



## 液体辅助激光加工过程中压力检测及应用研究进展

曹州权<sup>1</sup>, 谢小柱<sup>1\*</sup>, 陈蔚芳<sup>2,3</sup>, 魏昕<sup>1</sup>, 胡伟<sup>1</sup>, 任庆磊<sup>1</sup>

<sup>1</sup>广东工业大学机电工程学院, 广州 510006; <sup>2</sup>南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

<sup>3</sup>江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 南京 210016

**摘要:** 液体辅助激光加工是一种复合制造技术, 凭借其特有的特点及优势, 在相关领域受到广泛的关注和应用, 同时也成为激光与液体介质相互作用研究领域的一大热点。本文综述了液体辅助激光加工过程中冲击波和高速微射流的压力研究现状, 简述了液体辅助激光加工过程中压力现象产生的机理、压力的基本特征以及影响压力的因素, 重点介绍了液体辅助激光加工过程中产生的冲击波、微射流等冲击压力的检测方法和最新研究进展, 并对各检测方法的特点做出总结。最后介绍了液体辅助激光加工在相关领域的应用, 并对该技术的发展前景作出展望。

**关键词:** 液体辅助激光加工; 压力检测; 冲击波; 微射流

中图分类号: TN249; TG665

文献标志码: A

## Research progress of pressure detection and applications in liquid-assisted laser machining

Zhouquan Cao<sup>1</sup>, Xiaozhu Xie<sup>1\*</sup>, Weifang Chen<sup>2,3</sup>, Xin Wei<sup>1</sup>, Wei Hu<sup>1</sup> and Qinglei Ren<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; <sup>2</sup>School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; <sup>3</sup>Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing 210016, China

**Abstract:** Liquid-assisted laser machining is a composite manufacturing technology. Depending on its unique characteristics and advantages, it already has been received widely attention and applications in the field of manufacturing. The technology has become a hot spot in the interaction between laser and liquid medium. In this paper, the research status of shock wave and high-speed micro-jet pressure in liquid-assisted laser process is reviewed. The mechanism, the basic characteristics of pressure and the factors that affect the pressure in the process of liquid-assisted laser machining are resumed. The research method and the latest progress of the pressure phenomenon in the laser wet machining are mainly introduced. The advantages and disadvantages of these pressure detection methods are summarized. Finally, the applications of liquid-assisted laser machining in related fields are introduced and the prospects of this technology are summarized.

**Keywords:** liquid-assisted laser machining; pressure detection; shock wave; micro-jet

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.04.001

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(4): 381-392

### 1 引言

随着激光行业的不断发展, 激光制造技术在航空

航天、汽车制造、智能设备和生物医疗等领域得到了广泛的应用, 具有不可替代的地位。激光加工作为一种特种加工方法, 能够加工各种高硬度、高熔点等难加工材料, 加工精度高, 属于非接触加工且污染小, 很容易实现自动化和智能化生产。根据激光加工过程中有无液体加入, 激光加工可分为激光干式加工和液

收稿日期: 2017-01-16; 收到修改稿日期: 2017-03-07

\*E-mail: xiaozhuxie@gdut.edu.cn

体辅助激光加工。激光干式加工是通过高能量密度的聚焦激光束辐照到工件表面,由于表面温度升高使得材料表面熔化、气化和产生等离子体来实现材料去除。液体辅助激光加工则是在激光加工工件表面施加液体,或者将加工工件放于液体环境中,然后再使激光聚焦于工件与液体的液固表面进行加工<sup>[1]</sup>。加入液体通常是为了增强激光加工效率,或者利用液体的加入产生特殊物理现象以及化学反应,从而达到特殊的加工效果<sup>[2]</sup>。

研究发现在液体辅助激光加工过程中,液体对加工区域有冷却和清洗作用,使得加工工件的热影响区小、热应力减小且切口整齐干净,在加工热敏感材料、高硬脆材料以及高精度要求材料领域具有独特的优势。但是由于加工过程中液体的引入,激光与加工工件相互作用的同时,还与加入的液体物质发生作用,导致加工过程复杂化,甚至加工机理也会发生改变,加工过程难以控制。有研究者<sup>[3]</sup>通过实验及模拟仿真发现,在液体辅助激光加工的过程中伴随着压力现象的产生,并认为压力现象的存在,对加工工件的质量具有很大的影响。为了探测液体辅助激光加工这一过程,以及更好的掌握和控制这一项技术,众多研究者对该加工过程中压力现象进行研究,已成为激光复合加工领域的一个研究热点。

本文首先简要地概述液体辅助激光加工过程中产生压力现象的机理以及该压力的基本特征,重点内容将聚焦于液体辅助激光加工过程中压力现象这一领域的研究方法和最新进展,并介绍了液体辅助激光加工在相关领域的应用,最后对当前研究中存在的问题以及该技术的发展前景进行展望。

## 2 液体辅助激光加工过程中的压力现象

### 2.1 产生压力现象的机理

液体辅助激光加工过程中,由于有液体的存在,当激光作用于液固交界面时会伴随着一系列的声、光、热、机械效应等复杂物理过程<sup>[4]</sup>。当激光聚焦于液体中时,若激光能量密度超过液体的击穿阈值,首先在激光聚焦的液体区域内会发生光学击穿<sup>[5]</sup>。然后会产生高温高压的等离子体,在击穿区域会产生与激光入射方向相反的扩展膨胀,并且将会形成一个等离子体腔体。由于等离子体对激光能量的吸收率比水介质要大很多,因此强激光脉冲的大部分能量将转化成等离

子体能<sup>[6]</sup>。该等离子体吸收后续的激光能量加剧对外膨胀,就会形成初期以超声速传播的冲击波,此冲击波遇到物体即会产生一定的冲击压力。等离子冲击波辐射后,等离子空泡开始转化为蒸汽状态空泡,产生空泡空化现象。通常空泡形成之后会经历一系列的膨胀、收缩、反弹等过程,并伴随着若干次冲击波辐射之后空泡能量将会全部消散<sup>[7]</sup>。一般当空泡收缩到最小体积后,空泡溃灭将会产生最强的冲击压力。如果空泡周围存在固体壁面,则在空泡溃灭阶段还将产生高速射流现象<sup>[8]</sup>,其射向物体时也会产生一定的水击压力。Naudé<sup>[9]</sup>和 Benjamin<sup>[10]</sup>分别于1961年和1966年在实验室中首次观察到了射流现象。Benjamin通过研究指出,固壁的存在导致空泡表面会形成一个压力梯度,该压力梯度力将致使空泡中心向固壁面移动,并形成指向固壁的微射流。通过实验观测空泡在固壁面溃灭时形成微射流有三种模式<sup>[11]</sup>,如图1所示。在液体辅助激光加工过程中一共有两种类型的压力形成,一种是等离子体和空泡脉动过程形成的冲击波压力,另一种是空泡在壁面附近溃灭形成高速微射流的冲击压力。

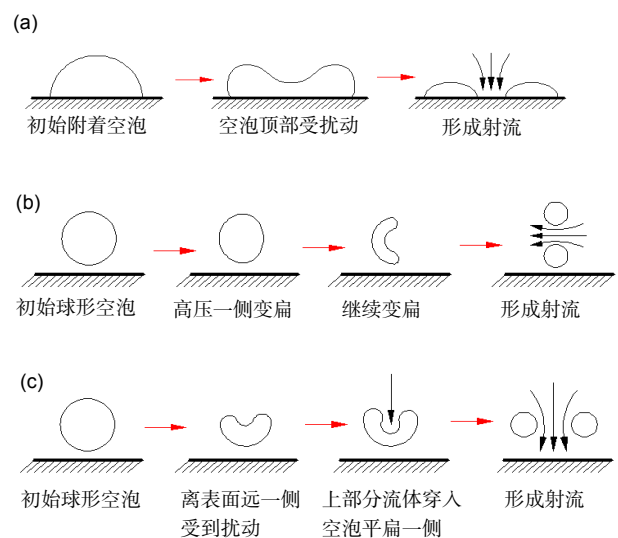


图1 微射流形成的三种模式<sup>[11]</sup>。(a)附着壁面的半球形空泡射流。(b)移入压力梯度区的空泡射流。(c)近壁面的空泡射流。

Fig. 1 The three modes of micro-jet formation<sup>[11]</sup>. (a) The jet formed by a hemispherical cavity attached to the wall. (b) The jet formed by a cavity entering a gradient pressure region. (c) The jet formed by cavity near the wall.

### 2.2 液体辅助激光加工过程中的压力基本特征

液体辅助激光加工过程中产生的是瞬时压力。其

压力的大小、方向、衰减速度以及作用时间等基本特征与激光的单脉冲能量、液体的性质、激光聚焦点到固壁面的距离等因素有着很大的关系。通常等离子体冲击波压力是液体辅助激光加工中出现最早的动态梯度压力,激光能量越大,相应形成的等离子体能量越大,形成的冲击波也就越强。同时等离子体形成的冲击波衰减速度极快,形成之后将以超音速衰减为声波。之后产生空化效应,形成空泡。而空泡在生长与溃灭的过程中将会形成冲击波和微射流。由于空泡生长和溃灭的时间极短,空泡的一次脉动周期通常在  $100\ \mu\text{s}$  左右,而形成冲击波的作用时间在  $1\ \mu\text{s}$  左右,该冲击波压力上升和下降时间通常在纳秒级别,而且和等离子体冲击波一样,衰减速度极快。由于空泡的能量只占激光输入能量的很小一部分,压力传播范围也非常小。固壁附近形成指向固壁面的微射流,也具有相同的性质。通常液体辅助激光加工时形成的空泡半径比较小,因此微射流和冲击波压力的作用范围非常小。

### 2.3 影响压力的因素

1) 激光能量。激光能量是影响激光诱导压力大的主要因素。一方面,激光单脉冲能量直接决定等离子体及空泡的初始能量,这将影响等离子体及空泡脉动过程产生的冲击压力和空泡溃灭形成的高速微射流的水锤冲击压力。另一方面,等离子体以及空泡的形成都有一定阈值,如果激光能量太低将达不到液体的击穿阈值,不会有压力现象的出现。另外,微射流也具有阈值特性,这取决于空泡的能量,而激光能量对空泡能量起决定性因素。贺杰<sup>[12]</sup>通过设计入射激光与微射流压力实验得到,随着作用激光能量的增加,射流冲击力的幅值呈单调上升趋势。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冲击力也相应变大。

2) 液体的粘度。Popinet 与 Zaleski<sup>[13]</sup>通过对 Navier-Stokes 方程数值求解,就粘性对于固壁面附近空泡溃灭射流特性的影响进行了数值模拟研究,发现当粘性增加时,溃灭射流速度减小;粘性的影响力受到空泡大小和无量纲参量的影响。刘秀梅<sup>[11]</sup>采用基于光纤耦合的光束偏转测试系统进行了实验研究,并且采用有限差分法数值模拟去验证不同参量的液体对激光等离子体冲击波、空泡等物理现象及空泡溃灭后期产生的射流对固壁面的冲击作用,结果表明液体粘性将减缓空泡膨胀和收缩过程,减小靶材所受射流冲击力,因而对空化起抑制作用。韩冰<sup>[14]</sup>通过对粘性空泡

模型数值求解,研究发现粘性对于泡能的耗散作用,随空泡体积的减小而减弱;随粘性增加,其影响力增长放缓。

3) 表面张力的影响。液体表面张力将会阻碍泡壁的运动,其主要影响空泡初始和溃灭阶段。通常表面张力会加速空泡的溃灭过程,而对其膨胀过程则起延缓作用。有研究表明,表面张力愈大,空泡能达到的最大直径愈小,空泡溃灭的压强也愈大<sup>[11]</sup>。这是因为表面张力加速了空泡的收缩,缩短了空泡溃灭历时,增加了空泡溃灭速度,所以表面张力愈大对空泡溃灭所起加速作用愈大,其所产生的瞬时冲击力也愈大<sup>[15]</sup>。

4) 含气量。刘涛<sup>[8]</sup>采用强脉冲激光器设计液体含气量对激光空泡在刚性壁面空蚀的影响实验。实验研究发现,随着液体中相对空气含量的提高,激光空泡脉动的最大尺寸增大,空泡的膨胀运动变剧烈,溃灭运动速度降低,空泡的溃灭强度降低,从而影响到溃灭冲击波和壁面微射流对刚性壁面的冲击速度和冲击压力。Yang<sup>[16]</sup>研究发现,含气量增加会增强空泡的可压缩性,减小空泡脉动频率。同时,更高的初始含气量带来空泡更高的膨胀和溃灭速度,但是含气量过高会导致空泡失去稳定性。

5) 激光聚焦点到固壁面的距离。由于固壁面的存在,空泡溃灭时流体速度受到抑制,从而空泡面的上下表面形成一个压力差,使泡的中心位置向固体壁面移动,将产生穿透空泡并指向壁面的高速液体射流<sup>[16]</sup>。Vogel<sup>[17]</sup>等人发现射流强度和方向与泡心到壁面距离的无量纲数  $\gamma(\gamma=L/R_{\max})$ ,  $L$  为固壁面离泡心的距离,  $R_{\max}$  为最大泡半径)有密切关系。之后众多研究<sup>[18-20]</sup>表明无量纲数  $\gamma$  直接影响冲击波和微射流对固壁造成压力的大小。

## 3 激光诱导空泡压力现象的检测技术

### 3.1 摄影技术法

摄影技术其主要是基于空间分辨率的时间结构,从而获得二维图像的一种方法,其在激光诱导空泡空化现象研究领域使用非常广泛。随着技术的发展,现代高速摄影技术可获得分辨率较高的二维图像。通过高速摄影技术可以清晰地记录空泡的溃灭过程,通过图像的处理和分析可以得到冲击和微射流的速度<sup>[21]</sup>。而射流的冲击压力大小可以使用水锤压力公式(1)计算得到<sup>[22]</sup>:



$$p = \frac{v \cdot \rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2}, \quad (1)$$

式中:  $v$  为射流速度的大小,  $\rho_1$ 、 $c_1$  分别为液相的密度及声速。同样的,  $\rho_2$ 、 $c_2$  为对应固相的密度和声速,  $p$  为水锤压力。

宗思光等<sup>[23]</sup>采用高速摄影技术对激光击穿水、硅油、乙醇三种不同液体中的空泡拍摄,并通过图像处理技术算出了冲击波的传播速度以及变化规律。研究分析认为粘性系数越小的液体空泡溃灭时空泡速度越快,冲击波强度越大,空泡能量越容易转换为冲击波能量对外辐射。Yang<sup>[16]</sup>利用高速摄影机拍摄到 Nd:YAG 激光在固体附近诱导空泡形成微射流的过程,如图 2 所示。可以清晰地观察到,在空泡溃灭时形成了指向壁面的微射流。胡满凤<sup>[24, 25]</sup>通过高速摄影仪对激光背向湿式刻蚀蓝宝石过程中的空泡和微射流压力场分布进行研究,如图 3 所示。发现在激光背向湿式刻蚀过程中存在三股微射流,左右两股射流较小,中间那股射流强度较大,并由数值仿真验证了这一结果。

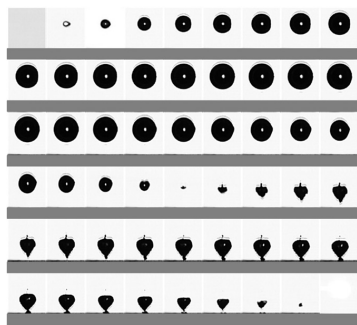


图 2 高速摄影机拍摄壁面附近的空泡<sup>[16]</sup>.  
Fig. 2 Bubble high-speed photography images near the wall<sup>[16]</sup>.

### 3.2 光偏转测量法

光偏转法测量是利用超声到达样品表面或沿样品表面传播时,样品表面的形状或反射率的改变导致反射光的位置或强度变化来实现的。光偏转的测试技术具有较高的时间分辨率,集合光学技术可使探测点具有较高的空间分辨率。南京理工大学对采用光偏转测量法对激光诱导空泡过程中产生的压力检测进行了深入的研究<sup>[26-28]</sup>。根据材料受力变形以及光偏转原理,由于压力的存在会使激光作用附近的材料背面发生微变形,从而引起照射在材料表面的探测光束偏折。通过光电探测器获取调制后的光信号的偏折量,即可分析得到冲击波和射流冲击力大小等信息,图 4 为光偏转法检测装置示意图。图 5 是采用光偏转法测量激光诱导空泡在固壁面附近溃灭的典型信号图。

赵瑞<sup>[18]</sup>采用基于光偏转原理的力学传感器对激光诱导的空泡在固壁面附近溃灭过程及其固体壁面的空蚀破坏机理进行了实验研究。发现微射流的产生以及射流冲击力的大小均由空泡泡能决定,当泡能低于一

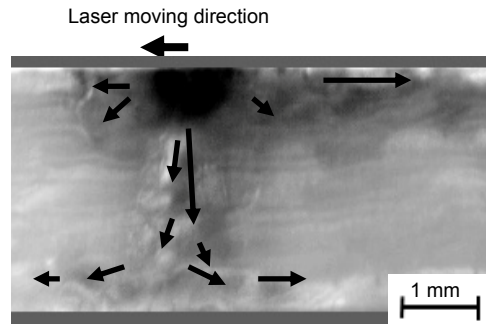


图 3 激光背向湿式刻蚀蓝宝石过程中流场分布<sup>[24]</sup>.  
Fig. 3 Flow distribution during laser-induced backside wet etching sapphire substrates<sup>[24]</sup>.

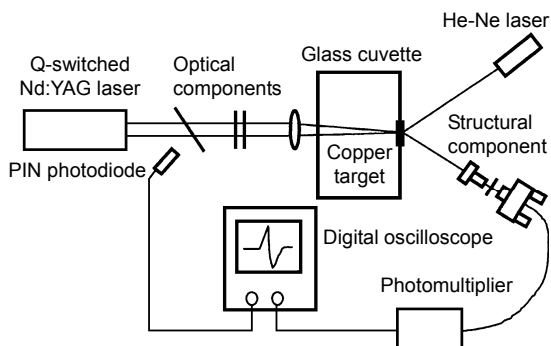


图 4 光偏转法检测装置示意图<sup>[27]</sup>.  
Fig. 4 Detection diagram of the probe beam deflection<sup>[27]</sup>.

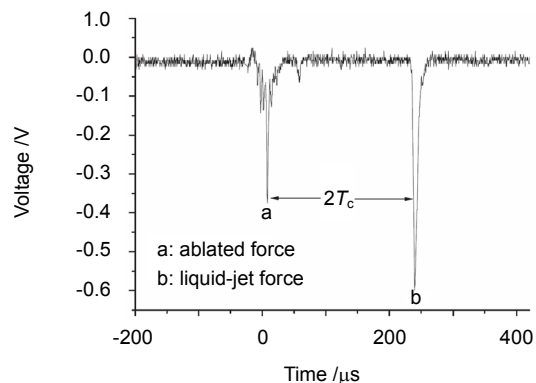


图 5 光偏转法检测的典型信号<sup>[15]</sup>.  
Fig. 5 A typical signal of the probe beam deflection<sup>[15]</sup>.

定值时空泡在溃灭过程中将不会产生微射流现象。且研究认为,射流和高压脉冲都是造成固壁空蚀破坏的主要因素,而空泡的无量纲数  $\gamma$  变化将影响高速射流和高压冲击波对固壁的作用效果。蒋红亮<sup>[29]</sup>采用光偏转法检测激光(激光单脉冲能量 30 mJ)得到高压冲击波和高速射流冲击压力信号,通过计算所受微射流冲击力的大小  $F=8.28$  N,换算成压力为 461 MPa,与 Lush<sup>[30]</sup>测得的射流压强值 450 MPa 接近,从而认为这高速射流会对绝大多数附近的固壁造成破坏。Li Beibei<sup>[31]</sup>等人为了研究环境压力对激光空泡的微射流的影响,采用光偏转检测技术研究空泡溃灭的过程,并得到了溃灭时产生的射流冲击压力。实验结果发现,随着环境压力的增加,空泡溃灭时间加快,微射流冲击压力呈非线性增加。

### 3.3 水听器探测法

水听器探测法是利用压电敏感材料的压电效应,将压力信号转换为电信号输出的一种检测方法,其在激光与液体作用产生声压信号的研究中比较常见。水听器可以直接将冲击波的波前压强转变为电压信号,然后输出电信号,该方法简单易操作。由于一定能量的激光聚焦在液体中时,不但会产生等离子体的声压冲击波信号,产生的空泡在生长与溃灭时同样会产生一定规律的声压信号,因此通过采用水听器探测激光作用于液体过程中产生的声压信号,可以清晰展现出不同时间段冲击波压力的变化规律,具有较高的时间分辨率。由于激光与液体作用辐射出的冲击波传播和衰减速度极快,对水听器的响应频率和灵敏度等性能要求比较高。目前在该研究领域使用的主要是压电陶瓷(PZT)水听器和聚偏氟乙稀(PVDF)水听器两种。

宗思光<sup>[32]</sup>采用高频水听器对激光击穿水介质过程的声压特性进行实验研究,得到激光击穿水介质过程中辐射出的声波信号,如图 6 所示。同时,还发现声压信号强度与入射激光能量具有一定的线性关系,如图 7 所示。通过改变水听器与激光聚焦点的位置,得到声压信号强度与击穿点距离关系图,如图 8 所示。李胜勇<sup>[33]</sup>等人通过 PZT 水听器获取粘性液体中激光空泡脉动辐射的声波实验结果发现,在入射激光能量不变的情况下,激光空泡脉动辐射声波的峰值频率有随着液体粘度的增加向高频移动的趋势。之后再采用中国科学院声学研究所定制的水听器对不同环境压强下激光空泡声波压力信号进行测量<sup>[34]</sup>,发现环境压强的改变影响了空泡生存周期和脉动的剧烈程度,但对声

波的强度和声谱分布没有影响。

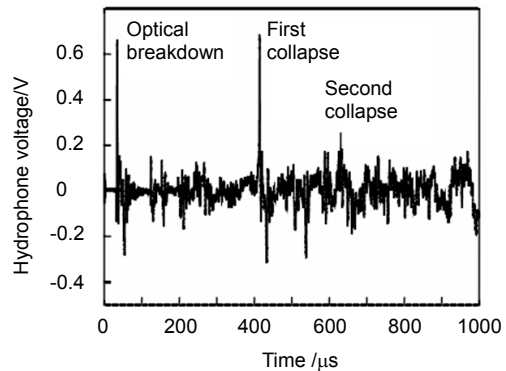


图 6 典型激光击穿水介质声辐射压力信号<sup>[32]</sup>。  
Fig. 6 Underwater pressure signal generated by laser-induced shockwave in the water<sup>[32]</sup>.

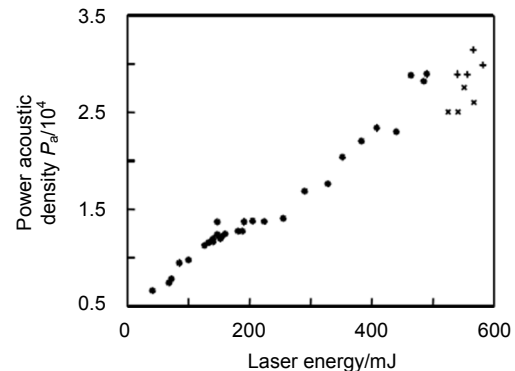


图 7 激光声信号强度与入射激光能量变化关系<sup>[32]</sup>。  
Fig. 7 Transfer relation of power acoustic density with laser energy<sup>[32]</sup>.

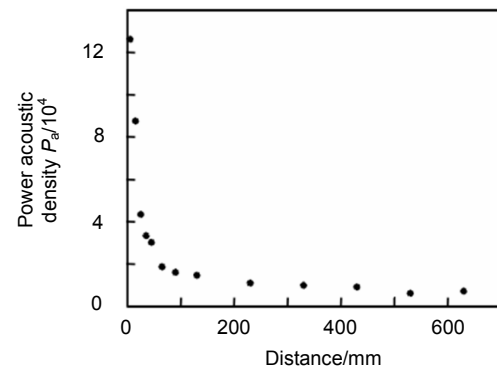


图 8 激光声信号强度与击穿点距离关系<sup>[32]</sup>。  
Fig. 8 Transfer relation of power acoustic density with distance<sup>[32]</sup>.

### 3.4 高频压电传感器检测法

高频压电传感器检测原理与水听器探测原理极其相似,都是利用压电敏感材料(如 PZT、PVDF 以及电气石晶体等)在压力作用下产生压电效应,从而检测到

压力基于时间变化的规律以及大小。高频压电传感器通常具有频响范围宽、灵敏度高、量程大的特点,校准以后可以直接对大量程的高频动态压力做检测。该传感器在激光诱导空泡空化研究领域使用较少,但是在研究水中爆炸冲击波以及空泡空化压力的领域应用广泛<sup>[35-36]</sup>。刘瑞军<sup>[37]</sup>采用 PVDF 压电传感器对激光冲击强化的冲击压力进行检测实验室,研究发现在同样的功率情况下,532 nm 波长激光器产生的冲击波峰值压力要比 1064 nm 波长激光器产生的大。本课题组为了研究激光背向刻蚀蓝宝石过程中压力现象,采用 PCB 公司的高频动态压力传感器(灵敏度 0.073 mV/kPa、固有频率大于 500 kHz、最大瞬时温度可以承受 1600 °C)搭建压力检测平台,对单脉冲激光作用于液体的压力信号及多脉冲激光背向刻蚀蓝宝石的压力信号进行检测。在研究单脉冲激光作用于液体的压力检测试验中,使用的激光单脉冲能量为 5 mJ,激光聚焦点距离传感器 4 mm,液体为水介质,采集信号如图 9 所示。

采集的压力信号曲线中可以看到有明显的两个脉

冲信号,信号间隔在 140  $\mu\text{s}$  左右,最大的压力在 1.2 MPa 左右。采用搭建的压力检测平台对多脉冲激光背向湿法刻蚀蓝宝石加工过程进行压力检测,采集信号如图 10 所示。其中使用的激光单脉冲能量 400  $\mu\text{J}$ ,频率 30 kHz,激光聚焦点距离传感器 2 mm,液体为硫酸铜混合液体。检测结果发现,在多脉冲激光背向湿法刻蚀过程中,激光作用点附近会出现一个压力场。同时,伴随复杂的脉冲冲击压力信号的出现,脉冲压力的大小在 1 MPa 左右,相邻的单个脉冲压力信号间隔为 40  $\mu\text{s}$  ~ 120  $\mu\text{s}$  之间。

以上介绍这几种常用的激光击穿液体介质过程的压力研究方法各有各的特点及优势。表 1 为这几种压力检测方法的优缺点。由于每种方法都有各自特点,许多研究者通常采用两种或这两种以上的方法对激光击穿液体介质过程的压力现象进行检测和研究,这样不但可以研究压力场的分布以及冲击波和微射流的作用方向,还可以实时分析压力的变化规律。最重要的是,多种方法一起使用可以起到相互验证、相互解释分析的作用。

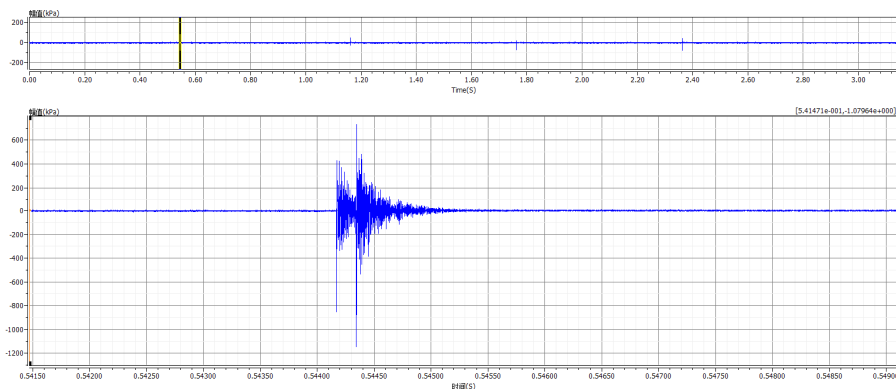


图 9 单脉冲激光作用于液体的压力信号。

Fig. 9 Pressure signal induced by single-pulse laser in the water.

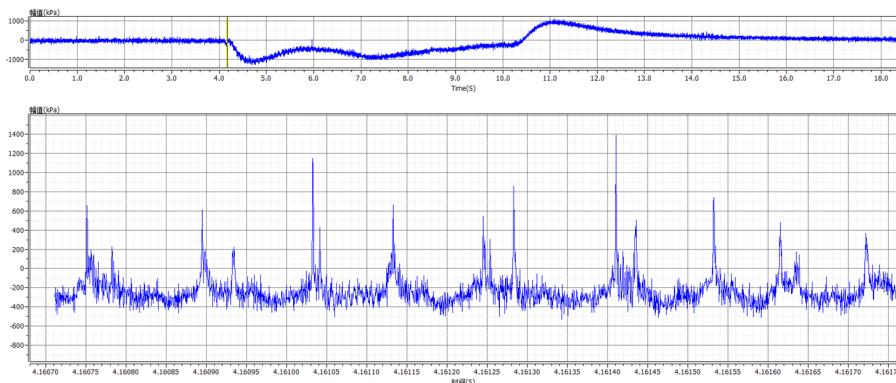


图 10 多脉冲激光背向湿式刻蚀蓝宝石的压力信号。

Fig. 10 Pressure signal by multi-pulse laser-induced backside wet etching sapphire substrates.

表 1 各种压力检测方法的特点.

Table 1 The characteristics of various pressure detection methods.

方法	优点	缺点
摄影技术法	可获得分辨率较高二维图像; 能够直观的观察空泡的脉动过程; 可以观测冲击波和微射流的运动及流场的分布	不能对压力进行实时观测和分析; 不适用于不透明的液体; 设备价格昂贵
光偏转测量法	频带宽, 量程大; 可以直接检测得到压力随时间变化的信号; 适合检测冲击波和微射流对固壁的作用力	灵敏度与可测试的频带存在矛盾; 误差较大
水听器探测法	尺寸小, 对原压力场扰动小; 频带宽, 灵敏度高; 可以进行点位压力检测	量程小, 只能探测弱冲击波和声波
高频压电传感器检测法	灵敏度高, 量程大; 能够在恶劣环境下工作; 能够直接输出压力随时间变化信号	存在原场干扰; 频带窄

## 4 应用

随着对激光与液体介质相互作用产生压力现象及机理的不断深入研究, 液体辅助激光加工技术在微纳制造、生物医学、表面处理等领域得到了广泛的应用。

### 4.1 微纳制造

随着科技产品不断向着精细精密和轻量化发展, 微纳制造逐渐成为制造行业研究的热点。激光制造技术可以达到纳米级的加工分辨率, 在微纳制造领域得到广泛应用<sup>[38]</sup>。

1) 微结构制造。液体辅助激光加工过程中, 由于有液体的辅助, 不仅起到冷却作用, 而且激光作用液体产生的冲击波以及微射流等压力现象, 对加工区域具有冲洗排屑的效果。Niino 等<sup>[39-41]</sup>采用激光湿式背向刻蚀的方法在石英表面上刻蚀出深宽比约为 6 的微沟

槽, 并通过控制激光光束的入射角, 成功制造了 60° 倾斜角的沟槽结构, 如图 11 所示。

图 12 为激光诱导背面湿法刻蚀(LIBWE)加工的图样和微流道工件。

高勋银等<sup>[42]</sup>基于激光诱导光化学沉积技术, 配置出对红外波长激光有较高吸收率的硫酸铜混合辅助溶液, 并采用激光背向湿式刻蚀方法对蓝宝石材料实现成型切割, 且加工零件表面质量较好, 无明显重凝和崩边现象, 如图 13 所示。

Kawaguchi 等<sup>[43]</sup>使用激光诱导背向湿式加工的方法对透明硬脆材料(例如石英玻璃、蓝宝石)进行微结构的加工研究, 并采用激光湿法背向刻蚀的方法在石英玻璃上加工出深 420 μm, 宽 7 μm, 深宽比达 60 的深沟槽, 如图 14 所示。采用其他方法很难加工出深宽比为 60 的微沟槽。

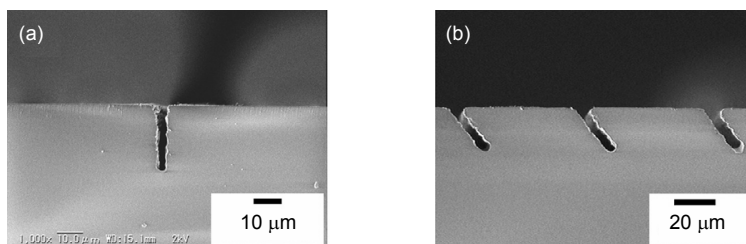


图 11 石英玻璃凹槽结构的横截面 SEM 照片<sup>[39]</sup>. (a) 垂直射入. (b) 斜射入.

Fig. 11 Cross-sectional SEM pictures of groove structures on silica glass<sup>[39]</sup>. (a) Vertical injection. (b) Oblique injection.

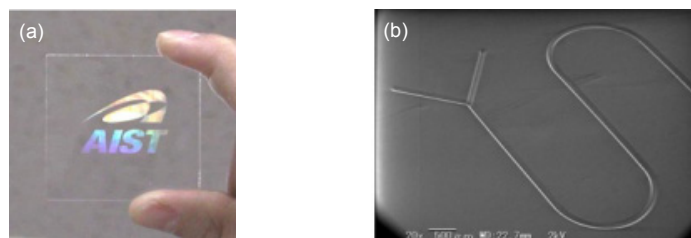


图 12 (a) 激光诱导背面湿法刻蚀加工图样<sup>[40]</sup>. (b) 微流道工件<sup>[40]</sup>.

Fig. 12 (a) Samples produced by LIBWE<sup>[40]</sup>. (b) Micro-fluidic channels<sup>[40]</sup>.



2) 微纳米颗粒制备。当一定能量的激光聚焦于液相介质中的固相靶材上时,将立刻导致材料表面融化和蒸发,同时瞬间产生局域超高温、超高压等离子体,汽化的材料与液相介质发生强烈的化学反应之后,又被周围液相介质超快速冷却,生成纳米颗粒。采用这种方法可用来制备和合成纳米颗粒材料,具有实验装置简单、操作方便、可重复性高、无污染等优点。此技术可以应用在金属、金属氧化物、半导体材料和有机物材料的纳米颗粒制备。图 15 为液体激光烧蚀的典型实验装置图<sup>[44]</sup>。

Liu 等人<sup>[45]</sup>在不同溶度 PVP 水溶液中采用纳秒激光制备出 FeO 纳米颗粒,并且发现随着 PVP 溶液的溶度增加,FeO 纳米颗粒直径逐渐减小。图 16 为 FeO 的 TEM 图。

何国庆<sup>[46]</sup>采用纳秒和皮秒脉冲激光器液相烧蚀制备 ZnO 纳米颗粒时发现,ZnO 纳米颗粒的尺寸随着激光能量的增加而减小。且皮秒脉冲激光制备的 ZnO 纳米颗粒比纳秒脉冲激光器制备的 ZnO 纳米颗粒直径更小。图 17 为激光液相烧蚀制备的 ZnO 粉末在不同的输出能量条件下测得的 AFM 图,其中图 17(a)、图 17(b)、图 17(c)分别对应的激光输出能量为 70 mJ、60 mJ、50 mJ,不同的激光输出能量制备的 ZnO 纳米

颗粒呈现的形状、大小和颗粒分布均匀度有所不同。Intartaglia 等<sup>[47]</sup>利用超短脉冲激光在水中制备的发光硅纳米颗粒,发现当飞秒激光的单脉冲能量从 0.4 mJ 减小到 0.15 mJ 时,硅纳米颗粒的尺寸从 65 nm 减小到 5.5 nm,且随着烧蚀的时间增加,纳米颗粒的产量也逐渐增加。另外,作者认为,在整个纳米颗粒的制备过程中,没有加入和使用任何有机物以及其他材料,这种“绿色”的硅纳米颗粒可以直接用于生物标记等应用。

#### 4.2 生物医疗

通过对激光与液体相互作用产生冲击波压力和高速微射流等物理现象不断深入研究,现已将该研究成果广泛应用于生物医疗领域,如激光虹膜切除、药物传输、白内障切除、激光碎石等应用。

Quinto-Su 等<sup>[48-49]</sup>利用激光诱导的空化气泡产生的冲击力和高速射流的压力对红细胞变形能力进行研究,并用高速摄像机记录了激光产生的单空泡和多空泡与红细胞相互作用的过程,如图 18 所示。通过该方法,分别检测了神经氨酸酶、麦胚凝集素和未经处理的三种红细胞的变形能力,研究发现麦胚凝集素能使红细胞强度增强,而神经氨酸酶能降低红细胞硬度,这与理论预测结果符合很好。

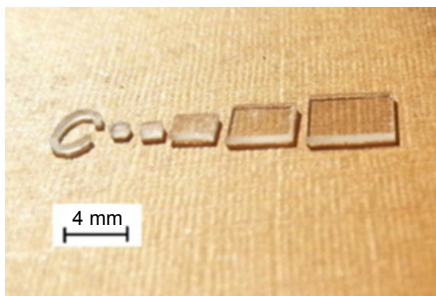


图 13 蓝宝石成型零件<sup>[42]</sup>。

Fig. 13 Sapphire molded parts<sup>[42]</sup>.

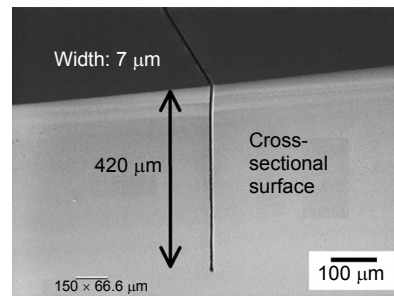


图 14 微沟槽横截面的 SEM 照片<sup>[43]</sup>。

Fig. 14 Cross-sectional SEM pictures of micro trench<sup>[43]</sup>.

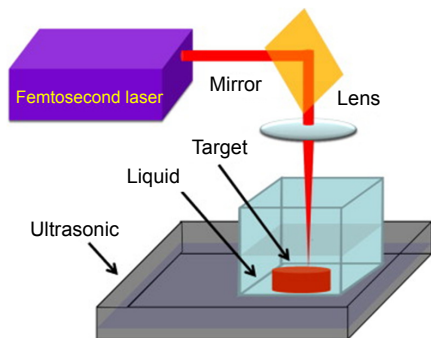


图 15 液体激光烧蚀的典型实验装置图<sup>[44]</sup>。

Fig. 15 Typical experimental setup for laser ablation in liquids<sup>[44]</sup>.

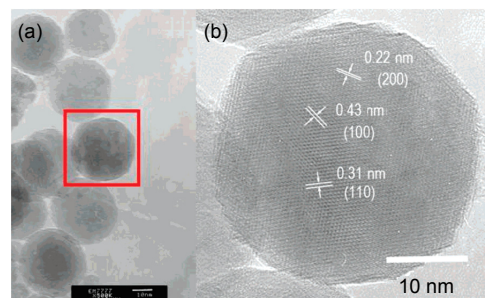


图 16 FeO 高分辨透射电镜图<sup>[45]</sup>。

Fig. 16 High-resolution TEM images of the FeO<sup>[45]</sup>.



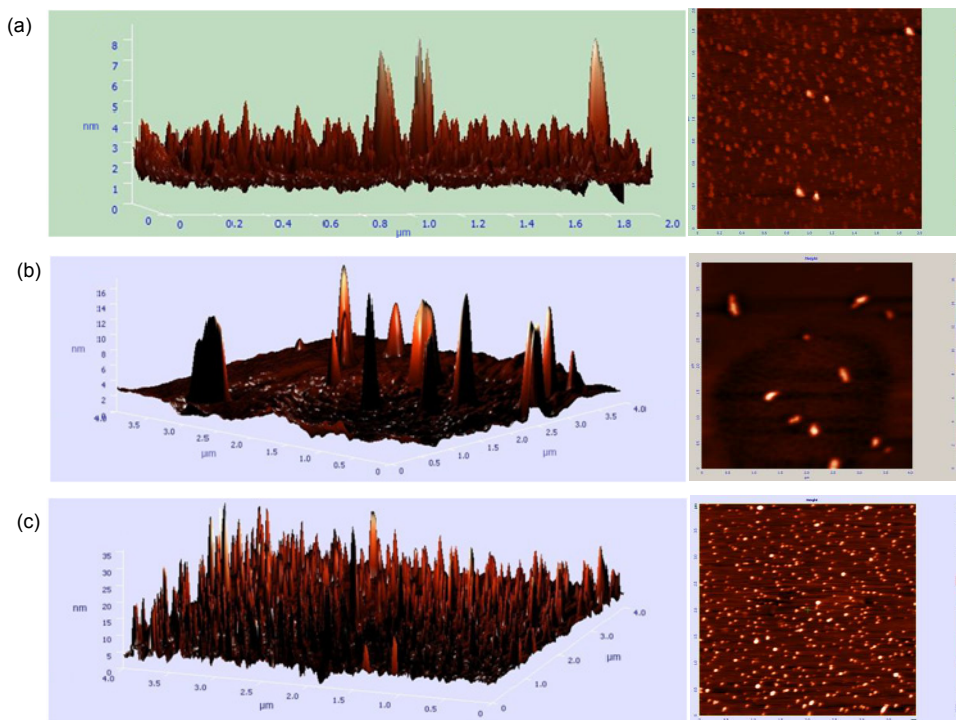


图 17 激光液相烧蚀制备的 ZnO 粉末在不同的输出能量条件下测得的 AFM 图<sup>[46]</sup>. (a) 激光输出能量为 70 mJ, 粒子粒径约为 8 nm. (b) 激光输出能量为 60 mJ, 粒子粒径约为 15 nm. (c) 激光输出能量为 50 mJ, 粒子粒径约为 40 nm.

Fig. 17 ZnO nano-material's AFM images under different output energy by liquid laser ablation<sup>[46]</sup>. (a) The laser output energy is 70 mJ and the particle size is about 8 nm. (b) The laser output energy is 60 mJ and the particle size is about 15 nm. (c) The laser output energy is 50 mJ and the particle size is about 40 nm.

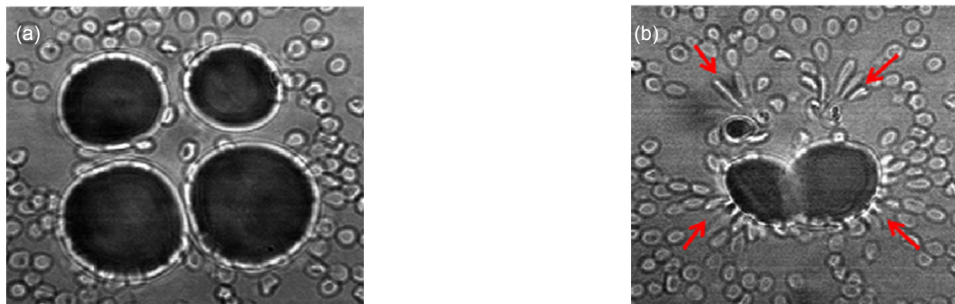


图 18 四个空泡与红细胞相互作用图<sup>[49]</sup>. (a) 空泡膨胀. (b) 空泡溃灭和细胞变形.

Fig. 18 Array of 4 bubbles interacting with red blood cells<sup>[49]</sup>. (a) Expansion of the bubbles. (b) Collapse of the array and deformation of the cells.

Park 等<sup>[50]</sup>采用 Er: YAG 激光器搭建了微射流注射系统, 研究在不使用针注射的情况下, 通过激光诱导出的微射流将药物输送到皮下组织中。研究发现, 采用低脉冲能量多脉冲次数方式, 能够输送更多的药物进入皮下组织。Jang 等<sup>[51]</sup>研究激光诱导微射流辅助喷注药物的方法, 发现采用不同的喷注方式以及激光脉冲作用的时间对药物输送的深度有很大的影响。通过优化皮肤表面中单位面积的微孔数目以及激光微喷注

时间等参数, 可以将疫苗、胰岛素和生长激素等大分子更深的渗透到皮肤中。Ramachandran 等<sup>[52]</sup>使用低功率 1064 nm 波长的连续激光器, 并利用细小而柔软的光纤将激光聚焦于生理液体中形成气泡群, 再利用气泡的移动将碳纳米管(CNTs)沿着周围流体传送, 或者利用气泡溃灭产生的微射流将碳纳米管(CNTs)冲散。通过这种技术可以精确控制药物体内的输送, 同时, 可以减轻手术创伤给病人带来的痛苦。

### 4.3 表面处理

液体辅助激光加工技术在表面处理领域已有广泛的应用,主要有激光冲击强化、激光湿式清洗、激光喷墨打印等。

1) 激光冲击强化。激光冲击强化原理主要是利用高功率的强激光束透过约束层,聚焦到工件表面的吸收层,吸收层吸收激光能量之后产生高强度的冲击波压力,从而对工件表面进行冲击强化。国外,美国 MIC 公司已经将激光冲击强化技术推广到航空、船舶、汽车等工业生产中。在 2005 年开发出一套激光冲击强化系统,并应用于波音 744-8 机翼的强化加工,此加工系统获得美国国防制造最高成就奖<sup>[53, 54]</sup>。国内,中科院沈阳自动化研究院开发了首台工业用的激光冲击强化设备,该设备对航空发动机整体叶盘进行冲击强化后,寿命提高了 3~5 倍<sup>[55-57]</sup>。

2) 激光湿式清洗。激光湿式清洗技术被称为一种新型的绿色清洗方法<sup>[58, 59]</sup>,现已较广泛的应用于微电子器件、文物保护、模具和光学器件的清洗。齐扬等<sup>[60]</sup>为了清除石质文物表面墨迹、油漆、烟熏、石灰等污染物,采用波长为 1064 nm,脉宽为 10 ns 的激光器,利用激光湿式清洗的方法,探究了岩石表面各种污染物的清洗阈值以及最佳清洗激光参数,最终对云冈石窟文物上的污染物进行了很好的清洗。Weng 等<sup>[61]</sup>分别用 Nd:YAG 激光器和 CO<sub>2</sub> 激光器,并采用激光湿式背向清洗的方法对玻璃基板上的氧化铝污染颗粒进行清除研究,发现由于激光是透过玻璃基板聚焦在背面的液体中,并由激光的诱导产生的空泡以及空泡溃灭产生的射流实现对玻璃基板背面的污染物的清除,这样大大降低了激光对基材的热损害,最终证明该方法可以有效的去除 0.5 μm 大小的亚微米颗粒。Kim 等<sup>[62]</sup>提出一种激光湿式冲击波清洗的方法(WLSC),用于去除硅晶片上纳米级聚合物颗粒。图 19 为激光湿式冲击波清洗系统的示意图。采用该系统实验研究了激光湿式冲击波去除机理以及提高去除效率的工艺参数,实验结果发现激光诱导冲击波可以使液体产生 10~100 m/s 的,能够有效地去除硅晶片上小至 28 nm 的聚合物颗粒。

## 5 总结与展望

本文首先概述了液体辅助激光加工过程中产生压力现象的机理和压力的基本特征。其次,对液体辅助激光加工过程中常用的几种压力检测方法进行介绍,

并对各种方法的特点做出总结。最后对该研究领域的相关应用做了介绍。

目前,已有众多学者对激光作用于液体介质产生冲击波压力和高速射流冲击力做了研究,同时,许多研究成果推向了实际应用。但是对于激光与液体介质相互作用的研究还尚未形成系统的理论,大多的研究都集中在单个脉冲激光产生的单个空泡的脉动、冲击波、微射流以及声辐射的数值模拟和实验研究。而对多空泡相互作用的效果以及机理研究较少,现有的研究中也大多采用的是数值模拟仿真的方法。在实际液体辅助激光加工应用中产生的一般都是多空泡,将会产生比单空泡更为复杂的气泡脉动、气泡压缩冲击波、气泡溃灭微射流、声辐射信号等现象,而这些复杂的现象及机理还有待研究者更深入的探索和研究。

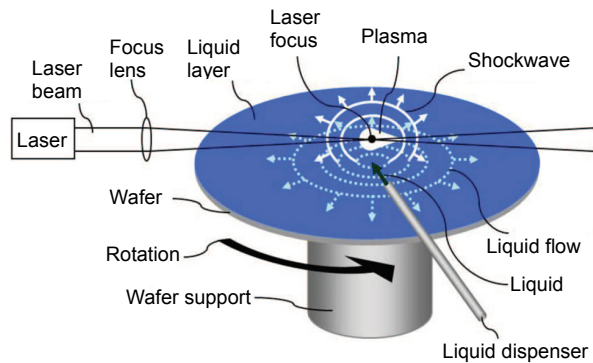


图 19 激光湿式冲击波清洗系统的示意图<sup>[62]</sup>。

Fig. 19 Schematic view of the WLSC system<sup>[62]</sup>。

## 基金项目

国家自然科学基金(51575114);广东省普通高校特色创新项目(2014KTSCX059);广州市科技计划(201607010156);广东省自然科学基金(S2013010014070);江苏省精密与微细制造技术重点实验室开放基金项目。

## 参考文献

- 1 Kruusing A. Handbook of liquids-assisted laser processing [M]. Amsterdam: Elsevier Ltd, 2008.
- 2 Huang Z Q, Hong M H, Do T B M, et al. Laser etching of glass substrates by 1064 nm laser irradiation[J]. *Applied Physics A*, 2008, **93**(1):159-163.
- 3 Lee T, Jang D, Ahn D, et al. Effect of liquid environment on laser-induced backside wet etching of fused silica[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, **107**(3):033112-033112-8.
- 4 Gupta P K, Ghosh N, Patel H S. Lasers and laser tissue interaction[M]. London: Imperial College Press, 2014: 123-151.
- 5 Peel C. Laser induced breakdown spectroscopy for elemental analysis in aqueous media[D]. Cranfield: Cranfield University, 2012.

- 6 Liu Tao, Wang Jiang'an, Zong Siguang, *et al.* Detecting technology based on laser-induced sound by underwater explosion [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(12): 2822–2826.  
刘涛, 王江安, 宗思光, 等. 基于激光水下爆炸声源的声探测技术 [J]. *强激光与粒子束*, 2012, **24**(12): 2822–2826.
- 7 Brujan E A, Ikeda T, Yoshinaka K, *et al.* The final stage of the collapse of a cloud of bubbles close to a rigid boundary[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, **18**(1): 59–64.
- 8 Liu Tao, Wang Jiang'an, Zong Siguang, *et al.* Cavitation erosion by laser-generated bubble near rigid boundary[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(2): 298–302.  
刘涛, 王江安, 宗思光, 等. 激光空泡在刚性壁面附近空蚀特性[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(2): 298–302.
- 9 Naudé C F, Ellis A T. On the mechanism of cavitation damage by non-hemispherical cavities collapsing in contact with a solid boundary[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1961, **83**(4): 648–656.
- 10 Benjamin T B, Ellis A T. The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1966, **260**(1110): 221–240.
- 11 Liu Xiumei. Effect of liquid parameters on expansion and collapse of laser-induced cavitation bubble[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.  
刘秀梅. 液体参量对激光空泡产生和溃灭的影响研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- 12 He Jie. Effect of liquid surface tension on the dynamic characteristics of laser-induced cavitation bubble[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.  
贺杰. 表面张力对光致空泡动力学特性影响的实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- 13 Popinet S, Zaleski S. Bubble collapse near a solid boundary: a numerical study of the influence of viscosity[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, **464**: 137–163.
- 14 Han Bing. Interaction of laser-induced cavitation bubbles and mechanical effects from the nonspherical bubble collapse[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.  
韩冰. 激光空泡相互作用及非对称溃灭的力学特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- 15 Liu Xiumei, He Jie, Lu Jian, *et al.* Effect of surface tension on a liquid-jet produced by the collapse of a laser-induced bubble against a rigid boundary[J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, **41**(1): 21–24.
- 16 Yang Yuanxiang, Wang Qianxi, Keat T S. Dynamic features of a laser-induced cavitation bubble near a solid boundary[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, **20**(4): 1098–1103.
- 17 Vogel A, Lauterborn W, Timm R. Optical and acoustic investigations of the dynamics of laser-produced cavitation bubbles near a solid boundary[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1989, **206**: 299–338.
- 18 Zhao Rui. Studies on characteristic of laser-induced plasma shock wave evolution and cavitation bubble dynamics[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.  
赵瑞. 激光等离子体冲击波传输及空泡动力学特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- 19 Zhao Rui, Liang Zhongcheng, Xu Rongqing, *et al.* Dynamics of laser-induced cavitation bubble near solid boundary[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, **47**(7): 5482–5485.
- 20 Zong Siguang. Cavitation and sound radicalization with laser-induced breakdown in liquid[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2013.  
宗思光. 激光击穿液体介质的空化与声辐射[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- 21 Xie Xiaozhu, Yuan Xuerui, Chen Weifang, *et al.* New development and applications of laser-induced cavitation bubbles[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, **50**(8): 080017.  
谢小柱, 苑学瑞, 陈蔚芳, 等. 激光诱导空泡技术研究和应用新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, **50**(8): 080017.
- 22 Han Bing, Zhang Hai, Yu Xiaoguang, *et al.* A method for measuring distribution of impact pressure field in water-jet cavitation peening processing[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, **32**(2): 6–8, 23.  
韩冰, 张海, 于晓光, 等. 一种测定空化水喷丸工艺中冲击压力场分布规律的方法[J]. *振动与冲击*, 2013, **32**(2): 6–8, 23.
- 23 Zong Siguang, Wang Jiang'an, Ma Zhiguo. Lighting and shock wave emission of laser cavitation bubble collapse[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(4): 1000–1006.  
宗思光, 王江安, 马治国. 激光空泡的溃灭发光及冲击波辐射[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1000–1006.
- 24 Hu Manfeng. Study on laser induced cavitation bubbles and flow field distribution during laser-induced backside wet etching sapphire substrates[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014.  
胡满凤. 激光背向湿式蚀刻加工蓝宝石过程中光诱导气泡和微射流流场分布研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2014.
- 25 Xie X Z. Cavitation bubble dynamics during laser wet etching of transparent sapphire substrates by 1064 nm laser irradiation[J]. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 2013, **8**(3): 259–265.
- 26 Li Beibei. Study on the test methods and effects of ambient parameters for the laser-induced cavitation bubble[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.  
李贝贝. 环境参数对激光空泡动力学行为的影响及测试方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- 27 Xu Rongqing, Chen Xiao, Shen Zhonghua, *et al.* Dynamics of laser-induced cavitation bubbles near solid boundaries[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(5): 1413–1418.  
徐荣青, 陈笑, 沈中华, 等. 固体壁面附近激光空泡的动力学特性研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(5): 1413–1418.
- 28 Xu R Q, Chen X, Shen Z H, *et al.* A fiber-optic diagnostic technique for mechanical detection of the laser-metal interaction underwater[J]. *Physics of Fluids*, 2004, **16**(3): 832–835.
- 29 Jiang Hongliang. Study on dynamic characteristics of laser-generated bubble[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2010.  
蒋红亮. 激光空泡动力学特性的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2010.
- 30 Lush P A. Impact of a liquid mass on a perfectly plastic solid[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1983, **135**: 373–387.
- 31 Li Beibei, Zhang Hongchao, Ni Xiaowu, *et al.* Experiment investigation on the liquid jet of laser-induced bubble in different ambient pressures[J]. *Laser Technology*, 2012, **36**(6): 749–753.  
李贝贝, 张宏超, 倪晓武, 等. 不同环境压强下激光空泡溃灭射流的实验研究[J]. *激光技术*, 2012, **36**(6): 749–753.
- 32 Zong Siguang, Wang Jiang'an, Wang Yuhong. Experiment investigation of water breakdown characteristic by high power laser[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(11): 68–72.  
宗思光, 王江安, 王雨虹. 脉冲激光击穿水介质特性的实验研究[J]. *光电工程*, 2008, **35**(11): 68–72.
- 33 Li Shengyong, Liu Xiaoran, Wang Jiang'an, *et al.* Influence of gas content on spectrum properties of laser-induced cavitation bubble collapse sound waves in viscous liquid[J]. *Journal of Optoelectronics: Laser*, 2012, **23**(6): 1206–1210.  
李胜勇, 刘晓然, 王江安, 等. 含气量对粘性液体中空泡声波频谱



- 特性的影响[J]. 光电子·激光, 2012, **23**(6): 1206–1210.
- 34 Li Shengyong, Wang Xiaoyu, Wang Jiang'an, *et al.* Experimental investigation of influence of ambient pressure on properties of laser-induced cavitation bubble collapse sound waves[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(3): 879–883.  
李胜勇, 王晓宇, 王江安, 等. 环境压强对激光空泡声波特性影响的实验研究[J]. 红外与激光工程, 2015, **44**(3): 879–883.
- 35 Yan Xiaomin, Li Zhirong, Zhong Kai, *et al.* Research on measurement of underwater explosion pressure with PVDF sensor[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, **15**(9): 189–192.  
闫潇敏, 李芝绒, 仲凯, 等. 聚偏氟乙烯传感器水中爆炸压力测量研究[J]. 科学与技术, 2015, **15**(9): 189–192.
- 36 Hu Yafeng, Liu Jianqing, Gu Wenbin, *et al.* Stress-testing method by PVDF gauge and its application in explosive test of porous material[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, **36**(5): 655–662.  
胡亚峰, 刘建青, 顾文彬, 等. PVDF 应力测试技术及其在多孔材料爆炸冲击实验中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2016, **36**(5): 655–662.
- 37 Liu Ruijun, Chen Donglin, He Weifeng, *et al.* Experimental study of shock wave based on laser shock processing[J]. *Applied Laser*, 2010, **30**(3): 204–206.  
刘瑞军, 陈东林, 何卫锋, 等. 基于激光冲击强化的冲击波实验研究[J]. 应用激光, 2010, **30**(3): 204–206.
- 38 Hu Yan. Study on nanosecond/picosecond laser high-precision machining of quartz glass[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.  
胡炎. 纳秒/皮秒激光对石英玻璃高精度加工的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- 39 Niino H. Surface microstructuring of inclined trench structures of silica glass by laser-induced backside wet etching[J]. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 2008, **3**(3): 182–185.
- 40 Niino H, Kawaguchi Y, Sato T, *et al.* Surface microstructuring of silica glass by laser-induced backside wet etching with a DPSS UV laser[J]. *Applied Surface Science*, 2007, **253**(19): 8287–8291.
- 41 Niino H, Kawaguchi Y, Sato T, *et al.* Surface microstructuring by laser-induced backside wet etching[M]. Tsukuba, Japan: SPIE, 2009.
- 42 Gao Xunyin. study on the development of working solution and processing mechanism of laser wet etching sapphire substrate[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014.  
高勋银. 激光湿式切割蓝宝石过程中工作液体的研制及加工机理研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2014.
- 43 Kawaguchi Y, Sato T, Narazaki A, *et al.* Rapid prototyping of silica glass microstructures by the LIBWE method: fabrication of deep microtrenches[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2006, **182**(3): 319–324.
- 44 Lin Geng, Tan Dezhi, Luo Fangfang, *et al.* Fabrication and photocatalytic property of  $\alpha$ - $\text{Bi}_2\text{O}_3$  nanoparticles by femtosecond laser ablation in liquid[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, **507**(2): L43–L46.
- 45 Liu Peisheng, Cai Weiping, Zeng Haibo. Fabrication and size-dependent optical properties of FeO nanoparticles induced by laser ablation in a liquid medium[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2008, **112**(9): 3261–3266.
- 46 He Guoqing. Preparation of nano particles in laser ablation in liquids[D]. Liaocheng: Liaocheng University, 2014.  
何国庆. 激光液相烧蚀制备纳米颗粒的研究[D]. 聊城: 聊城大学, 2014.
- 47 Intartaglia R, Bagga K, Scotto M, *et al.* Luminescent silicon nanoparticles prepared by ultra short pulsed laser ablation in liquid for imaging applications[J]. *Optical Materials Express*, 2012, **2**(5): 510–518.
- 48 Quinto-Su P A, Kuss C, Preiser P R, *et al.* Red blood cell rheology using single controlled laser-induced cavitation bubbles[J]. *Lab on A Chip*, 2011, **11**(4): 672–678.
- 49 Quinto-Su P A, Dijkink R, Prabowo F, *et al.* Interaction of red blood cells with arrays of laser-induced cavitation bubbles[C]. Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation, 2009.
- 50 Park M A, Jang H J, Sirotkin F V, *et al.* Er: YAG laser pulse for small-dose splashback-free microjet transdermal drug delivery[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(18): 3894–3896.
- 51 Jang H J, Yeo S, Yoh J J. Skin pre-ablation and laser assisted microjet injection for deep tissue penetration[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2017, **49**(4): 387–394.
- 52 Ramachandran H, Dharmadhikari A K, Bambardekar K, *et al.* Optical-tweezer-induced microbubbles as scavengers of carbon nanotubes[J]. *Nanotechnology*, 2010, **21**(24): 245102.
- 53 Luo Kaiyu, Lu Jinzhong, Zhang Lingfeng, *et al.* The microstructural mechanism for mechanical property of LY2 aluminum alloy after laser shock processing[J]. *Materials & Design (1980-2015)*, 2010, **31**(5): 2599–2603.
- 54 Babu N K, Raman S G S, Murthy C V S, *et al.* Effect of beam oscillation on fatigue life of Ti-6Al-4V electron beam weldments[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, **471**(1–2): 113–119.
- 55 Nie Guifeng, Feng Aixin, Ren Xudong, *et al.* Effect of laser shock processing parameters on residual principal stresses and its directions of 2024 aluminum alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(1): 0103006.  
聂贵锋, 冯爱新, 任旭东, 等. 激光冲击参数对 2024 铝合金冲击区域的主应力及其方向的影响[J]. 中国激光, 2012, **39**(1): 0103006.
- 56 Luo Xinmin, Yuan Chunzhi, Zhang Jingwen, *et al.* Laser shock-ing and its effects on microstructure and properties of metallic materials[J]. *Heat Treatment*, 2012, **27**(1): 17–22.  
罗新民, 苑春智, 张静文, 等. 激光冲击及其对金属材料组织和性能的影响[J]. 热处理, 2012, **27**(1): 17–22.
- 57 Zhao Wenyue, Liu Yuzhuo, Liu Lei, *et al.* Surface recrystallization of a gamma-TiAl alloy induced by shot peening and subsequent annealing treatments[J]. *Applied Surface Science*, 2013, **270**: 690–696.
- 58 Wang Haijiang, Liu Weiwei, Yu Yue, *et al.* Research status and prospect of laser cleaning of metal surface contamination[J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2016(8): 75–78.  
王海将, 刘伟崑, 余跃, 等. 金属表面污染物的激光清洗研究现状与展望[J]. 内燃机与配件, 2016(8): 75–78.
- 59 Song W, Hong M, Lukiyanchuk B. Method and apparatus for cleaning surfaces: US, US 6777642 B2[P]. 2004.
- 60 Yang Qi, Zhou Weiqiang, Chen Jing, *et al.* Laser cleaning of contaminants on the surface of Yungang Grottoes[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2015, **22**(2): 32–38.  
齐扬, 周伟强, 陈静, 等. 激光清洗云冈石窟文物表面污染物的试验研究[J]. 安全与环境工程, 2015, **22**(2): 32–38.
- 61 Weng T S, Tsai C H. Laser-induced backside wet cleaning technique for glass substrates[J]. *Applied Physics A*, 2014, **116**(2): 597–604.
- 62 Kim T H, Busnaina A, Park J G, *et al.* Nanoscale particle removal using wet laser shockwave cleaning[J]. *ECS Journal of Solid Science and Technology*, 2012, **1**(2): P70–P77.