

文章编号: 1001-3806(2007)03-0281-04

## 激光空泡溃灭辐射声波声谱特性研究

李胜勇<sup>1</sup>, 胡生亮<sup>1</sup>, 刘晓然<sup>2</sup>, 沈中华<sup>3</sup>, 倪晓武<sup>3</sup>, 金嘉旺<sup>1</sup>

(1. 海军工程大学 电子工程学院, 武汉 430033; 2. 海军指挥学院, 南京 211800; 3. 南京理工大学 应用物理系, 南京 210094)

**摘要:** 为了对高功率激光与液体物质作用时产生的激光空泡溃灭辐射声波的声谱特性进行实验研究, 采用压电陶瓷水听器测量了不同情况下的激光空泡溃灭声波, 对采集的信号经过傅里叶变换后得到相应的声谱进行谱分析。结果表明, 激光空泡半径大小对应着不同的声波频率, 泡半径大的, 声波频率较低。这一结果对空化噪声的理论与应用研究是有帮助的。

**关键词:** 激光技术; 激光空泡声波; 声谱特性; 压电陶瓷水听器

**中图分类号:** O434.14 **文献标识码:** A

## Spectrum properties of laser-induced cavitation bubble collapse sound waves

LI Sheng-yong<sup>1</sup>, HU Sheng-liang<sup>1</sup>, LIU Xiao-ran<sup>2</sup>, SHEN Zhong-hua<sup>3</sup>, NI Xiaowu<sup>3</sup>, JIN Jiawang<sup>1</sup>

(1. College of Electronics Engineering Naval University of Engineering Wuhan 430033, China; 2. Naval Command College, Nanjing 211800, China; 3. Department of Applied Physics Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract** The laser induced cavitation bubble collapse sound waves during the high power laser and matter interaction in liquid were experimentally investigated. Laser induced cavitation bubble collapse sound waves at different conditions were measured with a piezoelectric transducer hydrophone in the experiments and the signals of sound waves were analyzed based on fast Fourier transform. The investigation results showed the frequency varied with the radius of laser-generated bubble i.e. the bigger the radius and the lower the frequency. The results are valuable for theoretical and practical research in cavitation noise.

**Key words** laser technique; laser induced cavitation bubble collapse sound waves; property of spectrum; piezoelectric transducer hydrophone

### 引 言

空化是流动液体或软组织中一种特有的物理现象, 它是由于液体中局部压力低于该温度下的饱和蒸气压所产生的一种动力学现象。长期以来, 空化现象在工程实际中引起诸多问题: (1) 改变液体的水动力作用, 降低机械效率; (2) 产生空蚀。在水利机械、泄水建筑物以及其它高速流水设备方面, 空蚀常会引起设备系统降低效率, 剥蚀破坏甚至不能正常运行; (3) 辐射空化噪声。空化噪声是舰船、潜艇及鱼雷之类水中武器的主要噪声源, 空化噪声降低了水中兵器自身的隐蔽性并且干扰其水声探测设备的性能。这些问题促使人们对空化现象进行了大量研究。其中, 探讨空化噪声特性已经引起了许多学者的兴趣, 进行了大量的研究<sup>[1~5]</sup>。

为了直观地显示空泡溃灭的过程, 从上世纪 60 年代末期开始利用电解泡、火花泡来做空泡溃灭的实验。但是利用这些方法产生的空泡缺乏球对称性, 仅可以用来观察空泡溃灭的大致情形而不能进行定量研究。自从利用激光产生空泡后 (激光泡相比较于火花泡、动力泡等具有球对称性好、可控性好及无机机械形变的特点), 空泡溃灭的试验才得到较大的发展。通常, 空泡在经历了一系列膨胀、收缩、反弹并伴随着若干次冲击波辐射之后, 泡能最终将全部耗散, 并对外辐射出声波<sup>[6]</sup>。作者利用中国科学院声学所特制的高频响应压电陶瓷水听器 (piezoelectric transducer PZT) 测量了空泡溃灭过程中辐射的声波。经过声谱分析, 进而得出了激光空泡半径大小对应着不同的频率, 泡半径大的, 频率较低的结论。这一研究结果不仅可以促进空化噪声研究的深入, 从而避免空化噪声可能带来的危害; 同时, 也可以为军事领域对激光空泡溃灭时对外辐射的声波进行合理利用提供依据。

### 1 实验条件与装置

在无界域流场中激光与水作用产生空泡的实验装

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60578015); 海军青年研究基金资助项目 (2004)

作者简介: 李胜勇 (1976), 男, 讲师, 主要从事光电对抗研究。

E-mail: lsy929@163.com

收稿日期: 2006-03-31; 收到修改稿日期: 2006-06-05

置见图 1。调 Q 固体 Nd:YAG 脉冲激光器 1 (Continuum Surelite-II) 输出波长 1.064 μm, 脉宽 10 ns, 最大能

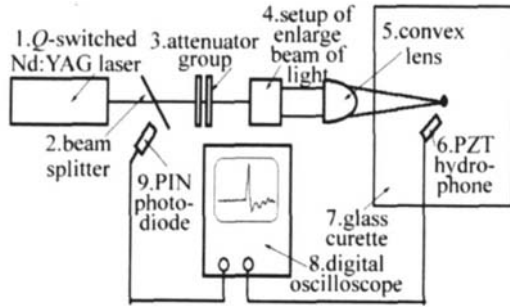


Fig 1 Schematic diagram of experimental setup

量 500 mJ 的单模激光脉冲; 脉冲激光经过波片 2 和衰减片组 3 之后, 采用光学扩束准直装置 4 以增大会聚角, 由透镜 5 (焦距为 147 mm) 聚焦。激光聚焦光斑尺寸约为 0.3 mm。衰减片组是为不改变激光输出模式的情况下用来调节激光输出能量。PN 光电二极管 9 (上升时间 100 ps) 用来接收波片 2 的部分反射光作为示波器记录冲击波波形的计时零点。声波探测器 6 采用中国科学院声学研究所研制的 PZT 探针式水听器, 数字式存储示波器 8 (Tek-TDS340) 记录水听器探测到的声波信号。在同一测量点处共进行 4 次声波信号的重复测量, 4 次激光脉冲能量的相对误差小于 1%。实验时为了减小焦点附近汽泡和杂质的影响, 相邻两次激光脉冲的时间间隔大于 10 s。

激光与水下物质作用产生激光泡的装置, 与图 1 基本相同, 只是在焦点位置放置不同的作用物质。将采样得到的声波信号通过傅里叶变换 (Fast Fourier transform, FFT) 就得到相应的声谱。

## 2 实验结果

采用图 1 的实验装置测量空泡脉动过程中对外辐射的声波如图 2 所示, 其中作用激光能量为 350 mJ 水

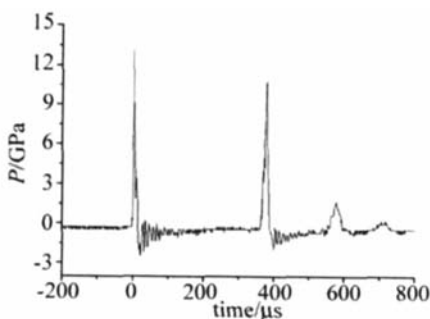


Fig 2 Typical signal of the sound

听器距焦点 2 mm, 利用给定的水听的灵敏度可将水听器输出的电信号转换为相应的声压信号, 图中第 1 个峰对应等离子体产生与膨胀过程中辐射的声波, 第 2 个峰对应空泡第 1 次溃灭辐射的噪声, 第 3 个峰对应空泡第 2 次溃灭辐射的声波, 第 4 个峰对应空泡第 3

次溃灭辐射的声波。表 1 列出了空泡 3 次脉动特征参数值, 由表 1 可见, 对于不同振荡过程, 最大泡径、最小

Table 1 Parameters of three bubble oscillation<sup>[7]</sup>

	first oscillation	second scillation	third oscillation
maximal bubble radius $R_{max}/mm$	2.60	1.10	0.85
minimum bubble radius $R_{min}/mm$	0.63	0.36	0.25
bubble oscillation duration $T/\mu s$	540	208	170
bubble energy $E/mJ$	7.34	0.56	0.26

泡径以及各次振荡周期均随脉动次数的增加而减小, 并且前两次脉动中空泡特征参数衰减幅度均超过 50%; 对于同一振荡过程, 实际泡壁收缩速度要快于膨胀速度, 尤其在空泡溃灭后期。另外, 由于空泡溃灭所引起的冲击波辐射和产生射流, 以及周围液体粘滞力的作用, 造成了大量泡能的耗散, 因此, 空泡在第 2 次收缩末期所剩泡能仅占第 1 次脉动泡能的 7%。由此可见, 在空泡整个运动过程中, 大部分泡能主要集中在第 1 次脉动过程中。因此, 可以认为研究空泡声波效应主要考虑空泡的第 1 次脉动过程。

由于激光脉冲为纳秒量级且周围水介质为静止的, 因此认为第 1 个峰与第 2 个峰之间的时间间隔代表空泡第 1 次生存周期  $T_1$ , 第 2 个峰和第 3 个峰之间的时间间隔代表空泡的第 2 次生存周期  $T_2$ <sup>[8]</sup>。由于空泡生存周期等于空泡溃灭周期  $T_c$ 。由图 2 可以读出空泡的溃灭周期; 根据瑞利<sup>[9]</sup>推导的公式可以求出空泡的最大泡半径  $R_{max}$ :

$$R_{max} = T_c / \{0.915 [\rho / (p_\infty - p_0)]^{1/2}\} \quad (1)$$

式中,  $R_{max}$  为最大泡半径;  $p_\infty$  为液体静压力;  $p_0$  为初始时刻泡外壁液体的压力;  $T_c$  为空泡收缩持续时间;  $\rho$  为液体密度。

但是, 固壁面的存在使上面计算泡最大半径的表达式不再有效。为了考虑固壁面的影响, 必须乘上延长因子  $K$  进行修正。利用空泡波形的周期计算空泡的最大半径的公式转化为:

$$R_{max} = T_c / \{0.915 [\rho / (p_\infty - p_0)]^{1/2} \cdot K\} \quad (2)$$

式中,  $K$  为延长因子。

## 3 激光泡特性

图 2 为在无界域流场中, 波长为 1064 nm 的激光作用所得到的声波波形。改变激光能量, 得到不同能量情况下的波形图, 将图中读出的生存周期分别带入 (1) 式, 可计算得到空泡所对应的最大泡半径, 得出激

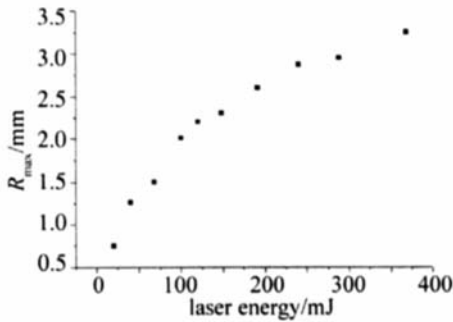


Fig 3 Transfer relation of max radius with laser energy

光泡半径随能量变化的关系图 3。从图中可以看出: 在第 1 次脉动过程中, 激光能量从 51mJ 增大到 400mJ 空泡最大泡半径从 0.7mm 增大到 3.34mm。呈现出这么一种规律: 随着作用激光能量的增加, 空泡第 1 次脉动的最大泡半径呈增加的趋势, 即与作用激光能量近似成线性变化关系。

图 4 和图 5 是激光作用能量为 100mJ 波长为 1064nm 与波长为 532nm 的激光分别在无界域流场中的声波波形。从中可以看出, 波长为 532nm 的激光空

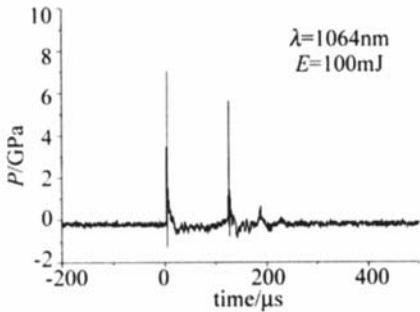


Fig 4 Diagram sound wave

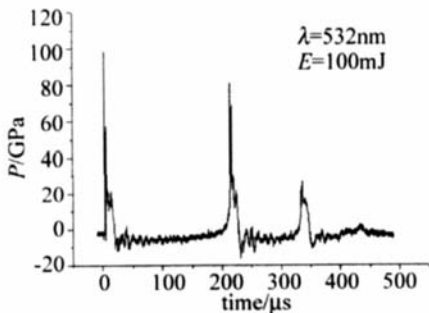


Fig 5 Diagram sound wave

泡生存周期为 220μs, 明显大于波长为 1064nm 的激光泡的生存周期 120μs。这样, 通过 (1) 式计算, 可算出波长为 532nm 的激光空泡的最大泡半径  $R_{max} = 2.4mm$  比 1064nm 的激光空泡最大泡半径  $R_{max} = 1.31mm$  的相应值要大。虽然 532nm 的激光在水中的吸收很小, 基本上是透过窗口, 但损耗也小; 而 1064nm 的激光传输损耗太大, 用于产生激光泡的作用激光能量自然就小多了, 所以就出现了这种现象。可以说 532nm 的激光在水下产生激光泡辐射声波的效率更高一点。

图 6 和图 7 为  $\lambda = 1064nm$  激光在能量为 350mJ

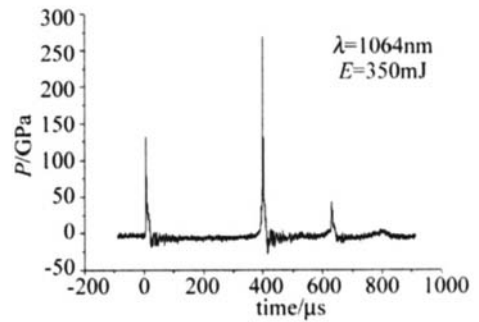


Fig 6 Sound wave nearby Al

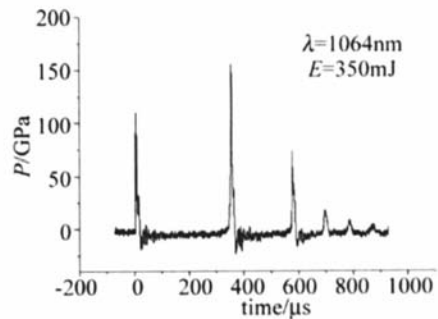


Fig 7 Sound wave nearby Cu

时分别作用于固壁面 A 和 Cu 的情况, 图中看出 A 的空泡生存周期为 400μs, Cu 的生存周期为 380μs, 这两者的生存周期均比无界流场中的 250μs 要大, 实验证明了固壁面的存在使空泡生存周期延长。固壁面存在时, 计算空泡半径时需要乘上延长因子加以修正, 实验过程中, 固壁面均在焦点附近, 泡心也在固壁面的附近, 取延长因子为  $1.6^{[10]}$ , 根据 (2) 式, 计算出在相同激光能量作用下, A1 和 Cu 的最大泡半径分别为 2.73mm 和 2.6mm, 最大泡半径差别不大。

由于 Al、Cu 的第 1 离化能分别为 5.97eV, 7.72eV, 离化能越大, 激光产生等离子体消耗的能量也就越大, 转化为激光泡的能量就减小了, 所以与 A1 作用比与 Cu 作用产生的激光泡生存周期要长。也可以说, 金属表面离化能越小的, 激光泡的生存周期也就越长, 激光泡半径也相应增大。

#### 4 激光泡声谱特性

将图 2 对应于空泡第 1 次脉动辐射的声波的过程放大就可以得到图 8 所示的典型空泡溃灭辐射声波波

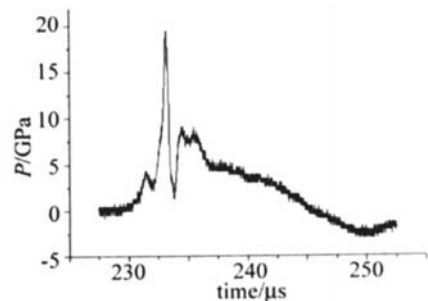


Fig 8 Typical sound wave of the first bubble collapse

形。将采样得到的声波信号通过傅里叶变换就得到相应的声谱图。

#### 4.1 改变作用激光能量

波长为 1064nm 的激光在不同能量作用得到频谱图,见图 9。从频谱图可以看出,随着能量的增加,频谱峰值频率有逐渐下降的趋势。

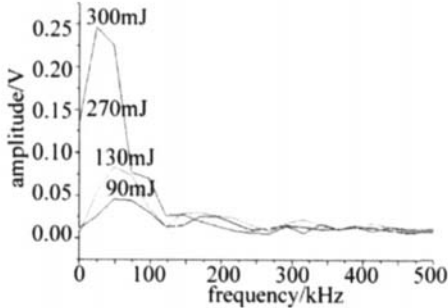


Fig 9 Sound wave spectrum of laser-generated bubble with various energy

#### 4.2 改变作用激光波长

能量为 100mJ 波长为 1064nm 与波长为 532nm 的激光分别在无界域流场中作用产生激光泡声波频谱分布(见图 10)。从频谱图中看出,1064nm 激光作用

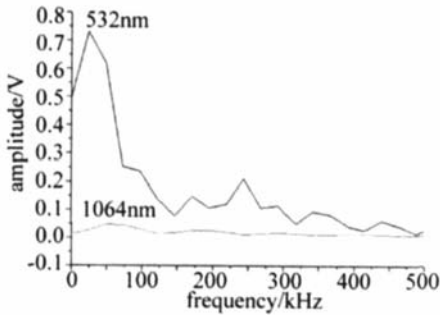


Fig 10 Spectrum of sound wave generated by various wavelength

时峰值频率较高,在 50kHz 左右,而声波幅度较小;532nm 激光作用时峰值频率较低,在 25kHz 左右,而声波幅度比较大。这是由于波长为 532nm 的激光作用时,相对于波长为 1064nm 作用时产生的激光泡生存周期更长,这样产生的激光空泡半径更大,所以峰值频率也更低。

#### 4.3 改变金属固壁面

将激光能量稳定在 230mJ,分别与 Al、Cu、Fe 作用产生空泡,在此能量下,3 种空泡生存周期分别为 330 $\mu$ s, 320 $\mu$ s, 300 $\mu$ s, 生存周期差别不大,这样由(2)式计算的空泡最大泡半径差别不大。从图 11 中也可以看出,在能量相同的情况下,3 种金属频谱分布差别不大,频率峰值基本相同。

从频谱分布可以看出,在相同激光能量作用时,固壁面附近空泡峰值频率相对无界域流场并没有太大变化。虽然固壁面的存在,使空泡生存周期延长,但空泡半径并没有发生太大的变化。但由于 Al、Cu、Fe 表面

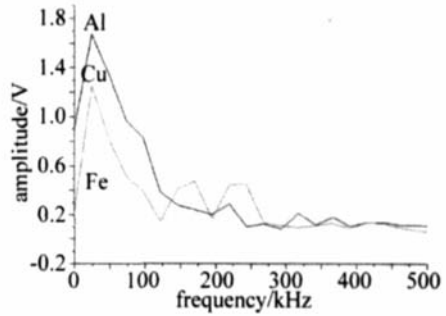


Fig 11 Spectrum of laser working on the various iron

离子能由小到大变化,所消耗激光能量也由少到多,从而转化为泡能的激光能量逐渐减小,所以峰值幅度有变小的趋势。

## 5 结 论

采用 PZT 水听器探测了空泡溃灭辐射的声波,通过分析,在激光泡整个运动过程中,大部分泡能主要集中在第 1 次脉动过程中,因此,主要研究空泡的第 1 次脉动过程中辐射的声波,考虑泡半径与生存周期对声波的影响。对不同激光能量、不同波长和不同环境产生的激光泡声波进行了研究,并且对采样的数据经过 FFT 变换后进行了声谱分析。实验与分析结果表明:随着作用激光能量的增大,激光泡最大半径增大,声波峰值频率减小;波长 532nm 激光相对于相同能量波长为 1064nm 激光作用下,激光泡最大半径变大,声波峰值频率减小;波长为 1064nm 激光与不同金属固壁面作用时,激光泡最大半径相差不大,声波峰值频率也接近。根据上面的声波频率变化特点,可以得出结论,激光泡辐射的声波峰值频率与激光泡最大半径有关,激光泡半径大的,峰值频率低。以上研究结果有助于建立液体中光击穿条件下激光泡声波信号的物理模型,而这一方法对于进一步研究光声效应的机理和应用有着一定的意义。

## 参 考 文 献

- [1] VOGEL A, LAUTERBORN W. Acoustic transient generation by laser-produced cavitation bubble near solid boundaries [J]. *J Acoust Soc Amer* 1988, 84(2): 719~731
- [2] TOMITA Y, KODAMA T. Interaction of laser induced cavitation bubbles with composite surfaces [J]. *Appl Phys* 2003, 94(5): 2809~2815
- [3] KHATOV IA, LINDAU O, TOPOLNIKOV A *et al*. Collapse and rebound of a laser induced cavitation bubble [J]. *Physics of Fluids* 2001, 13(10): 2805~2819
- [4] KODAMA T, TOMITA Y. Cavitation bubble behavior and bubble-shock wave interaction near a gelatin surface as a study of in vivo bubble dynamics [J]. *Appl Phys* 2000, B70: 139~149
- [5] NIX W, CHEN X, LU JI. Study on the mechanism of interaction between laser and liquid material [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(4): 258~261 (in Chinese).

是一个快速加热快速冷却的过程,这一过程必然对材料的显微组织有影响,反之从金相的变化情况也可以推测热作用的过程,为此研究了焊接后的焊缝金相,见图 10。从熔区的显微组织可看到,组织分布更加致

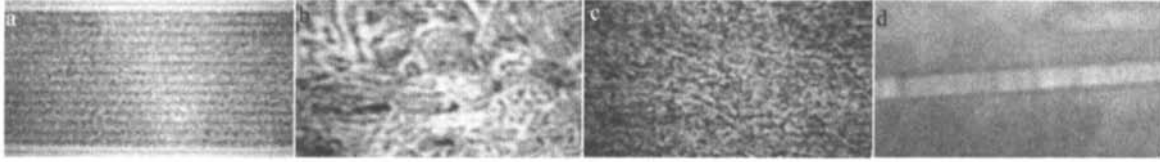


Fig 10 The photograph of microstructure

a—welding line section 16 $\times$  b—transition zone 2000 $\times$  c—welding line zone 500 $\times$  d—welding line

减小,与模拟结果定性进行比较,可发现两者是一致的。

采用热电偶测量工件表面的瞬态温度值,选取实验板上的 A 点作为热循环测试点。限于实验条件,本实验中未能测出激光光斑中心处熔池的温度。如图 9 所示,图 9a 为模拟结果,图 9b 为实验中每隔 0.36s 采集一个数据所绘出的温度时间曲线,从图 9a 图 9b 对比可以看出,其走势和极值都较为一致,说明模拟结果与事实情况是符合的。对于实验结果与模拟结果的差异,主要有以下几方面的原因:模拟时材料是处于理想状态的,各相关参数都是理论值,没有能计入实际材料可能存在的偏差,如材料的密度不均匀,导热不是严格的各向同性,辐射与对流散热,材料对激光能量的吸收与时间和温度有关等情况,综合造成模拟结果与实验结果稍有差异。在以后的模拟工作中还需要在这些方面加以改进,以使模拟更贴近实际情况,得到更精确的模拟结果。

#### 4 结束语

借助于大型通用有限元软件 ABAQUS 对高斯分布热源作用下的激光焊接温度场进行了有限元分析。通过模拟值与实测值相比较,验证了运用 ABAQUS 对激光焊接温度场模拟的结果是正确的,可以将模拟结果用于指导实验与生产。

#### 参 考 文 献

[1] LID Q, MEN Q G, TAO J. Modeling and numerical simulation of dynamic displacement field of welding [J]. *Welding & Joining* 2002

密、均匀,没有缺陷,呈现出枝条状组织结构,表明由于焊接过程中的快速加热和快速冷却,原基体组织纯化作用和重新结晶,有部分马氏体产生。由焊缝断面的照片看,激光焊接的热影响区很窄,并且由上到下逐渐

(2): 13~15 (in Chinese).

- [2] XUE Zh M, GU L, ZHANG Y H. Numerical simulation on temperature field in laser welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution* 2003, 24(2): 79~82 (in Chinese).
- [3] ZHANG W H, ZHOU J, TASHI L. Numerical modeling of keyhole dynamics in laser welding [J]. *Proc SPIE*, 2003, 4831: 180~185.
- [4] XU J H, LUO Y M, ZHANG Zh. Numerical simulation and parametric study for the heat transfer in keyhole high power density welding process [J]. *Journal of Southeast University*, 1999, 29(11): 62~67 (in Chinese).
- [5] BRUGEMANN G, MAHRLE A, BENZIGER T. Comparison of experimental determined and numerical simulated temperature fields for quality assurance at laser beam welding of steel and aluminum alloys [J]. *Elsevier Science* 2000, 10(33): 453~463.
- [6] LI J Ch, LIX Y, CHEN Q H. Fast calculation of thermal action of actual beam during the laser heat treatment [J]. *Chinese Journal of Materials Research* 1998, 12(3): 262~266 (in Chinese).
- [7] ZHANG Y K, ZHONG Zh J, YE Y X. *Laser processing technics* [M]. Beijing Chemical Industry Press, 2004. 73~74 (in Chinese).
- [8] AMARA E H, MEBANIN, ALLALOU N *et al*. Numerical thermodynamic field modeling of a metallic substance during laser welding [A]. *Proceedings of the CAOL 2005 2nd International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers* [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE Place of Publication, 2005. 146~154.
- [9] LIU Sh H, WAN P T, HU L G. Study on numerical of the temperature field in laser welding of steel sheet [J]. *Electric Welding Machine* 2001, 31(8): 16~19 (in Chinese).
- [10] HUA Y Q, WANG Zh Sh, YANG J Ch. The research on the experiment of laser welding for A3 thick steel plate [J]. *Applied Laser* 2005, 25(4): 230~232 (in Chinese).
- [11] ZHOU Y Y, HU Ch K, CHEN P F. The laser welding of the double-linked gear in automobile gear box [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(4): 445~448 (in Chinese).

(上接第 284 页)

- [6] SHIMA A. Studies on bubble dynamics [J]. *Shock Waves* 1997(7): 33~42.
- [7] CHEN X, XU R Q, SHEN Zh H *et al*. Experimental and theoretical study of the oscillation of a laser-induced bubble [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2005, 32(5): 331~335 (in Chinese).
- [8] VOGEL A, BUSCH S, PARLITZ U. Shock wave emission and cavitation on bubble generation by picosecond and nanosecond optical breakdown

in water [J]. *J Acoust Soc Amer*, 1996, 100(1): 148~165.

- [9] XU R Q, CHEN X, SHEN Zh H. Dynamics of laser-induced cavitation bubbles near solid boundaries [J]. *Acta Physica Sinica* 2004, 53(5): 1413~1418 (in Chinese).
- [10] QI D M, LU Ch J, HE Y Sh. Experimental investigation of cavitation collapse noise [J]. *Acta Acustica*, 2000, 25(6): 532~536 (in Chinese).