

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104466

钛合金疲劳裂纹的线性和非线性 超声综合定量检测技术*

许国琛¹ 邓江勇² 陈振华¹ 陈伟兵¹ 卢超^{1,3} 董德秀⁴

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063; 2. 广西防城港核电有限公司 防城港 538000;
3. 赣南师范大学物理与电子信息学院 赣州 341000; 4. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 沈阳 110043)

摘要:钛合金航空部件的低周疲劳裂纹在常规线性超声检测技术中易被低估,是飞机服役的安全隐患。针对上述问题开展了钛合金疲劳裂纹的非线性超声调制检测及其定量技术研究,提出了钛合金疲劳裂纹的线性和非线性超声综合检测方法。首先,通过金相法和线性超声相控阵检测技术对疲劳裂纹进行定量检测;其次,搭建了抗干扰能力强的非线性超声调制检测系统并设计了传感器布置方法;最后,基于声场分布分析提出疲劳裂纹的非线性超声调制定量方法,并将其定量检测结果与超声相控阵检测技术相对比。研究表明,超声相控阵方法测量的宏观裂纹长度为12 mm,而非线性超声方法测量的微裂纹延伸至距窄槽端部20 mm处,非线性调制检测技术在检测微裂纹和闭合裂纹具有显著优势。

关键词:钛合金;疲劳损伤;调制非线性系数;超声相控阵技术

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 430.25

The combination detection technology of the linear and the nonlinear ultrasound for fatigue cracks in titanium alloys

Xu Guochen¹ Deng Jiangyong² Chen Zhenhua¹ Chen Weibing¹ Lu Chao^{1,3} Dong Dexiu⁴

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
2. Guangxi Fangchenggang Nuclear Power Co., Ltd., Fangchenggang 538000, China;
3. Gannan Normal University, School of Physics and Electronic Information, Ganzhou 341000, China;
4. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

Abstract: Low-cycle fatigue cracks of titanium alloy aerospace components are easily underestimated by conventional linear ultrasonic inspection technology, which is a potential safety hazard for aircraft service. In the research, the modulation nonlinear ultrasonic detection and quantitative technology of fatigue cracks in titanium alloys were carried out. A combination of the linear and the nonlinear ultrasonic quantitative method was proposed for the fatigue cracks in titanium alloys. Firstly, the fatigue crack is quantitatively detected by the metallographic method and the ultrasonic phased array technology. Secondly, a modulation nonlinear ultrasonic detection system and a sensor arrangement method are designed for strong anti-interference ability. Finally, a modulation non-linear ultrasonic quantitative method for fatigue cracks is proposed based on the analysis of the sound field distribution, and the quantitative detection results are compared with ultrasonic phased array detection technology. The research results indicate that the length of the macro-crack measured by the ultrasonic phased array method is 12 mm, while the micro-crack measured by the nonlinear ultrasonic method extends to a distance of 20 mm from the end of the narrow groove. Thus, the non-linear modulation detection technology has more significant advantages in detecting micro-cracks and closed cracks.

Keywords: titanium alloy; nonlinear ultrasonic modulation; phased array technology; fatigue damage; modulation coefficient

0 引言

钛合金因具有密度小、耐腐蚀好、强度高等特点在航空航天、汽车、海洋工程等领域得到非常广泛的应用;以航空制造为例,波音 787 的叶片和叶盘,空客 A350XWB 的吊挂主结构、起落架、转向架、扭力臂和侧撑杆,均采用钛合金材料制造^[1-4]。航空钛合金部件在服役过程中大多受交变应力的作用,容易萌发疲劳裂纹并导致灾难性后果^[5-6]。然而,由于超声波和射线传播对微裂纹的取向敏感且透射率高,导致其对微裂纹的无损检测灵敏度差、易漏检的问题^[7]。非线性超声调制检测技术对接触性缺陷,如微裂纹、闭合裂纹、脱粘等具有很高的检测灵敏度^[8]。Li 等^[9]提出通过调制因子对小于 5 mm 的微裂纹进行定量评估。谢辉^[10]通过对接收信号小波分解并进行连续小波变换,并利用平均调制度对铝板腐蚀程度进行了表征。Klepka 等^[11]基于有限元数值方法研究了裂纹类型对振动声调制效应的影响。银信等^[12]基于有限元方法和试验方法提出可通过两横波混频的纵波定位塑性变形区。刘志勇等^[13]基于超声相控阵虚拟聚焦和物理聚焦两种模式下的缺陷非线性响应差异间接测量非线性分类,实现对疲劳裂纹长度成像检测。目前,对非线性超声调制的研究还多限于调制信号的检测机理、影响因素、信号处理以及损伤表征上^[14-17],裂纹或损伤的非线性超声调制定量方法研究还不够充分。

本研究提出微(闭合)裂纹的非线性超声调制定量检测技术,包括检测平台的搭建、传感器布置、基于声场的非线性超声定量方法,并将线性与非线性超声检测技术相结合全面定量钛合金疲劳裂纹尺寸。研究结果表明,线性超声相控阵检测技术可定量检测宏观裂纹,而非线性超声调制检测技术更适用于微(闭合)裂纹的定量检测;线性和非线性超声相结合、取长补短,是一种行之有效的钛合金疲劳裂纹和损伤定量无损检测方法,可应用于航空钛合金关键部件疲劳裂纹的全面定量检测中。

1 检测试样制备及超声相控阵检测

1.1 检测试样制备

试验采用的 TC4 (Ti-6Al-4V) 钛合金是一种典型的 ($\alpha+\beta$) 钛合金,因其耐热耐腐蚀性好、强度高优势,成为制造航空发动机叶片最为广泛的应用材料。参照国家标准《GBT 6398-2000 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》^[18],制作尺寸为 100 mm×72 mm×20 mm 的试样,试样中心窄槽的深度为 40 mm、宽度为 3 mm、尖端角度为 30°,如图 1(a)所示。疲劳试验机(INSTRON8801)的

应力比 R 和载荷频率分别设为 0.1 和 10 Hz,应变峰值设置为 0.2 mm,试样在疲劳周数为 154 000 时出现可见疲劳裂纹并停止加载。如图 1(b)所示,裂纹沿窄槽方向扩展共 20.5 mm,按裂纹形态可将疲劳裂纹扩展区分为 3 个区域:1 区裂纹长度 12.2 mm,张口最大、且张口沿扩展方向逐渐变窄;2 区长度 6.1 mm、难以观察;3 区可观察到 2.2 mm 的裂纹,其张口宽度非常小。

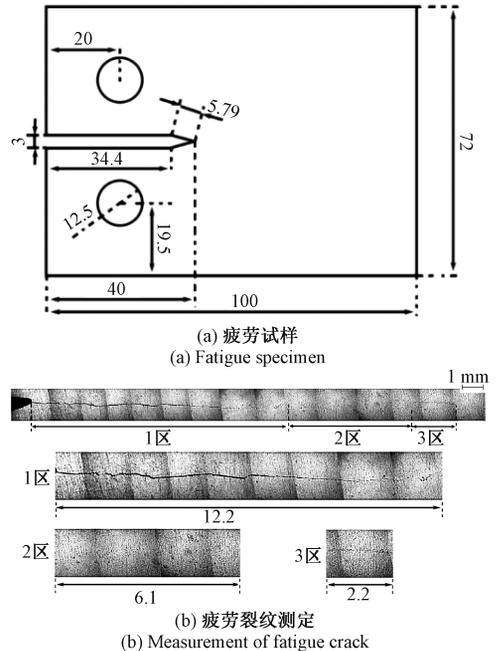


图 1 TC4 钛合金疲劳试样制备

Fig. 1 Fatigue specimen preparation of TC4 titanium alloy

1.2 超声相控阵检测

相控阵超声检测技术基于线性超声检测原理,通过调整激励时间使各阵元发射的超声波脉冲在预设位置同相位叠加。选用的相控阵直探头频率为 5 MHz、阵元总数 64、阵元组合方式为 16 阵元,线性扫查检测结果如图 2 所示。线性 B 扫描图像显示:裂纹长度约 12 mm,与金相实验显示的宏观裂纹长度一致,而与金相测得的裂纹总延伸长度(20.5 mm)有较大差距。因此,尽管相控阵超声检测技术可使线性超声检测的灵敏度进一步增强,但该技术也只能检测张口较大的宏观裂纹缺陷(1 区裂纹),而无法检测闭合裂纹缺陷(2 区)及张口较小的微裂纹缺陷(3 区),线性超声检测技术无法完全满足疲劳微裂纹的定量无损检测。

2 非线性超声调制检测技术

2.1 检测原理

非线性超声调制检测技术利用低频信号 f_1 使缺陷接

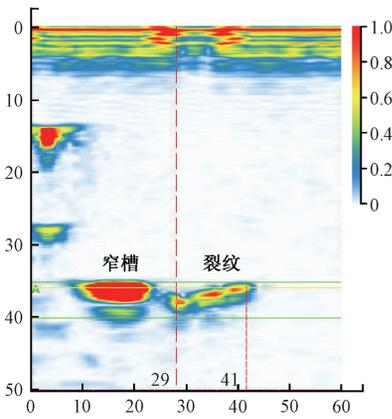


图 2 超声相控阵 B 扫描图像

Fig. 2 B scan image of ultrasonic phased array method

触界面出现周期性的张开和接触,高频超声 f_0 在缺陷界面接触时通过、张开时阻断的现象进行无损检测。非线性超声调制检测信号一般出现混频调制响应,即:接收到的高频信号会在频率位置 $f_0 - f_1$ 及 $f_0 + f_1$ 位置出现调制边频,通过分析 f_0 附近的超声波频谱成分可发现检测对象中的微裂纹和损伤。非线性系统的响应 σ 可表示为^[17]:

$$\begin{aligned} \sigma \approx & A_0 E \sin 2\pi f_0 t + A_1 E \sin 2\pi f_1 t + \\ & E \alpha_1 \left(\frac{A_0^2 + A_1^2}{2} - \frac{A_1^2}{2} \cos 2\pi f_1 t \right) - \\ & E \alpha_1 \frac{A_0^2}{2} \cos 2\pi f_0 t + E \alpha_1 A_0 A_1 \cos 2\pi (f_0 + f_1) t - \\ & E \alpha_1 A_0 A_1 \cos 2\pi (f_0 - f_1) t \end{aligned} \quad (1)$$

由式(1)可知,非线性系统响应频率成分除了含有 f_0 和 f_1 以外,还含有谐波成分 $2f_0$ 和 $2f_1$,以及非线性调制成分 $f_0 \pm f_1$ 。

可选取一次调制边频之和与主频的比值作为调制系数,即:

$$M = \frac{A_{1+} + A_{1-}}{A_0} \quad (2)$$

式中: A_{1-} 和 A_{1+} 为相应一次边频 $f_0 \pm f_1$ 的幅度; A_0 为相应主频 f_0 的幅度。

2.2 非线性超声调制检测系统及试验方法

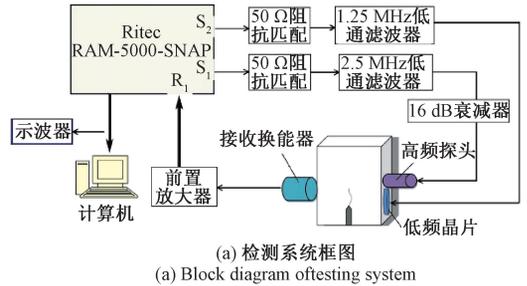
依托高能超声检测系统搭建非线性超声调制检测系统,系统工作频率 250 kHz~30 MHz,可激发功率达 5 kW 且周期、波形可调的高能射频脉冲信号,发射、接收传感器参数如表 1 所示。

表 1 发射接收传感器参数

Table 1 Parameters of transmitter and receiver

低频发射探头		高频发射探头		高频接收探头	
中心频率	晶片直径	中心频率	晶片直径	中心频率	晶片直径
370 kHz	20 mm	2.5 MHz	14 mm	2.5 MHz	20 mm

系统结构如图 3 所示,分别从 S_1 、 S_2 端输出高频和低频激励信号,在 S_1 端连接了 2.5 MHz 的低通滤波器以避免高频信号干扰,连接了衰减器避免高幅度信号对传感器的冲击;在 S_2 端连接了 1.25 MHz 低通滤波器以获得较为单一的低频激励信号;在 R_1 接收端连接了前置放大器以提高接收灵敏度。



(a) 检测系统框图
(a) Block diagram of testing system

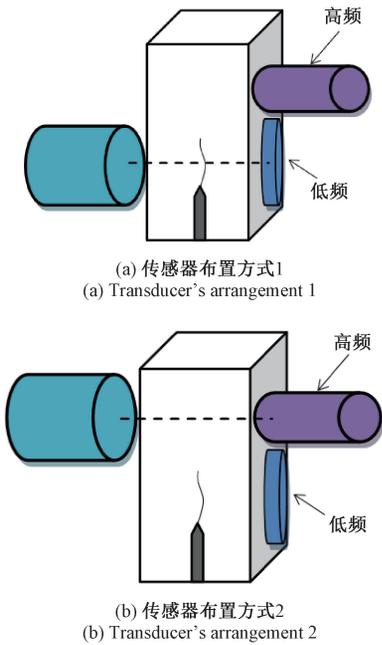


(b) 检测系统照片
(b) Photo of testing system

图 3 非线性超声调制检测系统

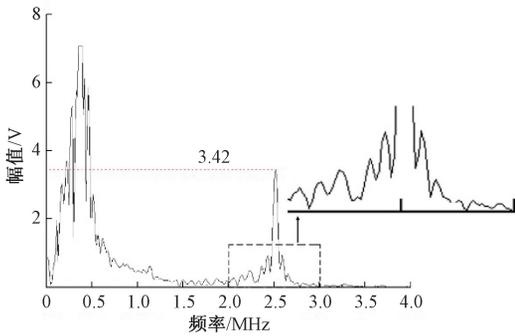
Fig. 3 Testing system of nonlinear ultrasonic modulation method

非线性超声调制检测技术需将高能量的低频振动作用在疲劳裂纹或损伤上以激励其非线性应力应变行为,高频发射探头与低频晶片布置于同一检测面,高低频发射传感器的边缘间距为 1 mm^[19]。按接收传感器位置设计两种探头布置方式:1)接收传感器与低频振动传感器相对布置(图 4(a));2)接收传感器与高频发射传感器相对布置(图 4(b))。由传感器布置方式 1 和方式 2 提取检测信号并通过傅里叶变换分析其频域特征,方式 1 所得频谱中未产生明显边频,方式 2 所得频谱中可清楚观察到一次调制边频,如图 4(c)、(d)所示。因此,为高效提取调制边频信号,应采用方式 2 的传感器布置方式。分析原因是低频探头的声场作用范围大,使裂纹发生“张开”和“闭合”;而高频发射信号声场作用范围更小,穿透裂纹时被裂纹的非线性应力-应变状态“调制”,调制信息携带在高频信号中且较为微弱,因此为了高效接收信号的调制信息,接收探头应该与高频发射探头正对布置,即布置方式 2 能够有效的接收到调制边频信号^[20]。

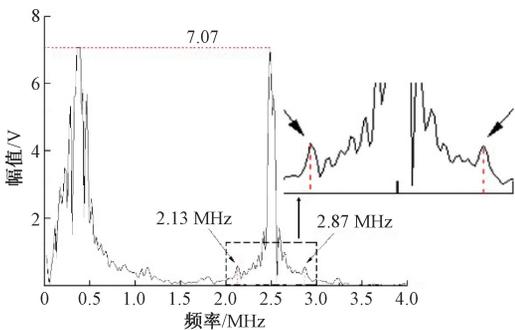


(a) 传感器布置方式1
(a) Transducer's arrangement 1

(b) 传感器布置方式2
(b) Transducer's arrangement 2



(c) 方式1提取的检测信号
(c) Testing signal of arrangement 1



(d) 方式2提取的检测信号
(d) Testing signal of arrangement 2

图 4 换能器布置方式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of transducer's arrangement

3 非线性超声调制定量检测方法及机理分析

3.1 激励声场分析

传感器布置方式 2 能够有效的接收调制边频信号，

疲劳裂纹的非线性超声响应是两发射传感器形成声场的相互叠加、共同作用的结果,高能低频信号是使缺陷出现非线性响应的必要条件。基于 6 dB 法测量两发射传感器的半扩散角以确定发射声场主声束形成的高能叠加区域,该区域可激发裂纹的调制非线性响应。理论计算可知,高低频传感器半扩散角分别为 $\alpha=9.65^\circ, \beta=52.68^\circ$,主声束形成的叠加区域由左边界和右边界围绕而成,该区域内既可满足大幅度低频振动激励缺陷的非线性响应又可保证较大的高频信号穿过缺陷被传感器接收。为便于定量检测缺陷,定义定量标线为高低频发射传感器间隙的中心垂线。定量标线与低频主声束右边界的交点距检测面为 l ,表示为:

$$l = \frac{D_l}{\tan\beta} \tag{3}$$

由式(3)可知, $l=7.6\text{ mm}$ 。由低频传感器的声场未扩散区域长度为近场区的 1.6 倍可计算低频传感器未扩散区长度为 $10\text{ mm} > l$, (钛板声速为 $6\ 100\text{ m/s}$)。因此,在定量线范围内具备高幅度的低频声场,当缺陷与定量标线相交时最有可能激励缺陷的非线性超声响应信号。

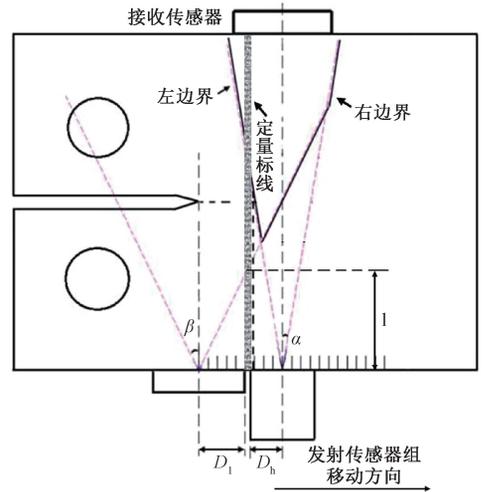


图 5 非线性超声调制检测方法

Fig. 5 Experimental setup of nonlinear ultrasonic modulation

3.2 非线性超声调制定量检测

如图 5 所示,保持发射接收传感器相对位置不变,调整发射接收传感器位置使定量标线与窄槽端部相交,以此为起始位置整体向右移动,移动过程中每隔 2 mm 采集检测信号并进行频谱分析;按式(2)计算调制非线性系数,采样位置累计 16 个,传感器组的位移总长 30 mm。图 6(a)、(b)所示为定量标线与损伤区域 3 相交时的检测信号及其频谱分布,接收到的信号频谱中除了 2.5 MHz 的主瓣频率分量外,还存在 2.13 以及 2.87 MHz 的调制边频分量。

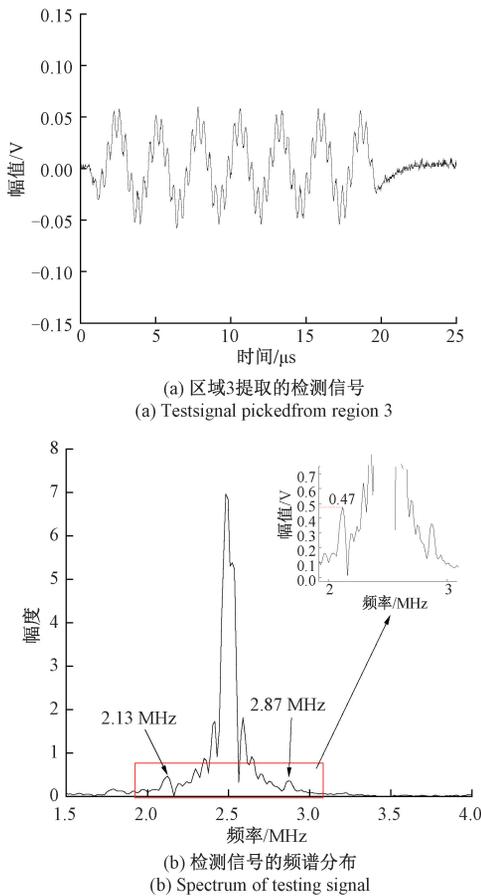


图 6 检测信号

Fig. 6 Test signals

由于调制非线性系数易受外部因素的干扰,其值存在一定波动性。因此,对每个检测位置进行 12 次信号采样,分析调制非线性系数的平均值和最大值随位移的变化。如图 7 所示,尽管调制非线性系数存在一定波动,其均值和最大值随传感器位移呈相似的规律性变化;当定量标线移动至距窄槽端部 0~8 mm 时,定量标线与宏观缺陷相交,调制非线性系数较低;当移动至距端部 8~20 mm 时,定量标线与微观裂纹区域 2 及区域 3 相交,调制非线性系数明显增大;此后,定量标线移出缺陷,调制非线性系数降低。因此,可通过定量标线处的调制非线性系数对缺陷进行定量检测。根据定量标线移动至距窄槽端部 8~20 mm 的相对非线性系数较大可知:微观裂纹延伸至距窄槽端部 20 mm 处,测量结果与金相结果一致(金相显示微观裂纹延伸至距窄槽端部 20.5 mm 处)。此外,图 7 还明确基于调制非线性系数无法检测宏观裂纹(定量标线位移 0~8 mm),低频超声波入射该宏观裂纹区域就像入射至刚性界面一样,无法使该处宏观裂纹闭合,不能产生超声波调制作用;因此,宏观裂纹需通过线性超声检测技术进行定量检测。实际检测中,可综合应

用线性超声相控阵检测技术和非线性超声调制检测技术对疲劳裂纹进行全面定量无损检测。

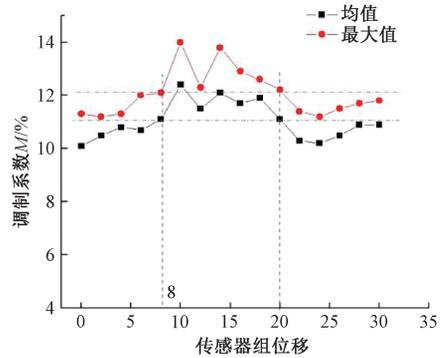


图 7 调制非线性系数随传感器组位移的变化

Fig. 7 The modulation nonlinearity varied with the displacement of the transducers

4 结 论

基于线性超声波原理的超声相控阵检测技术可形成聚焦声场,能够对开口裂纹进行高灵敏度快速成像检测。然而,相控阵检测图像无法显示疲劳微裂纹。本研究通过优化检测系统参数,结合声场分析提出新型调制非线性超声定量检测方法,可准确测定透声性强、线性超声无法检测的闭合裂纹(损伤)的延伸状态。由此,综合应用线性和非线性超声检测技术可对疲劳裂纹进行更为全面、可靠的检测。随着非线性专用传感器及检测系统的发展,调制非线性超声定量检测技术的抗干扰能力和稳定性将进一步增强,可望为疲劳损伤容限设计和评估提供更为有效的无损检测技术支持。

参考文献

[1] 杨硕,张俊红,林杰威,等. 考虑裂纹形状变化的 TC4 钛合金振动疲劳裂纹扩展寿命预测[J]. 航空动力学报, 2016, 31(10): 2353-2358.
 YANG SH, ZHANG J H, LING J W, et al. Vibration fatigue crack propagation life prediction of TC4 titanium alloy considering the change of crack shape [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(10): 2353-2358.

[2] SINGH P, PUNGOTRA H, KALSI N S. On the characteristics of titanium alloys for the aircraft applications[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(8): 8971-8982.

[3] 张宝柱,孙洁琼. 钛合金在典型民用飞机机体结构上的应用现状[J]. 航空工程进展, 2014, 5(3): 275-280.
 ZHANG B ZH, SUN J Q. Application status of titanium

- alloy in typical civil aircraft body structure [J]. *Advances in Aeronautical Engineering*, 2014, 5(3): 275-280.
- [4] 赵丹丹. 钛合金在航空领域的发展与应用[J]. *铸造*, 2014, 63(11): 1114-1117.
- ZHAO D D. Development and application of titanium alloy in aviation field [J]. *Casting*, 2014, 63(11): 1114-1117.
- [5] GUO P, ZHAO Y Q, ZENG W D. Fatigue crack growth behavior in TC4-DT titanium alloy with different lamellar micro-structures [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(2): 277-281.
- [6] 苏胜, 郭利军, 张东博, 等. 超声载荷下 TC4 钛合金的疲劳寿命分析[J]. *声学技术*, 2018, 37(1): 57-61.
- SU SH, GUO L J, ZHANG D B, et al. Fatigue life analysis of TC4 titanium alloy under ultrasonic loading [J]. *Acoustic Technology*, 2018, 37(1): 57-61.
- [7] 周正干, 刘斯明. 非线性无损检测技术的研究、应用和发展[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(8): 2-11.
- ZHOU ZH G, LIU S M. Research, application and development of nonlinear nondestructive testing technology [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(8): 2-11.
- [8] 刘学君, 杨晓华, 马广婷, 等. 基于非线性弹簧模型的振动声调制机理研究[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(10): 233-240.
- LIU X J, YANG X H, MA G T, et al. Study on vibration tone control mechanism based on nonlinear spring model [J]. *Vibration and Shock*, 2018, 37(10): 233-240.
- [9] LI N, SUN J J, JIAO J P, et al. Quantitative evaluation of micro-cracks using nonlinear ultrasonic modulation method [J]. *NDT&E International*, 2016, 79: 63-72.
- [10] 谢辉. 铝板腐蚀振动声调制检测方法研究[D]. 北京:北京工业大学, 2014.
- XIE H. Study on the detection method of aluminum plate corrosion vibration [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.
- [11] KLEPKA A, STASZEWSKI W J, JENAL R B, et al. Nonlinear acoustics for fatigue crack detection-experimental investigations of vibro-acoustic wave modulations [J]. *Structural Health Monitoring*, 2012, 11(2): 197-211.
- [12] 银信, 朱武军, 孙茂循, 等. 裂纹尖端塑性区非线性超声混频定位表征[J]. *声学学报*, 2021, 46(3): 463-470.
- YIN X, ZHU W J, SUN M X, et al. Characterization of nonlinear ultrasonic mixing localization of crack tip plastic zone [J]. *Journal of Acoustics*, 2021, 46(3): 463-470.
- [13] 刘志勇, 滕达, 项延训. 幅度调制的非线性超声相控阵成像方法[J/OL]. *应用声学*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2121.04.20210607.1725.002.html>.
- LIU ZH Y, TENG D, XIANG Y X. Nonlinear ultrasonic phased array imaging method based on amplitude modulation [J/OL]. *Application of Acoustic*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2121.04.20210607.1725.002.html>.
- [14] 张闯, 周希运, 刘素贞, 等. 电磁加载下金属板闭合裂纹的超声调制实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(4): 1224-1231.
- ZHANG CH, ZHOU X Y, LIU S ZH, et al. Experimental study on ultrasonic modulation of closed crack in metal plate under electromagnetic loading [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(4): 1224-1231.
- [15] 肖佳辰, 陈果, 卢超, 等. 复合材料冲击损伤非线性振动声调制检测技术的试验研究[J]. *实验力学*, 2018, 33(6): 949-956.
- XIAO J CH, CHEN G, LU CH, et al. Experimental study on nonlinear vibration tone measurement technique for impact damage of composite materials [J]. *Experimental Mechanics*, 2018, 33(6): 949-956.
- [16] 刘素贞, 权泽, 张闯, 等. 疲劳裂纹的电磁超声混频非线性检测[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(5): 1694-1702.
- LIU S ZH, QUAN Z, ZHANG CH, et al. Nonlinear detection of fatigue crack by electromagnetic ultrasonic mixing [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(5): 1694-1702.
- [17] 屈文忠, 李拯, 王芝, 等. 基于非线性超声调制方法的损伤识别与定位[J]. *振动测试与诊断*, 2016, 36(5): 852-857, 1020.
- QU W ZH, LI ZH, WANG ZH, et al. Damage identification and localization based on nonlinear ultrasonic modulation method [J]. *Vibration Testing and Diagnosis*, 2016, 36(5): 852-857, 1020.
- [18] 尹昱, 陈振华, 肖峰, 等. 不锈钢疲劳损伤的非线性超声检测方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020,

34(1): 68-73.

YIN Y, CHEN ZH H, XIAO F, et al. Nonlinear ultrasonic detection method for fatigue microdamage of stainless steel [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(1): 68-73.

- [19] 田宇, 高强, 李栋. 测距传感器性能评估与故障诊断方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10): 172-178.

TIAN Y, GAO Q, LI D. Research on performance evaluation and fault diagnosis of distance sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(10): 172-178.

- [20] 焦敬品, 杨素方, 何存富, 等. 单模态兰姆波线形阵列传感器研制及应用[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 155-162.

JIAO J P, YANG S F, HE C F, et al. Development and application of single mode Lamb wave linear array sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 155-162.

作者简介



许国琛, 现为南昌航空大学硕士研究生, 主要研究方向为超声波无损检测技术。

E-mail: 976629887@qq.com

Xu Guochan now is a M. Sc candidate at Nanchang Hangkong University. His main research interest includes ultrasonic nondestructive testing technology.



陈振华(通信作者), 2004年于江西师范大学获得学士学位, 2010年于北京工业大学获得博士学位, 现为南昌航空大学副教授, 主要研究方向为超声波无损检测技术及其系统、测控技术与仪器。

E-mail: zhenhuachen@yeah.net

Chen Zhenhua (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jiangxi Normal University in 2004, Ph. D. degree from Beijing University of Technology in 2010. Now he is an associate professor at Nanchang Hangkong University. His main research interests include ultrasonic nondestructive testing and related system, control technology and instrument.