天基激光清除小尺度空间碎片变轨模型研究

温 泉,杨丽薇,赵尚弘,方英武,王 轶,丁西峰,林 涛

(空军工程大学 信息与导航学院,陕西 西安 710077)

摘 要: 通过选取 LEO 区域中两种典型材料的小尺度空间碎片，分别建立了相应的强激光与靶材的冲量耦合模型,研究了高能脉冲激光与靶材作用下碎片速度的变化规律。在此基础上建立了激光辐照作用下小尺度空间碎片的变轨模型。通过仿真分析,对假定功率激光器作用下两种典型材料空间碎片轨道参数的变化规律进行了数值模拟，并讨论分析了碎片自旋角速率及不同功率的激光器对碎片清理效能的影响规律。研究结果表明,在假定功率的天基平台激光器作用下能在一个飞行周期内辐照两种典型材料碎片达到降轨清除效果,为天基平台激光清除空间碎片技术的应用提供了必要的理论基础。

关键词: 空间碎片； 天基激光； 降轨； 冲量耦合

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0329004

Research on de-orbiting model of small scale space debris removal using space-based laser

Wen Quan, Yang Liwei, Zhao Shanghong, Fang Yingwu, Wang Yi, Ding Xifeng, Lin Tao

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

Abstract: Two typical materials of small scale space debris in LEO were selected. On this basis, corresponding laser ablation impulse coupling models were established respectively. The velocity variation of the space debris irradiated by high-power pulsed laser was analyzed, and the orbit transfer of the small scale space debris irradiated by laser was modeled and investigated. The variations of the orbital parameters of the space debris orbit under the irradiation of laser with assumed power were simulated and analyzed, and the influence rules of the spinning angular velocity and laser with different power on debris removal efficiency were analyzed and discussed. The simulation results show that the space-based laser of assumed power can complete the mission of removing two typical materials of debris successfully by irradiating in one cycle of flight, which provides necessary theoretical basis for the application of space debris removal by using space-based laser.

Key words: space debris; space-based laser; de-orbiting; impulse coupling

收稿日期: 2016-07-10； **修订日期:** 2016-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(61571461);陕西省自然科学基金(2016JM6051);陕西省科技计划项目(2013K07-17)

作者简介: 温泉(1992-),男,硕士生,主要从事空间激光信息技术方面的研究。Email: wenquan2411@163.com

导师简介: 赵尚弘(1964-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事空间激光信息技术方面的研究。Email: zhaoshangh@aliyun.com

0 引 言

自 1957 年人类进入空间时代以来,频繁的航天活动产生了数量庞大的空间碎片,已经严重污染了空间环境,威胁着航天活动的安全[1]。空间碎片主要是指人类在太空活动中遗留在空间中的废弃航天器残骸以及它们因碰撞或爆炸而产生的碎片[2]。空间碎片主要分布在 400~2 000 km 的近地轨道(LEO)上,其中尺寸量级在 1~10 cm 的小尺度空间碎片因无法被监测跟踪,并且能对 LEO 轨道空间目标产生致命的危害,是 LEO 区域最危险的空间碎片。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迫在眉睫[1]。国内外提出的空间碎片主动移除方案主要有绳系拖拽法、捕获法和激光辐照法三类[3-5]。激光辐照主动移除空间碎片技术因可同时进行探测和跟瞄,操作简单,响应时间短,可重复使用,且成本较低,是目前国内外移除小尺度空间碎片最有前景的方法,也是当前的研究重点[6-8]。

近年来,国际上广泛开展了激光清除空间碎片的研究计划,如美国的 ORION[9]、欧盟的 CLEANSPACE[10]等,国内也相继开展了激光辐照小尺度空间碎片的相关研究[11-13]。参考文献[14]讨论分析了地基激光辐照技术清除近地轨道空间碎片的基本原理及可行性。参考文献[15]提出了地基高能脉冲激光平台清除空间碎片的方法。参考文献[16]提出了地基单脉冲和多脉冲激光清除椭圆轨道空间碎片变轨的两种计算模型方法,并对激光站布站区域和空间碎片变轨范围作了一定分析,为清除椭圆轨道空间碎片提供了计算方法。参考文献[17]研究了近地轨道小尺度空间碎片移除过程中轨道偏心率与近地点高度随激光脉冲数目变化的影响规律。目前的研究主要倾向于地基激光清除空间碎片技术方面,并且已经取得了一定的进展。但是地基激光清除技术由于大气层对激光的吸收损耗较大,且受地理位置和距离的影响,使得地基激光可有效工作的范围十分有限。随着激光器技术的不断发展,天基激光清除技术因其不受大气传输效应影响,捕获跟踪灵活方便等优点成为清除空间碎片的一种新的解决途径,但目前对于天基激光清除空间碎片技术的研究涉及较少。因此有必要就天基激光清除空间碎片的基本原理及可行性进行研究。

文中选取 LEO 区域中典型材料的小尺度空间碎片为例,通过对假定的天基平台激光器辐照典型材料碎片清除过程中碎片轨道参数的变化规律进行全过程数值模拟,讨论分析了碎片轨道参数的变化规律及自旋角速率对碎片清理效能的影响规律,并分析了不同功率密度激光器对碎片降轨效果的影响。

1 理论分析

1.1 激光清除过程

天基激光站部署在外层空间,假定激光站在轨道半径 r_L 的圆形轨道上运行,如图 1 所示。每个脉冲激光作用前,激光站通过机动确保其始终保持在最佳的作用角度辐照碎片。假设天基激光站的最大作用距离为 200 km,当空间碎片与激光站的相对距离小于 200 km(即碎片运行至 A 点)时,激光站开始辐照碎片。在强激光辐照作用下,碎片产生反冲冲量,获得速度增量,减速变轨[18]。当相对距离大于 200 km(即碎片运行至 B 点)时,天基激光不再作用[19]。当空间碎片再次进入天基激光站作用范围时,激光继续辐照碎片,直至碎片最终坠入大气层烧毁,则认为达到清除目的。

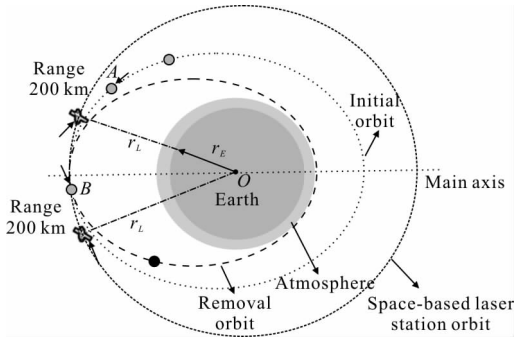

图 1 天基激光清除在轨空间碎片原理示意图

Fig.1 Schematic of orbiting space debris removal by using space-based laser

1.2 激光与靶材冲量耦合模型

空间碎片呈现多种形状,文中选取 LEO 区域中常见的平板为例进行理论分析。平板是体现激光辐照作用下烧蚀反冲现象最简单的例子,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曲面法线。

现就激光与靶材冲量耦合模型作如下假设:(1)

假定高能脉冲激光从左边辐照靶材，以靶材的质点为原点，以激光的辐照方向为 x 轴，过原点垂直于 x 轴为 y 轴，建立一个平面直角坐标系，θ 为靶材与 x 轴的夹角，如图 2 所示；(2)假定激光对靶材的烧蚀只作用在 $x-y$ 平面内，不考虑 z 轴的影响，忽略铝板的边缘；(3)假定靶材平面足够平坦且较薄；(4)假定靶材绕其质点沿逆时针方向自旋。

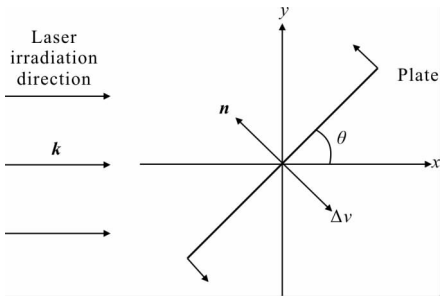

图 2 薄板映射在 $x-y$ 平面的示意图

Fig.2 Schematic of a thin plate projected onto the xy-plane

下面具体分析考虑激光与靶材的冲量耦合模型，设其自旋角速率为常数 $\omega(\omega=\omega\cdot\boldsymbol{n})$且不受激光烧蚀作用的影响，则靶材平面的法向量为：

$$\boldsymbol{n}=\begin{pmatrix}-\sin(\omega t+\theta)\\ \cos(\omega t+\theta)\end{pmatrix} \tag{1}$$

在高能脉冲激光辐照作用下空间碎片获得的冲量为[20]：

$$m\Delta v=C_m E \tag{2}$$

式中：Δv 表示靶材的速度增量；E 表示单脉冲激光能量；m 表示空间碎片的质量。

将公式(2)改写为动力学等式，其表达式为[21]：

$$m\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=-C_m\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{n}=C_m Ik\cdot\boldsymbol{H} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{n}$ 表示空间碎片的曲面法向量；k 表示高能脉冲激光的辐照方向；I 表示入射激光功率密度；$\boldsymbol{H}$ 表示碎片的二阶面积矩阵。

由于假定的靶材模型不考虑 z 轴的影响，所以空间碎片的法向量忽略了 z 轴分量。在激光与靶材烧蚀作用下，空间碎片在 x 轴和 y 轴获得的速度增量分别为：

$$\begin{cases}\Delta v_x=\dfrac{C_m IS}{2m\omega}[\omega t-\sin\omega t\cos(\omega t+2\theta)]\\ \Delta v_y=-\dfrac{C_m IS}{2m\omega}\sin\omega t\sin(\omega t+2\theta)\end{cases} \tag{4}$$

1.3 小尺度空间碎片轨道动力学变轨模型

当空间碎片运行至天基激光站的作用范围内，高能脉冲激光开始辐照碎片，此时碎片的真近角为 f_0。运用相应的轨道动力学方程，可以得到此时碎片的轨道半径，表示为：

$$r_0=\frac{r_{p0}(1+e_0)}{1+e_0\cos f_0} \tag{5}$$

式中：r_{p0} 为此时碎片的近地点半径；e_0 为碎片的偏心率。

碎片轴向和径向速度分量及当地轨道倾角可分别表示为：

$$\begin{cases}\Delta v_{\theta 0}=\sqrt{MG/q_0}\,[1+e_0\cos f_0]\\ \Delta v_{r0}=\sqrt{MG/q_0}\,[e_0\cos f_0]\\ \beta_0=\arctan(v_{r0}/v_{\theta 0})\end{cases} \tag{6}$$

式中：M 表示地球质量；G 为万有引力常数；q_0 为半通径。

碎片总的速度为：

$$v_0^2=v_{r0}^2+v_{\theta 0}^2=MG\left(\frac{2}{r_0}+\frac{1}{a_0}\right) \tag{7}$$

式中：a_0 为半长轴。

碎片轨道参数的几何变量关系示意图如图 3 所示，其中 D 表示空间碎片的位置，S 表示天基激光站的位置，δ 表示高能脉冲激光辐照空间碎片的辐照方向与碎片运动轨道平面内的轨道半径的夹角，r_L 表示天基激光站运动轨道平面内的轨道半径，r_E 表示地球半径，φ 表示天基激光站轨道半径和碎片轨道半径的夹角，z 表示天基激光站和空间碎片的距离，可表示为：

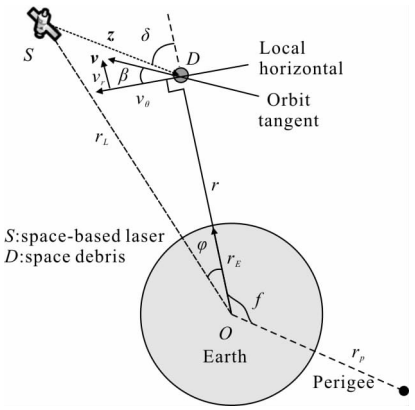

图 3 激光与靶相互作用的几何示意图

Fig.3 Geometry of the laser-target interaction

$$z=\sqrt{r^2+r_L^2-2r^2\sin^2\delta-\sqrt{r^2\sin^2\delta-r^2)(r^2\sin^2\delta-r_L^2)}} \quad (8)$$

高能脉冲激光辐照空间碎片产生反冲冲量，在反冲冲量作用下，碎片获得一个速度增量，改变其原有运行轨道，碎片的轨道参数也随之发生改变。空间碎片的轴向和径向速度增量分别为：

$$\begin{cases}\Delta v_\theta=-\Delta v_x\sin\xi-\Delta v_y\cos\xi\\ \Delta v_r=-\Delta v_x\cos\xi+\Delta v_y\sin\xi\end{cases} \quad (9)$$

式中：$\xi=\beta-\delta$。

变轨后，偏心率和半长轴的增量分别可以表示为：

$$\begin{cases}\Delta e=[2(e_0+\cos f_0)\Delta v_\theta-r_0+\sin f_0\cdot\Delta v_r/a_0]/v_0\\ \Delta a=2a_0^2v_0\Delta v_\theta/GM\end{cases} \quad (10)$$

空间碎片的轨道近地点、远地点半径增量分别为：

$$\begin{cases}\Delta r_p=(1-e_0)\Delta a-a_0\Delta e\\ \Delta r_a=(1+e_0)\Delta a+a_0\Delta e\end{cases} \quad (11)$$

单个脉冲激光辐照碎片后，其近地点半径 r_{p1} 变为 $r_{p0}+\Delta r_p$，此时的真近角可表示为：

$$f_1=\arccos\left(\frac{q_1/r_1-1}{e_1}\right) \quad (12)$$

主轴位置的改变量为 f_1-f_0。运用描述碎片时间与位置关系的开普勒方程，可以得到脉冲间隔时间后的碎片的真近角 f_2。当下一个脉冲激光辐照碎片时，令 $f_2=f_0$，再重复下一个脉冲激光辐照作用效果的分析，直至空间碎片坠入大气层，达到烧毁清除的目的。

2 仿真分析

空间碎片绝大部分分布在 LEO 区域，并且在 800~1 200 km 的轨道高度达到峰值[22]。因此，文中选取 LEO 区域空间碎片的两种典型材料：铝合金和碳酚材料，建立相应的激光与靶的冲量耦合模型，在此基础上，以近地点、远地点高度分别为 800 km、1 373 km 的典型轨道为例，分别建立了相应天基激光清除小尺度空间碎片的动力学变轨模型。参考文献[23]分别给出了关于假定激光器和两种典型材料小尺度空间碎片的相关参数，如表 1、表 2 所示。假定碎片在单脉冲高能激光烧蚀作用下的速度增量是瞬时获得的，仅考虑脉冲间隔内碎片的轨道变化，靶材与 x 轴夹角 θ 的初始角度为 30°，天基激光站运行的轨道高度为 1373 km，激光束的辐照方向与碎片运动轨道平面内的轨道半径的夹角 δ 为 90°。

表 1 激光器参数

Tab.1 Laser parameters

Parameters	Value
Maximum operating range/km	200
Laser wavelength/μm	1.06
Pulse width/ns	100
Beam quality factor	2.0
Efficiency factor/%	30
Laser spot radius/cm	31
Laser pulse energy/kJ	1
Power density/W·cm^{-2}	10^9
Laser repetition rate/Hz	20

表 2 空间碎片物理参数

Tab.2 Space debris physical parameters

Space debris description	Plate
Areal mass density/kg·m^{-2}	10
Mass/kg	0.75
Angular velocity/rad·s^{-1}	2.5
Impulse coupling coefficient/μNs·J^{-1}	14(Aluminum) 20(Carbon)

通过对假定的天基平台高能脉冲激光辐照两种典型小尺度空间碎片的清除全过程建立数值模型，可以得到典型碎片相关轨道参数的变化情况。

空间碎片真近角随激光脉冲数目增加的变化情况如图 4 所示。通过相应的数值计算可以得到两种典型碎片均在碎片真近角 175°的位置与天基平台的相对距离小于 200 km，进入天基激光的作用范围内，开始被脉冲激光辐照。从图中可以看出脉冲激光分别在碳酚碎片运行至真近角 179.3°位置和铝合金碎片 179.9°位置时，停止辐照作用，两种典型材料的真近角均随激光脉冲数目的增加而增加。由于空间碎片在绕地球平动的同时，其本身也在不停地自旋。在考虑靶材自旋时，激光与靶材的相互作用会随时间不断变化，不同时刻将对应不同的冲量，靶材获得的速度增量也将随之变化。单个脉冲激光与碎片作用的时间是一个纳秒级的量，碎片本身的自旋角度

很小,可以将其看作是一个“冻结”的状态,不考虑碎片自旋。但在脉冲间隔内,碎片的自旋角度较大,其与激光的作用角度也发生变化,由于激光烧蚀反冲现象,碎片的真近角呈现周期性变化的特性。

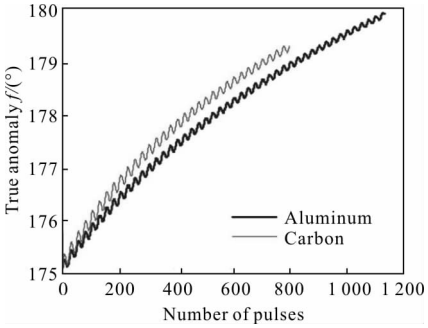

图 4 真近角 f 随激光脉冲数变化

Fig.4 f vs the pulse number of laser

近地点高度随脉冲数目增加的变化曲线如图 5 所示。由图 5 可以看出,随着脉冲数目的增加,铝合金和碳酚材料碎片近地点高度均呈现周期性变化,且都能降至 200 km 以下,达到烧毁清除的目的。铝合金材料碎片在 1 145 个脉冲激光作用后近地点高度降至 200 km,而碳酚碎片在 808 个脉冲就降至 199.4 km。可以看出,在相同激光器作用下,碳酚碎片的近地点高度相比铝合金碎片下降得更为明显。激光与碎片作用的冲量耦合系数是直接联系激光能量与靶冲量的一个参量,也是计算激光清除空间碎片效果的重要参数指标。从参考文献[23]可以得到,激光与碳酚材料作用的冲量耦合系数大于激光与铝合金材料作用的。因此由图 5 可以看出,激光与靶的冲量耦合系数越大,脉冲激光清除空间碎片所需的时间和能量就会相应地减小,清除效能也越高。

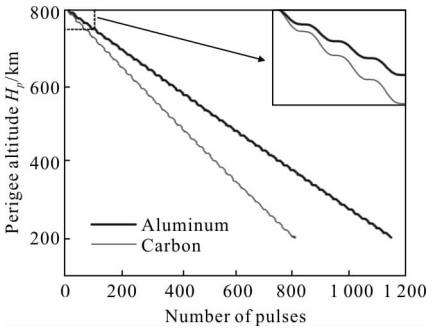

图 5 近地点高度 H_p 随激光脉冲数变化

Fig.5 H_p vs the pulse number of laser

如图 6 所示,碎片的远地点高度随激光脉冲数目的增加而减小,但是变化很小。在碎片运行至远地点附近,碎片远地点高度变化趋于平缓,且周期性变化的幅度也明显减小。碳酚材料碎片的远地点高度减小趋势大于铝合金材料碎片。

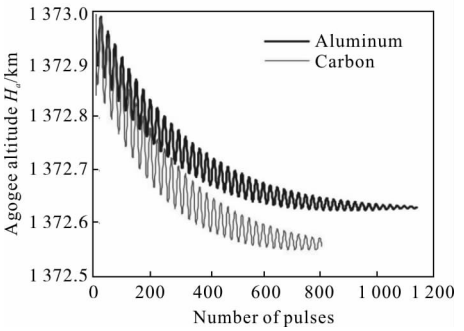

图 6 远地点高度 H_a 随激光脉冲数变化

Fig.6 H_a vs the pulse number of laser

两种典型材料碎片半长轴随激光脉冲数目的变化情况如图 7 所示,随着激光脉冲数目的增加,两种典型碎片的半长轴都逐渐减小,且碳酚碎片的减小趋势更为明显。如图 8 所示,两种典型碎片的偏心率随激光脉冲数目的增加而增加,且碳酚碎片的增加趋势大于铝合金碎片。

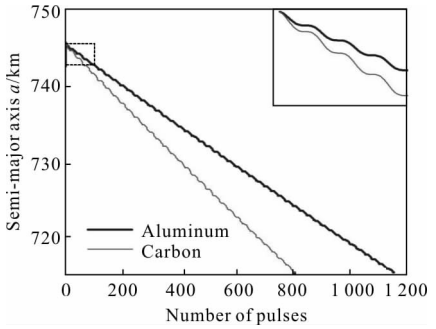

图 7 半长轴 a 随激光脉冲数变化

Fig.7 a vs the pulse number of laser

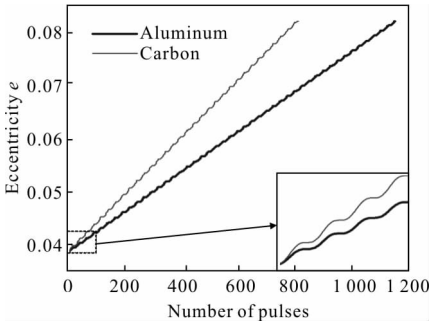

图 8 偏心率 e 随激光脉冲数变化

Fig.8 e vs the pulse number of laser

如图 9 所示,随激光脉冲数目的增加,两种典型

材料碎片的主轴转动角逐渐增大，脉冲激光停止辐照时，碳酚碎片主轴转角为 4.3°，铝合金碎片主轴转角为 4.9°。碎片的近地点、远地点高度、半长轴、偏心率及主轴转动角的变化都是由于碎片烧蚀反冲所获得的冲量而产生的。因此，上述参数都随激光脉冲数目的增加而呈现周期性变化的特性，并且碳酚材料碎片由于与激光作用的冲量耦合系数更大，上述参数的变化趋势均大于铝合金材料碎片。

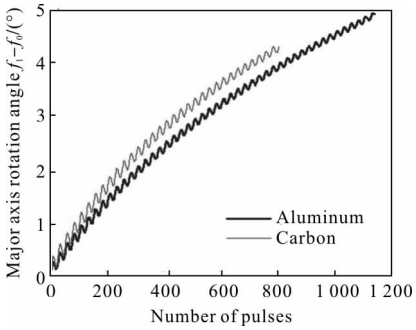

图 9 主轴转动角 f_1~f_0 随激光脉冲数变化

Fig.9 f_1-f_0 vs the pulse number of laser

激光与碎片的作用距离随激光脉冲数目的变化情况如图 10 所示。由图 10 可以看出，随脉冲数目的增大，碎片与天基平台的距离逐渐减小，脉冲激光停止辐照时，碳酚碎片与天基平台的距离为 152.1 km，铝合金碎片与天基平台的距离为 145.7 km。可以看出，两种典型材料碎片均能在假定的天基平台激光站的一个飞行周期内达到降轨清除的目的，说明假定的天基平台激光器可以有效清除特定轨道上的典型小尺度空间碎片。

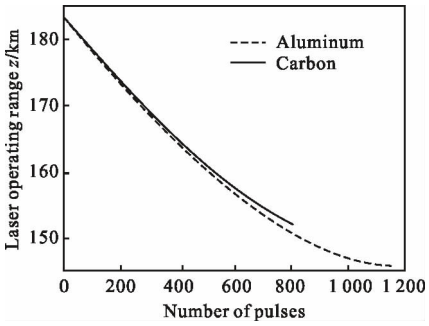

图 10 激光作用距离 z 随激光脉冲数变化

Fig.10 z vs the pulse number of laser

通过仿真不同自旋角速率下碳酚材料碎片的近地点高度随激光脉冲数的变化情况，研究分析空间碎片自旋特性对碎片降轨效果的影响规律。图 11 给出了碳酚材料碎片自旋角速率 w 依次为 0.5、1.5、2.5、3.5 rad/s 时，碎片近地点高度随激光脉冲数目的变化曲线。从仿真结果中可以得到，自旋角速率依次为 0.5、1.5、2.5、3.5 rad/s 的碳酚碎片分别在 793、806、808、802 个脉冲激光辐照后达到降轨清除的目的。碎片自旋角速率越小，碎片近地点高度的周期性变化的幅度更大，周期更长，但对碎片清除所需的能量和时间影响不明显。

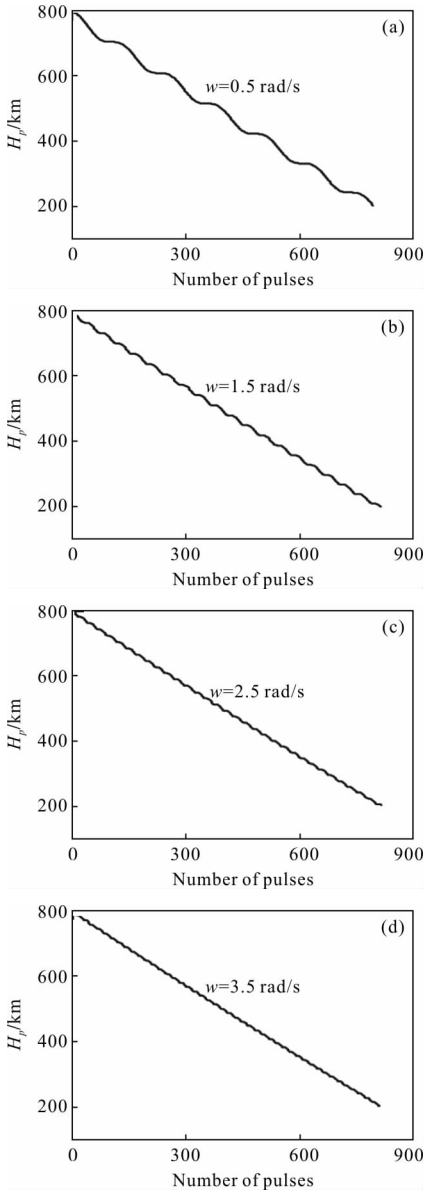

图 11 不同自旋角速率下碳酚材料碎片近地点高度随激光脉冲数变化

Fig.11 Perigee altitude of carbon debris with different spinning angular velocities vs the pulse number of laser

通过仿真不同激光功率密度下碳酚材料碎片的

近地点高度随激光脉冲数的变化情况，讨论分析不同功率密度激光器对碎片降轨效果的影响规律。由图 12 可以看出，随着脉冲数目的增加，在不同功率密度激光器的作用下，碳酚材料碎片近地点高度均呈现周期性变化。激光功率密度 10^9 W/cm^2 的激光器能使碳酚碎片在天基平台的一个飞行周期内降至 200 km 以下，达到烧毁清除的目的；激光功率密度 10^8 W/cm^2、10^7 W/cm^2 的激光器分别在 3 582、4 072 个脉冲激光辐照后，由于与碎片的相对距离大于 200 km，不再作用，当激光站在下一个飞行周期内与碎片的相对距离小于 200 km 时，脉冲激光再次辐照碎片，直至碎片达到烧毁清除的目的。

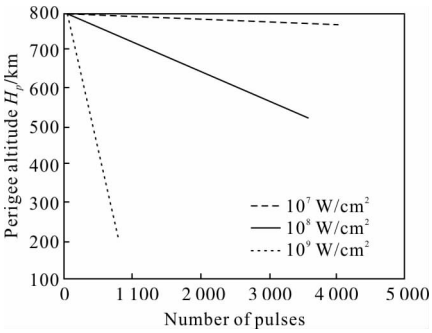

图 12 不同激光功率密度下碳酚材料碎片近地点高度随激光脉冲数变化

Fig.12 Perigee altitude of carbon debris with different power densities vs the pulse number of laser

3 结 论

文中针对 LEO 区域中常见的铝合金平板和碳酚平板，分别建立了天基平台激光清除小尺度空间碎片的动力学降轨模型，通过理论分析和仿真计算，对空间碎片轨道参数的变化情况进行了数值模拟，主要结论如下：随着激光与靶材作用的冲量耦合系数增大，空间碎片降轨清除所需的能量和时间会相应地减少。随着激光脉冲数目的增加，碎片轨道对应的近地点高度越来越小，并且呈现出周期性变化的特性。碎片本身的自旋角速率越小，其近地点高度周期性变化的幅度越大，周期越长，但对碎片的清除效能影响不明显。在假定的天基平台激光站的一个飞行周期内，通过辐照 808 和 1 145 个激光脉冲，可以分别达到对碳酚材料和铝合金材料碎片降轨清除的目的。

参考文献：

[1] 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.

[2] Li Chunlai, Ouyang Ziyuan, Du Heng. Space debris and space environment [J]. ***Quaternary Sciences***, 2002, 22 (6): 540-551. (in Chinese)
李春来，欧阳自远，都亨. 空间碎片与空间环境 [J]. 第四纪研究，2002, 22(6): 540-551.

[3] Bender M. Flexible and low-cost dragon spacecraft for orbital debris removal [C]//NASA/DARPA Orbital Debris Conference, 2009.

[4] Hoyt R. RUSTLER: architecture and technologies for low-cost remediation of the LEO large debris population [C]// NASA/DARPA Orbital Debris Conference, 2009.

[5] Kawamoto S, Ohkawa Y. Strategies and technologies for cost effective removal of large sized objects [C]//NASA/DARPA Orbital Debris Conference, 2009.

[6] Apollonov V V. High power lasers for space debris elimination[J]. ***Chinese Optics***, 2013, 6(2): 187-195.

[7] Steverding B, Dudel H P. Laser-induced shocks and their capability to produce fracture [J]. ***Journal of Applied Physics***, 1976, 47(5): 1940-1945.

[8] Schall W O. Laser radiation for cleaning space debris from lower earth orbits [J]. ***Journal of Spacecraft and Rockets***, 2002, 39(1): 81-91.

[9] Phipps C, Albrecht U, Friedman H, et al. Orion: clearing near-earth space debris using a 20-kW, 530-nm, earth-based, repetitively pulse laser[J]. ***Laser and Particle Beams***, 1996, 14(1): 1-44.

[10] Esmiller B, Jacquelardb C. Clean space small debris removal by laser illumination and complementary technologies [C] // Eckel S S H -A. Beamed Energy Propulsion. AIP Conference Proceedings. New York: American Institute of Physics, 2011, 1402: 347-353.

[11] Han Weihua, Gan Qingbo, He Yang, et al. Optimal direction and a process design of removing low earth orbit debris with space-based laser [J]. ***Acta Aeronautics et Astronautics Sinica***, 2015, 36(3): 749-756. (in Chinese)
韩威华，甘庆波，何洋，等. 天基激光清理低轨空间碎片的

最利角度分析与过程设计 [J]. 航空学报, 2015, 36(3): 749-756.

[12] 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.

[13] Lu Jianye, Wang Jun, Ma Yugang, et al. Theoretical simulations of the mechanical characteristics of laser induced plasma for monatomic target [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2004, 12(5): 550-554. (in Chinese)
鲁建业, 王军, 马玉刚, 等. 纯净靶激光等离子体力学特性的理论模拟[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(5): 550-554.

[14] Schall W O. Laser radiation for cleaning space debris from lower earth orbits [J]. ***Journal of Spacecraft and Rockets***, 2002, 39(1): 81-91.

[15] Claude R Phipps, Kevin L Baker, Stephen B Libby, et al. Removing orbital debris with lasers [J]. ***Advances in Space Research***, 2012, 49(2012): 1283-1300.

[16] Jin Xing, Hong Yanji, Chang Hao. Simulation analysis of removal of elliptic orbit space debris using ground-based laser [J]. ***Acta Aeronauticaet 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.

[17] Fang Yingwu, Zhao Shanghong, Yang Liwei, et al. Research on action rules of ground-based laser irradiating small scale space debris in LEO [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(2): 0229002. (in Chinese)
方英武, 赵尚弘, 杨丽薇, 等. 地基激光辐照近地轨道小尺度空间碎片作用规律研究 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45 (2): 0229002.

[18] Schmitz M. Performance model for space-based laser debris sweepers[J]. ***Acta Astronautica***, 2015, 115: 376-383.

[19] Avdeev A V, Bashkin A S, Katorgin B I, et al. About possibilities of clearing near-earth space from dangerous debris by a spaceborne laser system with an autonomous cw chemical HF laser[J]. ***Quant Electron***, 2011, 41(7): 669-744.

[20] Phipps C R, Birkan M, Bohn W, et al. Review: laser ablation propulsion [J]. ***Journal of Propulsion and Power***, 2010, 26(4): 609-637.

[21] 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: 895-915.

[22] Liou J C, Johnson N L. Risks in space from orbiting debris [J]. ***Science***, 2006, 311: 340-341.

[23] Claude R Phipps, Kevin L Baker, Stephen B Libby, et al. Removing orbital debris with lasers [J]. ***Advances in Space Research***, 2012, 49: 1283-1300.