

文章编号: 1001-3806(2003)06-0557-03

反射激光式超声测厚传感器及其应用*

陈 笑 徐荣青 沈中华 陆 建 倪晓武

(南京理工大学应用物理系, 南京, 210094)

摘要: 研制了激光超声测厚传感器, 并对其测试原理进行了讨论。该传感器具有高频响、频带宽、较高的灵敏度且易于调节。进而采用该传感器测试了由脉冲 Nd:YAG 激光在抛光的薄铁片上所激发的超声纵波。根据铁片背面对心处接收到的超声纵波及其回波波形, 可以推算出样品薄板的厚度。理论和实验测试结果显示, 该传感器的相对测量误差达 0.5%。

关键词: 激光超声; 光偏转; 测厚传感器; 纵波

中图分类号: TN247; TN249 **文献标识码:** A

Reflected laser ultrasonic sensor for testing thickness and its application

Chen Xiao, Xu Rongqing, Shen Zhonghua, Lu Jian, Ni Xiaowu

(Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, 210094)

Abstract: A new laser ultrasonic sensor for testing samples' thickness is developed. The detection principle is discussed in detail. This sensor has high-frequency response, high sensitivity and is easy to adjust. The sensor is used to detect laser-induced ultrasonic longitude-wave at the epicenter of the rear metallic surface when pulse Nd:YAG laser is focused on polished iron plate. Well-defined longitude wave and its echo waves are acquired. Based on the experimental results, the sample's thickness can be deduced. The theoretical and experimental results are in good agreement with relative error of 0.5%.

Key words: laser ultrasound; optical beam deflection; sensor for testing thickness; longitudinal wave

引 言

在工业领域中, 超声测厚是一门较为成熟的新技术, 其最大优点是无损检测、安全、可靠及精度高, 而且它可以在线进行实时检测^[1,2], 因而广泛用于各种板材、管材、锅炉容器壁厚的测试, 以及金属容器局部腐蚀锈蚀的情况探测中, 对设备安全运行以及现代化管理起着重要的作用。

超声波测厚可分为两大类: 一类是利用超声波在介质中的传播特性进行检测, 称为超声传播测厚法; 另一类是利用超声波对被检物的振动特性, 去判别它的厚度。超声波测厚仪按工作原理来分, 有共振法、干涉法及脉冲反射回波法等几种。由于脉冲反射法并不涉及共振机理, 与被检物表面的光洁度

关系不密切。所以, 基于脉冲反射法的测厚仪是最受欢迎的一种仪表^[3]。但因压电超声在薄样品中难以分辨出回波, 且该接触式检测不能用于高温或高压环境等, 因而使用受到限制。而激光超声技术在很大程度上克服了这些缺点。近几年来, 在激光超声应用方面, 将激光激发和激光探测结合在一起, 组成“全光系统”。其有以下优点: 可实现非接触、远程测量、响应频率高、带宽宽等。笔者提出一种采用光纤作为接收、传输元件的反射式光束偏转探测法, 即利用探测光束的偏转角来反映超声波传播的信息, 进而研制了相应的传感器。采用该光学传感器探测了脉冲 Nd:YAG 激光在试样上激发的纵波及回波信号, 根据信号峰值间的时间间隔及纵波的速度, 可得到样品的厚度, 对应的相对测量误差达 0.5%。

1 实验装置与测试原理

1.1 测试装置

测试装置如图 1 所示, 激光超声纵波是由输出波长为 1.06 μm , 脉宽为 10ns 的 Nd:YAG 脉冲激光器 1 激发的, 激发时单脉冲激光能量为 70mJ。脉冲激光束经过分光镜 2 时, 约有 5% 的能量被能量计 14 的

* 国家自然科学基金、江苏省自然科学基金、教育部高校优秀青年教师奖励计划及激光技术国家重点实验室开放基金资助项目。

作者简介: 陈 笑, 女, 1977 年 2 月出生。博士研究生。目前主要从事激光与物质相互作用的测试和机制方面的研究。

收稿日期: 2003-04-25; 收到修改稿日期: 2003-06-30

探头接收,用于实时监控每个脉冲激光束的能量。其余 95% 的能量通过焦距为 145mm 的透镜 3 聚焦到厚度为 0.25mm、两面抛光的铁片样品 4 上,聚焦点处的激光功率密度达到 10^8 W/cm^2 。实验触发信号源于由光电二极管 13 (上升沿时间 100ps) 获取散射激光。探测光束由半导体激光器 5 (输出波长 0.67 μm , 功率为 5mW) 发出。探测光束经过非球面镜 6 (焦距为 50mm) 会聚于铁片后表面对心处 (即在样品激发点中心垂直正对面), 其反射光由显微镜物镜 7 会聚于在其焦平面附近放置五维光纤微调架 9 (精度 0.1 μm) 中的单模光纤 10 的输入端。为减小噪音,在单模光纤前加入了中心透射波长为 0.67 μm 的窄带滤波片 8。从光纤输出的光进入型号为 Hamamatsu H5773 的光电倍增管 11。该光信号被光电倍增管转化为电信号,再通过双通道数字示波器 12 (TDS340) 被采样并存入计算机。图 1 中的元件 5~10 组成的子系统即被称为基于光束偏转法的激光超声测厚传感器,对应的测试原理与刀口法类似^[4],其特点均是利用探测光束在固体表面产生反射光的偏转来反映声波信息,但两者的接收原理和采用的敏感元件则不完全不同。刀口法主要是将偏转的反射光束通过透镜聚焦,一半被刀刃挡住,另一半被透镜聚焦至光电二极管,或者由透镜聚焦至四象限的位置传感器上进行测定。

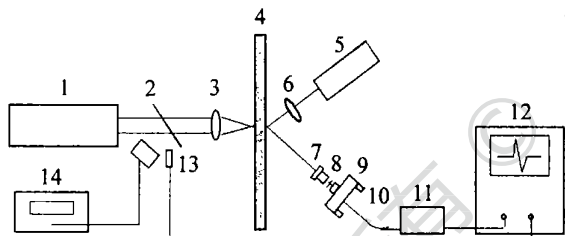


Fig. 1 Experiment arrangement for laser excitation and detection

1—Q-switched Nd:YAG 2—beam splitter 3—convex lens ($f=147\text{mm}$)
4—0.25mm-thickness of iron plate 5—laser diode 6—aspherical lens ($f_1=50\text{mm}$) 7—microscope objective ($20\times$, $L_2, f_2=4\text{mm}$) 8—interference filter (0.67 μm) 9—five dimension fiber regulating stand 10—single-mode optical fiber 11—photomultiplier (Hamamatsu H5773 with 2ns rise time) 12—digital oscilloscope (Tektronix TDS340) 13—PIN photodiode (with 0.1ns rise time) 14—energy meter

1.2 测量原理

当脉冲激光照射靶材时,可将脉冲激光等效为一垂直点力源作用在样品表面^[5]。当脉冲力作用在薄铁片上时,作用点的背面对心处会形成微小的锥形凸起,如图 2 所示。其锥形倾斜角 θ 和作用力 F 存在线性关系,即:

$$\theta = kF \quad (1)$$

式中, k 为常数。

由于 0.25mm 的铁片背面 (探测面) 预先进行了

抛光处理,因此,靶材的反射率很高。另外探测光聚焦在靶面上的光斑很小,可以近似认为光束发生镜面反射。当表面形变的倾斜角为 θ ,那么光束反射时,偏移原路径的角度即为 2θ 。如图 2 所示。相

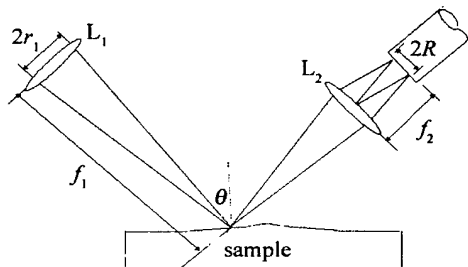


Fig. 2 Reflection of the detection beam at the epicenter

应的反射光束经显微镜物镜聚焦后所成的光斑偏移的距离如下所示:

$$\delta = 2f_2\theta \quad (2)$$

探测光束的聚焦光斑半径由下式表示^[6]:

$$r_2 = f_2(r_1/f_1) \quad (3)$$

式中, r_1, r_2 分别是探测光入射和反射光束束腰半径; f_1 和 f_2 分别是透镜 L_1 和 L_2 的焦距。这里 $r_1=2\text{mm}, f_1=50\text{mm}, f_2=4\text{mm}$, 那么 $r_2=0.16\text{mm}$, 而光纤芯径的半径 $R=4\mu\text{m}$, 所以有 $r_2 \gg R$ 。探测激光的反射光光强服从高斯分布, 即有:

$$I = I_0 \exp[-(\xi^2 + \eta^2)/r_2^2] \quad (4)$$

式中, I_0 是光束光强的最大值。

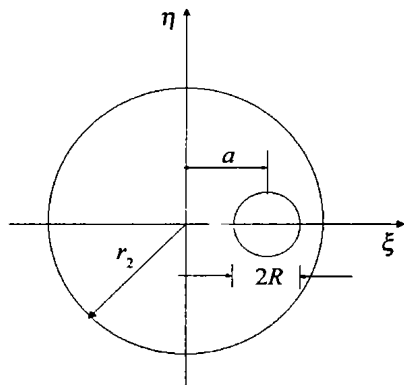


Fig. 3 Reflected beam coupling

如图 3 所示, 光纤耦合的光通量由下给出:

$$\Phi = I_0 \int_{-a-R}^{a-R} \int_{-\sqrt{R^2-(\xi-a)^2}}^{\sqrt{R^2-(\xi-a)^2}} \exp\left[-\frac{\xi^2 + \eta^2}{r_2^2}\right] d\eta d\xi \quad (5)$$

式中, a 是聚焦光斑的中心到光纤中心的距离, 光纤的耦合通量随表面形变而发生改变, 因为 $r_2 \gg R$, 所以可做下面的近似:

$$\Phi = I_0 \exp[-(a + \delta)^2/r_2^2] S_0 = \Phi_0 \exp[-(a + 2f_2\theta)^2/r_2^2] \quad (6)$$

式中, $S_0 = \pi R^2$ 。

所以, Φ 和 θ 之间的相应关系可看作服从高斯函数, 如图 4 所示。为了有最佳的近似线性效果, 首

先应调节光纤使耦合光通量初值为最大值的一半(这可以通过观察示波器直流信号的输出实现),即在图4中把工作点取在曲线的A点处。工作区在点A附近区域。取A点的导数作为线性系数。因此,光通量的变化为:

$$\Delta \Phi = \Phi_0 1.666 \theta / r_2 \quad (7)$$

而光通量的变化转化为交流电信号的电压为:

$$U = \eta \Delta \Phi = \eta 1.666 \Phi_0 \theta / r_2 \quad (8)$$

式中, η 是转化因子(单位: V/W)。由(1)式和(8)式

可得:

$$F = \frac{r_2 U}{1.666 \Phi_0 k \eta} \quad (9)$$

由(9)式和实验测得的电压值可以推算出垂直作用于靶材的瞬态力。

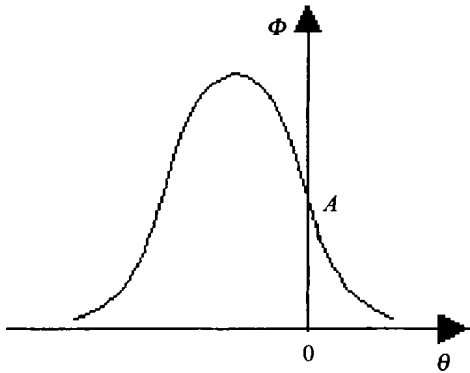


Fig. 4 Influence of θ on deflected beam coupling

2 实验结果与讨论

实验中所用激励激光的单脉冲能量为 40mJ。被作用靶材为 0.25mm 厚的铁片。图 4 为实验中所探测到激光超声纵波信号。它是由一个多脉冲高频信号和一个低频信号叠加而成。多脉冲高频信号是超声纵波在铁片前后端面之间来回反射形成的回波信号,低频信号为准静态波。由图 5 中可得相邻两脉冲峰值之间的时间间隔 T 均为 96ns。根据体波

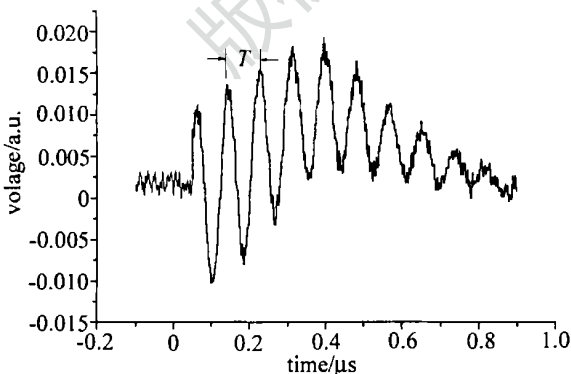


Fig. 5 Typical waveform of pulse-laser excitation in target

透射法和脉冲回波技术的激光测厚原理,采用峰值间隔法,薄铁片的厚度可由下式给出:

$$d = v \times T / 2 \quad (10)$$

式中, d 为铁片厚度; v 为铁片中激光超声纵波的速度; T 为峰值时间间隔。考虑到铁片中超声纵波速度 $v = 5180\text{m/s}$, 代入上式,求得铁片的厚度为 0.249mm。

同时,如果在已知样品厚度 d 和两相邻回波的时间间隔 T 的情况下,也可以推算该样品中纵波的传播速度。该传感器为探测未知材料,如复合材料的纵波速度提供了可能。

3 结论

用自行研制的基于光偏转的激光超声测厚传感器探测了脉冲 Nd:YAG 激光在铁片上激发的超声纵波,获得了较好的激光超声纵波及其回波波形,并据此获得了该样品的厚度,测量相对误差为 0.54%。同时基于该测试装置,还可以在已知样品厚度的情况下,推算出该样品中纵波波速。研制的超声测厚传感器的优点可以归纳如下:

(1) 此测试装置具有光学测量方法的一般优点,即非接触测量等,且相对于光学干涉等方法而言,还具有结构简单、易于调节等优点。

(2) 该方法和目前较为优越的刀口法的基本测量原理相同,可以达到很高的频响(其频响优于 10MHz)和较高的测试灵敏度。

(3) 光信号在转换为电信号前,可以由光纤传输;在某些特殊场合(如高温或高压等环境),还可实现遥测。

(4) 该传感器成本低,在激光超声领域,特别是待测物质为较薄的弹性材料,以及其它引起微形变的物理量的测量有很大的应用前景,如可用来测量 Lamb 波、表面波及能引起形变的静态力及瞬态力等。

参 考 文 献

- [1] 应崇福. 超声学. 北京: 科学出版社, 1993: 103~ 112.
- [2] 袁易全. 超声换能器. 南京: 南京大学出版社, 1989: 130~ 191.
- [3] 金长善. 超声工程. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989: 189~ 205.
- [4] 袁易全, 陈思忠. 近代超声原理与应用. 南京: 南京大学出版社, 1996: 353~ 354.
- [5] Ausel J D, Bun A L, Baboux J C. Ultrasonics, 1988, 26: 245~ 255.
- [6] 陆建, 侯锐, 陈建平 et al. 第八届现代声学国际会议. 北京: 科学出版社, 2001, 11(S312): 103~ 105.