

文章编号:1001-5078(2013)09-1007-04

· 激光应用技术 ·

## 激光参数对激光激发超声信号的影响分析

宋燕星<sup>1,2</sup>, 冯其波<sup>1</sup>, 王晶<sup>1</sup>, 陈士谦<sup>1</sup>

(1. 发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京交通大学, 北京 100044; 2. 防灾科技学院防灾仪器系, 河北 三河 065201)

**摘要:**研究了激光参数对激光激发超声信号的影响。研究中首先理论分析激光激发超声过程中, 激光参数对激发超声信号的影响。同时, 设计并搭建一种激光激发超声的实验装置, 实验验证理论分析结果。该实验装置应用脉冲激光配合光衰减结构对被测目标激发产生超声波, 通过超声探头实现激光超声信号的探测。实验中以铝板为检测对象, 对激光脉冲能量和照射光斑大小对激发超声信号的影响进行实验分析。通过理论分析及实验验证, 可得出照射光斑直径与激光能量会直接影响入射激光功率密度, 从而影响激发超声的幅度。

**关键词:**激光超声; 脉冲激光; 热弹机制; 热蚀机制

**中图分类号:** TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2013.09.09

## Analysis of the influence of laser parameters on laser ultrasonic signals

SONG Yan-xing<sup>1,2</sup>, FENG Qi-bo<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>1</sup>, CHEN Shi-qian<sup>1</sup>

(1. Key Lab Luminescence & Opt Informat, Minist Educ, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;

2. Department of Disaster Prevention Instrument, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China)

**Abstract:** The influence of laser parameters on laser ultrasonic signals is studied. Firstly, the physical mechanisms of ultrasonic generation by laser pulse and the influence of laser parameters on the ultrasonic signal are analyzed theoretically. And an experimental apparatus is designed and built to verify the theoretical analysis results. In the experiment the ultrasonic is generated with pulse laser and optical attenuation unit, and then the detection of laser ultrasonic signals is achieved by a piezoelectric ultrasonic transducer. In the experiment, the influence of the pulse laser energy and laser spot diameter on ultrasonic signal is studied with an aluminum plate. Through theoretical analysis and experimental verification, the laser power density can be affected by the laser spot diameter and laser energy, which will affect the generated ultrasonic amplitude.

**Key words:** laser ultrasonic; pulse laser; thermo elasticity; ablation regime

### 1 引言

激光超声技术<sup>[1-2]</sup>是利用激光来激发超声, 与传统的压电换能器技术相比, 激光超声技术具有非接触、宽带、激发源高保真及点源、点接收等优点。该技术可用于材料表征, 缺陷检测, 加工过程监测, 以及复杂形貌的工件或高温高压等<sup>[3-4]</sup>。而要实现该技术的工程应用, 首先需针对应用对象的特点, 研究分析各因素(包括检测方法、激光输入参数、信号探测方法等)对获得激光超声信号

的影响<sup>[5-7]</sup>, 从而为提高检测精度提供基础。本文以金属为研究对象, 重点针对激光参数对激光激发超声信号的影响, 理论分析照射光斑大小、脉冲能量等因素对激发超声信号的影响, 并搭建一

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 51027006); 中国地震局教师基金(No. 20120107); 中央高校基本科研业务费专项资金(创新项目团队资助计划)(No. ZY20110104)资助。

**作者简介:**宋燕星(1980-), 女, 博士后, 讲师, 主要从事光电检测方面的研究。E-mail: yanxing7090091@163.com

**收稿日期:** 2013-01-28

种应用脉冲激光激发超声的实验平台,实验验证理论分析结果。

## 2 理论分析

### 2.1 基本理论模型

当激光束垂直入射到光吸收系数为  $b$ , 半无限大 ( $z \geq 0$ ) 各向同性的固体表面时, 固体因吸收光能而在其中形成相应的热源。其热源的功率密度为:

$$Q = I_0 e^{-bz} g(r) f(t) \quad z \geq 0 \quad (1)$$

式中,  $f(t)$  表示激光强度的时间分布;  $I_0$  是样品表面 ( $z = 0$ ) 激光入射中心的强度; 函数  $g(r)$  是激光强度在光束截面中的空间分布。这时固体中该源所激发的温度场由热传导方程描述:

$$K \nabla^2 T - \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} = -Q \quad (2)$$

式中,  $T$  是温度增量;  $K$  是固体的热传导系数;  $Q$  是密度;  $C_v$  是等容比热温度的变化使固体膨胀产生超声场, 由于存在轴对称性, 用柱坐标来描述超声位移场  $U$ , 其标势  $\Phi$  和矢势  $\Psi$  (只有一个  $e_\theta$  方向上的分量) 的方程为:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} - \frac{1}{c_l^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = \beta T \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} - \frac{\Psi}{r^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0 \quad (4)$$

$$U = \nabla \Phi + \nabla \times \Psi \quad (5)$$

其中,  $\beta = \alpha(3\lambda + 2\mu)/(\lambda + 2\mu)$ ,  $\lambda, \mu$  为拉梅常数;  $c_l$  是纵波波速;  $c_s$  是横波波速。

由于边界上的热损失远小于激光源产生的热量, 忽略边界上的热流, 其边界条件为:

当  $z = 0$  时,

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

$$\sigma_{zz} = \lambda \nabla \cdot U + 2\mu \frac{\partial U_z}{\partial z} - \beta(\lambda + 2\mu) = 0 \quad (7)$$

$$\sigma_{rz} = \frac{E}{2(1+\mu)} \left( \frac{\partial U_r}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial r} \right) = 0 \quad (8)$$

式中,  $\sigma_{zz}, \sigma_{rz}$  分别为边界上应力张量的  $z$  方向和  $r$  方向上的分量;  $E$  为材料的杨氏模量;  $U_r, U_z$  分别为超声场位移矢量在  $r$  方向和  $z$  方向上的分量。

(2) 推导过程

假设激光强度在时间上作简谐变化

$$f(t) = e^{i\omega t} \quad (9)$$

其温度和位移势的稳态解为:

$$T(r, z, t) = \theta(r, z) e^{i\omega t} \quad (10)$$

$$\Phi(r, z, t) = \varphi(r, z) e^{i\omega t} \quad (11)$$

$$\Psi(r, z, t) = \psi(r, z) e^{i\omega t} \quad (12)$$

将公式(9) ~ (12) 与公式(1) ~ (8) 相结合, 并将柱坐标  $(r, z)$  换成极坐标  $(R, \theta)$  ( $\theta$  是偏离  $z$  轴的角度), 求出远场情况下的径向位移分量  $U_R(R, \theta)$  和切向位移分量  $U_\theta(R, \theta)$ , 通过推导计算(参考文献[2]), 得出计算结果为:

$$U_R(R, \theta, t) \sim (u_{Rc} + u_{Rp}) e^{i\omega t} \quad (13)$$

$$U_\theta(R, \theta, t) \sim (u_{\theta c} + u_{\theta p}) e^{i\omega t} \quad (14)$$

$$u_{Rc} = \frac{\beta I_0 a^2 b \left( \frac{\kappa}{\omega} \right)}{\rho C_v \left( \frac{\kappa}{\omega} b^2 - i \right) c_l} \frac{e^{-ik_l R}}{R} \Theta_{Rc}(\theta) \quad (15)$$

$$u_{Rp} = \frac{\beta I_0 a^2}{\rho C_v \left( 1 - \frac{\kappa}{i\omega} b^2 \right) bc_l} \frac{e^{-ik_l R}}{R} \Theta_{Rp}(\theta) \quad (16)$$

$$u_{\theta c} = \frac{\beta I_0 a^2 b \left( \frac{\kappa}{\omega} \right)}{\rho C_v \left( \frac{\kappa}{\omega} b^2 - i \right) c_s} \frac{e^{-ik_s R}}{R} \Theta_{\theta c}(\theta) \quad (17)$$

$$u_{\theta p} = \frac{\beta I_0 a^2 b \left( \frac{\kappa}{\omega} \right)}{\rho C_v \left( 1 - \frac{\kappa}{i\omega} b^2 \right) bc_s} \frac{e^{-ik_s R}}{R} \Theta_{\theta p}(\theta) \quad (18)$$

式中,  $\kappa = K/\rho C_v$  为热扩散系数。

其中:

$$\Theta_{Rc}(\theta) = \frac{J_1(k_l a \sin \theta)}{k_l a \sin \theta} \frac{1}{1 - ik_l^2 \left( \frac{\kappa}{\omega} \right) \cos^2 \theta} \left[ M_1(\theta) + \frac{(1+i)}{\sqrt{2}} k_l \left( \frac{\kappa}{\omega} \right)^{1/2} \cos \theta N_1(\theta) \right] \quad (19)$$

$$\Theta_{Rp}(\theta) = \frac{J_1(k_l a \sin \theta)}{k_l a \sin \theta} \frac{1}{1 + \left( \frac{k_l}{b} \right)^2 \cos^2 \theta} \left[ M_1(\theta) + i \frac{k_l}{b} \cos \theta N_1(\theta) \right] \quad (20)$$

$$M_1(\theta) = \frac{4 \cos \theta \sin^2 \theta (\gamma^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}}{(\gamma^2 - 2 \sin^2 \theta)^2 + 4 \sin^2 \theta \cos \theta (\gamma^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} \quad (21)$$

$$N_1(\theta) = \frac{(\gamma^2 - 2 \sin^2 \theta)^2}{(\gamma^2 - 2 \sin^2 \theta)^2 + 4 \sin^2 \theta \cos \theta (\gamma^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} \quad (22)$$

$$\Theta_{\theta c}(\theta) = \frac{J_1(k_s a \sin \theta)}{k_s a \sin \theta} \frac{1}{1 + \frac{1+i}{\sqrt{2}} k_s \left( \frac{\kappa}{\omega} \right)^{1/2} (\gamma^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} M_2(\theta) \quad (23)$$

$$\Theta_{\theta p}(\theta) = \frac{J_1(k_s a \sin\theta)}{k_s a \sin\theta} \frac{1}{1 + i \frac{k_s}{b} (\gamma^2 - \sin^2\theta)^{1/2}} M_2(\theta) \tag{24}$$

$$M_2(\theta) = \frac{2 \sin\theta \cos\theta (1 - 2 \sin^2\theta)}{(1 - 2 \sin^2\theta)^2 + 4 \sin^2\theta \cos\theta (\gamma^2 - \sin^2\theta)^{1/2}} \tag{25}$$

$$\gamma = \frac{k_s}{k_l} = \left[ \frac{2(1 - \sigma)}{1 - 2\sigma} \right]^{1/2} \tag{26}$$

式中,  $\sigma$  是材料的泊松比;  $a$  为入射激光的光束截面半径;  $k_l/b, k_s/b$  为相对光穿透深度;  $k_l a, k_s a$  为光吸收系数;  $\Theta_{Rp}, \Theta_{\theta p}, \Theta_{Rc}, \Theta_{\theta c}$  分别为  $u_{Rp}, u_{\theta p}, u_{Rc}, u_{\theta c}$  的方向因子。

激光热弹超声场的分布应该由激光束性质、材料的物理性质及场点的位置决定, (13) ~ (26) 式给出了它们的复杂关系。超声位移分量  $U_R(R, \theta)$  和  $U_{\theta}(R, \theta)$  的大小分别由两部分确定, 在金属中, 由于明显的热扩散和高于  $10^7$  的光吸收系数,  $u_{Rp}$  与  $u_{Rc}$  相比很小, 可以略去,  $u_{\theta p}$  与  $u_{\theta c}$  相比也很小可以略去, 所以  $u_{Rc}, u_{\theta c}$  代表了金属超声场的主要方面。

### 2.2 理论分析

#### (1) 脉冲能量对超声振幅的影响

激光的脉冲能量对超声的激发有着重要的影响。由于入射激光能量正比于  $I_0 a^2$ , 从式(13)至式(18)可以看出, 在功率密度低于固体表面损伤阈值时, 超声激发机制主要由热弹性机制主导, 此时在脉宽确定情况下, 超声信号振幅的大小正比于入射激光能量, 因此, 在热弹性机制下提高入射激光的能量可以增强超声信号的强度, 从而有利于提高检测灵敏度。

当功率密度高于固体表面损伤阈值时, 会出现表面塑性形变、熔化、汽化以及产生等离子体等种现象, 此时超声的激发主要由烧蚀机制主导。在烧蚀机制下, 超声信号的强度(主是纵波信号强度)会大大增加, 但同时也会改变超声场的特性。

#### (2) 照射光斑大小

激光器本身的输出光束直径对于激发超声并不重要, 因为光束直径可以通过光学方法轻易地实现扩束或缩束。但是, 照射到固体表面的光斑直径却对激发超声有重要影响。在入射激光能量和脉宽一定情况下, 照射光斑直径直接决定了照射到固体表面的光功率密度, 即  $P = \frac{I}{nS} = \frac{4I}{n\pi d^2}$  (其中,  $P$  表示脉冲激光功率密度;  $I$  表示激光脉冲能量;  $d$  表示照射

光斑直径;  $n$  表示脉宽), 该参数会影响超声的激发机制。在保持脉冲能量不变的情况下, 照射光斑直径越小则照射到固体表面功率密度增大, 此时会增强超声信号的强度。

### 3 实验装置

为验证理论分析结果, 本文搭建一种应用脉冲激光激发超声的实验平台, 其结构图如图 1 所示。

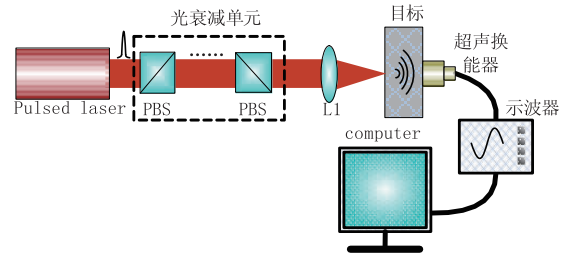


图1 脉冲激光激发超声实验装置结构图

如图 1 所示, 该方案中主要包括: 超声激发单元、能量衰减单元、激光超声接收单元、显示存储单元及数据处理单元。其中, 超声激发单元中, 应用 Nd : YAG 脉冲激光器作为激励源, 该激光器脉冲能量为 450 mJ, 脉宽 5 ns, 波长 1064 nm。当脉冲激光照射到检测目标时, 目标表面会由于热弹效应产生超声。能量衰减单元由多片 1/2 分光镜和透镜组成, 通过调整分光镜的数量来确定入射激光能量, 通过调整透镜 L1 的位置来调整入射被测目标表面光斑大小。激光超声接收单元由超声探头构成。显示存储单元中通过示波器完成超声信号的显示、存储, 而计算机完成数据后续处理。

### 4 实验结果

方案中通过能量衰减单元和聚焦透镜调整入射激光能量, 从而实验分析入射激光能量对激发超声信号的影响, 实验对象为 5.4 mm 铝板, 实验结果如图 2 所示。

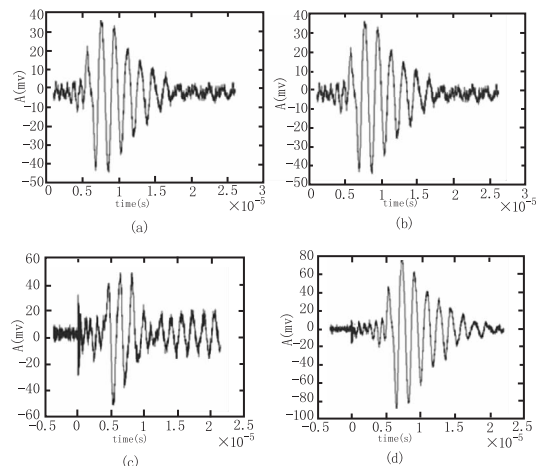


图2 实验结果图

表1表示图2中各结果图对应的实验条件信息及其对试件表面损伤结果。

表1 不同实验条件及其对应功率密度

	能量衰减 次数	照射光斑直径 /mm	激光功率密度 /(MW·cm <sup>-2</sup> )
(a)	4次分光	6	23.00
(b)	4次分光	5	33.12
(c)	4次分光	4	51.75
(d)	4次分光	3	92.00

结合表1给出的实验条件和图2中获得超声信号的实验结果图可以得出:被测对象表面的照射光斑直径越小,则入射激光功率密度越大,获得的超声信号幅值越大,这一实验结果符合之前理论分析结果。

## 5 结论

本文理论分析激光激发超声过程中,激光参数对激发超声信号的影响,并搭建脉冲激光激发超声的实验装置,对理论分析进行实验验证。通过理论分析及实验验证可得出照射光斑直径与激光能量会直接影响入射激光功率密度,从而影响激发超声的幅度。因此,在工业测量中,可根据检测要求调整入射光斑直径及功率密度的大小,以提高超声信号的强度和检测灵敏度。

## 参考文献:

- [1] Kong Lingjian, Xu Jun, Yan Yisheng, et al. The new research on ultrasonic wave generated by laser pulse[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(1): 20-23. (in Chinese)  
孔令剑,徐军,闫夷升,等.激光激发超声波的新方法研究[J].光子学报,2006,35(1):20-23.
- [2] Xu baiqiang, Ni xiaowu, Shen zhonghua, et al. Numerical simulation of laser-generated ultrasonic by finite element method in the plate material[J]. Chinese Journal of Lasers, 31(5): 621-625. (in Chinese)  
许伯强,倪晓武,沈中华,等.激光激发板状材料中超声导波的有限元数值模拟[J].中国激光,2004,31(5):621-625.
- [3] Kong lingjian, Zhu guifang, Jiang congqun. New detection application of laser ultrasonic[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(1): 57-62. (in Chinese)  
孔令剑,朱桂芳,姜从群.激光超声光学检测应用[J].激光与光电子进展,2010,47(1):57-62.
- [4] Geng senlin, Shang zhiyuan. Characteristics of ultrasound pulse thermoelastically generated by a laser pulse[J]. Journal of Shaanxi Normal University, 2003, 31(1): 43-47. (in Chinese)  
耿森林,尚志远.单脉冲激光热弹超声脉冲特性理论研究[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2003,31(1):43-47.
- [5] Shi Dufang, Wu Yaping, He Yulong. Characteristics of laser generated ultrasound in solids[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 1997, 18(12): 283-288. (in Chinese)  
是度芳,吴亚平,贺渝龙.固体中激光热弹超声的特性[J].固体力学学报,1997,18(12):283-288.
- [6] C B Scruby, L E Drain. Laser ultrasonics: techniques and applications[M]. Bristol: Adam Hilger, 1990.
- [7] Ma Yun. Laser ultrasonic technology and its application in the high-pressure sound velocity measurements[D]. Mi-an yang: Chinese academy of engineering physics, 2010, 4: 12-26. (in Chinese)  
马云.激光超声技术及其在高压声速测量中的应用[D].绵阳:中国工程物理研究院,2010,4:12-26.