

钢轨轨底斜裂纹的超声导波散射特性

卢超¹, 盛华吉¹, 宋凯¹, 林俊明², 何方成³

(1. 南昌航空大学 无损检测教育部重点实验室, 南昌 330063; 2. 爱德森(厦门)电子有限公司, 厦门 361003;
3. 中航工业北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 钢轨轨底斜裂纹的超声导波散射特性是超声导波检测钢轨轨底技术的基础。首先对钢轨轨底导波传播特性及激发频率对导波散射特性的影响进行了数值分析, 再进一步基于ABAQUS软件建立了钢轨轨底不同角度斜裂纹散射特性的有限元模型, 对横向振动模态和垂直振动模态下钢轨轨底不同角度斜裂纹的散射特性进行了分析。数值分析和波场快照显示, 横向振动模态较垂直振动模态下超声导波在钢轨轨底斜裂纹上的频散相对严重, 垂直振动模态下导波检测钢轨斜裂纹效果更好, 为后续钢轨轨底导波检测试验提供了理论基础。

关键词: 钢轨; 导波; 频散曲线; 无损检测

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2016)05-0018-05

Ultrasonic Guided Wave Scattering Characteristics of Rail Base Oblique Cracks

LU Chao¹, SHENG Hua-ji¹, SONG Kai¹, LIN Jun-ming², HE Fang-cheng³

(1. Key Lab of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
2. Eddysun (Xiamen) Electronic Co., Ltd., Xiamen 361003, China;
3. Avic Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The research on ultrasonic guided wave scattering characteristics on rail base oblique cracks is the basis of the appropriate guided wave detection technology. This paper includes numerical analysis result of the guided wave propagation characteristics on rail base and the effects of different excitation frequency on it. Based on ABAQUS software, a finite element model of the rail base is established at different angles, which is used to analyze scattering characteristics of transverse and vertical vibration mode wave in the rail base at different angles. The numerical analysis results and wave field simulation snapshots show that frequency dispersion phenomenon of transverse vibration mode wave on rail base oblique cracks is more obvious than that of vertical vibration mode. It is therefore the vertical vibration mode rather than the transverse one that can give better detection effect. This study also provides a theoretical basis for the subsequent rail base guided wave detection experiments.

Key words: Rail; Guided wave; Frequency dispersion curve; Nondestructive testing

火车对铁道上钢轨的长期冲压会使轨道轨底产生微小裂纹, 从而影响行车安全。斜裂纹、核伤(轨头横向疲劳裂纹)和腐蚀是钢轨轨底最常见, 同时也是危害最大的缺陷^[1]。在轨道线路上对此三类缺陷

收稿日期: 2015-11-06

基金项目: 江西省自然科学基金资助项目(20114BAB20200B)

作者简介: 卢超(1971—), 男, 教授, 主要从事固体声学及超声检测研究工作。

通信作者: 盛华吉(1991—), 男, 硕士, E-mail: a2241964569@163.com。

进行在线检测比较困难。目前国内外主要使用轨道探伤车及轨道探伤装置对其实施检测, 由于钢轨探伤车的探头轮装置放置于钢轨轨头踏面, 激励信号只能检测出钢轨中心轴±10 mm 范围内的缺陷, 该范围以外的轨底两侧边沿区域不能被检测到, 因而钢轨轨底缺陷成为检测的盲区。采用目前的超声检测技术无法对实际线路钢轨轨底板缺陷进行准确而快速的检测, 因此有必要研究出新的检测方法。

超声导波检测技术具有一触即发、长距离、大范围传播、检测快捷高效等特点。了解导波的意义、导

波模式^[2],并对波结构进行分析是选择和激发检测波模式的重要依据。ZUMPANO 等采用商用的 ABAQUS 平台对导波在钢轨中的传播进行了有限元仿真研究^[3],但该研究主要针对轨道轨头部分的缺陷,并未对轨底的超声导波传播模式和导波模式特征进行分析。WILCOX^[4],CAWLEY^[5]等应用导波检测方法对埋在铁路和公路交叉道路口中钢轨轨底的腐蚀缺陷进行了在线检测。HAYASHI^[6-7]和 MIYAZAKI^[8]等采用半解析有限数值法对日制 JIS50 型自由状态钢轨轨底中的导波进行了研究,分析得出在不同的激励方式作用下导波有三类模式:横向振动模式、垂直振动模式^[9]和纵向振动模式,每种振动模式含有多种导波模式,对导波传播模式的简化有利于分析与研究。

笔者以国内高速铁路铺设的钢轨为研究对象,利用有限元软件 ABAQUS 对其进行模拟仿真,研究钢轨轨底中超声导波对不同角度斜裂纹的散射特性。将激发探头放在轨底左侧一端的表面处,在轨底激发不同振动模式的导波。对钢轨轨底中不同振动模式导波的波包形状特征以及激发频率、周数等因素进行了研究,通过改变轨底斜裂纹的角度来获取检测信号,利用波包幅值以及波场快照分析缺陷几何特征对轨底导波检测的影响和轨底导波的散射特性。

1 钢轨轨底中的导波传播特性

频散和多模式是固体超声波传播的两个主要特性。钢轨轨底截面的几何形状不规则,通过数值方法可以得出导波传播特性的频散曲线和不同导波的传播模式。由于钢轨截面尺寸的差异,不同型号的钢轨所对应的导波的频散曲线和各模式导波的截止频率也不同。图 1 是钢轨截面的主要几何尺寸。

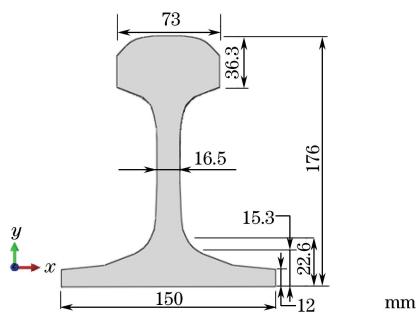


图 1 钢轨截面尺寸示意

日本名古屋理工学院的 HAYASHI 结合半解析有限元的方法,应用 RAIL DISPERSION 软件得出如图 2 所示的 0~200 kHz 频率范围内钢轨轨底中的横向振动模式、垂直振动模式和纵向振动

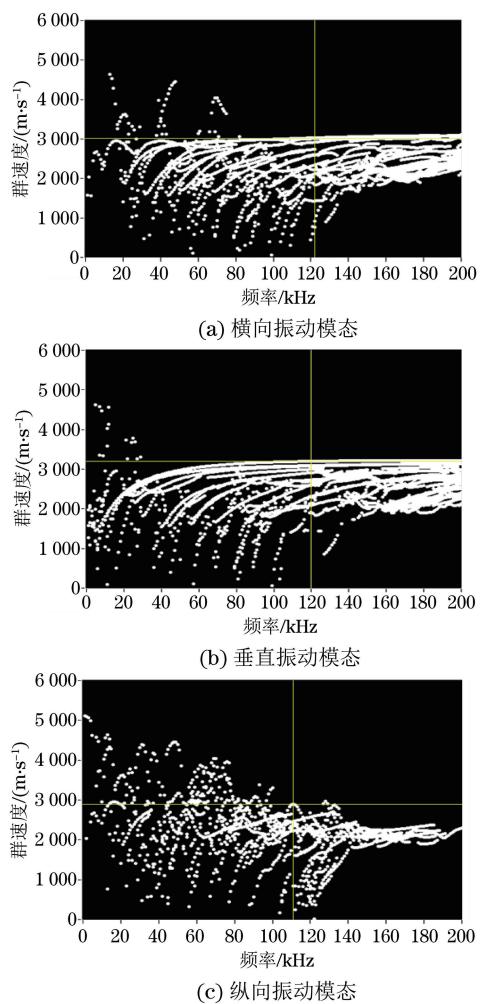


图 2 轨底导波的不同模态波结构

模态导波的频散曲线。由图可以看出,随着频率的增加,轨底中的各种振动模态中的导波模式数不断增加。对于纵向振动模态,群速度频散曲线比较混乱且不利于检测,而横向振动模态和垂直振动模态在 60~200 kHz 频率范围内频散曲线比较平缓,呈现较好的频散特性,可作为后续激励检测模式的研究。

由图 3 看出,随着脉冲周期数的增加,频带宽度越小,信号的频散特性越好,则传播能量越集中,声波传播距离就越远,有利于信号的传播。

从钢轨轨底群速度频散曲线可以看出,在钢轨轨底中存在传播的多种导波模式,这些模式基本都具有频散特性;各种导波模式的频散随着激发脉冲周数的不同而不同。为分析激励脉冲周期数对轨底导波检测的影响,需要定义导波波包的宽度和幅度^[9]。采用有限元软件 ABAQUS 仿真模拟得出信号数据,绘制出两种模态下波包幅值和宽度关系曲线,见图 4。

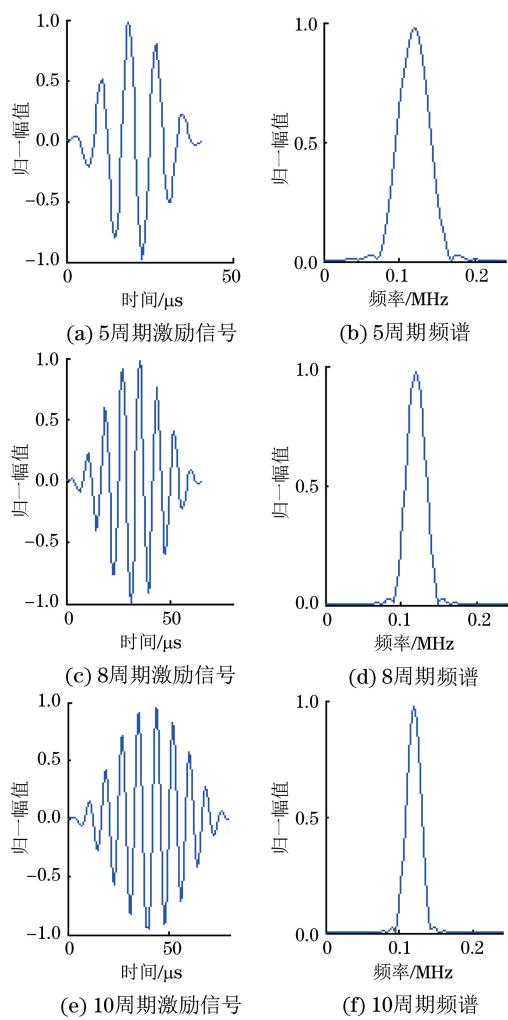


图3 汉宁窗函数调制 120 kHz 不同周期数的正弦激励信号

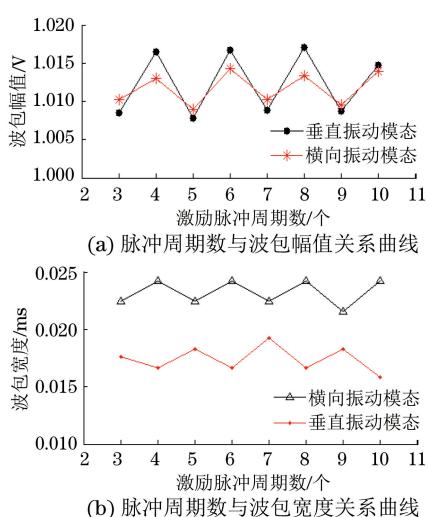


图4 轨底横向振动模式和垂直振动模式的脉冲周期数与波包幅值和宽度关系曲线

由此看出数值模拟时,对于横向振动模式,在频率为 60~200 kHz 范围内,脉冲周期数为 4,6,8,10 周时,波包幅值都较大,相应的波包宽度较小;对于

垂直振动模式,在频率为 60~200 kHz 范围内,脉冲周期数为 4,6,8,10 周时,波包幅值也都较大,但相应的波包宽度也较大。故两种模式选取激发频率为 120 kHz 内,脉冲激发周数为 10 时,波包幅值比较大的同时,波包幅度也得到兼顾。

2 试验方法和结果

以实验室现有的钢轨为样品建立如图 5 所示的钢轨模型,模型总长度 1 600 mm,在轨底中间切割长 15 mm,宽 1 mm,深 14 mm 的不同角度(30°, 60°, 90°, 120°, 150°)的斜裂纹。在钢轨轨底的左侧端面施加横向振动模式和垂直振动模式的激励信号,接受模式为自发自收。模型材料为钢,杨氏模量 E 为 210 GPa,密度 ρ 为 $7.85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,泊松比 ν 为 0.32。为了减少单元数目,节省计算资源的同时提高精度,模型中分别采用了边长为 4 mm 和 2 mm 的六面体 C3D8R 单元。

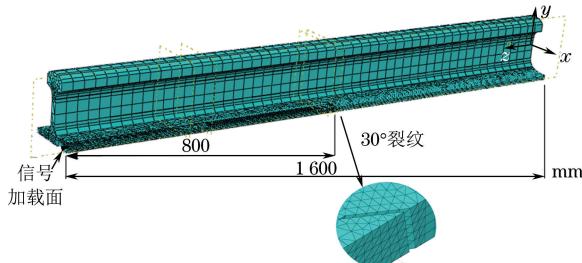


图5 钢轨模型

当斜裂纹角度为 60°时,钢轨轨底中两种振动模式下用超声导波测得回波信号,STFT(短时傅里叶变换)时频分布如图 6 所示。横向振动模式下导波传播一段距离后到达缺陷处的位置能量很少,频散严重;但垂直振动模式下导波的缺陷波和端面回波能量都较大,清晰可见。时频分布图中的不同形状等高线间接反映了该模式导波的频散特性和能量衰减。

图 7 为横向振动模式下 60°斜裂纹导波轨底传播波场快照图,图 8 为垂直振动模式下 60°斜裂纹导波轨底传播波场快照图。由图 7 可知,对于横向振动模式,在约 300 μs 时刻,始波到达斜裂纹缺陷处发生作用,产生反射回波和透射波;在约 450 μs 时刻透射波比较弱;到达约 750 μs 时刻透射波经右端面产生的端面反射回波很弱,能量损耗很大,频散较严重;在 900 μs 和 1 200 μs 时刻斜裂纹反射回波和右端面反射回波被接收到。由图 8 可知,对于垂直振动模式,约 300 μs 时刻始波到达斜裂纹缺陷处发生作用,产生反射回波和透射波;在约 450 μs 时刻

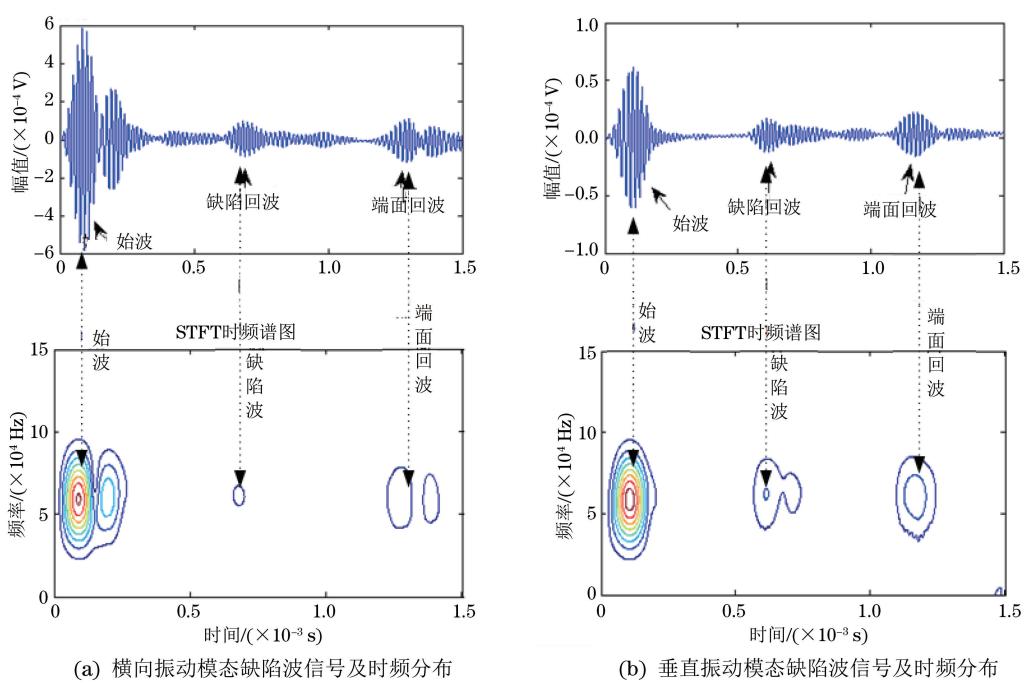
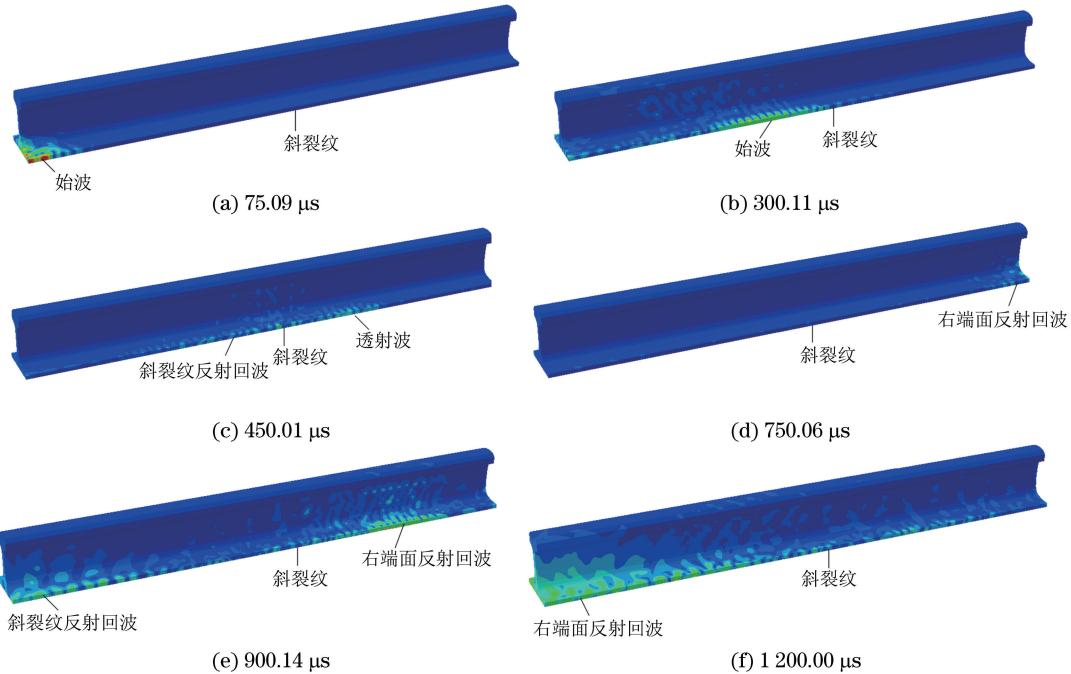


图 6 横向振动模态和垂直振动模态下的缺陷波信号及时频分布

图 7 横向振动模态下 60° 斜裂纹波场快照

一部分透射波沿着轨底向端面传播; 到达 $750 \mu\text{s}$ 时刻经过右端面得到端面反射回波; 在 $900 \mu\text{s}$ 和 $1 200 \mu\text{s}$ 时刻斜裂纹反射回波和右端面反射回波被接收。从以上两种振动模态的波场快照图可以看出, 横向振动模态相对垂直振动模态下导波在轨底传播过程中频散较严重, 检测效果没有垂直振动模态好。

同样, 对在不同裂纹角度时获取的缺陷信号数据进行分析, 得出斜裂纹缺陷反射回波幅值和不同

角度的对应关系, 如表 1 和图 9 所示。

表 1 轨底两种振动模态下的缺陷波包幅值

频率/kHz	波包幅值/($\times 10^{-5} \text{ V}$)	
	垂直振动模态	横向振动模态
30	2.07	0.93
60	2.42	1.37
90	2.49	1.64
120	2.32	0.91
150	1.63	0.79

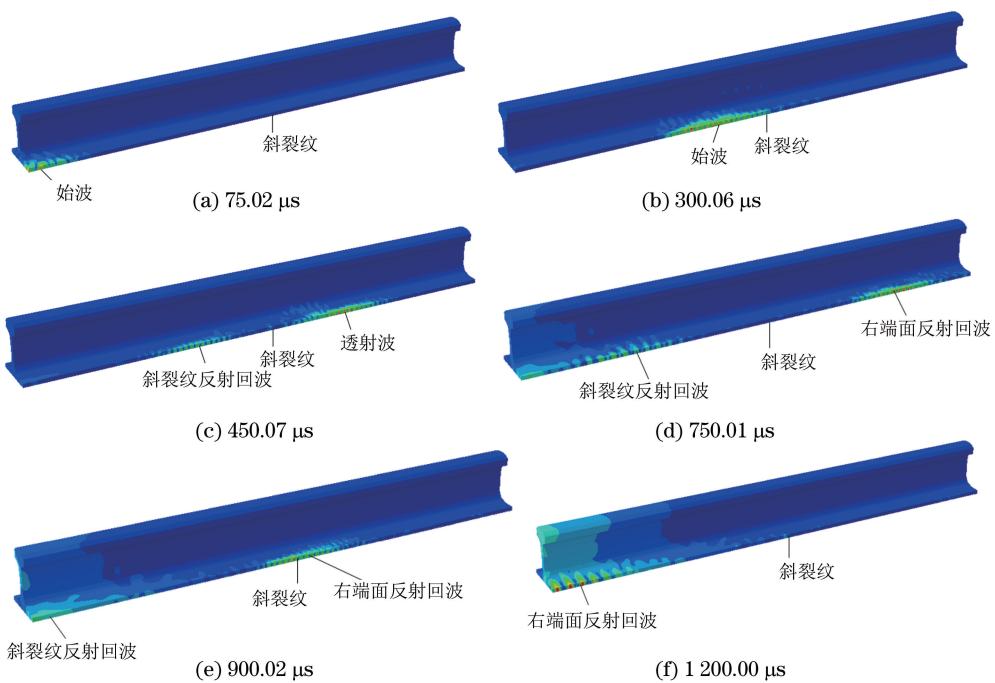


图 8 垂直振动模态下 60°斜裂纹波场快照

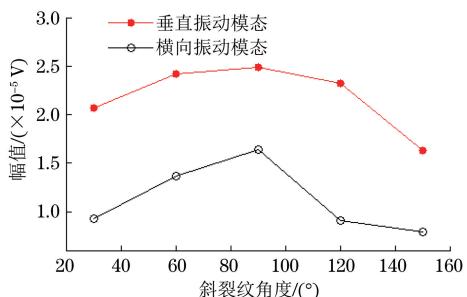


图 9 两种振动模态下斜裂纹角度-波包幅值曲线

由图 9 可知, 斜裂纹角度在 30°~90° 范围时, 随着角度的增加, 裂纹缺陷回波幅值也随之变大; 在角度为 90°~150° 范围时, 斜裂纹角度越大, 相应的缺陷回波幅值越小。总体上, 在斜裂纹为不同角度情况下, 相对于垂直振动模态, 横向振动模态在钢轨轨底传播时衰减较大, 在斜裂纹处存在较多的能量损失, 而且缺陷回波幅值较小。说明对于不同角度斜裂纹缺陷检测时, 垂直振动模态检测效果要比横向振动模态效果好。

3 结语

研究超声导波在钢轨轨底中的传播特性, 为垂直振动模态和横向振动模态两种模态方式应用于实际钢轨轨底斜裂纹缺陷检测提供了理论性的指导。笔者主要对无约束自由状态下钢轨轨底导波传播特性进行了研究, 选择合适的激励频率、脉冲周期数, 采用有限元方法对钢轨轨底斜裂纹缺陷进行了数值

模拟; 从钢轨轨底中的导波传播频散曲线可以看出, 横向振动模态和垂直振动模态适用于轨底缺陷检测, 而纵向振动模态频散曲线分散, 不适用于检测。同时超声导波在轨底传播的波场快照图和两种振动模态下斜裂纹不同角度波包幅度关系曲线显示, 横向振动模态相对垂直振动模态超声导波在轨底传播过程中频散较严重, 垂直振动模态检测效果更好。

参考文献:

- [1] 胡剑虹, 唐志峰, 蒋金洲, 等. 道岔钢轨轨底缺陷的导波检测技术研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(3): 34-40.
- [2] 何存富, 刘青青, 焦敬品, 等. 基于振动模态分析的钢轨中超声导波传播特性数值计算方法[J]. 振动与冲击, 2014(3): 9-13.
- [3] ZUMPANO G, MEO M. A new damage detection technique based on wave propagation for rail [J]. International Journal of Solid and Structures, 2006, 43 (5): 1024-1046.
- [4] WILCOX P, EVANS M. Guided wave testing of rail [J]. Insight, 2003, 45(6): 413-420.
- [5] CAWLEY P, ALLEYNE D N. Practical long range guided wave testing: application to pipes and rail[J]. Material Evaluation, 2003(1): 66-73.
- [6] HAYASHI T. Analysis of flexural mode focusing by a semianalytical finite element method[J]. Acoust. Soc. Am., 2003, 113(3): 1241-1248.

(下转第 25 页)

1.4 试块的磁粉检测

采用相同的磁化规范,将常规磁悬液和纳米 Fe_3O_4 磁悬液的质量浓度均配置为 $11.6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,符合标准的配置浓度^[5];利用 XDYY-Ⅲ A 型多用磁粉检测仪,用连续湿法对制作的带涂覆层的人工裂纹缺陷试块进行磁粉检测,磁痕显示如图 5 所示。

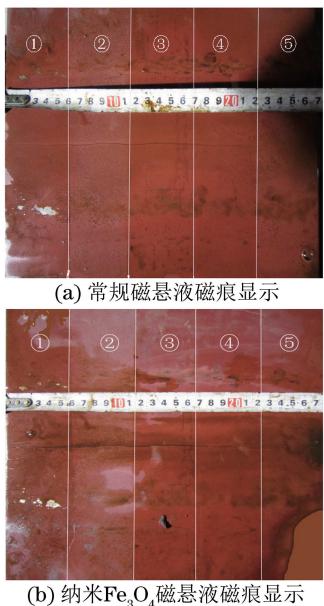


图 5 试块的磁粉检测磁痕显示

从图 5 可以看出:

(1) 两种磁悬液都能很好地显示试块上编号①~③区域的已知裂纹缺陷。

(2) 两种磁悬液作为同一缺陷的传感器,使用纳米 Fe_3O_4 磁悬液所得的①~③区域检测磁痕清晰度稍优于常规市场购买的 HR-1 型红磁膏的磁痕显示。

(3) 外加磁场施加后,①~③区域的涂覆层厚度相对较薄,该处的漏磁场相对较大,使用纳米 Fe_3O_4 磁悬液和常规市场购买的 HR-1 型红磁膏磁痕显示都很密实、牢固。

(4) 外加磁场撤走后磁痕仍很清晰。编号④区

域的裂纹缺陷,用常规 HR-1 型红磁膏磁悬液所得的磁痕清晰度稍优于纳米 Fe_3O_4 磁悬液所得的磁痕。

(5) 在检测过程中,随着外加磁场的施加,发现纳米 Fe_3O_4 磁悬液明显向缺陷漏磁场处聚集,这时形成的磁痕显示明显优于所用的常规 HR-1 型红磁膏。

(6) 撤走外加磁场后,由于磁悬液的流动以及纳米 Fe_3O_4 磁悬液的超顺磁性,编号④区域的裂纹缺陷磁痕显示变得模糊,从而导致了图 5 中④区域的磁痕显示松散和不连续现象(试验证明了磁粉检测应该在磁化的同时进行观察的经典磁粉检测理论)。

2 结论

(1) 随着涂覆层厚度的增大,使用纳米 Fe_3O_4 磁悬液和常规 HR-1 型红磁膏进行检测,所得的磁痕均由密实变得稀疏。

(2) 对于同一裂纹缺陷,涂覆层厚度相对较小区域(漏磁场较大),使用纳米 Fe_3O_4 磁悬液所得的检测磁痕清晰度稍优于常规市场购买的 HR-1 型红磁膏。

(3) 对涂覆层厚度相对较大的区域(漏磁场较小),在外加磁场施加过程中,纳米 Fe_3O_4 磁悬液向缺陷漏磁场处聚集,形成的磁痕显示明显优于所用的常规 HR-1 型红磁膏;当撤走外加磁场后,磁痕显示变得松散、不连续。

参考文献:

- [1] TSGR 7001-2013 压力容器定期检验规则[S].
- [2] 洪勇,史红兵,吴玉程. 纳米 Fe_3O_4 磁悬液应用于磁粉无损检测的探讨[J]. 化学工程与设备, 2015(8): 223-225.
- [3] JUAN B H, MAXIME J F, BRAD R W. Bifunctional $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZnS}$: Mn composite nanoparticles[J]. Material Letters, 2013, 98: 108-111.
- [4] 宋志哲. 磁粉检测[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2008.
- [5] NB/T 4730.4-2015 承压设备无损检测[S].

(上接第 22 页)

- [7] HAYASHI T, MIYAZAKI Y, MURASE M. Guided wave inspection for bottom edge of rails [R]. New York: Plenum, 2007: 169-175.
- [8] COCCIA S, BARTOLI I, MARZANI A, et al. Numerical

and experimental study of guided wave for detection of defects in the rail[J]. NDT&E International, 2011, 44(2): 93-100.

- [9] 卢超,李诚,常俊杰. 钢轨轨底垂直振动模式导波检测技术的实验研究[J]. 实验力学, 2012, 27(5): 593-599.