

流-固界面波的激光激发与光偏转检测*

赵 艳 沈中华 陆 建 倪晓武

(南京理工大学 理学院, 南京 210094)

摘 要 基于光偏转原理, 研制了可用于流-固界面波探测的光纤传感装置. 在此基础上, 建立了以调 Q Nd: YAG 激光为流-固界面波激发光源的实验系统. 实验上探测了激光在空气-铝、水-铝和酒精-铝等界面上激发的界面波波形. 根据实验波形, 算得在这三种界面上的泄漏 Rayleigh 波和 Scholte 波的速度分别为 2889 m/s 和 339 m/s、2916 m/s 和 1512 m/s、2872 m/s 和 1184 m/s, 此实验值与理论计算值相比, 偏差小于 5%.

关键词 界面波; 流-固界面; 光偏转法; 泄漏 Rayleigh 波; Scholte 波

中图分类号 O347.4+2 **文献标识码** A

0 引言

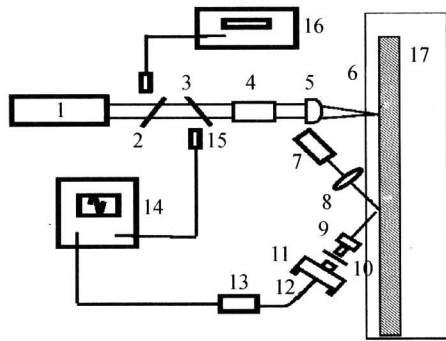
弹性波在介质中的传播及其与材料微缺陷的相互作用规律在超声无损检测及材料无损评价等领域有着非常重要价值. 对此问题认识的深入程度直接影响着超声无损检测和材料评估技术的发展, 尤其是激光超声的出现使得超声检测可实现非接触的无损探伤. 这使得研究者们非常重视激光激发的超声及其在材料微缺陷无损检测中的应用^[1~5]. 目前已开展的工作绝大多数集中于激光激发 Rayleigh 波及在材料表面缺陷中的应用^[6~9]. 事实上, Rayleigh 波是一种出现在固体与真空界面上的弹性表面波, 它只是表面波的一种特例, 在实际的工程问题中很少遇到. 与固体-真空界面相比, 一些更为普遍的情况是液-固界面和气-固界面. 在这种情况下产生的表面波已不再是简单的 Rayleigh 波, 而是另外两种波泄漏 Rayleigh 波和 Scholte 波, 这两种波统称为“流-固界面波”. 它们分别对应于流-固界面波特征方程的复根和实根. Scholte 波的速度略小于流体中的声速, 泄漏 Rayleigh 波与 Rayleigh 波相对应, 其速度的实部略大于固体半空间 Rayleigh 波的速度, 因此研究流-固界面的激光激发与光学非接触检测技术更具实用意义. 而至今为止, 只有极少数文献报道了激光激发流-固界面波的研究^[10~12], 尤其是气体-固体界面波的研究更少^[13]. 为此, 本文实验研究了脉冲激光激发流-固界面波及其光学检测方法. 基于光偏转原理, 建立了可用于流-固界面波探测的光纤传感装置, 成功探测到了水-铝板、酒精-铝板界面上的泄漏 Rayleigh 波和 Scholte 波波形. 同时将空气看成是一种特殊的流体, 测量了空气-铝板界面的界面波波形; 根据波形

推算出了三种情况下流-固界面波的速度, 实验值与理论计算值相比, 偏差小于 5%.

1 流-固界面波的激光激发与探测

在实验中, 流-固界面波由调 Q Nd: YAG 激光器输出的波长为 1.06 μm 、脉宽 10 ns 的脉冲激光在流体-固体界面上激发, 并由自制的基于光偏转原理的光纤传感装置探测流体与固体界面上的界面波, 其实验装置如图 1. 由脉冲激光器输出的脉冲激光, 先经过一个分束镜, 分出少量激光, 用能量计 (EPM1000 能量计主机+Jmax43 能量探头) 实时监视激光器的输出能量. 主光束再经过一个分束镜, 分出少量脉冲激光信号用作示波器的触发信号. 主光束再经过一个准直扩束系统, 然后经由一焦距为 100 mm 的柱面透镜将脉冲激光在置于流体 (如空气、水、酒精等) 中的铝板表面聚焦成线光源, 激发流-固界面波. 由脉冲线源激发的流-固界面波 (泄漏 Rayleigh 波和 Scholte 波) 沿流体-固体界面传播, 在距离激发点一定距离处用基于光偏转原理的光纤传感装置检测沿流体与固体界面传播的流-固界面波. 基于光偏转原理的光纤传感装置的基本原理为: 由输出功率为 0.5 mW 的 He-Ne 激光器发出波长为 632.8 nm 的连续激光, 经一焦距为 5 mm 的短焦透镜将探测光束聚焦到铝板表面形成探测光点, 光束经铝板表面反射后由一显微物镜 (焦距为 4 mm) 接收, 并由放置在五维光纤微调架 (其调节准确度 0.1 μm) 上的单模光纤在显微物镜之后接收铝板的反射光信号. 为了减小杂散光的干扰, 在单模光纤前加置了中心透射波长为 0.67 μm 的窄带滤波片. 单模光纤接收的反射光信号, 由光电倍增管 (Hamamatsu H5773) 将其转化为电信号, 并由 Tektronix (Tektronix THS730A 5GS/s, 500 MHz) 示波器进行采样记录.

*南京理工大学青年学者基金 (Njust200503) 资助
Tel: 025-84315560 Email: zhaoyan7906@sina.com
收稿日期: 2005-09-07



1.Q-switched Nd:YAG laser; 2,3.Beam splitter; 4.Extending and collimating lens; 5.Cylindrical lens; 6.Aluminum plate; 7.He-Ne laser; 8.Lens; 9.Microscope objective; 10.Narrow-band interference-filter; 11.Five-dimensional fiber-regulating-stand; 12.Single-mode optical fiber; 13.Photomultiplier; 14.Digital storage oscilloscope; 15.PIN; photoelectric diode; 16.Power-meter; 17.Water tank

图1 脉冲激光激发界面波及其检测装置
Fig. 1 Experimental setup of laser induce interface wave and its optical detection

当脉冲激光在铝板表面 A 点激发的界面波,沿界面传播到探测点 B 时,引起铝板 B 点发生微小形变,从而引起反射光束偏离原反射光束,进而影响进入探测光纤内的光强度. 通过示波器可以记录该光强变化,即记录下通过铝板 B 点的界面波波形. 下面对该探测原理作一简单的分析. 由 He-Ne 激光器发出的激光束直径约为 2 mm,经过焦距为 50 mm 的透镜聚焦到流-固界面上,经界面反射的探测光束经过显微物镜准直后的光束直径约为 0.16 mm,远大于单模光纤的直径(4 μm),出射光与光纤纤芯之间的位置如图 2(b). 假设界面形变的倾角为 θ,则显微物镜准直后的光束偏移的距离为 δ=2f₂·θ.

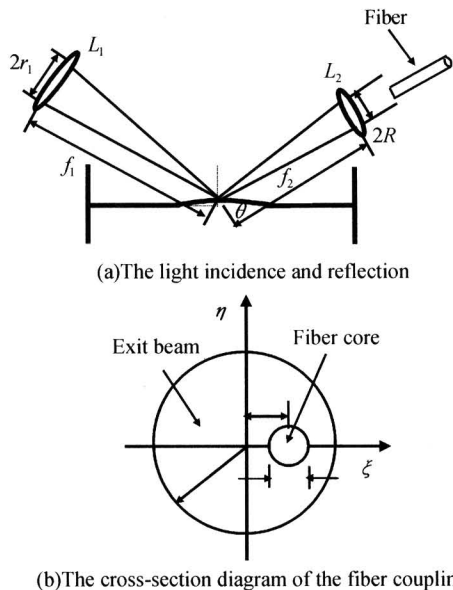


图2 基于光偏转原理的光纤传感装置原理
Fig. 2 Principle of fiber-coupled beam deflection method
假定经过显微物镜出射的光束仍然服从高斯分布^[14]

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{\xi^2 + \eta^2}{H^2}\right) \quad (1)$$

这里, I₀ 是光束中心的光强, H 为光束分布的 1/e 宽度,则在图 2(b)的情况下,耦合进光纤的光通量可由式(2)进行估算

$$\Phi = I_0 \iint_{\Omega} \exp\left(-\frac{\xi^2 + \eta^2}{H^2}\right) d\xi d\eta \quad (2)$$

式中, Ω 为出射光束与光纤纤芯的重叠区域.

由于光纤纤芯半径 r 远小于出射光束半径 R,因此光纤纤芯覆盖面积上的光强可以近似看成是均匀的. 在此近似条件下,将 δ=2f₂·θ 代入式(2)可得

$$\Phi = I_0 s_0 \exp\left[-\frac{(a + 2\theta f_2)^2}{H^2}\right] = \phi_0 \exp\left[-\frac{(a + 2\theta f_2)^2}{H^2}\right] \quad (3)$$

这里, s₀ 为光纤纤芯的面积, a 为 θ=0 时光纤纤芯中心到出射光束中心之间的初始距离. 由式(3)可知, Φ 和 θ 的关系曲线呈高斯型,如图 3. 如恰当选

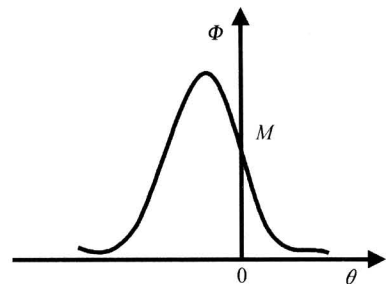


图3 耦合进光纤的光通量与偏转角 θ 之间的关系
Fig. 3 The coupling fluence Φ vs slope angle θ

取 a 值使出射光束没有偏转时耦合光通量为最大值 φ₀ 的一半(即静态工作点在 M 点附近),同时考虑到 θ 的变化非常小,因此传感器在 M 点附近工作时具有最佳的近似线性效果和最高的灵敏度. 基于上述考虑,可以对式(3)在 θ=0 点附近进行 Taylor 展开,并忽略非线性项的影响可得

$$\Phi = \frac{1}{2} \phi_0 - \frac{1.6652 f_2 \phi_0}{H} \theta \quad (4)$$

由式(4)可知:光通量 Φ 的变化线性地反映 θ 的变化,为此,可以只考虑光通量变化的交流成分

$$\Delta\Phi = -\frac{1.6652 f_2 \phi_0}{H} \theta \quad (5)$$

这里, ΔΦ 为由 θ 角度变化引起的耦合光通量变化,它与光电倍增管输出的电流变化呈线性关系,因此本研究采用的光纤传感装置可以近似的线性复现界面波在经过探测点时引起的界面形变.

2 实验结果与讨论

利用上述实验装置探测了脉冲激光在水-铝、酒精-铝和空气-铝等界面激发的界面波波形. 实验样

品为 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 的铝板, 分别将其置于纯净水、酒精和空气这三种流体介质中. 由脉冲 Nd: YAG 激光器输出的脉冲激光激发流-固界面波, 并由自制的基于光偏转原理的光纤传感装置探测沿流-固界面传播的流-固界面波(泄漏 Rayleigh 波和 Scholte 波). 通过实验测量, 在三种不同的流-固界面上获得完整的流-固界面波(泄漏 Rayleigh 波和 Scholte 波)波形, 分别如图 4~6. 根据波形的到达时刻以及探测点与激发点之间的距离, 计算了三种不同的流-固界面上泄漏 Rayleigh 波和 Scholte 波传播速度, 分别列于表 1.

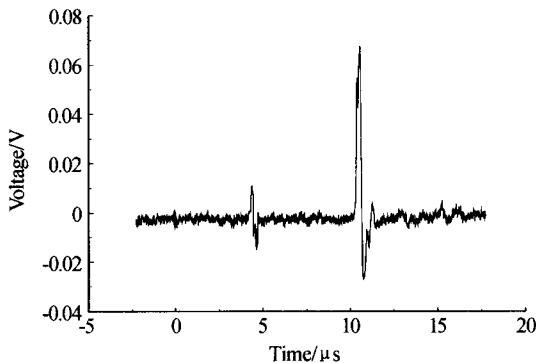


图 4 脉冲激光光源在酒精-铝界面激发的界面波波形
Fig. 4 Pulse waveform of interface wave generated by pulse laser liner source on the alcohol-aluminium interface

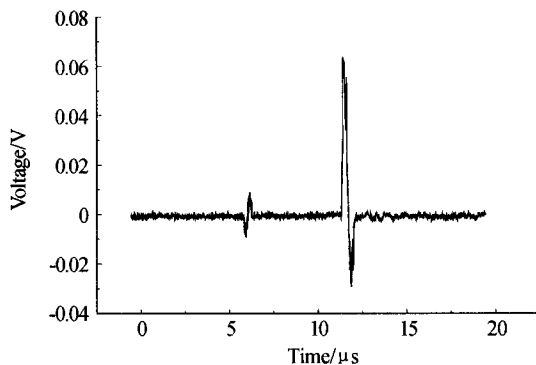


图 5 脉冲激光光源在水-铝界面激发的界面波波形
Fig. 5 Pulse waveform of interface wave generated by pulse laser liner source on the water-aluminium interface

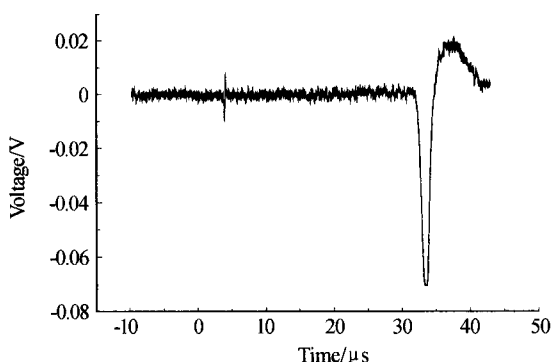


图 6 脉冲激光光源在空气-铝界面激发的界面波波形
Fig. 6 Pulse waveform of interface wave generated by pulse laser liner source on the air-aluminium interface

表 1 三种界面上界面波速度的实验值和理论值

	泄漏 Rayleigh 波			Scholte 波		
	实验值 m/s	理论值 m/s	相对 偏差	实验值 m/s	理论值 m/s	相对 偏差
水-铝界面	2916 ± 5	2904	0.4%	1512 ± 7	1499	0.9%
酒精-铝界面	2872 ± 4	2903	1.1%	1184 ± 5	1199	1.3%
空气-铝界面	2889 ± 8	2905	0.6%	339 ± 3	343	1.2%

为了与理论值进行比较, 根据文献[13]给出的 Scholte 方程

$$\left[2 - \left(\frac{\nu}{\nu_{T1}}\right)^2\right]^2 - 4 \left[1 - \left(\frac{\nu}{\nu_{T1}}\right)^2\right]^{1/2} \left[1 - \left(\frac{\nu}{\nu_{L1}}\right)^2\right]^{1/2} + \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \left(\frac{\nu}{\nu_{T1}}\right)^4 \left[1 - \left(\frac{\nu}{\nu_{L1}}\right)^2\right]^{1/2} \left[1 - \left(\frac{\nu}{\nu_{L2}}\right)^2\right]^{-1/2} \quad (6)$$

式中 ν 为界面波波速, ν_{T1} 和 ν_{L1} 分别为固体中横波波速与纵波波速, ν_{L2} 为流体中声波速度, ρ 为密度

理论计算的上述三种不同流-固界面上泄漏 Rayleigh 波和 Scholte 波的传播速度分别列于表 1. 理论计算中, 采用的三种材料的热物理参量及声学参量如表 2. 比较实验与理论计算, 两者的相对偏差小于 5% (这里的相对偏差定义为“理论值与实验值之差的绝对值与理论值的比值”), 这说明了本文所建立的流-固界面波的激光激发与检测装置的准确性. 事实上, 由式(5)可知, 泄漏 Rayleigh 波的传播速度应该是一个复数, 它的实部非常接近于 Rayleigh 波的传播速度, 偏差小于 0.5%, 而虚部很小, 通常被忽略.

表 2 空气、水、酒精、铝的热物理参量及声学参量

	密度	纵波速	横波速
	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$c_L / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$c_T / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
空气	1.21	343	
水	1000	1500	
酒精	800	1200	
铝	2700	6370	3110

此外, 为了分析界面波随传播距离的变化规律, 在距激发点不同距离处测量了界面波波形. 结果表明: 泄漏 Rayleigh 波和 Scholte 波随着传播距离的增加, 其振动幅度是逐渐减小的. 图 6 和图 7 中的波形充分说明了上述结论, 其中图 7 为空气-铝界面上距激发源 4.4mm 处的界面波波形. 这一实验结果与文献[13]报道的结果是一致的. 事实上, 决定流-固界面波传播速度与振幅衰减的内在原因可理解为: 泄漏 Rayleigh 波是沿流-固界面的固体这一侧面传播的, 因此它的传播速度接近于固体半空间的传播速度, 由于它在传播过程中不断的向流体半空间辐射能量, 这导致其振动幅度衰减. 同理, Scholte 波可认为是沿流-固界面的流体这一侧面传播的, 因此它的传播速度接近于流体中的声速, 由于它在传播过程中不断的向固体半空间辐射能量, 这导致其振动幅度衰减.

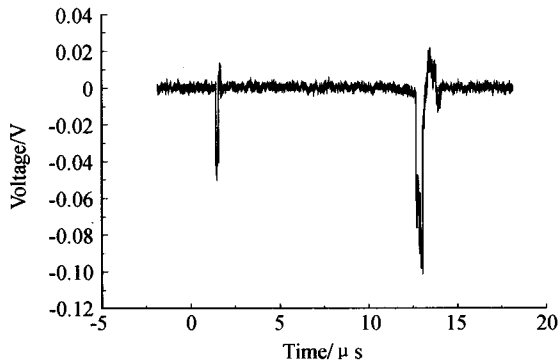


图7 在距离激发源 4.4 mm 处探测到的空气-铝界面波的波形

Fig. 7 Pulse waveform of air-aluminium interface wave detected at 4.4 mm away from the exciting source

3 结论

本文基于光偏转法建立了可用于研究激光激发流-固界面波的光学检测实验装置. 实验测量了脉冲激光激发下水-铝、酒精-铝和空气-铝界面上形成的界面波, 获得了完整的界面波波形, 同时根据波形的到达时间计算了三种条件下界面波的速度, 与理论值吻合较好. 此外, 在实验上还清楚地观察到了泄漏 Rayleigh 波和 Scholte 波随着传播距离的增加, 其振动幅度逐渐减小的特征.

参考文献

- 张淑仪. 激光超声与材料无损评价. 应用声学, 1992, **11**(4): 1~6
Zhang S Y. *Applied Acoustics*, 1992, **11**(4): 1~6
- 张淑仪. 超声无损检测高新技术. 国际学术动态, 1998, (8): 58~60
Zhang S Y. *International Academic Trends*, 1998, (8): 58~60
- 章肖融. 用激光超声评估复合材料. 应用声学, 2000, **19**(5): 1-9
Zhang X R. *Applied Acoustics*, 2000, **19**(5): 1~9
- 苗润才, 滕晓丽, 叶青. 液体表面低频声波的非线性声光效应. 光子学报, 2003, **32**(10): 1264~1267
Miao R C, Teng X L, Ye Q. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1264~1267
- 陈长乐, 宋宙模, 张彬乾. 复杂流场的超声-激光测量原理研究. 光子学报, 1996, **25**(8): 749~754
Chen C L, Song Z M, Zhang B Q. *Acta Photonica Sinica*, 1996, **25**(8): 749~754
- Jin Huang, Yasuaki Nagata. Laser-based ultrasonics for flaw detection. *Ultrasonics Symposium*, 1994, **2**(1-4): 1205~1209
- Clorennec D, Royer D, Catheline S. Saw propagation on propagation on cylindrical parts using laser-ultrasonics: application to crack detection. *Ieee Ultrasonics Symposium*, 2002, **1**(8-11): 207~210
- Clorennec D, Royer D, Walaszek H. Nondestructive evaluation of cylindrical parts using laser ultrasonics. *Ultrasonics*, 2002, **40**(1): 783~789
- Guan Jianfei, Shen Zhonghua, Xu Baiqiang. Finite element analysis of laser-generated rayleigh wave scattering by cracks in a plate. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1128~1132
- Gusev V, Desmet C, Lauriks W, et al. Theory of Scholte, Leaky rayleigh, and lateral wave excitation via the laser-induced thermoelastic effect. *J Acoust Soc Am*, 1996, **100**(3): 1514~1528
- Desmet C, Gusev V, Lauriks W, et al. Laser-induced thermoelastic excitation of scholte waves. *Appl Phys Lett*, 1996, **69**(21): 2939~2941
- Rostyene K, Glorieux C, Gao W, et al. Laser ultrasonic measurements of acoustic waves generated at solid-liquid interfaces. *Acta Physica Sinica*, 1999, **8**(supplement): 219~224
- 胡文祥, 钱梦禄. 气-固界面波的激光热弹激励. 中国科学(G辑), 2003, **33**(6): 509~514
Hu W X, Qian M L. *Science in China (Series G)*, 2003, **33**(6): 509~514
- Lu J, Hou R, Chen J P, et al. A new detection technique for laser-generated Rayleigh wave pulses. *Optics Communications*, 2001, **195**(1-4): 221~224

Laser Induced Fluid-solid Interface Wave and Its Optical Detection

Zhao Yan, Shen Zhonghua, Lu Jian, Ni Xiaowu

School of science, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094

Received date: 2005-09-07

Abstract Based on the principle of light deflection, a fibre-sensor equipment was developed for detecting the fluid-solid interface wave. And then, an experiment system was established, in which a Q-switched Nd : YAG laser was applied to excite the fluid-solid interface wave. The interface waves, which were induced by laser at the air-aluminum, water-aluminum, and alcohol-aluminum interfaces, were experimentally detected. The velocity of Leaky Rayleigh wave and Scholte wave on the three interfaces derived from the wave profiles, were 2889 m/s and 339 m/s, 2916 m/s and 1512 m/s, 2872 m/s and 1184 m/s respectively. Compared with theoretical value, the relative deviation was less than 5%.

Keywords Interface wave; Liquid-solid interface; Light deflection method; Leaky Rayleigh wave; Scholte wave



Zhao Yan was born in 1979. She received her Bachelor's Degree from Department of Applied Physics in Nanjing University of Science and Technology in 2002. Now, she is a doctor candidate in Testing Measure Technology and Instrument of Nanjing University of Science and Technology. She is devoted to investigating the applications of finite element method in laser ultrasonic.