

关键参数对空气中激光引致热核特性的影响规律研究

王伟东, 文明, 王殿恺, 卿泽旭

(航天工程大学 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

摘要: 针对纳秒脉冲激光能量在空气中沉积的等离子体热核演化问题, 利用两种不同分辨率的高速相机, 搭建了高分辨率的纹影系统。所获得的纹影实验结果很好地展示了激光能量沉积初始时刻的演化过程, 并研究了激光能量大小和透镜焦距这两个关键参数对激光引致等离子体热核演化过程的影响规律。实验结果表明激光沉积能量越大, 等离子体热核的尺寸越大, 但是可能存在激光能量沉积的饱和现象。另外, 激光能量越高、透镜的焦距越短, 激光能量沉积之后环境冷空气穿透热核的时间就越晚, 意味着等离子体热核维持稳定的高温低密度气团的时间越长, 这可以为激光致等离子体主动流动控制的相关研究提供充足的反应时间。

关键词: 激光能量; 焦距; 等离子体热核; 纹影; 演化

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0806002

Influence of key parameters on laser-induced hot core in air

Wang Weidong, Wen Ming, Wang Diankai, Qing Zexu

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: In order to understand the phenomenon of plasma hot core evolution in air deposited by nanosecond-pulsed laser energy, a high-resolution schlieren system was set up by using two cameras with different resolution. The experimental results obtained from schlieren system showed a good illustration of the initial moment of laser energy deposition, and then the law of the two key parameters of pulse energy and lens focal length on the evolution of laser-induced plasma hot core were studied. The experimental results show that the higher the energy of laser deposition, the larger the size of the plasma hot core, but there may be saturation of the laser energy deposition. In addition, the higher the laser energy and the shorter the focal length of lens, the later the external air penetrates the plasma core after laser energy deposition, which means the plasma core can maintain a steady state of high temperature and low density for a long time, and provides sufficient reaction time for the relevant research on plasma active flow control from the laser energy.

Key words: laser energy; focal length; plasma hot core; schlieren; evolution

收稿日期: 2018-03-07; 修订日期: 2018-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(11372356)

作者简介: 王伟东(1993-), 男, 硕士生, 主要从事等离子体流动控制方面的研究。Email: wwdwwd@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 文明(1978-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事激光航天应用技术方面的研究。Email: wujiewm@163.com

0 引言

主动流动控制通过在局部区域输入少量能量,来获得局部或全局的流动变化,使飞行器的性能得以改善^[1],是当前流体力学的一个重要研究领域。目前国际上对等离子体主动流动控制在航空工业中的应用研究也越来越深入,激光致等离子体流动控制具有结构小、质量轻、控制方便等优点,而且在不需主动控制组件的时候,不会带来负面效应,使其可克服超声速飞行中的诸多问题^[2],如控制进气捕获^[3],控制边界层分离^[4],控制 Edney IV 型激波相互作用^[5]等。因此,研究脉冲激光能量在空气中的沉积现象,以及关键参数对热核特性的影响规律就显得尤为重要了。

在空气中由激光引致的等离子体击穿(Laser Induced Breakdown, LIB)从 20 世纪就开始被广泛研究^[6]。激光在空气中聚焦沉积后会诱导产生高温低密度的等离子体热核,并形成向外传播的逐渐衰减的冲击波。冲击波的速度在激光能量沉积之后的 20 ns 达到了 60 km/s^[7],等离子体热核的温度在 1 s 时达到了 1.7×10^4 K,在 100 s 后热核温度仍有近 1 000 K^[8],因此对等离子体热核的研究至少要扩展到百微秒量级。2012 年, Yang^[9]利用纹影技术很好地展现了纳秒脉冲激光能量沉积后冲击波的传播,测量了冲击波半径和波速,但没有测量等离子体热核的尺寸。2017 年,卿泽旭^[10]采用纹影系统研究了不同激光入射能量大小对等离子体涡环的涡核直径和对冲击波波速的影响,实验结果表明激光能量的大小对冲击波波速的影响较小。在众多的研究中已经证实了热核在不受干扰的情况下会形成涡环和三瓣状结构^[11]。众多学者在数值模拟中采用了椭球形的能量沉积模型、高斯型初始温度分布模型^[12]等,可以同时模拟等离子体、低密度热气体以及冲击波等的演化。研究者对激光能量沉积形成热核的演化过程已经开展了大量的研究,但是在不同条件下,等离子体热核的发展有较大差异,因此有必要针对关键参数对激光能量沉积效果的影响情况展开进一步研究。

文中搭建了一套具有高时间分辨率和高空间分辨率的纹影观测系统,对 Nd:YAG 固体激光器纳秒脉冲激光能量在静止空气中沉积产生的等离子体热

核进行观测。激光能量大小和聚焦透镜的焦距对等离子体热核的宏观状态影响较大,通过对特征尺寸的测量,重点研究了这两个关键参数对激光能量沉积之后热核演化过程的影响规律。

1 实验装置

文中的实验观测系统主要包括三个子系统:纹影系统、激光能量沉积系统、时序控制系统。

纹影系统主要包含闪光灯、纹影镜组,以及刀口和成像部件,采用“Z”字形布局,光源和成像系统布置于平行光流场测试区的两侧,离轴角约 5° ,光路布局如图 1 所示。脉冲氙灯闪光灯利用高电压击穿氙气时的发光现象照明,发光时间短,亮度高,使得纹影系统具备较高的时间分辨率。脉冲氙灯附近的狭缝将氙灯发出的光线限制在 $1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的范围内,并以狭缝的位置作为系统的光源位置,使纹影系统具有较高的灵敏度。纹影镜组由两面直径 150 mm、焦距 1.5 m 的抛物面反射镜组成,使流场被平行光照射,光源和刀口分别位于两面纹影镜的焦点上。刀口通过切割光源像进一步提高纹影系统的灵敏度,通过调整凸透镜的位置,将待测流场的像清晰呈现在高速相机的接收屏上。成像系统分别采用美国 Vision Research 公司的 V711 型高速彩色相机和德国 PCO 公司的 HSFC PRO 超高速增强型相机。其中 V711 型彩色相机的最短曝光时间 0.28 s,在分辨率 $208 \text{ pixel} \times 200 \text{ pixel}$ 时记录速度为 105 frame/s,可连续记录约 1 s;HSFC PRO 超高速相机具有 4 个可设置不同延时的独立通道,分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,最小曝光时间可达 3 ns,对于激光能量沉积初始时刻的研究具有显著的优势。

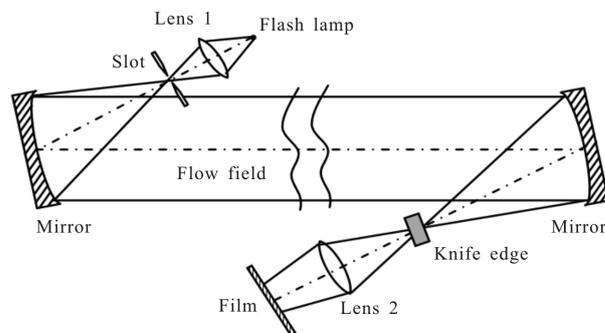


图 1 纹影系统光路布局图

Fig.1 Set-up of the schlieren system

激光能量沉积系统包括纳秒脉冲激光器和聚焦透镜,如图 2 所示,凸透镜将激光光源聚焦在窗口内的测试区域。文中采用 Nd:YAG 脉冲固体倍频激光器,输出波长 532 nm,单脉冲能量大小可通过改变注入电压进行调节,最大单脉冲能量可达 400 mJ,脉冲宽度约 8 ± 1.5 ns,能量稳定度 $\leq 3\%$ (RMS 值)。激光器输出的激光经过光臂的转换,从窗口位置的正上方出光,凸透镜通过转接环固连在激波管上,高度、角度等均可调。激光光路从上向下,经聚焦透镜后在窗口内击穿空气,实现激光能量沉积。进行实验时室温 288 K,压力为 1 atm($1 \text{ atm} = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$)。时序控制系统采用美国斯坦福公司的数字延迟发生器 DG645 来控制闪光灯、激光器和高速相机,精度 1 ns。

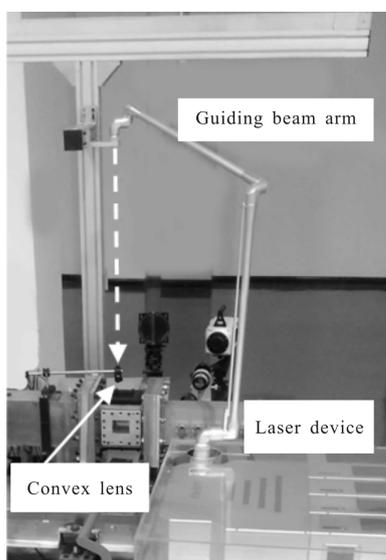


图 2 激光能量聚焦系统

Fig.2 Laser energy focusing system

2 实验结果与分析

2.1 激光能量沉积的流场演化

当入射激光能量为 209 mJ,焦距透镜为 150 mm 的情况下,纳秒脉冲激光能量在空气中沉积的部分纹影图像如图 3 所示。采用 HSFC PRO 超高速相机进行拍摄,尤为珍贵的是记录下了激光能量在沉积初期 1 s 内的流场演化。图中左上角的黑线对应实际长度 5 mm,激光入射方向为从上向下。在激光能量沉积之后,等离子体热核的初始击穿区域为近似锥形区域,靠近透镜的一端诱导击穿更多的等离子体。椭球形的冲击波逐渐在等离子体热核的表面产生,

并在 1 s 之后逐渐与热核区域解耦,冲击波在向外传播的过程中不断衰减,并逐渐恢复球形。热核的纵向尺寸逐渐收缩,在 22 s 时形成直径约 6 mm 的近似球形热核,之后环境中的冷空气在涡的诱导下,逐渐从远离透镜的一端进入热核,热核开始收缩并出现褶皱。褶皱会进一步发展并塌陷,环境中的冷空气逐渐穿透热核,并在 50 s 时穿透整个热核。在空气穿过热核的过程中,热核的横向尺寸不断增长,部分热气体由于粘性作用被从上部带出,形成了热气体尖刺。尖刺穿透热核不断向靠近透镜的方向运动,等离子体热核演化的状态基本成型,热核边界清晰,流体流动稳定,层流特性明显,直至后期热气体与环境空气混合显著,表现为热湍流。

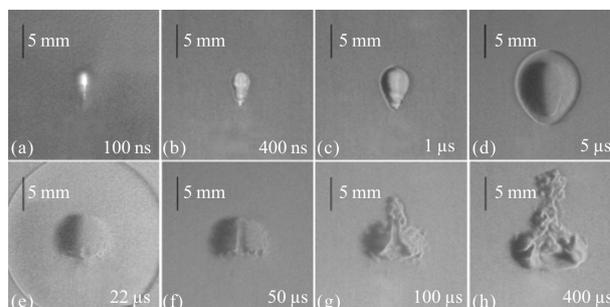


图 3 热核演化的部分纹影图

Fig.3 Part of the schlieren images of the hot core's evolution

热核在演化的过程中,宽度和高度是两个重要的定量信息,这两个量的变化情况可以勾勒出热核演化的大致轮廓,示意图如图 4 所示。

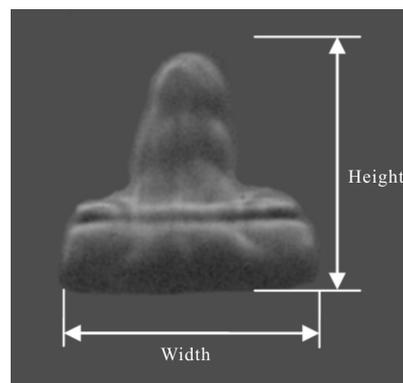


图 4 热核特征尺寸示意图

Fig.4 Schematic diagram of the hot core's characteristic size

2.2 脉冲激光能量大小对热核特性的影响规律

图 5 为针对不同能量大小的单脉冲激光,在焦距为 75 mm 的凸透镜聚焦下的热核演化情况对比,

图中像素为 208 pixel×200 pixel, 对应实际尺寸为 12.45 mm×12 mm。从图中 10 s 时图像的对比可以看出, 脉冲激光能量越大, 产生的等离子体越多, 可以观察到热核的发光现象越明显。在后续演化过程中对于不同能量大小的单脉冲激光能量沉积, 针对之前提到的两个特征尺寸进行了测量, 结果如图 6 所示。热核演化长度和宽度的判读是基于像素点与尺寸的对对应关系换算的。通过对标尺的像素点个数判读, 得到每个像素对应 60 μm。在边界像素点的判读过程中, 存在±2pixel 的判读误差, 即±120 μm, 除以图 6 中的宽度和高度数据, 得到误差在 1%~4% 之间。

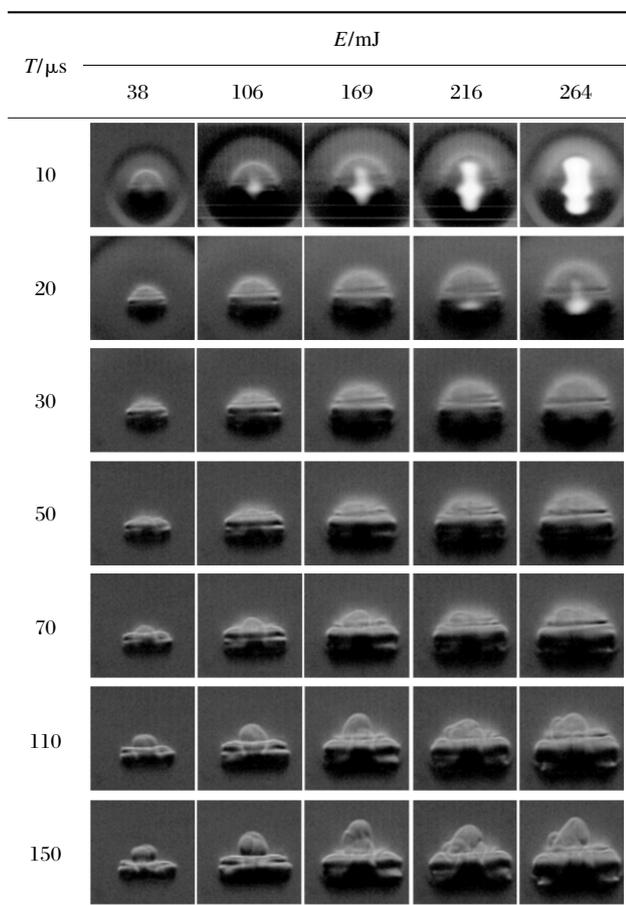
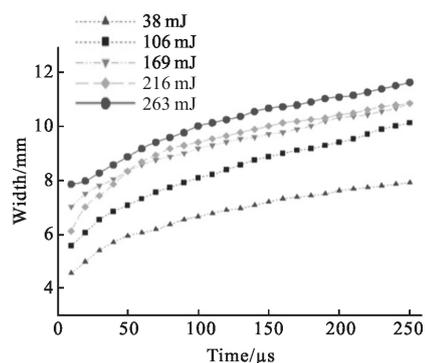


图 5 不同脉冲激光能量下热核的演化

Fig.5 Evolution of the hot core under different pulse laser energies

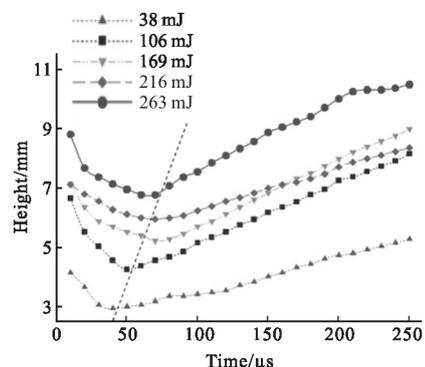
从图 6(a)中可以看到, 随着脉冲激光能量的不断增大, 在后续演化过程中, 热核的高度和宽度尺寸都更大, 表明脉冲激光能量沉积较大时击穿空气产生了更多的高温低密度等离子体。热核的宽度与激光能量大小有着密切的联系, 对图中 $t=100\text{ s}$ 时的热核宽度进行比较, 并进行最小二乘拟合, 结果如图 7

所示。随着激光能量的不断增大, 热核宽度的增长速度越来越小。根据二次拟合曲线推测, 在其他条件不变时, 热核直径将在激光能量为 333.7 mJ 时达到最大值 10.1 mm, 此时可能出现激光能量沉积的饱和现象。从图 6(b)中还可以看出热核的高度呈先下降后上升的趋势, 高度最低时即为环境冷空气刚刚穿透整个热核的时刻。另外也可以发现, 随着激光能量的增大, 热核在高度上的压缩过程到来越晚, 环境冷空气穿透整个热核的时间也越晚。



(a) 宽度变化

(a) Change in width



(b) 高度变化

(b) Change in height

图 6 不同沉积能量下的热核尺寸变化

Fig.6 Change in size of the hot core under different laser energies

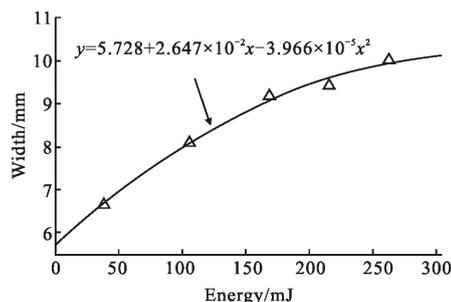
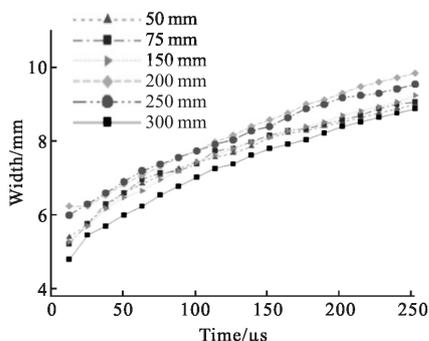


图 7 不同沉积能量在 $t=100\text{ s}$ 时的热核宽度

Fig.7 Width of the hot core at $t=100\text{ s}$ under different laser energies

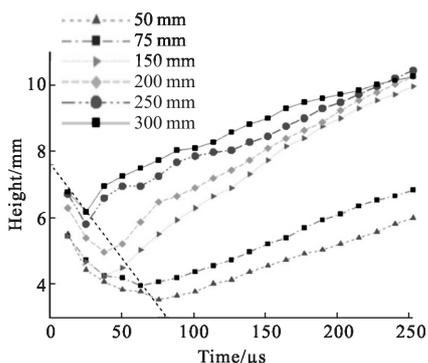
2.3 透镜焦距对热核特性的影响规律

对于 97 mJ 的单脉冲激光能量, 在不同焦距的凸透镜下开展了能量沉积实验, 采用的凸透镜焦距从 50~300 mm, 热核演化的尺寸对比如图 8 所示。



(a) 宽度变化

(a) Change in width



(b) 高度变化

(b) Change in height

图 8 不同焦距透镜聚焦下的热核尺寸变化

Fig.8 Change in size of the hot core under different focal length of lens

通过对比可以发现, 用于激光能量沉积的透镜焦距对热核在宽度上的变化影响较小, 不同的焦距下沉积热核宽度的偏差在 1 mm 左右。相对对宽度的影响, 透镜焦距对热核在高度上的变化有很大影响。透镜的焦距越长, 激光击穿空气形成等离子体的长度越长, 热核的高度尺寸也更大。从图 8(b)还可以看出: 焦距较长时, 在高度上的压缩过程会越早结束, 意味着焦距较长时产生了更大的涡量, 使环境空气在涡的作用下更早穿透整个热核, 这对保持热核核心区域状态、应用于等离子体主动流动控制是极其不利的。

3 结论

文中通过对特征长度的测量, 研究了激光能量大小和透镜焦距这两个关键参数对激光能量沉积之后热核演化的影响规律。具体研究结论如下:

(1) 激光能量越大, 热核的尺寸越大, 并且在一定时间内宽度随能量的变化符合二次曲线关系, 根据二次拟合曲线推测, 热核直径将在激光能量增加时达到一个最大值, 会出现激光能量沉积的饱和现象;

(2) 透镜焦距的大小主要影响了热核的高度尺寸变化, 焦距越长时热核的高度越大;

(3) 能量越高、焦距越短时, 环境中空气穿透整个热核的时间越晚, 意味着等离子体热核保持了较长时间的稳定状态, 这在相关激光致等离子体主动流动控制的研究中具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] Udagawa K, Kawaguchi K, Saito S, et al. Experimental study on supersonic flow control by MHD interaction [R]. 39th Plasmadynamics & Lasers Conference, AIAA 2008-4222, 2008.
- [2] Hong Junwu, Chen Xiaodong, Zhang Yulun, et al. The primary numerical research of active control technology in flow [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2005, 23(4): 402-407. (in Chinese)
洪俊武, 陈晓东, 张玉伦, 等. 主动流动控制技术的初步数值研究 [J]. *空气动力学学报*, 2005, 23(4): 402-407.
- [3] Shneider M N, Macheret S O, et al. Virtual shapes in supersonic flow control with energy addition [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2008, 24(5): 900-915.
- [4] Michael Atkinson, Jonathan Poggie, Jose Camberos. Numerical investigation of oblique shock-wave/ turbulent boundary-layer interaction control using plasma actuators [C] //49th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2011-3427, 2011.
- [5] Yan H, Gaitonde D. Control of edney IV interaction by energy pulse [C] //44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2006-562, 2006.
- [6] Radziemski L J, Loree T R, Cremers D A, et al. Time-resolved laser-induced breakdown spectrometry of aerosols [J]. *Analytical Chemistry*, 1983, 55(8): 1246-1252.
- [7] Hugo S, Mayo V, Rafael N, et al. Temporal evolution of the

- shock wave and hot core air in laser induced plasma [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(20): 3158–3160.
- [8] Jebens D S, Lakkaraju H S, McKay C P, et al. Time resolved simulation of lightning by lip [J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, 19(3): 273–276.
- [9] Erdem E, Zare-Behtash H, Kontis K, et al. Single pulse laser energy deposition in quiescent air and hypersonic flows[C]//18th AIAA/3AF International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, AIAA-2012-5870, 2012.
- [10] Qing Z X, Hong Y J, Wang D K, et al. Experimental and numerical study of nanosecond pulsed laser energy asymmetric deposition in quiescent air [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(7): 1661–1668.
- [11] Schülein E, Zheltovodov A A, Pimonov E A, et al. Study of the bow shock interaction with laser-pulse-heated air bubbles [C]//39th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, AIAA 2009-3568, 2009.
- [12] Yan H, Adelgren R, Boguszko M, et al. Laser energy deposition in quiescent air [C]//41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2003-1051, 2003.