

真空环境下脉冲激光烧蚀等离子体羽流特性分析

常浩, 金星, 林正国

(装备学院 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

摘要: 激光清除空间碎片利用的是高能脉冲激光烧蚀固体靶材的冲量耦合效应, 对于空间碎片来说, 激光辐照下的反冲冲量取决于碎片等离子体羽流的喷射过程, 并且会随着激光辐照方向的变化而变化。因此, 有必要研究空间碎片激光辐照下的等离子体羽流特性。针对等离子体羽流的流场超高速、瞬态、强自发光背景、小尺度的技术难点, 采用纳秒级曝光、多幅照片精确拼接技术, 采用高速相机和激光器同步时序控制技术, 实现纳秒级时间分辨率、亚微米级空间分辨率的流场演化信息定量测量, 实验获得典型碎片材料等离子体羽流演化特性, 以及不同激光入射角度下的等离子体羽流演化过程, 实验结果可揭示反喷冲量形成规律。

关键词: 等离子体羽流; 激光烧蚀; 阴影法; 辐照角度; 空间碎片

中图分类号: V416.5; TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1206014

Characteristics of plasma plume pulse laser ablation in vacuum

Chang Hao, Jin Xing, Lin Zhengguo

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: High power pulse laser ablation impulse effect can be used in the field of laser orbital debris removal. The recoil impulse of the space debris by laser ablation depends on the plasma plume expansion progress, and it will be changed by the change of laser ablation direction. Hence, it was necessary to study the characteristics of the plasma plume by laser ablation. Aim at the difficulties of ultra high speed, instantaneous condition, strong self luminescence and the small scale of the flow field, the technologies of ns exposure and precise stitching of multiple photos are adopted. Besides, the technology of controlling signal simultaneously with the high speed camera and laser power source was used. All these can achieve the ns scale time resolution and mm scale space resolution in the flow field quantitative measurement, which can be used to obtain the plasma plume evolution information. The plasma plume evolution characteristics of typical space debris material was obtained through experiments, also, the results of plasma plume expansion progress in different laser incident angle. The experimental results can reveal the change rule of the recoil impulse by pulsed laser ablation.

Key words: plasma plume; laser ablation; shadowing method; laser incident angle; space debris

收稿日期: 2016-04-05; 修订日期: 2016-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(11502301)

作者简介: 常浩(1987-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事纳秒激光推进技术方面的研究。Email: changhao5976911@163.com

0 引言

激光清除空间碎片利用的是高能脉冲激光烧蚀固体靶材的冲量耦合效应,通过烧蚀产物的反喷作用使碎片获得反冲冲量,从而使轨道速度减小,最终近地点高度降低进入大气层烧毁^[1-4]。对于空间碎片来说,激光辐照下的反冲冲量取决于碎片等离子体羽流的喷射过程,并且会随着激光辐照方向的变化而变化。因此,有必要研究空间碎片在激光辐照下的等离子体羽流特性,为进一步研究激光辐照下的空间碎片冲量矢量特性奠定基础。

激光辐照下的空间碎片冲量特性取决于碎片等离子体羽流演化过程。激光辐照空间碎片表面,随着入射激光功率密度增大,空间碎片表面物质熔融、汽化、离化,形成等离子体羽流,等离子体羽流的超高速反喷使得碎片获得反喷冲量,这是将激光能量转换为反喷动能的过程。并且,随着入射激光功率密度进一步增大,等离子体羽流离化程度加强,对后续入射激光产生屏蔽作用。

空间碎片等离子体羽流诊断技术是研究等离子体羽流演化规律,揭示反喷冲量的产生机理的重要手段。等离子体羽流中包括蒸汽、等离子体、分子团簇、表面碎屑^[5-8],蒸汽和等离子体以几十公里每秒超高速反喷,颗粒较大物质反喷速度则较低。等离子体羽流随着时间在空间上的演化,并且与碎片表面相互作用,形成反喷冲量。

等离子体羽流演化过程的特点是超高速、瞬间作用、强自发光背景、小尺度。等离子体羽流速度可达几十公里每秒;等离子体羽流与碎片瞬间作用,例如对于纳秒级脉宽激光,等离子体羽流作用时间小于几百纳秒;激光辐照下等离子体羽流产生强烈的自发光,造成羽流观测困难;等离子体羽流从产生到脱离碎片表面是在小尺度空间上完成,这些都对测量技术要求提出了挑战^[9-10]。文中针对等离子体羽流的流场超高速、瞬态、强自发光背景、小尺度的技术难点,以及时间、空间高分辨率的严苛要求,研究基于流场显示阴影技术,采用连续波激光探测光源辐照和衰减片抑制强自发光技术,采用纳秒级曝光多通路/多幅照片精确拼接技术,采用高速相机和激光器同步时序控制技术,实现高时空分辨率

的流场演化信息定量测量,解决激光等离子体羽流的时间、空间高分辨率测量难题,为揭示等离子体羽流的流场演化与反喷冲量形成规律提供实验分析和诊断方法。

1 等离子体羽流诊断技术

在流场显示中,通常利用光学显示技术来测量气体参数的空间分布,流场的温度、压力、浓度和马赫数等状态参数与密度有确定的函数关系,而气体的光学折射率是其密度的函数。由于流场的折射率变化对通过流场的光线产生扰动,因此可利用一些经典的光学方法鉴别光线被扰动的程度,从而确定流场折射率的空间分布。通常来讲,干涉法常用来研究温度梯度很小的自然对流附面层;而纹影法和阴影法常用于研究存在着较大温度梯度或密度梯度的流场,如高速流动、可压缩流动、流体混合、对流传热、分层流动和燃烧等。光学显示技术中最常用的一种方法是阴影法,它的测量系统结构简单且具有较高的分辨能力,得到的流场图像清晰、精度高,便于后期的分析处理。

该实验基于阴影法来搭建等离子体羽流测量系统,阴影法成像原理是利用光线通过气流扰动区后,由于流场密度不同致使折射率不同,在不同折射率下光会发生不同程度偏折和位移,偏折光线到达的区域形成亮区,偏折光线到达不了的区域形成暗区(阴影区),从而使得像平面上呈现明暗变化,如图 1 所示。

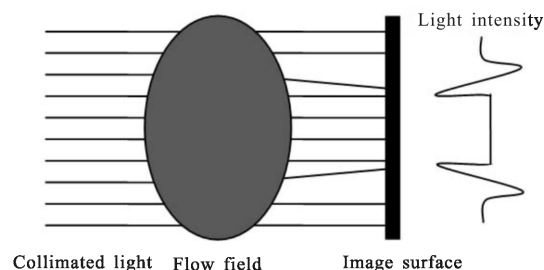


图 1 阴影成像原理

Fig.1 Principle of shadow imaging

拟设计的实验系统示意图如图 2 所示,系统主要由激光作用靶材装置和激光阴影流场测量装置两部分组成。激光阴影法作为一种成像诊断技术,广泛

应用于流场显示领域，可以对流场进行定性或定量的分析。脉冲激光烧蚀靶材产生瞬变等离子体流场，等离子体流场的密度变化导致流场各处折射率不同。通过探测光经过等离子体流场发生偏折，改变相机 CCD 上的光强分布，并将光强分布转换成明暗不同的阴影图像获得等离子体演化过程。激光作用靶材装置包括位移控制平台，烧蚀激光通过真空罐的光学窗口进入，靶材置于真空仓内，通过光路转折将烧蚀激光引入真空仓内，对靶材进行烧蚀。探测激光

光源位于平行靶面的方向，激光光源、靶材、高速 CCD 相机镜头位于同一高度的水平线上。激光烧蚀靶材过程中，形成的等离子体羽流传播速度非常快，并且伴随着自发光现象，这种快速过程的光学显示，对高速相机和激光器的工作时序要求比较严格。实验过程中，采用 DG535 脉冲信号发生器同步所有设备，由信号发生器给触发零时。同时，由于等离子体发光很强，为避免过饱和现象的发生，可在成像透镜前使用衰减片减小等离子体自发光。

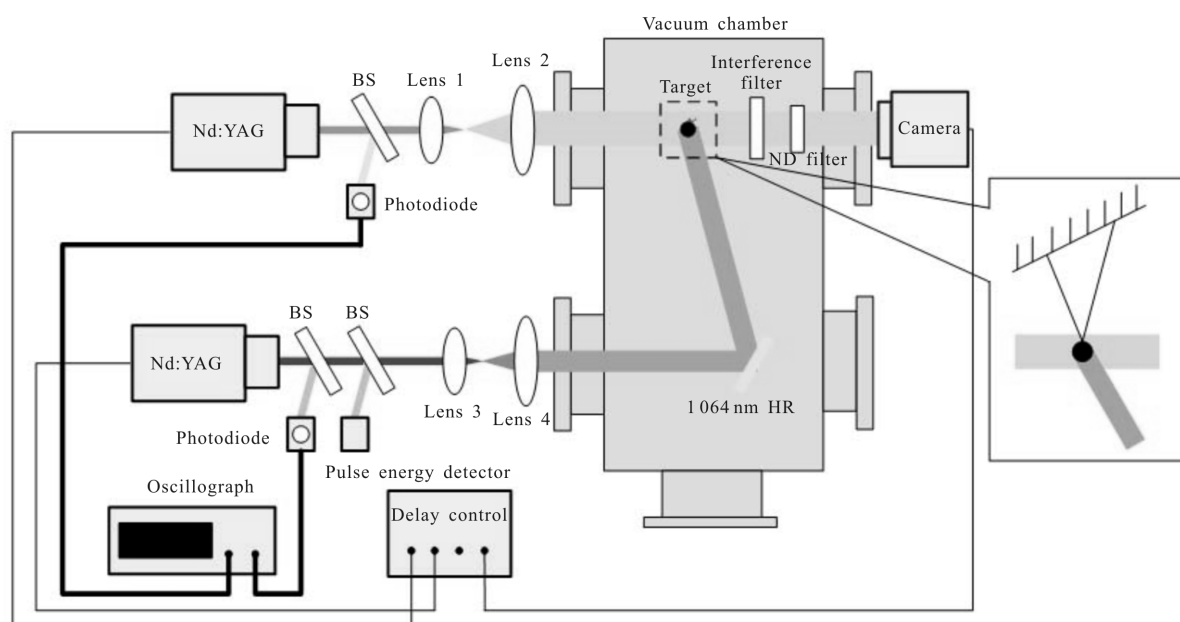


图 2 脉冲激光烧蚀等离子体羽流成像实验装置原理图

Fig.2 Schematic diagram of pulse laser ablation plasma plume imaging setup

2 实验结果与分析

2.1 时空标定结果

实验中烧蚀光源采用的是 Nd:YAG 固体激光器，激光波长为 1064 nm，半高宽为 8 ns，脉冲全宽 25 ns，最大输出激光能量为 500 mJ，光斑空间分布为近似平顶分布，光斑直径为 8 mm。实验中所采用的是普通的直尺，最小刻度 1 mm，标尺成像结果如图 3 所示。可以看出，激光阴影成像技术的空间分辨率非常高，一般能达到亚微米量级（接近激光的衍射极限），可清晰分辨出标尺 1 mm 的空间尺度。

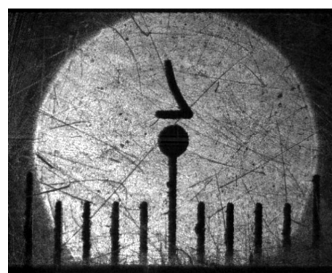


图 3 实验中标尺成像结果

Fig.3 Ruler imaging in experiment

阴影系统的背景光由闪光灯提供，闪光灯采用德国 HSPS 公司 (High Speed Photo Systeme) 的

NANOLITE 系列频闪光灯源, 配合 NANOLITE Driver 使用, 单脉冲能量可达 25 mJ, 脉冲持续时间约为 20 ns, NANOLITE Driver 可设置外部触发并受信号发生器控制, 使用高速光电探测器获得闪光灯曝光时间, 曝光时间和实物图如图 4 所示。由此, 可实现纳秒量级的流场时间冻结要求。

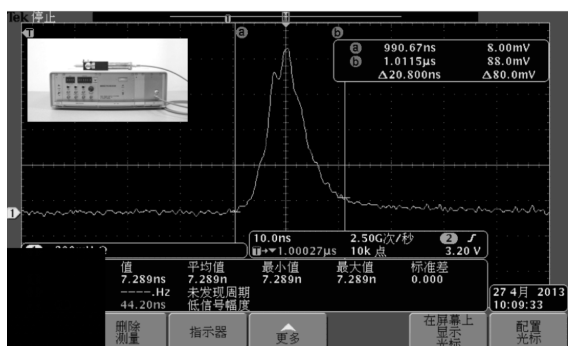


图 4 闪光灯曝光时间及实物图片

Fig.4 Flash exposure time and its actual photo

2.2 等离子体羽流特性分析

实验中, YAG 激光器的单脉冲激光能量输出为 ~466 mJ, 烧蚀激光经聚焦透镜, 形成的烧蚀光斑直径为 ~1 mm, 烧蚀工质为典型的空片材料铝。图 5 给出了 20 ns 时刻形成的等离子体羽流特征图, 图中黑色方框为铝质靶材。可以看出, 在 20 ns 时刻, 等离子体流场中开始出现强自发光区域, 该区域表示密度和温度较高区域, 并且大部分存在于靶面附近处。在距离靶面大约 2 mm 处, 同样出现密度和温度较高的亮区, 此处由于形成的羽流吸收入射激光能量, 进一步电离, 形成高温高压等离子体。整个羽流区域, 从等离子体羽流中心处向外分布, 等离子体密度和温度开始降低。

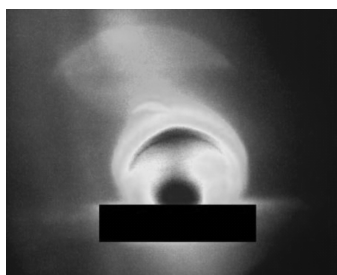


图 5 20 ns 时刻等离子体羽流特征图

Fig.5 Plasma plume characteristics at 20 ns

图 6~8 分别给出了 40、60、80 ns 时刻, 等离子体

羽流特征图。可以看出, 随着时间推移, 等离子体以蘑菇云状向外扩展, 同时中心密度和温度较高区域的等离子体开始向四周扩散, 但随着等离子体羽流的进一步膨胀, 其密度和温度也在降低。到 80 ns 时刻, 可以看出, 羽流密度和温度下降迅速, 并且羽流有开始脱离靶表面的趋势。由此可以看出, 在烧蚀脉冲激光即将结束时刻, 高温高压等离子体集中在靶面处, 此时刻靶面压力较大, 对靶形成的反冲冲量也较大, 随着时间推移, 靶面等离子体密度和温度逐渐降低, 并且逐渐脱离靶面, 反冲冲量也逐渐减少直至完全消失。

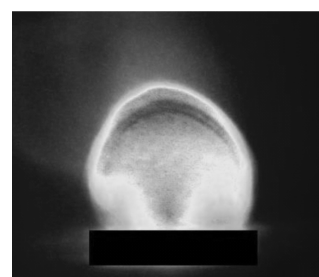


图 6 40 ns 时刻等离子体羽流特征图

Fig.6 Plasma plume characteristics at 40 ns

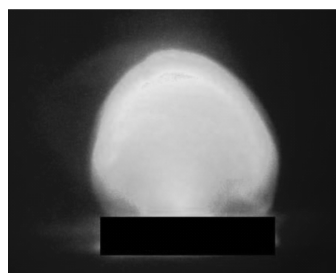


图 7 60 ns 时刻等离子体羽流特征图

Fig.7 Plasma plume characteristics at 60 ns

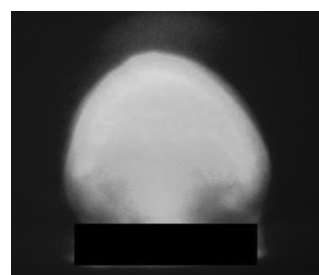


图 8 80 ns 时刻等离子体羽流特征图

Fig.8 Plasma plume characteristics at 80 ns

2.3 激光不同入射角度下等离子体羽流演化特性

激光清除空间碎片中, 随着激光与空间碎片相对位置的不断变化, 激光辐照空间碎片的角度也在

发生变化。因此,有必要研究激光不同入射角度下的等离子体羽流演化特性,从而为激光辐照空间碎片冲量耦合方向特性奠定基础。利用上述实验方法及系统,研究了激光入射角度变化时,等离子体羽流膨胀演化特性。实验中,单脉冲激光能量与垂直入射时保持一致,激光入射方向与靶材表面法向方向的夹角从 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 变化。图 9、10、11 和图 12 分别给出了激光入射角度为 5° 、 10° 、 15° 和 20° 四种情况下的等离子体羽流演化特性。

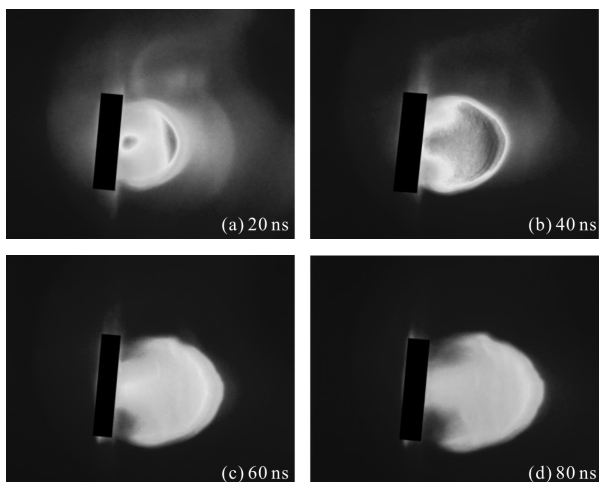


图 9 激光入射方向与靶面法向方向夹角为 5° 时的等离子体羽流演化特性

Fig.9 Plasma plume evolution progress when the angle of incident laser and target normal surface is 5°

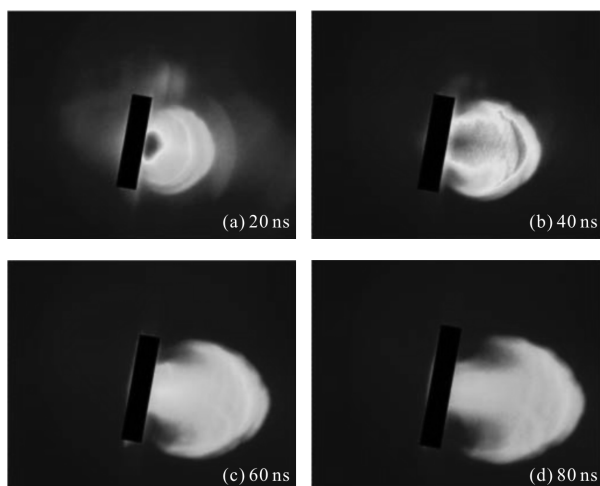


图 10 激光入射方向与靶面法向方向夹角为 10° 时的等离子体羽流演化特性

Fig.10 Plasma plume evolution progress when the angle of incident laser and target normal surface is 10°

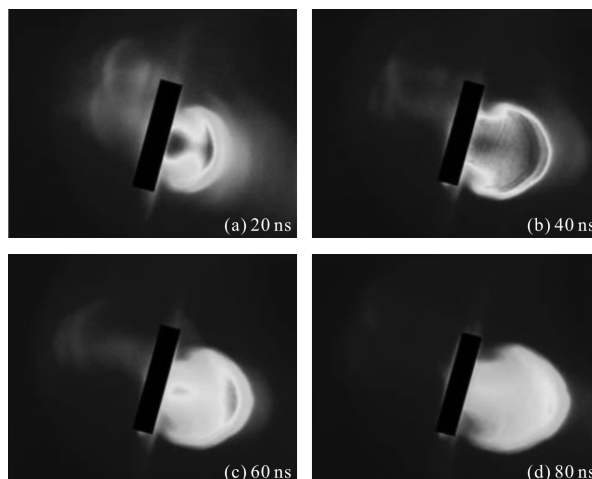


图 11 激光入射方向与靶面法向方向夹角为 15° 时的等离子体羽流演化特性

Fig.11 Plasma plume evolution progress when the angle of incident laser and target normal surface is 15°

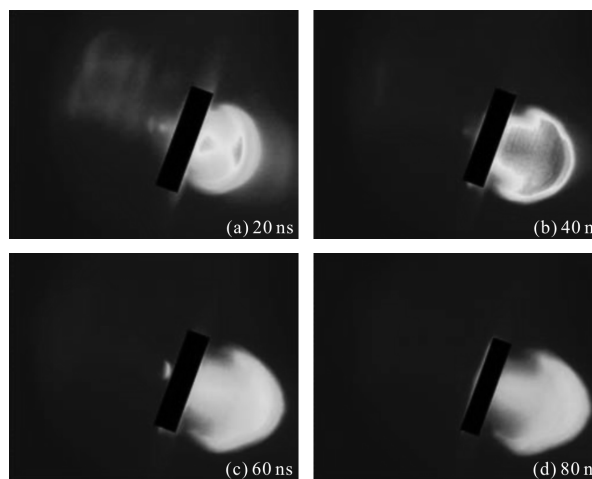


图 12 激光入射方向与靶面法向方向夹角为 20° 时的等离子体羽流演化特性

Fig.12 Plasma plume evolution progress when the angle of incident laser and target normal surface is 20°

可以看出,在不同的激光入射角度下,等离子体羽流喷射主要沿着靶面法向方向。等离子体羽流中密度和温度最高的区域首先出现在靶面附近,随着时间推移,逐渐向四周扩散,但密度和温度也在逐渐降低,到 80 ns 时刻,等离子体羽流有脱离靶面的趋势。不同激光入射角度下的等离子体羽流特性与激光垂直入射时的特性基本一致。因此,可认为在一定的激光入射范围内,等离子体烧蚀反喷方向基本沿着烧蚀平面法向方向,冲量方向同样沿着靶面垂直

方向,这与参考文献[11]给出的超短脉冲激光辐照靶材时,不论激光入射方向如何,烧蚀反喷方向始终沿着烧蚀平面法向方向,即烧蚀反喷对激光入射角度不敏感这个结论一致。

3 结 论

在激光清除空间碎片中,脉冲激光烧蚀空间碎片等离子体羽流特性是研究激光烧蚀冲量耦合机理的重要基础,通过实验研究,得到的结论如下:

(1) 在激光垂直入射碎片靶面情况下,当烧蚀脉冲激光即将结束时刻,高温高压等离子体集中在靶面处,此时刻靶面压力较大,对靶形成的反冲冲量也较大,随着时间推移,靶面等离子体逐渐脱离靶面,反冲冲量逐渐减少直至完全消失;

(2) 当激光斜入射时,等离子体羽流反喷方向基本沿着烧蚀平面法向方向,冲量方向同样沿着靶面垂直方向,烧蚀反喷对激光入射角度不敏感。

下一步在对纳秒脉冲激光烧蚀等离子体羽流流场演化信息高精度测量基础上,进一步对等离子体羽流中电子数密度、压力、温度等物理特性开展细致诊断与分析,结合理论建模和数值模拟工作,明确等离子体羽流瞬态流场变化对宏观力学效应的影响,为分析激光烧蚀冲量耦合提供理论和实验依据。

参考文献:

- [1] Bruno Esmiller, Christophe Jacqueland, Hans-Albert Eckel, et al. Space debris removal by ground-based lasers: main conclusion of the european project cleanspace [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(31): 45-54.
- [2] Phipps C R. A laser-optical system to re-enter or lower low Earth orbit space debris [J]. *Acta Astronautica*, 2014, 93: 418-429.
- [3] Phipps C R, Baker K L, Libby S B, et al. Removing orbital debris with lasers[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49(9): 1283-1300.
- [4] Shen Shuangyan, Jin Xing, Chang Hao. Cleaning space debris with a space-based laser system [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, 27(4): 805-811.
- [5] Mahmood S, Rawat R S, Springham S V, et al. Plasma dynamics and determination of ablation parameters using the near-target magnified imaging during pulsed laser ablation [J]. *Applied Physics A*, 2010, 101(4): 701-705.
- [6] Bolshov M, Yu Kasyanov, Feshchenko R, et al. Investigation of the dynamic of an expanding laser plume by a shadowgraphic technique [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2008, 63(12): 324-331.
- [7] Mahmood S, Rawat R S, Springham S V, et al. Material ablation and plasma plume expansion study from Fe and graphite targets in Ar gas atmosphere [J]. *Appl Phys A*, 2010, 101(4): 695-699.
- [8] Zhang N, Zhu X, Yang J, et al. Time-resolved shadowgraphs of material ejection in intense femtosecond laser ablation of aluminum[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, 99(16): 167602.
- [9] Hong Yanji, Jin Xing, Chang Hao. Discussion of key problems in space based laser centimeter orbital debris removal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0229002. (in Chinese)
洪延姬,金星,常浩. 天基平台激光清除厘米级空间碎片关键问题探讨 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 0229002.
- [10] Chang Hao, Jin Xing, Zhou Weijing. Experimental research on plasma plume expansion induced by nanosecond laser ablation Al [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 43-46. (in Chinese)
常浩,金星,周伟静. 纳秒激光烧蚀铝等离子体羽流膨胀特性实验[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S1): 43-46.
- [11] Liedahl D A, Rubenchik A, Libby S B, et al. Pulsed laser interactions with space debris: Target shape effects [J]. *Advances in Space Research*, 2013, 52(5): 895-915.