

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108203

基于激光超声体波的轨头内部缺陷检测方法研究^{*}

廖韦韬¹, 王海涛¹, 江奕¹, 陈帅¹, 郑凯²

(1. 南京航空航天大学 南京 210016; 2. 江苏省特种设备安全监督检验研究院 南京 210036)

摘要:激光超声检测技术具有非接触、宽带宽和高分辨率的特点,针对常规超声对钢轨轨头内部核伤微小缺陷不敏感、定位定量检测难的问题,本文基于激光超声体波散射和衍射原理,提出了模态转换反射波和衍射波飞行时间的缺陷定位定量检测计算模型。通过 COMSOL 仿真建立了超声体波与内部缺陷相互作用的二维有限元模型,分析了钢轨内部缺陷处超声体波波模式转换状态,验证了定位及定量方法的可行性。其次,搭建了固定扫查激光超声实验检测系统,对不同埋藏深度和不同直径的孔缺陷进行 B 扫实验。实验结果表明,激光超声检测技术能有效的检测钢轨内部微小孔缺陷,基于所提出的计算模型和检测方法,对钢轨内部缺陷检测的定位相对误差在 6% 之内,定量相对误差在 9% 之内。

关键词:激光超声;体波;轨头;内部缺陷;衍射

中图分类号: TH7 TB5 TG115.28 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.20

Research on the internal defect detection method of rail head based on laser ultrasonic body wave

Liao Weitao¹, Wang Haitao¹, Jiang Yi¹, Chen Shuai¹, Zheng Kai²

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Special Equipment Safety Supervision and Inspection Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China)

Abstract: Laser ultrasonic detection technology has the characteristics of non-contact, wide bandwidth and high resolution. The conventional ultrasonic is not sensitive to the small defects of nuclear damage inside the rail head, which is difficult to locate and quantitatively detect. In this study, the calculation model of the defect location quantitative detection based on the flight time of the modal conversion reflected wave and diffracted wave is proposed, which is based on the principles of laser ultrasonic body wave scattering and diffraction. By using COMSOL simulation, a two-dimensional finite element model of the interaction between the ultrasonic body wave and the internal defect is formulated. The model conversion state of the ultrasonic body wave at the internal defect of the rail is analyzed, and the feasibility of the positioning and quantitative method is verified. Secondly, a fixed scanning laser ultrasonic experiment detection system is established to implement B-scan experiments on hole defects of different buried depths and diameters. Experimental results show that the laser ultrasonic detection technology can effectively detect the micro hole defects in the rail. Based on the calculation model and the proposed detection method, the positioning relative error of the detection of the internal defects of the rail is within 6%, and the quantitative relative error is within 9%.

Keywords: laser ultrasonic; body wave; rail head; internal defects; diffraction

0 引言

在中国铁路轨道运输系统中,钢轨作为牵引列车行驶的重要组件,随着近年来中国铁路提速、重载的不断发

展,其所承受的负载也随之加重,同时产生缺陷的可能性也愈来愈大,会降低钢轨的服役寿命,更为严重的是导致钢轨断裂造成行车安全事故的发生,成为铁路安全的潜在危害。目前绝大多数在役钢轨的失效主要是因为疲劳和磨损过度导致的轨头、轨底和轨腰处内部缺陷的传

收稿日期:2021-07-06 Received Date: 2021-07-06

^{*} 基金项目:国家自然科学基金重大科研仪器研制(61527803)项目资助

播^[1-2],具有很大的隐蔽性和危险性,而轨头核伤是主要的钢轨内部缺陷属于体积型裂纹,当其扩展未发展到表面时,称为“白核”,当扩展到与钢轨表面相接时,则为“黑核”^[3]。轨头核伤是危害性最大的伤损形式之一,在2016年全国探伤发现的钢轨重伤中轨头核伤占比为50%以上^[4],主要分布在轨头踏面内部下方4~10 mm之内,呈圆形状,大小在1 mm左右。因此,对这类隐蔽性大、尺寸小、检测难度大的钢轨内部缺陷进行及时有效地定位和定量检测是至关重要的。

激光超声检测技术^[5-7]作为一种新型的超声无损检测技术,是超声技术与光学技术的结合,不仅结合了超声技术的优势,还能实现非接触式、远距离、大面积快速扫描检测^[8],其具有较高的检测带宽和较高的空间分辨力对小缺陷敏感,同时不受检测对象的复杂形状限制,因而在钢轨缺陷无损检测中得到了广泛的应用^[9],在铁路内部核缺陷无损检测中有较高的应用价值^[10-11]。目前,在内部缺陷检测方面,Pei等^[12]通过建立激光超声有限元模型,观测到反射横波以及在内部缺陷表面的模式转换,利用激光-电磁的实验系统验证仿真,并结合模式波的飞行时间来定量分析和评价内部缺陷;孙凯华等^[13]在热弹机制下利用激光激发横波,采用超声透射法和反射法,通过缺陷对反射横波的两次衰减,实现了对0.8 mm直径的内部缺陷的检测和深度定位。在钢轨内部缺陷检测方面,Pantano等^[14]建立了超声波在导轨和空气介质中传播的有限元模型,对钢轨轨头的内部缺陷进行检测和分析,并通过实验验证了空气耦合探头用于导轨检测的有效性;Garcia等^[15]利用由北美交通科技中心公司(Transportation Technology Center, Inc. TTCI)和意大利

Tecnogamma SPA共同开发和改进的非接触式激光超声钢轨缺陷检测系统对钢轨表面和内部缺陷的检测进行了研究。因此,结合激光超声在内部缺陷检测方面的技术以及现有的钢轨内部激光超声检测基础,实现轨头核伤缺陷的定位和定量是。

本文基于激光超声体波的反射和衍射原理,建立了激光超声体波与轨头内部缺陷相互作用的有限元模型,研究了超声体波在缺陷处的波型转换以及转换后的爬波在缺陷表面传播情况,提出了基于模式转换反射波和衍射波飞行时间的缺陷定量分析方法,不仅可以对缺陷进行检测和定位,而且可以精准的对缺陷进行定量评估。

1 激光超声体波轨头内部缺陷检测方法

1.1 激光超声反射体波缺陷定位理论分析

如图1所示,选择合适的激励-接收间距 M ,通过移动轨头试块的方式,保持激励点和接收点在检测过程中不变,此时产生的超声波在轨头内部会出现3种传播状态。在这几种状态下,在接收点处都能接收到沿表面传播的表面波(R)和掠面纵波(P),且到达的时间不变。当检测过程中逐渐移动试块时,激励点靠近缺陷,检测区域覆盖到缺陷,有部分体波(S/L)能量能传递到缺陷边缘,从而发生散射,传播声程较长,波的飞行时间较慢,如图1(a)和(c)所示;而移动试块使缺陷处于激励点-接收点中间正下方位置时,体波的传播声程最短,波的飞行时间最快,如图1(b)所示。因此,在这样的检测方式下,反射体波的声程($b_1+b_2, c_1+c_2, d_1+d_2$)呈现出远-近-远的传播规律,反射体波到达接收点的时间也呈现慢-快-慢的规律。

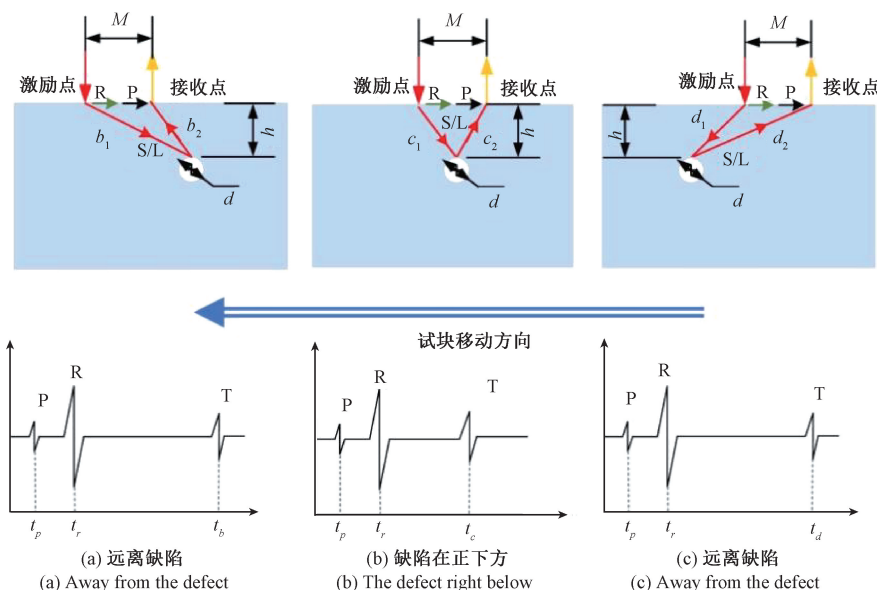


图1 缺陷定位检测原理

Fig. 1 Principle of defect localization and detection

通过以上的规律可知,在检测状态(b)时,A 扫波形图中反射体波的到达时间最短,此时的缺陷处于激励点和接收点的中间正下方位置,故可根据此时试块移动的距离 x 以及激励点与接收点的间距 M 计算出缺陷在轨头内部距离初始激励点的横向位置 W ;同时根据到达的时间 t 以及对应的体波波速 v 计算缺陷在轨头内部的埋藏深度 h ,即:

$$\begin{cases} W = \frac{M}{2} + x \\ c_1 = c_2 = \frac{v \times t}{2} \\ h = \sqrt{c_1^2 - \left(\frac{M}{2}\right)^2} \end{cases} \quad (1)$$

1.2 激光超声体波轨头内部孔缺陷定量理论分析

依据惠更斯原理,当超声横波在轨头内部传播时,不仅可以在缺陷处发生反射,而且还可在缺陷处形成新的波源,导致部分衍射波可沿缺陷的曲面进行爬行转换为爬波^[12],之后再以体波的形式衍射到轨头中。因此,通过分析直接反射的体波和衍射体波的模态转换波,不但能测量出缺陷的位置,还可进一步获得缺陷的尺寸信息。

图 2(a)所示为孔缺陷定量计算模型,同时也是各模态声波的传播示意图。激光激发超声波类型主要有纵波(L)、横波(S)、表面波(R)以及掠面纵波(P),各声波的传播路径有 3 个,其中沿表面传播的 R 波和 P 波为路径 1;在体内传播的 LL 波(纵转纵)、SS 波(横转横)、LS 波(纵转横)以及 SL 波(横转纵)均为路径 2;SCS 波沿路径 3 传播,SCS 波指的是有部分 S 波在缺陷 C 处沿缺陷曲面传播进而形成横爬波 SC 波,到达缺陷 D 处时又转化为横波即 SCS 波向周围介质辐射到达接收点。假设缺陷与激励点的横向距离 L_{AF} 、缺陷的埋藏深度 L_{FE} 以及缺陷直径 d 已知,则可根据图 2(a)计算出各模态声波的声程,

即:

$$\begin{cases} L_{AE} = \sqrt{L_{AF}^2 + L_{FE}^2} \\ L_{BE} = \sqrt{L_{BF}^2 + L_{FE}^2} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} L_{AO} = \sqrt{L_{AF}^2 + (L_{FE} + d/2)^2} \\ L_{BO} = \sqrt{L_{BF}^2 + (L_{FE} + d/2)^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} L_{AC} = \sqrt{L_{AO}^2 - (d/2)^2} \\ L_{BD} = \sqrt{L_{BO}^2 - (d/2)^2} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} L_{CD} = \frac{d}{2} \times [2\pi_2 - \cos^{-1}AOB - \cos^{-1}AOC - \cos^{-1}BOD] \\ \cos AOB = \frac{L_{AO}^2 + L_{BO}^2 - L_{AB}^2}{2 \times L_{AO} \times L_{BO}} \end{cases} \quad (5)$$

同时,根据各模态声波的声程,结合 R 波 V_R , P 波 V_P , L 波 V_L , S 波 V_S 的传播速度,可进一步得到各模态声波的传播时间,其中爬波波速与表面波一致,掠面纵波波速与纵波一致,即:

$$\begin{cases} t_R = \frac{M}{V_R} \\ t_P = \frac{M}{V_P} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} t_{LL} = \frac{L_{AE} + L_{EB}}{V_L} \\ t_{SS} = \frac{L_{AE} + L_{EB}}{V_S} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} t_{LS} = \frac{L_{AE}}{V_L} + \frac{L_{EB}}{V_S} \\ t_{SL} = \frac{L_{AE}}{V_S} + \frac{L_{EB}}{V_L} \\ t_{SCS} = \frac{L_{AC} + L_{DB}}{V_S} + \frac{L_{CD}}{V_R} \end{cases} \quad (8)$$

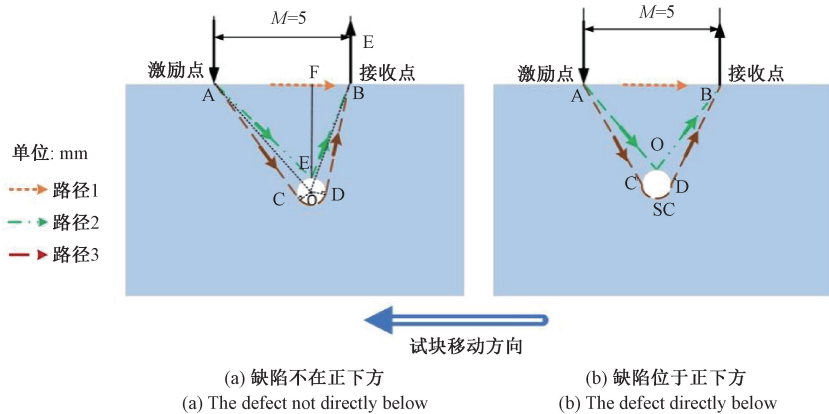


图 2 各模态声波传播示意图

Fig. 2 Schematic diagram of propagation of various modes of sound waves

结合以上各模态声波声程和飞行时间的公式,假设轨头内部孔缺陷的直径 $d=2\text{ mm}$,埋藏深度 $h=4\text{ mm}$,则可以获得移动试块的检测位置与模态声波的到达时间的关系图,如图3所示,图中虚线部分对应的是图1(b)中的检测位置,此时缺陷位于激励点-接收点正下方中间,各模态声波达到接收点的声程最近,即各个模态波的到达时间最快,因此在图像上呈现为双曲线的形状如图3中的LL波、SS波和SCS波所示,与1.1节中的理论是一致的。而表面波R和掠面纵波P由于路径1为固定间距,故到达的时间基本不变;L波波速大于S波波速,所以在未发生波形转换前,L波率先与缺陷作用转换为S波然后再以S波的波速到达接收点,因此LS波的达到时间会出现先快后慢的过程,同理SL波的达到时间会出现先慢后快的过程。同时当缺陷位于图1(b)的位置时,

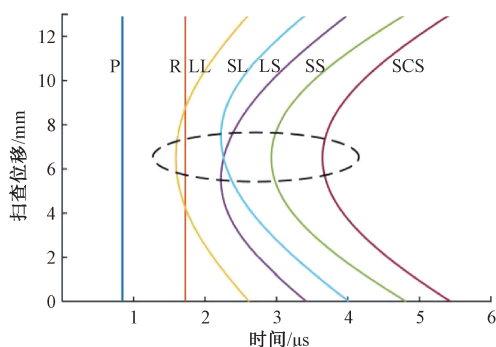


图3 不同激励位置各模态波到达时间

Fig. 3 The arrival time of each mode wave at different excitation positions

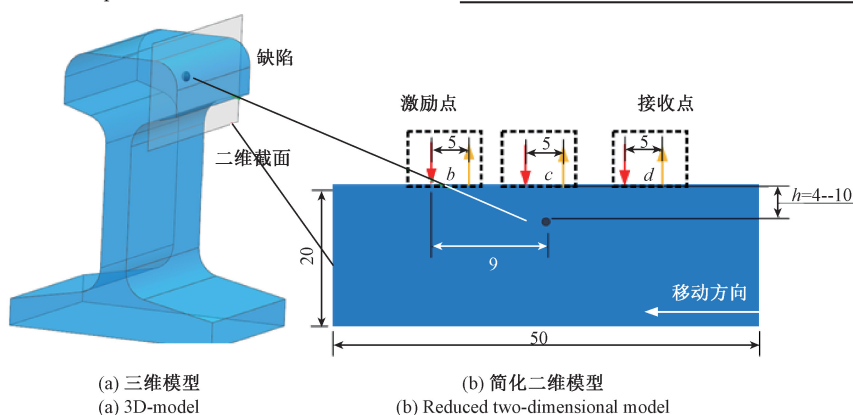


图4 激光超声轨头内部圆孔缺陷检测仿真模型

Fig. 4 Simulation model of defect detection of inner circular hole of laser ultrasonic rail head

2.2 有限元仿真结果分析与讨论

1) 缺陷定位检测仿真结果分析

图5为内部孔缺陷直径为1 mm的仿真模型下,试块移动不同位置下的激光超声与内部缺陷作用的声场图以及对应的时域图,其规律与图1(a)~(c)3个位置的声场

$L_{AO} = L_{OB}$,此时LS波和SL波的到达时间相等,在图像上会出现交点,而SS波和SCS波在此状态下的声程也是最短的,通过分析它们的波速和时间差,即可定量内部缺陷的大小。

2 激光超声体波有限元数值模拟仿真与分析

2.1 有限元建模和参数

基于激光激发超声波的热弹性机理,采用COMSOL有限元仿真软件建立了激光超声钢轨轨头内部缺陷检测模型。考虑到三维仿真计算量巨大,孔缺陷也属于三维球结构,因此将仿真模型简化为轨头纵向平面的二维模型,如图4(b)截面所示。有限元仿真中采用的A60钢轨材料特性参数如表1所示,激光光源为点光源,半径为0.1 mm,脉冲上升时间为7 ns,激光能量为 $1 \times 10^{11} \text{ W/m}^2$ 。模型长50 mm,宽20 mm。为保证数值模型的稳定,模型设置的时间步长为 $2 \times 10^{-9} \text{ s}$,总步长为7 μs ,网格划分为激励源和缺陷周边0.02 mm,其他位置为0.05 mm,同时激励点与接收点固定不动,间距M设置为5 mm^[16],激励点距离缺陷中心的初始距离为9 mm,以0.1 mm等间隔移动试块,移动总距离为13 mm。

表1 A60钢轨特性参数

Table 1 A60Rail characteristic parameters

材料	弹性模量 /(E/GPa)	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	热膨胀系数 K^{-1}
A60钢	210	7 840	0.29	1.18×10^{-5}

传播相一致。当未移动试块或试块移动过检测区域时,激励点和接收点远离缺陷,如图5(a)和(c)所示,各体波的总声程较远,SS波的达到时间较慢,而且入射声程与反射声程大小不同,因此LS波和SL波的到达时间也不同,同时在时域信号上表现一样,无法判别激励点-接收

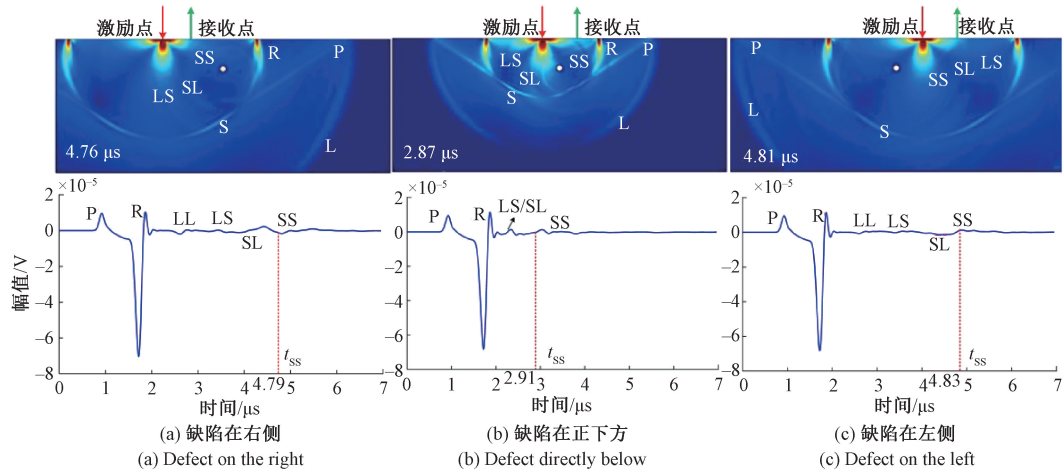


图 5 不同激励接收位置下体波与缺陷相互作用仿真结果云图和信号图

Fig. 5 Cloud and signal diagrams of simulation results of interaction between lower body waves and defects at different excitation receiving positions

点的位置在缺陷的左侧还是右侧,不利于内部缺陷的定位。当激励点-接收点位于图 5(b)位置时,各体波的总声程最短,SS 波的到达时间最快,而入射声程与反射声程的大小是相等的,此时 LS 波与 SL 波会在同一时刻相遇,能量叠加,LS/SL 模式波的幅值在时域信号中比图 5(a)和(c)的更明显,最后根据此刻 SS 波的到达时间,结合式(1)即可计算出内部缺陷的位置。

2) 缺陷定量检测仿真结果分析

图 6 为孔缺陷($d=2\text{ mm}$)钢轨模型下不同时刻激光超声声场图,可以清晰观察到各模态波的传播过程和模式转换。在热弹机理下,在钢轨材料表面和内部激光激励能同时产生 R 波、P 波、L 波和 S 波,其中 R 波的能量

集中方向与入射面呈 90° ,沿表面传播,L 波的能量集中方向与入射面呈 30° 、 -60° ,S 波能量集中方向与入射面呈 15° 、 -30° ,沿内部传播,对应图 6(a)。L 波波速最快,率先遇到缺陷,部分声波能量发生模式转换,产生 LL 波和 LS 波对应图 6(b);随着体波的进一步传播,S 波遇到缺陷同样有一部分发生散射产生 SS 波和 SL 波对应图 6(c),还有一部分会发生衍射形成两个爬波,即 SCS1 和 SCS2,其中 SCS1 会沿着缺陷下曲面爬行,最终向接收点传播,而 SCS2 沿缺陷上曲面爬行,最终向钢轨内部传播对应图 6(d)。同样之前的 L 波也会有部分产生纵爬波 LC 波,但是由于波形混叠、纵波能量较弱等情况 LC 波的能量很弱并不能直观地看出。

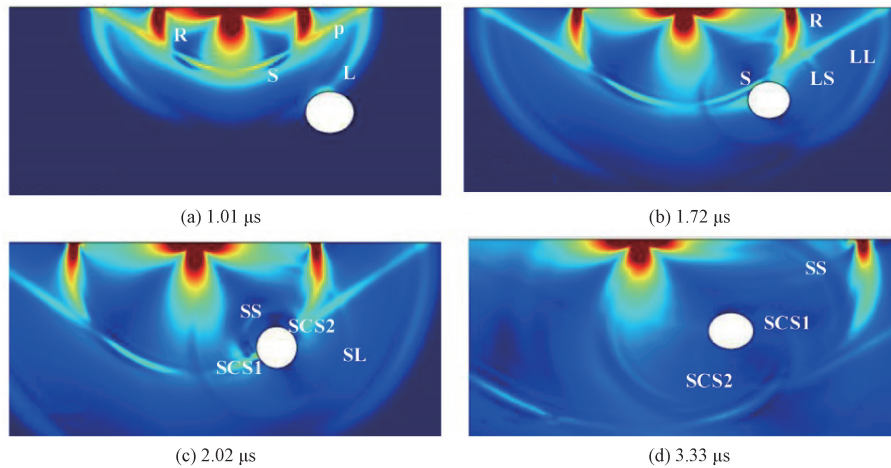


图 6 不同时刻体波与孔缺陷相互作用仿真声场

Fig. 6 Simulation sound field of interaction between body wave and hole defect at different time

图 7 为缺陷埋藏深度为 4 mm 时,不同直径大小的 B 扫仿真结果和 A 扫时域结果,其中虚线位置代表的是内部缺陷移动到激励点和接收点中间正下方位置时的情况,对应 A 扫信号的结果。图 7(a)为无缺陷时的 B 扫描,由于轨头内部不存在缺陷,体波在试件内不会发生模式转换,因此图像上只显示沿表面传播的信号(表面波

况,对应 A 扫信号的结果。图 7(a)为无缺陷时的 B 扫描,由于轨头内部不存在缺陷,体波在试件内不会发生模式转换,因此图像上只显示沿表面传播的信号(表面波

和掠面纵波);图 7(b)和(c)分别为缺陷直径 1 和 2 mm 时的 B 扫描结果,因为内部缺陷的存在,体波在内部传播的过程中和缺陷相互作用,而 LL 波的波速最快最先达到,但在缺陷深度为 4 mm 的情况下,有部分信号会与 R 波发生混叠,同时 LCL 波的能量弱,所以 L 波不利于缺陷的定位和定量检测;SS 波和 SCS 波虽然到达时间慢,

但能量占比大,色带清晰,且不与前面的波形存在混叠,易于区分表现明显,结合 1.2 节的计算模型,SS 波和 SCS 波的波速和到达时间,可分别用于缺陷的定位和定量检测,此外 SS 波和 SCS 波的时间间隔是由内部缺陷的大小决定的,缺陷的直径越大, Δt 就越大,相应的 SCS 波能量也会越弱。

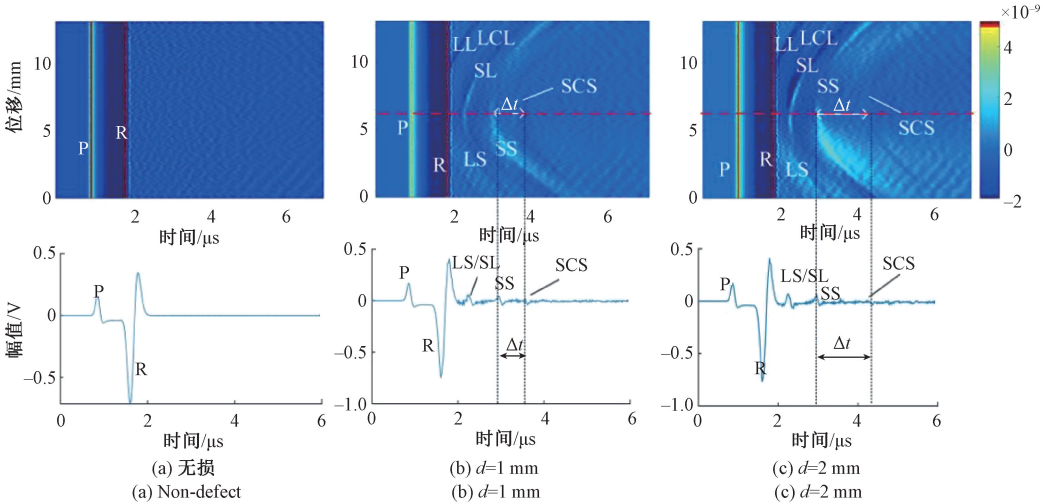


图 7 有无缺陷下各模式波的 B 扫图像和 A 扫时域图

Fig. 7 B-sweep images and A-sweep time domain images of each mode wave with or without defects

3 实验验证与结果分析

3.1 实验系统和轨头缺陷试件

激光超声体波检测实验系统如图 8(a)所示,系统包括激光器,聚焦透镜、干涉仪,调理电路以及带多个孔缺陷 20 cm 长的 A60 钢轨轨头块。激光器是 Nd:YAG 固体激光器,通过透镜聚焦,光斑半径大小为 0.1 mm,波长为 1 064 nm,脉冲上升时间为 8 ns,能量为 40 mJ,重复频率为 20 Hz。激光干涉仪为迈克尔逊干涉仪,波长为 532 nm,通过连续激光实现声波的接收,采集卡采样频率为 250 MHz,采样长度为 2 500,采样时间为 10 μs。截取的钢轨轨头放置在二维扫描平台上,通过控制扫描平台的左右移动来模拟激励接收固定的移动扫描,激光激励点与干涉仪接受点的相对距离为 5 mm,检测区域与图 4(b)一致,扫描平台移动步进为 0.1 mm,移动总长度为 13 mm,共 131 组数据。为了提高信噪比,每组数据在采集时作了 10 倍平均,最后将采集的数据绘制成 B 扫描结果图。

为了方便实验操作,切割了钢轨轨头块进行实验,每个轨头试块长度为 20 cm,设计了不同埋藏深度和直径的内部孔缺陷,如图 8(b)所示,材料特性和缺陷尺寸参数与仿真模型一致,孔直径大小为 1 和 2 mm,埋藏深度为 4、5、6、8 mm,同时为了减小误差,采用游标卡尺对缺陷尺寸进行标定,具体尺寸参数如表 2 所示。

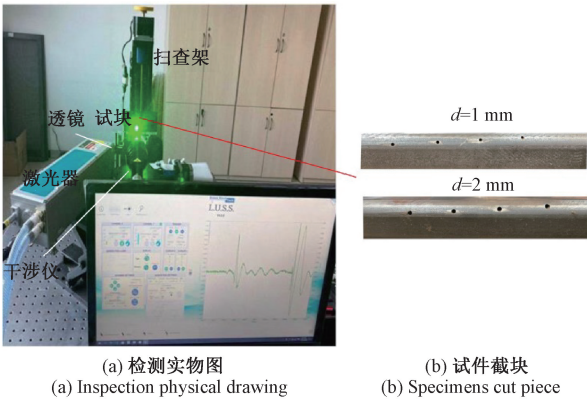


图 8 激光超声检测实验系统
Fig. 8 Laser ultrasonic testing experimental system

表 2 钢轨缺陷试件几何参数
Table 2 Geometric parameters of rail defect specimen

序号	孔直径 d/mm	埋藏深度 h/mm
1	1.12	4
2	1.14	5
3	0.98	6
4	1.02	8
5	2.03	4
6	2.12	5
7	2.06	6
8	1.97	8

3.2 实验结果分析与讨论

图 9(a) 和 (b) 分别为内部缺陷直径 $d=1\text{ mm}$ 和 $d=2\text{ mm}$, 深度 h 为 4 mm 时检测采集数据所绘制的 B 扫描可视化结果。从图 9 可知, 表面波与掠面纵波在可视化图像上呈直线形状, 因为激励点与接收点固定不动, 间距不变, 表面波和掠面纵波的传播路程也不变, 则到达接收点的时间也同样相等; 而超声体波都呈双曲线形状, 因为是动试块、固定激励-接收的扫查方式, 所以体波在轨头内传播的路程是由远及近再到远的变化, 则各个接收位置处体波到达的时间也会出现由慢及快再到慢的变化。同时, 随着缺陷埋藏深度的增加, 各模态波的到达时间会出现滞后, 与表面波和掠面纵波能逐渐区分开来, 体现了缺陷深度变化的过程, 不过深度越深, SCS 波的能量也越弱, 当深度达到 8 mm 时, 色带无法清晰辨别, 不利于时间值的读取, 如图 10(c) 和 (f) 所示; 而随着缺陷直径的增大, SS 波和 SCS 波之间的时间间隔也增大, 反映了缺陷大小变化的过程。图中虚线代表的是缺陷移动到激励点与接收

点中间正下方位置, 此时各模态波的到达时间最短, 入射声程与发射声程是相等的, 根据这两特性, 从图中读取模态波的时间和扫查位移, 结合体波的波速代入式 (1) 即可计算得到轨头内部缺陷的位置和埋藏深度; 同时考虑计算的简单性和准确性, 结合 1.2 节的计算模型, 只需根据 t_{ss} 和 t_{scs} 即可推算孔缺陷的直径。

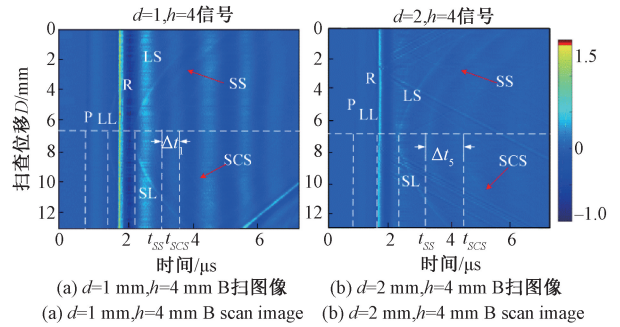


图 9 不同直径相同深度内部缺陷检测的可视化结果

Fig. 9 Visualization results of internal defect detection with different diameters and the same depth

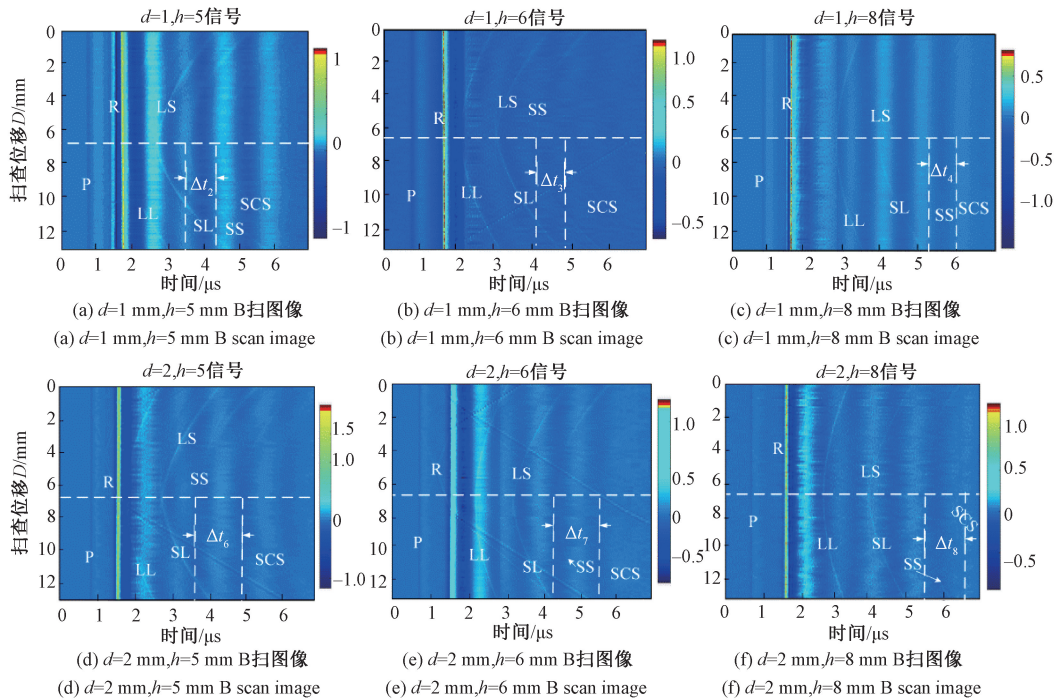


图 10 其他埋藏深度的内部缺陷检测可视化结果

Fig. 10 Visualization results of internal defect detection at other burial depths

由式 (1) 可知, 缺陷的定位定量精度由双曲线顶点 D (扫查位移) 的读取、埋深 h 和直径 d 决定。为了简化计算选取各模态波双曲线顶点处的扫查位移, 也即最佳检测位置, 不过由于人工操作的影响, 数值会略有差异, 但均集中在 $D=6.5\text{ mm}$ 附近, 之后再计算缺陷的埋藏深度、相对位置和尺寸大小, 结果如

表 3 和 4 所示。

图 11 为实验测量结果与实际值进行比较并计算的相对误差图, 实验结果表明, 基于激光超声横波的钢轨轨头内部孔缺陷定位定量检测具有可行性, 其中缺陷的定位相对误差在 6% 以内, 缺陷直径的定量相对误差在 9% 以内。

表 3 抛物线顶点 D 值及对应的各波到达时间

Table 3 D value of the parabola vertex and the corresponding arrival time of each wave

序号	扫查位移 D/mm	$t_R/\mu\text{s}$	$t_{SS}/\mu\text{s}$	$t_{SCS}/\mu\text{s}$
1	6.25	1.748	2.844	3.634
2	6.81	1.725	3.375	4.124
3	6.74	1.702	4.124	4.887
4	6.24	1.689	5.452	6.041
5	6.62	1.748	2.972	4.415
6	6.68	1.741	3.516	4.967
7	6.63	1.728	4.128	5.557
8	6.37	1.721	5.387	6.801

表 4 各缺陷的位置和大小

Table 4 Position and size of each defect mm

序号	横向距离 W	埋藏深度 h	孔直径 d
1	8.75	3.86	1.07
2	9.31	4.85	1.08
3	9.25	6.19	1.04
4	8.74	8.46	1.11
5	9.12	4.14	2.14
6	9.18	5.10	2.02
7	9.13	6.20	1.94
8	8.87	8.35	2.12

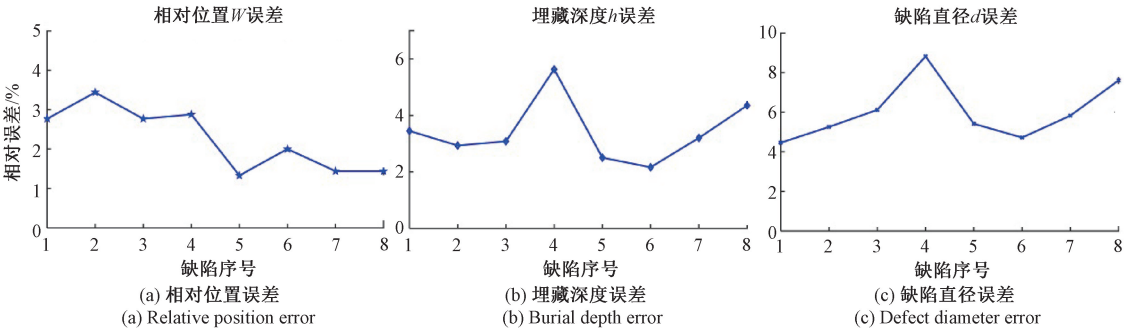


图 11 孔缺陷定位定量检测相对误差

Fig. 11 Relative error of hole defect location and quantitative detection

4 结 论

本文研究了一种利用固定激励和接收、移动检测对象的方式对钢轨轨头内部的孔缺陷进行完全非接触无损检测的方法。在该方法下基于超声体波的反射和衍射原理,提出了模态转换反射波和衍射波飞行时间的缺陷定位定量理论,并建立激光超声轨头体波传播有限元模型,分析了其与内部孔缺陷相互作用的规律,验证了检测理论的可行性和有效性,最后通过设计检测实验,搭建固定扫查激光超声实验系统,对含有不同尺寸和深度孔缺陷的轨头截块进行量化检测。实验结果表明,该方法能有效的对钢轨轨头内部缺陷进行精准的定位和定量,且定位的相对误差在 6%之内,定量的相对误差在 9%之内,为激光超声钢轨内部缺陷的在线检测应用奠定了理论基础。

参考文献

[1] GRASSIE S, NILSSON P, BJURSTROM K, et al. Alleviation of rolling contact fatigue on Sweden's heavy haul railway[J]. Wear,2002, 253(1-2):42-53.
[2] 刘启跃,张波,周仲荣. 铁路钢轨损伤机理研究[J].

中国机械工程,2002(18):72-75,6.
LIU Q Y, ZHANG B, ZHOU ZH R. The research of wear characteristics on steel rail[J]. China Mechanical Engineering,2002(18):72-75,6.
[3] 邢丽贤,邹定强,杜涵秋. 钢轨核伤断裂原因检验分析[J]. 铁路技术创新,2016(2):71-73.
XING L X, ZOU D Q, DU H Q. Inspection and analysis of nuclear damage and fractu-re of rail [J]. Railway Technical Innovation,2016(2):71-73
[4] 吕晶,杨其全,邹定强,等. 贝氏体钢轨母材轨头核伤原因分析[J]. 铁道建筑,2020,60(1):120-124.
LYU J, YANG Q Q, ZOU D Q, et al. Analysis on cause of rail head transverse cracks of bainite rail base metal[J]. Railway Engineering, 2020, 60(1):120-124.
[5] JIANG Y, WANG H T, CHEN S, et al. Visual quantitative detection of rail surface crack based on laser ultrasonic technology[J]. Optik, 2021,237:166732.
[6] LEVESQUE D, OCHIAI M, BLOUIN A, et al. Laser-ultrasonic inspection of surface-breaking tight cracks in metals using SAFT processing, [C]. IEEE, 2012: 753-756.

- [7] 何宁, 骆湘红, 赵中华, 等. 基于光纤耦合与相干探测的无损检测方法[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 200-207.
HE N, LUO X H, ZHAO ZH H, et al. Nondestructive testing method based on fiber coupling and coherence detection[J]. Acta Optic Sinica, 2017, 37(8): 200-207.
- [8] 李兵, 唐涛, 秦峰. 基于二维延时叠加的激光诱导声表面波成像研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 56-63.
LI B, TANG T, QING F. Study on imaging of laser-induced surface acoustic wave based on 2D time-delay superimposition [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 56-63.
- [9] 张辉, 宋雅男, 王耀南, 等. 钢轨缺陷无损检测与评估技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 11-25.
ZHANG H, SONG Y N, WANG Y N, et al. Review of rail defect non-destructive testing and evaluation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 11-25.
- [10] 武兴, 缪建成, 廖韦韬, 等. 基于激光超声纵波的钢轨内部缺陷检测方法[J]. 无损检测, 2021, 43(4): 16-19, 50.
WU X, MIU J CH, LIAO W T, et al. An inspection of rail internal defects based on laser ultrasonic longitudinal wave[J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(4): 16-19, 50.
- [11] 田雪雪, 赵纪元, 卢秉恒, 等. 增材制件内部缺陷埋藏深度的激光超声定量检测方法[J/OL]. 中国机械工程: 1-10 [2021-08-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20210420.1350.010.html>.
TIAN X X, ZHAO J Y, LU B H, et al. Quantitative detection of buried depth of internal defects in additive manufacturing based on laser ultrasonic technology[J/OL]. China Mechanical Engineering: 1-10 [2021-08-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20210420.1350.010.html>.
- [12] PEI C X, FUKUCHI T, ZHU H T, et al. A study of internal defect testing with the laser-EMAT ultrasonic method [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2012, 59(12): 2702-2708.
- [13] 孙凯华, 沈中华, 李远林, 等. 材料内部缺陷的激光超声反射横波双阴影检测方法[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 243-251.
SUN K H, SHEN ZH H, LI Y L, et al. Inspection of material internal defects using double shadow method based on laser ultrasonic reflected shear waves [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 243-251.
- [14] PANTANO A, CERNIGLIA D. Simulation of laser-generated ultrasonic wave propagation in solid media and air with application to NDE [J]. Applied Physics A, 2010, 98(2): 327-336.
- [15] GARCIA G, KALAY S, CERNIGLIA D, et al. U-Rail laser-based ultrasonic inspection system prototype "system overview and status" [J]. Railway Track & Structures, 2006, 102: 19-21.
- [16] ZHANG J P, QIN X P, YUAN J X, et al. The extraction method of laser ultrasonic defect signal based on EEMD [J]. Optics Communications, 2021, 484: 126570.

作者简介



廖韦韬, 2019 年于南京航空航天大学获得学士学位, 现为南京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为激光超声及无损检测。

E-mail: taoweiliao@163.com

Liao Weitao received his B.Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2019. He is currently a master student at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His research interests include laser ultrasonic and nondestructive testing and so on.



王海涛 (通信作者), 2002 年于中国科学院获得博士学位, 现在为南京航空航天大学南京航空航天大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无损检测技术及模式识别等方面的研究。

E-mail: htwang2002@126.com

Wang Haitao (Corresponding author) received his Ph.D. degree from Chinese Academy of Sciences in 2002. He is currently a professor and a Ph.D. advisor at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His research interests include nondestructive testing and pattern recognition and so on.



郑凯, 2006 年于南京大学获得博士学位, 现在为江苏省特种设备安全监督检验研究院教授级高工, 主要研究方向为结构健康检测和无损检测。

E-mail: kai.zheng@163.com

Zheng Kai received his Ph.D. degree from Nanjing University in 2006. He is currently a professor-level senior engineer at Special Equipment Safety Supervision and Inspection Institute of Jiangsu Province. His research interests include structural health monitoring and nondestructive testing and so on.