DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2412625

基于切线逼近法的双探头圆拟合裂纹定位方法研究*

邢燕好[1],陈伟屹[1],张 佳[1],靳海玉[2],林红伟[3]
(1. 沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870; 2. 新疆阿勒泰地区特种设备检验检测所 阿勒泰 836500;
3. 吉林市特种设备检验中心 吉林 132000)

摘 要:针对单探头电磁超声全向导波检测斜向裂纹时因缺陷位置误判致使难以准确定位的问题,提出了一种基于切线逼近法的双探头圆拟合裂纹定位检测方法,以电磁超声换能器检测位置点为圆心,裂纹回波信号的声程为半径,圆拟合获取多个不同位置处的一组圆集合,得到缺陷位置判别的真、伪两条切线;采用双探头数据补偿法得到不同位置处的两组圆集合,通过判别两组圆集合共同的切线为真,从而去除伪切线,实现裂纹的准确定位检测。研究结果表明:双探头圆拟合裂纹定位方法相较于单探头,能有效去除伪切线,裂纹定位最大误差为 2. 3%,为斜裂纹检测准确定位提供依据。

关键词: 电磁超声;双探头;圆拟合;斜裂纹;伪切线
中图分类号: TB553 TH89 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460. 40

Research on crack localization based on tangent approximation method with fitting of double probes

Xing Yanhao[1], Chen Weiyi[1], Zhang Jia[1], Jin Haiyu[2], Lin Hongwei[3]
(*1. School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China*;
2. Xinjiang Altay Regional Special Equipment Inspection and Testing Institute, Altay 836500, China;
3. Jilin Special Equipment Inspection Center, Jilin 132000, China)

Abstract: Addressing the challenge of accurately locating oblique cracks due to misjudgments of defect positions in single-probe electromagnetic ultrasound omni-directional guided wave detection, a two-probe circular fitting crack localization method based on tangent approximation is proposed. This method uses the electromagnetic acoustic transducer (EMAT) detection position point as the center of a circle and the acoustic range of the crack echo signals as the radius. By performing circular fitting at multiple different locations, a set of circle collections is obtained, allowing for the discrimination between true and false defect locations. The double-probe data compensation method is employed to obtain two sets of circles at different locations. By identifying the common tangent line of these two sets of circles, pseudo-tangents are removed, enabling accurate crack positioning and detection. Results show that the dual-probe circular fitting crack localization method effectively eliminates pseudo-tangents compared to the single probe, achieving a maximum crack localization error of 2. 3%. This provides a reliable basis for accurate oblique crack detection.

Keywords: electromagnetic ultrasound; omnidirectional lamb wave; circle fit; oblique crack; pseudo-tangent

0 引 言

金属板材因其具有耐高温、机械强度高、不易老化等特点,被广泛应用到化工、船舶、冶金等工业领域[1]。金属板材在复杂载荷和极端服役环境下易受损生成裂纹等缺陷,影响金属板材的安全使用[2]。对金属板材中的裂纹进行检测,及时发现缺陷的位置,视情维护,保障金属板材的使用性能,避免安全事故的发生[3]。

对金属板材裂纹定位检测能够及时发现金属板材中

收稿日期:2024-03-17 Received Date: 2024-03-17
*基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB3407800)、国家自然科学基金(62241107)、辽宁省自然科学基金(2022-BS-180,2023-MS-220)、辽宁省教育厅面上项目(LJKMZ20220474)资助

的裂纹等缺陷。国内外学者对工件中裂纹定位检测展开了一系列研究。Zhang 等[4]提出了一种结合飞行时间补偿和损伤概率重构的方法,利用飞行时间构造新的圆形概率分布,将其与传统的椭圆概率分布相结合实现损伤定位,平均定位误差为 7 mm;杨理践等[5]设计了一种用于激励管道中单向导波的电磁超声换能器(electromagnetic acoustic transducer,EMAT),通过双线圈结构激励产生超声波,能够提取有用信号,实现管道裂纹的定位检测;黄祺凯等[6]建立了基于 Barker 码脉冲压缩技术的 Lamb 波 EMAT 有限元模型,提高了 Lamb 波 EMAT 裂纹定位检测能力;王松浩等[7]提出了一种基于多换能器的损伤指数迭代方法,根据裂纹缺陷反射回波的渡越时间及损伤指数,实现了管道裂纹缺陷的定位检测,定位结果与实际位置相差 3.1 mm;Anand 等[8]将传递矩阵法和刚度矩阵法相结合,提出了一种计算表面波从层状各向异性介质传播到半无限各向异性介质中的透射系数和反射系数的方法,能够实现铝板中直径 1.5 mm 孔隙的定位检测;Liu 等[9]根据弯曲增强碳纤维塑料板结构特征的对称性,引入了形状补偿矩阵,实现对不同类型缺陷的定位检测,定位最大相对误差为 11.7%;Tang 等[10]提出优化稀疏信号分解方法确定全局最优模型参数,并结合频散补偿消除相干噪声实现管道缺陷的定位检测,缺陷最小定位误差为 0.72 cm,平均定位误差为 2.65 cm;Reyaz 等[11]根据平面波成像算法具有不同角度转向实现裂纹定位检测,在圆心空间定位和圆形特征半径定位误差均在 5% 以内;刘小峰等[12]提出了一种基于交叉递归率的缺陷定位方法,通过构建基于交叉递归率的损伤指数,采用椭圆概率成像算法实现了铝板表面与亚表面裂纹缺陷的定位检测,定位误差小于 10%;刘玉冰等[13]通过椭圆定位算法实现对声发射源的定位,定位平均误差为 2.95 cm;Yan 等[14]发现超声检测概率曲线与裂纹等效参数呈对数线性关系,结果表明当裂纹深度达到 10 mm 时,超声检测概率曲线均可达到 80% 以上。上述方法,可以实现周向裂纹或轴向裂纹的定位检测,检测误差在 10% 以内,针对工件中不同走向斜裂纹缺陷定位检测的研究较少。

工业上常见的裂纹缺陷检测方法有电磁超声检测、声发射检测、压电超声检测和漏磁检测等。电磁超声检测技术无需添加耦合剂、检测效果受环境影响小、检测时效性强[15],广泛应用于金属板材和管道等结构的检测[16-19]。单探头电磁超声全向导波检测斜向裂纹时因缺陷位置误判致使难以准确定位,因此,提出了一种基于切线逼近法的双探头圆拟合裂纹检测方法,以双探头检测位置点为圆心,裂纹回波信号的声程为半径,得到不同位置处的两组圆集合,通过判别两组圆集合共同的切线为真,从而去除伪切线,实现铝板中裂纹的准确定位检测。仿真分析了不同位置裂纹缺陷的回波响应特性,研究了圆拟合裂纹定位方法用于铝板裂纹定位检测的可行性。最后,通过搭建的实验系统对铝板中裂纹定位检测进行了实验验证。

1　裂纹检测方法

构建全向 Lamb 波能量衰减模型,判断工件中是否存在裂纹,根据衰减率确定反射位置区域,基于切线逼近法的双探头圆拟合裂纹检测方法,实现对工件中裂纹定位检测。

1.1　电磁超声裂纹检测基本原理

基于电磁超声裂纹检测原理,提出了一种切线逼近法的圆拟合裂纹定位方法,用于工件中裂纹定位检测,原理如图 1 所示。

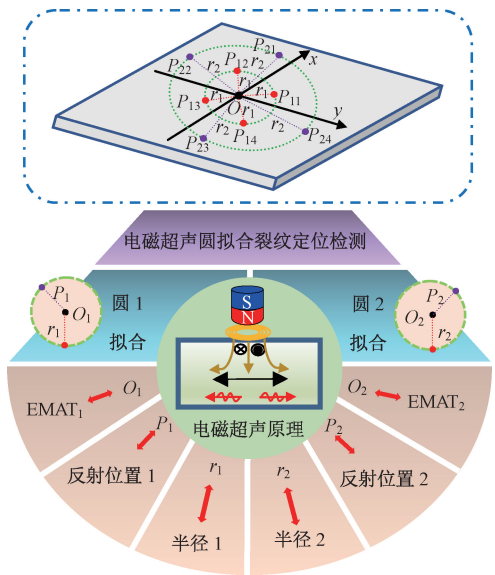


图 1　电磁超声圆拟合裂纹定位方法

Fig. 1　Electromagnetic ultrasound circular fitting crack localization method

图 1 中,O 为坐标原点,代表 EMAT 位置,可测量得到;P_{11}、P_{12}、P_{13} 和 P_{14} 为第 1 个圆上的动点,P_{21}、P_{22}、P_{23} 和 P_{24} 为第 2 个圆上的动点,代表超声波反射位置;r_1 为第 1 个圆的半径,r_2 为第 2 个圆的半径。

声程 s_i 满足式(1):

$$2\overline{\boldsymbol{P}_n\boldsymbol{O}}\mathrm{s}_\mathrm{i} \tag{1}$$

其中,P_n 为圆上的动点,代表超声波反射位置;O 为圆心,代表 EMAT 检测位置点。

声程 s_i 也可由式(2)计算得到[20]:

$$s_i = (t_2 - t_1) \cdot v \tag{2}$$

式(2)中,v 为声波在介质中的传播速度,t_1 为 EMAT

发射超声脉冲对应时刻，t_2 为 EMAT 接收到超声脉冲对应时刻。

由式(1)可知 P 点的轨迹为圆，O 为圆心。圆的半径 r 可由式(3)计算得到：

$$r = s_i/2 \tag{3}$$

超声波在检测工件中的裂纹时，周向导波可检测轴向裂纹缺陷，轴向导波可检测周向裂纹缺陷。实际工程应用中，由于工件受到复杂环境等因素影响，生成的裂纹大多是斜裂纹。斜裂纹通过周向导波或轴向导波难以实现裂纹定位检测，全向 Lamb 波检测技术具有激励方式简便、检测范围广、检测效率高、对裂纹缺陷敏感性强等优点，能够有效检测到工件中的斜裂纹等缺陷。通过全向 EMAT 激励产生全向 Lamb 波，用于铝板裂纹定位检测[21]。

1.2 全向 Lamb 波能量衰减模型的建立

由波的传播特性可知，全向 Lamb 波在铝板中传播过程中能量衰减，遇到裂纹等缺陷发生波的反射、衍射和透射。通过建立全向 Lamb 波能量衰减模型判断工件中是否存在裂纹缺陷，全向 Lamb 波能量衰减模型的建立是实现工件中裂纹位置检测的基础。通过工件中有无裂纹对应的全向 Lamb 波能量衰减模型，得到衰减率。

基于阻尼现象，全向 Lamb 波在工件中传播时振幅随距离增大而减小[22]。根据全向 Lamb 波的传播理论，构建全向 Lamb 波能量衰减模型，表示全向 Lamb 波的振幅与传播距离之间的关系。

当电磁超声换能器贴合被测工件表面，且被测工件中没有裂纹等缺陷时，表面位移场为传播距离 x 和绝对时间 t 的函数，表面位移场 $u(x,t)$ 可表示为[23]：

$$u(x,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega)\, \mathrm{e}^{\mathrm{i}[k(\omega)x-\omega t]}\, \mathrm{d}\omega \tag{4}$$

其中，$F(\omega)$ 为激励信号 $f(t)$ 的傅里叶变换，e^{i} 为自然常数，ω 为圆频率，$k(\omega)$ 为波数，x 为传播距离，t 为传播时间。在频域中，每个圆频率差分分量的相移为任一时间的表面位移。

全向 Lamb 波以相同的速度向各方向传播，电磁超声换能器激发全向 Lamb 波传播距离 x 后的总能量 E 可表示为：

$$E = \int_0^{\infty} 2\pi x u_f(x,t)^2\, \mathrm{d}t \tag{5}$$

其中，$u_f(x,t)^2$ 为全向 Lamb 波从电磁超声换能器传播距离 x 后的位移场。当被测工件无裂纹时，全向 Lamb 波传播相同距离总能量相等，$u_f(x,t)$ 可表示为：

$$u_f(x,t) = \frac{u(x,t)}{\sqrt{2\pi x}} \tag{6}$$

将式(6)代入式(5)可得：

$$E = \int_0^{\infty} u(x,t)^2\, \mathrm{d}t \tag{7}$$

全向 Lamb 波回波信号能量随传播距离增大呈衰减趋势，选择合适频率构建无裂纹情况下全向 Lamb 波能量衰减模型，用于分析不同频率下全向 Lamb 波回波能量随传播距离增大而衰减的情况。分析有裂纹情况下全向 Lamb 波能量衰减情况，构建有裂纹和无裂纹情况下全向 Lamb 波能量衰减模型，对比相同激励频率下有裂纹和无裂纹情况下全向 Lamb 波能量衰减模型的区别。

在相同激励频率和相同传播距离情况下，工件中有裂纹与工件中无裂纹时全向 Lamb 波的能量衰减值存在显著差异，可作为判断工件中是否存在裂纹的依据。无裂纹时的传播距离等于有裂纹时入射波传播距离和反射波传播距离之和，定义 A_n 为无裂纹时全向 Lamb 波的振幅，A_h 为有裂纹时反射波的振幅，A_n 和 A_h 之间能量的差异是由裂纹处的能量衰减引起的。构建衰减比表达式，根据衰减比确定反射位置区域。衰减率 F_A 表达式可表示为：

$$F_A = \frac{A_n - A_h}{A_n} \tag{8}$$

全向 Lamb 波反射位置位于裂纹的不同区域回波能量不同，能量衰减率有显著差异。不同反射位置示意图如图 2 所示。

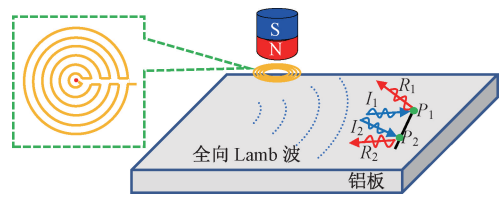


图 2 不同反射位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of different reflection positions

图 2 中，EMAT 为收发一体 EMAT，用于激励和接收全向导波；I_1、I_2 为入射波，R_1、R_2 为反射波；P_1、P_2 为反射位置，P_1 位于裂纹尖端，P_2 位于裂纹中间区域。由图 2 可知，EMAT 激励产生全向导波，沿铝板表面传播，遇到裂纹发生波的反射。根据反射波的能量衰减率确定反射位置区域，实现裂纹定位检测。

研究全向导波的传播路径和反射位置。由费马定律可知，入射角等于反射角。基于该原理，确定反射回波的传播路径。不同反射位置的衰减率不同，回波信号的能量不同。

由于裂纹尖端发生波的衍射，裂纹尖端的能量衰减大于裂纹中间区域的能量衰减。选择合适的能量衰减率作为裂纹尖端和裂纹中间区域的分界点。确定反射位置区域后，通过双探头圆拟合裂纹定位方法实现裂纹定位检测。基于切线逼近法的双探头圆拟合裂纹定位方法流程图如图 3 所示。

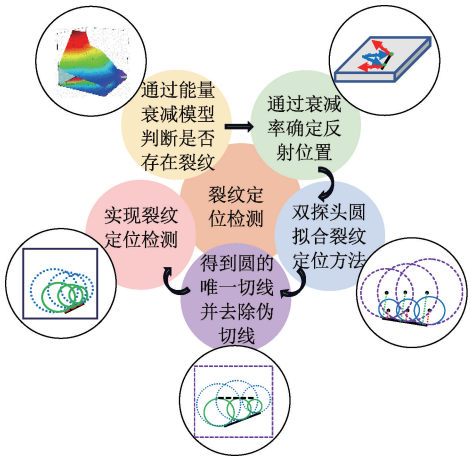
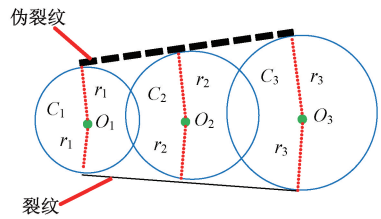


图 3　裂纹定位检测流程图

Fig. 3　Crack localization detection flowchart

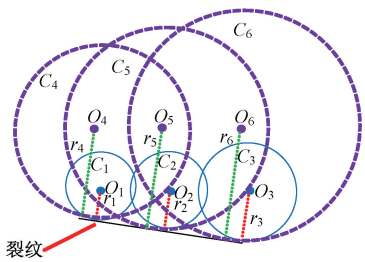
1.3　双探头圆拟合裂纹检测方法研究

通过基于切线逼近法的双探头圆拟合裂纹定位方法,实现裂纹准确定位检测。单探头和双探头圆拟合裂纹定位方法如图 4 所示。



(a) 单探头圆拟合裂纹定位方法

(a) Single probe circular fitting crack localization method



(b) 双探头圆拟合裂纹定位方法

(b) Dual probe circular fitting crack localization method

图 4　单探头及双探头圆拟合裂纹定位方法

Fig. 4　Single probe and dual probe circular fitting crack localization methods

图 4(a)中,C_1、C_2、C_3 为 3 个半径、位置不同的圆,通过移动探头位置所得;O_1、O_2、O_3 为 C_1、C_2、C_3 的圆心,由探头位置可知;r_1、r_2、r_3 为 C_1、C_2、C_3 的半径,根据探头位置及反射位置求得。通过单探头圆拟合裂纹定位方法对裂纹定位检测且工件中只存在一个裂纹缺陷时,由于存在两条圆的切线,通过单探头对裂纹进行定位检测造成裂纹位置误判。图 4(b)中,$C_1 \sim C_6$ 为 6 个半径、位置不同的圆,C_1、C_2、C_3 通过移动第 1 个探头位置所得,C_4、C_5、C_6 通过移动第 2 个探头位置所得;$O_1 \sim O_6$ 为 $C_1 \sim C_6$ 的圆心,由两个探头位置可知;$r_1 \sim r_6$ 为 $C_1 \sim C_6$ 的半径,根据两个探头位置及反射位置求得。使用双探头圆拟合裂纹定位方法对裂纹定位检测只存在一条圆的切线,能够准确定位裂纹位置。基于此,使用双探头圆拟合裂纹定位方法对铝板中的缺陷进行定位检测。

当铝板中存在裂纹时,EMAT 接收到裂纹反射回波信号,将全向 Lamb 波波速与时间相乘得到反射距离,通过反射距离及声场指向性确定反射位置,根据能量衰减率确定反射位置区域。以 EMAT 检测位置点为圆心,裂纹回波信号的声程为半径,圆拟合获取多个不同位置处的两组圆集合,通过圆的切线实现裂纹定位检测。基于切线逼近法的双探头圆拟合裂纹定位检测示意图如图 5 所示。

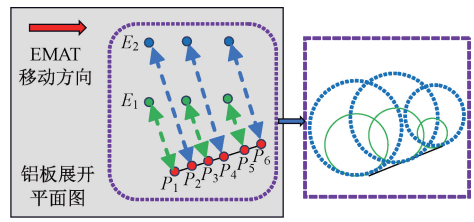


图 5　裂纹定位检测示意图

Fig. 5　Schematic diagram of crack localization detection

图 5 中,E_1 和 E_2 为不同位置的 EMAT,EMAT 沿直线从左至右移动,$P_1 \sim P_6$ 为不同的反射位置。通过双探头圆拟合裂纹定位方法获取多个不同位置的两组圆集合,得到两组圆集合共同的切线,实现裂纹定位检测。

2　仿真研究

建立电磁超声裂纹缺陷有限元仿真模型,分析不同位置裂纹缺陷与回波信号的关系。通过 COMSOL 有限元软件建立电磁超声导波激励模型,得到电磁场和声场的主要特征。分析导波对裂纹缺陷的响应特性,研究圆拟合裂纹定位方法的可行性。

2.1　有限元仿真模型建立

采用垂直磁场在铝板上激发导波,钕铁硼永磁铁尺寸为 10 mm×5 mm,剩磁为 1.2 T。电磁超声仿真模型如图 6 所示。铝板长度为 300 mm、厚度为 14 mm,铝板的材料参数如表 1 所示。

表 1　铝板的材料参数

Table 1　Material parameters of aluminum plates

密度/(kg·m^{-3})	杨氏模量/GPa	泊松比	声速/(m·s^{-1})
2 730	690	0.33	2 980

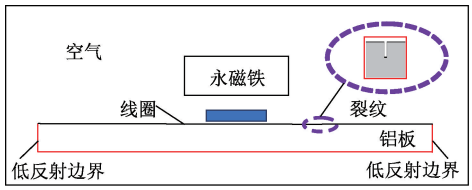


图 6 EMAT 仿真模型

Fig. 6 EMAT simulation model

图 6 中,铝板两侧为低反射边界,永磁铁和线圈激发导波,导波沿铝板表面及内部传播,遇到裂纹缺陷时,发生波的反射和透射。

网格的划分影响仿真结果准确性,网格划分空间大影响求解精度,网格划分空间小导致求解时间长。因此,需划分合适的网格。网格长度 L_m 和时间步长 t_s 分别由下式计算得到:

$$L_m = 1/8(c/f) \tag{9}$$

$$\Delta t_s = CFL \times L_m/c \tag{10}$$

其中,c 为超声波在介质中的传播速度,f 为超声波的频率,CFL 为收敛系数。

不同材质的被测工件得到的频散曲线不同,以铝板为例,频散曲线包括对称模态和反对称模态。相速度为超声波相位在铝板中传播的速度,群速度为超声波波包在铝板上传播的速度。相速度值可用于 EMAT 线圈间距的设计,该模态的波长 λ 可由激励脉冲频率下的相速度求得:

$$\lambda = C_p/f \tag{11}$$

其中,C_p 为相速度,f 为频率。通过超声波的相速度和波长求得,线圈间距为 $\lambda/2$。

2.2 不同位置裂纹的仿真结果研究

导波的振动遍及整个铝板壁厚,能够对铝板上的裂纹产生响应,同时裂纹缺陷的位置也影响反射回波信号。基于此,分析不同位置的裂纹缺陷对反射回波信号的影响,为铝板裂纹缺陷的定位检测提供依据。

铝板中常见的缺陷包括裂纹和腐蚀等,仿真中使用矩形槽表示裂纹缺陷,电磁超声换能器激发超声导波,向铝板周围传播,当超声波遇到裂纹缺陷时检测点接收到反射回波。仿真模型激励的导波遇到裂纹缺陷形成的反射回波位移云图分布如图 7 所示。

图 7 中,当 t=10 μs 时,EMAT 激发出的导波已较为明显。当 t=20 μs 时,EMAT 激发出的导波向周围传播。当 t=30 μs 时,导波到达裂纹处,发生波的反射和透射。当 t=40 μs 时,反射波传至检测点形成回波信号。根据回波信号的位置和幅值实现对裂纹的定位检测。

在铝板中,导波声速为 2 980 m/s,对于槽型裂纹缺陷,几何参数主要包括深度和宽度。固定裂纹缺陷的深度为 3 mm,宽度为 1.5 mm 不变,改变裂纹缺陷的位置,在距换能器中心 20 mm 处设置检测点,得到相应的裂纹缺陷回波信号图,如图 8 所示。

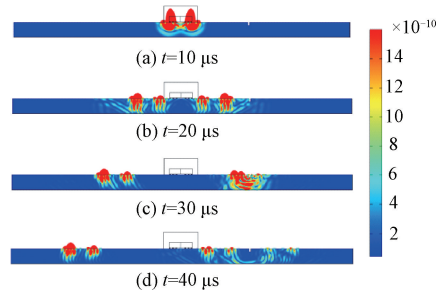


图 7 裂纹缺陷反射回波位移云图

Fig. 7 Echo displacement nephogram of flaw reflection

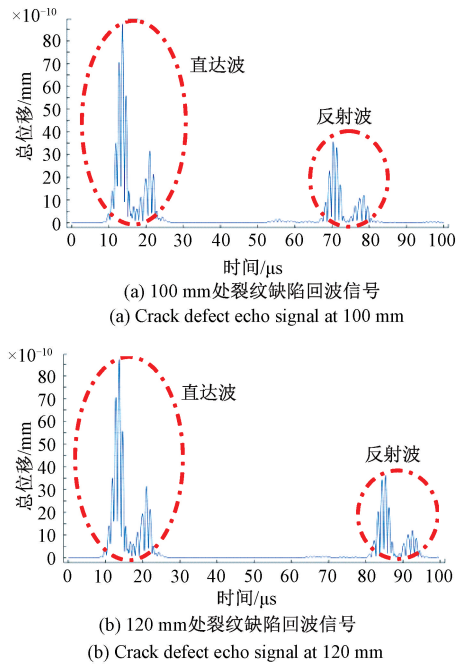


图 8 不同位置裂纹缺陷回波信号图

Fig. 8 Echo signal diagram of crack defects at different locations

图 8 中,前面的波包为入射波,入射波信号的波包位置保持不变,后面的波包为反射波,反射波信号的波包位置随着裂纹位置的改变发生变化。图 8(a)裂纹位置在检测点右侧 80 mm 处,检测点直达波时间约为 14 μs,裂纹缺陷反射回波时间约为 68 μs。理论直达波与反射回波距离 160 mm,通过计算实际距离为 160.92 mm,实际距离与理论距离相差 0.92 mm。图 8(b)裂纹位置在检测点右侧 100 mm 处,检测点直达波时间约为 14 μs,裂纹缺陷反射回波时间约为 81 μs。理论直达波与反射回波距离 200 mm,通过计算实际距离为 199.66 mm,实际距离与理论距离相差 0.34 mm。将检测点作为圆心,裂纹反射

位置作为圆上的点,通过圆拟合裂纹定位方法的拟合结果如图 9 所示。

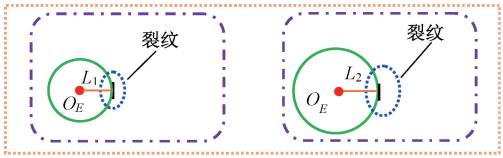


图 9　圆拟合仿真结果图

Fig. 9　Circle fitting simulation result diagram

图 9 中,O_E 为圆心,代表检测点的位置;L_1、L_2 为半径,代表检测点与裂纹缺陷之间的距离,L_1、L_2 的值分别为 80 mm 和 100 mm。检测点与裂纹实际距离为 80 mm 和 100 mm,预测距离为 80. 46 mm、99. 83 mm,裂纹定位误差为 0. 6%、0. 2%。圆拟合仿真结果表明,预测裂纹位置与实际裂纹位置误差在 1% 以内,具有较高精度,可通过圆拟合裂纹定位方法实现铝板裂纹缺陷的定位检测。

固定裂纹的宽度不变,研究不同深度裂纹反射回波实际距离随裂纹缺陷位置变化的关系,如图 10 所示。

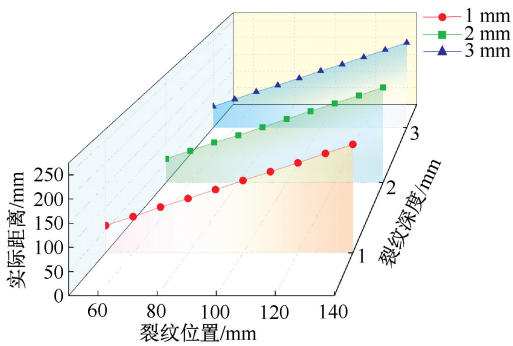


图 10　裂纹回波距离与裂纹位置关系图

Fig. 10　Diagram of crack echo distance versus crack location

图 10 中,裂纹的深度为 1 mm、2 mm 和 3 mm,裂纹缺陷反射回波实际距离随裂纹位置增加而线性增大。

由此可见,当裂纹缺陷的深度和宽度保持不变,仅改变裂纹缺陷的位置,反射波信号的波包位置随之发生改变。实际距离与理论距离误差较小,全向 Lamb 波可用于铝板中裂纹缺陷的定位检测。

3　实验研究

实验检测带有裂纹的铝板,验证基于切线逼近法的双探头圆拟合裂纹定位方法用于铝板中裂纹定位检测的准确性。

3. 1　电磁超声检测系统

为了验证基于切线逼近法的双探头圆拟合裂纹定位方法的可行性,搭建实验平台并进行实验验证,实验装置主要包括:RAM-5000-SNAP 装置、PC、电磁超声换能器、示波器、铝板等。

实验使用 RAM-5000-SNAP 产生高频脉冲,施加在激励线圈上,在铝板上激发超声导波。超声导波在铝板表面及内部传播,当超声导波遇到裂纹时,发生波的反射,反射波被 EMAT 接收,将声信号转换成电压信号。PC 机用于参数的调整,示波器用于显示回波信号。

实验使用双探头进行裂纹检测,双探头位置不同,沿铝板直线运动。双探头运动过程中能够接收到裂纹的反射回波,通过分析回波信号时域波形得到反射位置。将双探头作为圆心,反射位置作为圆上一点,反射位置与探头之间的距离作为圆的半径。根据双探头的位置和反射位置圆拟合获得多个不同位置处的两组圆集合,通过两组圆集合共同的切线去除伪切线,得到唯一的裂纹切线。搭建的实验系统平台如图 11 所示。

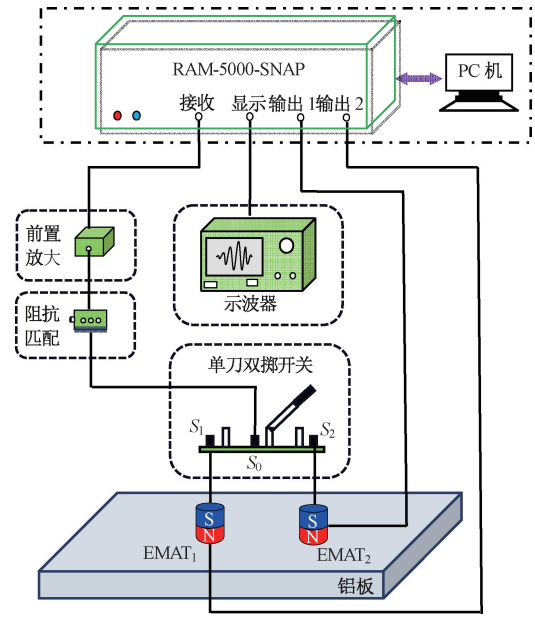


图 11　实验装置图

Fig. 11　Experimental setup diagram

3. 2　裂纹定位检测

使用收发一体式电磁超声换能器实验装置,进行全向 Lamb 波铝板裂纹缺陷定位检测实验。铝板的长×宽为 3 000 mm×1 500 mm。永磁铁提供静态偏置磁场,电磁超声全向 Lamb 波换能器线圈采用柔性电路板设计,工作导线间距为 3 mm。铝板中裂纹长×宽×高为 55 mm×2 mm×1. 5 mm。裂纹检测如图 12 所示。

图 12 中,实验铝板中刻有一个斜裂纹,通过改变电磁超声换能器的运动轨迹与裂纹的相对夹角作为不同走向的裂纹。其中 P_1 为电磁超声换能器与裂纹相对夹角 0°时换能器的运动轨迹,P_2 为电磁超声换能器与裂纹相对夹角 30°时换能器的运动轨迹,P_3 为电磁超声换能器

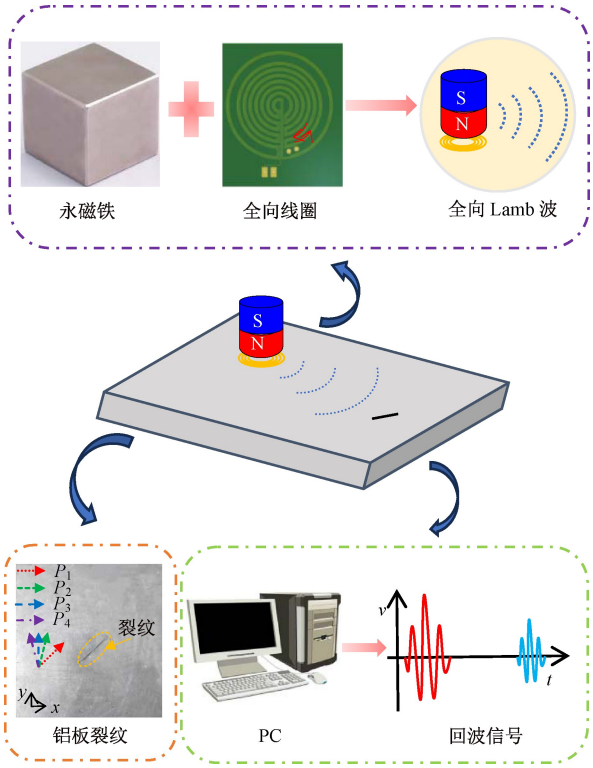
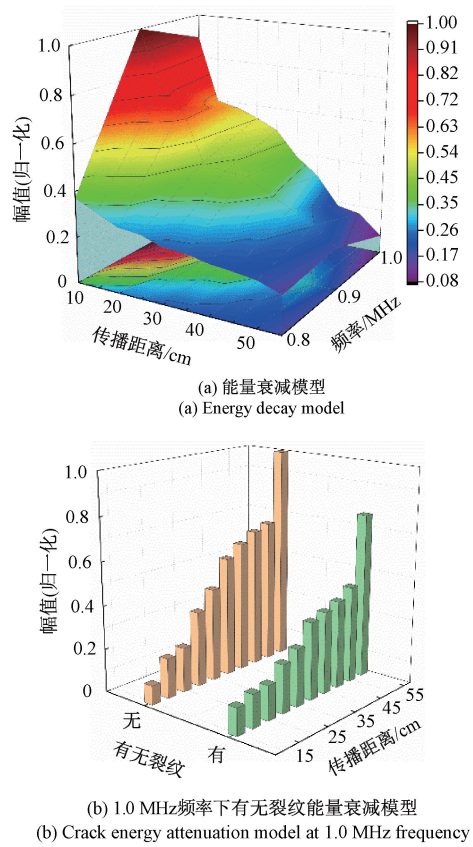


图 12 裂纹检测图

Fig. 12 Crack detection diagram



(a) 能量衰减模型
(a) Energy decay model

(b) 1.0 MHz频率下有无裂纹能量衰减模型
(b) Crack energy attenuation model at 1.0 MHz frequency

图 13 能量衰减模型示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the energy decay model

与裂纹相对夹角 45°时换能器的运动轨迹,P_4 为电磁超声换能器与裂纹相对夹角 60°时换能器的运动轨迹。全向线圈和永磁铁作用于铝板,激励产生全向 Lamb 波。

实验通过全向 Lamb 波传播距离和超声导波幅值之间的关系构建能量衰减模型,全向 Lamb 波能量衰减模型及铝板有无裂纹的全向 Lamb 波能量衰减模型如图 13 所示。

图 13(a)为 3 种激励频率下(0.8 MHz、0.9 MHz、1.0 MHz)接收 EMAT 接收到的全向 Lamb 波回波幅值随传播距离增大(10~55 cm)能量衰减的情况。当激励频率为 1.0 MHz 时,回波能量随传播距离增大衰减情况明显。故选用 1.0 MHz 激励频率建立全向 Lamb 波能量衰减模型,用于分析全向 Lamb 波回波能量随传播距离增大衰减的情况。

图 13(b)为 1.0 MHz 激励频率下有裂纹和无裂纹的能量衰减模型。图 13(b)中,在相同传播距离情况下,当铝板中存在裂纹时能量值明显小于铝板无裂纹时的能量值,由此可作为判断铝板中是否存在裂纹的依据。

根据衰减比确定全向 Lamb 波反射位置区域。由衰减比表达式及能量衰减求得,当全向 Lamb 波的反射位置位于裂纹尖端时,衰减比大于 50%,当全向 Lamb 波的反射位置位于裂纹中间区域时,衰减比小于 50%。选择衰减比为 50%作为反射位置的判断依据。

为验证基于切线逼近法的双探头圆拟合裂纹定位方法的准确性,将全向线圈与双探头分别置于铝板上,进行裂纹定位检测实验。由于声场具有指向性,在未知裂纹位置的情况下,使用单探头圆拟合裂纹定位方法存在伪切线,造成裂纹位置的误判,故使用双探头圆拟合裂纹定位方法进行裂纹定位检测。

将探头作为圆心,回波反射位置作为圆上一点,通过探头的位置和反射位置得到相应的圆,将探头沿直线运动得到多个不同位置处的一组圆集合。此时存在两条切线,其中一条切线为伪切线。故需要两个探头沿直线运动获取多个不同位置处的两组圆集合,通过两组圆共同的切线去除伪切线,得到唯一的裂纹切线,裂纹定位检测结果如图 14 所示。

图 14 中,探头运动轨迹和裂纹之间的相对夹角为 0°、30°、45°和 60°。E_1 为通过 $EMAT_1$ 运动轨迹得到的圆,E_2 为通过 $EMAT_2$ 运动轨迹得到的圆;C_1 为预测裂纹,C_2 为实际裂纹。使用双探头进行实验研究,双探头沿铝板直线移动,E_1 和 E_2 分别由两个不同位置的 EMAT 接收到的回波信号得到。通过 E_1 和 E_2 共同的切线确定裂纹的位置,基于切线逼近法的双探头圆拟合裂纹定位方法得到的切线即为预测裂纹的位置。

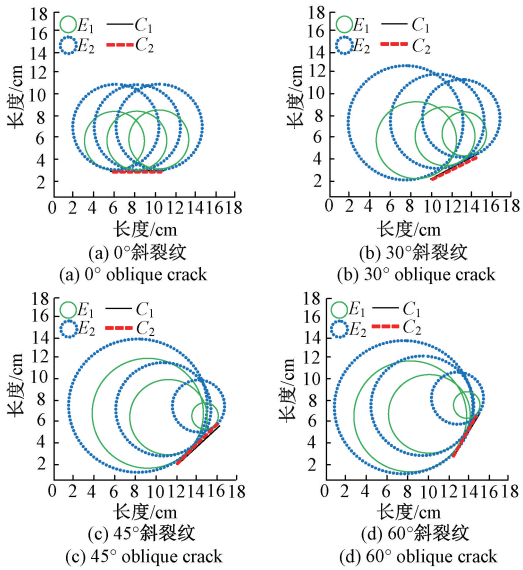


图 14　圆拟合裂纹定位检测结果图

Fig. 14　Circle fitting crack localization detection results

定义探头检测裂纹的起始位置为原点,每个相对夹角选取 5 个数据点。不同相对夹角的裂纹定位结果如表 2 所示。

表 2　不同夹角裂纹定位结果

Table 2　Crack localization results for different angles

相对夹角/(°)	探头距裂纹距离/mm	数据点				
		0	1	2	3	4
0	预测距离	100.1	100.1	100.2	100.2	100.2
	实际距离	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
30	预测距离	85.3	95.4	105.5	115.6	125.6
	实际距离	85.0	95.0	105.0	115.0	125.0
45	预测距离	132.5	142.1	151.5	161.3	171.1
	实际距离	135.0	145.0	155.0	165.0	175.0
60	预测距离	99.5	109.4	119.2	129.1	139.0
	实际距离	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0

由表 2 可知预测裂纹位置与实际裂纹位置接近,基于切线逼近法的双探头圆拟合裂纹定位误差结果如图 15 所示。

图 15 中,探头运动轨迹和裂纹之间的相对夹角为 0°、30°、45°和 60°。由图可知,相对夹角为 0°、30°和 60°的裂纹定位误差相对较小,误差在 1% 以内;相对夹角为 45°的裂纹定位误差相对较大,最大误差为 2.3%。

实验结果表明,基于切线逼近法的双探头圆拟合裂纹定位方法对铝板中裂纹定位误差较小,具有良好的精度,可用于铝板中裂纹定位检测。

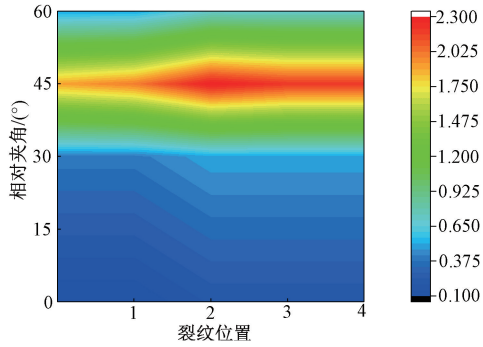


图 15　圆拟合裂纹定位误差等高线图

Fig. 15　Circle fitting crack localization error contour diagram

4　结　　论

针对电磁超声全向导波单探头检测时难以实现裂纹缺陷准确定位的问题,提出了一种基于切线逼近法的双探头圆拟合裂纹定位方法,去除裂纹位置分析的伪切线,实现准确定位检测。研究结果表明:

1)通过分析全向 Lamb 波能量衰减模型及能量衰减比可知,衰减比为 50% 时可作为反射位置的判断依据,可确定全向 Lamb 波反射的位置区域。

2)双探头圆拟合裂纹定位方法能够实现铝板中裂纹定位检测,仿真中裂纹定位误差在 1% 以内;实验中相对夹角为 0°、30°和 60°的斜裂纹定位误差相对较小,误差在 1% 以内;相对夹角为 45°的斜裂纹定位误差相对较大,最大误差为 2.3%,具有良好的检测精度。

3)双探头圆拟合裂纹定位方法能有效去除伪切线,避免裂纹位置的误判,为工件中裂纹定位检测提供了一种新方法。

本文提出的基于切线逼近法的双探头圆拟合裂纹定位方法实现了不同走向斜裂纹的检测,去除了伪切线,避免了不同走向斜裂纹位置的误判。工件中实际存在的多是鱼鳞状、折线状等形状的裂纹,需改进圆拟合裂纹定位方法实现更为复杂形状缺陷的定位检测。

参考文献

[1]　计鸿鑫, 任伟杰, 蒋先贤, 等. 镁合金板材弯曲回弹预测与控制研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(15): 1-13.

JI H X, REN W J, JIANG X X, et al. Research progress on the prediction and control of springback during bending of magnesium alloy sheets [J]. Materials

Reports, 2024, 38(15): 1-13.

[2] 董志波, 王程程, 李承昆, 等. 复杂载荷、极端环境下焊接结构疲劳寿命预测研究综述[J]. 中国机械工程, 2024, 35(5): 829-839.
DONG ZH B, WANG CH CH, LI CH K, et al. Review of research on fatigue life prediction of welded structures under complex loads and extreme environments[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(5): 829-839.

[3] 靳建辉, 张卿, 韩博, 等. 复杂裂纹涡流检测与评估方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024,45(2):280-288.
JIN J H, ZHANG Q, HAN B, et al. Research on eddy current testing and defect evaluation methods for complex cracks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024,45(2):280-288.

[4] ZHANG H, TENG F Y, WEI J T, et al. Damage location method of pipeline structure by ultrasonic guided wave based on probability fusion[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-14.

[5] 杨理践, 张佳, 邢燕好, 等. 一种管道中 T(0,1)模态单向电磁超声换能器[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 98-106.
YANG L J, ZHANG J, XING Y H, et al. A unidirectional T(0,1) mode electromagnetic acoustic transducer in pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 98-106.

[6] 黄祺凯, 石文泽, 卢超, 等. 基于编码压缩的钢板电磁超声 Lamb 波检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 117-127.
HUANG Q K, SHI W Z, LU CH, et al. Research on the detection method of the steel plate with Lamb wave EMATs based on phase coded pulse compression[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 117-127.

[7] 王松浩, 胡芷逸, 张应红, 等. 超声导波管道缺陷定位方法研究[J]. 应用声学, 2022, 41(4): 558-567.
WANG S H, HU ZH Y, ZHANG Y H, et al. Ultrasonic guided waves for defect location in pipeline[J]. Journal of Applied Acoustics, 2022, 41(4): 558-567.

[8] ANAND C, GROVES R M, BENEDICTUS R. Modeling and imaging of ultrasonic array inspection of side drilled holes in layered anisotropic media[J]. Sensors, 2021, 21(14): 4640.

[9] LIU X, ZENG X P, YU Y H, et al. Localization and quantification of different types of defects in composite structures with SMART sensor layers[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2022, 29(10): 1-24.

[10] TANG B H, WANG Y M, GONG R Q, et al. Sparse reconstruction of ultrasonic guided wave signals of fluid-filled pipes by multistrategy hybrid DBO-OMP using dispersive Hanning-windowed chirplet model[J]. Measurement, 2024, 231: 114648,1-12.

[11] REYAZ S U, BENIWAL S, GANGULI A. Application of plane wave imaging and processing for measurement of reflectors in concrete[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 5014311.

[12] 刘小峰, 张天瑀, 张春兵, 等. 基于交叉递归率的复材板损伤定位成像方法[J]. 中国机械工程, 2023, 34(8): 940-947.
LIU X F, ZHANG T Y, ZHANG CH B, et al. Location imaging of composite plate damage based on cross recurrence rate[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(8): 940-947.

[13] 刘玉冰, 陶传义, 蒋宇飞, 等. 基于光纤光栅传感器网络的平面声发射检测与定位[J/OL]. 光电子·激光, 1-9[2024-07-07]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1182.o4.20240408.1944.010.html.
LIU Y B, TAO CH Y, JIANG Y F, et al. Plane acoustic emission detection and location based on fiber bragg grating sensor network[J/OL]. Journal of Optoelectronics · Laser, 1-9[2024-07-07]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1182.o4.20240408.1944.010.html.

[14] YAN R G, WANG W J, DING R, et al. Study on the method of establishing the probability of detection curve for ultrasonic detection on railway hollow axle cracks[J]. Measurement, 2024, 224: 113866,1-11.

[15] 卢超, 郭伟, 石文泽, 等. 高温声学检测技术的发展、应用与挑战[J]. 振动.测试与诊断, 2024, 44(1): 1-10,193.
LU CH, GUO W, SHI W Z, et al. Development, application and challenge of high temperature acoustic testing technology[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(1): 1-10,193.

[16] 石文泽, 邵纬桑, 卢超, 等. 高温铝合金仅线圈式电

磁超声检测方法研究[J/OL]. 机械工程学报, 1-13 [2024-05-27]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/11. 2187. TH. 20240305. 1500. 004. html.

SHI W Z, SHAO W S, LU CH, et al. Study on coil-only electromagnetic ultrasonic testing method for high-temperature aluminum alloy [J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, 1-13 [2024-05-27]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/11. 2187. TH. 20240305. 1500. 004. html.

[17] ZHANG Y H, LIU W L, LI N, et al. Design of a new type of omnidirectional shear-horizontal EMAT by the use of half-ring magnets and PCB technology [J]. Ultrasonics, 2021, 115: 106465.

[18] CHO H, CHOI S, LISSENDEN C J. Nondestructive inspection results from mockups of spent nuclear fuel storage canisters using shear-horizontal waves generated by an electromagnetic acoustic transducer[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems, 2020, 3(2): 021001,1-9.

[19] 刘轩, 吕炎, 边策, 等. 管道电磁超声传感器阵列检测技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(11): 24-32.

LIU X, LYU Y, BIAN C, et al. Electromagnetic acoustic transducer array of pipeline inspection technology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(11): 24-32.

[20] 赵佰秋, 孟立新, 于笑楠, 等. 多通道超声的双向单程伪距测量研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 174-180.

ZHAO B Q, MENG L X, YU X N, et al. Research on dual one-way pseudorange measurement of multi-channel ultrasound[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(9): 174-180.

[21] 邢燕好, 王振宇, 张佳, 等. 电磁超声全向导波换能器辐射控制方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(10): 74-85.

XING Y H, WANG ZH Y, ZHANG J, et al. Research on the radiation control method of electromagnetic ultrasonic omnidirectional guided wave transducer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(10): 74-85.

[22] 刘骁, 沙正骁, 梁菁. 基于深度学习的材料超声回波衰减预测方法[J]. 应用声学, 2023, 42(3): 529-539.

LIU X, SHA ZH X, LIANG J. Material ultrasonic echo attenuation prediction method based on deep learning[J]. Journal of Applied Acoustics, 2023, 42(3): 529-539.

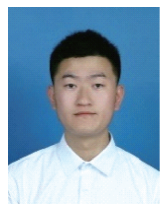
[23] YU H F, LU L J, QIAO P ZH. Localization and size quantification of surface crack of concrete based on Rayleigh wave attenuation model[J]. Construction and Building Materials, 2021, 280: 122437,1-17.

作者简介

邢燕好,2002 年于沈阳工业大学获得学士学位,2005 年于沈阳工业大学获得硕士学位,2018 年于沈阳工业大学获得博士学位,现为沈阳工业大学副教授,主要研究方向为电磁超声检测技术和压电超声波检测技术相关理论及应用、无损检测仪器设计与开发。

E-mail: xingyanhao@126.com

Xing Yanhao received his B. Sc. degree in 2002 from Shenyang University of Technology, received his M. Sc. degree in 2005 from Shenyang University of Technology, received his Ph. D. degree in 2018 from Shenyang University of Technology. He is currently an associate professor in Shenyang University of Technology. His main research interests include electromagnetic ultrasonic detection technology, piezoelectric ultrasonic detection technology theory and application, nondestructive testing equipment design and development.



陈伟屹,2021 年于德州学院获得学士学位,现为沈阳工业大学硕士研究生,主要研究方向为电磁超声检测技术理论及应用。

E-mail: 1131255193@qq.com

Chen Weiyi received his B. Sc. degree in 2021 from Dezhou University. He is currently a master candidate in Shenyang University of Technology. His main research interests include electromagnetic ultrasonic detection technology theory and application.

张佳(通信作者),2012 年于黑龙江科技大学获得学士学位,2015 年于沈阳工业大学获得硕士学位,2021 年于沈阳工业大学获得博士学位,现为沈阳工业大学副教授,主要研究方向为电磁超声检测技术、压电超声检测技术理论及应用。

E-mail: zhangjia0929@126.com

Zhang Jia (Corresponding author) received her B. Sc. degree in 2012 from Heilongjiang University of Science and Technology, received her M. Sc. degree in 2015 from Shenyang University of Technology, received her Ph. D. degree in 2021 from Shenyang University of Technology. She is currently an associate professor in Shenyang University of Technology. Her main research interests include electromagnetic ultrasonic detection technology, piezoelectric ultrasonic detection technology theory and application.

靳海玉,2010 年于中国计量学院获得学士学位,现为新疆阿勒泰地区特种设备检验检测所所长、高级工程师,主要研究方向为特种设备检验、无损检测技术相关理论及应用。

E-mail: 407309797@ qq. com

Jin Haiyu received his B. Sc. degree from China Jiliang University in 2010. He is currently a director and senior engineer in Xinjiang Altay Region Special Equipment Inspection and Testing Institute. His main research interests include special equipment inspection, non-destructive testing technology related theory and application.

林红伟,2003 年于吉林化工学院获得学士学位,现为吉林市特种设备检验中心(吉林市特种设备事故调查服务中心)承压类总检验师、高级工程师、中国特种设备检验协会压力管道检验工作委员会委员、中国特种设备检验协会危化品常压容器检验工作委员会委员,拥有 GS、RQS、GDS 检验人员资质,主要研究方向为特种设备检验、无损检测技术相关理论研究及应用。

E-mail: linhongwei1651@ 163. com

Lin Hongwei received his B. Sc. degree from Jilin Institute of Chemical Technology in 2003. He is currently a pressure class chief inspector, senior engineer, China Special Equipment Inspection Association Pressure Piping Inspection Committee, China Special Equipment Inspection Association of Hazardous Chemicals Pressure Vessel Inspection Committee, with GS, RQS, GDS inspector qualifications in Jilin Special Equipment Inspection Center (Jilin Special Equipment Accident Investigation Service Center). His main research interests include special equipment inspection, non-destructive testing technology related theory and application.