温、核辐射、易燃、易爆及极毒等环境;

(5)由于对构件的几何形状不敏感,而适于检测其它方法受到限制的形状复杂的构件。 局限性:

(1) 声发射特性对材料甚为敏感,又易受到机电噪声的干扰,因而,对数据的正确解 释要有更为丰富的数据库和现场检测经验,

(2) 声发射检测,一般需要适当的加载程序。多数情况下,可利用现成的加载条件, 但有时,还需要特作准备;

(3) 声发射检测所发现缺陷的定性定量,仍需依赖于其它无损检测方法。由于上述特点,现阶段声发射技术主要用于:①其它方法难以或不能适用的对象与环境;②重要构件的综合评价;③与安全性和经济性关系重大的对象。因此,声发射技术不是替代传统的方法,而是一种新的补充手段。

1.3 发展过程

声发射现象的观察及其地震学中的应用,历史已久。然而,作为一种现代检测技术,起步于 50 年代初德国凯赛尔所作的研究工作^[1]。他在几种金属材料的变形过程中观察到声发射现象,并提出了著名的声发射不可逆效应。此后,美国的研究人员发现了塑性变形中的位错声发射机制。

60年代,声发射作为无损检测技术,在美国原子能、宇航技术中兴起,在焊接延迟裂 纹监视、压力容器与固体发动机壳体等检测方面出现丁应用实例^[2]。

70年代,在日、欧、我国等相继得到发展。但是,当时对声发射的期望值过高,而检测设备的开发、基础研究、检测经验均有限,故其进展缓慢,仅获得有限的成功。

80年代,随微机技术、基础研究的进展,声发射技术获得迅速发展,其研究与应用从 实验室研究扩展到结构评价、工业过程监视等各领域,首先在金属与玻璃钢压力容器、储罐、 管道等结构件中,进入工业应用和标准化阶段,成为一种新兴动态无损检测方法^[3-5]。

2

第2章 声发射技术基础

2.1 声发射源

引起声发射的材料局部变化称为声发射事件,而声发射源,是指声发射事件的物理源点 或发生声发射波的机制源。在工程材料中,有许多种损伤与破坏机制可产生声发射波,概括 起来如表 2-1 所示。



表 2-1 声发射源

2.2 波的传播

波源处的声发射波形,一般为宽频带尖脉冲,包含着波源的定量信息,然而,所测得信 号波形,由于介质中的传播特性和传感器频响特性之影响而变得非常复杂,与原波形有很大 不同,从而很大地淡化了所测得波形特性参数的物理意义。因此,波的传播对波形的影响, 是在实验条件设置、数据分析及评价中均需考虑的基本问题。

2.2.1 波的传播模式

声发射波在介质中的传播,根据质点的振动方向和传播方向的不同,可构成纵波、横波、 表面波、兰姆波等不同传播模式。

纵波(压缩波):质点的振动方向与波的传播方向平行,可在固体、液体、气体介质中 传播。

横波(剪切波):质点的振动方向与波的传播方向垂直,只能在固体介质中传播。

表面波(瑞利波): 质点的振动轨迹呈椭圆形,沿深度约为1~2个波长的固体近表面 传播,波的能量随传播深度增加而迅速减弱。

兰姆波:因物体两平行表面所限而形成的纵波与横波组合的波,它在整个物体内传播, 质点作椭圆轨迹运动,按质点的振动特点可分为对称型(膨胀波)和非对称型(弯曲波)两种。

2.2.2 波的传播速度

波的传播速度,是与介质的弹性模量和密度有关的材料特性,因而不同的材料,波速也 不同。不同的传播模式也具有不同的传播速度。在均匀介质中,纵波与横波的速度分别可用 下式表达。

$$V_{l} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\sigma}{\rho (1+\sigma) (1-2\sigma)}}; \quad v_{l} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\sigma)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$
(2-1)

式中 Vt —— 纵波速度;

u--- 横波速度;

 σ —— 泊松比;

E —— 杨氏模量;

G --- 切变模量;

ρ —— 密度。

在同种材料中,不同模式的波速之间有一定比率关系。例如,横波速度约为纵波速度的 60%,表面波速度约为横波的 90%。纵波、横波、表面波的速度与波的频率无关,而板波的 速度则与波的频率有关,即具有频散现象,约分布在纵波速度和横波速度之间。在实际结构 中,传播速度还受到诸如材料类型、各向异性、结构形状与尺寸、内容介质等多种因素的影 响,因而传播速度实为一种易变量。

传播速度,与波的频率和波长成正比,等于频率与波长的乘积。

传播速度主要用于声发射源的时差定位计算,而其不确定性成为影响源定位精度的主要因素。在实际应用中,波速难以用理论计算,需要用实验测量,例如,在被检件表面上,用 笔芯模拟源和声发射仪时差测量功能,测得两个传感器之间的时差,再用时差除以传感器间 距即可得到波速。以实测波速算出的定位精度一般可在传感器间距的1~10%范围内变化。 就常见容器类二维结构而言,表面波或板波的传播衰减远小于纵波和横波而可传播更远的距离,常成为主要的传播模式。多数金属容器中,典型传播速度约为3000m/s,在无法测得波速的情况下,常可以作为定位计算的初设值。

2.2.3 反射、折射与模式转换

在固体介质中,声发射源处同时产生纵波和横波两种传播模式。它们传播到不同材料界面时,可产生反射、折射和模式转换。两种入射波除各自产生反射(或折射)纵波与横波外, 在半无限体自由表面上,一定的条件下还可转换成表面波,见图 2-1。厚度接近波长的薄板 中又会发生板波。厚度远大于波长的厚壁结构中,波的传播变得更为复杂,其示意见图 2-2。



图 2-2 厚板中传播示意图

O-波源 L-纵波 S-横波 R-表面波

声发射波经界面反射、折射和模式转换,各自以不同波速、不同波程、不同时序到达传 感器,因而,波源所生一尖脉冲波到达传感器时,可以纵波、横波、表面波或板波及其多波 程迟达波等复杂次序,分离成数个尖脉冲或经相互叠加而成为持续时间很长的复杂波形,有 时长达数 ms。在钛合金气瓶上,对铅笔芯模拟源的响应波形一例如图 2-3 所示。除外,再 加上后述传感器频响特性及传播衰减等的影响,信号波形的上升时间变慢,幅度下降、持续 时间变长、到达时间延迟、频率成份向低频偏移。这种变化,不仅对声发射波形的定量分折, 而且对波形的常规参数分析也带来复杂的影响,应予以充分注意。



2.2.4 衰减

衰减是指波的幅度随传播距离的增加而下降的现象。引起声发射波衰减的三个主要机制 为:波的几何扩展、材料吸收和散射。

(1)几何扩展衰减:由于声发射波从波源以各向扩展,从而随传播距离的增加,使单位面积上的能量逐渐减少,造成波的幅度下降。扩展衰减与传播介质的性质无关,主要取决于介质的几何形状(或波阵面),它主要控制着近场区的衰减。

一般而言,一局部源所产生体波(纵波与横波)的幅度下降与传播距离成反比,而表面 波和板波则与其平方根成反比。棒、杆等一维介质中,几何扩展衰减小于二维和三维介质。 在小型球类容器中,由于波阵面随传播距离先扩展而后收缩,波的幅度也相随而波动:例如, 从南极点所产生波的幅度,到达赤道线处变得最小,而到北极点又会变大。

(2) 材料吸收衰减: 波在介质中传播时,由于质点间的内摩擦(粘弹性)和热传导等因素,部分波的机械能转换成热量等其他能量,使波的幅度随传播距离以指数式下降。

其衰减率取决于材料的粘弹性等性质,并与波的频率关,近似与频率成正比。这种能量 损失机制主要控制着远场区的衰减。

(3)散射衰减:波在传播过程中,遇到不均匀声阻抗界面时,发生波的不规则反射(称为散射),使波原传播方向上的能量减少。粗晶、夹杂、异相物、气孔等是引起散射衰减的主要材质因素。

(4) 其它因素:①频散,即在一些构件中,不同频率成份的波以不同的速度传播(频 散效应),引起波形的分离或扩展,从而使波的峰幅度下降,②相邻介质"泄漏",即由于 波向相邻介质"泄漏"而也造成波的幅度下降,例如,容器中的水介质,③ 障碍物,即容 器上的接管、人孔等障碍物也可造成幅度下降。

(5) 实际结构中的衰减

实际结构中,波的哀减机制很复杂,难以用理论计算,只能用试验测得。例如,在被检件表面上,利用铅笔芯模拟源和声发射仪,按一定的间距测得幅度(dB)~距离(m)曲线。 图 2-4 示出了长 12.2m,内径 1.2n,厚度 12.5mm 的气压容器封头上,用不同频率测得的幅度一距离曲线。



图 2-4 气压容器衰减曲线 [6]

传播衰减的大小,关系到每个传感器可监视的距离范围,在源定位中成为确定传感器间 距或工作频率的关键因素。在实际应用中,为减少衰减的影响而常采取的措施包括:降低传 感器频率或减小传感器间距,例如,对复合材料的局部监视通常采用150kHz的高频传感器, 而大面积监视则采用30kHz的低频传感器,对大型构件的整体检测,可相应增加传感器的数 量。

2.3 影响声发射特性的因素

声发射来自材料的变形与断裂机制,因而所有影响变形与断裂机制的因素均构成影响声 发射特性的因素,主要包括:

 材料,包括成份、组织、结构,例如,金属材料中的晶格类型、晶粒尺寸、夹杂、 第二相、缺陷,复合材料中的基材、增强剂、界面、纤维方向、辅层、残余应力等; 8

- ② 试件,包括尺寸与形状;
- ③ 应力,包括应力状态、应变率,受载历史;
- ④ 环境,包括温度、腐蚀介质。

这些因素,对合理选择检测条件,正确解释检测结果,均为需考虑的基本问题。影响声 发射强度的主要因素如表 2-2 所示

类型	产生高强度的因素	产生低强度的因素	
	高强度	低强度	
	各向异性	各向同性	
	不均匀性	均匀	
材料特性	焊缝或铸造组织	锻造组织	
	粗晶粒	细晶粒	
	有缺陷	无缺陷	
	有夹杂或第二相	无夹杂或第二相	
	厚断面或平面应变	薄断面或平面应力	
应力状态	无预载	有预载	
	高应变率	低应变率	
	裂纹扩展	塑性变形	
变形和断裂方式	解理断裂	剪切断裂	
	纤维断裂	基材开裂	
	马氏体相变	扩散型相变	
	李晶变形	滑移变形	
17 4立	低温	高温	
	腐蚀介质	非腐蚀介质	

表 2-2 影响声发射强度的因素

2.4 凯赛尔效应和费利西蒂比

2.4.1 凯赛尔效应

材料的受载历史,对重复加载声发射特性有重要影响。重复载荷到达原先所加最大载荷 以前不发生明显声发射,这种声发射不可逆性质称为凯赛尔效应。多数金属材料中,可观察 到明显的凯赛尔效应。但是,重复加载前,如产生新裂纹或其它可逆声发射机制,则凯赛尔 效应会消失。

凯赛尔效应在声发射技术中有着重要用途,包括:①在役构件的新生裂纹的定期过载声 发射检测:②岩体等原先所受最大应力的推定:③疲劳裂纹起始与扩展声发射检测,④通过 预载措施消除加载销孔的噪声干扰,⑤加载过程中常见的可逆性摩擦噪声的鉴别。

2.4.2 费利西蒂效应和费利西蒂比

材料重复加载时,重复载荷到达原先所加最大载荷前发生明显声发射的现象,称为费利

西蒂效应,也可认为是反凯赛尔效应。重复加载时的声发射起始载荷(P_{AE})对原先所加最大载荷(P_{max})之比(P_{AE} / P_{max}),称为费利西蒂比。该效应的示意如图 2-5 所示。



图 2-5 费利西蒂效应

费利西蒂比作为一种定量参数,较好地反映材料中原先所受损伤或结构缺陷的严重程度,已成为缺陷严重性的重要评定判据。树脂基复合材料等粘弹性材料,由于具有应变对应力的迟后效应而使其应用更为有效。费利西蒂比大于1表示凯赛尔效应成立,而小于1则表示不成立。在一些复合材料构件中,费利西蒂比小于0.95作为声发射源超标的重要判据。

第3章 检测设备与信号处理

3.1 声发射传感器

3.1.1 传感器工作原理

某些晶体受力产生变形时,其表面出现电荷,而又在电场的作用下,晶片发生弹性变形, 这种现象称为压电效应。常用声发射传感器的工作原理,基于晶体元件的压电效应,将声发 射波所引起的被检件表面振动转换成电压信号,供于信号处理器。

压电材料多为非金属介电晶体,包括: 锆钛酸铅、钛酸铅、钛酸钡等多晶体和铌酸锂、 碘酸锂等单晶体。其中, 锆钛酸铅(PZT-5)接收灵敏度高,是声发射传感器常用压电材料。铌酸锂晶体居里点高达 1200℃,常用作高温传感器。

传感器的特性包括:频响宽度、谐振频率、幅度灵敏度,取决于许多因素,包括:①晶 片的形状、尺寸及其弹性和压电常数;②晶片的阻尼块及壳体中安装方式;③传感器的耦合、 安装及试件的声学特性。

压电晶片的谐振频率(f)与其厚度(t)的乘积为常数,约等于 0.5 倍波速(V),即 f·t =0.5V,可见,晶片的谐振频率与其厚度成反比。

3.1.2 类型与选择

传感器属检测系统的关键部件,其响应多敏感于表面振动的垂直位移,包括:位移、位 移速度、位移加速度,这主要取决于传感器的频率响应和灵敏度特性。

传感器可分为压电型、电容型和光学型。其中,常用的压电型又可分为:谐振式(单端和差动式)、宽频带式、锥型式、高温式、微型、前放内置式、潜水式、定向式、空气耦合式和可转动式,其主要类型、特点和适用范围如表 3-1 所示。

类型	特点	适用范围
单 端 谐 振 传感器	谐振频率,多位于 50~300kHz 内.典型应用为 150kHz,主要 取决于晶片的厚度,敏感于位移速度。响应频带窄,波形畸变大, 但灵敏度高,操作简便,价格便宜,适于大量常规检测	大多数材料研究和构件的无 损检测
宽频带传 感器	响应频率,约为100~1000kHz,取决于晶片的尺寸和结构 设计。灵敏度低于谐振传感器,幅频特性不甚理想,但操作简便, 适于多数宽频带检测	频谱分析、波形分析等信号类 型或噪声的鉴别
锥型传感 器	100~1500kHz内,频率响应平坦,灵敏度高于宽频带传感器。采用微型晶片和大背衬结构,尺寸大,操作不便。适于位移测 量类检测	源波型分析、频谱分析。也作 为传感器校准的二级标准

表 3-1 传感器的类型、特点和适用范围

1	ん土	>	
(ZNÉ		
	575	/	

类 型	特点	适用范围
差动传感 器	由两个压电晶片的正负极差接而成,输出差动信号。与单端式 相比,灵敏度较低,但对共模电干扰信号有好的抑制能力,适于强电 磁噪声环境	强电磁干扰环境下,可替代 单端式传感器
高温传感 器	采用居里点温度高的晶片.如铌酸锂晶片。使用温度可达 540℃	高温环境下的检测,如在线 反应 容器
电容传感 器	一种直流偏置的静电式位移传感器。直到 3MHz,频率响应平 坦,物理意义明确,适于表面法向位移的定量测量,但操作不便,灵 敏度较低,约为 0.01A°,适于特殊应用	源波形定量分析或传感器 绝对灵敏度校准
光学传感器	属激光干涉计量的一种应用,直到 20MHz,频率响应平坦, 并具有非接触,点测量等特点,适于表面垂直位移的定量测量,但操 作不便,灵敏度低,约为 0.1A°。适于特殊应用	仅用于实验室定量分析,也 可作为标准位移传感器

3.1.3 结构形式

常用的压电型谐振传感器的结构形式见图 3-1。

压电元件多采用锆钛酸铅陶瓷晶片(PZT 一 5),起着声电转换作用。两表面镀上 5~19μm 厚的银膜,起着电极作用。陶瓷保护膜,起着保护晶片及传感器与被检体之间的电绝缘作用。 金属外壳对电磁干扰起着屏蔽作用。导电胶,起着固定晶片与导电的作用。在差动式传感器 中,正负极差接而成的两个晶片,可输出差动信号,起着抑制共模电噪声的作用。传感器材 料选择,还应考虑诸如温度、腐蚀、核辐射、压力等检测环境因素。



a)单端式 b)差动式

3.1.4 传感器绝对灵敏度校准

绝对灵敏度校准,是声发射定性定量分析、二级标准传感器选择所不可缺少的环节,有 表面波脉冲法和互易法两种。绝对灵敏度(M),一般用在一定频率下,传感器的输出电压 (V)与表面垂直位移速度(m/s)之比来表示,其单位为: V/(m·s⁻¹)。

(1)表面波脉冲法 在半无限体钢制试块表面上,以铅笔芯或玻璃细管的断裂作为阶 跃力点源,如测得标准电容位移传感器和待效传感器对表面波脉冲的响应,则即可按定义算 出绝对灵敏度。 该校准方法已纳入 ASTM 标准^[6],在 100kHz~1MHz 频率内,校准的不确定度可达±5% (90%置信度)。国内也已建立起此类校准系统^[7],传感器灵敏度校准曲线一例见图 3-2。



图 3-2 传感器绝对灵敏度曲线

表面波脉冲法,操作不便,但与检测实际相近,除了一般传感器校准外,还可用于二级 标准传感器的校准。

(2) 互易法 根据传感器的机电变换的可逆性原理,在半无限体试块表面上,只要比较一组同类传感器之间的电气特性,即可测出绝对灵敏度。此法不需直接测量表面的法向位移,因而操作较简便,但是,每次校准需提供三个同类待校传感器。该方法已纳入日本无损检测协会标准^[8],在 50kHz~1MHz 频率内,可提供表面波和纵波灵敏度。

3.1.5 传感器相对灵敏度校准

在批量检测中,需要一种简便而经济的相对校准方法,以比较传感器灵敏度的变化。此 类方法只提供传感器对模拟源的相对幅度或频率响应。

常用的对接法,一般由小型试块、以扫 频仪为激励源的超声传感器(谐振频率大于 2.5MHz)及电压表构成,可用来比较传感 器的频率响应。

作为一简便的方法,可由小型试块、电 脉冲发生器、声发射仪等构成。用声发射仪 记录传感器对模拟信号的响应幅度,也可与 已知灵敏度的标准传感器作比较,其原理如 图 3-3 所示。



- 3.2 电缆
- 3.2.1 电缆类型

传感器、前置放大器及主机之间通过电缆线连接。电缆类型包括:同轴电缆、双芯绞合

线和光纤电缆。

50Ω同轴电缆为常用的基本类型,可满足电磁屏蔽和阻抗匹配的基本要求。前置放大器 的电源线与信号输出线,一般共用同一个同轴电缆,而有些厂家的设备,则前置放大器的电 源线与信号线分开,并采用双芯绞合线。光纤电缆只用于特殊情况。

3.2.2 电缆中的噪声问题

传感器电缆,其屏蔽作用有限,对电磁波起着类似"天线"的作用,易受电磁波的于扰。 为减少其影响而应限制其长度,一般不宜大于1.5m,同理,传感器与金属试件之间不得导 电,要保持电绝缘。强电磁噪声环境中,也可直接采用前置放大器内置式传感器,以消除由 电缆线引入的噪声。此外,传感器本身也是电容器,因而电缆的分布电容会相应降低传感器 的灵敏度。为使传感器之间的灵敏度保持一致,宜采用等长度电缆。

信号电缆线和连接件,在使用中常由于损伤或开路而会引起电磁噪声干扰。

3.2.3 阻抗匹配

当信号在电缆中传输时,如信号线的阻抗与终端或始端不匹配,信号将在传输线内发生 反射,造成信号衰减,只有与两端都匹配才使信号衰减最小。为获得最佳传输功率,电缆线 与前置放大器和主机都应当匹配。

前置放大器的输出阻抗和主机的输入阻抗一般为 50Ω,因而,其连接都采用 50Ω的信号 电缆。当主机的输入阻抗并非 50Ω时,应另加上阻抗匹配器。

3.2.4 电缆长度

传感器电缆很短,其传输衰减可忽略。但是,前置放大器至主机的电缆长度,可从几米 至 300 米或更长的范围内变化,对长电缆应考虑信号衰减问题。一般而言,全线的衰减不宜 大于 3dB。当电缆长度大于 300 米时,应串接中继放大器。

3.3 信号调节

3.3.1 前置放大器

前置放大器置于传感器附近,放大传感器的输出信号,并通过长电缆供主机处理。主要 作用为:①高阻抗传感器与低阻抗传输电缆之间提供阻抗匹配,以防信号衰减;②通过放大 微弱的输入信号,以改善对电缆噪声有关的信噪比;③通过差动放大,降低由传感器及其电 缆引进的共模电噪声;④提供频率滤波器。

前置放大器的主要性能包括:

(1) 增益:通常提供 40dB 固定增益。有的还备有 20dB 和 60dB 附加增益,以适应不同的用途。

(2)频率范围: 放大器本身可提供较宽的频率范围,通常约为2kHz~1MHz。然而,

实际频宽取决于滤波器的选择,包括低通、高通和带通滤波器。

(3)噪声:噪声水平取决于晶体管的性能、放大器频宽、输入阻抗和环境温度。其中, 频宽为主要的影响因素,而频率范围越宽噪声水平就越高。因而,噪声水平,只有在同一频 宽下比较才有意义。

(4)动态范围:可用最大输出信号幅度对输出噪声幅度之比表示。为适用于宽的信号 幅度范围,放大器的动态范围应尽可能大,一般为 60dB~85dB。

3.3.2 滤波器

频率滤波器一般采用插件式或编程式,包括高通、低通和带通滤波器,主要用来排除噪 声和限定检测系统工作频率范围。

选择滤波频带时,在噪声和传播衰减之间应适当作折衷考虑。例如,机械噪声的频率成份,多集中在100kHz以下,而传播衰减则约从300kHz起变得很大,从而限制着可监视范围。因此,在多数应用中,优先采用100~350kHz的带通滤波器。但对高衰减材料的检测,则不得不采用100kHz以下的低频滤波器。

3.3.3 增益测量单位

放大器的增益及信号幅度的测量,通常采用分贝(dB)为单位,其计算分别用下式表示。

$$dB\alpha = 20lg (V_{out}/V_{in}) ; dB_{AE} = 20lg (V/V_{ref})$$
(3-1)

式中 dBα ——用 dB 表示的增益

Vout —— 输出电压

- V_{in} —— 输入电压
- dBAE --- 用 dB 表示的幅度

V --- 电压

V_{ref} —— 参考电压

声发射技术中,将前置放大器的输入 1μV(V_{ref})定义为 0dB。

3.4 信号探测与处理

3.4.1 信号类型

在示波器上观察到的传感器输出信号有两种基本类型:突发型和连续型,如图 3-4 所示。 突发型信号,指在时域上可分离的波形。实际上,所有声发射源过程,均为突发过程, 如断续的裂纹扩展。不过,当声发射频度高达时域上不可分离的过程时,就以连续型信号显 示出来,如塑性变形和泄漏信号。在实际检测中,也会出现其混合型。

对不同的信号类型,要采用不同的信号处理方法。早期的通用系统,多为突发型信号检测为主,而在一些专用检测仪中设有连续型信号的检测功能。近年来的通用系统,可同时采 集两类信号。



3.4.2 门槛比较器

为排除低幅度背景噪声及确定系 统灵敏度,对前置放大器的输出,设 置高于背景噪声水平的阀值电压,即 称为门槛值。门槛比较器仅将幅度高 于门槛值的信号鉴别为声发射信号, 其原理示意见图 3-5。

门槛电路采用固定门槛和浮动门 槛两种。其中,浮动门槛可随背景噪 声水平的波动而上下浮动,主要用于 连续型信号背景下突发信号的探测。

3.4.3 信号特性参数

特征提取电路将过门槛信号测量 为几个信号特性参数。连续信号参数 包括:振铃计数、平均信号电平和有



图 3-5 门槛比较电路

效值电压,而突发信号参数包括: 波击(事件)计数、振铃计数、幅度、能量计数、上升时间、持续时间和时差。常用突发信号特性参数示意见图 3-6。



图 3-6 突发信号参数

常用信号特性参数的含义和用途如表 3-2 所示。

表 3-2 声发射信号参数

参数	含义	特点与用途	
波击 (Hit)和波击 计数	一通道上一声发射信号的探与测量 和所测得波击个数,可分为总计数、计数率	反映声发射活动的总量和频度,常用于声发射活动性评价	
事件计 数	由一个或多个波击鉴别所得声发射 事件的个数,可分为总计数、计数率。一阵 列中,一个或几个波击对应一个事件	反映声发射事件的总量和频度,用于源的活动性和定位 集中度评价	
振铃计 数	越过门槛信号的振荡次数,可分为总 计数和计数率	信号处理简便,适于两类信号,又能粗略反映信号强度 和频度,因而广泛用于声发射活动性评价,但甚受门槛的影响	
幅度	事件信号波形的最大振幅值,通常用 dB表示(传感器输出 1μV 为 0dB)	与事件大小有直接的关系,不受门槛的影响,直接决定 事件的可测性,常用于波源的类型鉴别、强度及衰减的测量	
能量计 数(MARSE)	事件信号检波包络线下的面积,可分 为总计数和计数率	反映事件的相对能量或强度。对门槛、工作频率和传播 特性不甚敏感,可取代振铃计数,也用于波源的类型鉴别	
持续时 间	事件信号第一次越过门槛至最终降 至门槛所经历的时间间隔,以μs表示	与振铃计数十分相似,但常用于特殊波源类型和噪声的 鉴别	
上升时 间	事件信号第一次越过门槛至最大振 幅所经历的时间间隔,以μs表示	因甚受传播的影响而其物理意义变得不明确,有时用于 机电噪声鉴别	
有效值 电压 (RMS)	采样时间内,信号电平的均方根值, 以 V 表示	与声发射的大小有关,测量简便,不受门槛的影响,适 用于连续型信号,主要用于连续型声发射活动性评价	
平均信 号电平 (ASL)	采样时间内,信号电平的均值,以 dB 表示	提供的信息和应用与 RMS 相似,对幅度动态范围要求 高而时间分频率要求不高的连续型信号,尤为有用。也用于背 景噪声水平的测量	
时差	同一个声发射波到达各传感器的时 间差,以μs表示	决定了波源的位置、传感器间距和传播速度,用于波源 的位置计算	

从亦具	试验过程外加变量,包括经历时间、	不属于信号参数,但属于波击信号参数的数据集,用于
21文里	载荷、位移、温度及疲劳周次	声发射活动性分析

3.5 数据显示

所测得信号的数据集,包括信号参数和外变量,经系统软件的实时或事后分析,其结果 以更直观的图表形式显示出来。常用的数据显示类型与图形示例分别见表 3-3 和图 3-7。

显示类型	说 明	用途
事件经历图	指信号参数随外变量变化的图形,是一种最为广泛采用的声发射活动性显示,见图 3-7a)和 b)	 波源的活动性评价 费利西蒂比和凯赛尔效应评价 恒载声发射评价 起裂点测量
分布图	表示事件计数随信号参数值的统计分布.纵轴表示事件计数,而横 轴表示信号参数,如幅度、能量、振铃计数。其中,幅度分布最为广 泛应用,可分为积分型和微分型两种分布形式,见图 3-7c)和 d)	 波源的类型鉴别,例如裂纹扩展与塑 性变形;纤维断裂与基材开裂 波源的强度评价
关系图 (点图)	表示任意两个信号参数或外变量之间的统计关系。每个显示点对应 于一个事件,而二维坐标轴分别表示其两个参数值,见图 3-7e)。因 可同时提供信号波形的形状和大小的信息,适于作较精确的分析。对 一些经历图,也可用关系图表示。	 1. 波源的类型鉴别,如纤维断裂与分层 扩展 2. 噪声鉴别,如电磁噪声与摩擦噪声
定位图	以点表示每个事件在传感器阵列中的位置。一些系统软件可自动绘制出事件集中区的方形或圆形圈子,见图 3-7f)	 4. 确定波源的位置 2. 外来噪声的空间鉴别 3. 事件集中区为基的数据评价
列表	指每个事件数据集的时序排列,包括信号参数、外变量、波源的坐 标	 系统对模拟源的响应观察,包括系统 校准 对特殊问题的精确分析

表 3-3 数据显示类型



a)振铃(能量)计数经历 b)振铃(能量)计数率经历 c)积分型幅度分布d)微分型幅度分布 e)振铃(持续时间)一幅度关系 f)平面定位

3.6 声发射源定位

3.6.1 源定位类型

源定位是声发射技术的重要功能,其类型如表 3-4 所示

表 3-4 源定位分类

定位 平面定位 差定位 1 维 定 位 柱面定位 维定位 し球面定位 突发信号 区域定位 信号到达次序 源定位 幅度测量式区域定位 连续信号 衰减测量式定位 互相关式时差定位 干涉式时差定位

时差定位,经时差、波速、传感器间距等参数的测量及复杂的算法运算,可确定波源的 坐标或位置,是一种精确而又复杂的定位方式,广泛用于试样和构件的检测。不过,时差定 位,易丢失大量的低幅度信号,其定位精度又受波速、衰减、波形、构件形状等许多易变量 的影响,因而,在实际应用中难以得到满意的结果,也受到种种限制。

区域定位,是一种处理速度快、简便而又粗略的定位方式,主要用于复合材料等由于声 发射频度过高或传播衰减过大或检测通道数有限而难以采用时差定位的场合。

连续信号源定位,主要用于压力泄漏源的定位。

3.6.2 区域定位

由于传播衰减的影响,每个传感器主要接收其周边区域发生的声发射波。区域,是指围绕一传感器的区域,而来自该区的声发射波首先被该传感器接收。区域定位,按传感器各监视各区域的方式或按声发射波到达各传感器的次序,粗略确定声发射源所处的区域。当仅考虑首次到达波击信号时,可提供波源所处的主区域,而该区域以首次接受传感器与临近传感器之间的中点连线为界。当考虑第二次或第三次到达波击信号时,可进一步确定主区中的第二或第三分区。在复合材料检测中常用的区域定位原理示意见图 3-8。



3.6.3 一维(线)定位

一维定位至少采用两个传感器和单时差,是最为简单的时差定位方式,其原理见图 3-9。 若声发射没从波源 Q 到达传感器 S₁和 S₂的时间差为Δt,波速为v,则可得下式:

线定位仅提供波源的双曲线坐标,故还不 属点定位,主要用于实验室试样、长管道、线 焊缝等一维元的检测。

3.6.4 二维(平面)定位

二维定位至少需要四个传感器和两组时 差,但为得到单一解一般为三组时差。传感器 阵列可任意选择,但为运算简便,常采用简单





阵列形式,如三角形、方形、菱形等。近年来,任意三角形阵列及连续多阵列方式也得到应用。就原理而言,波源的位置均为两组或三组双曲线的交点所确定。

由四个传感器构成的菱形阵列平面定位原理见图 3-10。



图 3-10 二维 (平面) 定位法

若由传感器 S₁和 S₃间的时差Δt_x所得双曲线为 1,由传感器 S₂和 S₄间的时差Δt_y所得双曲线为 2,波源 Q,离传感器 S₁和 S₃,S₂和 S₄的各距离差分别为 L_x 和 L_y ,波速为v,两组 传感器间距分别为 a 和 b,那么,波源就位于两条双曲线的交点 Q(X, Y),上,其坐标可 表示为:

20

$$X = \frac{L_X}{2a} \left\{ L_X + 2\sqrt{(X - \frac{a}{2})^2 + Y^2} \right\}$$
(3-3)

$$X = \frac{L_Y}{2b} \left\{ L_Y + 2\sqrt{(Y - \frac{b}{2})^2 + X^2} \right\}$$
(3-4)

3.7 声发射检测系统

3.7.1 类型

60年代末,首台声发射商品仪问世以来,已更新换代多次,在结构、功能、数字化程度和价格上均有甚大差异。一般可分为:功能单一的单通道型(或双通道型)、多通道多功能的通用型和工业专用型,其特点与适用范围见表 3-5 所示。

类 型	特点	适用范围
	 1. 只有一个信号通道,功能单一,适于粗略检测 2. 多用模拟电路,处理速度快,适于实时指示 	
单通道系统	 3. 多为测量计数或能量类简单参数 4. 小型,机动,廉价 	 1. 实验室试样的粗略检测 2. 现场构件的局部监视
双通道系统	 1. 具有两个信号通道和一维源定位功能 2. 具有幅度及其分布等多参数测量和分析功能 	 1. 实验室试样较精确的检测 2. 管道、焊缝等一维元的定位检测
多通道系统	 可扩展多达数十个通道,并具有二维源定位功能 具有多参数分析、多种信号鉴别,实时或事后分析功能 微机用于数据的采集、分析、定位计算、存储和显示 操作复杂,昂贵,但适于综合而精确分析 	 金属、复合材料等多种材料检测 实验室和现场的开发和应用 大型构件的结构完整性评价
工业专用系统	 多为小型,功能单一 多为模拟电路,适于现场实时指示或报警 价格为工业应用的重要因素 	 刀具破损监视 泄漏监视 旋转机械异常监视 电器件多余物冲击噪声监视 固体推进剂药条燃速测量

表 3-5 声发射仪的类型、特点、适用范围

3.7.2 单通道声发射仪

单通道声发射仪,一般由传感器、前置放大器、主放大器、信号参数测量、数据分析、 记录与显示等基本单元构成,如图 3-11 所示。



图 3-11 单通道声发射仪

传感器的输出信号,经前置放大器放大,滤波器频率鉴别,主放大器进一步放大,门槛 电路探测、测量单元提取信号特性参数,分析单元运算,最后输出到记录与显示单元。特性 参数的测量、分析和显示,随检测仪的类型有很大差异。例如,最早期的单通道仪器而言, 主放大器的输出信号,经门槛比较电路形成振铃计数脉冲,再经计数器计数及数模转换,便 供 x-y 记录仪记录.这类最简单的类型,已被淘汰,逐步为多参数测量电路所取代,其一例 如图 3-12 所示。



图 3-12 多参数测量电路示例

3.7.3 多通道声发射系统

随微机技术的发展,其应用从早期源定位计算,相继扩展到数据采集、存储、分析和显示等更为一般的功能。与此同时,信号处理,从计数类参数的测量发展到事件或波击参数类的测量与分析,并在数字化程度、实时性、精确性、综合性、通用性方面均有了很大进展。 国内,目前采用的机型包括以下两种。

3.7.3.1 微机控制式多通道系统

图 3-13 示出了该类系统的方框图一例。



图 3-13 计算机控制式多通道系统

该系统采用多处理器并行处理结构,由高速采集用独立通道控制器、协调用总通道控制

器、数据分析用主机算机构成。

独立通道控制器,分别控制着两个独立信号通道,进行波击参数组的测量,包括波击与 振铃计数、能量、幅度、持续时间、上升时间、有效值电压、平均信号电平和到达时间等常 规参数,并快速存储于大容量输出缓冲器。缓冲器在前端高速测量与后续低速主处理器之间 提供速率匹配,以防止主机丢失高频度信号数据。由于采用并行处理结构,不降低采集速度 的情况下,可扩展达数十个检测通道,原理上可扩展达 128 个通道。

总通道控制器,具有容量更大的缓冲器,并在前端与主机之间起着协调作用,它将所读 波击参数组和外变量,以每个波击到达传感器的次序,逐个供给主机并存于硬盘。由于采用 全局定时法,在每个通道的每个波击的数据集中,都包含着精度为0.25μs的到达传感器的 绝对时间,而不是时差。这种数据结构,为检测人员事后任意选择其它定位软件提供了机会。

主计算机,可采用 IBM 兼容机,在各种软件的支持下,可实现实时或事后的分析与显示。软件的功能包括:①实时数据采集,包括条件设置、转存和显示方式选择;②源定位,包括一维、二维定位及事件集中区显示;③事后分析,包括:数据滤波和编程功能;④三维图显示;⑤在附件支持下的波型记录与谱分析。

常用显示方式包括:历程图、分布图、关系图、定位图和数据列表。

3.7.3.2 全数字式多通道声发射系统

随数字信号处理技术的发展,全数字式多功能声发射系统的开发成为近年的新趋势。其 最大特点是经前置放大的信号不必再经过一系列模拟电路而直接转换成数字信号,再同时进 行常规特性参数提取与波形记录。这不仅改善了电路的稳定性和可靠性,而且大大强化了系 统信号处理能力。

图 3-14、图 3-15、图 3-16 分别示出了 MISTRAS 2001 系统、系统框图及其数字信号处 理卡(DSP卡)框图。



图 3-14 M1STRAS 2001 系统



图 3-16 AEDSP 卡框图

该系统采用插卡式并行处理结构,除 IBM 兼容 PC 机、前置放大器、传感器及有关软件 外,主要由数个并行处理的 AEDSP 卡组合而成。

AEDSP 卡是 ISA 总线 PC 卡,可直接插入 PC 槽内,也可经扩展箱组合成不同的多通道 系统,原理上可扩展达 256 通道(128 个卡)。AEDSP 卡是该系统的核心,是双通道全数字 式声发射信号处理单元,在 PC 界面采集程序的支持下可同时进行常规特性参数的提取和瞬 态波型的记录与处理。该卡主要由高速数字信号处理芯片 TMS320C40、可编程滤波器、A /D转换器、特征提取电路、外变量输入、存储器、高速总线及 ISA 总线构成,其数据流程 如下。

经前置放大的信号首先进入可编程滤波器。可用软件选择 4 个高通和 4 个低通,也可任

意组合成 15 个带通滤波器。经 16bit、10MHz(单通道时可达 20MHz) A / D 转换器形成的 数字信号,可直接进入 DSP 芯片进行波型记录与处理,同时进入特征提取电路形成多种常 规特性参数,包括突发信号的波击特性参数和连续信号的时基采样特性参数,这些特性参数 再进入 DSP 芯片被存储与处理。此外,传感器校准电路连同前置放大器向传感器提供可编 程的脉冲信号,用于检查传感器的耦合灵敏度。DSP 芯片是 AEDSP 卡的强 CPU 和高速信 号处理器,它具有寄存波型、特性参数及控制程序用大容量随机存储器。该芯片可计算波形 的频谱及待开发的其它信号特性参数。它还收集特性参数、波形、外变量等信息并加以规格 化,通过输出缓冲器及 ISA 总线供 PC 机存储、分析和显示。并行分布的 AEDSP 卡之间, 通过高速总线实现通讯与协调工作。按厂家的资料,该 AEDSP 卡具有每通道 15000Hit / s 的波击处理能力及 250MB / S 的数据传输能力。

该系统的软件,除常规参数、波形的采集、事后分析、源定位、图表显示等基本软件外, 还可配置波形记录与分析、模式识别和多模式处理等软件。

3.7.4 检测系统选择

3.7.4.1 检测对象与目的

(1) 被检材料: 声发射信号的频域、幅度、频度特性随材料类型有很大不同,例如, 金属材料的频域约为数 kHz~数 MHz,复合材料约为数 kHz~数百 kHz,岩石与混凝土约为 数百 Hz~数百 kHz。对不同材料需考虑不同的工作频率。

(2)检测对象:对试验室材料试验、现场构件检测、各类工业过程监视等不同的检测, 需选择不同类型的系统,例如,对实验室研究,多选用通用型,对大型构件,采用多通道型, 对过程监视,选用专用型。

(3)所需信息类型:根据所需信息类型和分析方法,需要考虑检测系统的性能与功能,如信号参数、波形记录、源定位、信号鉴别、及实时或事后分析与显示等。

3.7.4.2 影响选择的因素

选择检测系统时需要考虑的主要因素如表 3-6 所示。

性能及功能	影响因素
工作频率	材料频域、传播衰减、机械噪声
传感器类型	频响、灵敏度、使用温度、环境、尺寸
通道数	被检尺寸及传播衰减
源定位	不定位,区域定位、时差定位
信号参数	连续信号与突发信号参数、波形记录与谱分析
显示	定位、经历、关系、分布等图表的实时或事后显示
噪声鉴别	空间滤波、特性参数滤波、外变量滤波及其前端与事后滤波
存储量	数据量,包括波形记录
数据率	高频度声发射、强噪声、多通道多参数、实时分析

表 3-6 影响选择的因素

第4章 声发射检测技术

4.1 压力容器声发射检测程序

压力容器是声发射检测的典型对象,其基本程序与要求,对其它应用具有指导意义,如表 4-1 所示。

检测程序		主 要 内 容
	资料准备	 申请单 材料牌号、焊接及热处理条件 总装图、包括焊缝和关键部位 设计压力、使用压力、验收压力和受压历史 预计的噪声发射源 加压程序,包括加压率、分级和最高压力及保压时间 检测人员和加压人员之间的联络方法
	Ин-Арть н	2. 社会大大和加速大大之间的成年为12 3. 记录压力的方法 1. 任意現选择。每任类型和特殊
准备	传感器布置	 1. 传感器远拜,包括尖型和特性 2. 传感器阵列方式、位置和间距 3. 传感器固定与声耦合
	设置与校准	 检测参数设定 检测仪校准 各通道噪声水平检查 检测系统通道灵敏度调整 传播衰减测量 波速测量 定位校准
检测		 记录加载过程中的声发射数据 观察加载过程中的数据和波形显示 对强噪声干扰和异常情况应采取临时措施
结果的解释与评定		 事后剔除无关信号和噪声干扰 绘制数据图表 按标准评定声发射级别
检测报告		 1. 检测条件 2. 典型图表 3. 评定结果

表 4-1 压力容器声发射检测基本程序和要求

4.2 设置与校准

4.2.1 检测门槛设置

测系统的灵敏度,即对小信号的检测通力,决定于①传感器的灵敏度②、传感器间距和 ③检测门槛设置。其中,门槛设置为其主要的可控制因素。

检测门槛,多用 dB(相对于传感器输出 1μv)来表示。检测门槛越低,测得信息越多,但易受噪声的干扰,因此,在灵敏度和噪声干扰之间应作折衷选择。多数检测是在门槛为 35~55dB的中灵敏度下进行,最为常用门槛值为40dB。不同的门槛设置与适用范围见表4-2。

门槛 (dB)	适用范围
25-35	高灵敏度检测,多用于低幅度信号或高衰减材料或基础研究
35-55	中灵敏度检测,广泛用于材料研究和构件无损检测
55-65	低灵敏度检测,多用于高幅度信号或强噪声环境下的检测

表 4-2 门榄设置与适用范围

4.2.2 定时参数设置

定时参数,是指波击信号测量过程的控制参数,包括:峰值鉴别时间(PDT)、波击鉴别时间(HDT)和波击闭锁时间(HLT)。

峰值鉴别时间,是指为正确确定波击信号的上升时间而设置的新最大峰值等待时间间隔。如将其选得过短,会把高速、低幅度前驱波误作为主波处理,但应尽可能选得短为宜。

波击鉴别时间,是指为正确确定一波击信号的终点而设置的波击信号等待时间间隔。如 将其选得过短,会把一个波击测量为几个波击,而如选得过长,又会把几个波击测量为一个 波击。

波击闭锁时间,是指在波击信号中为避免测量反射波或迟到波而设置的关闭测量电路的 时向间隔。

声发射波形随试件的材料、形状、尺寸等因素而变,因而,定时参数应根据试件中所观察到的实际波形进行合理选择,其一推荐范围如表 4-3 所示。

	材料与试件	PDT (µs)	HDT (µs)	HLT (s)
	复合材料	20~50	100~200	300
	金属小试件	300	600	1000
件	高衰减金属构	300	600	1000
件	低衰减金属构	1000	2000	20000

表 4-3 定时参数选择

4.2.3 通道灵敏度调整

为确认倍感器的耦合质量和检测电 路的连续性,检测前后应检查各信号通道 对模拟信号源的响应幅度。

多数金属压力容器的检测规程规定, 每通道对铅笔芯模拟信号源的响应幅度 与所有传感器通道的平均值偏差为土 3dB或±4dB,而玻璃钢构件为土 6dB。

常用的铅笔芯模拟源结构形式如图 4-1 所示。

为了保证模拟源的重复性, 一般采用

直径 0.5mm 的 HB(或 2H)笔芯,其伸长量为 2.5mm,笔芯与构件表面夹角为 30°。响应幅 度取三次响应的均值。

4.2.4 传感器间距

构件声发射检测所需传感数量,取决于试件大小和所选传感器间距。传感器间距又取决 于波的传播衰减,而传播衰减值又来自用铅笔芯模拟源实际测得的距离一衰减曲线。

时差定位中,最大传感器间距所对应的传播误减,不宜大于预定最小检测信号幅度与检测门槛值之差,例如,门榄值为40dB,预定最小检测信号幅度为70dB,则其衰减不宜大于30dB。区域定位比时差定位可允许更大的传感器间距。

在金属容器中,常用的传感器间距约为1~6m,多数容器的检测需布置约8~40多个传感器。

4.2.5 源定位校准

多通道检测时,应在构件的典型部位上,用模拟源进行定位校准。所加模拟信号,应被 一个定位阵列所接收,并提供唯一的定位显示,区域定位时,应至少被一个传感器接收到。 步数金属容器检测方法中规定,源定位精度应在两倍壁厚或最大传感器间距的 5%以内。

4.3 传感器安装

4.3.1 表面准备

传感器表面与试件表面之间良好的声耦合为传感器安装的基本要求。试件的表面须平整 和清洁,松散的涂层和氧化皮应清除,粗糙表面应打磨,表面油污或多余物要清洗。对半径 大于 150mm 的曲面可看成平面,而对小半径曲面应采取适当措施,例如,可采用转接耦合

28



图 4-1 铅笔芯模拟源

块或小直径传感器。

对于接触界面,应填充声耦合剂,以保证良好的声传输。耦合剂不宜涂得过多或过少, 耦合层应尽可能薄,表面要充分浸湿。耦合剂的类型,对声耦合效果影响甚少,多采用真空 脂、凡士林、黄油、快干胶及其它超声耦合剂。对高温检测,也可采用高真空脂、液态玻璃 及陶瓷等。但是,须考虑耦合剂与试件材料的相容性,即不得腐蚀或损伤试件材料表面。

4.3.2 固定方式

多用机械压缩来固定传感器。常用固定夹具包括: 松紧带、胶带、弹簧夹、磁性固定器、 紧固螺丝等。所加之力,应尽可能大一些,约为0.7MPa。

一些快干式粘接剂,包括快干胶、环氧树脂,既可固定传感器,而又起着声耦合作用, 适于长期监视方面的应用,但因安装简便也可用于短期监视。这类耦合剂可使传感器同时接 收对表面的垂直和横向振动成份,故其耦合效率高于流体耦合剂。但是,在高应变、高温环 境下其脱粘问题应予以注意。

在高温或低温检测中,多采用由金属或陶瓷制成的波导杆转接器。它是通过焊接或加压 方式固定于试件表面,可使试件表面高温或低温端的声发射波传输到常温端的传感器。这一 结构会引起一定的传输衰减和波形畸变,其接触面为主要的衰减因素。波导杆的结构形式见 图 4-2。



图 4-2 波导杆

4.4 加载程序

4.4.1 加载准备

多数情况下,加载操作仅有一次机会,关系到声发射检测的成败,须作充分的准备。

(1)加载方式,应尽量模拟试件的实际受力状态,包括:内压、外压、热应力及拉、 压、弯;

(2)加载设备,包括:试压泵、材料试验机,应尽量选择低噪声设备;

(3)加载程序,主要决定于产品的检测规范,但有时因声发射检测所需,要作些调整。 常用的加载参数包括:升压速率、分级载荷和最高载荷及其恒载时间,有时需要增加重复加 载程序;

(4) 应确定声发射检测人员与加载人员之间的联络方法,以实时控制加载过程;

(5) 应确定记录载荷的方法。多用声发射仪记录载荷传感器的电压输出。

4.4.2 载荷控制

(1)升载速率,慢速加载会过分延长检测周期,而快速加载也会带来不利的影响。首先,会使机械噪声变大,如低压下的流体噪声;其次,会引起高频度声发射活动,以致因超过检测仪的极限采集速率而会造成数据丢失;再则,由于应变对应力的不平衡而会带来试验安全问题。压力容器的加载,多采用较低的加载速率,且要保证均匀加载。

(2) 恒载,多数工程材料,在恒载下显示出应变对应力的迟后现象。一些材料在恒载下可产生应力腐蚀或氢脆裂纹扩展。恒载周期又为避免加载噪声或鉴别外来噪声干扰提供了机会。近年来,恒载声发射时序特性已成为声发射源严重性评价和破坏预报的一主要依据,必要时,可忽略升载声发射,而只记录恒载声发射。对于压力容器,分级恒载时间约设定 2~10min,而最高压力下约恒裁 10~30min。

(3)重复加载,对一些新制容器,当首次加载时常常伴随大量无结构意义的声发射,包括局部应力释放和机械摩擦噪声,这给检测结果的正确解释带来很大困难,为此需进行二次加载检测。另外,在役容器的定期检测,原理上也属于重复加载检测,以发现新生裂纹。费利西蒂效应,为重复加载检测提供工基本依提因此,对首次加载声发射过于强烈的构件、复合材料及在役构件,宜采用重复加载检测方法。

4.5 噪声来源与排除

4.5.1 噪声来源

噪声的类型包括:机械噪声和电磁噪声。

机械噪声,是指由于物体间的撞击、摩擦、振动所引起的噪声;而电磁噪声,是指由于 静电感应、电磁感应所引起的噪声。常见的噪声来源,如表 4-3。

类型	来源
	1. 前置放大器噪声,是不可避免的白色电子噪声
电磁噪声	2. 地回路噪声,因检测仪和试件的接地不当而引起
	 电台和雷达等无线电发射器、电源于扰、电开关、继电器,马达、焊接、电火花、打雷等引起的电磁于扰
	1. 摩擦噪声,多因加载时的相对机械滑动而引起,包括:试样夹头、施力点、容器支架、螺丝、
机械噪声	2. 撞击噪声,包括:雨、雪、风沙、振动及人为敲打
	3. 流体噪声,包括: 高速流动、泄漏、空化、沸腾、燃烧

表 4-3 噪声来源

4.5.2 排除噪声的方法

噪声的鉴别和排除,是声发射技术的主要难题,现有许多可选择的软件和硬件排除方法。 有些须在检测前采取措施,而有些则要在实时或事后进行。噪声的排除方法、原理和适用范 围见表 4-4。

适用范围 方 法 原 理 频率鉴 滤波器 600Hz 以下机械噪声 别 幅度鉴 调整固定或浮动检测门槛值 低幅度机电噪声 别 前沿鉴 对信号波形设置上升时间滤波窗口 来自远区的机械噪声或电脉冲干扰 别 用波到达主副传感器的次序及其门电路,排除先到达副 主副鉴 传感器的信号,而只采集来自主传感器附近的信号,属空间鉴 来自特定区域外的机械噪声 别 别 符合鉴 用时差窗口门电路,只采集特定时差范围内的信号,属 来自特定区域外的机械噪声 空间鉴别 别 载荷控 用载荷门电路, 只采集特定载荷范围内的信号 疲劳试验时机械噪声 制门 时间门 用时间门电路, 只采集特定时间内的信号 点焊时电极或开关噪声 数据滤 对波击信号设置参数滤波窗口,滤除窗口外的波击数据, 机械噪声或电磁噪声 波 包括:前端实时滤波和事后滤波 差动式传感器、前放一体式传感器、接地、屏蔽、加载 其它 机械噪声或电磁噪声 销孔预载、隔声材料、示波器观察等

表 4-4 噪声的排除方法

4.6 数据解释与评价

4.6.1 数据解释

数据解释,是指所测得数据中分离出与检测目的有关的数据。除简单情况外,多采用事 后分析方法。

在记录的数据中,识别出有关数据或噪声与无关数据.识别方法包括:分布图、关系图和定位图分析;

② 采用数据滤波方法剔除噪声或无关数据,包括:时差滤波或空间滤波,波击特性参数滤波,外参数滤波;

③ 绘制出与检测有关的数据图表。

4.6.2 数据评定

4.6.2.1 验收/拒收式评定法

评价判据.是声发射技术中尚不够成熟的部分。在现行的构件检测规程中,多采用简便 的验收/拒收式判据。这种判据,主要指示结构缺陷的存在与否,而不指示缺陷的结构意义, 但可为验收或后续复险及其处理提供依据。 表 4-5 示出了一些现行检测规程中选用的评价判据。

日本 4 五、	ASTM E 	ASTM E —118	ASME V 	ASMEV 	GJB2044 —94
计们利据	增强塑 料容器	增强塑 料管道	增强塑 料容器	金属容 器	钛合金 容器
恒载声发射	有	有	有	有	有
费利西蒂比	有	有	有	有	无
振铃计数或计数率	有	无	无	有	有
高幅度事件计数	有	有	有	有	有
长持续时间或大能量事件计数	无	有	有	无	无
件计数	无	无	无	有	无
能量或幅度随载荷变化	无	无	有	有	无
活动性	无	无	有	有	有

表 4-5 常用评价判据

金属和纤维增强塑料压力容器的评价判据实例分别见表 4-6 和表 4-7。

表 4-6 金属压力容器评价判据一例^[9]

评价判据	首次加载时	重复加载时
恒载声发射	保压 TH min 后的波击计数不大于 E _H	保压 TH min 后的波击数不大于 EH
振铃计数率	不采用	规定的载荷增量下计数小于 N _T
波击计数率	不采用	幅度高于门槛值的波击数小于 E _T ,
高幅度波击计数	高于规定幅度的波击数不大于 EA	高于规定幅度的波击数不大于 EA
能量或幅度	不随载荷而增加	不随载荷而增加
活动性	不随载荷而增加	不随载荷而增加
门槛值(dB)	V _{TH}	V _{TH}

注: 1. E_H, N_T, E_T, E_A分别表示专用规范规定的验收基准值。

2. V_{TH}表示规定的检测门槛值。

3. T_H表示规定的恒载时间。

表 4-7	增强塑料压力容器评价判据-	-例[10]

评价判据	首次加载时	二次加载时		意 义
恒载声发 射	恒压 TH min 后波击敷小于 E _H . 没有幅度大于 A _H 的波击	TH min 后波击数小 于 E _H		连续损伤量度
费利西蒂 比	大于 FA	大于 FA	度	原先所受损伤严重性的量
振钤计数	不随载荷而快速增加	小于 N _c		累积损伤的量度
 氏持续时 间	没有大于规定值的波击	没有大于规定值的波 击		分层,脱粘、主裂纹扩展

高幅度波 击计数	小于 E _A	小于 EA	裂)	高能微结构破坏(纤维断
-------------	-------------------	-------	----	-------------

注: 1. A_H、E_A,、E_H、F_A、N_c,分别表示专用规范中规定的验收标准.

验收标准的量化基准,取决于构件的材料、类型、受载历史、加载方式及检测系统等多 种因素,因而对具体情况要作具体规定。一般而言,验收标准来自有关试样和构件的破坏试 验数据和大量的现场检测经验,包括声发射与其它无损检测方法的对比验证结果。

4.6.2.2 声发射源严重性分级法

与简便的验收 / 拒收式评价判据不同, 声发射源的多级分类法还可提供缺陷的结构意 义, 即缺陷的严重程度, 可为声发射源的后续处理提供更为具体的指南。例如, 基于不同的 严重性级别, 可提供注意监视、立即降载复检、事后复检、复检的次序等信息。

严重性分类法,通常基于声发射源区(通常为检测通道或事件集中区)的活动性、强度、 恒载声发射和集中度等特性,且根据具体情况可选择单一特性或组合特性。

表 4-8 示出了近年来采用或改进中的声发射源多级分类法实例。

分类方法	简要说明	参考文献
活动性法	基于振铃、事件、能量等计数随载荷的变化率,可将声发射源分成安静、活动、 临界活动等级别	[11]
恒载声发射	基于恒载声发射延续特性,将声发射源分成稳定、较稳定、不稳定等几种级别	[12]
强度法	基于事件平均幅度或能量的大小将声发射源分成弱、强、很强等级别。也可与 活动性相组合而成为新的严重性级别	[11]
综合评价法	分别对声发射源的活动性、平均能量、定位集中度加以分级,又将其综合成四级严重性级别	[13]
判据加权法	对恒载声发射、费利西蒂比、累积持续时间、高幅度事件计数等判据,基于超标程度分别打分,总计10分,又根据分数多少分成5级	[14]
强度分析法	以历程指数为横轴,以严重性为纵轴。制成所谓的声发射强度图,并分隔成具 有不同结构意义的五个强度区。其中,历程指数指近期所发生事件的信号强度对所 有事件信号强度之比;严重性指最大信号强度的事件平均:信号强度指信号的包络 面积	[15]

表 4-8 声发射源的严重性分类方法

4.7 声发射检测标准与规范

声发射检测标准化,迟后于其它常规无损检测方法,但已有许多进展。八十年代,美国 材料试验协会(ASTM)和机械工程协会(ASME)、日本无损检测协会(NDIS)、法国及 欧洲声发射工作组(EWGAE)等,相继提出了有关声发射检测标准和规范,包括:术语、 检测仪性能测试和检测方法。其中,美国 ASTM 标准和 ASME 规范,因种类较全,内容较 细而引人注意。

在我国,检测术语、检测仪性能测试、钛合金压力容器检测方法、复合材料构件检测方

法和在役金属容器检测方法等已分别纳入国家标准、国家军用标准和行业标准,其余尚处在 企业或内部标准阶段。

国内外有关声发射标准和规范目录如表 4-9 所示。

国别	标准号	内容
	GB / T 12604 • 4-90	检测术语
	GJB 2044-94	钛合金压力容器检测方法
中国	JB / T 8283-95	检测仪性能测试方法
	JB / TQ753-89	在役容器检测方法
	QJ 2914-96	复合材料构件检测方法
	ASTM:	
	E 610-82	检测术语
	E750-80	检测仪特性测试方法
	E1106-86	传感器一级校准方法
	E976-84	传感器响应再现性测定指南
	E650-85	压电传感器安装指南
	E569-85	金属压力容器监视方法
美国	E751-85	电阻焊监视方法
	E749-85	连续焊监视方法
	E1139-87	金属压力容器连续监视方法
	E1211-87	泄漏检测和定位方法
	E1419-91	无焊缝气压容器检测方法
	E1067-89	FRP 储罐 / 容器检测方法
	E1118-86	FRP 管道检测方法
	E914-85	绝缘高空作业台检测方法
	ASME, V-12	金属压力容器检测方法
	ASME, V-11	FRP 压力容器检测方法
	MIL-STD-1945	检测术语
	MIL-HDBK	复合材料检测方法
	NDIS 2412-80	高强钢球形储罐检测和分类方法
日本	NDIS 2109-91	传感器校准方法
口平	NDIS 2106-79	检测装置性能表示方法
	NDIS 2409-79	检测术语
	NF A 09-350 (1984)	检测术语
	NF A 09-354 (1985)	压电传感器及特性要求
	NF A 09-353 (1985)	单通道仪器性能测定
法国	NF A 09-355 (1985)	传感器校准
	NF A 09-351 (1984)	源定位推荐方法
	NF A 09-360 (1985)	纤维复合材料及制品检测方法
	NF A 09-352 (1985)	泄漏检测方法

表 4-9 声发射检测标准

第5章 声发射检测应用

声发射技术,除常用的金属、复合材料外,还适用于陶瓷、岩石、混凝土、木材、骨骼 等固体材料及其结构件,其应用范围包括:① 材料表征;② 构件结构完整性评价;③ 运 行及工艺过程监视;④地质学应用;⑤医学应用。并已扩展到石油化学、航空航天、原子能、 电力、机械、矿业、地质、建筑等各行各业。

5.1 材料表征应用

声发射作为实验室材料研究的工具已有较长的应用历史。通过对材料表征实验过程的声发射监视,建立声发射、微观机制、力学特性之间的关系,通常同时达到两个目的:① 分析和评价变形、断裂机制与力学行为;② 为构件的无损评价建立广泛的声发射特性数据库。 主要应用范围如表 5-1 所示。

类型	信息	主 要 应 用
1. 塑性变形	位错运动、滑移变形、孪晶 变形、夹杂开裂与分离	材料实验中,提供对应力一应变曲线的声发射响应图形,用于 分析塑性变形机制、行为及材料因素的影响,评价凯赛尔效应及 最大应力历史
2. 断裂力学试验	塑性区、裂纹的起始与扩展	断裂韧性(K _{le} 或 J _{le})试验中,用于起裂点测量,也为构件无损 检测建立材料声发射特性数据库
3. 疲劳试验	裂纹的起始、扩展及闭合机制	疲劳实验中,实时提供疲劳损伤过程的时序特征,用于鉴别疲 劳损伤的起始、稳定扩展、快速扩展等不同阶段,有时还用来评 估裂纹扩展速率
4. 环境裂纹	应力腐蚀与氢脆裂纹	在应力腐蚀、氢脆敏感性实验中,实时提供环境裂纹起始与扩展过程的时序特征,用来鉴别裂纹的起始、潜伏、快速扩展等不同的阶段,有时还用来评估裂纹扩展速率
5. 相变	晶格相变	在晶格相变实验中,用来测定马氏体转变点 M _s 或奥氏体转变点 A _s ,并可作为研究成核机制,求出成长速度的手段
	纤维断裂	
< 有人+++	界面分离	大社村主任学队市 田本河仍把佐始扫上 发应 米利卫氏具
 6. 复合材料断袋 	基材开裂	在141种农证试验甲,用本计证须切的起点、扒片、关望及原重
	层间分离	
7. 其它		蠕变、腐蚀、残余应力、脆性转变、其它材料

表 5-1 材料表征方面的应用

5.2 结构件应用

5.2.1 适用范围

在压力容器、储箱、管道等构件的结构完整性评价,是声发射技术的主要应用领域,可 分为制品的验收检测、在役定期检测和运行与工艺过程中连续监视,其适用范围如表 5-2 所 示。

类型	检测信息	应用
验收检测	设计、材料及工艺缺陷,包括:焊接 缺陷及结构薄弱区	新制品验收试验中安全监视与结构完整性评价,主要用于 常规方法受限制或有特殊要求的对象,包括:复合材料构件、 航空航天构件,多层容器,危险物内装容器、现场竖装储罐 等
在役定期	检测使用中新生缺陷,包括:应力腐 蚀、氢脆、疲劳裂纹及材料脆化	定期加载试验中安全监视与结构完整性评价,包括:金属、 复合材料压力容器、储罐、管道、地下管线、高空作业升降 车、桥梁、车载气瓶、运输槽车等
运行中连续或 断续监视	运行中活动性缺陷,包括:应力腐蚀、 氢脆、疲劳、泄漏及轴承异常	结构关键部位破坏的早期预报,包括:核电站反应容器、 一次冷却管、发电站转轴、飞机机翼、海上采油平台等
工艺过程监视	制造过程中的开裂、破损及工艺异常	工艺过程监控,包括:焊接、机械加工、轴锻件检查、热 处理、固化,铸造、电镀等

表 5-2 结构件适用范围

新制品的验收检测,主要用来评价材料与工艺缺陷。考虑到现行常规检测可提供满意的 效果,因而,声发射主要用于常规方法受到限制或有特殊要求的对象,例如,复合材料构件、 多层容器、危险物内装容器、现场竖装储灌及航空航天用气瓶、储箱、发动机壳体等重要构 件。

在役构件的维修检测,主要评价使用中产生的新缺陷。由于其经济效益显著,而最为广 泛应用,其典型应用包括:石油化学工业用金属和复合材料压力容器、储罐及输送管道、桥 梁、升降车等。

运行中的声发射连续监视,由于目前尚没有其它更为有效的方法而受到重视。但是,由 于存在环境噪声干扰等许多难题,而主要用于有重大事故隐患的结构关键部位早期破坏预 报。关于工艺过程监控,除焊接裂纹、刀具破损监控外,在选材、铸造、成型、热处理、固 化、电镀等过程也有应用实例,这类将会成为声发射技术工业应用的重要领域。

构件的结构完整性监视的主要目标是找出关键结构缺陷的部位。对超标区,一般要用其 它无损检测方法复检,进一步确定缺陷的性质和大小,为验收或继续使用、降载使用、修复、 报废等提供依据。用其它方法不可检的对象,可代替其它方法。尤其在役或连续监视中,不 需要繁杂的大面积扫查操作,不必拆除外部隔热层或内容介质,大大缩小常规复检面积,缩 短或避免停产周期,因而可获得重要的安全和经济效益。

合理选择加载方式,对检测成功关系重大。对验收检验,多利用已有的加载程序,而对

在役检测,通常过载10%工作压力。对运行中的短期监视,可利用维修后的启动载荷或运行中的波动压力。对核电站蒸气管路等,也可利用加热或冷却周期产生的热应力。

声发射检测,通常仅有一次加载检测机会,数据的解释评定也较复杂,因而,检测人员 的技术水平与检测经验尤为重要,应进行技术培训和考核。劳动部和航天工业公司等单位, 已把声发射检测人员的资格相继纳入鉴定与认证项目。

5.2.2 金属构件应用

5.2.2.1 钛合金气瓶

钛合金气瓶检测,属声发射技术用于新制品批量验收试验中的典型一例。

偏析类组织缺陷是影响气瓶结构完整性的关键缺陷,通常难以用常规方法检出。1980 年以来,声发射检测方法相继纳入企业标准、行业标准和国家军用标准,用于液压验收试验 工序,在确定结构完整性次序、剔除次品、选定批次抽爆件和产品验收等方面起着不可替代 的作用^[16,17]

气瓶由两个半球对接焊而成,典型直径约340mm,壁厚约3~4mm。常用声发射检测装置检测多采用一个面阵列。将传感器布置在赤道焊缝附近,以便在定位图上区分出焊缝与基材部位。见图5-1。



图 5-1 钛气瓶声发射检测装置

检测门槛 40dB, 传感器谐振频率 150kHz, 滤波器频宽 100~350kHz。传感器灵敏度约 65dB[相对于 1V / (m·s⁻¹)]。各通道对 0.5mm, HB 笔芯模拟源的响应幅度偏差为±2dB。 源定位精度为传感器间距的 5%。传感器间的传播衰减小于 10dB。

加压使用电动试压泵。加压速率小于 0.2MP / s, 在验收压力下保压 10min。压力传感的 输出记录于主机系统。

检测结果的图表显示包括: ① 定位图; ② 幅度、压力与经历时间的关系图; ③ 振铃 计数、压力的时间经历图。

TC4气瓶声发射源严重性分级判据一例见表 5-3。

检测门槛 dB	严重性	生级别	保压声发射延续时间 Ti min	高幅度事件计数 >80dB	事件或振铃计数 随压力变化	严重 程度	处理意见
	1		<1	0	收敛或恒速增加	不严重	不需要验证
40 II		a	_	>1	快速增加	较严重	可进行抽样验证
	II b C	b	>1	_	_		
		C	>3	_	_		
	111		>8	_	—	很严重	应进行验证

表 5-3 TC4 气瓶声发射源分级判据

爆破验证结果表明,声发射源的级别与破裂源处的缺陷及破坏压力之间有一定的关系 [^{12]}。例如,I级气瓶,断口组织正常,均达到设计压力;III级均暴露出宏观偏析或焊接缺陷, 破坏压力低于设计压力;II级(尤其为II一C级)显示出过度性特性。

对 II、III级气瓶,可用其它无损检测方法验证。在批量检测中,通常以III级作为拒收基准,而在 II级中选择最差的气瓶进行批次性抽爆验证,为产品验收提供依据。

5.2.2.2 车载无缝气瓶

美国运输部,将无缝管形气瓶拖车用于工业气的高速公路运输。每个拖车固定多达 12 个无缝铬钼钢类气瓶,直径约 54cm,长 10m。使用压力约 18.2MPa,每年充气达 100 次。 运输部原先规定,每五年进行一次液压试验。

使用中新生的疲劳裂纹,为定期液压试验所难以检测的关键缺陷。为此,声发射检测用 于填充工序的日常操作程序中,即超过工作压力10%的过载程序中,用声发射监视裂纹的亚 临界扩展。其声发射检测步骤如图 5-2 所示。



图 5-2 车载气瓶检测步骤

检测采用线阵列,传感器置于气瓶的两头。传感器谐振频率 150kHz,检测门槛 40dB。 如在圆柱段轴向间距 20cm 范围内或端部所出现的事件计数超过规定值,则应用超声方法进 行局部复检,并确定缺陷的大小。如裂纹深度超过断裂力学分析所提供的验收标准,则将气 瓶拆除。

这种检测,成本低,不必拆卸,又可避免内部的水污染,故比起原先的液压试验更为有 意义。五年内,已检测达 1700 多件。其声发射检测方法,已纳入 ASTM 标准^[18]。 国内也有类似的应用实例^[19]。每台拖车装载 32 个无缝气瓶。材料为 30CrMnSi 和 34CrMo 钢,内径 21.9cm,壁厚 13~14mm,长 2m。用一月的周期,包括复检工作总检测 7 台件 224 个气瓶,节约检测费用达 74 万元。

5.2.2.3 压力容器与储罐

金属压力容器,由于数量、使用安全和常规检测成本等问题,始终是国内外声发射检测 活动的重点对象,尤其是化学、石油和核工业用在役容器。

70年代,美国以非标准的程序检测达 600 多件。多采用声发射源的定位、活动性或强度分类及后续复检等检测程序。但是,由于当时的技术和经验所限,仅获得有限的成功。80年代,z学工业部门 Monsato 公司,经多年的技术攻关,对检测方法做了许多改进,包括:信号分析方法、源定位方式、加载程序及评价判据^[20]。时差定位技术由于易受传播衰减等复杂的结构因素的影响而造成大量的数据丢失,因而,对大型容器的检测,多用区域定位方式。声发射源的评价,已变成多种判据,包括:恒载声发射、振铃计数率、事件计数、高幅度事件计数及能量计数等,参见表 4-6。至 1988年,检测达 2000多个压力容器与储罐,且检测出许多结构缺陷,包括:内外表面腐蚀、应力腐蚀裂纹、焊接裂纹、未熔合、未焊透及材料脆化等。通过早期发现结构缺陷或提供结构完整性信息,避免或缩短了停机维修周期,获得达 1000万美元的经济效益。1988年,金属压力容器声发射检测方法被纳入 ASME 锅炉与压力容器规范^[9],成为一标准的工业用无损检测方法。

我国约有 96 万台在役压力容器和储罐。经过十多年实验室和现场研究,自 80 年代中期, 劳动、机械、航空航天、石油、化工、冶金等行业的有关单位,相继引进 20 多台多通道检 测系统,积极开展现场应用和标准化工作^[21~24],至今检测达 400 多台压力容器和储罐,包 括:石油液化气、天然气、煤气、氨气、液氨、液态乙烯等储罐,化肥厂的热水塔、脱硫塔、 水洗塔、尿素合成塔,炼油厂的加氢反应塔、炼油沉降塔,橡胶厂的硫化罐,染织厂的染色 罐,造纸厂的蒸球及铁路槽车,已获得明显的经济效益。1994 年,声发射检测方法,在《劳 动人事部锅炉压力容器规范》中,规定为可采用的无损检测方法。

图 5-3 示出了对各类构件所采用传感器布置实例。所用传感器分别为 2~64 个。



图 5-3 传感器布置实例[25]

a)不锈钢储罐 b)钢制脱气容器 c)高压气瓶



图 5-3 传感器布置实例^[25](续)
 d)钢制压力容器 e)钢制球罐 f)钢制储罐

作为在线检测结果一例,图 5-4 示出了压力容器液压试验时源定位结果。对这类构件, 使用 20 通道检测系统,可实现全区域时差定位。



图 5-4 声发射源定位结果

5.2.3 复合材料构件应用

5.2.3.1 玻璃钢压力容器、储罐、管道

70年代,美国化学工业用玻璃钢压力容器和储罐,发生过许多破坏。这类破坏多与选

材、设计、运输及制造方面的错误有关,而对此又没有可行的无损检测方法。

1978年,塑料工业协会成立了增强塑料声发射检测委员会,经合作攻关,于1982~1983年相继制定了压力容器与储罐和管道的声发射检测方法,后来又纳入ASTM^[26,27]标准和ASME规范^[10]。

至 1986 年,检测达 7000 件压力容器与储罐和 10000 件管道。1979 年以来,采取 100% 声发射检测措施后,便消除了破坏事故,获得重大社会经济效益。玻璃钢容器与储罐的破坏 次数随年度的分布见图 5~5。其中,1982 年以后的三次破坏,与声发射检测无直接的关系。



图 5-5 容器与储罐的破坏随年度的分布[20]

这类检测均采用区域定位方式,一般使用 6~30 个传感器通道,取决于构件的尺寸。一般同时采用高频(约为 150kHz)和低频(约为 30kHz)两种谐振式传感器。前者布置于高应力区如接头、管咀、人孔等部位,而后者则布置于大范围的非关键部位。

对压力容器和储罐所采用的典型加载程序如图 5-6 所示。对于压力容器,除引入恒载周期外,还增加反复加载周期,以便在加载过程中评价费利西蒂比。



42



b) 压力容器

评价判据随构件的类型有所不同,主要包括恒载声发射、费利西蒂比、振铃计数和高幅 度事件计数,参见表 4-7。对超标区,仍用目视或其它无损检测方法复检。 5.2.3.2 碳 / 环氧复合材料构件

近年来,我国声发射技术的应用,也正向先进复合材料检测方向扩展,典型实例包括: ① 加筋壳支架;② 固体发动机壳体;③ 直升机垂尾及其元件。

复合材料多采用整体固化成型、混合连接等复杂工艺,性能的再现性较差,用传统探伤 方法不可测的缺陷类型繁多,在后续考核试验中易产生低应力损伤或不可修复的破坏。声发 射检测的主要作用是:① 考核试验中防止不可修复的破坏;② 结构完整性评定;③ 损伤 过程分析。

作为一例,碳/环氧复合材 料加筋壳支架的声发射传感器 布置如图 5-7 所示。声发射检测 采用 D / E8000 系统及其 8 个区 域定位阵列。前置放大器增益 40dB,检测门槛 60dB,滤波器 频宽 100~350kHz,传感器谐振 频率 150kHz,传感器灵敏度约 为 65dB[相对于 1V / (m·s⁻¹)]。 多信号处理通道对标准电脉冲



图 5-7 加筋壳体传感器布置

信号的响应幅度偏差为士 2dB,各传感器通道对 ϕ 0.5mm,HB 铅笔芯模拟源的响应幅度偏差为土 4dB。各传感器可探测半径约 40cm。传感器优先布置在结构薄弱区,包括几何不连续处、窗口、修复区和已知缺陷区。传感器固定采用松紧带,声耦合剂采用凡士林或真空脂。

加载程序采用分级轴压方式。当首次加载声发射特性超标时再进行二次加载,见图 5-8。



图 5-8 加筋壳支架加载程序

声发射检测结果的评定基准一例见表 5-40。

表 5-4 加筋壳声发射评定基准

声发射参数	首次加载时	二次加载时	超标时
摄铃计数	小于 56000	_	测定费利西蒂比
高幅度事件计数	小于 10	_	测定费利西蒂比
(大于 80dB)			
恒载声发射事件计数(大于 70dB)	恒载 4min 的后 2min 内小于 10	_	用其它方法复检
费利西蒂比	_	大于 0.95	用其它方法复检