

# 脉冲激光辐照小尺度空间碎片的影响规律

杨丽薇,赵尚弘,方英武

(空军工程大学信息与导航学院,陕西 西安 710077)

**摘要:**通过建立了激光辐照小尺度空间碎片的物理模型。仿真分析了小尺度碎片的速度增量与激光功率密度的关系,讨论了不同功率密度下激光的有效作用时间以及不同脉宽下激光冲击波的传播波形和到达位置;在此基础上,模拟分析了冲量耦合系数随不同激光脉宽和功率密度的变化规律。结果表明:速度增量随激光功率密度的增加而增加,激光冲击波波形随脉宽增加有明显展宽,且在激光功率密度、脉宽一定条件下短波长可获得更大的冲量耦合系数。

**关键词:**脉冲激光;辐照;小尺度空间碎片;物理模型

**中图分类号:**TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.03.002

## Influence rules of small scale space debris irradiated by pulse laser

YANG Li-wei, ZHAO Shang-hong, FANG Ying-wu

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** A physical model of small scale space debris irradiated by laser was established. The relation between the speed increment of small scale debris and the laser power density was investigated by numerical simulation, and the laser effective acting time was obtained under different power densities. Further, the waveforms and arriving position of shock wave propagation with different laser pulse widths were analyzed. Finally, the change rules of impulse coupling coefficient with different laser pulse widths and power densities were analyzed. The results indicate that the velocity increments increase with the increase of power density, and the shock wave has obvious broadening effect. Especially, the short wavelength can obtain the larger impulse coupling coefficient when the power density and pulse width are definite.

**Key words:** pulse laser; irradiation; small scale space debris; physical model

### 1 引言

地球轨道上一切无功能的人造物体统称为空间碎片,其中铝/铝合金碎片材料的质量分数占到44%以上<sup>[1]</sup>。空间碎片按照尺寸大小,一般可分为

小于1 cm、1~10 cm和大于10 cm三个量级。其中尺寸小于1 cm的空间碎片,航天器一般采用加装防护结构的方式进行被动防护;尺寸大于10 cm的空间碎片可对其进行跟踪编目和监测预警,航天器一

基金项目:陕西省科技计划项目(No. 2013K07-17);国家自然科学基金项目(No. 61205002)资助。

作者简介:杨丽薇(1988-),女,讲师,博士,研究方向为空间激光信息研究。E-mail: yangliwei@163.com

收稿日期:2015-06-09;修订日期:2015-07-01

般采用主动规避的方式进行防护;尺寸在 1 ~ 10 cm 量级的空间碎片,目前既难以跟踪编目和监测预警,又缺乏合理的防护措施,被国际社会公认为是对航天器威胁最大的碎片<sup>[2-3]</sup>。根据 NASA 的分析研究,尺寸在 1 ~ 10 cm 之间的空间碎片数量目前大约为 67 万个左右<sup>[2]</sup>。空间碎片绝大多数分布在距地面 2000 cm 的人类使用最频繁的近地轨道(LEO),少部分在距地 35786 cm 的地球同步轨道(GEO),空间碎片数量的不断增长使得 LEO 空间环境日益恶化<sup>[4]</sup>。为了最大限度地保障近地空间环境安全,主动移除 LEO 区域小尺度空间碎片势在必行<sup>[5]</sup>。

高能脉冲激光移除空间碎片技术因其可同时进行探测和跟瞄,具有无污染、高效率、低成本等优点,因而被认为是最有前景的新方法<sup>[6-7]</sup>。美、德、俄、日等国开展激光移除空间碎片研究起步较早,其中以美国的 Orion 计划最为著名,部分关键技术已开展在轨演示验证,但技术细节尚不清楚<sup>[8]</sup>。国内由于受高能激光关键设备和技术的封锁限制<sup>[9]</sup>,还没有重要的研究成果,仍处于概念、模型与机理研究阶段。因此,本文以 LEO 区域空间碎片中常见的尺寸为 10 厘米量级的铝合金材料为研究对象,通过仿真分析不同的强脉冲激光参数辐照小尺度空间碎片的影响规律,为高能脉冲激光移除 LEO 区域小尺度空间碎片技术的应用提供必要的理论基础。

## 2 理论分析

分析国内外学者提出的移除 LEO 小尺度空间碎片计划,主要是采用高能脉冲激光辐照产生等离子体形成的冲量耦合效应驱动碎片变轨来实现。即对于 LEO 碎片,可降低其轨道,当轨道高度小于 200 km 后,进入大气层烧毁达到清除目的;对于 GEO 碎片,可抬高或降低其轨道,使其离开 (36000 ± 235) km 的带状环形保护区域达到离轨目的<sup>[10]</sup>。强脉冲激光辐照碎片会产生反冲冲量,碎片在反冲冲量作用下其速度发生变化,激光辐照碎片获得反冲冲量如图 1 所示。激光辐照碎片产生的反冲冲量越大,碎片的轨道速度减小得也越多,轨道速度越小对应的碎片绕地轨道短半轴长度越短,从而达到变轨目的。根据前期的相关研究<sup>[11]</sup>,激光辐照作用下存在烧蚀反冲现象,即不论激光入射方向如何,烧蚀反冲方向始终沿着烧

蚀平面的法向方向。

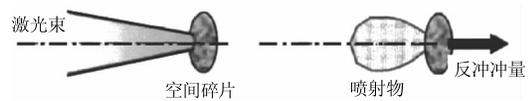


图 1 激光辐照碎片获得反冲冲量示意图

Fig. 1 The sketch map of obtaining recoil impulse by laser irradiating small scale space debris

蚀作用下的铝靶烧蚀反冲示意图如图 2 所示。对于质量为  $m$  的铝靶,靶上能量密度为  $\phi$ 。取其面积微元为  $S_a$ ,激光辐照方向矢量为  $e$ ,烧蚀反喷方向矢量为  $k$ ,微元反喷冲量矢量为  $j_a$ 。

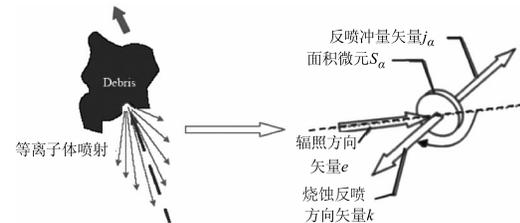


图 2 铝靶烧蚀反冲示意图

Fig. 2 The sketch map of ablating Al materials

单位入射激光能量所获得的靶的冲量称为激光与靶的冲量耦合系数,它是直接联系激光能量与靶冲量的一个参量,也是计算激光移除空间碎片效果的重要参数指标。冲量耦合系数  $C_m$  的常用表达式为<sup>[12]</sup>:

$$C_m = \frac{m\Delta v}{E} = \frac{P}{I} \quad (1)$$

式中,  $\Delta v$  为速度增量;  $E$  为单脉冲激光能量;  $I$  为入射激光功率密度;  $P$  为靶材表面的烧蚀压力;  $m\Delta v$  表示脉冲激光辐照作用下靶获得的冲量。

根据动量关系,激光辐照作用下铝靶所产生的冲量可表示为:

$$m\Delta v = -C_m \phi \sum_a S_a |e \cdot j_a| j_a \quad (2)$$

强脉冲激光照射靶材引起蒸气或等离子体的流体力学运动及其在凝聚态靶中的力学响应,形成了激光对靶的力学效应。蒸气或等离子体的运动将占据明显的能量比例,其动力学机制对激光与靶的耦合起到决定性的作用。特别地对于金属材料,文献[13]给出的靶面压力公式与实验结果符合较好。即对于靶面压力与激光功率密度和激光脉宽之间的数学关系,可表示为下面的形式:

$$P = (\alpha\tau)^{-0.125} I^{0.75} \quad (3)$$

式中,  $a$  为与入射激光波长和靶材原子有关的参数。

强脉冲激光与材料相互作用将在靶表面形成压力脉冲,该脉冲在靶体内部的传播就是冲击波。根据理想流体弹塑性模型,其一维平面流动的 Lagrangian 方程组可表示为<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} u = \frac{\partial U}{\partial t}; v = \frac{1}{\rho} \frac{\partial U}{\partial w} \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\sigma + q)}{\partial w} = 0; \frac{\partial E}{\partial t} + (\sigma + q) \frac{\partial v}{\partial t} = 0; \sigma = P + S \\ \frac{\partial S_d}{\partial t} = 2G(\frac{1}{3v} \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial t}); |S_d| < \frac{2}{3}Q \\ S_d = \pm \frac{2}{3}Q; |S_d| \geq \frac{2}{3}Q \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $U$  为欧拉坐标;  $w$  为拉氏坐标;  $v$  为比体积;  $\rho$  为常态密度;  $u$  为质点速度;  $\sigma$  为应力;  $q$  为人为黏性;  $E$  为比内能;  $S_d$  为偏应力;  $G$  为剪切模量;  $Q$  为屈服强度。

根据上述方程,编写相应的动态响应分析程序可对不同激光参数及相应的冲击波特性进行数值模拟分析。

### 3 结果分析

铝合金材料是 LEO 区域空间碎片的主要成分之一。本文以轨道高度 1000 km 的铝合金靶材为例分析速度增量与不同激光功率密度之间的关系。假定铝靶碎片质量为 80 g, 碎片尺寸大小为 10 cm × 10 cm, 碎片厚度为 1 mm, 激光波长为 532 nm, 激光功率密度范围为  $10^6 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$ , 激光脉宽为 1 ns ~ 1 ms。通过仿真得到激光辐照碎片时不同功率密度条件下速度增量与作用时间关系如图 3 所示。

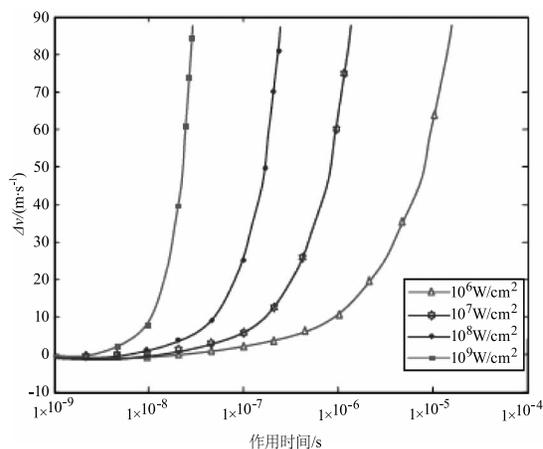


图 3 不同功率密度下速度增量与作用时间关系曲线  
Fig. 3 The curve of velocity increment and action time for different power densities

由图 3 可以看出,速度增量随激光功率密度的增加而增加。根据强脉冲激光移除空间碎片的机理,理论上到靶激光功率密度的工作范围在  $10^6 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$  之间,所以可选择多种到靶激光功率密度。假定当速度增量为 20 m/s 时,通过数值仿真可得到不同激光功率密度下所需的激光有效作用时间,计算结果如表 1 所示。

表 1 不同激光功率密度下的激光参数 ( $\Delta v = 20 \text{ m/s}$ )

Tab. 1 Basic laser parameters during effective work time

到靶功率密度 / ( $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	传输功率 / W	脉宽 / $\mu\text{s}$	作用时间 / $\mu\text{s}$
$10^6$	$2 \times 10^{10}$	$10^0$	3.0
$10^7$	$2 \times 10^{11}$	$10^{-1}$	0.5
$10^8$	$2 \times 10^{12}$	$10^{-2}$	0.08
$10^9$	$2 \times 10^{13}$	$10^{-3}$	0.01

下面仿真两种激光冲击波,以此分析不同激光脉宽条件下冲击波传播和激光冲量耦合系数之间的关系。取激光波长为 1.06  $\mu\text{m}$ , 辐照脉宽为  $10^{-8} \text{ s}$ , 功率密度为  $10^8 \text{ W/cm}^2$ , 铝靶表面的峰值压力为 4.85 GPa。在这种情况下,得到不同时刻冲击波的波形和到达位置如图 4(a) 所示。将激光脉宽调整到  $10^{-7} \text{ s}$ , 铝靶表面的峰值压力达到 3.66 GPa, 最终得到冲击波波形和到达位置如图 4(b) 所示。根据图 4(a) 可以看出冲击波迅速衰减,约 0.5  $\mu\text{s}$  时基本上衰减为弹性波,峰值压力大约为 0.48 GPa。由图 4(b) 可知,激光冲击波波形有明显展宽,且冲击波的衰减速度减慢,此时表面峰值压力下降了 1.19 GPa。由此可以看出不同脉宽条件对激光冲击波传播特性有较大影响,其影响因素主要与冲量耦合效应特性有关。

下面通过仿真计算进一步分析不同脉宽对冲量耦合系数的影响关系,并与相应的实验结果进行对比。假定激光波长为 248 nm, 当脉宽分别为 23 ns 和 40 ns 时,冲量耦合系数随激光功率密度的变化曲线如图 5 所示。由图 5 可以看出,当波长一定条件下,冲量耦合系数随激光功率密度的增加而减小;尤其是冲量耦合系数随着脉宽的变小而明显地增加,这是因为等离子体产生及对后续激光产生屏蔽的影响所致。且在激光功率密度和脉宽一定条件

下,短波长获得的冲量耦合系数更大,这说明短波长激光更利于激光与材料的冲量耦合。

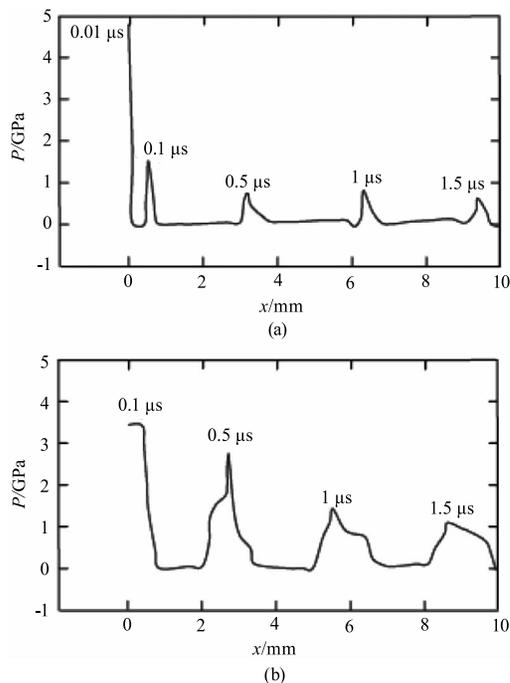


图4 不同激光脉宽下冲击波传播特性曲线  
Fig.4 The waveforms and arriving position of shock wave with different laser pulse width

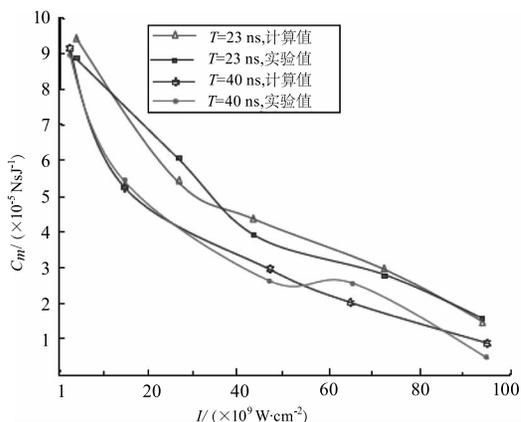


图5 冲量耦合系数随激光功率密度的变化关系曲线  
Fig.5 The distribution curve of impulse coupling coefficient with power density

#### 4 结论

小尺度空间碎片对人类航天活动的影响越来越大,利用强脉冲激光移除小尺度空间碎片是一种可行手段。本文通过理论分析和仿真计算研究了强脉冲激光辐照轨道高度约为 1000 km 小尺度空间碎片的影响规律,主要结论如下:当到靶激光功率密度的工作范围在  $10^6 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$  之间时可选择多种到靶激光功率密度,存在最优冲量耦合

系数;不同脉宽条件对激光冲击波传播特性有较大影响,主要与冲量耦合特性有关;本文计算条件下,短波长激光更利于激光与靶材的冲量耦合相互作用。

#### 参考文献:

- [1] Liou J C, Johnson N L, Hill N M. Controlling the growth of future LEO debris populations with active debris removal[J]. Acta Astronautica, 2010, 66(5): 648-653.
- [2] Bauer W, Romberg O, Pissarskoi A, et al. In orbit debris-detection based on solar panels [J]. CEAS Space J., 2013, (5): 49-56.
- [3] ZHAO Shanghong, FANG Yingwu, ZHAO Haiyan, et al. Detecting and removing problem of small scale space debris[J]. Journal of Air Force Engineering University: Military Science Edition, 2014, 14(2): 1-4. (in Chinese)  
赵尚弘, 方英武, 赵海燕, 等. 小尺度空间碎片的探测与清除问题[J]. 空军工程大学学报: 军事科学版, 2014, 14(2): 1-4.
- [4] Liou J C, Johnson N L. Risks in space from orbiting debris[J]. Science, 2006, 311: 340-341.
- [5] GONG Zizheng, XU Kunbo, MU Yongqiang, et al. The space debris environment and the active debris removal techniques [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(2): 129-135. (in Chinese)  
龚自正, 徐坤博, 牟永强, 等. 空间碎片环境现状与主动移除技术[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(2): 129-135.
- [6] Phipps C R, Luke J R, Lippert T, et al. Micro propulsion using laser ablation [J]. Applied Physics A, 2004, 79: 1385-1389.
- [7] WU Siqing, LIU Jin song, WANG Shenglie, et al. Recent research progress of terahertz waves remote detection [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(12): 1325-1328. (in Chinese)  
吴四清, 刘劲松, 汪盛烈, 等. 太赫兹波远程探测的最新研究进展 [J]. 激光与红外, 2013, 43(12): 1325-1328.
- [8] Campbell J W. Project Orion: orbital debris removal using ground-based sensors and lasers [R]. NASA Technical Memorandum, 1996, 108522: 1-352.
- [9] KANG Wenyun, SONG Xiaoquan, HOU Junyan, et al. Study on measuring and evaluating method of laser pointing error for space target [J]. Laser & Infrared, 2013, 43

- (12);1381 – 1383. (in Chinese)  
康文运,宋小全,侯军燕,等. 空间目标激光瞄准偏差的测量评估方法研究[J]. 激光与红外,2013,43(12): 1381 – 1383.
- [10] Autrique D, Clair G, L'Hermitte D, et al. The role of mass removal mechanisms in the onset of ns-laser induced plasma formation [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114 (2): 023301.
- [11] XU Haodong, LI Xiaojiang, ZHANG Donglai, Deorbit and capture model of ground-based laser irradiating space debris [J]. *Modern Defence Technology*, 2012, 40(3): 18 – 23. (in Chinese)  
徐浩东, 李小将, 张东来. 地基激光辐照空间碎片降轨模型研究[J]. *现代防御技术*, 2012, 40(3): 18 – 23.
- [12] JIN Xing, HONG Yanji, CHANG Hao. Simulation analysis of removal of elliptic orbit space debris using ground-based laser [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(9): 2064 – 2073. (in Chinese)  
金星, 洪延姬, 常浩. 地基激光清除椭圆轨道空间碎片特性的计算分析 [J]. *航空学报*, 2013, 34(9): 2064 – 2073.
- [13] Steverding B, Dudel H P. Laser-induced shocks and their capability to produce fracture [J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, 47(5): 1940 – 1945.
- [14] Amarchintal H K, Grandhi R V, Langer K, et al. Material model validation for laser shock peening process simulation [J]. *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2009, 17: 1 – 15.