

# $10^{-6}$ — $10^{-4}$ m<sup>2</sup>/s 黏度液体中靶受力学作用的 测试与分析<sup>\*</sup>

刘秀梅 赵瑞 贺杰 陆建<sup>†</sup> 倪晓武

(南京理工大学应用物理系, 南京 210094)

(2007 年 2 月 3 日收到, 2007 年 4 月 10 日收到修改稿)

通过自行研制的光纤传感器对不同黏度液体中材料靶后的力学作用进行研究, 获得了液体黏度变化对等离子体烧蚀力、射流冲击力及空泡生存周期的影响. 实验结果表明, 液体黏度相同时, 靶材所受冲击力幅值随作用激光能量的增加单调上升, 液体黏度增加时, 靶材所受的冲击力减小, 靶材的空化空蚀程度亦减小, 受液体黏度增大的影响, 空泡膨胀或收缩过程减缓, 相应的生存周期也增大. 此外, 对空泡溃灭周期公式进行修正, 结果表明修正后的理论估算值与实验值的一致性较好.

关键词: 射流冲击力, 黏度影响, 空化, 空泡生存周期

PACC: 4755C, 4755B

## 1. 引言

自从 19 世纪后期在螺旋桨叶片上发现空化现象以来<sup>[1]</sup>, 空化现象的理论及内涵已经有了很大的发展. 随着科技的进步, 涉及空化现象的领域也愈来愈多, 例如高速螺旋桨、高速鱼雷雷体、高速潜艇、水轮机、水工泄水建筑物、原子能、宇航、制浆工业、废水处理、表面除垢甚至生物学和医学等. 空化现象之所以重要在于其作用后果的严重性, 这些作用后果主要可分为三大类: 改变液体的水动力作用、产生空蚀和辐射空化噪声. 由于空化空蚀现象给许多领域带来了一定的影响和后果, 因此它已成为人们研究的热点问题之一<sup>[2-5]</sup>.

空泡空化现象是激光击穿液态物质时发生的物理现象之一. 当一束高功率激光聚焦与水下靶材表面时, 首先在聚焦区形成高温高压等离子体, 该等离子体将不断压缩周围水介质从而产生冲击波和空泡现象. 空泡在内外压差的作用下进行多次脉动, 且随着泡能和泡内含气量逐步减小, 空泡最终溃灭. 当空泡周围存在固体壁面, 将形成指向壁面的冲击波和射流, 该冲击波和射流是造成壁面空化的主要

原因<sup>[6]</sup>. 除水外, 其他液体中也常会发生空化现象, 例如液态金属钠、液态金属钾、液态铯, 油泵和轴瓦中的润滑油等. 这些液体都属于黏性液体, 其黏度是液体内摩擦力的表现. 由于黏性的存在给流体运动的数学描述和处理带来了很大的困难, 所以在以往的理论分析中, 人们往往忽略液体黏性的影响. 因此有关液体黏性对空化的影响尚未进行系统的研究.

本文用基于光偏转原理做成的光纤力学传感器探测了不同黏性液体中单空泡溃灭产生的射流对固壁面的瞬态冲击力. 在此基础上分析了液体黏度变化对激光烧蚀力、射流冲击力及空泡溃灭时间的影响, 并对空泡溃灭周期进行了修正. 这一研究结果不仅可以促进相关检测技术的发展, 深入了解空泡运动, 进而避免空化可能带来的危害, 同时也可合理利用空化现象提供参考.

## 2. 实验装置及测试原理

### 2.1. 实验装置

实验装置在图 1 中给出, 调 Q 固体 Nd:YAG 脉

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金 (批准号 60578015) 教育部高校优秀青年教师奖励计划和博士点基金 (批准号 20050288025) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: lujian@mail.njust.edu.cn

冲激光器 1(输出波长 1.06  $\mu\text{m}$ 、脉宽 10 ns)经过分光镜 2、衰减片 3 和扩束装置 4 后,由会聚透镜 5(焦距 150 mm)聚焦于贴在水槽壁表面 0.20 mm 厚的铜片 7 上. 实验触发信号由光电二极管 16(上升时间 100 ps)获取激光反射光来实现. 水槽 6 里装有不同配比的甘油,实验时室温 20 $^{\circ}\text{C}$ . 溶液采用不同配比(容积配比)的甘油液体,其黏度在表 1 中给出<sup>[7]</sup>. 一般

表 1 不同黏性液体的黏度  $\nu$ 

容积 配比	甘油 纯净水	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
黏度 $\nu$ ( $10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s)	1.004	1.283	1.690	2.332	3.411	5.372	9.499	19.42	51.30	189.9	

图 1 中探测光束由氦氖激光器 8(波长 0.63  $\mu\text{m}$ 、功率 5 mW)发出. 探测光束由一个非球面镜聚焦到靶材背面对心处 1 mm(样品激发点的中心垂直对面为对心点),其反射光再由一个焦距为 4 mm 显微物镜 10 会聚. 在其焦平面附近放置五维光纤微调架 12(精度 0.1  $\mu\text{m}$ ),以调节单模光纤 13 与反射光的耦合. 从光纤输出的光进入光电倍增管 14(上升时间 2 ns)转化为电信号,再输入数字式双通道示波器 15(Tektronix 340, 1 GPs),并存入计算机. 为提高测试信号的信噪比,在探测光进入光纤前先通过干涉滤光片 11. 能量计 17 用来实时监测入射激光的能量.

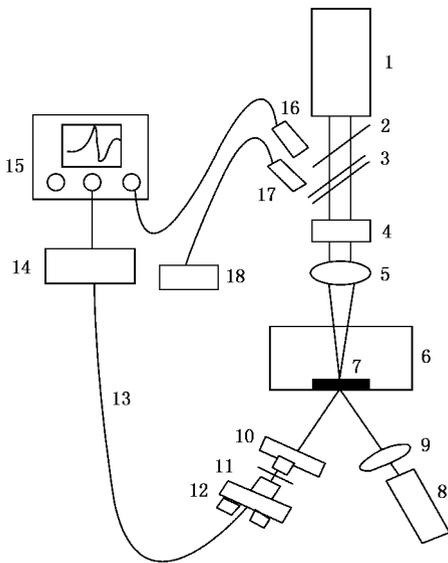


图 1 基于光偏转原理的实验装置示意图

## 2.2. 测试原理

将图 1 中有关探测部分放大得到图 2. 根据胡

克定律,黏度可分为动力黏度和运动黏度. 其中动力黏度表示液体在一定剪切应力下流动时内摩擦力的量度,运动黏度表明流体抵抗流动或者说是内部摩擦的能力的度量值<sup>[8]</sup>,其值为相同温度下液体的动力黏度与其密度之比,即运动黏度 =  $\frac{\text{动力黏度}}{\text{液体密度}}$ ,本文中涉及的黏度均指运动黏度.

克定律,薄板在圆形边界约束下,受垂直薄板平面力作用时,将在作用点背面产生微小的锥形突起,且满足

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

式中,胡克系数  $k$  取决于约束圆半径  $r_s$  和靶面材料,在本文的情况下可视为常数, $d$  为靶材表面中心的最大位移. 因为是微形变,所以有  $d \ll r_s$ , 于是

$$\theta \approx \frac{d}{r_s}. \quad (2)$$

实验使用靶材的反射率很高,因而可以近似认为探测激光光束发生镜面反射. 又因在激光的作用下,作用区域将在靶材料弹性范围内形成凸起,所以光束反射时相对原有反射光路要偏转  $2\theta$  的角度,从而反射光束经显微镜物镜聚焦后在焦平面上的偏离量  $x$  为

$$x = f_2 2\theta = 2f_2 d / r_s, \quad (3)$$

式中  $f_2$  为显微物镜的焦距.

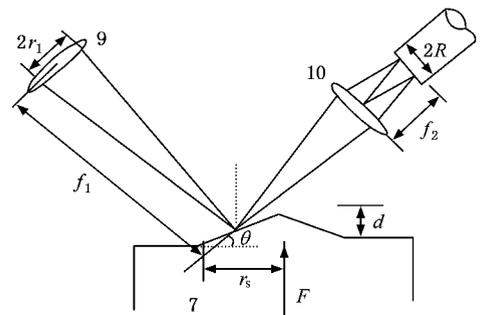


图 2 靶材对心处的探测光反射示意图

设  $A$  为氦氖激光器发出激光的光束束腰半径,探测激光束的光强服从高斯分布

$$I = I_0 \exp\left[-\frac{r^2}{A}\right], \quad (4)$$

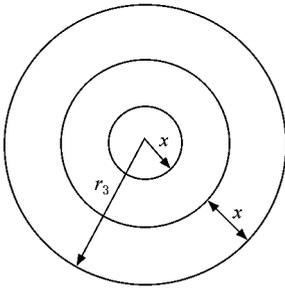


图3 光纤端面接收探测光偏转示意图

式中  $I_0$  为探测光束光强的最大值. 当探测光束照在因激光作用而形成凸起的锥形上, 且光斑中心与锥心重合时, 反射光束变为一环形光斑, 如图 3 所示. 设  $r_3$  为光纤芯径的半径, 则耦合进光纤的光通量会变小, 其光通量的减少量为<sup>[9]</sup>

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= I_0 \int_{r_3-x}^{r_3} e^{-\frac{r^2}{A^2}} 2\pi r dr \\ &= \pi A^2 I_0 \left[ e^{-\left(\frac{r_3-x}{A}\right)^2} - e^{-\left(\frac{r_3}{A}\right)^2} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

因为  $r_3$  远小于  $A$ , 应用级数展开, 忽略 2 次项有  $\Delta\Phi = 2\pi I_0 r_3 x - \pi I_0 x^2$ ; 又因为  $x$  远小于  $r_3$ , 所以只考虑第 1 项, 即  $\Delta\Phi = 2\pi I_0 r_3 x$ . 即耦合进光纤的光通量的变化与光线在焦平面上的线偏离量成正比. 结合(1)和(3)式, 有

$$\Delta\Phi = 4\pi I_0 R f \theta = \left[ 4\pi k I_0 f_2 \frac{r_3}{r_s} \right] F. \quad (6)$$

光通量的变化则体现为光电流或电压的变化, 从而有

$$U = \eta \Delta\Phi = \left[ 4\pi \eta k I_0 f_2 \frac{r_3}{r_s} \right] F = KF, \quad (7)$$

式中  $K = 4\pi \eta k I_0 f_2 \frac{r_3}{r_s}$ ,  $\eta$  是光电倍增管的转化因子 (单位 V/W), 由(7)式可见示波器上的电压变化可以反映靶材所受力的变化.

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). 实验时为了消除随机误差, 每一探测距离平均采样五次, 所给出的实验数据为五次平均值.

### 3. 实验结果与讨论

#### 3.1. 液体黏度不变, 作用激光能量变化

通过实验我们发现靶材在不同配比的甘油水

溶液中得到的力学信号相似, 结合实际应用, 我们主要分析接近全血黏度的 50% 甘油水溶液中靶材所受的典型力学信号, 在图 4 中给出. 图中作用激光能量 40.05 mJ, 峰  $a$  为激光等离子体产生的烧蚀压力脉冲信号, 峰  $b$  为第一次射流冲击力信号, 峰  $c$  为第二次射流冲击力信号<sup>[10]</sup>. 从图 4 可以看出: 该作用激光能量下, 第一次射流冲击力最大, 其次为等离子体烧蚀力和第二次射流冲击力.

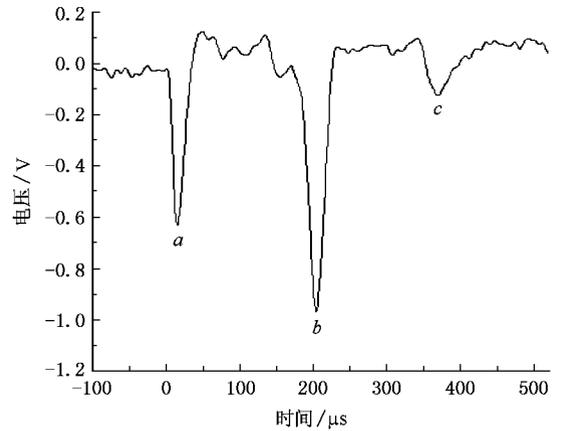


图4 靶材在 50% 甘油中所受的典型力学信号

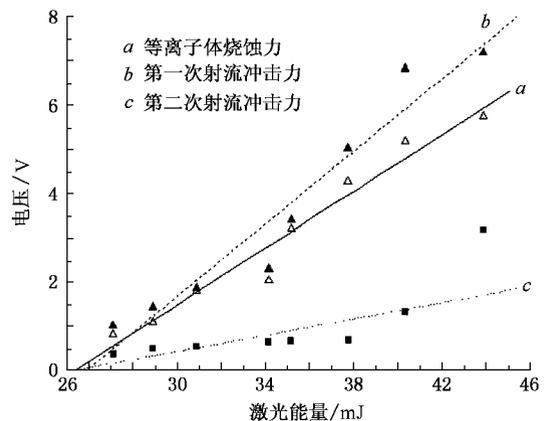


图5 力学信号与入射激光能量关系

图 5 给出了 50% 甘油中力学信号随入射激光能量变化的关系, 其中等离子体烧蚀力  $a$ 、第一次和第二次射流冲击力分别为  $b$  和  $c$ . 由图可见, 随着作用激光能量的增加, 等离子体烧蚀力及两次射流冲击力的幅值均呈单调上升趋势. 这是因为入射激光能量越大, 激光泡所含能量相应变大, 空泡溃灭时所产生的射流速度和射流冲击力也相应变大<sup>[9]</sup>. 但第一次射流冲击力  $b$  最强、等离子体烧蚀力  $a$  次之、第二次射流冲击力  $c$  最弱的关系没有改变, 这说明

第一次射流冲击力是造成靶材被破坏的主要原因。

### 3.2. 作用激光能量不变, 液体黏度变化

保持作用激光能量基本不变(涨落为  $\pm 2\%$ ), 只改变液体的黏度, 实验中得到的力学信号变化应该主要由液体黏性变化所致。此时空泡溃灭过程中等离子体烧蚀力、射流冲击力大小与液体黏度的关系如图 6 所示, 其中曲线 *a*, *b* 和 *c* 对应的信号分别来源于等离子体烧蚀力、第一次和第二次射流冲击力。实验结果表明, 随着甘油水溶液黏度的增加三个脉冲信号均呈下降趋势; 且黏度越大, 靶材受到的第一、二次射流冲击强度越小, 这是因为当液体黏度增加时增加了空泡脉动的阻力, 液体的黏度比较大时, 泡能消耗比较迅速, 空泡剧烈衰减<sup>[11]</sup>。曲线 *c* 更是按照非线性规律下降(随机性比较大), 我们认为这是泡能和腔内含气量的减小导致空泡弹性大大减弱造成的。此外, 实验中还发现当溶液含 90% 以上的甘油时, 只能探测到空泡第一次溃灭射流冲击力信号, 说明此时空泡的能量较低, 空泡第一次收缩后无力回弹。

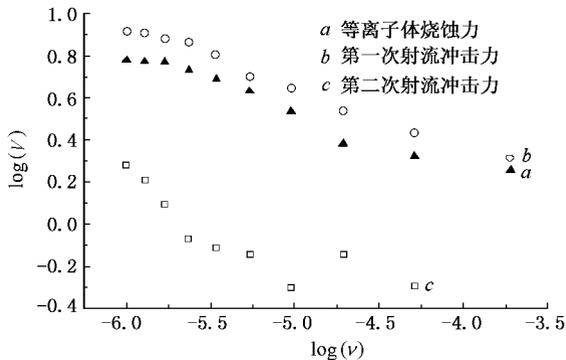


图 6 力学信号与黏度的对数坐标图

图 6 为作用激光能量为 40.05 mJ 时的力学信号随黏度变化图, 因此可以直接读出该能量下等离子体烧蚀压力和第一、二次射流冲击力的实验数值。结合烧蚀压力的实验值和电信号电压的(7)式, 文献[9]对该传感器进行定标。通过该定标力学传感器, 可以求出黏性液体中激光等离子体烧蚀力和两次射流冲击力的变化率  $\frac{\Delta F}{F_{\text{water}}} \times 100\% = \left| \frac{F_i - F_{\text{water}}}{F_{\text{water}}} \right| \times 100\%$  ( $F_i$  表示不同配比甘油溶液中靶材所受冲击力大小) 具体关系如图 7。从图 7 可见, 液体黏度越大, 靶材所受的等离子体烧蚀压力和射流冲击力减少幅度越大, 靶材的空蚀强度减弱; 当液体的黏度增大到

一定程度时, 上述三个冲击力的衰减幅度几乎不变; 随着液体黏性的增大, 第二次射流冲击力减少幅度最大, 其次为第一次射流冲击力及激光等离子体烧蚀力, 这说明黏度增大对空化空蚀有抑制作用。从本实验中我们可以看出溶液的特性对空化的形态有很大影响。

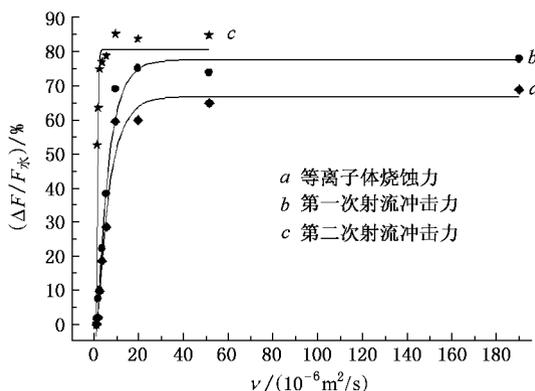


图 7 液体黏度  $\nu$  与激光等离子体烧蚀力及第一、二次射流冲击力变化率的关系

### 3.3. 黏性液体中空泡的溃灭周期

近年来, 国内外很多学者<sup>[12-15]</sup>对不可压缩液体中球形单空泡溃灭周期进行过理论分析, 其中最为著名的是 Rayleigh 公式<sup>[12]</sup>

$$T_c = R_{\max} \cdot 0.915 \sqrt{\rho_1 / p_{\infty}}, \quad (8)$$

式中  $T_c$  为空泡溃灭周期;  $R_{\max}$  为最大泡半径;  $\rho_1$  为液体密度;  $p_{\infty}$  为液体静压强 ( $p_{\infty}$  取  $10^5$  Pa)。由于瑞利公式没有考虑液体的黏性、压缩性和表面张力等因素的影响, 因此不再适用于描述本实验中的空泡运动。

空泡溃灭周期的求解主要有两种方法: 数值求解和实验测试。由于求解的困难性, 目前虽然有少量文献涉及到空泡运动的黏性阻力系数的数值解<sup>[16,17]</sup>, 但至今没有文献给出黏性液体中空泡溃灭周期的计算公式。

结合实验数据和空泡黏性阻力系数公式, 我们对(8)式给出了修正,

$$T'_c = T_c \cdot f(Re) \approx T_c \cdot (0.462 + Re^{1/4}/50)^{-1}, \quad (9)$$

式中  $Re$  为空泡雷诺数<sup>[18]</sup>, 且有  $Re = \frac{R_{\max} \sqrt{P_{\infty}/\rho}}{\nu}$  (其中  $R_{\max} = 1.17$  mm, 测试方法见文献[19])。

图 8 为空泡在第一次脉动过程中溃灭周期与液

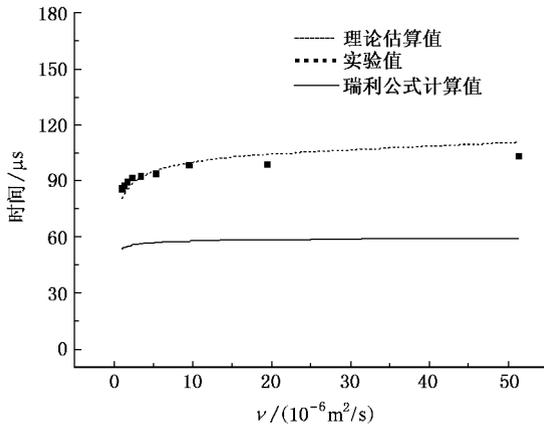


图8 空泡第一次溃灭周期与黏度  $\nu$  的关系

体黏度的关系,其中实线为采用瑞利公式(8)式计算得到的结果,方形点为实验数据,虚线为采用修正公式(9)式计算得到的理论估算值。从图中可以看出实验结果与利用瑞利公式(8)式得到的结果相比存在较大的误差,而修正后得到的理论估算值与实测值的一致性较好。但是还有一定的误差,这主要是因为忽略了空泡最大泡半径的变化,且没有考虑液体的压缩性和表面张力等因素造成的。此外,图8中的瑞利公式(8)的计算结果随液体黏度变化,作者认为这是甘油水溶液在黏度变化的同时密度也在变

化所引起的。

实验中还发现空泡的溃灭周期随溶液黏度的增加而增加。我们认为这是因为液体黏度增大时,致使空泡收缩或膨胀的运动过程减缓造成的,且液体黏度越大致使空泡运动时间增加越长,空泡的溃灭周期也增加越多,这与文献[19—21]给出的结果一致。

## 4. 结 论

采用自行研制的高灵敏度光纤传感器测量了不同黏度液体中靶材所受的力学信号。实验结果表明,同一种液体中,激光烧蚀力和第一、二次射流冲击力均随作用激光能量的增加而增加,液体黏性对空泡运动起阻尼作用,黏度越大,靶材受到的第一、二次射流冲击力强度越小,靶材的空化空蚀程度亦减小,受液体黏性增大影响,空泡膨胀或收缩过程减缓,相应的溃灭周期也增大。此外,结合实验结果和空泡运动的黏性阻力系数公式,对不可压缩流体中球形单空泡的溃灭周期公式进行了修正,结果表明修正后得到的理论估算值与实测值较好地符合。本文的研究结果不仅可促进空化研究的深入,也可为避免空化现象和合理利用空化现象提供参考。

[1] Besant W H 1859 *Hydrostatics and hydrodynamics* (London: Cambridge University Press), Art 158  
 [2] Lauterborn W, Bolle H 1975 *J. Fluid Mech.* **72** 391  
 [3] Tomita Y, Shima A 1986 *J. Fluid Mech.* **169** 535  
 [4] Akhatov I, Lindau O, Topolnikov A, Mettin R, Vakhitova N, Lauterborn W 2001 *Phys. Fluids* **13** 2805  
 [5] Lindau O, Lauterborn W 2003 *J. Fluid. Mech.* **479** 327  
 [6] Shaw S J, Jin Y H, Schiffers W P, Emmony D C 1996 *J. Acoust. Soc. Am.* **99** 2811  
 [7] Gao X H, He Z Y 1989 *Sichuan Daily Chemicals* **3** 53 (in Chinese) [高雄弘、何在友 1989 四川日化 **3** 53]  
 [8] Liang G W, Cai W C 2002 *Fluid Flow Measurement Technology and Instrument* (Beijing: China Machine Press) p17 (in Chinese) [梁国为、蔡武昌 2002 流量测量技术及仪表(北京:机械工业出版社)第17页]  
 [9] Xu R Q, Chen X, Shen Z H, Lu J, Ni X W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1413 (in Chinese) [徐荣青、陈笑、沈中华、陆建、倪晓武 2004 物理学报 **53** 1413]

[10] Lu J, Xu R Q, Chen X, Shen Z H, Ni X W, Zhang S Y, Gao C M 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 3890  
 [11] Stebnovskii S V 2000 *J. Appl. Mech. Tech. Phys* **41** 95  
 [12] Rayleigh L 1917 *Philos. Mag.* **34** 94  
 [13] Blake J R, Gibson D C 1987 *Ann. Rev. Fluid Mech.* **19** 99  
 [14] Godwin R P, Chapyak E J, Noack J, Vogel A 1999 *SPIE* **3601** 225  
 [15] Shima A 1997 *Shock Waves* **7** 33  
 [16] Bhaga D, Weber M E 1981 *J. Fluid. Mech.* **105** 61  
 [17] Ryskin G, Leal L G 1984 *J. Fluid. Mech.* **148** 19  
 [18] Popinet S, Zaleski S 2002 *J. Fluid. Mech.* **464** 137  
 [19] Zhao R, Xu R Q, Shen Z H, Lu J, Ni X W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4783 (in Chinese) [赵瑞、徐荣青、沈中华、陆建、倪晓武 2006 物理学报 **55** 4783]  
 [20] Visuri S R, Celliers P, DaSilva L, Matthews D 1997 *SPIE* **2975** 343  
 [21] Tomita Y, Tsubota M, Nagane K, An-naka N 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 5993



# Mechanical effects during interaction of pulsed laser and metal in fluids in viscosity range of $10^{-6}$ to $10^{-4}$ m<sup>2</sup>/s \*

Liu Xiu-Mei Zhao Rui He Jie Lu Jian<sup>†</sup> Ni Xiao-Wu

( Department of Applied Physics , Nanjing University of Science & Technology , Nanjing 210094 , China )

( Received 3 February 2007 ; revised manuscript received 10 April 2007 )

## Abstract

A novel force sensor based on optical beam deflection was developed to investigate the mechanical effects during the pulsed laser ablation of a metal in liquids with different viscosities. The experimental results show that the targets in viscous liquids are affected by laser-generated ablation force and high-speed liquid-jet impulse induced by bubble collapse. In the same liquid, the amplitudes of the three kinds of forces increase with the increase of laser energy. With the increase in viscosity, the amplitudes of all three forces decrease, and the cavitation erosion is reduced. Larger viscosities make the bubble expand or contract more slowly, and bubble life-time becomes larger. Besides, the Rayleigh equation was revised, and the results are in good agreement with the experimental data.

**Keywords** : liquid jet impinging force , viscosity , cavitation erosion , bubble life-time

**PACC** : 4755C , 4755B

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60578015 ), the Teaching and Research Award Program for Outstanding Young Professor in Higher Education Institute. MOE , China and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China ( Grant No. 20050288025 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : lujian@mail.njust.edu.cn