

文章编号: 1006-9941(2020)10-1010-07

基于电磁超声共振的金属环-含能材料界面脱粘缺陷检测

周海强¹, 刘天浩², 裴翠祥²

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 西安交通大学 机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 为实现对金属-含能材料粘接结构界面粘接质量的无损评价, 提高其结构安全性, 本研究以金属环-含能材料界面脱粘缺陷的无损检测为研究对象, 提出了基于电磁超声共振的金属环-含能材料结构界面脱粘缺陷非接触检测方法, 制作了专用小型电磁超声探头, 搭建了电磁超声环形自动扫查系统, 对金属环-含能材料脱粘缺陷模拟试件进行了自动扫查成像, 开发了相应的信号处理方法, 验证了该技术对于金属环-含能材料界面脱粘缺陷非接触检测的可行性和检测能力。

关键词: 脱粘缺陷; 金属环; 无损检测; 电磁超声; 非接触

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2019305

1 引言

金属-含能材料粘接结构在航天和国防等重要工业领域应用广泛。粘接作为连接材料或结构的常用工艺, 拥有制作方便、连接应力分散等诸多优点。但是, 由于粘接层间界面脱粘而引发的各种灾难事故时有发生, 粘接结构的安全与质量问题被人们广泛关注。因此, 粘接质量的无损检测和评价是国际上一个非常重要的研究领域和课题^[1-3]。多种无损检测方法已被研究并应用于粘接界面的检测, 如X射线、CT和超声等。其中X射线和CT检测可有效检测出体积型缺陷, 也可检测出裂纹缺陷, 具有空间分辨率高, 结果直观等优点, 在含能材料研究及其部件制造中一直发挥重要的作用。但X射线和CT检测方法对测量条件要求较高, 需要线源和探测器分别位于被测部件的两侧, 此外射线对人体还存在辐射风险。与之相比, 超声检测虽然在空间分辨率和结果直观性方面存在不足, 但对于界

面分层缺陷, 超声检测具有更高的灵敏度, 且拥有设备简单、成本低、灵活方便、效率高、对人体无害等优点^[4-6]。然而, 常规超声检测技术主要采用接触式压电探头, 检测时探头与被测试件必须接触且需要液体耦合剂, 因此要求试件具有较好的表面状态, 保证检测探头与被测试件具有良好的声学耦合, 检测时探头与被测试件的接触状态对检测结果有非常大的影响, 不但严重影响测量结果的准确性和可靠性, 还会限制其检测效率^[5, 7-8]。

电磁超声作为一种新兴的无损检测技术, 依靠电磁感应直接在被测导体中激发和接收超声波, 具有非接触、无需耦合、易实现大型构建快速自动化检测等优点。相关研究^[9-10]表明, 与传统压电超声主要采用纵波检测不同, 电磁超声可以非常容易地激发和接收对粘接界面状态更加敏感的横波。然而, 与传统压电超声相比, 电磁超声最大的缺点就是能量转换率和信噪比较低。电磁超声共振利用一定频率的多周期正弦脉冲驱动探头在试件激发多周期超声脉冲序列, 多周期超声脉冲序列在试件上下表面往复反射, 当相邻回波信号相位差为周期的整数倍时发生超声共振, 信号幅值急剧增大。到目前为止, 电磁超声共振技术在金属材料厚度检测和材料特性评价等方面的研究取得了很好的效果^[10]。基于电磁超声共振技术, 开发金属环-含能材料粘接界面脱粘缺陷电磁超声非接触检测方法, 具有非常好的研究和应用前景^[11]。

收稿日期: 2019-12-02; 修回日期: 2020-03-01

网络出版日期: 2020-08-25

基金项目: 国家自然科学基金资助(11502192)

作者简介: 周海强(1986-), 男, 助理研究员, 主要从事含能材料无损检测与评价技术研究与应用工作研究。

e-mail: haiqiang0602@caep.cn

通信联系人: 裴翠祥(1984-), 男, 副教授, 主要从事机械结构无损检测与评价技术的研究与应用工作。e-mail: pei.cx@xjtu.edu.cn

引用本文: 周海强, 刘天浩, 裴翠祥. 基于电磁超声共振的金属环-含能材料界面脱粘缺陷检测[J]. 含能材料, 2020, 28(10): 1010-1016.

ZHOU Hai-qiang, LIU Tian-hao, PEI Cui-xiang. Interface Debonding Inspection in Metal Ring and Energy-Containing Material Bonding Structure Based on Electromagnetic Acoustic Resonance[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2020, 28(10): 1010-1016.

本研究针对小型金属环-含能材料界面脱粘缺陷的无损检测难题,提出了基于电磁超声共振的界面脱粘缺陷增强型电磁超声非接触检测方法和技术,开发了用于金属环的专用小型电磁超声传感器和扫查装置,进行了金属环-含能材料界面脱粘缺陷电磁超声共振自动扫查及成像实验,探究了所开发检测方法和技术对于金属环-含能材料界面脱粘缺陷的检测能力。

2 实验研究

2.1 电磁超声共振检测原理

电磁超声共振法的原理如图 1 所示,采用一定频率 f 多周期正弦脉冲信号驱动电磁超声探头在试件表面激发持续一定时间的超声脉冲序列 $p_0(t)$,在试件上下表面间形成反复反射,各反射回波信号 $p_i(t)$ 发生部分重叠,当超声激励频率设定为如式(1)计算值时,即相邻回波信号之间 $\Delta t=2h/c=nT=n/f$,各回波信号发生同相位叠加,形成超声共振信号^[12-13]。

$$f = \frac{nc}{2h} \quad (1)$$

式中, f 为超声激励频率,Hz; n 为共振频率阶次; c 为材料中超声波波速, $m \cdot s^{-1}$; h 为被检构件厚度,m。电磁超声共振法由于信号幅值及功率明显较常规的短脉冲回波法强,因此具有非常高的信噪比。使用较小型的电磁超声探头也能获得较好的检测性能,可大幅度提高其空间分辨率。此外,还具有可用较低频的信号检测薄板结构,激励的超声剪切波对粘接界面敏感等优点。

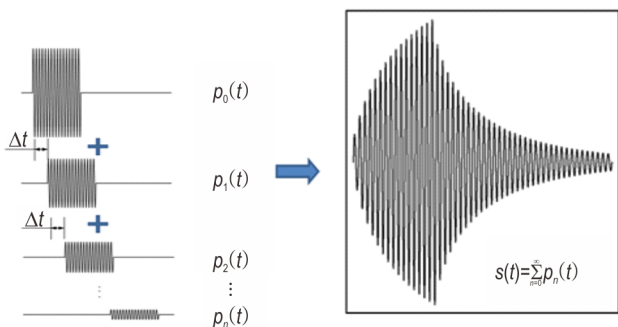


图 1 电磁超声共振法基本原理图

Fig.1 Basic principle of the electromagnetic acoustic resonance (EMAR) method

基于电磁超声共振法,本研究开发了针对脱粘缺陷的检测方法。如图 2 所示,电磁超声的激励频率为粘接试件金属层的超声共振频率,即满足式(1)。当电磁超声探头位于粘接完好区域上方时,电磁超声探头激发的超声波大部分透过粘接界面传至胶层和下层

基底材料内部,仅有少部分超声波能量在金属层底面反射,因此无法形成很强的超声共振效应;而当超声探头位于脱粘区域时,电磁超声激发的超声波在金属层下表面发生全反射(金属层下表面满足自由边界条件),从而在金属层上下表面形成很强的往复反射和超声共振效应。因此根据检测信号幅值和信号包络能量大小可区分粘接完好区域与脱粘区域。

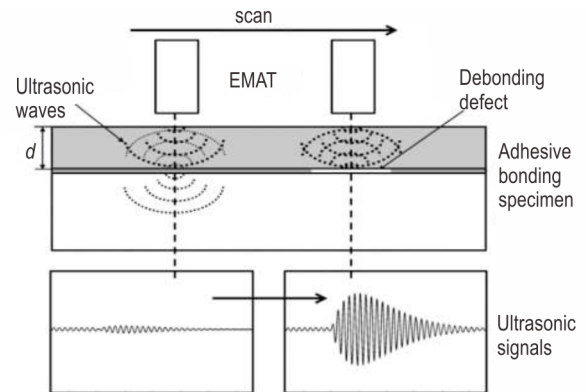


图 2 界面脱粘缺陷电磁超声共振检测方法

Fig.2 Adhesive debonding inspection with EMAR method

2.2 信号分析方法

与传统的脉冲回波信号不同,共振信号是一个持续时间较长的连续周期信号。因此,采用基于共振超声信号功率谱分析的信号处理方法,进一步提高电磁超声的信噪比和脱粘缺陷检测能力。如式(2)所示,首先对超声共振信号进行自相关分析:

$$R(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-m-1} s(n) \cdot s(n+m) \quad (2)$$

式中, $R(m)$ 是超声共振信号 $s(n)$ 的自相关函数, n 是信号的采样点。使用自相关分析,随机噪声的干扰可以被显著抑制,因为随机噪声的自相关函数除了在 $m=0$ 外,在各处均为 0。然后,电磁超声共振信号的功率谱密度(PSD)函数可以被定义为等式(3)。PSD 函数表示超声波功率随频率变化的强度。与离散傅里叶变换(DFT)不同,离散傅里叶变换(DFT)显示信号的频谱含量(信号中谐波的幅度和相位),PSD 描述信号的功率在频率上分布。

$$P(f) = \sum_{m=-M}^M W(m) \cdot R(m) \cdot e^{-j \cdot 2\pi f m \Delta t} \quad (3)$$

式中, $P(f)$ 为超声共振信号的功率谱密度, f 为频率分量,Hz; $W(m)$ 为窗函数, Δt 为采样间隔, s 。

2.3 实验系统及试件

电磁超声自动扫查检测系统如图 3 所示,主要由检测单元和扫查单元两部分构成。检测单元主要由

RITEC RAM-5000 SNAP 电磁超声检测设备、专用小型 EMAT 电磁超声探头、Tektronix DPO4104 数字示波器、带通滤波器, 阻抗匹配器和控制计算机组成。为实现小型金属环-含能材料粘接试件的检测, 专用小型电磁超声探头线圈直径仅为 5 mm, 与电磁超声检测设备连接, 用于超声波信号的激发和接收。数字示波器与电磁超声检测设备连接实现超声信号的采集, 为提高信号的信噪比, 示波器采用 16 次平均模式进行信号采集和显示。扫查单元由旋转电动扫查台组, 运动控制器和控制计算机组成。扫查单元中, 采用电动旋转台夹持被检试件旋转, 电磁超声探头固定在扫查台支架上进行对被检试件的周向扫

查。电磁超声探头与试件的提离距离约为 0.5 mm, 电磁超声探头端部设有弧形槽, 使探头沿金属环周向运动, 防止发生偏心。

人工模拟脱粘缺陷试件如图 4 所示, 由低碳钢金属环(图 4 中剖面线部分)和高聚物粘接炸药(polymer bonded explosive, PBX)模拟材料圆柱通过环氧胶粘接而成。为模拟不同大小和不同形状的脱粘缺陷, PBX 模拟材料圆柱上设计长度 10 mm, 宽度 W 分别为 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 mm 的矩形通槽和直径 Φ 分别为 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 mm 的圆形通孔, 相邻两槽或两圆孔间隔 60° 。

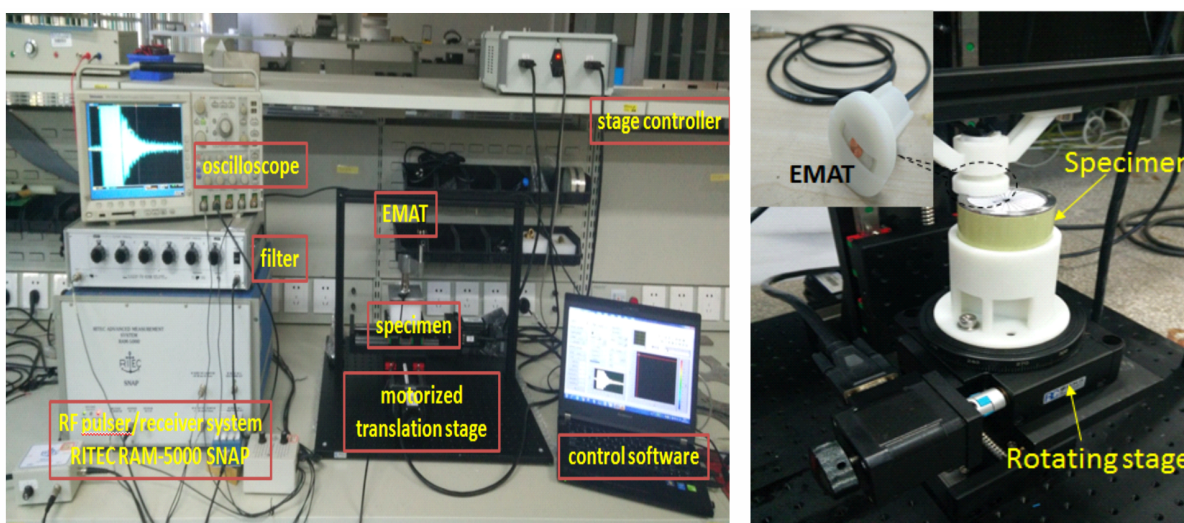
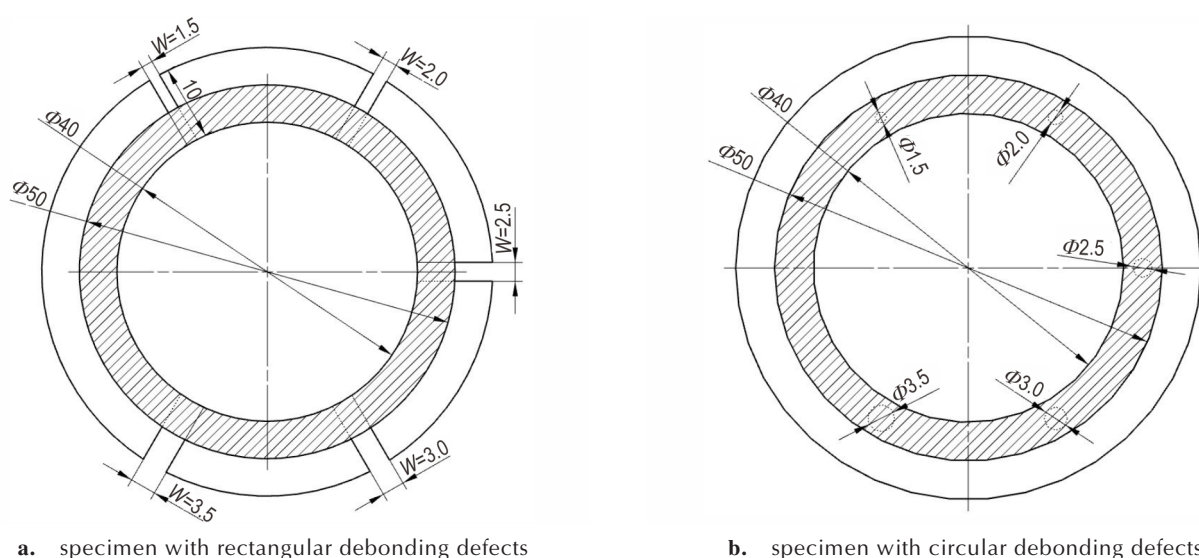


图 3 金属环-含能材料界面脱粘缺陷电磁超声自动扫查实验系统

Fig.3 Experiment system of automatic electromagnetic acoustic testing for debonding inspection in the adhesive layer between metal ring and energy-containing material



a. specimen with rectangular debonding defects

b. specimen with circular debonding defects

图 4 金属环-含能材料界面脱粘缺陷模拟试件

Fig.4 Simulated specimens of interfacial debonding defects between metal rings and energetic materials

3 结果与讨论

3.1 脱粘缺陷电磁超声共振信号分析

根据实验测试结果,选择模拟试验件第3阶超声共振频率 2.8 MHz 为激励频率,脉冲信号持续时间 10 μ s,开展脱粘缺陷电磁超声共振检测工作。图 5 分别为在矩形脱粘缺陷试件中粘接完好区域和宽度 $W=1.5, 2.0, 3.0$ mm 脱粘缺陷上方的电磁超声共振信号;图 6 分别为在圆形脱粘缺陷试件中粘接完好区域和直径 $\Phi=1.5, 3.0, 3.5$ mm 脱粘缺陷上方的电磁超声共振信号。由图 5 和图 6 可以看出,当电磁超声探头位于粘接完好区域上方时,检测信号幅值较小。当电磁超声探头位于脱粘区域上方时,检测信号幅值明显增大,出现更明显的超声共振现象,且随着脱粘缺陷的增大而增大。因此,可以看出该检测方法对于金属环-含能材料界面脱粘缺陷具有很好的检测效果,可以检测出脱粘缺陷的存在,并一定程度上评价其大小。

3.2 脱粘缺陷电磁超声共振 B 扫成像

为了进一步验证该检测方法对于金属环-含能材料界面脱粘缺陷的检测能力,采用所开发的电磁超声自动扫查和成像系统对模拟试件进行环形扫查和超声

B 扫成像。图 7 分别为矩形和圆形脱粘缺陷试件电磁超声共振 B 扫图像。从图 7a 中可以明显观察到①~⑤五个位置处信号幅值(像素颜色)明显较强,分别为 $W=3.5, 3.0, 2.5, 2.0$ mm 和 1.5 mm 脱粘缺陷 B 扫成像。从图 7b 中可以明显观察到①②③三个位置处信号幅值明显较强,分别为 $\Phi=3.5, 3$ mm 和 2.5 mm 脱粘缺陷 B 扫成像。而 $\Phi=2.0$ mm 和 $\Phi=1.5$ mm 两较小脱粘缺陷却无法看到,是因为脱粘缺陷面积太小,已超出探头的检测灵敏度。

3.3 脱粘缺陷电磁超声共振功率谱成像

从两电磁超声 B 扫图可以看出,图中 7 部分超声背景信号分布并不均匀,这给缺陷的识别造成一定的困难。为克服这一问题,根据图 5 和图 6 可以看出当脱粘缺陷存在时,电磁超声共振信号衰减变小,持续时间更长,因此可选择时间靠后的信号进行分析。为更好对缺陷进行识别,提高缺陷信号的成像质量,降低因金属环本身材质导致的超声共振信号变化的影响,截取图 7 中黄色虚线框内时间段的时域信号,通过功率谱(PSD)变换将时域信号转为频域信号,生成的频域 B 型显示图如图 8 所示。图 8a 中可很清楚地观察到五个脱粘区域在共振激励频率出现功率谱峰值区域,图 8b 中

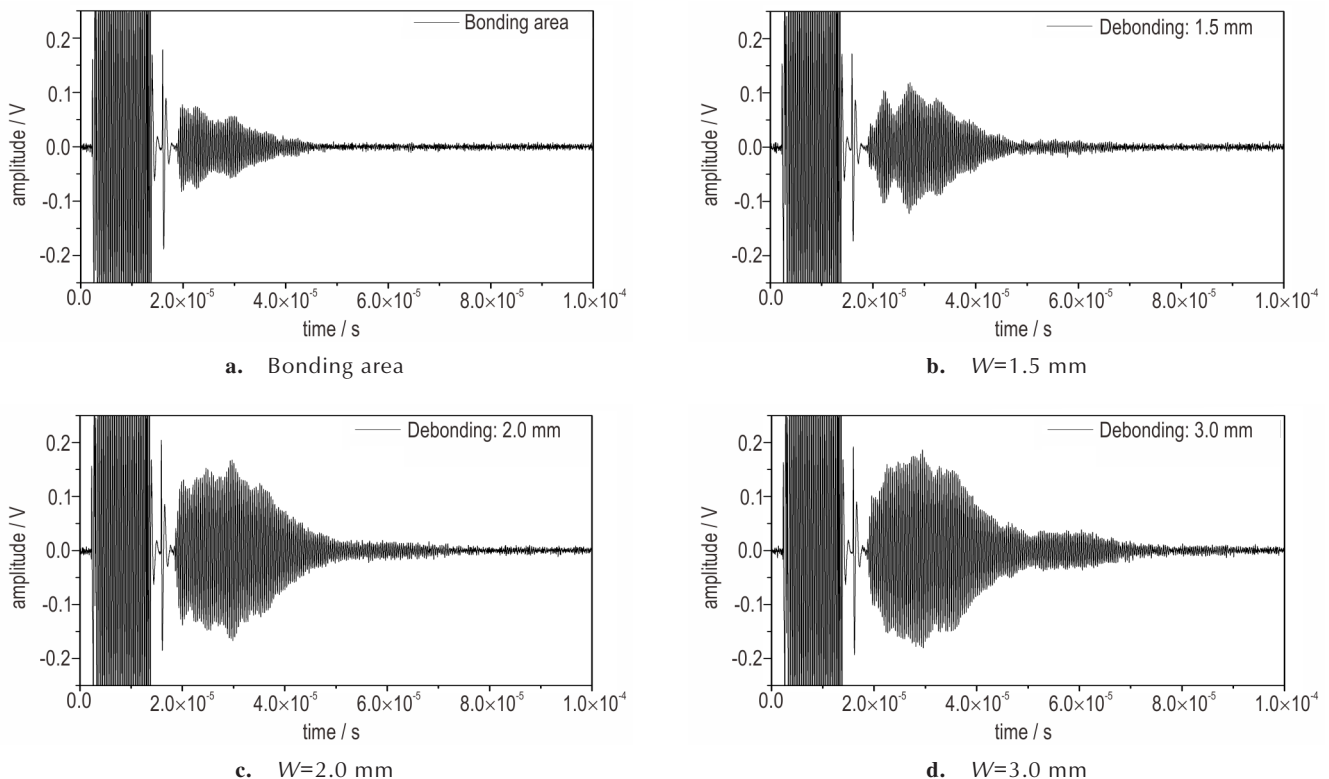


图 5 矩形脱粘试件不同位置对应的电磁超声共振信号

Fig.5 Measured electromagnetic acoustic resonance signals for specimen with rectangular debonding defects of different position

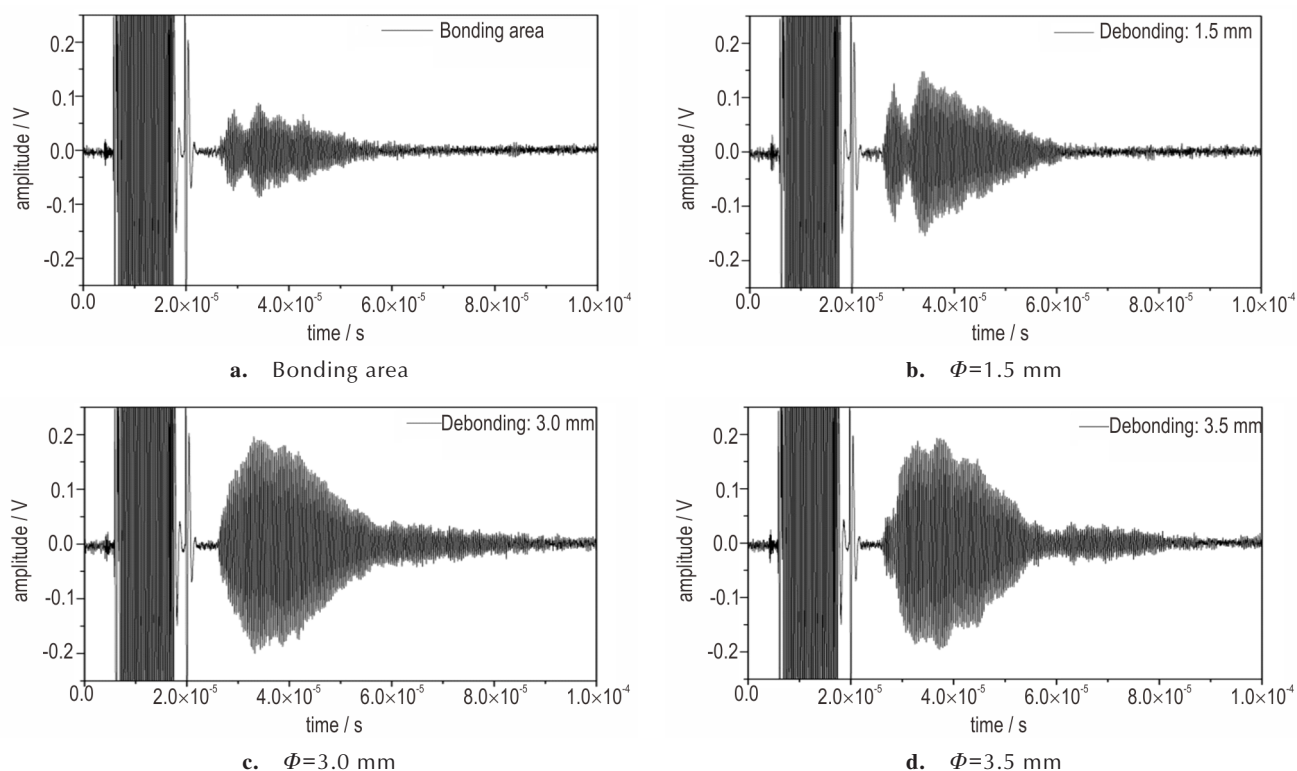


图6 圆形脱粘试件不同位置对应的电磁超声共振信号

Fig.6 Measured electromagnetic acoustic resonance signals for specimen with circular debonding defects of different position

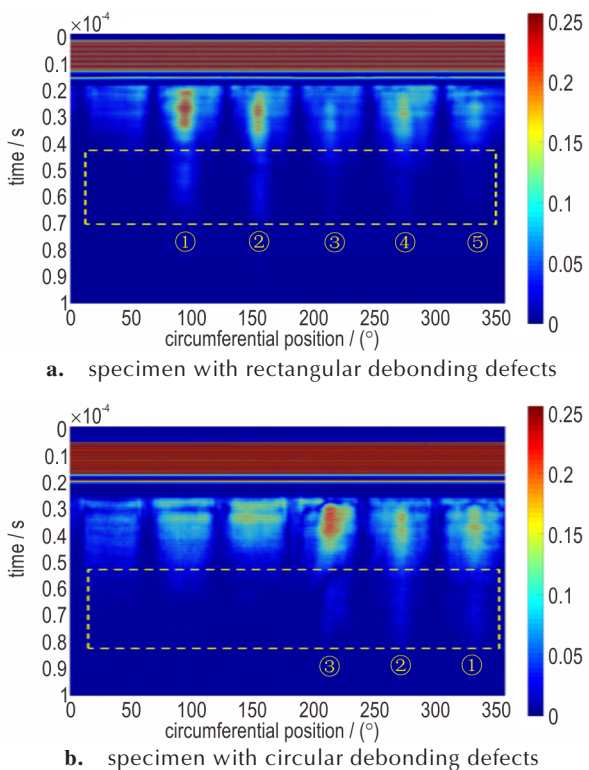


图7 金属环-含能材料试件环形扫查电磁超声共振时域信号B扫图

Fig.7 B-scan images of electromagnetic acoustic resonance time-history signal with rotating scanning of the metal ring / energy-containing material specimen

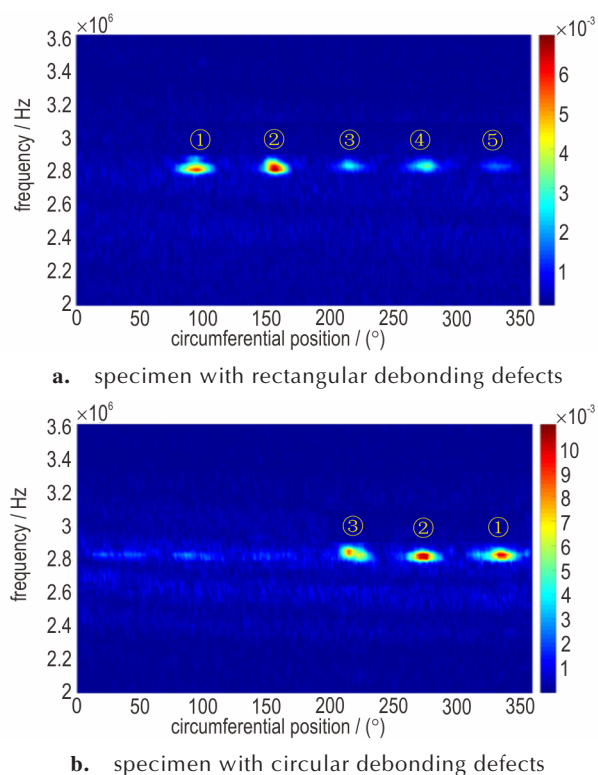


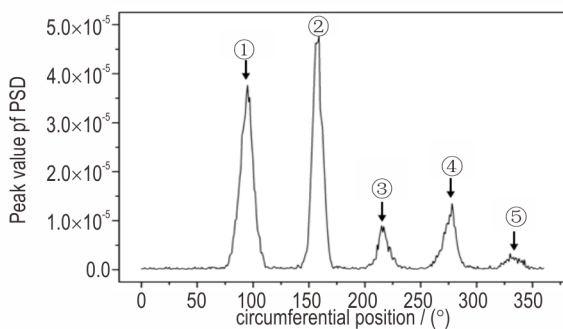
图8 金属环-含能材料试件环形扫查电磁超声共振功率谱密度B扫图

Fig.8 B-scan images of electromagnetic acoustic resonance PSD with rotating scanning of the metal ring / energy-containing material specimen

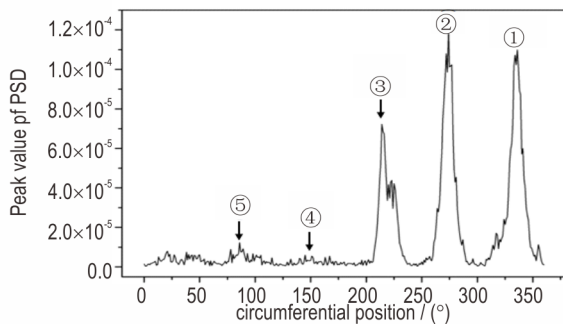
可很清楚地观察到三个脱粘区域在共振激励频率出现功率谱峰值区域,而其他背景区域均无明显的噪声存在。由图8可见,通过进行功率谱分析处理后,有效抑制背景信号和其他噪声的影响,缺陷成像质量大幅度提高,具有更高的缺陷可识别性。

4 电磁超声共振脱粘缺陷检测能力分析

图9为提取图8中提取功率谱峰值得到其分布曲线。从图9可以看出,随着缺陷尺寸的减小,功率谱峰值总体分布上也存在下降趋势,但存在较大的误差,如图9中①号缺陷位置对应功率谱密度峰值应大于②号缺陷位置功率峰幅值,③号缺陷位置功率谱密度峰值应该大于④号缺陷位置功率谱幅值,但受到金属环材质(磁化系数)不均的影响,实际测量结果却与之相反,这给缺陷尺寸定量带来一定困难。



a. specimen with rectangular debonding defects

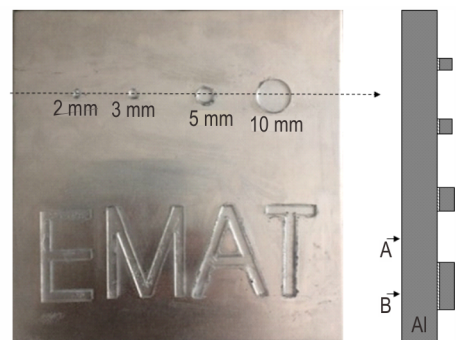


b. specimen with circular debonding defects

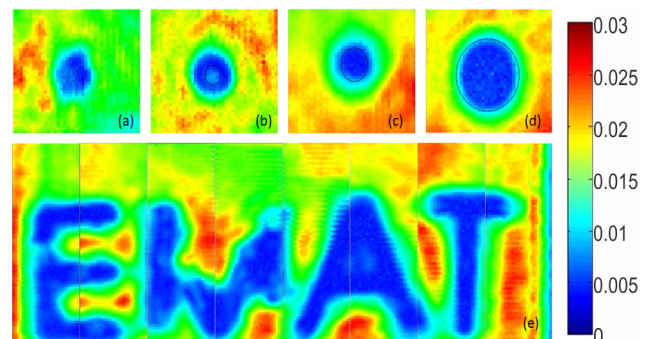
图9 环形扫查电磁超声共振信号 PSD 峰值分布曲线
Fig.9 PSD peak distribution curve of electromagnetic acoustic resonance signal by circular scanning

通过上述结果可以看出,由于金属环-含能材料试件中脱粘缺陷的尺寸远小于检测所采用探头的尺寸,超出了探头的分辨极限,因此很难从B扫图中准确获得缺陷的尺寸和形状信息。为进一步说明该方法对于

缺陷的分辨能力,在此借用前期针对平板粘接试件的检测结果进行分析。图10为一金属-有机玻璃平板粘接试件电磁超声共振C扫检测结果^[11],从中可以看出对于直径2 mm和3 mm的圆形脱粘缺陷,其所对应缺陷成像尺寸与实际尺寸相差较大,而接近探头的尺寸(直径5 mm)或更大尺寸的缺陷,其成像结果则与实际尺寸相近,且能分辨缺陷的形状。因此该方法对于缺陷的分辨能力主要受所采用检测探头的尺寸限制,要提高对小缺陷的形状和尺寸的分辨能力,需要进一步研究和开发更小尺寸的电磁超声探头,或者开发聚焦型探头。



a. The adhesive bonding specimens



b. C-scan image

图10 金属-有机玻璃平板粘接试件电磁超声共振C扫检测结果
Fig.10 C-scan image of PSD peak of electromagnetic acoustic resonance signal in metal-plexiglass bonding specimen

5 结论

(1) 基于电磁超声共振的金属环-含能材料界面脱粘缺陷检测方法,开发了用于金属环-含能材料粘接试件界面脱粘缺陷检测专用的小型电磁超声探头,搭建了电磁超声自动扫查和成像系统,实现了金属环-含能材料界面脱粘缺陷模拟试件的自动扫描和超声B扫成像,开发了基于功率谱分析的电磁超声共振信号处理方法。

(2) 实验测量结果表明电磁超声共振检测方法对于金属环-含能材料界面脱粘缺陷具有很好的检测灵敏度, 可以实现宽度 1.5 mm 以上的矩形脱粘缺陷和直径 2.5 mm 以上的圆形脱粘缺陷检测和 B 扫成像。

(3) 铁磁性金属环由于加工等因素造成的材质不均对电磁超声信号的稳定性有较大的影响, 通过采用基于功率谱分析的电磁超声共振信号处理方法能够有效抑制这一影响, 处理后的图像能大幅度提高了对缺陷的识别能力和缺陷的成像质量。但由于金属环材质不均造成的电磁超声信号不稳定和电磁超声传感器相对于缺陷尺寸仍然比较大等因素的存在, 缺陷的精确定量评价还存在一定的难度, 需要后续进一步对探头和信号处理方法进行优化。

参考文献:

- [1] 江念, 王召巴, 金永, 等. 固体发动机界面粘接性能的非线性超声无损评价[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(1): 141-144.
JIANG Nian, WANG Zhao-ba, JIN Yong, et al. Nondestructive evaluation on adhesive properties of SRM interface using nonlinear ultrasonic [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2015, 38(1): 141-144.
- [2] 徐猛, 徐彦霖, 王增勇, 等. 粘接结构的超声检测技术及其进展[J]. 机械, 2007(34): 56-58.
XU Meng, XU Yan-lin, WANG Zeng-yong, et al. Ultrasonic testing techniques and progress of adhesive structure. *Mechanics*[J]. 2007(34): 56-58.
- [3] 税国双, 汪越胜, 曲建民. 粘接界面性能退化的非线性超声无损检测[J]. 声学技术, 2008, 27(5): 146-148.
SHUI Guo-shuan, WANG Yue-shen, QU Ji-min. Nondestructive evaluation of adhesive joints degradation using nonlinear ultrasonics[J]. *Technical Acoustics*, 2008, 27(5): 146-148.
- [4] 郑善朴, 陆铭慧, 王俊东, 等. 多层结构脱粘缺陷的超声检测方法[J]. 应用声学, 2019, 38(1): 134-141.
ZHENG Shan-pu, LU Ming-hui, WANG Jun-dong, et al. Ultrasonic testing method for debonding defects in multilayer structures [J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2019, 38(1): 134-141.
- [5] Guyott C C H, Cawley P, Adams R D. The non-destructive testing of adhesively bonded structure: A review[J]. *The Journal of Adhesion*, 1986, 20: 129-159.
- [6] 张伟斌, 田勇, 杨存丰. 含能材料无损检测技术及其应用综述[C]//全国第九届无损检测学术年会论文集, 上海, 2010, 769-777.
ZHANG Wei-bin, TIAN Yong, YANG Gun-feng. Summary of Energetic Materials Technologies and Applications of Nondestructive Testing [C]//Proceedings of the 9th National Annual Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, 2010, 769-777.
- [7] Tattersall H G. The ultrasonic pulse echo technique as applied to adhesion testing[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1973, 6(7): 819-832.
- [8] Segal E, Dickstein P, Segal Y, et al. A novel method of processing pulse echo data in adhesive bond inspection[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 1990, 9(1): 1-17.
- [9] Dixon S, Edwards C, Palmer S B, et al. Consideration for the ultrasonic inspection of metal-adhesive bonds using EMATs[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2000, 19(3): 95-103.
- [10] Dixon S, Edwards C, Palmer S B. The analysis of adhesive bonds using electromagnetic acoustic transducers[J]. *Ultrasonics*, 1994, 32(6): 425-430.
- [11] Liu Tian-hao, Pei Cui-xiang, Cheng Xin, et al. Adhesive debonding inspection with a small EMAT in resonant mode[J]. *NDT and E International*, 2018, 98: 110-116.
- [12] Hirao M, Ogi H. Electromagnetic acoustic resonance and material characterization [J]. *Ultrasonics*, 1997(35): 413-421.
- [13] Urayama R, Takagi T, Uchimoto T, et al. Online monitoring of pipe wall thinning by electromagnetic acoustic resonance method [J]. *E-Journal of Advanced Maintenance*, 2013(5): 155-164.

Interface Debonding Inspection in Metal Ring and Energy-Containing Material Bonding Structure Based on Electromagnetic Acoustic Resonance

ZHOU Hai-qiang¹, LIU Tian-hao², PEI Cui-xiang²

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China; 2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to realize the non-destructive evaluation of the interface bonding quality of metal-energetic material bonding structure and improve its structural safety, the non-destructive testing of debonding defect in metal ring and energetic material bonding structure is studied in this paper. A new non-contact testing method based on electromagnetic acoustic resonance is proposed for the inspection of the metal ring-energetic material structure. A special miniature electromagnetic acoustic transducer is made, and an automatic scanning system of electromagnetic acoustic testing is developed. The simulated debonding defects specimen were scanned and imaged automatically. A corresponding signal processing method was developed. The feasibility and detection ability of this technology for non-contact detection of debonding defects of metal ring-energetic materials interface were verified.

Key words: debonding defect; metal ring; NDT; electromagnetic acoustic resonance; non-contact

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019305

(责编: 高毅)