

文章编号:1671-5497(2003)04-0021-05

# 含不同缺陷的金属材料声发射特性

何舒<sup>1</sup>, 马羽宽<sup>2</sup>, 杨建波<sup>2</sup>

(1. 吉林大学 远程教育学院, 吉林 长春 130025; 2. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130025)

**摘要** 根据声发射测试原理, 利用信号峰值电压与材料形变过程中释放能量的关系建立了裂纹开裂的声发射参数与应力关系的数学模型, 提出了声发射总计数和声发射计数率的一般表达式, 研制了声发射装置, 并在拉伸试验条件下对具有不同缺陷的 ZG25 试件进行了声发射检测。实验结果表明: 无缺陷的 ZG25 材料与有气孔、疏松、夹渣和微裂纹缺陷的该材料具有不同的声发射 AE 事件特征, 这对金属材料声发射无损检测具有实际意义。

**关键词** 声发射; 金属材料; 缺陷表征

**中图分类号**: TG115 **文献标识码**: A

## Acoustic emission characteristics of various defects in metallic materials

HE Shu<sup>1</sup>, MA Yu-kuan<sup>2</sup>, YANG Jian-bo<sup>2</sup>

(1. College of Distance Education, Jilin University, Changchun 130025, China; 2. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract** Based on the principle of acoustic emission(AE) detection, a mathematical model between AE parameters and cracking stress from the relation of the signal peak voltage and emission energy during the deformation of material is established. A general expression between the total counts and counting rate is developed. During the tensile test, with the AE detecting system developed, it is found that the defects in ZG25 steel such as gas pore, slag inclusion and microcrack, show different AE characteristics. Thus, AE as a non-destructive method is practically useful for metallic materials.

**Key words** acoustic emission; metal material; defect characterization

由于声波对金属材料中的缺陷十分敏感, 通过提取声发射的有效物理参量来判断金属材料中缺陷的类型和位置, 是检测材料缺陷的新技术<sup>[1, 2]</sup>。有关声发射信号与材料内部缺陷的关系, 以及通过声发射判断受力材料内部缺陷的类型及特征的研究尚未见报道<sup>[3, 4]</sup>。本文根据声发射测试原理和信号峰值电压与材料形变过程中释放能量的关系, 采用声发射技术检测、收集、提取和加载过程活性缺陷的敏感声波, 研究了材料内部缺陷变化的声发射特征。以此提高声发射技术在无损检测领域的可靠性, 对进一步进行理论研究和无损检测材料缺陷的研究具有实际应用价值。

收稿日期: 2002-04-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59471007)

作者简介: 何舒(1968-), 女, 吉林长春人, 助理研究员, 硕士。

## 1 材料声发射参数与应力关系的数学模型

假定一个声发射事件可以近似为指数衰减的余弦波,并表示为<sup>[11]</sup>:

$$V = V_0 e^{-\beta t} \cos(2\pi f t) \quad (1)$$

式中  $V$  为瞬时电压,  $V_0$  为峰值电压,  $\beta$  为衰减因子,  $t$  为时间,  $\mu\text{s}$ ;  $f$  为频率,  $\text{kHz}$ 。

一个事件产生声发射的振铃计数为:

$$\xi = \frac{f_0}{\beta} \ln \frac{V_0}{V_t} \quad (2)$$

式中:  $f_0$  为工作频率,  $\text{kHz}$ ;  $V_t$  为阈值电压,  $V$ 。

实验证实,在测试频带范围内( $0.1 \sim 1.0 \text{ MHz}$ ),  $\beta$  是  $f_0$  的比例函数,即  $f_0/\beta$  是常量,用  $A_1$  表示。而峰值电压与一个给定的形变过程中释放出的能量的平方根成正比,即:

$$V_0 = \psi \sqrt{E_g} \quad (3)$$

式中:  $\psi$  为比例因子;  $E_g$  为释放的能量。

在形变或断裂过程中产生的声发射事件总计数  $N$  也是形变状态的函数,因此设:

$$\eta = \zeta(x) \quad (4)$$

式中:  $\eta$  为形变量为  $x$  时的累积的声发射事件数。

材料达到其形变  $x$  之后产生的总振铃计数  $N_e(x)$  为:

$$N_e(x) = \int \zeta(x) d\eta = A_1 \int \ln \left[ \frac{\psi \sqrt{E_g}}{V_t} \right] \frac{d\eta}{dx} dx \quad (5)$$

相应的计数率为:

$$\frac{dN_e(x)}{dt} = \zeta(x) \frac{d\eta}{dx} \frac{dx}{dt} = A_1 \ln \left[ \frac{\eta \sqrt{E_g}}{V_t} \right] \frac{d\eta}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (6)$$

式(5)和式(6)为描述声发射总振铃计数和声发射计数率两个统计参数的一般表达式。

裂纹的微开裂、开裂、扩展直至断裂过程是一个不连续的随机过程,这就决定了突发型声发射信号是一系列分离的、幅度不等的随机脉冲。在外加应力作用下,断裂前首先产生大量的显微开裂,每一次微开裂过程就是一个声发射源<sup>[4,6]</sup>。当单个晶粒出现微开裂时,应力在数量级  $d^3$  的体积内松弛,故释放的声发射能量为:

$$E_g = \alpha^2 \sigma^2 \quad (7)$$

式中:  $\sigma$  为外加应力;  $\alpha$  为与晶粒度有关的比例系数。

在材料中,晶粒都表现出某种强度分布,使得微开裂的晶粒数目随应力的增加而增加。作为近似分析,可以将晶粒微开裂的概率用一个极值分布函数给出,即:

$$p = 1 - \exp[-(\sigma/\sigma_0)^k] \quad (8)$$

式中:  $k$  为微开裂指数;  $\sigma_0$  为初始声发射所对应的应力。

由此得出在外加应力  $\sigma$  作用下晶粒微开裂的总数(近似为产生声发射的事件数  $AE$ )为:

$$\eta = M(1 - \exp[-(\sigma/\sigma_0)^k]) \quad (9)$$

式中:  $M$  为材料处于塑性变形的晶粒数。

将式(9)中的  $\exp[-(\sigma/\sigma_0)^k]$  按幂级数展开,进一步简化整理得到声发射总计数为:

$$N_e(x) = A' \left( \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^k \left( \ln \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right) - \frac{1}{k} \right) + C_1 \right) \quad (10)$$

由  $\sigma/\sigma_0 = 1$  时  $N_e = 0$  确定积分常数  $C_1 = 1/k$  (式中  $A' = A_1 M$ ),可得声发射计数率与应力的关系式:

$$\frac{dN_e}{dt} = A' \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{k-1} \ln \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \frac{d\sigma}{dt} \quad (11)$$

式中 : $A'' = A_1 Mk / \sigma_0$ 。

式 (10) 和式 (11) 是声发射参量与应力关系的数学模型。它们是根据声发射测试原理和微开裂的极值分布函数得到的,是用宏观的力学参量表示的微观过程,具有更宽的适用范围和实用意义,也是材料声发射检测软件和硬件开发的理论基础。

## 2 材料缺陷声发射检测试验

### 2.1 声发射检测系统的研制

目前国际上最先进的声发射系统均采用分布并行处理技术<sup>[1-5]</sup>,可实现各单元配置的有效通讯,数据处理能力达到数千 Hit 以上。本文自行开发的多通道声发射检测系统,各单元采用并行方式分布处理结构,其系统流程如图 1 所示。系统主要由探头、前放、独立通道控制板 ICC、TRA 及工控机组成。ICC 是核心部件,主要完成声发射源信号的数据采集和处理。ICC 由模拟电路的增益控制电路、声发射特征参量提取电路、A/D 转换电路和时序控制电路组成。

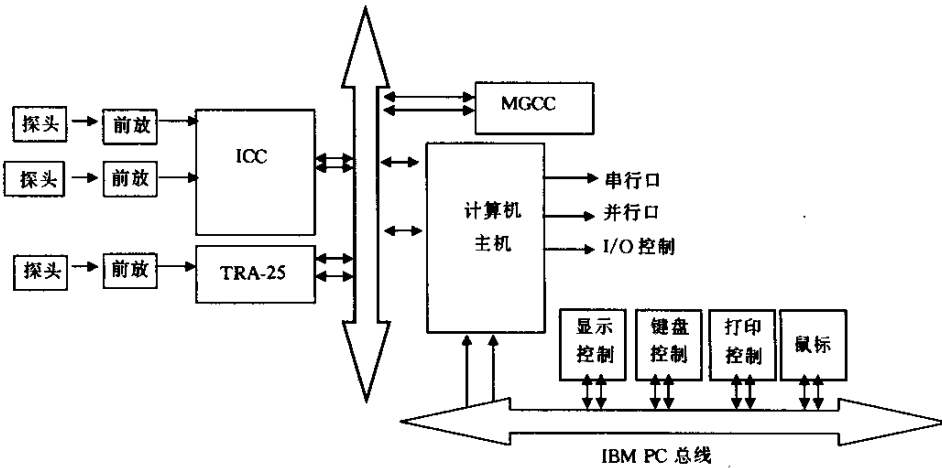


图 1 声发射检测系统框图

Fig.1 Schematics of acoustic emission test system

### 2.2 含缺陷构件的声发射特性试验

通过采用不同的铸造条件,设定缺陷出现的部位及产生的趋势。把通过 X 射线探伤仪检测出的具有不同缺陷特征的试样作为本试验的标准试样。

试验检测材料为 ZG25,分别选取 X 射线探伤未发现缺陷的试样(简称无缺陷试样)和内含气孔、疏松、微裂纹、夹渣等缺陷的试样,试样的尺寸如图 2 所示。用万能拉伸试验机拉伸试件,同时用 X 射线探伤仪检测含缺陷的区域。为减少试验机夹具对探头的噪声干扰,采用声隔离夹具,使传入试件的噪声降低至 30 dB 以下。

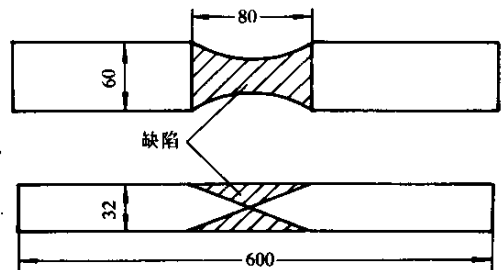


图 2 材料声发射拉伸试件

Fig.2 Schematics of tensile specimen for acoustic emission test

## 3 试验结果与分析

图 3 为无缺陷试样在拉伸应力作用下的声发射特性与应力的关系曲线。可以看出,弹性变形阶段应力、应变成线性关系,塑性变形阶段平稳变化。在较大塑变条件下,即应力接近 800 MPa 时出现断

裂,这是无缺陷低合金高强钢应力应变变化的明显特征。拉伸试验后期的塑性变形断裂会引起少量的 AE 事件出现。而在弹性变形阶段并无 AE 事件发生,说明此试件不足以引起试件产生低应力微开裂的缺陷。

在含少量气孔的试件中,前期弹性变形区较窄,与无缺陷试件相比断裂应力略低。在塑性变形区应力变化平坦,并有明显 AE 事件出现,说明弹性变化之前试件就有缺陷(少量气孔)存在,见图 4(a)。图 4(b)中,多气孔(疏松)试件应力曲线同图 4(a)中的趋势接近,但在拉伸试验早期即

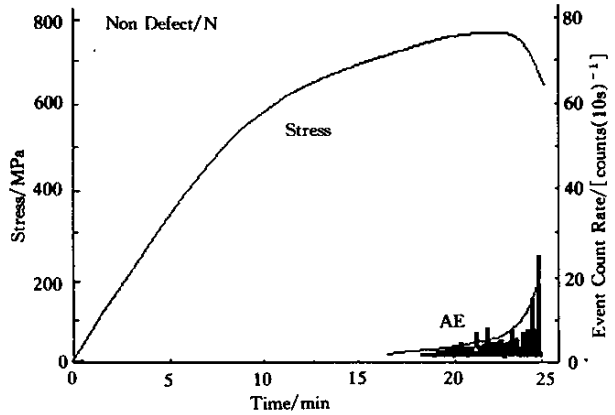
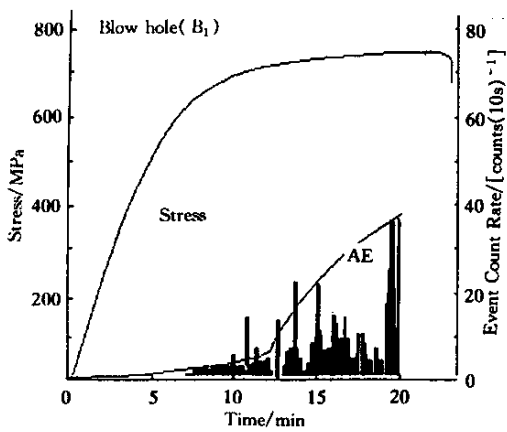
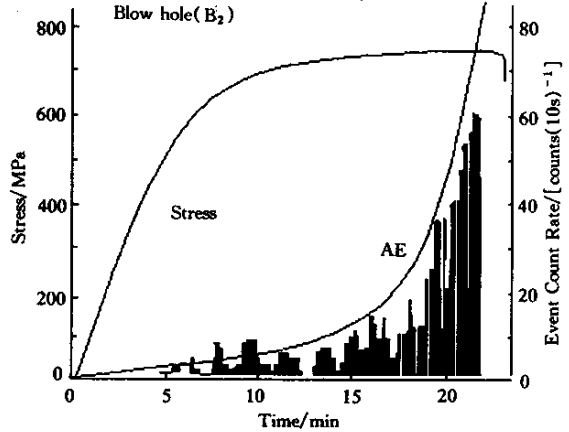


图 3 无缺陷试样声发射特性

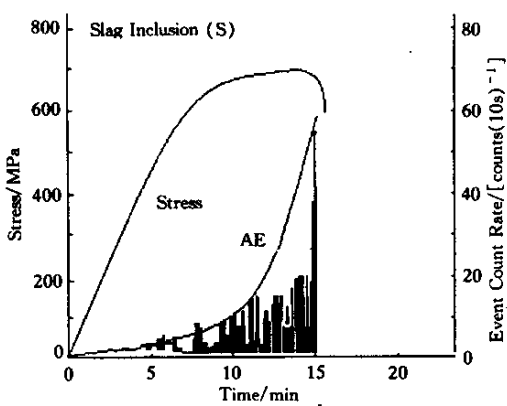
Fig. 3 Acoustic emission characteristics of defect-free specimen



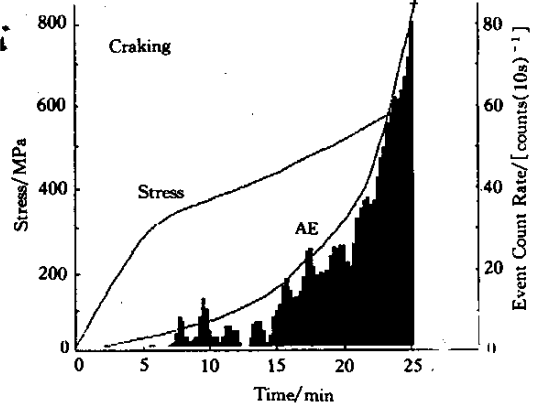
(a) 气孔



(b) 疏松



(c) 夹渣



(d) 裂纹

图 4 含缺陷试样的声发射特性

Fig. 4 Acoustic emission characteristic of defective samples

弹性变形阶段即出现 AE 事件,且 AE 事件持续时间较长,计数率较高,幅值较大。图 4(c)(有夹渣)中,在塑性变形早期即出现断裂,AE 事件出现较早且持续时间与具有气孔类型缺陷的情况相比较短,说明夹渣导致力学性能下降的作用比气孔更明显。图 4(d)(有微裂纹)中,弹性变形区较短,屈服应力值较低,在应力为 300 MPa 时即出现塑性变形并产生大量的 AE 事件。因此有微裂级缺陷的试件,AE 事件明显增多,使金属的力学性能大幅度下降,说明此种缺陷危害性较大。尤其在裂纹的尖端部位造成应力集中,随着应力的增加,裂纹尖端首先进入局部屈服状态,同时塑性变形尖端也逐渐变成圆形,当局部应力增大到使材质的应力强度因子达到断裂韧性值时,就会产生裂纹扩展。在塑性变形中,位错的滑移、塞积会产生大量低幅度声发射信号。材质内含有的碳化物等第二相或夹杂物质点也会因相界面分离或断裂产生高幅度的突发性声发射信号。当裂纹扩展时,材料即能产生突发性声发射信号。

## 4 结 论

(1) 根据声发射测试原理和信号峰值电压与材料形变过程中释放能量的关系,通过声发射总计数和声发射计数率的关系,提出了金属材料受力条件下微裂纹开裂的声发射参数与应力关系的数学模型。

(2) 利用所研制的声发射检测系统,研究了材料 ZG25 无缺陷与有气孔、疏松、夹杂、微裂纹 4 种缺陷的试件在应力作用下的声发射 AE 事件特性。试验结果表明,在塑性变形过程和断裂过程中,材料产生大量声发射活动,不同的缺陷类型具有不同的声发射特征,有裂纹的试件具有最高的声发射活动,且具有低应力声发射倾向的特征。

### 参考文献:

- [1] 袁振明,马羽宽,何泽云. 声发射技术及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1985.
- [2] 孔军. 声发射瞬态波形的数据采集处理与分析[D]. 北京:北方交通大学,1995.
- [3] 李路明. 声发射三角网络定位方法的研究[D]. 北京:清华大学,1994.
- [4] 何舒. 声发射 ICC 系统焊缝检测及小波模拟研究[D]. 长春:吉林工业大学信息学院,1999.
- [5] JANA E, BENZ G. Use of acoustic emission techniques for detection of discontinuities[J]. Materials Evaluation, 1998, 56(10):1215-1222.
- [6] MATSUYAMA K. AE field application for diagnosis of deteriorated concrete structure[Z]. Progress in Acoustic Emission VII. The Japanese Society for NDI, 1994: 299-304.

# 含不同缺陷的金属材料声发射特性

作者: [何舒](#), [马羽宽](#), [杨建波](#)

作者单位: [何舒\(吉林大学, 远程教育学院, 吉林, 长春, 130025\)](#), [马羽宽, 杨建波\(吉林大学, 通信工程学院, 吉林, 长春, 130025\)](#)

刊名: [吉林大学学报\(工学版\)](#) **ISTIC EI PKU**

英文刊名: [JOURNAL OF JILIN UNIVERSITY\(ENGINEERING AND TECHNOLOGY EDITION\)](#)

年, 卷(期): 2003, 33(4)

引用次数: 1次

## 参考文献(6条)

1. [袁振明, 马羽宽, 何泽云](#) [声发射技术及其应用](#) 1985
2. [孔军](#) [声发射瞬态波形的数据采集处理与分析](#)[学位论文] 1995
3. [李路明](#) [声发射三角网络定位方法的研究](#)[学位论文] 1994
4. [何舒](#) [声发射ICC系统、焊缝检测及小波模拟研究](#)[学位论文] 1999
5. [ANA E, BENZ G](#) [Use of acoustic emission techniques for detection of discontinuities](#) 1998(10)
6. [Matsuyama K](#) [AE field application for diagnosis of deteriorated concrete structure](#) 1994

## 相似文献(10条)

1. 期刊论文 [岳亚霖, 韦朋余, 张炜, 李盛华, YUE Ya-lin, WEI Peng-yu, ZHANG Wei, LI Sheng-hua](#) [船用金属材料声发射信号特性研究 -实验力学](#)2008, 23(6)  
 利用声发射技术对6种船用金属材料拉伸试验过程中产生的声发射信号进行了详细研究.通过对材料从弹性、屈服、强化直至破坏过程中的声发射信号参数统计分析,总结了船用金属材料拉伸过程中声发射信号事件数量、幅度、频率随拉力变化的分布规律,为在船用金属材料与结构缺陷中进行声发射检测的设备参数的配置、传感器的选择和危险等级的划分提供了基础数据.
2. 学位论文 [高虹](#) [基于小波分析的声发射信号处理](#) 2001  
 该文阐述了声发射技术的产生和发展,国内外声发射技术的发展状况,讨论了声发射信号产生的机理、不同材料的声发射特性以及声发射检测中的源定位等问题,提出了现有声发射源定位方法中存在的不足.在此基础上,通过对小波变换基本理论的分析与研究,提出了基于小波分析的声发射源定位方法,该方法基于模态声发射的理论,将声发射源定位建立在给定的波形模式和频率基础上,利用小波分析的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,对衰减的信号进行有效的补偿,通过设定相对于峰值的阈值和互相关方法计算时差,再进行声发射源定位.通过对实验中所获得的复合材料声发射信号进行相应处理计算,得出结果表明,应用上述方法能够有效减小声发射源定位的误差,提高定位精度.
3. 学位论文 [马加松](#) [岩石材料破坏的声发射研究](#) 2001  
 声发射技术是研究各材料及其结构力学性质的一种物理声学方法.当受载物体发生变形或破坏时,由于能量释放所产生的弹性波在固体内的传播称为声发射现象.自Kaise, J.(1953)发现了金属材料中凯瑟效应后,声发射技术作为评价结构完整性的无损检测(NDT)技术受到科学家的普遍关注.该文对各种不同岩石(砂岩、灰岩、泥岩、页岩、白云岩等)受载条件下的声发射试验,采集岩石及结构受载变形和破坏过程中的声发射特征参数,寻长岩石材料破裂及裂纹扩展时,所承载荷与声发射参数之间的关系,建立岩土类材料破坏AE判据.
4. 期刊论文 [张守苗, 席镇, 高宏, 贾园, Zhang Shouzhuo, Xi Zhen, Gao Hong, Jia Yuan](#) [金属材料类别对动态摩擦声发射参数影响的实验研究 -润滑与密封](#)2008, 33(8)  
 利用声发射技术研究了材料类别对动态摩擦状态的影响.结果表明:材料类别对摩擦产生的声发射信号有很大影响,动态摩擦产生的声发射信号的强弱与材料之间的硬度差有关,硬度差越大,摩擦产生的声发射信号的能量差别越大;声发射信号的能量可以反映摩擦学中的“犁沟效应”的差别.
5. 期刊论文 [刘炉山, 夏国旺](#) [应用声发射检测复合材料桨叶疲劳损伤的技术研究 -直升机技术](#)2003, ""(1)  
 随着材料技术的发展,复合材料在直升机上运用越来越广泛.由于复合材料的损伤模式与金属材料有很大的区别,因此,了解复合材料破坏判据对复合材料零部件的定寿具有决定性的作用.本文介绍了声发射技术的基本理论、应用现状和声发射技术在复合材料桨叶疲劳试验中的应用研究.
6. 期刊论文 [成建国, 毛汉领, 黄振峰, 黄云奇, CHENG Jian-guo, MAO Han-ling, HUANG Zhen-feng, HUANG Qi-yun](#) [金属材料声发射信号特征提取方法 -声学技术](#)2008, 27(3)  
 试图通过对声发射信号的检测实现对水轮机转轮叶片金属疲劳裂纹的在线监测.利用美国PAC公司SAMOS声发射检测系统采集到声发射的各种参数;针对大型水轮机现场环境的情况,选用了四种声发射信号.通过BP神经网络和模式识别结合的方法,设计特征提取器来提取金属材料疲劳声发射特征信号.比较神经网络输入参数对输出结果的灵敏度,选择出一些对分类识别最有效的特征参数;并采用可分离性判据进一步验证其正确性.最后,在13个声发射特征参数中,质心频率、计数、持续时间、上升时间、平均信号电平五个参数的特征最为显著,可以用于识别现场环境下的声发射信号.
7. 期刊论文 [刘国光, 程青蟾](#) [声发射技术及其在金属材料领域的应用 -上海金属](#)2001, 23(6)  
 声发射是一门正在发展的新技术.由声发射信号的特征可关联到金属材料的塑性形变、断裂、相变,以及铁磁性金属材料的磁畴运动.由此阐述了声发射技术在材料科学的研究,金属构件与设备完整性动态检测,以及制造过程监控中越来越广泛的应用.
8. 学位论文 [张磊](#) [非晶态化学镀Ni-P层的结合强度和稀土的影响](#) 1997
9. 期刊论文 [龚斌, 金文, 李兆南, 金志浩, GONG Bin, JIN Wen, LI Zhao-nan, JIN Zhi-hao](#) [基于小波变换的金属材](#)

## 料声发射特性研究 -石油化工高等学校学报2008, 21(1)

以Q235-B碳钢和0Cr18Ni9不锈钢为研究对象,分别对其在塑性变形和裂纹扩展时产生的声发射信号进行检测,运用小波变换分析检测信号来研究材料的声发射特性.结果表明,碳钢产生声发射信号经db5小波6级分解后,d5级信号占的能量比例最大,其峰值对应频率基本在166~176 kHz内,裂纹扩展时这一级信号所占能量比例较塑性变形时高;不锈钢产生声发射信号经同样变换后,d6级信号占的能量比例最大,其峰值对应频率基本在88~112 kHz内,裂纹扩展时这一级信号所占能量比例较塑性变形时高.

### 10. 学位论文 邱保文 应用磁声法无损检测铁磁材料应力和淬硬层深的研究 1996

该文提出了单比值法测定应力及双比值法测量淬硬层深度的稳定方法,为定量评定应力及淬硬层深度打下基础.

## 引证文献(1条)

### 1. 龚斌. 金文. 李兆南. 金志浩 裂纹尖端塑性区的声发射特性研究[期刊论文]-塑性工程学报 2007(6)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_jlgydxzrkxxb200304005.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_jlgydxzrkxxb200304005.aspx)

下载时间: 2010年6月2日