

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.07.001

断铅笔芯声发射实验信号研究^{*}

郭 力, 霍可可

(湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:针对断铅声发射实验信号应用广泛而又没有深入分析的现状,为了更深层次地揭示断铅声发射实验信号的特点,探究了不同分析方法下断铅声发射信号的差异。分别采用了经验模态分解和5层小波变换方法,将断铅声发射实验信号进行了分解重构,并对分解重构信号的时域和频域特征进行了剖析;经验模态分解采用相关系数法,得到了6个固有模态函数,对声发射信号进行了深入分析。研究表明:经验模态分解与小波变换能够将断铅信号的低频噪声信号分离出来,可准确提取铅芯断裂声发射特征信息;同时结合断铅声发射信号的短时傅里叶变换分析也发现了噪声分布在相近的频率范围内,进一步说明了经验模态分解与小波变换分离断铅信号中低频噪声信号的准确性。

关键词:声发射;断铅;小波变换;经验模态分解;短时傅里叶变换

中图分类号:TH878

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)07-0663-05

Acoustic emission signal processing based on breaking lead test

GUO Li, HUO Ke-ke

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Aiming at the present situation of wide application and no in-depth analysis of the acoustic emission experimental signal of pencil-lead breaking, in order to reveal the characteristics of pencil-lead break acoustic emission (AE) signal in a deeper level and to explore the difference of pencil-lead break AE signal under different analysis methods, empirical mode decomposition (EMD) and 5-layer discrete wavelet transform (DWT) were respectively used to decompose and reconstruct pencil-lead break AE signals. The time-domain and frequency-domain features of the decomposed and reconstructed AE signals were analysed. In the EMD 6 intrinsic modal functions were obtained by using the correlation coefficient method to analyse the AE signal in depth. The results indicate that low frequency noise in the AE signal is filtered and the lead fracture characteristic information can be accurately extracted by EMD and DWT. At the same time, the analysis of pencil-lead break AE by short-time Fourier transform also find that the noise is distributed in the similar frequency range, which further proves the accuracy of the low frequency noise filtered in the AE signal filtered. EMD and 5-layer wavelet transform are used to decompose and reconstruct pencil-lead break AE signal and the low frequency noise signal in the AE signal is filtered out, which can extract the lead fracture characteristic information. At the same time, the analysis of pencil-lead break AE by short-time Fourier transform also proves its accuracy.

Key words: acoustic emission; pencil-lead break; wavelet analysis; empirical mode decomposition(EMD); short time Fourier transform

0 引 言

声发射技术在磨削加工智能监测中起着越来越重要的作用,能够监测磨削砂轮状态、工件磨削烧伤、磨削裂纹、工件表面形貌等^[1]。为了保证声发射传感器

安装位置和与工作台的接触状态的合理,使磨削过程中系统能采集到良好的声发射信号,要做断铅笔芯声发射实验。

断铅试验是一种稳定、重复性高和可靠的验证方法。铅笔芯断裂产生的声发射信号是非常典型的突发

收稿日期:2017-11-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51475157)

作者简介:郭 力(1964-),男,湖南常德人,博士,教授,主要从事先进磨削声发射智能监测与磨削机床方面的研究。E-mail:guoliuhu8@163.com

型的声发射信号,具有信号稳定、频谱宽、可重复性强、易于实现的特点,是良好的模拟声发射源。由于断铅笔芯声发射信号属于非线性非平稳信号,包含的有用信号经常被干扰,所以要通过对断铅声发射信号的分析,分离干扰信号与有用信号,探究断铅声发射信号的时域、频域等特征。

文献[2]对断铅笔芯实验声发射信号进行了小波分析,认为可以通过信号小波分解重构把断铅声发射信号中的干扰噪声分离;文献[3]对断铅声发射信号进行了有限元模拟仿真分析;文献[4]用断铅试验分析了声发射信号在玻璃纤维复合材料板中的衰减和传播速度规律;文献[5]综述了强背景噪声下声发射信号降噪方法,包括小波分析、独立分量分析 ICA、经验模态分解 EMD;文献[6]应用经验模态分解 EMD 来分析刀具的磨损;文献[7-9]分析了声发射技术在磨削领域的研究新进展。

目前,对断铅声发射实验信号分析不深入,因此本文将应用小波分析、经验模态分解和短时傅里叶变换 3 种方法,对断铅声发射实验信号进行深入分析。

1 断铅实验

本文使用直径为 0.5 mm 的 HB 铅笔,铅芯伸长量为 2.5 mm,每次断铅时保证铅芯与试件表面夹角为 30°,并采用磁性夹具将声发射传感器固定在试件表面。采用美国物理声学公司 PAC 的 PCI-2 声发射系统,其 WSA 声发射传感器的工作频率范围为 100 kHz ~ 1 000 kHz,谐振频率为 125 kHz。声发射传感器和试件之间涂有耦合剂,目的是减少声发射信号在传感器和试件界面处过度散射和衰减。

试件是球墨铸铁 QT700-2 材料,做成一个大的平板。在试件上距离声发射传感器 30 mm 的位置按压铅笔铅使其断裂采集下发出的声发射信号。PAC 的 PCI-2 声发射系统中 AEwin 声发射信号采集系统的采样频率为 1 MHz,门槛为 40 dB,声发射前置放大器为 40 dB。PCI-2 声发射系统可以采集原始声发射信号,并且分析其特征参数。

声发射信号分析应用 Matlab 软件。

2 断铅声发射信号特征参数

本研究用 PCI-2 声发射系统测量得到的断铅笔芯声发射实验信号特征参数如表 1 所示。

表 1 断铅声发射信号特征

计数	能量	幅值/dB	RMS
2 125	1 023	71	0.006 8

由表 1 可知:断铅撞击中声发射信号计数为 2 125;断铅声发射信号能量为 1 023;其有效值为 0.006 8;声发射信号幅值为 71 分贝。

3 断铅声发射信号经验模态分解

经验模态分解(EMD)对信号的分解是依据信号数据自身的时间尺度特征来进行的,无须预先设定任何的基函数,这与建立在先验性的谐波基函数上傅里叶分解的小波基函数上的小波分解方法具有本质的差别,所以 EMD 方法在理论上可以应用于任何类型的信号的分解。鉴于经验模态分解在处理非线性非平稳信号的优势与断铅声发射信号的非线性非平稳特性,采用经验模态分解对断铅声发射信号进行分析处理。

断铅声发射实验原始信号的波形与频谱是非常典型的突发高衰减声发射信号。原始信号波形如图 1 所示。

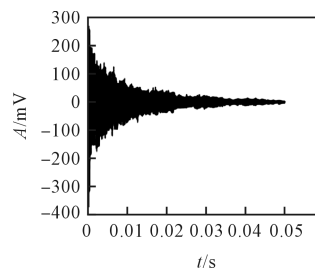


图 1 断铅声发射原始信号波形

原始信号频谱如图 2 所示。

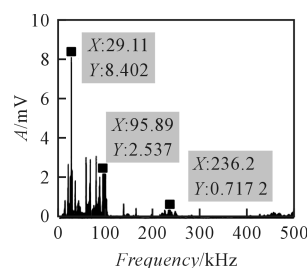


图 2 断铅声发射原始信号频谱

从波形上来看,断铅声发射原始信号在铅笔芯断裂的瞬间释放的能量较多,信号开始时刻幅值 259 mV,其后信号幅值快速以指数形式衰减。从频谱上来看,断铅声发射信号在 0 ~ 500 kHz 频率段上均有频率成分存在,主要能量集中在 100 kHz 以内,并且在 29 kHz 幅值最高;在 29 kHz、96 kHz 和 236 kHz 附近有频率集中,出现频率峰值。

从断铅声发射原始信号频谱上可以看到信号的总体频率信息,但是这些频率出现的时刻并不能很好地体现出来。为了能够将信号频率域与时域结合起来分析,采用经验模态法对断铅声发射原始实验信号进行分解。

对于断铅声发射原始信号,本研究利用经验模态

法分解得到了 15 个固有模态函数 (IMF), 分别为: $\text{imf1}, \text{imf2}, \dots, \text{imf15}$ 和一个残余分量 $r_n(t)$ 。为了表示固有模态函数和残余分量 $r_n(t)$ 与原始声发射信号的相关程度, 计算分析它们之间的相关系数, 如表 2 所示。

表 2 固有模态函数与原信号相关系数

序号 1	imf1	imf2	imf3	imf4	imf5	imf6
相关系数	0.427	0.335	0.500	0.476	0.337	0.130

由表 2 可以看出:

$\text{imf1} \sim \text{imf6}$ 与原始信号的相关性相对较大, 而 $\text{imf7} \sim \text{imf15}$ 和残余分量与原始信号的相关系数很小接近零是噪声, 因而固有模态函数 $\text{imf1} \sim \text{imf6}$ 中包含了断铅声发射信号全部信息。针对 $\text{imf1} \sim \text{imf6}$ 做进一步的分析, 观察断铅声发射信号的特征。

固有模态函数 $\text{imf1} \sim \text{imf6}$ 的波形如图 3 所示。

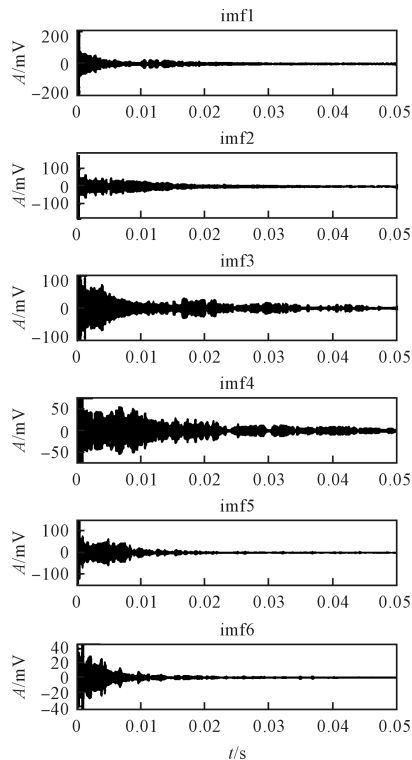


图 3 固有模态函数 $\text{imf1} \sim \text{imf6}$ 波形

固有模态函数 $\text{imf1} \sim \text{imf6}$ 频谱如图 4 所示。

从图中可以看出: 在不同的固有模态函数上, 其主要频率范围和波形幅值都不尽相同。

imf1 其波形幅值 A 是 239 mV 接近原始声发射信号的幅值, 并且出现在信号的开始时刻很快衰减, 其频率范围宽达 $0 \sim 500$ kHz, 但是有 3 处信号峰值 A 频率分别为 96 kHz、236 kHz 和 457 kHz, 与其他的固有模态函数相比在 100 kHz $\sim$ 500 kHz 上表现更加突出, 集中了断铅声发射信号高频部分的主要能量, 因而可以选择 imf1 作为断铅声发射高频信号特征的代表;

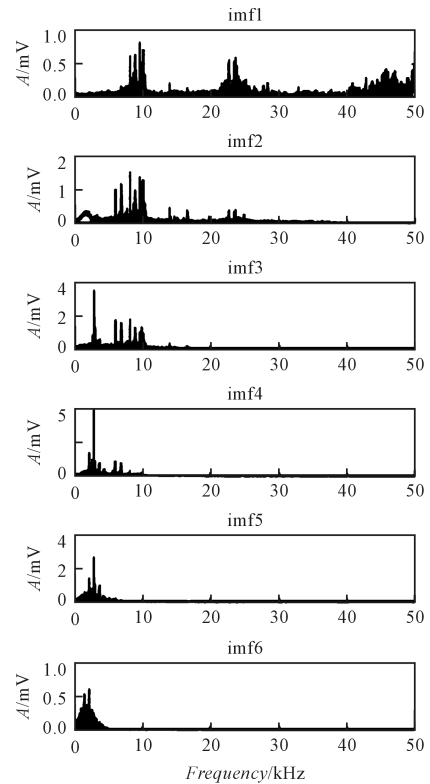


图 4 固有模态函数 $\text{imf1} \sim \text{imf6}$ 频谱

imf2 的波形幅值 184 mV, 并且出现在信号的开始时刻很快衰减, 它的频率在 $0 \sim 300$ kHz 范围, 但是主要集中在了 96 kHz 附近并且在 55 kHz $\sim$ 110 kHz 最为明显, 因而可以选择固有模态函数 imf2 作为断铅声发射信号 96 kHz 附近的信号特征的代表;

imf3 其波形幅值 105 mV, 主要频率 $0 \sim 110$ kHz, 在 29 kHz 附近与 96 kHz 附近均比较明显, 是断铅声发射信号;

固有模态函数 imf4 其幅值为 74 mV, 频率分布在 29 kHz $\sim$ 70 kHz, 是断铅声发射信号;

imf5 幅值为 143 mV, 频率分布主要在 29 kHz 附近, 它的重构信号作为断铅声发射信号 29 kHz 附近信号特征的代表;

imf6 其波形幅值 44 mV 较小, 而且它的频率主要集中在 30 kHz 以下, 由于这部分频率范围通常是噪声较多的频率段, 做背景噪声处理。

imf5 重构信号波形如图 5 所示。

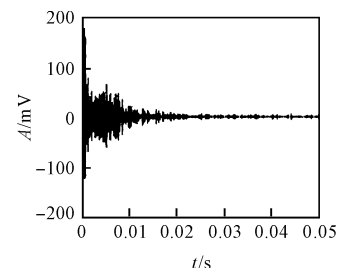


图 5 imf5 重构信号波形

频谱如图 6 所示。

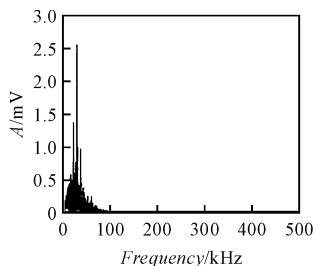


图 6 imf5 重构信号频谱

4 断铅声发射信号小波分析

断铅声发射信号是一种典型突发的非线性非平稳信号,其中包括的各种有用信息往往被干扰。小波变换可以将声发射信号在不同的尺度上进行分解与重构,实现在不同频率段上对应时域波形进行分析提取信号特征,排除噪声等干扰信息。小波变换分析是把信号通过一个低通滤波器和一个高通滤波器,分别得到信号的低频成分和低频成分。若在一次小波变换完成后,低频成分中仍含有高频成分,则对低频成分重复

上述过程,直到低频成分中不含高频成分。

小波变换的多分辨分析实际上是低通滤波。如果假设采样频率为 f_s ,对信号 $f(x)$ 进行 N 层二进离散小波分解则其第 i ($i=1,2,3,\dots,N$) 层的低频信号 a_i 与高频信号 d_i 的频带范围分别为 $[0]$ 、 $[f_s/2^{i+1}, f_s/2^i]$ 。

以 3 层小波分解为例,其声发射信号频带划分如图 7 所示。

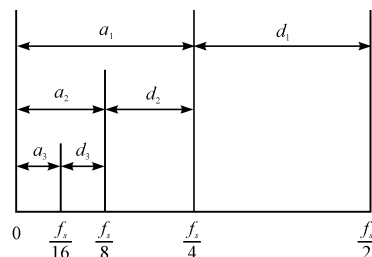


图 7 3 层小波分解频带划分

在 Matlab 小波工具箱中,本研究选用 db10 基本小波对采集到的断铅声发射信号进行 5 层离散小波分解,并重构。

小波变换断铅声发射信号的波形和频谱如图 8 所示。

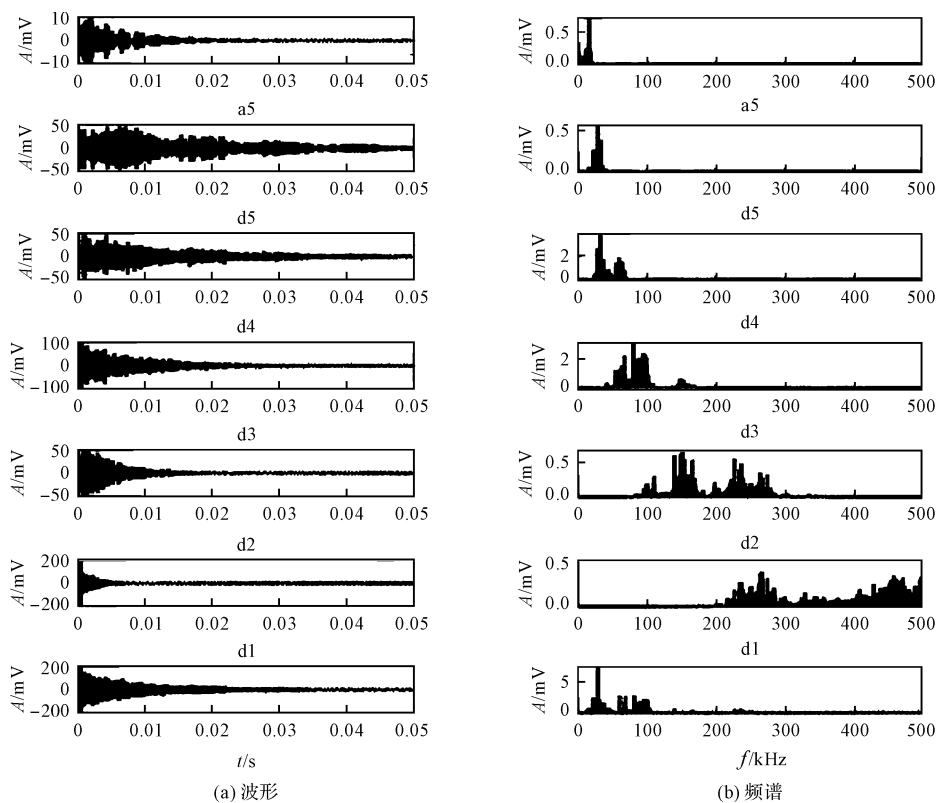


图 8 断铅声发射信号小波变换

S—原始信号; d1, d2, d3, d4, d5—第 1, 2, 3, 4, 5 层的重构高频信号; a5—第 5 层重构低频信号

断铅声发射信号采样频率,根据小波分解频带划分规律,理想状态下 a5, d5, d4, d3, d2, d1 重构信号包含的频率范围分别为: $0 \sim 15.625$ kHz, 15.625 kHz ~

31.25 kHz, 31.25 kHz ~ 62.5 kHz, 62.5 kHz ~ 125 kHz, 125 kHz ~ 250 kHz, 250 kHz ~ 500 kHz。

从图 2 原始信号的频谱中可以看出:

断铅声发射信号幅值 A 是 259 mV, 而频率主要集中在 10 kHz ~ 110 kHz 之间, 主要频率峰值为 29 kHz、96 kHz、236 kHz。

图 8 中 d1 重构信号波形幅值 A 是 276 mV, 频率主要分布在 200 kHz ~ 500 kHz, 峰值频率 265 kHz、453 kHz, 是主要断铅声发射信号特征;

d2 重构信号波形幅值 76 mV, 频率主要分布在 80 kHz ~ 300 kHz, 峰值频率 151 kHz、226 kHz, 是断铅声发射信号;

d3 重构信号波形幅值 142 mV, 频率主要分布在 40 kHz ~ 110 kHz, 峰值频率 81 kHz, 是主要断铅声发射信号特征;

d4 重构信号波形幅值 78 mV, 频率主要分布在 20 kHz ~ 70 kHz, 峰值频率 33 kHz, 也可能是噪声;

d5 重构信号波形幅值 65 mV, 频率主要分布在 15 kHz ~ 40 kHz, 峰值频率 29 kHz, 是噪声;

a5 重构信号波形幅值 16 mV, 频率主要分布在 7 kHz ~ 18 kHz, 峰值频率 15 kHz, 因为信号幅值太小是噪声。d1、d3 重构信号幅值较大比较重要, 尤其是 d3 重构信号应该是断铅声发射信号的主要内容。

小波分解重构声发射各层信号特征如表 3 所示。

表 3 小波分解重构声发射各层信号特征

声发射信号	波形幅值	频率分布范围	峰值频率
	/mV	/kHz	/kHz
s	259	10 ~ 110	29, 96, 236
a5	16	7 ~ 18	15
d5	65	15 ~ 40	29
d4	78	20 ~ 70	33
d3	142	40 ~ 110	81
d2	76	80 ~ 300	151, 226
d1	276	200 ~ 500	265, 457

由表 3 中可见:

d1、d3 重构信号幅值较大比较重要, 尤其是 d3 重构信号应该是断铅声发射信号的主要内容。

同时, 原始断铅实验声发射信号中的主要频率 96 kHz 和 236 kHz 段主要集中在 d3 和 d2 重构信号上, 因而这 2 个重构信号包含较多的断铅实验声发射信号有用信息。

5 断铅声发射信号 STFT 分析

短时傅里叶变换 (STFT) 可以分析信号的频率、幅

值与时间之间的关系。断铅声发射信号短时傅里叶变换时频谱如图 9 所示。

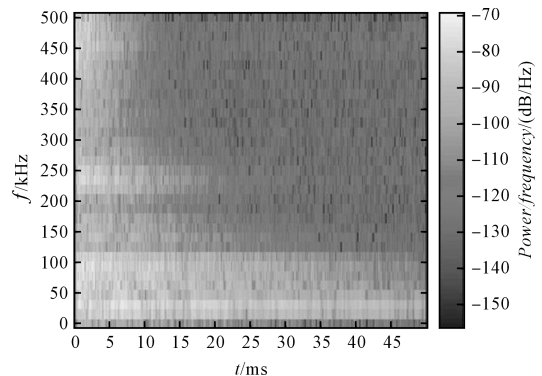


图 9 断铅声发射信号短时傅里叶变换

由图 9 可以看出:

信号有 4 个明显的频率段随着时间轴分布差异明显。

第 1 个频率段 400 kHz ~ 500 kHz 和第 2 个频率段 220 kHz ~ 280 kHz 为较高频率段, 在 0 ~ 5 ms 内分布最多, 随后快速衰减 20 ms 后基本消失。这两个频率段在断铅声发射原始信号频谱中幅值较大, 并且只在铅笔芯断裂的初始时刻显著;

第 3 个频率段为 40 kHz ~ 120 kHz 中频段, 它随着铅笔芯断裂产生并且在 0 ~ 25 ms 内持续较长的一段时间再衰减, 在断铅声发射原始信号频谱中这个频段处于重要的位置, 幅值较大, 可以认为这是断铅声发射信号的主要内容;

第 4 个阶段为 10 kHz ~ 40 kHz 的低频频率段, 它在整个声发射信号持续过程中都存在较大的幅值而不随时间衰减, 而这可能是噪声。

6 结束语

利用小波分析、经验模态分解 EMD 和短时傅里叶变换, 本研究对断铅笔芯声发射实验信号进行了综合分析。断铅过程先有弹性变形, 然后脆性断裂, 这个过程有内部缺陷释放, 会产生包括高频信息的宽频声发射信号, 然后声发射信号就是以指数快速衰减, 所以可能声发射信号 STFT 分析中 20 ms 之前其实是铅笔芯弹性变形和脆性断裂的阶段。原始断铅声发射信号是断铅信号、噪音等信号叠加的综合结果。

(下转第 684 页)

本文引用格式:

郭力, 霍可可. 断铅笔芯声发射实验信号研究[J]. 机电工程, 2018, 35(7): 663-667, 684.

GUO Li, HUO Ke-ke. Acoustic emission signal processing based on breaking lead test[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(7): 663-667, 684.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>