

用于瞬态力学量测试的光学传感器设计及应用*

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 基于光纤耦合反射式光束偏转法,提出了一种可用于瞬态力学量测试的光学传感器,并详细给出了该测试机理.采用该传感器,在靶材对心处实时检测到由于空泡在固体靶材附近溃灭时射流冲击力引起的靶材瞬态微小变形.通过对该传感器定标可以进一步得到作用冲击力大小.这种传感器的应用将有助于了解激光诱导产生空泡射流运动特性及其对靶材的损伤机制.

关键词 光偏转;射流冲击力;空泡;激光

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A

0 引言

空化现象早在19世纪末就引起了人们的兴趣和关注^[1].空化是由于液体中受到某种扰动,如压力,温度变化致使其中出现空腔的行为.空化现象之所以重要在于其作用的后果,按其作用效果主要分为三类:改变液体的水动力作用、产生空蚀和辐射空化噪音.其中尤以空蚀现象更最为引人注目,它所产生的影响给工程界带来了许多严重的后果^[2,3],如在水利机械、泄水建筑物以及其它高速流水设备方面造成设备效率降低、剥蚀破坏甚至不能正常运行.近几年来,随着激光医学的发展,在眼科、泌尿科、血管成形术等领域中均要考虑到空蚀的作用和影响^[4].因此对空蚀现象的研究具有重要的理论和应用意义.

目前对空泡溃灭阶段所引起的高速射流对固壁面的冲击力研究,主要有三种手段,一是用超高速摄影法求得射流速度,进而计算出射流对固壁面的冲击力^[5],二是根据固壁面蚀除坑的深浅和材料的强度特性推算出射流的冲击力^[6].三是采用PVDF或PZT推算出作用力大小^[7].但是这三种方法均有其明显缺陷:由空蚀坑的深浅推算出射流的冲击力不仅粗略,而且无法知道冲击力随时间的变化特性;采用高速摄影的方法设备昂贵,且得到的冲击力数值是平均冲击力;PVDF压力传感器测试属于一种有损检测方法,并且频响带宽有限.因此我们设计了一种可以用于检测瞬态力学参量的光学传感器.这种传感器可以直接测量固壁面在任一时刻所受的瞬

态力,即测得的力学信号在时间上具有连续性.并且可以获得很好的水下激光诱导空泡产生的射流对固壁面的冲击力波形.该装置结构简单,调节方便,频响高(大于10 MHz),可实现非接触测量.这一研究结果有利于人们加深对空蚀现象的认识.在激光眼科手术及液体介质中的激光加工领域中优化激光参数,达到最佳的治疗效果及加工效果具有十分重要的意义.

实验上人们先后利用动力泡^[8]、火花泡^[9]及激光泡^[3,5,10]研究空化现象.由于激光产生的空泡球对称性好,可控性好及无机械形变的特点,因此,本文就采用激光诱导产生空泡研究其在固壁面附近溃灭的运动特性.

1 实验装置及机理

1.1 实验装置

采用一种自行研制的基于光纤耦合反射式光偏转法的传感器来测试靶材所受的力学信号.实验装置见图1.调Q脉冲Nd:YAG激光器(波长1.06 μm ,脉宽30 ns)单脉冲的能量可以达到170 mJ.脉冲激光经过分光镜,衰减片后,通过一个会聚透镜(焦距147 mm),聚焦在厚度为0.25 mm,贴在水槽壁表面的铁片上.水槽(100 \times 50 \times 100 mm^3)里装有纯净水.实验触发信号由光电二极管(上升时间100 ps)获取激光反射光来实现.探测光束由氦氖激光器(波长0.63 μm ,功率5 mW)发出.在探测区域将槽壁抠一圆孔,让探测光束直接聚焦到铁片背面对心处(铁片后表面经过抛光预处理).其反射光再由一个显微物镜(焦距4 mm)会聚.在其焦平面附近放置五维光纤微调架(精度0.1 μm),以便调节单模光纤(波长0.63 μm)对反射光进行耦合.从光纤输出的光进入光电倍增管(上升时间2 ns),转化为电信号,再输入数字式双通道示波器(Tektronix THS730A, 1 Gs/s).信号被采样并存入计算机.为

*国家自然科学基金(No. 60208004)、江苏省自然科学基金、教育部高校优秀青年教师奖励计划和激光技术国家重点实验室开放基金资助

** Tel: 025-4315699 Email: nxw@mail.njust.edu.cn
收稿日期: 2003-03-03

提高测试信号的信噪比,在探测光进入光纤前经由干涉滤光片(透射中心波长 $0.63 \mu\text{m}$).

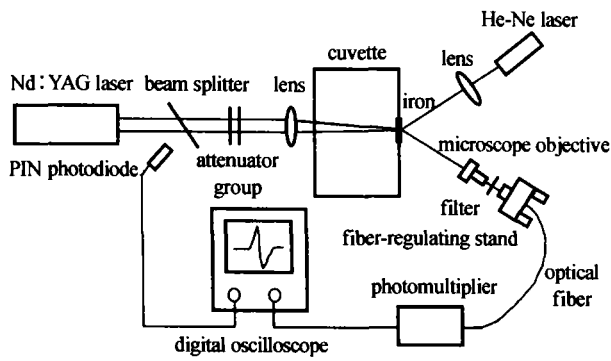


图1 实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

1.2 测试原理

当有脉冲力作用在薄铁片上时,在靶材的对心处会形成微小的凸起,这里近似为一微小锥形凸起,如图2所示.在弹性形变情况下,锥角和作用力存在线性关系,即

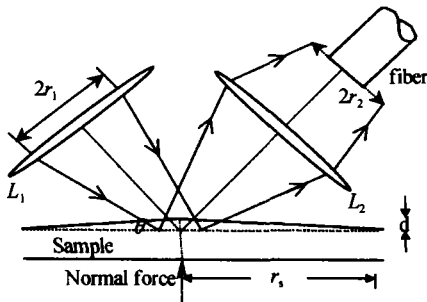


图2 探测光在靶材对心处的反射图

Fig. 2 Reflection of the detection beam at the epicenter

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

式中 k 为常数, F 为垂直作用力, d 为靶材表面的对心位移.

当表面形变的倾斜角为 θ 时,由于锥角 θ 很小,因此表面倾斜角与对心位移满足

$$\theta = d/r_s \quad (2)$$

由于 0.25 mm 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.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 .相应的反射光束经显微镜聚焦后所成的光斑偏移的距离如下所示

$$x = 2f_2\theta \quad (3)$$

探测光反射光束的聚焦光斑半径为

$$r_2 = f_2(r_1/f_1) \quad (4)$$

r_1, r_2 分别是探测光、反射光的束腰半径, f_1, f_2 分别是 L_1, 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 $r_2 \gg R$.

探测激光反射光束的光强服从高斯分布

$$I = I_0 \exp(-r^2/r_s^2) \quad (5)$$

I_0 是光束光强的最大值.当光斑照射到锥形凸起上时,光斑的中心与锥心重合,反射后变为环形光斑.如图3所示,假设反射光的偏移遵循几何光学原理,因此减少的光通量为原来位于光纤芯径内从 $(R-x)$ 到 R 的光偏移到芯外 R 到 $(R+x)$.耦合入光纤的光通量的变化量为

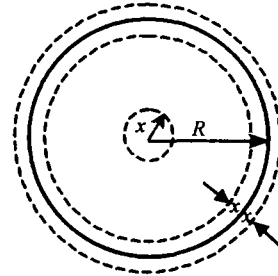


图3 由于表面形变引起的探测光斑环状分布

Fig. 3 Annulus distribution of reflected detection beam due to surface deformation

$$\Delta\Phi = I_0 \int_{R-x}^R e^{-(\frac{r^2}{r_s^2})} 2\pi r dr = \pi r_s^2 I_0 \left[-e^{-(\frac{R-x}{r_s})^2} + e^{-(\frac{R}{r_s})^2} \right] \quad (6)$$

由于 $r_s \gg R, 2R \gg x$,因此式(6)可以简化为

$$\Delta\Phi \approx 2\pi I_0 R x - \pi I_0 x^2 \approx 2\pi I_0 R x = 2\pi I_0 R 2f_2 \frac{d}{r_s} = (4\pi k I_0 f_2 \frac{R}{r_s}) F \quad (7)$$

这样通过对光通量变化的测量,很容易确定出作用力的大小.而光通量的变化转化为交流电信号可表示为

$$U = \eta \Delta\Phi = (4\pi k I_0 \eta f_2 \frac{R}{r_s}) F \quad (8)$$

η 是光电倍增管的转化因子(单位 V/W).

由式(8)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.

在测试过程中,为了获得最佳效果,首先应调节光纤使耦合光通量最大(这可以通过观察示波器直流信号的输出实现).

2 实验结果分析与讨论

当强脉冲激光聚焦于水中时,会在作用区产生等离子体,冲击波和空泡等一系列现象^[11].若空泡附近存在固壁面,那在空泡溃灭过程中,会形成指向靶材的高速射流,该射流对材料具有很大的破坏作用.图4为激光能量为 90 mJ 时,激光烧蚀水中铁片时,铁片在激光作用全过程中所受的典型力学信号.图中可以明显看到两个峰的存在,两峰时间间隔为 $124 \mu\text{s}$.考虑到实验中所用水槽在激光入射方向的壁面到靶材表面的距离为 5 cm ,因此排除了峰 b 是峰 a 在槽壁反射回波的可能.图中峰 a 为激光

烧蚀压力脉冲信号,峰 b 为空泡溃灭所产生的高速射流对靶的冲击力. 峰 b 在幅值上明显大于 a .

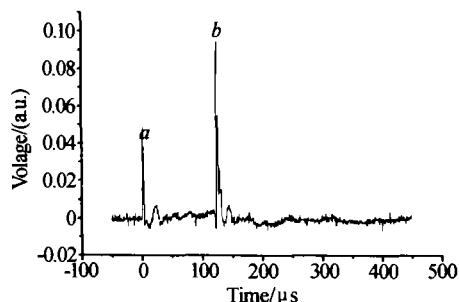


图4 水中 0.25 mm 厚的铁片所受的典型力学信号
Fig.4 The detected signal of 0.25 mm-thick-iron plate in water

该光学传感器可以通过其它传感器,如 PZT 或 PVDF 来定标. 另外还可以通过激光烧蚀力本身来定标,即先通过经验公式推算出烧蚀力^[12],然后根据实验信号得到烧蚀力和射流冲击力的相对大小比值,从而定量得到射流冲击力的值. 在已知射流力大小的情况下,进而推算出射流速度值和空泡尺寸、振荡周期、泡能等决定空蚀效应的重要参数. 这一结果对激光水下加工及眼科手术有着十分重要的意义.

3 结论

本文设计并研制了基于光偏转的可用于测试力学参量的光学传感器. 该传感器频率响应主要受限于光电倍增管的上升沿时间和靶材对力的响应速度,通常其频率响应可以超过 10 MHz. 它具有较高的灵敏度,可以通过在接收光纤前加滤波片及提高探测光的稳定性和纯度的方法来进一步提高,本系统的主要噪声是光电倍增管的本底噪声. 该传感器经过定标后,可求得高速射流对靶材的冲击力,进而算出射流的速度随时间的变化规律,另外本传感器除了用力学传感器通常的定标方法外,还可根据理论算出最大烧蚀压力,由该信号本身中的烧蚀压力定标. 该装置的优点:1)该装置是基于空间分辨率的时序结构,用来分析被测物理量的时间特性较好. 2)此装置不仅具有光学测量方法的一般优点,相对于干涉等方法,还具有结构简单,易于调节等优点.

3)由于该检测手段是基于光纤耦合的反射式光偏转法,属于无损检测范畴,且其频响较高. 4)光信号在转换为电信号前,可以由光纤传输,在某些场合,可实现遥测. 鉴于上述优点,该光学传感器在力学特性测试方面具有发展潜力.

参考文献

- 1 Besant W H. Hydrostatics and hydrodynamics, Art 158. London: Cambridge University Press, 1859
- 2 Shima A. Studies on bubble dynamics. *Shock Wave*, 1997, 7:33 ~ 42
- 3 Philipp A, Lauterborn W. Cavitation erosion by single laser-produced bubbles. *J Fluid Mech*, 1998, 361: 75 ~ 116
- 4 Niemz M H. Laser-tissue interactions: fundamentals and application. Germany: Springer-Verlag, 1996. 149 ~ 242
- 5 Vogel A, Lauterborn W, Timm R. Dynamics of laser-produced cavitation bubbles near a solid boundary. *J Fluid Mech*, 1989, 206:299 ~ 338
- 6 Naudu' C F, Ellis A T. On the mechanism of cavitation damage by non-hemispherical. cavities collapsing in contact with a solid boundary. *J Basic Engineering Trans. A. S. M. E. D*, 1961, 83:648 ~ 656
- 7 Shaw S J, Schiffers W P, Gentry T P, et al. The interaction of a laser-generated cavity with a solid boundary. *J Acoust Soc Am*, 2000, 107(6): 3065 ~ 3072
- 8 Benjamin T B, Ellis A T. The collapse of cavitation bubbles and the pressure thereby produced against solid boundaries. *Philos. Trans. R. Soc. London ser. A* 1966, 260:221 ~ 240
- 9 Blake J R, Gibson D C. Growth and collapse of a vapor cavity near free surface. *J Fluid Mech*, 1981, 170:479 ~ 497
- 10 Vogel A, Lauterborn W. Acoustic transient generation by laser-produced cavitation bubbles near solid boundaries. *J Acoust Soc Am*, 1988, 84(2): 719 ~ 731
- 11 Vogel A, Busch S, Parlitz U. Shock wave emission and cavitation bubble generation by picosecond and nanosecond optical breakdown in water. *J Acoust Soc Am*, 1996, 100(1): 148 ~ 165
- 12 Phipps C R, Jr., Turner T P, Harrison R F, et al. Impulse coupling to targets vacuum by KrF, HF, and CO₂ single-pulse lasers. *J Appl Phys*, 1988, 64(3): 1083 ~ 1096

Optical Sensor for Transient Force Detection and Its Application

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

Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, P. R. China

Received date: 2003-03-03

Abstract Based on optical beam deflection principle, a new fiber-coupling optical sensor is presented for transient force deflection. The detection principle is discussed in detail. By use of this sensor, the small displacement induced by liquid-jet impact force is detected at the target's epicenter when a laser-bubble collapses in the neighborhood of a solid boundary. Further by calibration of this sensor, the value of this acted force can be easily obtained. So the application of this optical sensor helps to understand the bubble dynamics and the corresponding damage mechanisms in hydraulics and laser medicine.

Keywords Optical beam deflection; Liquid-jet impact force; Cavitation bubble; Laser



Chen Xiao was born in February 1977, Jiangsu Province. She is a doctoral graduate in Optics Engineering in Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology. Her research has been concerned with laser-matter interaction.