

DOI: 10.11973/wsje201808007

金属表面疲劳损伤的非线性 Rayleigh 波检测方法

李海洋¹, 潘强华², 王召巴¹

(1. 中北大学 信息与通信工程学院, 太原 030051; 2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100029)

摘要:提出了一种非线性 Rayleigh 表面波检测方法来实现金属表面疲劳损伤的检测。搭建了非线性 Rayleigh 波检测平台,进行了金属材料表面疲劳损伤的检测,测量不同拉伸载荷周期数目下非线性系数的变化,结合金属材料表面微观形态,建立了非线性系数-材料微观结构-宏观力学性能之间的联系。试验结果表明,非线性 Rayleigh 波检测方法可用于金属表面疲劳损伤的检测,具有一定的应用价值。

关键词:疲劳损伤; Rayleigh 表面波; 非线性系数; 微观检测

中图分类号: TG115.28; TB551; TB31

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2018)08-0034-05

Nonlinear Rayleigh Wave Detection Method for Metal Surface Fatigue Damage

LI Haiyang¹, PAN Qianghua², WANG Zhaoba¹

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

Abstract: A nonlinear Rayleigh surface wave detection method was proposed to detect and evaluate the fatigue damage of metal surface. The main contents include: the nonlinear Rayleigh wave detection platform was constructed; the detection of fatigue damage of metal materials surface was realized; measuring the variation of nonlinear coefficients under different tensile load cycles and combining with the micro morphology test of metal materials, the relationship between the nonlinear coefficient, the microstructure of materials and the macro mechanical properties was established. The experimental results show that the nonlinear Rayleigh wave detection method can be used to detect the fatigue damage of metal surface, and has a certain application value.

Key words: corrosion fatigue; Rayleigh surface wave; nonlinear coefficient; microscopic detection

材料的寿命一般可分为早期性能退化、损伤起始与积累以及最后断裂失效 3 个阶段,其中第一阶段占了金属工件整个疲劳寿命的 80%~90%^[1-3]。金属工件疲劳寿命的检测与评价一直是航空以及船舶等行业关心的问题^[4]。金属工件应力集中区在循环拉伸载荷的长期作用下,会有金属材料位错结构

的滋生。随着循环载荷的持续作用,金属材料内部位错密度不断增大,位错间会相互合并和生长,逐步在工件表面形成微孔,这往往是更为严重损伤的起始。因此,开展对拉伸疲劳加载下金属表面疲劳损伤的检测与评价就显得十分必要。

线性超声检测技术是依赖声波传播过程中产生的声波幅度变化、回波时间等线性特征参量进行检测和评价的,对金属材料早期的性能退化不敏感,无法实现金属表面疲劳损伤的检测^[5-6]。非线性声学检测方法^[7-9]是采用有限振幅声波在固体材料中传播引起的非线性声学现象对材料性能进行评价的方法。对于金属材料表面损伤的检测与评价,通常采用非线性表面检测方法。税国双^[6]采用 Rayleigh

收稿日期: 2018-04-19

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(11604304); 山西省重点研发计划资助项目(201603D121006-1); 山西省基础研究计划青年面上项目(201701D221127)

作者简介: 李海洋(1987—), 讲师, 主要研究方向为非线性超声无损检测及信息与信号处理。

通信作者: 李海洋, climb_021@163.com

波对 AZ31 镁铝合金试件表面的镍合金涂层在拉伸载荷作用下的损伤演化,进行了非线性超声无损评价研究。HERRMANN^[10]设计了非线性表面波方法的试验步骤,评价了镍合金材料样品的高温损伤。WALKER^[11]采用非线性表面波对 A36 钢材低周疲劳的塑性形变进行了检测。颜丙生^[12]提出了直接激发和接收 Rayleigh 波的方式,检测了镁合金厚板的表面疲劳损伤。

笔者搭建了非线性超声检测平台,建立了非线性系数与拉伸疲劳载荷周期数之间的关系;结合疲劳样品的表面形态检测,完成了金属材料微观结构的评价。最终,采用非线性 Rayleigh 波检测方法,实现了对拉伸载荷作用下金属表面疲劳损伤的早期评价与检测。

1 理论分析

在各向同性固体材料的半空间中,Rayleigh 波沿其自由表面传播。随着基波的传播,二次谐波是由材料的非线性产生的。对平面 Rayleigh 波而言,可得到如下关系^[13-15]

$$\frac{A_2}{A_1^2} \propto \frac{\omega^2 x \beta}{c_R^2} \quad (1)$$

式中: c_R 为 Rayleigh 波的传播波速; A_1 和 A_2 分别为基波和二次谐波信号的幅值; x 为 Rayleigh 波在固体材料中的传播距离; ω 为角频率; β 为超声非线性系数。

由于实际试验过程中,传播速度和激发频率都是保持不变的常数,所以 β 可以通过测量基波和二次谐波的幅值得到。因此,非线性系数又可表示为

$$\beta = \frac{A_2}{A_1^2 x C} \quad (2)$$

式中: C 常数包括所有的常数参数。

试验中, x 是保持不变的,可定义相对非线性系数 β' 来代替 Rayleigh 波的非线性系数的变化情况,其相对非线性系数的表达式为

$$\beta' = A_2 / A_1^2 \quad (3)$$

待测样品的非线性主要由以下两部分构成:①金属材料固有的非线性,来源于构成材料的原子间相互作用力的非简谐性;②金属材料受到外界循环载荷作用在工件的内部和表面产生位错、滑移带和微裂纹等微观结构,产生了非线性。其中,第②部分是声学非线性的主要来源,会造成非线性声学系数的增长,而位错、滑移带和微裂纹等微观结构的滋生正是金属材料力学性能退化的主要原因。因此,文

章采用量化非线性系数与加载拉伸疲劳周期数目的关系,来建立非线性系数-金属材料微观结构-宏观力学性能三者之间的关系。

2 试验过程

2.1 试验装置

搭建非线性 Rayleigh 表面波超声检测系统。RAM-5000-SNAP 非线性超声检测系统产生周期数为 30,频率为 5MHz 的高能 tone-burst 信号,该信号经过低通滤波器后,由发射换能器激发超声波,经过耦合剂耦合进入楔块中,经过波型转换产生表面波,在待测试件表面传播。最终,表面波信号被楔块和接收换能器接收。试验装置、试验装置的部分放大图和试验框图如图 1~3 所示。



图 1 试验装置外观

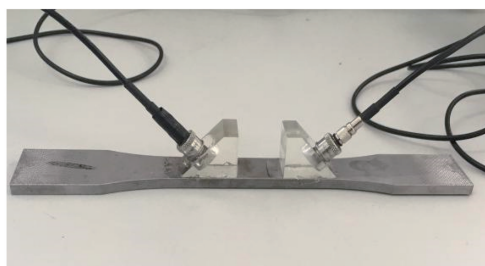


图 2 试验装置的部分放大图

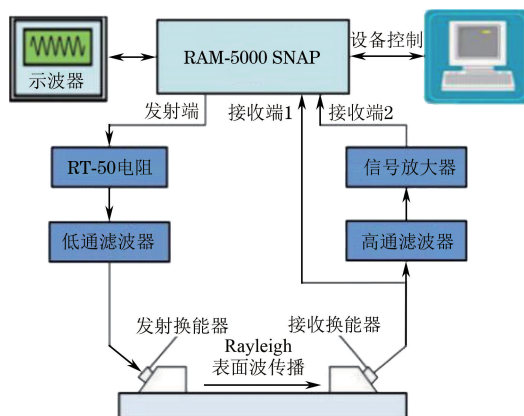


图 3 试验系统连接框图

由于待测样品表面存在疲劳损伤,Rayleigh 表面波在传播过程中发生了畸变,即产生了二次及

以上的高次谐波。由于二次及以上的高次谐波信号一般都很微弱,很容易淹没在系统噪声中,所以,在发射端放置了低通滤波器滤掉高频成分,且接收换能器具有宽频带特性。接收换能器的频谱如图 4 所示。

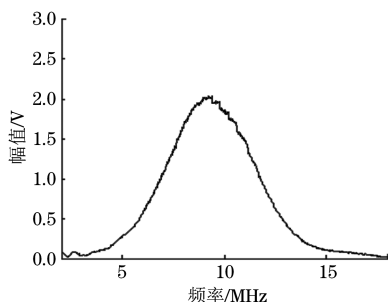


图 4 接收换能器频谱

为了更好地提取二次谐波信号,接收信号时需经过 10 MHz 的高通滤波,再经过信号放大器放大,最终被非线性超声检测系统采集,同时在示波器上显示。试验中,使用常规医用超声耦合剂实现换能器、楔块和待测试件接触面的有效耦合。

2.2 Rayleigh 表面波的激发

采用斜楔法激发 Rayleigh 波。换能器激励产生纵波声信号,信号传播至楔块与待测样品界面处发生透射现象,满足 Snell 定律

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \quad (4)$$

式中: c_1 为楔块的纵波声速; c_2 为 Rayleigh 波声速; θ_1 和 θ_2 分别为波的入射角和折射角,材料中的声速如表 1 所示。

此处楔块材料为有机玻璃,待测金属样品为 Q235 钢。为了在试件中激发有效的 Rayleigh 波,必须满足 $\theta_2 = 90^\circ$ 。由此,可计算出纵波入射角为

$$\sin \theta_1 = \sin 90^\circ (c_1/c_2) = 60^\circ \quad (5)$$

试验中采用的楔块角度为 60° ,满足式(5),可实现 Rayleigh 表面波的有效激发。

表 1 材料中的声速 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

材料	声速
有机玻璃/纵波	2 680
钢材/表面波	3 013

2.3 试验样品

试验中待测试件的几何尺寸如图 5 所示。待测试件满足应力集中的系数为 $1.6(\sigma_{\max}/\sigma)$ 。

采用 PA-100 型疲劳试验机进行拉伸疲劳试

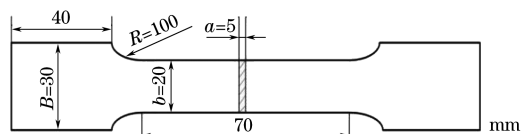


图 5 试件的几何尺寸

验。疲劳加载频率为 20 Hz,应力比 $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0.25$,平均加载载荷大小为 10 kN,振幅为 6 kN,疲劳载荷为正弦交变载荷。为了观察不同疲劳周数对试验结果的影响,每加载 10 万次后将试件从疲劳试验机上卸下来,采用图 1 所示的试验装置进行非线性系数测量。重复上述步骤,建立非线性参数与疲劳周期数之间的关系,进而可建立非线性参数-材料宏观力学性能之间的关系。

3 试验结果与分析

3.1 波形分析

采用非线性 Rayleigh 波检测平台,实现基波和二次谐波时域波形的接收,分别如图 6,7 所示。对接收到的时域波形进行 FFT 变换,在频率为 5 MHz 的基频位置上得到基波幅值 A_1 ,基波频域波形如图 8 所示;在频率为 10 MHz 的二倍频位置上得到二次谐波幅值 A_2 ,如图 9 所示。图 9 中二次谐波幅值经过放大器放大 20 dB。试验过程中,测量基波与二次谐波幅值时应保证测量条件的一致性,且每次测量过程重复 3 次,结果取其平均值,以降低随机因素对试验的影响,保证试验结果的准确性和可靠性。

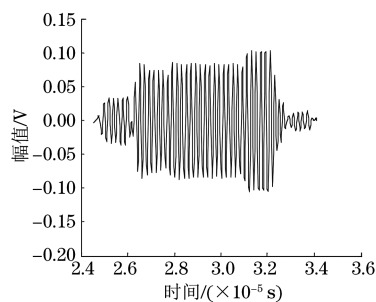


图 6 基波的时域波形

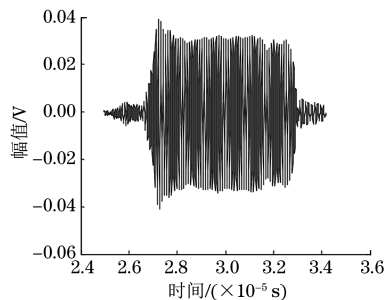


图 7 二次谐波的时域波形

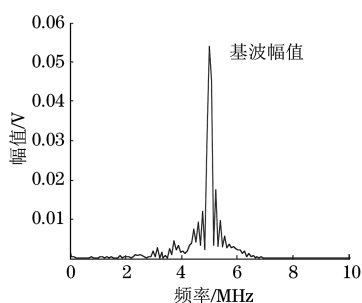


图8 基波频域波形

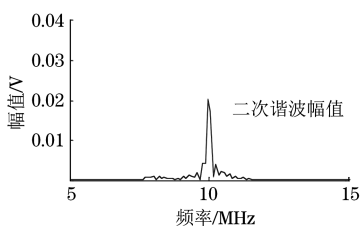


图9 二次谐波频域波形

3.2 试验结果分析

利用上述试验系统和试验方法对试件进行了不同拉伸载荷周期数目下超声非线性系数的测量。将测量到的基波与二次谐波幅值代入式(3),计算出被测试件的超声相对非线性系数。 β'_0 为测量的未进行疲劳加载时试件的超声相对非线性系数, β' 为离线测量的不同拉伸载荷周期数目下试件的超声相对非线性系数,利用 β'/β'_0 对超声相对非线性系数进行正则化处理。用不同拉伸载荷周期数目的正则化相对非线性系数来表示金属表面疲劳损伤的程度。图10为正则化后的超声相对非线性系数与拉伸载荷周期数目的关系。

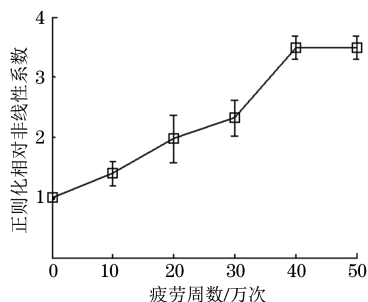


图10 正则化相对非线性系数与拉伸载荷周期数目关系

从图10可以看出,随着试件疲劳载荷周期数目的增大,正则化相对非线性系数整体上呈增长趋势。Q235钢的超声相对非线性系数与不同拉伸载荷周期数目的关系可分为两个阶段。第一阶段:拉伸载荷周期数目为40万次之前,超声非线性系数随疲劳周期数目的增加呈明显的单调增加的变化趋势。第二阶段:拉伸载荷周期数目为40

万次之后,超声非线性系数基本保持不变。试验结果表明,超声非线性系数对Q235钢材料表面的早期疲劳损伤十分敏感。可见,在疲劳载荷作用前完成金属结构非线性声学系数的初始标定后,可利用非线性超声无损检测技术来定期离线检测在役零部件的表面疲劳程度。

3.3 材料微观结构观测

为了进一步分析Q235钢非线性的来源,采用S-3400N扫描电子显微镜对拉伸疲劳样品进行了微观结构的观测,目的是对比原始样品与拉伸疲劳载荷作用后试验样品的表面形态。观察过程应在观察面、放大倍数等条件一致的情况下进行,以确保对比结果的准确性。原始样品和拉伸疲劳载荷作用后试验样品表面形态的观察结果如图11所示。

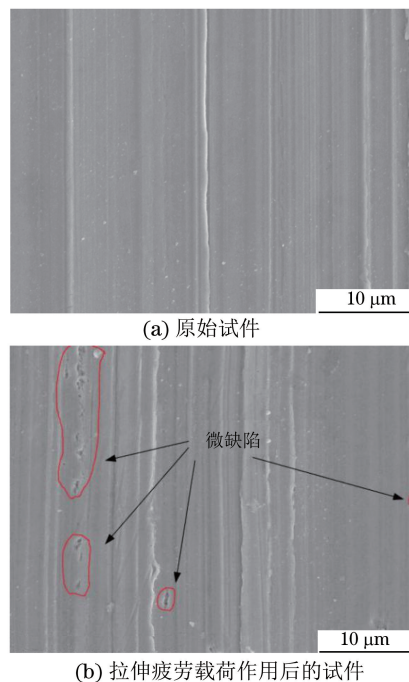


图11 电子显微镜下试件的原始表面形态与拉伸疲劳载荷作用后的表面形态对比

对比图11(a),(b)可以看出,原始试件表面没有损伤,而拉伸疲劳载荷作用后试验样品表面出现了微孔等微损伤,且这些损伤的形状不规则,大小不等,如图11(b)中红色圈标注的地方。试验结果表明,在试件进入塑性变形阶段后,样品表面出现微孔等微观缺陷,这些微损伤是超声非线性系数增大的原因。由此,建立了试件的非线性系数-微结构-材料宏观力学性能三者之间的关系。

4 结论

(1) 研究了一套利用 Rayleigh 表面波离线测量

超声非线性系数的试验系统。采用该系统测量了 Q235 钢在不同拉伸载荷周期数目下的超声非线性系数的变化情况,试验结果表明,非线性 Rayleigh 波检测方法可用于金属表面疲劳损伤的检测。

(2) 采用 S-3400N 扫描电子显微镜观察了 Q235 钢在拉伸载荷作用后的表面微观形态的变化情况,建立了非线性系数-微结构-材料宏观力学性能三者之间的关系,结果表明,超声非线性系数主要来源于金属表面微孔等疲劳损伤,为非线性 Rayleigh 表面检测方法的应用提供有力论据。

参考文献:

- [1] 税国双,汪越胜,曲建民.材料力学性能退化的超声无损检测与评价[J].力学进展,2005,35(1):52-68.
- [2] CANTRELL J H. Substructural organization, dislocation plasticity and harmonic generation in cyclically stressed wavy slip metals[J]. Proceedings of the Royal Society A, 2004,460(2043):757-780.
- [3] 吴斌,颜丙生,何存富,等. AZ31 镁合金早期力学性能退化非线性超声检测[J]. 航空材料学报, 2011, 31(1):87-92.
- [4] 周正干,刘思明.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.
- [5] JHANG K Y. Nonlinear ultrasonic techniques for nondestructive assessment of micro damage in material: A review [J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2009, 10(1):123-135.
- [6] 税国双,汪越胜.金属材料表面涂层损伤的非线性超声评价[J]. 固体火箭技术, 2012,35(5):703-706.
- [7] 吴其建.基于非线性声学的铝材疲劳裂纹检测方法研究与实验[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2016.
- [8] 张剑锋,轩福贞,项延训.材料损伤的非线性超声评价研究进展[J]. 科学通报, 2016, 61(14):1536-1550.
- [9] 李子豪.非线性无损检测技术的研究和应用[J]. 黑龙江科学, 2015(15):150-151.
- [10] HERRMANN J, KIM J Y, JACOBS L J, et al. Assessment of material damage in a nickel-base superalloy using nonlinear Rayleigh surface waves[J]. Journal of Applied Physics, 2006,99(12):124913.
- [11] WALKER S V, KIM J Y, QU J, et al. Fatigue damage evaluation in A36 steel using nonlinear Rayleigh surface waves[J]. NDT & E International, 2012,48(2):10-15.
- [12] 颜丙生,吴斌,何存富.利用非线性 Rayleigh 波检测镁合金厚板疲劳损伤的仿真和试验研究[J]. 机械工程学报, 2011,47(18):7-14.
- [13] ZEITVOGEL D T, MATLACK K H, KIM J Y, et al. Characterization of stress corrosion cracking in carbon steel using nonlinear Rayleigh surface waves [J]. NDT & E International, 2014,62(2):144-152.
- [14] GUO S, ZHANG L, MIRSHEKARLOO M S, et al. Method and analysis for determining yielding of titanium alloy with nonlinear Rayleigh surface waves [J]. Materials Science & Engineering A, 2016,669: 41-47.
- [15] HAN Z Y, HUANG X G, CAO Y G, et al. A nonlinear cumulative evolution model for corrosion fatigue damage[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2014,15(6): 447-453.

(上接第 33 页)

- [10] 徐轲,浦蕾晔,段红红,等.焊缝无损检测中未焊透与未熔合的识别[J].焊管,2011,34(6):51-53.
- [11] 王敏.基于扩展有限元法的平板模型裂纹扩展研究[D].大连:大连理工大学,2011.
- [12] 孙晓菊. I + II 复合型裂纹在 16MnDR 制压力容器壳体中的研究[D].北京:北京化工大学,2013.
- [13] 樊利国,荆洪阳.爬波检测及其应用[J].无损检测, 2005,27(4):212-216.
- [14] 杨志刚,郭亚男.爬波在小径管探伤中的应用[J].甘肃科技,2011,27(22):85-87.
- [15] 王维东,张振华,曹云峰,等.小径管焊缝的超声爬波检测方法[J].无损检测,2017,39(7):28-32.
- [16] 许志升,袁焕源.插入式管座角焊缝相控阵超声检测技术研究[J].吉林电力,2017,45(3):39-41.
- [17] 林彤.电站锅炉管座角焊缝相控阵超声检测应用[J].质量技术监督研究,2016(5):2-6.
- [18] 夏舞艳,贺存良.相控阵技术在电站锅炉管座角焊缝检测中的应用[J].机电工程技术,2016,45(2):81-84.
- [19] 蔡伟,姚志忠.插入式管座角焊缝超声波探伤缺陷定位方法[J].无损探伤,2008,32(3):7-11.
- [20] 刘长福,敬尚前,李中伟,等.圆形工件超声波周向检测回波定位及复验[J].无损探伤,2011,35(1):13-16.