

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-17

飞机铝合金薄壁板裂纹电磁超声导波—涡流 复合检测方法研究

马勉东¹, 余宏伟¹, 马荣¹, 周鑫², 范学领¹

(1. 西安交通大学 航天航空学院, 西安 710049)

(2. 空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038)

摘要: 飞机在长期服役过程中, 铝合金薄壁板会萌生大量裂纹, 需要进行快速有效的检测。基于电磁超声和电磁涡流技术, 提出一种面向飞机铝合金薄壁板的电磁超声导波—涡流复合检测方法, 并对大幅面铝合金薄壁板进行裂纹复合检测试验研究, 分析电磁超声导波快速检测能力和探头特性的影响, 评估涡流对薄壁件缺陷的检测的有效性。结果表明: 本文提出的检测方法一定程度上减小了有效检测面积, 提高了检测效率, 实现了铝合金薄壁板缺陷全方位、高效率检测; 探头提高距离和磁体数量的变化显著影响检测信号的强度和质量, 绝对式涡流检测探头有两个较好的检测频段, 差动式涡流检测探头最佳检测频率段为 500~1 000 kHz。

关键词: 铝合金板; 电磁超声; 电磁涡流; 无损检测; 复合检测

中图分类号: V267

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

Research on electromagnetic ultrasonic guided wave and eddy current composite detection method for cracks in aircraft aluminum alloy thin-wall sheet

MA Miandong¹, YU Hongwei¹, MA Rong¹, ZHOU Xin², FAN Xueling¹

(1. School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2. College of Aeronautical Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: During the long-term service of aircraft, aluminum alloy thin-walled plates will generate a large number of cracks, which requires rapid and effective detection. Based on electromagnetic ultrasound and electromagnetic eddy current technology, an electromagnetic ultrasound guided wave eddy current composite detection method for aircraft aluminum alloy thin-walled plates is proposed, and the crack composite detection experiments on large-area aluminum alloy thin-walled plates are studied. The influence of electromagnetic ultrasound guided wave rapid detection ability and probe characteristics is analyzed, and the effectiveness of eddy current in detecting defects in thin-walled parts is evaluated. The results show that the proposed detection method can reduce the effective detection area to a certain extent, improve the detection efficiency, and achieve all-round and efficient detection of defects in aluminum alloy thin-walled plates. The changes in the probe lift distance and the number of magnets significantly can affect the strength and quality of the detection signal. Absolute eddy current detection probes have two good detection frequency ranges. The optimal detection frequency range for differential eddy current detection probes is 500 kHz to 1 000 kHz.

Key words: aluminum alloy plate; electromagnetic ultrasonic; electromagnetic eddy current; non-destructive detection; composite detection

收稿日期: 2023-12-01; 修回日期: 2024-02-25

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-IV-0003-0070)

通信作者: 范学领(1978-), 男, 博士, 教授。E-mail: fanxueling@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 马勉东, 余宏伟, 马荣, 等. 飞机铝合金薄壁板裂纹电磁超声导波—涡流复合检测方法研究[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(X): 1-17.

MA Miandong, YU Hongwei, MA Rong, et al. Research on electromagnetic ultrasonic guided wave and eddy current composite detection method for cracks in aircraft aluminum alloy thin-wall sheet[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(X): 1-17. (in Chinese)

0 引言

薄壁结构作为飞机的基本结构形式,由薄型板件和加强构件组成,是构成气动外形和承受载荷的重要结构^[1]。其中,薄型铝合金板主要用于制作蒙皮、进气涵道、壁板等薄壁大幅面零件^[2-3]。然而,飞机在长期服役过程中,铝合金薄壁件会萌生裂纹,严重时会导致断裂失效,产生灾难性后果^[4-5]。因此,飞机服役一段时间后要要进行大修,但仅依靠目视方法效果不够,迫切需要发展一种可靠的检测手段对薄壁件实施在线检测。

电磁超声检测技术具有检测速度快、效率高、环境适应性强等特点,被广泛应用于金属管材、板材等缺陷检测领域,但存在近表面盲区,检测分辨率和定量精度低。相比于电磁超声检测,电磁涡流对于近表面缺陷具有较高的检测精度^[6-7],但检测效率较低。研究发现,电磁超声检测技术和电磁涡流检测技术都是基于电磁感应原理,电磁超声和涡流的复合技术能够达到互补的检测效果^[8]。田明明等^[9]提出了一种基于小波分析的脉冲涡流/电磁超声复合无损检测方法,实现了对表面缺陷和底部减薄缺陷的同步检出;Guo等^[10]将电磁超声和脉冲涡流的复合检测技术应用于管道的无损检测,能够监测厚度变化和表面缺陷;Uchimoto等^[11]开发了一种电磁超声和涡流的双探头,定量评估了探针测量壁薄宽度和深度的能力;刘素贞等^[6]基于电磁超声和涡流的复合检测技术,实现了对金属材料表面及内部缺陷的检测。上述研究者对电磁超声和涡流复合式检测技术^[12]在飞机薄壁件的缺陷检查中的应用提供了基础,但目前复合探头检测模式是利用电磁超声和涡流分别检测内部和近表面缺陷,针对铝合金薄壁件缺陷仍然采用涡流检测模式,检测效率低,因此发展针对飞机大幅面薄壁铝合金板的近表面缺陷复合检测方法具有重要意义。

本文提出一种电磁超声导波-涡流复合检测方法,对薄壁铝合金板开展裂纹复合检测试验研究,探究电磁超声检测相对位置及探头特性对检测结果的影响,分析对薄壁件缺陷的检测能力,实现薄壁大幅面零件裂纹的有效检测,验证电磁超声和电磁涡流无损检测技术在飞机薄壁件上的实用性。

1 电磁超声导波-涡流复合检测方法及其原理

为同时实现大型薄壁大幅面铝合金零件(如蒙皮,进气涵道,壁板等)缺陷或损伤的高效和精确检测,提出电磁超声导波-涡流复合检测方法,其总体思想为,首先利用电磁超声导波检测技术单次检测面积大、检测速度快的特点^[13],基于电磁超声导波缺陷发射法或透射法,实现大型薄壁大幅面铝合金零件缺陷快速检测和定位。进一步为解决导波快速扫查时分辨率低、缺陷定量精度不足等问题,采用电磁涡流检测技术作为补充,选用灵敏度较高的脉冲涡流式检测方法^[14],对超声检测缺陷大致区域进行高分辨率的逐点检测,从而实现裂纹缺陷快速高效检测。

针对大幅面薄壁板材内部或表面缺陷,复合检测机制如图1所示。首先采用电磁超声导波检测技术,其是一种运用电磁感应原理激发和接收超声波的检测方法^[15-16],电磁铁上的线圈通电后,产生的磁场会在金属试件中产生涡流,静磁场和涡流相互作用产生洛伦兹力,三者之间激发出超声波,其声波沿着结构四周或长宽方向传播,基于透射法(一发一收模式)或缺陷发射法(自激自收模式),利用正交扫描方式,可以实现快速缺陷定位识别(如图2所示),可选用Lamb波、表面波或SH波进行检测。超声导波正交线性扫描,虽然检测效率高,但缺陷分辨率相对较低,可以用于快速锁定缺陷存在的可疑区域。然后采用电磁涡流检测技术作为补充,选用灵敏度较高的脉冲涡流式检测方法,此方法也是运用电磁感应原理,通过试件中产生的涡流引起次生磁场超声,诱发线圈形成感应电势^[15]。对检测缺陷可疑区域进行高分辨率的逐点检测,从而实现裂纹缺陷的快速高效检测。

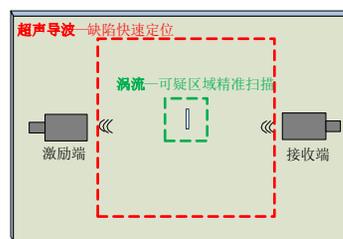


图1 薄壁件电磁超声导波-涡流复合检测机制
Fig. 1 Electromagnetic ultrasonic guided wave and eddy current composite testing mechanism for thin wall components

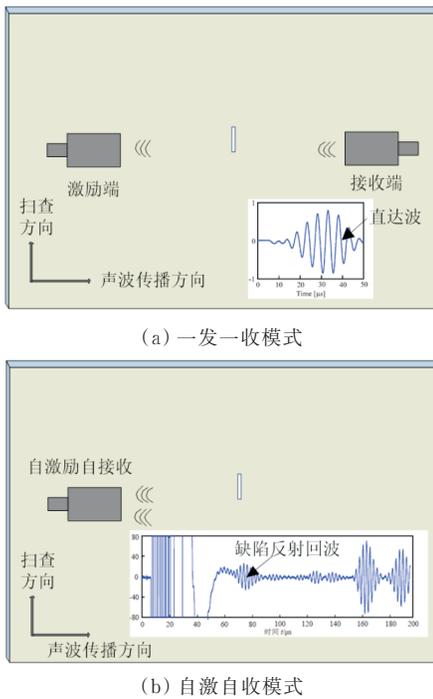


图2 超声导波探头布置方式

Fig. 2 Layout of ultrasonic guided wave probes

2 铝合金薄壁板电磁超声导波-涡流复合检测实验研究

2.1 试件设计

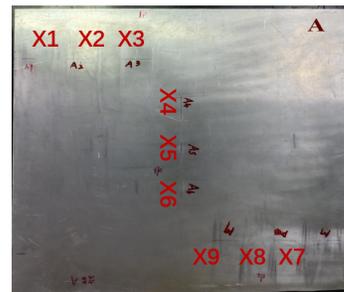
针对飞机的薄壁大幅面零件,选用尺寸为 500 mm×500 mm×2 mm(长×宽×厚)的铝合金板为模拟试验件,其中,铝合金薄板标识为 A,模拟检测件尺寸和缺陷参数如表 1 所示。每个平板需检测共九个缺陷,如表 2 所示,对不同尺寸缺陷进行编号,缺陷在板材上分布如图 3 所示。由于电磁检测基于涡流效应,对于表面是否存在漆层对于检测结果影响忽略不计,故本实验中模拟试件均无漆层。

表1 模拟件尺寸及缺陷
Table 1 Size and defects of samples

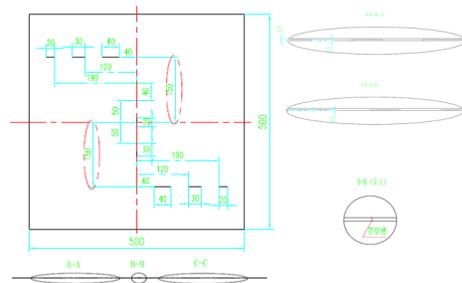
材料	板材尺寸/mm	裂纹尺寸/mm	备注
铝合金	500×500×2	宽度 0.2	薄壁件 A
		长度 20/30/40 深度 0.5/1/2 (贯穿)	

表2 不同尺寸缺陷编号
Table 1 Defect numbers of different sizes

编号	尺寸/mm
X1	20×1×0.2
X2	30×1×0.2
X3	40×1×0.2
X4	40×2×0.2
X5	20×2×0.2
X6	30×2×0.2
X7	20×0.5×0.2
X8	30×0.5×0.2
X9	40×0.5×0.2



(a) 检测部位图



(b) 缺陷在板材上的尺寸标注

图3 缺陷在板材上分布图

Fig. 3 Distribution of defects on the board

2.2 检测实验系统

电磁超声和电磁涡流复合检测试验系统基于缺陷发射法,以电磁超声检测系统为主体,主要有信号发射模块和信号接收模块两部分组成,信号发射模块包括信号发生器、功率放大器、阻抗匹配盒、复合探头等,接收模块包括前置放大器、采集卡、PC、滤波器^[8, 17],如图 4 所示。

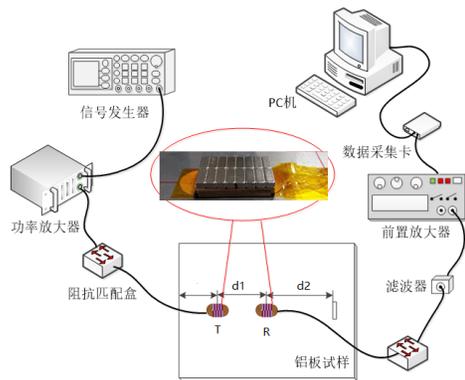


图4 电磁超声和涡流检测系统

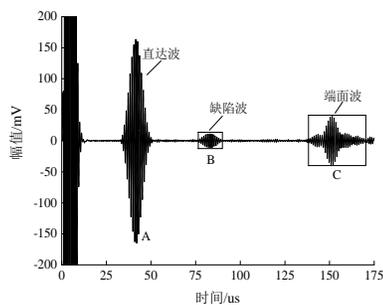
Fig. 4 Electromagnetic ultrasonic and eddy current testing system

2.3 铝合金薄壁板电磁超声导波快速检测研究

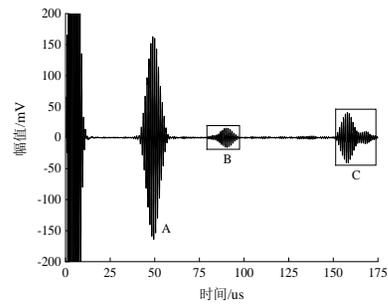
为了探究铝合金薄壁板电磁超声导波快速检测能力,优化检测系统性能,通过研究探头相对缺陷不同距离和角度的影响能够确定系统的检测灵敏度,揭示在不同位置上的检测性能,为电磁超声检测系统的设计和 optimization 提供关键信息,提高检测系统的实用性。

2.3.1 T-D-R不同距离对检测信号影响

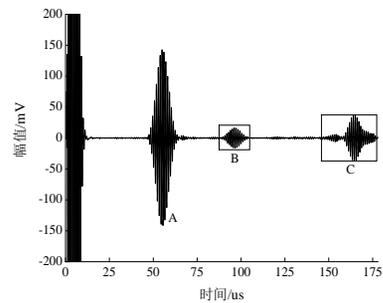
以 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 铝合金板的 X7 (最小尺寸缺陷) 为研究对象,在检测过程中,保证每次检测时的正弦激励频率为 1 MHz 不变,电磁超声波形式选择 SH_0 波。将激励探头 T 与接收探头 R 正对,设置缺陷 D 距激励探头距离 d_2 为 60 mm ,仅改变 T/R 距离 d_1 ;保持激励探头 T 位置不变,移动接收探头,使得 T/R 距离 d_1 从 115 mm ,以 20 mm 为步进逐渐增加至 235 mm 。同一缺陷,声波从 T 传播到 D,再由 D 传播到 R, T-D-R 之间距离不同时,实验结果如图 5 所示,可以看出:随着 T-D-R 距离增大,检测信号直达波和缺陷波信号的幅值变化不大,验证超声导波传播距离远,衰减小的特性,电磁超声导波能够实现大幅面的缺陷快速检测。



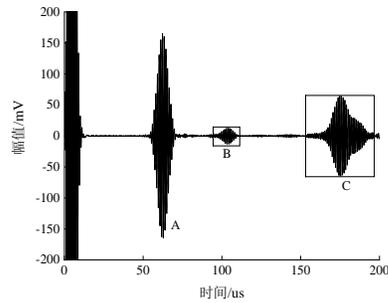
(a) R-T 间距 115 mm



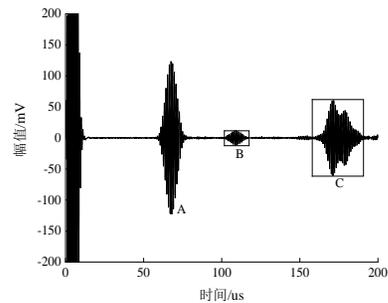
(b) R-T 间距 135 mm



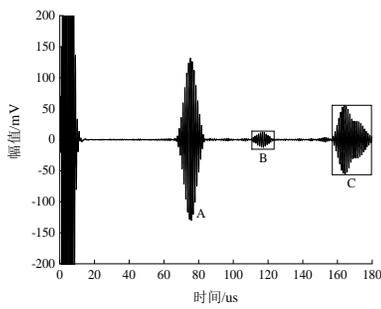
(c) R-T 间距 155 mm



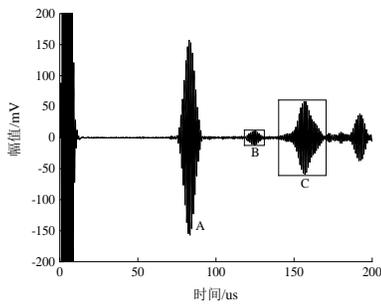
(d) R-T 间距 175 mm



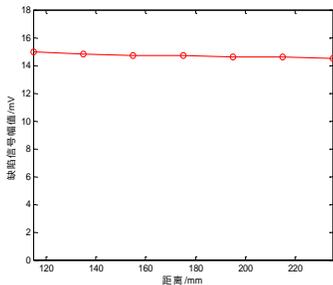
(e) R-T 间距 195 mm



(f) R-T 间距 215 mm



(g) R-T 间距 235 mm

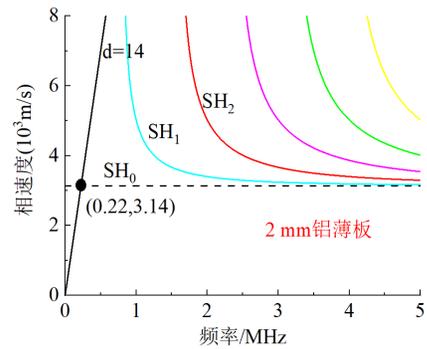


(h) R-T 间距与缺陷波幅值

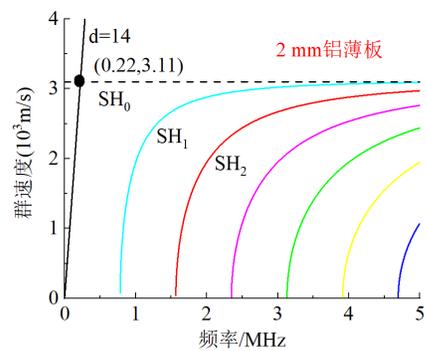
图 5 探头正对不同距离的检测结果

Fig. 5 Detection results of probe facing different distances

2 mm 铝合金薄板的频散曲线如图 6 所示,可以看出:SH₀波的波速,基于波包传播时间,可以计算出缺陷位置。试验结果表明,电磁超声导波传播速度大于 3 000 m/s,电磁涡流传播速度小于 50 m/s^[18-19],能够实现大幅面铝合金板的快速检测;基于时间飞行法(TOF),可以计算出缺陷距离探头的距离,通过椭圆或双曲线定位法,电磁超声导波可实现缺陷位置快速定位。



(a) 相速度



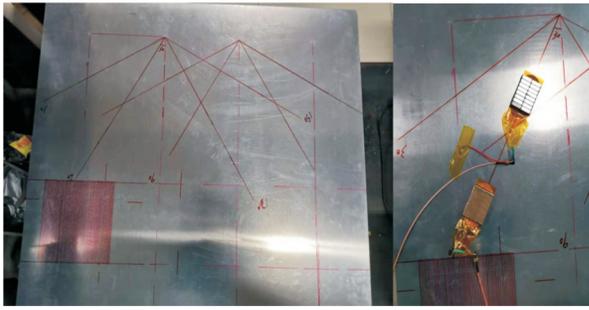
(b) 群速度

图 6 2 mm 铝合金薄板的频散曲线

Fig. 6 Dispersion curve of 2 mm aluminum alloy thin plate

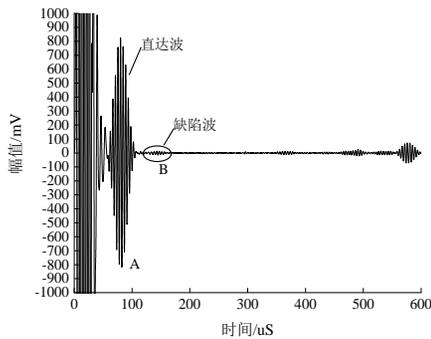
2.3.2 缺陷不同角度对检测信号影响

以 500 mm×500 mm×2 mm 铝合金板的 X7 (最小尺寸缺陷)为研究对象,在检测过程中,保证每次检测时的正弦激励频率为 1 MHz 不变,电磁超声波形式选择 SH₀波。激励和接收探头对齐平行(如图 7 所示),且探头与缺陷角度选取 30°,60°,90°,120°,150°,在检测过程中保证探头与缺陷相对距离固定不变,不同角度检测铝薄板缺陷的试验结果如图 8 所示,可以看出:缺陷角度对检测信号具有显著影响,当探头正对缺陷时,即探头与缺陷呈 90°时,缺陷回波幅值最大;当探头与缺陷夹角由 30°变为 150°的过程中,缺陷回波幅值呈现先增大后减小的趋势。这是由于探头与缺陷存在夹角,信号会在界面处发生反射和折射,减弱检测信号。

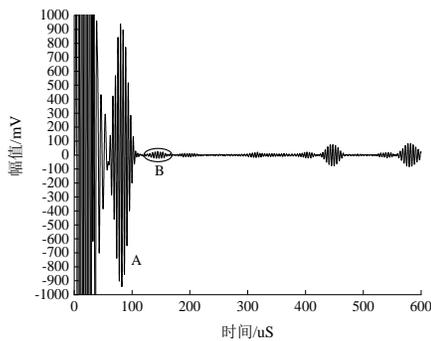


(a) 探头与缺陷夹角划分 (b) 探头检测实物

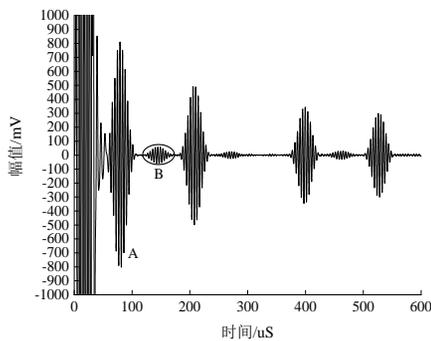
图 7 不同角度检测铝合金薄板缺陷
Fig. 7 Detection of defects in aluminum alloy thin plates from different angles



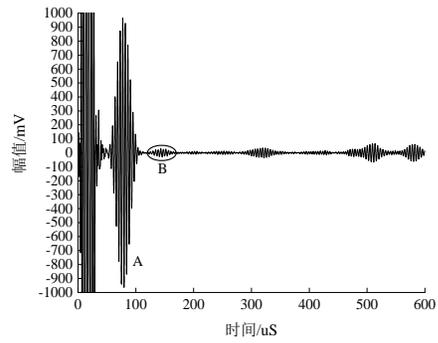
(a) 30°



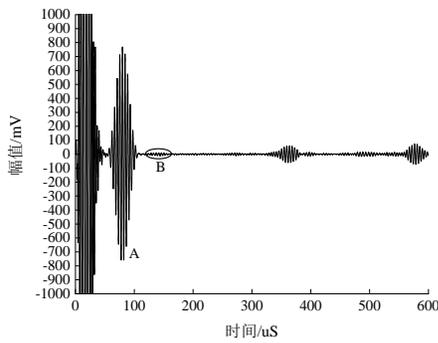
(b) 60°



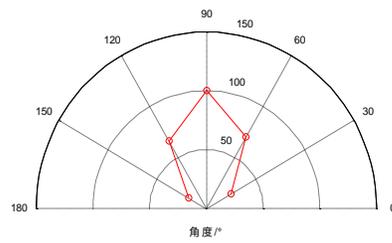
(c) 90°



(d) 120°



(e) 150°



(f) 不同检测角度的缺陷信号幅值

图 8 铝薄板不同角度 SH₀波检测结果
Fig. 8 SH₀ wave detection results of aluminum thin plates at different angles

选用 500 mm × 500 mm × 2 mm 的铝薄板进行研究,分析探头与缺陷相对位置对检测结果的影响,研究表明,超声导波在传播时衰减小,传播距离远,缺陷与探头距离增大对检测信号影响较小,能够实现大幅面结构中缺陷快速检测和定位;缺陷角度对检测信号影响显著,检测时应尽量减小缺陷与检测信号角度。

2.4 电磁超声探头特性对检测结果影响

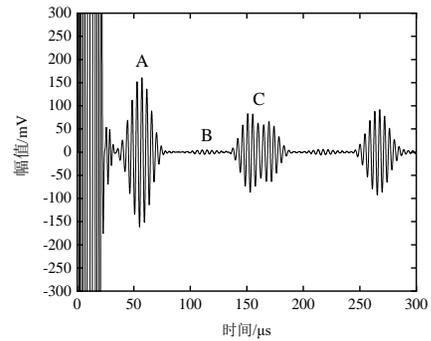
在电磁超声检测系统优化过程中,电磁超声探头特性也直接影响检测系统的性能和可靠性,其中探头提离距离和磁体数量的变化可能导致检测信号的强度和质量发生变化。通过研究这些影响,可以有助于确定合适的提离距离和磁体数量,以获得较强和清晰的检测信号。

2.4.1 提离距离对检测信号的影响

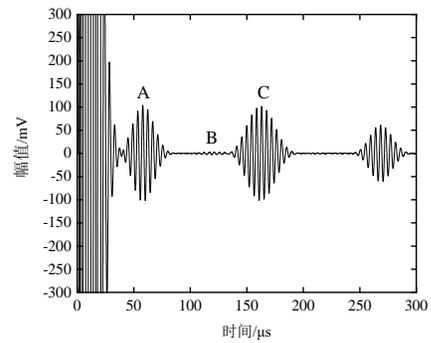
SH₀导波探头检测铝合金薄板实物如图9所示,由频散曲线得激励频率为0.22 MHz,选用铝合金薄板X3裂纹进行检测,保证激励频率不变,改变EMAT探头提离,实验结果如图10所示。SH₀波探头在铝薄板的提离实验中,每间隔0.5 mm检测一次信号,当探头提离距离在0~2 mm时,探头均可在铝薄板上检测到缺陷波信号,但其信号幅值会随着提离距离的增加而逐渐衰减。当提离距离到2.5和3.0 mm时缺陷波信号消失,且直达波与端面波信号也随提离距离增加而大幅度减小。



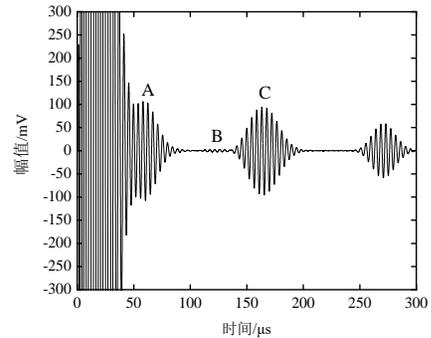
图9 SH₀导波探头检测铝薄板缺陷
Fig. 9 SH₀ guided wave probe detecting defects in aluminum thin plates



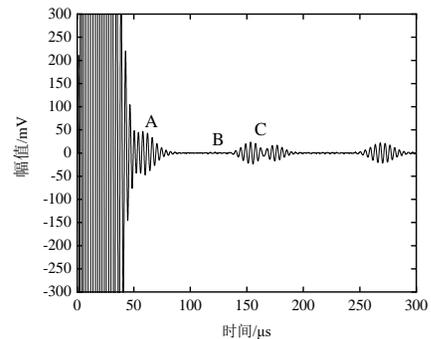
(b) 探头提离 0.5 mm



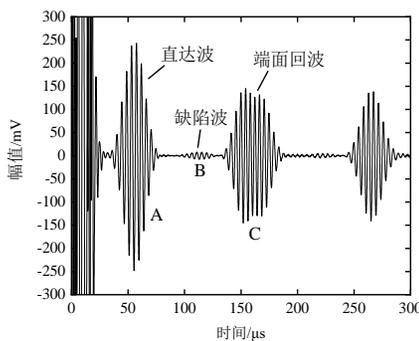
(c) 探头提离 1 mm



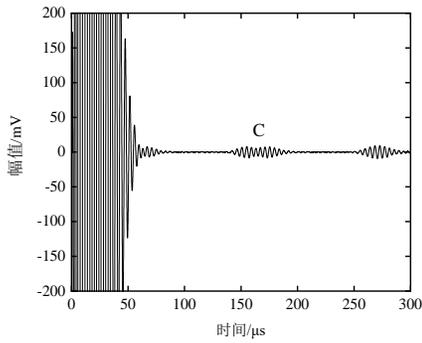
(d) 探头提离 1.5 mm



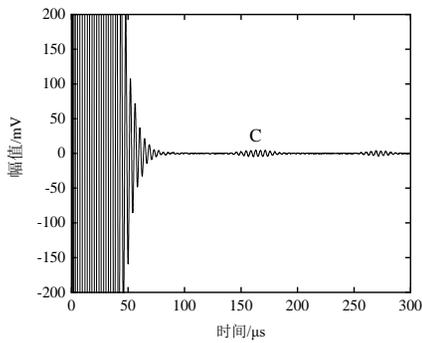
(e) 探头提离 2 mm



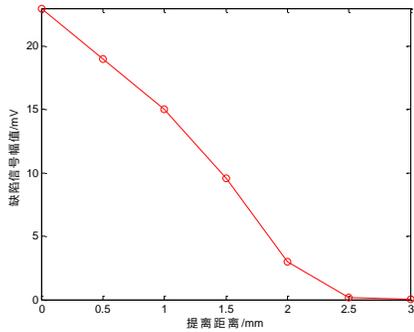
(a) 探头提离 0 mm



(f) 探头提高 2.5 mm



(g) 探头提高 3 mm



(h) 不同提高距离的缺陷信号幅值

图 10 探头不同提高距离的检测结果
Fig. 10 Detection results of probe with different lifting distances

2.4.2 磁铁数量对检测信号的影响

以铝薄板为实验对象,其尺寸为 500 mm×500 mm×2 mm,SH₀波探头实物如图 11 所示。该 SH₀波探头采用 8 对磁铁,由频散曲线得工作点为 (0.22, 3.14),即激励频率定为 0.22 MHz。改变 SH₀波探头磁铁数量,保证探头相对位置不变,以 X3 裂纹为实验对象检测铝合金薄板得到的结果如图 12 所示,可以看出:SH₀波探头的磁极对数数量对声波信号的影响十分明显,在铝薄板上探头磁

铁对数越多,得到的信号幅值越大。通过对比铝薄板不同磁极对数时所接收的声波信号,可明显发现当磁铁对数为 6、8 时,铝薄板的超声波信号幅值明显较大;当磁极对数为 8 时,铝薄板的缺陷波信号明显;当磁极对数减少至 2、4 时,回波信号幅值显著减小,但铝薄板上仍有相对微弱的缺陷波信号。由此可得在 SH₀波探头的磁铁需要达到一定数量才能满足电磁超声导波快速检测需求。

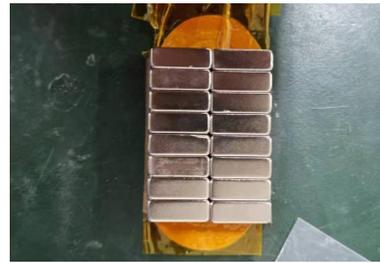
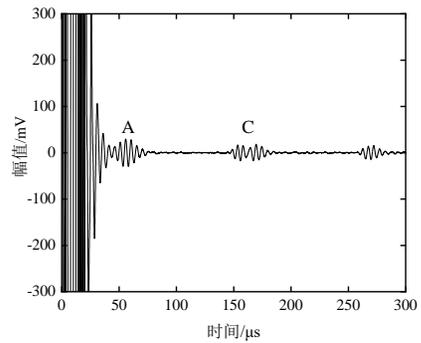
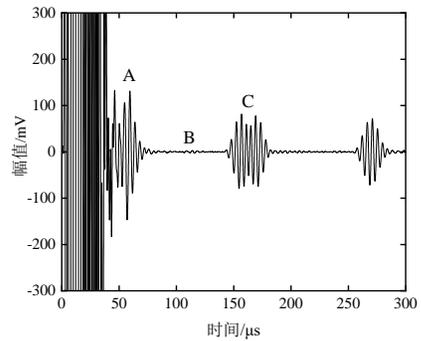


图 11 SH₀波探头实物图
Fig. 11 Physical image of SH₀ wave probe



(a) 磁铁对数 2 对



(b) 磁铁对数 4 对

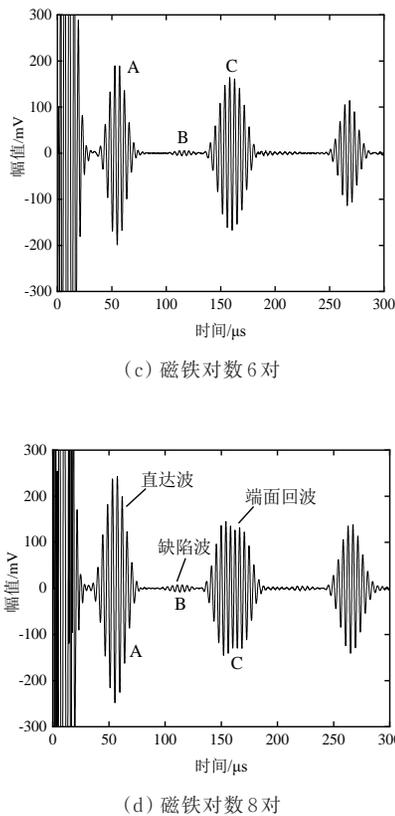


图 12 不同磁铁对数的 SH0 波探头检测结果
Fig. 12 Detection results of probe with different magnet pairs

本文分析了探头提离距离和磁体数量对检测结果的影响,研究表明,探头提离距离和磁体数量的变化显著影响检测信号的强度和质量,提离距离的增加会导致信号幅值的衰减,工程中应减小探头提离距离;合理配置多对磁铁可以帮助提高激励磁场的均匀性,从而更好地覆盖被检测区域。

2.5 铝合金薄壁板裂纹电磁涡流检测结果

涡流探头种类繁多,按照线圈的绕制方式可分为绝对式涡流检测探头和差动式涡流检测探头^[20],后来利用数字电路分时复用技术发展了多通道涡流检测技术^[21-22]。为探究涡流检测探头对飞机薄壁铝合金板裂纹检测的有效性,以铝合金薄板模拟件裂纹为研究对象,开展了涡流检测试验,对比分析了噪声信号和缺陷信号的信号特征,验证铝合金薄板裂纹涡流检测的可行性。在检测结果中,左侧为检出信号,X为实部,Y为虚部。右侧为检出信号的李萨如图,横纵坐标分别对应信

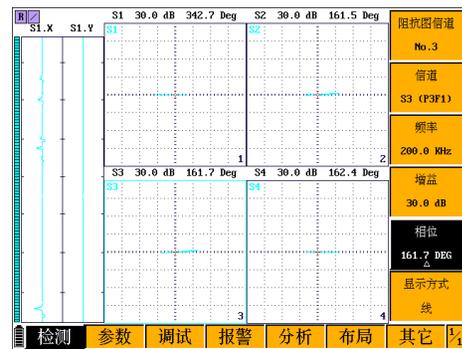
号实部和虚部。

2.5.1 平面四通道涡流检测探头检测结果

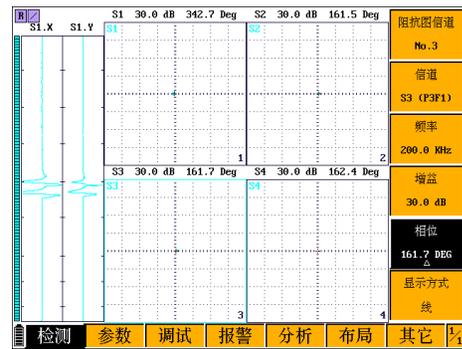
在多通道涡流检测方面,选用平面四通道涡流检测探头检测^[22],工艺参数如表 3 所示。平面四通道涡流探头在铝合金平板上的晃动信号、无缺陷区域信号如图 13 所示。检测结果表明,利用平面四通道涡流探头在铝合金平板上检测,晃动信号相位水平,无缺陷区域噪声信号幅值小于 0.2 格。利用平面四通道涡流检测探头分别对铝合金板上的缺陷进行检测,铝合金平板上缺陷的涡流检测结果如图 14 所示。缺陷检测结果表明:铝合金薄板缺陷 X1、X2、X3、X7、X8、X9 的涡流检测幅值均在 1~2 大格范围内,X4、X5、X6 的涡流检测信号均为超屏信号。结果表明该探头可有效检出平板上的缺陷。

表 3 平面四通道涡流检测探头检测工艺参数
Table 3 Process parameters for planar four channel eddy current detection probe detection

频率/ KHz	驱动电 压/V	前置放大器 增益/dB	后置放大器 增益/dB	数字滤 波点数	高通滤 波/Hz
200	5	15	30	3	2

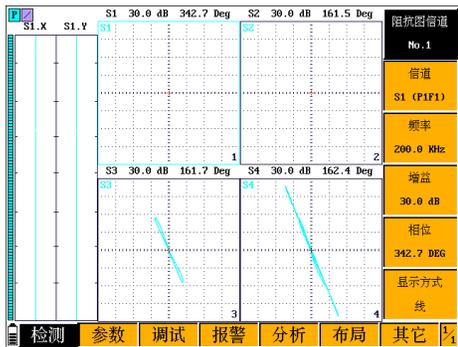


(a) 铝合金薄板晃动信号

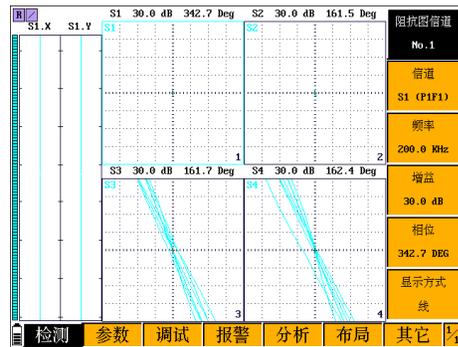


(b) 铝合金薄板无缺陷信号

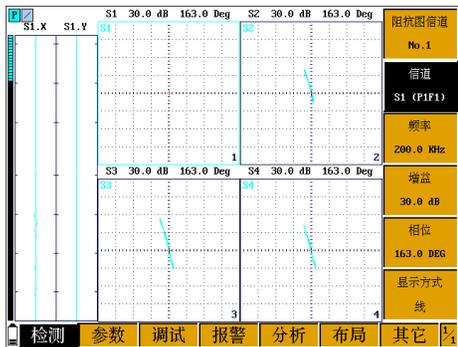
图 13 铝合金无缺陷区域涡流检测结果
Fig. 13 Eddy current testing results for defect free areas of aluminum alloy



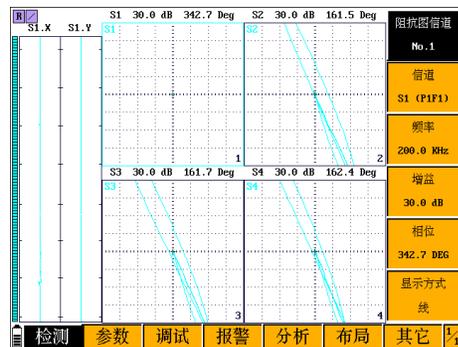
(a) X1 缺陷涡流检测结果



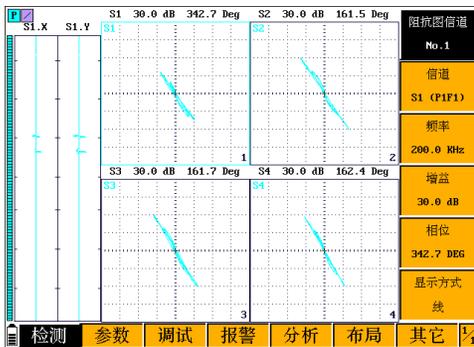
(e) X5 缺陷涡流检测结果



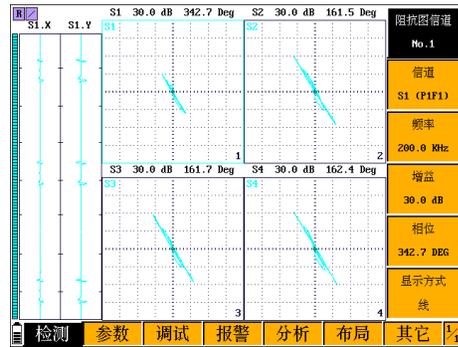
(b) X2 缺陷涡流检测结果



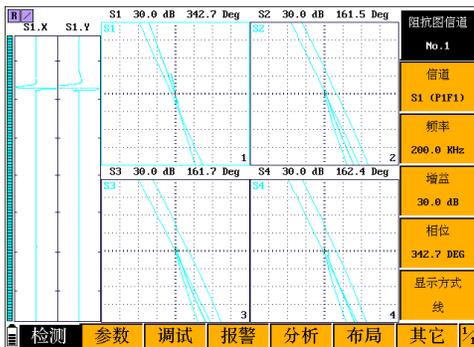
(f) X6 缺陷涡流检测结果



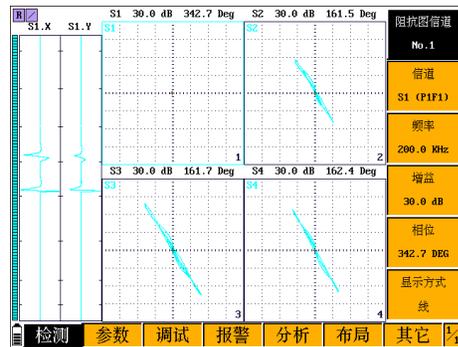
(c) X3 缺陷涡流检测结果



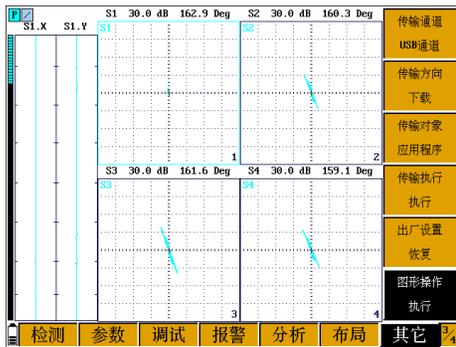
(g) X7 缺陷涡流检测结果



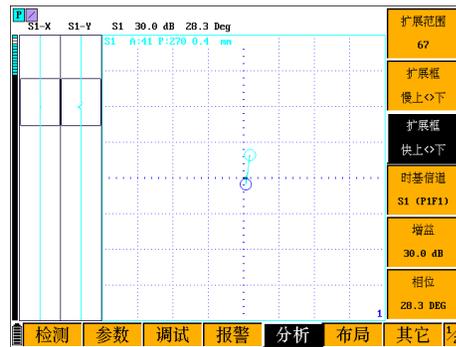
(d) X4 缺陷涡流检测结果



(h) X8 缺陷涡流检测结果



(i) X9 缺陷涡流检测结果



(b) 50 kHz 检测结果

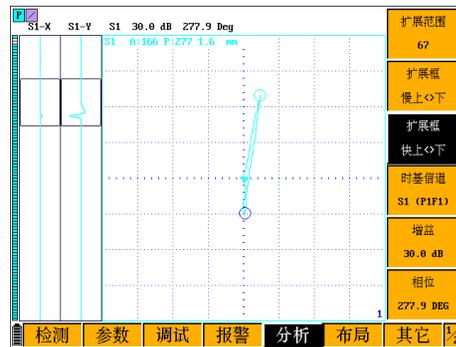
图 14 铝合金板缺陷涡流检测结果
Fig. 14 Eddy current testing results for defects in aluminum alloy plates

2.5.2 绝对式涡流检测探头检测结果

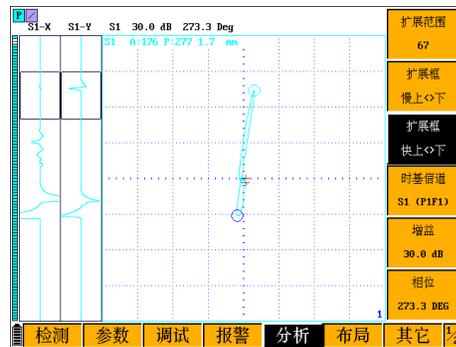
检测对象选择铝合金平板的 X7 裂纹,绝对式涡流检测探头检测工艺参数如表 4 所示。由于仪器最高频率限制以及探头检测信号特点,取绝对式探头 25~5 000 kHz 频率段进行检测,检测结果如图 15 所示,可以看出:对铝合金板的缺陷实施检测时,探头在 151.5~303 kHz、666~1 000 kHz 时都有较好的检出效果,且在 666~1 000 kHz 范围内缺陷信号幅值最大;在 151.5~303 kHz 和 666~1 000 kHz 两个频率段缺陷信号与探头晃动、提离信号具有较大相位差,具有很好的区分度,无缺陷处信号处于水平位置且较稳定,可有效对铝合金板缺陷实施精确定位和定量检测。

表 4 绝对式涡流检测探头检测工艺参数
Table 4 Absolute Eddy Current Testing Probe Testing Process Parameters

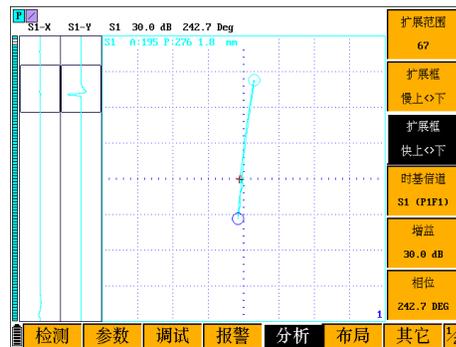
频率/kHz	驱动电压/V	前置放大器增益/dB	后置放大器增益/dB	数字滤波点数	高通滤波频率/Hz
5~5 000	3	10	30	3	2



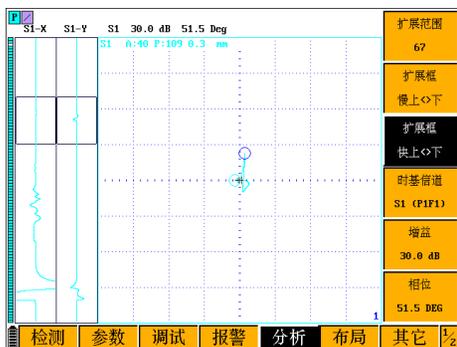
(c) 125 kHz 检测结果



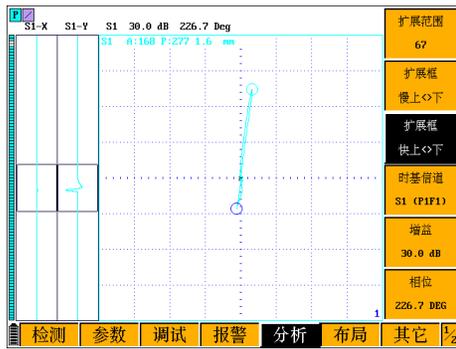
(d) 151.5 kHz 检测结果



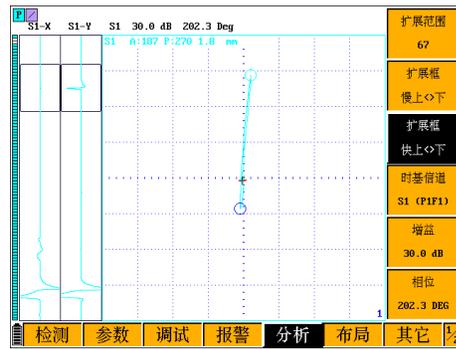
(e) 200 kHz 检测结果



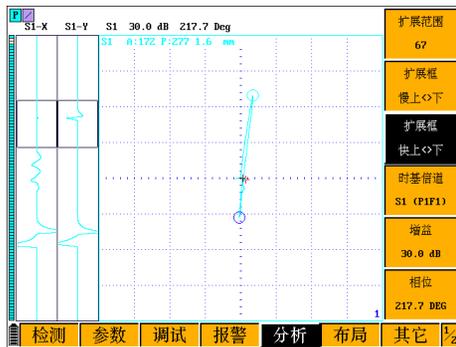
(a) 25 kHz 检测结果



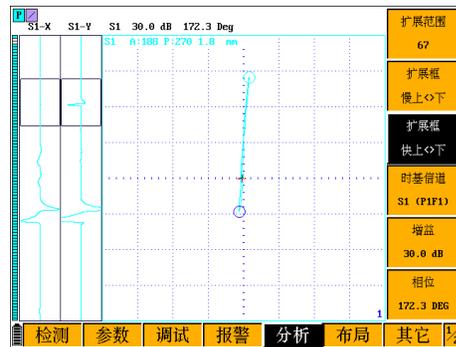
(f) 250 kHz 检测结果



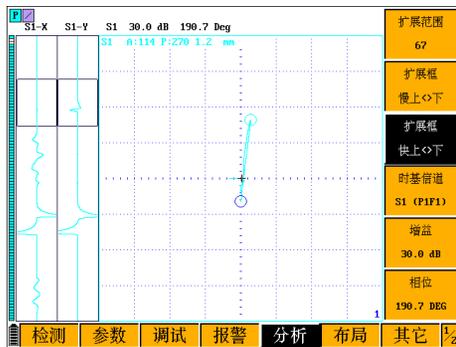
(j) 666.7 kHz 检测结果



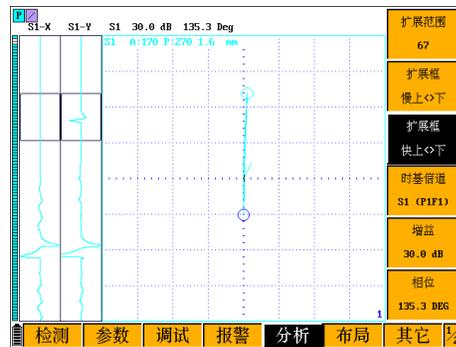
(g) 03 kHz 检测结果



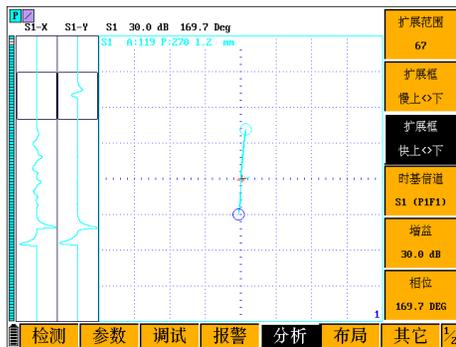
(k) 833.3 kHz 检测结果



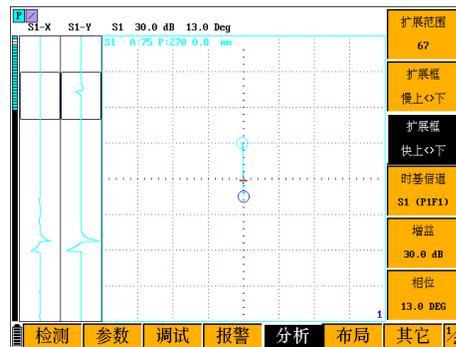
(h) 400 kHz 检测结果



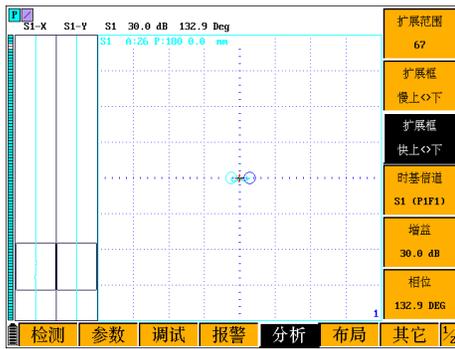
(l) 1000 kHz 检测结果



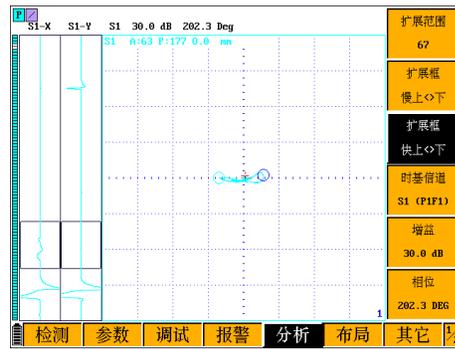
(i) 500 kHz 检测结果



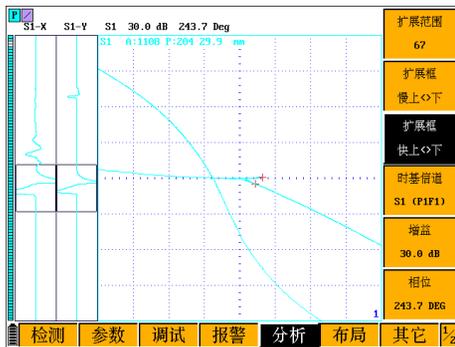
(m) 2000 kHz 检测结果



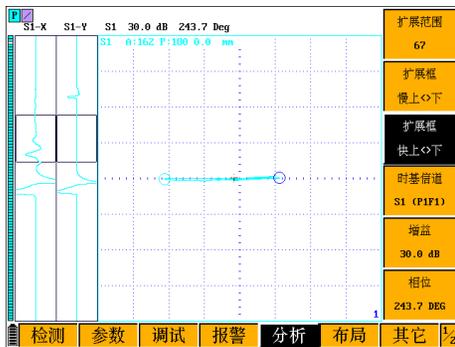
(n) 5 000 kHz 检测结果



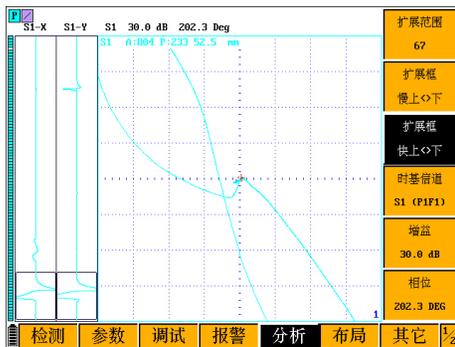
(r) 666.7 kHz 检测晃动信号



(o) 200 kHz 检测提高信号



(p) 200 kHz 检测晃动信号



(q) 666.7 kHz 检测提高信号

图 15 绝对式 5~50 kHz 探头的检测结果

Fig. 15 Detection results of absolute 5~50 kHz probe

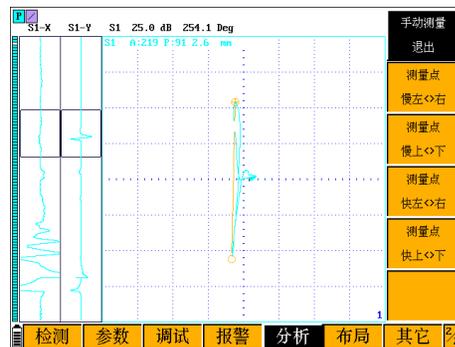
2.5.3 差动式涡流检测探头检测结果

检测对象选择铝合金薄板的 X7 裂纹,差动式涡流检测探头检测工艺参数如表 5 所示。由于仪器最高频率限制以及探头检测信号特点,差动式探头选取 5~5 000 kHz 频率段进行检测,检测结果如图 16 所示,可以看出:实施检测时,探头在 125~1 000 kHz 时都有较好的检出效果,差动式涡流检测探头针对铝合金板缺陷检测时的最佳检测频率段为 500~1 000 kHz,在 500~1 000 kHz 范围内缺陷信号幅值最大;不同检测频率段缺陷信号与探头晃动、提高信号具有较大相位差,具有很好的区分度,能够实现铝合金板缺陷精确定位和检测。

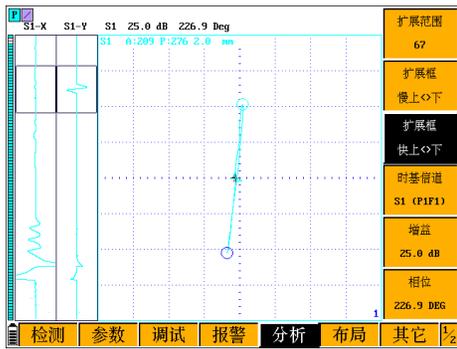
表 5 差动式涡流检测探头检测工艺参数

Table 5 Testing process parameters of differential eddy current detection probe

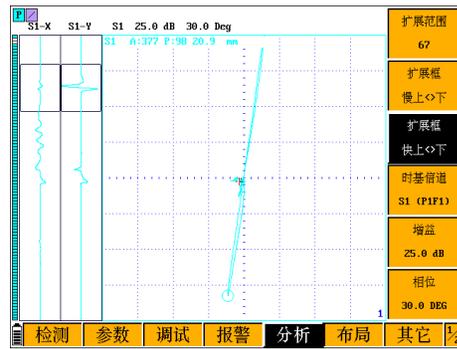
频率/kHz	驱动电压/V	前置放大器增益/dB	后置放大器增益/dB	数字滤波点数	高通滤波频率/Hz
5~5 000	3	15	25	3	2



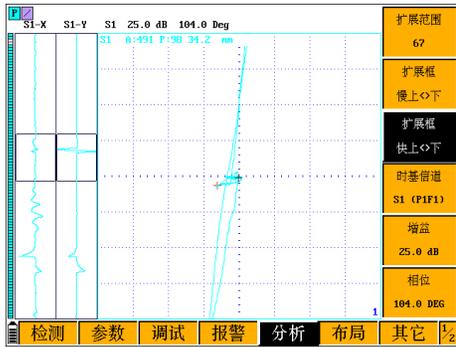
(a) 25 kHz 检测结果



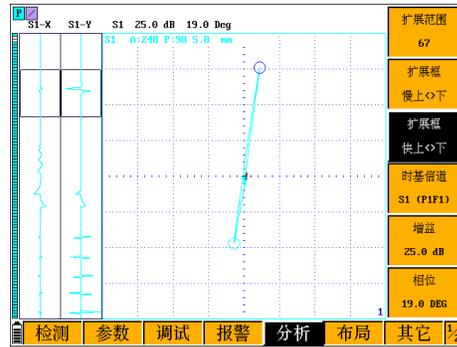
(b) 50 kHz 检测结果



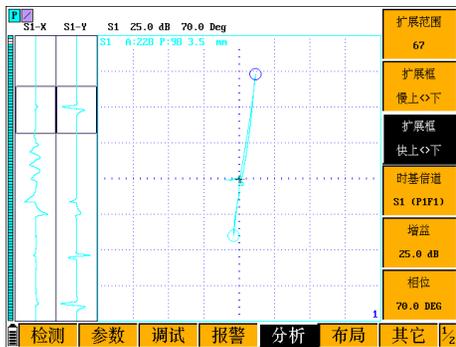
(f) 357.1 kHz 检测结果



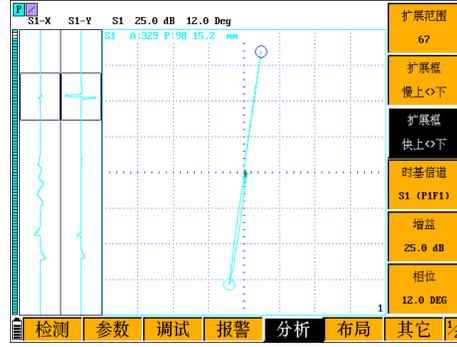
(c) 125 kHz 检测结果



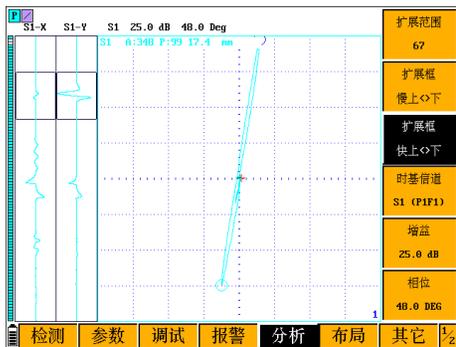
(g) 400 kHz 检测结果



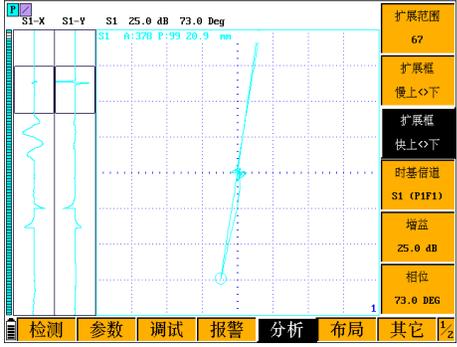
(d) 200 kHz 检测结果



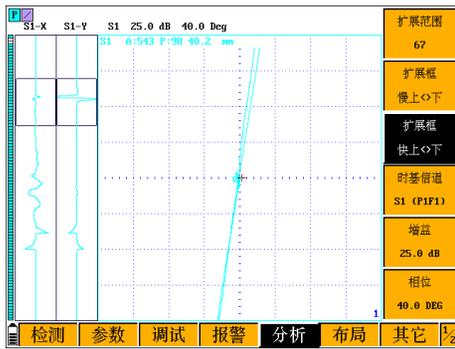
(h) 454.5 kHz 检测结果



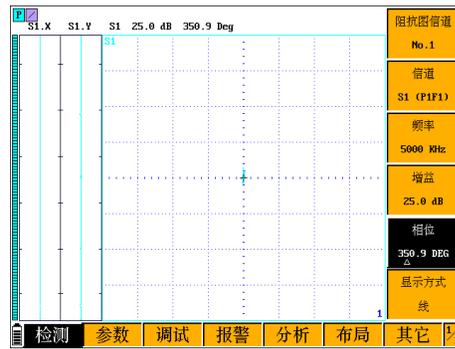
(e) 303 kHz 检测结果



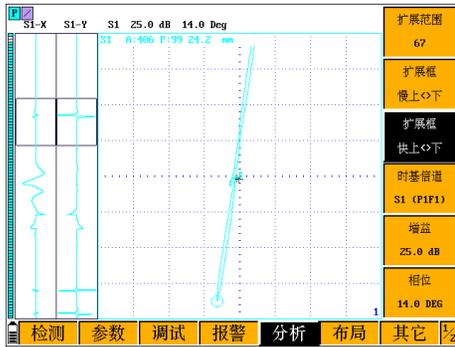
(i) 500 kHz 检测结果



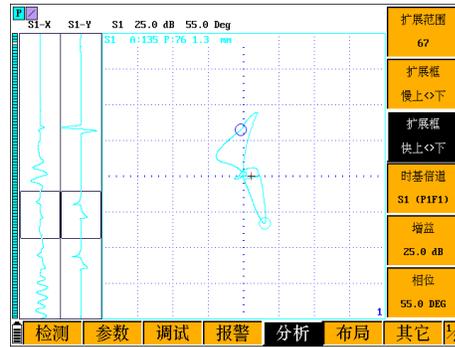
(j) 666.7 kHz 检测结果



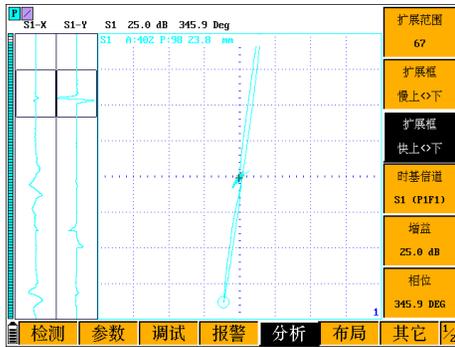
(n) 5 000 kHz 检测结果



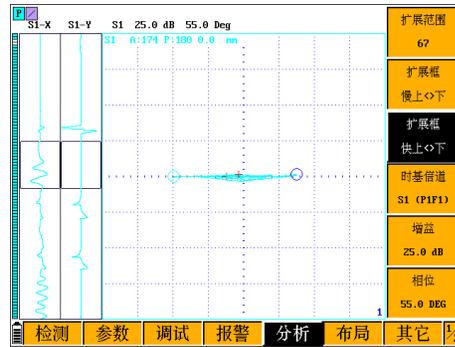
(k) 833.3 kHz 检测结果



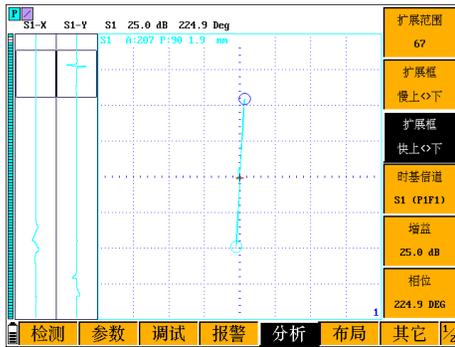
(o) 250 kHz 检测提高信号



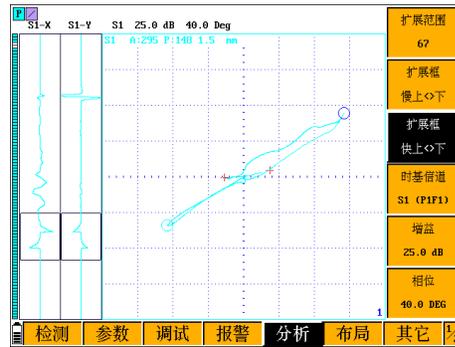
(l) 1 000 kHz 检测结果



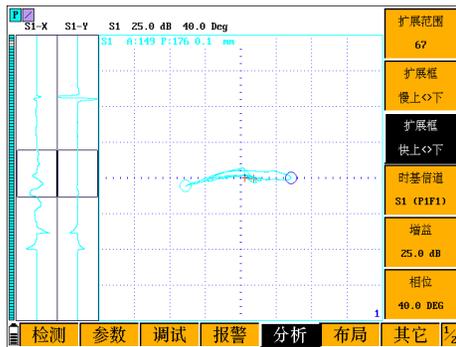
(p) 250 kHz 检测晃动信号



(m) 2 000 kHz 检测结果



(q) 666.7 kHz 检测提高信号



(r)666.7 kHz 检测晃动信号

图 16 差动式 5~50 kHz 探头的检测结果

Fig. 16 Detection results of differential 5~50 kHz probe

3 结 论

1) 电磁超声导波—涡流复合检测方法通过超声导波的正交线性扫描实现了大幅面铝合金薄壁板中缺陷可疑区域的快速定位,能够有效减小电磁涡流的有效检测面积,为飞机大幅面铝合金薄壁件上缺陷的高效和精确检测提供了一种有效的方法。

2) 电磁超声检测探头与缺陷相对距离对检测信号无显著影响,探头与缺陷夹角会显著影响缺陷回波幅值,且 90° 时缺陷回波幅值最大; SH_0 导波探头的提高距离和磁铁数量能够明显影响铝合金薄壁件的检测信号,工程中探头提高距离应处于 $0\sim 2$ mm,配置的磁铁对数不少于 $6\sim 8$,以提高检测系统的实用性。

3) 不同类型的涡流检测探头能够精准检测铝合金平板上缺陷,且检测频率会影响缺陷检测效果,其中绝对式涡流检测探头有两个较好的检测频率段,差动式涡流检测探头最佳检测频率段为 $500\sim 1\ 000$ kHz,提高了检测系统的适用范围和可靠性。

参 考 文 献

- [1] 曾苇鹏,鲁嵩嵩,刘斌超,等. 飞机薄壁结构面外载荷下三维疲劳裂纹扩展仿真分析[J]. 航空工程进展, 2022, 13(3): 23-31.
ZENG Weipeng, LU Songsong, LIU Binchao, et al. Three-dimensional fatigue crack propagation analysis of aircraft thin-walled structures under out-of-plane loading[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(3): 23-31. (in Chinese)
- [2] 毕运波,柯映林,董辉跃. 航空铝合金薄壁件加工变形有

限元仿真与分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(3): 397-402.

- ZHU Ziqiang, WU Zongcheng. Finite element simulation and analysis of deformation in machining of aeronautical aluminum alloy thin-walled workpiece [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(3): 397-402. (in Chinese)
- [3] 廖凯,张萧笛,车兴飞,等. 铝合金薄壁件加工变形的力学模型构建与分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(5): 166-172.
LIAO Kai, ZHANG Xiaodi, CHE Xingfei, et al. Construction and analysis of mechanic model of deformation for Al alloy thin-walled component[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(5): 166-172. (in Chinese)
- [4] 段佳桐,隋福成,刘汉海,等. 弯曲载荷下薄壁结构疲劳裂纹扩展性能[J]. 航空学报, 2021, 42(5): 280-288.
DUAN Jiatong, SUI Fucheng, LIU Hanhai, et al. Fatigue crack growth performance of thin-walled structure under bending load[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(5): 280-288. (in Chinese)
- [5] 鲁龙坤,庄苗,柳占立. 裂纹尖端张开角在飞机金属薄壁结构中的应用[J]. 航空科学技术, 2020, 31(4): 21-29.
LU Longkun, ZHUANG Zhuo, LIU Zhanli. CTOA applications in metallic thin-walled structures of airplane [J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(4): 21-29. (in Chinese)
- [6] 刘素贞,孟学艳,张闯,等. 金属材料缺陷的电磁超声/涡流复合检测技术研究[J]. 声学技术, 2018, 37(1): 43-50.
LIU Suzhen, MENG Xueyan, ZHANG Chuang, et al. Research on electromagnetic ultrasonic/eddy current composite inspection technology for metal material defects[J]. Technical Acoustics, 2018, 37(1): 43-50. (in Chinese)
- [7] 田明明,解社娟,肖盼,等. 基于脉冲涡流/电磁超声复合检测方法的复杂缺陷检测[J]. 无损检测, 2016, 38(12): 9-14.
TIAN Mingming, Xie Shejuan, XIAO Pan, et al. Complicated defects detection based on hybrid NDT methods of PECT and EMAT [J]. Nondestructive Testing, 2016, 38(12): 9-14. (in Chinese)
- [8] 周正干,黄凤英,于芳芳. 电磁超声和涡流组合检测方法[J]. 无损检测, 2009, 31(9): 706-710, 714.
ZHOU Zhenggan, HUANG Fengying, YU Fangfang. Testing method combing EMAT with eddy current[J]. Nondestructive Testing, 2009, 31(9): 706-710, 714. (in Chinese)
- [9] 田明明,解社娟,韩捷,等. 基于小波分析的脉冲涡流/电磁超声复合无损检测方法[J]. 中国机械工程, 2019, 30(16): 1925-1930.
TIAN Mingming, XIE Shejuan, HAN Jie, et al. A hybrid PECT/EMAT NDT based on wavelet analysis [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(16): 1925-1930. (in

- Chinese)
- [10] GUO W, GAO B, TIAN G Y, et al. Physic perspective fusion of electromagnetic acoustic transducer and pulsed eddy current testing in non-destructive testing system[J]. Transactions of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2020, 378: 1-8.
- [11] UCHIMOTO T, GUY P, TAKAGI T, et al. Evaluation of an EMAT - EC dual probe in sizing extent of wall thinning [J]. NDT & E International, 2014, 62: 160-166.
- [12] 唐华溢. 涡流与电磁超声复合无损检测技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
TANG Huayi. Research on composite non-destructive detection technology of ECT and EMAT[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [13] 李望, 吴长青, 赵炜炜, 等. 电磁超声检测技术的应用[J]. 电子测试, 2021(3): 115-116, 126.
LI Wang, WU Changqing, ZHAO Weiwei, et al. Application of electromagnetic ultrasonic testing technology [J]. Electronic Test, 2021(3): 115-116, 126. (in Chinese)
- [14] 秦峰. 航空涡轮叶片缺陷的扫查式涡流检测技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
QIN Feng. Research of scanning eddy current testing technology for the defects on aircraft turbine blades[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [15] 刘志运, 江泽华. 基于铁道车辆车轴的电磁超声和涡流复合检测方法研究[J]. 中国仪器仪表, 2022(3): 73-77.
LIU Zhiyun, JIANG Zehua. Research on combined detection method of electromagnetic ultrasonic and eddy current based on railway vehicle axle [J]. China Instrumentation, 2022(3): 73-77. (in Chinese)
- [16] 刘志运, 周芸悦, 袁泉等. 电磁超声—涡流复合检测技术在铁道车辆上的应用[J]. 仪表技术, 2022(1): 26-29.
LIU Zhiyun, ZHOU Yunyue, YUAN Quan, et al. Application of electromagnetic ultrasonic-eddy composite detection technology on railway vehicles[J]. Instrumentation Technology, 2022(1): 26-29. (in Chinese)
- [17] 孟学艳. 电磁超声—涡流检测金属材料微损伤的方法研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
MENG Xueyan. Study on micro damage detection of metal materials by electromagnetic ultrasonic-eddy current method [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [18] 范效礼, 李玮涵, 苗锐, 等. 基于动生涡流磁场的钢质管道内壁缺陷快速外检测[J]. 无损检测, 2023, 45(12): 51-56, 85.
FAN Xiaoli, LI Weihuan, MIAO Rui, et al. Rapid external detection of steel pipe inner wall defects based on motion-induced eddy currents magnetic field [J]. Nondestructive Testing, 2023, 45(12): 51-56, 85. (in Chinese)
- [19] 张晓红, 胡文刚, 张琳, 等. 薄壁扁平不锈钢管的涡流检测工艺[J]. 宇航材料工艺, 2019, 49(3): 79-81.
ZHANG Xiaohong, HU Wengang, ZHANG Lin, et al. Eddy current testing process technology applied to thin-walled flat tubes [J]. Aerospace Materials & Technology, 2019, 49(3): 79-81. (in Chinese)
- [20] 黄凤英, 林俊明, 任硕, 等. 道岔专用涡流检测探头的设计及应用[J]. 无损探伤, 2022, 46(3): 23-25.
HUANG Fengying, LIN Junming, REN Shuo et al. Design and application of eddy current testing probe for turnout [J]. Nondestructive Testing, 2022, 46(3): 23-25. (in Chinese)
- [21] 汪剑鸣, 杨伟明, 王琦, 等. 基于平面阵列电磁传感器的金属缺陷检测新方法[J]. 传感技术学报, 2018, 31(1): 6-12.
WANG Jianming, YANG Weiming, WANG Qi, et al. A new method for detection metal defects based on planar array electromagnetic sensors [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(1): 6-12. (in Chinese)
- [22] 李铁名. 基于涡流/磁记忆集成检测方法的金属构件缺陷评价研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.
LI Yiming. Research on eddy current and magnetic memory integrated detection method and defect evaluation of metal components [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)