

光船对气液两相介质激光支持爆轰波影响的数值模拟

冯俊涛, 苏云鹏, 盛德仁
(浙江大学 能源工程学院 热工与动力系统研究所, 杭州 310027)

摘 要: 建立了气液两相介质单脉冲激光支持爆轰波的数值模型,结合光船边界条件,数值模拟爆轰波及其周围流场的演化过程,分析温度、压力、速度场在爆轰波发生时的变化特性和演化形态。研究表明:有无光船边界在 $30\mu\text{s}$ 前爆轰波发展趋势基本一致。激光作用结束后,焦点范围处温度压力均达到最大,速度继续上升达到最大后逐渐衰减。温度最大值一直在焦点附近,压力最大值则是在激光作用时出现在中心处,激光作用结束后,转移到波阵面上,而速度最大值发生在冲击波波阵面上。光船模型中,冲击波会与壁面发生耦合作用,冲击波的反射与叠加作用使最大温度中心会向外偏移,压力和速度会在壁面与冲击波边沿接触面的两侧处达到最大值,向内侧逐渐减小。

关 键 词: 激光推进; 抛物型光船; 气液两相介质; 激光支持爆轰波; 流场演化; 数值模拟

中图分类号: V439; TN249 **文献标志码:** A

Numerical simulation of light-craft effects on laser supported donation wave with gas-liquid two phase propellant

FENG Juntao, SU Yunpeng, SHENG Deren
(Institute of Thermal Science and Power System,
College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The numerical model of impulse laser supported donation wave with gas-liquid two phase propellant was established to analyze the evolution process of the donation wave and flow field, based on the actual light-craft boundary condition. The characteristics and evolution form of temperature, pressure, velocity field change were analyzed. The results showed: the development trend of donation wave was basically identical regardless of the craft at the first $30\mu\text{s}$. At the end of laser action, the temperature and pressure reached to the maximum in the focal range. While the velocity kept rising to the maximum and then dropped gradually, the maximum temperature was near the focus, maximum stress occurred at the center and then transferred to the front of the wave, and maximum speed occurred on the shock wave. When combined with craft, the shock wave produced thrust coupled with the wall. The maximum temperature center shifted outward because of the shock wave reflection. The pressure and speed reached the maximum at two sides of the interface where the shock wave edge got to the wall, and then decreased toward the inside gradually.

收稿日期:2017-09-13
基金项目:国家自然科学基金(51276169)
作者简介:冯俊涛(1993—),男,硕士生,主要从事湿蒸气两相介质数值模拟研究。

引用格式:冯俊涛,苏云鹏,盛德仁. 光船对气液两相介质激光支持爆轰波影响的数值模拟[J]. 航空动力学报,2018,33(11):2669-2677. FENG Juntao, SU Yunpeng, SHENG Deren. Numerical simulation of light-craft effects on laser supported donation wave with gas-liquid two phase propellant[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(11): 2669-2677.

Key words: laser propulsion; parabolic light craft; gas-liquid two phase; laser supported detonation wave; flow field evolution; numerical simulation

激光推进具有有效载荷比高、比冲高、发射成本低等优点^[1],其能量转换主要由激光支持爆轰波来实现。现代微型卫星的推进方式以集成化、微型化为主要特点,高效绿色安全的激光推进具有技术优势和广泛的应用前景。

激光推进的能量转换过程比较复杂,激光能量通过激光光束汇聚到推进器中一点,能量密度超过介质击穿阈值时,在激光束的强电场作用下,介质发生电离,吸收激光能量,压力急剧升高、体积膨胀,发生小范围的爆炸^[2],爆炸产生的压力转化为光船壁面的压力,进而推动光船前进^[3]。

目前已有大量对大气呼吸模式^[3-5]、火箭烧蚀模式^[6-9]激光推进的研究。对两相介质激光推进的研究还不多^[10],数值模拟方面也仅限于单相介质的研究^[10-14]。前期研究表明,气液两相介质能够降低介质击穿阈值^[15],在一定程度上有助于提高能量转化效率^[16];光船形状方面,抛物型光船的推进性能最佳^[17]。本文研究在无光船约束气液两相介质激光作用的基础上,通过数值模拟分析抛物型光船气液两相介质激光推进的能量传递变化特性和演化形态,并对比分析加上光船后流场的发展情况。

1 激光支持爆轰波数值模型

如图 1 所示,透镜焦距与激光束界面半径、圆形光斑(爱里斑)半径之间的关系可表示

$$r_i = \frac{0.61\lambda f_0}{r_0}$$
 (1)

式中 λ 为激光波长; f_0 为聚焦透镜焦距; r_1 为激光束截面半径。

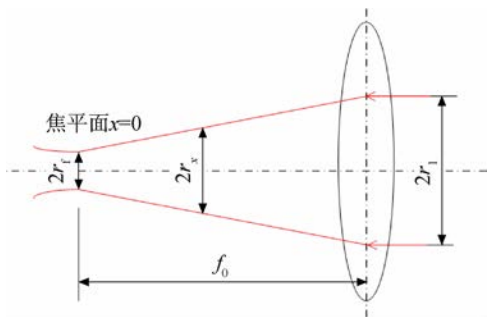


图 1 激光光束聚焦示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser beam focusing

焦平面上激光光强呈高斯分布

$$I(x,r,t) = 2P_i(\pi r_i^2) \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{r_i^2}\right)$$
 (2)

式中 P_i 为入射激光功率, r 为焦平面上的半径。

非焦平面上,激光功率也呈高斯分布。取焦平面中心点为坐标原点,根据几何相似原理,激光光路截面半径 $r(x)$ 可以表示为

$$\frac{r(x) - r_i}{r_1 - r_i} = \frac{x}{f_0}$$
 (3)

$$r(x) = \frac{x}{f_0}(r_1 - r_i) + r_i$$
 (4)

在 t 时刻,激光光路截面距焦平面为 x ,径向坐标为 r 的位置处激光光强为

$$I(x,r,t) = 2P_i/[(\pi r(x)^2)] \cdot e^{-\frac{2r^2}{r(x)^2}}$$
 (5)

激光传输过程中,由于等离子体的对激光的能量吸收,根据激光辐射输运方程可得

$$\frac{dI}{dl} = -\alpha I$$
 (6)

式中 l 为激光光学传播距离; α 为吸收系数,其值由高温等离子体温度和电子密度决定。

在焦平面处,激光能量聚焦达到光学击穿所需的阈值,介质发生光学击穿,形成等离子体吸收区。平衡时介质的组分主要来自 N_2 、 O_2 和 H_2O 的分解产物,平衡时高温等离子体的压力可以表示为

$$p = an_0kT$$
 (7)

式中 a 为压强增值系数,初始值为 1; n_0 为初始分子数密度; k 为玻耳兹曼常数; T 为介质的热力学温度。

激光焦点周围存在一定厚度等离子体,部分激光能量被等离子体吸收转化为内能,等离子体向外膨胀形成激光支持爆轰波。建立了气液两相激光支持爆轰波的物理模型,如图 2 所示。

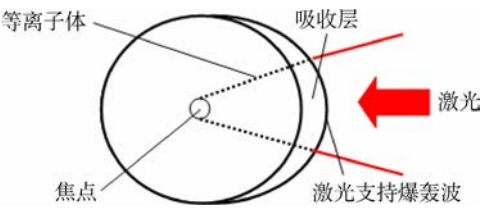


图 2 气液两相介质激光支持爆轰波物理模型

Fig. 2 Physical model of laser supported detonation wave in gas-liquid two phase medium

由于此过程的复杂性,为了确保数值计算的可行性与可靠性,采用能量沉积模型^[11,18]进行合理的简化,并假设:

- 1) 把激光支持爆轰波形成过程看作是二维轴对称、考虑热传导的湍流模型。
- 2) 液相为珠状小水滴,重力作用的影响可以忽略,小水滴在整个空间均匀分布。
- 3) 气相为空气,满足理想气体条件。
- 4) 两相介质击穿后形成的高温等离子体组成的分解产物以及电离产物,处于局域热力学平衡,各粒子组分(N_2 、 O_2 和 H_2O 的分解产物)遵循玻耳兹曼分布。
- 5) 以介质击穿温度为界,气体温度低于击穿温度时,按气液两相介质计算,反之以击穿后形成的等离子体计算。

2 激光支持爆轰波数值模型

为了验证数值模拟方法的准确性,本文参照文献[19]空气介质无约束条件下激光支持爆轰波纹影测量实验的参数,建立了空气介质激光支持爆轰波的数值模型,进行数值模拟,将结果与文献

[19]中激光支持爆轰波纹影测量实验结果进行了比较,结果如图 3、图 4 所示。

图 3 为不同时刻下数值模拟空气介质激光支持爆轰波的密度演化过程,可以看出,在激光支持爆轰波流场演化过程中,流场中出现了两个密度间断层,除外部未受到干扰的区域外,密度场内到外可分为两个区域:内部是低压区,密度低于初始态介质密度,可视为高温等离子体区域;中间环形薄层区域密度较高,高于初始态介质密度,可视为爆轰波波阵面。

图 4 为文献[19]实验测量流场的不同时刻的纹影照片,激光从右边入射。图中纹影照片明显显示出了两个密度间断层,密度区域的大小和形状与图 3 数值模拟的结果基本一致。同时对比图 3 和图 4,可以看出,波阵面的演化过程和发展趋势基本保持一致,基本均由椭圆向圆形转变。实验照片得到是流场阴影图,因此计算结果与实验结果在细微结构上有一定差别。在此基础上,空气介质激光支持爆轰波数值模拟的结果比较接近实验结果,故可验证该激光支持爆轰波数值模拟方法。

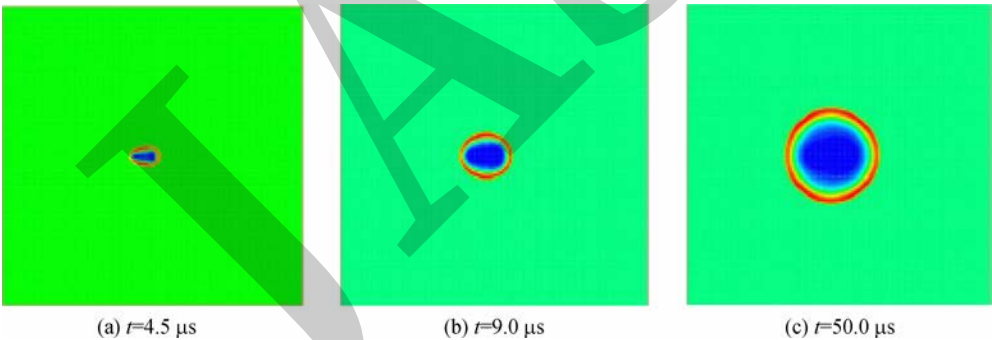


图 3 数值模拟激光支持爆轰波的密度演化过程
Fig. 3 Numerical simulation of density evolution of laser supported detonation wave

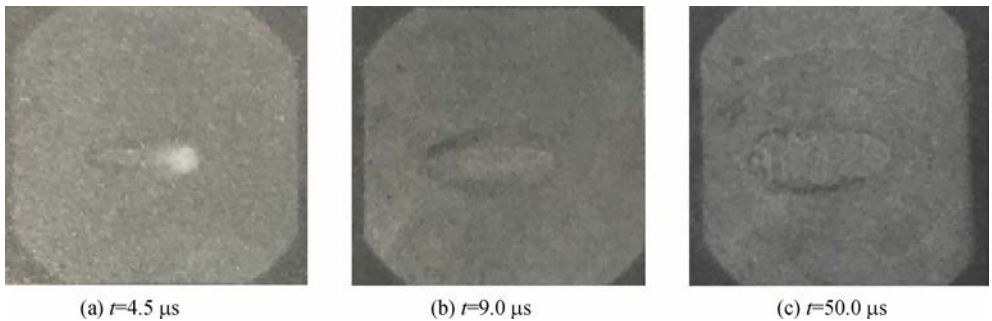


图 4 激光支持爆轰波流场的纹影摄影照片
Fig. 4 Schlieren photo of a laser supported detonation wave flow field

3 数值计算与结果分析

3.1 计算网格和条件设置

3.1.1 计算网格设计

无光船模型,不考虑周围界面对流场的影响,使用正方形网格。取正方形尺寸 100 mm×100 mm(如图 5),网格数量 500×500。抛物形光船(如图 6)出口半径 20 mm,采用三角形网格。

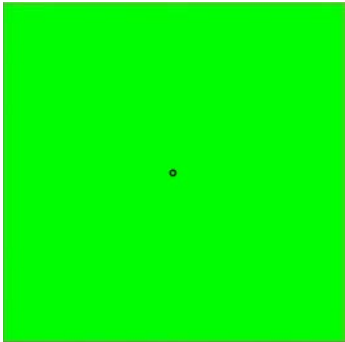


图 5 无光船模型

Fig. 5 Model without parabolic light craft

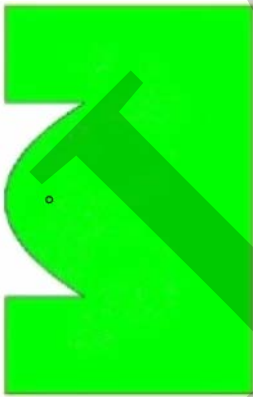


图 6 抛物形光船模型

Fig. 6 Parabolic light craft model

3.1.2 计算参数和条件

气液两相介质激光支持爆轰波演化过程的数值模拟所取计算参数:液相小水滴粒径 $d_1 = 1\text{ }\mu\text{m}$,体积分数 $\varphi = 0.001$,介质初始温度 $T = 300\text{ K}$,初始压力 $p = 0.1013\text{ MPa}$,聚焦透镜焦距 $f = 245\text{ mm}$,激光束入射截面半径 $r_1 = 22\text{ mm}$,入射激光波长 $\lambda = 325\text{ nm}$ 。激光脉冲时间 $\tau = 1\text{ }\mu\text{s}$,激光脉冲功率 $P_1 = 0.5\text{ MW}$,计算迭代步长 $0.1\text{ }\mu\text{s}$ 。

计算使用压力基非稳态进行迭代计算,启用能量方程,加载 UDF 编程的源项。湍流模型选

择 $k-\epsilon$ 黏度模型。为了更好地计算爆轰波传播过程的热传导,采用离散传播辐射(DTRM)模型。

3.2 无光船模型数值模拟结果

激光作用时间为 $1\text{ }\mu\text{s}$,选取时刻 $t = 1, 3, 10, 30\text{ }\mu\text{s}$ 的温度、压力和速度进行分析。

图 7 为不同时刻流场的温度分布。不同时刻流场高温区域分布在对称轴两侧的激光光路作用

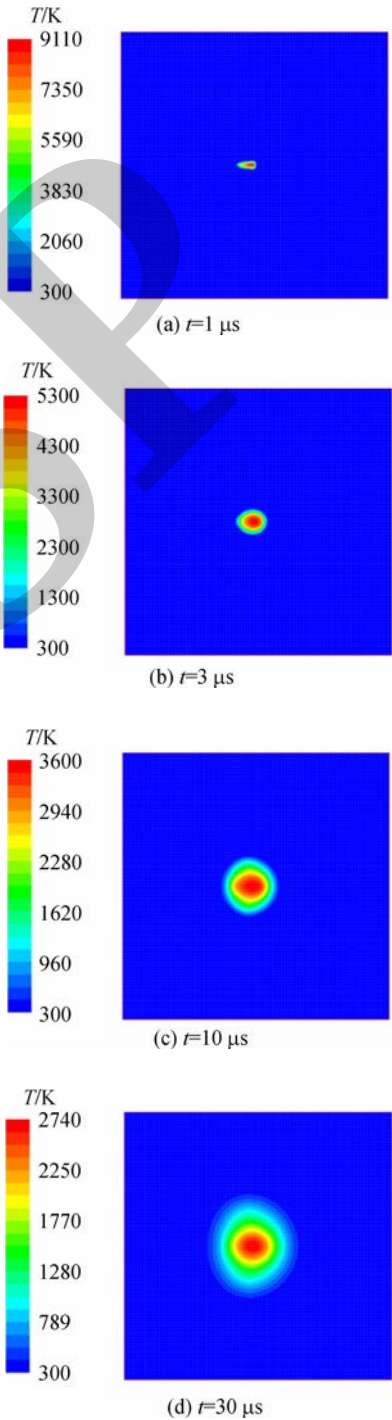


图 7 温度场随时间演化过程(无光船模型)

Fig. 7 Temperature field with time evolution (model without parabolic light craft)

范围内。激光作用时在焦平面附近和爆轰波波阵面上产生高温区域,在激光作用结束时达到最高温度 9 110 K;激光作用结束后,高温区域向周围扩大,等离子体的膨胀导致中心点温度开始逐渐下降。高温区域的扩大的过程中最高温度仍然保持在焦平面处。

图 8 为不同时刻流场的压力分布。爆轰波波

阵面在激光作用结束后近似于椭圆,并随着时间推移椭圆长短轴之差逐渐减小,最大压力为 $1\ \mu\text{s}$ 时,达到 30.5 MPa。激光焦点附近波阵面为爆轰波阵面,在激光作用期间大量吸引激光能量,入射方向传播速度快,其余方向为冲击波阵面,传播速度较慢,因此激光作用结束后压力分布云图呈现明显椭圆形态。与温度场演化情况不同的是,随着爆轰波的演化和时间推移,最高压力从初始平面处不停向外推移,内部等离子体压力不断下降,形成内部的低压区。

图 9 为不同时刻流场的速度分布。从上述流场的压力和温度分布可见,爆轰波从焦点处形成并向周围传播,在激光光源方向形成爆轰波,压力较高,在其他方向上与压力场的传播类似,速度最大值不停向外推移,并可将其视为波阵面。内部等离子体速度不断下降,中心区域甚至趋向于零。

3.3 抛物形光船模型数值模拟结果

激光作用时间为 $1\ \mu\text{s}$,选取时刻 $t=1,10,30$,

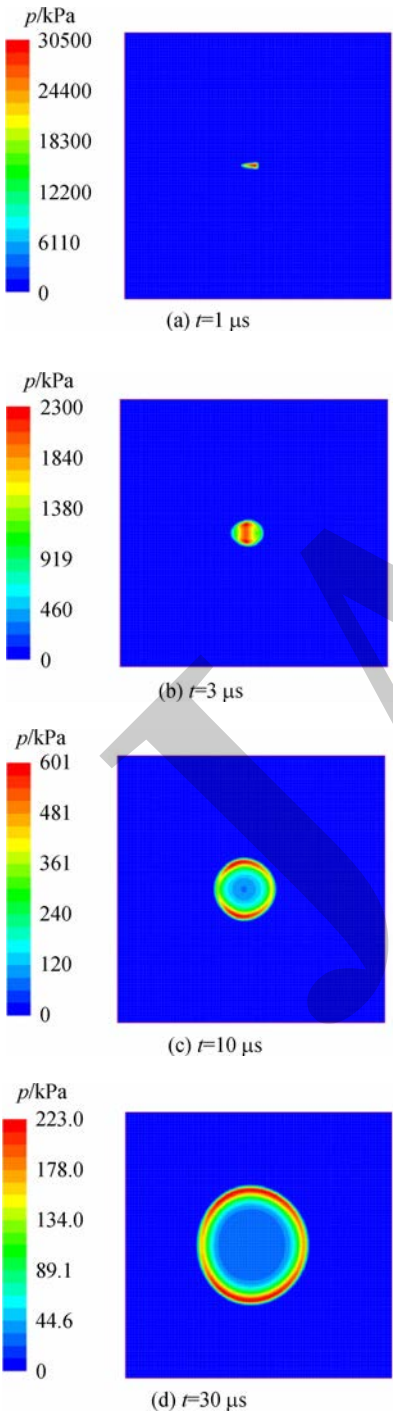
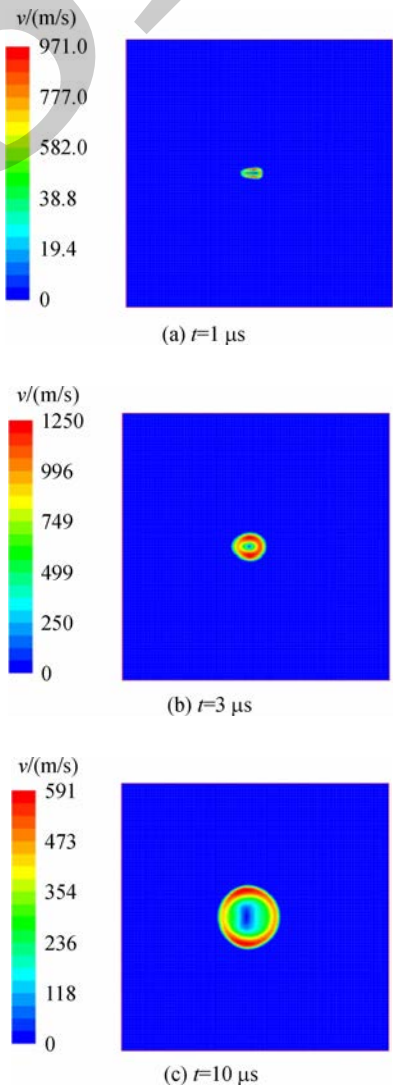


图 8 压力场随时间演化过程(无光船模型)
Fig. 8 Pressure field with time evolution
(model without parabolic light craft)



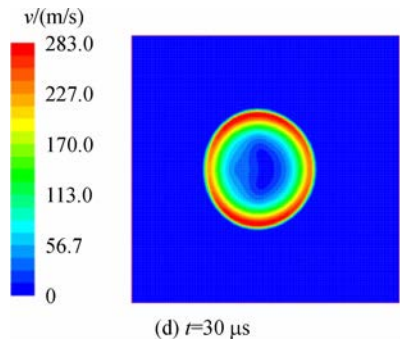


图 9 速度场随时间演化过程(无光船模型)
Fig. 9 Velocity field with time evolution
(model without parabolic light craft)

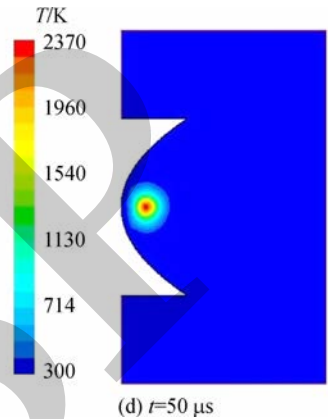
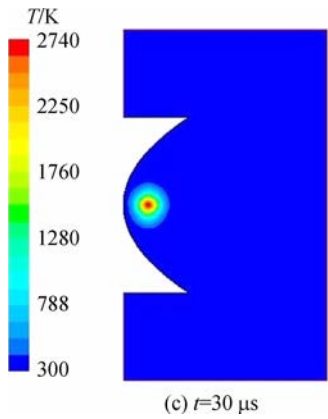
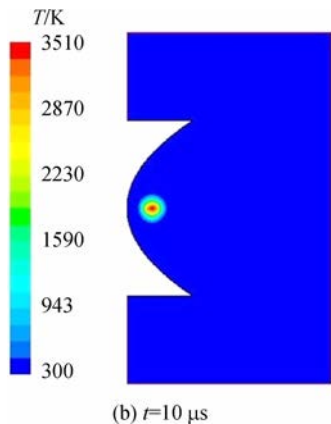
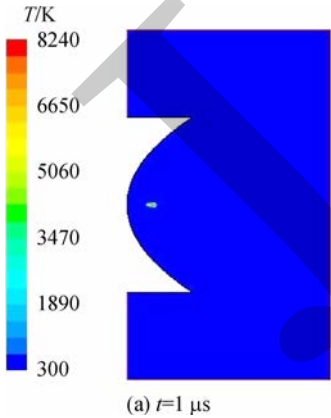


图 10 温度场随时间演化过程(抛物形光船模型)
Fig. 10 Temperature field with time evolution
(parabolic light craft model)

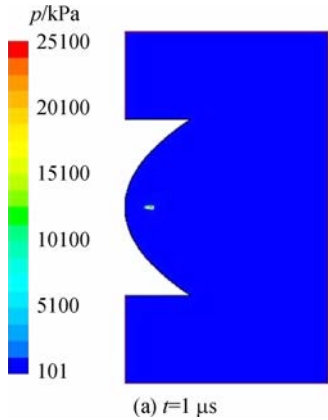
50 μs 的压力、速度和温度进行分析。

图 10 激光作用时,在焦平面附近和爆轰波波阵面上产生高温区域,在整个激光作用过程中,高温区域不断扩大,温度不断上升,在激光作用结束时达到最高温度 8 240 K;激光作用结束后,高温区域向周围扩大,中心点温度开始逐渐下降。高温区域的扩大的过程中并没有位移,最高温度仍然保持在焦平面处。与无光船模型不同的是,受到壁面反射冲击波的影响,高温区形态将发生变化,呈现图 10(d)的形态。

图 11 为压力场随时间变化的图像,1 μs 激光



作用结束时冲击波压力最大达到 25.1 MPa,在 30 μs 前最高压力从初始平面处不停向外推移,内部等离子体压力不断下降,形成内部的低压区。大约 30 μs 时波阵面到达壁面并与壁面发生耦合,产生推力。图 11(d)为与壁面耦合之后的压力图,图中可以看出,最大压力点位于耦合边界点处,此处壁面反射冲击波刚与原冲击波叠加。内侧由于反射冲击波的发展,压力比耦合边界处要小,并且向焦点方向不断衰减。



(a) $t=1 \mu\text{s}$

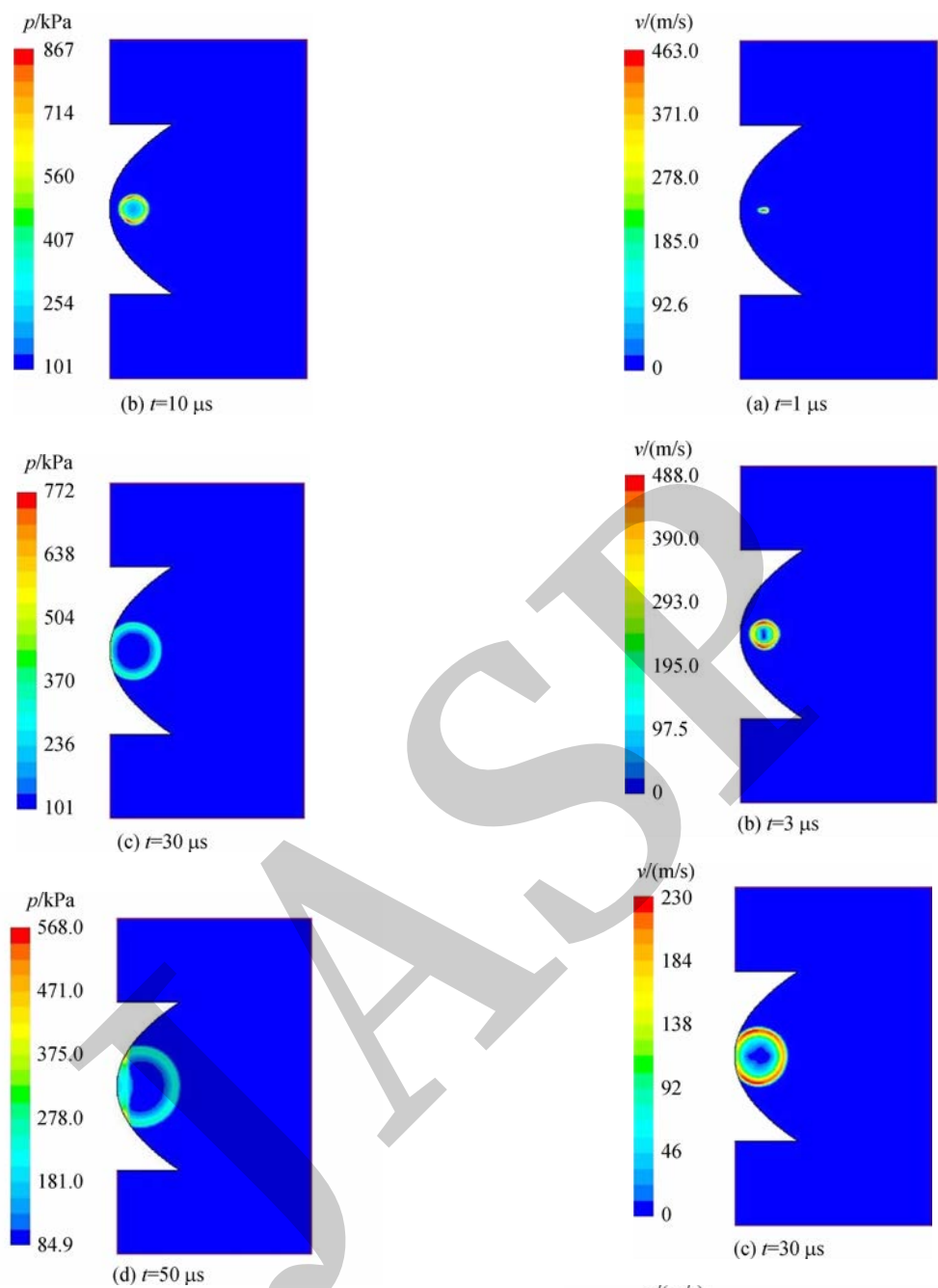


图 11 压力场随时间演化过程(抛物形光船模型)

Fig. 11 Pressure field with time evolution
(parabolic light craft model)

图 12 为速度随时间变化图像,1 μs 激光作用结束时,速度会继续上升,最大速度发生在波阵面上。从图 12(d)可以看出当冲击波与壁面作用后,反射后冲击波的波速比之前的冲击波的波速大,最终会追上并发生耦合。

对比分析,在无光船约束模型数值计算结果中,激光作用时(1 μs 内),由于透镜对激光的聚焦作用,温度、速度、压力的分布呈锥形。激光作用结束后,逐渐从椭圆向圆形过渡。且由于沿激光入射方向的优势吸收,此方向上的传播速度要快

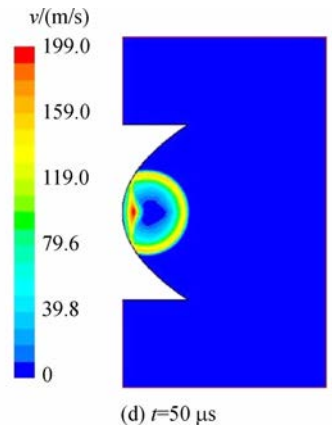


图 12 速度随时间演化过程(抛物形光船模型)

Fig. 12 Velocity field with time evolution
(parabolic light craft model)

一些,流场分布呈现长轴在入射方向的椭圆形,之后会逐渐变成圆形。在 $1\mu\text{s}$ 内,由于激光能量的沉积,焦点处温度是在不断上升的,在 $1\mu\text{s}$ 时达到最大,中心温度始终高于周围,并向外辐射能量。在整个激光作用过程中,高温区域不断扩大,温度不断上升,在激光作用结束时达到最高温度;激光作用结束后,高温区域向周围扩大,等离子体的膨胀导致中心点温度开始逐渐下降。高温区域的扩大的过程中最高温度仍然保持在焦平面处。速度最大值发生在波阵面上,由于能量的积聚以及内能的转化,并不在激光作用结束后立即达到最大。而压力的变化则介于两者之间,在激光作用结束前,最大值发生在波阵面内部。激光作用结束后,最大压力向波阵面转移。

加上光船模型后,在波阵面到达壁面前,爆轰波的发展趋势与无光船约束时相同。当波阵面到达壁面后,由于冲击波与光船壁面的耦合以及冲击波的反射,最大温度中心会向外偏移。由于冲击波与壁面耦合产生推力,压力度和速度会在壁面与冲击波边沿接触面的两侧处达到最大值,并向内侧逐渐减小。这是由壁面反射冲击波与原冲击波叠加所引起。内侧由于反射冲击波的发展,压力比耦合边界处要小,并且向焦点方向不断衰减。

4 结 论

1) 建立了气液两相介质激光支持爆轰波数值计算模型,分析了激光作用后温度、速度、压力场,并研究了加上光船约束后对爆轰波发展趋势的影响。

2) 在 $30\mu\text{s}$ 前,有无光船对爆轰波无影响,爆轰波发展趋势基本一致。激光作用结束后,焦点范围处温度压力均达到最大,而速度会继续上升达到最大后逐渐衰减,温度最大值一直在焦点附近,而压力和速度最大值发生在冲击波波阵面上。

3) 加上光船后,冲击波会与壁面发生耦合作用,冲击波的反射与叠加作用会使最大温度中心会向外偏移,并且压力度和速度会在壁面与冲击波边沿接触面的两侧处达到最大值,并向内侧逐渐减小。

参考文献:

[1] 洪延姬,李修乾,窦志国. 激光推进研究进展[J]. 航空学报,2009,30(11):2003-2014.
HONG Yanji, LI Xiuqian, DOU Zhiguo. Advances in study

on laser propulsion[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(11):2003-2014. (in Chinese)

- [2] 陈朗,鲁建英,冯长根. 空气中激光支持爆轰波实验及理论分析[J]. 高压物理学报,2010,24(2):154-160.
CHEN Lang, LU Jianying, FENG Changgen. Experimental and theoretical investigation on laser supported detonation waves in air[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(2):154-160. (in Chinese)
- [3] 龚平,唐志平. 大气呼吸模式激光推进的机理分析及数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2003,23(6):501-508.
GONG Ping, TANG Zhiping. Mechanism analysis and numerical simulation of air-breathing model for laser propulsion[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(6):501-508. (in Chinese)
- [4] 吴建军,鄢昌渝,刘洪刚,等. 基于二维激光支持爆轰波模型的光船工作过程数值模拟[J]. 推进技术,2007,28(5):509-512,521.
WU Jianjun, YAN Changyu, LIU Honggang, et al. Numerical simulation of the operating process based on 2D LSD-wave for the lightcraft[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(5):509-512, 521. (in Chinese).
- [5] 叶继飞,洪延姬,王广宇,等. 基于热力循环的激光微推力发动机特性研究[J]. 中国激光,2012,39(1):89-93.
YE Jifei, HONG Yanji, WANG Guangyu, et al. Research of micro laser thruster engine performance based on thermodynamic cycle analysis[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(1):89-93. (in Chinese)
- [6] 蔡建,胡晓军,唐志平. 烧蚀模式激光推进的实验研究[J]. 推进技术,2008,29(3):371-376.
CAI Jian, HU Xiaojun, TANG Zhiping. Experimental investigation on ablation mode of laser propulsion[J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(3):371-376. (in Chinese)
- [7] 童慧峰,唐志平,张凌,等. 烧蚀模式激光推进的数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2007,27(2):165-170.
TONG Hui Feng, TANG Zhiping, ZHANG Ling. Simulation of ablation mode laser propulsion[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(2):165-170. (in Chinese)
- [8] 李修乾,洪延姬,文明,等. 水滴烧蚀多脉冲激光推进性能[J]. 强激光与粒子束,2011,23(7):1731-1734.
LI Xiuqian, HONG Yanji, WEN Ming, et al. Propulsive characteristics of water droplets for multi-pulse laser propulsion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(7):1731-1734. (in Chinese)
- [9] 盛德仁,史香锬,陈坚红,等. 气液两相工质激光推进的理想动力循环模型[J]. 推进技术,2015,36(12):1909-1914.
SHENG Deren, SHI Xiangkun, CHEN Jianhong, et al. Ideal cycle model for laser propulsion with gas-liquid two phase propellant[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(12):1909-1914. (in Chinese)
- [10] CHEN H, SHI L, MA L, et al. Numerical simulation of air-breathing nanosecond laser propulsion considering subsonic inflow and multi-pulse[J]. Optik-International Journal

for Light and Electron Optics,2014,125(14):3444-3448.

[11] 李倩,洪延姬,曹正蕊. 吸气式激光推进推力产生机理的数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2006,26(6):550-555.

LI Qian,HONG Yanji,CAO Zhengrui. Numerical simulation of thrust generating mechanism for air-breathing laser propulsion[J]. Explosion and Shock Waves,2006,26(6):550-555. (in Chinese)

[12] 崔村燕,洪延姬,李倩,等. 水工质激光推进数值建模分析[J]. 推进技术,2007,28(5):501-504.

CUI Chunyan,HONG Yanji,LI Qian,et al. Analysis of numerical models to describe inner flow-field evolution of laser propulsion with water propellant[J]. Journal of Propulsion Technology,2007,42(1):31-32. (in Chinese)

[13] YANG Y N,YANG B,ZHU J R,et al. Theoretical analysis and numerical simulation of the impulse delivering from laser-produced plasma to solid target[J]. Chinese Physics B,2008,17(4):1318-1325.

[14] YAN H,ADELGREN R,BOGUSZKO M,et al. Laser energy deposition in quiescent air[R]. AIAA-2003-1051,2003.

[15] 盛德仁,苏云鹏,史香锟,等. 激光诱导下雾化水滴颗粒的击穿特性[J]. 浙江大学学报(工学版),2016,50(5):949-954.

SHENG Deren,SU Yunpeng,SHI Xiangkun,et al. Optical breakdown model of atomized water droplet induced by laser[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2016,50(5):949-954. (in Chinese)

[16] VOLKOV K N,EMEL'YANOV V N. Calculation of the threshold power of optical breakdown during interaction between a laser pulse and droplets of dielectric liquid[J]. High Temperature,2005,43(3):344-351.

[17] 鄢昌渝,吴建军,刘洪刚,等. 抛物型激光推进光船构型设计与特性分析[J]. 推进技术,2007,28(5):457-461.

YANG Changyu,WU Jianjun,LIU Honggang,et al. Design of configuration and analyse of properties for parabolic laser propulsion lightcraft[J]. Journal of Propulsion Technology,2007,28(5):457-461. (in Chinese)

[18] 苏云鹏. 气液两相工质激光支持爆轰波的数值模拟和实验探究[D]. 杭州:浙江大学,2017.

SU Yunpeng. Numerical simulation and experiment analysis of laser supported detonation wave with gas-liquid two phase propellant[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2017. (in Chinese)

[19] 陈朗,伍俊英,鲁建英. 激光支持爆轰波[M]. 北京:国防工业出版社,2011.

(编辑:叶 青)