

文章编号:1674-8190(2015)04-502-05

# TC18 钛合金疲劳断裂过程声发射信号特征分析

张昭,肖迎春,王倩,郑建军

(中国飞机强度研究所 结构无损检测及健康监测研究室,西安 710065)

**摘要:** 声发射技术通过实时监测结构服役过程中发出的声发射信号,判断结构是否出现损伤,是一种重要的在线监测损伤的技术。为了明确 TC18 钛合金在疲劳试验中产生微裂纹、裂纹扩展及断裂等过程中声发射信号的特性,设计 TC18 钛合金试验件,进行其疲劳试验并全程采集声发射信号,采用参数分析方法,得到声发射信号在时域、频域方面的参数特征。结果表明:在裂纹萌生及扩展阶段,声发射信号幅值为 40~65 dB,低于相同条件下铝合金的信号幅值;在 200~280 kHz 频段上,裂纹萌生阶段与后续过程的能量分布存在较大差异。结合上述研究结果,给出 TC18 钛合金试验件声发射监测的参考原则。

**关键词:** TC18;钛合金;疲劳试验;声发射;特征参数

**中图分类号:** V25; V26

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2015.04.017

## Analysis of Acoustic Emission Signals Characteristics for TC18 Titanium Alloy Fatigue Fracture Process

Zhang Zhao, Xiao Yingchun, Wang Qian, Zheng Jianjun

(Nondestructive Testing & Structural Health Monitoring Research Department,  
Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Acoustic emission can real-time monitor acoustic emission signals by structure service process and judge the structural damage. Acoustic emission is an important technique for on-line monitoring of damage. The feature of acoustic emission signals is figured out, which are produced by the cracks in titanium alloy of TC18, when the crack initiates, and grows until the TC18 sample is broken. TC18 samples and fatigue test are designed, and acoustic emission signals are acquired along the test. The feature parameters of time domain and frequency domain using parametric method are gained. The results show that in the crack initiation and expansion stage, acoustic emission signal amplitude in the 40~65 dB, lower than under the same conditions of aluminum alloy signal amplitude and in the 200~280 kHz band crack initiation stage and follow-up process of energy distribution, there is a big difference. Finally the reference comments of acoustic emission monitoring in titanium alloy of TC18 samples are given.

**Key words:** TC18; titanium alloy; fatigue test; acoustic emission; feature parameters

## 0 引言

为了满足新一代飞机主承力结构的大尺寸、高减重和长寿命设计要求,一些发达国家在新型钛合

金属材料与应用方面已取得了较大发展<sup>[1]</sup>。TC18 钛合金是退火状态下强度最高的钛合金材料,特别适合制造飞机机身、起落架结构中的大型构件<sup>[2]</sup>等,在国内外多种型号飞机上都有应用<sup>[3]</sup>。在飞机的关键部位,出现任何裂纹如果不能被及时发现,都将导致灾难性的后果。近年来,虽然中国钛合金产业得到了快速发展,钛材产量位居世界第四,航空结构用钛合金产品也得到了稳步发展,但与发达

收稿日期:2015-02-02; 修回日期:2015-10-20

通信作者:张昭,562429661@qq.com

国家相比,我国在钛合金应用水平、产品结构和用量等方面仍存在较大差距<sup>[4-7]</sup>。

声发射技术通过实时监测结构服役过程中发出的声发射信号,判断结构是否出现损伤,是目前在线监测损伤的重要手段之一。国外已将声发射技术在部分军、民用飞机上进行了成功应用,例如在飞机 TC18 材料关键部位的监测上,声发射技术可及时发现裂纹,避免了重大事故的发生。材料的声发射信号特征是声发射监测参数设置及损伤判断的重要依据,目前国内外对常用铝合金在疲劳断裂过程中的声发射信号特征已进行了广泛研究,得到了其时域、频域参数特征<sup>[8-9]</sup>;对传统钛合金材料在静力拉伸过程中的声发射信号特征进行了研究,得到了其幅值特征<sup>[10]</sup>,对钛合金疲劳过程中声发射信号的处理方法也进行了相关研究<sup>[11]</sup>。而对于 TC18 钛合金在疲劳试验中裂纹声发射信号的特征,国内外进行的分析研究较少,现阶段对其特征参数的量化区间尚不清楚。

本文设计 TC18 钛合金试验件,并对其进行疲劳试验,全程采集声发射信号,采用参数分析方法对其进行研究,得到时域、频域的特征参数,及上述参数在不同阶段的变化趋势。所得结论可为飞机地面试验和服役过程中,对 TC18 钛合金构件的声发射健康监测提供依据,特别是滤波设置和损伤判断。

## 1 试验设置

试验件材料为 TC18 钛合金,表面采用刚玉砂吹砂处理,表面粗糙度( $R_a$ )为  $3.2 \mu\text{m}$ 。试验件共九件,其形状及尺寸如图 1 所示,长 300 mm,宽 40 mm,厚 2 mm,中心位置打直径 6 mm 的圆孔。

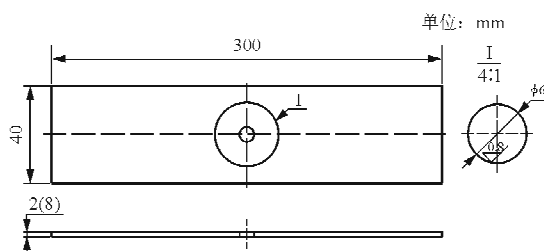


图 1 试验件形状及尺寸

Fig. 1 Shape and size of the test piece

采用 500 kN Instron8801 液压伺服疲劳试验机进行试验,疲劳试验最大载荷为 807 MPa,常幅疲劳,试验应力比  $R=0.06$ ,加载频率为 5 Hz。

试验采用 PAC PCI-2 声发射系统,R15a 传感器,谐振频率带宽为 50~400 kHz,采用 2 通道线定位设置。两个传感器等距固定在试验件中心通孔两侧,距孔中心 25 mm,传感器采用粘贴方式固定,粘接剂为硅胶。试验前采用断铅法进行灵敏度测试及波速测量,前置放大器增益 40 dB,检测门槛 40 dB。为了掌握裂纹扩展情况,在试验件另一侧中心孔周围布置银粉涂层传感器,最近的涂层距中心孔距离为 1 mm。试验件、传感器布置情况及试验现场如图 2 所示。

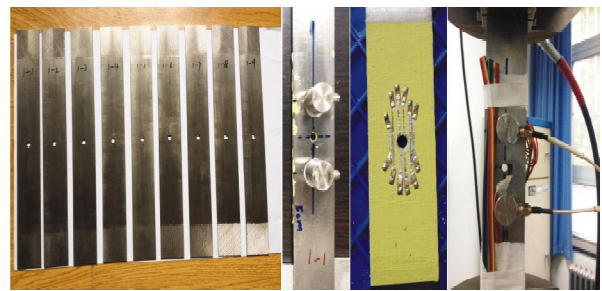
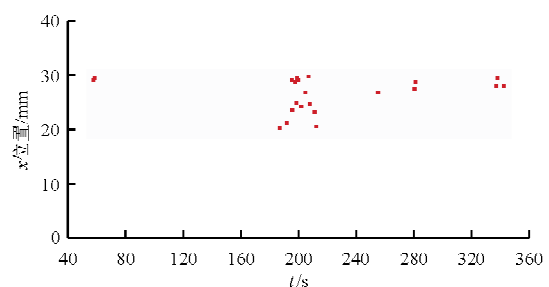


图 2 试验件、传感器布置情况及试验现场

Fig. 2 Test pieces, sensor distribution and test site

## 2 试验结果及分析

九件试验件都成功记录其裂纹萌生及扩展过程,以第三件试验件的结果为例进行说明。第三件试验件裂纹萌生阶段、部分裂纹扩展阶段及裂纹断裂阶段声发射信号  $x$  位置对时间历程图如图 3 所示,采用空间滤波法,滤除非观察部位的干扰信号。



(a) 裂纹萌生阶段

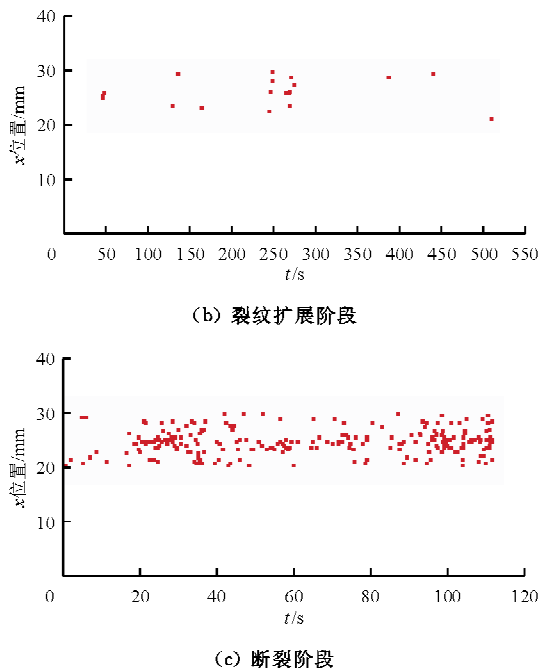


图3 三个阶段声发射信号  $x$  位置对时间的历程图  
Fig. 3 Time history diagrams of acoustic emission signals  $x$  position on three stages

试验从开始加载到试验件断裂用时 43 min (由于试验中有停顿,采集分五次进行),监测过程中,在孔位置第一次出现声发射信号发生在试验开始第 14 min(如图 3(a)所示);短时间内连续出现声发射事件,表示有新的声发射源在孔位置出现,不停机近距离目视观察,未发现裂纹出现;350 s 后,靠近孔右边银粉涂层第一次报警,表示裂纹已扩展至孔边 1 mm 处,此时停机观察,发现裂纹。据此认为第 14 min 时萌生裂纹,将此阶段划分为裂纹萌生阶段,试验件断裂前一段时间为断裂阶段,两者之间过程为裂纹扩展阶段。采用参数分析法对不同阶段的声发射信号的时域、频域特征进行

分析,试验件在不同阶段的相关参数如表 1 所示。

表 1 试验件在不同阶段的相关参数  
Table 1 List of parameters at different stages

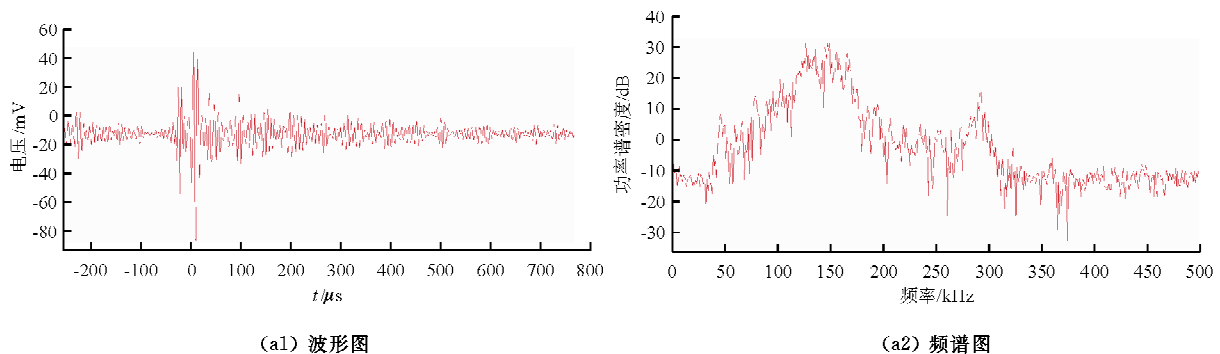
阶段	最高事件率/ (次·s <sup>-1</sup> )	平均幅值/dB	中心频率/kHz	峰值频率/kHz
裂纹萌生	3	45	145.8	137.4
裂纹扩展	5	50	161.8	138.0
断裂	40	70	172.1	142.5

从图 3 和表 1 可以看出:TC18 钛合金在裂纹萌生阶段声发射事件瞬时释放率不高,在 14 s 内共连续发生 7 次事件;裂纹扩展期事件平均发生率低,大约每隔 50 s 释放一次声发射事件群,每个事件群包含 1~3 个事件,最高瞬时释放率高于萌生期;断裂阶段最高事件率呈爆发式增长,由 5 次/s 达到 40 次/s。

从幅值上看,裂纹萌生阶段和扩展阶段的幅值波动不大,平均值从 45 dB 增加到 50 dB;在试验件将要断裂时,幅值开始升高至 70 dB,最高达到 86 dB。能量变化趋势比较明显,萌生阶段最高能量值为 2 个/s,扩展阶段达到 20 个/s,断裂时为 306 个/s。需要指出的是,在同等试验条件下,LY12CZ 铝合金试验件疲劳断裂试验的裂纹萌生信号幅值为 60~80 dB。

从频域参数上可以看出:受探头谐振频率的影响,声发射信号在不同阶段峰值频率的变化不大,在 140 kHz 左右;中心频率随着疲劳试验的进行逐渐发生偏移,裂纹萌生阶段为 145.8 kHz,裂纹扩展阶段增加至 161.8 kHz,断裂阶段达到 172.1 kHz。

三个阶段声发射信号的波形图及频谱图如图 4 所示。



(a) 裂纹萌生阶段

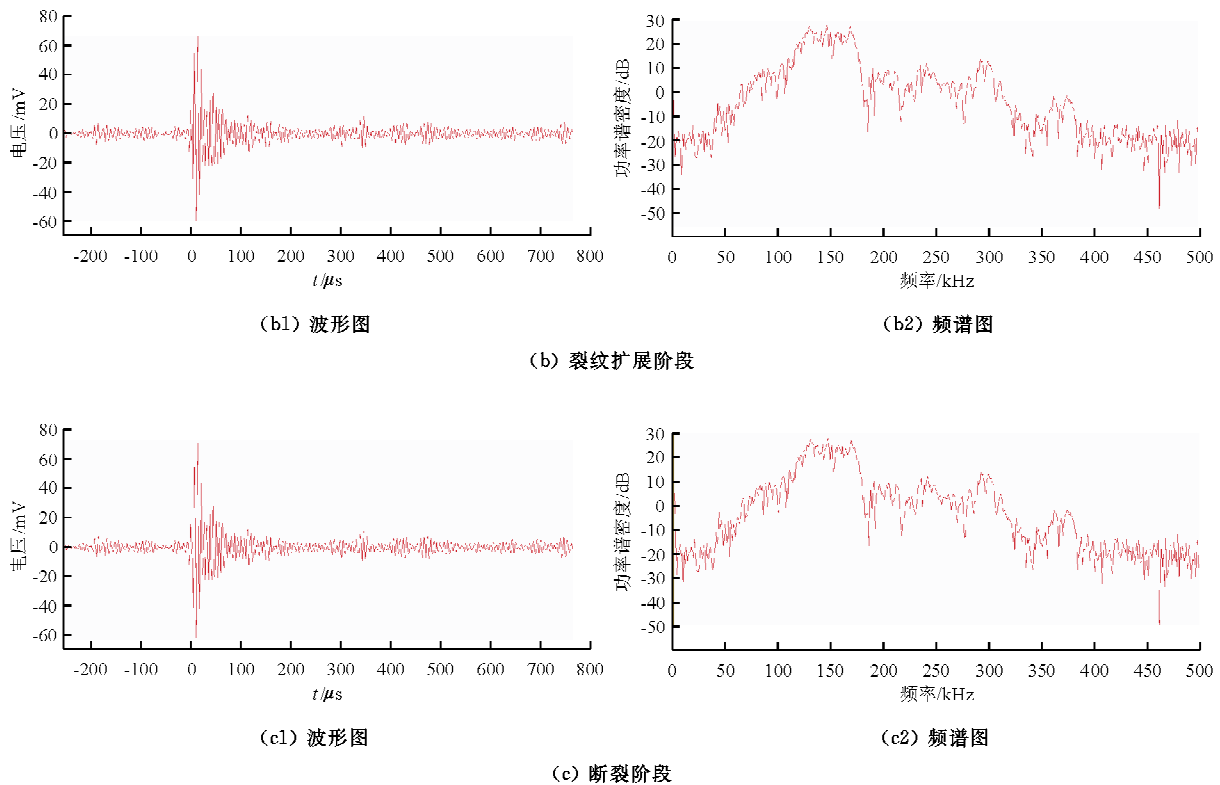


图4 三个阶段声发射信号的波形图及频谱图

Fig. 4 Oscillogram and spectrogram of acoustic emission signals on three stages

从图4可以看出:三个阶段声发射信号的主要频率成分为100~200 kHz;不同的是,萌生阶段信号频谱在200~280 kHz强度较弱,最大值为5 dB,断裂阶段该范围信号强度最强,最大值为12 dB,扩展阶段居中,最大值为10 dB。

在等幅疲劳载荷作用下,裂纹的扩展速度逐渐增加,声发射信号的事件率及幅值参数随疲劳载荷循环次数的增加而增加。声发射信号的频谱随裂纹扩展呈现出向高频偏移现象,其机理有待进一步研究。

### 3 结论

(1) 从裂纹萌生到断裂的过程中,裂纹声发射信号的幅值与事件率逐渐增加,扩展速率与事件率为正相关关系。

(2) 在频域上,随着裂纹扩展的进行,裂纹声发射信号出现频谱重心向高频偏移的现象,在未探明其机理之前,该现象可以作为判断裂纹所处阶段的一个经验性提示。

(3) TC18 钛合金在裂纹萌生至断裂过程中的声发射信号的幅值整体偏低,在监测过程中,门限值不宜过高,对于干扰噪音不宜采用门槛滤波的方式。

### 参考文献

- [1] 朱知寿. 航空结构用新型高性能钛合金材料技术研究与发展[J]. 航空科学技术, 2012(1): 5-9.  
Zhu Zhishou. Research and development of advanced new type titanium alloys for aeronautical applications[J]. Aeronautical Science & Technology, 2012(1): 5-9. (in Chinese)
- [2] 胡愈刚, 王晓平, 周亮. TC18 钛合金焊接技术在飞机起落架制造中的应用研究[J]. 航空制造技术, 2011(16): 72-74.  
Hu Yugang, Wang Xiaoping, Zhou Liang. Application research on TC18 titanium alloy welding technology in manufacture of aircraft landing gear[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(16): 72-74. (in Chinese)
- [3] 韩栋, 张鹏省, 毛小南, 等. BT22 钛合金及其大型锻件的研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24(2): 46-49.  
Han Dong, Zhang Pengsheng, Mao Xiaonan, et al. Research progress of BT22 titanium alloy and its large forgings [J]. Materials Review, 2010, 24(2): 46-49. (in Chinese)

- [4] 赵永庆. 国内外钛合金研究的发展现状及趋势[J]. 中国材料进展, 2010, 29(5): 1-8.  
Zhao Yongqing. Current situation and development trend of titanium alloys[J]. Materials China, 2010, 29(5): 1-8. (in Chinese)
- [5] Zhou Lian. Ti-2007 science and technology: proceedings of the 11th world conference on titanium(JIMIC5)[M]. Kyoto; The Japan Institute of Metals, 2007.
- [6] 邓炬. 正在崛起的中国钛工业[J]. 稀有金属快报, 2007, 26(6): 1-6.  
Deng Ju. The rising Chinese titanium industry[J]. Rare Metals Letters, 2007, 26(6): 1-6. (in Chinese)
- [7] 赵永庆. 钛合金的研究与开发[J]. 钛工业进展, 2005, 22(4): 1-7.  
Zhao Yongqing. Research and development of titanium alloys[J]. Titanium Industry Progress, 2005, 22(4): 1-7. (in Chinese)
- [8] 李仲, 黄华斌, 张积广, 等. 疲劳裂纹萌生的声发射信号特征研究[J]. 结构强度研究, 2008(3): 31-37.  
Li Zhong, Huang Huabin, Zhang Jiguang, et al. Research on acoustic emission signal characteristics of fatigue crack initiation[J]. Structural Strength Research, 2008(3): 31-37. (in Chinese)
- [9] Christian U Grosse, Masayasu Ohtsu. Acoustic emission testing[M]. Berlin; Springer, 2008: 42-45.
- [10] 吴克勤, 谢里阳, 倪爱伟. 某钛合金材料拉伸过程的声发射特征[J]. 机械制造, 2007, 45(1): 50-52.  
Wu Keqin, Xie Liyang, Ni Aiwei. Acoustic emission characteristics of a titanium alloy during tensile process[J]. Machinery, 2007, 45(1): 50-52. (in Chinese)
- [11] 王建新, 耿荣生, 胡晓光, 等. 小波包-AR 潜在钛合金材料声发射监测技术中的应用[J]. 无损检测, 2007, 29(9): 512-515, 518.  
Wang Jianxin, Geng Rongsheng, Hu Xiaoguang, et al. Application of wavelet packet AR spectrum to the detection of acoustic emission signals of titanium alloys[J]. Nondestructive Testing, 2007, 29(9): 512-515, 518. (in Chinese)

### 作者简介:

张 昭(1984—),男,硕士,助理工程师。主要研究方向:飞机结构无损检测及健康检测。

肖迎春(1964—),男,博士,研究员。主要研究方向:飞机结构无损检测及健康检测。

王 倩(1985—),女,硕士,工程师。主要研究方向:飞机结构无损检测及健康检测。

郑建军(1986—),男,硕士,工程师。主要研究方向:全尺寸飞机静力/疲劳地面试验。

(编辑:马文静)