

基于多模态信号的金属材料缺陷无损检测方法

孙明健 刘婷 程星振 陈德应 闫锋刚 冯乃章

Nondestructive detecting method for metal material defects based on multimodal signals

Sun Ming-Jian Liu Ting Cheng Xing-Zhen Chen De-Ying Yan Feng-Gang Feng Nai-Zhang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 167802 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.167802

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.167802>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电子关联效应对平行双量子点系统磁输运性质的影响

Effect of electronic correlations on magnetotransport through a parallel double quantum dot

物理学报.2015, 64(10): 107201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.107201>

扶手椅型石墨烯介观环中的持续电流

Persistent currents in mesoscopic graphene rings with armchair edges

物理学报.2015, 64(1): 017302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.017302>

串型耦合双量子点处于自旋阻塞区时磁输运性质的研究

Mageto-transport properties of serial double quantum dots in the spin blockade regime

物理学报.2013, 62(1): 017201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.017201>

串型耦合双量子点之间库仑作用对其近藤共振的影响

The effect of the interdot Coulomb interaction on Kondo resonance in series-coupled double quantum dots

物理学报.2012, 61(8): 087203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.087203>

基于多模态信号的金属材料缺陷无损检测方法*

孙明健¹⁾²⁾ 刘婷²⁾ 程星振¹⁾ 陈德应²⁾ 闫锋刚^{1)†} 冯乃章^{1)2)‡}

1)(哈尔滨工业大学(威海)信息与电气工程学院, 威海 264209)

2)(哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001)

(2016年5月12日收到; 2016年6月2日收到修改稿)

金属材料缺陷检测对于经济发展具有重要意义. 针对现有无损检测技术信号模态单一、检测范围有限等不足, 提出了一种基于多模态信号的金属材料缺陷无损检测方法. 该方法以光声无损检测方法为主体, 首先利用有限元方法分析了缺陷对激光能量吸收量和光声表面波传播的影响, 提出了基于激光吸收量和光声表面波的缺陷检测方法; 然后搭建了多模态信号检测平台, 采集了缺陷的光学、光声和超声三种模态的信号, 检测出了裂纹的宽度和分布信息, 以及深度和在内部的延伸状况. 研究表明, 本文提出的基于金属材料多模态信号的无损检测方法能够准确、全面地检测出金属材料的杂质和裂纹的尺寸信息, 弥补了现有无损检测方法在检测范围上的不足, 为缺陷定量检测和全面诊断提供了一个新的思路.

关键词: 光声, 超声, 无损检测, 有限元

PACS: 78.20.Pa, 43.35.Cg, 81.70.Cv, 87.10.Kn

DOI: 10.7498/aps.65.167802

1 引言

随着工业技术的发展与工艺水平的提高, 各种金属材料已经广泛应用在军工、建筑、工业生产等各行各业中. 在金属材料的加工过程以及使用工程中, 受多方面因素影响, 诸如缩孔、夹渣、腐蚀、疲劳裂纹等缺陷都随之产生^[1,2]. 这些缺陷会对材料的使用寿命、力学性能等产生直接影响^[3], 并且会逐渐发展形成裂纹, 最终导致断裂, 造成巨大损失. 因此, 金属材料缺陷无损检测技术的研究至关重要.

近年来, 国内外学者在金属材料浅表面缺陷无损检测领域进行了广泛的研究. 霍雁和张存林^[4]以及孟梨雨等^[5]在红外热波无损检测上进行了深入研究, 利用该方法实现了对多种材料缺陷尺寸的测量; Chen等^[6]利用点聚焦超声对材料的弹性模量、声衰减系数、密度等参数进行了定量检测,

并以此为依据对材料缺陷进行了评估; Sun等^[7]研究了基于振动和声发射技术的钢轨缺陷检测方法; Petcher和Dixon^[8]对电磁超声产生的剪切波检测焊缝缺陷进行了研究; Soumya等^[9]利用涡流、超声及微波对飞行器搭接接头的疲劳程度进行了检测和评估. 光声无损检测技术凭借其准确、非接触、操控灵敏等优势, 在浅表面缺陷检测方面得到了深入研究. 曾伟等^[10-12]研究了基于光声表面波振荡效应、波速分析以及能量分析等方法的表面缺陷检测技术; 关建飞等^[13]研究了激光声表面波在金属表面裂纹检测上的应用方法; Podymova等^[14]研究了光声信号幅值与亚表面缺陷深度的关系; Cavuto等^[15]利用表面缺陷对光声表面波的衰减现象对火车轮轴缺陷进行了检测.

纵观国内外对于无损检测技术的研究与发展趋势可以发现, 目前的金属材料缺陷检测主要采用某一种方式, 使用单独一种模态信号进行, 这样往

* 国家自然科学基金(批准号: 61371045)、山东省重点研发计划(批准号:2015GGX103016)和中国博士后科学基金(批准号: 2015M571413)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yfglion@163.com

‡ 通信作者. E-mail: fengnz@yeah.net

往只能定性检测材料一部分的缺陷, 不能够得到完整的信息, 因而不能对缺陷进行正确的评估和预测, 不能制定合适的维护方案. 因此, 研究一种使用多种模态信号来全面检测材料缺陷的技术十分有必要.

2 多模态检测方法

金属材料的缺陷可能出现在从表面到内部的各个位置. 对于诸如表面裂纹、磨损等起源于材料表面的缺陷, 利用视觉设备采集缺陷的光学图像, 根据像素分布、亮度和色彩等信息, 进行各种运算来抽取目标的特征, 就能够快速地确定缺陷位置、尺寸和类型等信息^[16,17]. 然而, 光学图像无法体现材料表面以下的缺陷信息, 为了获得更多的缺陷信息, 可以利用声学的检测方法扩展检测深度.

工业上常采用超声波检测表面以下的缺陷. 由于缺陷和材料的声阻抗 Z (与材料的密度 ρ 和声速 v 有关, 如 (1) 式所示) 存在较大差异, 压电材料产生的超声波传播到两种声阻抗的交界面时, 一定比例的超声波就会反射回来, 超声反射回波的比例 R 如 (2) 式所示, 其中 Z_1 和 Z_2 分别为材料和缺陷的声阻抗^[18].

$$Z = \rho \cdot v, \quad (1)$$

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2. \quad (2)$$

同时, 当金属晶粒尺寸为 $0.03\lambda - 300\lambda$ (λ 为超声波长) 时, 在其中传播的超声就会发生散射, 并且随着晶粒或异物尺寸的变化, 散射的效果也会发生改变^[19]. 反射和散射现象对于超声成像具有至关重要的作用, 利用超声成像技术可以获得更加直观的缺陷图像. 不过, 超声方法对于材料深度较浅的区域缺陷检测效果很差, 以至于不能够检测浅表层缺陷. 而近年来快速发展的光声无损检测方法能够弥补这个不足.

光声无损检测方法的核心是光声效应——金属材料吸收脉冲激光的能量 A_e , 形成局部能量累积, 并转化为热能, 进而导致金属局部温度 T 上升, 造成局部体积膨胀, 形成弹性应力场, 即超声场^[20,21]. 光声效应的过程可以用 (3) 式和 (4) 式来描述, 其中, c 为金属材料的比热容, K 为材料的热传导系数, μ 和 η 为材料的 Lamé 常数, α 为材料

的热膨胀常数, ρ 为材料密度, \mathbf{u} 为超声引起的位移^[22].

$$A_e = c\rho\dot{T} - \nabla \cdot (K\nabla T), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \mu\nabla^2\mathbf{u} + (\eta + \mu)\nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) - (3\eta + 2\mu)\alpha\nabla T \\ & = \rho\ddot{\mathbf{u}}. \end{aligned} \quad (4)$$

光声效应在金属材料上产生的超声波包括纵波、横波、瑞利波、兰姆波等多种波型, 其中纵波和横波能够从激发源向材料内部传播, 瑞利波、兰姆波可以沿着材料表面传播. 而表面裂纹、气孔、杂质等材料浅层缺陷会影响这些波的传播并造成波型的转换.

另外, 当金属中存在杂质时, 由于杂质的密度、热传导系数、热膨胀系数和光吸收系数等物理参数往往与所检测材料的物理参数存在较大差异, 导致激光吸收能量值 A_e 的差异. A_e 和温度 T 二者的关系可由 (5) 式表示, 其中, C 为材料的比热容^[23,24]. 由于密度和比热容均为恒定值, 因此温度正比于光吸收量. 根据光声效应的原理, 材料温度变化最终导致了超声信号的产生, 表面激发源处的超声初始声压 p_0 如 (6) 式所示, 其中 κ 为材料的体积模量, β 为热膨胀系数. 对于固体材料, κ 与弹性模量 E 和泊松比 ν 有关, 可表示为 (7) 式所示的形式.

$$T = \frac{A_e}{\rho C}, \quad (5)$$

$$p_0 = \kappa(\beta T - \nabla \cdot V), \quad (6)$$

$$\kappa = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}. \quad (7)$$

实际上, 纳秒级脉冲激光引起的材料体积相对变化非常小, 可以忽略不计^[21], 又由于 E , ν 和 β 都可视为恒定值, 因此可认为初始声压 p_0 正比于温度 T , 进而可推出初始声压 p_0 正比于光吸收能量值 A_e . 因而可以从光声效应引起的初始声压 p_0 和温度 T 的变化去分析光吸收量 A_e 的差异.

根据光学检测、光声检测和超声检测之间相互补充的特点, 提出了以光声无损检测方法为主体, 结合光学检测和超声检测方法的金属材料多模态无损检测方法, 该方法的整体结构如图 1 所示. 首先通过相机采集材料表面的光学信号, 处理后得到表面缺陷的尺寸、分布位置和类型; 然后, 采集材料的光声信号, 通过结合光学表面缺陷分布信息和材料表面吸收的激光能量分布信息, 能够确定浅表面夹渣的分布位置, 同时, 对于表面裂纹缺

陷, 利用光声表面波信号和表面裂纹的宽度信息, 可以计算出表面裂纹的深度和倾斜角度, 另外利用光声信号能够重建出材料表面的起伏情况; 材料的超声信号中能够获取到内部缩孔和夹渣的位

置信息, 超声信号和光声信号相结合, 能够确定表面裂纹在材料内部的走势等信息. 因此, 这种多模态无损检测方法能够更加全面地获取金属缺陷的信息.

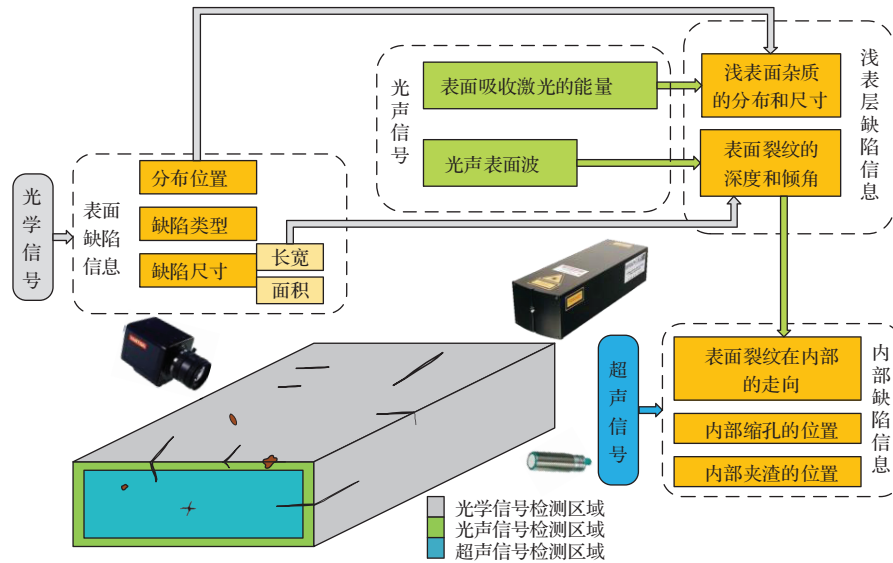


图1 金属材料多模态无损检测方法结构图

Fig. 1. Structure of multimodal nondestructive testing method for metallic materials.

3 光声信号的仿真分析

3.1 金属材料表面激光吸收量的仿真研究

金属材料的表层杂质大多是由于熔铸和加工过程中污染和净化处理不当造成的. 根据第2节的分析, 使用有限元方法对金属材料及其杂质在光声效应过程中初始声压 p_0 和温度 T 的变化情况进行了仿真分析.

3.1.1 材料表面激光吸收量的分析

为了加快计算速度, 减少资源占用量, 采用了二维有限元模型, 如图2所示. 模型选择钢作为被检测的金属材料, 材料参数如表1所列, 杂质选择了钢中较为常见的氧化铝, 参数如表2所列. 激光功率密度设置为 $5 \times 10^8 \text{ W/m}^2$, 光线半径为 0.5 mm, 脉宽设置为 10 ns, 作用位置为上侧边 10,

15 和 20 mm 处, 分别对应钢、氧化铝以及两者交界. 设置氧化铝区域网格尺寸为 0.02 mm, 钢区域为 0.05 mm, 时间步长取 15 ns, 仿真时间设置为 0—3 μs . 模型如图2所示, 图中单位为 mm. 三个位置光声效应引起的温度 T 和声压 p_0 的变化曲线如图3所示.

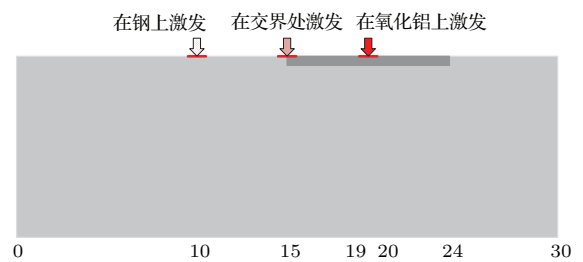


图2 (网刊彩色) 带有杂质的有限元仿真模型

Fig. 2. (color online) Finite element model with impurity.

表1 有限元模型中钢材料具体参数

Table 1. Parameters of steel in finite element model.

| 属性 | 密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | 热传导率/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ | 比热容/ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ | 弹性模量/ 10^{11} Pa | 泊松比 | 热膨胀系数/ K^{-1} |
|----|-----------------------------------|--|--|----------------------------|------|------------------------|
| 数值 | 7850 | 45 | 460 | 2.1 | 0.31 | 1×10^{-5} |

表2 有限元模型中氧化铝材料具体参数
Table 2. Parameters of aluminium oxide in finite element model

| 属性 | 密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | 热传导率/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ | 比热容/ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ | 弹性模量/ 10^{11} Pa | 泊松比 | 热膨胀系数/ K^{-1} |
|----|-----------------------------------|--|--|---------------------------|------|------------------------|
| 数值 | 3700 | 27.5 | 600 | 3.5 | 0.23 | 0.88×10^{-5} |

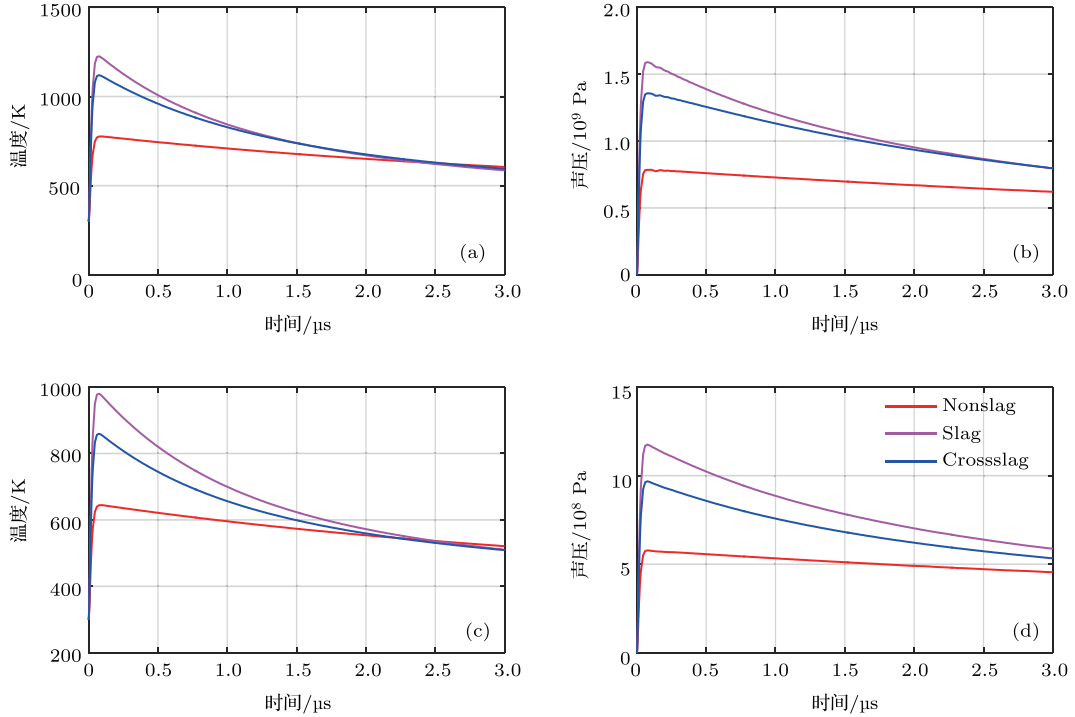


图3 (网刊彩色) 有杂质和无杂质区域的温度和声压变化曲线 (a) 震中位置的温度曲线; (b) 震中位置的声压曲线; (c) 激发区域平均温度曲线; (d) 激发区域平均声压曲线

Fig. 3. (color online) Temperature and pressure curves of region with and without impurity: (a) Temperature curve in epicenter; (b) sound pressure curve in epicenter; (c) average temperature curve of excitation region; (d) average sound pressure curve of excitation region.

从图3中可以看出, 温度 T 和声压 p_0 的变化曲线是一致的, 二者均在 75 ns 时达到峰值, 根据 (6) 式和 (7) 式可以计算出, 温度变化每升高 1 K, 钢表面声压将升高 1.75 MPa, 氧化铝表面温度每升高 1 K, 声压将升高 1.9 MPa. 而利用仿真得到的数据计算, 声压增量分别为 1.71 和 1.79 MPa, 两组结果基本一致, 这也验证了温度 T 和声压 p_0 呈正比的关系. 受材料性质的影响, 杂质部分和无杂质部分声压最大值和平均值都存在较大的差异, 这也说明了这两个部分对激光的吸收量差异较大.

3.1.2 基于激光吸收量的金属表层杂质检测方法

根据 3.1.1 节仿真的结果可知, 受金属材料性质的影响, 杂质部分和无杂质部分对激光的吸收量

存在较大差异, 并且反映在声压值大小上. 依据这一结论, 利用激光逐点激发材料表面的光声信号并采集声压值, 以声压大小反映各点的光吸收量大小, 重建出最大声压的图像, 就能够检测出材料表层杂质的分布状况. 按照这种思路设计了如图 4 所示的三维有限元模型, 中间的氧化铝作为杂质, 厚度与模型厚度相同. 材料参数、激光参数和仿真时间均与之前的模型一致. 激光点源半径为 0.5 mm, 按照图 4(c) 所示的位置和路径在模型上表面施加载荷, 共进行了 100 组仿真, 覆盖整个上表面, 得到 100 组声压信号. 利用这 100 组声压信号的最大值绘制出有限元模型上表面的初始声压分布图, 分辨率为 100×100 , 如图 5 所示.

由图 5 可以发现, 有限元模型中的杂质区域初始声压与正常区域差别明显, 这也证明了杂质

区域与正常区域的激光吸收量存在很大差异. 但杂质区域边缘轮廓模糊, 这是由于仿真中为了节省时间和数据存储量, 设置的激光点源半径大造成的, 这也导致了杂质边缘的激发区域中

正常区域和杂质区域可能占据不同比例, 使得交界区域光吸收量不均匀. 这些问题可以通过减小激光点源半径, 增加光声激发点数的方式进行改善.

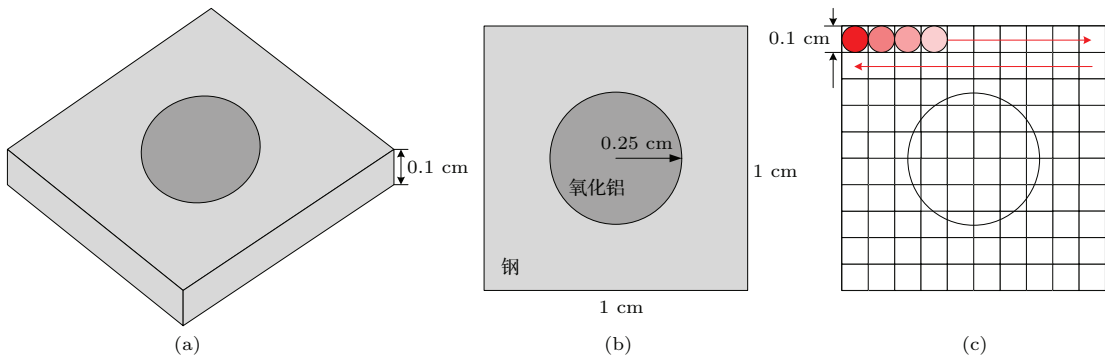


图4 (网刊彩色) 三维有限元模型 (a) 立体图; (b) 俯视图; (c) 激发点和扫描路径

Fig. 4. (color online) 3D finite element model: (a) Graphic model; (b) top view of the model; (c) shot point and scanning path.

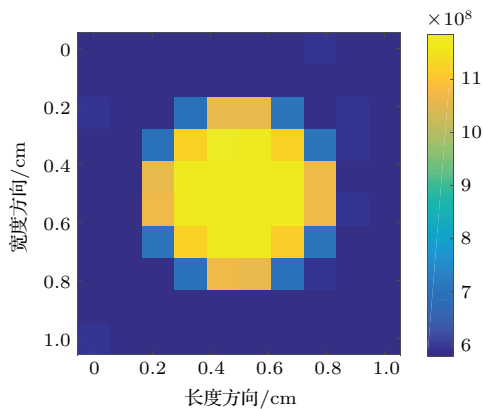


图5 (网刊彩色) 模型上表面的初始声压分布

Fig. 5. (color online) Initial pressure distribution on the model surface.

3.2 金属材料光声表面波的仿真研究

为了探究金属材料的光声效应产生的表面波信号与材料缺陷之间的相互作用, 使用有限元方法对金属材料表面波传播过程进行了仿真. 仿真中选择钢作为被检测的金属材料, 材料参数如表1所列. 为加快求解速度, 选择二维模型, 设置模型尺寸为 $30\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 设置裂纹宽 0.2 mm , 深度取 $1, 2$ 和 3 mm , 倾斜角度(与裂纹左侧上表面夹角)取 $30^\circ, 60^\circ$ 和 90° , 裂纹左侧边距模型左侧边 20 mm . 激光参数不变, 作用位置分别为上侧边 $19\text{--}20\text{ mm}$ 处和 $20.2\text{--}21.2\text{ mm}$. 网格划分尺寸为 0.1 mm , 时间步长取 15 ns , 仿真时间设置为 $0\text{--}8\text{ }\mu\text{s}$. 模型如

图6所示, 图中单位为 mm .

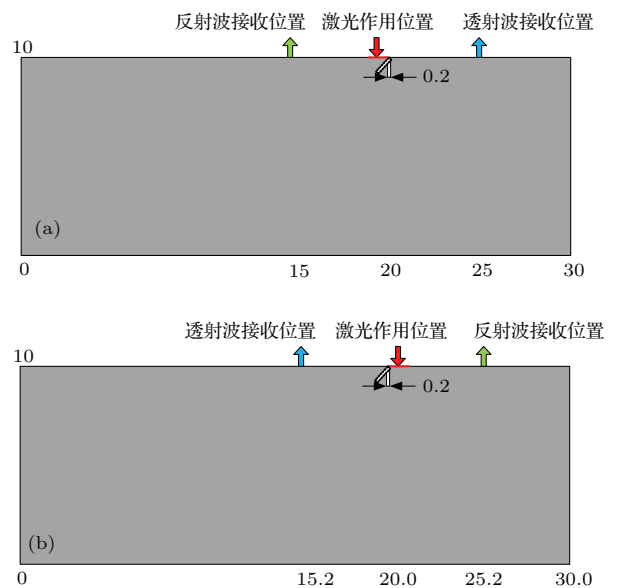


图6 (网刊彩色) 有限元模型示意图 (a) 在裂纹左侧激发光声信号; (b) 在裂纹右侧激发光声信号

Fig. 6. (color online) Schematic diagram of finite element model: (a) Excitation on the left side of crack; (b) excitation on the right side of crack.

3.2.1 裂纹反射波分析

利用 ANSYS 仿真得到深度为 $1, 2, 3\text{ mm}$, 角度为 $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 的裂纹反射波信号, 如图7和图8所示. 根据反射表面波的声程和到达时间可近似计算出表面波的波速为 3000 m/s , 与钢的实际表面波速基本一致.

从图7和图8中可发现,在靠近裂纹边缘处激发产生的表面波反射信号具有如下特点: a) 裂纹的存在使得接受位置处的直接表面波和反射表面波产生重叠,反射波幅值增大,并且由无缺陷情况下的单极波形变为了双极波形; b) 对比图7(a)—图7(c)可以发现,当倾斜角度缩小时,相同深度裂纹的左侧反射波(可以看做一个夹角为锐角的裂纹反射波)幅值随之增大,直接表面波到达时间也随之延后; c) 对比图8(a)—图8(c)可以发现,角度相同的情况下,反射波到达的时间随深度增加而增加,但这种现象随着倾斜角度的增大愈发不明显,60°和90°的裂纹反射波到达时间几乎完全一

致; d) 对比图7(d)—图7(f)以及图8(d)—图8(f)可以发现,裂纹的右侧反射波(可以看作一个夹角为钝角的裂纹反射波)到达时间几乎不受倾斜角度和深度的影响,而反射波幅值随角度增大而增大,不受深度影响; e) 对比相同深度和相同角度下左右侧反射波可以发现,左侧反射波幅值明显大于右侧反射波的幅值,并且随着倾角接近直角,这种差别越来越小.

综合上述分析可知,从裂纹反射波信号中可以计算出表面波的波速,并且能够对裂纹的倾斜角度和深度进行定性的分析.

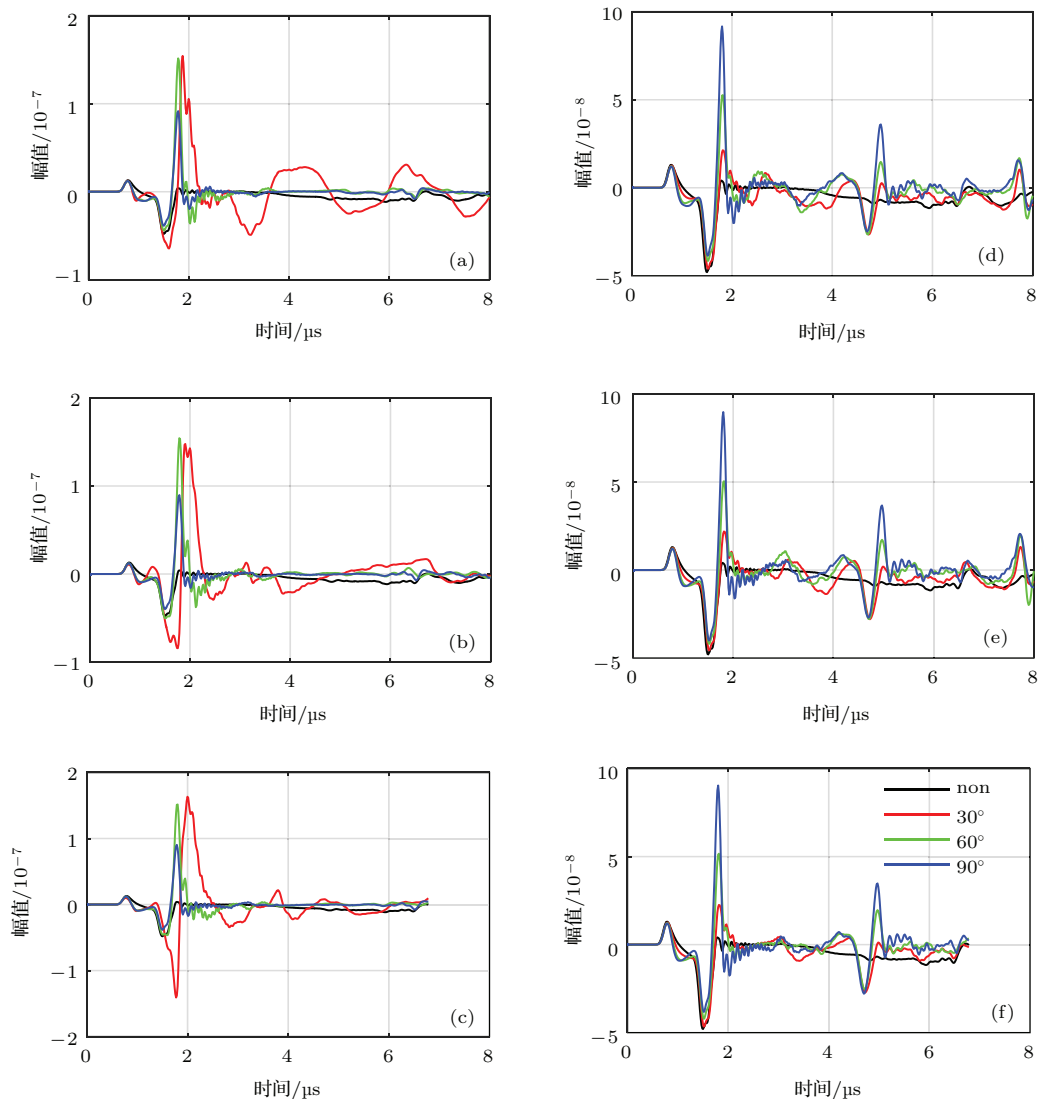


图7 (网刊彩色) 相同深度不同角度裂纹的反射表面波信号对比 (a) 1 mm 左侧反射波; (b) 2 mm 左侧反射波; (c) 3 mm 左侧反射波; (d) 1 mm 右侧反射波; (e) 2 mm 右侧反射波; (f) 3 mm 右侧反射波

Fig. 7. (color online) Crack surface reflection wave comparison of the same depth and different angle: (a) Left side reflection wave of depth 1 mm; (b) left side reflection wave of depth 2 mm; (c) left side reflection wave of depth 3 mm; (d) right side reflection wave of depth 1 mm; (e) right side reflection wave of depth 2 mm; (f) right side reflection wave of depth 3 mm.

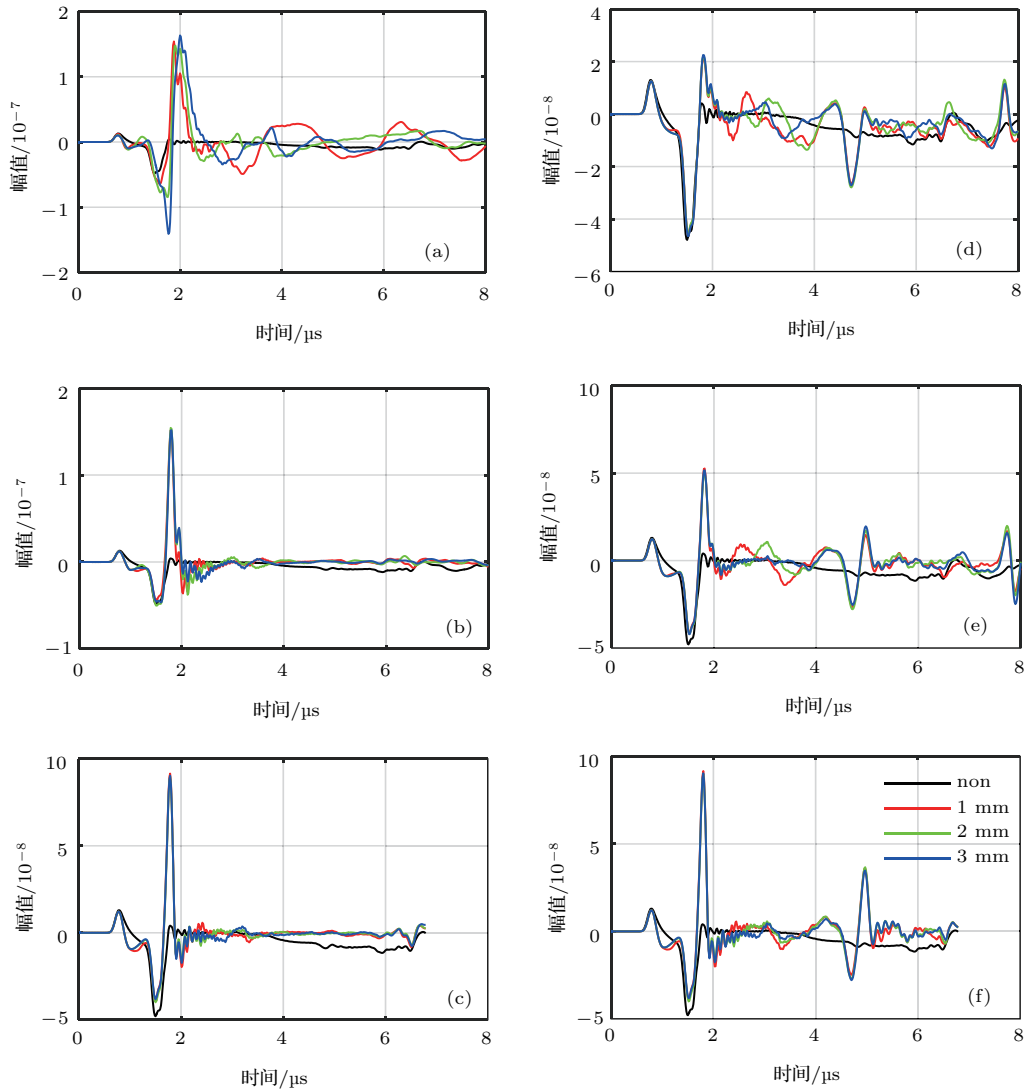


图8 (网刊彩色) 相同角度不同深度裂纹的反射表面波信号对比 (a) 30° 左侧反射波; (b) 60° 左侧反射波; (c) 90° 左侧反射波; (d) 30° 右侧反射波; (e) 60° 右侧反射波; (f) 90° 右侧反射波

Fig. 8. (color online) Crack surface transmitted wave comparison of the same angle and different depth: (a) Left side transmitted wave of 30 degree; (b) left side transmitted wave of 60 degree; (c) left side transmitted wave of 90 degree; (d) right side transmitted wave of 30 degree; (e) right side transmitted wave of 60 degree; (f) right side transmitted wave of 90 degree.

3.2.2 裂纹透射波分析

利用 ANSYS 仿真得到深度为 1, 2, 3 mm, 角度为 30°, 60°, 90° 的裂纹透射波信号, 如图 9 和图 10 所示. 从图 9 和图 10 中可以发现, 在靠近裂纹边缘处激发产生的表面波透射信号具有如下特点: a) 从图 9 可以看出, 裂纹深度相同时, 倾斜角度越小, 透射波幅值越大; b) 从图 10 可以看出, 裂纹倾斜角相同时, 透射波的幅值随深度增加而减小, 而且倾斜角越接近 90°, 不同深度裂纹的透射波幅值差别越来越小; c) 对比左右两侧的透射波信号可以发现, 左侧透射波幅值明显小于右侧透射波幅值, 这是因为在右侧激发光声信号时, 激发点所在的边

与裂纹呈钝角, 产生的声波大部分被反射到材料内部, 致使表面波成分减少导致的.

为了分析透射波的传播路径, 首先根据裂纹与材料表面的几何关系 (如图 11 所示) 计算出了裂纹左右两侧激发的透射波的最短路径, 如 (8) 式和 (9) 式所示, 再根据反射波的仿真信号计算出表面波的波速 $v = 3000 \text{ m/s}$, 因此计算得到在最短路径下的透射波到达时间, 如表 4 所列. 另外, 从透射波的仿真信号中, 可以提取出各裂纹透射波的到达时间, 如表 5 所列. 对比表 4 和表 5 可以发现两组时间基本吻合, 因此可以确定, 裂纹透射波的传播路径即为图 11 所示的路径.

$$s_L = \sqrt{(d \cdot \sin \theta)^2 + (d \cdot \cos \theta + l - w)^2} + d + w, \tag{8}$$

$$s_R = \sqrt{(d \cdot \sin \theta)^2 + (l - d \cdot \cos \theta - w)^2} + d + w. \tag{9}$$

表4 根据透射波最短声程和声速计算得到的时间(单位为s)

Table 4. Time calculated from the shortest paths of transmitted wave (in s).

| 左侧透射波 | | | | 右侧透射波 | | | |
|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| 深度/mm | 倾角/(°) | | | 深度/mm | 倾角/(°) | | |
| | 30 | 60 | 90 | | 30 | 60 | 90 |
| 1 | 1.723 | 1.863 | 2.306 | 1 | 2.297 | 2.191 | 2.036 |
| 2 | 1.810 | 2.127 | 2.468 | 2 | 2.938 | 2.753 | 2.468 |
| 3 | 1.956 | 2.468 | 2.955 | 3 | 3.585 | 3.340 | 2.955 |

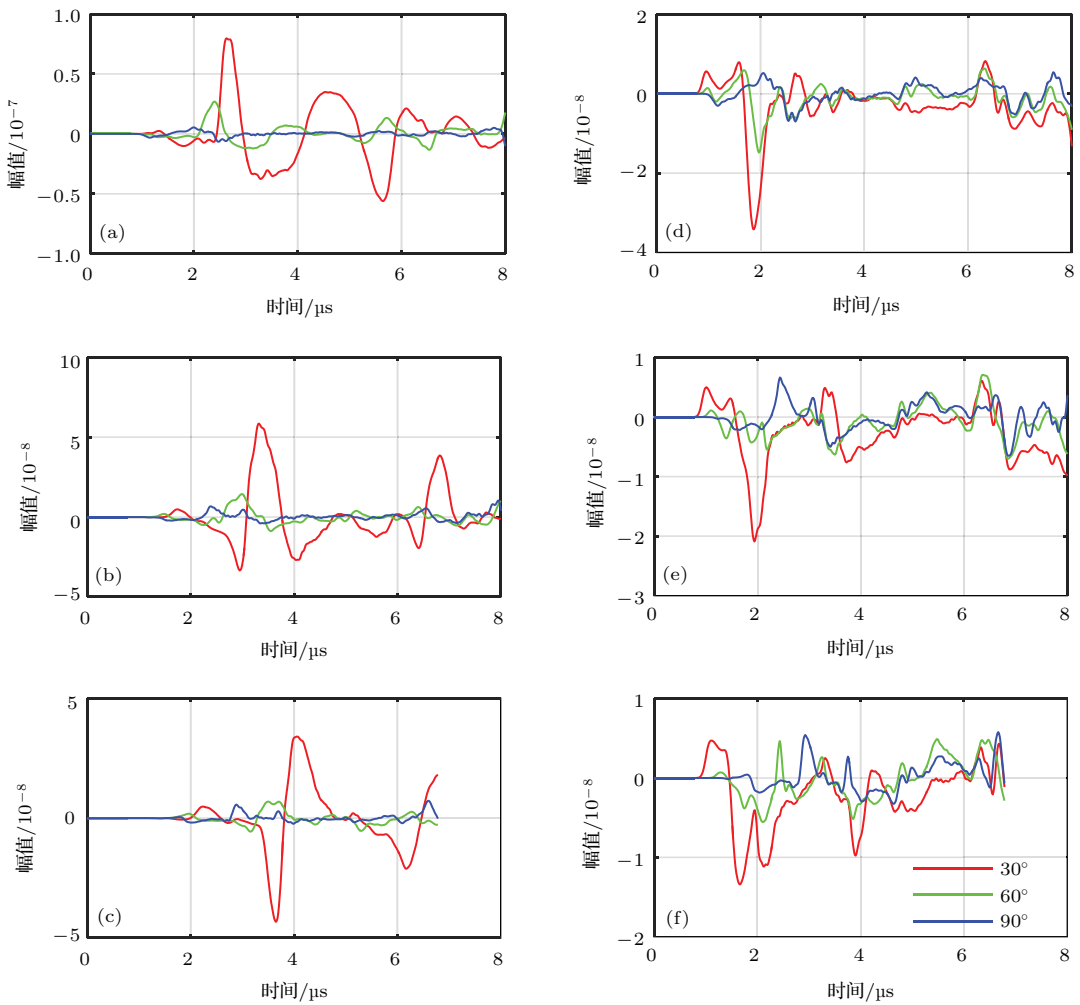


图9 (网刊彩色) 相同深度不同角度裂纹的透射表面波信号对比 (a) 1 mm 右侧透射波; (b) 2 mm 右侧透射波; (c) 3 mm 右侧透射波; (d) 1 mm 左侧透射波; (e) 2 mm 左侧透射波; (f) 3 mm 左侧透射波

Fig. 9. (color online) Crack surface transmitted wave comparison of the same depth and different angle: (a) Left side transmitted wave of depth 1 mm; (b) left side transmitted wave of depth 2 mm; (c) left side transmitted wave of depth 3 mm; (d) right side transmitted wave of depth 1 mm; (e) right side transmitted wave of depth 2 mm; (f) right side transmitted wave of depth 3 mm.

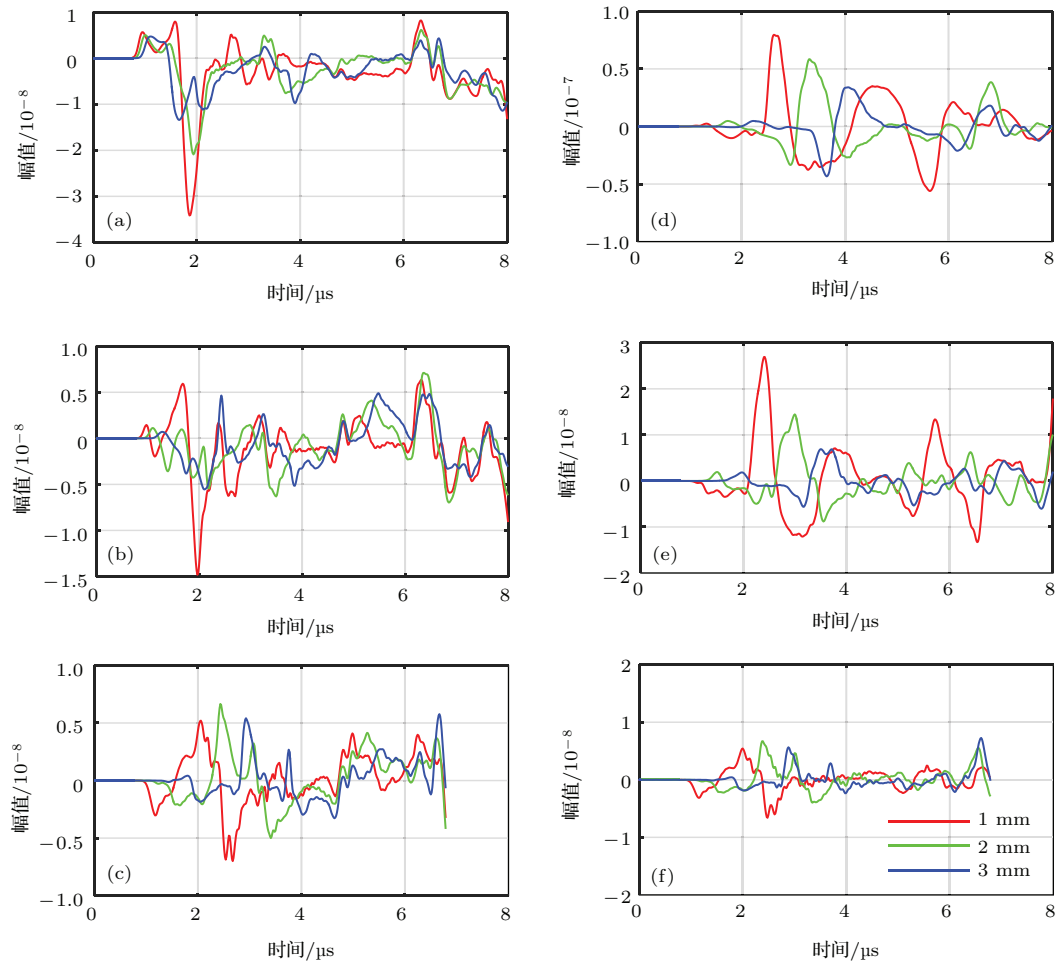


图 10 (网刊彩色) 相同角度不同深度裂纹的透射表面波信号对比 (a) 30° 左侧透射波; (b) 60° 左侧透射波; (c) 90° 左侧透射波; (d) 30° 右侧透射波; (e) 60° 右侧透射波; (f) 90° 右侧透射波

Fig. 10. (color online) Crack surface transmitted wave comparison of the same angle and different depth: (a) Left side transmitted wave of 30°; (b) left side transmitted wave of 60°; (c) left side transmitted wave of 90°; (d) right side transmitted wave of 30°; (e) right side transmitted wave of 60°; (f) right side transmitted wave of 90°.

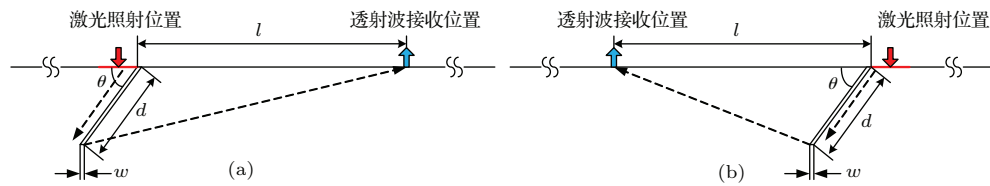


图 11 透射波最短传播路径示意图 (a) 裂纹左侧激发时; (b) 裂纹右侧激发时

Fig. 11. The shortest path of transmitted wave: (a) Excited on the left side of crack; (b) excited on the right side of crack.

表 5 从仿真结果中提取的时间 (单位为 s)

Table 5. Time extracted from the simulated results (in s).

| 深度/mm | 左侧透射波 | | | 深度/mm | 右侧透射波 | | |
|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | 倾角/(°) | | | | 倾角/(°) | | |
| | 30 | 60 | 90 | | 30 | 60 | 90 |
| 1 | 1.726 | 1.891 | 2.101 | 1 | 2.522 | 2.161 | 2.041 |
| 2 | 1.861 | 2.131 | 2.386 | 2 | 3.077 | 2.672 | 2.326 |
| 3 | 1.996 | 2.477 | 2.852 | 3 | 3.482 | 3.272 | 2.822 |

3.2.3 基于光声表面波的表面裂纹尺寸确定方法

根据3.3节的分析可知,在裂纹表面宽度 w 、深度 d 和倾斜角度 θ 已知的情况下可以根据(8)式和(9)式计算得到透射波到达时间 t .而在实际检测过程中,能够直接采集到的数据是裂纹表面宽度 w 和透射波到达时间 t ,检测的目标则是确定裂纹深度 d 和倾斜角度 θ .由于裂纹表面宽度 w 和材料声速 v 都是确定的值,为了计算出深度 d 和倾斜角度 θ ,则需要在两个不同的位置测得透射波时间 t_1 和 t_2 ,再求解(10)式所示的二元二次方程,即可计算出裂纹深度 d 和倾斜角度 θ .

$$\begin{cases} v \cdot t_1 = \sqrt{(d \cdot \sin \theta)^2 + (d \cdot \cos \theta + l - w)^2} \\ \quad + d + w, \\ v \cdot t_2 = \sqrt{(d \cdot \sin \theta)^2 + (l - d \cdot \cos \theta - w)^2} \\ \quad + d + w. \end{cases} \quad (10)$$

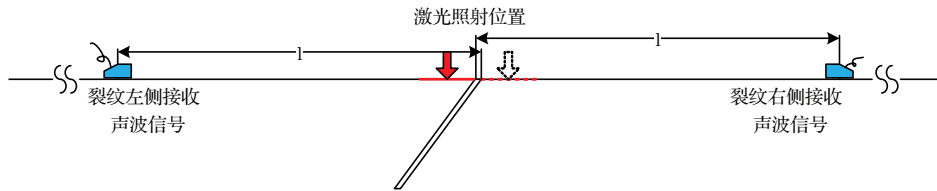


图12 透射波采集方法示意图

Fig. 12. Schematic diagram of transmitted wave acquisition.

表6 根据仿真结果计算得到的倾斜角和深度

Table 6. The angle and depth calculated from the simulated results.

| 实际深度/mm | 实际倾角/(°) | 透射波到达时间/s | | 深度/mm | 倾角/(°) |
|---------|----------|---------------|---------------|-------|--------|
| 1 | 30 | $t_1 = 1.726$ | $t_2 = 2.522$ | 1.3 | 25.5 |
| 1 | 60 | $t_1 = 1.891$ | $t_2 = 2.161$ | 0.99 | 65.4 |
| 1 | 90 | $t_1 = 2.101$ | $t_2 = 2.041$ | 1.1 | 94.9 |
| 2 | 30 | $t_1 = 1.861$ | $t_2 = 3.077$ | 2.2 | 32.3 |
| 2 | 60 | $t_1 = 2.131$ | $t_2 = 2.672$ | 1.9 | 63.1 |
| 2 | 90 | $t_1 = 2.386$ | $t_2 = 2.326$ | 1.8 | 93.1 |
| 3 | 30 | $t_1 = 1.996$ | $t_2 = 3.482$ | 2.9 | 34.1 |
| 3 | 60 | $t_1 = 2.477$ | $t_2 = 1.951$ | 2.9 | 62.2 |
| 3 | 90 | $t_1 = 2.852$ | $t_2 = 2.822$ | 2.8 | 91.1 |

4 多模态信号的获取与处理

4.1 多模态信号采集平台

金属材料缺陷多模态无损检测方法首先需要采集材料的光学信号、光声信号和超声信号.光学信号通过面阵相机(ARTCAM-300MI-WOM AR-

因此,提出如下方法来采集裂纹的宽度和透射波到达时间,示意图见图12.首先,利用光学信号确定表面裂纹的宽度 w ;然后分别在裂纹左右两侧边缘激发光声信号,并在距离裂纹左右边缘相同的位置接受表面波信号,两次共接收到4组信号,包括左侧边缘激发得到的反射波信号 S_{Lr} 和透射波 S_{Lt} 、右侧边缘激发得到的反射波信号 S_{Rr} 和透射波 S_{Rt} ;再利用反射信号 S_{Lr} 和 S_{Rr} 计算出表面波波速 v ,并定性分析缺陷的倾斜方向(向左或向右)和深浅;最后从透射波信号 S_{Lt} 和 S_{Rt} 中提取出透射波到达时间 t_1 和 t_2 ,代入(10)式中,计算出裂纹的倾角和深度.对仿真得到的信号按照上述方法处理,计算得到裂纹的倾角和深度如表6所列.从表6可以看出,使用该方法能够比较精确地确定缺陷的深度(最大误差为0.3 mm)和倾斜角度(最大误差为5.4°).

TRAY)采集,经USB数据接口传送至PC进行处理.光声信号由Nd-YAG激光器(LS-2137, LOTIS TII, 6 ns, 15 Hz)激发,同时利用光电探测器(ET-2020, Electro-Optics Technology, Inc.)检测激光信号,作为采集卡采集光声信号的触发信号.采集卡连接一个中心频率为40 MHz的超声探头,采集光声信号时为被动接收式,采集超声信号时为主动收

发式. 多模态检测平台结构如图 13 所示. 仿体选择了如图 14 所示的 U71Mn 型钢轨, 在轨面上加工出 7 条纵向裂纹, 各条裂纹的尺寸如表 7 所示.

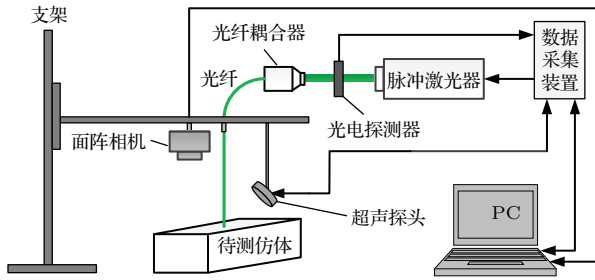


图 13 多模态检测平台结构图

Fig. 13. Structure chart of multi-modal testing platform.

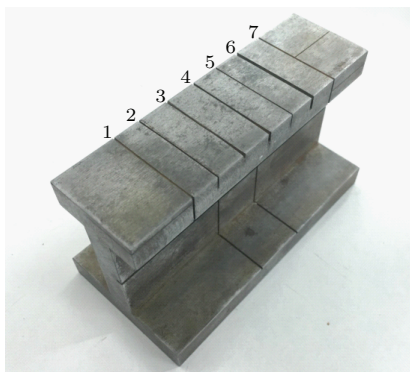


图 14 U71Mn 钢轨仿体示意图

Fig. 14. Schematic diagram of the U71Mn phantom.

利用多模态信号采集平台采集到的仿体光学图像如图 15 所示, 对图像进行去噪、阈值分割、边缘提取等处理后, 得到 7 条裂纹的宽度如表 8 所示. 对比表 7 可发现, 根据光学图像确定的裂纹宽度相当精确.

利用多模态检测平台采集了图 15 中所框区域的光声信号, 并使用所采集的光声信号重建出了仿体上表面的三维图像和纵切面图像, 如图 16 (a) 和图 16 (b) 所示.

表 7 仿体轨面裂纹尺寸
Table 7. Crack size of phantom surface.

| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 宽度/mm | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 0.5 |
| 深度/mm | 0.5 | 1.5 | 1.0 | 5.5 | 5.0 | 5.0 | 0.5 |



图 15 仿体光学图像

Fig. 15. Optical image of the phantom.

从图 16 (a) 中可以看出, 重建出的上三维图像清晰地显示了每条裂纹在表面上的走向、轮廓和位置, 裂纹的深度信息也被刻画出来. 从图 16 (b) 中可以发现, 对于深度较浅的裂纹 1 和 7, 以及 6 这类宽度较大的裂纹, 光声图像能够清楚地显示出它们在各个剖面的信息, 裂纹 2, 4 和 5 由于宽度较小且深度较深, 探头接收到的能量有所衰减, 对于裂纹底部的显示效果有所降低. 根据光声信号提取出的裂纹深度如表 9 所示, 可以发现利用光声信号得到裂纹深度比较接近实际值.

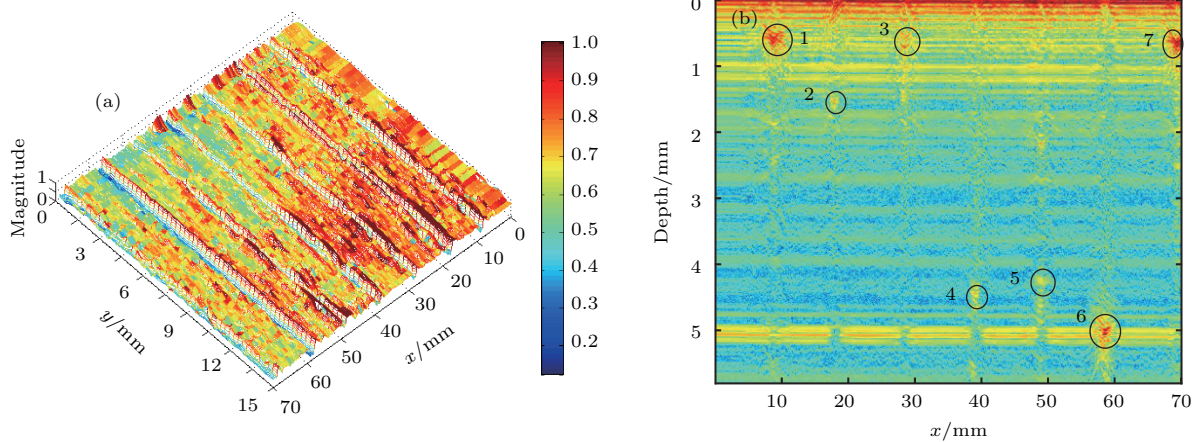


图 16 (网刊彩色) 仿体光声信号重建的图像 (a) 上表面三维图像; (b) 纵切面图像

Fig. 16. (color online) PA image reconstructed from phantom PA signal: (a) 3D image of surface; (b) longitudinal section image.

表8 光学信号检测到的裂纹宽度
Table 8. Crack width detected from optical signal.

| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 检测宽度/mm | 0.493 | 0.504 | 0.527 | 0.476 | 0.463 | 0.993 | 0.489 |
| 实际宽度/mm | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 0.5 |

表9 光声信号检测出的裂纹深度
Table 9. Crack width detected from PA signal.

| 编号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|
| 检测深度/mm | 0.65 | 1.56 | 0.74 | 4.41 | 4.28 | 5.03 | 0.66 |
| 实际深度/mm | 0.5 | 1.5 | 1.0 | 5.5 | 5.0 | 5.0 | 0.5 |

表10 超声信号计算出的裂纹深度
Table 10. Crack width detected from US signal.

| 编号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 检测深度/mm | 0.3—0.9 | 1.2—1.8 | 1.0—1.6 | 5.1—5.7 | 4.7—5.2 | 4.5—5.5 | 0.3—0.9 |
| 实际深度/mm | 0.5 | 1.5 | 1.0 | 5.5 | 5.0 | 5.0 | 0.5 |

利用多模态检测平台采集到的超声信号成像后如图 17 所示, 可以发现超声图像中, 清晰地显示了裂纹 4, 5, 6 在内部的延伸路线, 而且底端回波信号明显. 四条较浅的裂纹 1, 2, 3, 7, 底端的回波则被表面回波所覆盖, 这样不利于提取裂纹底面回波信号, 因此不方便计算这几条缺陷的深度, 这也体现出了超声方法在浅表面缺陷检测上的不足. 由于采集到的超声信号存在拖尾现象, 利用超声信号确定的各条裂纹深度都表示为一个范围的形式, 如表 10 所示.

超声和光声的纵切面图像分别显示了仿体缺

陷的不同特征: 光声图像相对于超声图像, 更清晰地显示了每条裂纹底部的位置, 并且没有拖尾现象, 这样有利于精确计算裂纹深度; 超声图像相对于光声图像, 更清晰地显示了每条裂纹在材料内部的延伸路径. 鉴于以上两点, 利用小波方法将光声和超声的纵切面图像进行融合, 得到如图 18 所示的图像, 图中裂纹的延伸路线、裂纹底部位置等都很清晰地显示出来. 利用融合后的数据重新计算每条裂纹的深度, 如表 11 所列. 对比表 9 和表 10, 可以发现检测到的深度值更接近实际值. 再结合仿体的光学图像和上表面光声三维图像, 裂纹的宽度

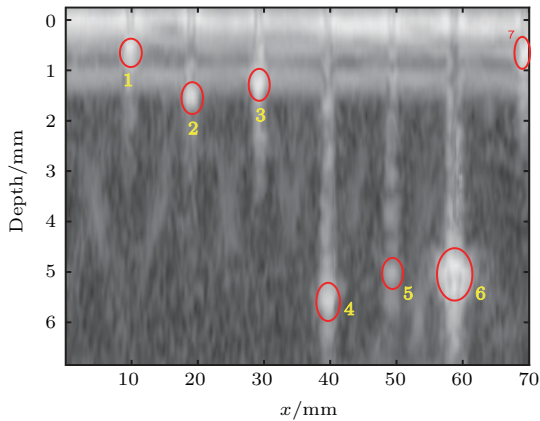


图 17 (网刊彩色) 多模态检测平台采集到的超声图像
Fig. 17. (color online) Image reconstructed from US signal.

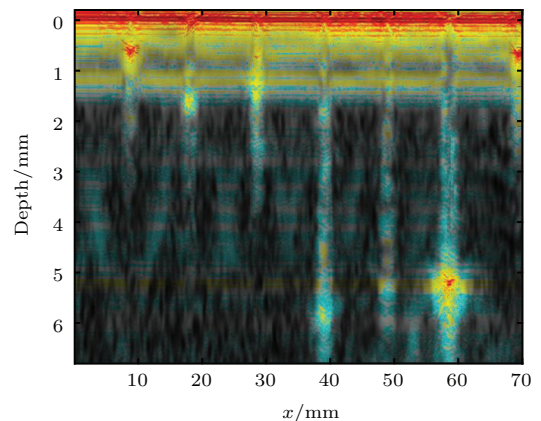


图 18 (网刊彩色) 光声和超声切面图融合后的图像
Fig. 18. (color online) Fused image of PA and US image.

表 11 融合信号计算出的裂纹深度
Table 11. Crack width detected from fused signal.

| 编号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|
| 检测深度/mm | 0.59 | 1.72 | 0.85 | 5.85 | 5.23 | 5.10 | 0.58 |
| 实际深度/mm | 0.5 | 1.5 | 1.0 | 5.5 | 5.0 | 5.0 | 0.5 |

和分布信息也都已经全部得到.

5 结 论

本文研究了一种基于金属材料多模态信号的无损检测方法. 首先通过有限元仿真, 分析了金属材料的光声效应过程中, 材料和杂质吸收激光能量的差异以及表面裂纹尺寸对表面波的影响, 提出了基于激光吸收量和光声表面波的缺陷检测方法; 然后搭建了多模态信号采集平台, 采集了带垂直裂纹仿体的光学、光声和超声信号, 通过对信号的处理和融合, 检测出了裂纹的宽度和分布信息, 以及深度和在内部的延伸状况. 研究结果表明, 本文提出的基于金属材料多模态信号的无损检测方法能够准确、全面地检测出金属材料的杂质和裂纹的尺寸信息, 弥补了现有无损检测方法模态单一、检测范围有限等不足, 为缺陷定量检测和全面诊断提供了一个新的思路.

参考文献

- [1] Dong L M, Li J, Ni C M, Shen Z H, Ni X W, Chen J P, Chigarev N, Tournat V, Gusev V 2011 *Chin. J. Lasers* **38** 90 (in Chinese) [董利明, 李加, 倪辰荫, 沈中华, 倪晓武, 陈建平, N Chigarev, V Tournat, V Gusev 2011 中国激光 **38** 90]
- [2] Han E H, Chen J M, Su Y J, Liu M 2014 *Materials China* **35** 65 (in Chinese) [韩恩厚, 陈建敏, 宿彦京, 刘敏 2014 中国材料进展 **35** 65]
- [3] Bian X Y, Fan J Z, Ma Z L, Zuo T, Wei S H 2010 *Rare Metals* **3** 357 (in Chinese) [边心宇, 樊建中, 马自力, 左涛, 魏少华 2010 稀有金属 **3** 357]
- [4] Huo Y, Zhang C L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 144204 (in Chinese) [霍雁, 张存林 2012 物理学报 **61** 144204]
- [5] Meng L Y, Zeng Z, Wang G, Tao N, Zhang C L 2015 *Optoelectron. Technol.* **35** 174 (in Chinese) [孟梨雨, 曾智, 王冠, 陶宁, 张存林 2015 光电子技术 **35** 174]
- [6] Chen J, Bai X L, Yang K J, Ju B F 2015 *Ultrasonics* **56** 505
- [7] Sun M J, Wang Y, Zhang X, Liu Y, Wei Q, Shen Y, Feng N Z 2014 *Proceedings of Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2014 IEEE International Montevideo Uruguay, May 12–15 2014* p819
- [8] Petcher P A, Dixon S 2015 *Angew. Chem. Int. Edit.* **74** 58
- [9] Soumya D, Kapil G, Stanley R J Mohammad T, Ghasr A 2013 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **62** 4
- [10] Zeng W, Wang H T, Tian G Y, Hu G X, Yang X M, Wan M 2014 *Nondestr. Test* **36** 38 (in Chinese) [曾伟, 王海涛, 田贵云, 胡国星, 杨先明, 万敏 2014 无损检测 **36** 38]
- [11] 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]
- [12] Zeng W, Wang H T, Tian G Y, Fang L, Wang W, Wan M, Yang X M 2014 *Chin. J. Sci. Instrum.* **35** 650 (in Chinese) [曾伟, 王海涛, 田贵云, 方凌, 汪文, 万敏, 杨先明 2014 仪器仪表学报 **35** 650]
- [13] Guan J F, Shen Z H, Xu B Q, Ni X W, Lu J 2006 *Appl. Acoust.* **25** 138 (in Chinese) [关建飞, 沈中华, 许伯强, 倪晓武, 陆建 2006 应用声学 **25** 138]
- [14] Podymova N B, Karabutov A A, Cherepetskaya E B 2014 *Laser Phys.* **24** 8
- [15] Cavuto A, Martarelli M, Pandarese G, Revel G M, Tomasini E P 2015 *Ultrasonics* **55** 48
- [16] Li X K 2014 *Ph. D. Dissertation* (Chongqing: Chongqing University) (in Chinese) [李新科 2014 博士学位论文(重庆: 重庆大学)]
- [17] Pang F Q 2008 *M. S. Thesis* (Taiyuan: North University of China) (in Chinese) [庞付全 2008 硕士学位论文(太原: 中北大学)]
- [18] Sun M J, Cheng X Z, Wan G N, Liu T, Fu Y, Wang Y 2015 *Proceedings of the International Symposium on Surface Topography & Optical Microscopy Harbin, China, July 23–25 2015* p13
- [19] Cox B T, Laufer J G, Beard P C 2009 *Photons Plus Ultrasound: Imaging and Sensing* 2009 (USA: SPIE) p13
- [20] Sun M J, Cheng X Z, Wang Y, Zhang X, Shen Y, Feng N Z 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 038105 (in Chinese) [孙明健, 程星振, 王艳, 章欣, 沈毅, 冯乃章 2016 物理学报 **65** 038105]
- [21] Sun M J, Lin X W, Wu Z H, Liu Y, Shen Y, Feng N Z 2014 *Proceedings of Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2014 IEEE International Montevideo, Uruguay, May 12–15 2014* p896
- [22] Ding Y S, Yang S X, Gan C B 2015 *J. Vibra. Shock* **34** 33 (in Chinese) [丁一珊, 杨世锡, 甘春标 2015 振动与冲击 **34** 33]
- [23] Wang L V 2008 *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* **14** 171
- [24] Lévesque D, Rousset G, Bertrand L 1986 *Can. J. Phys.* **64** 1030

Nondestructive detecting method for metal material defects based on multimodal signals*

Sun Ming-Jian¹⁾²⁾ Liu Ting²⁾ Cheng Xing-Zhen¹⁾ Chen De-Ying²⁾
Yan Feng-Gang^{1)†} Feng Nai-Zhang^{1)2)‡}

1) (School of Information and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

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

(Received 12 May 2016; revised manuscript received 2 June 2016)

Abstract

Metal materials play an important role in many domains, which are significant to the national economy. However, different kinds of metal defects, such as cracks, contraction cavities, impurities, will be generated in the process of production and service. These defects will affect the metal service life and mechanical properties directly, and even cause serious economic loss. Therefore, it is vital to detect the metal defects.

Numerous nondestructive testing (NDT) methods have been proposed for detecting metal defects, such as ultrasonic (US) testing, eddy current testing, photoacoustic (PA) testing, magnetic particle testing, etc. However, each of them uses a single modal signal, which leads to a limited detection range. A nondestructive detecting method for metal material defects based on multimodal signals is proposed to expand the scope of detection and obtain more complete information. Specifically, optical signal, PA signal and US signal are combined together in this method, with the consideration of their complementarities.

Simulation and experiments are conducted to validate the effectiveness of the proposed method. Firstly, finite element simulation is employed to analyze the relationship between material parameters and the absorption of laser energy. Meanwhile, the influence of defect size on PA surface wave is simulated and analyzed. Then, a multimodal NDT platform is established to collect and process optical, PA and US signals of the metal defects. These three modal signals contain information about metal surface, shallow surface and internal defects respectively. Eventually, the information, including the location, appearance on the surface, depth, extension path in the material, is obtained.

As demonstrated in the results, the nondestructive detecting method based on multimodal signals can detect the metal defects accurately and comprehensively. This method improves the existing methods in terms of detection range and quantitative detection. Additionally, it provides a new way for the quantitative detection and comprehensive diagnosis of metal defects.

Keywords: photoacoustic, ultrasound, nondestructive detection, finite element

PACS: 78.20.Pa, 43.35.Cg, 81.70.Cv, 87.10.Kn

DOI: 10.7498/aps.65.167802

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61371045), the 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: yfglion@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: fengnz@yeah.net