

声发射技术在工程应用中的若干问题及对策

宫李海 阳能军

(陕西省西安市第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)

摘要: 本文介绍了声发射技术在国内外发展的概况和基本原理, 综述了声发射技术在我国的应用领域, 根据其应用现状, 提出和预测了我国在声发射技术上目前尚需解决的问题和发展趋势。

关键词: 声发射技术; 现状; 问题; 对策

Several Problems on Engineering Application of Acoustic Emission Technique and the Solutions

GONG Li-hai, YANG Neng-jun

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an, Shanxi, 710025, China)

Abstract: This paper introduces the internal and overseas development situation and fundamental principle of acoustic emission technique. The application fields of acoustic emission technique in the internal be reviewed. According to the application status of acoustic emission. The paper proposes the issues needing to be resolved and the developing trend of acoustic emission technique in China at present.

Key words: Acoustic emission technique; Status; Issue; Countermeasure

在材料受外力或内力作用产生变形或断裂, 以弹性波形式释放出应力应变能的现象称为声发射 (Acoustic Emission, 简称AE)^[1]。各种材料声发射的频率范围很宽, 从次声频、声频到超声频, 所以, 声发射也称为应力波发射。声发射是一种常见的物理现象, 如果释放的应变能足够大, 就可以产生听得见的声音, 如在耳边弯曲的竹片, 就可以听见劈啪声, 这是由竹片受力产生变形而发出的声音。大多数金属材料塑性变形和断裂时也有声发射发生, 但声发射信号的强度很弱, 人耳不能直接听见, 所以需要借助灵敏的电子仪器才能检测出来。用仪器检测、分析声发射信号和利用声发射信号推断声发射源的技术称为声发射技术。

1 声发射技术发展概况

现代声发射技术的开始以Kaiser二十世纪五十年代初在德国所作的研究工作为标志。他观察到铜、锌、铝、铅、锡、黄铜、铸铁和钢等金属和合金在形变过程中都有声发射现象。他发现, 材料被重新加载期间, 在应力值达到上次加载最大应力之前不产生声发射信号, 现在人们称材料的这种不可逆现象为“Kaiser效应”——凯撒效应。

二十世纪五十年代末和六十年代, 美国和日本许多工作者在实验室中作了大量工作, 研究了各种材料声发射源的物理机制, 并初步应用于工程材料的无损检测领域。Dunegan首次将声发射技术应用于压力容器的检测。美国于1967年成立了声发射工作组, 日本于1969年成立了声发射协会。

二十世纪七十年代初, Dunegan等人开展了现代声发射仪器的研制, 他们把仪器测试频率提高到100kHz-1MHz的范围内, 这是声发射实验技术的重大进展, 现代声发射仪器的研

制成功为声发射技术从实验室走向在生产现场用于监视大型构件的结构完整性创造了条件。进入九十年代, 美国PAC公司、美国DW公司、德国Vallen Systeme公司和中国广州声华公司先后分别开发生产了计算机化程度更高、体积和重量更小的第三代数字化多通道声发射检测分析系统, 这些系统除能进行声发射参数实时测量和声发射源定位外, 还可直接进行声发射波形的观察、显示、记录和频谱分析。

我国从1973年起开始有关声发射的研究工作, 三十多年来, 我国声发射技术在研究、应用的深度和广度上都有比较大的发展。从研究的范围来看, 已从最初的仅限于压力容器、金属疲劳和断裂力学应用等, 发展到目前的金属材料、复合材料、岩石和磁声发射等领域, 并已经覆盖航空、航天、铁路运输、工业制造过程监测、建筑、石油化工、电力等几乎所有工业领域。已研制出了单通道、八通道、三十二通道等各种型号的声发射仪器。

八十年代中期以前, 由于信号处理能力的限制, 人们对声发射源性质的认识, 对声发射信号从声发射源到达传感器过程中的传输特性等的认识缺少应有的深度, 声发射技术在实验结果的重复性、进而在结果的可靠性等方面存在不少问题。

八十年代末、九十年代初之后, 由于计算机技术和信号处理技术的迅速发展, 也出现了新一代声发射仪器和相应的各种信号处理软件。而且通过该仪器采集到的波形来更深层次的了解声发射源性质和声波传输特性也成了可能, 以波形分析为基础的声发射技术得到应用和发展。在声发射信号处理方面, 神经网络和小波分析技术也取得了一定的进步, 我国学者利用神经网络技术对声发射源活动情

收稿日期: 2009-02-21 修回日期: 2009-03-22

作者简介: 宫李海 (1981-), 男, 汉族, 陕西丹凤籍, 硕士, 研究方向为军事装备学。

况进行模式识别,除了能区别出缺陷种类(裂纹、泄漏或噪声)外,还可对裂纹的危害程度进行判断。声发射技术稳步发展至今可以说已变得日趋成熟,其应用范围也变得更广。

2 声发射技术原理

2.1 声发射技术的基本原理

当材料或结构受外力或内力作用时,由于其微观结构的不均匀,内部缺陷的存在,导致了局部应力集中,造成不稳定的应力分布。当这种不稳定应力分布状态下的应变能积累到一定程度时,不稳定的高能状态一定要向稳定的低能状态过渡,这种过渡是以塑性变形、快速相变、裂纹的产生、发展直至断裂等形式来完成。

根据声发射信号的特点,可以把声发射信号分为突发型和连续型两类。连续型信号由一系列低幅值和连续信号组成,这种信号对应变速率敏感,主要与材料的位错和交叉滑移等塑性变形有关。突然型信号是由高幅值、不连贯、持续时间为微秒级的信号组成,主要与材料中的堆垛层错的形成和机械孪晶以及裂纹的形成和断裂过程有关。

对于不同的材料和不同的声发射产生形式,声发射信号的频率范围是不一样的,从次声、音频,直到数十兆赫兹的超声,幅度范围可从几微伏到上百伏。从声发射源发射的弹性波最终传播到达材料的表面,用声发射换能器进行探测,这些探测器将材料的机械振动转换为电信号,然后再被放大、处理和记录。固体介质中局部变形时,不仅产生体积变形,而且产生剪切变形,因此将激起两种波,即压缩波(纵波)和切变波(横波),它们以不同的速度在介质中传播,当遇到不同介质的界面时会产生反射和折射。因此,声发射波的传播规律与固体介质的弹性性质和几何形状密切相关。实际情况下,波在固体介质中的传播都伴随有衰减现象发生。波传播的几种主要衰减因素为:几何衰减、色散衰减、散射和衍射衰减、由能量损耗机制引起的衰减等。在实际结构中,上述所有机制都使声发射信号得到衰减,但衰减最终只能通过实验来测得。

2.2 信号分析法

目前采集和处理声发射信号的方法可分为声发射信号的波形分析法和声发射信号的特征参数分析法两大类。

参数分析方法的应用比较成熟,记录声发射波形信号的特征参数是近几十年来声发射仪器一直采用的方法,是声发射信号处理最早应用也是当前运用最多的方法。它通过对声发射信号进行初步的整理,可以得到一个声发射事件的五个参数,即振铃计数、能量、幅度、上升时间和持续时间,通过对这些特征参数的分析来获取所需要的相关信息。与记录的声发射波形信号相比,声发射波形特征参数已经损失了大量的信息,但由于这一方法记录的信号量大,检测仪器分析的实时性强,仍是声发射检测所使用的主要方式^[2]。

波形分析方法是伴随着声发射仪的快速发展、电子计算机处理能力的快速提升和传感器频带的宽带化而迅速发展起来的,是直接以声发射信号的波形为研究对象,在整个频率范围内,根据存储和记录的声发射信号的波形,进行分析处理来获取所需要的相关信息的方法^[3]。从理论上讲,它能提供比特征参数分析更多的信息量。目前这两大

类处理方法都在声发射检测技术中得到应用和发展。

3 声发射技术应用领域

目前声发射技术作为一种成熟的无损检测方法,已被广泛应用于许多领域,主要包括以下方面^[1]: ①石油化工业:各种压力容器、压力管道和海洋石油平台的检测和结构完整性评估,常压贮罐底部、各种阀门和埋地管道的泄漏检测等。②电力工业:高压蒸汽汽包、管道和阀门的检测和泄漏监测,汽轮机叶片的检测,汽轮机轴承运行状况的监测,变压器局部放电的检测。③材料试验:材料的性能测试、断裂试验、疲劳试验、腐蚀监测和摩擦测试,铁磁性材料的磁声发射测试等。④民用工程:楼房、桥梁、起重机、隧道、大坝的检测,水泥结构裂纹开裂和扩展的连续监视等。⑤航天和航空工业:航空器壳体和主要构件的检测和结构完整性评价,航空器的时效试验、疲劳试验检测和运行过程中的在线连续监测等。⑥金属加工:工具磨损和断裂的探测,打磨轮或整形装置与工件接触的探测,修理整形的验证,金属加工过程的质量控制,焊接过程监测,振动探测,锻压测试,加工过程的碰撞探测和预防。⑦交通运输业:长管拖车、公路和铁路槽车及船舶的检测和缺陷定位,铁路材料和结构的裂纹探测,桥梁和隧道的结构完整性检测,卡车和火车滚珠轴承和轴颈轴承的状态监测,火车车轮和轴承的断裂探测。⑧其他:硬盘的干扰探测,带压瓶的完整性检测,庄稼和树木的干旱应力监测,磨损摩擦监测,岩石探测,地质和地震上的应用,发动机的状态监测,转动机械的在线过程监测,钢轧辊的裂纹探测,汽车轴承强化过程的监测,铸造过程监测,Li/MnO₂电池的充放电监测,人骨头的摩擦、受力和破坏特性试验,骨关节状况的监测。

4 存在问题及对策

4.1 存在问题

目前声发射技术的研究范围,从最初仅限于金属材料力学性质等方面的应用,发展到金属材料、复合材料、地质材料、工业制造过程监测及磁声发射等领域,覆盖了航空、航天、铁路交通、工业生产、建筑、石油化工、电力等众多领域^[4-6]。声发射技术现已经进入工业实际应用阶段。但是,声发射技术方面仍然有以下待解决的问题: ①现有的声发射源基本理论还不够完善,不能很好地指导人们对声发射源的理解以及在工程方面中的应用,这有待于进一步研究。②目前声发射检测设备使用功能单一,抗干扰能力和排除噪声的能力不强,不能适应多种工程应用环境的需要。缺少先进的设备设计理念和生产工艺及技术,以及能与之相对应的信号数据分析与处理软件。③已有的附属设备及耗材制造工艺还有待完善,使用方式还有待改进。多通道传感器使用时,使用时相应的信号线较多,会对实际应用造成不便。现有的耦合剂性能还不能满足各种使用要求。④现有的信号处理技术不能及时的对声发射信号进行处理,难以对工程设备进行及时的报警以及在线诊断分析,影响了在线检测技术的发展。⑤现有的声发射检测技术应用范围较为狭窄,多为事后的一种检测手段加以利用,对现役设备进行全监控及在线监测分析使用

的范围还不够广,使用经验也不够丰富,没有发挥声发射技术的自身优势,且限制了声发射技术的理论创新和技术发展。⑥缺少完善的声发射技术标准,无法对相关行业进行统一的规范,影响声发射技术的发展。

4.2 对策

(1) 从细观、微观和宏观三方面同时研究声发射源的基本理论,通过引入多层次的缺陷背景和损伤机制来研究材料从变形、损伤到失效的全过程,深刻了解声发射源机制^[7]。

(2) 在设备仪器的设计与制造方面,进一步完善和提高现有检测设备的功能和可靠性,从而研制出适合于严重噪声环境下应用的新型声发射监测仪器。要求声发射检测仪器具有高响应速度、高灵敏度、高增益、宽动态范围、强阻塞恢复能力和频率检测窗口可调等性能^[8]。并开发出能够分析与处理各种声发射信号数据的新软件,促进声发射技术的应用。

(3) 加快与声发射检测设备相关的各种附属设备以及用品的研制。应大力加强信号传输以及设备制造所需相关材料的学科及专业的发展,进一步完善和提高现有共振型换能器的制造水平,发展低频和高温换能器的制造技术;研制适用于不同目的、不同环境以及不同结构和性能的无线传输信号传感器;以及研制、生产性能更加先进的耦合剂,避免因设备连接不当而造成的信号提取不及时、不准确,影响相关工作的进展。

(4) 进一步研究声发射信号各种处理分析技术,提高压力容器、压力管道和各种大型机械装备的在线检测应用水平,提高声发射源的模式识别、结构失效预测、自动报警和在线诊断等功能。

(5) 进一步发展声源定位技术,拓展声发射检测技术的应用领域,寻找排除噪声和研究缺陷有害度评估的新方法。尤其是针对桥梁、管道、大型机械装备等设备的声发射检测技术和在线监测、预警技术的研究。

(6) 加快声发射检测标准的制定和修订步伐,建立完善的声发射检测标准体系,为进一步促进声发射技术的发展,推广声发射检测在工程中的应用打下基础。

参考文献:

- [1] 沈功田,戴光,刘时风.中国声发射检测技术进展——学会成立25周年纪念[J].无损检测,2003.
- [2] 姚力.几种典型声发射信号的特征参数分布分析[J].无损检测,2004,28,(2).
- [3] 耿荣生,沈功田,刘时风.基于波形分析的声发射信号处理技术[J].无损检测,2002,24,(6).
- [4] 杨明纬.声发射检测.机械工业出版社,2005.
- [5] 袁振明.声发射检测.国防工业出版社,1981.
- [6][9] 袁振明,马羽宽,何泽云.声发射技术及其应用.北京:机械工业出版社,1985.
- [7] 张俊哲.无损检测技术及其应用.科学出版社,1993.
- [8] 熊庆国.声发射技术的现状与展望.工程安全与防尘,1996,7.

(上接第34页) (1) 设计以间距 d 布置,直径为 d_w 的排水砂井。设想直径为 d_e 的圆柱状地基,如间隙水只流向砂井,其固结时间为: $t = 2Thde / Ch$ 式中: t —固结时间(d) Th —水平向固结时间因数(无因次) Ch —水平向固结系数(m^2/d) d_e —有效直径(m)。

当砂井间距为 d 间;正三角形布置 $d_e = 1.05d$;正方形布置 $d_e = 1.13d$ 。 d_w —砂井直径(m)可知 d_e 越小,排水砂井间距 d 就越小,越能促进固结。固结度 U_h 与时间因数 Th 是以有效直径和排水砂井直径之比 $n = d_e / d_w$ 为参数。 d_e 与垂直向的固结排水距离 D 相对较小,所以多把垂直方向排水忽略。但粘土层厚度较小时,不能忽略。粘土层总的固结度 U 由下式求得: $U = 1 - (1 - U_h)(1 - U_v)$,式中: U_h —水平向固结度; U_v —竖向固结度。

地基处理范围,为了稳定,以填土坡面下为处理对象;为防止沉降,主要以路基顶面宽度下作为处理对象。

设计排水砂井时,首先假定施工方法、砂井直径、排水距离和改良范围。然后进行稳定及沉降计算,若不能满足时,修正假定数据,再进行计算。并注意以下几点:①是否有砂层存在。②防止扰动四周土壤,避免降低透水性或地基强度。宜取尽可能宽的排水间距。一般情况水平向固结系数 Ch 为竖向的固结系数 Cv 的数倍,但是由于砂井打设方法不同,实际 Ch 只能达到 Cv 甚至小于 Cv 的值。③砂井中的砂,在固结过程中起到排水通路的作用,因此必须长期发挥良好的透水性能。通常采用干净优质的粗砂。

(2) 施工程序:①铺砂。在砂井施工之前,地表面先

铺一砂垫层。并设置排水沟,使填土内不致有较高的地下水位。②打入排水砂井。其法有打入式、振动沉桩式、射水式、螺旋钻进式及袋装式等。无论何种方式一般的沉入深度为15~20m,超过这一深度工程费用明显增大。a.打入式和振动沉桩式:这是最常用的两种方式。使用履带式起重机时沉入深度为10m左右;使用特制的钢打桩架,沉入深度可达30m。桩径一般采用30~50cm,间距为1.5~3.0m。打入式和振动沉桩式的施工程度大致相同:套管底端接上管靴,放置在设计井位上;用汽锤敲击或振动锤敲打至设计深度;用铲斗把砂喂入套管中;将喂砂口封闭,一边压入压缩空气,一边拔出套管;待套管完全拔出,砂井沉入即告结束。b.射水式:该法与别的方法相比对地基扰动最小,在水源丰富,排泥处理无困难时宜采用。其施工顺序:将套管置在设计井位上;在套管内放入喷嘴杆,并用喷嘴射水。

5 结束语

软基情况各处不一,一定要弄清地质情况,根据路基对承载力、变形及稳定性的要求,结合当地所产材料和经济条件,作充分研究,再决定应采取的设计方案和施工方案,确保路基稳定,提高工程质量。

参考文献:

- [1] 公路路基设计规范(JTG D30-2004).北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 公路路基施工技术规范(JTG F10-2006).北京:人民交通出版社,2006.

声发射技术在工程应用中的若干问题及对策

作者: [宫李海](#), [阳能军](#), [GONG Li-hai](#), [YANG Neng-jun](#)
 作者单位: [陕西省西安市第二炮兵工程学院, 陕西, 西安, 710025](#)
 刊名: [中国西部科技](#)
 英文刊名: [SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WEST CHINA](#)
 年, 卷(期): 2009, 8(10)
 引用次数: 0次

参考文献(8条)

1. [沈功田, 戴光, 刘时风](#) [中国声发射检测技术进展—学会成立25周年纪念](#)[期刊论文]-[无损检测](#) 2003
2. [姚力](#) [几种典型声发射信号的特征参数分布分析](#)[期刊论文]-[无损检测](#) 2004(02)
3. [耿荣生, 沈功田, 刘时风](#) [基于波形分析的声发射信号处理技术](#)[期刊论文]-[无损检测](#) 2002(06)
4. [杨明纬](#) [声发射检测](#) 2005
5. [袁振明](#) [声发射检测](#) 1981
6. [袁振明, 马羽宽, 何泽云](#) [声发射技术及其应用](#) 1985
7. [张俊哲](#) [无损检测技术及其应用](#) 1993
8. [熊庆国](#) [声发射技术的现状与展望](#) 1996(07)

相似文献(10条)

1. 会议论文 [耿荣生](#) [声发射技术在航空工业中的应用-现状、困难及对策](#) 2004
 叙述了声发射(AE)技术在航空工业中的应用状况,特别是它在航空结构件状态监测中的作用。分析了应用AE技术所面临的困难及一些特殊需要解决的问题,并就如何发展AE监、检测应用范围进行了初步探讨。介绍了AE技术在评估飞机日历损伤和日历寿命中的作用,并介绍了作者利用AE技术在该领域所取得的一些初步成果。
2. 期刊论文 [彭新明, 孙友宏, 李安宁](#) [岩石声发射技术的应用现状](#) -[世界地质](#)2000, 19(3)
 介绍了国内外岩石声发射技术在测定地应力、钻进监测、岩石力学与岩石破碎学研究、坑道岩体稳定性监测等方面的应用现状及发展趋势。
3. 期刊论文 [吴占稳, 沈功田, 王少梅, 潘春旭](#) [声发射技术在起重机无损检测中的现状](#) -[起重运输机械](#)2007, ""(10)
 对起重机械常规无损检测技术(目视检测、磁粉检测、超声检测、应力测试、振动测试等)和声发射技术进行了比较,归纳了声发射技术在起重机械无损检测中的研究现状,提出了研究的基本思路,讨论了起重机械声发射技术中的几个关键问题,即典型声发射源信号的获取、声发射信号处理技术、声发射源的模式识别。最后,对起重机械声发射检测技术的研究前景进行了展望。
4. 会议论文 [沈功田, 戴光, 刘时风](#) [中国声发射技术进展](#) 2004
 介绍了国内外声发射技术的发展历程和现状,综述了我国学会活动情况、标准、仪器、人员及主要研究和应用领域的现状,提出了我国目前急需解决的问题和发展趋势。
5. 会议论文 [高胜友, 谈克雄, 李福祺, 朱德恒](#) [声发射技术在电气设备局部放电测量中的应用-现状与将来](#) 2001
 总结了近年来发射(AE)技术在变压器、电力电容器等电力设备局部放电(PD)测量中的应用情况,并对声发射信号的统计特征分析以及模式识别方法进行了归纳,最后展望了声发射技术在电气设备故障诊断领域的发展前景。
6. 学位论文 [姜波](#) [声发射技术在化工设备检测中的应用](#) 2007
 声发射技术是上世纪六十年代开始目前已日趋成熟的一种无损检测方法,它被广泛应用于石化设备的检测及结构的完整性评价。本文通过阐述声发射检测的基本原理,总结了声发射检测的特点。介绍了国内外声发射检测技术的发展历程和现状,并概述了声发射检测技术在压力容器和常压储罐上的应用进展。
 压力容器在制造、定期维修和长期使用过程中都需要进行检测和监测,以防止恶性事故发生,避免人身重大伤亡和设备财产重大损失。本文从声发射信号的采集、信号分析的相关原理开始简述了压力容器裂纹在线检测的方法,讨论了检测时的测点布置及数据处理的原理和方法,并通过实例应用加以说明。
 常压储罐在原油、化学危险品的储存和输送过程中起着重要作用,在使用过程中,罐底腐蚀泄漏是引起储罐失效的主要原因。本文根据常压储罐的声发射检测与评价技术的研究成果,介绍了声发射技术用于立式储罐罐底腐蚀状态下的检测研究并通过实例证明了采用该项技术可以对立式储罐罐底的结构完整性做出准确的评价。
7. 期刊论文 [林介东, 胡平](#) [声发射技术测量变压器局部放电的现状与进展](#) -[广东电力](#)2005, 18(1)
 介绍了近年来声发射(acoustic emission, AE)技术在变压器局部放电测量方面的发展及应用情况,详细说明了用声发射技术检测变压器局部放电的原理,对检测系统结构、定位测量方法及局部放电声发射信号的模式识别进行了概述,探讨了该方法的优缺点和今后的发展方向。
8. 期刊论文 [张艳霞, 何晖, ZHANG Yan-xia, HE Hui](#) [岩石声发射的Kaiser效应研究进展](#) -[地下空间与工程学报](#) 2007, 3(6)
 简要介绍了声发射技术的原理、发展史,从Kaiser效应应用方面,还介绍了声发射技术的研究成果,还介绍了岩石的Kaiser效应及声发射技术在岩土工程中的应用。最后讨论了声发射技术未来的研究方向。
9. 学位论文 [龚斌](#) [承压特种设备检测中声发射技术的研究](#) 2006
 声发射检测作为一种新的无损检测方法与其它常规无损检测方法相比有其独特的优点。随着工业技术的发展,如何从声发射检测信号中获取更多的源信息,使声发射技术更好地用于承压特种设备的检测成为工业生产的迫切需要,也是目前声发射技术研究的重点课题之一,这一课题研究具有重要的

理论意义和实际应用价值。

本文主要对压力容器安全检测和压力管道泄漏检测中声发射技术进行研究。

基于弹性波在传播时声压遵从指数衰减规律和第一次门槛跨越时差技术比较成熟的现状，论文提出两种声发射源精确定位的方法——能量累积定位法和多探头定位法，并对特种设备声发射检测中各种常见的探头阵列从理论上求出了两种定位方法的解析解。利用能量累积值与信号衰减特性的关系，论文导出了信号幅值修正系数的解析公式，从而快捷、准确地判断源声发射的强度。论文还对两种定位方法中的部分探头阵列利用模拟声发射源进行了实验定位，结果表明在实验室条件下两种定位方法都具有较好的定位精度。

论文利用线性理论和弹塑性理论就小范围屈服与大范围屈服两种情况对裂纹尖端形成塑性区时产生的声发射累计数与缺陷尺寸的关系进行研究，得出小范围屈服和大范围屈服形成塑性区时产生的声发射累计数分别与应力强度因子的 $4m$ 和 $2m$ 次方成正比的结论。论文还提出了一种利用声发射的凯塞效应来判断容器中新检出缺陷来历的方法，并通过单边缺口试样拉伸声发射检测实验和实际应用案例验证了理论分析的正确性。

论文通过建立压力管道圆孔泄漏的射流扰动模型，研究了泄漏声发射信号的产生机理及信号的频谱特性和能量累计特性。并以水为实验介质进行了压力管道圆孔泄漏的声发射实验测试，利用小波分析对实验结果进行处理，结果表明压力管道泄漏声发射信号是由射流对微小扰动的响应引起的并沿压力管道传播的一种含有多种频率成分的应力波，其频带很宽，从几kHz到几MHz都有，与液体的表面张力、密度及波动常数等参数有关，对碳钢管道水泄漏的实验测试表明泄漏孔径和总流量的改变对频率的分布特性影响不大，主要频率成分集中在 $3.05\sim 3.81\text{kHz}$ 左右；对同一泄漏孔径，喷射流速与信号的能量累计值基本符合指数关系 $E = a \cdot v^n$ 。

10. 期刊论文 [熊庆国. 贺风云. Xiong Qingguo. He Fengyun 声发射监测仪的现状与发展展望 - 工业安全与防尘](#)
2000, "" (12)

分析了声发射监测仪的结构, 论述了声发射监测仪的研制现状与发展方向.

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_zgxbkj200910018.aspx

下载时间: 2010年5月31日