

# 基于小波能谱系数的耐火材料损伤分析

赵尧杰<sup>1</sup>, 王志刚<sup>1,2</sup>, 刘昌明<sup>1</sup>, 孔建益<sup>1</sup>, 韩兵强<sup>2</sup>

(1. 武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室, 湖北 武汉, 430081;

2. 武汉科技大学耐火材料与高温陶瓷国家重点实验室培育基地, 湖北 武汉, 430081)

**摘要:**为弄清镁碳质耐火材料在加载破坏过程中的损伤演化, 利用小波变换对不同损伤阶段的典型声发射信号进行分析。采用小波特征能谱系数描述信号能量在各个频率范围的分布情况, 得出耐火材料不同损伤阶段的破坏形式以及各损伤阶段所呈现出来的特性。结果表明, 不同损伤阶段的信号能量分布特征存在明显的差异, 利用小波特征能谱系数分析法能够有效地提取声发射源信号的特征并确定耐火材料的损伤类型。

**关键词:**镁碳质耐火材料; 声发射; 小波变换; 能谱系数

**中图分类号:** TQ175.1   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1674-3644(2013)01-0032-04

耐火材料是多孔、多相的微观非均质材料, 其微观结构的损伤形式多样, 产生的声发射信号波形复杂, 且干扰噪声多, 因此准确检测其声发射源比较困难。声发射(acoustic emission, AE)技术是一种新型的无损检测方法, 其优点突出, 已得到广泛应用。利用声发射技术对耐火材料的微观损伤机理进行研究, 通过对声发射信号的分析以确定材料微观损伤的声发射源信号特征, 这对研究耐火材料的不同微观损伤模式及其整个损伤演化过程具有重要的意义。

声发射信号是一种时变非平稳信号, 具有不可预知性、突发瞬态性、源信号和干扰噪声多样性等特点<sup>[1]</sup>。传统的信号分析方法在将信号进行时频域变换时会导致信号中许多重要信息的丢失和平均化, 而时频域分析方法则是一种能适应时变非平稳信号的处理方法。在众多的时频域分析方法中, 小波变换在时域和频域同时具有良好的局部分析特性, 非常适合于声发射信号的分析<sup>[2-3]</sup>。Suzuki等<sup>[4]</sup>用快速傅里叶变换、短时傅里叶变换和小波分析等3种方法对复合材料微观破坏模式的声发射信号进行研究, 发现小波分析能够提供更多的声发射源信息。小波特征能谱系数能表征信号的能量在小波分解的各个频率范围内的分布情况。信号在不同频带上的能量分布不同, 必然是因为信号中包含的声发射源信息不同。因此,

可以选择小波特征能谱系数来表征声发射信号的特征<sup>[5]</sup>。

本文对镁碳质(MgO-C)耐火材料在加载破坏过程中产生的声发射信号进行小波变换, 通过研究小波能谱系数及分析信号的能量分布, 提取不同声发射源信号的特征, 从而区分耐火材料在加载过程中的不同损伤模式以及各损伤阶段所呈现出来的特性。

## 1 小波变换及其能谱系数

### 1.1 小波变换

小波变换的基本出发点是通过寻找一组小波基函数, 对信号进行一定形式的转换后再对信号进行分析处理<sup>[6]</sup>。设声发射信号为  $f(n)$ , 利用小波分析对其进行  $J$  尺度的分解与重构, 从而得到  $J+1$  个频率区间的分量, 即

$$f(n) = A_J f(n) + D_J f(n) + D_{J-1} f(n) + \dots + D_1 f(n) \quad (1)$$

式中:  $D_j f(n)$  为第  $j$  ( $j=1, 2, \dots, J$ ) 次小波分解后高频成分的重构信号;  $A_J f(n)$  为第  $J$  次小波分解后低频成分的重构信号。

### 1.2 小波特征能谱系数

小波分析能把信号分解成不同的尺度分量, 各尺度分量代表不同的频率范围, 信号在不同分解尺度上的信息分布情况可以通过不同分解尺度

收稿日期: 2012-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075310); 教育部科学技术研究重点项目(2111115)。

作者简介: 赵尧杰(1986-), 男, 武汉科技大学硕士生。E-mail: wust\_zyj@126.com

通讯作者: 王志刚(1973-), 男, 武汉科技大学教授, 博士生导师。E-mail: wzgwy@126.com

上信号的能量特征反映出来。因此,本文根据下式定义每个小波分解分量的能量<sup>[5]</sup>:

$$\begin{cases} E_j^D f(n) = \sum_{n=1}^N (D_j f(n))^2, j=1,2,\dots,J \\ E_j^A f(n) = \sum_{n=1}^N (A_j f(n))^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $E_j^A f(n)$  为信号在分解尺度  $J$  上的低频信号分量的能量;  $E_j^D f(n)$  为信号在分解尺度  $j$  上的高频信号分量的能量。

信号的总能量定义为:

$$E f(n) = E_j^A f(n) + \sum_{j=1}^J E_j^D f(n) \quad (3)$$

低频信号和高频信号的小波特征能谱系数为:

$$\begin{cases} K_j^D = \frac{E_j^D f(n)}{E f(n)}, j=1,2,\dots,J \\ K_j^A = \frac{E_j^A f(n)}{E f(n)} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $K_j^A$  为信号在  $J$  尺度上的低频成分的小波特征能谱系数;  $K_j^D$  为信号在  $j$  尺度上的高频成分的小波特征能谱系数。

## 2 耐火材料 AE 信号的特征提取

### 2.1 试验研究

试验对象为镁碳质耐火材料,以烧结镁砂为骨料、镁砂细粉和石墨及金属铝粉为基质以及树脂为结合剂而制成。在样本的制作过程中,按照一定的比例取各种原料在混碾机中进行搅拌混合,再采用压力试验机压制成型,成型压力为 150 MPa。压制成型的试件在恒温鼓风干燥箱中进行烘烤,热处理温度为 110 °C,保温时间为 24 h,试件最终尺寸为 125 mm×25 mm×25 mm。

图 1 所示为 MgO-C 质耐火材料的声发射试验原理图。采用示差高温应力应变试验机进行三点弯曲试验,加载率设为 0.15 N/(m<sup>2</sup>·s),同时运用声发射采集系统 AEWin 对整个试验过程中材料破坏所产生的声发射信号进行记录。探头与试件之间用凡士林作耦合剂,并用胶带将探头固定在试件表面上,设置前置放大器增益为 40 dB,

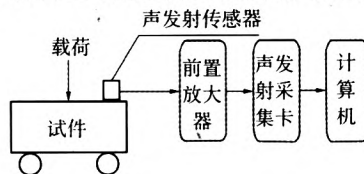


图 1 MgO-C 质耐火材料声发射试验原理图

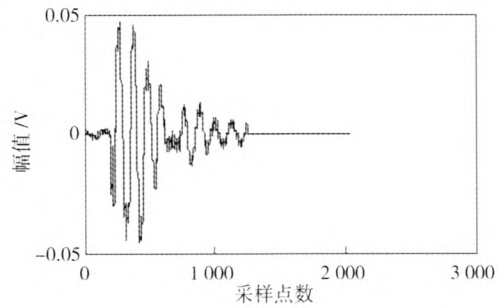
Fig.1 Schematic diagram of acoustic emission for MgO-C refractory

信号采集的阈值为 50 dB。

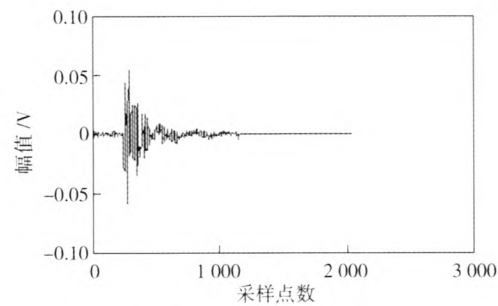
### 2.2 AE 信号的小波特征能谱系数

镁碳质耐火材料的加载损伤过程基本上分为 4 个阶段:起始损伤阶段、损伤缓慢发展阶段、损伤逐渐加剧阶段和试件整体断裂阶段。图 2 所示为各损伤阶段镁碳质耐火材料的典型声发射信号波形图。

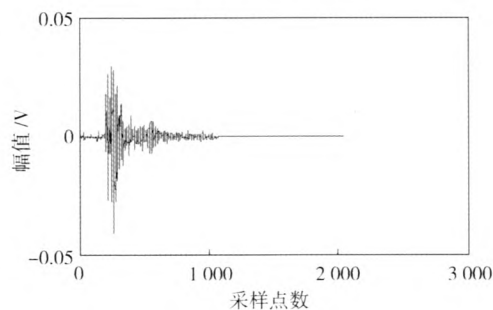
利用小波特征能谱系数分析方法对不同损伤



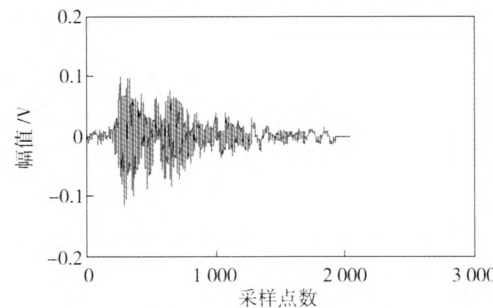
(a) 起始损伤阶段



(b) 损伤缓慢发展阶段



(c) 损伤逐渐加剧阶段



(d) 试件整体断裂阶段

图 2 各损伤阶段 MgO-C 质耐火材料的 AE 信号波形  
Fig.2 AE signals of MgO-C refractory during damage stages

阶段镁碳质耐火材料的 AE 信号进行处理,可以得到不同损伤阶段信号的能量分布情况。首先对声发射信号进行分解与重构,然后采用小波特征能谱系数分析法对各分解尺度的信号分量进行处理。根据小波基函数的选择原则,即选取的小波基应具有一定的冲击特性和近似指数衰减性质,同时能满足离散小波变换要求、时域紧支性要求和突出信号奇异性要求,因此本研究选用 db8 小波基,分解尺度  $J=7$ ,采样频率  $f_s=1$  MHz。将信号经过 7 层小波分解之后得到 8 个频率范围的

信号分量,每个频率范围的计算公式为:

$$\left[0, \frac{f_s}{2^{j+1}}\right], \left[\frac{f_s}{2^{j+1}}, \frac{f_s}{2^j}\right], j = J, J-1, \dots, 1 \quad (5)$$

且有  $A_j f(n) \in \left[0, \frac{f_s}{2^{j+1}}\right]$ ;  $D_j f(n) \in \left[\frac{f_s}{2^{j+1}}, \frac{f_s}{2^j}\right]$ 。

计算得到小波分解尺度和各个频率范围的对应关系如表 1 所示。

利用式(2)~式(4)计算信号每一分解尺度的能量占信号总能量的百分比,得到镁碳质耐火材料每一损伤阶段信号的小波特征能谱系数分布,如表 2 所示。

表 1 小波分解尺度及其频率范围

Table 1 Wavelet decomposition scales and frequency ranges

小波分解尺度	A7	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1
频率范围/kHz	0~3.9	3.9~7.8	7.8~15.6	15.6~31	31~62.5	62.5~125	125~250	250~500

表 2 各损伤阶段的 AE 信号经 7 层小波分解后的特征能谱系数分布

Table 2 Energy spectrum coefficient distribution of AE signals during damage stages

损伤阶段	能谱系数分布/%							
	A7	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1
起始损伤	1.71	8.65	85.70	1.09	1.20	1.52	0.07	0.06
损伤缓慢发展	2.70	1.20	1.54	5.57	81.63	5.89	1.15	0.32
损伤逐渐加剧	0.22	0.07	0.10	0.32	14.07	60.83	18.45	5.94
试件整体断裂	0.59	2.48	9.73	1.33	14.60	46.08	24.75	0.44

### 3 损伤类型分析

MgO-C 质耐火材料的微观结构相当复杂,其内部含有微孔洞、微裂纹等原始缺陷。它由镁砂骨料、基质及二者之间的界面组成,其中基质又是由石墨、镁砂细粉、各种添加剂及结合剂构成。基质的组成与结构以及基质与镁砂骨料之间不同的黏结强度对耐火材料的整体性能有很大的影响。在耐火材料的各组成成分中,颗粒通常是经过高温煅烧后破碎而成,具有较高的密度与强度,基质相的致密程度、强度及抵抗侵蚀能力都比界面和颗粒差。当 MgO-C 质耐火材料受载破坏时,通常是基质先破坏。微裂纹首先在基质中出现,随后逐步向基质与颗粒之间的界面相中扩展。强度高的材料在受载破坏时产生的 AE 信号频率通常较高。基于以上分析,结合图 2、表 1 和表 2 中的数据可以得出:

(1) 试验初期为材料的起始损伤阶段,当材料受到的外载荷增加到一定程度时,其原始缺陷周围首先产生少量微裂纹。图 2(a) 所示为起始损伤阶段产生的低频声发射信号,由表 2 可见,其能量主要集中于 D6 频段,占信号总能量的 85% 以上。此阶段的损伤形式为原生微裂纹处的基体开裂,对应的破坏频率为 7.8~15.6 kHz。

(2) 损伤缓慢发展阶段,材料内部的基质中不

断出现新的裂纹,这些微裂纹会在基质中逐步扩展、传播。图 2(b) 中的声发射信号在整个加载损伤过程中出现的次数很多,主要集中于损伤缓慢发展到试件断裂的过程中。由表 2 可见,信号的能量主要分布在 D4 频段上,占信号总能量的 81% 以上。此阶段主要为基质裂纹扩展这种单一的损伤形式,对应的破坏频率为 31~62.5 kHz。

(3) 当材料破坏进入到损伤逐渐加剧阶段后,微裂纹除了继续在基质中扩展以外,还逐步向界面相中延伸、扩展,使界面与颗粒之间出现剥离。这一阶段的声发射信号能量主要集中于 D3 频段,其次是 D2、D4 频段,位于这 3 个频段上的信号能量占信号总能量的 93% 以上。这表明此阶段为基质裂纹扩展和界面开裂的混合损伤形式,损伤形式复杂。破坏频率处于中高频段,其中基质裂纹扩展对应的破坏频率为 31~62.5 kHz,界面开裂对应的破坏频率则为 62.5~250 kHz。

(4) 在试件整体断裂的瞬间,破坏所产生信号的能量分布于低频到高频的多个频段上,表明在试件断裂瞬间同时发生了基质损伤和界面损伤。这一阶段的破坏较为复杂,属于多种损伤形式的叠加。

综上所述,由于具有复杂的微观结构,镁碳质耐火材料在加载破坏过程中出现了多种损伤形式。另外,材料中各成分的黏结形式和强度存在

差异,导致同一种损伤形式对应的破坏频率也不完全相同。因此,基质损伤和界面损伤都各自对应一定的损伤频带范围。

#### 4 结语

本文通过对声发射信号进行同步监测,运用小波特征能谱系数分析法对不同损伤阶段的声发射信号进行处理,分析了镁碳质耐火材料的损伤类型。在加载破坏过程中,镁碳质耐火材料的损伤类型有基质损伤和界面损伤。其中,基质损伤包括原生微裂纹处基体开裂(破坏频率为7.8~15.6 kHz)和基质裂纹扩展(破坏频率为31~62.5 kHz),界面损伤为界面开裂(破坏频率为62.5~250 kHz)。

利用小波变换能够有效提取声发射源信号的特征,并且采用小波特征能谱系数分析法可以简单、直观地描述不同声发射源信号的特征分布,从而可以确定镁碳质耐火材料的不同损伤模式以及各损伤阶段所呈现出来的特性,并为镁碳质耐火

材料损伤声发射信号的模式识别奠定基础。

#### 参 考 文 献

- [1] 耿荣生. 声发射信号处理和分析技术[J]. 无损检测, 2002, 24(1): 23-28.
- [2] Terchi A, Au Y H J. Acoustic emission signal processing[J]. Measurement and Control, 2001, 4(8): 240-244.
- [3] 钱华明, 王雯升. 遗传小波神经网络及在电机故障诊断中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(3): 81-86.
- [4] Hiroaki Suzuki, Tetsuo Kinjo, Mikio Takemoto, et al. Fracture-mode determination of glass-fiber composites by various AE processing[C]//Progress in Acoustic Emission VIII: Proceedings of the 13th International Acoustic Emission Symposium. Nara, Japan: The Japanese Society for NDI, 1996: 47-52.
- [5] 张平. 声发射检测信号处理新技术[D]. 北京: 清华大学, 2002.
- [6] 彭玉华. 小波变换与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

### Refractory damage analysis based on energy spectrum coefficients of wavelet transform

Zhao Yaojie<sup>1</sup>, Wang Zhigang<sup>1,2</sup>, Liu Changming<sup>1</sup>, Kong Jianyi<sup>1</sup>, Han Bingqiang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. The State Key Laboratory Breeding Base of Refractories and Ceramics, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

**Abstract:** To study the damage evolution of magnesia carbon refractory material in the loading damage process, the characteristics of typical acoustic emission (AE) signals are analyzed by means of the wavelet transform technique. The energy spectrum coefficients are used to describe the energy distribution of AE feature signals in each frequency band, and the damage form and signal characteristics in each damage phase are derived. The analysis shows that there is a significant difference in energy distribution of signals between various damage stages, and the energy spectrum coefficients of wavelet transform is effective in extracting the characteristics of AE resources and studying the various damage types of refractory materials.

**Key words:** MgO-C refractory; acoustic emission; wavelet transform; energy spectrum coefficient

[责任编辑 尚 晶]

# 基于小波能谱系数的耐火材料损伤分析

作者: [赵尧杰](#), [王志刚](#), [刘昌明](#), [孔建益](#), [韩兵强](#), [Zhao Yaojie](#), [Wang Zhigang](#), [Liu Changming](#),  
[Kong Jianyi](#), [Han Bingqiang](#)

作者单位: [赵尧杰, 刘昌明, 孔建益, Zhao Yaojie, Liu Changming, Kong Jianyi \(武汉大学冶金装备及其控制教育部重点实验室, 湖北武汉, 430081\)](#), [王志刚, Wang Zhigang \(武汉大学冶金装备及其控制教育部重点实验室, 湖北武汉, 430081; 武汉大学耐火材料与高温陶瓷国家重点实验室培育基地, 湖北武汉, 430081\)](#), [韩兵强, Han Bingqiang \(武汉大学耐火材料与高温陶瓷国家重点实验室培育基地, 湖北武汉, 430081\)](#)

刊名: [武汉大学学报 \(自然科学版\)](#) 

英文刊名: [Journal of Wuhan University of Science and Technology \(Natural Science Edition\)](#)

年, 卷(期): 2013, 36(1)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_whkjdxxb201301008.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_whkjdxxb201301008.aspx)