

综 述

# 管道声发射泄漏检测技术研究进展

焦敬品, 何存富, 吴 斌, 费仁元, 王秀彦  
(北京工业大学 机电学院, 北京 100022)

摘 要: 声发射检测的目的是获得声发射源的有关信息(如声发射源的特征和位置等)。管道泄漏声发射信号既携带结构的某些特征信息(泄漏孔大小和位置等), 同时又有很大的随机性和不确定性, 属于一种非平稳随机信号。在分析管道泄漏声发射信号特点基础上, 着重对管道声发射泄漏检测技术及信号处理方法的最新研究进展进行了回顾。模态声发射能够解决常规声发射技术发展中的问题, 是一种潜在的能够实现管道泄漏定量检测的方法。

关键词: 声发射检测; 管道; 泄漏; 信号处理; 综述  
中图分类号: TG115. 28 文献标识码: A 文章编号: 1000-6656(2003)10-0519-04

## ADVANCE IN ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUES FOR PIPELINE LEAK DETECTION

JIAO Jing-pin, HE Cun-fu, WU Bin, FEI Ren-yuan, WANG Xiu-yan

(College of Mechanical Engineering & Applied Electronics Technology, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

**Abstract:** The aim of AE (acoustic emission) testing is to obtain the information of AE source (source character and location etc). The AE signals of pipeline leak carry the information of structure integrity (the dimension and location of leak), which are random and uncertain, and belong to non-stationary signals. The state-of-the-art of acoustic emission techniques for pipeline leak detection and signal processing has been reviewed based on the AE signal character of pipeline leak. Modal acoustic emission may be used to solve the problems in the development of conventional AE technique, and is a potential technique for the realization of quantitative pipeline leak detection.

**Keywords:** Acoustic emission testing; Pipeline; Leak; Signal processing; Survey

管道作为五大运输工具之一, 在运输液体、气体和浆液等方面具有特殊的优势, 尤其在石油、化工、天然气及城市供水等行业中有着不可替代的作用。然而管道在长期使用中受冲刷和腐蚀导致管壁减薄, 常常发生泄漏事故, 据统计世界各大中城市自来水的泄漏损失率在 20% 左右<sup>[1]</sup>。可以说管道泄漏给人们生命财产安全及生存空间造成极大的损害, 因此大力发展和普及管道检测技术迫在眉睫。

尽管常规无损检测方法(如超声检测爬机和漏磁检测爬机等)对管道检测具有优势<sup>[2~5]</sup>, 如技术成熟, 只需对工人稍加培训就可利用现有专门设备进行检测, 但常规无损检测技术的不足是检测过程为

逐点扫描式, 因此不能有效用于广泛使用的成千上万公里的管道检测。

声发射(AE)技术是 20 世纪 50 年代后迅速发展起来的一种无损检测方法, 与超声及涡流等方法相比, 声发射具有能动态监测且覆盖面大的优势, 因此在材料研究、压力容器评价及飞机构件强度监测等方面已取得了较明显的效果。据报道<sup>[1]</sup>, 若能将声发射技术推广应用于管道泄漏检测, 可将平均 1 000 m<sup>3</sup>/km 的泄漏量减小到 500m<sup>3</sup>/km, 因此声发射技术是一种可能的、有效的管道泄漏检测方法。

### 1 管道泄漏的声发射检测原理

严格地讲, 压力管道或容器等泄漏所激发的应力波并不是声发射现象, 因为在泄漏过程中, 管壁只是波导, 本身不释放能量, 但由于泄漏点液体泄漏同样也会在管道中激发出应力波, 通过该应力波可以

收稿日期: 2002-12-18  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19972003); 北京市重点基金资助项目(3011001)

描述材料结构上的某种状况,所以从这个意义上讲,也可以认为是一种声发射现象。泄漏声发射信号的主要特点是① 由液体泄漏激励产生,属于连续声发射信号<sup>[6]</sup>。② 泄漏声发射信号在管道内传播,能反映结构的某些特征,如漏孔位置和大小等。③ 压力管道泄漏所激发的声发射现象是一个非常复杂的问题,涉及到诸多因素,如泄漏孔径大小和形状以及液体压力、湍流和固液耦合等,要想建立完备的数学物理模型基本不可能。④ 受声发射源的自身特性(多样性、信号的突发性和不确定性)、声发射源到传感器的传播路径、传感器的特性、环境噪声和声发射测量系统等多种复杂因素的影响,声发射传感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,声发射信号本质上属于一种非平稳随机信号。

因此,管道泄漏声发射信号既携带结构的某些特征信息(泄漏孔大小及位置等),同时又有很大的随机性和不确定性,属于一种非平稳随机信号。下面从实验研究方法及信号处理方法两个方面阐述国内外压力管道声发射泄漏检测研究状况。

## 2 管道声发射泄漏检测技术研究现状

### 2.1 管道声发射泄漏检测试验研究

国内外对于管道的声发射泄漏检测试验研究已见报道。国内大都基于管道的传统声发射泄漏检测研究。

霍臻<sup>[7]</sup>利用声发射技术对管道泄漏进行检测,试验证明应用泄漏应力波信号检测气体和液体的泄漏是可行的,并具有较高的灵敏度,但存在的问题是难于准确确定泄漏源的位置以及检测灵敏度受噪声影响等。因此要进一步推广应用声发射技术,必须首先解决源定位不准确、信号解释和噪声问题。

李光海等<sup>[8]</sup>利用声发射技术分别进行了充水和工业气体的埋地管线泄漏检测研究。采用快速傅里叶变换(FFT)、小波和神经网络识别技术对泄漏声发射信号和噪声进行分离处理,采用基于衰减和波形分析两种方法对泄漏源进行定位。在 100m 长管道上可检测直径 1mm 的泄漏孔,定位误差率为传感器距离的 10%,试验初步证明了声发射技术检测埋地管线泄漏的可能性。

国外学者针对传统声发射的不足,采用模态声发射技术对管道泄漏进行了初步试验研究。

Clark<sup>[9]</sup>研究了背景填充介质对充液管线中传

播的声信号衰减的影响,在空气、水和不同湿度沙等背景填充介质情况下进行了试验。结果证明,背景填充介质对充液管线中传播的声信号影响很大;背景填充为空气和水时,声信号衰减分别为最小和最大,信号能量分布在 10 ~ 100kHz 范围,大部分在 30kHz 以上;背景填充物为沙时,增加湿度对整个管线的声信号衰减都有负面影响。

Miller<sup>[10]</sup>建立了一种参考标准,用于管线泄漏的声发射检测装置的搭建和评价,参考标准包括直径为 5.08cm(2in)的管道和很方便引入的可以控制形式的泄漏孔。试验证明,该参考标准不仅对声发射设备的检查很有效,而且作为一种综合的声发射源定位方法有利于对泄漏源的识别。试验研究了压力和注射空气对 4 546cm<sup>3</sup>/h(1gal/h)泄漏的影响,该泄漏率对于环境保护意义重大。在注入 0.172MPa(25bf/in<sup>2</sup>)氮气情况下,现场试验成功检测出 6.36cm<sup>3</sup>/h(0.001 4gal/h)的泄漏,在 63.5cm(25in)传感器距离下,泄漏定位误差 < 2.54cm(1in)。

Lee<sup>[11]</sup>将声发射技术用于管线的泄漏检测,采用了基于信号幅度衰减和时间行程两种不同方法对泄漏源进行定位。试验结果表明,基于衰减的方法对于泄漏检测更为有效,如果考虑衰减的影响,源定位可以更为准确;试验中的泄漏信号的频带大部分集中在 140 ~ 160kHz,因此试验中共振频率为 150kHz 的传感器最适合检测泄漏信号。

针对现有无损检测方法还不能实现地下管线 455cm<sup>3</sup>/h(0.1gal/h)的泄漏检测,Miller<sup>[12]</sup>设计了试验装置,建立了声发射泄漏检测系统,其中的模拟泄漏源具有可重复性。在变化泄漏孔径、泄漏孔取向、背景填充物和管道填充物及压力的情况下,进行了声发射泄漏检测试验,图 1 为部分试验结果。

综上所述,国内外对于管道声发射泄漏检测尚处于实验室阶段,尚无广泛认可并能有效用于管道声发射泄漏检测的试验方法,现场应用更有待进一步努力。

### 2.2 声发射信号分析识别方法

声发射检测的目的是获得声发射源的有关信息(如声发射源的特征及位置等)。管道泄漏声发射信号既携带结构的某些特征信息(泄漏孔大小及位置等),同时又有很大的随机性和不确定性,属于一种非平稳随机信号。因此需要利用各种信号处理方法对泄漏声发射信号进行分析识别,达到源识别的目

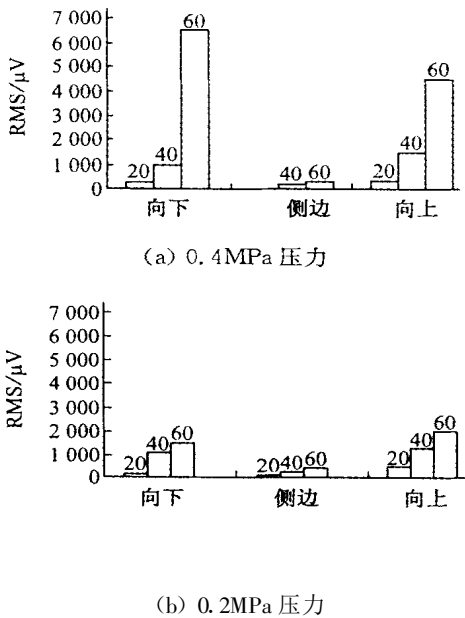


图1 泄漏声发射信号有效值(RMS)随压力、  
泄漏孔径(20, 40, 60mm)和取向变化趋势

的。因此,声发射信号处理也是近年声发射研究的热点之一,内容主要集中在神经网络、小波分析和相关分析等方面。

### 2.2.1 声发射信号的神经网络识别技术

神经网络作为模式识别的重要方法之一,对于多参数识别问题显示了独特的优越性,应用已相当广泛。由于神经网络具有自组织、自适应及自学习功能,还有很高的容错性和鲁棒性,因此它可很好地解决声发射检测中存在的噪声干扰问题,成为声发射检测中缺陷识别的重要方法之一<sup>[13~15]</sup>。神经网络在管道泄漏声发射信号分析识别中已有应用。

唐秀家、颜大椿<sup>[16]</sup>研究了管道泄漏后形成多相湍流所引发的应力波在管道中的传播机理,分析了泄漏引发的管道横振、纵振和圆环振动,提出了一系列应力波提取指标及离散数据算法。首次提出了以泄漏信号特征指标构造神经网络输入矩阵,建立对管道运行状况进行分类的神经网络模型,以检测管道泄漏事故的发生,并根据这一理论设计了适用于工业应用的管道检测仪器。

### 2.2.2 声发射信号的小波分析方法

由声发射源激发的应力波进入介质传播后的信号是一种非平稳随机信号,传统的信号分析方法建立在傅里叶变换基础上,只适用于确定性信号,对于声发射信号的分析无法解决时间和频率分辨力的矛盾。小波变换是近20a(年)发展起来的一种信号处理方法,与信号的时域和频域分析不同,小波变换具有同时在时域和频域表征信号局部特征的能力,既

能刻画某个局部时间段信号的频谱,又可以描述某一频谱信息对应的时域信息,很好地解决了时间和频率分辨力的矛盾,适合于对时变信号进行局部分析。对于分析含有瞬态现象的声发射信号尤为适合。目前,小波变换在声发射检测中的应用研究主要局限于复合材料板缺陷的声发射检测<sup>[17~23]</sup>。

例如,Kwon<sup>[24]</sup>基于模态声发射理论,将声发射源定位建立在给定的波形模态和频率基础上,利用小波分析方法提取针对复合材料不同损伤的声发射波相应的单一频率或某一很窄的频率段内的波形,选择形成波形的峰值,对衰减信号进行有效的补偿,通过设定相对于峰值的阈值或互相关方法计算时差,再进行声发射源定位,该方法有效减小声发射源定位误差,提高定位精度。

小波变换对于管道泄漏声发射识别处理也是一种潜在可行的方法,这方面研究还未见报道。

### 2.2.3 声发射信号的相关分析

相关分析是用于检测连续声发射信号源的一个重要方法,但在大部分材料和结构中,连续声发射源所激发的弹性波在传播过程中都存在频散现象,使得这一方法的应用受到了极大的限制<sup>[25,26]</sup>。

充液管网的弥散特征使得传统相关分析方法难以准确确定管网中泄漏源的位置。Lance<sup>[27]</sup>建立了管网泄漏理论模型,获得了其声发射事件的基本特征。并采用两种算法对泄漏源定位中超声信号的弥散进行了补偿,时间-空间转换法可以准确确定模拟模型和现场试验中的噪声源;并从理论上证明,空间-频率转换法可以通过一个或两个探头来确定泄漏的位置,但这种方法有待于试验证实。

Roberts<sup>[28]</sup>开发了一种用于管线声发射泄漏源定位的通用互相关方法。该方法有助于消除弥散现象对定位精度的影响,并对现场检测可能遇到的几个问题予以考虑。从试验结果可见,泄漏声发射信号既包括对称模态又包括非对称模态;模态的弥散特性沿管线长度变化,频率 $> 30\text{kHz}$ 时更为明显;各模态的能量分布沿管线长度也是变化的;合理的模态分离技术对定位算法的影响很大。因此,对选定模态的更好的分离方法是今后研究的重点,这对于复杂的多模态系统的适当模态的选择尤为重要。

综上所述,管道的声发射泄漏检测及相关课题的研究是国内外无损检测领域的一个热点。虽然目前针对这一问题提出了种种试验方案,但这些方案都只是针对问题的某些方面,并没有形成一整套完

善的、有效的检测管道泄漏的试验方案。

### 3 展望

随着声发射理论及计算技术的日趋发展, 管道声发射泄漏检测技术还将得到更进一步发展, 而模态声发射技术是其最有发展潜力的方向之一。

模态声发射技术 (Modal Acoustic Emission) 是国际上近年出现的声发射检测新技术, 它是潜在能够解决阻碍常规声发射技术发展问题的可行方法之一<sup>[29]</sup>。它基于导波理论, 秉承了人们最为熟悉的超声波传播中许多易解释和接受的物理模型方面的优点, 对工程应用占大多数的板材、壳体、棒材和管材结构的检测更是其所长。被测材料结构中的源或声发射事件在负载作用下产生的是频率和模态丰富的导波信号, 利用导波理论和牛顿力学定律将一直困扰声发射推广应用中所面临的问题 (即源定位不准确、信号解释困难和噪声问题等) 从理论上得到了较好的解释和表达, 并通过建立简单明确的物理数学模型表征问题。

目前, 国内模态声发射研究较少, 研究范围更为有限<sup>[30-31]</sup>。刘松平等<sup>[30]</sup>介绍了模态声发射检测技术的原理、信号特征及信号源识别和定位, 并对其在飞机疲劳裂纹监测中的应用进行了介绍。而泄漏声发射应力波在管道中的传播机理研究, 尤其在试验检测应用方面, 如导波模态及频率的选择等还未见报道。国外这方面的研究大都局限于复合材料板材的模态声发射初步试验<sup>[32-33]</sup>, 而管材方面的模态声发射研究还未见报道。

可以预见, 模态声发射研究必将掀起国内外声发射研究的又一新高潮, 它是潜在的、能够实现管道泄漏定量检测的方法之一。

### 参考文献:

- [1] Fuchs HV. Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis[J]. *Applied Acoustic*, 1999, 33(1): 1—19.
- [2] 陈积懋. 管道无损检测与评价技术[J]. *状态检测与分析*, 1997, 18(1): 59—62.
- [3] 李永年, 等. 国内外埋地管道腐蚀状况物理检测技术现状[J]. *岩土工程界*, 2000, 3(9): 43—45.
- [4] 冉启芳. 无损检测方法的分类及其特征简介[J]. *无损检测*, 1999, 21(2): 75—80.
- [5] 陈华波, 涂亚庆. 输油管道泄漏检测方法综述[J]. *管道技术与设备*, 2000, 22(1): 38—41.
- [6] 沈功田, 耿荣生, 刘时风. 连续声发射信号的源定位技术[J]. *无损检测*, 2002, 24(4): 164—167.
- [7] 霍臻, 陈翠梅, 朱润祥. 压力管道声发射泄漏检测[J]. *无损检测*, 1997, 19(4): 105—107.
- [8] 李光海, 王勇, 刘时风. 基于声发射技术的管道泄漏检测系统[J]. *自动化仪表*, 2002, 23(5): 20—23.
- [9] Clark M Amanda, Rewerts Lance E, Robbers Ron R. Experimental studies on the role of backfill and pipeline characteristics in the application of acoustic leak location to underground pipelines[J]. *Review of Progress in Quantitative Non-destructive Evaluation*, 1997, 16(4): 467—473.
- [10] Miller RK, et al. A reference for the development of acoustic emission pipeline leak detection techniques[J]. *NDT & E*, 1999, 32(1): 1—8.
- [11] Rae Min, Lee Joon-Hyun. Acoustic emission technique for pipeline leak detection[J]. *Key Engineering Materials*, 2000, 186(4): 888—892.
- [12] Miller RK, Pollock AA, Finkel P, et al. The development of acoustic emission for leak detection and location in liquid-filled, buried pipelines[J]. *Journal of Acoustic Emission*, 2001, 32(2): 245—256.
- [13] Gravec Igor, Kosel Tadej, Muzic Peter. Location of continuous AE sources by sensory neural networks[J]. *Ultrasonics*, 1998, 36(5): 525—530.
- [14] Yuki Hironobu, Homma Kyoji. Estimation of acoustic emission source waveform of fracture using a neural network[J]. *NDT & E*, 1996, 29(1): 21—25.
- [15] 李家林, 马羽宽, 董云朝, 等. 声发射检测中用人工神经网络剔噪的分析与研究[J]. *无损检测*, 1999, 21(9): 399—401.
- [16] 唐秀家, 颜大椿. 基于神经网络的管道泄漏检测方法及其仪器[J]. *北京大学学报*, 1997, 33(3): 319—327.
- [17] 刘镇清, 黄瑞菊. 小波变换及其应用[J]. *无损检测*, 2001, 23(4): 174—177.
- [18] 王健, 等. C/E 复合材料声发射信号小波分析及人工神经网络模态识别[J]. *宇航材料工艺*, 2001, 12(1): 49—53.
- [19] Daubenchies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets[J]. *Comm in Pure Applied Math*, 1988, 41(7): 99—105.
- [20] Gang Qi. Wavelet-based AE characterization of composite materials[J]. *NDT & E International*, 2000, 33(3): 133—144.
- [21] Ma kuan-yu. Effect on flaw location by the wave shape of acoustic emission propagation in a limited medium[A]. 11th World Conference on Nondestructive

## 欢迎浏览无损检测资讯网

无损检测资讯网(<http://www.ndtinfo.net>)是由无损检测高级工程师夏纪真创办并主持的无损检测技术综合资讯专业网站,于2000年4月开通至今,浏览人数已突破5万人次,月访问量超过千人次。在此衷心感谢无损检测界各位同仁对网站的大力支持与关爱,并将会继续努力把网站办得更好,为我国无损检测技术事业的腾飞发展贡献微薄绵力。该网站除有众多的公开资讯栏目外,还设有“技术专区”(为收费会员制),该栏目发布国产无损检测器材大全,国外无损检测器材介绍,无损检测技术常用公

式、数据、试块以及技术方法原理介绍和专业教材等。网站具有简繁体中文版和英文版,已经引起国内外无损检测界的广泛关注。热诚欢迎无损检测专业人士加入本站的技术专区,热诚欢迎各无损检测器材厂商、科研教学以及相关单位来本站发布宣传信息或建立网站连接(详情请见“网站介绍”和“技术专区说明”)。联系地址:广州市番禺区南村镇广州市永大集团公司北丽园32-602;邮编:511442;电话/传真:020-61913997;手机:13922301099;电子邮箱:[xjz@ndtinfo.net](mailto:xjz@ndtinfo.net)。(夏纪真)

## 欢迎订阅2004年度《理化检验·物理分册》杂志

《理化检验·物理分册》由上海材料研究所与中国机械工程学会理化检验分会联合主办,为国内理化测试领域权威刊物。本刊为中国科技核心期刊,中国科技论文统计用期刊,中国科学引文数据库来源期刊,中国期刊网收录期刊,中国学术期刊(光盘版)收录期刊。

该刊主要报道材料的金相检验、物理性能与力学性能测试等专业的新技术、新方法、新经验,报道上述专业技术在新材料研制、先进工艺制订、产品失效分析和安全评估及产品质量控制等方面的应用成果以及国内外最新研究动态和发展趋势。

该刊辟有试验与研究,测试技术与方法,质量控制与失效分析,安全评估,试验设备与应用,综述,实践经验,标准化,专题讲座,技术咨询,信息与动态和资料索引等栏目。

本刊为国内外公开发行人,月刊(每月8日出版),大16开本,56页,彩色胶印。邮发代号:4-183,6元/册,全年72元。欢迎到当地邮政局(所)订阅2004年《理化检验·物理分册》,切勿贻误。漏订者请与本刊编辑部联系,地址:上海市邯郸路99号,邮编:200437,电话:021-65556775-361,传真:021-65544911, E-mail: [ptca-pt@mat-test.com](mailto:ptca-pt@mat-test.com)。

tive Testing(Vol. 1)[C]. Las Vegas USA: 1985. 62.

[22] 杨建波,王阳,高虹,等.小波变换用于声发射波达时间的研究[J].无损检测,2001,23(11):482.

[23] 张平,刘时风,耿荣生,等.小波变换在声发射检测中的应用[J].无损检测,2002,24(4):181-185.

[24] Kwon Oh-Yang, Joo Yong-Chan. Source location in plate by using wavelet transform of AE signals[A]. 14th International AE Symposium & 5th AE World Meeting(Vol. 4)[C]. Hawaii USA: 1998. 9-14.

[25] Fuller CR, Fahy FJ. Characteristics of wave propagation and energy distributions in cylindrical elastic shells filled with fluid[J]. Journal of Sound and Vibration, 1982, 81(4): 501-518.

[26] Alleyne D, Cawley P. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode[J]. Journal of Acoustic Society of America, 1991, 89(10): 1159-1168.

[27] Rewerts Lance E, Roberts Ron A, Clark M Amanda. Dispersion compensation in acoustic emission pipeline leak loca-

tion[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1997, 16(4): 427-434.

[28] Roberts Ron A, Rewerts Lance E, Clark M Amanda. The role of propagation characteristics in acoustic emission pipeline leak location[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1998, 17(5): 501-508.

[29] Goman MR. Plate wave acoustic emission[J]. Journal of Acoustic Society of America, 1991, 89(1): 358-364.

[30] 刘松平, Michael Goman, 陈积懋. 模态声发射检测技术[J]. 无损检测, 2000, 22(1): 38-41.

[31] 刘晶, 陈积懋, Steve Ziolo. 应用模态声发射技术进行自动源识别[J]. 无损检测, 2000, 22(2): 80-83.

[32] Surgeon M, Wevers M. Modal analysis of acoustic emission signals from CFRP laminates[J]. NDT & E, 1999, 32(2): 311.

[33] Morscher Gregory N. Modal acoustic emission of damage accumulation in a woven SIC/SIC composite[J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(6): 687-697.