

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2022.258

腐蚀损伤的激光超声可视化成像检测

尚晓壮^{1a}, 刘瑶璐^{1a,1b}, 周世杰^{1a}, 宁慧铭^{1a,1b}, 胡 宁^{1a,2}

(1. 重庆大学 a. 航空航天学院; b. 非均质材料力学重庆市重点实验室, 重庆 400044;

2. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300401)

摘要: 腐蚀损伤广泛存在于国防科技、交通运输等工业领域, 严重威胁了结构的安全性和可靠性, 因此对腐蚀损伤的安全检测具有重要意义。依据激光超声的基本理论, 采用自主设计的全自动激光超声扫描实验系统, 通过对铝板中的腐蚀损伤进行激光扫描实验, 分析了 Lamb 波能量、幅值和腐蚀之间的关系, 并依据“弹性波能流法”的原理, 利用幅值最大值完成了损伤区域的可视化; 提出了一种评估铝板腐蚀程度的方法——能量比较法, 完成了对不同腐蚀程度的铝板的评估分析。该研究可实现腐蚀缺陷的快速检测与评估, 并且检测结果直观可视, 展现了巨大的应用前景。

关键词: 激光超声; 腐蚀损伤; Lamb 波; 可视化成像; 损伤程度评估

中图分类号: TB553

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2022)12-094-09

Laser ultrasonic visual imaging detection of corrosion damage

SHANG Xiaozhuang^{1a}, LIU Yaolu^{1a,1b}, ZHOU Shijie^{1a}, NING Huiming^{1a,1b}, HU Ning^{1a,2}

(1a. College of Aerospace Engineering; 1b. Chongqing Key Laboratory of Heterogeneous Material Mechanics, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China)

Abstract: Corrosion damage exists extensively in material structures in the industries, such as national defense and transportation, which threatens the safety and reliability of the structure seriously. Therefore, it is of great significance to monitor corrosion damage in materials. In this paper, based on the theory of laser ultrasound, an automatic laser scanner detection system was designed and developed. The laser scanning experiments were carried out on the corrosion damage in the aluminum plate through this system,

收稿日期: 2022-01-22 网络出版日期: 2022-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(11632004, U1864208); 深空探测省部共建协同创新中心开放课题(SKTC202108); 国家科技重大专项项目(2017-VII-0011-0106); 河北省自然科学基金创新群体研究项目(A2020202002); 河北省重点研发计划(202030507040009); 天津市科技计划项目(20ZYJDC00030); 天津市自然科学基金重点项目(S20ZDF077)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (11632004, U1864208), Open Fund of Center of Space Exploration, Ministry of Education (SKTC202108), National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2017-VII-0011-0106), the Fund for Innovative Research Groups of Natural Science Foundation of Hebei Province (A2020202002), the Key Program of Research and Development of Hebei Province (202030507040009), Science and Technology Planning Project of Tianjin (20ZYJDC00030), and the Key Project of Natural Science Foundation of Tianjin (S20ZDF077).

作者简介: 尚晓壮(1996—), 男, 重庆大学硕士研究生, 主要研究方向为基于超声导波的损伤检测。(E-mail) shangxiaozhuang@cqu.edu.cn.

通信作者: 刘瑶璐, 女, 重庆大学副教授, 工学博士, 硕士研究生导师, (E-mail) liuyaolu@cqu.edu.cn.

and the relationship among the Lamb wave energy, amplitude and corrosion was analyzed. The damage area was visualized with the maximum amplitude according to the principle of “elastic wave energy flow method”. Finally, the amplitude integral ratio method was proposed, which can be used to evaluate the degree of corrosion damage. The proposed method can realize the rapid detection and evaluation of corrosion defects with the detection results being visualized, showing a great potential in application.

Keywords: laser ultrasound; corrosion damage; Lamb waves; visualization image; damage assessment

随着科学技术的不断进步,航空航天、交通运输等工业迎来了日新月异的变化,相应地,也对所需工业结构提出了更严格的要求。长期高强度的运作、复杂的工作环境必然会对结构和材料造成各式各样的腐蚀损伤,因此,针对结构健康监测迫切需要提出一种高效可靠的检测方法。在无损检测手段中,通常用超声检测技术对缺陷进行检测,但常规超声检测技术大部分用传感器产生超声波、需要耦合剂,操作复杂,不适合进行非接触式检测^[1-2]。较传统检测方式,激光超声检测技术在检测速度上更快,适用性更强,并且激光超声还具有多模式、宽频带以及高空间分辨率的特点,可以实现缺陷的在线检测和监测^[3-4]。激光超声检测技术的快速发展使超声可视化成为无损检测行业中新的研究方向。

国内外大量学者开展了一系列关于激光超声可视化检测的研究。最早由 White^[5] 提出运用激光激励的方式来产生超声波的想法。随后,Victorov^[6] 提出可以利用超声表面波的发射、透射系数检测固体内部的损伤缺陷。Ledbette 等^[7] 在激光照射的材料中发现了多种超声波存在(横波、纵波、Lamb 波等),该发现成功为激光超声波检测技术提供了坚实的理论依据。喻明等^[8] 参照 X 射线的 CT 成像原理,利用 Lamb 波能量衰减的变化情况重建铝板中的损伤区域。Hu 等^[9-11] 和 Liu 等^[12,13] 自主研发了一套全自动激光超声扫描检测设备,可以实现对铝板的通孔、凹槽和复合材料板中脱层进行快速的扫描识别,并且能够结合特有的程序对材料的结构损伤进行实时成像。Seher 等^[14] 在用 A0 模式 Lamb 波对标准管道和腐蚀管道进行壁厚损伤检测时发现,可以用 Lamb 波的幅值大小描述管道的厚度。

激光超声检测技术在国内无损检测行业中的应用较少,特别是对于铝板腐蚀损伤的检测。因此,笔者采用全自动激光超声扫描实验系统,开展激光扫描腐蚀铝板的实验,探讨铝板损伤区域可视化成像的可行性;并提出了一种评估材料腐蚀损伤严重程度的方法,通过激光扫描实验完成对不同腐蚀程度的铝板的评估分析,为腐蚀损伤的无损检测研究奠定一定的实验基础。

1 超声可视化成像原理

笔者将基于“弹性波能流法”的理论完成对铝板的腐蚀损伤的可视化成像处理。文献^[15-17]利用激光扫描法(LSM)和贝蒂互换定理提出超声波传播可视化技术概念,Liu 等^[12]在此基础上改进发展,进而提出“弹性波能流法”测量材料损伤的方法。众所周知,弹性波的传播过程就是弹性波能量的传播,在波源粒子振动带动附近粒子振动的同时,就使得波源附近粒子获得了能量,能量就这样不断地向前传播。因此,将某一段时间通过该粒子的总能量定义为“弹性波能量流”。当利用超声波检测某一范围时,测量所有介质粒子点上的波的应变能,得到整个检测区域的“弹性波能量流”,就可以绘制出检测区域的弹性波能流图。通过对能流图的分析,即可得到材料的损伤位置、形状和大小。在实验中利用激光动态打点的方式激发超声波,通过超声波探头接收信号,即可得到激光激发点位置的超声波能量,即等价的应变能 γ ,其原理表达式如式(1)所示^[12]。

$$\begin{cases} \gamma = \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 (i = 1, 2, 3, \dots, n), \\ n = T/\Delta T, \\ \alpha_i = \beta(\epsilon_{xi} + \epsilon_{yi}), \end{cases} \quad (1)$$

式中: ΔT 为采样间隔时间, T 为信号的采样时间, ϵ_{xi} 表示 x 方向上应变, ϵ_{yi} 表示 y 方向上应变, $\epsilon_{xi} + \epsilon_{yi}$ 表示激光点在 i 点信号的幅值, β 为一比例常数。通过公式计算出检测区间内的每个激光扫描点的 γ 的值,就能

得到检测区域的波的能流图。

对检测区间每个激光扫描点的信号进行傅里叶变换,提取该区域所有点信号的基频最大幅值 A_1 ,从而得到检测区域波的最大幅值图。波的最大幅值图本质上也是波的能流图,可以对实验扫描区域中的损伤进行判定。相比较于波的能流图而言,得到波的最大幅值图的信号处理算法更简单,计算过程也更加简单,所以这里采取波的最大幅值图来描述铝板的腐蚀损伤。

2 实验部分

2.1 检测试件及仪器

实验中使用的铝材为航空铝材 2024 型号,板材尺寸为 1 500 mm×750 mm×1.5 mm,实验时在铝板上制作 1 个矩形损伤区域,大小约为 40 mm×40 mm,如图 1 所示。为了在 2024 型号的航空铝材表面获得尽可能真实的损伤区域,使用 25% 的盐酸溶液均匀腐蚀铝板表面。腐蚀铝板前为了防止腐蚀时盐酸溶液溢出,在腐蚀区域边缘上固定高约 5 mm 的半固态玻璃胶,并让玻璃胶在正常温度下固化 4 h。等待玻璃胶固化完成后,即开始对铝板的腐蚀。



图 1 铝板腐蚀损伤区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of corrosion damage area in an aluminum plate

实验仪器为自主设计的全自动激光超声扫描实验系统,其系统整体框架如图 2 所示。主要由硬件:包括激光器模块、探头模块;软件:包括数据采集与控制模块、路径规划软件、参数设置软件两部分构成。其中激光超声扫描检测系统采用 Dawa-100 型 Q 调 Nd:YAG 激光器,输出激光波长为 1 064 nm,脉宽为 6~8 ns,单个脉冲点能量最高可达 100 mJ,激光重复频率为 1~20 Hz。为避免光斑的功率密度过高,通过聚焦透镜使得激光光斑的直径为 2 mm。脉冲激光照射试件表面时,试件表面吸收光能瞬间转化的热能会使试件产生微小变形。通过硬件部分的数据采集和控制模块采集传入的超声信号,检测完成后,通过 MATLAB 软件完成超声信号中 Lamb 波的截取和处理,最终实现损伤检测的可视化。

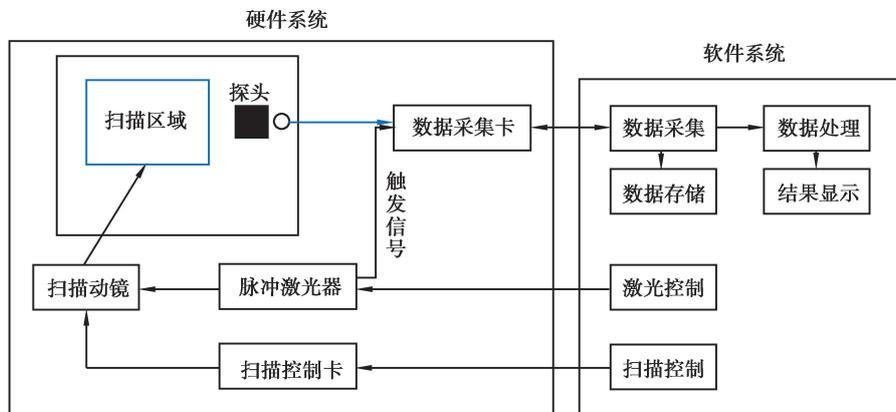


图 2 全自动激光超声扫描检测系统架构图

Fig. 2 Architecture of automatic laser ultrasonic scanning detection system

2.2 实验检测方案

利用全自动激光超声扫描实验系统对铝板腐蚀区域进行激光扫描实验。实验扫描方案如图 3 所示,激光扫描范围是铝板腐蚀中心的 1 个 80 mm×80 mm 的矩形区域。在扫描实验开始前,扫描区域按照扫描点的栅格进行划分(图 4)。区域的横向方向设为 a 方向,纵向方向设为 b 方向,得到所有扫描点的坐标 (a_i, b_i) ,扫描路径间距为 10 mm,共计 9 条扫描路径,每条扫描路径上扫描 9 个点,并且每个扫描点重复扫描 50 次,以减小实验数据的偶然性带来的误差。中心频率 100 kHz 的探头放置在扫描区域同侧距离约 10 cm 的地方接收超声信号,把接收到的超声信号通过低通滤波器过滤掉频率较高的噪声信号,然后传入数字采集系统。待该次实验完成后,重复多次上述实验,验证实验的可重复性和可靠性。

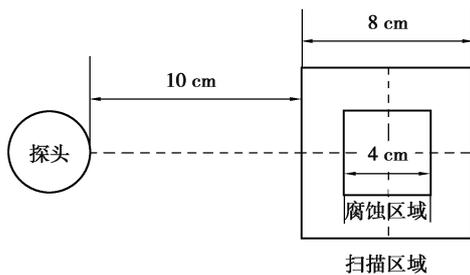


图 3 激光扫描实验图

Fig. 3 Laser scanning experiment

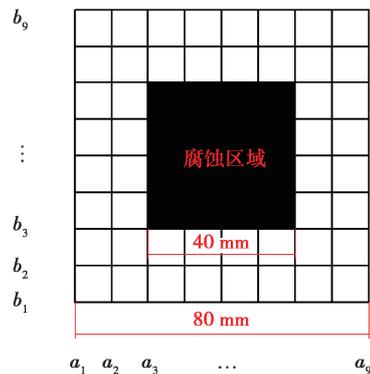


图 4 激光扫描区域点图

Fig. 4 Dot map of laser scanning area

2.3 信号分析及检测结果

在激光扫描实验完成后,对激发的超声信号进行分析,如图 5 为坐标 (a_1, b_5) 和坐标 (a_9, b_5) 的超声波信号。从波形图中,能明显的看出每个超声信号中存在 2 个波包。计算发现第 1 个波包群速度大约为 5 500 m/s,第 2 个波包群速度大约为 2 231 m/s,根据铝板的频散曲线可以判断第 1 个波包为 Lamb 波的 S0 模式,第 2 个波包为 Lamb 波的 A0 模式。由于 S0 模式的强度较小,所以在后续的研究中选择 A0 模式进行分析。

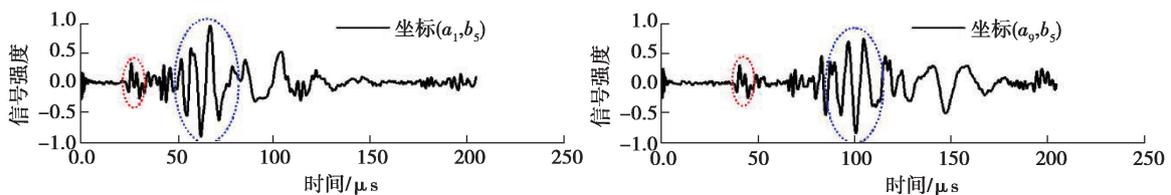


图 5 2 个坐标点的波形图

Fig. 5 Waveform of two waves

为了研究腐蚀区域内外扫描点处激发的超声信号特征,选择 a_5 路径上扫描点的超声信号进行分析。研究发现腐蚀区域内扫描点的信号强度小于未腐蚀区域内扫描点的信号强度,如图 6 所示,这是由于腐蚀区域内激光与材料相互作用的能量受到腐蚀损伤的削减,导致产生的超声波信号减弱。选取信号中的 A0 模式波包,对其进行傅里叶变换,提取 A0 模式的中心频率幅值 A_1 ,如图 7 所示。将幅值 A_1 作为通过扫描点的弹性波能量,对扫描区域进行损伤成像,检测结果如图 8 所示。图 8 中存在一块颜色分布较为均匀且呈深蓝色的区域,其大小约为 40 mm×40 mm,为铝板的腐蚀损伤区域。可见,利用 A0 模式的信号强度可对腐蚀损伤进行成像,且通过多次重复性试验证明检测结果稳定可靠。

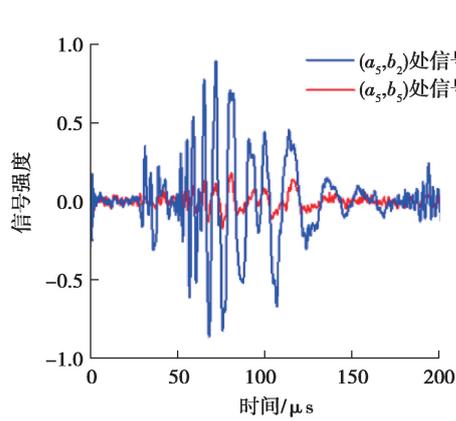
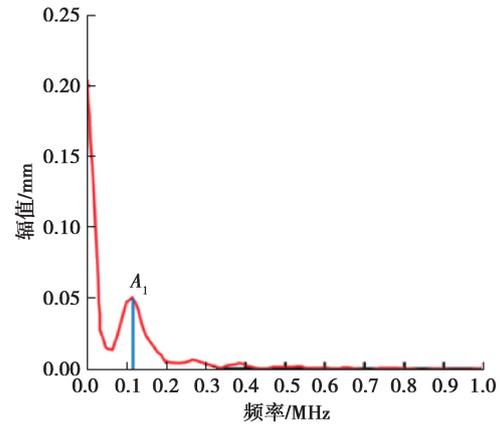
图 6 a_s 路线上超声信号图Fig. 6 Ultrasound signal diagram on the a_s route

图 7 A0 模式 Lamb 波信号频域图

Fig. 7 Frequency domain diagram of A0 mode wave signal

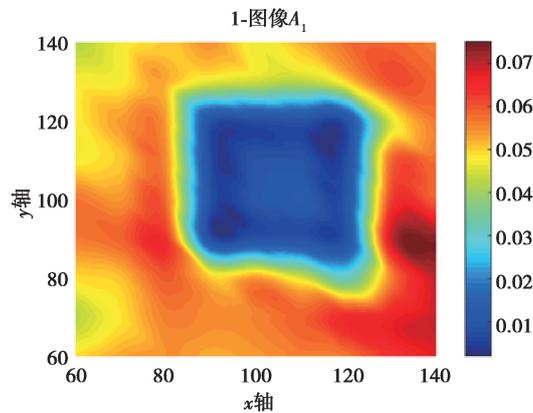


图 8 实验铝板腐蚀区域成像图

Fig. 8 Image of corrosion area of aluminum plate

3 腐蚀程度评估

3.1 幅值 A_1 评估腐蚀损伤程度的可行性分析

为了研究幅值 A_1 评估腐蚀损伤程度的可行性,首先,通过盐酸腐蚀的方式在铝板上制造程度不同的腐蚀损伤。实验时准备 3 块型号为 2024 的航空铝材,尺寸为 $750\text{ mm} \times 750\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$,并且在每块铝板的中心位置标记出 1 个 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的待腐蚀区域,并将板材标号为 1 号板、2 号板和 3 号板,其相应的腐蚀区域也标号为 1 号区域、2 号区域和 3 号区域。分别使用不同剂量盐酸 10, 20, 40 mL,依次对上述区域进行相同时间的腐蚀,最终获得 3 块不同损伤程度的试样,如图 9 所示,在腐蚀程度上可以判定为 3 号区域最大,2 号区域次之,1 号区域最小。

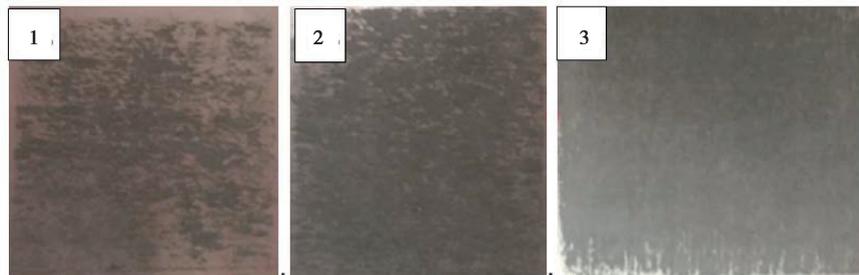


图 9 铝板腐蚀损伤区域图

Fig. 9 Corrosion damage area of aluminum plate

其次,对 3 块板上的扫描区域的超声信号进行幅值 A_1 提取,并完成 3 块腐蚀区域的超声可视化成像图,如图 10 所示。结果发现成像图中腐蚀区域颜色均呈深蓝色,不能简单的通过腐蚀区间的颜色深浅来判断腐蚀区域的严重程度。进一步对比 3 种情况下 a_4, a_5, a_6 3 条路径上扫描点的幅值 A_1 ,如图 11 所示。图 11 中显示,3 条扫描路径上各点的幅值 A_1 相差不大,因此利用幅值 A_1 来评价腐蚀损伤程度是不可行的。

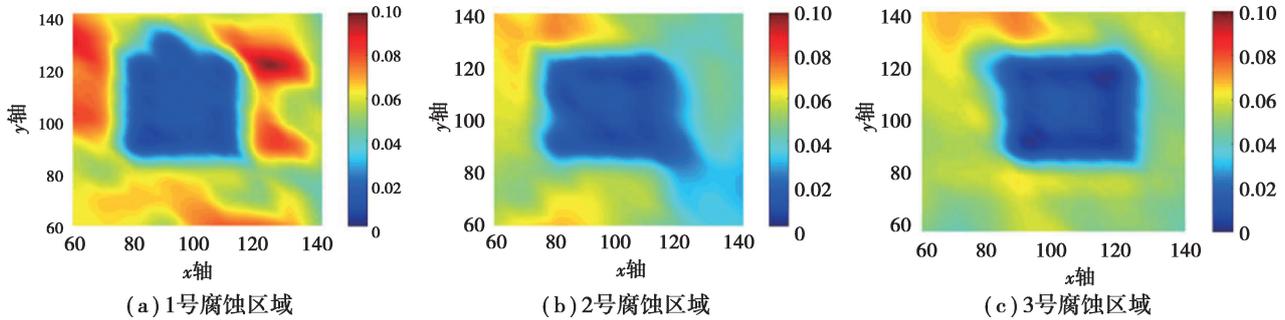


图 10 1~3 号腐蚀区域幅值 A_1 成像图

Fig. 10 A_1 amplitude images of corrosion area 1 to 3

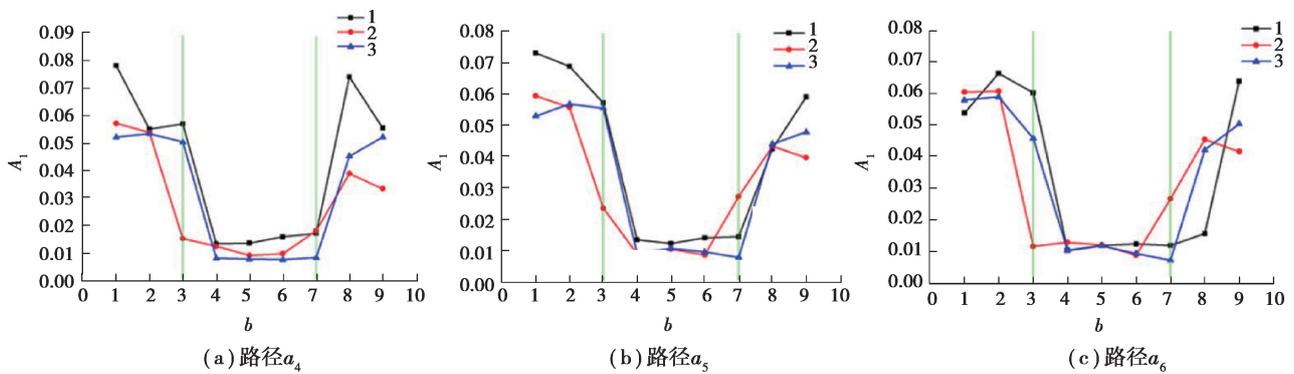


图 11 经过腐蚀区间不同路径的 A_1 对比曲线图

Fig.11 Comparison of A_1 in different paths passing through the corrosion zone

3.2 能量比值 A_{21} 评估腐蚀程度分析

上节分析发现通过幅值 A_1 可以检测腐蚀损伤区域,却无法评估腐蚀损伤程度。实际上腐蚀越严重的区域,材料表面的变形情况就越严重,单用 1 个因子(幅值 A_1)是无法对腐蚀的严重程度进行定量判断的。实验中的激光热膨胀产生的超声信号是 1 个宽频信号,该信号的主要能量集中在主频区间 $50 \sim 200$ kHz 之间,然而信号在 $200 \sim 300$ kHz 的高频区间也具有较明显的能量。分析发现当腐蚀程度不同时,信号在主频区间和 高频区间能量分配是不一致的。为了研究主频区间和 高频区间信号能量的相对变化,将 A0 模式的主频区域能量用 S_1 表示,高频区域能量用 S_2 表示,如图 12 所示,并定义公式(2)来衡量这 2 个频率区域能量的相对变化。

$$A_{21} = \frac{S_2}{S_1^2} \quad (2)$$

为了研究 A_{21} 的值能否判断腐蚀的损伤程度,同样选择路径 a_4, a_5, a_6 这 3 条经过腐蚀区间路径的 A_{21} 值来进行分析,如图 13 为上面 3 种程度不同的腐蚀损伤的 A_{21} 对比曲线。

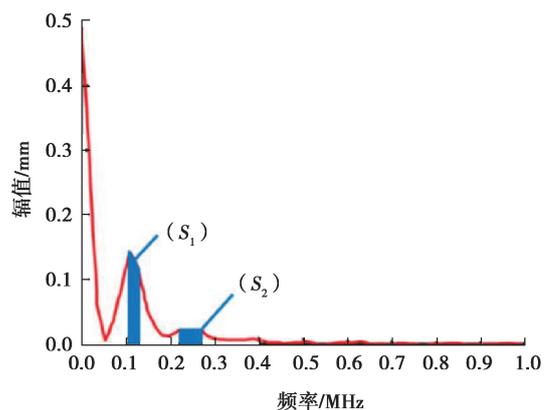


图 12 低频区间和高频区间能量表示图

Fig.12 Representation of energy in low and high frequency ranges

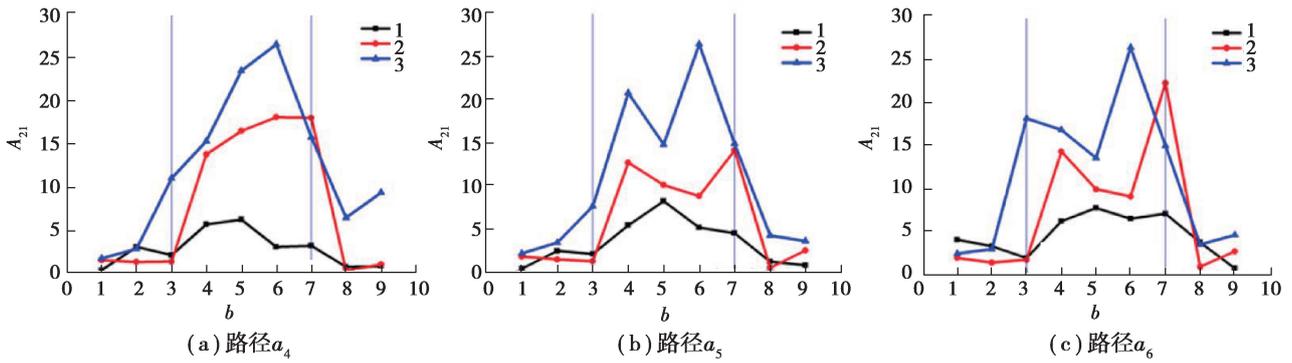


图 13 经过腐蚀区间不同路径上的 A_{21} 对比曲线图

Fig. 13 Comparison of A_{21} in different paths passing through the corrosion zone

在图 13 中,经过腐蚀区间的 3 条路径上, A_{21} 值的大小均为 $3 > 2 > 1$, A_{21} 值的变化与铝板的腐蚀损伤程度趋势一致,即腐蚀越严重, A_{21} 值越大。以上结果表明,当腐蚀程度不同时,激光激发出的超声波在不同频率上能量分配是不一样的;当腐蚀程度越严重时,能量会向高频区间移动,导致 A_{21} 的值变大。

为了探究这种现象的机理,利用纳米压痕仪测量材料未腐蚀区域和腐蚀区域的杨氏模量。表 1 是未腐蚀区域和腐蚀区域随机测量的 9 个点的杨氏模量,腐蚀区域的杨氏模量在 5~50 GPa 间,远小于未腐蚀区域的杨氏模量(64~83 GPa)。图 14 为腐蚀区域的材料微观组织图,从图 14 中可以发现受腐蚀区域出现了孔洞和微裂纹,并且材料变得疏松。激光辐照导致在材料表面局部温度升高,材料发生热弹性膨胀产生应力振动并传至材料内部形成超声波。当激光作用在受腐蚀材料上时,杨氏模量的减小导致材料的应力振动强度减小,因此形成的超声波强度下降;然而由于腐蚀产生的微裂纹缺陷会引起材料更多的高频率振动,使得超声波能量向高频移动。

表 1 未腐蚀区域和腐蚀区域的杨氏模量

Table 1 Young's modulus of normal aluminum plate and corroded aluminum plate

腐蚀区域杨氏模量 $E_{腐}$	未腐蚀区域的杨氏模量 E
37.621 53	74.451 99
50.492 25	71.954 79
25.345 60	72.458 71
40.845 49	83.159 44
4.574 40	77.345 94
16.542 25	64.235 03
38.987 60	80.110 04
6.684 58	80.105 31
7.265 60	83.575 33

因此,提出能量比值法(A_{21})对腐蚀损伤程度进行评估。把所有的扫描点能量比值 A_{21} 的值可视化成像处理,得到 1 号区域、2 号区域和 3 号区域 A_{21} 值的腐蚀损伤成像图,如图 15 所示。

图 15(a) 显示, A_{21} 值成像的腐蚀区域位置和 A_1 值成像位置几乎一样,说明也可以通过 A_{21} 的值来进行损伤区域的可视化。并且,3 个腐蚀区域的 A_{21} 成像图的颜色梯度的数值大小存在较大差异,1 号腐蚀区域的 A_{21} 值最大值为 8,2 号腐蚀区域的 A_{21} 值最大值大于 20,但却小于 25,3 号腐蚀区域的 A_{21} 值最大值大于 25,即 A_{21} 的梯度值可得到 $3 > 2 > 1$ 。当把颜色梯度统一设置为 30 时,提取腐蚀区域位置的 A_{21} 值,得腐蚀区域

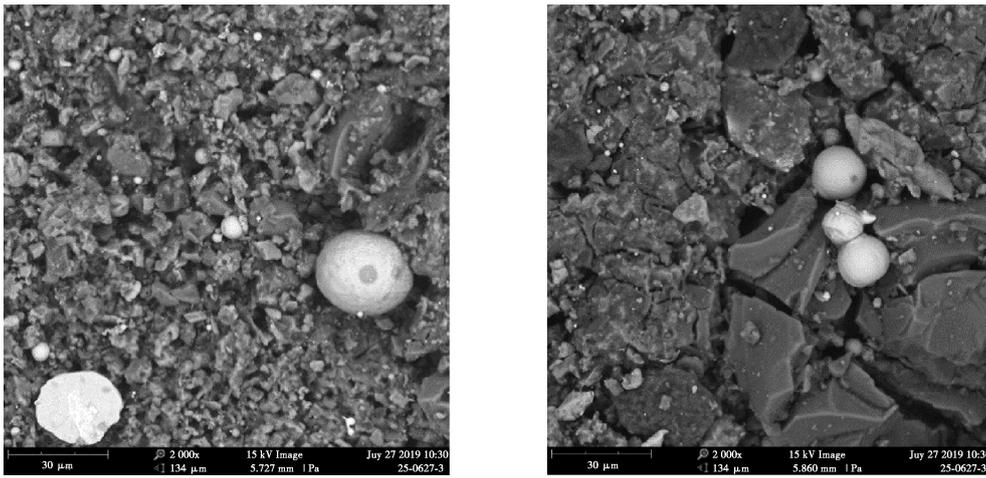


图 14 电子显微镜下腐蚀区域材料微观组织图

Fig. 14 Microstructure of the material in the corroded area under electron microscope

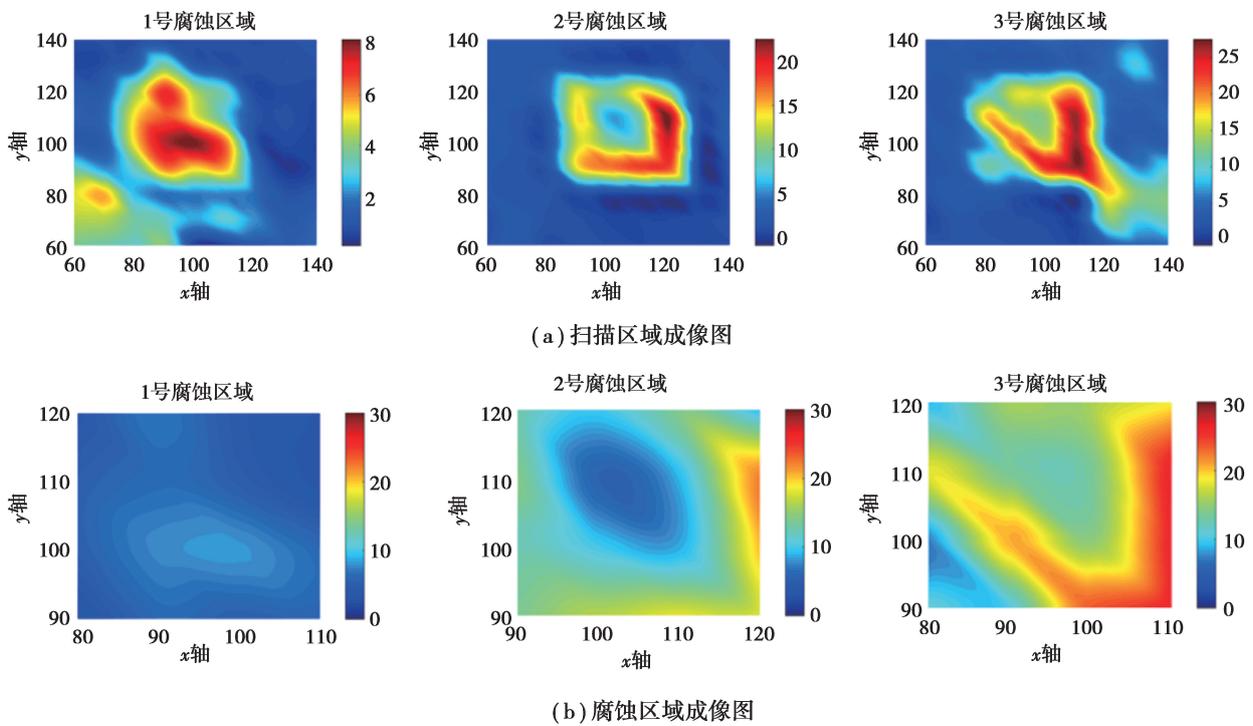


图 15 A_{21} 的腐蚀损伤成像图

Fig. 15 Corrosion damage images of A_{21}

成像图 15(b)。从图 15(b)中可以很明显的看出,1 号腐蚀区域的颜色最深,2 号腐蚀区域的颜色稍微明亮,3 号腐蚀区域颜色最为亮丽,即可通过颜色的深浅程度看出 3 号腐蚀区域最为严重,2 号腐蚀区域次之,1 号腐蚀区域最轻,说明可简单从梯度颜色值来判别腐蚀的严重程度。因此,能量比值法(A_{21})可以对腐蚀损伤程度进行评估。

4 结 论

根据激光超声理论,采用自主设计的一套全自动激光超声扫描检测系统,通过对铝板中的腐蚀损伤进行激光扫描实验,分析了 Lamb 波能量、幅值和腐蚀损伤之间的关系,得出以下结论:

- 1) 依据“弹性波能流法”的原理,通过对复杂的激光超声信号进行分析,成功利用信号中分离出的 A_0 模

式 Lamb 波的幅值 A_1 完成损伤区域的可视化成像;

2) 通过对 3 个腐蚀程度不同的损伤区域进行激光扫描实验, 提出了 1 种可以用来评估腐蚀严重程度的能量比值法, 并用该方法完成了对不同腐蚀程度的铝板的评估分析。

参考文献:

- [1] 石永春, 刘剑锋, 王文娟. 管道内检测技术及发展趋势[J]. 工业安全与环保, 2006, 32(8): 46-48.
Shi Y C, Liu J F, Wang W J. Inner examination technology on pipeline and the development trend[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2006, 32(8): 46-48.(in Chinese)
- [2] 王文明, 王晓华, 张仕民, 等. 长输管道超声波内检测技术现状[J]. 油气储运, 2014, 33(1): 5-9.
Wang W M, Wang X H, Zhang S M, et al. Long-distance pipeline ultrasonic internal inspection-state of the art[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(1): 5-9.(in Chinese)
- [3] Ashley S. Nondestructive evaluation with laser ultrasound[J]. Mechanical Engineering, 1994, 116: 63-66.
- [4] Zhang Y J, Wang X C, Yang Q, et al. Characterization of mean grain size of interstitial-free steel based on laser ultrasonic [J]. Journal of Materials Science, 2018, 53(11): 8510-8522.
- [5] White R M. Generation of elastic waves by transient surface heating[J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(12): 3559-3567.
- [6] Viktorov I A. Physical properties of ultrasonic lamb waves[M]// Rayleigh and Lamb Waves. Boston, MA: Springer US, 1967: 67-121.
- [7] Ledbetter H M, Moulder J C. Laser-induced Rayleigh waves in aluminum[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1979, 65(3): 840-842.
- [8] 喻明, 兰从庆, 许克克, 等. Lamb 波 CT 成像的实验研究[J]. 声学技术, 1995, 14(4): 162-164.
Yu M, Lan C Q, Xu K K, et al. Laboratory study of Lamb wave computed tomography[J]. Technical Acoustics, 1995, 14(4): 162-164.(in Chinese)
- [9] Hu N, Shimomukai T, Yan C, et al. Identification of delamination position in cross-ply laminated composite beams using S0 Lamb mode[J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(6): 1548-1554.
- [10] Hu B, Hu N, Li L L, et al. Tomographic reconstruction of damage images in hollow cylinders using Lamb waves[J]. Ultrasonics, 2014, 54(7): 2015-2023.
- [11] Hu N, Shimomukai T, Fukunaga H, et al. Damage identification of metallic structures using A0 mode of lamb waves[J]. Structural Health Monitoring, 2008, 7(3): 271-285.
- [12] Liu Y L, Hu N, Xu H, et al. Damage evaluation based on a wave energy flow map using multiple PZT sensors[J]. Sensors, 2014, 14(2): 1902-1917.
- [13] Liu Y L, Goda R, Samata K, et al. An efficient algorithm embedded in an ultrasonic visualization technique for damage inspection using the AE sensor excitation method[J]. Sensors 2014, 14(11): 20439-20450.
- [14] Seher M, Huthwaite P, Lowe M J S. Experimental studies of the inspection of areas with restricted access using A0 lamb wave tomography [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, 63(9): 1455-1467.
- [15] 徐亮亮. 二维激光振镜扫描控制系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
Xu L L. The design of scanning control system based on 2D laser galvanometer[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [16] Takatsubo J, Wang B, Tsuda H, et al. Generation laser scanning method for the visualization of ultrasounds propagating on a 3-D object with an arbitrary shape[J]. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 2007, 1(12): 1405-1411.
- [17] Yashiro S, Takatsubo J, Miyauchi H, et al. A novel technique for visualizing ultrasonic waves in general solid media by pulsed laser scan[J]. NDT & E International, 2008, 41(2): 137-144.