

“钢-铅”粘接结构非接触激光超声检测方法

夏嘉斌^{1,2}, 孙广开^{2,4}, 宋 潮³, 周正干⁴

(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 北京信息科技大学 光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100101; 3. 中北大学 电气与控制工程学院, 山西 太原 030051; 4. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要: 为了解决核工业领域防辐射用钢铅粘接结构的非接触、高精度无损检测问题, 研究激光超声检测方法。建立了粘接结构模型, 分析了激光超声的传播及脱粘导致的声波反射和衰减; 实验测量了良好粘接与脱粘处的窄带激光超声信号, 观测到脱粘导致的界面反射信号幅度变化; 分析得出表征脱粘的激光超声反射系数与声波频率和测量位置的关系; 通过激光超声 C 扫描方法实现模拟脱粘试样的检测与成像。研究表明: 激光超声方法可以实现两层钢铅粘接结构脱粘的成像检测, 在核工业防辐射结构检测中具有应用前景。

关键词: 核工业; 粘接结构; 脱粘; 激光超声; 无损检测

中图分类号: TB553 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0117006

Non-contact laser ultrasonic testing of steel-plumbum bonding structure

Xia Jiabin^{1,2}, Sun Guangkai^{2,4}, Song Chao³, Zhou Zhenggan⁴

(1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Measurement Technology,

Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101, China;

3. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

4. School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to solve the problem for the non-contact and high precision nondestructive testing of steel-plumbum bonding structures used for radiation inhibition in nuclear industry, the laser ultrasonic testing method was studied. The model of the steel-plumbum bonding structure was established. The propagation of laser ultrasonic and the wave reflection and attenuation induced by the debonding defect were analyzed. The narrowband laser ultrasonic signals were measured at the good bonding and debonding region, and the variation of the amplitude of the interface reflected signal induced by the debonding defect was observed. For the characterization of the debonding defects, the relation of the reflection coefficient with the wave frequency and measuring position was analyzed. The detection and imaging of the specimen with simulated debonding defects were realized by the laser ultrasonic C-scan

收稿日期: 2017-06-12; 修订日期: 2017-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(U1430120, 51375027)

作者简介: 夏嘉斌(1994-), 男, 硕士生, 主要从事光电检测技术与系统方面的研究。Email: jiabin.xia@bistu.edu.cn

通讯作者: 孙广开(1984-), 男, 讲师, 博士, 主要从事检测技术相关方面的研究。Email: guangkai.sun@buaa.edu.cn

method. The research results show that the imaging testing of debonding defects in the two-layer steel-plumbum bonding structure can be realized using the laser ultrasonic method, it has application prospect in the nuclear industry for the testing of radiation protection structures.

Key words: nuclear industry; bonding structure; debonding; laser ultrasonic; nondestructive testing

0 引言

“钢-铅”粘接结构以其优异的防辐射性能和高强度等特点广泛用于核工业领域重大装备的设计制造^[1]。然而,受材料性质、粘接工艺和应用环境影响,钢铅粘接结构在制造和使用过程中容易产生脱粘缺陷,显著降低结构的力学性能,危及重大装备的安全可靠性^[1-2]。因此,必须采用有效的无损检测方法准确检出脱粘缺陷,保障粘接结构在全寿命期的完整性和可靠性。

在各种无损检测方法中,超声检测是粘接结构脱粘检测采用的主要方法。但是,对于部分核装备采用的钢铅粘接结构,常规超声检测方法因使用液体耦合剂而影响结构性能,无法应用^[1-2]。射线检测受方法原理及材料性能影响而难以应用,也难于检测面积型的脱粘缺陷。磁粉和涡流等检测方法也受技术原理限制而难以满足检测要求^[1-2]。因此,需要研究有效的检测方法,以实现此类粘接结构的非接触、高精度无损检测^[1]。

这种情况下,激光超声检测方法受到关注。该方法采用激光激励和探测超声波进而检测材料和结构中的缺陷。与常规超声检测方法相比,具有完全非接触(无需超声耦合剂)和高精度的特点^[3-6],并适用于复杂结构的现场检测,有望解决钢铅粘接结构的非接触检测问题。

2011年,DUBOIS等研制出一种新型的激光超声检测系统^[7],提高了技术设备的可靠性,并降低了使用成本,推动了激光超声技术的广泛应用。2012年,CHIA等利用脉冲激光扫描激励和压电超声探测的兰姆波成像方法实现了飞机复合材料结构脱粘的检测^[8]。2014年,PARK等研究了复合材料结构脱粘的激光超声检测方法^[9]。2015年,周正干等分析了异种金属粘接结构界面与激光超声的交互作用^[10]。以上研究为金属粘接结构脱粘的激光超声检测奠定了基础。

但是,钢铅粘接结构在组成材料、粘接工艺和结

构形式上具有特性,目前需要进行有针对性的研究。基于此,文中针对钢铅粘接结构脱粘缺陷的激光超声检测问题进行研究,得出利用激光超声检测钢铅粘接结构脱粘的方法和参量选取原则,实现模拟脱粘试样的扫描成像检测,为解决核装备防辐射钢铅粘接结构的非接触、高精度无损检测问题提供有效的方法。

1 数值计算方法与模型

1.1 有限元计算方法

固体材料中激光超声的激发机制主要包括热弹效应和烧蚀效应,其中热弹效应不会损伤材料表面,是激光超声无损检测主要采用的超声激发机制。通常,描述固体材料中激光超声的热弹激发与传播过程采用的是热弹耦合原理,对应的有限元形式如下^[11-12]:

$$[K]\{T\} + [C]\{\dot{T}\} = \{R_q\} \{R_Q\} \quad (1)$$

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{R_{ext}\} \quad (2)$$

式中:[K]为传导矩阵;{ T }为温度向量;[C]为比热容矩阵;{ \dot{T} }为温升率向量;{ R_q }为热通量向量;{ R_Q }为热源向量;[M]为质量矩阵;{ U }为位移矢量;{ \ddot{U} }为加速度矢量;{ R_{ext} }为外力矢量。

根据公式(1)、(2)所示的热弹耦合有限元方程,选用准定常假设条件,将热弹耦合机制分解为以下两个步骤进行数值计算。第一步,将热流载荷用脉冲激光进行等效,并施加在材料模型表面,脉冲激光在材料中形成的温度场的传播过程由热传导方程进行计算获得,得到材料模型中各节点随时间变化的温度载荷。第二步,将上一步得到的温度载荷作为激励载荷施加在材料模型中的各节点,弹性波的产生与传播过程采用热弹方程进行计算。考虑到数值计算精度,时间步长和单元长度的选择依据分别为:

$$\Delta t \leq \frac{1}{180f_{max}}, L_e \leq \frac{\lambda_{min}}{20} \quad (3)$$

式中: Δt 为积分时间; f_{max} 为分析中声波频率的最大

值; L_e 为单元长度; λ_{\min} 为分析中波长的最小值。

1.2 钢铅粘接结构模型

采用有限元方法建立钢铅粘接结构的数值模型, 基于热弹耦合理论和有限元程序计算激光超声的传播和声场特征。

建立的钢铅粘接结构模型的几何尺寸为 30 mm×10 mm; 钢层厚度为 6 mm、铅层厚度为 3.5 mm、环氧树脂胶层厚度为 0.5 mm; 删除部分单元模拟脱粘缺陷。表 1 为各层材料的物理性能参数, 其中 ρ 代表密度, c 代表比热容, λ 代表热导率, α 代表热膨胀系数, E 代表弹性模量, ν 代表泊松比。

有限元计算的过程中, 第一步为计算温度场, 单元类型选择为适用于瞬态热分析的二维矩阵热单元, 各节点的温度自由度具有单一性, 计算得到全部节点在任一时刻的温度数据; 第二步计算弹性波场, 单元类型选择的是二维矩形实体单元, 沿 X、Z 方向各节点具有自由度, 将温度载荷作为激励载荷施加于单元节点上, 计算获得全部节点在任一时刻的位移和应变数据, 可表示产生的超声场。

表 1 有限元计算采用的材料热力学性能参数

Tab.1 Thermal and elastic properties of the materials used in finite element calculation

Material property	Epoxy resin	Plumbum	Steel
$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1 200	11 300	7 850
E/GPa	35	16.4	216
ν	0.28	0.44	0.28
$c/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	210	126	460
$\lambda/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	1.2	35	15
$\alpha/\times 10^{-5}$	1	1.2	1.45

2 实验装置与试样

2.1 激光超声检测实验装置

激光超声实验装置实物见图 1。采用一台光纤传导脉冲激光器产生超声波, 脉冲激光波长 1 064 nm、脉冲时间宽度 10 ns、脉冲激光能量范围 0~20 mJ、光斑直径 3 mm; 采用一台双波混合激光干涉仪探测超声信号, 探测光斑直径约 200 μm , 超声频率响应范围 50 kHz~125 MHz; 采用前置放大器和滤波器处理超声信号, 通过数据采集卡完成信号的 A/D 转换; 采用两组四维精密调节机构分别承载激励和探

测激光端口, 可调节激光入射角度及与试样距离; 采用精密二维位移平台带动试样运动, 在程序控制下完成扫描成像检测^[13-15]。

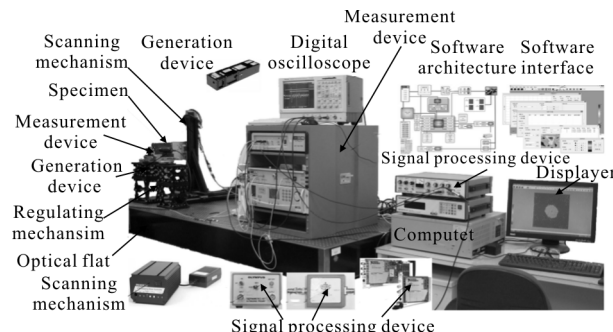


图 1 激光超声检测实验装置

Fig.1 Experimental setup for laser ultrasonic testing

2.2 钢铅粘接结构试样

采用环氧树脂胶接工艺制备模拟脱粘的圆柱形钢铅粘接结构试样, 其中, 钢层厚度为 6 mm、铅层厚度为 3.5 mm、胶层厚度为 0.5 mm。在环氧树脂与钢层和铅层界面处预置 9 个不同直径的圆形聚四氟乙烯薄片, 模拟不同尺寸的脱粘缺陷, 模拟脱粘缺陷的编号及尺寸如表 2 所示。制备的试样实物及模拟脱粘分布如图 2 所示。

表 2 模拟脱粘缺陷的编号及尺寸

Tab.2 Number and size of the simulated interfacial debonding defect

Number	Diameter/mm	Number	Diameter/mm
(1)	4	(6)	10
(2)	5	(7)	9
(3)	6	(8)	8
(4)	7	(9)	12
(5)	14		

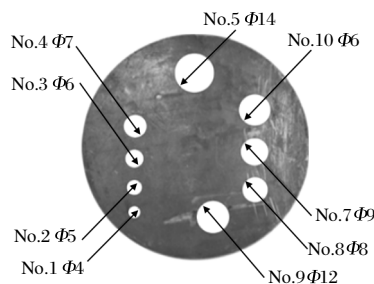


图 2 模拟脱粘缺陷的环氧树脂胶接钢铅粘接结构试样

Fig.2 Epoxy resin-bonded steel-plumbum structure specimen with simulate interfacial debonding

3 仿真与实验分析

3.1 脱粘导致的激光超声场分布变化

图 3 是采用良好粘接结构模型和模拟脱粘缺陷模型计算得出的激光超声场的纵向截面瞬态位移分布 (1.6 μs); 模拟脱粘缺陷长度为 4 mm、厚度为 0.5 mm; 计算过程中, 采用单脉冲激光能量为 1.8 mJ、脉冲激光时间宽度为 10 ns、光斑直径为 3 mm, 脉冲激光光斑中心与脱粘缺陷中心沿模型上表面法线是同轴方向; 计算中的积分时间步长取为 0.5 ns、有限元单元长度取为 10 μm 。

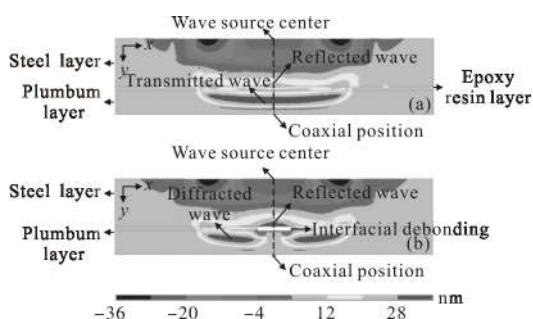


图 3 环氧树脂胶接钢铅粘接结构中激光超声场的分布特征
Fig.3 Distribution of the wave field of laser ultrasonic in epoxy resin-bonded steel-plumbum structure

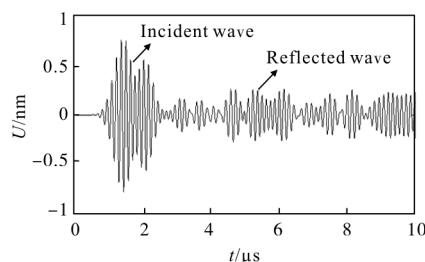
由图 3(a)分析得出, 钢铅粘接结构中激光超声场沿声束轴线呈对称型分布特征; 激光超声在传播过程中形成声束主瓣, 主瓣轴线方向与模型上表面法线方向相同, 即主瓣声能沿粘接结构表面法向传播, 可以采用脉冲反射法和穿透法表征脱粘缺陷。对比分析图 3(a)和(b)得出当钢铅粘接结构的环氧树脂胶层存在脱粘缺陷时, 脱粘界面与激光超声作用产生更高幅度的反射声场, 声波传播路径改变, 产生衍射声场(脉冲激光产生宽频带超声波, 在小于 1MHz 频率范围存在相对高幅度声能, 此部分声波的波长大于模拟缺陷尺寸, 导致激光超声的衍射), 并导致透射声场能量的显著衰减。

3.2 脱粘导致的激光超声反射信号变化

基于图 3 所示的钢铅粘接结构的良好粘接模型和脱粘缺陷模型的激光超声传播的计算结果, 选择模型表面声源中心节点沿 Y 轴方向提取以位移表示的宽带激光超声信号并提取 4~6 MHz 窄带频率成

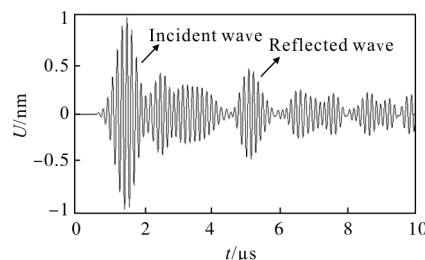
分, 得到窄带激光超声信号如图 4 所示。利用图 1 所示的激光超声实验装置和图 2 所示的钢铅粘接结构模拟脱粘试样进行实验研究, 设定脉冲激光功率密度是 $2.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 、脉冲宽度是 10 ns、聚焦光斑直径是 3 mm; 采用脉冲反射法, 在试样中选取良好粘接位置和模拟直径 4 mm 脱粘缺陷位置进行测量, 探测点位于激励光斑中心, 测量得到的 4~6 MHz 窄带激光超声信号如图 5 所示。

由图 4 和图 5 可以观测到钢铅粘接结构脱粘缺陷界面导致的激光超声反射信号的幅度变化, 即当粘接结构环氧树脂胶层存在脱粘缺陷时, 频率 4~6 MHz 的窄带激光超声反射信号幅度显著提高; 在脱粘缺陷的检测中, 采用数值计算和实验方法相



(a) 良好粘接处的激光超声信号

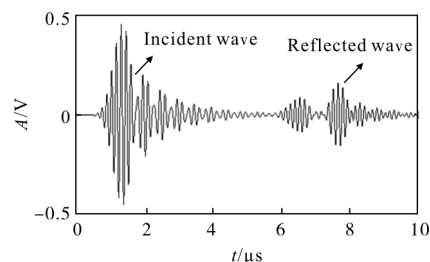
(a) Laser ultrasonic signals at good bonding region



(b) 脱粘处的激光超声信号

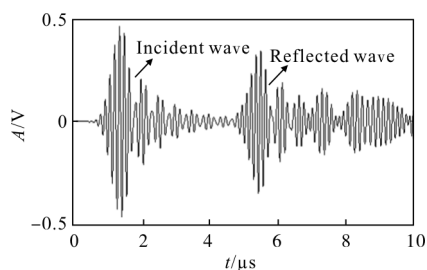
(b) Laser ultrasonic signals at debonding region

图 4 数值计算得到的窄带激光超声反射信号
Fig.4 Numerical calculation of narrowband reflected laser ultrasonic signals



(a) 良好粘接处的激光超声信号

(a) Laser ultrasonic signals at good bonding region



(b) 脱粘处的激光超声信号
(b) Laser ultrasonic signals at debonding region

图 5 实验测量得到的窄带激光超声反射信号

Fig.5 Experimental measurement of narrowband reflected laser ultrasonic signals

结合, 得到的基于界面反射波幅度变化具有良好的-一致性,但在激光超声反射信号的波形、幅度以及到达时间这三方面存在一些差异,主要原因为^[16-18]:(1) 粘接结构模型和试样实物的物理性能参量有一定差异;(2) 在热弹耦合理论的激光超声的数值计算过程中存在一定误差。

3.3 激光超声与脱粘界面作用的反射特性

分析激光超声与粘接结构脱粘缺陷界面作用的反射特性,为得到相对高幅度的脱粘界面反射波幅度,应选择合适窄带激光超声信号频率。在粘接结构的良好粘接模型和脱粘缺陷模型的声源中心位置提取宽频带的激光超声信号,选择中心频率不同的滤波器对窄带信号进行提取,计算得到由于脱粘界面导致的反射回波幅度变化量与声波频率之间的对应关系,并利用实验装置和试样得到实验数据,如图 6 所示,其中粘接界面回波幅度变化量与入射波幅度的比值定义为反射系数。

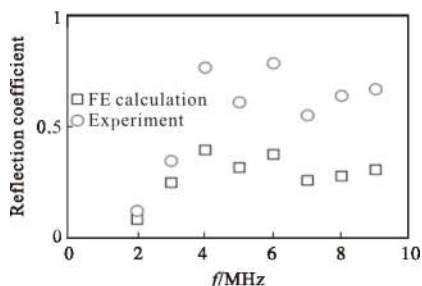


图 6 脱粘界面与激光超声作用的反射系数谱

Fig.6 Reflection coefficient spectra for the interaction of laser ultrasonic with debonding interface

分析图 6 得出, 表征钢铅粘接结构脱粘缺陷的激光超声反射系数随声波频率增加不呈线性变化关

系; 与脱粘界面反射系数的最小值和最大值对应的激光超声频率分别为 2 MHz 和 6 MHz;在 4~9 MHz 频率范围,激光超声信号具有更高的反射系数,有利于脱粘缺陷的检测;激光超声反射系数随频率变化存在波动,这与宽频带激光超声波不同频率成分的声场分布特征相关。数值计算和实验结果在脱粘界面反射系数随频率变化趋势上具有一致性,但在反射系数数量值上存在差异,导致差异的因素与前述原因相同^[19-20]。

基于以上分析,对于两层钢铅粘接结构脱粘缺陷的激光超声检测,可以在 4~9 MHz 频率范围进行窄带信号提取,根据脉冲反射法通过反射信号幅度的变化表征脱粘缺陷。同时,由于检测采用的激励脉冲激光聚焦光斑直径(3 mm)小于钢-铅粘接结构试样中的模拟脱粘缺陷直径(4~12 mm),这种情况下根据超声反射原理可知,激光超声反射系数不随缺陷尺寸的增加而增大,有利于不同尺寸脱粘缺陷的检测一致性。

为选择合适的声波探测位置,得到相对高幅度的脱粘界面反射回波并保持信号幅度稳定,基于粘接结构模型、实验装置和试样进行计算和实验分析,将探测光斑分别沿正、负方向偏离声源中心,间隔为 1 mm,在此过程中,得到的脱粘反射系数与声波测量位置存在对应关系,如图 7 所示,其中测量位置“0”与结构表面声源中心位置对应,“1”和“-1”分别对应声源中心正负偏离 1 mm 的位置。

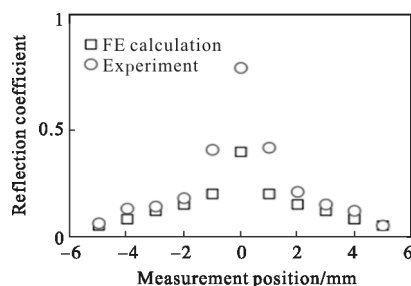


图 7 脱粘界面反射系数与测量位置的关系

Fig.7 Relation of the reflection coefficient of debonding interface with the measuring position

分析图 7 得出, 钢铅粘接结构脱粘缺陷的反射系数随激光探测位置偏移呈对称型分布特征;在声源中心位置测得的脱粘界面反射系数具有最大值;当探测位置偏离声源中心位置 1 mm 以上时,测量

得到的脱粘界面反射系数大幅减小;在脱粘界面反射系数随测量位置变化趋势上,数值计算和实验结果具有一致性,但在反射系数值上存在一定差异,导致差异的原因相同。

以上分析表明,脱粘缺陷可用声源中心位置探测激光超声的反射信号进行表征;在扫描过程中,采用高分辨激光探测装置,为了减小探测位置偏移对脱粘界面反射波幅度的影响,需要精密控制探测激光光斑空间相对位置使其保持恒定,从而提高脱粘缺陷检测准确度。

4 激光超声 C 扫描检测

根据以上分析,利用脉冲反射法,通过激光超声 C 扫描方法对模拟脱粘缺陷的钢铅粘接结构试样进行检测与成像,图 8 为得到的 C 型图。实验参量的设置为:脉冲激光功率密度为 $2.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 、光斑直径为 3 mm、超声频率为 4~6 MHz;探测激光光斑直径约 200 μm ;扫描采样点间距为 0.2 mm,保持探测激光光斑与试样表面声源中心位置重合,并精密控制探测光斑相对位置使其偏移量在 1 mm 之内。

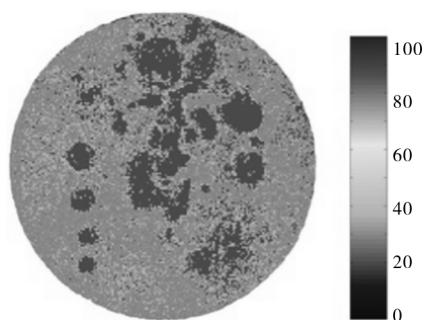


图 8 环氧树脂粘接钢铅粘接结构试样的激光超声 C 扫描成像
Fig.8 C-scan image of the epoxy resin-bonded steel-plumbum structure with laser ultrasonic

从图 8 所示钢铅粘接结构试样激光超声 C 扫描检测图中可以观测到,编号(1)~(4)脱粘缺陷的检测图像与预置缺陷的形状、分布和尺寸特征具有一致性,验证了激光超声方法的有效性;从扫描图中可以分辨出编号(5)~(9)预置脱粘缺陷的形态特征,但在预置脱粘缺陷周边和试样中心区域存在大尺寸脱粘缺陷图像,这表明此区域存在与预置缺陷相连且界面性质相近的自然缺陷,导致预置缺陷的形态图像

与自然缺陷图像相混叠。

5 结 论

(1) 钢铅粘接结构中激光超声场沿声束轴线呈对称型分布特征;激光超声主瓣声能沿粘接结构表面法向传播;脱粘界面与激光超声作用产生更高幅度的反射声场,声波传播路径改变,产生衍射声场,并导致透射声场能量的显著衰减。

(2) 对于两层钢铅粘接结构脱粘缺陷的激光超声检测,可在 4~9 MHz 频率范围提取窄带信号,根据反射信号幅度变化表征脱粘缺陷;可选择声源中心位置探测反射信号,需要精密控制探测光斑位置使其保持恒定,提高脱粘缺陷检测准确度。

(3) 利用激光激励、激光探测的非接触激光超声检测方法,通过 C 型扫描成像,可以得到两层钢铅粘接结构脱粘缺陷的形态、位置和分布特征,验证了方法的有效性,为解决钢铅粘接结构脱粘缺陷的非接触、高精度无损检测问题提供了参考。

参考文献:

- [1] Li Jianwen, Tang Guangping, Huo Heyong, et al. Study on non-contact nondestructive testing techniques of bonding structure with steel-lead alloys [J]. *China Adhesives*, 2013, 22: 21-33. (in Chinese)
李建文, 汤光平, 霍合勇, 等. “钢-铅”粘接结构非接触无损检测技术的研究[J]. 中国胶粘剂, 2013, 22: 21-33.
- [2] Zhang K S, Zhou Z G, Zhou J H, et al. Characteristics of laser ultrasound interaction with multi-layered dissimilar metals adhesive interface by numerical simulation[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 353: 284-290.
- [3] Zhan Yu, Liu Changsheng, Xue Junchuan, et al. Simulation of laser ultrasonic detection micro crack by equivalent load method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1006004. (in Chinese)
战宇, 刘常升, 薛俊川, 等. 等效荷载法模拟激光超声微裂纹检测[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1006004.
- [4] Song Yanxing, Wang Jing, Feng Qibo, et al. Influence of laser parameters and laser ultrasonic detection method on ultrasonic signals[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1433-1437. (in Chinese)
宋燕星, 王晶, 冯其波, 等. 激光参数及激光超声探测方法对超声信号的影响 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5):

- 1433–1437.
- [5] Sun G K, Zhou Z G. Characterization of delaminations in composite laminates by laser ultrasonics [J]. *Materials Testing*, 2016, 58(10): 877–886.
- [6] Karabutov A A, Podymova N B. Quantitative analysis of the influence of voids and delaminations on acoustic attenuation in CFRP composites by the laser–ultrasonic spectroscopy method[J]. *Composites: Part B*, 2014, 56: 238–244.
- [7] Dubois M, Drake T E. Evolution of industrial laser–ultrasonic systems for the inspection of composites [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2011, 26(3–4): 213–228.
- [8] Chia C C, Lee J R, Park C Y, et al. Laser ultrasonic anomalous wave propagation imaging method with adjacent wave subtraction: Application to actual damages in composite wing[J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, 44: 428–440.
- [9] Park B, An Y K, Sohn H. Visualization of hidden delamination and debonding in composites through noncontact laser ultrasonic scanning [J]. *Composite Science and Technology*, 2014, 100: 10–18.
- [10] Zhou Z G, Sun G K, Chen X C, et al. Detection of drilling–induced delamination in aeronautical composites by noncontact laser ultrasonic method [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(12): 2656–2663.
- [11] Babbar V K, Underhill P R, Stott C, et al. Finite element modeling of second layer crack detection in aircraft bolt holes with ferrous fasteners present [J]. *NDT&E International*, 2014, 65: 64–71.
- [12] Dong L M, Ni C Y, Shen Z H, et al. Numerical simulation of evaluation of surface breaking cracks by array–lasers generated narrow–band SAW [J]. *Acoustic Physics*, 2011, 57 (5): 730–736.
- [13] Qiu L, Liu B, Yuan S F, et al. Impact imaging of aircraft composite structure based on a model–independent spatial–wavenumber filter[J]. *Ultrasonics*, 2016, 64: 10–24.
- [14] Cara Leckey A C, Rogge M D, Raymond P F. Guided waves in anisotropic and quasi–isotropic aerospace composites: Three–dimensional simulation and experiment[J]. *Ultrasonics*, 2014, 54: 385–394.
- [15] Sun G K, Zhou Z G, Li G H, et al. Development of an optical fiber–guided robotic laser ultrasonic system for aeronautical composite structure testing [J]. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127: 5135–5140.
- [16] An Qichang, Zhang Jingxu, Yang Fei, et al. TMT M3 mirror figure measurement with slope method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1884–1889. (in Chinese)
安其昌, 张景旭, 杨飞, 等. 基于斜率的 TMT 三镜面形检测方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1884–1889.
- [17] Nan Gangyang, Wang Qiwu, Zhang Zhenzhen, et al. Rail steel flaw inspection based on laser ultrasonic method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0106006. (in Chinese)
南钢洋, 王启武, 张振振, 等. 基于激光超声方法的钢轨缺陷检测[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0106006.
- [18] Zhang Changjuan, Jiao Feng, Niu Ying. PCBN tool wear mechanism in laser ultrasonically combined cutting cemented carbide [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0806002. (in Chinese)
张昌娟, 焦锋, 牛赢. PCBN 刀具激光超声复合切削硬质合金的磨损机理[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 0806002.
- [19] Zhang Changjuan, Jiao Feng, Zhao Bo, et al. Tool wear in laser ultrasonically assisted cutting cemented carbide and its effect on surface quality [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1413–1423. (in Chinese)
张昌娟, 焦锋, 赵波, 等. 激光超声复合切削硬质合金的刀具磨损及其对工件表面质量的影响 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(6): 1413–1423.
- [20] Lv Qiang, Li Wenhao, Bayanheshig, et al. Interferometric precision displacement measurement system based on diffraction grating [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10 (1): 39–50. (in Chinese)
吕强, 李文昊, 巴音贺希格, 等. 基于衍射光栅的干涉式精密位移测量系统[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 39–50.