

激光激发超声波的新方法研究*

孔令剑¹ 徐 军^{1,2} 闫夷升¹ 谷小飞¹ 朱桂芳¹ 侯 洵²

(1 第二炮兵工程学院, 实验中心, 西安 710025)

(2 西安交通大学, 西安 710049)

摘 要 介绍了激光激发超声波的原理, 分别给出了热弹机制和烧蚀机制下的纵波和剪切波理论波形; 基于排列因子作用, 提出了一种新型激光激发超声波的方法——激光定相位排列激发超声波, 激光源经过定相位排列后, 在某一方向上产生的超声波幅度比传统单一源产生的超声波幅度要强很多, 采用此种方法, 可实现对超声信号方向和强度的有效激发控制, 对下一步的超声无损检测有非常重要的意义; 结合实际给出了该方法的实现方式.

关键词 超声学; 激光超声; 定相位排列; 热弹机制; 烧蚀机制

中图分类号 O426.1 **文献标识码** A

0 引言

激光超声学是利用激光来激发和检测超声、并开展超声传播和媒质特性等研究的新兴交叉学科^[1]. 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, 因此, 它更有利于材料的无损评估和其它学科的应用, 像材料表征, 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恶劣环境下设备的监测等. 激光超声具有很多优异特性, 其发展和应用前景是相当乐观的, 但怎样更有效地提高激发的超声信号强度, 是一个亟待解决的问题. 于是, 近年来各种提高检测信噪比的技术, 如表面修饰^[2]、激光源的时间或空间调制技术等得到了发展. 本文将提出一种新的激光激发超声波的方法, 可实现良好的激发效果.

1 激光激发超声波原理

当脉冲激光束照射到某一物质(固体、液体或气体)表面, 一部分能量被物质吸收, 另一部分被反射. 一般认为, 固体中激光激发超声波的机理, 随入射激光的功率密度和固体表面条件不同而改变, 分为热弹和烧蚀两种机制.

热弹机制时, 照射到试样表面的激光能量不足以使表面熔化, 试样内超声波脉冲主要是由于试样吸收光能发生热弹性膨胀而产生的. 照射到不透明试样表面的脉冲激光, 其能量部分被浅表层吸收, 部分被反射. 吸收光能的浅表部分, 由于温度上升而发生膨胀以至发生形变. 由于入射光波是脉冲的, 浅表部分的形变也是周期性的, 周期形变在周围介质中激发了超声波. 在此种情况下, Rose 在 1983

年提出纵波和剪切波幅值与角度分布的关系为

$$u_L \propto \frac{\sin \theta \sin 2\theta \sqrt{k^2 - \sin^2 \theta}}{(k^2 - 2\sin^2 \theta)^2 + 2\sin \theta \sin 2\theta \sqrt{k^2 - \sin^2 \theta}} \quad (1)$$

$$u_S \propto \frac{\sin 2\theta(1 - 2\sin^2 \theta)}{(1 - 2\sin^2 \theta)^2 + 2\sin \theta \sin 2\theta \sqrt{k^2 - \sin^2 \theta}} \quad (2)$$

这里, u_L 表示纵波大小, u_S 表示剪切波大小, θ 是与内表面法线间的夹角, k 是纵波与剪切波的波速比值: $k = c_L/c_S$. 热弹机制下的理论波方向如图 1.

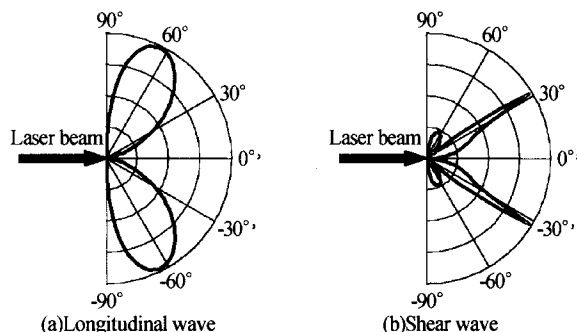


图 1 热弹机制下的理论波方向

Fig. 1 Theoretical directivity pattern in thermoelastic regime

烧蚀机制时, 激光能量足以使照射材料的表面熔化, 材料汽化产生一冲量作用于表面, 产生一个法向作用力, 激发出了幅值较大的超声波. 此时, 虽然激发超声波的幅度较强, 但由于其每次约对表面产生 0.3 mm 的损伤, 所以只能用于某些场合, 而且通常用来产生超声纵波. 在此种情况下, Miller 和 Pursey 在 1954 年提出纵波和剪切波幅值与角度分布的关系为

$$u_L \propto \frac{2k^2 \cos \theta (k^2 - 2\sin^2 \theta)}{(k^2 - 2\sin^2 \theta)^2 + 4\sin^2 \theta \sqrt{1 - \sin^2 \theta} \sqrt{k^2 - \sin^2 \theta}} \quad (3)$$

$$u_S \propto \frac{\sin 2\theta \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}}{k(1 - 2\sin^2 \theta)^2 + 4\sin^2 \theta \sqrt{1 - \sin^2 \theta} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}} \quad (4)$$

烧蚀机制下的理论波方向如图 2.

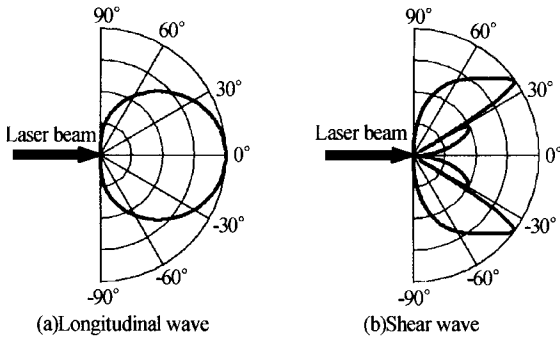


图 2 烧蚀机制下的理论波方向
Fig. 2 Theoretical directivity pattern in ablation

单个激光脉冲能激发出宽带的激光超声脉冲, 它的弱点则是易受到宽带噪音的干扰. 因此, 近年来又开展了激光超声源在时间或空间分布调制技术的研究, 使激发的超声信号成为窄带或线性调频信号, 以便采用窄带滤波技术或信号处理技术来提高检测的信噪比^[3]. 入射激光的定相位排列用以产生超声波, 可实现在超声场内某一特定方向上对超声波的大幅度增强. 以下, 本文将对激光的定相位排列产生超声波进行理论和实现研究.

2 激光的定相位排列激发超声波理论研究

激光的定相位排列是指一些有时间相位延迟的脉冲激光源按某一方式排列照到物质表面, 可产生某一方向加强的超声波方式. 由图 3. 通过适当调

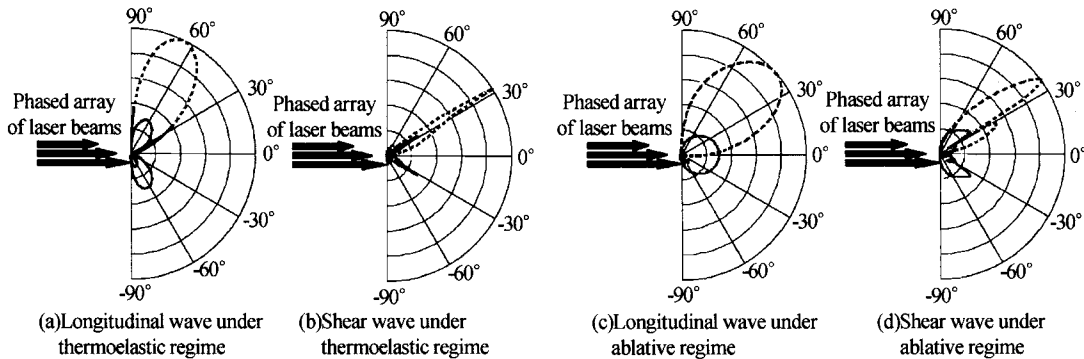


图 4 定相排列激发(蓝色虚线)与单一脉冲源激发(黑色实线)超声波的强度比较
Fig. 4 Comparison of ultrasound intensity generated by phased array (dotted blue line) and single source (solid black line)

由图 4 可看出激光源经过定相位排列后, 相同的激光脉冲强度下, 在某一方向上产生的超声波幅度比单一源产生的超声波幅度要强很多, 另外, 通过选取不同的排列因素可以得到感兴趣的强度方向, 以用于超声波信号检测. 采用此种方法可有效地加强脉冲激光对超声波的激发, 相比传统的激发方法有大幅度的信号加强, 本方法将有很好的应用前景.

该方法存在的主要问题是: 实际应用中, 由于材

节脉冲源的时间和空间分布, 得到超声场内的某一方向超声干涉加强.

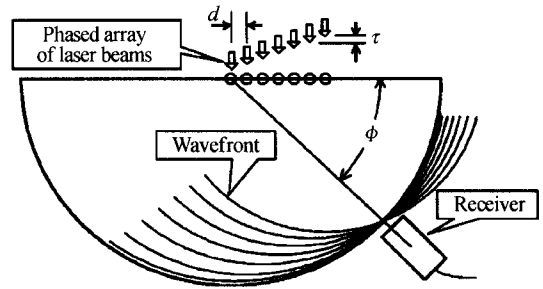


图 3 激光的定相位排列产生超声波
Fig. 3 Ultrasound generated by phased array of laser beams

因此, 定相位产生的超声波方向模式 $u(\theta, \phi)$ 由单一源产生的超声波方向模式 $u_c(\theta)$ 和排列因素 $I_a(\theta, \phi)$ 共同决定. 表达式为

$$u(\theta, \phi) = u_c(\theta) \cdot I_a(\theta, \phi) \tag{5}$$

式中, $I_a(\theta, \phi) = \left(\frac{\sin Nq}{N \sin q}\right)^2$, $q = \frac{\pi d}{\lambda}(\sin \theta - \sin \phi)$,

$\sin \phi = \frac{c\tau}{d}$, $u(\theta, \phi)$ 表示在固定间隔下超声波模式的强度分布, λ 为超声波波长, ϕ 为选择的超声波加强方向与表面方向的夹角, d 为相邻脉冲源中心间距, τ 为相邻脉冲源间的时间延迟, c 为超声波速.

需要注意, 由于纵波和剪切波在同一种媒质中有不同的传播速度, 所以, 它们的排列因素是不同的. 通过模拟计算可得到定相排列激发与传统单一源激发产生超声波的强度如图 4.

料表面的不平整性, 使得排列激光源到达表面的时间和角度与理论上有一定的差异, 超声波的定向加强与理论相比也产生了一定的偏差, 粗糙度很大的时候, 甚至会出现超声信号一片混杂. 出现这种情况时解决的办法是: 采用表面修饰技术^[4], 对材料进行抛光或在材料表面加一涂层, 比如蒸一层膜, 或涂一层特殊液体, 就可以使得表面粗糙度降低, 而不影响超声信号的定向加强.

3 激光的定相位排列激发超声波光纤实现研究

通常,激光定相位排列可通过长度不同的光纤排列传输激光来实现,也可通过移动激光源来实现,以下本文将通过光纤法实现激光定相位排列激发超声波。

把 $k \times m$ (k, m 为正整数) 根光纤做成光纤束,其中有 k 种长度的光纤,分别为 $l, l + \Delta l, l + 2\Delta l$, 每一种有 m 根。与激光器耦合的输入端用光纤卡盘固定在一圆内,使得光纤能够自由受力而又不松散;输出端光纤也由光纤卡盘固定,并按种类直线排列为 k 排(激光光源比点光源有更好的超声激发^[5])。由光纤出射的脉冲激光是发散的,其照射面积是光纤出口与样品表面距离的函数,为了得到好的照射强度,在光纤出口处放置一聚焦透镜。如图 5。

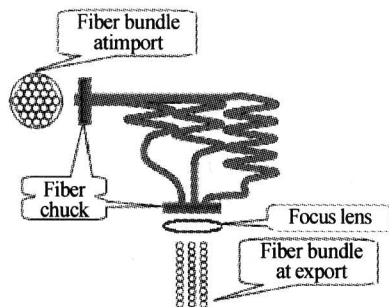


图 5 光纤束定相位排列示意图($k=3, m=10$)

Fig. 5 Phased array of fiber bundle($k=3, m=10$)

相邻两光纤源间,由于长度的不同,将产生出射激光脉冲的时间延迟,其延迟量由方程(6)决定。

$$\tau = \frac{\Delta l}{c/n} \quad (6)$$

式中, τ 为相邻源的时间延迟, Δl 为长度差, c 为光在真空中的传播速度 (3.0×10^8 m/s), n 为光纤芯的折射率。

要在物质中产生超声波,脉冲激光能量必须满足一定的要求,特别是在烧蚀机理下,激光能量高达 10^7 W/m²,在实际应用中必须考虑高能激光耦合进入光纤和在其中传播的可行性,这方面国外已有报道^[6]。对于耦合问题,文献[7~10]有比较详细的介绍说明。考虑到光纤纤芯比包层和护套层有更好的破坏极限,相比其端面更不容易损伤,所以在耦合端剥掉包层和护套层可获得高的耦合激光强度。

4 结论

通过对激光激发超声波原理进行分析,讨论了激光的定相位排列激发超声波理论,由模拟计算可以看出,采用激光定相位排列来激发超声波比传统的激发方法获得了更好的激发效果,同时,通过选取不同的排列因素可以得到感兴趣的强度方向,以用于超声波信号检测,并指出了该方法的光纤实现。相比传统的激光激发超声波方法,本方法能很好的解决激光能量到超声能量的转换问题,并实现对超声信号的方向控制和有效地幅度增强,对于下一步的超声无损检测应用有非常重要的意义,这将有利于今后对激光超声的进一步应用研究。

参考文献

- 1 Scruby C B, Drain L E. Laser Ultrasonics; Techniques and Applications. Hilger Briston, U. K., 1990, 23~30
- 2 Woch S C, Zhou Q L. Behavior of laser-induced ultrasonic waves radiated from a wet surface, Part I: Theory, Part II: Experimental work. *Appl Phys*, 2001, **89**(6): 3469~3477, 3478~3485
- 3 Wagner J W, Spicer J B, Murray T, et al. Fundamental issues for optimization of laser sources for generation of ultrasound. *Acoust Soc Am*, 1996, **100**(4): 2622
- 4 Monchalain J P. Optical detection of ultrasound. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 1986, **33**(5): 486
- 5 Doyle P A. Near-field ultrasonic Rayleigh waves form a laser line source. *Ultrasonic*, 1996, **34**(1): 1~8
- 6 Allison S W, Gillies G T, Magnuson D W, et al. Pulsed laser damage to optical fibers. *Applied Optics*, 1985, **24**(19): 3140~3145
- 7 薛春荣, 祝生祥, 肖志刚. 锥形光纤间的耦合特性. *光子学报*, 2004, **33**(7): 803~805
Xue C R, Zhu S X, Xiao Z G. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 803~805
- 8 赵发英, 张全, 唐海青. 平端光纤与锥端球透镜光纤的耦合. *光子学报*, 2003, **32**(2): 5~8
Zhao F Y, Zhang Q, Tang H Q. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2): 5~8
- 9 刘敬伟, 陈少武, 余金中. BPM-FSRM 混合法分析 SOI 脊形波导与光纤耦合. *光子学报*, 2005, **34**(2): 222~225
Liu J W, Chen S W, Yu J Z. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 222~225
- 10 Xu Qingyang, Chen Shaowu. Theoretical study on the Butt-coupling of semiconductor laser and fiber Bragg grating. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 1~5

The New Research on Ultrasonic Wave Generated by Laser Pulse

Kong Lingjian¹, Xu Jun^{1,2}, Yan Yisheng¹, Gu Xiaofei¹, Zhu Guifang¹, Hou Xun²

¹ Experiment Center, The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025

² Xi'an Jiaotong Univ., Xi'an 710049

Received date: 2005-04-07

Abstract One of the major tasks for the ultrasound generated by laser is the discussion of the two regimes: thermoelastic regime and ablation regime, and each of the theoretical directivity patterns are mentioned. Based on the effect of array factor, a newly method of the laser ultrasonic generated by a phased array of laser beams was proposed. This means, a method to make the ultrasound field be steered and amplified in a particular direction, can be designed and implemented to enhance the signal propagation in the region of interest. It will be more significant to apply ultrasound generated by this method in nondestructive testing of materials and products. The corresponding system has been completed in practice.

Keywords Ultrasonics; Laser ultrasound; Phased array; Thermoelastic regime; Ablation regime



Kong Lingjian was born on July 14, 1979, in Shandong, P. R. China. He received the B. S. Degree in electronic engineering in 2003. Now he is pursuing M. S. Degree in the Second Artillery Engineering Institute. His major research interest is laser technologies fault diagnosis of electro-optical weapon equipment.