

圆管构件螺纹处缺陷的激光超声定位检测

李海洋^{1*}, 李巧霞¹, 王召巴¹, 潘强华²

¹中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;

²中国特种设备检测研究院, 北京 100029

摘要 搭建了激光超声检测实验平台,采用热弹效应和激光干涉接收方式,观测了点聚焦激发横波的指向性及内表面处缺陷对超声信号的影响,完成了圆管工件的 B-scan 成像,实现了对圆管型螺纹构件内表面裂纹的定位。结果表明,点聚焦激光激发横波信号在作用点法向夹角为 32.1° 的方向上能量最强,与理论分析相符合;根据圆管构件 B-scan 成像实现了内表面裂纹的位置检测,并结合峰值-角度变化进一步实现了缺陷宽度测量。该研究成果为激光超声工业应用推广提供了实验依据。

关键词 测量; 激光超声; 螺纹构件; 内表面裂纹

中图分类号 TN249; O426.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.101202

Positioning Detection of Defects in Thread of Tubular Member by Laser Ultrasonic

Li Haiyang^{1*}, Li Qiaoxia¹, Wang Zhaoba¹, Pan Qianghua²

¹School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

²China Special Equipment and Research Institute, Beijing 100029, China

Abstract An experimental platform of laser ultrasonic is built based on the thermoelastic effect and the laser interference reception method. The directivity of transverse waves generated by the incident laser and the effects of the inner surface defect on the ultrasonic signal are observed. According to the B-scan image, the defect location at the inner surface threaded part is detected. The experimental results show that the transverse wave with the largest power generated by the laser point source is in the direction of normal angle of 32.1° , which is consistent with the result of the theoretical analysis. The B-scan image combined with the peak-angle variation of the signal is used to locate the inner surface defect and to measure the defect width. This study can provide an experimental basis for industry application and popularization of laser ultrasonic.

Key words measurement; laser ultrasonic; thread component; internal surface defect

OCIS codes 120.1880; 190.4420; 280.3375

1 引言

圆管螺纹构件是与其他螺纹部件相互耦合连接的重要部件,当长期处于恶劣环境及高应力状态时构件螺纹处极易产生裂纹。构件体积小且处于狭窄复杂的环境中,其内表面螺纹处损伤不易被发觉,因此圆管型螺纹构件螺纹处损伤的检测十分困难。这种带有损伤的构件若长期服役会造成重大的安全隐患。因此,圆管型螺纹构件内表面的缺陷检测十分必要。

国内外常用的无损检测方法有磁粉检测法^[1]、交流磁场检测法^[1]、漏磁场检测法^[1]和超声检测法^[2-6]等。前三种方法对工件材料、形状及检测环境有局限性,且工序繁琐,不适宜检测圆管构件内表面螺纹处的缺陷。激光超声检测^[7-9]是一种新兴的超声检测方法,通过光、热、力、声场能量顺序转换在固体介质中产生超声波,结合激光干涉接收方式,可实现复杂环境下的非接触检测。此外激光超声还具有宽频带、波型丰富的优点,对于圆管型螺纹构件内表

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-04-08; 录用日期: 2018-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(11604304)、山西省高等学校科技创新项目、山西省自然科学基金(201701D221127)

* E-mail: climb021@163.com

面螺纹处裂纹的检测十分适用。

战宇等^[10]模拟了激光超声波在预加裂纹薄板中的传播过程,探讨了金属平板上表面裂纹的宽度和深度对反射波的影响;Mezil 等^[11]采用非线性混频激光超声检测的方法完成了对金属裂纹参数的局部评价;陈清明等^[12]根据激光超声检测技术的发展以及激光超声的检测特性分析了激光超声的应用。严刚^[13]开展了脉冲激光用于表面缺陷的检测与评价,讨论了表面缺陷对远场、近场声表面波的作用机制。孔令剑等^[14]研究了激光超声检测系统中,对超声信号的检测方法,介绍了嵌入式信号采集处理系统的工作原理及其信号处理过程,实现了钢轨表面深度大于 0.5 mm 缺陷的定位。激光超声技术在表面缺陷评价方面取得了大量成果,但是针对圆管型构件内表面螺纹处缺陷的检测研究尚未开展。

本文采用激光超声技术对圆管型构件内表面螺纹处缺陷进行非接触检测,基于热弹效应和干涉接收法建立了激光超声检测实验系统,实现了热弹性激励横波声信号指向性的观测,实现了圆管型螺纹构件的内表面缺陷定位,为激光超声应用于工业检

测提供了实验方法。

2 激光超声检测理论

根据入射激光的功率密度,激光激发超声机理一般可分为烧蚀机制和热弹机制。烧蚀机制是当激发激光功率密度高于材料表面损伤阈值(金属材料的典型阈值是 $10^7 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$)时,材料表层的瞬态升温逐步导致材料的熔化、汽化,并形成等离子体喷射出部分表面物质,同时给样品施加了一个反作用力进而在样品表面和内部产生声波。这种机制可以获得大幅度声波,但会造成材料表面约 $0.3 \mu\text{m}$ 的损伤。热弹机制是当激发激光功率密度低于材料表面损伤阈值时,材料表层由于局部升温产生表面切向压力,同时激发出横波、纵波和表面波。相比于烧蚀机制,热弹机制不会导致材料的任何相变,符合严格的无损检测。因此,本文采用热弹机制来激发超声信号。

当金属材料表面处于自由状态时,主要的应力平行于材料表面,激光激发的纵波与横波具有一定的指向性^[5],且满足

$$u_L(\theta_0) \propto \frac{\sin 2\theta_0 (k^2 - \sin^2\theta_0)^{1/2}}{(k^2 - 2\sin^2\theta_0)^2 + 4\sin^2\theta_0 (1 - \sin^2\theta_0)^{1/2} (k^2 - \sin^2\theta_0)^{1/2}}, \quad (1)$$

$$u_S(\theta_0) \propto \frac{k \sin 4\theta_0}{k (1 - 2\sin^2\theta_0)^2 + 4\sin^2\theta_0 (1 - \sin^2\theta_0)^{1/2} (1 - k^2 \sin^2\theta_0)^{1/2}}, \quad (2)$$

式中: $u_L(\theta_0)$, $u_S(\theta_0)$ 分别为纵波、横波位移大小; θ_0 为超声发射角; $k = v_L/v_S$ 为纵波与横波速度之比。激光激发横波和纵波指向性如图 1 所示。

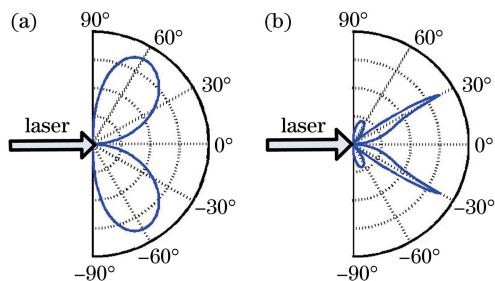


图 1 热弹机制下激光超声指向性。(a)纵波;(b)横波

Fig. 1 Directivity of laser ultrasonic in thermoelastic mechanism. (a) Longitudinal wave; (b) transverse wave

从图 1 中可知,热弹机制下激光激发的纵波和横波的方向关于表面法向对称。激光激发纵波信号在法线两侧以单瓣的形式向外辐射,指向性角度 θ 约为 60° ;激发横波信号在法线两侧以双瓣的形式向外辐射,指向性角度 θ 约为 30° 。此外,对比纵波

和横波声束的范围,横波信号具有更窄的角度范围,有很强的指向性。声束角度范围越大,在圆管工件中传播时的反射情况越复杂。在对内表面缺陷检测与定位的过程中,检测结果会出现误判,因此,本研究采用激光激发的横波作为圆管构件的检测信号。

3 实验研究

3.1 实验装置

激光超声检测系统采用激光发射器(CFR200)作为激发部分,发射一束重复频率为 20 Hz,波长为 1064 nm,脉宽为 11 ns 的脉冲激光,经焦距为 100 mm 的点聚焦透镜照射到圆管工件表面,激发出超声波在固体介质中传播;采用激光超声接收仪(QUARTET-500 mV)作为接收部分,基于迈克耳孙干涉仪原理实现反射声信号的干涉接收,并由超声采集卡采集并传输到计算机上,通过 LU Scan 软件来实现波形显示和分析,最后实现构件内表面缺陷的定位。激光超声检测系统框图和实验平台如图 2 所示。

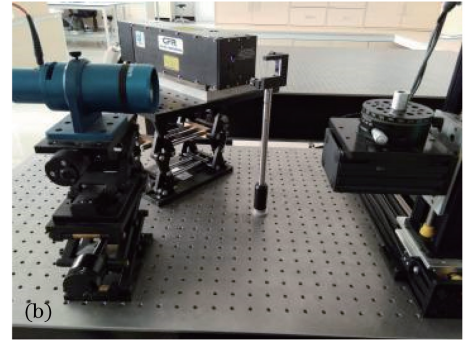
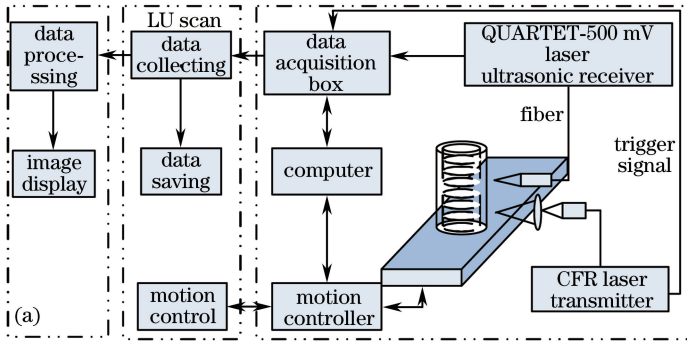


图2 激光超声检测实验框图和平台。(a)实验框图;(b)实验平台

Fig. 2 Experimental diagram and platform of laser ultrasonic detection. (a) Diagram; (b) platform

检测样品为内表面螺纹处有缺陷的圆管构件, 样品示意图如图3所示, 检测工件的内径 R_1 为 9.0 mm, 检测工件的外径 R_2 为 6.0 mm, 检测工件的厚度 h 为 19.9 mm。样品的材料参数如下: 纵波的传播速度 v_L 为 $6220 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 横波的传播速度 v_S 为 $3110 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 表面波的传播速度 v_R 为 $2900 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 材料密度 ρ 为 $2.73 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

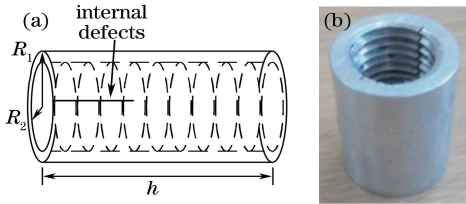


图3 实验样品。(a)示意图;(b)照片图

Fig. 3 Experimental sample. (a) Diagram; (b) photo

3.2 检测步骤

为了精确地检测到圆管型构件内表面螺纹处的缺陷, 要求探测横波信号具有较高的信噪比(SNR)。选择合适的激发点和接收点是实验的关键。具体实验步骤为:

1) 搭建激光超声检测平台, 将待测工件固定在扫查架上。激光超声检测系统的激发部分需调整激光器、点聚焦透镜和工件之间的距离, 以满足透镜的焦距距离, 使得激光激发声波能量最大; 检测系统的接收部分需调整激光干涉接收测头与工件的距离, 以满足聚焦透镜的聚焦距离, 使得接收信号能量最强。

2) 计算激光激发点与探测点之间的角度。图4是待测工件检测过程示意图, 其中 O 是圆心位置, L 表示激光入射点, $\theta = 30^\circ$ 。由此可确定横波入射到内表面的点 R 的坐标, 并求解点 L 关于 OR 的对称点 D , 即超声探测点。根据 L 、 D 、 O 三点可确定激发点到探测点间的角度 $\beta = 36^\circ$ 。

3) 将圆管构件固定在有精确刻度的旋转台上, 进行不同扫查步长的扫查。设置采样时长为 $10 \mu\text{s}$,

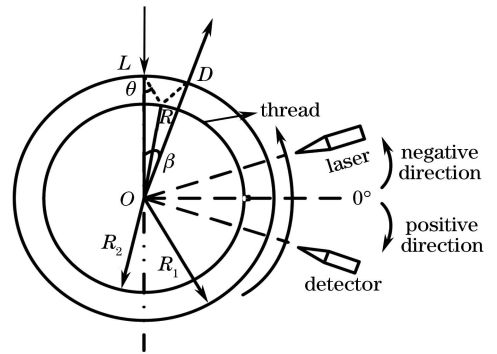


图4 检测原理图

Fig. 4 Detection principle

扫查步长分别为 3° 和 1° , 扫查范围为 -45° 至 45° 。进行不同初始位置的缺陷扫查, 内表面缺陷分别位于 0° 和 -6° 位置处。扫查正负方向如图4所示, 完成待测工件的 B-scan 检测。

4 结果分析

4.1 横波指向性

本研究采用透射法观测激光超声横波指向性, 采用点光源激光激发横波和纵波, 声波信号在板材工件内部传播的情况如图5所示, 其中横波指向性的角度满足:

$$\theta = \arccos\left(\frac{h}{l_s}\right) = \arccos\left(\frac{h}{v_s \cdot t_s}\right), \quad (3)$$

式中: l_s 为横波传播路程; t_s 为横波到达时间点。图5中, L_1 和 L_2 分别表示激光激发的在内部传播的一次纵波和二次纵波, S 表示激光激发的横波信号。

干涉接收仪采集到的激光超声信号的时域波形

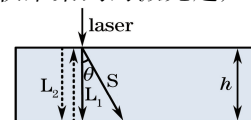


图5 透射法声波传播示意图

Fig. 5 Propagation diagram of ultrasonic in the transmission method

如图 6 所示。

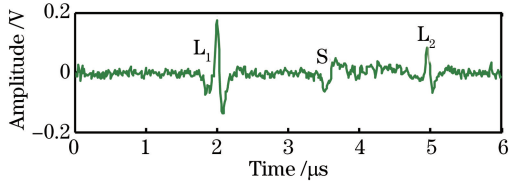


图 6 透射法时域图

Fig. 6 Time-domain diagram of transmission method

由板材工件的厚度为 9.5 mm 可知,图 6 中一次纵波信号 L_1 到达时间为 $t_1 = 1.9 \mu\text{s}$,二次反射纵波 L_2 到达的时间为 $t_2 = 4.9 \mu\text{s}$ 。而在一次纵波 L_1 和二次反射纵波 L_2 之间接收到声信号达到时间为 $t_3 = 3.6 \mu\text{s}$,判断为激光超声激励产生的横波信号,该信号传播路程为: $l_s = v_s \times t_s = 3110 \times 3.6 = 11.2 \text{ mm}$ 。

由(3)式可求得该声信号传播角度为: $\theta = 32.1^\circ$,说明激光超声激发横波声信号的指向性角度满足图 1 中横波指向性角度。

4.2 内表面缺陷定位

按照 3.2 节中的步骤完成圆管工件的检测,采

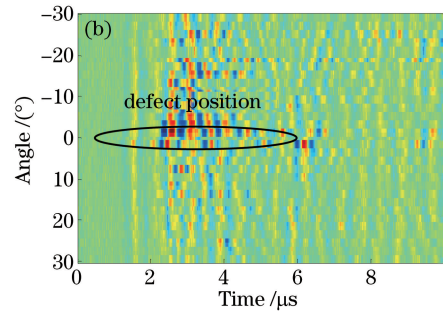
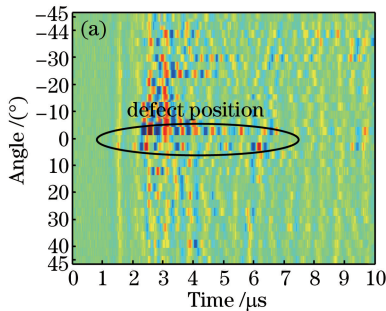


图 8 B-scan 图。(a)扫描步长为 3° ; (b)扫描步长为 1°

Fig. 8 B-scan image. The step of scanning is (a) 3° and (b) 1°

图 8 中横坐标表示采样时长为 $10 \mu\text{s}$,纵坐标表示扫描范围为 $[-45^\circ, 45^\circ]$,图中颜色表示声波幅值强度。圆管构件内表面螺线会对入射声波造成散射,在角度范围为 $[-45^\circ, -10^\circ]$ 和 $[10^\circ, 45^\circ]$ 时接收到的内表面反射声波幅值明显下降,说明螺线结构会对检测结果造成影响。入射声波在缺陷两侧尖端处会出现较强的反射信号,使接收声信号能量增加。在图 8(a)和(b)纵坐标 0° 位置处,信号幅值明显增大,与实际缺陷位置相符合,由此可实现内表面缺陷位置的检测。

为避免不同测量点对检测结果产生影响,采用激光超声检测平台实现了内表面缺陷位于 -6° 位置的检测,扫描步长为 3° ,所得 B-scan 图像如图 9 所示。

集超声时域信号。 LD 对应的短弧长、长弧长分别为 5.6 mm、50.7 mm。声波从点 L 传播至点 R ,再反射至点 D 所经过的距离为 7.5 mm。发射激光可得时域波形如图 7 所示,图中: R_1 为经短弧长传播的表面波,到达时间为 $1.9 \mu\text{s}$; R_2 为经长弧长传播的表面波,到达时间为 $17.5 \mu\text{s}$; S 为经内表面反射的横波信号,到达时间为 $2.6 \mu\text{s}$ 。

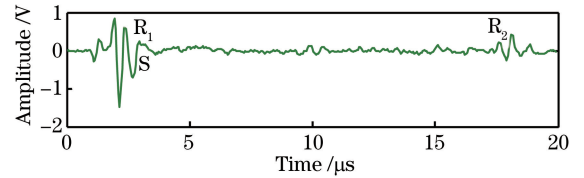


图 7 时域信号

Fig. 7 Time-domain signals

完成圆管工件的扫描检测,角度范围为 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 。由于横波信号幅值较小,通过单个激发-探测位置得到的时域波形很难完成对缺陷的识别与定位。因此,将采集激光超声信号绘制成 B-scan 图像,内表面缺陷初始位置为 0° ,扫描步长为 3° 和扫描步长为 1° 的 B-scan 图像如图 8 所示。

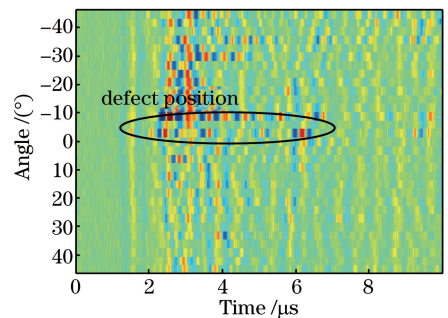


图 9 B-scan 图

Fig. 9 B-scan image

从图 9 中 B-Scan 图可见,在纵坐标为 -6° 处出现明显的信号增加,由此判断内表面缺陷位于 -6° 处。结合图 8 和图 9 可知,激光超声检测手段可实现管状结构螺线处缺陷的定位检测,且缺陷

所处不同初始位置对该技术检测结果的影响不大。

为了进一步分析圆管构件内表面缺陷对入射超

声波传播的影响,将图 8(a)、(b)和图 9 中的信号的幅度峰值绘制成峰值-角度曲线,分别如图 10(a)、(b)、(c)所示。

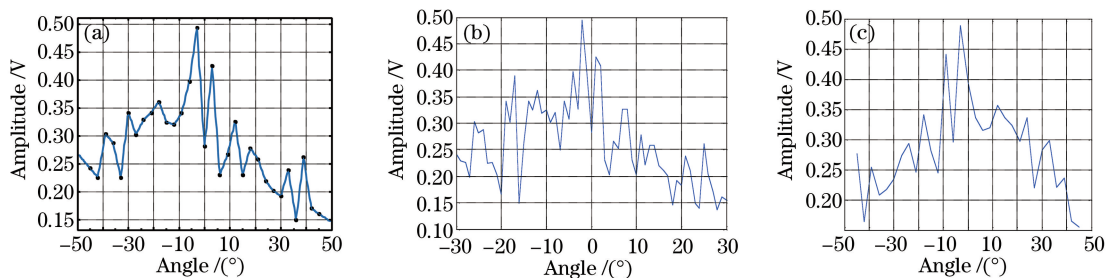


图 10 峰值-角度关系图。(a)与图 8(a)对应峰值-角度关系;

(b)与图 8(b)对应峰值-角度关系;(c)与图 9 对应峰值-角度关系

Fig. 10 Relation diagram of peak and angle. (a) Peak-angle corresponding to Fig. 8(a);

(b) peak-angle corresponding to Fig. 8(b); (c) peak-angle corresponding to Fig. 9

由图 10(a)可知,该曲线在 -3° 至 3° 范围内的声波信号峰值集中,这是由内表面缺陷两侧尖端散射作用造成的;而在 0° 处峰值存在极小值,这是由缺陷底面对超声信号的散射造成的。根据弧长计算公式 $l = 2\pi R\theta/180^\circ$,可知缺陷宽度为 0.6 mm ,依此对图 10(b)和(c)进行分析,测量宽度分别为 0.4 mm 和 0.6 mm ,与缺陷实际宽度 0.5 mm 十分接近,检测误差为 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 。由此,采用激光超声检测技术完成了圆管构件内表面螺纹处缺陷的定位,并进一步实现了对缺陷宽度的检测。该检测方法具有非接触且检测精度高的优点,适用于复杂环境下不规则工件的无损检测。

5 结 论

通过激光超声技术完成了对圆管构件内表面螺纹处裂纹的定位检测,搭建了激光超声检测实验平台,验证了激光激发的工件内部横波的指向性;分别完成了扫查步长为 1° 和 3° 、缺陷初始位置为 0° 和 -6° 、扫查角度范围为 -45° 到 45° 的 B-scan 扫描成像。实验结果表明:激光超声产生横波信号传播方向与法线成 32.1° ,符合激光超声横波的理论指向性;实现了圆管构件内表面螺纹处缺陷定位检测,进一步实现了内表面缺陷宽度的测量,测量误差为 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 。由此可见,激光超声检测系统能够有效地检测出管道表面裂纹缺陷,为激光超声在管道螺纹处表面裂纹无损检测中的进一步应用进行了有益的补充。

参 考 文 献

[1] Ding J F, Kang Y H, Wu X J. Overview of

nondestructive inspection methods for the drilling pipe thread [J]. *Nondestructive Testing*, 2007, 29(6): 350-352.

丁劲锋,康宜华,武新军. 钻杆螺纹无损检测方法综述[J]. *无损检测*, 2007, 29(6): 350-352.

[2] Li H Y, An Z W, Lian G X, *et al.* A probability model for ultrasonic nonlinear effects of rough contact interface[J]. *Acta Acustica*, 2015, 40(2): 247-253.

李海洋,安志武,廉国选,等. 粗糙接触界面超声非线性效应的概率模型[J]. *声学学报*, 2015, 40(2): 247-253.

[3] McPherson B, Dutton P, Dale B A, *et al.* A new automated tool-joint inspection system to reduce drillstring failures [J]. *SPE Drilling Engineering*, 1991, 6(2): 153-159.

[4] Li H Y, Peng D L, Xu W J. The lower bound of speed estimation variance of the narrowband Doppler Current Profiler[J]. *Technical Acoustics*, 2013, 32(2): 96-100.

李海洋,彭东立,许伟杰. 窄带多普勒测流技术估计方差下界研究[J]. *声学技术*, 2013, 32(2): 96-100.

[5] Li H Y, An Z W, Lian G X, *et al.* Detection of plastic zone at crack tip by non-collinear mixing method[C]// *Proceedings of the 2014 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications*, October 30-November 2, 2014, Beijing, New York: IEEE, 2014: 154-157.

[6] Li H Y, An Z W, Lian G X, *et al.* The non-collinear mixing method for the detection the material fatigue [C]// *The 21st International Congress on Sound and Vibration*, July 13-17, 2014, Beijing. [S.l.: s.n.], 2014: 3639-3644.

[7] Luo S T, Tan X L, Pan M C, *et al.* Progress of

- laser-generated ultrasonic non-destructive testing technology [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8192: 81924C.
- [8] Zhao T. Study on laser ultrasonic non-destructive testing technology [J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2010(32): 170-172.
赵添. 激光超声无损检测技术研究 [J]. 科技情报开发与经济, 2010(32): 170-172.
- [9] Tan X L, Pan M C, Luo S T, *et al.* Application of wavelet analysis in laser-generated ultrasonic nondestructive testing [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8321: 832116.
- [10] Zhan Y, Liu C S, Qiu Z G. Finite element numerical simulation of surface cracks in laser ultrasonic testing materials [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013, 10(4): 81-82.
战宇, 刘常升, 邱兆国. 激光超声波检测材料表面裂纹的有限元数值模拟 [J]. 科技创新导报, 2013, 10(4): 81-82.
- [11] Mezil S, Chigarev N, Tournat V, *et al.* Evaluation of crack parameters by a nonlinear frequency-mixing laser ultrasonics method [J]. Ultrasonics, 2016, 69: 225-235.
- [12] Chen Q M, Cai H, Cheng Z H. Laser ultrasonic technology and its applications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(4): 53-57.
陈清明, 蔡虎, 程祖海. 激光超声技术及其在无损检测中的应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(4): 53-57.
- [13] Yan G. Laser surface acoustic waves used in nondestructive testing of metal surface defects [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
严刚. 激光声表面波用于金属表面缺陷无损检测的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [14] Kong L J, Zhu G F, Jiang C Q. New detection application of laser ultrasonic [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(1): 011203.
孔令剑, 朱桂芳, 姜从群. 激光超声光学检测应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(1): 011203.