

文章编号: 0253-2239(2004)12-1643-6

## 激光烧蚀水下金属产生冲击波和 空泡效应的研究 \*

徐荣青<sup>1,2</sup> 陈 笑<sup>2</sup> 陈建平<sup>3</sup> 沈中华<sup>2</sup> 陆 建<sup>2\*\*</sup> 倪晓武<sup>2</sup>

1 华东船舶工业学院电子信息学院, 镇江 212003  
2 南京理工大学应用物理系, 南京 210094  
3 北京航空工程技术研究中心, 北京 100076

**摘要:** 采用自行研制的高灵敏度光束偏转测试系统,对脉冲激光烧蚀水下金属产生的等离子体冲击波和空泡效应进行了实验研究。实验得到了激光等离子体冲击波的传播规律、冲击波与激光空泡的分离过程、空泡的脉动特性以及空泡溃灭冲击波的形成机制。结果表明,空泡最大和最小泡径、振荡周期均随着脉动次数的增加呈减小趋势,且减小幅度较大。最小收缩泡径由泡能和腔内含气量共同决定。在同一次脉动过程中,空泡膨胀所需的时间明显大于收缩所需的时间。

**关键词:** 激光物理; 空泡; 冲击波; 光偏转

中图分类号: TN247 文献标识码: A

## Shock Wave and Cavitation Effects by Laser Ablation of Metal in Water

Xu Rongqing<sup>1,2</sup> Chen Xiao<sup>2</sup> Chen Jianping<sup>3</sup> Shen Zhonghua<sup>2</sup> Lu Jian<sup>2</sup> Ni Xiaowu<sup>2</sup>

1 *Department of Electronics & Information, East China Shipbuilding Institute, Zhenjiang 212003*  
2 *Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094*  
3 *Beijing Aeronautical Technology Research Centre, Beijing 100076*

(Received 3 November 2003; revised 31 May 2004)

**Abstract:** Laser-induced plasma shock wave and cavitation bubble by pulsed laser ablation of a metal in water are investigated by a high-sensitive optical beam deflection technique. The experimental results present the laser-produced plasma shock waves propagation, the detachment of the shock wave from bubble wall, cavitation bubble oscillation and bubble-collapse-induced shock waves generation in the vicinity of a solid boundary. It is shown that with the increase of the number of oscillating cycles, the maximum and minimum bubble radii are decreased sharply, as well as the corresponding oscillating durations. The minimum bubble radius is determined by the bubble energy and gas-vapor content in a cavity. The duration of bubble expansion is obviously longer than that of contraction during the same oscillating cycle.

**Key words:** laser physics; cavitation bubble; shock wave; optical beam deflection

\* 国家自然科学基金(60208004)、江苏省自然科学基金(BK2001056)、教育部高校优秀青年教师奖励计划(2002)和激光技术国家重点实验室开放基金(2005)资助课题。

\*\* 通讯联系人。E-mail: nxw@mail.njust.edu.cn

收稿日期:2003-11-03;收到修改稿日期:2004-05-31

## 1 引 言

激光加工是激光应用的主要方向之一,也一直是人们关注的热点<sup>[1~4]</sup>。通常的激光加工均在空气中进行,其对应的基础研究发展较为成熟。但在其它介质中,如在水下进行激光加工及其对应的加工

效果和效率的报道尚不多见,而海洋开发以及一些特殊应用领域已对水下激光加工提出了迫切的需求。水下激光对靶材作用过程的研究是水下激光应用的基础。由于水下激光与靶相互作用过程要比空气中复杂,除了空气中出现的各种现象外,还有空化效应,而空化效应在水利机械和激光医学手术中所带来的不良后果及其问题本身的复杂性也一直是科研工作者研究的热点<sup>[5,6]</sup>。

当一束高功率激光聚焦于水下靶材表面时,首先在聚焦区内产生高温高压等离子体。初始以超音速对外膨胀的等离子体将不断压缩周围水介质产生冲击波和空泡现象。通常,激光等离子体冲击波在传播了一定距离之后迅速衰减为声波,而激光空泡则在泡内外压差的作用下进行多次脉动<sup>[7]</sup>。随着泡能及泡内含汽(气)量逐步减少,空泡最终溃没。

利用激光产生空泡的方法出现之后,研究内容主要集中在空泡对周围物质损伤和蚀除机制的分析。目前研究空泡现象的实验手段主要有高速摄影法<sup>[5,8]</sup>、光偏转法<sup>[9]</sup>、干涉法<sup>[10]</sup>及其压电换能器探测法<sup>[11]</sup>等。但其中高速摄影设备昂贵,且时间分辨率不高,适合研究空泡的运动规律,但不利于研究等离子体冲击波的衰减规律。若采用光延时法,虽时间精度较高,但研究的时间范围小,适合于研究等离子体冲击波的衰减规律和空泡的初期膨胀过程,不适合于分析空泡的后期脉动特性。目前采用光偏转法结合电延时的实验检测装置,相比较而言,结构简单,调节方便,具有较高的时间分辨率和空间精度,可对激光等离子体冲击波和空泡运动过程进行全面研究。

## 2 实验装置

实验装置示意图见图 1。调 Q 固体 Nd:YAG 脉冲激光器 1 输出波长  $1.06 \mu\text{m}$ 、脉宽 10 ns,最大能量 500 mJ 的单模激光脉冲;2 为分光镜,被其反射的部分光由 PIN 光电二极管 16(上升时间 100 ps)采集,作为示波器采集数据的同步触发信号;通过衰减片组 3 可以调节作用于靶材的激光能量而不改变其空间分布;凹透镜 4(焦距 50 mm)和凸透镜 5(焦距 150 mm)构成了光学扩束系统,其作用是将脉冲激光扩束并垂直聚焦于水中铝靶 6 的表面上;元件 7 为尺寸是  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  装有纯净水的水槽。

实验中铝靶被预先置于作用激光的前焦区,同

时采用光学扩束装置以增大会聚角,这样可有效地防止水首先发生光学击穿,从而保证初始的激光等离子体空泡泡心始终位于靶材表面,且具有较好的半球状。靶面焦斑半径约为  $100 \mu\text{m}$ ,焦斑处激光功率密度约为  $1.8 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$ ,远大于铝的击穿阈值  $7.5 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 。

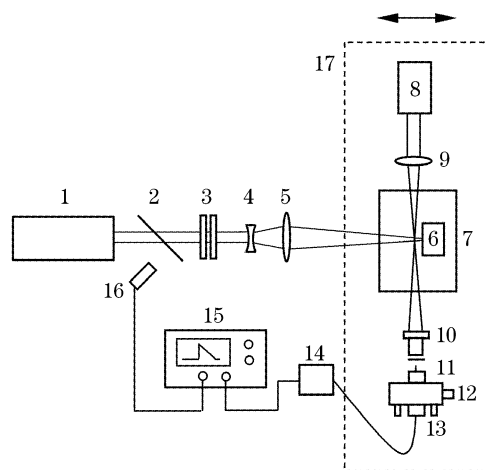


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup based on optical beam deflection

图 1 中用于测试冲击波和空泡运动特性的传感器是基于光束偏转原理的光纤传感器,主要是为研究本文实验现象而专门设计的。该光纤传感器由 He-Ne 激光器 8、聚焦透镜 9、显微物镜 10、干涉滤波片 11、光纤调节架 12、单模光纤 13 以及光电倍增管 14 等组成(见图 1)。探测组件 8~12 被固定在二维可移动平台 17 上,如图 1 虚框所示。探测光束与靶面之间的距离可直接从二维平台上的刻度尺读取,该平台沿靶面法线方向的移动精度为  $10 \mu\text{m}$ 。

He-Ne 激光器发射的波长  $0.63 \mu\text{m}$ 、功率 5 mW 的连续激光,通过焦距为 50 mm 的透镜聚焦于靶面焦点的正前方,与冲击波或空泡相互作用时微小地改变光束传播方向后,再通过  $20\times$  的显微物镜聚焦于单模光纤的端面上。光纤与探测光的耦合可通过光纤微调架进行调节。光电倍增管则用来将光纤出射的光强放大,并转化为电信号输出至数字存储示波器 15。图形的分析和处理则通过计算机来完成。

在实验中,为研究激光等离子体空泡及其反弹信号随探测距离的变化规律,通过移动二维平台(移动方向如图 1 中箭头所示)可以调节探测光与靶表面之间的距离,并将空间“零”位置定义为当探测光刚好被靶材挡去一半时所对应的位置,即输出信号幅值为最大信号的一半(这可以直接从示波器上的

波形幅值进行判定)。

### 3 实验结果与讨论

图 2 为采用光偏转法探测的典型波形信号。它包含了激光作用于水中靶材时的三种物理现象和过程,即激光等离子体冲击波、等离子体空泡及其反弹现象、空泡收缩到最小泡体积时辐射的冲击波信号。图中上升沿 a 和 c 分别代表空泡在一次和二次脉动中对应的膨胀泡壁;下降沿 b 和 d 为对应的收缩壁。下面就这三种物理现象展开具体讨论。

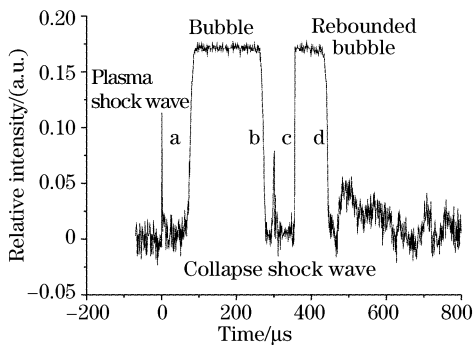


Fig. 2 Typical signal detected by optical deflection system

#### 3.1 激光诱导的等离子体冲击波

图 3 为激光能量为 170 mJ,探测光距靶面 10 mm 处的等离子体冲击波信号。其上升沿为 35 ns,半峰全宽为 54 ns。通过测定探测光在不同位置对应的冲击波信号到达时间,可求得冲击波的传播速度。

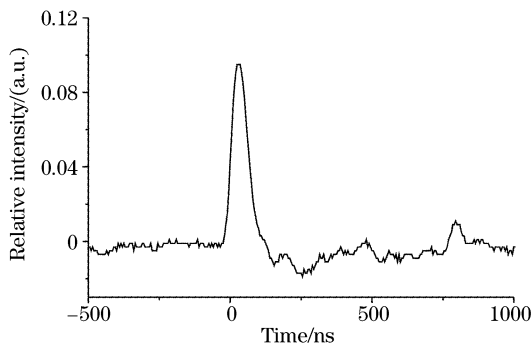


Fig. 3 Typical profile of laser-induced plasma shock wave

图 4 即为冲击波的速度随位置的变化关系图。在实验中,不同位置处的冲击波信号是由不同的激光脉冲产生,因而速度的测量是建立在激光等离子体冲击波具有良好的可重复性基础上的。从图 4 可以看出,激光等离子体冲击波速度在 0.5 mm 内迅速从两倍的声速降到 1700 m/s,然后以较慢的速度衰减,直到 4.2 mm 处降为声速。

图 5 为不同激光能量产生的等离子体冲击波衰减为声波脉冲的距离分布。从图 5 可以看出,在 80 mJ 以上,这一距离随激光能量线性增加。

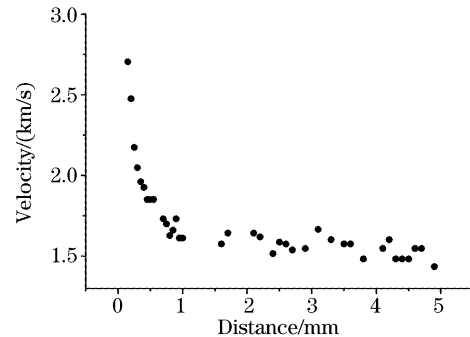


Fig. 4 Velocity of laser-induced plasma shock wave as a function of time

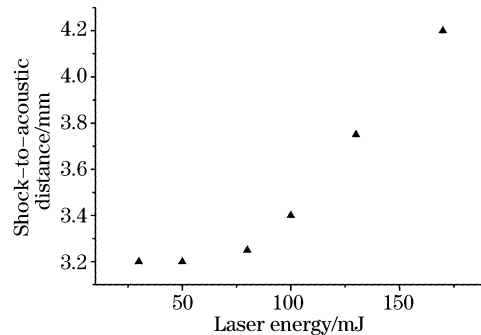


Fig. 5 Distance of shock wave decaying to acoustic transient as a function of laser energy

#### 3.2 空泡膨胀过程

图 6 为脉冲激光能量为 170 mJ,激光等离子体冲击波与空泡膨胀壁分离的实验序列图。由图可见,空泡的发展表现出了有别于等离子体冲击波的传播特性,尽管二者均是由激光等离子体对外膨胀引起的。由于冲击波波阵面的传播速度总是快于波后粒子的速度,因此冲击波和空泡的分离几乎是在等离子体形成瞬间开始的。从冲击波形成开始到其达到最大速度这一瞬态过程是在等离子体边缘,激光脉冲作用时间内完成的。而空泡膨胀速度要相对缓慢,在较远距离处才达到最大速度。

图 7 为基于实验序列图,通过跟踪初始空泡膨胀壁所得到的泡半径随时间的变化关系图。由图可见,在初始 1.99  $\mu$ s 内,空泡壁向外仅移动 0.24 mm 但在 0.29 mm 处,泡壁膨胀速度由 90 m/s 迅速增加为 2530 m/s,且保持该速度到 0.34 mm。之后在 3.65  $\mu$ s 内,速度迅速下降为 60 m/s。在 197  $\mu$ s 之后,空泡达到最大泡半径 1.37 mm。

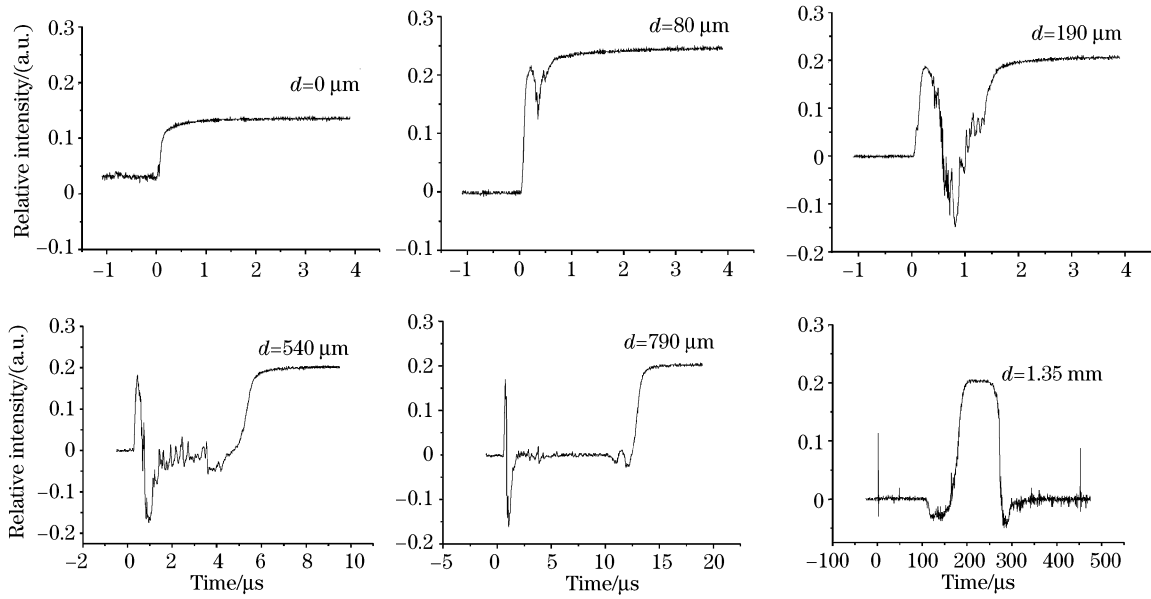


Fig. 6 Detachment of laser-induced plasma shock wave from an expanding cavitation bubble

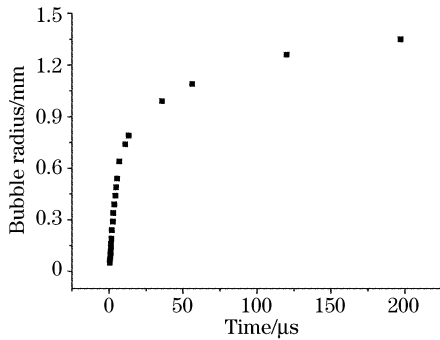


Fig. 7 Radius of expanding bubble as a function of time

3.3 泡脉动的最大及最小泡径

图 8 为根据数值模拟结果<sup>[7]</sup>所画的脉动空泡泡径随时间变化关系的示意图。在实验中,将探测光由远场移向靶面时,当探测光离靶面距离  $d$  大于最大泡半径  $R_{max}$  时,信号中只有冲击波脉冲信号,包括激光等离子体冲击波和空泡溃灭所辐射的冲击波信号,无因探测光经过空泡而产生的信号。当探测距离  $d$  移至刚好小于最大泡半径  $R_{max}$  时,如图 8 中的

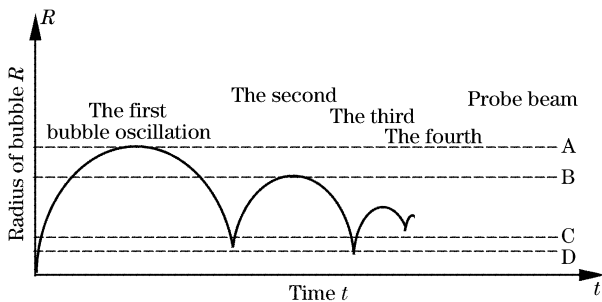


Fig. 8 Diagram of probe beam passing through an oscillating cavity

A 所示位置,图中将出现由空泡引起的光偏转信号,对应于图 9(a)。因此,在实验中以恰好出现空泡第一次脉动所引起的光偏转信号为依据,判定该位置  $d$  即为空泡最大泡半径  $R_{1max}$ 。当探测光继续移向靶面时,由于泡内折射率梯度的增大使得经过空腔的探测光逐步偏离光纤芯径,进而引起空泡光偏转信号趋于饱和。当  $d$  刚好移至于小于  $R_{2max}$  时,即图 8 中的 B 位置,信号中将出现空泡二次脉动所引起的偏转信号。同理可推,此处即对应于  $R_{2max}$ 。反之,将探测光由靶面近场向远处移动时,当距离增至最小泡径  $R_{min}$  时,饱和信号中将出现‘凹陷’,如图 9(c)和图 9(d)所示,从时间上可判定刚出现第一个‘凹陷’的位置对应于  $R_{2min}$ ,接着出现第二个‘凹陷’,其对应的空间位置即为  $R_{1min}$ 。细微调节探测光的位置,以标志性的信号出现概率为 1/2 处的位置判定为各次脉动所对应的最大或最小泡径,同时根据实验序列图还可直接得到的各次脉动所对应的膨胀和收缩时间。

在实验中,当脉冲激光能量为 150 mJ,聚焦光斑半径为 50  $\mu\text{m}$  时,所测得的前两次脉动过程所对应的空泡最大和最小半径分别为  $R_{1max} = 1600 \mu\text{m}$ ,  $R_{1min} = 650 \mu\text{m}$ ;  $R_{2max} = 800 \mu\text{m}$ ,  $R_{2min} = 300 \mu\text{m}$ 。其对应的脉动周期分别为  $T_1 = 266 \mu\text{s}$ ,  $T_2 = 152 \mu\text{s}$ 。实验结果表明:  $R_{1min} > R_{2min}$ ;  $R_{1max} > R_{2max}$ ;  $T_1 > T_2$ 。随着脉动次数的增加,空泡的最大半径依次减小,且减小的幅度较大;空泡各次脉动周期也呈减少趋势;且在同一次脉动过程中,泡收缩速度要快于膨胀速度。空泡收缩的最小泡径和收缩周期则是由泡能和

腔内含气量共同决定。在空泡膨胀收缩过程中, 尤其在其收缩的最后阶段, 泡内气(汽)体将迅速扩散到周围液体中, 加之部分气(汽)体的冷凝作用, 造成了腔内含气量的大量减小。同时, 由于空泡溃灭所引起的冲击波辐射和射流的产生, 以及周围液体粘滞力的作用, 都将造成大量泡能的耗散, 从而使得空泡在第二次收缩末期, 所剩泡能明显小于第一次收缩时的泡能; 但是另一方面, 气(汽)体的冷凝液化所释放出的能量又可弥补部分损失的能量。通常, 泡

能越小, 收缩越缓慢,  $R_{min}$  越大; 而含气量越小, 空泡的弹性越小, 收缩越剧烈,  $R_{min}$  越小。由此可见, 在泡能和腔内含气量均较大幅下降的情况下, 二者对最小泡半径和脉动周期的作用实际是一种竞争的关系。当含气量的下降占主导地位时,  $R_{2min} < R_{1min}$ ; 当泡能的减少占主导地位时,  $R_{2min} > R_{1min}$ 。实验结果说明, 腔内含气量的减小在空泡脉动过程中其实占有主导地位。

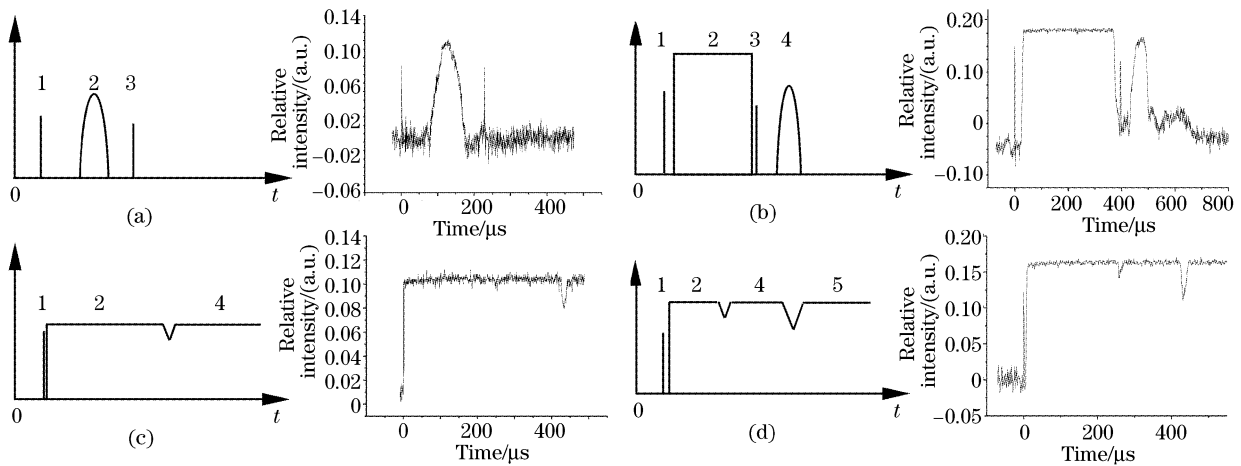


Fig. 9 Characteristic signals of optical beam deflection at different stages ‘1’ denotes laser-induced plasma shock wave. ‘2’, ‘4’ and ‘5’ correspond to three oscillating cycles, respectively. ‘3’ denotes bubble-collapse-induced shock wave

### 3.4 空泡溃灭诱导的冲击波

采用示波器的延时功能, 还可观察到空泡在第一次脉动周期的最后溃灭阶段对外辐射冲击波的形成和发展过程, 如图 10 所示。作用激光能量为 150 mJ。在探测位置 110 μm 处, 在‘凹陷’里首先出

现了空泡溃灭辐射的冲击波脉冲信号。随着探测距离的增大, ‘凹陷’不断变大, 该冲击波的信号幅值呈现先增大后下降的趋势。和激光等离子体冲击波相比, 空泡溃灭诱导的冲击波在信号强度上要弱于前者。

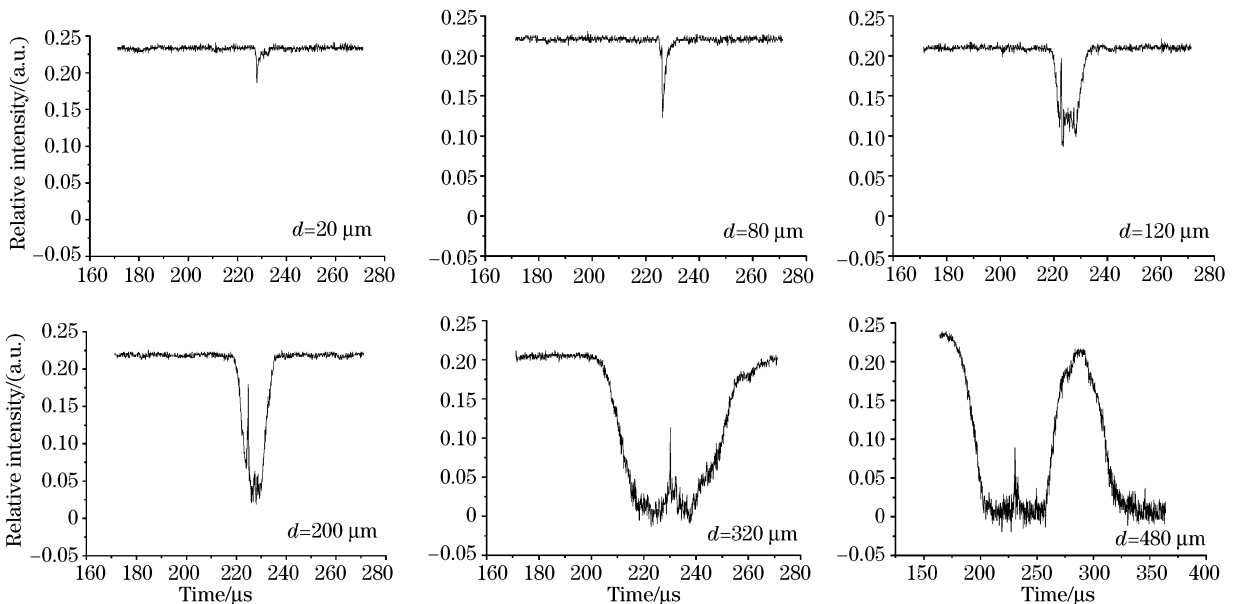


Fig. 10 Development of bubble-collapse-induced shock wave with the detection distance

**结论** 本文发展了一种基于光纤耦合的高灵敏度光束偏转测试系统,该系统具有造价低、结构简单、调节方便、测量精度高等优点;并用它研究了激光烧蚀水下铝靶时所产生的等离子体冲击波、等离子体空泡及其空泡溃灭诱导的冲击波等物理现象。我们的研究结果对激光的应用及相关检测技术的发展有一定的促进作用。另外,本文只是对水中激光与物质相互作用进行了一个初步研究,许多问题有待进一步深入,如空泡溃灭时产生的冲击波和射流之间的相互关系及不同条件对它们的影响。

### 参 考 文 献

- 1 Luxon J L, Parker D E. *Industrial Laser and Their Application*. 2nd Edition, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1992
- 2 Fabbro R, Peyre P, Berthe L *et al.*. Physics and applications of laser shock processing of materials. *Proc. SPIE*, 2000, **3888**: 155~164
- 3 Li Y W, Liu J Z, Li W X. Study of CO<sub>2</sub> Laser grooving under water on the outside of a cylinder casing. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(5): 455~460 (in Chinese)
- 4 Hua Y Q, Chen R F, Lu M *et al.*. Study on the experiment of 40Cr steel by laser shocked processing. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2004, **31**(4): 495~498 (in Chinese)
- 5 Niemz M H. *Laser-Tissue Interactions: Fundamentals and Application*. Germany: Springer-Verlag, 1996
- 6 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
- 7 Shaw A. Studies on bubble dynamics. *Shock Waves*, 1997, **7**: 33~42
- 8 Ohl C D, Kurz R T, Geisler *et al.*. Bubble dynamics, shock waves and sonoluminescence. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1999, **A357**: 269~294
- 9 Doukas A G, Zweig A D, Frisoli J K *et al.*. Non-invasive determination of shock wave pressure generated by optical breakdown. *Appl. Phys.*, 1991, **B53**: 237~245
- 10 Ward B, Emmony D C. Direct observation of the pressure developed in a liquid during cavitation-bubble collapse. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**: 2228~2231
- 11 Shaw S J, Schiffers W P, Emmony D C. Experimental observations of the stress experienced by a solid surface when a laser-created bubble oscillates in its vicinity. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2001, **110**: 1822~1827