

文章编号: 1001-1455(2007)02-0165-06

烧蚀模式激光推进的数值模拟*

童慧峰^{1,2}, 唐志平¹, 张 凌¹

(1. 中国科学技术大学力学和机械工程系中科院材料力学行为与设计重点实验室, 安徽 合肥 230026;
2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 采用针对高温气体(等离子体)电离度的一种近似计算方法, 以及具有五阶精度的广义 Godunov 差分格式-加权本质无振荡格式 WENO(weighted essentially non-oscillatory schemes), 给出了高温气体状态方程的简便描述, 并考虑激光与等离子体的相互作用, 模拟了强激光与固体靶相互作用时激光支持靶面等离子体流场的动态物理过程, 并给出了不同参数条件下激光烧蚀固体靶的推进效应参数(冲量耦合系数等)。计算结果及与实验结果的对比表明, 靶材料和激光参数(功率密度、波长、脉冲宽度等)是影响推进效应的主要因素, 并且计算结果具有较高的精确度。

关键词: 固体力学; 推进效应; 激光支持等离子体流场; 激光烧蚀推进

中图分类号: O346; O532.25

国标学科代码: 130 · 1570

文献标志码: A

自从 A. Kantrowitz^[1] 提出利用高功率激光发射微小卫星的设想以来, 激光推进已经成为一种正在进行热点研究的新型推进方式。激光推进的原理, 就是利用高功率激光与物质(固体、液体、气体)相互作用产生类似于化学火箭一样的喷射, 从而推动物体前进。与化学火箭相比, 激光推进具有许多优点^[2-4]。

在激光推进研究中, 传统的实验研究不考虑激光与物质相互作用的具体物理过程。而要进一步深入必须对激光与靶物质以及靶面等离子体的相互作用、靶面等离子体的运动规律等物理过程进行研究。对于脉冲激光, 激光作用时间很短, 通过实验手段很难进行动态跟踪测试。数值模拟是了解激光与物质相互作用的物理过程各参量动态变化的有效手段。本文中在给出高温等离子体状态方程简化描述的基础上, 采用具有五阶精度的数值方法^[5] (WENO) 对脉冲激光烧蚀固体靶的动态物理过程及其对固体靶的推进效应进行二维轴对称条件下的数值模拟计算。激光与固体靶相互作用的物理过程相当复杂, 在数值模拟过程中主要强调激光与靶面蒸气的能量耦合以及对固体靶的力学推进效应等方面。

1 控制方程

在所讨论的模型中, 忽略等离子体的粘性和热传导, 则流场控制方程依然采用经典的二维轴对称可压缩流体动力学控制方程^[6]

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{U})}{\partial r} = \mathbf{H}(\mathbf{U}) \quad (1)$$

式中

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \rho \\ M \\ N \\ E \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F}(\mathbf{U}) = \begin{pmatrix} M \\ M^2/\rho + p \\ MN/\rho \\ \frac{M(E+p)}{\rho} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G}(\mathbf{U}) = \begin{pmatrix} N \\ MN/\rho \\ N^2/\rho + p \\ \frac{N(E+p)}{\rho} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H}(\mathbf{U}) = -\frac{N}{\rho r} \begin{pmatrix} \rho \\ M \\ N \\ E + p + \frac{\rho r}{N} \frac{\partial I}{\partial x} \end{pmatrix}$$

式中: $M = \rho u$, u 为 x 方向速度; $N = \rho v$, v 为 y 方向速度。 x 方向为对称轴方向。控制方程中有 5 个独

* 收稿日期: 2005-12-14; 修回日期: 2006-05-09

作者简介: 童慧峰(1976—), 男, 博士研究生。

立变量 ρ, u, v, E, p , 加上状态方程组成封闭的方程组。

对于非电离区采用理想气体状态方程

$$E = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2}\rho(u^2 + v^2), \quad pv = RT \quad (2)$$

式中: E 为单位体积的总能量, R 为理想气体常数。

对于等离子体区则采用下述的等离子体状态方程, 激光与等离子体的能量耦合通过控制方程中的 $\partial I / \partial x$ 项计入方程组的计算(这里假定了 x 方向是激光入射方向, 当激光斜入射时则有分别沿 x 和 r 方向的能量吸收项), I 是入射后被等离子体吸收的光强。

2 等离子体状态方程及逆韧致吸收

2.1 等离子体状态方程

电子的 Helmholtz 自由能为^[7]

$$F_e = -\alpha N_0 kT \left(\ln \left(\frac{AT^{3/2}}{\alpha \rho N_0} \right) + 1 \right) + N_0 Q(\alpha) \quad (3)$$

式中

$$A = \frac{2(2\pi m_e k)^{3/2}}{h^3}, \quad Q(\alpha) = \sum_{i=1}^L I^i + (\alpha - L) I^{L+1}$$

α 是系统平均电离度, L 是整数, $\alpha - 1 < L < \alpha$ 。 m_e 为电子质量, k, h 分别为玻尔兹曼常数和普朗克常数, I^i 是原子的第 i 级电离势, N_0 为单位质量的总原子数。

根据热力学关系

$$P = \rho^2 \frac{\partial F}{\partial \rho}, \quad S = -\frac{\partial F}{\partial T}, \quad E = F + TS = -T^2 \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{F}{T} \right) \quad (4)$$

可以得到电子对状态方程贡献项的表达式

$$P_e = \alpha N_0 \rho kT, \quad E_e = \frac{3}{2} \alpha N_0 kT + N_0 Q(\alpha) \quad (5)$$

由前面的推导可以知道, 要计算等离子体中电子作用项, 最主要的就是系统平均电离度的计算。

在电离平衡计算中, 各级离子数通过一组方程确定

$$\frac{N^i}{N^{i-1}} = K(\rho, T), \quad K(\rho, T) = \frac{g^i}{g^{i-1}} \frac{2(2\pi m_e kT)^{3/2}}{\rho N_e h^3} \exp\left(-\frac{I^i}{kT}\right) \quad (6)$$

式中: N^i, N^{i-1} 分别为单位质量等离子体的第 $i, i-1$ 级离子数, g^i 是第 i 级离子的基态统计权系数。

忽略等离子体中离子温度与电子温度的差别, 得到高温气体状态方程的简化描述

$$P = (1 + \alpha) N_0 \rho kT, \quad E = \frac{3}{2} (1 + \alpha) N_0 kT + N_0 Q(\alpha) \quad (7)$$

2.2 逆韧致吸收

按照 Y. B. Zel'dovich 等^[7]的理论, 当激光功率密度较大(大于 0.1 GW/cm^2)时, 物质蒸气吸收激光能量主要应归因于自由电子的逆韧致辐射。吸收系数

$$K_R = \frac{2.432 \times 10^{-37}}{(h\nu)^3} \left(1 - \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right) \right) \frac{Z(Z+1)^2 N_e^2}{T^{1/2}}$$

在具体的计算当中上面的公式过于复杂, 更细致的计算可以得到等离子体的线性吸收系数

$$K_R = 2.91 \times 10^{-21} \frac{Z(N_e/N_{ec})^2 N_{ec} \ln \bar{\Lambda}}{\sqrt{1 - N_e/N_{ec}} T^{3/2}} \quad (8)$$

$$N_{ec} = 1.115 \times 10^{13} / \lambda^2 \quad (9)$$

式中: N_e 为自由电子数密度, N_{ec} 为临界自由电子粒子数密度, 单位都为 cm^{-3} ; K_R 的单位为 cm^{-1} ; $\ln \bar{\Lambda}$ 为 Gaunt 因子参数。从上式可以看出, 逆韧致吸收系数和靶物质以及电离度、激光波长以及等离子体温度有较敏感的关系, 而且吸收系数在临界面附近最大。

3 数值方法

WENO 差分格式是 20 世纪 90 年代在 ENO(essentially non-oscillatory schemes)的基础上发展起来的具有高精度、高分辨率的一种差分格式^[5], WENO 格式利用各个备选模板的凸组合的方式重构, 每个模板的权值也就是组合系数的选取依赖于该模板上数值解的局部光滑性, 这样, 在同样的可选模板情况下, 在光滑区域, WENO 具有比 ENO 更高的精度, 而在间断附近, 又保持有 ENO 的性质。

为满足稳定性和相容性条件, 要求

$$\omega_r \geq 0, \quad \sum_{i=0}^{k-1} \omega_r = 1 \tag{10}$$

式中: ω_r 为各个备选模板凸组合的权。当 $f(u)$ 在一个或更多的模板上出现间断时, 为避免采用线性权而引起的强烈振荡, 须构造非线性权

$$\omega_r = \frac{\alpha_r}{\sum_{s=0}^{k-1} \alpha_s} \quad r = 0, 1, \dots, k - 1 \tag{11}$$

式中

$$\alpha_r = \frac{d_r}{(e + \beta_r)^2}$$

引入小量 $e(e > 0)$ 用以避免出现分母为零, 通常情况下取 $e = 10^{-6}$ 。 β_r 为光滑因子, SHU Chi-wang^[5] 给出了一种光滑因子和非线性权的构造方法

$$\beta_r = \sum_{l=1}^{k-1} \int_{x_{j-1/2}}^{x_{j+1/2}} \Delta x^{2l-1} \left(\frac{\partial^l p^{(r)}(x)}{\partial^l x} \right)^2 dx \tag{12}$$

式中: $p^{(r)}(x)$ 是在区间 $I_j = (x_{j-1/2}, x_{j+1/2})$ 上节点模板 $S_r(j)$ 的插值多项式。取 $k = 3$ 时

$$\begin{aligned} \beta_0 &= \frac{13}{12}(f_j - 2f_{j+1} + f_{j+2})^2 + \frac{1}{4}(3f_j - 4f_{j+1} + f_{j+2})^2 \\ \beta_1 &= \frac{13}{12}(f_{j-1} - 2f_j + f_{j+1})^2 + \frac{1}{4}(f_{j-1} - f_{j+1})^2 \\ \beta_2 &= \frac{13}{12}(f_{j-2} - 2f_{j-1} + f_j)^2 + \frac{1}{4}(f_{j-2} - 4f_{j-1} + 3f_j)^2 \end{aligned}$$

这样得到的权值具有以下性质:

(1) 在光滑区域, 有 $\omega_r \approx d_r$, 可以证明在光滑区域格式具有 $2k - 1$ 阶精度;

(2) 在激波附近, WENO 流通量与 ENO 的流通量相似, 因为在有间断通过的节点模板上权值接近于零。

对于二维情形, 在 (x_j, y_l) 点重构 $f_x(u)$, 由于 $f_x(u)$ 只是 x 的导数, 因此固定网格点上 y 方向的值 y_l , 只考虑 x 方向, 这样有限差分 WENO 重构实际上是 x 方向上的一维重构; 同样, 重构 $g_y(u)$ 也只是 y 方向上的一维问题。利用这种思想可以扩展到多维空间中。

4 结果与讨论

4.1 流场分析

计算模型: 靶材料为铝, 光斑半径 $r = 0.59 \text{ mm}$, 激光波长 $\lambda = 1.06 \text{ }\mu\text{m}$, 激光功率密度 $I = 11 \text{ GW/cm}^2$, 激光脉冲宽度 $\tau = 10 \text{ ns}$, 单脉冲能量 $E = 1.2 \text{ J}$ 。

计算区域如图 1 所示, AB 边界是对称轴, $ABFE$ 是激光作用区域, AE 是激光烧蚀边界, AD 是靶面固壁, DC 、 CB 为无约束自由出口边界。在激光作用期间, 在烧

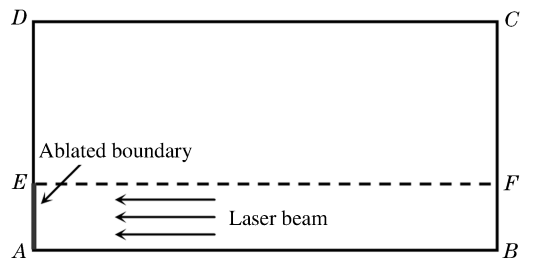


图 1 计算简易模型

Fig. 1 Simple model of simulation

蚀边界处采用的是稳态近似,也就是说在激光作用时间内烧蚀边界处的量是定常的。

图2~3分别给出了不同时刻的等离子体流场分布图(等值线图)。从密度分布图可以看到,等离子体的粒子运动速度相对较慢,前驱冲击波的密度比波后流场的密度要小。而温度分布刚好相反,前驱冲击波的温度比波后流场的温度要高。从100~200 ns的流场分布图可以得到,前驱冲击波的速度平均值为约7.5 km/s。

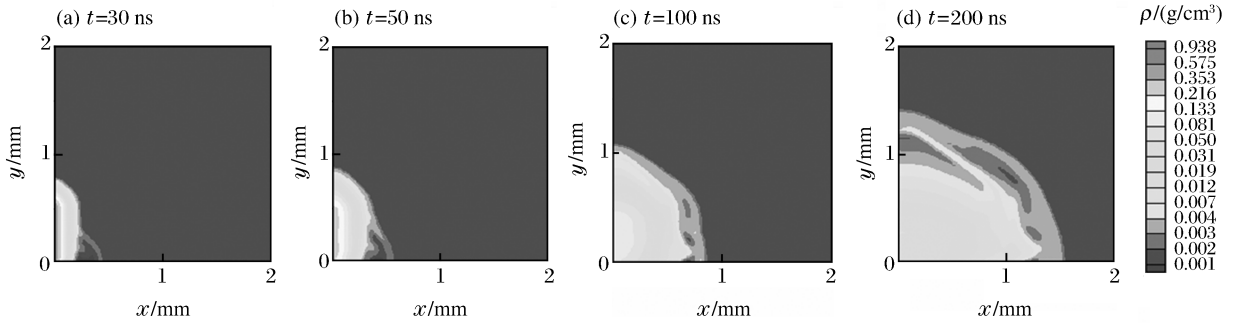


图2 密度等值线图

Fig. 2 Density contours

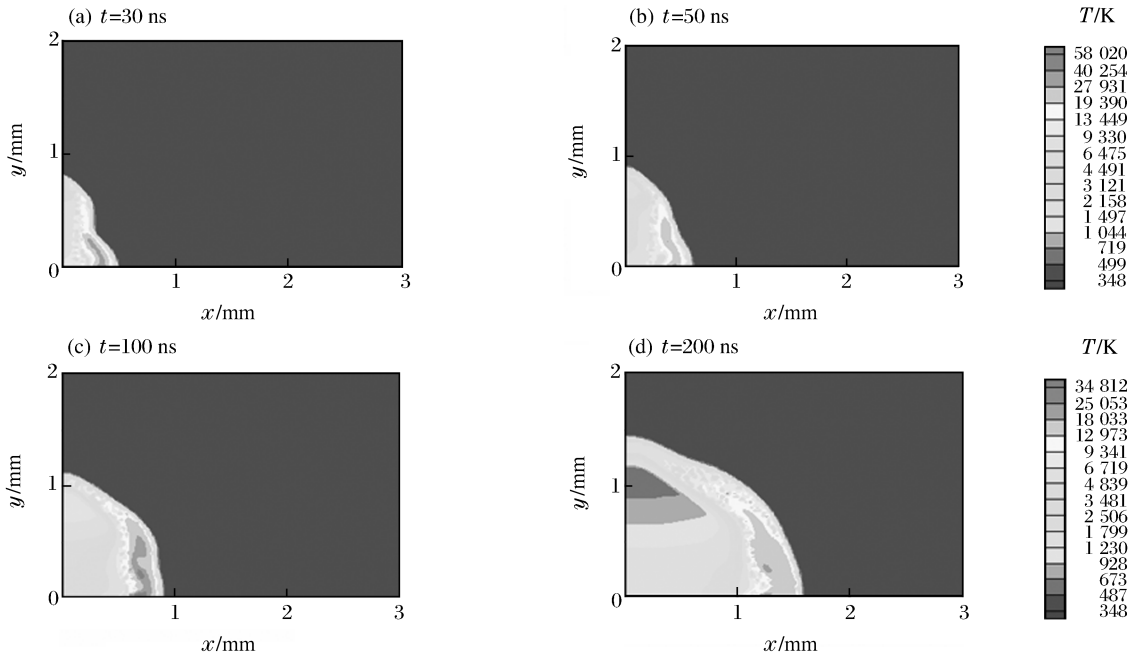


图3 温度等值线图

Fig. 3 Temperature contours

4.2 推进效应

冲量耦合系数是衡量激光推进效应的重要参数,为单位激光能量固体靶所获得的推进冲量

$$c_m = \frac{\int p(t) dt}{E_i} = \frac{M}{E_i} \quad (13)$$

式中: $p(t)$ 为靶面动态烧蚀压力, M 为作用过程中固体靶所获得的推进冲量, E_i 为入射激光总能量。

采用单脉冲激光对铝、铜、钢以及石墨等材料进行了大气环境中的激光推进实验,得到了这些材料在不同功率密度下的冲量耦合系数数据^[2]。为了验证计算结果的准确性,选取功率密度为11 GW/cm²时铝、铜、铁和石墨等四种材料的冲量耦合系数数值计算结果,与实验结果进行比较。由表1可以看到,实验结果与计算结果吻合得很好。

表 1 实验与计算的冲量耦合系数

Table 1 Mechanical coupling coefficient values of experiment and simulation

材料	$c_{me}/(\mu\text{N}/\text{W})$	$c_{ms}/(\mu\text{N}/\text{W})$
铝	79.4	79.6
铜	77.9	78.2
铁	76.9	62.8
石墨	88.9	90.2

表 2 不同激光参数下的计算结果

Table 2 Simulation results of different laser parameters

$I/(\text{GW}/\text{cm}^2)$	τ/ns	r/mm	E/J	$M/(\mu\text{N} \cdot \text{s})$	$c_m/(\mu\text{N}/\text{W})$
5	20	1	3.14	432	137.6
		2	12.56	1 865	148.5
	50	1	7.85	653	83.2
		2	31.40	2 782	88.6
	200	1	31.40	1 633	52.0
		2	125.60	6 998	55.7
10	20	1	6.28	664	105.7
		2	25.12	2 866	114.1
	50	1	15.70	1 083	69.0
		2	62.80	4 634	73.8
	200	1	62.80	3 464	55.2
		2	251.20	13 634	54.3
20	20	1	12.56	679	54.1
		2	50.24	2 989	59.5
	50	1	31.40	1 243	39.6
		2	125.60	5 500	43.8
	200	1	125.60	3 557	28.3
		2	502.40	16 172	32.2
50	20	1	31.40	802	25.5
		2	125.60	3 505	27.9
	50	1	78.50	2 139	27.2
		2	314.00	8 689	27.7
	200	1	314.00	7 492	23.9
		2	1 256.00	35 263	28.1
100	20	1	62.80	1 187	18.9
		2	251.20	5 910	23.5
	50	1	157.00	3 100	19.7
		2	628.00	14 388	22.9
	200	1	628.00	13 486	21.5
		2	2 512.00	60 111	23.9

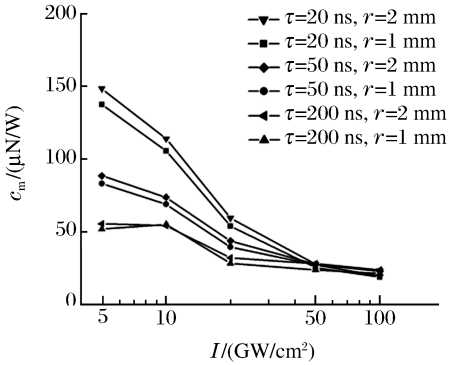


图 4 不同脉冲宽度不同光斑大小条件下冲量耦合系数随激光功率密度的变化情况

Fig. 4 Varieties of mechanical coupling coefficient with laser intensity under different laser pulse duration and different laser spot

为了得到不同激光参数对激光推进效应的影响,对于铝靶,计算了单脉冲条件下激光功率密度、激光脉冲宽度、激光光斑大小和单脉冲总能量等参数不同时的推进性能参数。表 2 给出了不同参数条件下的冲量耦合系数,图 4 给出了不同激光脉冲宽度、不同光斑大小条件下推进效应参数(冲量耦合系数)随激光功率密度的变化情况。

由图中可以看出,激光功率密度是决定推进效应的主要参量,随着激光功率密度的增加,冲量耦合系数有较大幅度的降低。但激光功率密度已经达到很高(大于 50 GW/cm^2)后,激光功率密度继续增加时冲量耦合系数只有很小的下降。激光脉冲宽度对推进效应也有较大的影响。

5 小 结

采用具有五阶精度的 WENO 算法,计算了高功率激光辐照固体靶材料时靶面激光支持等离子体流场的动态发展过程以及对靶的力学推进效应(冲量耦合系数):

(1)计算了大气环境下激光烧蚀铝靶的等离子体流场,给出了不同时刻各参量的等值线图,计算得到等离子体先驱冲击波的速度为约 7.5 km/s 。

(2)采用固体靶面的流场压力积分计算固体靶所受到的冲量,单位激光能量固体靶所获得的冲量即为衡量推进效应的参量-冲量耦合系数。与实验数据的对比表明,冲量耦合系数的计算结果具有较高的精确度。

参考文献:

- [1] Kantrowitz A. Propulsion to orbit by ground-based laser[J]. *Astronautics and Aeronautics*, 1972,10(5):74-76.
- [2] 童慧峰,唐志平,胡晓军,等.“烧蚀模式”激光推进的实验研究[J]. *强激光与粒子束*,2004,16(11):1380-1384.
TONG Hui-feng, TANG Zhi-ping, HU Xiao-jun, et al. Experiment study of “ablation mode” laser propulsion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004,16(11):1380-1384.
- [3] Phipps C R. Optimum parameters for laser launching objects into low earth orbit[J]. *Laser and Particle Beams*, 2000,18:661-669.
- [4] Phipps C R. LISP: Laser impulse space propulsion[J]. *Laser and Particle Beams*, 1994,12(1):23-54.
- [5] SHU Chi-wang. Essentially Non-Oscillatory and Weighted Essentially Non-oscillatory Schemes for Hyperbolic Conservation Laws[R]. NASA/CR-97-206253, 1997.
- [6] Itina T E, Marine W, Autric M. Mathematical modeling of pulsed laser ablated flows[J]. *Applied Surface Science*, 2000(154-155):60-65.
- [7] Zel'dovich Y B, Raizer Y P. *Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena*[M]. New York: Academic Press, 1966.

Simulation of ablation mode laser propulsion

TONG Hui-feng^{1,2*}, TANG Zhi-ping¹, ZHANG Ling¹

(1. CAS Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials,
Department of Mechanics and Mechanical Engineering,
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;
2. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: A general Godunov finite difference schemes-WENO schemes which had fifth-order accuracy was used to make a numerical calculation for 2-dimensional axis symmetrical laser-supported plasma flow field under laser ablated solid target and laser ablated propulsion efficiency parameters (mechanical coupling coefficient etc.) was obtained by the simulation. The models of the calculation of ionization degree of plasma and the interaction between laser beam and plasma and the simplified eos (equation of state) of plasma were considered in the simulation. Comparison of simulation and calculation results shows that the different materials of target and the laser parameters (intensity, wave length etc.) and the geometry of target are the main factors which influence the laser propulsion efficiency.

Key words: solid mechanics; propulsion efficiency; laser-supported plasma flow field; laser ablated propulsion

* Corresponding author: TONG Hui-feng
E-mail address: hftong@mail.ustc.edu.cn
Telephone: 86-816-2485132