

激光与光电子学进展

管道内部缺陷的激光超声可视化检测

周宪佟, 黄晓燕*, 侯大森

西安石油大学电子工程学院, 陕西 西安 710065

摘要 管道运输是石油天然气工业最主要的运输方式之一, 因此, 对管道的安全监测具有重要意义。采用激光超声可视化技术对弯管道内部的缺陷进行了检测, 实验结果表明, 激光超声可视化技术可通过缺陷回波动态传播过程直观检测出弯管道内部的缺陷。根据缺陷回波的传播规律分析出缺陷的位置, 结果表明, 该方法的最大误差为 4%。

关键词 信号处理; 管道; 检测; 激光超声可视化; 内部缺陷

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1707001

Laser-Ultrasonic Visualization-Based Detection of Pipeline Internal Defects

Zhou Xiantong, Huang Xiaoyan*, Hou Dasen

School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract Pipeline transportation is one of the most important transportation methods used in the oil and gas industries. Therefore, pipeline safety monitoring is of great significance. In this paper, laser-ultrasonic visualization technology is used to detect internal defects in curved pipes. The experimental results show that the laser-ultrasonic visualization technology can intuitively detect internal defects in curved pipes through the dynamic propagation process of defect echoes. The defect location is analyzed according to the defect echo propagation rule, and the result shows that the maximum error of this method is 4%.

Key words signal processing; pipeline; detection; laser ultrasonic visualization; internal defects

OCIS codes 070.4790; 070.7345; 140.3538

1 引言

石油天然气开采勘探的飞速发展使管道被广泛应用于运输行业, 但同时也导致了很安全事故, 其中, 管道内部缺陷是造成安全事故的主要因素之一^[1-2]。在无损检测手段中, 通常用超声检测技术对管道缺陷进行检测。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, 操作复杂且产生的超声波有时不适合进行检测^[3-4]。激光超

声作为一种新的检测技术, 突破了常规超声检测的障碍, 具有高分辨率、非接触、无需耦合剂等优点, 且适合表面和内部微小裂纹、孔洞、焊缝等缺陷的检测, 被广泛应用于无损检测中^[5-8]。激光超声检测技术的快速发展使超声波遇到缺陷后传播过程的可视化成为无损检测行业中新的研究方向, Yashiro 等^[9]采用激光超声检测技术实现了超声波传播的可视化。Liu 等^[10]使用超声波传播可视化技术检测了铝薄壁壳内表面上小凹坑。张月影等^[11]使用时

收稿日期: 2020-11-20; 修回日期: 2020-12-25; 录用日期: 2021-01-13

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划(16JK1614)

通信作者: *xyhuang1212@163.com

域激光超声方法对加热激光辐照区域内真实微裂纹的闭合响应及裂纹闭合引起的裂纹局部塑性/弹性微观变化进行了研究。杨连杰等^[12]利用激光超声技术研究了表面波在表面缺陷上的反射与透射。谷艳红等^[13]将激光超声与电磁超声相结合,对铝板的缺陷位置及大小进行了测量。张进朋等^[14]利用缺陷对激光超声的衍射作用实现了内部缺陷的定位定量检测。

激光超声检测技术在国内无损检测行业中的应用较少,特别是对于管道缺陷的检测。因此,本文采用激光超声波可视化检测仪,研究了激光超声可视化技术在管道内部缺陷的检测机理,并对缺陷位置进行了准确定位,为管道的无损检测研究奠定一定的实验基础。

2 激光超声检测技术的基本原理

2.1 超声波的激发

脉冲激光在试件表面会形成温度场,试件表面受热膨胀形成弹性应力波,即超声波。当入射激光的功率密度小于材料损伤阈值时,不会损伤试件,这种超声波激发模式也被称为热弹效应。热弹效应可以通过热弹耦合理论描述,其热传导方程可表示为

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial T}{\partial z}) + \rho q, \quad (1)$$

式中, ρ 为密度, C 为比热容, T 为试件内部 t 时刻的温度分布, K_x 、 K_y 、 K_z 为沿 x 、 y 、 z 方向上的热传导系数, q 为试件内部的热源密度。实验研究的试件为各向同性,其沿 x 、 y 、 z 方向的热传导系数 K_x 、 K_y 、 K_z 均相等,即 $K_x = K_y = K_z = K$,且试件的内部无热源,即 $\rho q = 0$ 。因此,可将(1)式简化为

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (2)$$

2.2 超声波的接收

实验采用 Olympus A539-SM 探头接收超声波,利用压电效应的原理,将超声振动波转换成电信号,然后将电信号放大后进行 A/D(模/数)变换,并将其存入计算机中。

3 实验研究

3.1 检测试件及仪器

实验使用的弯管道为 304 管线钢,弯曲角度为

90°,尺寸为 60 mm×3 mm,其中, $\Phi=60$ mm 为圆管道的直径,3 mm 为管道的厚度。弯管道外侧长为 165 mm,内侧长为 7 mm,在弯管道内部用线切割方法制造人工平底孔缺陷(记为①)和不规则结疤缺陷(记为②),缺陷的大小(缺陷表面圆的直径)分别为 2 mm 和 4 mm,深度为 1 mm,弯管道及其缺陷示意图如图 1 和图 2 所示。

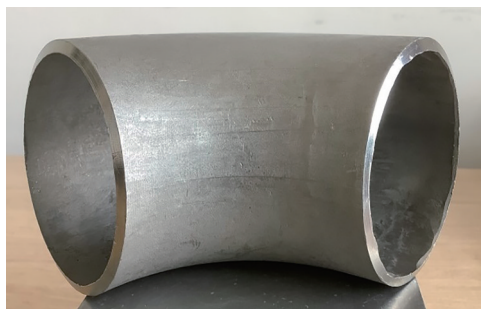


图 1 弯管道的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the curved pipeline



图 2 弯管道缺陷的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the curved pipeline defects

实验仪器如图 3 所示,实验系统由控制单元、脉冲激光发生器、激光反射镜、高速 A/D 采集单元、滤波器、超低噪声放大器、超声传感器及数据处理等器件构成。采用波长为 1064 nm、脉冲宽度为 7 ns 的 Nd:YAG 脉冲激光器激发超声波,最大激光输出功率为 650 μ J,聚焦后的光斑直径小于 1 mm。控制部分同步控制二轴激光反射镜在 x 轴、 y 轴从上到下、从左至右偏转 $\pm 25^\circ$ 逐点扫描。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。用耦合剂将传感器固定在试件表面,以增加超声波的反射率;传感器前端有内置集成放大器,以屏蔽部分噪声。在接收信号前端加入超声信号滤波、降噪及放大装置,对采集的超声信号进行扫描后通过高速 A/D 采集卡转换并存入计算机进行图像处理。检测结束后,记录的超声波信号被重新整合,然后以最大振幅图、时域图像、频域图像、



图3 实验装置

Fig. 3 Experimental device

速度图像及动态传播图等形式显示。从图像中可实时观察到物体内部损伤对超声信号的影响,也可以

动态显示出超声波在物体中的实际传播过程,从而直观检测出物体内部的缺陷。

3.2 实验探头位置

基于热弹原理利用脉冲激光产生热激励超声波,用探头接收超声波信号,实现对弯管道的缺陷检测,探头的摆放位置如图4所示,包括将探头放置在缺陷①的上方(位置1)、将探头放置在缺陷①和缺陷②的中间(位置2)、将探头放置在缺陷②的上方(位置3)。通过多次实验选取适当能量的脉冲激光,当脉冲激光激发源进入电动小镜后,再通过柱面镜聚焦调节激光源的焦距,使其焦点位于弯管道表面。通过调节电动小镜的偏转角度实现脉冲激光的扫描,通过调节光纤头和样品表面的相对距离,使弯管道上激光光斑的直径最小;使激光束垂直于弯管道表面,对弯管道进行扫描,扫描间距为 0.2 mm,采样频率 10 MHz,扫描速度为 500 Hz。

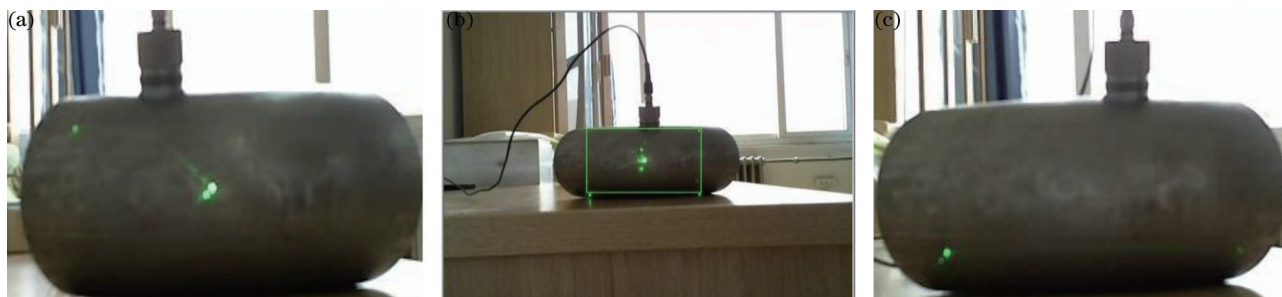


图4 探头的位置。(a)位置1;(b)位置2;(c)位置3

Fig. 4 Position of the probe. (a) Position 1; (b) position 2; (c) position 3

3.3 实验结果

多次实验后,选取合适的弯管道缺陷检测数据,探头放置在不同位置时弯管道的二维最大振幅图像、超声波传播动态图如图5、图6所示。由二维最大振幅图像可以明显观察到弯管道中超声波声

场强度的分布情况,超声波传播动态图则反映了超声波在弯管道中传播时各扫描点的位移振动随时间的变化情况,可以清晰地观察到超声波传播过程中遇到缺陷时的变化情况,从而根据缺陷回波准确判断出缺陷所在的位置。

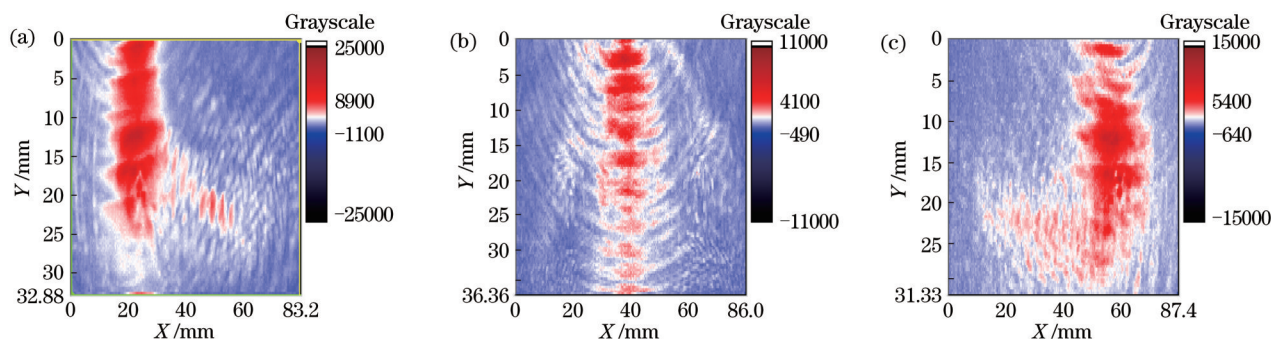


图5 弯管道的二维最大振幅图像。(a)位置1;(b)位置2;(c)位置3

Fig. 5 Two-dimensional maximum amplitude image of the curved pipeline. (a) Position 1; (b) position 2; (c) position 3

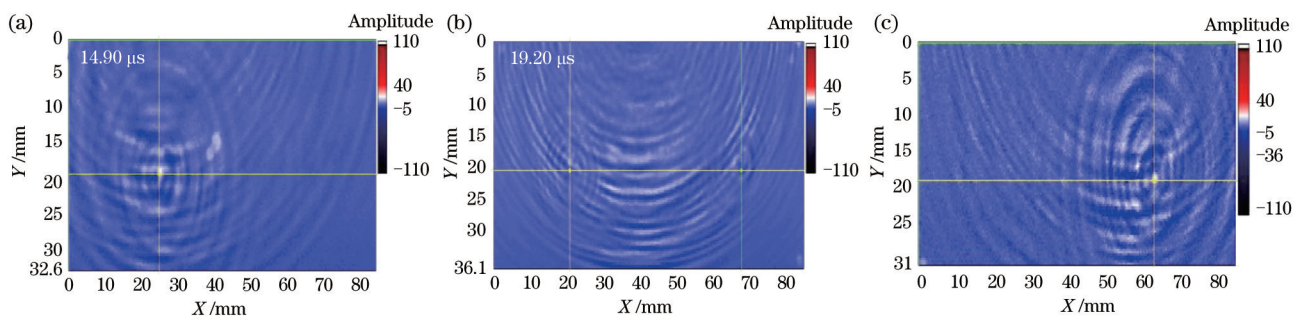


图 6 弯管道的超声波传播动态图。(a)位置 1;(b)位置 2;(c)位置 3

Fig. 6 Dynamic image of ultrasonic propagation of the curved pipeline. (a) Position 1; (b) position 2; (c) position 3

3.4 实验结果与分析

选取探头在位置 2 测量的数据进行分析,其中,弯管道的激光扫描区域为 84.00 mm×36.70 mm,激光激发点与探测点的距离为 46.00 mm,缺陷①

与激光探测点的距离为 9.00 mm,缺陷②与激光探测点的距离为 4.00 mm。图 7 为弯管道可视化范围内 14.3, 16.8, 19.8, 24.5 μs 时的超声波传播动画。

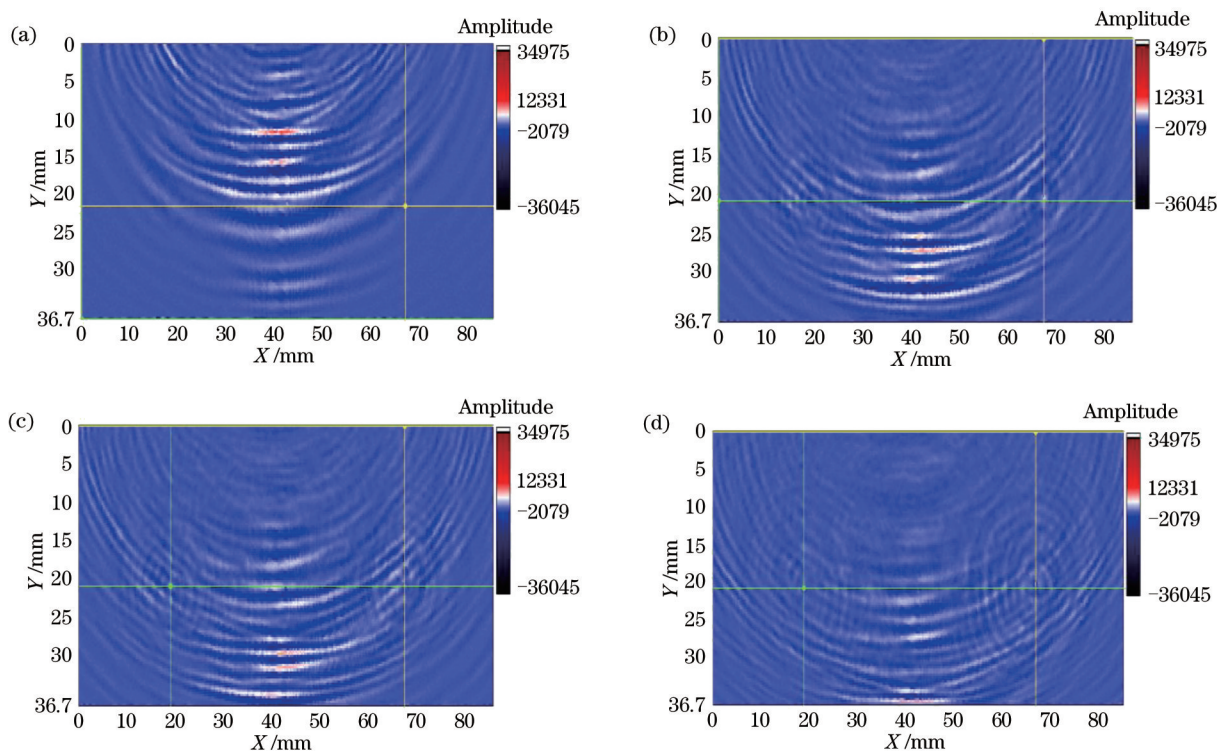


图 7 弯管道可视化范围内的超声波传播动画。(a) 14.3 μs;(b) 16.8 μs;(c) 19.8 μs;(d) 24.5 μs

Fig. 7 Animation of ultrasonic propagation in the visualized range of the curved pipeline. (a) 14.3 μs; (b) 16.8 μs; (c) 19.8 μs; (d) 24.5 μs

从激光超声可视化传播动画中可以清晰地观察到超声波遇到缺陷后的变化情况,从而根据缺陷回波特征利用 LUVI 软件控制光标,将光标移至回波位置,如图 7 中的交叉点处。然后,将激光导光移至检测体表面与超声波传播动态图上光标交点的对应位置,从而进行缺陷定位。图 8、图 9 为超声波的时域信号图和频谱图,图 10 为导光指向的缺陷位置。由于脉冲激光在材料表面可以激

发纵波、横波、表面波、Lamb 波等模式,且反对称 A0 模式的 Lamb 波能量较大,适合进行缺陷检测。此外,激光超声可视化检测仪可以明显看出缺陷回波,确定缺陷出现的时刻,从而完成缺陷的定位。

图 8 中激光激发点与探测点的距离为 46.00 mm,即直达波的传播距离为 46.00 mm,第一个波包最大幅值对应的时间为 14.3 μs,计算得到直达波的群

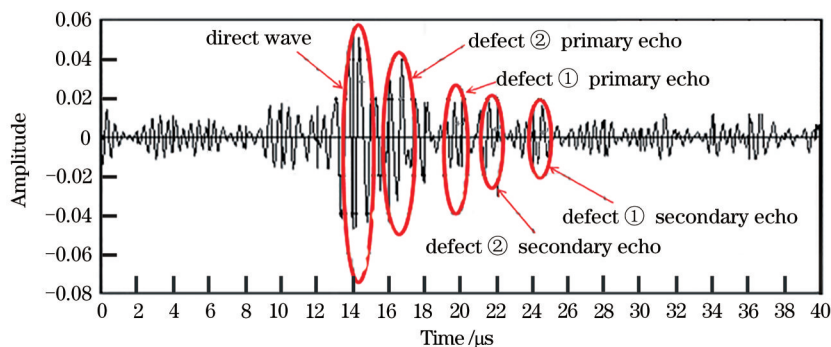


图 8 时域信号图

Fig. 8 Time domain signal diagram

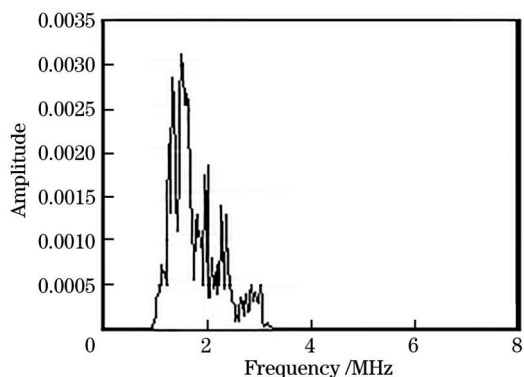


图 9 频谱分布图

Fig. 9 Spectrum distribution diagram



图 10 导光指向的缺陷位置

Fig. 10 Defect position pointed by light guide

速度为 3217 m/s。由超声波的时域信号图可知,激光激发的是 Lamb 波,而各个模式的 Lamb 波速度不同,由计算出的直达波速度可以确定时域信号中的 Lamb 波是反对称 A0 模式的 Lamb 波,与 A0 模式理论群速度 3191 m/s 的相对误差为 0.81%,进一步确定第一个波包为直达波的 A0 模式。从图 9 中可以发现,超声波的能量主要分布在 0.8~3.2 MHz 频

率范围内,中心频率为 1~2.8 MHz。根据第二个波包计算出激光探测点与缺陷②的距离为 $(16.8 \mu\text{s} - 14.3 \mu\text{s}) / 2 \times 3217 \text{ m/s} = 4.02 \text{ mm}$,与实际距离的误差为 0.53%。同理,得到激光探测点与缺陷①的距离为 8.85 mm,与实际距离的误差为 1.67%。通过改变激光激发点和探测点距离进行多次实验,计算出缺陷①和缺陷②的位置及误差如表 1 所示。

表 1 不同缺陷的位置及误差

Table 1 Location and error of different defects

Distance /mm	Detection point		Detection point	
	distance defect ① /mm	Error /%	distance defect ② /mm	Error /%
36	8.71	3.22	4.16	4.00
41	8.76	2.67	4.10	2.50
46	8.85	1.67	4.02	0.53
51	8.74	2.89	4.08	2.00
56	8.72	3.11	4.11	2.75

4 结 论

针对弯管道内部缺陷检测的需求,首先,采用激光超声可视化检测仪基于热弹原理在弯管道表面激

发超声波信号,并通过探头采集超声波信号序列;然后,对信号序列进行处理,生成超声波传播的动态图像,从而观察到超声波的实际传播过程,并检测出弯管道内部缺陷。多次实验结果表明,激光超声可视化

技术可以通过缺陷回波动态传播过程直观检测出弯管道内部的缺陷,并根据缺陷回波传播规律分析出缺陷位置,最大误差为 4%,从而为激光超声在油气管道内部缺陷无损检测中的应用提供了一种有效的方法。

参 考 文 献

- [1] Li X. Analysis of the importance of pipeline integrity management[J]. Petrochemical Industry Technology, 2017, 24(5): 169.
李雪. 浅析管道完整性管理的重要性[J]. 石化技术, 2017, 24(5): 169.
- [2] Chen X D, Wang B, Guan W H, et al. Present situation of use of in-service pressure vessels and pipelines in Chinese petrochemical enterprises, analysis of defect conditions and failure prevention countermeasures[J]. Pressure Vessel Technology, 2001, 18(5): 43-53.
陈学东, 王冰, 关卫和, 等. 我国石化企业在用压力容器与管道使用现状和缺陷状况分析及失效预防对策[J]. 压力容器, 2001, 18(5): 43-53.
- [3] Shi Y C, Liu J F, Wang W J, et al. Inner examination technology on pipeline and the development trend[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2006, 32(8): 46-48.
石永春, 刘剑锋, 王文娟, 等. 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.
- [4] 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.
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.
- [5] Liu X, Shan N, Ma X F, et al. Design and study of laser ultrasound visual detection system for carbon fiber composite materials[J]. Journal of Applied Sciences, 2017, 35(6): 797-804.
刘霞, 单宁, 马晓峰, 等. 碳纤维复合材料激光超声可视化检测系统设计研究[J]. 应用科学学报, 2017, 35(6): 797-804.
- [6] Guo J, Li S H, Ning N, et al. Application of laser ultrasonic technique in non-destructive testing[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014, 5(4): 487-490, 501.
郭佳, 李四海, 宁宁, 等. 激光超声技术在无损检测中的应用[J]. 航空工程进展, 2014, 5(4): 487-490, 501.
- [7] Clorennec D, Royer D, Catheline S, et al. SAW propagation on cylindrical parts using laser-ultrasonics: application to crack detection[J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 1: 207-210.
- [8] Valle F H, Dutton B, Edwards R S, et al. Laser ultrasonic characterisation of branched surface-breaking defects[J]. NDT & E International, 2014, 68: 113-119.
- [9] 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.
- [10] Liu Y L, Zhang J, Liu X Y, et al. Damage inspection of shell structures using a technology of ultrasonic propagation visualization based on laser scanning excitation[J]. Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, 2018, 38(3): 149-155.
- [11] Zhang Y Y, Ni C Y, Shen Z H, et al. 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, 等. 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.
- [12] Yang L J, Li Y, Sun J J, et al. Reflection and transmission of laser ultrasonic waves on surface defects[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4): 041203.
杨连杰, 李阳, 孙俊杰, 等. 激光超声表面波在表面缺陷上的反射与透射[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 041203.
- [13] Gu Y H, Zhang Z Z, Gao X H, et al. Application of nondestructive detection of aluminum using laser ultrasonic technology and EMAT method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0504002.
谷艳红, 张振振, 高先和, 等. 激光超声结合电磁超声在铝板无损检测中的应用研究[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0504002.
- [14] 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.