

声发射检测技术在压力容器和拉伸试验中的应用

张昌稳¹, 李强¹, 叶辉², 熊亚飞²

(福州大学材料科学与工程学院, 福州 350108)

摘要: 综述了声发射检测技术在压力容器和拉伸实验中的应用, 对压力容器中常见的缺陷进行声发射源定位分析和特征参数相关分析, 发现不同类型缺陷具有不同的声发射特性, 通过列举大量声发射拉伸实验实例, 提出了运用预制缺陷试样进行声发射拉伸实验可以模拟压力容器缺陷的声发射信号特性。在此基础上, 提出了建立多参数声发射信号综合评估机制, 开发基于不同缺陷声发射信号识别和评价的可视化软件是目前研究的热点领域。

关键词: 拉伸试样; 压力容器; 综合评估; 特征参数

The application of acoustic emission technology for the pressure vessel and the tensile test

Zhang Chang-wen¹, Li Qiang¹, Ye Hui², Xiong Ya-Fei²

(Fuzhou University & Materials institute, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The application of acoustic emission technology in the pressure vessel and the tensile test was summarized, It was discovered that different types of defects have different acoustic emission characteristics. Large numbers of acoustic emission tests were listed, it was proposed that the acoustic emission test which was carried out in the specimen with precast defects could simulate the characteristic of acoustic emission signal in the pressure vessel. On the basis, it was put forward to establish the evaluation mechanism of multi-parameter acoustic emission signals, developing the visualization software based on the identification and evaluation of multi-parameter acoustic emission signals was focus area of research.

Keywords: Tensile specimen; Pressure vessel; Comprehensive assessment; Characteristic parameters

收稿日期: 2012-06-07

作者简介: 张昌稳 (1989—), 男, 在读研究生, 主要研究声发射信号的检测与评估。导师: 李强教授。

0 引言:

声发射现象从开始发现到现在已经有六十多年的历史,作为一种动态、高灵敏性的无损检测方法,声发射检测技术不仅能检测和判断缺陷的活性和严重性,还能检测到缺陷随载荷、时间等外变量而变化的实时或连续信息,对缺陷进行早期或者临近破坏前的预报,从而避免突发灾难性事故的发生,因此开展声发射检测技术在缺陷识别和评估上的研究具有重大的现实意义。材料中的许多机制都可以构成声发射源,例如材料的塑性变形、裂纹的形成与扩展、相变、磁效应以及表面效应等都会产生声发射信号而成为声发射源。

本文详细综述了压力容器常见缺陷的声发射信号源,并对缺陷的声发射信号源运用定位图和特征参数法进行相关分析,主要包括裂纹扩展,夹渣、未熔合、未焊透等焊接缺陷,残余应力释放等产生的应力变化及声信号特点。同时,对干扰信号例如氧化皮剥落、电子噪音等的声发射特性进行了分析讨论。由于缺陷试样的拉伸实验可以很好地模拟压力容器缺陷的受载状态,因此本文对大量声发射拉伸实验也进行了综述分析。

1 声发射检测技术在压力容器中的应用

1.1 压力容器的声发射检测研究现状

现代声发射检测技术开始于 20 世纪 50 年代初 Kaiser 在德国所做的研究工作,他在观察材料形变时,发现铜、锌、铝、铅、锡、黄铜、铸铁和钢等金属材料在形变过程中都有声发射现象。而将声发射技术应用于压力容器检测是开始于 1963 年美国人 Dunegan 所做的现代声发射仪器的研究^[1]。到目前为止声发射技术在压力容器检验中的应用已有将近 50 年,在这 50 年间,声发射检测仪器经历了从全模拟式到全数字式的不断更新,声发射检测技术在欧洲、北美、日本、中国、伊朗等许多国家的压力容器检验中已经得到广泛应用。据有关文献报导,全世界采用声发射技术已检验大型压力容器数万台,有关介绍压力容器声发射检测技术研究和应用的文章也很多。并在此基础上制定了许多声发射检验标准,例如国内的 GB/T 18182—2000 金属压力容器声发射检测及结果评价方法, GB/T 12604.4—2005 声发射检测术语以及国外的 ASME V—12 中金属压力容器检测方法等等。

声发射检测技术于上世纪 70 年代初引入我国, 70 年代中期由机械部合肥通用机械研究所最早开展了压力容器的声发射检测应用工作, 当时人们研究利用声发射技术进行预报和测量裂纹的开裂点情况, 并取得了一定进展。随后中科院沈阳金属研究所、航空航天部 621 所、机械部合肥通用机械研究院、武汉大学等一些科研院所和大学开展了金属和复合材料的声发射特性研究。由于声发射技术具有实时、在线、灵敏度高和整体检测的特点, 同时伴随着声发射仪器的计算机化程度不断提升, 自 90 年代至今, 声发射技术在我国的研究和应用呈快速增长的趋势, 20 世纪 90 年代初期燕山石化、天津石化、大庆石化、大庆油田、哈尔滨炼化、广州石化、扬子石化、镇海石化、胜利油田和辽河油田等石油、石化企业广泛开展了压力容器的声发射检测工作, 并取得显著的经济和社会效益。进入 21 世纪至今, 许多特种设备检验机构以及大专院校从国内外购买了数字化多通道声发射检测分析仪, 开展了以波形分析为基础的声发射信号检测与分析的研究。2003 年 8 月国家质量监督检验检疫总局颁布的《特种设备检验检测机构管理规定》和《特种设备检验检测人员考核与监督管理规则》, 正式将声发射技术作为压力容器检测常用的无损检测方法之一。据估计, 目前我国约有 30 多个科研院所、专业检验单位和大专院校从事压力容器声发射检测技术的研究和检测应用工作, 从业人员达到 100 多人, 这些单位每年采用声发射技术检测大型压力容器 300~700 台。综合分析来看, 声发射检测技术主要围绕两个问题进行研究, 声发射源的识别和声发射源的评价。目前, 有关介绍压力容器声发射检测技术研究和应用的文章已经很多。然而, 绝大多数文章只是报道了压力容器声发射检测的结果, 而对于压力容器中缺陷分析的文章还很少, 本文提出了运用多参数综合评估机制, 建立基于 VB 或 VF 语言编程的声发射源识别和评价分析的可视化软件是目前研究的热点领域。

1.2 压力容器常见缺陷的声发射源

压力容器中常见的声发射源包括裂纹、焊接缺陷的开裂、残余应力释放、结构摩擦、氧化皮剥落、泄露等等, 研究表明裂纹是最普遍和最危险的声发射信号源。

压力容器中的裂纹包含表面裂纹和体内深埋裂纹, 在一次升压和保压过程中, 当升压压力低于 1.0MPa 时, 声源信号较为分散, 且幅值较低, 未发现高幅

值的集中声源，当压力升至 1.0MPa 时，表面裂纹的声发射信号增多，能量急剧增大。对于深埋裂纹来说，在 1.0~1.5MPa 的压力下才出现声发射定位源信号，在压力为 3.0MPa 附近，裂纹活动最激烈，声发射定位源信号达到峰值。当应力达到材料的塑性变形区域时，声发射的发射率急剧增加，经过最大值后又逐步减少。一般认为这一声发射信号是由于材料的位错运动而产生的。在被检设备中存在裂纹等危害缺陷情况下，裂纹顶端产生应力集中，致使该部位比其他部位更早的进入塑性变形区域而引发声发射信号，这为以后压力容器定期检验发现裂纹等危害性缺陷提供了前提条件。

其次，焊接缺陷开裂和焊接残余应力释放是压力容器中的又一大危险性缺陷，焊缝内存在的气孔、夹渣、未熔合和未焊透等缺陷的开裂与扩展及非金属夹杂物的断裂均可产生声发射信号，并且声发射信号的特征参数值变化显著。对于新制压力容器进行声发射检测，首次加压容易产生焊接残余应力释放信号，对于在用压力容器，焊缝返修部位容易出现此类声发射源。另外容器的裙座、支座、支柱和接管等角焊缝部位也容易产生焊接残余应力，在升压过程中应力的重新分布可产生大量声发射信号。

最后，腐蚀开裂也是压力容器声发射检测中的重要缺陷信号，美国人 Claudio Allevato^[2]等人利用声发射技术研究了 Cr-Mo 反应器和管道在热梯度过程中的高温氢蚀现象。通过实验研究了常用高温储罐在富氢环境下的腐蚀状况，对于临界使用寿命的储罐，通过建立降温梯度，器壁孔内因甲烷气体压力不足以克服外界相对应应力而无法得到声发射信号，研究结果所得声发射信号可以用来进行压力容器的寿命评估。

以上介绍的是压力容器中真实缺陷的声发射信号特性。此外，在压力容器的声发射源中往往还含有大量干扰声发射信号源，例如氧化皮剥落、泄露以及电子噪音等等。对于长期使用的钢制压力容器，在内外部均易产生氧化，有时内部介质腐蚀性严重、外部环境潮湿、酸雨和海风等可产生较严重的腐蚀，在水压试验过程中，这些氧化皮的破裂剥落过程会产生大量的声发射信号。同时，在压力容器加压过程中，探头信号线短路、传输电线短路、前置放大器自激发等都可产生大量的电子噪声，大量干扰噪声也可产生声发射信号。

有学者运用频谱分析法研究了氧化皮脱落的声发射信号特性，研究结果表

明：氧化皮脱落产生的声发射信号为突发型信号，中心频率较高，大约在 80kHz 左右。张忠政^[3]等人运用特征参数分析法对加压容器的声发射信号进行了分析，研究表明，当泄露介质为液体时，密封失效的泄露信号为幅度较低连续型信号，中心频率约为 10~50kHz；当泄露介质为气体时，泄露信号为幅度较高的突发型信号占有的混合型信号，中心频率约为 100~400kHz，此类信号能通过时差定位分析法实现定位，检测结果为类似压力容器的泄露声发射检测提供了参考。

压力容器声发射检测技术的关键是从大量干扰声发射信号中识别出真实缺陷产生的声发射信号，并由此找到危险声发射信号源。目前国内外研究声发射信号识别的方法已有很多，人工神经网络识别就是有效的声发射信号识别方法。刘怀喜等人运用人工神经网络技术对碳/环氧复合材料的拉伸损伤过程进行了声发射检测，实验证明，选择合理的神经网络结构、运用 BP 网络训练算法、建立有效的训练样本集、在确定合理的参数时，就能在声发射检测中对碳/环氧复合材料的各种类型损伤进行正确的识别。

1.3 压力容器常见缺陷的声发射信号特性

研究压力容器声发射源的特性，是在进行压力容器声发射信号源分析和解释的基础上进行的，中国特检院的有关人员通过现场对 500 多台实际压力容器声发射检验数据进行综合分析，以及对发现的声发射源进行常规无损检测复验，得到现场压力容器声发射检验可能遇到的七类典型声发射源，对这些可能的声发射源进行时差定位分析，可以确定出各类缺陷声发射源的特性。

1.3.1 裂纹扩展

裂纹的声发射定位源比较集中，在进行加载声发射检测期间，一般在低于压力容器运行的压力下无声发射定位源信号，在高于此压力的升压、保压各个阶段均有声发射定位源信号，在降压后的第二次升压和保压阶段，很少或几乎没有声发射定位源信号，满足 Kaiser 效应。图 A 为一台 1000m³ 液化石油气球罐上发现的深埋裂纹的声发射定位源图。

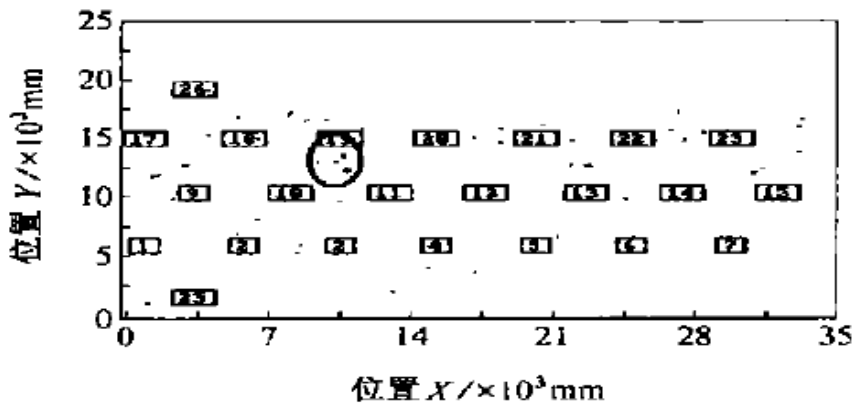


图 A 1000m³球罐上深埋裂纹的时差定位图

1.3.2 焊接缺陷

球罐容器在制造焊接过程中，如果焊接工艺操作不当，即可出现各种焊接缺陷。其中气孔、夹渣和未熔合三种焊接缺陷很容易同时出现，混合在一起。根据大量的压力容器声发射试验结果，大部分缺陷在正常的水压条件下不易产生声发射信号，但也有一些缺陷可产生大量声发射信号。这些缺陷产生的声发射定位源也比较集中，在进行加载声发射检测时，一般在低于压力容器运行的压力下即可产生声发射定位源信号，而且各个升压和保压阶段均有声发射定位源信号，在降压后的第二次升压和保压阶段，也可出现一些声发射定位源信号，不能满足 Kaiser 效应。分析认为，夹渣缺陷的存在是第二次升压过程中产生声发射信号的原因。这是因为非金属夹渣物在第一次升压过程中可产生断裂并与金属基体脱离，在降压后的第二次升压过程中这些夹渣物会继续破裂或相互之间产生摩擦而释放出弹性波。图 B 为一台 400m³ 液化石油气球罐上发现的气孔、夹渣和未熔合等焊接缺陷的声发射定位源图。

1.3.3 机械摩擦

在现场压力容器加压试验过程中，容器壳体会产生相应的应变，以至整个结构因摩擦产生大量的声发射定位源信号，该现象十分常见。结构摩擦通常由脚手架、保温支撑环、容器的支座、裙座、柱腿和平台等焊接垫板引起。结构摩擦产生的声发射定位源散步在较大的范围，并且由于结构摩擦的 AE 机制与一整块金属材料因塑性变形产生 AE 的机制不同，故不能满足 Kaiser 效应，即在降压后的第二次升压过程中仍产生大量的声发射信号。图 3 为一台大型换热器在

13.7~14.2MPa 升压时产生的声发射定位源图。

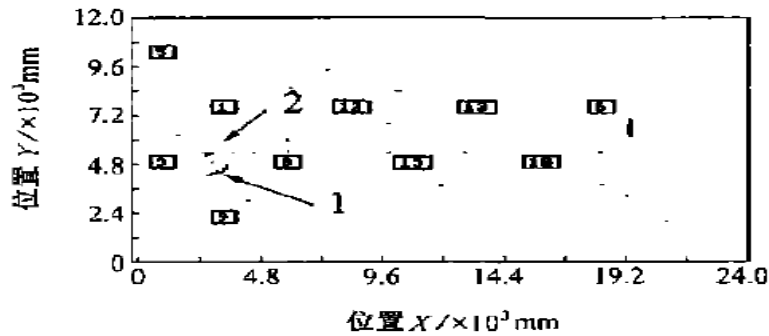


图 B 400m³球罐上焊接缺陷的声发射定位源图

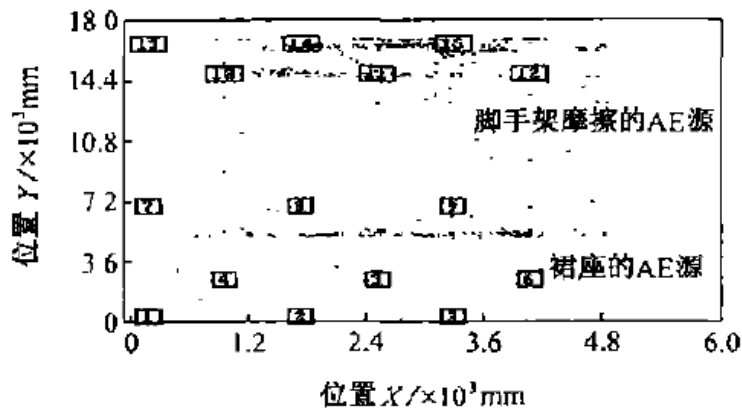


图 C 大型换热器在升压时结构摩擦产生的 AE 源

1.3.4 焊接残余应力释放

冷加工、焊接和不均匀加热都可在压力容器壳体上产生残余应力、焊缝错边、机械损伤和壁厚减薄等结构性缺陷，在加压过程中也可引起应力集中，这些部位在第一次加压和保压过程中均产生大量的声发射信号。由于残余应力的分布范围比裂纹和焊接缺陷部位大得多，因此产生的声发射定位源区域比裂纹和夹渣等缺陷的范围大。残余应力释放产生的声发射信号具有两个特点，①定位源分布范围较大，不象裂纹扩展和焊接缺陷开裂产生的声发射定位源那么集中。②满足 Kaiser 效应，因为残余应力释放是应力集中部位材料的局部屈服，导致大量位错运动而产生的声发射信号，位错运动的最终结果使应力得到一定程度的松弛。降压后进行第二次升压时，只有压力达到第一次最高压力之后，位错才会运动，故才有声发射信号产生。图 D 为一台高压空气贮罐在 13~15MPa 加压时，三处焊缝返修部位产生的 AE 源。

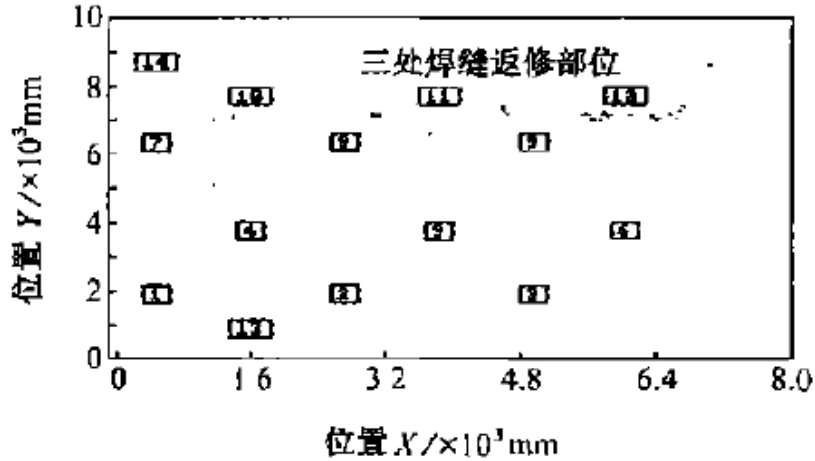


图 D 高压空气贮罐在三处焊缝返修部位产生的 AE 源

1.3.5 泄露

由于泄露产生的声发射信号是连续的，因此不能被时差定位方法进行定位。但是，对于多通道仪器来说，探头越接近泄漏源的通道，采集的声发射信号越多，信号的幅度、能量等声发射参数也越大。通过采用声发射信号撞击数、幅度和能量等声发射通道的分布图，可以确定泄露源的区域。

1.3.6 氧化皮剥落

在首次加压过程中，随着应力的增加，容器壳体必然会产生相应的应变，但容器壳体表面附着的金属氧化物不能随之产生相同的应变，故在加压与保压过程氧化皮会破裂剥落，从而产生大量的声发射信号。图 E 为一台 120m^3 的液氨球罐进行水压试验，从 $2.5\sim 3.0\text{MPa}$ 升压过程中大量氧化皮破裂剥落产生的声发射腐蚀的位置，在从低压到高压的所有升压和保压过程均有大量信号出现，而且在第二次升压和保压过程中也有少量分散的信号产生。

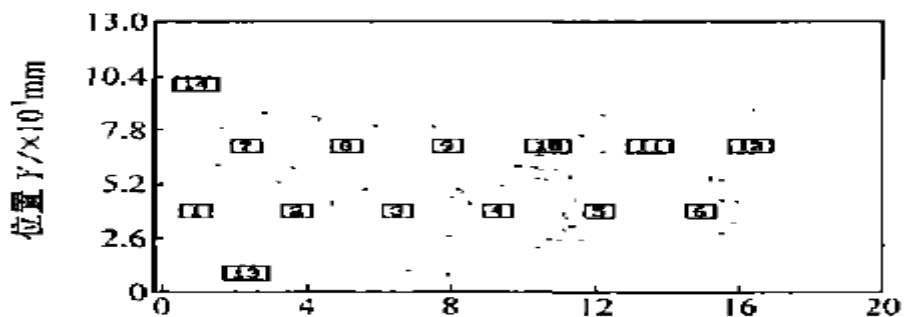


图 E 加压氧化皮剥落的 AE 源

1.3.7 电子噪声

由于目前所采用声发射仪器的抗干扰能力较强,根据大量压力容器现场检验的经验发现,采集到的几乎所有的电子噪声信号都不是来自于外部环境,而是来自于声发射仪器系统内部。声发射系统内部的电子噪声源主要包括探头、信号线、前置放大器、电缆线和信号采集板等。由于来自不同通道的电子噪声信号相互不关联,所以不会产生定位源。

2 声发射检测技术在拉伸实验中的应用

拉伸试样的声发射信号与拉伸各阶段的断裂力学性能相对应,可以分为以下几部分:弹性阶段、塑性阶段、颈缩阶段以及断裂阶段,通过综述国内外声发射研究进展情况,得到材料拉伸过程的声发射信号特性。

梁志刚^[4]等人以 4mm/min 的速度对 5A06 铝合金板材进行了拉伸声发射实验研究。通过将整个过程的应力-应变拉伸特性曲线图和声发射事件计数率-时间图进行对比分析,弹性变形阶段的声发射计数有短时间起伏,塑性变形阶段的声发射事件计数值变化比较大,而断裂阶段声发射事件计数呈现明显下降趋势,与拉伸特性曲线图基本吻合。

孙国豪^[5]等人运用特征参数分析法和各参数之间的相关性对 16MnR 焊接试样的不同缺陷进行了研究,发现未焊透、气孔、夹渣与无缺陷之间的累积声发射特征参数和相关性各不相同,以多种形式存在的缺陷往往表现出不同的线性回归性,所以该研究提出尽可能建立多种缺陷材料的声发射数据库,但是该研究对于缺陷的波形分析状况涉及较少,结合多种方法综合判定声发射信号源可以成为未来研究的一个方向。

伍蒋军^[6]等人利用声发射时域和频域分析方法对金属缺陷的萌生、扩展及断裂过程进行了声发射检测。研究结果表明,声发射信号主要集中于塑性变形、屈服和断裂三个阶段,其中塑性变形和屈服阶段的幅值较弱,频率较低,信号特性主要是连续型。而断裂阶段的声发射信号幅值增加明显,频率较宽,并且多是突发型信号。

刘怀喜^[7]等人研究了复合材料飞轮试件在不断提高加载速率时材料损伤的声发射信号特性,研究结果表明,与飞轮试件各类损伤密切相关的特征参量包括:能量、持续时间、振铃计数、上升时间以及频率,不同损伤对应的特征参量值差

别明显，其中纤维少量断裂与纤维剧烈断裂的声发射特性差别很大。随后用训练好的人工神经网络分析声发射信号得到期望输出与实际输出结果一致，说明训练的网格具有较高的精度和泛化能力。

程青蟾^[8]等人用声发射监测 16MnR 带预制中心穿透裂纹试板，以声发射信号分析预制裂纹的运动，研究发现与裂纹失稳扩展相应的声发射事件信号参数值差异很大，反映了其显微断裂机制的不同。

柏明清^[9]等人研究了温度对 16MnR 钢拉伸过程声发射信号的影响，通过对各特征参数进行相关性对比分析发现，能量-持续时间的相关性最高，随着温度的降低，能量信号的相关性趋向集中。同时对声发射信号进行特征参量累积分析发现，屈服时的累积振铃计数均在 5000-6000 内变化，能量变化的差异性比较明显，并且随温度降低呈下降趋势，这主要是由于晶体位错簇间距随温度降低而增大，位错密度显著性降低引起的。

刘立群^[10]等人采用声发射检测技术对直 V 形切口 A3 板材和斜 V 形切口 A3 板材进行拉伸断裂实验，通过对比分析发现，声发射能量、振铃计数、幅值、撞击数以及频谱峰值都能很好的表征材料损伤过程，其中直 V 形切口板材的幅值-时间图分布较规则，拉伸断裂阶段最高幅值能达到 90dB，而斜 V 形切口板材幅值的变化比直 V 形切口大，由于断裂方向的改变，斜 V 形切口在 I 区就不断有微裂纹的开裂和扩展，同时进一步将材料断裂力学性能与相关特征参数图结合分析发现，声发射特征参数能够很好的描述材料拉伸断裂各阶段的损伤机理。（如果有相关图应该更能说明问题）。

Meysam Akbari^[11]等人运用声发射技术，研究 AISI 号低碳钢光滑试样和缺陷试样在拉伸过程的声发射检测情况，通过对比两种拉伸过程的声发射信号振铃计数值和能量值，发现材料声发射信号与试样的活性位错有关。分析声发射信号的频谱图发现，塑性变形的声发射信号频率在 280-310KHz 范围内变化，并且缺陷试样中裂纹尖端应力值受到应力场强度因子的控制，所以通过声发射累积振铃计数与应力场强度因子之间的函数关系可以预测应力场强度因子。

C.Ennaceur^[12]等人通过声发射检测技术、电位差异方法以及显微断口观察之间的相关性来研究压力容器钢板中裂纹的扩展情况，研究结果表明，塑性变形产生的声发射信号，不但包括不稳定裂纹扩展信号，还有位错滑移，夹渣断裂以及氧

化皮脱落等产生的声发射信号。

A.Choudhury^[13]等人研究了滚动轴承中预制缺陷试样和无缺陷试样的声发射检测情况, 研究表明, 对于小尺寸缺陷试样, 声发射振铃计数值可以很好的表征内套筒和轴承缺陷的声发射特性, 当缺陷大于一定尺寸时, 声发射振铃计数值不在变化, 缺陷的声发射信号往往具有比较宽范围的幅值和振铃计数值。

3 结论

对上述压力容器声发射信号的分析 and 拉伸试验进行综述得到以下结论:

(1) 压力容器常见缺陷的声发射信号源, 不但包括真实缺陷的形成与扩展, 主要是裂纹扩展, 焊接缺陷的夹渣、未熔合、未焊透以及焊接残余应力释放, 还包括大量声发射干扰信号例如氧化皮脱落、泄露以及电子噪音等, 从大量干扰声发射信号中识别出真实缺陷的信号源是研究的热点领域。

(2) 声发射信号识别的方法有很多, 主要包括特征参数法、波形分析法、模态声发射识别以及人工神经网络分析等等, 其中基于特征参数的人工神经网络分析在声发射源识别方面有着明显的优势, 而目前运用人工神经网络进行声发射信号分析的报道大多是针对一次实验结果进行讨论, 还没有形成缺陷声发射源的规范化综合识别机制, 因此建立多种缺陷的综合识别系统是研究的热点方向。

(3) 运用声发射拉伸实验可以模拟压力容器缺陷的受载状态, 在此基础上, 系统分析承压设备中缺陷的声发射信号特性, 建立基于多参数综合评估机制的可视化软件, 可以更加直观、准确的评估缺陷类型。

参考文献:

- [1] 沈功田, 刘时风, 戴光. 声发射检测[M]. 中国特种设备检测研究中心, 2004.
- [2] C. Ennaceur, A. Laksimi, C. Herve, M. Cherfaoui. Monitoring crack growth in pressure vessel steels by the acoustic emission technique and the method of potential difference[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2006, 83: 197-204.
- [3] 张忠政, 巩建鸣. 压力容器密封失效泄露声发射检测[J]. *无损检测*, 2010, 32(11):889-892.
- [4] 梁志刚, 吴艳红, 蒋旭新. 5A06 铝合金拉伸过程声发射检测[J]. *科协论坛*, 2009, 9 (76):76-78.
- [5] 孙国豪, 柏明清. 缺陷试板拉伸过程声发射信号特性的相关性分析[J]. *无损检测*, 2010, 32(8): 622-625.
- [6] 伍蒋军, 黄振峰. 金属拉伸声发射信号特征分析[J]. *浙江工业大学学报*, 2011, 39(3): 300-303.
- [7] 刘怀喜, 马润香. 声发射法在复合材料飞轮试件损伤检测中的应用[J]. *无损检测*, 2008, 30(1): 48-51.
- [8] 程青蟾, 刘国光. 用声发射监测 16MnR 带预制中心穿透裂纹试板的拉伸试验[J]. *上海金属*, 1998, 20 (1):51-55.
- [9] 柏明清, 朱晏萱. 16MnR 试样低温拉伸过程声发射特性分析[J]. *石油化工设备*, 2011, 40 (1):14-16.
- [10] 刘立群, 陈国明. V 型切口板材试件拉伸断裂过程中的声发射特征[J]. *无损检测*, 2009, 31 (5): 360-364.
- [11] Meysam Akbari, Mehdi Ahmadi. The application of acoustic emission technique to plastic deformation of low carbon steel[J]. *Physics Procedia*, 2010, 3(7): 795-801.
- [12] C. Ennaceur, A. Laksimi, C. Herve, M. Cherfaoui. Monitoring crack growth in pressure vessel steels by the acoustic emission technique and the method of potential difference[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2006, 83: 197-204.
- [13] A. Choudhury, N. Tandon. Application of acoustic emission technique for the detection of defects in rolling element bearings[J]. *Tribology International*, 2000, 33: 39-45.