

涂层接触疲劳损伤过程中的声发射小波分析

Acoustic Emission Wavelet Analysis of Coating During Contact Fatigue Damage Process

张志强^{1,2}, 李国禄¹, 王海斗², 徐滨士², 朴钟宇²

(1 河北工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300130;

2 装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

ZHANG Zhi-qiang^{1,2}, LI Guo-lu¹, WANG Hai-dou², XU Bin-shi², PIAO Zhong-yu²

(1 School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology,

Tianjin 300130, China; 2 National Defense Key Lab for Remanufacturing Technology,

Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

摘要: 采集铁基合金涂层在不同接触疲劳损伤阶段的声发射信号, 并采用 dB10 基本小波对其进行 5 层小波分解和重构, 分析了疲劳损伤声发射信号的波形和频率特征。结果表明: 裂纹萌生阶段的原始声发射信号以连续型为主, 裂纹的稳定扩展阶段以混合型为主, 裂纹的失稳扩展阶段以突发型为主; 通过小波变换实现了将疲劳损伤声发射信号与干扰波分离, 获得了高信噪比的疲劳损伤特征信息; 在不同的疲劳损伤阶段, 声发射信号的频率分布各不相同。随着疲劳损伤的加剧, 各层的波形幅值呈增大的趋势, 并且疲劳损伤频率分布范围也更加广泛。

关键词: 接触疲劳; 小波分析; 声发射信号; 损伤诊断

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2012)09-0048-06

Abstract: Acoustic emission (AE) signals during different contact fatigue damage phases of Fe-based alloy coating were collected. The signals were five-layer decomposed and reconstructed by dB10 wavelet. Characteristics of waveform and frequency of AE signals during fatigue damage were analysed. The results show that continuous type of untreated AE waveform is dominant during crack initiation phase, then mixed type is dominant during crack stable growth phase, and burst type is dominant during crack unstable growth phase. That separation fatigue damage signals from interference waves by wavelet transform was achieved, and fatigue damage signals of improved signal-to-noise ratio were obtained. Distribution of frequency is different during different fatigue damage phases, and the more severe of fatigue damage, the more extensive of frequency distribution and the larger of waveform amplitude in every layers.

Key words: contact fatigue; wavelet analysis; acoustic emission signal; damage diagnosis

等离子喷涂技术是以等离子弧为热源的热喷涂技术, 已被广泛应用于修复疲劳损伤表面并延长零件使用寿命^[1,2]。研究等离子修复涂层的接触疲劳损伤过程并对其进行损伤诊断具有重要的实际应用价值^[3-7]。涂层滚动接触疲劳损伤过程主要包括裂纹的萌生、稳定扩展、失稳扩展, 直到涂层材料的断裂而最终导致点蚀、剥落失效几个典型的阶段。采用声发射仪器采集、分析声发射信号并利用声发射信号诊断材料损伤程度是一种新型的、高灵敏度的无损检测技术^[8,9]。由于涂层接触疲劳损伤声发射信号本身属于非平稳信号, 声发射源也较为复杂, 包含损伤特征的突变信号往往被噪声等环境信号所干扰, 因此对其进行

故障特征提取和诊断比较困难。小波变换是为了克服傅里叶变换的局限性而提出的一种时频分析方法, 具有良好的时频局部特性, 能够反映非平稳信号在局部范围内的特征, 是信号奇异性检测的有力工具^[10-14]。

本工作采用超音速等离子喷涂技术制备铁基自熔剂合金涂层, 以球盘式接触疲劳试验机为平台在线采集了涂层接触疲劳损伤过程中的声发射信号, 通过小波变换对涂层不同接触疲劳损伤阶段的声发射信号在不同尺度上进行分解和重构, 实现对其全频带上进行多个层次的划分, 由粗及细地对信号进行逐步观察和分析, 提取了包含损伤特征的波形和频率特征, 实现了对涂层接触疲劳损伤过程进行诊断和分析的目的。

1 实验方法

1.1 涂层的制备

采用 HEPJet 型高效能超音速等离子喷涂设备制备涂层,涂层材料为 Fe 基自熔剂合金,粉末形貌如图 1 所示,粉末呈规则的圆球形,颗粒大小比较均匀,粒子直径在 $50\sim 60\mu\text{m}$ 之间,这为充分熔化及获得低孔隙、高致密度涂层提供了保证。同时,均匀的球形粉末流动性好,从而提高喷涂效率。Fe 基合金成分如下: $w(\text{Cr}) = 13.6\%$, $w(\text{B}) = 1.6\%$, $w(\text{Si}) = 1.1\%$, $w(\text{C}) = 0.15\%$, $w(\text{Fe}) = 83.55\%$ 。实验用基体材料为淬火 45[#] 钢, $\text{HV}_{0.1} = 300\sim 400$ 。基体试样为圆环状,外径、内径及高度分别为 60, 30, 25mm,端面磨光处理。喷涂前先对基体进行丙酮清洗,端面进行棕刚玉喷砂粗化。为提高涂层与基体的结合强度,采用 AlSi 合金打底,合金成分如下: $w(\text{Al}) = 84.9\%$, $w(\text{Si}) = 15.1\%$ 。Fe 基合金工作层和 AlSi 合金打底层厚度分别控制在 $450\sim 500\mu\text{m}$ 和 $50\sim 70\mu\text{m}$,经过磨床加工后涂层厚度分别控制在 $200\sim 250\mu\text{m}$ 和 $50\sim 70\mu\text{m}$ 之内,涂层表面粗糙度 R_a 为 $0.5\sim 0.6\mu\text{m}$ 。Fe 基合金涂层的微观结构形貌如图 2 所示,可以看出涂层结构比较致密,但在涂层中存在少量的孔隙,并且在沉积粒子边界之间存在少量的微观裂纹,这些微缺陷的存在将严重影响涂层的抗接触疲劳性能。采用基于灰度分析的方法^[15]对涂层的孔隙率进行测定,测得涂层平均孔隙率为 1.32%。

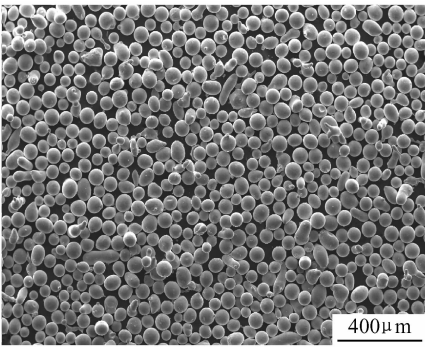


图 1 铁基合金粉末 SEM 形貌

Fig. 1 SEM morphology of Fe-based alloy powders

1.2 接触疲劳实验及信号的采集

采用 YS-1 型球盘式滚动接触疲劳试验机对涂层进行接触疲劳实验。试验机采用杠杆加载,通过计算本次实验涂层承受的最大赫兹接触应力为 1.84GPa,最大接触半径为 $161\mu\text{m}$ 。采用 11 球推力轴承(51306)作为配对摩擦副,转速受驱动电机控制,由速度传感器在线监测,本次实验转速为 2000r/min。为了尽可能

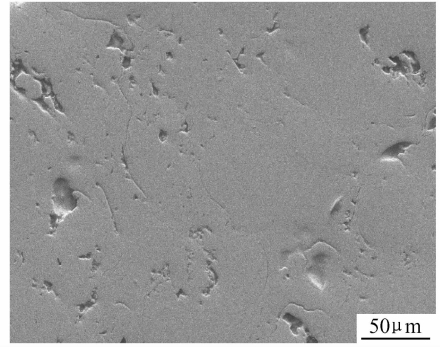


图 2 Fe 基合金涂层表面微观结构 SEM 形貌

Fig. 2 SEM surface microstructure of Fe-based alloy coating

获得低衰减的声发射信号,借助夹具将发射传感器直接安装到被测试样的侧面。使用 PCI-2 声发射检测系统对涂层接触疲劳损伤过程的声发射信号进行采集。采用的传感器为 Nano30 型压电式传感器。信号采样率为 1Mps,前置放大器放大额度为 40dB,阈值值设定为 45dB。

1.3 小波变换理论

涂层疲劳损伤声发射信号能量较弱,属于非平稳信号,被淹没在噪声中不易分辨。小波变换具有多尺度特性,可以对信号进行不同尺度的分解和重构,获取信号不同尺度的细节信息,便于对信号波形和频率特征进行分析。

小波函数的确切定义为:设 $\varphi(t) \in L^2(R)$ 为平方可积函数,若其傅里叶变换 $\hat{\varphi}(\omega)$ 满足条件:

$$C_{\varphi} = \int_R \frac{|\hat{\varphi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

则称 $\varphi(t)$ 为一个基本小波或母小波。式(1)为小波函数的可容许条件。将母函数 $\varphi(t)$ 经伸缩和平移后得:

$$\varphi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right), a, b \in R; a \neq 0 \quad (2)$$

式中: a 为尺度因子; b 为平移因子,称为 $\varphi_{a,b}(t)$ 依赖于参数 a, b 的小波基函数。由于 a 和 b 是连续变化的参数,因此称 $\varphi_{a,b}(t)$ 为连续小波基。将任意 $L^2(R)$ 空间中的函数 $f(t)$ 在小波基下展开,称其为函数 $f(t)$ 的连续小波变换,其表达式为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_R f(t) \varphi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

其重构公式(逆变换)为:

$$f(t) = \frac{1}{C_{\varphi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (4)$$

在实际运用中,尤其是在计算机上实现,连续小波必须加以离散化。通常,连续的尺度因子 a 和平移因子 b 的离散化公式分别取作: $a = a_0^j, b = ka_0^j b_0, j \in Z$,

其中 a_0, b_0 为扩展步长, 对应的离散小波函数基 $\varphi_{j,k}(t)$ 为:

$$\varphi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \varphi(a_0^{-j} t - kb_0) \tag{5}$$

函数 $f(t)$ 离散小波变换表达式为:

$$W_f(j,k) = \int_R f(t) a_0^{-j/2} \varphi^*(a_0^{-j} t - kb_0) dt \tag{6}$$

离散小波变换的重构公式(逆变换)为:

$$f(t) = \sum_j \sum_k W(t) \varphi_{j,k}(t) \tag{7}$$

2 实验结果与分析

本研究采用 dB10 基本小波对涂层不同疲劳损伤阶段的声发射信号进行 5 层小波分解和重构。S 为原始疲劳损伤信号, d 代表高频信息, a 代表低频信息。d1, d2, d3, d4, d5 和 a5 分别表示第 1, 2, 3, 4, 5 层细节信号, d1, d2, d3, d4, d5 与 a5 层重构信号的频率范围分别为 500~1000, 250~500, 125~250, 62.5~125, 31.25~62.5, 0~31.25kHz。国内外研究表明, 涂层

的接触疲劳损伤频率主要分布在 50~1000kHz 范围内, 由于涂层接触疲劳损伤的声发射源极为复杂, 包括涂层内部微缺陷(孔隙、层间裂纹、未熔粒子等)、裂纹的萌生和扩展以及材料的弹塑性变形等, 不同的损伤源激发的声发射信号频率范围是不同的, 所以对不同疲劳声发射源频率成分的理论研究还处于起步阶段。

不同疲劳损伤阶段的声发射信号经 5 层小波分解和重构后的频率与波形幅值的分布如表 1 所示, 可以发现在不同的接触疲劳损伤阶段, 小波分解和重构后的频率分布和波形幅值是不同的, 随着疲劳损伤的加剧, 各层的波形幅值呈增大的趋势, 并且疲劳损伤频率分布范围也更加的广泛; 在裂纹的失稳扩展也就是最终失效之前, 疲劳损伤的频率主要分布在 100~325kHz 范围之内, 在裂纹的失稳扩展阶段, 疲劳损伤的频率不仅分布在 110~370kHz, 而且包含傅里叶全局变换无法识别的 500~710kHz 的高频成分; 60kHz 以下的低频成分主要是环境噪音。

表 1 不同疲劳损伤阶段的声发射频率与波形幅值的分布

Table 1 Distribution of AE frequency and waveform amplitude during different fatigue damage phases

Wavelet transform layer	Continuous type AE waveform (3.7×10^5)		Mixed type AE waveform (8.4×10^5)		Burst type AE waveform (9.9×10^5)	
	Waveform amplitude/mV	Frequency/kHz	Waveform amplitude/mV	Frequency/kHz	Waveform amplitude/mV	Frequency/kHz
S	70-90	100-200	150-180	100-300	450-500	110-140, 250-370
d1	<5	500-720	10-15	500-720	40-47	500-710
d2	50-60	250-325	100-150	250-325	250-300	250-370
d3	70-90	110-200	150-180	125-200	180-230	125-250
d4	70-90	100-110	150-180	100-125	280-350	110-120
d5	<5	40-60	<5	40-60	<5	40-60
a5	<5	20-32	<5	20-32	<5	20-32

疲劳裂纹萌生阶段涂层的疲劳损伤形貌如图 3 所示, 涂层在循环应力作用下, 裂纹主要沿着喷涂粒子界面处萌生。由等离子喷涂层的成型特点决定, 在涂层内部不可避免地存在孔隙、裂纹、未熔粒子等微缺陷, 由于微缺陷处材料结构不稳定, 裂纹易于在这些缺陷处萌生。该阶段的声发射原始信号以连续型为主, 采集该阶段较为典型的声发射信号 (3.7×10^5 循环周次), 并对其进行 5 层小波分解和重构后的波形与频率谱分别如图 4 和图 5 所示。从图 4 中 S 所示的原始声发射信号波形中较难识别出包含裂纹萌生的典型周期性突变的声发射特征信息, 这主要是因为裂纹萌生引起的声发射特征信号被高频的试验机高速运转产生的噪音干扰、掩埋引起的。从图 5 中 S 频率谱中可以看出原始信号的频率主要集中在 100~200kHz, 其中 100kHz 处频率幅值最强, 而信号中高频的噪声干扰

信息很难识别出来。由此得知, 仅对原始信号进行简单的傅里叶变换并不能将高频干扰信号与接触疲劳损伤信号区分开。图 4 所示的 d1 层信号波形图中包含裂纹萌生的周期性突变信号仍然并不明显, 严重被高频噪音所干扰。由图 5 中 d1 层信号频谱图可以看出, 包含噪音的 d1 层信号主要分布在 500~720kHz 的高频范围内。图 4 中 d2, d3, d4 和 d5 层的波形中可以较为明显地看出由于裂纹萌生产生的周期性突变的声发射信息, 其中 d3 和 d4 层最为显著, 并且突变幅值也较大, 为 70~90mV, d2 层的突变幅值为 50~60mV, 而 d5 层的突变特征并不明显, 突变幅值不足 5mV。图 4 中 a5 层的波形为典型的正弦波, 这可能是由于稳定的背景噪声引起的, 频率分布在 20~32kHz 左右。图 5 中 d2, d3, d4 层信号的频率分布范围分别为 250~325, 110~200, 100~110kHz。由此可以得知疲劳裂

纹萌生的频率分布范围较为广泛，主要集中在 250~325,110~200,100~110kHz 三个频率段，这主要是由于涂层中存在较多的孔隙、涂层粒子层间裂纹、未熔粒子等微缺陷，这些微缺陷是主要的裂纹萌生源，不同类型的微缺陷导致裂纹萌生而产生的声发射信号频率分布各不相同。

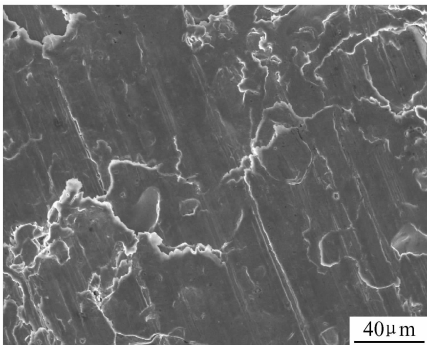


图 3 裂纹萌生阶段涂层的疲劳损伤形貌

Fig. 3 Morphology of fatigue damage of coating during crack initiation phase

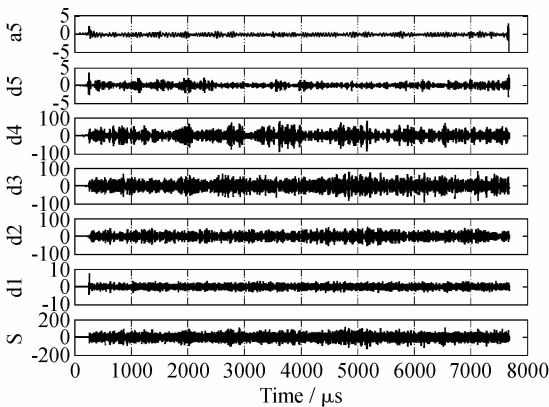


图 4 5 层小波分解声发射波形(3.7×10⁵)

Fig. 4 AE waveform by five layer wavelet decomposition (3.7×10⁵)

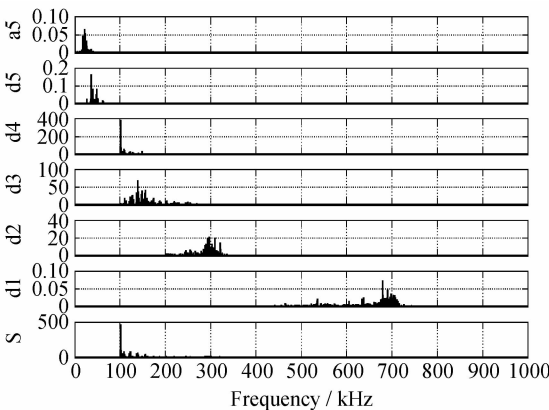


图 5 5 层小波分解声发射频谱(3.7×10⁵)

Fig. 5 AE frequency spectrum by five layer wavelet decomposition(3.7×10⁵)

疲劳裂纹稳定扩展阶段涂层的疲劳损伤形貌如图 6 所示，该阶段裂纹已经扩展连接成环形，并且裂纹变宽成为宏观裂纹，涂层表面材料产生微断裂。该阶段的声发射原始信号以混合型为主，采集该阶段较为典型的声发射信号(8.4×10^5 循环周次)，并对其进行 5 层小波分解和重构后的波形与频率谱分别如图 7 和图 8 所示。与裂纹的萌生阶段不同，裂纹稳定扩展释放的原始声发射信号波形中可以发现呈突变特征的声发射信息，如图 7 中 S 波形所示，这主要是因为裂纹的稳定扩展释放能量较大的声发射信号，幅值高达 150~180mV，明显高于环境噪声。从图 8 中 S 层频率谱中可以看出裂纹稳定扩展释放的声发射信号的频率主要分布在 100~300kHz 较为宽泛的范围内，其中 100~150kHz 处频率幅值最强，而信号中高频的噪声干扰信息很难被识别。图 7 中 d1 层信号波形图中主要包含高频的噪声信号，主要分布在 500~720kHz 范围内，这与裂纹萌生阶段相同。图 7 中 d2,d3,d4 层的波形中可以明显看出由于裂纹稳定扩展产生的周期性突变特征声发射信息，突变幅值高达 150mV。图 7 中 a5

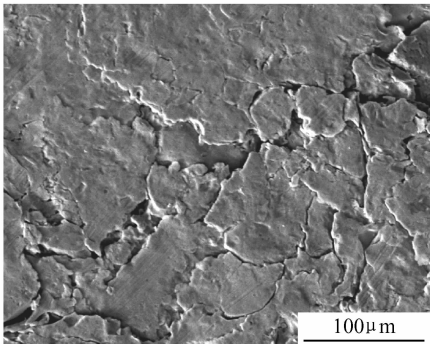


图 6 裂纹稳定扩展阶段涂层的疲劳损伤形貌

Fig. 6 Morphology of fatigue damage of coating during crack stable growth phase

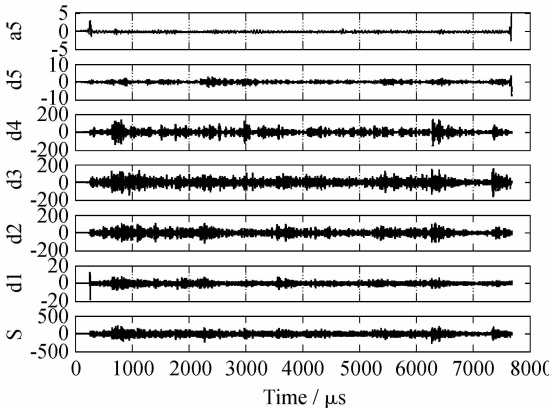


图 7 5 层小波分解声发射波形(8.4×10⁵)

Fig. 7 AE waveform by five layer wavelet decomposition(8.4×10⁵)

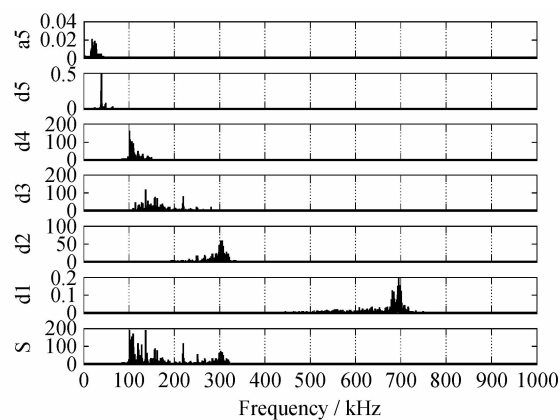


图 8 5 层小波分解声发射频谱 (8.4×10^5)

Fig. 8 AE frequency spectrum by five layer wavelet decomposition (8.4×10^5)

层的波形为典型的正弦波,这可能是由于稳定的背景噪声引起的。图 8 中 d2,d3,d4 层信号的频率分布范围分别为 250~325,125~200,100~125kHz。由此可以得知疲劳裂纹稳定扩展频率分布范围也较为广泛,主要集中在 250~325,125~200,100~125kHz 三个频率段。由于裂纹扩展的类型和方式不同,由此释放的声发射频率分布各不相同。

疲劳裂纹失稳扩展阶段即裂纹扩展连接直到涂层材料的剥落而导致最终失效阶段的疲劳损伤形貌如图 9 所示,剥落是涂层在该应力水平下的最终失效形式,材料大面积去除,剥落坑深度较深。该阶段的声发射原始信号以突发型为主,采集该阶段较为典型的声发射信号(9.9×10^5 循环周次),并对其进行 5 层小波分解和重构后的波形与频率谱分别如图 10 和图 11 所示。在裂纹的失稳扩展阶段,原始声发射信号波形呈现高衰减特征的突变型声发射信号,如图 10 中 S 层波形所示,这主要是因为涂层材料的大面积断裂和剥落瞬间释放大量的能量而产生强度较大的声发射信号,信号在传播中能量快速衰减而形成的,声发射突变幅值高达 500mV,信号衰减时间约为 $725\mu s$ 。从图 11 中 S 信号频率谱中可以看出在裂纹失稳扩展阶段释放的原始声发射信号的频率主要集中在 110~140kHz 和 250~350kHz 两个频率段内,其中 110~140kHz 处频率幅值最强,而信号中高频的噪声干扰信息同样很难被识别。图 10 中 d1~d5 层信号波形图中都具有裂纹损伤特征的突变信号,由此可以推测 d1~d5 层声发射波形中都包含涂层疲劳裂纹失稳扩展直到最终失效时的特征信息,并且裂纹的失稳扩展阶段声发射源是极其复杂的,期间伴随有裂纹的萌生、增值、扩展、连接、断裂以及涂层粒子的剥离等并存的复杂过程。图 10 中 d2,d3,d4 层波形的突变幅值最高,高达 180~350mV,

d1 层波形的突变幅值为 40~47mV,d5 层波形的突变幅值 $<5mV$ 。图 11 中 d1~d4 层信号的频率分布范围分别为 500~710,250~370,125~250,110~120kHz。由此可以得知裂纹的失稳扩展直到涂层的最终失效的声发射信号频率主要集中在以上四个频率段,频率分布范围更加广泛,包括 500kHz 以上高频成分。

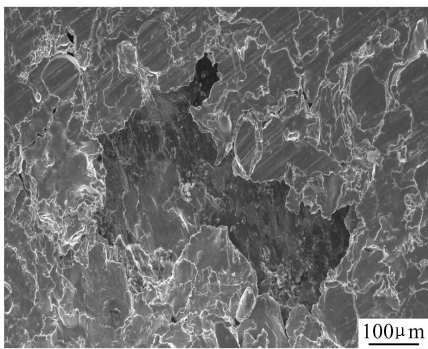


图 9 裂纹失稳扩展阶段涂层的疲劳损伤形貌

Fig. 9 Morphology of fatigue damage of coating during crack unstable growth phase

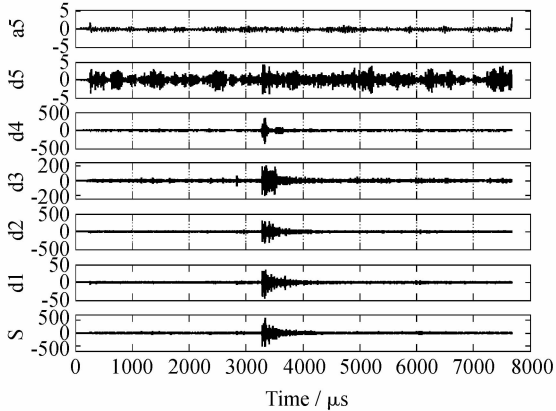


图 10 5 层小波分解声发射波形 (9.9×10^5)

Fig. 10 AE waveform by five layer wavelet decomposition (9.9×10^5)

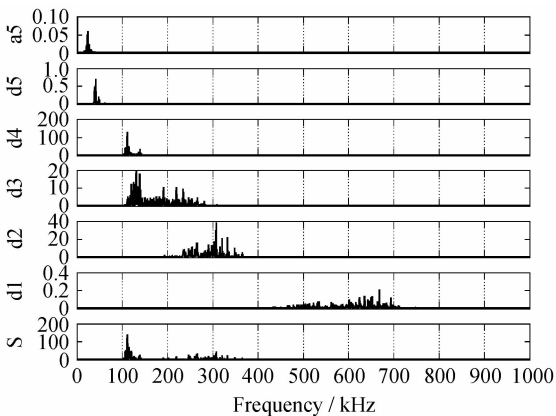


图 11 5 层小波分解声发射频谱 (9.9×10^5)

Fig. 11 AE frequency spectrum by five layer wavelet decomposition (9.9×10^5)

综上所述,涂层接触疲劳损伤过程主要包含裂纹的萌生、裂纹的稳定扩展和裂纹的失稳扩展三个阶段,不同阶段的声发射信号类型是不同的,裂纹萌生释放的声发射信号以连续型为主,裂纹稳定扩展释放的声发射信号以混合型为主,裂纹失稳扩展释放的声发射信号以突发型为主。各个疲劳损伤阶段的声发射信号是多个复杂的裂纹萌生和扩展过程释放的弹性波以及低频和低频环境噪声叠加的结果,属于能量较弱的非平稳信号。只是简单地使用傅里叶全局变换并不能将包含损伤信息的周期性突变特征提取出来,更不能准确获得包含损伤特征的信号的频率分布。采用小波变换将原始的声发射信号分解到不同的频率段并进行重构,在不同的频率段将时域波形和频率分布对应,这种时频分析的方法可以将高频和低频干扰信号剔除,准确提取不同频率成分的涂层疲劳损伤特征信息。不同的疲劳损伤源释放的声发射信号频率和波形是不同的,而涂层接触疲劳损伤过程是极其复杂的,是大量损伤源作用的综合反映。随着疲劳损伤的加剧,声发射信号频率分布范围更加广泛,由此推测疲劳损伤加剧,是多种不同频率成分的疲劳损伤源综合作用的结果,因此,采用小波变换分析不同疲劳损伤阶段的波形特征和频率成分对于研究涂层接触疲劳损伤源以及分析涂层接触疲劳损伤机理具有非常重要的指导意义。

3 结论

(1)涂层的接触疲劳损伤过程主要分为裂纹的萌生、裂纹的稳定扩展和裂纹的失稳扩展三个阶段,在裂纹的萌生阶段产生声发射原始信号以连续型为主;在裂纹的稳定扩展阶段产生声发射原始信号以混合型为主;在裂纹的失稳扩展阶段产生声发射原始信号以突发型为主。

(2)疲劳损伤声发射信号易被试验机高速运转产生的噪音干扰甚至掩埋,通过小波变换对不同接触疲劳损伤阶段的声发射信号进行分解和重构,实现了将干扰信号与疲劳损伤信号分离,获得高信噪比的疲劳损伤特征信息。

(3)不同的疲劳损伤阶段的声发射信号频率成分是不同的。随着疲劳损伤的加剧,各层的波形幅值呈增大的趋势,并且疲劳损伤频率分布范围也更加的广泛。

参考文献

- [1] 徐滨士,朱绍华. 表面工程的理论与技术[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [2] ZHU S, XU B S, YAO J K. High quality ceramic coatings sprayed by high efficiency hypersonic plasma spraying gun[J].

- Material Science Forum, 2005, 475—479(5): 3981—3984.
- [3] TAN C K, MBA D. Identification of the acoustic emission source during a comparative study on diagnosis of a spur gearbox[J]. Tribology International, 2005, 38(5): 469—480.
- [4] 朴钟宇,徐滨士,王海斗,等. 等离子喷涂铁基涂层的接触疲劳失效机理研究[J]. 材料工程, 2009, (11): 69—73.
- [5] PIAO Z Y, XU B S, WANG H D, et al. Investigation of fatigue prediction of Fe-Cr alloy coatings under rolling contact based on acoustic emission technique[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(7): 2581—2586.
- [6] MIGUEL J M, GUILLEMANY J M, MELLOR B G. Acoustic emission study on WC-Co thermal sprayed coatings[J]. Materials and Science Engineering A, 2003, 352(1—2): 55—63.
- [7] MBA D. Development of acoustic emission technology for condition monitoring and diagnosis of rotating machines, bearings, pumps, gearboxes, engines and rotating structures[J]. Shock and Vibration Digest, 2006, 38(2): 3—16.
- [8] 杨明伟. 声发射检测[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [9] TANDON N, CHOUDHURY A. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of damages in rolling element bearings[J]. Tribology International, 1999, 32(8): 469—480.
- [10] 周伟. Matlab小波分析高级技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2006.
- [11] 韩磊,程礼,苗学问. 基于小波分析的航空发动机轴承故障诊断[J]. 轴承, 2008, (10): 30—34.
- [12] ZHU K P, WONG Y S, HONG G S. Wavelet analysis of sensor signals for tool condition monitoring: a review and some new results[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49(7—8): 537—553.
- [13] ZHU Z K, YAN R Q, LUO L H, et al. Detection of signal transients based on wavelet and statistics for machine fault diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(4): 1076—1097.
- [14] ZHANG X C, XU B S, WU Y X, et al. Porosity, mechanical properties, residual stresses of supersonic plasma-sprayed Ni-based alloy coatings prepared at different powder feed rate[J]. Applied Surface Science, 2008, 254(13): 3879—3889.
- [15] ZHANG X C, XU B S, XUAN F Z, et al. Statistical analyses of porosity variations in plasma-sprayed Ni-based coatings[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 467(1—2): 501—508.

基金项目:国家杰出青年科学基金(51125023);国家自然科学基金(50875075);国家973计划(2011CB013405)

收稿日期:2011-09-05;修订日期:2012-02-02

作者简介:张志强(1985—),男,硕士,从事装备再制造寿命预测研究、无损检测等研究,联系地址:天津市红桥区丁字沽河北工业大学南院材料加工楼205室(300130),E-mail:zhangzq1130@163.com

通讯作者:王海斗(1969—),男,教授,从事表面工程、再制造的寿命预测等研究,联系地址:北京市丰台区杜家坎21号装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室(100072),E-mail:wanghaidou@yahoo.com.cn