

# 激光烧蚀平面碳靶的等离子体形态演化

张兴强, 马真艳

(湖北汽车工业学院数理与光电工程学院, 湖北 十堰 442002)

**摘要:**激光等离子体推进是未来航空航天领域极具应用前景的前沿技术之一,而激光等离子体的形态演化成为激光等离子体冲击波推进的必要条件。本文基于激光等离子体形成的基本理论,模拟了激光碳等离子体的形态参数。之后利用波长为  $1.064\ \mu\text{m}$ 、脉宽约  $10\ \text{ns}$  的 Nd:YAG 激光器等设备研究了不同激光功率密度下碳等离子体的形态参数,测量数据证实了理论结果。此外,由彩色数字摄像机拍摄的图像表明,当激光器的工作电压从  $700\ \text{V}$  上升到  $1100\ \text{V}$  时,观察到激光碳等离子体从发育不全到充分发育,再到发育过度的演化过程。因此,激光碳等离子体充分发育的条件是:激光器的工作电压调节到  $850\ \text{V}$ ,平均输出能量达  $157.1\ \text{mJ}$ ,功率密度为  $4.45 \times 10^9\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。因等离子体的发育程度关系到激光等离子体冲击波的传播及作用,其研究成为激光等离子体冲击波推进的重要环节。

**关键词:**激光等离子体推进;激光碳等离子体;等离子体发育;形态演化

中图分类号:O539 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2022.05.006

## Outline evolution of plasma from planar carbon target ablated by laser

ZHANG Xing-qiang, MA Zhen-yan

(School of Mathematics, Physics and Optoelectronic Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China)

**Abstract:** Laser plasma propulsion is a strategic commanding point in the field of aerospace in the future, while the outline evolution of laser plasma has become a necessary condition for laser plasma shock wave propulsion. In this paper, based on the basic theory of the formation of laser plasma, the outline parameters of laser carbon plasma is simulated, then measured under different laser power density by using a Nd:YAG laser with wavelength of  $1.064\ \mu\text{m}$  and pulse width of  $10\ \text{ns}$  and so on. The simulated result is proved by the measured data. In addition, the images taken by a color digital camera show that the evolution procedure of laser carbon plasma can be observed from underdeveloped to fully developed, and then to overdeveloped when the operating voltage of the laser rises from  $700\ \text{V}$  to  $1100\ \text{V}$ . Thus the condition for fully developed laser carbon plasma is adjusting the working voltage of laser to  $850\ \text{V}$ , the average output energy is  $157.1\ \text{mJ}$  and power density is  $4.45 \times 10^9\ \text{W}/\text{cm}^2$ . As the developed degree of plasma correlates to the propagation and action of laser plasma shock wave, its research becomes an important step to laser plasma shock wave propulsion.

**Keywords:** laser plasma propulsion; laser carbon plasma; development of plasma; outline evolution

### 1 引言

激光等离子体因其优异的特性已被成功应用于

核聚变、纳米合成、薄膜生长、离子源形成等领域,并获得了丰硕的成果<sup>[1-2]</sup>。近几十年来,随着航空航天

基金项目:湖北省教育厅科研重点项目基金项目(No. D20102002);湖北汽车工业学院博士科研启动基金项目(No. BK200919)资助。

作者简介:张兴强(1969-),男,博士,副教授,主要从事激光推进技术等研究。E-mail:zhangxingqiang\_student@sina.com

收稿日期:2021-06-16

领域对推进技术的创新性需求,以及在耐高温、耐高压材料研制上所取得的突破性进展,激光等离子体再次介入先进推进技术行列,越来越受到世界上许多发达国家,甚至发展中国家的重视。传统的化学火箭发动机因燃料中氧化剂和还原剂的分子质量大以及自然燃烧时受火焰温度的限制,气体温度的理论值仅有4000~5000 K,比推力约为4000~5000 N·s。核能火箭发动机的比推力可达10000 N·s,然而受核推进装置的重量所限,其推力/质量比只有 $10^{-2} \sim 10^{-4}$  N·s/kg。高能激光可将较轻的推进剂加热到等离子体状态,温度达到20000 K甚至更高,相应的比推力达到20000 N·s或更高。此外,激光等离子体推进的供能<sup>[3]</sup>与推进是分开的,推进装置重量轻,其推力/质量比远远大于核推进装置,能够提供较多的有效载荷。激光等离子体推进具有推力大、有效载荷多、冲量耦合系数高、操控方便、费用低、无环境污染等优点,但激光等离子体本身是发光、发热的高温辐射体,不可能将全部能量转换成推进动能,因而应开展相关的应用基础研究。当强激光辐照于靶材时,在其表面形成的高温、高密度等离子体发生定向喷射,对靶体施加一定的推力<sup>[4-6]</sup>。激光等离子体的形成过程常常伴随着等离子体冲击波的产生,激光诱导冲击波的时间演化及其几何形状主要取决于激光的功率和等离子体的形态等<sup>[6-8]</sup>,激光等离子体和激光诱导冲击波对推进过程具有不同的作用。因此,本文基于激光烧蚀平面碳靶诱导冲击波的基本原理,研究激光等离子体的形态演化,发育完全的等离子体形态是激光诱导冲击波得以正常传播以及发挥作用的必要条件,可为激光等离子体冲击波推进奠定基础。

## 2 激光等离子体及冲击波的形成机理

激光与靶材的相互作用主要取决于激光的热烧蚀效应,当激光作用于靶材时,在靶材表面产生等离子体,该等离子体形成一定的空间分布。激光能量首先由靶材原子通过逆韧致辐射吸收,在材料表面产生大量蒸汽,继而形成高温、高压等离子体,临界面将等离子体分为两个区域,靶材表面到临界面之间的等离子体区域称为烧蚀区,该区域具有较高的物质密度和较低电子温度,适合X光的发射;从临界面开始,背离靶材表面向外的等离子体区域称为电晕区,该区域具有较低的物质密度和较高的电

子温度,适合激光束的传输和电子热传导<sup>[9]</sup>。等离子体主要通过逆韧致吸收机制在临界面附近吸收激光能量,然后向四面八方扩展,当激光的能量较低时,临界面距离靶材表面不远,烧蚀区的厚度很薄,激光束在烧蚀前沿对靶面产生烧蚀压力,烧蚀物质向垂直于靶材表面的方向喷射。在几纳秒的时间内,烧蚀压力迅速传导并施加到等离子体正面,产生冲击波。在激光等离子体形成的初期,波阵面沿激光入射方向的传播速度大于沿入射激光的垂直方向,属于非典型球面冲击波,随着激光能量的增加,冲击波波前不断向外扩展,非中心对称的波前逐渐向球面波前的结构转变,最终衰退演变为球面声波脉冲。当强激光持续作用时,随着激光强度的增加,等离子体对激光的吸收增强,烧蚀区的厚度增大,该区域的等离子体表现为光学厚的,不利于激光束的传播,临界面远离靶材表面,激光束无法穿越烧蚀区到达靶材表面,阻碍了靶材对激光的吸收,产生了等离子体屏蔽效应<sup>[10]</sup>。

## 3 激光碳等离子体的形态参数模拟

激光烧蚀碳靶产生等离子体时,烧蚀过程中的物理参数可利用原子物理过程与流体力学过程耦合求解。原子物理过程与流体力学过程是紧密相关的,首先将初始化的电子温度和等离子体密度代入束缚电子占据概率方程组,解得原子物理的过程参数。其次将这些过程参数代入流体力学方程组,求出流体力学过程参数,如电子温度、等离子体密度等,循环求解,直到自洽。最后得到所需的推进参数,如烧蚀压、等效烧蚀深度、弛豫时间、烧蚀速度等<sup>[11]</sup>。经过运算,烧蚀压随激光功率密度的变化如图1所示。

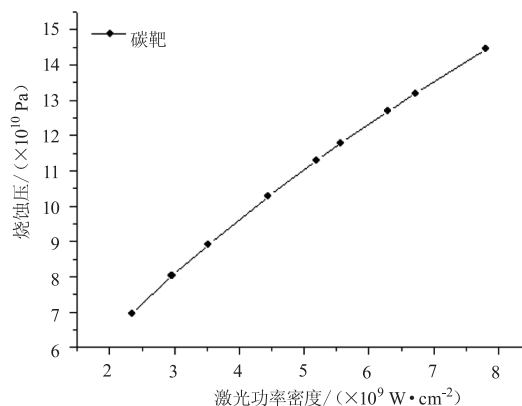


图1 烧蚀压随激光功率密度的变化

Fig. 1 Variation of ablative pressure with laser power density

Nd:YAG 激光器的输出波长  $\lambda$  是  $1.064 \mu\text{m}$ , 单光子能量  $h\nu$  为:

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{1.064 \times 10^{-6}} \approx 1.867 \times 10^{-19} (\text{J}) \quad (2)$$

激光功率密度较低时,若只考虑碳原子发生一级电离,则一级电离能  $U_i$  为:

$$U_i = \frac{1086.5 \times 10^3}{6.02 \times 10^{23}} \approx 1.805 \times 10^{-18} (\text{J}) \quad (3)$$

从式(2)和式(3)推测,一个碳原子被激光电离成  $\text{C}^+$ ,需要吸收大约 10 个激光光子。当激光烧蚀碳靶时,产生的碳离子数为:

$$N_c = \frac{1}{10} \cdot \frac{I}{h\nu} \quad (4)$$

激光电离碳原子,既包含着能量的传输,也伴随着热量的传递。当达到热平衡状态时,由沙哈方程得出离子密度  $n_i$  为:

$$n_i = 2.4 \times 10^{21} T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{U_i}{kT}} \quad (5)$$

由阿伏伽德罗定律,可得烧蚀压  $P_a$  为:

$$P_a = nkT \quad (6)$$

其中,  $h$  和  $k$  分别为普朗克常数和玻耳兹曼常数;  $\nu$  是激光频率;  $T$  和  $n$  分别表示等离子体温度和密度。

因电离度  $\alpha$  的表达式为:

$$\alpha = \frac{n_i}{n} \quad (7)$$

根据式(5)、(6)和(7),可得:

$$n_i = \alpha \cdot n = \alpha \cdot \frac{P_a}{kT} = 2.4 \times 10^{21} T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{U_i}{kT}} \quad (8)$$

当烧蚀压和碳原子的一级电离能确定时,可依据不同的激光功率密度设定较为合理的电离度,计算等离子体的温度,之后确定  $n$  和  $n_i$ 。由式(4)和(5)可估计出离子所占的体积  $V_i$ :

$$V_i = \frac{N_c}{n_i} \quad (9)$$

当激光功率密度较低时,碳原子的一级电离度不高,电子温度较低且密度较小,等离子体的体积主要由  $V_i$  确定。当激光功率密度逐步提高时,碳原子的一级电离度迅速增大,电子的影响不能忽略,电子密度不仅增加,而且运动速度也提高很快,此时等离子体的体积  $V$  主要由电子所占据的空间来决定,大致是随着电离度指数增长的,可表示为:

$$V = V_i e^\alpha \quad (10)$$

由式(1)~(10),可算出不同激光功率密度下碳等离子体的各种参数,如表 1 所示。

表 1 不同激光功率密度下碳等离子体的模拟参数

Tab. 1 Simulated parameters of carbon plasma under different laser power density

| 参数                                               | 模拟结果   |        |        |         |         |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $P/(\times 10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2})$ | 2.34   | 2.96   | 3.52   | 4.45    | 5.19    | 5.57    | 6.29    | 6.72    | 7.80    |
| $P_a/(\times 10^{10} \text{ Pa})$                | 6.9449 | 8.0374 | 8.9185 | 10.2815 | 11.2868 | 11.7823 | 12.6793 | 13.1931 | 14.4380 |
| $\alpha$                                         | 0.3    | 0.8    | 1.3    | 1.6     | 1.8     | 1.9     | 2       | 2.1     | 2.2     |
| $T/\text{K}$                                     | 15427  | 17172  | 18228  | 19032   | 19343   | 19548   | 19817   | 20012   | 20319   |
| $n/(\times 10^{26} \text{ cm}^{-3})$             | 3.262  | 3.392  | 3.546  | 3.915   | 4.228   | 4.368   | 4.636   | 4.777   | 5.149   |
| $N_c/\times 10^{16}$                             | 4.403  | 5.603  | 6.652  | 8.415   | 9.818   | 10.54   | 11.901  | 12.71   | 14.766  |
| $V_i/\text{mm}^3$                                | 13.508 | 16.533 | 18.776 | 21.513  | 23.238  | 24.151  | 25.689  | 26.626  | 28.699  |
| $V/\text{mm}^3$                                  | 13.52  | 36.79  | 68.70  | 106.55  | 140.58  | 161.47  | 189.81  | 217.43  | 259.01  |

#### 4 激光烧蚀平面碳靶的实验研究

激光烧蚀平面碳靶产生等离子体的装置示意图如图 2 所示,平面碳靶固定不动,Nd:YAG 激光器输出波长为  $1.064 \mu\text{m}$  的激光脉冲,脉宽大约 10 ns。在操作过程中,利用激光能量计监测激光的输出能量,采用示波器观察激光波形并观测脉宽。垂直于固定平面碳靶的表面放置毫米刻度尺,并与激光束水平平行,毫米刻度尺的水平对向位置安放彩色数字摄像机 (Sony NEX - VG10),以便拍摄并记录激

光烧蚀平面碳靶形成等离子体的过程。

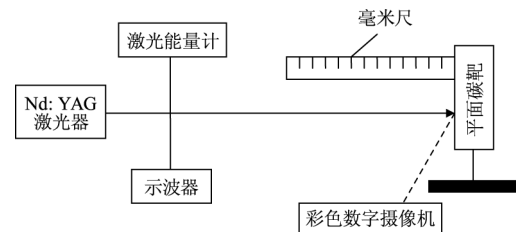


图 2 激光烧蚀碳靶产生等离子体的装置示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of setup for producing plasma from carbon target ablated by laser

激光器的阈值电压大约为 450 V,激光器运行稳定后,每隔 50 V 将电压从 700 V 升高到 1100 V,激光器在该工作区的线性度很好,激光的平均能量从 82.2 mJ 增加到 275.5 mJ,激光功率密度也从  $2.34 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$  增大到  $7.80 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ ,基本保持线性上升。利用彩色数字摄像机拍摄不同电压下激光碳等离子体的形态演化,如图 3 所示。

激光器在不同电压下的输出功率密度是不同的,导致等离子体的长度和直径都在变化,等离子体的形态也各异。激光烧蚀碳靶产生等离子体的形态参数如表 2 所示,当激光功率密度增大时,等离子体的长度和直径都在逐渐增加,而体积却在快速膨胀。

在激光功率密度相同的条件下,将表 1 中激光碳等离子体的模拟体积与表 2 中的测量体积进行对比,如图 4 所示。当激光功率密度较低时,两者吻合得很好,功率密度较高时,激光器的输出不是十分稳定,两者的差别稍增大。

考虑到在模拟过程中,所建立的模型与实际情况可能存在一定的偏差,实测等离子体的长度和直径可能出现测量误差,以及计算方法并非十分严密,模拟值与测量值存在很小的区别。然而从总的趋势来看,它们大体上随激光功率密度的增加呈线性上升,且斜率基本相等,这表明模拟过程是正确的,另一方面也说明所测量的等离子体体积基本可靠。

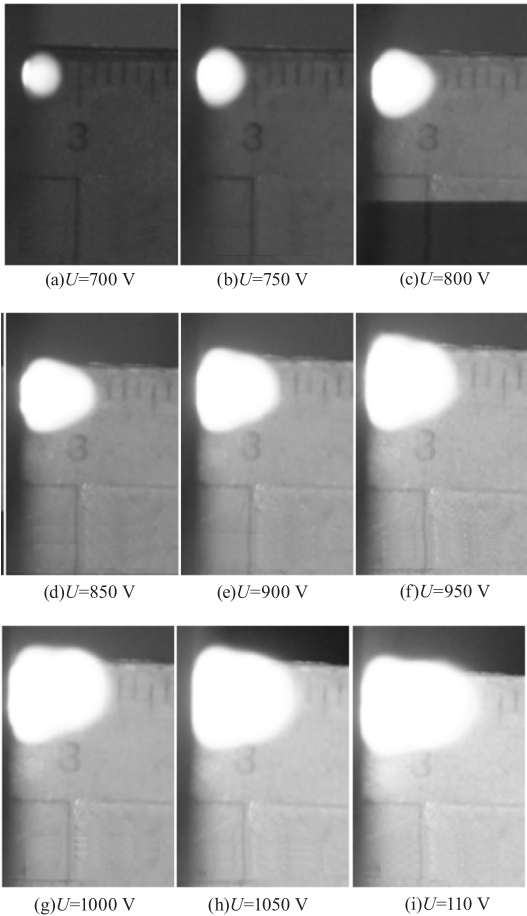


图 3 激光碳等离子体的形态演化图像  
Fig. 3 Pattern of outline evolution from laser carbon plasma

表 2 激光碳等离子体参数的测量  
Tab. 2 Measured parameters of laser carbon plasma

| 参 数                                                    | 测量数据  |       |       |        |        |        |        |        |        |
|--------------------------------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                                        | 700   | 750   | 800   | 850    | 900    | 950    | 1000   | 1050   | 1100   |
| 电压/V                                                   |       |       |       |        |        |        |        |        |        |
| 平均激光能量/mJ                                              | 82.2  | 104.6 | 124.2 | 157.1  | 183.3  | 196.8  | 222.2  | 237.3  | 275.5  |
| 激光功率密度/ $(\times 10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2})$ | 2.34  | 2.96  | 3.52  | 4.45   | 5.19   | 5.57   | 6.29   | 6.72   | 7.80   |
| 等离子体长度/mm                                              | 2.46  | 3.55  | 3.98  | 5.04   | 5.63   | 6.1    | 6.38   | 6.68   | 7.19   |
| 等离子体直径/mm                                              | 2.68  | 3.69  | 4.7   | 5.34   | 5.74   | 5.97   | 6.2    | 6.34   | 6.58   |
| 等离子体体积/ $\text{mm}^3$                                  | 13.87 | 37.95 | 69.02 | 112.82 | 145.61 | 170.67 | 192.52 | 210.78 | 244.37 |

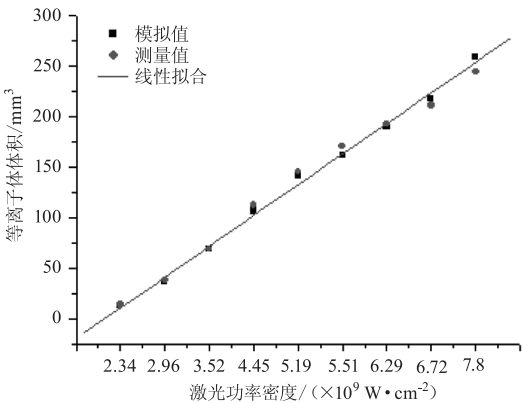


图 4 激光碳等离子体的模拟体积与测量值对比  
Fig. 4 Simulated volume of laser carbon plasma compared with measured one

5 激光碳等离子体的形态分析

当激光器的工作电压调节到 700 V 时,等离子体的体积很小,其图像如图 3(a) 所示,等离子体的长度与直径尺寸相当,等离子体刚开始生长;升高电压到 750 V,等离子体的体积快速增加,如图 3(b) 所示,等离子体的长度增加较少,直径增加较多,长度小于直径,等离子体形似矮扁的圆锥头形状,表明该等离子体还没有充分发育;继续升高电压到 800 V,等离子体的体积继续增加,如图 3(c) 所示,等离子体的长度依然小于直径,仍没有充分生长起来,导致其形状仍然为矮扁的圆锥头,只是头顶比

750 V 时稍尖。当电压升高到 850 V 时,等离子体的体积持续增加,如图 3(d) 所示,尽管等离子体的长度稍小于直径,但其头部已变成圆球形,并与根部连成一体,等离子体外廓连续,外边界分明,这表明该等离子体基本发育完全。

当电压升高到 900 V 时,等离子体的体积依然增加,如图 3(e) 所示,等离子体的长度稍小于直径,其头部与根部之间出现了不太明显的亚葫芦脱节,外轮廓边界(特别是头顶)也变得稍微模糊,尽管等离子体的头部依然保持为圆球形状,但圆球帽的头部特征已然初显,等离子体的发育稍显过度;当电压从 950 V 升高到 1100 V 时,等离子体的体积依次膨胀,其图像分别如图 3(f)、3(g)、3(h)、3(i) 所示,尽管等离子体的长度超过了直径,但头部与根部之间的亚葫芦脱节不断加深,头顶的外轮廓边界逐渐模糊,圆球帽的头部特征逐步成型,等离子体过度发育的特征进一步显现。

脉冲式 Nd:YAG 激光器每次输出一个巨脉冲,该巨脉冲是由从大到小周期性排列的一系列脉冲峰构成,第一个脉冲峰最高,含能最多,随后的脉冲峰逐渐减小。巨脉冲的上升沿很陡,下降沿趋缓,与物质发生相互作用时,尽管上升沿的作用是主要的,但下降沿的作用也必需考虑到。当电压为 700 V 时,等离子体的长度仅有 2.46 mm,直径约为 2.68 mm,等离子体柱的体积大约是  $13.87 \text{ mm}^3$ ,由此可知激光能量较低时,巨脉冲的第一个脉冲峰在靶材表面的烧蚀面积很小,等离子体临界面离靶材表面非常近,巨脉冲下降沿基本穿透临界面作用于靶材表面,继续烧蚀靶材,由于下降沿的作用比较微弱,烧蚀作用受到很大的限制,因此等离子体表现为细短的圆锥头形状。当电压继续升高时,巨脉冲的第一个脉冲峰在靶材表面的烧蚀面积扩大,后续脉冲峰的作用也逐步增强,这样导致等离子体的半径增加,长度伸长,体积增加很快,等离子体依然保持为矮扁的圆锥头形状,其发育不完全。当电压升高到 850 V 时,巨脉冲的第一个脉冲峰在靶材表面的烧蚀面积基本未变,然而等离子体的烧蚀区变厚,临界面与靶材表面保持一定的距离,紧随其后的一系列脉冲峰不断被临界面处的等离子体吸收,临界面逐渐进入烧蚀区,电晕区的厚度快速增加,直到巨脉冲结束,由此可观察到长度与半径都明显延伸的圆球头形状的等

离子体,头部与根部连成一体,外轮廓边界非常清晰,此时等离子体发育基本完成。进一步升高电压到 900 V 及以上,巨脉冲的第一个脉冲峰作用很强,在靶材表面形成更大的烧蚀面积,继而产生更多等离子体,而后面的脉冲峰值不足以维持大面积等离子体的发育,因此在等离子体腰部出现亚葫芦状凹陷,而后续的脉冲峰依然较强,持续作用于等离子体,使等离子体头部形成圆球帽形状,其头顶外轮廓边界逐渐变得模糊,等离子体过度发育越来越严重。

在激光器的线性工作区内将电压从 700 V 调节到 1100 V,观测了激光碳等离子体从发育不全到发育完全,再到发育过度的演化过程,由此确定微秒激光器诱发等离子体的电压大约为 850 V,这样可以获得状态良好的等离子体形态,为后续的推进参数优化以及激光等离子体冲击波传播提供了参考。

## 6 结 论

总之,通过研究激光碳等离子体的形态演化,证实了模拟结果与测量数据基本吻合。由彩色数字摄像机拍摄的激光碳等离子体的形态演化图像表明,不同工作电压下激光碳等离子体的形态各异。当电压调节到 850 V 时,激光器的平均输出能量是 157.1 mJ,功率密度为  $4.45 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ ,激光碳等离子体基本发育完全,形成圆球头形状、外轮廓边界清晰且头部与根部连成一体的等离子体。当电压低于 850 V 时,激光碳等离子体发育不全,形成矮扁的圆锥头形状,且等离子体的外轮廓边界泛红,色温偏低,特别是当电压为 700 V 时,泛红的边界区域最大,色温很低,此时等离子体开始生长。当电压高于 850 V 时,激光碳等离子体发育过度,头部与根部之间出现了亚葫芦脱节,等离子体头部呈圆球帽形状,外轮廓边界特别是头顶部变得越来越模糊,这是微秒激光器烧蚀靶材过度发育的特征。激光诱导冲击波在发育完全的等离子体中可以正常传播,研究等离子体的形态演化可以确认等离子体的发育条件,这为激光等离子体冲击波推进提供了必要的信息。

## 参考文献:

- [1] Wang Haosu, Ga Yongjing, Huang Hui, et al. Progress on the advanced propulsion technologies of launch vehicles [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2019, 3(2): 62–70. (in Chinese)  
王浩苏, 郭永婧, 黄辉, 等. 国内外先进推进技术发展

- 综述[J]. 宇航总体技术, 2019, 3(2): 62 – 70.
- [2] P K Kaw. Nonlinear laser-plasma interactions [J]. Reviews of Modern Physics, 2017, 1(1): 2.
- [3] Yuan Jianhua, Li Shang, Huang Kai, et al. Research on charging strategy of laser powered UAV cluster[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(10): 1190 – 1195. (in Chinese)  
袁建华, 李尚, 黄开, 等. 激光供能无人机集群充电策略研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(10): 1190 – 1195.
- [4] Simon Bardy, Bertrand Aubert, Laurent Berthe, et al. Numerical study of laser ablation on aluminum for shock-wave applications: development of a suitable model by comparison with recent experiments[J]. Optical Engineering, 2017, 56(1): 011014.
- [5] Tenbner, Yun Kai, Theodor Schlegel, et al. Laser-plasma induced shock waves in micro shock tubes[J]. New Journal of physics, 2017, 19(10): 103016.
- [6] J P Cup-Lelandais, M Boustie, L Berthe, et al. Spallation generated by femtosecond laser driven shocks in thin metallic targets[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(6): 065402.
- [7] Jean-Philippe, Colombier, Patrick Combis, et al. Hydrodynamic simulations of metal ablation by femtosecond laser irradiation[J]. Physical Review B, 2005, 71: 165406.
- [8] Beatrice Campanella, Stefano Legnaioli, Stefano Pagnotta, et al. Shock waves in laser-induced plasmas[J]. Atom, 2019, 7(2): 1 – 14.
- [9] Zhang J. A theoretical model of X light produced by laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1990, 2: 170 – 190. (in Chinese)  
张钧. 激光产生 X 光的理论模型[J]. 强激光与离子束, 1990, 2: 170 – 190.
- [10] Yuan D. The researches on the shock wave interaction mechanisms with laser plasma [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2007: 1 – 48. (in Chinese)  
袁迪. 冲击波与激光等离子体相互作用机理研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2007: 1 – 48.
- [11] Zhang Xingqiang, Lu Jianye. Preliminary analysis of laser sustained plasma propulsion mechanism [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(8): 0802008. (in Chinese)  
张兴强, 鲁建业. 激光等离子体推进机理的初步分析[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0802008.