

文章编号 1004-924X(2004)05-0550-05

# 纯净靶激光等离子体力学特性的理论模拟

鲁建业<sup>1,2</sup>, 王军<sup>2</sup>, 马玉刚<sup>3</sup>, 陈波<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 哈尔滨工业大学 光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 吉林大学 物理学院, 吉林 长春 130023)

**摘要:** 基于磁流体力学模型, 对 Xe、He、C、N、O、Ne、Al、Ar 等元素在激光辐照下的等离子体力学特性进行了研究, 并且以 Al 元素为例, 研究了不同波长情况下的靶材烧蚀速 以及烧蚀压力的变化趋势。结果表明: 在相同入射条件下, 除 Xe 外, He、C、N、O、Ne、Al、Ar 这几种元素的烧蚀压力比较接近, 并且各元素的烧蚀速度的情况也大体相同, 这样从增加火箭的有效载荷的角度考虑, 采用大气驱动模式将是非常有利的。另外数值模拟结果还表明, 随着入射光波长的增加, 靶材的烧蚀速度、烧蚀压力单调下降并逐渐趋于平缓, 尤其是当入射光波长小于某一个值时, 这个变化非常迅速。因此, 如果单纯从入射光波长角度考虑, 波长越短将越有利于产生更大的推力。但短波长激光被大气散射严重, 造成极大的能量损耗。因而在实际应用时, 应该根据飞行器所处的不同飞行位置合理选择驱动光波长。

**关键词:** 纯净靶; 激光; 等离子体

**中图分类号:** O539 **文献标识码:** A

## Theoretical simulations of the mechanical characteristics of laser induced plasma for monatomic target

LU Jian-ye<sup>1,2</sup>, WANG Jun<sup>2</sup>, MA Yu-gang<sup>3</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Academia Sinica, Changchun 130023, China; 2. Institute of Optoelectronics, Harbin University of Technology, Harbin 150001, China; 3. Institute of Physics, Jilin University, Changchun 130023, China)

**Abstract:** Based on a magneto-hydrodynamics model, the plasma characteristics for the elements Xe, He, C, N, O, Ne, Al and Ar are studied. And, numerical simulations were introduced to the relationship between the ablation-velocity and -pressure with the wavelength of the imported laser beam by using element Al as an example. These analyses show that under the same condition of the imported laser beam, the ablation-pressures and -velocities of He, C, N, O, Ne, Al and Ar are roughly equal, which means that the Air-breathing-Mode will be the profitable one to improve the effective load of the rocket. These simulations reveal that the ablation-velocity and -pressure of the target goes down and gradually tends to flatness with the increase of the imported laser wavelength. This change goes very rapidly when the wavelength is less than a certain value. If only considering the wavelengths of the induced laser beams, the shorter ones will be better to increase the thrust-force. But a laser beam with a shorter wavelength will be heavily scattered by at-

收稿日期: 2004-06-18; 修订日期: 2004-08-26.

基金项目: 中国博士后科学基金资助

mosphere, leading to great energy loss. So in the practical application, the laser beam's wavelength should be chosen according to the different flying height of the aircraft.

**Key words:** monatomic target; laser; plasma

## 1 引言

随着航天技术、激光技术的不断发展以及人们对激光产生等离子体特性的进一步深入了解<sup>[1-2]</sup>,利用激光产生的高温等离子体实现对飞行器的推进<sup>[3-8]</sup>的研究日益受到包括我国<sup>[9-10]</sup>及美国、英国、德国、俄罗斯、法国、日本、韩国等世界诸多国家的广泛重视。由于激光推进可靠陆基或空基激光器远距离传输能量,从而大大增加航空器有效载荷,降低发射费用。同时激光推进技术还可以应用于卫星姿态调整、军事情报搜集卫星、反卫星弹丸快速布放以及超小型飞弹的发射和制导等领域。

目前对激光推动技术的研究集中在增加比推力、光火箭外形设计、捕获跟踪技术等方面。在增加比推力的研究中,多是在研究光 and 不同物质的相互作用入手,希望找到最有利的激光推动的工作物质。

本文利用磁流体力学模型<sup>[11-12]</sup>数值模拟研究了不同的单一元素靶在激光辐照下的力学特性以及入射激光波长与激光等离子体的冲击波压力之间的关系,希望能够在激光推动的工作参数优化方面做一些有益探索。

## 2 磁流体力学模型

从空间结构上看,沿入射激光方向,等离子体可以粗略地分成电晕区和超临界密度区两部分。前者的特点是其具有较低的物质密度和较高的电子温度,后者的特点正好相反。临界面位于这两个区域的交界处,在这里,等离子体频率和入射激光频率相等,因而当激光传输至临界面时将会被反射。

由于等离子体的迅速膨胀,等离子体内部的带电粒子的运动会使得等离子体内存在瞬时的大电流和强磁场。这样对等离子体的状态的描述要同时考虑磁流体力学过程和有关的原子物理过程。通常的做法是对原子/离子的能级结构采用

平均原子/离子模型,并在有关的原子物理过程中考虑碰撞电离、光电复合发射(或辐射俘获)、电子碰撞激发和谱线自发发射(或辐射衰变)以及三体复合过程。可以写出流体力学方程组:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u^2 + P) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \left( + \frac{1}{2} u^2 + e_I \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ u \times \left( + \frac{1}{2} u^2 + e_I \right) + pu + F \right] = I_a(x - x_c) - W_R. \quad (3)$$

其中

$$= \frac{c^2}{\gamma - 1}, \quad P = c^2, \quad (4)$$

$$c^2 = \frac{(Z+1)RT}{A}. \quad (5)$$

这里  $\gamma = \frac{5}{3}$  是绝热指数,  $A$  是克分子量,  $c$  是声速。并且:

$$e_I = kn_{i_{z=0}} I(Z), \quad F = -f_e k_e \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (6)$$

$$k_e = \frac{9.23 \times 10^2 T^{5/2}}{(Z+4) \ln e_i}. \quad (7)$$

这里  $f_e$  是电子热流受阻因子,它的引进是基于这样一个原因,即经典热流(或称扩散流)最大不应该超过直穿流的大小。通常,  $f_e$  的取值为  $A^{-\frac{1}{2}}$ 。这里,  $A$  代表靶元素的克原子量。

因为电晕区的物质密度较低,电子自由程长,因此可以将该区做等温处理,并忽略其  $x$  光发射量。而对于超临界密度区,其流场是亚声速的,因而是可以实现定态的。除此之外,还假定对入射激光的吸收仅发生在临界面处。

从方程式(1-3)容易得到电晕区的解的表达式:

$$\begin{cases} = c \exp \left[ - \frac{x - x_c}{c_0 t} \right] \\ u = \frac{x - x_c}{t} + c_0 \\ T(x > x_c) = T_c \end{cases}, \quad (8)$$

这里  $x_c$ 、 $T_c$ 、 $c$  和  $c_0$  分别是临界面在欧拉空间的位置和该处的温度、密度以及声速。利用临界面密度(单位  $\mu\text{m}^{-3}$ )的定义:  $Z c n_i = 10^9 \left( \frac{\mu\text{m}}{L} \right)$ , 可以得到  $c$  和  $c_0$  的表达式:

$$c = \frac{10^9}{Z n_i} \left( \frac{\mu\text{m}}{L} \right)^2, \quad (9)$$

$$c_0 = \left[ \frac{(Z + 1) R T_c}{A} \right]. \quad (10)$$

考虑到超临界密度区的特点,可以在这个区域内将流体力学方程组(1-3)化简成如下形式:

$$\frac{\partial}{\partial x} (u) = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (u^2 + P) = 0. \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ u \left( + \frac{1}{2} u^2 + e_I \right) + Pu + F \right] = -W_R, \quad (13)$$

求解这 3 个方程即可得到:

$$m u = c c_0, \quad (14)$$

$$(u^2 + c^2) = 2 c c_0. \quad (15)$$

再根据式(4)和(15),就可以得到烧蚀阵面 ( $P_a = 0$ ) 处的等离子体压力表达式:

$$P_a = 2 c c_0^2 = 2 P_c, \quad (16)$$

很自然地,电晕区的解和超临界密度区的解在临界面处应该是连续的。利用该条件就可以得到整个体系的完整解,并求出电子温度和等离子体密度等参数。

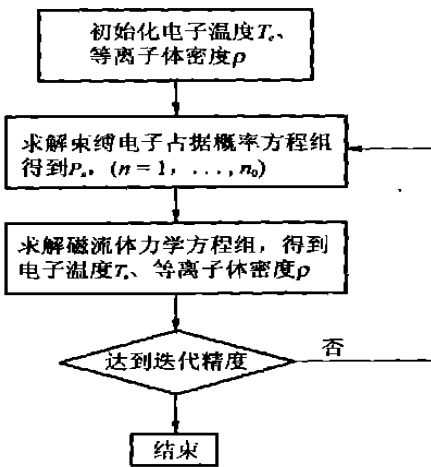


图 1 磁流体力学模拟流程示意图  
Fig. 1 Sketch of flow chart

应该注意的是,在流体力学方程组的求解过程中还需要知道原子物理过程参数<sup>[11-12]</sup>。事实

上这两个过程是相互影响的。因此,在数值模拟过程中要将这两个过程耦合起来考虑。

根据上述思路,编写了定态等离子体状态模拟软件 Craam,其流程如图 1 所示。

### 3 对纯净靶等离子体特性的数值模拟研究

图 2 和图 3 是对几种元素靶材在激光辐照下所产生的等离子体的部分特性所作的数值模拟结果。从中可以看到,相同入射条件下,除 Xe 外,

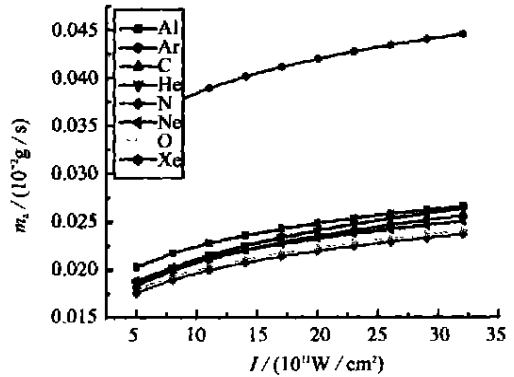


图 2 He、C、N、O、Ne、Al、Ar、Xe 的烧蚀速度随激光强度的变化

Fig. 2 Ablation-velocity vs laser intensity for He、C、N、O、Ne、Al、Ar and Xe

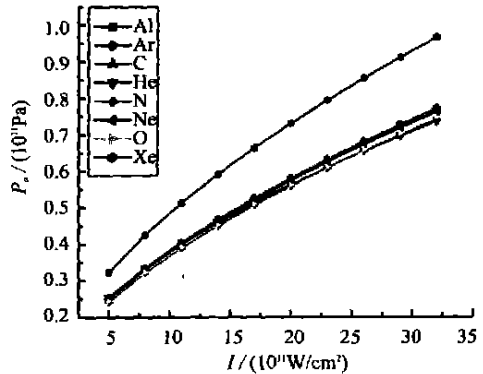


图 3 He、C、N、O、Ne、Al、Ar、Xe 的烧蚀压力随激光强度的变化

Fig. 3 Ablation-pressure vs laser intensity for He、C、N、O、Ne、Al、Ar and Xe

He、C、N、O、Ne、Al、Ar 这几种元素的烧蚀压力比较接近,其中又以 Al 和 C 的值要稍微大些。而且,各元素的烧蚀速度的情况也大体相同。但是如果考虑到尽可能大地增加火箭的有效载荷的情

况下,那么氧将是比较有利的靶材,因为这时火箭可以采用大气驱动模式。同时从图中还可以看到,随着入射激光功率密度  $I$  的增加,各种靶材的烧蚀速度以及烧蚀压力均呈现出单调增加的趋势,并且增速随入射激光功率密度的增加而趋缓。从对图中几种元素烧蚀压力的拟合情况,它们可以近似表示成的形式  $P_a = aI^b$ 。其中,  $a$   $[0.093, 0.125]$ ,  $b$   $[0.590, 0.605]$ 。考虑到  $I = \frac{I_w}{S}$ 。这里,  $I_w$  是聚焦前入射激光的功率密度,  $S$  是入射激光投射到靶材上的面积与聚焦前光束截面积的比值。所以等离子体膨胀所能提供的推力  $F_a$  为:  $F_a = P \cdot S = aI_w^b \cdot S^c$ ,  $c > 0$ 。由此可以清楚看到,最终所能获得的推力与  $S$  成比例。因此从提高推力的角度看,并不需要一味地追求入射激光的高功率密度。需要说明的是,能产生等离子体的激光功率密度是由最低限要求的,而且当入射激光功率密度过低时,本模拟中所使用的模型以及近似成立的前提条件会遭到破坏,要采用更严格的模型来进行讨论。

对于不同波长的入射激光而言,即使是功率密度相同,它们可产生的等离子体的特性也不可能完全相同。不同入射光波长会影响到临界面在等离子体中的具体位置,并导致靶材实际吸收的入射激光能量大小有所不同。图 4 和图 5 中以

Al 元素为例,给出了不同波长情况下的靶材烧蚀速度  $m_a$  以及烧蚀压力  $P_a$  的变化趋势。其中,假定入射激光功率密度为  $10^{12} \text{ W/cm}^2$ 。从中可见,随着入射光波长的增加,烧蚀速度以及烧蚀压力单调下降并逐渐趋于平缓,并且在入射光波长小于  $2 \mu\text{m}$  时,这个变化非常迅速。

可见,如果单纯从入射光波长的角度考虑,波长越短将越有利于产生更大的推力,但短波长激光被大气散射严重,造成很大的能量损耗。因而在实际应用时,应该根据飞行器所处的不同飞行位置合理选择驱动光波长。

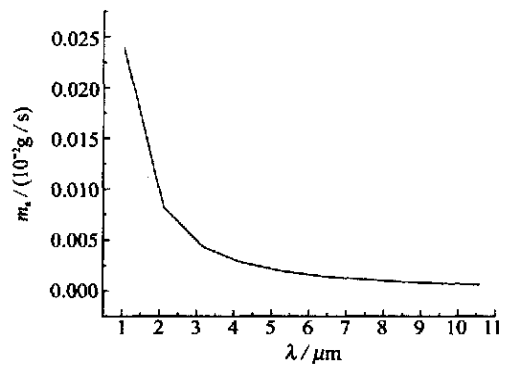


图 5 Al 烧蚀速度随激光波长的变化

Fig. 5 Ablation-velocity vs the incident beam's wavelength for Al

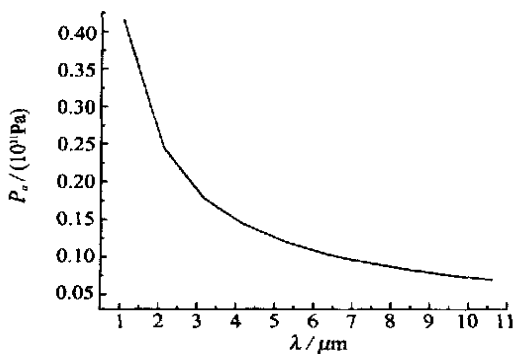


图 4 Al 烧蚀压力随激光波长的变化

Fig. 4 Ablation-pressure vs the incident beam's wavelength for Al

## 4 结 论

通过对几种不同元素的纯净靶在激光辐照下产生的等离子体有关特性的理论模拟研究可以看到,如果考虑到增加火箭的有效载荷,那么氧是比较有利的靶材。同时,等离子体的膨胀压力以及靶的烧蚀速度均随入射激光的功率密度的增加而增加并逐渐趋缓。这样,在保证产生等离子体的必要功率密度的前提下,适当增加入射激光光斑面积更有利。此外,单纯从入射光波长角度看,波长越短越有利于增加烧蚀速度,提高烧蚀压力,从而更加有利于提高推力。

## 参考文献:

[1] 尼启良,陈波,巩岩. 激光等离子体软 X 射线光源的一种诊断方法[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(3): 235-238.  
 NI Q L, CHEN B, GONG Y. Diagnostic method for laser plasma soft X-ray source[J]. *Optics and Precision Engineering*

- , 2002, 10(3): 235-238. (in Chinese)
- [2] 江少恩, 刘忠礼, 李楠. 激光等离子体三维重建迭代方法研究[J]. 光学 精密工程, 1997, 5(5): 36-43.  
JIANG S E, LIU ZH L, LI N. Numerical simulation and analysis on three-dimensional reconstruction of laser plasma[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(5): 36-43. (in Chinese)
- [3] KANTROWITZ, A. Propulsion to orbit by ground-based lasers[J]. *Aeronautics and Astronautics*, 1972, 10: 74-76.
- [4] YABE T, PHIPPS C, AOKI K, *et al.* Laser driven vehicle[J]. *SPIE*, 2002, 4760: 867-878.
- [5] TOYODA K. Continuous wave laser thruster experiment[J]. *Vacuum*, 2000, 59: 63-72.
- [6] SASOH A. Laser-driven in-tube accelerator[J]. *Review of Scientific Instruments*. 2001, 72: 1893-1898.
- [7] PHIPPS C R, LUKE J R. Diode laser-driven microthrusters: A new departure for micropropulsion[J]. *AIAA*. 2002, 40(1): 1-9.
- [8] MASNAVI M, KIKUCHI T, NAKAJIMA M, *et al.* Influence of opacity on gain coefficients in static and fast moving neon-like krypton plasma[J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, 92(7): 3480-3486.
- [9] 郑力铭, 朱定强, 徐旭, 等. 激光推进火箭发动机吸收室的数值模拟[J]. 推进技术, 2002, 23(5): 387-390.  
ZHENGL M, ZHU D Q, XU X, *et al.* Numerical simulation of flow in the absorption chamber of laser propulsion rocket engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2002, 23(5): 387-390. (in Chinese)
- [10] 李俊美, 洪延姬, 文明, 等. 激光推进中一种光船结构的设计[J]. 装备指挥技术学院学报, 2002, 13(6): 97-100.  
LI J M, HONG Y J, WEN M, *et al.* Structural Design of a lightcraft for laser propulsion[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command and Technology*, 2002, 13(6): 97-100. (in Chinese)
- [11] 张均, 陈光南, 常铁强. 激光产生 X 光的数值模拟研究[J]. 计算物理. 1994, 11(1): 1-8.  
ZHANG J, CHEN G N, CHANG T Q. Investigation of numerical simulations for laser-produced X-ray[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*. 1994, 11(1): 1-8. (in Chinese)
- [12] 陈光南, 常铁强, 张钧. 激光与靶非平衡耦合的数值模拟[J]. 计算物理. 1998, 15(4): 409-418.  
CHEN G N, CHANG T Q, ZHANG J. Numerical simulation for laser-target nonequilibrium coupling[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 1998, 15(4): 409-418. (in Chinese)

作者简介: 鲁建业(1969 - ), 男, 河南洛阳人, 副教授, 主要研究方向为新型可调谐激光介质光谱、等离子体物理等。E-mail: lujy@hit.edu.cn