

# 强激光水中诱导等离子体冲击波数值模拟

鲁建英<sup>1</sup> 耿德坤<sup>2</sup> 陈 朗<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国人民解放军防化学院, 北京 102205

<sup>2</sup>北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081

**摘要** 在强激光与水介质作用过程中, 等离子体和冲击波的形成机理是人们关心的主要问题之一。采用双脉冲激光纹影摄影法, 获得了强激光作用时水中的冲击波流场图形, 建立了激光与水作用两相流计算模型, 建模时考虑了激光吸收, 水体汽化、等离子体形成和膨胀等过程。对强激光作用水体形成冲击波的过程进行了数值模拟计算, 获得了与实验相符的计算结果。进一步分析了激光诱导等离子体冲击波的传播特性, 并与经典理论模型结果进行了比较。研究表明, 在激光作用下, 水中等离子体快速膨胀形成的冲击波传播初始速度高达上千米每秒, 压力约为十几吉帕, 随后冲击波的速度和压力迅速衰减, 1  $\mu\text{s}$  后衰减到声波速度。

**关键词** 激光技术; 冲击波; 数值模拟; 水

**中图分类号** O383

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP42.0902001

## Numerical Simulation of High Intensity of Laser Induced Plasma Shock Wave in Water

Lu Jianying Geng Desheng Chen Lang

<sup>1</sup>*Institute of Chemical Defense, Chinese People's Liberation Army, Beijing 102205, China*

<sup>2</sup>*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

**Abstract** Laser-induced plasma formation and shock wave generation mechanism are our concern problems in investigating high intensity laser pulse focusing into water. A high speed schlieren photography technique with double-pulse lasers is used as a background light source, and the temporal and spatial evolution of shock wave are obtained. A two-phase computation model is established in consideration of water vaporization, plasma absorption laser pulse energy. The processes of laser induced plasma shock wave in water are numerically simulated. A reasonable agreement is obtained between experimental and simulation results. The shock wave propagation characteristics are studied, and comparison between simulation results and theoretical predictions are presented. The results show that the shock wave speeds in the initial stages of laser induced breakdown in water is up to 5 km/s, and pressure is up to a dozen GPa. Shock wave velocity and pressure decay rapidly over time, which decrease to acoustic speed in an 1  $\mu\text{s}$  later after breakdown.

**Key words** laser technique; shock wave; numerical simulation; water

**OCIS codes** 140.3440; 350.3390; 350.5400

## 1 引 言

强激光击穿水介质发生电离, 产生高温高压等离子体, 等离子体向外膨胀过程中形成冲击波, 同时在水中形成空泡, 该现象可以用于激光推进<sup>[1]</sup>、声波探测<sup>[2-3]</sup>和眼科手术<sup>[4]</sup>等多个研究领域。考察激光作用时水中等离子体和冲击波的形成机理和作用规律, 建立相应理论计算方法是人们需要关心的问题。美国 Felix 等<sup>[5]</sup>采用纹影摄像方法, 观测了激光聚焦于水、甲醇等液体中的冲击波。Jean 等<sup>[6]</sup>采用压力传感器, 测量了激光作用下水中冲击波压力, 给出了冲击波速度与激光能量的关系。Joachim<sup>[7]</sup>研究了激光脉冲宽度对水中冲击

收稿日期: 2015-03-20; 收到修改稿日期: 2015-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(11302251)

作者简介: 鲁建英(1975—), 女, 博士, 讲师, 主要从事激光与物质相互作用等方面的研究。E-mail: fhxyljy@sohu.com

波的响应规律。Richard等<sup>[8]</sup>建立了激光击穿水的数值计算模型,采用移动击穿模型描述水的等离子体化过程。该模型认为只要入射激光超过水的击穿阈值时,就发生击穿形成等离子体,计算中采用了恒定的等离子体吸收系数,并没有考虑温度对吸收系数的影响。从目前的研究结果看,激光“击穿”水体产生等离子体,形成冲击波的作用过程很快,其相变反应复杂,通过实验只能观测到水中冲击波的流场效应,难于观测到反应过程的细节。因此,需要建立考虑多种因素的计算模型,对强激光与水的作用过程进行数值模拟计算,分析水体对激光能量的吸收,等离子体形成和冲击波传播机制和规律。

本文把强激光聚焦于水中,击穿水体形成冲击波,并采用激光为背景光源的纹影高速照相法,获得了水中冲击波流场变化的物理图像;建立了激光与水作用多相流计算模型,考虑水体对激光能量的吸收、水的汽化、等离子体形成和冲击波传播等过程。对激光与水作用过程进行了数值模拟计算,分析了冲击波传播特性和激光能量对作用过程的影响规律。

## 2 激光与水作用实验

激光与水作用实验原理如图1所示。实验系统由Nd:YAG固体激光器、纹影系统、双脉冲光源激光器、高速相机、同步脉冲发生器、数字示波器等部分组成。固体激光器发出的强激光,经过反射/透射镜1后分成两束。大部分激光经过反射后,再由聚焦透镜3聚焦于水容器中心,在水中形成等离子体和冲击波。少量激光经透射后,其能量被激光能量计记录,根据反射/透射镜的反射与透射激光的能量比例关系,可计算出实际作用到水中的激光能量。

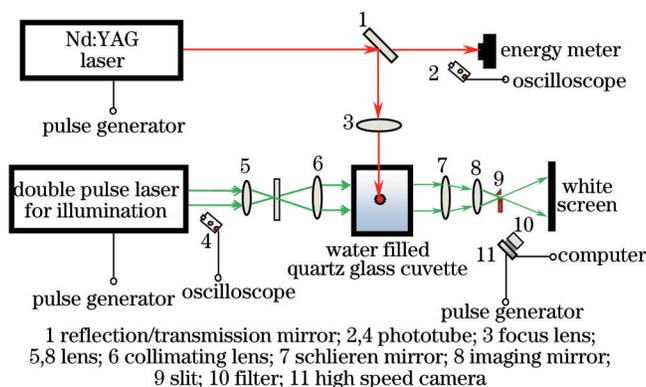


图1 激光与水作用过程的实验装置

Fig.1 Experiment arrangement for laser induced breakdown in water

利用双脉冲激光器发出的两束具有一定时间间隔的脉冲激光作为背景光,通过光学纹影成像系统,记录水中流场变化图像,每次可获得两幅图像。具体过程为,背景激光经过扩束装置和准直镜6后,输出平行光并穿过流场扰动区域,其折射率发生变化,变化的光线经过纹影镜7后聚焦,利用刀口切去部分光线,在白屏上形成流场的纹影图像,再由高速相机记录。实验时在相机前面放置一个滤光片,对等离子体发光进行过滤,只允许背景光源通过,可获得清晰的流场结构纹影图像。由于加载激光持续时间很短(脉宽为24 ns),而实验系统的最快响应时间为几十纳秒,因此该系统还不能记录到激光作用期间爆轰波的形成和传播,只能测量激光作用后等离子体冲击波的演化情况。

作用激光和背景激光出光时间,以及相机启动时间都由脉冲发生器控制。脉冲发生器发出4路脉冲信号,分别启动示波器、激光器、双脉冲激光器和相机。利用脉冲发生器可以改变双脉冲激光器的出光时间和间隔,采用光电转换器2和4放置于光路中探测激光器发出的激光并转化为电信号在示波器显示出来。通过示波器可以准确记录激光脉冲、双脉冲激光器的出光时间、相机的启动时间。

实验中加载激光器为Nd:YAG固体激光器,激光波长为1.064 μm,脉宽为24 ns,最大激光输出能量为4 J,光斑空间分布为类平顶分布,光斑直径为15 mm,聚焦后约为0.1 mm。背景光源激光器为Nd:YAG双脉冲激光器,激光波长为532 nm,脉宽为10 ns,能量为25 mJ,光斑初始直径为10 mm,扩束后光斑直径为50 mm。脉冲发生器的型号是Model 575,延迟时间分辨率是250 ps。示波器的型号是DPO 7054,带宽为500 MHz,上

升时间(10% ~ 90%)为 415 ps, 采样频率高达 10 GS/s。光电转换器的响应时间是 1 ns。相机的全幅采集图像频率为 15 fps, 双曝光模式下最小时间隔为 500 ns, 快门最短时间为 1/16000 s。盛放蒸馏水的石英玻璃水箱底面边长为 200 mm, 高为 300 mm, 壁面 1.064 μm 光透射率大于 98%。

### 3 激光与水作用数值模拟计算

通过实验难以观测到激光与水作用时水体汽化和等离子体形成过程, 因此, 数值模拟计算成为激光与水作用研究的重要手段。等离子体和冲击波在空间上近似呈轴对称分布, 因此建立激光与水作用二维轴对称数值计算模型, 如图 2 所示。激光从右边沿  $x$  轴方向入射, 并在坐标原点聚焦, 以  $x$  轴为对称轴, 垂直于激光入射方向为  $y$  轴, 建立长 200 mm、宽 100 mm 的二维轴对称几何模型。激光光斑半径取 100 mm, 通过向焦点区域注入能量模拟激光与水作用时液态水获得的能量。在半径小于 100 mm 的区域内以 5 mm 的长度划分为四边形网格, 半径大于 100 mm 区域以 1.05 的比例逐渐扩大网格长度, 网格划分结果如图 3 所示。

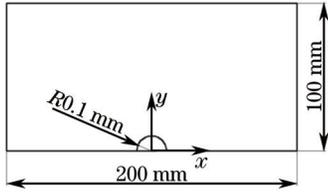


图 2 计算几何模型

Fig.2 Geometry model

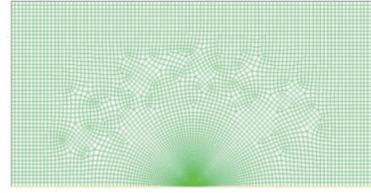


图 3 模型网格图

Fig.3 Computational mesh

采用两相流模型, 描述激光击穿液态水后的汽化和等离子体产生, 计算单元可以看作液相和气相组成的混合物, 以体积分数描述水由液相向气相的转变。激光作用前, 计算域全为液体水, 单元的液相体积分数为 1。在激光作用过程中, 液相吸收激光能量向气相转化, 根据液相和气相的体积分数判断液体汽化情况。对各相的连续性方程、动量方程、能量方程加权求和, 获得混合物的连续性方程、动量方程和能量方程。

连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l + \alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \mathbf{v}_m + \alpha_v \rho_v \mathbf{v}_m) = S_m \quad (1)$$

动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \mathbf{v}_m^T)] + \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F} + \nabla \cdot (\mathbf{v}_{dr} \mathbf{v}_{dr} \rho_m) \quad (2)$$

能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l E_l + \alpha_v \rho_v E_v) + \nabla \cdot [\alpha_l (\rho_l E_l + P) \mathbf{v}_l + \alpha_v (\rho_v E_v + P) \mathbf{v}_v] = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_E \quad (3)$$

式中  $\alpha_l$ 、 $\alpha_v$  分别为液相和气相的体积分数;  $\rho_l$ 、 $\rho_v$  分别为液相和气相的密度;  $\mathbf{g}$  为重力加速度;  $\mathbf{F}$  为体积力;  $\mathbf{v}_{dr}$  为气相相对于混合物的漂移速度;  $S_m$ 、 $S_E$  为混合物的质量源项、能量源项;  $k$  为热导率;  $\rho_m$ 、 $\mu_m$ 、 $\mathbf{v}_m$  为混合物的密度、粘度、速度。  $E_l$ 、 $E_v$  为液相和气相的能量。其中

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (4)$$

$$h = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT \quad (5)$$

式中  $E$  为能量,  $h$  为焓,  $p$  为压强,  $\rho$  为密度,  $v$  为速度,  $c_p$  为比热,  $T$  为温度。表 1 为水的物性参数。

表 1 计算模型使用的蒸馏水的物性参数

Table1 Physical parameters of distilled water used in computation model

Material	Density /(g·cm <sup>-3</sup> )	Thermal conductivity /(W·m <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> )	Specific heat /(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	Vaporization heat /(kJ·kg <sup>-1</sup> )	Vaporization temperature /K
Water	1.0	0.6	4182	2260	373

液态水在常温常压下可以看作是\*\*不可压缩流体\*\*，但在冲击波的作用下，水的可压缩性就不能忽略了。因此，液态水的状态方程采用<sup>[9]</sup>：

$$\frac{p+F}{p_0+F} = \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^n, \quad (6)$$

其中  $n=7.15$ ,  $F=3085.6 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 均为常数,  $\rho_0$  为常温常压下水的密度,  $p_0$  为标准大气压。水中声速为 1480 m/s。水击穿后产生的等离子体采用理想气体状态方程描述。

计算域初始压力为一个标准大气压, 初始温度为 300 K。水在激光的作用下吸收激光能量, 这部分能量以源项的形式耦合到能量方程中, 则能量源项  $S_E$  为

$$S_E = \frac{E_0}{\frac{4}{3}\pi R_0^3 t_a} \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{\tau^2}\right], \quad (7)$$

式中  $E_0$  是入射激光能量;  $t$  为时间, 以激光开始作用的时刻为时间起点;  $R_0$  为能量注入区域半径;  $t$  为激光脉冲作用时间, 取为 24 ns;  $t_0$  和  $t_a$  为常数, 这里分别取为 12 ns 和 22.14 ns。计算中多相流模型选用流体体积函数 (VOF) 模型, 湍流模型选用标准  $k-\varepsilon$  模型, 激光注入能量、液态水的状态方程通过自定义函数调入程序, 采用 fluent 求解器进行求解计算。

## 4 结果与讨论

### 4.1 冲击波流场实验和模拟计算结果对比

图 4 所示为 215 mJ 激光击穿水后不同时刻冲击波流场的纹影照片, 激光从右边入射。由于高速相机拍摄中每次只能同时拍摄到两幅照片, 在同一激光脉冲能量下进行多次重复实验, 相机记录不同延迟时间时白屏上的图像, 就可以得到不同时刻下的纹影照片。每次激光脉冲的能量偏移幅度小于 2%。从实验结果看, 每次实验的击穿点稍有偏移。在  $5 \mu\text{s}$  之前白屏上成像与实际大小比为 2.92:1。在  $7 \sim 25 \mu\text{s}$  时成像比例为 1.28:1。图 4 表明, 激光击穿水介质后, 在水中形成了球状冲击波, 中心为等离子体作用后的空泡区。随着时间增加, 球状的冲击波不断向外扩张, 且  $3 \mu\text{s}$  后记录到的冲击波波阵面不再是规则的圆形。

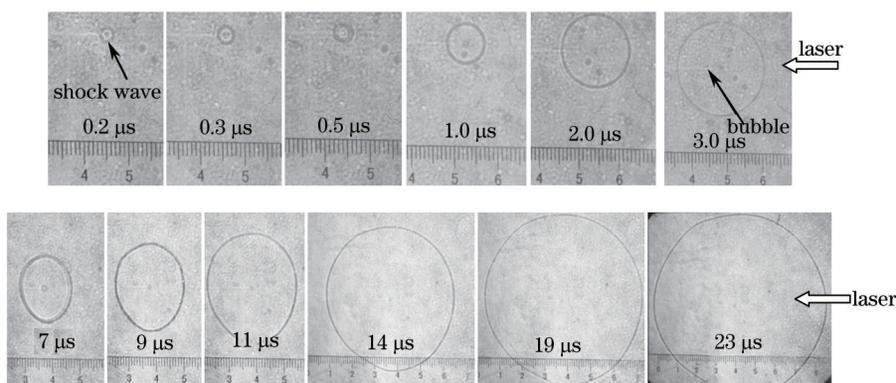


图 4 215 mJ 激光击穿水后不同时刻冲击波流场的纹影照片

Fig.4 Schlieren pictures of shock wave for different delay time after optical breakdown in water by 215 mJ laser pulse

图 5 为 215 mJ 脉冲激光能量下不同时刻流场压力数值模拟计算结果。从流场压力云图可以看到冲击波的传播情况。与实验的冲击波流场纹影照片相比, 计算的冲击波波阵面更规则, 以球面波向外传播。延迟 0.5、1、3、11  $\mu\text{s}$  时, 实验测得的冲击波传播距离分别为 0.62、1.37、4.3、13.0 mm, 而模拟计算的冲击波传播距离分别为 0.8、1.5、4.2、15 mm。计算值稍高于实验值, 一方面计算中假设激光能量全部被吸收, 计算的冲击波比实际强度偏高, 传播距离偏远; 另一方面, 实验中虽然可以精确控制延迟时间, 但每次激光出光能量值有 2% 的偏移, 实测的传播距离有一定偏差。

图 6 所示为两种激光能量下水中冲击波传播距离的模拟计算值与实验值对比, 可知计算的冲击波传播距离略高于实验值。

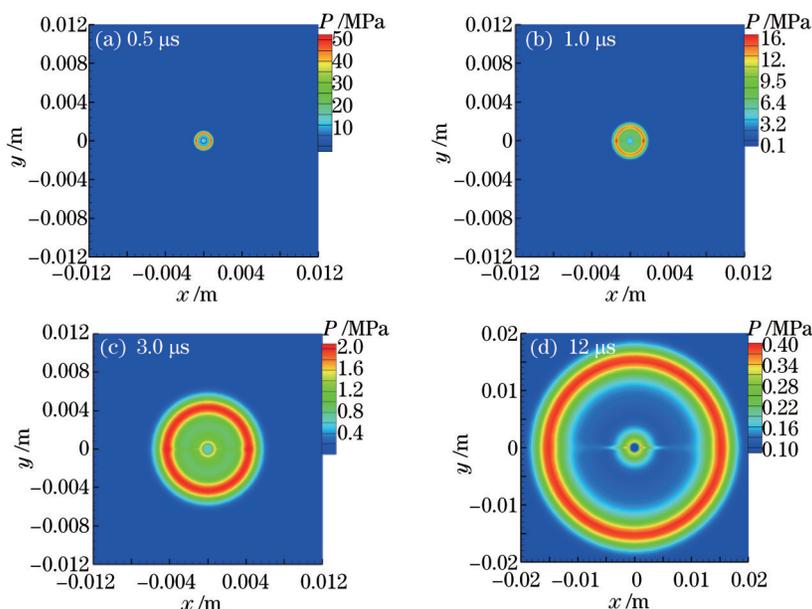


图5 模拟计算的215 mJ激光击穿水后不同时刻流场压力分布

Fig.5 Computed shock pressure contour at different time for 215 mJ laser pulse

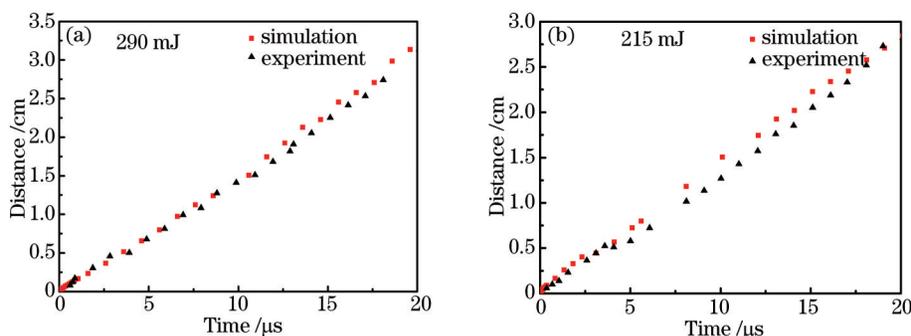


图6 不同激光能量下冲击波传播距离计算与实验结果的比较。(a) 290 mJ; (b) 215 mJ

Fig.6 Comparison of propagation distance of shock wave between computed and experimental results. (a) 290 mJ; (b) 215 mJ

#### 4.2 冲击波速度和压力

根据不同时刻冲击波传播距离,可得冲击波速度。对图6冲击波传播距离曲线,进行曲线拟合,拟合后的数据显示冲击波在后期衰减为声波速度,约为1455.9 m/s,接近于水中声速1480 m/s。而在冲击波传播初期,实验数据很难测量,在此采用基于水中点爆炸理论推导出的冲击波理论计算公式与数值模拟计算结果进行对比。冲击波理论解析计算公式为<sup>[10]</sup>

$$R(t) = M_0 c_0 t \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{1}{M_0} \right) \exp \left[ - \left( \frac{R_0}{c_0 t} \right)^n \right] \right\} + R_0 \quad (8)$$

式中  $c_0$  为水中声速1480 m/s,  $n$  取0.8,  $R_0$  为冲击波初始的传播距离,为了与数值模拟计算条件一致,取  $R_0=0.1$  mm;  $M_0$  为冲击波最大马赫数,且

$$M_0 = k \left( \frac{E_0}{R_0^3 c_0^2 \rho_0} \right)^{\frac{1}{5}} + 1, \quad (9)$$

式中  $k$  为与爆炸过程有关的积分常数,其数值接近于1;  $E_0$  为爆炸总能,这里为激光入射能量  $E_0=215$  mJ。

图7所示为模拟计算的冲击波波阵面位置与理论值的对比。冲击波波阵面有一定的宽度,模拟计算中冲击波位置取压力为10 MPa<sup>[8]</sup>处。由图7可知,不同时刻下模拟计算和理论计算的冲击波位置基本一致。理论计算时忽略了水的粘性等因素的影响,理论值稍高于模拟计算值。图8给出了模拟计算得到的冲击波速度与理论值的对比。两种计算结果得到的冲击波速度随时间变化趋势一致,均表现为传播初期冲击波速

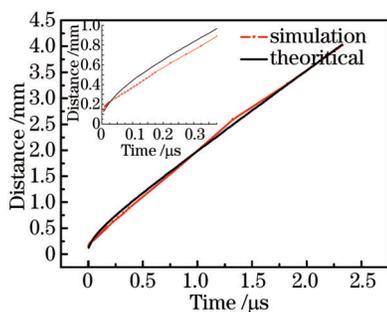


图7 模拟计算冲击波的传播距离与理论值相比

Fig7 Comparison of propagation distances of shock wave between theoretical values and numerical results

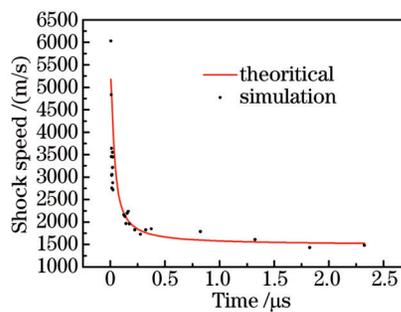


图8 模拟计算的冲击波速度与理论值相比

Fig8 Comparison of propagation speeds of shock wave between theoretical values and numerical results

度快,速度达 5000 m/s 以上,随着时间增加很快衰减,150 ns 时衰减到 2000 m/s 以下。

模拟计算的冲击波峰值随时间变化如图 9 所示。图 9 中理论计算曲线为根据水中冲击波速度与压力关系的 Rice & Walsh 模型<sup>[11]</sup>计算得到的结果,该模型适用于压力小于 25000 MPa 时的情形,其冲击波压力  $p$  与速度的数学表达式为

$$p = v_1 \rho_0 D \left[ 10^{\left( \frac{D - c_0}{v_2} \right)} - 1 \right] + p_0, \quad (9)$$

式中  $c_0$  为水中声速;  $v_1$ 、 $v_2$  为常数,分别取 5190 m/s 和 25306 m/s;  $p$  为冲击波压力;  $D$  为冲击波速度;  $p_0$  为标准大气压。由图 9 可知,在前 24 ns 内,随着激光能量不断注入,冲击波峰值压力逐渐升高。24 ns 后,模拟计算的冲击波压力与理论值接近,且变化趋势基本一致。模拟计算中考虑了水的粘性耗散等因素,因此在冲击波传播初期,速度、压力等值均低于理论计算值,与真实过程更为接近。

通过模拟计算,可以得到距离击穿点不同位置处压力波形曲线,如图 10 所示。可知,距离聚焦点较近的位置,压力随时间变化较剧烈。如冲击波传播到 1 mm 处,该点的压力在 0.2 ms 内迅速达到最大值 45 MPa,波阵面后该点压力迅速下降到 5 MPa。而距离聚焦点较远的位置,压力随时间变化较缓慢,如 4 mm 处,该点的压力在 1 ms 内达到最大值 2.5 MPa。由图 10 还可知,激光诱导等离子体冲击波在水中剧烈衰减,5 mm 处压力衰减到 1 mm 位置的 1/26,而压力波半峰全宽也从 1 mm 处的 170 ns 增加到 1.37 ms。计算结果为开展水中等离子体冲击波的测量提供一定的理论依据。

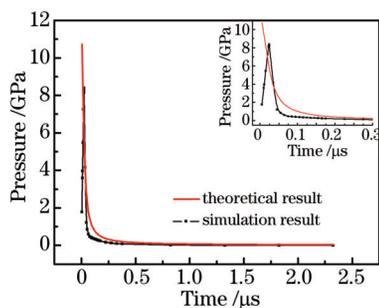


图9 模拟计算冲击波压力峰值随时间的变化曲线与理论值的比较

Fig.9 Computed shock wave pressure as a function of time

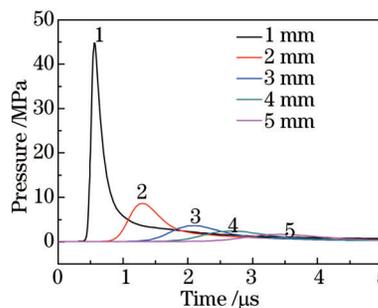


图10 模拟计算的距击穿点不同位置处压力随时间的变化曲线

Fig.10 Computed pressure history at different distances from the focus point

图 11 和 12 分别为不同时刻等离子体冲击波流场沿  $y$  方向上压力和密度剖面图。图 11 表明,在冲击波传播初期,压力波形前沿较陡,高压集中在等离子体区域。随着冲击波的传播,波阵面逐渐加宽,前沿变缓。在 45 ns 时刻,能明显看到水中冲击波的压力峰,之后等离子体区域压力降低,高压区出现在冲击波前沿位置。由图 12 的密度图可知,激光击穿水产生的等离子体空泡密度低于  $600 \text{ kg/m}^3$ ,且中心密度较高,靠近气泡壁处密度较低。随着空泡不断膨胀,内部密度逐渐降低。由图 12 还可以看出冲击波通过前后,介质的密

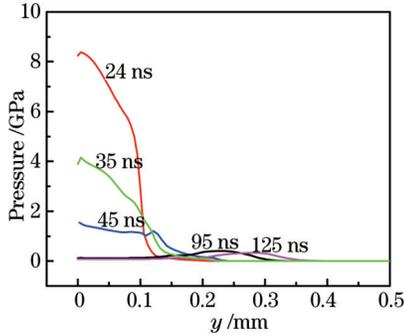


图 11 模拟计算的沿  $y$  方向上压力剖面

Fig.11 Computed pressures profile along  $y$  direction

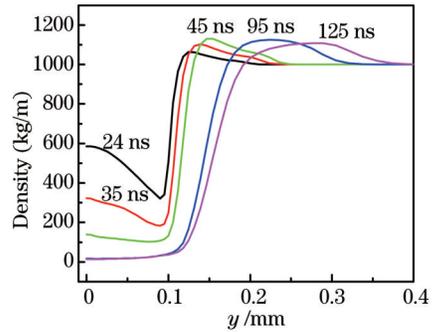


图 12 模拟计算的沿  $y$  方向上密度剖面

Fig.12 Computed densities profile along  $y$  direction

度变化。冲击波经过后,水中介质密度略有增加,最大密度为水正常密度的 1.13 倍。

### 4.3 激光能量对等离子体空泡初始压力和温度的影响

图 13 所示为不同激光能量下,计算的 50 ns 内空泡中心点压力变化曲线。由图可知,中心点压力在激光作用阶段几乎成直线上升,随着注入能量的增加,压力上升斜率增大,压力峰值也相应增大,150、215、290、355、400 mJ 下中心点压力最大值分别为 5.8、8.4、11.0、12.7、14.2 GPa。当激光作用结束后,随着等离子体空泡向外膨胀,中心压力逐渐下降,下降的速度随激光能量增加而增大,在 400 mJ 下中心点压力下降最快。图 14 所示为不同激光能量下中心点温度随时间的变化。可知,激光诱导等离子体温度高达上万开尔文,激光能量越高,中心点温度上升速度越快,最高温度也越大。24 ns 后,中心点温度开始缓慢下降,但下降幅度没有压力剧烈。

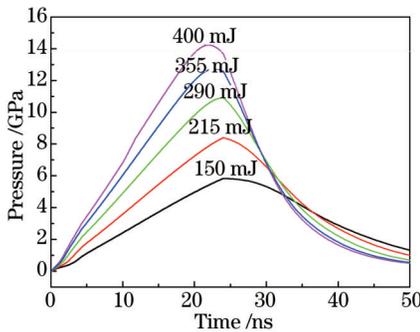


图 13 计算的不同能量下空泡中心点压力随时间的变化曲线

Fig.13 Pressure histories in the central of cavitations bubbles induced by varied laser pulse energies

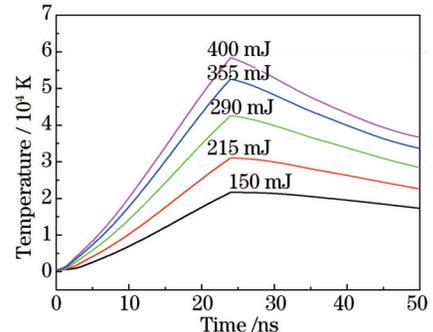


图 14 计算的不同能量下空泡中心点温度随时间的变化曲线

Fig.14 Temperature histories in the central of cavitations bubbles induced by varied laser pulse energies

表 2 给出了采用文献 9 中等离子体初始压力和温度的计算方法得到的理论计算值。与图 13 和图 14 的模拟计算结果比较可知,模拟计算的空泡中心压力和温度均低于理论计算值。理论计算中激光能量瞬间注入到空泡内,而数值模拟计算中,在注入能量的同时气泡已经开始向外膨胀,体积扩大,压力和温度相应减小。另外在理论计算中并没有考虑水汽化时吸收的能量,这也使得计算值偏高。因此数值模拟计算结果更接近实际情况。为了精确描述激光作用水的能量沉积过程,还需要建立考虑更多因素的数值计算模型。

表 2 等离子体空泡初始压力和温度的理论计算值

Table2 Theoretical predictions of pressures and temperatures in the plasma bubble after optical breakdown in water

Laser pulse energy /mJ	150	215	290	355	400
Pressure /GPa	35.3	50.6	68.3	83.6	94.2
Temperature /10 <sup>4</sup> K	5.73	8.19	11.0	13.5	15.2

## 5 结 论

采用双脉冲激光纹影照相法,对激光击穿水后等离子体冲击波的演化过程进行了观测,得到冲击波传播图像和传播速度。建立了考虑水汽化和能量吸收过程、冲击波在水中传播的两相流计算模型。将数值模拟计算结果与实验结果和理论计算结果进行比较,验证了数值模拟计算的正确性。

通过数值模拟计算,给出了激光与水作用时等离子体区的压力和温度,以及冲击波传播初期压力、速度随时间的变化规律。激光等离子体爆轰波传播初期速度达到上千米,压力高达吉帕级。且随着能量的增加,初始冲击波速度和压力均明显上升。但随着时间增加,冲击波速度和压力迅速衰减。在冲击波传播后期,冲击波速度衰减为水中声速。

## 参 考 文 献

- 1 Bing Han, Zhonghua Shen, Jian Lu, *et al.*. Numerical study of water-confinement geometries for laser propulsion[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(10): 950-957.
- 2 J R Mcghee. Investigation of the acoustic source characteristics of high energy laser pulse: models and experiment[J]. *Thesis Collection*, 2008.
- 3 Wang Xiaoyu, Wang Jiang'an, Zong Siguang. Energy distribution after laser-induced optical breakdown underwater[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1002007.  
王晓宇, 王江安, 宗思光. 水下光击穿的能量分布研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1002007.
- 4 Hammer D X, Thomas R J, Noojin G D, *et al.*. Ultrashort pulse laser induced bubble creation thresholds in ocular media[C]. *Photonics West'95*. International Society for Optics and Photonics, 1995.
- 5 Felix M P, Ellis A T. Laser-induced liquid breakdown—a step-by-step account[J]. *Appl Phys Lett*, 1971, 19(11): 484-486.
- 6 Jean-Christophe Isselin, Annd-Patricia Alloncle, Michel Autric. Laser induced breakdown in water: process for shock waves generation[C]. *SPIE*, 1998, 3443: 363-369.
- 7 Joachim N, Daniel X H, Gray D N, *et al.*. Influence of pulse duration on mechanical effects after laser-induced breakdown in water [J]. *J Applied Physics*, 2008, 83(12): 7488-7495.
- 8 Richard J Scammon, Edward J C, Robert P Godwin, *et al.*. Simulation of shock waves and cavitation bubbles produced in water by picosecond and nanosecond laser pulses[C]. *SPIE*, 1998, 3254: 264-275.
- 9 Wang Yuhong, Wang Jiang'an, Ren Xichuang. Laser induced bubble characteristics with experimental and numerical methods[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(12): 8372-8328.  
王雨虹, 王江安, 任席闯. 激光空泡特性实验与数值计算研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(12): 8372-8328.
- 10 Bian Baomin, Chen Xiao, Xia Ming, *et al.*. The investigation of laser-induced plasma shock wave propagation in liquids[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(2): 508-513.  
卞保民, 陈 笑, 夏 铭, 等. 液体中激光等离子体冲击波波前传播特性研究及测试[J]. *物理学报*, 2004, 53(2): 508-513.
- 11 Rice M H, Walsh J M. Equation of state of water to 250 kilobars[J]. *J Chem Phys*, 1957, 26: 824-830.

栏目编辑: 宋梅梅