

丁羟衬层固化状态的激光超声实时监测方法研究

谭辉*, 陈友兴**, 金永, 柴华淇, 杨亚军

中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051

摘要 衬层是连接固体火箭发动机壳体和推进剂的重要组成部分,其粘接状态决定着推进剂-衬层-壳体粘接界面的完整性,进而影响固体发动机的安全可靠。针对衬层粘接结构的混合态和非连续阻抗特性,研究了激光超声在衬层结构中的传播规律,搭建了实验装置;以烧蚀机制激发超声波为手段,通过提取超声波在衬层中的传播时间和相对声衰减量,采用超声波透射法对衬层的固化过程进行状态表征,提出了用于求解衬层中纵波渡越时间的标定时间差值法,建立了非连续阻抗的相对声衰减模型。实验结果表明,采用标定时间差值法获得的渡越时间,以及采用相对声衰减模型计算得到的声衰减量能够很好地表征衬层的固化过程。

关键词 激光器; 激光超声; 激光发射器; 激光接收器; 固体火箭发动机; 衬层

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0814004

Laser Ultrasonic Real-Time Monitoring Method for Solidification State of Butylated Hydroxy Lining

Tan Hui*, Chen Youxing**, Jin Yong, Chai Huaqi, Yang Yajun

School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract The lining is an important part of connecting the solid rocket motor shell and the propellant, and its bonding state determines the integrity of the propellant-liner-shell bonding interface, which further affects the safety and reliability of the solid motor. According to the mixed state and discontinuous impedance characteristics of the lining bonding structure, the propagation law of laser ultrasound in the lining structure is studied, and the experimental device is set up. By means of ultrasonic wave excited by ablation mechanism, the propagation time and relative sound attenuation of ultrasonic wave in the lining are extracted, and the ultrasonic transmission method is used to characterize the curing process of the lining. A calibration time difference method for solving the longitudinal wave transit time in the lining is proposed, and the relative sound attenuation model of discontinuous impedance is established. The experimental results show that the transit time obtained by the calibration time difference method and the sound attenuation calculated by the relative sound attenuation model can well characterize the curing process of the lining.

Key words lasers; laser ultrasound; laser transmitter; laser receiver; solid rocket motor; lining

1 引言

丁羟衬层作为固体火箭发动机燃烧室内绝热层和推进剂的粘接材料,其粘接性能的优劣直接影响着发动机的工作可靠性和安全性^[1-2]。在实际工程应用中,推进剂药浆是在衬层的“半固化状态”下浇

入的,此时衬层中剩余的活性因子还能与绝热层反应生成化学键,使粘接更加牢固^[3]。衬层在“半固化状态”之前的状态较黏稠,活性因子较多,化学反应后会产生气泡,此时浇注推进剂将使粘接界面的力学性能下降。衬层在“半固化状态”之后,活性因子与绝热层的化学反应基本完成,此时浇注推进剂将

收稿日期: 2021-09-06; 修回日期: 2021-10-04; 录用日期: 2021-12-24

基金项目: 山西省自然科学基金(201801D121150)、中北大学第十七届研究生科技立项(20201730)

通信作者: *tandahui1997@163.com; **cyxzbdx@163.com

会导致粘接不牢固。因此,在装药过程中准确监测衬层的“半固化状态”是保障火箭发动机装药质量的关键。

目前,监测丁羟衬层固化状态的方法主要采用手指压法,但手指压法依靠操作人员经验,具有不稳定性。杨亚军等^[4]采用非线性超声来监测衬层的固化过程,研究成果处于实验室阶段。实际工程应用要求在监测丁羟衬层的固化状态时保证不破坏衬层的固化,而且能实时在线监测并掌握衬层的固化状态。激光超声检测技术是通过激光发射器发射激光脉冲至材料表面,从而形成应力场,进而产生超声波,再利用光学检测系统来接收携带特征信息的超声波,最终得到试件的特征信息^[5]。这种检测技术不仅具有非接触和在线监测的特点,还具有分辨率高和可激发多模式超声波等优点,被广泛应用于表面缺陷、内部缺陷与厚度的检测^[6-20]。Zhang 等^[21-22]尝试采用激光超声来监测环氧树脂与硅酮密封胶的固化规律,均取得了初步成果,但衬层是以丁羟为主要成分的化学混合物,成分比单一的环氧树脂与硅酮密封胶繁杂,故固化过程更复杂,为此增加了监测难度。

本文以丁羟的粘接结构为研究对象,利用烧蚀机制激发超声波,采用透射检测法接收超声波^[23]。基于激光超声对衬层的固化状态进行非接触在线监测,详细分析激光超声波的渡越时间和幅值与固化状态之间的关系,并表征衬层的固化状态,证实激光超声在线非接触监测衬层固化过程的可行性及有效性。

2 试件制作与监测平台

2.1 试件的制作

为了研究固化过程,制作的试件剖面如图 1 所示。试件为衬层的混合粘接结构,由金属板-丁羟衬层-金属板构成,下侧金属板的大小为 50 mm × 50 mm × 5 mm。为了保障空气与衬层之间充分接触而加快固化时间,上侧金属板与衬层的接触面大

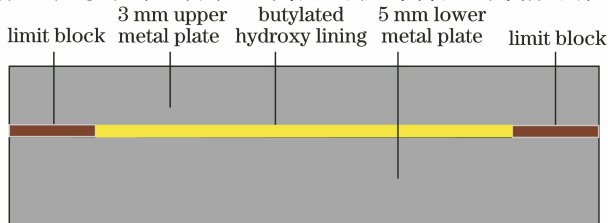


图 1 衬层粘接结构的剖面图

Fig. 1 Cross-section view of lining bonding structure

小是下侧金属板的 1/2,即尺寸为 25 mm × 50 mm × 3 mm,中间部分为衬层,中间部分两侧为控制衬层厚度与位置的限位块。

2.2 激光超声监测固化过程的实验装置

依据衬层易于流动的特点搭建了实验装置,如图 2 所示。监测平台由 CFR (Compact Folded Resonator) 激光发射器、QUARTET-500 mV 型激光接收器、反射镜、凸透镜、数据采集部分和运动控制部分组成,将激光接收器安置在可移动的运动平台上,便于调节发射器与接收器处于对心位置。其中 CFR 激光发射器的触发方式为方波边沿触发方式,发射的激光波长为 1064 nm,脉宽为 11 ns,重复频率为 10 Hz。激光发射器发射的激光通过反射镜后使光路发生偏转,偏转光垂直照射在水平放置的焦距为 100 mm 的凸透镜上,凸透镜将激光束聚焦为圆形光斑并发射至试件表面,在试件中激励超声波。超声波在试件内部进行传播,激光接收器用于接收携带特征信息的超声波。

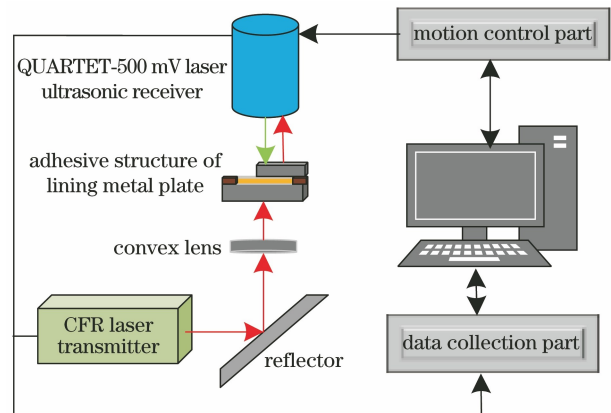


图 2 激光超声监测衬层固化的实验装置

Fig. 2 Experimental device for laser ultrasonic monitoring of lining solidification

3 传播路径与回波信号的分析

3.1 传播路径分析

激光激发器发射脉冲至厚度为 5 mm 的金属板表面。若此时激光功率密度小于材料损伤阈值,则发生热弹机制;若大于材料损伤阈值,则发生烧蚀反应。激光功率密度 I 的计算公式为

$$I = \frac{Q}{S\tau}, \quad (1)$$

式中: Q 为单脉冲激光的能量(由激光能量计测量得出); S 为材料表面的光斑面积; τ 为激光脉宽。

因脉冲激光器中的激光能量转换为超声信号能量的效率较低,采用热弹机制不能采集到清晰的纵

波信号,当能看见明显的纵波信号时,说明材料表面已被烧蚀,故本文利用烧蚀机制在材料表面产生大量等离子体以形成应力,进而在材料中激发超声波^[24-25]。根据超声波在粘接结构混合态介质中的传播规律,当超声波由金属板向衬层界面传播时,超声波的反射系数大于透射系数,透射的声波能量小,易于淹没在界面衰减中,因此大部分超声波在金属板-衬层界面发生反射,少部分发生透射,推理其前 9 个回波的传播路径如图 3(a)所示。回波 I 是径直通过试件的回波,如图 3(b)所示。回波 II 是在回波 I 的基础上,再在厚度为 3 mm 的金属板内进行一次往返反射的回波,如图 3(c)所示。回波 III 是在厚度为 5 mm 的金属板内进行一次往返反射后径直通过试件的回波,如图 3(d)所示。回波 V 是在厚度为 5 mm 的金属板内进行一次往返反射后径直通过试件,最后在厚度为 3 mm 的金属板内进行一次往返反射的回波,如图 3(e)所示。其余回波的传播路径与此类同。

采用 CIVA 软件来模拟超声波纵波在三层介质中的传播路径,如图 4 所示。模型由厚度为 5 mm 的金属板、厚度为 1.5 mm 的衬层和厚度为 3 mm 的金属板构成,金属板选用铝板,超声纵波在铝板中的声速为 6350 m/s。超声波纵波由图 4 上方圆柱形

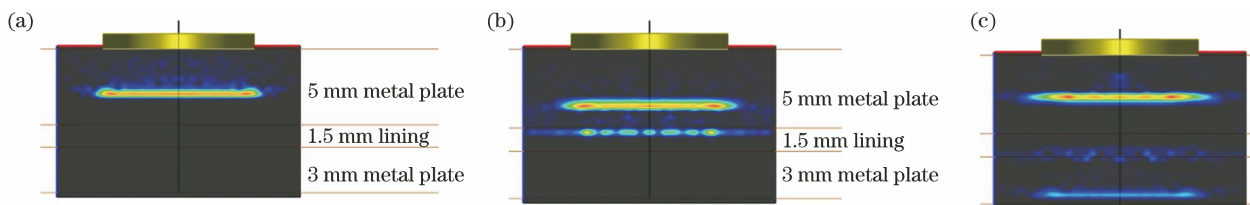


图 4 超声波在金属板衬层粘接结构中的传播路径。(a)超声波进入厚度为 5 mm 金属板的仿真云图; (b)超声波进入厚度为 1.5 mm 衬层的仿真云图;(c)超声波进入厚度为 3 mm 金属板的仿真云图

Fig. 4 Propagation path of ultrasonic wave in bonding structure of metal plate lining. (a) Simulation cloud image of ultrasonic entering metal plate with thickness of 5 mm; (b) simulation cloud image of ultrasonic entering metal plate with thickness of 1.5 mm; (c) simulation cloud image of ultrasonic entering metal plate with thickness of 3 mm

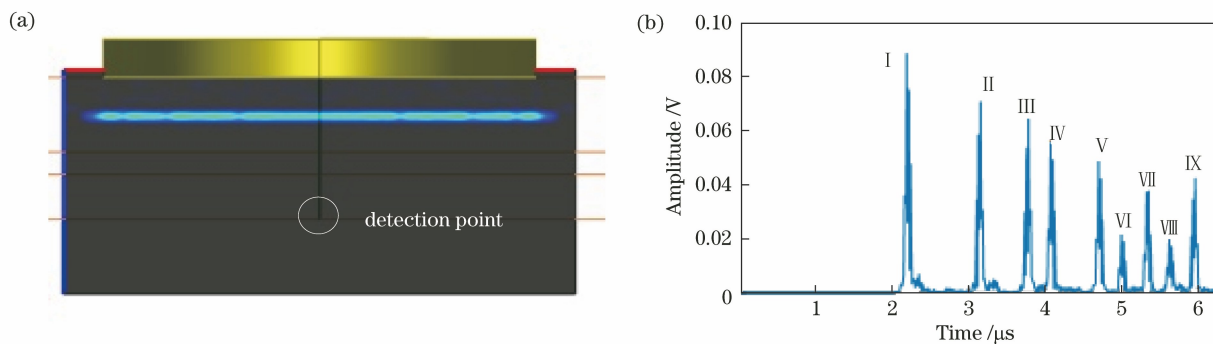


图 5 金属板衬层粘接结构中的探测点与其 A 扫信号。(a)粘接结构中的探测点;(b)探测点处 A 扫信号

Fig. 5 Detection point and A-scan signal in bonding structure of metal plate lining. (a) Detection point in bonding structure; (b) A-scan signal at detection point

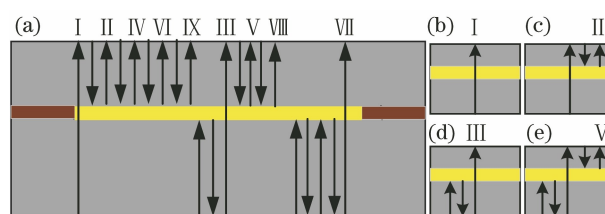


图 3 超声波在试件中的传播路径。(a)前 9 次的回波路径;(b)回波 I 的路径;(c)回波 II 的路径;(d)回波 III 的路径;(e)回波 V 的路径

Fig. 3 Propagation path of ultrasonic wave in specimen. (a) Echo paths for the first nine times; (b) path of echo I; (c) path of echo II; (d) path of echo III; (e) path of echo V

探头发射并在厚度为 5 mm 的金属板中传播,以图 5(a)的底面中心点为探测点,观察此点的 A 扫信号与回波到达厚度为 3 mm 的金属板(与空气接触面之前)的传播情况,以确定超声波在粘接结构中的传播路径。图 4 表明超声波已进入厚度为 5 mm 的金属板、厚度为 1.5 mm 的衬层、厚度为 3 mm 的金属板内并进行传播。由图 4 可以看出,少部分超声波穿透粘接结构,大部分超声波在金属板内反射,此仿真结果与超声波在阻抗差较大的多层介质中的传播路径相同。图 5(b)为超声波在探测点处的 A 扫

信号, A 扫信号中有 9 次回波, 其抵达时间依次为 2.18, 3.15, 3.78, 4.07, 4.70, 5.00, 5.36, 5.63, 5.97 μs 。根据回波 II ~ IX 与回波 I 之间的抵达时间差所经历的路程与金属板厚度的关系, 可证明图 3 路径的准确性。依据 A 扫信号中不同回波峰

值的到达时刻截取处于同一时刻的回波仿真云图, 如图 6 所示。从图 6 可以看出, 超声纵波的传播路径与图 3 路径吻合。综上所述, 本文利用 CIVA 仿真软件验证了图 3 的超声纵波在金属板衬层粘接结构中的传播路径。

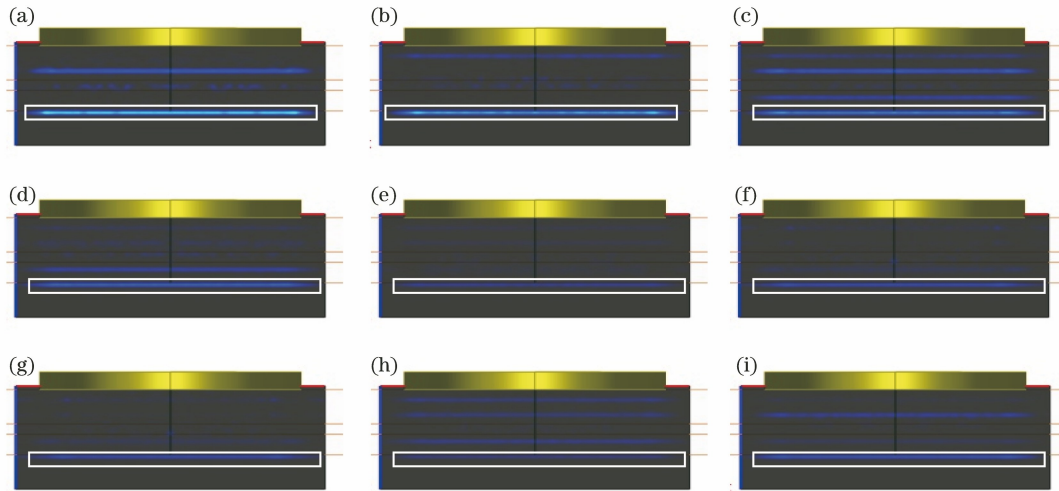


图 6 前 9 次回波到达时刻的仿真云图。(a)回波 I ;(b)回波 II ;(c)回波 III ;(d)回波 IV ;(e)回波 V ;(f)回波 VI ;(g)回波 VII ;(h)回波 VIII ;(i)回波 IX

Fig. 6 Simulated cloud images of the first nine echo arrival times. (a) Echo I ; (b) echo II ; (c) echo III ; (d) echo IV ; (e) echo V ; (f) echo VI ; (g) echo VII ; (h) echo VIII ; (i) echo IX

接下来对前 9 次回波的传播路径进行实验验证, 分别采用 1060 号铝和 201 号钢来制作衬层粘接结构试件, 测得的激光超声信号如图 7 所示, 铝板衬层粘接结构中信号的中心频率在 2 MHz 左右, 钢板衬层粘接结构中信号的中心频率在 2.9 MHz 左右。标注信号时域图中前 9 个回波, 表 1 为前 9 个

回波的抵达时间。依据其他回波和回波 I (第一次穿透衬层粘接结构的透射纵波) 的时间差与超声波在试件金属板内的传播时间之间的关系, 可以推导出超声波在衬层粘接结构中的传播路径, 结果与图 3 的传播路径一致, 实验验证了图 3 的准确性。

表 1 前 9 个回波的抵达时间
Table 1 Arrival time of the first nine echoes

Material	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1060 aluminum	2.50	3.44	4.06	4.38	5.00	5.32	5.62	5.94	6.26
201 steel	2.50	3.50	4.20	4.50	5.20	5.52	5.88	6.20	6.54

3.2 特征波的判定与分析

根据图 3 可知, 回波 I、回波 III 和回波 VII 均穿透衬层一次, 并携带了衬层固化的特征信息。但回波 III 和回波 VII 在厚度为 5 mm 的金属板中来回穿透, 而回波 I 可以更直观地反映超声波在衬层中的传播情况, 因此回波 I 为判定衬层固化状态的特征波。

丁羟衬层体内的活性因子在固化过程中不断发生交联反应, 导致材料的声阻抗、黏性、密度和形态等发生转变, 这会影响超声波在材料内部的传播^[4]。超声波在衬层内部的声速与幅值变化情况可以直接反馈给回波 I, 因此本文围绕回波 I 的抵达时间和

振幅变化开展激光超声在线监测衬层固化方法的可行性研究。

超声波在衬层中的传播声速是判断衬层状态的有效条件之一, 以往的研究方法是根据衬层厚度与声波在衬层中一次传播的时间进行比值计算以求解超声波在衬层中的声速, 其中一次传播的时间为二次回波与一次回波差值的一半。由图 3 可知, 激光激发的超声纵波在衬层中均穿透一次, 无二次穿透, 因此以往的研究方法不适用于激光超声监测固化状态, 本文提出标定时间差值法求解纵波在衬层中的渡越时间, 其推导原理如下。

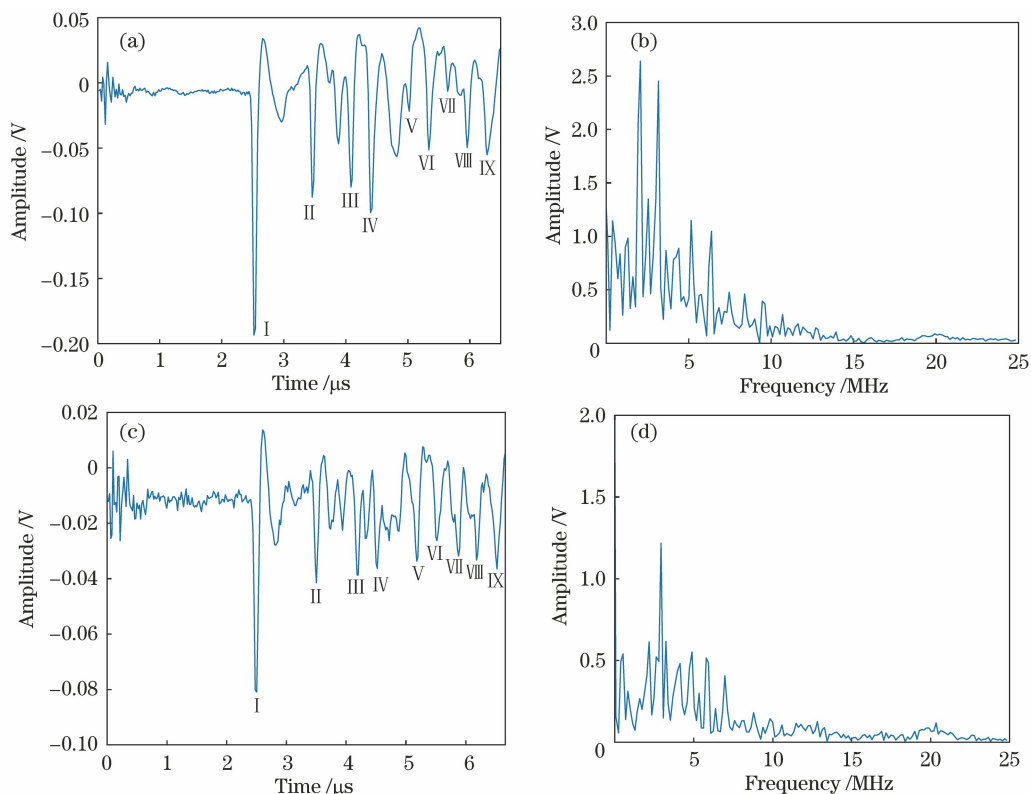


图 7 激光超声监测衬层固化的典型信号。(a)铝板衬层粘接结构典型信号的时域图;(b)铝板衬层粘接结构典型信号的频域图;(c)钢板衬层粘接结构典型信号的时域图;(d)钢板衬层粘接结构典型信号的频域图

Fig. 7 Laser ultrasonic monitoring of typical signal of lining solidification. (a) Time domain diagram of typical signal of aluminum lining bonding structure; (b) frequency domain diagram of typical signal of aluminum lining bonding structure; (c) time domain diagram of typical signal of steel plate lining bonding structure; (d) frequency domain diagram of typical signal of steel plate lining bonding structure

激光激励超声波透射模式中的超声纵波传播速度 V 可表示为

$$V = \frac{d}{t}, \quad (2)$$

式中: d 为材料厚度; t 为超声纵波在材料中的渡越时间。在限位块保证衬层厚度 d 一定的情况下, V 与 t 成正比, 可根据 t 的变化来了解 V 的转变, 从而掌握超声波在衬层中的变化情况。

采用透射法接收到试样回波 I 信号的抵达时间 t_1 由 4 部分组成, 如图 8 所示。 t_1 可定义为

$$t_1 = t + t_2 + t_3 + t_4, \quad (3)$$

$$t = t_a + t_b, \quad (4)$$

式中: t 为激光激发脉冲开始至材料表面与激光接收器接收信号并返回计算机的时间; t_a 为激光激发脉冲开始至试件表面的时间; t_b 为激光接收器接收信号并返回计算机的时间; t_2 、 t_3 和 t_4 分别为超声纵波在厚度为 5 mm 的金属板、衬层和厚度为 3 mm 的金属板中的渡越时间。(3)式中的 t 与 t_3 是未知量, 为了求解纵波在衬层中的渡越时间 t_3 ,

采用标定法来得到未知量 t 的数值。

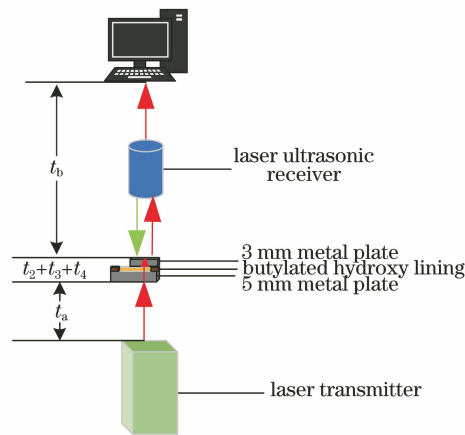


图 8 回波 I 抵达时间的组成部分

Fig. 8 Components of echo I arrival time

选取与试样中金属材料相同的板作为标定板, 保证激光发射器与接收器的位置不变, 采用透射法接收到标定板的第一个回波信号的时间 t_5 , 可表示为

$$t_5 = t + t_6, \quad (5)$$

式中: t_6 为超声纵波在标定板中的渡越时间。

联立(3)式和(5)式并求差值,可得出超声纵波在衬层中的渡越时间 t_3, t_3 的变化影响着回波 I 的抵达时间。丁羟衬层从粘手的拉丝状态开始,体内的大量活性因子与空气中的水分子等物质接触后产生热量,则衬层内部温度升高,黏性加强,此时粘接结构中的声速较慢,故回波 I 的到达时间较长。固化反应的进行使衬层转变为稍粘手,此时衬层外部已基本固化完成,内部因衬层较封闭无法与空气中的水分子等物质发生化学反应,剩余的部分活性因子之间发生交联反应,使衬层的整体弹性降低,所以超声纵波在衬层中的传播速度加快;当衬层完全不粘手且按压不会产生凹陷时,此时衬层已处于完全固化状态,衬层内部活性因子的交联反应完毕,衬层不再具有黏性,所以超声纵波在衬层中的传播速度加快,故回波 I 的抵达时间变短^[4]。因此,回波 I 的抵达时间可判定衬层固化状态。

回波 I 的幅值变化情况是表征衬层固化状态的关键。根据超声波的传播原理,振幅为 P_0 的超声波入射至粘接结构混合态介质中,经过透射和声衰减后得到回波 I,如图 9 所示,其振幅 P_1 可表示为

$$P_1 = \exp(-\alpha_1 L_1) \exp(-\alpha_2 L_2) \times \exp(-\alpha_1 L_3) T_1 T_2 P_0, \quad (6)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{L_2} \ln\left(\frac{P_i}{P_j}\right), \quad (7)$$

$$T_1 = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}, \quad (8)$$

$$T_2 = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (9)$$

式中: α_1 为超声波在金属板中的声衰减系数; α_2 为超声波在衬层中的声衰减系数; L_1, L_2 和 L_3 分别为接近激光发射器端金属板、衬层与接近激光接收器端金属板的厚度; T_1 为超声波从金属板到衬层界面的声压透射系数; T_2 为超声波从衬层到金属板界面的声压透射系数; P_i 为穿过衬层前的超声幅值; P_j 为穿过衬层后的超声波幅值; Z_1 和 Z_2 分别为金属板和衬层的声阻抗。

回波 I 在厚度为 3 mm 的厚金属板中反射得到回波 II,其振幅 P_2 可表示为

$$P_2 = [\exp(-2\alpha_1 L_3)] \cdot |r_1| P_1, \quad (10)$$

$$r_1 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (11)$$

式中: r_1 为超声波从金属板向衬层界面传播的声压反射系数。

由(6)式和(7)式可知,振幅 P_1 的变化受

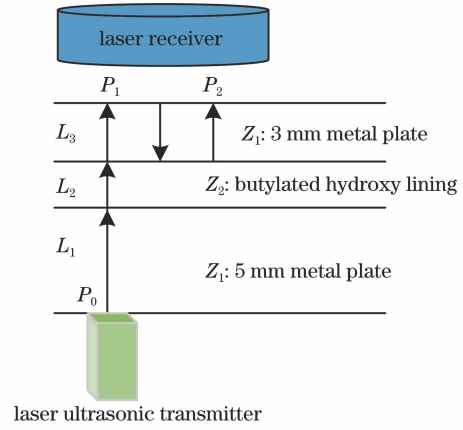


图 9 超声波的传播原理

Fig. 9 Propagation principle of ultrasonic wave

$\ln(P_i/P_j)$ 与 $T_1 T_2$ 的影响。 $\ln(P_i/P_j)$ 表示超声波在衬层中的绝对声衰减程度,根据图 3 超声波在衬层粘接结构中的传播路径,无法求解 P_i 和 P_j 。因此在衬层与金属板中建立相对声衰减模型,定义 A 为相对声衰减量,表示超声波在衬层中的相对声衰减程度,表达式为

$$A = \ln\left(\frac{P_1}{P_1 - P_2}\right). \quad (12)$$

衬层的相对声衰减量表征超声波在衬层与金属板中的相对声衰减程度,绝对声衰减量表征超声波在衬层中与进入衬层前的声衰减程度,因超声波在金属板中的声衰减系数 α_1 不变,故相对声衰减模型所求解的相对声衰减量的变化趋势与绝对声衰减量的变化趋势一致。令 B 为衬层的绝对声衰减量,表达式为

$$B = \alpha_2 L_2 = \ln(P_i/P_j). \quad (13)$$

将(6)式中的 P_1 与(10)式中的 P_2 代入(12)式,可得

$$A = \ln\left[\frac{1}{1 - \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1} \exp(-2\alpha_1 L_3)}\right] = \ln\left[\frac{Z_2 + Z_1}{Z_2 + Z_1 - (Z_1 - Z_2) \exp(-2\alpha_1 L_3)}\right]. \quad (14)$$

丁羟衬层从黏流态到完全固化,声阻抗 Z_2 逐渐变大,根据(14)式可得 A 随 Z_2 的变化曲线如图 10(a)所示。从图 10(a)可以看到, Z_2 的增大会导致 A 减小,因衬层的相对声衰减曲线的变化趋势与绝对声衰减曲线一致,故衬层的绝对声衰减量 B 减小。

令 $D = T_1 T_2$, 即

$$D = T_1 T_2 = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} = \frac{4k}{(1+k)^2}. \quad (15)$$

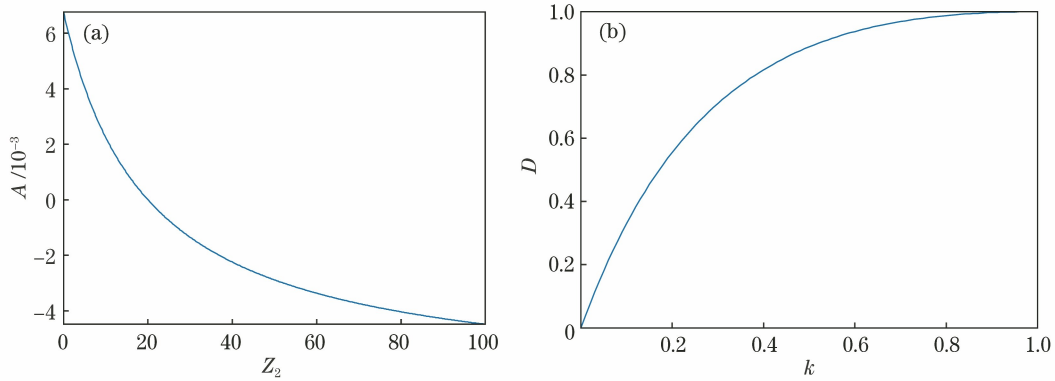


图 10 不同变量随 Z_2 的变化曲线。(a) A 随 Z_2 的变化曲线;(b) D 随 k 的变化曲线

Fig. 10 Variation curves of Z_2 with different variables. (a) Variation curve of Z_2 with A ;

(b) variation curve of k with D

由(15)式可知, D 随着 Z_2 的变化而变化。令 $k = Z_2/Z_1, 0 < k < 1$, 随着 Z_2 的增大, k 增大。绘制 D 随 k 的变化曲线如图 9(b) 所示。从图 9(b) 可以看到, Z_2 的增大会导致 D 的增大。根据(6)式可知, 固化反应可以使衬层的声阻抗 Z_2 增大, A 减小, B 减小, D 增大, 回波 I 的振幅 P_1 变大。因此, 回波 I 的振幅变化情况可作为判断激光超声监测衬层固化状态可行性的手段。

4 在线监测实验与结果分析

4.1 在线监测实验过程

整个实验流程分为 4 个步骤, 具体如下。

1) 首先使用激光超声在金属板中激发超声纵波, 计算纵波在金属板中一次传播的时间。采样频率为 50 MHz, 以 1060 号铝板与 201 号钢板为研究对象, 厚度分别为 3 mm 与 5 mm。纵波在厚度为 3 mm 的铝板中的渡越时间为 $0.47 \mu\text{s}$, 声速为 6383 m/s; 在厚度为 5 mm 的铝板中的渡越时间为 $0.78 \mu\text{s}$, 声速为 6410 m/s。纵波在厚度为 3 mm 的钢板中的渡越时间为 $0.50 \mu\text{s}$, 声速为 6000 m/s; 在厚度为 5 mm 的钢板中的渡越时间为 $0.85 \mu\text{s}$, 声速为 5882 m/s(超声纵波在金属板中的渡越时间是进行 5 次重复实验得出的平均值, 纵波在厚度为 3 mm 的钢板和厚度为 5 mm 钢板中声速差异的为一个采样点误差)。

2) 在同等的条件下激发标定板中的超声纵波, 计算激光激发脉冲开始至材料表面与接收器接收信号并返回计算机的时间。选取与试件金属板相同材质且与试件相同厚度的板作为标定板, 分别在每块板上不同的 5 个位置处采集一组数据, 采样频率为 50 MHz, 经(4)式计算得到铝板的 t 为 $0.40 \mu\text{s}$, 钢

板的 t 为 $0.34 \mu\text{s}$ 。

3) 配置衬层料浆并制作试件。本文采用的丁羟衬层材料由中国航天科技集团公司第四研究院提供。首先将配置的衬层料浆搅拌 15 min 后放入 83°C 的恒温箱中加热 20 min, 使衬层中的化学成分充分反应后产生气泡, 随后放入真空泵中抽取气泡 10 min; 取出样品, 将其倒在 5 mm 厚的金属样板上刮平后放上同种材质的 3 mm 厚的金属板, 放入真空泵中抽取气泡 10 min; 取出试件, 此时试件中的丁羟衬层已处于“拉丝状态”。其中铝板衬层粘接结构中的衬层厚度为 1.4 mm, 钢板衬层粘接结构中的衬层厚度为 1.3 mm。

4) 监测固化实验。考虑到丁羟衬层在“拉丝状态”与“半固化状态”下的持续时间较长, 将试件放在激光超声实验平台上采用烧蚀机制进行实验。因材料属性不同, 所以激光在材料表面的临界激光功率密度不同, 由(1)式得出铝板和钢板的激光功率密度分别为 $3.31 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 与 $6.54 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$, 满足烧蚀指标。每 30 min 采集一组数据, 采样频率为 50 MHz。

4.2 实验结果分析

判断激光超声监测衬层固化可行性的标准是回波 I 的到达时间和振幅。随着固化反应的进行, 回波 I 的到达时间变短, 幅值变大。图 11(a) 为衬层处于不同阶段下铝板粘接结构的回波 I 信号, 图 11(b) 为衬层处于不同阶段下钢板粘接结构的回波 I 信号。图 12(a) 为在铝板粘接结构中衬层处于不同阶段的 9 个回波 I 信号的频域图(每个阶段均取三个回波 I 信号), 图 12(b) 为在钢板粘接结构中衬层处于不同阶段的 9 个回波 I 信号的频域图。图 13(a) 为铝板粘接结构中回波 I 的 B 扫图, 图 13(b) 为钢板粘接结构中回波 I 的 B 扫图。

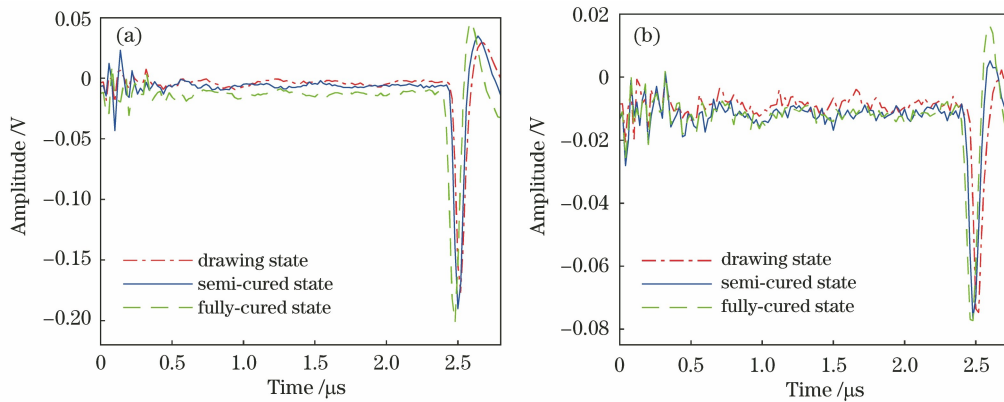


图 11 衬层在不同状态下的回波 I 信号。(a) 铝板衬层粘接结构的回波 I 信号;(b) 钢板衬层粘接结构的回波 I 信号

Fig. 11 Echo I signal of lining in different states. (a) Echo I signal of aluminum lining bonding structure; (b) echo I signal of steel plate lining bonding structure

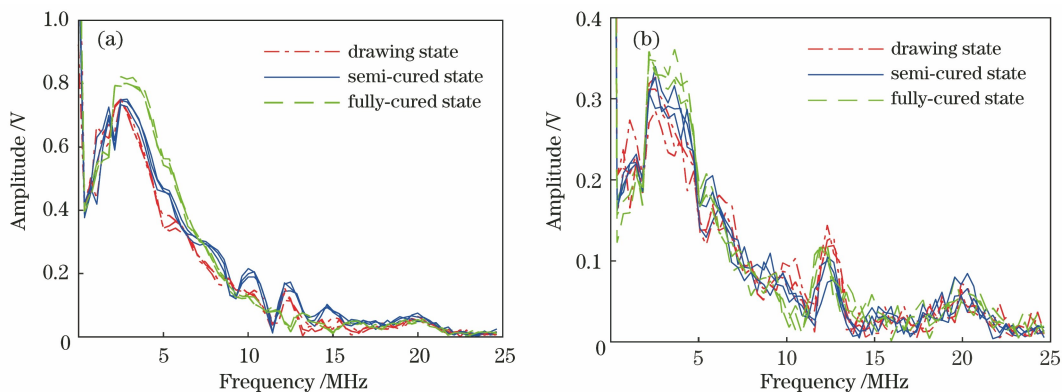


图 12 衬层在不同状态下的回波 I 信号频域图。(a) 铝板衬层粘接结构的回波 I 信号频域图;(b) 钢板衬层粘接结构的回波 I 信号频域图

Fig. 12 Frequency domain diagram of echo I signal in different states of lining. (a) Frequency domain diagram of echo I signal of aluminum lining bonding structure; (b) frequency domain diagram of echo I signal of steel plate lining bonding structure

根据图 11 可知,铝结构与钢结构在衬层半固化状态下回波 I 的抵达时间相比于拉丝状态下均加快 $0.02 \mu\text{s}$,完全固化状态下回波 I 的抵达时间相较于半固化状态下加快 $0.02 \mu\text{s}$ 。考虑到烧蚀机制下光斑的厚度会改变试件的厚度,进而影响回波 I 的抵达时间,但经激光位移传感器测量后试件的烧蚀光斑厚度不足以影响在该采样频率下所采集的回波信号,因此排除由烧蚀机制所引起的试件厚度变化导致回波 I 的抵达时间提前因素,回波 I 抵达时间的提前是由衬层固化状态变化造成的。此外,随着固化反应的进行,回波 I 的幅值变大,其变化情况与理论推导一致。在每个状态下取三个不同的回波 I 信号进行频域分析,回波 I 在衬层不同状态下的超声频域信息如图 12 所示。图 12(a)中回波 I 的中心频率约为 3.2 MHz ,除中心频率处信号以外,当衬层处于拉丝状态时,回波 I 在与中心频率成 4 倍

关系的频率处出现明显信号;当衬层处于半固化状态时,回波 I 在与中心频率成 3~5 倍关系的频率处出现明显信号;当衬层处于完全固化状态时,回波 I 除中心频率处信号外,未出现明显的其他频率信号,但其中心频率信号的幅值明显大于拉丝及半固化状态下中心频率信号的幅值。图 12(b)中回波 I 的中心频率约为 3.2 MHz ,中心频率处的信号在衬层完全固化状态下的信号幅值高于半固化状态下的信号幅值,半固化状态下的信号幅值高于拉丝状态下的信号幅值;除中心频率处信号以外,在与中心频率成 4 倍和 7 倍关系的频率处出现信号。根据铝板衬层粘接结构中回波 I 的频域信号可有效判定衬层的固化状态,而钢板衬层粘接结构中回波 I 的频域信号相对紊乱,不同固化状态下只有中心频率处的信号幅值有差异,需后续具体研究钢板衬层粘接结构中的超声非线性信息与衬层固化状态之间的关系。

如图 13(a)与图 13(b)所示:波形向上偏移代表回波 I 的抵达时间随着固化过程的进行变短,颜色越来越深代表回波 I 的幅值变大;根据 B 扫图的变化规律可知,混合态铝结构中衬层的半固化时间为 600 min,完全固化时间为 1800 min;混合态钢结构

中衬层的半固化时间为 750 min,完全固化时间为 2370 min(因空气中温度、湿度以及在配置衬层时固化剂含量不同等差异,衬层完全固化时间有差别)。因此,激光超声在线监测衬层固化过程具有可行性及有效性。

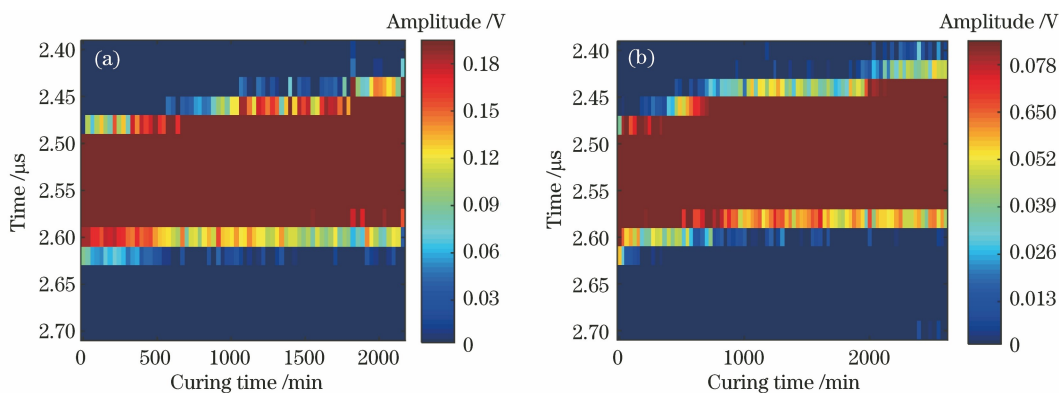


图 13 回波 I 的 B 扫图。(a)铝板衬层粘接结构回波 I 的 B 扫图;(b)钢板衬层粘接结构回波 I 的 B 扫图

Fig. 13 B-scan of echo I. (a) B-scan of echo I of aluminum lining bonding structure;
(b) B-scan of echo I of steel plate lining bonding structure

4.3 特征量表征衬层固化状态

由图 11 可以得到衬层在不同状态下回波 I 的抵达时间,采用标定时间差值法求解超声波在衬层中的渡越时间,利用(2)式计算得到超声波在衬层中的声速,依据(12)式计算得到超声波在衬层与金属板中的相对声衰减量。利用回波 I 的抵达时间、超声波在衬层中的渡越时间以及声速与相对声衰减量来表征衬层的不同状态,如表 2 所示。从表 2 可以看到:衬层在半固化状态下回波 I 的抵达时间相比于拉丝状态下加快 0.02 μs ,完全固化状态下回波 I 的抵达时间相比于半固化状态加快 0.02 μs ;衬层在半固化状态下超声波的渡越时间相比于拉丝状

态下加快 0.02 μs ,完全固化状态下相比于半固化状态下加快 0.02 μs ;衬层在半固化状态下超声波的传播声速相比于拉丝状态下加快约为 40 m/s,完全固化状态下相比于半固化状态下加快约为 40 m/s;衬层在拉丝状态下铝板粘接结构与钢板粘接结构中的相对声衰减量分别为 0.56~0.60 Np 和 0.71~0.76 Np,在半固化状态下的相对声衰减量分别为 0.51~0.56 Np 和 0.68~0.71 Np,在完全固化下的相对声衰减量分别为 0.46~0.51 Np 和 0.66~0.68 Np。综上所述,回波 I 的抵达时间、超声波在衬层中的渡越时间以及声速与相对声衰减量均能有效表征衬层的固化状态。

表 2 在不同状态下衬层的特征量参数

Table 2 Characteristic parameters of lining in different states

Lining state	Aluminum lining bonding structure				Steel plate lining bonding structure			
	Echo I arrival time / μs	Ultrasonic transit time / μs	Ultrasonic speed / $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Relative sound attenuation /Np	Echo I arrival time / μs	Ultrasonic transit time / μs	Ultrasonic speed / $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Relative sound attenuation /Np
Drawing state	2.52	0.87	1609	0.56~0.60	2.50	0.81	1605	0.71~0.76
Semi-cured state	2.50	0.85	1647	0.51~0.56	2.48	0.79	1646	0.68~0.71
Fully-cured state	2.48	0.83	1687	0.46~0.51	2.46	0.77	1688	0.66~0.68

5 结 论

本文基于衬层的粘接结构利用烧蚀机制激发超声波,研究基于激光超声的丁羟衬层固化状态监测方法,采用超声纵波在衬层中传播的渡越时间和幅值变化量作为参量进行状态表征,提出了用于求解

衬层中纵波渡越时间的标定时间差值法,建立了纵波在金属与在衬层中的相对声衰减模型,揭示了激光超声纵波在衬层金属板粘接结构中的传播规律。实验结果表明:超声波在衬层中的传播只有一次,信号中的多次回波仅是上下介质多次反射的结果,回波 I 是表征衬层状态最佳的特征信息,后续项目组

需研究钢板衬层粘接结构中回波 I 的超声频域非线性信息与衬层固化状态的关系,细化在固化过程中铝板衬层粘接结构中回波 I 的频率成分变化情况;所提出的标定时间差值法求得的渡越时间能够很好地表征衬层固化过程,其表征分辨率与采样频率有关,在提高采样频率的情况下,可获得更好的状态变化过程曲线,后续项目组将提升实验平台性能,以满足更高采样率下信号的获取,确保细微状态变化的识别效果;所建立的相对声衰减模型从理论上解释了激光超声在非连续阻抗介质中的传播规律,为类似结构的研究提供了理论基础和指导意义。

参 考 文 献

- [1] Liu L, Li G C, Li J F, et al. Vibration damage analysis of the bonded interface of shipborne solid rocket motor based on measured data[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2019, 42(3): 389-395.
刘磊, 李高春, 李金飞, 等. 基于实测数据的固体火箭发动机粘接界面振动损伤分析[J]. *固体火箭技术*, 2019, 42(3): 389-395.
- [2] Lü X, He G Q, Liu P J, et al. Requests and suggests for basic research on SRM combustion and flow[J]. *Journal of Astronautics*, 2019, 40(10): 1157-1166.
吕翔, 何国强, 刘佩进, 等. 固体发动机燃烧流动基础问题与研究建议[J]. *宇航学报*, 2019, 40(10): 1157-1166.
- [3] Pang A M, Chi X H, Yin H L. Recent advances on research of adhesive interfaces between NEPE propellants and HTPB liner [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2018, 41(2): 181-189, 202.
庞爱民, 池旭辉, 尹华丽. NEPE 推进剂/衬层界面研究进展[J]. *固体火箭技术*, 2018, 41(2): 181-189, 202.
- [4] Yang Y J, Wang Z B. Realtime ultrasonic monitoring of curing state of liner in solid rocket engine[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(5): 697-702.
杨亚军, 王召巴. 固体火箭发动机衬层固化状态超声波实时监测方法[J]. *兵工学报*, 2014, 35(5): 697-702.
- [5] Lu M H, Ding L, Yan X J, et al. Application and prospect of laser ultrasonic nondestructive testing technology in advanced manufacturing[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(4): 631-643, 826.
卢明辉, 丁雷, 颜学俊, 等. 激光超声技术在工业检测中的应用与展望[J]. *振动. 测试与诊断*, 2021, 41(4): 631-643, 826.
- [6] Liu X Z, Duan J M, Sang Y L, et al. Laser ultrasonic detection method for concrete crack depth [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(3): 839-847.
刘学增, 段俊铭, 桑运龙, 等. 混凝土裂缝深度的激光超声探测方法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(3): 839-847.
- [7] Zhang Y J, Xu D, Wang X C, et al. Dynamic detection stability of grain size based on laser ultrasonics [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(5): 1427-1435.
张彦杰, 徐冬, 王晓晨, 等. 基于激光超声的晶粒尺寸动态检测稳定性研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(5): 1427-1435.
- [8] Zheng K, Wu X, Li J Y, et al. Laser ultrasonic evaluation of metallic material thickness at high temperature[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(10): 21-27.
郑凯, 武兴, 李俊燕, 等. 高温下金属材料厚度的激光超声检测研究[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(10): 21-27.
- [9] Liu Z X, Hu Z L, Wang L X, et al. Effective detection of metal surface defects based on double-line laser ultrasonic with convolutional neural networks [J]. *Modern Physics Letters B*, 2021, 35(15): 2150263.
- [10] Yu J Y, Li C L, Qiu X B, et al. Defect measurement using the laser ultrasonic technique based on power spectral density analysis and wavelet packet energy [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021, 63(8): 2079-2084.
- [11] Xu Z X, Yang F, Guan S Y, et al. Research on detection method of cylindrical surface defect based on laser ultrasonic surface wave enhancement effect [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(10): 1183-1189.
徐志祥, 杨帆, 关守岩, 等. 基于表面波增强效应的圆柱表面缺陷检测方法研究[J]. *激光与红外*, 2020, 50(10): 1183-1189.
- [12] Cavuto A, Martarelli M, Pandarese G, et al. FEM based design of experiment for train wheelset diagnostics by laser ultrasonics [J]. *Ultrasonics*, 2021, 113: 106368.
- [13] Song Y, Ma S B. Measurement of opening cracks using diffraction signal of laser ultrasonic longitudinal wave [J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(1): 9-14.
宋艳, 马世榜. 利用激光超声纵波的衍射信号测量开口裂纹[J]. *激光与红外*, 2021, 51(1): 9-14.
- [14] Tang Y H, Zuo O Y, Wu M P. Research on laser ultrasonic crack depth quantitative detection [J]. *Applied Laser*, 2020, 40(6): 1144-1152.
唐又红, 左欧阳, 武美萍. 激光超声裂纹深度定量检测研究[J]. *应用激光*, 2020, 40(6): 1144-1152.
- [15] Li F, Zhang Y, Zhu L M. Survey of research progress on ultrasonic nondestructive testing of drilling-induced defects in composite materials [J]. *Materials*

- Reports, 2020, 34(S2): 1528-1533.
- 李范, 张杨, 朱利民. 复合材料钻孔缺陷超声检测技术研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(S2): 1528-1533.
- [16] Zuo O Y, Wu M P, Tang Y H. Numerical simulation of crack position determined by laser ultrasound based on COMSOL[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(10): 1164-1171.
- 左欧阳, 武美萍, 唐又红. 基于COMSOL的激光超声裂纹检测数值模拟研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(10): 1164-1171.
- [17] Zhang Y Y, Ni C Y, Shen Z H. Laser ultrasonic monitoring of reversible/irreversible changes in photo-thermal modulation crack closure[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1204006.
- 张月影, 倪辰荫, 沈中华. 光热调制裂纹闭合可逆/不可逆变化的激光超声监测[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1204006.
- [18] Yuan J X, Qin X P, Zhang J P, et al. Depth detection of internal defects for arc additive products based on laser ultrasound [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(1): 65-73.
- 袁久鑫, 秦训鹏, 张进朋, 等. 基于激光超声的电弧增材制件内部缺陷深度检测[J]. 中国机械工程, 2021, 32(1): 65-73.
- [19] Zhang J P, Qin X P, Yuan J X, et al. Defect location and size detection based on laser ultrasonic diffraction bulk wave[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1214002.
- 张进朋, 秦训鹏, 袁久鑫, 等. 基于激光超声衍射体波的缺陷定位定量检测[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1214002.
- [20] Chen C, Ying K N, Liu N, et al. Application of phase shift migration method in laser ultrasonic SAFT[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(3): 0304001.
- 陈楚, 应恺宁, 刘念, 等. 相移迁移法在激光超声合成孔径聚焦技术中的应用[J]. 中国激光, 2021, 48(3): 0304001.
- [21] Zhang Y J, Wang X C, Yang Q, et al. Research on epoxy resin curing monitoring using laser ultrasonic [J]. Measurement, 2020, 158: 107737.
- [22] Du P J, Chen Y X, Tan H, et al. Research on non-contact online monitoring of silicone sealant curing process[J]. Applied Laser, 2020, 40(6): 1138-1143.
- 杜鹏杰, 陈友兴, 谭辉, 等. 硅酮密封胶固化过程非接触在线监测研究[J]. 应用激光, 2020, 40(6): 1138-1143.
- [23] Ma J, Zhao Y, Zhang Z Z, et al. Acoustic field directivity of longitudinal wave generated by oblique laser based on combustion wave [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(2): 25-29.
- 马健, 赵扬, 张振振, 等. 斜入射激光支持燃烧波时纵波声场的指向性[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(2): 25-29.
- [24] Gao X, Feng G Y, Zhu H T, et al. Determination of ignition thresholds of laser supported combustion wave and detonation wave based on piezoelectric probe [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(9): 2305-2308.
- 高翔, 冯国英, 朱海涛, 等. 基于压电探测判定激光支持燃烧波和爆轰波的点燃阈值[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9): 2305-2308.
- [25] Ma S B, Liu W, Qu C N, et al. Simulation and experiment of laser ultrasound field under ablation mechanism[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(12): 1433-1437.
- 马世榜, 刘伟, 屈重年, 等. 烧蚀机制下激光超声声场的模拟与实验验证[J]. 激光与红外, 2015, 45(12): 1433-1437.