

基于光声信号的高铁钢轨表面缺陷检测方法

孙明健 程星振 王艳 章欣 沈毅 冯乃章

Method for detecting high-speed rail surface defects by photoacoustic signal

Sun Ming-Jian Cheng Xing-Zhen Wang Yan Zhang Xin Shen Yi Feng Nai-Zhang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 038105 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.038105

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.038105>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I3>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于柱弥散光源体内辐照的前列腺扫描光声成像仿体实验

Phantom experimental photoacoustic scanning imaging of prostate based on internal light irradiation using cylindrical diffusing source

物理学报.2015, 64(20): 207801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.207801>

多参量光声成像及其在生物医学领域的应用

Multi-parameter photoacoustic imaging and its application in biomedicine

物理学报.2015, 64(9): 098102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.098102>

利用散射光增强弱吸收固体混合物中主要光吸收物质的光声光谱特征

Using scattered light to amplify the photoacoustic spectroscopic signatures of the main absorbing material in a weakly light-absorbing solid mixture

物理学报.2013, 62(8): 087802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.087802>

光声信号的双谱分析方法研究

Double spectrum analysis of photoacoustic signal

物理学报.2013, 62(8): 087803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.087803>

自适应多光谱光声成像技术研究

Adaptive optics multispectral photoacoustic imaging

物理学报.2012, 61(21): 217801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.217801>

# 基于光声信号的高铁钢轨表面缺陷检测方法\*

孙明健<sup>1)2)</sup> 程星振<sup>2)</sup> 王艳<sup>1)</sup> 章欣<sup>1)</sup> 沈毅<sup>1)</sup> 冯乃章<sup>2)†</sup>

1) (哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001)

2) (哈尔滨工业大学(威海)信息与电气工程学院, 威海 264200)

(2015年8月13日收到; 2015年10月28日收到修改稿)

针对传统的基于超声信号的高铁钢轨无损检测方法对于表面微裂纹检测效果不佳的问题, 提出了一种基于光声信号的高铁钢轨表面缺陷检测方法. 首先, 使用有限元及K-wave方法建立了钢轨模型并获得了模拟光声信号; 然后利用时间反演的方法对钢轨表面的光声图像进行了重建, 并研究了不同传感器中心频率对成像结果的影响; 最后设计实验采集了钢轨表面的光声信号并进行了处理和分析. 实验结果表明, 基于光声信号的高铁钢轨表面缺陷检测方法对于表面微裂纹有很好的检测效果, 该方法在钢轨探伤领域有较大的可行性及发展潜力.

**关键词:** 无损检测, 光声成像, 高铁钢轨, 有限元

**PACS:** 81.70.Cv, 78.20.Pa, 43.50.Lj, 87.10.Kn

**DOI:** 10.7498/aps.65.038105

## 1 引言

近年来, 我国的高速铁路发展迅速, 高速列车的安全运行也因此变得愈发重要. 高速列车在加速和制动过程中以及通过钢轨接缝、弯道和道岔时, 长期对钢轨产生强烈摩擦、挤压、弯曲和冲击, 使钢轨产生疲劳缺陷. 缺陷一旦产生就易于快速扩展, 造成钢轨折断从而导致车毁人亡等重大恶性事故<sup>[1,2]</sup>, 直接影响着行车的安全. 在影响钢轨材料和构件质量和安全性的诸多因素中, 表面裂纹的危害性极大, 而隐藏在材料和构件近表面的裂纹往往又是致命裂纹的起点, 更具隐蔽性和危险性, 所以无损检测技术的一个重要方面就是对材料和构件表面和近表面缺陷的检测.

在高铁钢轨表面缺陷检测中, 常规的无损检测方法是磁粉检测、射线检测、涡流检测和超声检测等, 其中超声检测方法在我国钢轨探伤中应用非常广泛<sup>[3-7]</sup>. 超声检测具有准确度高、操作简单等特点. 然而, 对于表面或者近表面的微裂纹, 由于受

到钢轨表面几何形状、粗糙度等因素的影响, 超声检测效果不佳甚至无法进行检测<sup>[8]</sup>.

光声检测技术是近年来发展起来的一种基于材料特性的无损检测评价方法<sup>[9]</sup>, 由于钢轨对超声的衰减散射远小于材料对光的衰减和散射, 用宽带超声探测器检测超声波代替光学成像中检测散射光子, 可以提供高分辨率和高对比度的影像, 能够克服光学技术在成像深度以及超声技术在成像分辨率方面的不足. 同时光声检测技术所成图像主要是依据试件表面光能量吸收分布不同, 这可以有效克服超声成像在成像对比度方面的不足<sup>[10,11]</sup>. 国内外学者对该技术在表面缺陷检测上的应用展开了研究: 南京大学王敬时等<sup>[12]</sup>根据表面缺陷深度对激光声表面波的低通滤波效应对材料表面微裂纹进行了检测; 南京航空航天大学的曾伟等<sup>[13]</sup>研究了激光声表面波与材料近表面之间的振荡效应, 为近表面缺陷的定量检测提供了一种理论基础; 浙江大学杨世锡等<sup>[14]</sup>利用有限元研究了材料表面裂纹的宽度和深度对激光超声信号的影响; Kende-

\* 国家自然科学基金(批准号: 61201307, 61371045, 61171197)、中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: HIT. NSRIF. 2013132)、山东省重点研发计划(批准号: 2015GGX103016)和中国博士后科学基金面上项目(批准号: 2015M571413)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fengnz@yeah.net

rian 和 Djordjevic<sup>[15]</sup> 采用空气耦合探头接收激光超声信号, 检测了钢轨的垂直裂纹以及车轮缺陷; Podymova 等<sup>[16]</sup> 研究了亚表面缺陷的激光超声信号幅值与缺陷深度之间的关系; Cavuto 等<sup>[17]</sup> 利用表面缺陷会衰减激光声表面波的现象, 通过比较有缺陷情况下的波形, 来检测火车轮轴的表面缺陷. 然而, 这些已有的研究成果基本都是从一维信号的角度对钢轨缺陷进行定性的分析, 所得到的检测结果并不足以详细描述缺陷的实际状态.

考虑传统超声技术在钢轨表面缺陷检测上的不足, 以及光声技术在钢轨表面缺陷检测上的优势, 本文提出了一种基于光声信号的高铁钢轨表面缺陷的检测方法. 首先, 使用有限元及 K-wave 方法建立了钢轨模型并获得了模拟光声信号, 然后利用时间反演的方法对钢轨表面的光声图像进行了重建, 并研究了不同传感器参数对成像结果的影响, 最后设计实验采集了钢轨表面的光声信号并进行了处理和分析. 本方法具有以下优点: 1) 激光脉冲作为激发源, 可以非接触地在各种材料中直接激发光声信号, 并且产生的信号便于被传感器接收, 因此能够在各种恶劣环境进行检测作业; 2) 激光源的控制十分灵活, 可以很方便地移到缺陷近场附近, 为钢轨缺陷检测提供便利<sup>[18]</sup>; 3) 激光脉冲可以激发出宽频带的、多模式的超声信号, 并且便于和光纤技术集成, 可以实现快速、自动化的在线监测, 是一种很有应用背景的新型无损检测技术.

## 2 光声基本理论

光声信号是由光声效应产生的, 原理如图 1 所示. 光声效应是物体在吸收激光能量后产生瞬时的温度升高, 导致局部压力的升高, 继而以压力波的形式传播出去形成超声波的现象.

通过光声效应产生光声信号需要满足两个基本条件: 1) 激光脉冲的激发时间需要远小于热弛豫时间, 这样在激光脉冲作用期间热扩散过程就可以被忽略; 2) 激光脉冲宽度应该小于压力弛豫时间, 这样热应力能够迅速建立. 为了满足以上两种原则, 选择使用纳秒级的激光脉冲来激发光声信号<sup>[19]</sup>.

通过瞬态温度场产生的初始应力场  $P_0$  可以通过下式进行计算<sup>[20-22]</sup>:

$$P_0 = \tau(x)h(x) = (\beta c/C_p)u_a F, \quad (1)$$

$$\tau(x) = \beta c^2/C_p, \quad (2)$$

$$c^2 = C_p/K_T\rho_0 C_v, \quad (3)$$

式中  $\tau(x)$  为 Grüneisen 参数,  $\beta$  为等体积膨胀系数,  $C_p$  是恒压比热容,  $C_v$  为恒容比热容,  $K_T$  为绝热压缩率,  $u_a$  是吸收系数,  $F$  是光积分通量. 通过上式描述可以发现初始应力场是由力学、热学和光学参数决定的. 然而,  $\tau$  受材料属性的影响非常明显. 当受到激光照射时, 表面下一定深度内的钢体都会产生初始的声场. 当钢轨表面存在缺陷时, 由于材料特性的不同, 产生的初始声场会与无缺陷的钢轨不同, 并且不同的表面缺陷会产生不同的声场. 采集光声信号并通过重建算法可以绘制出不同表面缺陷钢轨的声压分布图, 从而达到观察和识别表面损伤的目的.

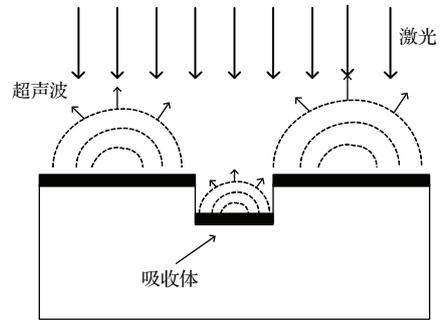


图 1 光声效应原理图

Fig. 1. Diagram of photoacoustic effect.

## 3 光声效应的仿真与图像重建

### 3.1 钢轨表面光声效应的仿真

为验证方法的合理性, 首先利用有限元软件模拟钢轨表面光声效应的过程, 并对模拟光声信号进行图像重建. 有限元模型的尺寸为  $15 \times 10 \times 10$  (mm), 材料属性与目前高铁钢轨普遍采用 75 kg/m 的钢轨参数相同, 具体材料参数, 列于表 1.

模型设置了三种钢轨表面缺陷: 横向裂纹缺陷、斜向裂纹缺陷及鱼鳞状裂纹缺陷. 这三种典型表面缺陷的具体描述可参考文献<sup>[23]</sup>, 模型尺寸如图 2 所示, 图中单位为  $10^{-4}$  m.

在模拟钢轨表面光声效应的过程中, 假设钢轨模型表面受激光能量的照射是均匀的, 这里采用高斯面热源分布的加载形式, 其热流密度分布函数为<sup>[24]</sup>

$$q(r) = \frac{2AP}{\pi R^2} \exp\left\{-\frac{2r^2}{R^2}\right\}, \quad (4)$$

表1 75 kg/m 钢轨材料的具体参数  
Table 1. Material parameters of the 75 kg/m-rail.

属性	密度 /kg·m <sup>-3</sup>	热传导率 /W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	比热容 /J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	弹性模量 /×10 <sup>11</sup> Pa	泊松比	热膨胀 系数/K <sup>-1</sup>
数值	7800	14.7	460	2.06	0.31	1.2 × 10 <sup>-5</sup>

(4) 式中  $P$  为激光功率 (W),  $R$  为激光照射半径 ( $m$ ),  $A$  为材料对激光的吸收系数. 设置初始温度为 27 °C, 激光波长为 532 nm, 脉宽为 6 ns, 单脉冲能量为 150 mJ, 激光辐射面积为钢轨模型带有缺陷的表面上. 在 COMSOL 中设定仿真时间为 10 ns, 在保证时间精度的情况下, 设置时间步长为 0.1 ns, 通过热力耦合仿真得到 10 ns 时的钢轨表面的热应力分布情况, 并将此时刻的应力场作为光声信号的初始声场. 为了方便光声图像的重建以及减少程序运行时间提高运行效率, 之后 10 ns—14  $\mu$ s 的光声信号在钢轨中的传播模拟过程的仿真由 K-wave 仿真工具箱来完成.

在 K-wave 中按照图 2 的钢轨模型尺寸图建立

横向裂纹、斜向裂纹和鱼鳞纹的表面损伤模型, 其中单位网格尺寸设置为 0.1 mm, 钢轨中声速设置为 4500 m/s, 钢轨密度设置为 7800 kg/m<sup>3</sup>, 超声换能器接受光声信号需要耦合剂, 这里设置耦合剂的密度为 1000 kg/m<sup>3</sup>, 传播声速为 1450 m/s, 将有限元计算得到应力场以矩阵的形式加载到 K-wave 钢轨模型中作为光声传播的初始应力场. 超声传感器探头位于钢轨表面上方 1 mm 处, 钢轨模型与超声传感器探头的相对位置如图 3 所示.

在仿真过程中分别将无缺陷、横向缺陷、斜裂纹缺陷和鱼鳞状缺陷的典型结构以及传感器按图 3 (a) 所示的位置加入模型中. 仿真过程中设置阵列传感器尺寸为 15 mm × 10 mm, 阵元间距设置

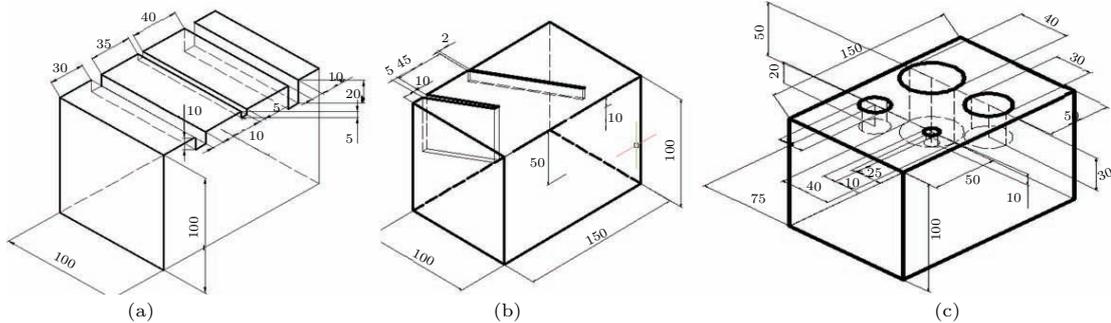


图2 三种钢轨表面缺陷模型 (a) 横裂纹模型; (b) 斜裂纹模型; (c) 鱼鳞剥离模型

Fig. 2. Three kinds of rail surface defect model: (a) Transverse crack model; (b) oblique crack model; (c) scale stripping model.

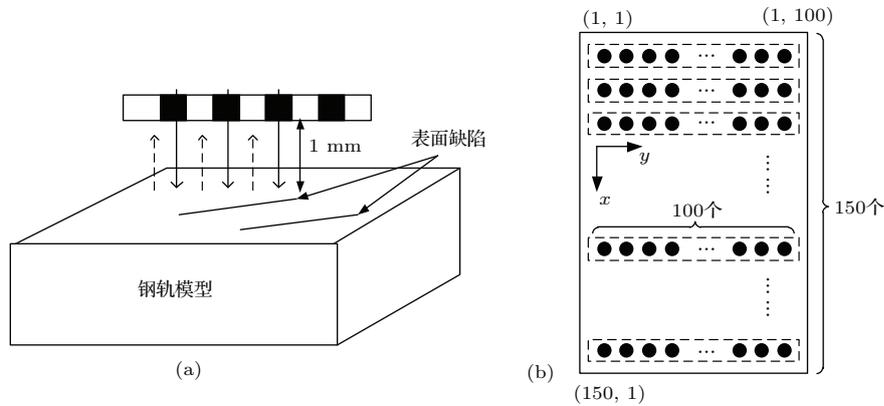


图3 K-wave 中元件相对位置以及传感器编号示意图 (a) 元件相对位置; (b) 传感器编号

Fig. 3. Component relative position and the serial number of the transducers in K-wave: (a) Component relative position; (b) the serial number of the transducers.

为0.1 mm. 然后将有限元分析得到的4种模型的初始声场加载到对应的K-wave模型中进行传播过程仿真. 对于每一种表面缺陷损伤模型都采用如图3(b)所示的150 × 100个测量点的数据进行测量, 可以从中得到不同传感器位置对同种表面损伤的反映情况. 依次对3种典型表面缺陷及无缺陷模

型进行15000次测量, 最终可以得到4 × 15000种包含不同伤损在不同测量位置的钢轨表面的光声信号的数据. 为了简化钢轨光声信号的分析过程, 对传感器进行了编号, 传感器的具体编号方式如下图3(b)所示, 其中x方向长度为1.5 cm, y方向长度为1.0 cm.

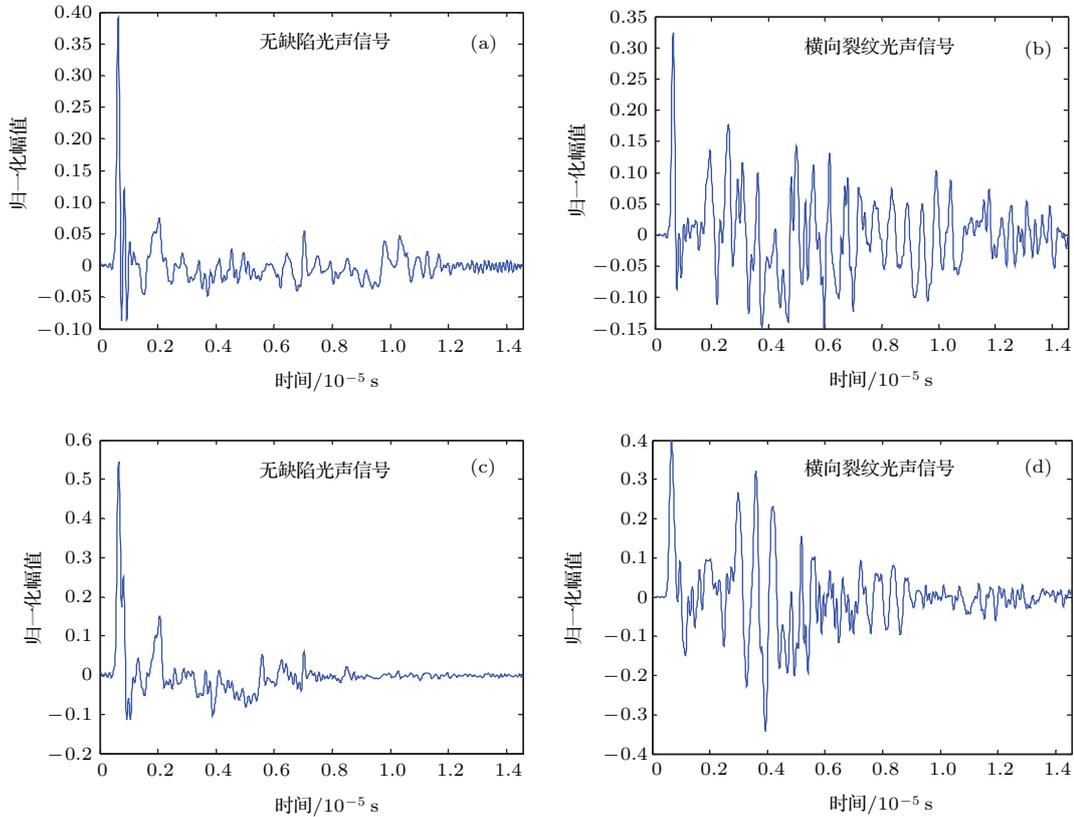


图4 同一传感器在不同位置采集的光声信号对比 (a), (b) 传感器(4, 76)在有/无缺陷时的光声信号; (c), (d) 传感器(50, 76)在有/无缺陷时的光声信号

Fig. 4. Comparison of photoacoustic signals collected by the same sensor in different position: (a), (b) PA signal of transducer (4, 76); (c), (d) PA signal of transducer (50, 76).

随机选取了有横裂纹缺陷和无缺陷的情况下两个位置(坐标分别为(4, 76)和(50, 76))的传感器所获得的光声信号进行对比, 如图4所示. 由于距离不同, 离缺陷更近的(50, 76)传感器采集的光声信号幅值更大. 图4(a)和图4(b)中, (4, 76)处的传感器采集到的无缺陷时光声信号的最大幅值为0.39, 有横裂纹缺陷时光声信号的最大幅值为0.33; 图4(c)和图4(d)中, (50, 76)处的传感器采集到的无缺陷时光声信号的最大幅值为0.55, 有横裂纹缺陷时光声信号的最大幅值为0.40. 因此, 激光在钢轨表面激发的光声信号的最大幅值比无缺陷时低, 这正是由于缺陷的存在使材料吸收的激光能量减少所导致的.

### 3.2 钢轨表面光声图像重建

为了便于描述成像平面的位置, 在钢轨模型中建立如图5所示的笛卡尔坐标系, 取带有缺陷的面作为上表面. 从3.1节的结果中可知, 表面有无缺陷所得到的光声信号的最大幅值是不同的, 因此在

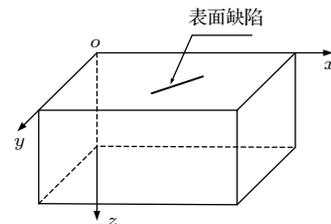


图5 钢轨模型参考坐标系

Fig. 5. Reference coordinate system of the rail model.

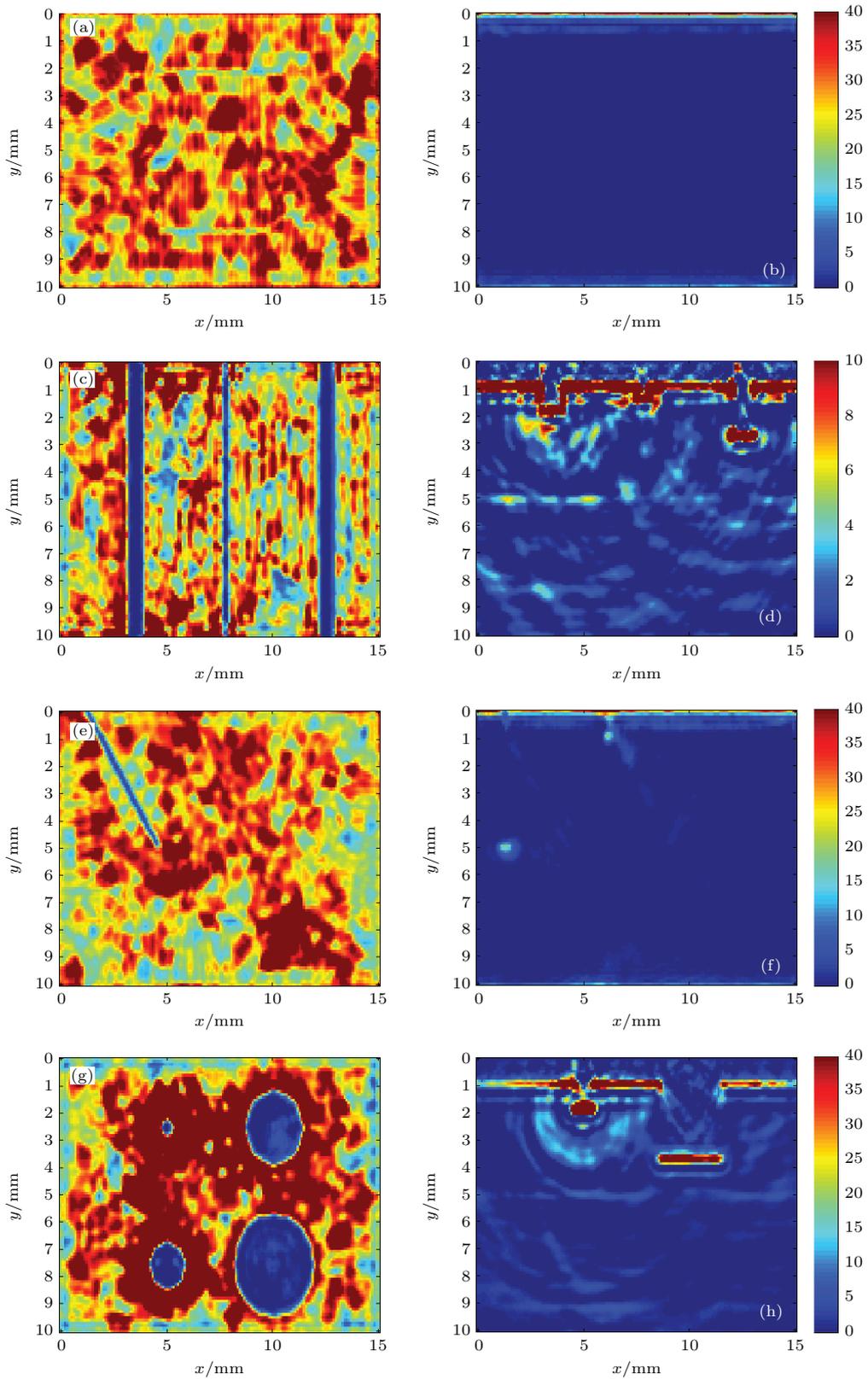


图6 (网刊彩色) 钢轨模型光声重建图像 (a), (b) 为无缺陷模型的  $x-y$  平面与  $x-z$  平面的光声图像; (c), (d) 为横裂纹缺陷模型的  $x-y$  平面与  $x-z$  平面的光声图像; (e), (f) 为斜裂纹缺陷模型的  $x-y$  平面与  $x-z$  平面的光声图像; (g), (h) 为鱼鳞状剥离缺陷模型的  $x-y$  平面与  $x-z$  平面的光声图像

Fig. 6. (color online) Photoacoustic image of the rail model: (a), (b) No-defect model of  $x-y$  plane and  $x-z$  plane; (c), (d) the transverse crack defect model of  $x-y$  plane and  $x-z$  plane; (e), (f) the oblique crack defect model of  $x-y$  plane and  $x-z$  plane; (g), (h) the scaly peel defect model of  $x-y$  plane and  $x-z$  plane.

K-wave 中利用时间反演的方法, 利用 3.1 节得到的表面下不同深度的光声信号最大幅值进行图像重建, 得到了这几种模型对激光能量的吸收分布, 结果如图 6 所示, 图中的颜色表示声压的相对强度值. 根据 3.1 节中所设置的阵列探头参数, 重建的图像共有  $150 \times 100$  个像素点, 由于对同样尺寸的图像, 像素点个数越多图像越精细, 因此若设置更小的阵元间距, 可重建得到更精细的光声图像, 就能提高图像分辨率, 减小缺陷检测的误差.

由于有限元模型的网格划分比 K-wave 模型更细, 两种模型节点数目不一致, 因此有限元结果不能直接施加在 K-wave 模型上. K-wave 模型的一个节点对应多个有限元模型的节点, 选取 K-wave 每个节点对应的所有有限元的结果, 求取平均值来代表该 K-wave 节点的初始声压, 这样就能统一节点数目, 使有限元的结果施加在 K-wave 模型上. 这种处理方法使图 6 (a), (c), (e), (g) 中出现声压值不均匀的现象.

在图 6 (a), (c), (e), (g) 中, 由于  $x$ - $y$  平面直接受到激光照射, 表面很浅的区域吸收了激光能量, 所以  $x$ - $y$  平面声压平均值较大. 随着深度的增加, 激光能量的吸收越来越小, 所以在图 6 (b), (d), (f), (h) 中,  $x$ - $y$  平面中下部分声压值几乎为零. 此外, 从图 6 (a), (c), (e), (g) 中可以很清楚地分辨缺陷的位置、尺寸和形状等信息, 从图 6 (b), (d), (f), (h) 中又可以确定缺陷的深度以及向内延伸的方向等信息, 因此重建的光声图像增强了表面缺陷检测结果的直观性.

### 3.3 不同传感器频带对于重建图像分辨率的影响

实际钢轨探伤过程中, 用于采集信号的超声传感器的参数会对最终的成像结果产生影响. 有限元仿真中, 激光激发的超声最大频率可以通过 (5) 式来估计 [14],

$$f_{\max} = \frac{\sqrt{2}C_R}{\pi R}, \quad (5)$$

其中,  $C_R$  为钢轨的表面波波速 (约为 3000 m/s),  $R$  为激光照射斑点的半径 (设置为 300  $\mu\text{m}$ ), 因此可大致估计出光声信号的最大频率为 4.5 MHz, 信号的频谱分布在 0—4.5 MHz 之间.

为了分析不同的传感器频带对于图像分辨率的影响, 分别利用中心频率为 0.5, 1, 2 MHz 的超声传感器对钢轨横向裂纹的光声信号进行采集, 再

利用时间反演对采集的信号进行图像重建, 得到如图 7 所示的图像.

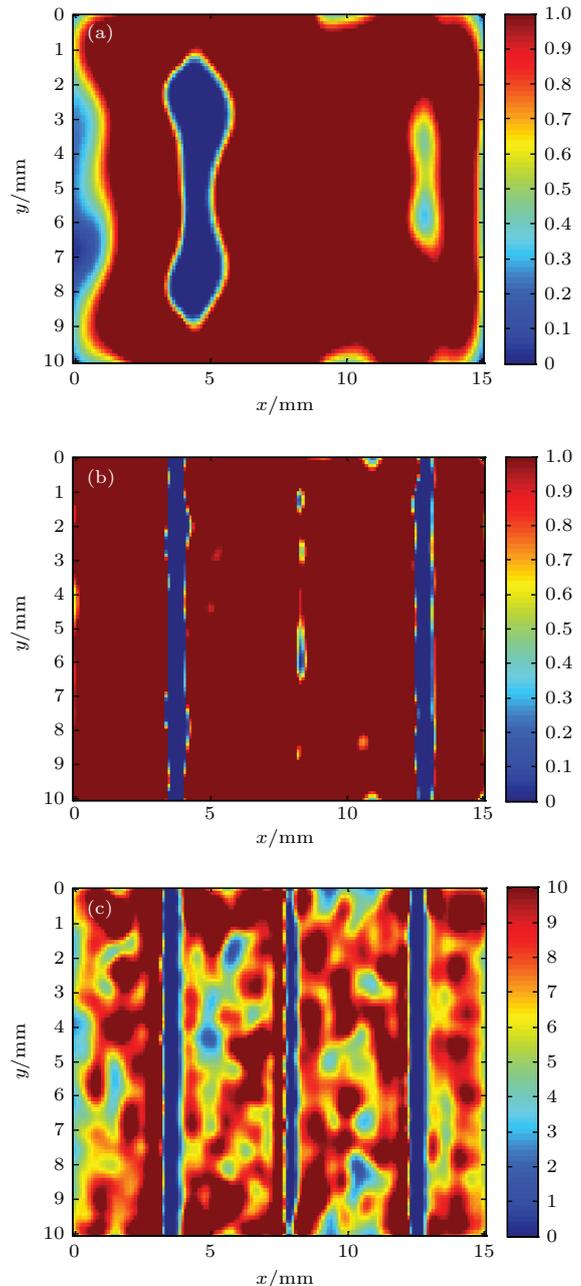


图 7 (网刊彩色) 传感器取不同中心频率时光声图像重建结果 (a) 0.5 MHz 时的图像; (b) 1 MHz 时的图像; (c) 2 MHz 时的图像

Fig. 7. (color online) Reconstruction results of photoacoustic images of different cut-off frequency of the sensor: (a) 0.5 MHz; (b) 1 MHz; (c) 2 MHz.

从图 7 (a) 中可知, 传感器中心频率取 0.5 MHz 时, 重建结果中 0.5 mm 的缺陷未检测出, 而 1 mm 的缺陷的形状与实际相差很多. 从图 7 (b) 中可以看出, 传感器中心频率达到 1 MHz 时, 即可清楚地检测出毫米级的表面缺陷. 而在图 7 (c) 中, 使用中

心频率为 2 MHz 的传感器时, 几百微米级的表面缺陷能够被清楚地检测到, 而毫米级的缺陷图像变化非常微小. 这说明毫米级的表面缺陷产生的光声信号频谱主要分布在 1—2 MHz 的区间内, 而几百微米级的表面缺陷产生的光声信号频谱主要分布在 2—4.5 MHz 的区间. 事实上, 当超声传感器的带宽与缺陷产生的声压频谱范围大致相同时, 可以获得比较好的成像结果 [25], 因此, 恰当地选择超声探头的中心频率和带宽两个参数对于改善图像质量以及提高缺陷检测精度具有重要意义.

### 4 实验与结果分析

为了进一步验证方法的合理性与可行性, 设计了一个高铁钢轨表面缺陷光声检测平台, 平台的结构如图 8 所示. 采用了 Q-Switch Nd: YAG 脉冲激光器发射脉冲激光, 脉宽为 6 ns, 波长为 532 nm, 重复频率为 15 Hz, 能量为 10 mJ, 通过耦合器后耦合至光纤, 然后照射在钢轨模型表面上. 钢轨模型的踏面上加工了 8 条裂纹, 如图 9 所示, 裂纹的序号、尺寸及位置分部信息列于表 2. 其中, 前七条裂纹均横贯钢轨踏面, 所以以各条裂纹距离左侧边的距离作为其位置, 第八条裂纹在水平方向从 80—100 mm, 竖直方向上位于距上侧边 15 mm 的距离, 取其竖直方向的距离作它的位置.

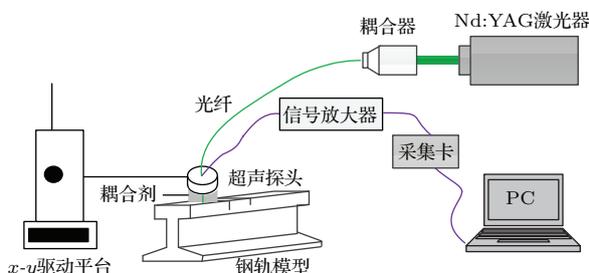


图 8 高铁钢轨表面缺陷光声检测平台

Fig. 8. Photoacoustic detection platform for high speed rail surface defects.

表 2 钢轨踏面上的裂纹尺寸及位置

Table 2. Distribution positions and parameters of the rail tread cracks.

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
位置/mm	20	30	40	50	60	70	80	15
宽度/mm	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0.5	0.2
深度/mm	1.0	2.0	3.0	5.0	1.0	5.0	1.0	1.0

激光斑点上方 20 mm 处放置了一个单阵元的超声探头, 采用后向模式采集所激发的光声信

号, 激光照射的位置及超声探头的位置通过  $x$ - $y$  驱动平台来改变. 利用该平台采集踏面上如图 9 所示的 70 mm × 15 mm 区域的光声信号, 扫描路径如图 9 中箭头所示,  $x$  方向上步长为 100 μm, 每行扫描 700 个点, 沿  $y$  方向上扫描 50 行, 每行间距为 300 μm. 所采集的钢轨踏面某个点的光声信号如图 10 所示.

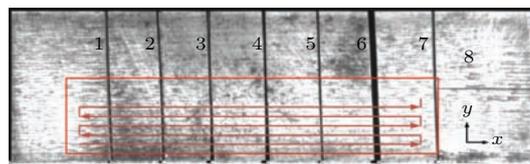


图 9 高铁钢轨模型踏面裂纹分布

Fig. 9. Distribution of tread crack in high-speed rail model.

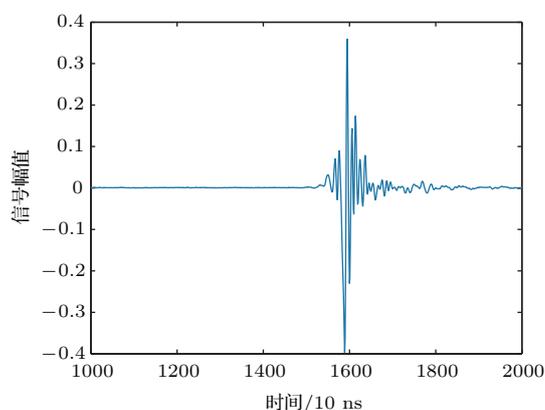


图 10 钢轨踏面某点的光声信号

Fig. 10. Photoacoustic signal of certain point on the rail tread.

由于超声探头位于钢轨踏面上方 20 mm 处, 所以采集到的钢轨踏面光声信号最大值对应应在 10—20 μs 的范围内, 利用这个范围内光声信号最大值进行图像重建. 钢轨踏面部分区域  $x$ - $y$  平面的光声图像如图 11 所示,  $x$ - $y$  平面的光声图像如图 12 所示. 从图 11 和图 12 中可以清楚地分辨钢轨踏面细微裂纹的分布状况.

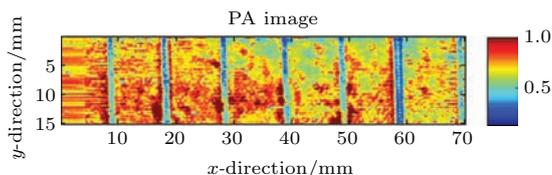


图 11 (网刊彩色) 钢轨踏面部分区域  $x$ - $y$  平面的光声图像

Fig. 11. (color online) Photoacoustic image of the  $x$ - $y$  plane in the partial area of rail tread.

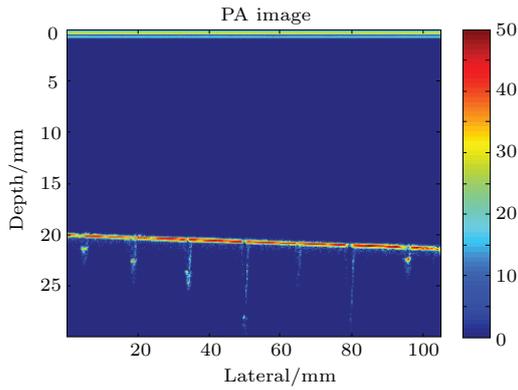


图 12 (网刊彩色) 钢轨踏面部分区域  $x-z$  平面的光声图像  
Fig. 12. (color online) Photoacoustic image of the  $x-z$  plane in the partial area of rail tread.

对光声图像进行进一步的图像处理, 一种简单的处理方法是选取图 11 和图 12 中每条裂纹以及附近的一块矩形区域, 通过计算裂纹所占的面积与矩形区域总面积的比例, 来确定裂纹的宽度和深度. 使用该方法得到的裂纹的宽度和深度列于表 3.

表 3 检测得到的钢轨踏面裂纹尺寸  
Table 3. The detected size of the rail tread cracks.

序号	1	2	3	4	5	6	7
宽度/mm	0.51	0.53	0.49	0.50	0.52	0.98	0.45
深度/mm	1.20	2.4	3.1	7.0	4.1	6.4	1.1

通过比较测量值与真实值可发现, 检测到的缺陷宽度比深度更加精确, 这是由于随深度增加光声信号幅值降低, 重建的图像效果变差所导致的. 测量的误差, 一方面可以通过改善图像质量(选用参数更合适的探头、采集更多点的光声信号)来缩小; 另一方面, 本实验采集的光声信号并不完整, 仅仅使用了激发点正上方的光声信号进行图像重建, 因此重建的图像也不能完全表现钢轨表面的情况. 如果能够将激发点周围各个方向的光声信号全部采集, 那么重建得到的光声图像将更加完整, 再设计更先进的图像处理算法, 比如滤波、分割、形态学处理等方法, 便可得到更精确的宽度、深度、走向等可以用来衡量钢轨缺陷程度的信息, 这些都是后续研究中要进行改进的地方. 依据宽度、深度、走向等信息, 可以对钢轨缺陷进行评估继而制定相应的处理方案.

## 5 结 论

本文研究了一种基于光声信号的高铁钢轨表面缺陷检测方法. 首先使用有限元分析方法获得了

激光照射下的钢轨表面初始声场, 并通过 K-space 方法模拟了光声信号在初始声场作用下的传播情况. 然后利用时间反演的方法进行了光声图像的重建, 并研究了超声传感器不同中心频率对于重建结果的影响. 最后设计实验采集了钢轨表面及浅表面的光声信号, 并进行了图像重建, 从图像中可以清晰地分辨表面缺陷的位置、深度、走向等信息. 实验结果表明该方法对于表面微裂纹具有很好的检测效果, 弥补了超声方法对于钢轨表面微裂纹检测效果差的问题, 同时也为高铁钢轨无损检测提供了一种新的方法.

## 参考文献

- [1] Zhao X Q, Wang W J, Zhong W, Liu Q Y, Zhu M H, Zhou Z R 2009 *J. China Railway Soc.* **2** 84 (in Chinese) [赵雪芹, 王文健, 钟雯, 刘启跃, 朱旻昊, 周仲荣 2009 铁道学报 **2** 84]
- [2] Xie Y Y, Zhou S X, Xie J L, Liu Q F 2009 *Engineer. Mech.* **26** 31 (in Chinese) [谢云叶, 周素霞, 谢基龙, 刘青峰 2009 工程力学 **26** 31]
- [3] Song Z L, Yamada T, Shitara H, Takemura Y 2011 *J. Electromag. Anal. Appl.* **3** 546
- [4] Liu X, Lovett A, Dick T, Rapik S, Barkan Christopher P 2014 *J. Transport. Engineer.* **140** 04014048
- [5] Zhang X, Feng N, Wang Y, Shen Y 2014 *Appl. Acoust.* **86** 80
- [6] Sun J, Zhao Y, Song J, Ma J, Guo R, Liu S, Nan G, Jia Z 2014 *J. Optoelectron. Laser* **25** 141
- [7] Yang R, He Y, Gao B, Gui Y, Peng J 2015 *Measurement: J. Int. Measur. Confeder.* **66** 54
- [8] Sun M J, Wang Y, Zhang X, Liu Y, Wei Q, Shen Y, Feng N Z 2014 *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2014 IEEE International* Montevideo, Uruguay, May 12–15, 2014 p819
- [9] Maclean A G, Schneider L T, Freytag A I, Adam Gribble, Barnes J A, Looock H P 2014 *Applied Physics B Lasers & Optics* (Berlin: Springer-Verlag) p1
- [10] Yan L, Gao C, Zhao B, Ma X, Zhuang N, Duan H 2012 *Int. J. Thermophys.* **33** 2001
- [11] Jiao Y, Jian X H, Xiang Y J, Cui X Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 087803 (in Chinese) [焦阳, 简小华, 向永嘉, 崔峭峯 2013 物理学报 **62** 087803]
- [12] Wang J S, Xu X D, Liu X J, Xu G C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7765 (in Chinese) [王敬时, 徐晓东, 刘晓峻, 许钢灿 2008 物理学报 **57** 7765]
- [13] Zeng W, Wang H T, Tian G Y, Hu G X, Wang W 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 134302 (in Chinese) [曾伟, 王海涛, 田贵云, 胡国星, 汪文 2015 物理学报 **64** 134302]
- [14] Ding Y S, Yang S X, Gan C B 2015 *J. Vibration and Shock* **34** 34 (in Chinese) [丁一珊, 杨世锡, 甘春标 2015 振动与冲击 **34** 34]

- [15] Kenderian S, Djordjevic B 2006 *Insight* **48** 336
- [16] Podymova N B, Karabutov A A, Cherepetskaya E B 2014 *Laser Phys.* **24** 8
- [17] Cavuto A, Martarelli M, Pandarese G, Revel G M, Tomasini E P 2015 *Ultrasonics* **55** 48
- [18] Sun M J, Lin X W, Wu Z H, Liu Y, Shen Y, Feng N Z 2014 *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2014 IEEE International* Montevideo, Uruguay, May 12–15, 2014 p896
- [19] Biomedical photoacoustic imaging, Beard P [http://www.medphys.ucl.ac.uk/research/mle/pdf\\_files/Review\\_Roy\\_Soc\\_Interface\\_1.pdf](http://www.medphys.ucl.ac.uk/research/mle/pdf_files/Review_Roy_Soc_Interface_1.pdf) [2015-8-13]
- [20] Gusev V E, Karabutov A A 1993 *Laser Optoacoustics* (New York: American Institute of Physics) pp780–783
- [21] Oraevsky A A, Karabutov A A 2003 *Bionomedical Photonics Handbook* (Boca Raton: CRC Press) pp462–473
- [22] Cox B T, Laufer J G, Beard P C 2009 *Photons Plus Ultrasound: Imaging and Sensing* 2009 (USA: SPIE) p717713
- [23] Ministry of Railways of the People's Republic of China 2011 *Classification of rail damage TB/T 1778-2010* (Beijing: China Railway Publishing House) pp1–8 (in Chinese) [中华人民共和国铁道部 2011 钢轨伤损分类 TB/T 1778-2010 (北京: 中国铁道出版社) 第1—8页]
- [24] Zhou G L, Kong L B, Sun H Y 2008 *Manufact. Automat.* **09** 90 (in Chinese) [周桂莲, 孔令兵, 孙海迎 2008 制造业自动化 **09** 90]
- [25] Tan Y, Huang X M, Ren Y J 2011 *J. Appl. Opt.* **05** 831 (in Chinese) [谭毅, 黄新民, 任亚杰 2011 应用光学 **05** 831]

# Method for detecting high-speed rail surface defects by photoacoustic signal\*

Sun Ming-Jian<sup>1)2)</sup> Cheng Xing-Zhen<sup>2)</sup> Wang Yan<sup>1)</sup> Zhang Xin<sup>1)</sup>  
Shen Yi<sup>1)</sup> Feng Nai-Zhang<sup>2)†</sup>

1) (Harbin Institute of Technology, School of Astronautics, Harbin 150001, China)

2) (Harbin Institute of Technology at Weihai, School of Information and Electrical Engineering, Weihai 264200, China)

( Received 13 August 2015; revised manuscript received 28 October 2015 )

## Abstract

Railway plays a major role in our daily life and national economy. In recent years, people payed much more attention to the safety operation of the high-speed train. In fact, the rail cracks originate from surface micro cracks will directly affect the safety of high-speed train. Therefore, it is vital to detect the rail surface micro cracks.

Numerous nondestructive testing methods have been developed and applied in the detection of high speed rail cracks, such as magnetic particle testing, eddy current testing, and ultrasonic testing, etc. However, all the above conventional methods could only achieve crack information from the point of one-dimensional signal but not effective for the detection of surface micro cracks. A surface defect detection method based on photoacoustic (PA) signal from high speed rail is proposed so as to detect the surface crack more exactly and visually.

Simulation and experiments are designed to validate the proposed method. Firstly, three models of high-speed rail with transverse crack, oblique crack, and scale stripping are established respectively. Meanwhile, the PA effect is simulated by finite element analysis and K-wave. Then, PA image of the rail surface is reconstructed by time inversion reconstruction algorithm, and some parameters, such as the center frequency of ultrasonic sensor and the laser power are also confirmed in further simulation. Subsequently, an experimental platform is established to collect the actual PA signal from a rail surface and to reconstruct PA images of the rail surface and shallow layer. The crack appearing in PA images are clear enough to show the receive crack information, such as sizes, propagating directions, and locations, which can be used to evaluate the rail states and decide processing scheme.

It is proved that clear images of rail surface and shallow layer can be received by the detecting method of high-speed rail surface defects based on photoacoustic signal, and the surface cracks can be detected effectively.

**Keywords:** nondestructive detection, photoacoustic imaging, high-speed rail, finite element method

**PACS:** 81.70.Cv, 78.20.Pa, 43.50.Lj, 87.10.Kn

**DOI:** 10.7498/aps.65.038105

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61201307, 61371045, 61171197), the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (Grant No. HIT. NSRIF. 2013132), Science and Technology Development Plan Project of Shandong Province, China (Grant No. 2015GGX103016), and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2015M571413).

† Corresponding author. E-mail: [fengnz@yeah.net](mailto:fengnz@yeah.net)