

激光超声：一种新的检测技术

赵才福

(郑州工学院数理力学系)

摘 要：本文扼要地阐述了激光超声技术的基本原理及其应用。

关键词：激光，超声，检测技术

在众多的测试技术中，光测技术是一种既古老又成熟的检测技术，特别是 60 年代激光器的问世，为这一古老的技术带来了新的生机，形成了近代光学测试技术，在许多领域得到了更为广泛的应用。超声技术则是日趋完善和成熟且应用相当广泛的检测技术，已成为当今世界五大常规检测方法之一。尽管如此，它们也有一定的局限性，如光测技术的非穿透性，超声技术的接触性等，随着现代工业和科学技术的高度发展，这些缺点显得越来越突出。激光超声技术则是融近代光测技术与超声技术于一体，集两者之优点的新的检测技术，它既克服了光测技术的非穿透性，又克服了超声技术接触性之弊端，能以非接触方式对物体进行连续快速的自动检测，并能对形状复杂、表面粗糙、环境恶劣的物体进行全方位检测。因此，该技术一出现，立刻引起了世界各国无损检测界的极大关注，竞相研制激光超声检测系统，逐步完善技术，努力使其付诸实用，为工业部门提供一种较为理想的无损检测新方法。

激光超声检测技术包括超声振动的产生和检测两部分。当高能激光脉冲辐射在被测材料表面时，其表层便产生高频超声振动，即激光超声，用近代光学测试技术检测该振动在固体中传播的时间、能量损耗及频率变化等，这些参量携带了材料特性的有关信息，从而实现对物体的非接触无损检测。

1 激光超声振动的产生

众所周知，光波是一种电磁波，一束脉冲激光就是一个瞬间相干电磁辐射。当这种辐射作用在材料表面时，由于电磁场的作用在材料表面的传导带附近感应电流，部分入射能量变换成热而被吸收，其余能量作为反射脉冲再辐射。由于电子传导的屏蔽作用使吸收和反射发生在材料的表层，其深度用 δ 表示，对于长波长的红外光， δ 可用经典表达式表示^{〔1〕}：

* 收稿日期：1990.04

$$\delta^2 = \frac{1}{\pi \sigma \Gamma \mu \mu_0} \quad (1)$$

式中: σ 和 μ 分别为材料的电导率和磁导率, Γ 为光脉冲辐射频率, μ_0 是自由空间磁导率。对于更高频率的光波, δ 必须由量子力学导出。

利用经典的电磁理论可以确定光脉冲的反射率 R , 反射能量 E'' 和入射能量 E 之间的关系:

$$R = \frac{E''}{E} = \frac{2 - 2t + t^2}{2 + 2t + t^2} \quad (2)$$

式中 $t = \mu_0 \sigma C \delta$, C 为光速, 这里 $t \gg 1$, 因此(2)式可近似为:

$$R = 1 - \frac{4}{t} \quad (3)$$

$$\text{于是吸收能量为: } E' = (1 - R)E = \frac{4}{\mu_0 \sigma C \delta} E \quad (4)$$

脉冲激光在金属表面的作用相当于一个瞬时热源, 如图 1 所示, 如果我们设想能量吸收发生非常迅速, 热导率变化形成的金属膨胀可以忽略不计。对于面积为 A , 深度为 δ 的表层, 在吸收能量 E' 的沉积电作用下, 引起的温度变化 ΔT 由下式给出:

$$\Delta T = \frac{E'}{S \rho A \delta} \quad (5)$$

式中的 S 和 ρ 分别为金属的热稳定容量和密度, 把 E' 代入(5)式中有:

$$\Delta T = k \cdot \frac{E}{A} \quad (6)$$

这里的 $k = 4 / (\mu_0 C \rho \sigma S \delta^2)$ 是材料常数, E 是入射能量。由(6)式可见:

$$\Delta T \propto E \quad (7)$$

热能吸收引起表层温度的突然上升, 必然伴随热膨胀的产生。因此由原来的体积 $V(V = A\delta)$ 膨胀到 $V + \Delta V$ 。

$$\Delta V = 3\alpha V \Delta T \quad (8)$$

式中 α 是线性膨胀系数, 把(4)、(5)代入(8)式有:

$$\Delta V = \frac{3\alpha}{S\rho} \cdot (1 - R)E \quad (9)$$

由于吸收激光能量而产生的热弹性变形相当于在材料表层下部突然增加了体积 ΔV , 且与入射能量 E 成正比。(9)式表明体积增量 ΔV 与发热面积 A 和深度 δ 无关。所以这个能量源是以一种纯膨胀形态存在的, 如果使其处在各向同性的弹性介质中, 就会向四面八方均匀地辐射纵波, 但对于极接近表面的区域, 由于波模转换的作用也可产生横波, 在某些特定条件下, 初始纯应力与表面近似正交, 这时也有横波存在。纵波和横波的辐射幅度可用下式表示:

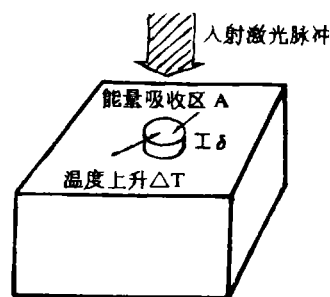


图1 金属表面吸收激光

能量引起温度快速上升

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 - k^2 \cos^2 2\theta_2}{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 + k^2 \cos^2 2\theta_2} \quad (10)$$

式中: $k = \frac{C_1}{C_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$, A_1 为纵波幅度, A_2 为横波幅度, θ_1 为纵波入射角, θ_2 为横波入射角, C_1 为纵波波速, C_2 为横波波速。

由此可见, 产生于热膨胀的弹性超声源可以认为是一组平行于表面的双极向应力, 即纵向和横向振动, 见图 2。当这两种振动的合振动沿介质表面传播时就形成了表面波, 这种波不同于压电换能器件产生的基本是垂直于表面的应力波。

应当注意, 光脉冲的功率密度应加以控制, 式(7)表明, 表面温度的增加与入射能量密度成线性关系, 当入射能量大到使金属表面的温度上升到其熔点时, 金属表面就发生消融, 这会对被测材料表面造成损伤。光功率密度的大小视被测材料的吸收系数和激光束波长而定。对于普通金属材料, 单脉冲能量一般为数十毫焦耳。

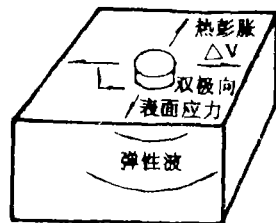


图2 温度上升引起热膨胀 ΔV

2 超声振动的光学检测

在通常的超声检测技术中, 是以压电换能器件作为敏感元件实现对回声脉冲的探测, 这就要求被测材料与换能器件之间必须声学耦合, 这样必然存在耦合剂的易变性和耦合的可靠性问题, 同时也使对材料的快速自动检测带来一定困难。随着电子、光测技术的发展, 超声波的光学检测与微机处理越来越显示出其独特的优越性, 典型的检测系统是直接探测材料表面位移的迈克耳逊干涉仪⁽²⁾, 如图3所示, 当激光束经 M_0 分光后, 反射光束由 M_1 反射并穿过 M_0 到光电探测器 W , 称此为参考光束, 透射光由被测材料调制后再经 M_0 反射到达 W , 此光束为测量光束, 如果被测材料由于激光超声振动的作用使其表面产生垂直于表面的位移, 该位移使测量光束产生附加相称, 由此引起光电探测器中光电流强度的变化, 产生与声波频率相同的电信号, 实现对超声波的光电检测。

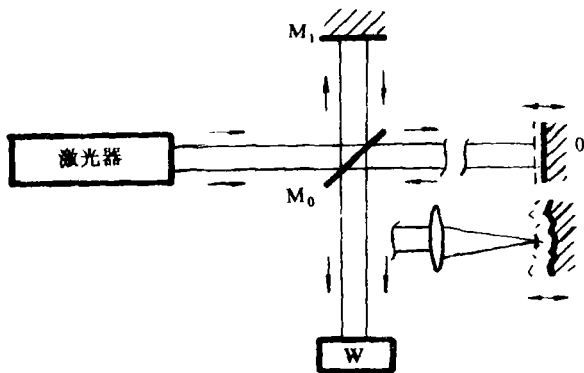


图3 迈克耳逊干涉仪光路图

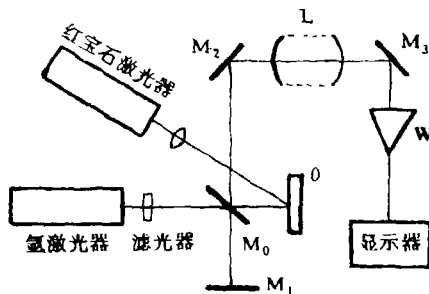


图4 典型的激光超声检测系统示意图

3 激光超声检测技术的应用

激光超声的最重要的应用是无损检测,其中包括材质及材料特性的评价、应力应变分析、在役设备的无损探伤等。典型的激光超声检测系统如图4所示,超声振动由功率密度大约为 $500\text{mw}/\text{cm}^2$ 的红宝石脉冲激光产生,测量激光器、分光镜 M_0 、试件O和反射镜 M_1 、 M_2 组成迈克耳逊干涉仪,参

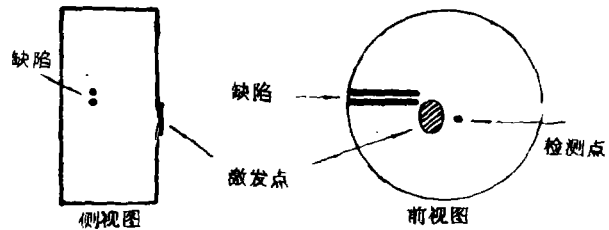


图5 试件缺陷示意图

考光束和测量光束经成像组件L及光电探测器W后送入显示器。试件是一块有人为缺陷的圆钢板,在其侧面钻有两个相互平行的直径为2mm,孔距为1mm,孔深为16.5mm的小孔,如图5所示。用500MHz示波器观察激光超声的初始波和反射波,其结果不仅能检测出缺陷的存在,也能分辨出孔的数量,如图6所示。用这套检测系统还成功地探查出了直径为105mm,弹壳体内2mm深,10mm长的纵向缺陷^[3]。

为了对激光超声进行远距离探测并且有较高的分辨率和灵敏度,有人使用共焦法布里—珀罗干涉仪^[4],并且对干涉仪的腔体进行动态调节。光信号通过远距离摄像机接收,使系统有较大的集光能力,提高了系统的灵敏度和稳定性,用此装置成功地检测出了1.5m

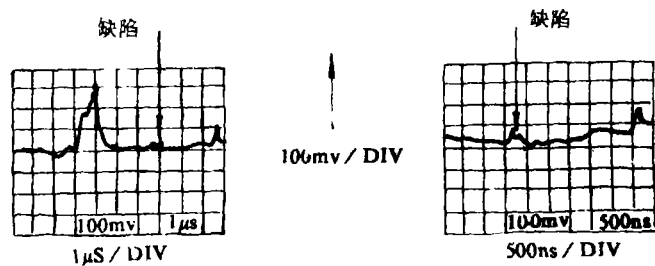


图6 激光超声检测系统测得的缺陷波形

以远的12.5mm厚钢板的超声反射回波。最近的检测距离可达10m。

在压电换能器的超声检测技术中,测量薄件的能力比较差,但是激光超声脉冲窄这一优异特性,可以大大提高测薄件的能力。用一台激光脉冲持续时间为微微秒的锁模激光器激发出脉冲宽度为2ns,上升时间小于1ns的超声波,用此进行薄件的缺陷探测几乎不存在近场盲区,探测出了剃刀锋口内的缺陷,这是压电换能器件无法比拟的。日本用激光超声技术以过去10倍以上的精度检测出陶瓷材料表面深100微米左右的,大小约50微米的缺陷,这将有助于陶瓷发动机的开发及性能的提高^[5]。在激光打孔的生产过程中,随着打孔加工的进行,产生的超声波频率及其振幅随之变化,利用这种相互关系可以解决激光打孔中的过程控制问题^[6]。材料的声速是一项极为重要的参数,它与材料的特性,材料中的应力应变,温度等有关,因此,用激光超声技术可以进行材料特性的研究,应力分析和温度测定等^[7]。

4 结束语

综上所述可以看出, 激光超声检测技术具有很多优异的特性, 它是一种新开拓的检测方法, 可为工业检测部门提供一种真正的远距离诊断技术, 并且在恶劣的工业生产环境中具有潜在的应用价值, 其发展和应用前景是相当乐观的。但是, 由于该技术中需在大功率激光器和精密光学仪器, 因此成本高, 体积大, 在检测结果的解释方面尚未得到完满的理论证明, 检测系统的灵敏度、整个激光超声系统的稳定性、可靠性还有待于进一步完善和提高。尽管如此, 随着电子和激光技术的发展, 深信激光超声检测技术会进一步完善和提高, 并得到广泛的应用。

参 考 文 献

- (1) C.B.Scruby, et al. Research Techniques in Nondestructive Testing. 1982, P281
- (2) W.Kaule. Eighth World Conference on Nondestructive Testing. 1976, 3J,
- (3) R.L.Wellman. Tech Notes, Testing & Instrumentation, July 1983
- (4) J.P.Monchalin. 11th World Conference on Nondestructive Testing Proceedings. 1979, P1017-1024
- (5) 国外激光. 1987, No.9, P41
- (6) 国外激光. 1988, No.10, P43
- (7) 电子技术. 1986, No.1, P5

Laser-Generated Ultrasound: A New Detection Technique

Zhao Caifu

(ZhengZhou Institute of Technology)

Abstract: In this paper, porntly expound the principle and application of laser-generated ultrasound technique.

Keywords: laser, ultrasound, detection technique