

混合式激光超声技术的钢轨轨头疲劳损伤 无损检测研究与应用

赵 扬^{1, 2} 刘 帅¹ 马 健¹ 孙继华^{1, 2} 宋江峰¹ 郭 锐¹ 贾中青^{1, 2}

(¹ 山东省科学院激光研究所, 山东 济南 250014; ² 山东省无损检测技术与工程研究中心, 山东 济南 250014)

摘要 采用自主研发的激光声磁检测系统对钢轨疲劳损伤进行了无损检测研究。选择含有不同尺寸的表面裂纹和表面垂直孔的人工伤钢轨作为检测对象,进行了测试分析。结果表明,缺陷信号的幅度随缺陷深度的增加而增大。为了抑制检测过程中噪声对检测结果的影响,采用 Matlab 设计软阈值小波去噪算法并对信号进行处理,信噪比提高了 12 dB 以上。研究结果为激光声磁检测技术在钢轨无损检测工程领域的应用提供了一定的参考。

关键词 测量;激光超声;电磁超声换能器;钢轨损伤;小波阈值技术

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.s108008

Investigation and Application of Laser-EMAT Testing Fatigue Damage of Railhead

Zhao Yang^{1, 2} Liu Shuai¹ Ma Jian¹ Sun Jihua^{1, 2} Song Jiangfeng¹
Guo Rui¹ Jia Zhongqing^{1, 2}

(¹ Laser Research Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan, Shandong 250014, China)
(² Centre of NDT Engineering and Technique in Shandong, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract The objective of the study is to provide a novel method and system that is used to inspect the fatigue defects of the rail in a non-contact way. A laser-electro magnetic acoustic transducer (EMAT) system is designed in Laser Institute of Shandong Academy of Sciences, which is used in the present work. Artificial surface cracks and holes with different sizes are prepared on the rail. The principle of mode conversion is applied to determine the defects above. Namely, Rayleigh wave generated by line laser source becomes shear wave when the Rayleigh wave passes the surface defect. To receive the defect signal in a noncontact way, an EMAT sensor is used in this work. Experimental results show that the amplitude of defect signal increases with the increase of defect depth. To avoid the influence of noise on the testing result, the ultrasonic signal of surface defect is processed by wavelet soft-threshold filter designed by Matlab. The signal to noise ratio increases by 12 dB at least. The results show that the laser-EMAT technique has good prospects in the engineering applications of rail testing.

Key words measurement; laser ultrasonic; electro magnetic acoustic transducer; rail damage; wavelet threshold technique

OCIS codes 120.4290; 280.3375; 230.1040; 170.7170

1 引 言

高速铁路运输向科学研究提出了一系列挑战,其中钢轨的疲劳损伤检测就是主要内容之一。高速铁路列车轴重轻、运行速度快,钢轨轨顶内侧轨距角处由于往复的轮轨载荷作用,产生接触疲劳裂纹并逐渐扩展,这是疲劳损伤的早期形式^[1]。裂纹发展

到一定程度后便快速扩展,形成大尺寸横向疲劳裂纹,直至钢轨发生横向折断,这一现象已引起我国铁路工务部门的高度重视^[2]。中国铁道科学院《提速线路钢轨大修周期的研究》的课题组成员对主要干在役 60 kg/m 钢轨的使用状况和伤损情况进行了全面的调查研究,结果表明,无论是无缝线路还是有

收稿日期: 2013-10-23; **收到修改稿日期:** 2013-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(52105240)、山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS 2011ZZ016)、山东省科学院科技发展项目(2012-02)

作者简介: 赵 扬(1982—),男,博士,副研究员,主要从事超声无损检测技术方面的研究。

E-mail: yang.aisin.zhao@gmail.com

缝线路,钢轨伤损主要发生在轨头,占伤损总数一半以上,而轨头伤损大多为裂纹、孔洞引起的接触疲劳伤损^[3]。因此,消除或控制轨头接触疲劳伤损是延长钢轨寿命和确保铁路安全运营的主要方法,而实现这一目的的重要前提是能够对钢轨轨头的各种缺陷进行准确、可靠的无损检测与评价。

在钢轨的无损检测研究领域中,传统超声检测技术、漏磁检测技术、脉冲涡流检测技术和可视检测技术已经应用于实际检测^[4]。传统超声检测技术利用压电探头激发纵波及横波进行检测(频率为2~5 MHz),可以实现轨头内部缺陷、轨腰内部缺陷和轨底内部缺陷的检测,人工检测可靠性高,高速自动检测系统(探伤车)的速度可以达到70 km/h。该技术要求声波入射角限制在70°以内,因此难以对钢轨表面和近表面缺陷进行检测;同时该技术需要采用液体耦合的方式进行检测,因此不能在低于-15℃环境下使用^[5]。漏磁检测技术可用于检测钢轨近表面缺陷,但当检测速度超过35 km/h时,检测灵敏度急剧下降。脉冲涡流技术是检测特别适用于钢轨表面和近表面缺陷的检测,甚至当检测速度达到100 km/h仍有较高的检测灵敏度,但是这种技术受探头与钢轨表面间距的变化影响较大,因此对钢轨表面平整度要求较高,而实际检测时钢轨的表面存在不同程度的磨损,限制了该技术的应用^[6]。

目前,为解决现有钢轨无损检测技术存在的问题,国外许多无损检测人员开展了电磁超声技术、激光超声技术以及导波技术等无损检测新技术研究,希望提供一种能够实现表面及内部缺陷的高速、非接触式且对钢轨表面状态限制较小的无损检测技术^[4]。Hess等^[7-9]采用有限元方法分析了低频表面波在钢轨轨头中的传播模式和能量分布,应用轮式阵列超声换能器激发频率为250 kHz的表面波对钢轨表面裂纹进行了检测,然而他们所采用接触式的检测方式对钢轨表面的平整度、清洁度以及耦合状态要求较为严格,难以在温度低于-15℃环境下使用。Dixon等^[10-11]则采用非接触式的电磁超声换能器(EMAT)激发150 kHz和200 kHz的表面波对钢轨表面和近表面裂纹进行快速检测。由于这种技术获得的检测信号强弱受到钢轨与换能器距离的影响很大(不能超过2 mm),能量转换效率较低而且由于激发出的声波在固体中具有宽的辐射模式,因而降低了检测的灵敏度及微小缺陷的检测能力,在现场检测时受到了诸多限制^[12]。激光超声技术具有是一种全新的无损检测技术,在具有传统超

声检测技术优点的同时,还具有非接触检测、高精度、高灵敏度和高速度等特点,尤其适合于高温、腐蚀性、辐射性以及被检件具有较快的运动速度等恶劣环境下使用,并且容易实现快速自动化扫描检测^[13]。该技术能够同时激发表面波、纵波和横波等多种波型,因此可以同时检测不同类型的缺陷,特别适用于钢轨这种表面和内部存在多种缺陷类型的无损检测。目前,国外将该技术应用于钢轨检测所存在的主要问题是利用光学干涉仪接收激光产生的超声信号时,检测灵敏度受样品表面状态影响较大,又难以检测钢轨内部缺陷。因此研究适用于接收钢轨表面及内部缺陷信号的接收方法和相应的传感器,且能够保证具有较高的检测灵敏度,是解决该技术走向实际应用的主要途径^[14]。

提出了基于激光声磁技术实现钢轨疲劳损伤缺陷的无损检测。激光声磁技术利用了激光激发超声具有远距离操控且激发声波具有高频率、高分辨力的优点,并结合了电磁声传感器具有的非接触式、受钢轨表面状态限制很小且易于在高速环境下接收超声信号的特点。该技术极限检测速度可达200 km/h,无需耦合介质,可以实现在-50℃~70℃的环境温度下工作,在钢轨在役检测领域中具有较大应用潜力。

2 原 理

2.1 激光激励超声波的原理

目前,热弹机制和烧蚀机制是激光激发超声波的两种主要机制,其中热弹机制可以不损伤材料的表面,但所激发超声波能量较低,不利于内部缺陷检测;烧蚀机制可以得到能量较强的超声波但会对材料表面产生微损伤,去除材料表面几微米的厚度。为了激发出较高能量的超声波,同时避免钢轨表面发生烧蚀,可以在材料表面覆上一层吸收层,这样可以提高所激发出声波的能量,即表面自约束机制。由于钢轨在服役时,其表面会沉积一定的灰尘、污浊物以及表面氧化层等,适用于利用表面自约束机制来激励检测所需的超声波。本文采用了表面自约束机制来激励 Rayleigh 波,用来检测钢轨表面缺陷。

2.2 电磁法接收超声波的原理

EMAT 传感器是利用电磁效应来接收金属材料中的超声波信号,其能量转换是在被测工件表面的趋肤层内直接进行的,所以不需要与工件接触并且不需要任何耦合介质。EMAT 传感器对于被测物体表面状态要求不高,而且可对高温物体和表面粗糙的物体直接检测。当被测物体表面有超声自内

部投射时,质点发生位移,带正电荷的晶格在偏置磁场的作用下受力,产生交变电流。这个交变电流将导致被测导体的表层出现交变的磁场,交变磁场漏出导体后,在被测导体上方的线圈中感生出电动势。这样,就可以由 EMAT 传感器的检测线圈接收到^[15]。利用声磁法接收超声信号时,被测物体作为电磁超声传感器的一部分,必须是电导体或磁导体。若被测物体是铁磁性材料,除洛伦兹力外,还受到磁致伸缩力的作用^[16]。

EMAT 传感器接收超声信号的要素是磁场和材料表面的微观粒子的振动状态;所接收的超声波型取决于质点的振动方向与声波传播方向的关系,因此外加磁场的方向、线圈的几何形状以及电磁场的频率是设计不同波型的 EMAT 传感器主要考虑因素^[17]。

2.3 表面缺陷检测原理

利用线型激光束可以在钢轨表面激励出指向性较好的 Rayleigh 波, Rayleigh 波会沿着材料表面传播,当传播至表面开口型缺陷时,会发生波型转换产生横波,如图 1 所示。利用可接收横波的 EMAT 传感器进行扫查时,根据电磁感应原理,当 EMAT 位于缺陷正上方时所接收到的信号幅度最大,据此可以确定缺陷位置。

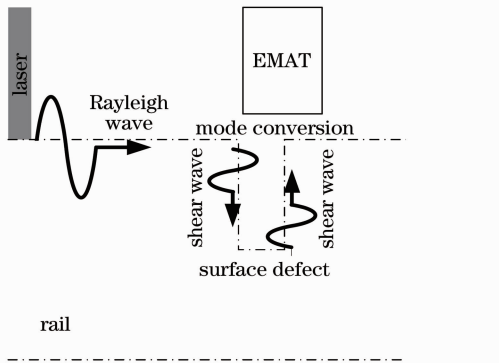


图 1 激光声磁技术检测钢轨表面缺陷原理示意图

Fig. 1 Diagram of laser-EMAT testing the defects on railhead surface

2.4 小波阈值去噪原理

利用小波阈值法进行信号处理关键的部分是选取或者构造合适的阈值函数^[18]。本文选择软阈值函数进行去噪处理,软阈值是把信号的绝对值 $|\omega_{j,k}|$ 与指定的阈值 λ 进行比较,小于或等于阈值的点变为 0,大于阈值的点变为该点值与阈值的差,表示为

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_{j,k}) \cdot (|\omega_{j,k}| - \lambda), & |\omega_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |\omega_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (1)$$

阈值的选取直接关系到信号降噪的质量,非线性小波变换阈值法阈值的选取有四种形式,本文选择的是固定的阈值形式,这种阈值形式在软阈值函数处理中能够得到直观意义上很好的降噪效果^[19]。sqtwolog 阈值选取方法为

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \ln N}, \quad (2)$$

式中 $\sigma = \frac{1}{0.6745} \cdot \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\omega_{j,k}|$, ($1 \leq j \leq J$), 式中 N 是对应的某一个尺度 j 的小波系数的个数, J 是小波分解的最大层次数。

3 实 验

3.1 实验样品

选取含有典型钢轨疲劳损伤缺陷的人工伤试样做实验样品。试样一是利用线切割技术在钢轨表面加工了尺寸为 $60 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 和 $60 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的表面裂纹,如图 2(a)所示。试样二是利用钻铣中心在钢轨表面加工了尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 和 $\phi 5 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的表面竖直孔,如图 2(b)所示。

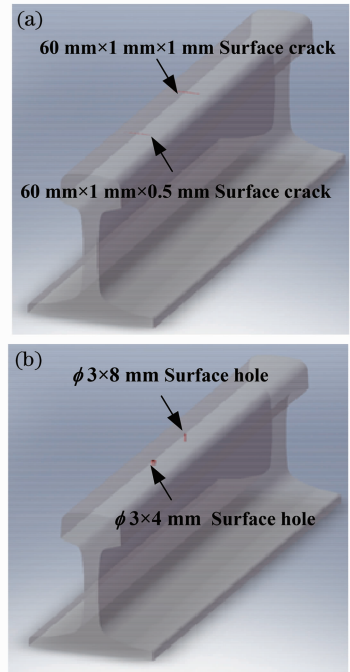


图 2 钢轨表面人工伤缺陷。(a)裂纹;(b)竖孔

Fig. 2 Artificial defects on railhead surface.

(a) Crack; (b) vertical hole

3.2 实验系统

采用了自研激光声磁检测系统,其系统示意图如图 3 所示。主要包括负责激励 Rayleigh 波的脉冲激光器及由光学透镜组成的聚焦系统、负责接收横波的 EMAT 传感器、用于控制 EMAT 位置的三维步进装

置以及由前置放大器、压控增益放大器、模拟数字转换器(ADC)和现场可编程门阵列(FPGA)组成的信号采集与处理系统,并通过上位机显示结果。

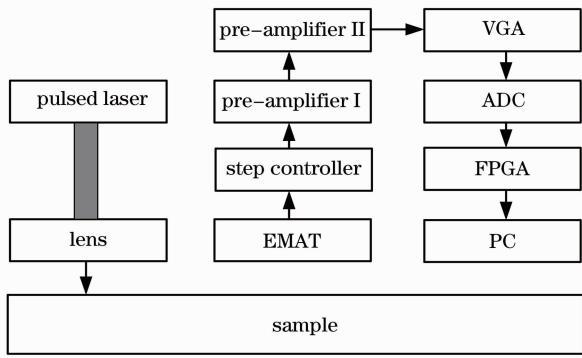


图 3 激光声磁检测系统示意图

Fig. 3 Diagram of laser-EMAT testing system

4 结果与讨论

4.1 表面裂纹检测结果

利用上述激光声磁系统对含有表面裂纹人工伤的试样进行检测,其中脉冲激光器的单脉冲能量为 200 mJ,波长为 1064 nm,重复频率为 1~20 Hz,光斑直径约为 10 mm,经聚焦后形成线型光斑。利用三维步进装置调整 EMAT 传感器的位置并对缺陷进行扫描,当接收到的缺陷衍射回波幅度最大值时固定 EMAT 的水平位置,实验中设定 EMAT 的提高距离为 3 mm。图 4(a)和图 5(a)分别给出了 60 mm×1 mm×0.5 mm和 60 mm×1 mm×1 mm的表面裂纹缺陷检测结果,可知,信号中含有噪声,利用小波阈值去噪技术(WSTM)进行处理,图 4(b)和图 5(b)给出了去噪后的结果,信噪比分别提高了 16.28 dB、16.45 dB。

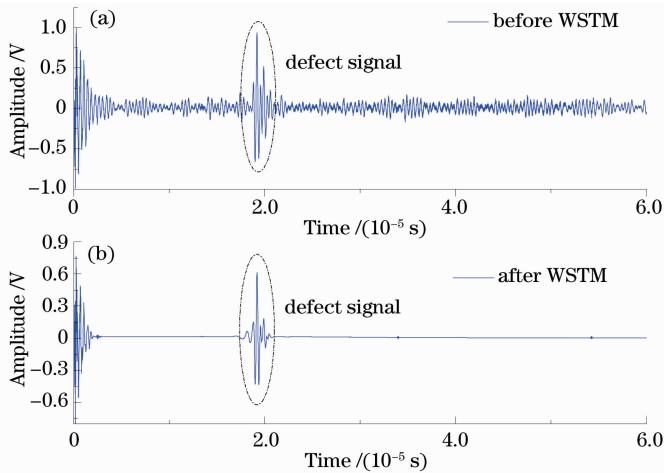


图 4 60 mm×1 mm×0.5 mm表面裂纹的激光声磁检测信号及小波去噪后信号。(a) 小波去噪前;(b) 小波去噪后
Fig. 4 Signals of laser testing surface crack with size of 60 mm×1 mm×0.5 mm and its denoise result through wavelet soften threshold method. (a) Before WSTM; (b) after WSTM

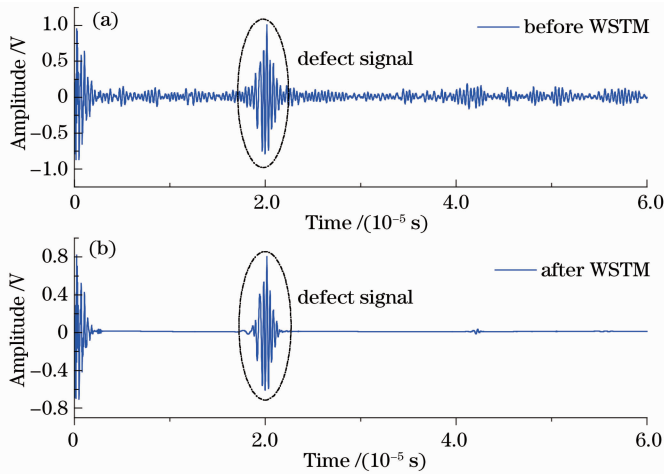


图 5 60 mm×1 mm×1 mm表面裂纹的激光声磁检测信号及小波去噪后信号。(a) 小波去噪前;(b) 小波去噪后
Fig. 5 Signals of laser testing surface crack with size of 60 mm×1 mm×1 mm and its denoise result through wavelet soften threshold method. (a) Before WSTM; (b) after WSTM

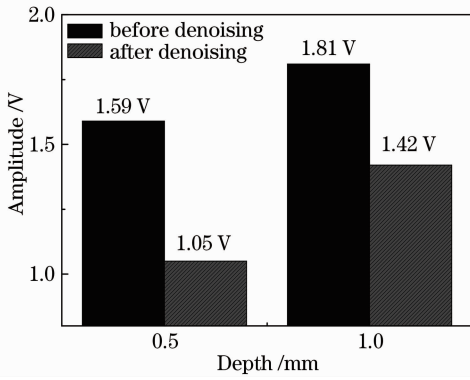


图 6 裂纹深度与缺陷信号幅度的关系
Fig.6 Relationship between the crack depth and its signal amplitude

进一步分析可知,随着裂纹深度的增加,缺陷信号幅度逐渐增大,如图 6 所示。根据 2.3 节原理可知,EMAT 所接收到的横波是由激光激励的 Rayleigh 波转换得到的,这种 Rayleigh 波本身是一个宽频带信号,当裂纹深度较小时,仅有高频成分转化为横波信号,而当裂纹深度增加时相当低频的信号也会转化为横波信号,因此信号能量较高。

4.2 表面竖直孔检测结果

类似地,图 7 和图 8 给出了 $\phi 3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 和 $\phi 3 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的表面竖直孔的检测结果以及经小波去噪的结果,信噪比分别提高了 12.84、15.56 dB。

与表面裂纹检测结果相似,随着孔深度的增加,缺陷信号幅度逐渐增大(图9),但信号增大幅度不

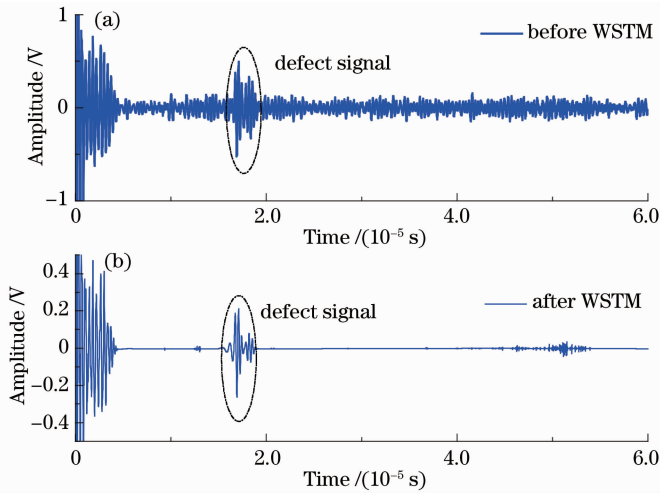


图 7 $\phi 3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 表面竖直孔的激光声磁检测信号及小波去噪后信号。(a) 小波去噪前; (b) 小波去噪后
Fig.7 Signals of laser testing vertical hole with size of $\phi 3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ and its denoise result through wavelet soften threshold method. (a) Before WSTM; (b) after WSTM

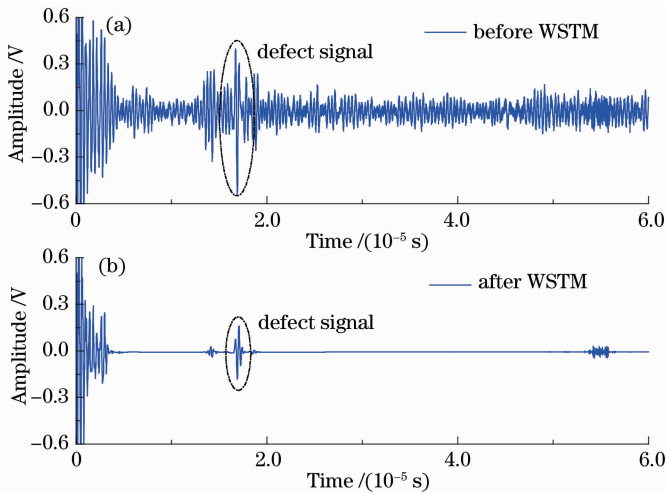


图 8 $\phi 3 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 表面竖直孔的激光声磁检测信号及小波去噪后信号。(a) 小波去噪前; (b) 小波去噪后
Fig.8 Signals of laser testing vertical hole with size of $\phi 3 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ and its denoise result through wavelet soften threshold method. (a) Before WSTM; (b) after WSTM

如表面裂纹明显,这是因为两个孔径深度远大于裂纹深度,按 Rayleigh 波声速为 2900 m/s 计算,波长为 4 mm,8 mm 时所对应的频率分别为 0.725 MHz、0.325 MHz,从图 10 中可以发现 Rayleigh 波在 0.325 MHz 附近能量已经很低了。因此,当缺陷深度超过一定值时,所接受到的信号幅度随深度变化将非常小。

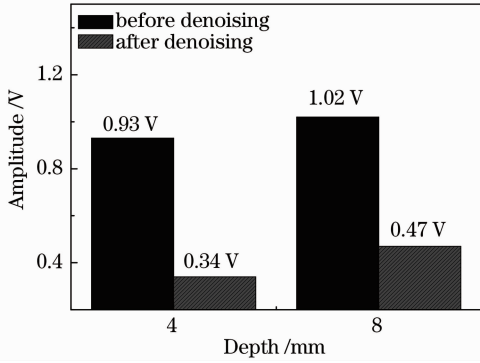


图 9 孔深与缺陷信号幅度的关系

Fig. 9 Relationship between hole depth and its signal amplitude

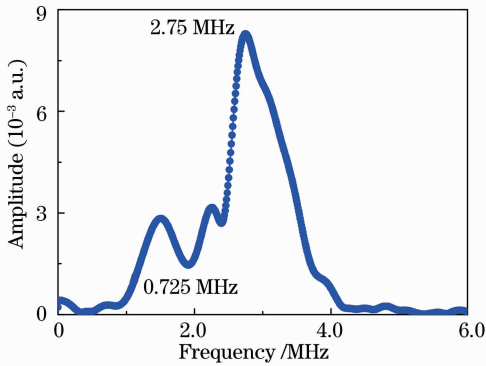


图 10 Rayleigh 波的幅度谱

Fig. 10 Amplitude spectrum of Rayleigh wave

5 结 论

- 1) 利用激光声磁技术可以实现钢轨表面缺陷的非接触式检测;
- 2) 利用激光激励出的 Rayleigh 波检测表面裂纹和表面孔时,随着缺陷的深度增大,EMAT 接收到的缺陷信号幅度增大,可用来监测裂纹的扩展情况;
- 3) 小波软阈值技术可以抑制激光声磁检测过程中的噪声,对表面裂纹和表面竖孔的信号去噪后,信噪比分别提高了 16.28 dB~16.45 dB 和 12.84 dB~15.56 dB;
- 4) 激光声磁技术无需耦合剂,且不受被检材料形状及表面粗糙度的限制,在高温、腐蚀和高速运转的金

属材料和结构的无损检测领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Smith R A. Rolling contact fatigue of rails; what remains to be done? [J]. China Railway Science, 2002, 23(3): 6-10. 史密斯. 钢轨滚动接触疲劳的进一步研究[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(3): 6-10.
- 2 Ma Yunxian. Creation and prevention for cracks of rolling contact fatigue[J]. Shanghai Railway Science & Technology, 2002, (4): 41-43. 马允先. 钢轨接触疲劳裂纹的产生与防治[J]. 上海铁道科技, 2002, (4): 41-43.
- 3 Tian Changhai. Major repair cycles of rails of speed-raising railway lines[J]. Journal of the China Railway Society, 2005, 27(4): 78-84. 田常海. 提速线路钢轨的大修周期[J]. 铁道学报, 2005, 27(4): 78-84.
- 4 Papaalias M, Roberts C, Davis C. A review on non-destructive evaluation of rails, state-of-the-art and future development[J]. J Rail and Rapid Transit, 2008, 222(4): 367-384.
- 5 Robin C. Rail flaw detection: overview and needs for future developments[J]. NDT & E International, 2004, 37(2): 111-118.
- 6 Junger M, Thomas H M, Krull R, et al.. The potential of eddy current technology regarding railroad inspection and its implementation[C]. In Proceedings of ECNDT 2006, 2006.
- 7 Hess D, Cawley P. The potential of ultrasonic surface waves for rail inspection [C]. AIP Conference Proceedings, 2005, 760: 227-234.
- 8 Hesse D, Cawley P. Surface wave modes in rails[J]. The J Acoustical Society of America, 2006, 120(2): 733-740.
- 9 Armitage P R. The use of low frequency Rayleigh waves to detect gauge corner cracking in railway lines[J]. Insight, 2002, 44(6): 369-372.
- 10 Edwards R S, Dixon S, Jian X. Characterisation of defects in the railhead using surface waves[J]. NDT & E International, 2006, 39(2): 468-472.
- 11 Dixon S, Edwards R S. Inspection of rail track head surface using electromagnetic acoustic transducers[J]. Insight, 2004, 46(6): 326-330.
- 12 Papaalias M, Roberts C. Rail Inspection Technologies[R]. Report Prepared for EU Funded Project INNTRACK, Project no. TIP5-CT-2006-0314150, 2006.
- 13 Robert E Green Jr. Non-contact ultrasonic techniques [J]. Ultrasonics, 2004, 42(1-9): 9-16.
- 14 Kenderian S, Djordjevic B, Green R. Laser-based and air coupled ultrasound as noncontact and remote techniques for testing railroad tracks[J]. Materials Evaluation, 2002, 60(1): 65-70.
- 15 MacLaughlan D, Clark S, Cox B. Recent advancements in the application of EMATs to NDE [C]. 16th World Conference on NDT, 2004.
- 16 Ying Chongfu. Ultrasonics[M]. Beijing: Science Press, 1990. 应崇福. 超声学[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- 17 Li Qian, Lin Shuyu, Wang Chunlin. Research on application of EMAT technique [J]. Electronic Component & Device Applications, 2009, 10(10): 71-73. 李倩, 林书玉, 王春玲. 电磁超声换能器(EMAT)的应用技术研究[J]. 电子元器件应用, 2009, 10(10): 71-73.
- 18 Cui Jintai. An Introduction to Wavelets [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1995. 崔锦泰. 小波分析导论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.
- 19 Song S P, Que P W. Wavelet based noise suppression technique and its application to ultrasonic flaw detection [J]. Ultrasonics, 2006, 44(2): 752-759.