



钢轨服役疲劳特性的非线性表面波检测研究

陈选民¹, 陈峰²

(1. 广州铁路职业技术学院轨道交通学院, 广东 广州 510430; 2. 中南大学交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 该文利用非线性表面波检测方法对钢轨在不同服役年限后的疲劳特性进行评价, 通过推导得到表面波相对非线性系数的测量表达式, 选取服役期为 0、1、2、5、10 和 20 年的钢轨, 采用楔块探头研究非线性表面波在钢轨截面传播特性, 以此分析表面波非线性系数的规律。实验结果显示服役初始阶段钢轨的非线性系数的变化很小, 随着服役时间的增加钢轨非线性系数变化速率呈现增大的趋势; 通过对钢轨微观组织分析, 表明位错密度增加所导致的微裂纹是钢轨的非线性系数增大的重要原因。研究将为非线性超声检测钢轨服役疲劳损伤提供理论依据, 对预防钢轨因疲劳导致的失效, 保证钢轨的安全服役和铁路运行安全提供新的研究方向。

关键词: 钢轨检测; 非线性表面波; 服役年限; 疲劳损伤

中图分类号: U216.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2018)08-0032-05

Experimental investigation of rail fatigue in service using nonlinear surface wave

CHEN Xuanmin¹, CHEN Feng²

(1. College of Railway Transportation, Guangzhou Railway Polytechnic, Guangzhou 510430, China;

2. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: The paper studied the rail fatigue characteristics with different service years by using nonlinear surface waves, then derived the relative nonlinear surface wave parameter. It adopted angle beam wedge transducers to measure the propagation of nonlinear surface waves in the cross section of rails with the service years of 0, 1, 2, 5, 10, 15 and 20 respectively and analyzed the laws of nonlinear surface wave parameters. The results showed that, the change of the nonlinear parameter of rail at the initial stage of service was very small, and the nonlinear parameter of rail increased with the increase of service year. According to the metallographic analysis, it was found that the main reason for the increase of nonlinear parameter was the micro-crack caused by the increase of dislocation density. This paper will provide theoretical basis for evaluation of the rail fatigue through nonlinear surface wave, and a novel pathway for preventing the rail failure caused by fatigue, to ensure the safety of rail in service and the safe railway operation.

Keywords: rail detection; nonlinear surface wave; service year; fatigue failure

0 引言

随着我国铁路向高速、重载方向发展, 对铁路

运行的安全提出了越来越高的要求^[1-2]。钢轨承载着列车质量, 钢轨品质是保证铁路安全运行的重要因

收稿日期: 2017-12-28; 收到修改稿日期: 2018-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(51525541); 铁路总公司科技研究开发计划课题(2014G001-E)

作者简介: 陈选民(1963-), 男, 湖南湘潭市人, 副教授, 主要从事轨道超声无损检测方法研究。

素。列车运行过程中由于车轮对钢轨的冲击, 钢轨不可避免地出现各种缺陷, 因此需对钢轨进行有效检测以避免事故的发生。超声检测方法因操作简单快速和对人体无害等优势成为钢轨无损检测的首选方法^[3-4]。

当前超声无损检测技术主要采用线性超声方法, 对钢轨内存在的夹渣、裂纹和核伤等进行检测, 而这些宏观缺陷的出现已对铁路运行安全带来极大威胁^[5]。研究显示, 诸如钢轨等构件的服役寿命主要包含 3 个阶段: 早期的力学性能退化、损伤的起始和积累、宏观缺陷形成和构件断裂失效。其中前两阶段占构件服役寿命的 90% 以上, 因此, 为实现钢轨健康状态检测以及疲劳寿命预测, 有必要发展一种钢轨早期疲劳损伤的评价方法、避免宏观缺陷形成及构件失效^[6-7]。

近年来, 非线性超声检测得到了极大的发展^[8-9]。研究显示, 非线性超声对材料的疲劳损伤、微裂纹以及热损伤等非常敏感, 可应用于材料早期力学性能变化的有效评价。当前非线性超声检测研究主要采用纵波、表面波和兰姆波等一发一收的双探头检测模式^[10-12]。钢轨由于复杂的几何外形并不适合于非线性纵波的检测, 而兰姆波主要在薄板材中传播, 无法应用于钢轨; 由于表面波检测时两探头可布置于被检测材料的同侧, 因此非线性表面波的检测方法更适合于钢轨疲劳检测实际应用^[13]。

本文将尝试采用非线性表面波对不同服役年限下钢轨的疲劳损伤特性进行研究。利用楔块探头收发表面波的方法对不同服役年限的钢轨进行非线性检测实验, 并计算相对非线性系数, 探究非线性系数与不同服役年限下钢轨疲劳特性的内在联系, 为钢轨早期疲劳损伤和力学性能退化的无损检测和评价提供一种新的研究方向。

1 理论方法

超声波在固体介质中传播时, 由于固体介质的非线性特性, 单一频率的声波在固体中传播时将与其产生非线性作用, 从而产生高次谐波。非线性超声检测实验中, 通常利用采集信号中基波和二次谐波的幅值测量材料非线性系数。此处将简单对非线性表面波及表面波非线性系数进行介绍。考虑在半无限大空间内传播的表面波, 其沿 x 轴方向传播并沿 z 方法呈指数衰减。该表面波质点振动速度的横向和垂向分量^[14]可表示为

$$v_{rx}(x, y, 0, t) = (\xi_t + \eta) \sum_{n=-\infty}^{\infty} v_{rn}(x, y) \exp(ink_r x - in\omega t) \quad (1)$$

$$v_{rz}(x, y, 0, t) = (1 + \xi_p \eta) \sum_{n=-\infty}^{\infty} v_{rn}(x, y) \exp(ink_r x - in\omega t) \quad (2)$$

其中 n 表示谐波波次, $\xi_t = (1 - \xi^2)^{1/2}$, $\xi_p = (1 - \xi^2 c_t^2 / c_p^2)^{1/2}$, $\eta = -2(1 - \xi^2)^{1/2} / (2 - \xi^2)$, $\xi = c_r / c_t$; c_p 、 c_t 和 c_r 分别表示纵波、横波和表面波声速, $k_r = \omega / c_r$ 为表面波波数, $v_{rn}(x, y)$ 表示在材料表面传播的表面波的声场。

由上述两式可以看出, 非线性表面波主要由纵波分量和横波分量组成。在非线形波形成过程中, 由于材料三阶弹性模量常数的对称性, 横波相互作用产生的非线性波能量为 0, 因此在实际的测量过程中, 可将非线性体波检测理论应用于非线性表面波的检测中。纵波非线性系数检测表达式为

$$\beta = \frac{1}{8k^2 x} \frac{v_2}{v_1^2} \quad (3)$$

在实际非线性表面波检测过程中, 通常通过测量其垂直分量进行非线性系数的检测, 引入非线性表面波垂直分量表达式 (2), 可以将公式 (3) 修正为表面波非线性系数测量的表达式, 即

$$\beta_r = \frac{1}{1 + \xi_p \eta} \frac{1}{8k_r^2 x} \frac{v_{r2}}{v_{r1}^2} \quad (4)$$

在固体材料非线性实验中, 由于高次谐波通常比基波低两个数量级以上, 因此通常仅考虑基波和二次谐波。在非线形表面波的检测过程中, 实际检测非线性波为在材料表面传播的表面波垂向分量的非线性结果, 即为 $v_{rz}(\omega)$ 和 $v_{rz}(2\omega)$; 其通常在信号频域特性中提取和处理, 分别对应检测的信号幅值 A_1 和 A_2 。在实际的测量过程中, 由于难以测量非线性系数的准确值, 为了测量方便, 此处利用信号幅值定义相对表面波非线性系数:

$$\beta'_r = \frac{1}{x} \frac{A_2}{A_1^2} \quad (5)$$

于是通过测量一定传播距离下表面波的基波和二次谐波的垂向分量即可实现相对表面波非线性系数的计算。材料非线性系数变化量 $\Delta\beta$ 与材料位错密度之间的关系^[15-16]可表示为

$$\Delta\beta = \frac{24}{5} \frac{\Omega \Lambda L^4 R^3 E_2^2}{\mu^3 b^2} |\sigma| \quad (6)$$

其中, Λ 表示位错密度, L 表示位错长度, E_2 为材料二

阶弹性常量, μ 为剪切模量, b 为 Burgers 常量, R 是横波常数, Ω 为剪切应变向纵向应变转换常数, σ 表示应力。由此可见, 材料非线性系数的变化与材料位错密度成正比关系。已有研究表明, 当材料结构受疲劳损伤、蠕变损伤或热损伤后位错将增多, 导致声波畸变加剧及二次谐波增大, 从而使得非线性系数增大。因此在理论上可通过测量非线性系数评价钢轨随服役期限疲劳损伤程度。

2 实验及结果分析

2.1 试块准备

为了便于在实验室内开展研究, 制备 7 个相同厚度的钢轨试块, 如图 1 所示。试验所采用的试块分别从服役期为 0(新生产)、1、2、5、10、15 和 20 年的 60 kg/m 的标准钢轨中截取, 其中服役期限为 20 年的试块轨腰截面部位出现了微裂纹, 其余试块均没有明显缺陷存在。实验前将对钢轨试块的横截面表面进行打磨, 从而减小表面不平整对检测结果的影响。



图 1 钢轨试块实物图

2.2 实验方法

图 2 为钢轨疲劳的非线性表面波检测的示意图。利用波形发生器产生 2.25 MHz, 30 周期的正弦波信号, 该信号经功率放大器放大 50 dB 后驱动楔块探头, 楔块探头产生表面波并在钢轨轨腰横截面传播, 声波被另一楔块探头接收后传入示波器, 信号导入工控机进行进一步研究。实验过程中发射探头的中心频率为 2.25 MHz, 而接收探头中心频率为 5 MHz, 因此其可有效接收基波和二次谐波成分。发射端、探头的楔块与钢轨横截面轨底部位通过液体耦合剂进行接触, 从而保证声能的有效传递; 接收端楔块与钢轨横截面轨头处接触, 由于钢轨与楔块通过液体耦合剂耦合, 因此可认为仅有表面波的纵波分量传入接收楔块, 即实验实际测得为

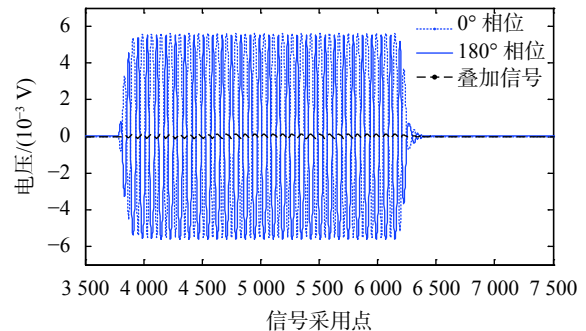
表面波的纵波分量。由于钢轨随服役年限的增加出现一定的变形, 表现为钢轨高度的降低, 因此在检测过程中通过调整两探头在轨头和轨底的位置使检测距离为 12 cm 并保持固定, 采用不同输入电压 (450~950 mV) 驱动超声探头, 完成对所有钢轨试块检测实验。



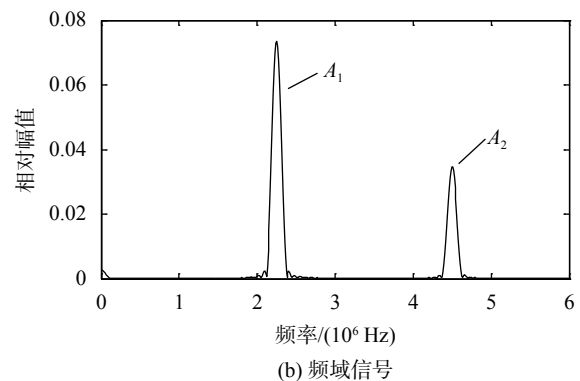
图 2 检测系统示意图

2.3 非线性来源分析

在非线性实验中, 由于系统、耦合剂以及材料自身特性等均会引起非线性特性, 造成难以准确测量材料非线性特性, 对此本文采用相位反转技术探讨非线性来源。图 3(a) 显示了采用 0° 相位和 180° 相位检测的信号结果, 两者叠加信号同时显示于图中。由于声源非线性和耦合剂非线性等引起的二次谐波与基波相位相同, 而材料非线性导致的二次谐



(a) 时域信号



(b) 频域信号

图 3 实验检测时频域信号结果

波与基波存在 90° 相位差, 因此当相位相反的两信号叠加时, 由声源非线性和耦合剂引起的非线性会彼此相消, 而由材料非线性引起的二次谐波将得到加强。利用快速傅里叶变换对两信号叠加的结果进行时频域变换得到其频域信号特性, 结果如图 3(b) 所示, 由该图可清楚地观察到频率为 4.5 MHz 的较强的二次谐波幅值。由此可见, 本实验可以有效检测到钢轨材料的非线性特性。

2.4 非线性系数随钢轨服役年限变化分析

利用相位反转技术, 检测在不同服役年限的钢轨中传播的非线性表面波信号。由于该实验检测距离固定, 因此可通过观测 A_2/A_1^2 的变化计算得到相对非线性系数, 即利用不同输入电压条件下的测量结果进行直线拟合, 利用该拟合直线的斜率可以得到钢轨相对非线性系数的大小。采用相同的分析方法实现对不同服役年限的钢轨试块非线性系数的测量。

由于实验过程中仅存在钢轨服役的年限差异, 因此检测结果可用于评价服役年限对钢轨疲劳损伤的影响。为了减小实验过程中的误差, 对每个试块进行 5 次独立实验。归一化的检测结果如图 4 所示, 误差线同样绘制于图中。由该结果可以看到钢轨的非线性系数随服役年限变化的规律: 在相对较短的服役年限内 (0~5 年), 钢轨的非线性系数并未出现明显变化; 随着服役年限的增长 (10~15 年), 钢轨的非线性系数出现了缓慢的线性增加趋势; 而当钢轨因服役年限久远而出现微裂纹时, 钢轨的非线性系数呈现急剧增加的变化趋势, 其增长率达到 100%。

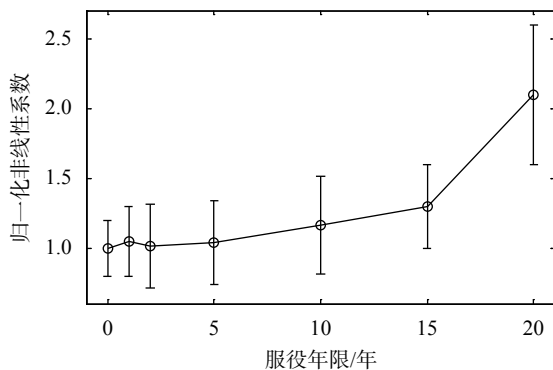
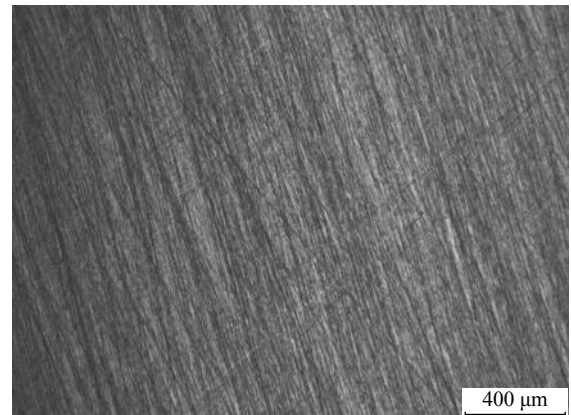


图 4 非线性系数随钢轨服役年限的变化规律

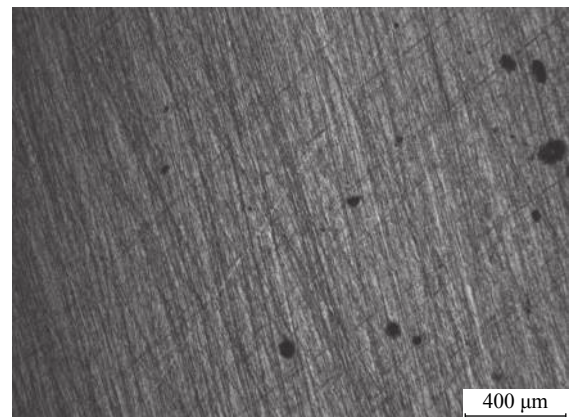
2.5 钢轨非线性系数变化原因分析

利用金相分析法对钢轨微观组织进行分析, 由

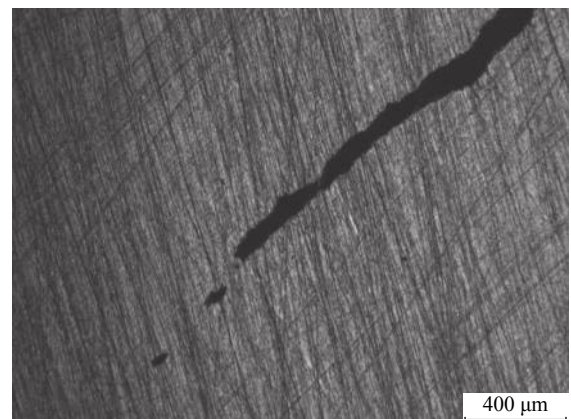
于服役年限 10 年内钢轨组织变化微弱, 因此图 5 仅显示了服役年限为 0 年、15 年和 20 年钢轨的金相图。由图中结果可见, 服役年限为 15 年的钢轨相比 0 年钢轨的组织出现轻微的损伤, 而在服役年限为 20 年的钢轨中则存在较为明显的微裂纹。由于疲劳损伤材料中微裂纹的产生是由位错密度增加累积的结果, 因此随服役年限的增加, 钢轨非线性



(a) 0年



(b) 15年



(c) 20年

图 5 钢轨轨腰金相图

系数的增加与其内部微观结构的位错密度增加相关:在钢轨服役年限早期,由于位错密度变化不明显,非线性系数同样缓慢变化;而位错密度累积出现微裂纹后,非线性系数出现了快速增大的趋势。该相关理论已在其他合金材料疲劳损伤的研究中得到了验证^[10]。由于位错密度的增加引起超声波畸变加剧,进而导致测量的非线性系数增大,因此通过观察非线性系数的变化即可了解材料所处的损伤阶段^[12]。可见,理论和实验均表明采用非线性表面波对钢轨早期疲劳损伤评价及微观缺陷检出的可行性。

3 结束语

本文利用非线性表面波检测方法对不同服役年限的钢轨进行了检测和评价。通过制备不同服役年限的钢轨试块,并利用楔块探头测量其表面波非线性系数,探究钢轨非线性系数随服役年限引起的疲劳特性的变化规律。并对钢轨进行金相分析实验,通过观察服役损伤钢轨内的微观结构变化,探究服役损伤程度与材料表面波非线性系数的关系,得到如下结论:

1) 钢轨服役年限的初始阶段,其非线性系数并未出现明显的变化;随着服役年限的增加,其非线性系数出现缓慢增加的特性;当因服役出现严重疲劳而导致微裂纹出现时,非线性系数急剧增大。研究结果表明采用非线性表面波检测方法监测钢轨服役周期内疲劳特性变化的可行性,为通过非线性表面波检测方法有效预防钢轨疲劳失效提供新的途径。

2) 当前该研究仅处于实验室研究阶段,实验过程及理论仍需进一步完善,如通过钢轨轨头进行检测,探讨疲劳损伤与非线性系数的绝对关系等;另外,研究工作将致力于将非线性表面波检测技术应用于钢轨在线检测,以便及早发现服役期钢轨微缺陷,避免钢轨断裂产生的事故,保证行车运行安全。

参考文献

- [1] 何华武. 中国高速铁路创新与发展[J]. 中国铁路, 2010(12): 5-8.
- [2] 张书增, 李雄兵, 杨岳, 等. 钢轨轨头内多元高斯声场模拟及其缺陷响应[J]. 铁道学报, 2014, 36(1): 76-80.
- [3] 张龙平, 杨飞. DGTC-80型地铁钢轨探伤车[J]. 机车电传动, 2017(2): 90-92.
- [4] 邓建辉. 钢轨裂缝缺陷分析[J]. 理化检验-物理分册, 2002, 38(8): 360-362.
- [5] 张书增, 杨岳, 刘希玲, 等. 基于探头声场特性的钢轨超声检测研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(5): 123-128.
- [6] 税国双, 汪越胜, QU J M, 等. 利用直接激发 Rayleigh 表面波的方法测量材料的声学非线性系数[J]. 声学学报, 2008, 33(4): 378-384.
- [7] 颜丙生, 刘自然, 张跃春, 等. 非线性超声检测镁合金早期疲劳的试验研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(2): 20-24.
- [8] HAMILTON M F, BLACKSTOCK D T. Nonlinear Acoustic[M]. America: Academic Press, 1998: 25-39.
- [9] 颜丙生, 吴斌, 李佳锐, 等. 金属材料力学性能退化非线性超声检测实验系统优化[J]. 仪表技术与传感器, 2011(2): 95-98.
- [10] KIM J Y, JACOBS L J, QU J, et al. Experimental characterization of fatigue damage in a nickel-base superalloy using nonlinear ultrasonic waves[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2006, 120(3): 1266-1273.
- [11] XIANG Y, DENG M, XUAN F, et al. Cumulative second-harmonic analysis of ultrasonic Lamb waves for ageing behavior study of modified-HP austenite steel[J]. Ultrasonics, 2011(51): 974-981.
- [12] TORELLO D, THIELE S, MATLACK K H, et al. Diffraction, attenuation, and source corrections for nonlinear Rayleigh wave ultrasonic measurements[J]. Ultrasonics, 2015(56): 417-426.
- [13] HERRMAN J, KIM J Y, JACOBS L J, et al. Assessment of material damage in a nickel-based superalloy using nonlinear Rayleigh surface waves[J]. J. Appl. Phys., 2006, 99(12): 124913.
- [14] SHULL D J, KIM E E, HAMILTON M F, et al. Diffraction effects in nonlinear Rayleigh wave beams[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1995, 97(4): 2126-2137.
- [15] XIANG Y, DENG M, XUAN F. Thermal degradation evaluation of HP40Nb alloy steel after long term service using a nonlinear ultrasonic technique[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2014, 33(2): 279-287.
- [16] LEE T H, JHANG K Y. Experimental investigation of nonlinear acoustic effect at crack[J]. NDT&E Int, 2009, 42(8): 757-764.

(编辑:李妮)