

轧制AZ31B镁合金腐蚀疲劳过程中的声发射信号分析

周华茂 王俭秋 张波 韩恩厚 臧启山

(中国科学院金属研究所 金属腐蚀与防护国家重点实验室 沈阳 110016)

摘要: 利用全数字声发射系统研究了轧制 AZ31B 镁合金腐蚀疲劳过程中的声发射信号。结果表明, 轧制 AZ31B 镁合金在 NaCl 溶液中的腐蚀疲劳过程主要存在 4 种声发射源, 其中与腐蚀相关的两种信号分别对应于阳极溶解和阴极析氢, 前者属于板平面内激励源, 产生扩展波信号; 后者属于板平面外激励源, 产生弯曲波。与载荷相关的两种信号分别对应于塑性变形的连续型信号和裂纹扩展阶段高载荷阶段出现的裂纹扩展信号。腐蚀相关的声发射信号存在于整个疲劳过程, 而塑性变形信号只发生在疲劳过程中特定的应力阶段。

关键词: AZ31B 镁合金 腐蚀疲劳 声发射 频谱分析

中图分类号: TG146 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-4537(2009)02-0081-07

1 前言

镁合金是广泛应用于汽车等交通运输工具的结构材料。由于零部件常处于腐蚀环境下并受到循环应力的作用, 因而导致了疲劳失效^[1~4]。

材料或结构受外力或内力作用产生变形或断裂, 以弹性波形式释放应变能的现象称为声发射 (acoustic emission, AE)^[5]。AE 技术作为无损探伤和材料研究工具, 经过几十年的发展, 对材料中活动的微观事件已成为一项高灵敏度的检测技术, 是监测收集材料中损伤信息非常有用的工具^[6~11]。

AE 技术的最大特点在于识别发射源, 各种 AE 源信号代表了材料不同类型的损伤, 因而通过研究 AE 技术可以加深对材料基本性能的理解^[12]。关于 AE 检测, 最重要的问题是确定 AE 源的位置和性质, 从而能对材料或结构的损伤情况作出判断。

模态声发射 (modal acoustic emission, MAE) 是一种基于波形分析的 AE 信号处理技术, 它将 AE 信号波形与 AE 的物理过程相联系, 不同的 AE 激励源可以产生模式和特征完全不同的波形, 这样 MAE 技术就为材料不同损伤源的识别提供了有利条件^[13]。

本文通过波形分析确定轧制 AZ31B 镁合金腐蚀疲劳过程中的 AE 源, 为通过波形研究疲劳损伤奠定基础。

2 实验方法

实验材料为轧制 AZ31B 镁合金, 其成分 (mass%) 为: Al 3.20, Zn 0.45, Mn 0.26, Si 0.15, Mg 为余量。其室温屈服强度为 135 MPa, 抗拉强度为 250 MPa, 延伸率为 19.5%。疲劳试样平行于轧制方向截取, 标距段尺寸为 30 mm×12 mm×4 mm。用于外加电位腐蚀实验和腐蚀疲劳实验试样的工作面积为 10 mm×10 mm, 非工作面用 704 硅橡胶密封。

疲劳实验在 INSTRON 8562 型机械伺服疲劳试验机上进行, 加载波形为正弦波, 应力幅 $\sigma_a = 54.7$ MPa, 载荷比 $R=0.1$, 频率 $f=1$ Hz。

AE 测试采用 PAC 公司的 DiSP 全数字声发射系统, 采用线性定位方式, 两个高灵敏度的宽度传感器对称位于试样两侧, 硅油耦合, 间距为 80 mm。其它实验参数设置见表 1。图 1 为 AE 测试系统示意图。所有实验均在室温下进行。

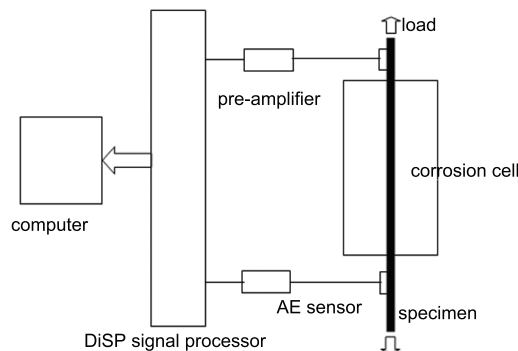


Fig.1 Block diagram of AE measuring system

定稿日期: 2007-10-10

基金项目: 中国科学院百人计划项目, 国家重点基础研究发展规划项目 (2007CB613705)

作者简介: 周华茂, 男, 1978 生, 博士生, 研究方向为镁合金的腐蚀疲劳

通讯作者: 王俭秋, E-mail: jiqwang@imr.ac.cn

Table 1 Parameters setting of AE testing

parameter type	hardware setup values
threshold values	30 dB
preamplifier	40 dB
peak definition time(PDT)	300 μs
hit lock time(HLT)	1000 μs
hit definition time(HDT)	600 μs
sample rate	2MSPS
pre-trigger	25.6 μs
hit length	1 k
filter on board(low)	10 kHz
filter on board(high)	1 MHz
front end filter	no

3 结果与讨论

3.1 镁合金板上断铅声发射实验

为了解 AE 源在镁合金板上形成的 MAE 波模式,用笔芯在镁合金试样上做断裂实验。当在镁合金板表面和侧面进行断铅时,分别得到了典型的 MAE 信号(图 2)。图 2a, 2c 分别为铅芯在镁合金板的表面断裂 OOP (out of plate) 源所检测到的声发射波形及快速傅立叶变换 FFT (fast fourier transform) 频谱。可以看到,产生的信号波形主要为弯曲波和少量的扩展波(图 2a),波形频率主要集中在 20 kHz~600 kHz,其峰值频率约为 100 kHz(图 2c)。图 2b, 2d 为铅芯在镁合金板的侧面断裂源 IP (in plate) 源所检测到的声发射波形及 FFT 频谱。波形模式以高幅扩展波为主(图 2b),FFT 频谱显示,主要分布在 20 kHz~400 kHz 区间,而峰值频率约为 230 kHz(图 2d)。从图 2 可以看出,表面断铅的中频率部分峰值频率与侧面断铅的峰值频率一致,表明中频率部分主要来源于起始的扩展波。

由以上结果可知,不同形式的 AE 激励源可以在镁合金板上形成不同模式的扩展波或弯曲波,这说明所用镁合金板试样符合 MAE 技术所需要的薄板条件,可以对腐蚀疲劳实验声发射结果采用 MAE 技术分析信号波形,进而通过波形、频谱来识别材料腐蚀疲劳过程中不同形式的损伤源。

3.2 在 NaCl 溶液中腐蚀行为的 AE 波形分析

镁合金在 0.1%NaCl(pH=6) 溶液中的自腐蚀电位为 -1580 mV(vs.SCE) 。镁合金在 -1480 mV(vs.SCE) 阳极极化电位下腐蚀时主要产生两种声发射信号(I型和II型),声发射波形、FFT 频谱如图 3 所示。可以看出,两类信号的波形存在显著差异。

频谱图显示 I 型声发射信号分布范围大致在 20

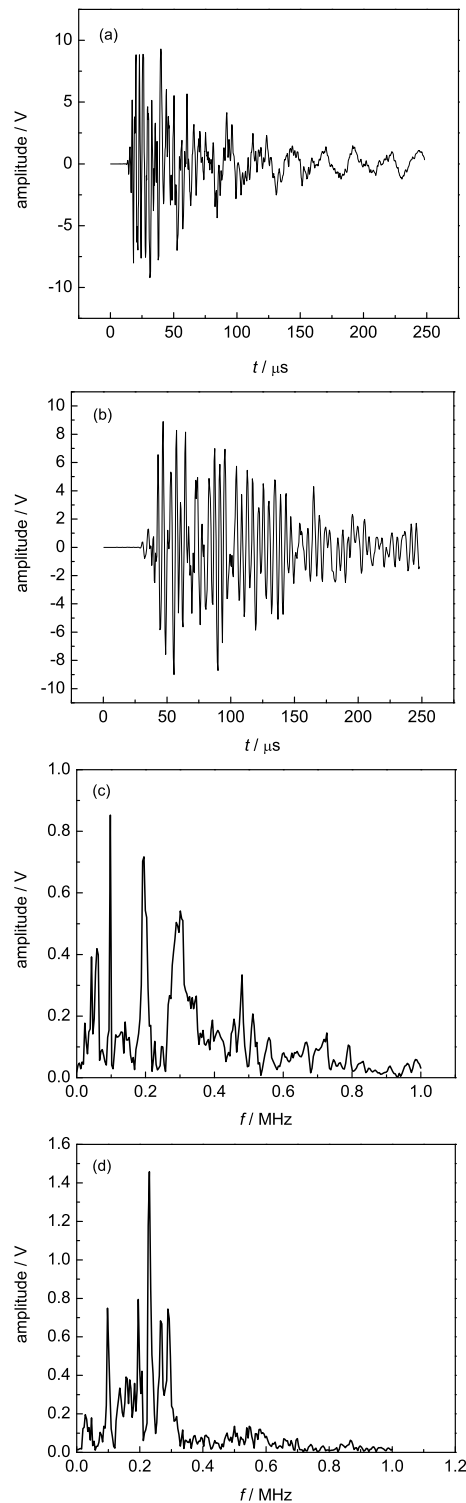


Fig.2 Plate waveforms (a, b) and FFT(c, d) spectrum of lead broken on the magnesium alloy plate(a,c) surface and (b,d) side

kHz~600 kHz, 峰值频率约为 270 kHz(图 3c); II 型声发射信号分布范围大致在 20 kHz~200 kHz, 峰值频率约为 100 kHz(图 3d)。

镁合金在 -1680 mV(vs.SCE) 阴极极化电位下腐蚀时也主要产生两种类型的声发射信号(I型和II型),声发射波形、FFT 频谱如图 4 所示。可以看出

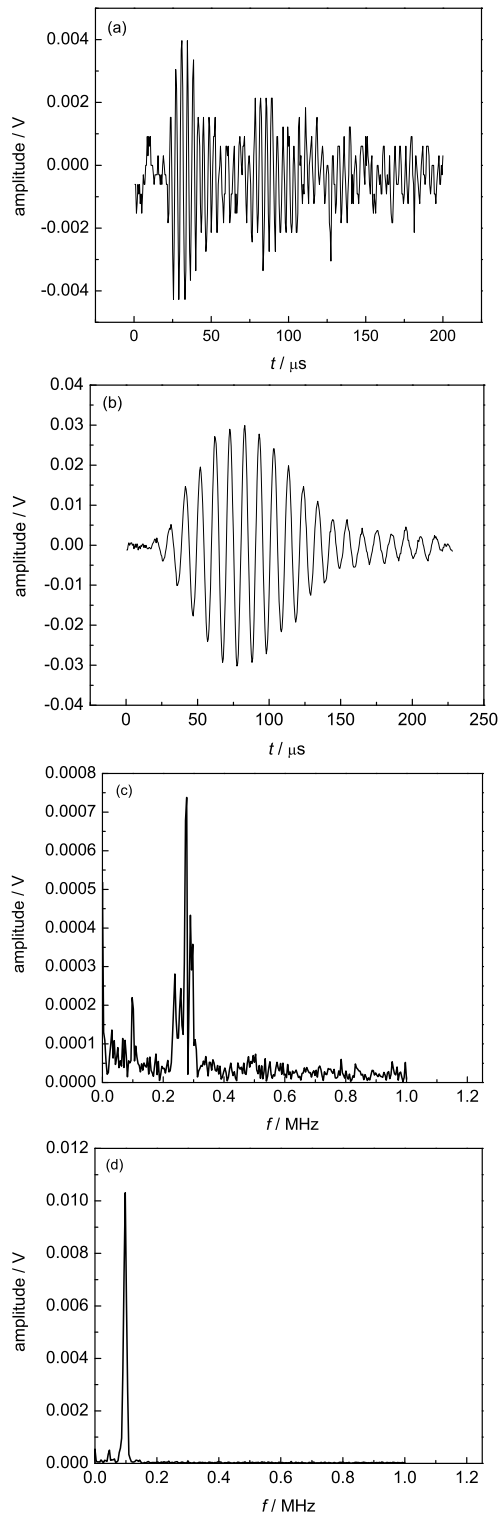


Fig.3 type I (a, c) and type II (b, d) waveforms of (a, b) anodic polarization and (c, d) FFT spectrum

两类信号的波形同样存在显著差异。频谱图显示，I 型声发射信号分布范围大致在 20 kHz~400 kHz，峰值频率约为 240 kHz(图 4c)；II 型声发射信号分布范围大致在 20 kHz~300 kHz，峰值频率约为 100 kHz(图 4d)。

从板波角度分析波形模式，I 型信号为扩展波，

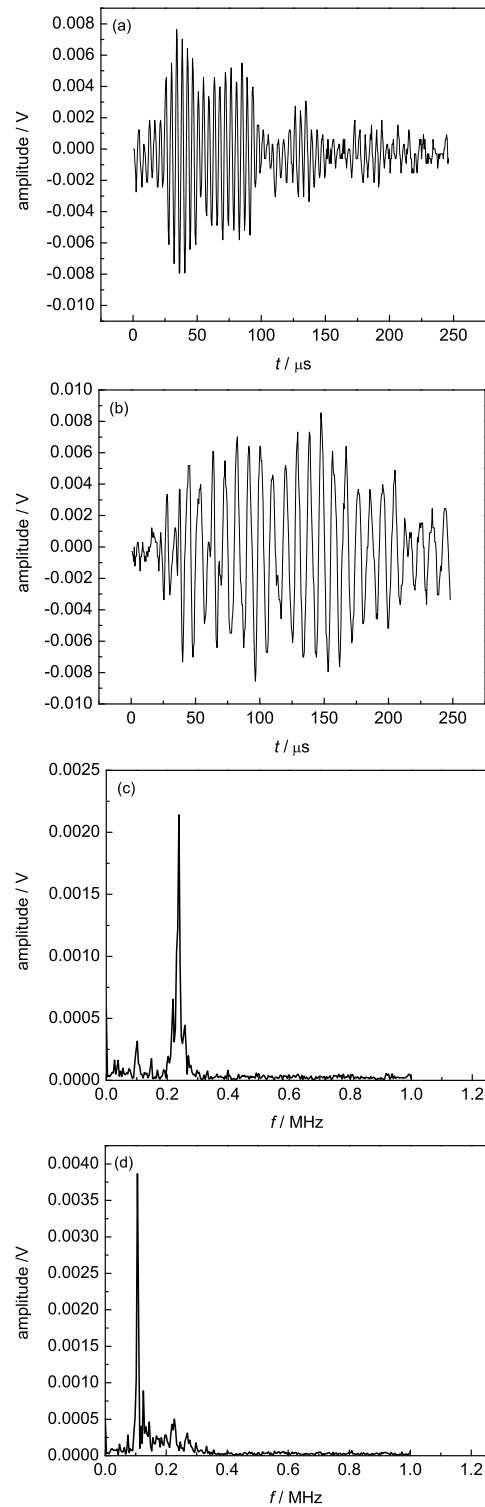


Fig.4 type I (a, c) and type II (b, d) waveforms of (a, b) cathodic polarization and (c, d) FFT spectrum

而 II 型信号为弯曲波。图 3 和图 4 对 I 型信号的频谱分析显示了扩展波的频谱特征，主要由中频成分组成；对 II 型信号的频谱分析显示了弯曲波的特点，主要由低频成分组成。

I 型信号波形特征表明，在极化过程中产生了板平面内的激励源，从而产生了扩展波；而 II 型信号

波形特征表明,在极化过程中产生了板平面外的激励源,在板中形成了弯曲波。这些不同的声发射源对应着不同的腐蚀损伤过程。

镁合金腐蚀过程中存在 3 个过程:一是阳极溶解,金属原子离开合金表面的过程,表层失去部分原子,会产生应力松弛,属于板平面内的激励源,产生扩展波;二是阴极析氢, H_2 离开镁合金表面,相当于在外部对板平面施加了一个力,属于板平面外的激励源,产生弯曲波;三是腐蚀产物在金属表面的沉积,由于其幅度值较低,基本上类似于噪声信号。

对应镁合金的腐蚀过程,可知 I 型信号反映阳极溶解,而 II 型信号则反映阴极析氢。一般说来,阳极溶解信号幅度小于阴极析氢信号幅度。

由于外加电位下主要存在阳极溶解和阴极析氢两种声发射信号,通过对所采集到的信号进行波形分析,得到外加电位下的 I 型和 II 型信号随时间变化的关系(图 5)。可以看到,在两种极化条件下, I 型信号的事件数(events)高于 II 信号。阳极极化下, I 型和 II 型信号事件发生率(events/s)分别为 4.56 和 0.76;而阴极极化下, I 型和 II 型信号事件发生率分别为 0.06 和 0.014。可见,阳极极化下的同类型信号事件发生率高于阴极极化。

3.3 在空气中塑性变形的声发射波形分析

为了分析镁合金塑性变形的 AE 信号,对镁合金试样进行了室温拉伸实验。声发射信号有两种基本类型:突发型和连续型。突发型信号是在时域上可分离的波形。连续型信号是时域上不可分离的波形。对镁合金的拉伸过程中的声发射信号进行分析,发现拉伸应力达到一定值后,声发射信号急剧增多,基本上只有一种特征信号,即连续型信号。拉伸过程中,出现塑性变形信号的位置如图 6 中 A 点所示,约为屈服强度的 31%。

拉伸过程中的塑性变形信号的典型波形和其 FFT 频谱如图 7 所示。频谱图(图 7b)显示,其频率范围很宽,在 10 kHz~1 MHz 之间。

3.4 在 NaCl 溶液中腐蚀疲劳过程的声发射波形分析

通过累积事件数与循环周次曲线的拐点确定裂纹萌生周次和裂纹失稳扩展周次^[14,15]。在裂纹萌生前,通过分析所有采集的声发射信号波形,发现主要存在 3 类信号。图 8 是镁合金在 0.1%NaCl(pH=6)溶液中,裂纹萌生阶段的 3 种波形。通过与阳极溶解、阴极析氢和塑性变形的信号频谱进行比较,发现第 I 类信号为阳极溶解,第 II 类信号为阴极析氢,第 III 类信号为材料的塑性变形。

前两类信号在整个载荷周期都存在,而第 3 类

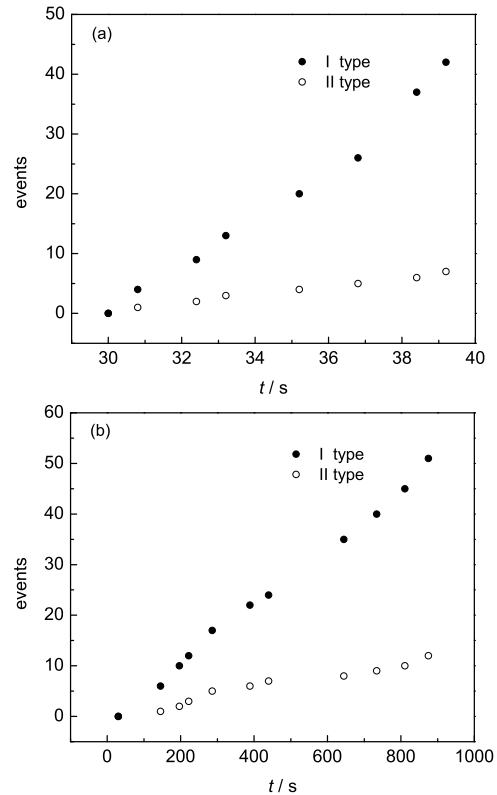


Fig.5 Evolution of cumulative AE events against time (a) anodic polarization (b) cathodic polarization for rolled AZ31B alloy in 0.1%NaCl

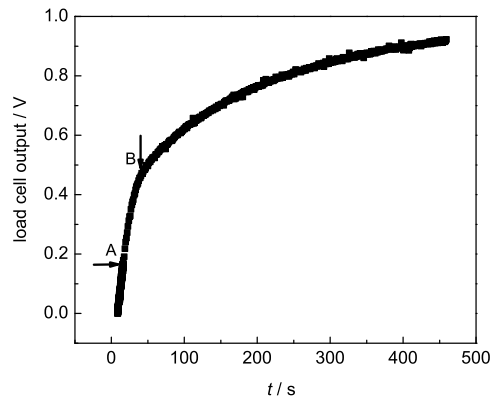


Fig.6 Tension curve (A point for initiation of plastic deformation signals, B point for yield point)

信号只发生在加载周期内特定的应力阶段。图 9 为开始出现塑性变形信号的示意图。A 点为加载阶段开始出现塑性变形信号的位置, σ_A 为 A 点的应力值。通过对裂纹萌生阶段的 10 个应力循环内的 σ_A 值进行平均统计,得出裂纹萌生阶段 A 点出现的位置约为 52% σ_{YS} 。

在裂纹扩展阶段,通过分析所有采集的 AE 信号波形,发现主要存在四类信号。其中前三种信号分别对应于阳极溶解、阴极析氢、材料的塑性变形,与裂纹萌生阶段基本相同,只是裂纹扩展阶段塑性变形信号 A 点出现位置约为 60% σ_{YS} 。与裂纹萌生阶段

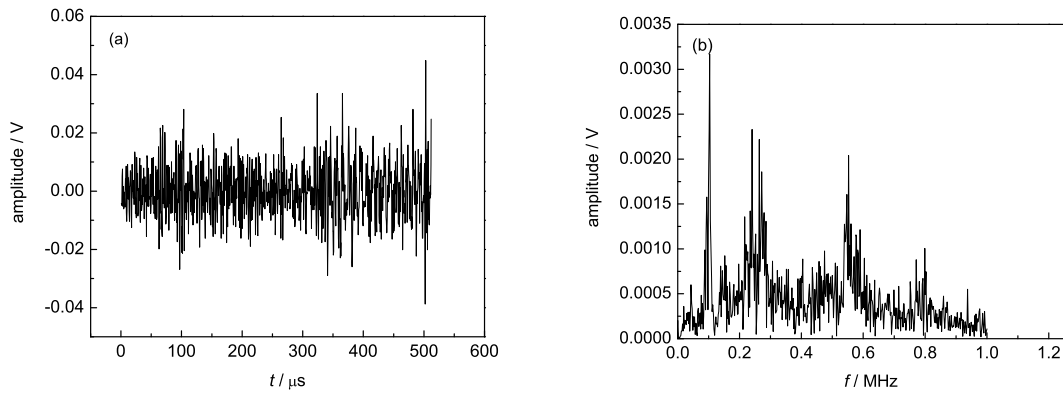


Fig.7 The typical AE waveform of (a) plastic deformation during tension process and (b) FFT spectrum

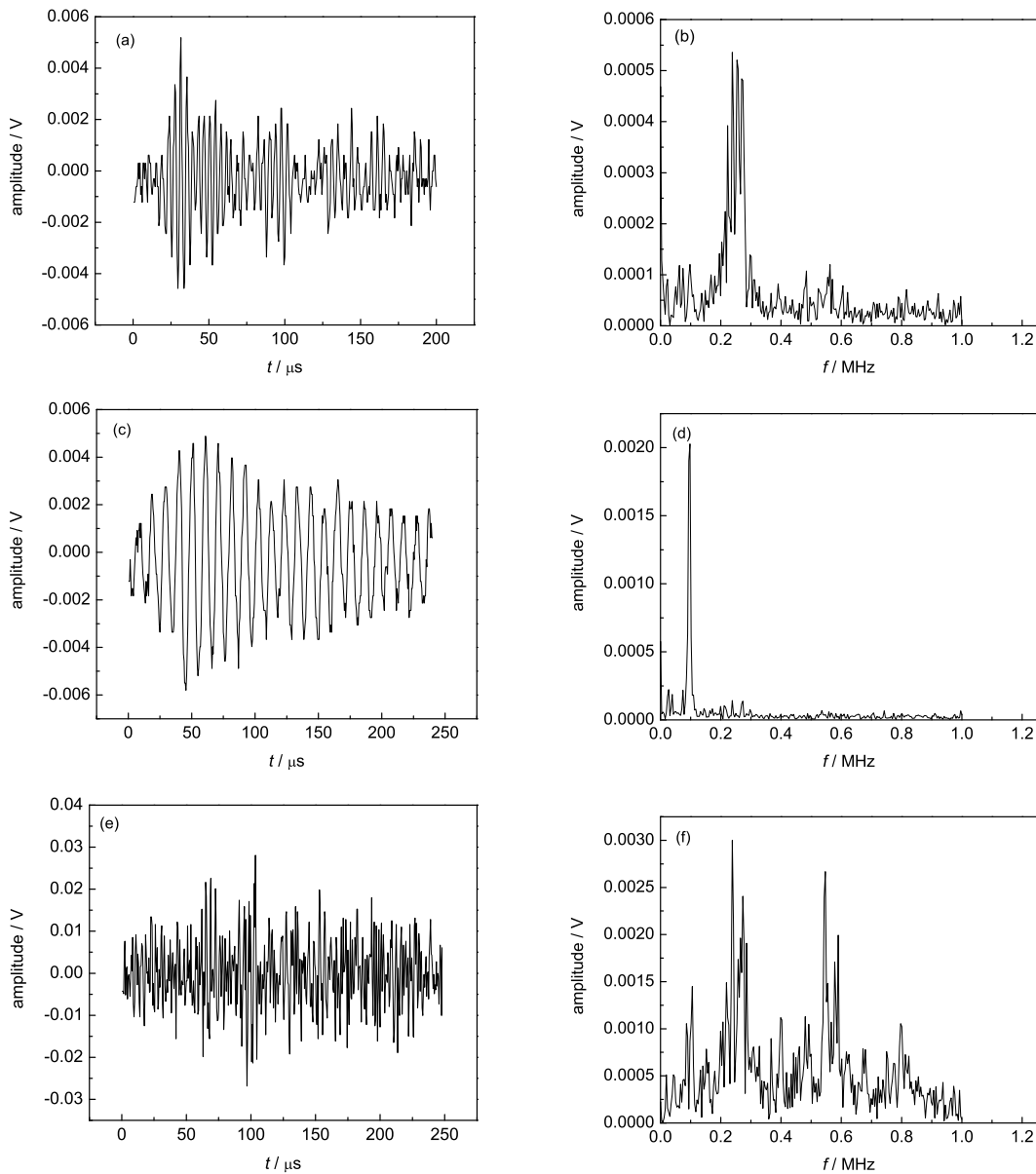


Fig.8 The three typical waveforms (a, c, e) and FFT spectrum (b, d, f) at crack initiation stage during corrosion fatigue in 0.1%NaCl, ($\sigma_a=54.7$ MPa, $R=0.1$, $f=1$ Hz)
 (a, b) type I, (c, d) type II, (e, f) type III

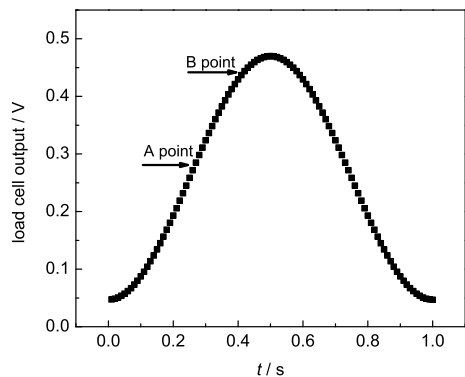


Fig. 9 A schematic diagram of one load cycle (A point for initiation of plastic deformation signals in loading stage, B point initiation of crack propagation signals in loading stage)

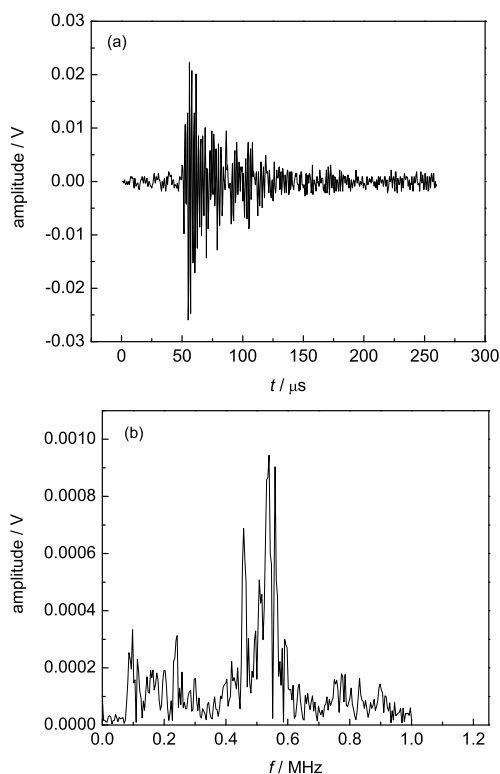


Fig. 10 The fourth typical waveform (a) and FFT spectrum (b) at crack propagation stage during corrosion fatigue in 0.1%NaCl ($\sigma_a=54.7$ MPa, $R=0.1$, $f=1$ Hz)

相比, 裂纹扩展阶段的一个循环周期内, 加载阶段出现塑性变形 AE 信号的应力升高。这可能对应于材料发生循环硬化。

第四类的 AE 信号如图 10 所示, 频率组成较丰富, 范围较宽, 主要分布在 100 kHz~900 kHz 区间, 而峰值频率约为 540 kHz (图 10b)。结合分析载荷时间图, 发现这类波形出现在每周加载的高应力部分, 约为 $85\% \sigma_{YS}$, 接近峰值应力 (图 9 中 B 点), 推断

其为裂纹扩展信号。

4 结论

(1) 在 NaCl 溶液中, 镁合金无论在阳极极化还是阴极极化过程中, 存在两种类型的 AE 信号, 分别对应着阳极溶解和阴极析氢。阳极溶解属于板平面内激励源, 产生扩展波信号, 峰值频率在 270 kHz 左右。阴极析氢属于板平面外激励源, 产生弯曲波, 峰值频率在 100 kHz 左右。

(2) 镁合金拉伸过程中的塑性变形 AE 信号为连续型信号。当拉伸应力约为屈服强度的 31% 时, 开始大量出现塑性变形 AE 信号。

(3) 在腐蚀疲劳过程裂纹萌生阶段, 除了阳极溶解和阴极析氢两种 AE 信号外, 还出现了塑性变形 AE 信号。在裂纹扩展阶段, 在每周加载的高应力阶段出现裂纹扩展 AE 信号。裂纹扩展 AE 信号频率分布很宽, 峰值频率为 540 kHz。前两类腐蚀信号在整个循环周期都存在。而塑性变形信号和裂纹扩展信号只发生在循环周期内特定的应力阶段。

参考文献

- [1] Liu Y, Li Y Y, Zhang W W, et al. Development of the fatigue of magnesium alloys[J]. Mater. Rev., 2005, 19(2): 87-89
(刘英, 李元元, 张卫文等. 镁合金疲劳的研究进展 [J]. 材料导报, 2005, 19(2): 87-89)
- [2] Hilpert M, Wagner L. Corrosion fatigue behavior of the high strength magnesium alloy AZ80[J]. J. Mater. Eng. Performance., 2000, 9(4): 402-407
- [3] Eliezer A, Gutman E M, Abramov E, et al. Corrosion fatigue of die cast and extruded magnesium alloys[J]. J. Light. Met., 2001, 1: 179-186
- [4] Unigovski Ya, Eliezer A, Abramov E, et al. Corrosion fatigue of extruded magnesium alloys[J]. Mater. Eng., 2003, A360: 132-139
- [5] Yuan Z M, Ma Y K, He Z Y. Acoustic Emission Technology and Its Application[M]. Beijing: China Machine Press, 1985
(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)
- [6] Zhang B Q. The evaluation of corrosion process of metals by use of acoustic emission[J]. J. Daqing Pet. Inst., 1994, 18(2): 60-68
(张宝琪. 利用声发射评定金属的腐蚀过程 [J]. 大庆石油学院学报, 1994, 18(2): 60-68)
- [7] Berkovits A, Fang D. Study of fatigue crack characteristics by acoustic emission[J]. Eng. Fract. Mech., 1995, 51(3): 401-416
- [8] Lindley T C, Palmer I G, Richards C E. Acoustic emission monitoring of fatigue crack growth[J]. Mater. Sci. Eng., 1978, 32: 1-15

- [9] Fang D, Berkovits A. Evaluation of fatigue damage accumulation by acoustic emission[J]. *Fatigue. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 1994, 17(9): 1057-1067
- [10] Shan D, Nayeb-Hashemi H. Fatigue-life prediction of SiC particulate reinforced aluminum alloy 6061 matrix composite using AE stress delay concept[J]. *J. Mater. Sci.*, 1999, 34: 3263-3273
- [11] Dzenis Y A. Cycle-based analysis of damage and failure in advanced composites under fatigue 1. Experimental observation of damage development within loading cycles[J]. *Int. J. Fatigue.*, 2003, 25: 499-510
- [12] Philips A L, Godinez V G, Stafford S W. Amplitude distribution analysis for b-value relationship to the plasticity of 7075-T6 aluminum[J]. *Mater. Eval.*, 1985, 43: 420-425
- [13] Geng R S, Shen G T, Liu S F. Modal acoustic emission: a powerful tool for acoustic emission signal processing[J]. *Nondestruct. Test.*, 2002, 24(8): 341-345
(耿荣生, 沈功田, 刘时风. 模态声发射 - 声发射信号处理的得力工具 [J]. *无损检测*, 2002, 24(8): 341-345)
- [14] Kohn D H, Ducheyne P. Sources of acoustic emission during fatigue of Ti-6Al-4V: effect of microstructure[J]. *J. Mater. Sci.*, 1992, 27: 1633-1641
- [15] Zhou H M, Wang J Q, Zang Q S, et al. Characteristics of acoustic emission during fatigue of as-rolled AZ31B magnesium alloy[J]. *Mater. Sci. Forum.*, 2007, 546-549: 579-584

ACOUSTIC EMISSION SIGNAL ANALYSIS FOR ROLLED AZ31B MAGNESIUM ALLOY DURING CORROSION FATIGUE PROCESS

ZHOU Huamao, WANG Jianqiu, ZHANG Bo, HAN Enhou, ZANG Qishan
(*State Key Laboratory for Corrosion and Protection, Institute of Metal Research,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016*)

Abstract: Acoustic emission (AE) signals during corrosion fatigue of a rolled AZ31B magnesium alloy were studied. There were mainly four types of signals found in the corrosion fatigue process. Two types of AE signals corresponded respectively to anodic dissolution and cathodic hydrogen evolution appeared in a whole loading cycle. The signals of anodic dissolution belonged to the sources in plate produced extensive waveform, while the signals of cathodic hydrogen evolution belonged to the sources out of plate produced flexural waveform. Another two types of AE signals were corresponded to mechanical signals. One was the signals of plastic deformation which were continuous signal and appeared at the certain stress stage in a loading cycle. At the stage of crack propagation, crack propagation signals appeared at high stress loading part of each cycle.

Key words: AZ31B magnesium alloy, corrosion fatigue, acoustic emission, spectrum analysis