

文章编号: 1001-3806(2009)01-0083-04

移动扫描激光线源检测圆柱表面缺陷实验研究

马琪钧, 单奇, 谢婧, 石一飞, 沈中华*
(南京理工大学 信息物理工程系, 南京 210094)

摘要: 为了研究瑞利波与圆柱表面缺陷的相互作用, 并以此作为检测圆柱表面缺陷的理论依据, 设计了一套实验装置, 该装置采用脉冲激光线源产生超声波, 激光干涉仪探测瑞利波信号, 通过改变激发源与人工缺陷的相互位置研究了瑞利波与缺陷的相互作用过程。实验中在不同的相互位置得出了不同的瑞利波波形, 反射瑞利波的峰-峰值随激光源与缺陷的距离减小而增大, 且当激发点位于缺陷边缘处时波形的极性改变。结果表明, 当应用本装置时, 通过改变人工缺陷与激光光源相对位置, 再利用检测峰-峰值的极大值情况和根据接收到的瑞利波的极性可以判断缺陷的位置。

关键词: 激光技术; 缺陷检测; 移动扫描线光源法; 瑞利波

中图分类号: TN249; O426.2 **文献标识码:** A

Experimental study of the surface notches detection on cylinder by means of scanning laser line source

MA Qi-jun, SHAN Qi, XIE Jing, SHI Yi-fei, SHEN Zhong-hua

(Department of Information Physics and Engineer, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to investigate interaction between Rayleigh waves and the notches on the surface of a cylinder, an experiment setup was designed. By changing the relative position between generation source and the notch, Rayleigh waves were detected by a laser interferometer with applying a pulse laser to generate the signal. Experimental results demonstrated that different Rayleigh waves were obtained at different positions, that peak-to-peak value of reflective Rayleigh waves increased with the decrease of laser source-notch distance, and that the waves polarity transformed. Therefore, detecting the maximum of peak-peak value can be utilized to judge the position of the notch by rotating the sample while keeping the position of generation source unchanged; the polarity can also be used in further judgments.

Key words: laser technique; notch detection; scanning laser line source; Rayleigh wave

引言

脉冲激光激发超声是由激光直接照射样品产生, 这种方法具有无需耦合剂, 且可进行远距离激发和接收的优点, 因此, 人们都试图在传统的压电超声的基础上使用宽频带、多模式的激光超声探伤方式, 使超声无损检测方法能扩展至原有压电超声检测所无法应用的场合。

采用超声法检测表面缺陷是利用弹性表面波到达弹性表面缺陷时基于材料本身声阻抗性质突变而产生的反射、衍射及衰减等特征来反演缺陷的位置、大小和走向等信息^[1]。CLORENNEC 等人利用线激光光源在

圆柱及圆管表面激发瑞利波, 并对应用表面波探测表面缺陷的可能性进行了讨论^[2]; JIAN^[3]用有限元法分析了瑞利波和表面缺陷的相互作用; GAO^[4]等人利用脉冲激光激发圆柱表面的周向导波并引进 2 维傅里叶变换分析波的模式, 这是检测缺陷的基础。探测表面缺陷方法之一是由 KROMINE 等人^[5-6]发展的扫描激光光源位置技术 (scanning laser source, SLS), 该技术运用超声波和缺陷之间的相互作用, 具有高的空间分辨率。GUAN^[7]等人利用有限元法模拟了脉冲激光作用于单层铝板表面, 由热弹机制产生超声波及其传播过程。GUAN^[8]、SHI^[9]和 XU 等人采用有限元法 (finite element method, FEM), 计算了热弹机制激发的超声场^[10], 并讨论了激光激发的在不同深度的缺陷附近的声场, 可以反映出不同深度缺陷所对应的不同波形。

柱状材料是工业生产中十分常见的基本结构, 因此, 对其表面缺陷的无损检测有着重要的意义。作者将移动扫描激光线源法应用于柱状材料的表面缺陷检测。实验中以加工有表面人工矩形缺陷的铝制圆柱

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2007203); 国家自然科学基金资助项目 (60778006); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目资助项目

作者简介: 马琪钧 (1986-), 女, 本科生, 现主要从事激光超声学方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: shenzh@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2007-10-24; 收到修改稿日期: 2008-06-03

(直径 20mm, 矩形缺陷深度 1mm) 作为样品, 采用脉冲激光在圆柱表面激发瑞利波, TEMPO-FS200 干涉仪进行接收。通过将缺陷置于不同位置的情况下实验所得的结果讨论圆柱表面瑞利波的传播规律, 峰-峰值随缺陷位置的变化情况以及当缺陷接近线激光光源激发点时波形的极性变化。除此之外, 提出了将这些规律应用到无损检测中的可能性。随着人工缺陷与激光光源相对位置的改变, 通过检测峰-峰值的极大值情况可以判断缺陷的位置; 还可以根据接收到的瑞利波的极性来进行进一步的判断。

1 实验设计

作者所设计的实验装置如图 1 所示, 其中 Nd:YAG

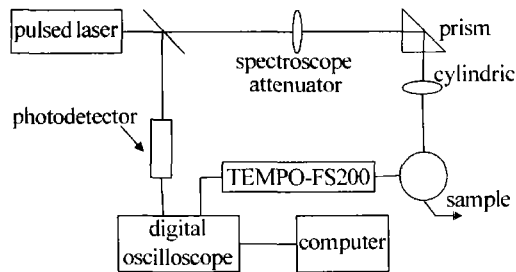


Fig. 1 Experiment set-up

脉冲激光器 (脉宽为 10ns, 波长为 1064nm) 作为超声波激发源, 激发激光首先经分光镜, 其中一束射入高速光电二极管进行电信号转换后, 作为触发源输入数字示波器 (Tektronix3054B 500MHz)。另一束则经衰减镜衰减后, 通过柱透镜聚焦成线源照射到样品表面, 使温度升高导致局部热膨胀, 晶格动能增加, 但还在样品的弹性限度之内, 即热弹作用产生超声波^[2]。实验中将铝制样品置于精密旋转台上, 采用激光超声波检测仪器 TEMPO-FS200 来探测脉冲激光在样品中激发的瑞利波。TEMPO-FS200 是一个带有自适应的光束组合器的参考光束干涉仪: 由干涉仪发射出的探测光束 (波长 532nm) 聚焦到样品表面, 经样品表面反射后与干涉仪内部的参考光束发生干涉, 通过相位解调, 检测出样品表面超声波引起的振动位移。TEMPO-FS200 探测到的超声信号转换成电信号后输入数字示波器。

激光在圆柱表面激发的声波模式有很多种, 一次

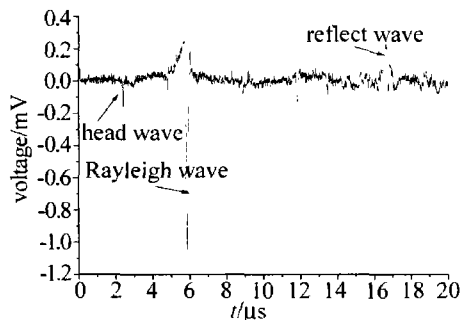


Fig. 2 Typical signal waveform

激发可同时产生纵波、横波、头波、Lamb 波和瑞利波等^[2]。图 2 所示为实验探测到的典型波形。可以看出除瑞利波以外的其它波形并不明显, 所以, 瑞利波在无损检测中应用更为广泛。

2 实验分析

2.1 不同位置激发时瑞利波的特性研究

为了确定激光源与表面缺陷处于不同位置时瑞利波信号特征, 如图 3 所示。图 3a ~ 图 3d 中均表示了实验中激光源与表面缺陷的相互位置以及激光激发后干涉仪在垂直方向上接收到的经表面传播的瑞利波。

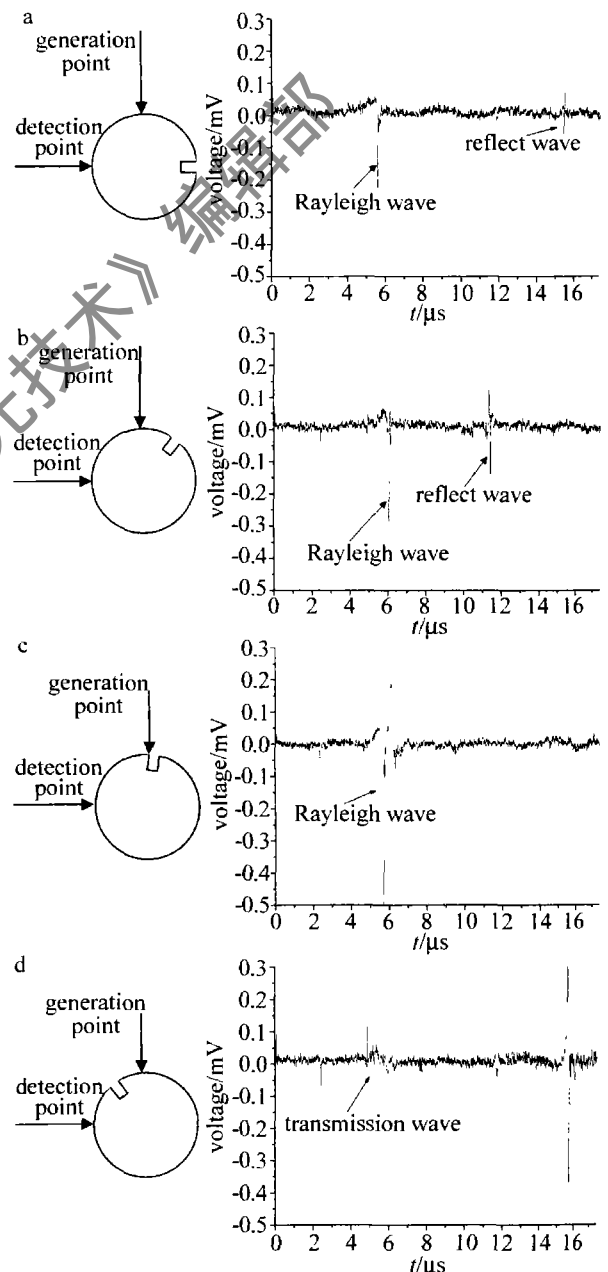


Fig. 3 Different positions of the notch and corresponding Rayleigh waves a—laser line source located in the left of the notch at the angle of 90° b—laser line source located in the left of the notch at the angle of 45° c—laser line source located in the edge of the notch d—laser line source located in the right of the notch at the angle of 45°

实验中激光激发点与干涉仪接收点的距离保持不变,为1/4圆柱($\varnothing 20\text{mm}$)周长,所以,只是由于缺陷位置不同而导致接收到的瑞利波形有所差异。下面将对4个波形进行逐个分析。

图3a中,缺陷与激发源成 90° 。激光激发后,干涉仪可接收到从激发点直接传播过来的入射瑞利波,通过计算(瑞利波在铝中的波速为 2905m/s)可知它对应于图中 $t = 5\mu\text{s} \sim 6\mu\text{s}$ 处的波形;而向缺陷方向传播的瑞利波经缺陷反射后,经过一段时间的延迟也被干涉仪接收,且由于经过的路程是前者的3倍,所以对应了图中 $t = 15\mu\text{s} \sim 16\mu\text{s}$ 的瑞利波反射波波形。图3b中,缺陷与线激光光源成 45° 。此时干涉仪可直接接收所激发的入射瑞利波,位于波形图中 $t = 5\mu\text{s} \sim 6\mu\text{s}$ 处;而由于缺陷位置的改变,被缺陷边缘反射的瑞利波所经过的路程变为了入射波的2倍,因此,出现了波形图中 $t = 10\mu\text{s} \sim 11\mu\text{s}$ 处波形,这与图3a有所不同。图3c中,线激光光源入射缺陷的一侧边缘。在 $t = 5\mu\text{s} \sim 6\mu\text{s}$ 时仍直接接收到入射瑞利波,从图中可以看到瑞利波呈双极性。图3d中,将缺陷置于和线激光光源、干涉仪各成 45° 处。图中透射瑞利波,因经1/4圆周到达接收点经过缺陷而受到严重衰减,而另一方向绕过3/4圆周被接收到。

再将这4种情况下的瑞利波进行峰-峰值的计算,可得到以下数据(见图4):图中的变化趋势表明了当

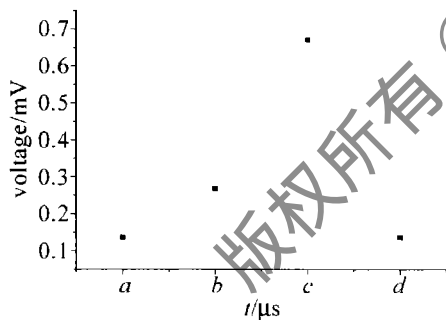


Fig. 4 Changes of peak-to-peak value according to the notch positions
缺陷位置逐渐接近线光源激发点区域时,峰-峰值会明显上升,但是当缺陷位置经过激发点后,瑞利波的峰-峰值又会有显著下降的趋势,而在缺陷处得到了极大值。这一现象与平板中观察到的现象相似^[5]。利用瑞利波的这一特征可以在无损检测中较为准确判断缺陷的位置。

2.2 缺陷靠近激发点时瑞利波极性的研究

在实验中观察到了当缺陷从光源左侧顺时针逐渐旋转至铝制圆柱表面激发点过程中 $t = 15\mu\text{s} \sim 16\mu\text{s}$ 处的瑞利波极性的变化情况,此处的瑞利波经过了3/4圆周后被干涉仪所接收到的,将该处的波形放大后可以很明显的看出变化规律。图5中表示了激光激发点

与缺陷的不同相互位置,其中a点~f点分别对应了图6a~图6f的波形图。

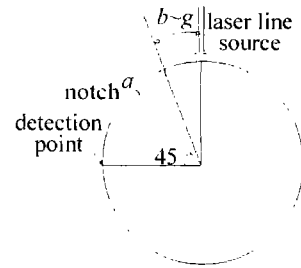


Fig. 5 Relative position of generation points and notches

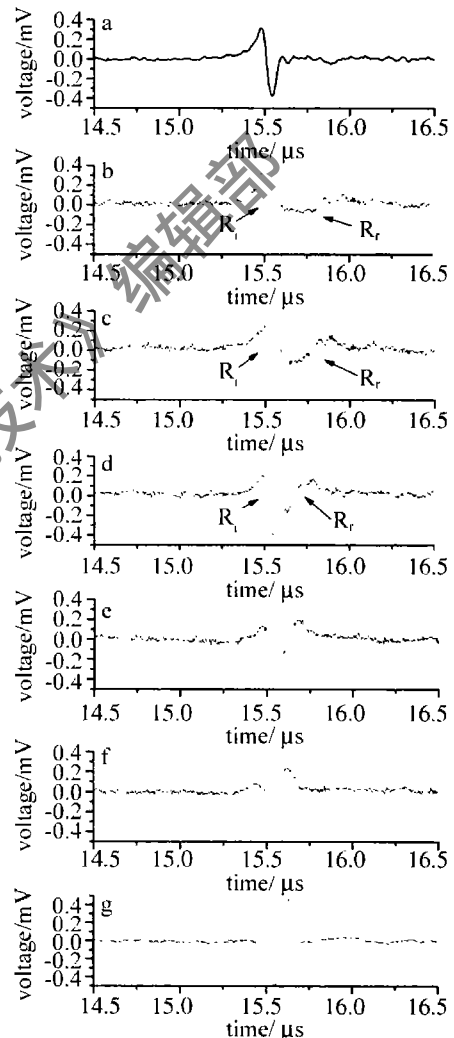


Fig. 6 Rayleigh waves' polarity transforms when the notch approaching generation point
a—positions of the notch and generation point forms an angle of 45°
b~f—small distance between the notch and generation point with the sample rotating every 1.5°
g—generation point lying at the edge of the notch

从图6中可以看出,波峰的极性从先正后负逐渐变成了先负后正。这种明显的趋势可以用波的反射与叠加原理加以解释。图中 R_i 代表线激光光源激发后直接沿圆柱表面传播的入射瑞利波, R_r 代表反射瑞利波。由图6a中可以看出,当缺陷与激发点成 45° 角处时,由于入射瑞利波与反射瑞利波的空间距离较大,并

不存在波的叠加过程,此时在 $t = 15\mu\text{s} \sim 16\mu\text{s}$ 时接收到激发的瑞利波的波峰极性为先正后负。在图 6b 中也可以看到 R_i 的波峰极性为先正后负,这是由线激光光源激发后直接沿圆柱表面传播的瑞利波;而沿相反方向传播的瑞利波被距离激发点很近的缺陷边缘反射后,根据声波的反射原理,当声波由金属传播至金属-空气界面时有 p 的位相损失,因此波峰极性变为先负后正,这是与 R_i 右侧相连的振幅较小的波形 R_r ,它在图 6a 中并体现是因为缺陷距激发点距离较远,两个波仍有较大的空间距离,经理论计算,它应出现在 $t = 21\mu\text{s} \sim 22\mu\text{s}$ 时。随着缺陷与激发点逐渐接近,如图 6c、图 6d、图 6e、图 6f 所示, R_i 和 R_r 随之靠近并进行叠加,叠加过程遵循波的叠加原理,在图 6f 中可以看到,反射波的波谷与入射波的波峰叠加导致后者的波峰垂直位移减小。在图 6g 中,因此时激发的瑞利波全部经过的缺陷边缘的反射作用,有了整体的 p 的位相损失,所以波峰极性变为先负后正。

根据以上理论解释可知,当缺陷接近激光激发点时,入射波与反射波的距离就是缺陷和激光激发点之间距离的 2 倍,那么通过观察波形的转变可以精确的计算出缺陷的位置。

3 结论

设计了通过改变激光光源与缺陷的相互位置来检测缺陷位置的实验装置。在光源和缺陷的相互位置改变的情况下得到了不同的波形,通过观察入射瑞利波的情况以及计算反射瑞利波出现的时间可确定缺陷的具体位置。提出了峰-峰值的比较也可应用到无损检测中,通过极大值点判断缺陷的位置使检测具有更高

的灵敏度。除此之外,瑞利波极性的变化也是检测缺陷的一个重要依据。

参考文献

- [1] YUAN Y Q, CHEN S Z. Principles and applications of ultrasonic in modern times [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1996: 323 (in Chinese).
- [2] CLORENNEC D, ROYER D. Analysis of surface acoustic wave propagation on a cylinder using laser ultrasonics [J]. A P L, 2003, 82 (25): 4608-4610.
- [3] JIAN X, DIXON S, GUO N, et al. Rayleigh wave interaction with surface-breaking cracks [J]. J A P, 2007, 101 (6): 064906/1-064906/7.
- [4] GAO W, GLORIEUX C, THOEN J. Study of circumferential waves and their interaction with defects on cylindrical shells using line-source laser ultrasonics [J]. J A P, 2002, 91 (9): 6114-6119.
- [5] KROMINE A K, FOMITCHOV P A, KRISHNASWAMY S, et al. Laser ultrasonic detection of surface-breaking discontinuities: scanning laser source technique [J]. Materials Evaluation, 2000, 58 (2): 173-177.
- [6] KROMINE A K, FOMITCHOV P A, KRISHNASWAMY S, et al. Detection of subsurface defects using laser based technique [J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2001, 20: 1612-1617.
- [7] GUAN J F, SHEN Zh H, XU B Q. Spectral analysis of the scattering waveform of the laser-generated ultrasonic waves for detecting the crack in the material [J]. Laser Technology, 2005, 29 (3): 287-290 (in Chinese).
- [8] GUAN J F, SHEN Zh H, LU J, et al. Finite element analysis of the scanning laser line source technique [J]. Japan J A P, 2006, 45 (6A): 5046-5050.
- [9] SHI Y F, SHEN Zh H, NI X W, et al. Finite element modeling of acoustic field induced by laser line source near surface defect [J]. Optics Express, 2007, 15 (9): 5512-5520.
- [10] XU B Q, SHEN Zh H, NI X W, et al. Finite element modeling of laser-generated ultrasound in coating-substrate system [J]. J A P, 2004, 95 (4): 2109-2115.

(上接第 76 页)

参考文献

- [1] HUANG Y W. TEC based thermostat system for high-power semiconductor laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35 (2): 144-147 (in Chinese).
- [2] JIANG H L. Design of thermostate system for high sower semiconductor laser [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2004, 25 (4): 320-322 (in Chinese).
- [3] SONG Sh D, YU Q X. The study of constant temperature and current control system for SLED [J]. Laser Technology, 2004, 28 (2): 193-195 (in Chinese).
- [4] SUN L F, TIAN X J. High precision PWM power amplifier based on thermoelectric cooler [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2004, 15 (9): 1026-1030 (in Chinese).
- [5] CHEN L. Precise constant temperature controller for high power laser diode [J]. Laser & Infrared, 1999, 29 (4): 249-252 (in Chinese).
- [6] DENG J. Research and design of high-power semiconductor laser diode driver [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2003, 24 (5): 319-320 (in Chinese).
- [7] YUAN J G. Accurate controlling system for the output and frequency of laser diodes [J]. Laser Technology, 2006, 30 (6): 650-652 (in Chinese).
- [8] SUN D G. Study on the PWM driver circuit of LD for laser fuze [J]. Laser Technology, 2007, 31 (2): 217-219 (in Chinese).
- [9] LIU R. High-accuracy current and temperature control for laser diode using MCS-51 microcontroller [J]. Laser Technology, 2004, 28 (3): 225-227 (in Chinese).