

# 声发射信号的参数分析方法

沈功田, 耿荣生<sup>1)</sup>, 刘时风<sup>2)</sup>

(国家质量技术监督局 锅炉压力容器检测研究中心, 北京 100013)

**摘要:**系统地介绍声发射信号简化波形特征参数的定义和分析方法, 包括列表显示和分析、单参数分析、经历图分析、分布图分析和关联图分析等。

**关键词:**声发射检验; 信号处理; 参数分析

中图分类号: TG115. 28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2002)02-0072-06

## PARAMETER ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS

SHEN Gong-tian GENG Rong-sheng<sup>1)</sup>, LIU Shi-feng<sup>2)</sup>

(Centre of Boiler & Pressure Vessel Inspection and Research, Beijing 100013, China)

**Abstract:** The definition of simple waveform parameters and analysis methods for acoustic emission signals are systematically introduced, including parameter list, single parameter analysis, historical variety analysis, distribution analysis and correlation analysis.

**Keywords:** Acoustic emission testing; Signal processing; Parameter analysis

声发射(AE)检测的目的在于发现声发射源和得到有关声发射源尽可能多的信息。通过对探测到的声发射信号进行处理和分析,可以得到被探测材料和结构内声发射源的大量信息。然而,受声发射源的自身特性、声发射源到换能器的传播路径、换能器的特性和声发射仪器测量系统等多种因素的影响,声发射换能器输出的声发射电信号波形十分复杂,它与真实的AE源信号相差很大,有时甚至面目全非。因此,如何根据声发射换能器输出的电信号来获取有关AE源的信息一直是人们面临并努力加以解决的难题。在数十年的研究和生产实践中发展起来的声发射参数分析方法,虽然还有很多地方需完善,但已被证明在多数情况下可以解决工程实践中的很多问题,并具有其它方法不可替代的作用。

声发射信号具有很宽的动态范围,其位移幅度可从 $<10^{-15}10^{-9}\text{m}$ ,达到 $10^6$ 量级(120dB)。另外,声发射信号的产生率也是变化无常的,所以目前人为地将声发射信号分为突发型和连续型发射。

如果信号由区别于背景噪声的脉冲组成,且在时间上可以分开,那么就叫突发型声发射信号;如果信号的单个脉冲不可分辨,则叫连续型声发射信号。实际上,连续型声发射信号也是由大量小的突发型信号组成的,只不过太密集而不能分辨而已<sup>[1]</sup>。

由于声发射信号的上述特点,目前采集和处理声发射信号的方法可分为两大类。一类是以多个简化的波形特征参数来表示声发射信号的特征,然后对其进行分析和处理;另一类为存储和记录声发射信号的波形,对波形进行频谱分析。简化波形特征参数分析法是20世纪50年代以来广泛使用的经典声发射信号分析方法,目前在声发射检测中仍得到广泛应用,且几乎所有声发射检测标准对声发射源的判据均采用简化波形特征参数,以下将系统介绍其分析方法。

### 1 声发射信号简化波形特征参数的定义

图1为突发型标准声发射信号简化波形参数的定义<sup>[2]</sup>。由这一模型可得到波击(事件)计数、振铃计数、能量、幅度、持续时间和上升时间等参数。

对于连续型声发射信号,上述模型中只有振铃

收稿日期: 2001-12-07

1) 北京航空工程技术研究中心, 北京 100076

2) 清华大学机械系, 北京 100084

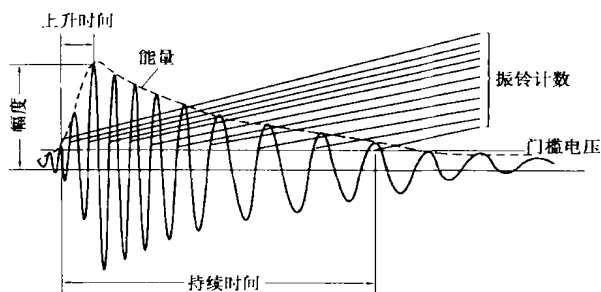


图1 声发射信号简化波形参数的定义

计数和能量参数可以适用。为了更确切地描述连续型声发射信号的特征,又引入了平均信号电平和有效值电压两个参数。

表1列出了常用声发射信号特征参数的含义和用途。这些参数的累加可定义为时间或试验参数(如压力和温度等)的函数,如总事件计数、总振铃计数和总能量计数等。这些参数也可定义为随时间或

试验参数变化的函数,如声发射事件计数率、声发射振铃计数率和声发射信号能量率等。这些参数之间也可以任意两个组合进行关联分析,如声发射事件-幅度分布、声发射事件能量-持续时间关联图等。

## 2 声发射信号参数的列表显示和分析

列表显示是将每个声发射信号参数进行时序排列和直接显示,包括信号到达时间,各声发射信号参数、外变量和声发射源坐标等。表2为压力容器升压过程采集到的裂纹扩展声发射信号参数数据列表。在声发射检测前对声发射系统进行灵敏度测定和模拟源定位精度测试时,直接观察数据列表。对声发射源的强度进行精确分析时也经常采用数据列表。

## 3 声发射信号单参数分析方法

由于早期的声发射仪器只能得到计数、能量或

表1 声发射信号参数

参 数	含 义	特 点 与 用 途
波击(Hit)和波击计数	超过阈值并使某一通道获取数据的任何信号称之为一个波击 <sup>[3]</sup> ,所测得的波击个数可分为总计数和计数率	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	产生声发射的一次材料局部变化称之为一个声发射事件 <sup>[3]</sup> ,可分为总计数和计数率。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,但受门槛值大小的影响
幅度	信号波形的最大振幅值,通常用dB表示(传感器输出 $\mu\text{V}$ 为 $0\text{dB}$ )	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	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	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 $\mu\text{s}$ 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	信号第一次越过门槛至最大振幅所经历的时间间隔,以 $\mu\text{s}$ 表示	因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	采样时间内信号的方均根(RMS)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	采样时间内信号电平的均值,以dB表示	提供的信息和用途与RMS相似,对幅度动态范围要求高而时间分辨力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
到达时间	一个声发射波到达传感器的时间,以 $\mu\text{s}$ 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
外变量	试验过程外加变量,包括时间、载荷、位移、温度及疲劳周次等	不属于信号参数,但属于波击信号参数的数据集,用于声发射活动性分析

表 2 声发射信号特征参数数据列表

到达时间				压力 kg/cm <sup>2</sup>	通道	上升时间 $\mu\text{s}$	计数	能量	持续时间 $\mu\text{s}$	幅度 dB
min	s	ms	$\mu\text{s}$							
01	18	910	173	36.60	3	81	92	57	3 222	59
01	18	910	321	36.60	12	133	49	48	6 243	51
01	18	910	500	36.60	4	69	62	86	6 899	55
01	18	911	207	36.60	8	29	27	53	1 947	51

幅度等很少参数,因此,早期对声发射信号的分析 and 评价通常采用单参数分析方法,最常用的单参数分析方法为计数分析法、能量分析法和幅度分析法。

### 3.1 计数法

计数法是处理声发射脉冲信号的一种常用方法。目前应用的计数法有声发射事件计数率与振铃计数率及它们的总计数,另外还有一种对振幅加权的计数方式,称加权振铃计数法。声发射事件是材料内局域变化产生的单个突发型信号,声发射计数(振铃计数)是声发射信号超过某一设定门限阈值的次数,信号单位时间超过阈值的次数为计数率,声发射计数率依赖于换能器的响应频率、换能器的阻尼特性、结构的阻尼特性和阈值的水平。对于一个声发射事件,由换能器探测到的声发射计数为

$$N = \frac{f_0}{\beta} \ln \frac{V_p}{V_t} \quad (1)$$

式中  $f_0$ ——换能器的响应中心频率

$\beta$ ——波的衰减系数

$V_p$ ——峰值电压

$V_t$ ——阈值电压

计数法的缺点是易受样品几何形状、换能器特性及连接方式、阈值电压、放大器和滤波器工作状况等因素的影响。

### 3.2 能量分析法

由于计数法测量声发射信号存在上述缺点,尤其是连续型声发射信号,因而通常采用测量声发射信号的能量来对连续型声发射信号进行分析。目前,声发射信号的能量测量是定量测量声发射信号的主要方法之一。声发射信号的能量正比于图 1 中声发射波形的面积,通常用方均根电压  $V_{\text{rms}}$  或均方电压  $V_{\text{ms}}$  来进行声发射信号的能量测量。但目前声发射仪器多用数字化电路,因而也可直接测量声发射信号波形的面积。对于突发型声发射信号可以测量每个事件的能量。

一个信号  $V(t)$  的均方电压和方均根电压定义

如下

$$V_{\text{ms}} = \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} V^2(t) dt \quad (2)$$

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{V_{\text{ms}}} \quad (3)$$

式中  $\Delta T$ ——平均时间

$V(t)$ ——随时间变化的信号电压

根据电子学理论,可以得到  $V_{\text{ms}}$  随时间的变化正比于声发射信号的能量变化率,声发射信号从  $t_1$   $t_2$  时间内的总能量  $E$  可由下式表示

$$E \propto \int_{t_1}^{t_2} (V_{\text{ms}})^2 dt = \int_{t_1}^{t_2} V_{\text{ms}} dt \quad (4)$$

声发射信号能量的测量可以直接与材料的重要物理参数(如声发射事件的机械能、应变率或形变机制等)直接联系起来,而不需要建立声发射信号的模型。能量测量同样解决了小幅度连续型声发射信号的测量问题。另外,测量信号的方均根电压或均方电压也有很多优点。首先,  $V_{\text{rms}}$  和  $V_{\text{ms}}$  对电子系统增益和换能器耦合情况的微小变化不太敏感,且不依赖于任何阈值电压,不像计数技术那样与阈值的大小有紧密关系;其次,  $V_{\text{rms}}$  和  $V_{\text{ms}}$  与连续型声发射信号的能量有直接关系,而计数技术根本不存在这样的简单关系;再者,  $V_{\text{rms}}$  与  $V_{\text{ms}}$  很容易对不同应变率或不同样品体积进行修正。

### 3.3 幅度分析法

信号峰值幅度和幅度分布是一种可以更多地反映声发射源信息的处理方法,信号幅度与材料中产生声发射源的强度有直接关系,幅度分布与材料的形变机制有关<sup>[4]</sup>。声发射信号幅度的测量同样受换能器的响应频率、换能器的阻尼特性、结构的阻尼特性和阈值水平等因素的影响。通过应用对数放大器,既可对声发射大信号也可对声发射小信号进行精确的峰值幅度测量。

人们对声发射信号的幅度、事件和计数得到如下经验公式

$$N = \frac{Pfc}{b} \quad (5)$$

式中  $N$ ——声发射信号累加振铃计数  
 $P$ ——声发射信号事件总计数  
 $f$ ——换能器的响应频率  
 $\tau$ ——声发射事件的下降时间  
 $b$ ——幅度分布的斜率参数

#### 4 经历图分析方法

声发射信号经历分析方法通过对声发射信号参数随时间或外变量变化的情况进行分析,从而得到声发射源的活动情况和发展趋势。最常用和最直观的方法是图形分析,图2为一台压力容器在加压过程中裂纹扩展最终导致泄漏的声发射信号随时间的变化图。经历图分析方法可用于进行声发射源的活动性评价、费利西蒂(Felicity)比和凯赛尔(Kaiser)效应评价、恒载声发射评价和起裂点测量。

#### 5 分布分析方法

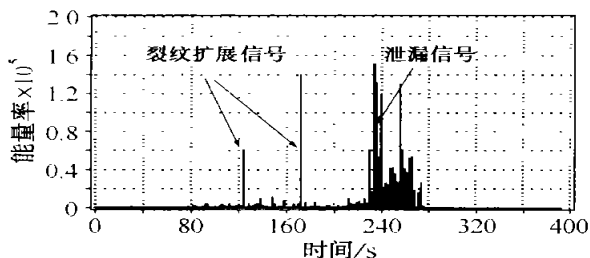
声发射信号分布分析方法是声发射信号撞击计数或事件计数按信号参数值进行统计分布分析。一般采用分布图进行分析,纵轴选择撞击计数或事件计数,而横轴可选择声发射信号的任一参数,横轴选用某一个参数即为该参数的分布图,如幅度分布、能量分布、振铃计数分布、持续时间分布及上升时间分布等,其中幅度分布应用最为广泛。分布分析可用于发现声发射源的特征,从而达到鉴别声发射源类型的目的,如金属材料的裂纹扩展与塑性变形以

及复合材料的纤维断裂与基材开裂等,该法也常用于评价声发射源强度。图3为一台压力容器在加压过程中裂纹扩展声发射信号撞击数和定位源事件的部分参数分布图。

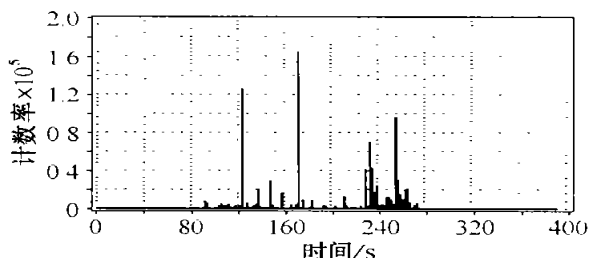
#### 6 关联分析方法

关联分析方法也是声发射信号分析中最常用的方法,对任意两个声发射信号的波形特征参数可作其关联图进行分析,图中二维坐标轴各表示一个参数,每个显示点对应于一个声发射信号撞击或事件。通过作出不同参量之间的关联图,可以分析不同AE源的特征,从而起到鉴别AE源的作用。如有些电子干扰信号通常具有很高的幅度,但能量却很小,通过幅度-能量关联图即可将其区分出来;对于压力容器来说,内部介质泄漏信号与容器壳体产生的信号相比,具有长得多的持续时间,通过能量-持续时间或幅度-持续时间关联图分析,很易发现压力容器的泄漏。美国MONPAC声发射检验俱乐部以声发射信号计数与幅度的关联图的形态来评价金属压力容器声发射检验数据的质量<sup>[5]</sup>。

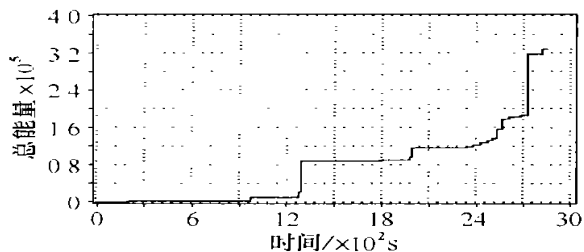
图4为一台压力容器在加压过程中其裂纹扩展声发射信号撞击数的部分典型的关联图。图5为一台压力容器在加压过程中其裂纹扩展并最终导致泄漏的声发射信号能量和计数与持续时间的关联图,可见,在同等能量和计数值的情况下,泄漏信号的持续时间比裂纹扩展信号的持续时间大得多。



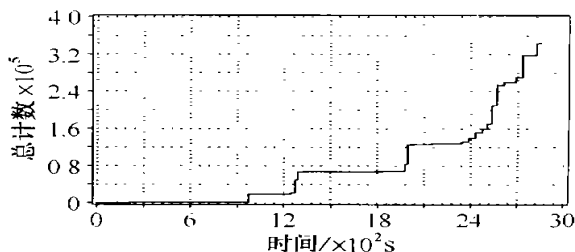
(a) 能量率随时间的变化图



(b) 计数率随时间的变化图



(c) 总能量随时间的变化曲线



(d) 总计数随时间的变化曲线

图2 压力容器加压过程中声发射信号随时间的变化经历图

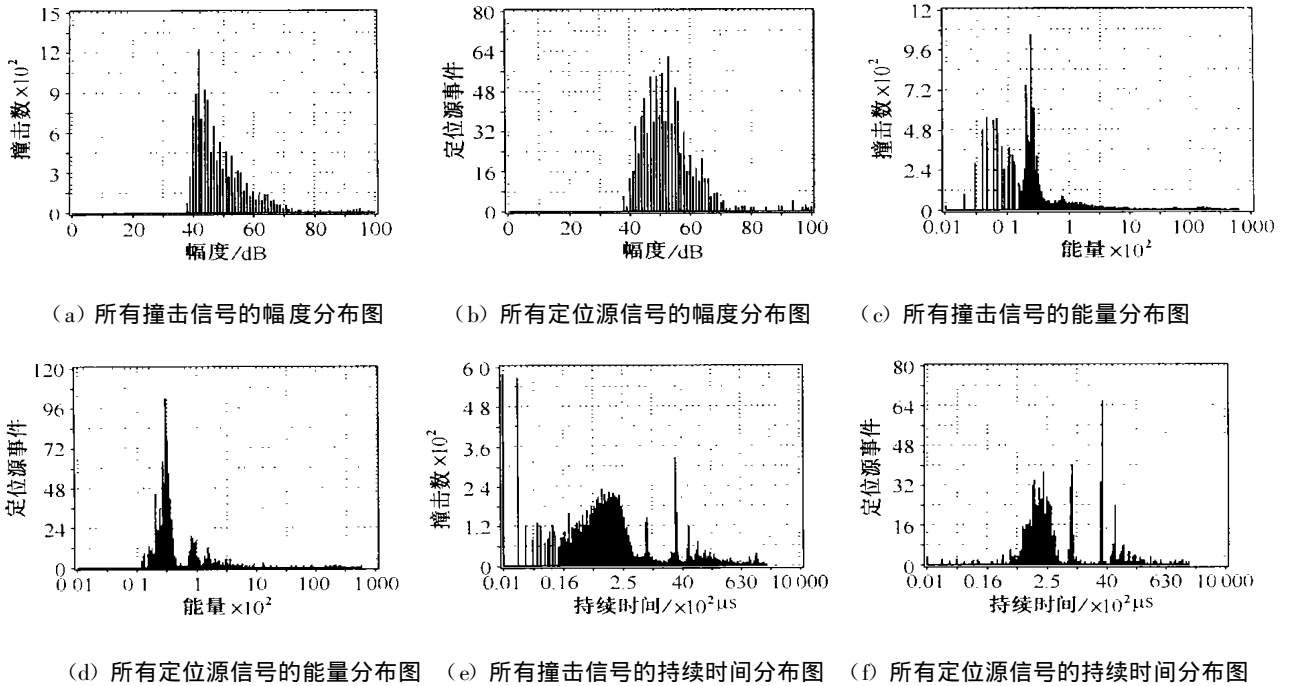


图3 压力容器在加压过程中裂纹扩展声发射信号参数的分布图

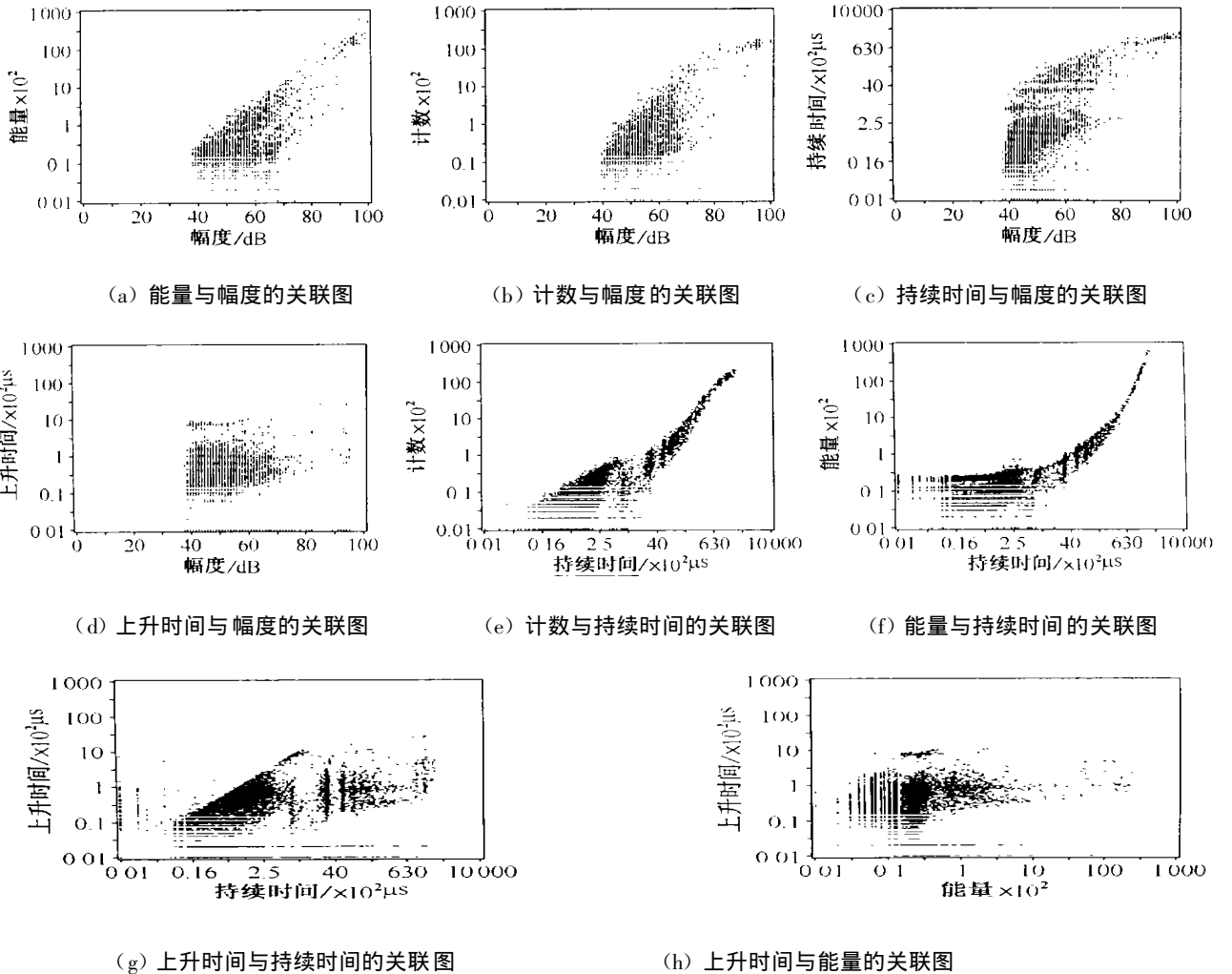
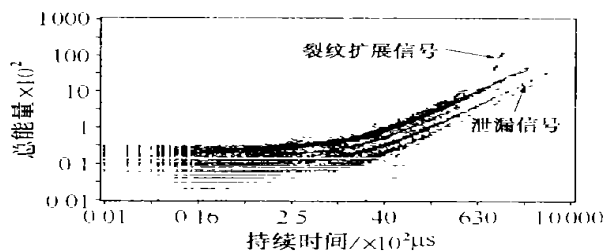
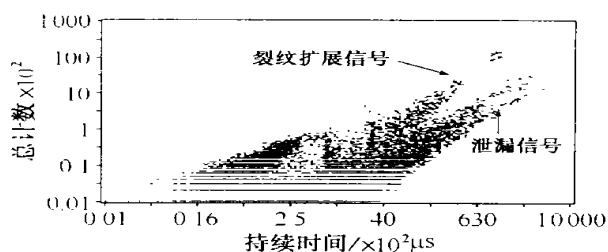


图4 压力容器在加压过程中裂纹扩展声发射信号参数的关联图



(a) 总能量与持续时间的关联图



(b) 总计数与持续时间的关联图

图5 压力容器在加压过程中裂纹扩展和泄漏声发射信号参数的关联图

## 7 结论

总之, 声发射信号参数分析方法是声发射试验和工程检测中广泛使用的经典方法, 由于其对声发射仪的要求较低, 分析方式简单、直观, 分析速度快, 实时性好, 且便于检测人员掌握和操作, 因此, 它目前仍是工程检测中主要使用的方法, 在将来的声发射技术发展中, 仍将起到不可替代的作用。

### 参考文献:

[1] Heiple CR, Carpenter SH. Acoustic Emission[M]. Mathews JR, ed. New York, 1981.

- [2] Miller Ronnie K, McIntire Paul, eds. Nondestructive Testing Handbook(Vol. 5) Acoustic Emission Testing[M]. Second edition, Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 1987.
- [3] ASTM E1316—1996 Standard Terminology for Nondestructive Examinations[S].
- [4] Pollock AA. Acoustic emission distribution[A]. International Advances in Nondestructive Testing(Vol. 7)[R]. 1981. 215—239.
- [5] Stockbridge Scott, Hoffman Jeff. Analysis of acoustic emission data from metal pressure vessel by weighing of data attributes including MONPAC criteria[A]. Progress in Acoustic Emission VII[C]. Japan: The Japanese Society for NDI, 1994.

(上接第 65 页)

据信息, 主控制模块调用相应的子功能模块完成不同的仪器操作功能, 如存储、打印、回放及通讯等。

损伤自动识别功能的实现, 首先需要对缺陷回波数据特征进行大量试验分析, 归纳为若干组特征数据存入计算机作为自动识别的依据, 对于专用超声探伤设备可针对某种类型的被测对象及特定损伤情况进行这项工作; 在探伤过程中计算机将采集的数据进行数字滤波, 除去回波信号中的干扰噪声, 然后与特征数据进行比较和分析, 将可疑回波以某种方式提供给操作人员, 这样可有效减少漏判, 提高仪器的智能化程度和可靠性。

利用计算机强大的处理能力可以很容易地实现局部波形的动态展开和冻结功能, 即把指定范围内的动态回波在屏幕显示宽度内尽可能地展览放大显示, 还可以冻结为静止画面, 便于对可疑缺陷波进行详细观察和分析, 减少误判的可能性。

系统还设计有设置、修改工艺和工件参数以及相应数据和波形的存储、打印及回放等功能。可见, 仪器的主要功能是由软件来实现的。

## 4 结束语

从该仪器的设计和实现可以看出, 计算机的丰富资源和强大功能在这种基于虚拟仪器的设计思想支持下可以得到充分利用和发挥; 利用计算机资源还可连接大屏幕显示设备, 实现数据、结果和波形的存储、打印、通讯及网络共享等。在硬件条件不变的情况下, 可以通过软件模块的修改和增加来完善仪器的原有功能, 扩充和增加新的功能。随着 A/D, I/O 等硬件的集成化和模块化, 可方便地通过升级硬件来提高其性能。该设计方法有可能改变目前传统仪器的研制和生产方式, 促进超声检测技术的发展, 具有广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 沈兰荪. 高速数据采集系统的原理与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1995.
- [2] 李靖, 等. 超声探伤法[M]. 广州: 广东科技出版社, 1981.
- [3] 中国机械工程学会无损检测分会. 超声波检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.