

文章编号:1001-5078(2017)06-0669-05

· 激光应用技术 ·

激光瑞利波的时间依赖性探测表面缺陷深度

刘 辉¹, 郑 宾², 王召巴¹, 郭华玲²

(1. 中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学计算机与控制工程学院, 山西 太原 030051)

摘 要:针对金属构件表面微小缺陷非接触式定量检测的难题,本文采用有限元法模拟了激光产生的瑞利波与不同深度的表面缺陷的相互作用,研究了瑞利反射波与表面缺陷深度的时间依赖关系。通过分析该时间依赖关系的产生机制,提取出能够定量表征表面缺陷深度的时域特征量,得出了该时域特征量与表面缺陷深度的数学关系表达式,并利用该数学关系表达式进行了激光超声表面缺陷检测实验中的深度计算。结果表明,实验结果与数值模拟结果具有良好的一致性,该时域特征量与缺陷深度呈线性关系,能够定量表征表面缺陷深度的范围为0.1~0.5 mm,最大误差 ≤ 0.06 mm。

关键词:无损检测;激光超声;瑞利波;时域特征量;表面缺陷

中图分类号:TN247 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.06.004

Time dependence of laser-induced Rayleigh wave for detecting surface defect depth

LIU Hui¹, ZHENG Bin², WANG Zhao-ba¹, GUO Hua-ling²

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

2. School of Computer Science and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the difficult problem that the surface defects is quantitatively detected by the non-contact NDT methods, the interaction between laser-induced Rayleigh wave and surface defects has been simulated by the finite-element method. The time-dependence relationship between Rayleigh reflected wave and surface defect depth was studied. The time domain feature quantities that can quantitatively character the defect depth were extracted through analyzing formation mechanism of time-dependence relationship, and the mathematical relationship of time domain feature quantities and surface defect depth was deduced. The depth of surface defect was calculated by using the mathematical relationship in surface defect detection of laser ultrasonics. The results show that the experimental results match well with the numerical simulation results, and it is a linear relationship between the time-domain feature quantities and surface defect depth. The time-domain feature quantities of reflected Rayleigh wave can achieve the quantitative detection of surface defect depths with the range of 0.1~0.5 mm, and the maximum error is less than 0.06 mm.

Key words: NDT; laser-induced ultrasonic; Rayleigh wave; time-domain characteristic quantity; surface-breaking defect

1 引 言

激光超声所具有的非接触的探测特性和能够产生宽带超声信号的能力,使其十分适用于无损检测

领域,已得到越来越广泛的应用^[1-5]。探测表面缺陷的方法依赖于由缺陷引起的反射波与透射波信号特征的变化,而信号特征的变化主要体现在信号时

基金项目:教育部博士点基金联合资助项目(No. 201342012007)资助。

作者简介:刘 辉(1986-),男,博士研究生,主要从事激光超声无损检测技术研究工作。E-mail:495340907@qq.com

收稿日期:2017-01-09

域特征的突变和频域特征的偏移。近几十年来,许多研究人员进行了大量的工作来研究激光诱导的瑞利波检测表面破裂裂纹的特征,并取得了重大的研究成果^[6-10]。但是,以前的研究很少关注激光产生的瑞利波的波形特征与表面裂纹的深度之间的时间依赖关系,并利用该依赖关系来进行表面裂纹深度的定量检测。因此,本文将采用数值模拟结合实验验证的方法,研究瑞利波特征与表面裂纹深度之间的时间依赖关系,系统地分析波形时域特征的形成机理,提取瑞利波的时域特征量与表面缺陷深度的数学关系,并通过测量 Rayleigh 波形的时域特征量实现表面裂纹深度的定量表征。

2 数值模型的理论基础

图 1 为建立的数值模型示意图。激光光源照射在模型的上表面,模型中将实际的表面疲劳裂纹简化为了人工凹槽。由于激光光源在 Z 轴上平行于裂纹的长度方向,裂纹的长度足够长,且材料是均匀、各向同性、线弹性的,因此,可将模型简化为 2D 模型,作为二维平面弹性应变问题进行求解,如图 2 所示。图 2 中,模型的整体尺寸为 $30 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$;人工凹槽左边界位置为 M 点,距离模型左边界距离为 16 mm ;激光光源作用中心位置为 O 点,距离凹槽左边界为 1 mm ;在距离人工凹槽左边界为 3 mm 、 4 mm 、 5 mm 、 6 mm 的位置分别作为接收点,标记为 A 、 B 、 C 、 D 。

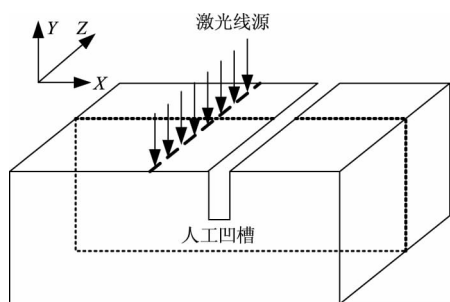


图 1 激光光源辐照样品表面结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sample surface irradiated by laser line source

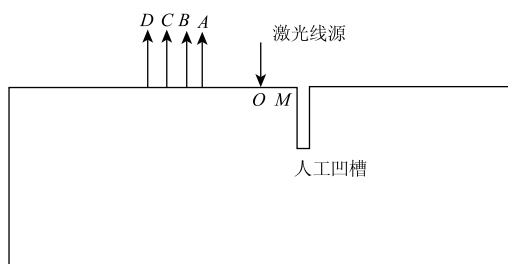


图 2 简化的 2D 模型横截面

Fig. 2 2D model cross section

模型中,将激光光源引起的样品上表面附近的瞬间大的温度梯度简化为了瞬时表面温度载荷。因此,模型进一步简化为了求解二维的热-结构耦合的平面弹性应变问题。本文采用直接耦合分析解法进行建模,选用二维耦合单元 PLANE13 进行模型的求解。热场与结构场耦合的实质是将热场方程与结构场方程通过热应变项联系在一起。

各向同性材料中热-结构耦合场的控制方程为:

$$k \nabla^2 T(x, y, t) - \rho c \dot{T}(x, y, t) = Q(x, y, t) \quad (1)$$

$$\mu \nabla^2 U(x, y, t) + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot U(x, y, t)) = \rho \ddot{U}(x, y, t) + \beta \nabla T(x, y, t) \quad (2)$$

其中, $T(x, y, t)$ 表示瞬态温度分布; $U(x, y, t)$ 代表位移向量场; k 为热传导率; β 为热声耦合常数,可表示为 $\beta = (3\lambda + 2\mu)\alpha_T$, α_T 为线性热膨胀系数, $Q(x, y, t)$ 表示激光光源辐照产生的热源载荷。

在分析过程中,瞬态表面温度载荷作用在激光光源辐照区域,假定模型的其他表面与外界无热流交换。模型的上表面为自由边界条件,人工凹槽的两边亦是自由条件,且相互之间无约束干扰,可描述为如下方程:

$$n \cdot [\sigma - (3\lambda + 2\mu)\alpha_T T(x, y, t)I] = 0 \quad (3)$$

其中, n 为表面法向单位向量; I 为单位张量; σ 为应力张量。

此外,温度场和位移场的初始条件为:

$$T(x, y, 0) = 300K \quad (4)$$

$$U(x, y, 0) = \left. \frac{\partial U(x, y, t)}{\partial t} \right|_{t=0} = 0 \quad (5)$$

热-结构耦合方程的有限元形式为:

$$[K]\{T\} + [C]\{\dot{T}\} = \{p_1\} + \{p_2\} \quad (6)$$

$$[M]\{\ddot{U}\} + [S]\{U\} = \{F_{ext}\} \quad (7)$$

其中, $[K]$ 代表热传导矩阵; $\{T\}$ 表示温度; $[C]$ 表示热容量矩阵; $\{\dot{T}\}$ 代表温度变化率; $\{p_1\}$ 、 $\{p_2\}$ 为热源矢量。 $[M]$ 为质量矩阵; $\{\ddot{U}\}$ 为加速度矢量; $[S]$ 为刚度矩阵; $\{U\}$ 为位移矢量; $\{F_{ext}\}$ 为外力矢量,可表示为:

$$\{F_{ext}\} = \int [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} dV \quad (8)$$

其中, $[B]$ 为形状函数矩阵; $[D]$ 为材料参数矩阵; $\{\varepsilon_0\}$ 为热应变矢量。

方程求解时,为提高计算精度,单元尺寸一般控制在 $\lambda/20 \sim \lambda/10$ (其中 λ 为最小波长);由于采用 Newmark 积分法进行计算,该方法中解的稳定性不受

时间步的影响,但考虑到解的精度,一般选取激光超声极限频率的 $1/10$,这里的极限频率定义为激光超声

中心频率幅度下降到 $1/e$ 时所对应的最大频率。

模型中使用的材料参数如表1所示。

表1 数值计算中铝材料的热-结构参数*

Tab. 1 Thermo-physical parameters of aluminum used in the calculation*

吸收率	密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	比热 $/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	热导率 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	热膨胀系数 $/(10^{-5} \cdot K^{-1})$	拉梅常数	
					$\lambda (10^{10} Pa)$	$\mu (10^{10} Pa)$
$5.2 \times 10^{-2} + 3 \times 10^{-5} (T - 300)$	$2769 - 0.22 \times T$	$780.3 + 0.48T$	$249.5 - 0.08T$	2.31×10^{-5}	5.81	2.61

注: *表中所有参数均为在温度范围 $300 K \leq T \leq T_m$ 内的值; T_m 为材料的烧蚀阈值

3 样品与实验装置

3.1 样品

图3所示为实验采用的铝制试样,材料为7075铝合金,试样的尺寸为 $200 mm \times 80 mm \times 10 mm$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 厚),人工表面裂纹通过电火花技术(WEDM)加工完成,宽度为 $0.1 mm$,深度范围为 $0.1 \sim 0.5 mm$,间隔 $0.1 mm$ 。裂纹到试样左边缘的距离约为 $120 mm$,激光线源激励位置在人工凹槽左侧 $18 mm$ 处,探测位置与激光线源激励位置在表面人工凹槽的同侧,距离凹槽 $46.5 mm$ 。

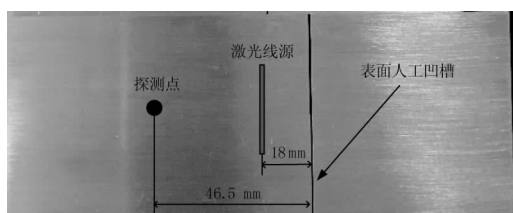


图3 带有人工表面凹槽的铝制试样

Fig. 3 Specimen of aluminum plate with artificial surface-breaking crack

3.2 实验装置

为研究瑞利波波形特征与表面裂纹深度之间的时间依赖关系,建立了用于检测铝板中表面裂纹的激光超声非接触式无损检测实验系统,如图4所示。系统中,采用INNOLAS公司Spitlight Compact 200的Nd:YAG脉冲激光器来激发瑞利波,激光器的波长为 $1064 nm$,脉冲空间宽度为 $8 ns$,能量范围为 $70 \sim 220 mJ$ 连续可调;使用柱面镜将激光聚焦到线源。使用NI USB-6009数据采集卡控制脉冲激光器发射激光束。使用基于光折射晶体的双波混合激光干涉仪来测量超声波信号,该干涉仪使用的连续激光的波长为 $532 nm$,功率为 $400 mW$,干涉仪的检测带宽为 $1 \sim 200 MHz$ 。采用Tektronix DPO3034数字示波器来记录激光干涉仪探测到的电压信号。与激光源同步的触发信号用于触发数字示波器。将试样放置在3D电动平移台上以精确地控制试样的移动。由NI PXIe-1062Q机箱和NI PXIe-8115控制

器构成PC通过程序控制数据采集卡、运动控制器和数字示波器。

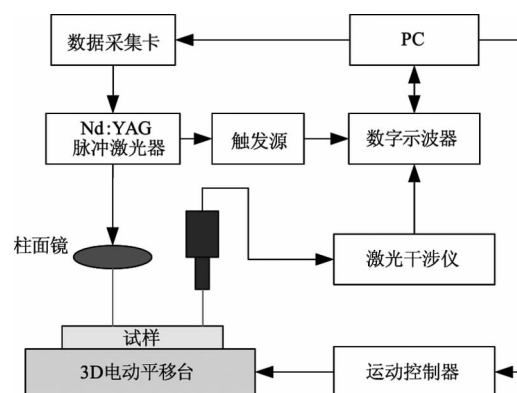


图4 实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram for experimental setup

4 结果与分析

模型中,温度载荷的作用时间为 $8 ns$,激光线源宽度为 $100 \mu m$,为了在铝制试样的热弹区域内激发出尽可能大的波形振幅,温度载荷大小选择为 $500 ^\circ C$ 。图5为在检测点C处获取的样品表面存在 $0.5 mm$ 深度的表面缺陷时反射瑞利波的时域波形。从图5中可以看到,在反射瑞利波的时域波形中主要有三个波峰,分别是R波、RR波与RS波,其中R波是激光线源激发出的瑞利波直接传播到检测点C处产生的,RR波与RS波是由表面缺陷引起的,RR波与RS波的形成机制将在后面详细讨论。图6为不同缺陷深度时,在检测点C接收到的反射瑞利波的时域波形。观察图6可以发现,随着缺陷深度从 $0.1 \sim 0.5 mm$ 的逐渐增加,RR波的到达时间基本不变,为 $2.06 \mu s$;RS波的到达时间逐渐延迟,分别为 $2.24 \mu s$ 、 $2.34 \mu s$ 、 $2.45 \mu s$ 、 $2.55 \mu s$ 、 $2.64 \mu s$,对应的时间延迟量分别为 $0.10 \mu s$ 、 $0.11 \mu s$ 、 $0.10 \mu s$ 和 $0.09 \mu s$,呈现出线性延迟规律。由图6中RR波与RS波的到达时间随缺陷深度的变化规律可知,RR波的到达时间是与表面缺陷的左边界(即表面缺陷的位置)密

切相关的,RR波的峰值及RS波的到达时间是与表面缺陷的底端(即表面缺陷的深度)密切相关的,可根据RR波与RS波的到达时间特性进行表面缺陷位置与深度的检测。

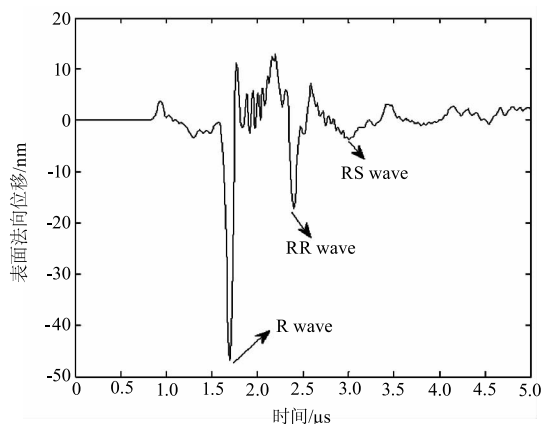


图5 表面缺陷深度0.5 mm时,反射瑞利波时域波形

Fig. 5 Time-domain reflected Rayleigh waveform with 0.5 mm depth defect

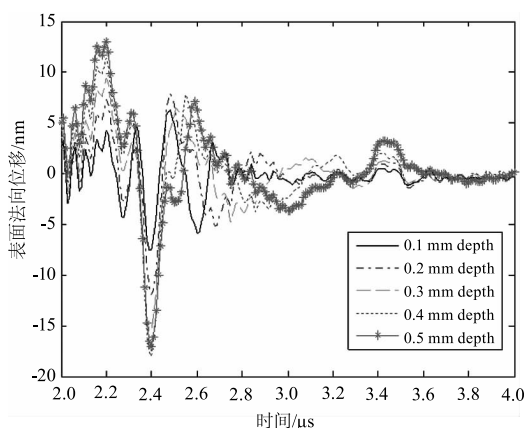


图6 表面缺陷深度不同时,反射瑞利波时域波形

Fig. 6 Time-domain reflected Rayleigh waveform with different depth defect

RR波与RS波的形成机制可表示为图7所示。RR波是由激光产生的瑞利波沿着试样表面传播到缺陷的左边界,然后直接发生反射,又沿着表面传播到接收点C形成的。RS波是由激光产生的瑞利波沿着试样表面传播到缺陷的左边界,并沿着左边界继续传播到缺陷底部,这时在缺陷底部发生波形模式转换变为剪切波(S波),S波以一个角度 θ 传播到试样表面,然后又发生波形模式转换成瑞利波,最后瑞利波沿着试样表面传播到接收点C形成的。

根据 Scruby 等^[11]计算得出的激光在铝中热弹产生剪切波的角度依赖关系,图7中 $\theta \approx 30^\circ$ 。这时RR波与RS波的到达时间差 Δt 与表面深度的时间依赖关系可表示为:

$$\Delta t = \frac{d}{c_r} + \frac{d}{c_s \cos \theta} - \frac{d \tan \theta}{c_r} + \Delta t_{\text{Width}} \quad (9)$$

其中, c_r 为瑞利波在铝中的传播速度; c_s 为剪切波在铝中的传播速度; d 为表面缺陷深度; θ 为剪切波入射到试样表面时与表面发现的夹角; Δt_{Width} 为缺陷宽度引起的时间差。因此,RR波与RS波的到达时间差 Δt 与表面深度 d 的时间依赖关系可进一步表示为:

$$d = \frac{1.73 c_r c_s}{0.73 c_s + 2 c_r} \cdot (\Delta t - \Delta t_{\text{Width}}) \quad (10)$$

由公式(10)可以看出,激光超声反射瑞利波的时间特征 Δt 与表面深度 d 呈现一种线性的依赖关系。为验证结果的正确性,采用图3所示的一系列试件和图4所示的实验装置进行了五次表面缺陷深度的检测实验,其中实验结果如图8所示。

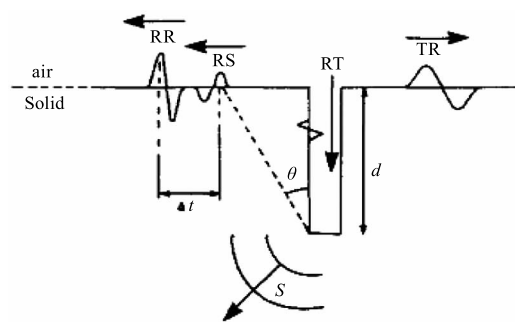


图7 瑞利波与表面缺陷相互作用示意图

Fig. 7 Interaction diagram of Rayleigh wave and the crack

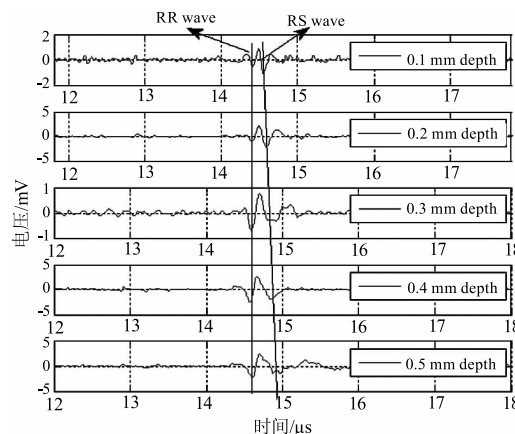


图8 表面缺陷深度不同时,实验得出的反射瑞利波时域波形

Fig. 8 Time-domain reflected Rayleigh waveform with different depth defect by experiment

由图8可以看出,随着缺陷深度从0.1 mm逐渐增加到0.5 mm,RR波与RS波的到达时间差亦呈现出线性增加规律,这与数值模拟结果取得了良好的一致。为了进一步比较数值模拟和实验结果,分别采用公式(10)对数值模拟和五次实验得到的时间差进行表面缺陷深度的计算,结果如图9所示。

从图9中看出,五次实验结果均实现了表面缺陷深度的定量检测,检测的深度范围为0.1~0.5 mm,深度检测的最大误差为0.06 mm。引起误差的主要原因包括:①试件中标准表面缺陷的加工误差;②由于试验中存在噪声干扰,使得读取波峰的到达时间是存在读数误差,这需要在接下来工作中进行进一步的数据处理研究。实验结果充分表明,利用RR波与RS波的到达时间差这一时间特征量可有效的进行表面缺陷深度的定量表征。

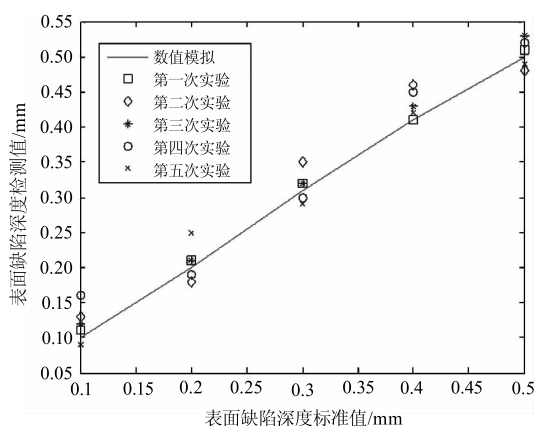


图9 表面缺陷深度计算结果

Fig. 9 Calculated results of the surface defect depths

5 结 论

本文采用数值模拟的方法,研究了反射瑞利波特征与表面裂纹深度之间的时间依赖关系,系统地分析波形时域特征的形成机理,提取出瑞利波的时域特征量与表面缺陷深度的数学关系表达式,并搭建了激光超声无损检测系统进行了实验验证。结果表明,RR波与RS波的到达时间差这一时间特征量与表面缺陷深度呈现出线性增长关系,利用该时间特征量可有效的进行表面缺陷深度的定量检测,检测表面缺陷的深度范围为0.1~0.5 mm,最大误差 ≤ 0.06 mm。这一研究结果可应用到发动机涡轮叶片和飞机机翼的表面裂纹非接触式无损检测之中。

参考文献:

- [1] LI Chunhui, LI Sinan, et al. A comparison of laser ultrasonic measurements and finite element simulations for evaluating the elastic properties of tissue mimicking phantoms [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44: 866 – 871.
- [2] MA Baoquan, ZHOU Zhenggan. Progress and development trends of composite structure evaluation using noncontact nondestructive testing techniques in aviation and aerospace industries [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2014, 35(7): 1787 – 1803. (in Chinese)

- 马保全,周正干. 航空航天复合材料结构非接触无损检测技术的进展及发展趋势 [J]. 航空学报, 2014, 35(7): 1787 – 1803.
- [3] Jung-Ryul Lee, See Yenn Chong, et al. A time-of-flight mapping method for laser ultrasonic guided in a pipe and its application to wall thinning visualization [J]. NDT & E International, 2011(44): 680 – 691.
- [4] WANG Jingshi, XU Xiaodong, LIU Xiaojun, et al. Low pass effect of surface defect metal based on laser ultrasonic [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(12): 7765 – 7769. (in Chinese)
- 王敬时,徐晓东,刘晓峻,等. 利用激光超声技术研究表面微裂纹缺陷材料的低通滤波效应 [J]. 物理学报, 2008, 57(12): 7765 – 7769.
- [5] Puu-An Juang, Ching-Chih Tsai. Analysis and measurement of lateral elliptic motion effect for an asymmetric disc-type ultrasonic motor [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010(24): 312 – 322.
- [6] M Stache, et al. A precise non-destructive damage identification technique of long and slender structures based on modal data [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 365: 89 – 101.
- [7] Zhang C, et al. Structural damage detection based on virtual element boundary measurement [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 372: 133 – 146.
- [8] ZENG Wei, WANG Haitao, TIAN Guiyun, et al. Research on laser ultrasonic defect signal detection technology based on energy analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3): 650 – 655. (in Chinese)
- 曾伟,王海涛,田贵云,等. 基于能量分析的激光超声波缺陷检测研究 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 650 – 655.
- [9] GUAN Jianfei, SHEN Zhonghua, NI Xiaowu, et al. Numerical study on depth evaluation of micro-surface crack by laser generated ultrasonic waves [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2010, 24(1): 15 – 21. (in Chinese)
- 关建飞,沈中华,倪晓武,等. 激光超声探测铝板表面微缺陷深度的数值研究 [J]. 测试技术学报, 2010, 24(1): 15 – 21.
- [10] Choi S, Jhang K Y. Influence of slit width on harmonic generation in ultrasonic surface waves excited by masking a laser beam with a line arrayed slit [J]. NDT & E International, 2013, 57: 1 – 6.
- [11] C B Scruby, R J Dewhurst, D A Hutchins, et al. Quantitative studies of thermally generated elastic waves in laser-irradiated metals [J]. Appl. Phys., 1980, 51(2): 6210 – 6215.