脉冲激光大光斑辐照空间碎片冲量耦合特性研究

林正国,金 星,常 浩

(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:开展了脉冲激光大光斑辐照空间碎片冲量耦合特性研究,即激光烧蚀光斑尺寸略小于碎片尺寸下的冲量耦合特性, 对比实验研究了平面状碎片在激光大光斑辐照和小光斑辐照下的冲量耦合特性,以及大光斑辐照下光斑尺寸和形状因素对冲量耦合特性的影响规律,并结合实验研究结论验证了理论研究的合理性。研究结果表明: 相同激光功率密度下小光斑辐照比大光斑辐照的冲量耦合系数高;大光斑辐照下冲量耦合系数主要受激光功率密度影响,光斑尺寸对冲量耦合系数的影响较小;采用大光斑辐照下冲量耦合系数的理论计算结果更接近于实验结果。上述实验研究成果对激光辐照不规则空间碎片理论研究具有一定的实验指导意义。

关键词: 空间碎片; 大光斑辐照; 冲量耦合特性; 脉冲激光

中图分类号: V416.5;TN249 **文献标志码**: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1243001

Analysis of the impulse coupling characteristics of space debris irradiated by pulsed laser with big spot

Lin Zhengguo, Jin Xing, Chang Hao

(State Key Laboratory of Laser Propulsion and Application, Aerospace Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: The impulse coupling characteristics of space debris irradiated by pulsed laser with big spot was studied. The impulse coupling characteristics of planar debris under big and small spot irradiation were studied conservatively. The influence rules of shape and spot size under big spot irradiation on impulse coupling characteristics were studied. The rationality of theoretical research was verified by the experimental results. The results demonstrate that the impulse coupling coefficient with big spot radiation is higher than that of small spot radiation under the same laser power density. Impulse coupling coefficient under big spot irradiation is mainly affected by laser power density. The influence of spot size on impulse coupling coefficient is small. The theoretical calculation results of impulse coupling coefficient under big spot irradiation are closer to the experimental results. The above experimental results have certain guiding significance for the theoretical study of laser irradiated non-planar space debris.

Key words: space debris; big spot irradiation; impulse coupling characteristic; pulsed laser

收稿日期:2018-07-10; **修订日期**:2018-08-28

基金项目:国家自然科学基金(11502301)

作者简介:林正国(1993-),男,硕士生,主要从事激光清除空间碎片技术方面的研究。Email: 912150371@qq.com

导师简介:金星(1962-),男,研究员,主要从事激光航天应用技术方面的研究。Email: Jinxing@163.com

0 引 言

激光清除空间碎片一直受到国际社会的广泛关注，激光清除空间碎片分为冲量耦合阶段和减速降轨阶段[1-3]。冲量耦合阶段中,激光与碎片相互作用产生的冲量越大，反冲冲量方向与碎片轨道速度夹角越大，在第二阶段中的减速降轨效果就越好,因此，激光与碎片相互作用的冲量耦合特性及规律是激光清除空间碎片技术面临的基础性问题。

激光与碎片的冲量耦合阶段具有两大特点:一是激光对厘米级空间碎片的“全覆盖”特点。因大气传输效应和衍射极限等因素的影响，激光器发射口径较大(如 ORION 计划中地基激光发射口径达 6 m、CLEANSPACE 计划中地基激光发射口径也要大于 4 m)，近地轨道上远场激光光束尺寸一般大于厘米级碎片尺寸[4-5],因此碎片是在激光“全覆盖”情况下获得反冲冲量;二是空间碎片形状的不规则特点。因爆炸解体、碰撞等原因,碎片形状一般可分为三类:(1) 包含两个基本平面的碎片，如薄板;(2) 包含若干个平面的碎片，如正方体等;(3) 物体表面面积微元上法向连续变化的碎片,如球体等,其中第(2)、(3)类碎片占到绝大多数。因此,不规则空间碎片在激光“全覆盖” 下的冲量耦合特性及规律更是研究的关键。

目前实验研究主要集中在激光烧蚀光斑尺寸远小于平面靶尺寸下的冲量耦合特性及规律，即小光斑辐照,光斑尺寸通常在百微米量级[6-7]。同时,在小光斑辐照冲量耦合特性实验研究基础上，国外学者理论研究了不规则碎片在“全覆盖”下的冲量耦合特性[8-9],但是小光斑辐照下碎片表面羽流喷射是无约束自由喷射,而激光“全覆盖”下,碎片表面相同小光斑辐照微元上的羽流喷射实际上是一种相互影响和干扰的约束喷射,因而现有理论研究是否符合实际,缺乏相关实验研究进行验证。但是直接通过实验手段研究碎片在脉冲激光“全覆盖”下的冲量耦合特性较为困难，可采用大光斑辐照方式研究碎片表面小光斑辐照微元羽流喷射有约束情况下的冲量耦合特性,为“全覆盖”理论研究提供实验指导依据。

文中以平面状碎片和球体状碎片为研究对象，设计实验测量方法,搭建实验平台,完成真空环境下的缩比实验。首先实验研究了激光小光斑垂直辐照平面状碎片的冲量耦合特性，以及激光大光斑垂直辐照平面状碎片和球体状碎片时，光斑尺寸和碎片形状对冲量耦合特性的影响规律，然后对比分析了平面状碎片在激光大光斑辐照和小光斑辐照下冲量耦合特性的区别,最后基于“面积矩阵法”结合实验研究结果验证了目前理论研究激光辐照空间碎片冲量的合理性。

1 实验方案

基于扭摆系统微冲量测量原理，设计脉冲激光辐照空间碎片冲量测量系统布局如图 1 所示。实验系统由激光能量加载分系统、扭摆分系统、位移测量分系统和阻尼系统组成,实验装置主要包括激光器、聚焦透镜、电位移台、扭摆以及相关配套设备。激光器选用的是 Nimma400 激光器，激光器输出脉冲激光的波长为 1 064 nm，脉宽为 8 ns，最大输出能量 450 mJ,输出能量采用的是电压调解方式。

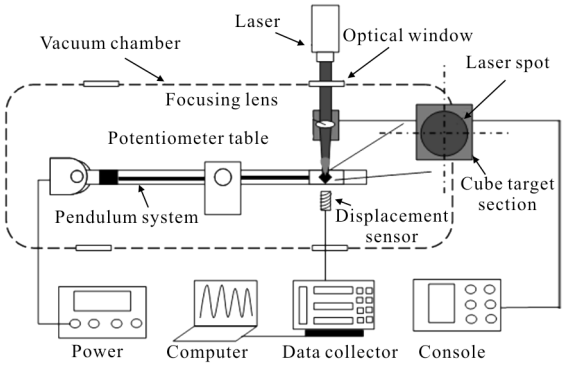

图 1 冲量测量系统布局

Fig.1 Impulse measurement system layout

从图 1 中可以看出，激光穿过真空舱光学窗口后,经透镜聚焦垂直辐照到靶材表面,靶材获得反冲冲量引起扭摆的振动，利用位移传感器采集和记录扭摆摆动的角位移变化曲线,然后根据扭摆微冲量测量原理即可得到冲量大小。实验过程中光斑尺寸可通过使用电位移控制台改变聚焦透镜与靶材间的距离而改变。光斑大小采用感光纸感光方法测量,具体操方法是:将感光纸靠近靶材,利用光学显微镜测量和记录下脉冲激光烧蚀感光纸后产生的

烧蚀光斑大小。

实验所选用的空间碎片靶材为 2 mm 边长的正方体和 2 mm 直径的球体,靶材的材料为铝,实验中通过测量得到小光斑辐照的光斑直径为 270 m,满足小光斑辐照要求。对于大光斑辐照而言,大光斑辐照时激光的聚焦光斑尺寸应当与碎片尺寸在一个量级, 因此大光斑辐照时调节聚焦光斑直径大于等于 1 mm,为比较大光斑辐照时光斑尺寸对冲量耦合特性的影响,调节出 3 种光斑尺寸,测量得到光斑的直径分别为 1、1.16、1.33 mm。由于正方体和球体碎片具有良好的对称性, 当激光水平面内垂直辐照碎片表面时,其冲量方向沿着激光入射方向,并且当激光垂直辐照正方体表面时, 可视为激光垂直辐照平面状碎片。

2 激光小光斑辐照下的冲量耦合特性

脉冲激光小光斑垂直辐照平面状碎片时, 冲量随入射激光能量的变化曲线如图 2 所示。

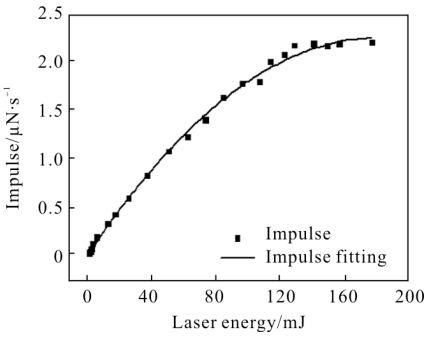

图 2 平面状碎片在激光小光斑辐照下冲量变化曲线

Fig.2 Impulse curves of planar debris with laser radiation under small spot

从图 2 中的冲量拟合曲线可以看出: 随着入射激光能量增加,冲量逐渐增加,但是冲量的增幅却在逐渐变缓。因为靶材表面吸收入射激光能量后迅速熔融气化,在辐照区域形成了气化物喷射,对靶材产生反冲冲量,随着入射激光能量的增大,气化物不断增加,反冲冲量逐渐增大,与此同时部分气化物被电离形成了高温高压的等离子体, 等离子体膨胀也会产生冲量, 但是等离子体对入射激光能量具有吸收作用,导致入射激光能量不能完全到达靶材表面,与靶耦合的激光能量减少,即产生等离子体屏蔽效应,并且入射激光能量越大,等离子体屏蔽效应越强,从而引起冲量的增幅变缓。

脉冲激光小光斑垂直辐照平面状碎片时,冲量耦合系数随激光功率密度的变化曲线如图 3 所示。

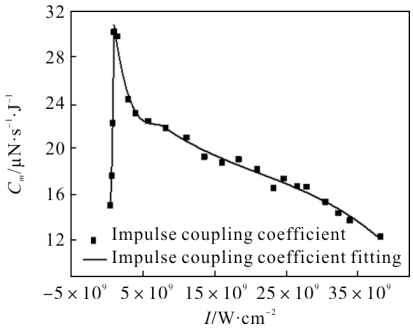

图 3 平面状碎片在激光小光斑辐照下冲量耦合系数变化曲线

Fig.3 Impulse coupling coefficient curves of planar debris with laser radiation under small spot

从图 3 中冲量耦合系数的拟合曲线可以看出: 随着激光功率密度增加,冲量耦合系数急剧增加,当达到最优冲量耦合系数对应的激光功率密度后,随着激光功率密度的继续增加, 冲量耦合系数逐渐减小。因为在最优冲量耦合系数之前,靶面烧蚀效率较低, 增大激光功率密度有助于提高靶材的气化和离化喷射强度,改善冲量耦合系数;在最优冲量耦合系数之后,气化物被电离产生等离子体,形成了等离子体屏蔽效应, 等离子体吸收入射激光能量导致冲量耦合系数逐渐下降。

3 激光大光斑辐照下的冲量耦合特性

3.1 光斑尺寸影响

不同光斑尺寸下激光大光斑垂直辐照平面状碎片和球体状碎片时, 冲量随入射激光能量的变化曲线如图 4 和图 5 所示。

从图 4 和图 5 可以看出:

(1) 激光大光斑辐照平面状碎片和球体状碎片时,不同光斑尺寸下,冲量随入射激光能量的变化趋势基本相同,随着入射激光能量的增加,冲量逐渐增加。这与小光斑辐照下的冲量变化规律相同,但是大光斑辐照下冲量并没有出现增速变缓的现象, 因为在最大输出能量 450 mJ 下,当光斑直径大于 1 mm时,到达靶材的激光功率可调范围最大不超过 8 109 W/cm^2,没有达到形成有效的等离子体屏蔽效应的激光功率密度阈值。

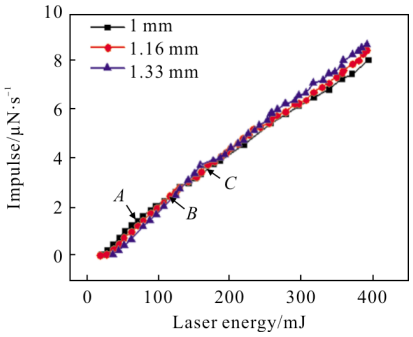

图 4 激光大光斑辐照平面状碎片的冲量变化曲线

Fig.4 Impulse curves of planar debris with laser radiation under big spot

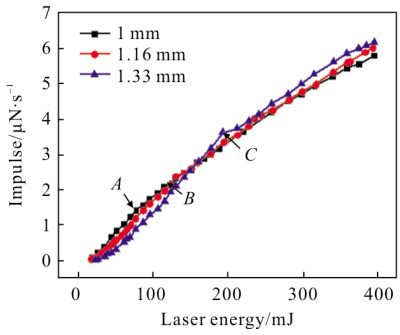

图 5 激光大光斑辐照球体状碎片的冲量变化曲线

Fig.5 Impulse curves of spherical debris with laser radiation under big spot

(2) 图中 **A** 点是 1 mm 直径光斑的最优冲量耦合系数对应的数据点，**B** 点是 1.16 mm 直径光斑的最优冲量耦合系数对应的数据点，**C** 点是 1.33 mm 直径光斑的最优冲量耦合系数对应的数据点。不论是激光大光斑辐照平面状碎片还是球体状碎片，在 **A** 点之前，当入射激光能量相同时，光斑越大对应的冲量越小，在 **C** 点之后，当入射激光能量相同时，光斑越大对应的冲量越大。因为在最优冲量耦合系数之前，烧蚀效率较低，增大激光功率密度有助于提高靶材表面的气化和离化喷射强度，因此在最优冲量耦合系数之前，增大激光功率密度有助于提高冲量耦合系数；在最优冲量耦合系数之后，靶材表面形成了等离子体屏蔽效应，激光功率密度越大，等离子体屏蔽效应越强，因此在最优冲量耦合系数之后，增大激光功率密度会引起冲量耦合系数的降低。当入射激光能量一定时，增大光斑面积会减小激光功率密度，所以在最优冲量耦合系数之前，光斑尺寸越大对应的冲量越小，在最优冲量耦合系数之后，光斑尺寸越大对应的冲量越大。

图 6 为不同光斑尺寸下，激光大光斑辐照平面状碎片的冲量耦合系数变化曲线，可以看出：

(1) 不同光斑尺寸下冲量耦合系数随激光功率密度的变化趋势基本相同，冲量耦合系数先急剧增加然后逐渐减小，存在最优冲量耦合，因为随着激光功率密度增加，靶材表面气化和离化强度增强，冲量耦合系数急剧增大，随着激光功率密度继续增加，靶材表面形成了等离子体屏蔽效应，导致冲量耦合系数逐渐减小。这与小光斑辐照下冲量耦合系数的变化规律相同。

(2) 相同激光功率密度下不同光斑尺寸对应的冲量耦合系数基本相同，表明：激光大光斑辐照平面状碎片时，冲量耦合系数主要受激光功率密度影响，激光功率密度在冲量耦合中占主导地位，冲量耦合系数受光斑尺寸影响较小。

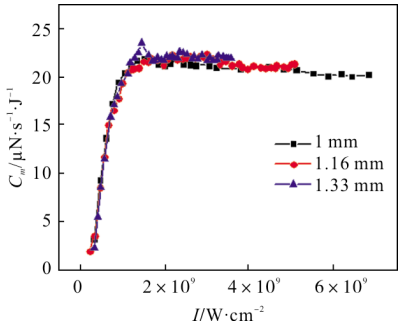

图 6 不同光斑尺寸下激光辐照平面状碎片的冲量耦合系数变化曲线

Fig.6 Impulse coupling coefficient curves of planar debris with laser radiation under different spot sizes

3.2 形状因素

图 7 为相同光斑尺寸下，激光大光斑辐照平面状碎片和球体状碎片的冲量随入射激光能量变化曲线，相同激光聚焦光斑尺寸下，脉冲激光大光斑辐照平面状碎片和球体状碎片时，冲量随入射激光能量的变化曲线，可以看出：

(1) 当光斑尺寸相同时，随着入射激光能量增加，脉冲激光大光斑辐照平面状碎片和球体状碎片产生的冲量都在逐渐增大，并且平面状碎片的冲量增速明显比球体状碎片快。

(2) 在相同光斑尺寸下，当入射激光能量一定时，激光大光斑辐照平面状碎片产生的冲量基本比球体状碎片大，并且随着入射激光能量增加，两者的差值在逐渐增大。因为根据平面状碎片与球体状碎片的几何关系可知，球体表面上的各微元面法线方

向存在夹角,因此当激光大光斑辐照球体状碎片时,球体表面微元面上气化物和等离子体的喷射方向也存在夹角,则微元面上产生的反冲冲量存在夹角,会抵消一部分冲量分量,导致激光大光斑辐照球体状碎片形成的总的冲量比平面状碎片情况下的低,并且入射激光能量越大,球体表面微元面上反冲冲量抵消的越多,球体状碎片对应的冲量相比平面状碎片越低。

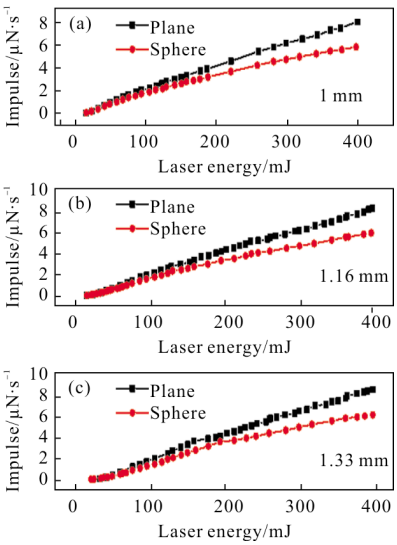

图 7 相同光斑尺寸下激光辐照平面状碎片和球体状碎片的冲量变化曲线

Fig.7 Impulse curves of planar and spherical debris with laser radiation under the same focusing spot

4 激光小光斑辐照与大光斑辐照下冲量耦合特性对比

图 8 为激光小光斑辐照与大光斑辐照平面状碎片时,冲量耦合系数随激光功率密度的变化曲线,可以看出:

(1) 大光斑辐照和小光斑辐照下的冲量耦合系数随激光功率密度变化趋势相同,并且最优冲量耦合系数对应的激光功率密度也基本相同,表明冲量耦合系数的变化规律与激光功率密度具有很强的相关性。

(2) 当激光功率密度相同时,激光小光斑辐照下的冲量耦合系数始终比大光斑辐照下的冲量耦合系数高,并且冲量耦合系数不是成比例增大,因此可以排除小光斑辐照下光斑尺寸测量误差的影响,主要原因是小光斑辐照下靶材表面被辐照区域很小,相当于单个微元,真空环境下微元面上的羽流喷射是一种无约束的自由喷射,而大光斑辐照下被辐照区域相当于由很多个小光斑辐照微元组成,单个微元面上的羽流喷射必然会受到相邻微元面上羽流喷射的干扰和约束,使得大光斑辐照下相同小光斑辐照微元上的羽流喷射是一种有影响和干扰的约束喷射,从而导致冲量耦合系数降低。

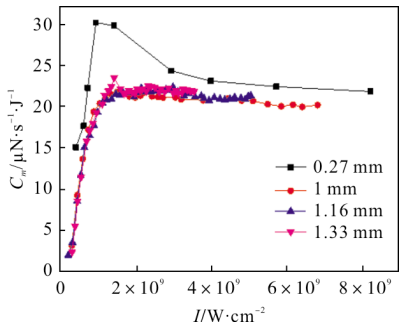

图 8 激光小光斑与大光斑辐照下平面碎片的冲量耦合系数变化曲线

Fig.8 Impulse coupling coefficient curves of planar debris with laser radiation under small and big spot

5 理论验证

基于 Liedahl 提出的“面积矩阵法”[10],结合平面状碎片在激光大光斑辐照和小光斑辐照下冲量耦合系数随激光功率密度变化的实验结果,获得当光斑直径为 1、1.16、1.33 mm,激光脉宽为 8 ns 时,激光大光斑辐照球体状碎片时,冲量随入射激光能量变化的理论结果与实验结果对比如图 9 所示。

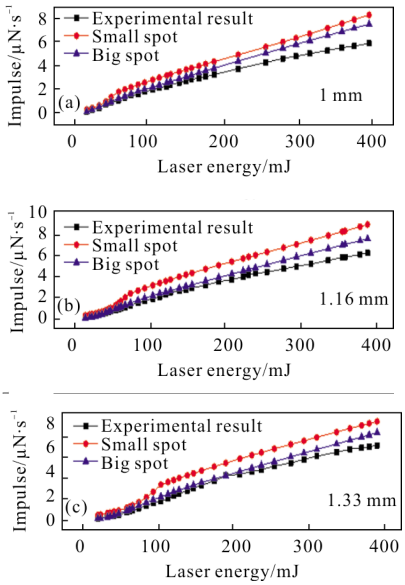

图 9 球体状碎片冲量变化的理论结果与实验结果

Fig.9 Theoretical and experimental results of the impulse change of spherical debris

从图 9 可以看出：

(1) 不同光斑尺寸下,在求解激光大光斑辐照球体状碎片冲量时，采用大光斑辐照下冲量耦合系数比采用小光斑辐照下冲量耦合系数的理论结果更接近于实验结果,并且相比较小光斑辐照,大光斑辐照下的理论结果与实验结果误差更小,表明大光斑辐照下的冲量耦合特性与小光斑辐照下的冲量耦合特性并不相同,并且大光斑辐照下的冲量耦合特性更接近于理论求解激光“全覆盖”不规则碎片冲量的实际。

(2) 当入射激光能量较大时,理论结果与实验结果仍偏差较大，因为平面状碎片与球体状碎片的羽流反喷作用并不完全相同，球体表面小光斑辐照微元的羽流相互影响、干扰的方式和平面状碎片的情况不同。

6 结 论

为研究平面状碎片在脉冲激光小光斑辐照下的冲量耦合特性是否能用于研究“全覆盖”下,即碎片表面相同小光斑辐照微元羽流喷射是一种相互影响和干扰的约束喷射情况下的冲量耦合特性，从实验和理论两个方面开展关于激光大光斑辐照空间碎片冲量耦合特性的研究,为“全覆盖”理论研究提供实验指导依据。得到主要结论如下：

(1) 当激光功率密度相同时,平面状碎片在激光小光斑辐照下的冲量耦合系数始终比大光斑辐照大，因此大光斑辐照下的反喷强度不是简单的小光斑辐照强度的叠加，小光斑辐照下的冲量耦合系数不能用于求解大光斑辐照下的冲量，应当采用大光辐照下的冲量耦合系数。

(2) 平面状碎片和球体状碎片在激光大光斑辐照下的冲量随入射激光能量的变化趋势相同，随着入射激光能量增加,靶材表面气化和离化强度增强，冲量逐渐增大，但是相同入射激光能量下平面状碎片对应的冲量比球体状碎片大。

(3) 基于“面积矩阵法”在求解激光大光斑辐照空间碎片冲量时，分别采用了平面状碎片在大光斑在小光斑辐照下的冲量耦合系数，对比发现采用平面状碎片在大光斑辐照下冲量耦合系数的理论计算结果更接近于实验结果,有效地减小了误差。

参考文献：

[1] Finkleman David. The dilemma of space debris[J]. American Scientist, 2014, 102(1): 26-33.

[2] Kaplan M H. Survey of Space Debris Reduction Methods[R]. AIAA-2009-6619, 2009.

[3] Wang Chenglin, Zhang Yan, Wang Kunpeng. Strategy of removing space debris using ground-based lasers[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(11): 2137-2143. (in Chinese)
王成林, 张艳, 王鲲鹏. 地基激光清除空间碎片的策略[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(11): 2137-2143.

[4] Phipps C R, Albrecht G, Friedman H, et al. ORION: Clearing near-earth space debris using a 20 kw, 530 nm, earth-based, repetitively pulsed laser [J]. Laser & Particle Beams, 1996, 14(1): 1-44.

[5] Esmiller B, Jacquelard C, Eckel H A, et al. Space debris removal by ground based laser main conclusions of the european project cleaspace[J]. Applied Optics, 2014, 53(31): 45-54.

[6] Early J T, Bibeau C, Phipps C. Space debris de-orbiting by vaporization impulse using short pulse laser[C]//High-Power Laser Ablation. American Institute of Physics, 2004: 190-204.

[7] Chang Hao, Jin Xing, Zhou Weijing. Experiment 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.

[8] Wang C, Zhang Y, Wang K. The shape effect of space debris on recoil impulse by pulsed laser ablation [C]// Proceedings of the SPIE, 2016, 152(10): 101-130.

[9] Jin Xing, Chang Hao, Hong Yanji, et al. Impulse calculation for irregularly shaped space debris under laser irradiation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(8): 1956-1960. (in Chinese)
金星, 常浩, 洪延姬, 等. 激光辐照不规则空间碎片反冲冲量计算[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(8): 1956-1960.

[10] 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.