

自由振荡激光天基清扫空间碎片机理研究

魏靖松, 程 勇, 朱孟真, 陈 霞, 刘 旭, 谭朝勇, 米朝伟

(中国人民解放军陆军工程大学 军械士官学校, 湖北 武汉 430075)

摘要: 在绕地轨道上残留着大量的空间碎片, 这些人类航天活动造成的太空污染已经严重威胁到太空飞行器的安全。其中, 直径在 1~10 cm 之间的碎片具有致命的潜在危害, 是急需解决的麻烦。激光清扫空间碎片也愈来愈引起科学领域的关注, 其中天基脉冲激光是清扫这类小型空间碎片的有效技术途径之一。由于现有方案中的天基超短脉冲、超大能量、紧凑可靠的激光器在工程上难以实现, 笔者创新提出了自由振荡脉冲激光天基清扫空间碎片的思想与方案。通过模拟分析发现自由振荡激光的脉冲持续时间是其产生大冲量的优势, 从机理和效应上与纳秒激光进行了对比, 证明了“热金属蒸气反喷”比“等离子反喷”的冲量增量与能量利用率更高。建立了激光消融金属的物理模型, 模拟分析得到了当激光功率密度大于 $5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时, 金属液滴的直径一般不大于 $60 \mu\text{m}$ 的结果, 说明了激光清扫空间碎片过程中相伴产生的“微碎片”不会有“次生危害效应”, 反而能在一定程度上加速碎片清扫。该文为自由振荡激光器在天基清扫碎片的领域应用奠定了基础。

关键词: 天基激光; 自由振荡激光; 空间碎片; 毫秒激光

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200198

Mechanism study of removing space debris with space-based free running laser

Wei Jingsong, Cheng Yong, Zhu Mengzhen, Chen Xia, Liu Xu, Tan Chaoyong, Mi Chaowei

(Ordnance Non-Commissioned Officer Academy, Army Engineering University of PLA, Wuhan 430075, China)

Abstract: There are a great amount of space debris discarded in the orbits around earth. This pollution in space caused by people's spaceflight has threatened the space assets seriously. Some of the debris with the diameter ranging from 1 to 10 cm, should be given priority treatment for processing, due to the latent but fatal threat they induced. Laser space debris removal is becoming an absorbing topic in the realm of science. Among the mechanisms presented, space-based pulsed laser is one of the effective method to eliminate these small debris. Due to the limitation of technics, the short-pulsewidth, great-energy, compact-structure and reliable lasers claimed in the plans reported were hard to be achieved. A creative debris-removing method using space-based free running pulsed laser was proposed. The long pulse duration of the laser advantaged the impulse generation was revealed in a numerical analysis. Comparing with nanosecond pulsewidth laser, both in theory and experiment, "hot metal vapor ejection" was proved to be better than "plasma ejection" at impulse increment and energy utilization. Analyzing with a laser-melting-metal model proposed, the diameter of metal drops ejected were calculated less than $60 \mu\text{m}$ in general, with the laser power density greater than $5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$. The result demonstrated that the "micro pieces" accompanying the ejection were unable to cause "secondary threat", but accelerated the debris removing in some degree. The study lays the foundation for the application of space-based free running laser in space debris removal.

收稿日期: 2020-05-27; 修订日期: 2021-02-24

作者简介: 魏靖松, 男, 讲师, 博士, 主要从事高能固体激光器及应用方面的研究工作。

Key words: space-based laser; free running laser; space debris; ms laser

0 引言

目前,围绕地球飞行的空间碎片对人类的危害日益严峻,引起了全球相关领域人士的广泛关注。截止现在,这些碎片的总重量已经达到 7000 t(1 t=10³ kg),总数超过一百万,并以每年 5% 的速度增长^[1]。由此导致的空间碰撞事件频繁发生。国际空间站上的散热器上留有大量碎片撞击的痕迹,美国航空航天局通过对替换下来的壳体进行研究建立了关于空间碎片的模型^[2]。为了避免灾难,降低空间碎片威胁,人们提出了各种概念、方案和手段。其中,通过激光脉冲使碎片脱离太空轨道,可能是大规模移除太空碎片的一个重要的方法和有效的手段。采用激光清扫空间碎片已经成为当今国际研究的热点。

国际上对激光清扫空间碎片已经进行了几十年的研究。其基本原理是通过激光辐照使碎片产生反冲冲量,减速变轨,直至碎片进入大气层烧毁。从各种激光清扫方案来看,主要分为地基和天基两种平台方案^[3-12]。由于地基方案所需要瞄准和照射的目标距离多半在 1000 km 以外,中间又有大气衰减和干扰,对探测系统和激光发射系统的要求很高,工程应用上很难实现。而天基激光与碎片处于相同的太空轨道,可以抵近和伴飞,对整个激光发射系统的压力大大减轻。越来越多的学者关注天基激光清扫碎片。其中, Wolfgang 等人在 2002 年详细论证了天基激光清扫方案^[6]; Phipps 等人提出了天基高轨清扫空间碎片策略^[7]; 龚自正带领的团队论证了天基激光清除空间碎片方案^[8]; 温泉等人研究了天基激光清除小尺度空间碎片变轨模型和过程^[9]; 特别值得一提的是,由多个国家合作提出的 EUSO+CAN 的天基清扫方案,是目前为数不多的将概念、关键技术转化为实验研究的方案^[11-12]。

但在几乎所有的方案中,不论清扫空间碎片的平台是地基还是天基,均采用 10⁹ W/cm² 量级的靶面功率密度实现“等离子反喷”,这要求激光器要有极短的脉冲持续时间,超高峰值功率,超大脉冲能量,可靠性高,光束质量好等一系列要求,同时又对体积和质量有限制。仅以单脉冲能量为例,为了能够在一定距离内实现清扫,激光的脉冲能量需要达到千焦量级^[13]。

这样的激光器一方面在工程上难以实现天基运行;另一方面,功率密度过高导致“等离子屏蔽效应”,降低冲量耦合效率和碎片的冲量增量变化量,浪费了激光能量。

在实验中发现,对金属产生冲量并不需要靶面激光功率密度达到 10⁹ W/cm² 的水平,只要超过 10⁵ W/cm² 以后,就能够产生金属蒸气喷发^[14],尤其是自由振荡的 ms 脉冲激光能够为靶面带来巨大的冲量,如图 1 所示。自由振荡激光器容易获得大脉冲能量激光,功率密度可以满足产生蒸气喷发而又低于等离子喷发的条件,具有清扫空间碎片的应用潜力^[15]。同时,自由振荡激光器由于其结构简单、转换效率高、可靠性好等结构优势,比其他类型激光器更能够适应严苛的太空环境,是天基清扫空间碎片的理想激光器。但是激光清扫碎片的方案中却极少提到这种激光。这是因为自由振荡激光在与空间碎片(多为金属材料)作用时,会附带产生微量的液态金属喷溅,有的学者认为这样带来二次碎片,不够安全^[16]。实际上,文中通过论证发现液态金属喷溅形成的金属液滴尺度不足以对航天器构成致命危害,而且喷溅还会增加激光清扫空间碎片的效率。

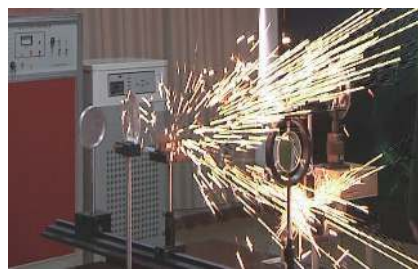


图 1 自由振荡激光辐照下的金属喷溅

Fig.1 Metal ejection under free running laser irradiation

文中从激光清扫机理入手,讨论自由振荡激光产生的冲量变化,提出了自由振荡激光加热消融金属的模型,分析了自由振荡激光所导致的液态金属喷溅尺寸,论证了自由振荡激光清扫空间碎片的安全性和有效性。

1 自由振荡脉冲激光清扫空间碎片机理

1.1 冲量与冲量耦合系数

激光清扫空间碎片是将激光作用在碎片上,使其

表面迅速发生相变和物质喷发,产生的反冲冲量改变碎片的动量,使碎片变轨,最终坠入大气层烧毁,从而达到清扫碎片的目的。

用冲量耦合系数 C_m 来衡量激光脉冲单位能量 E 所产生冲量 Δp 的能力,定义式为:

$$C_m = \frac{\Delta p}{E} \quad (1)$$

冲量耦合系数与激光功率密度、波长、脉冲宽度和材料特性密切相关,但无法用函数进行明确地表达。Phipps 在对前人报道的实验结果整理后,拟合出一条冲量耦合系数曲线,如图 2 所示。

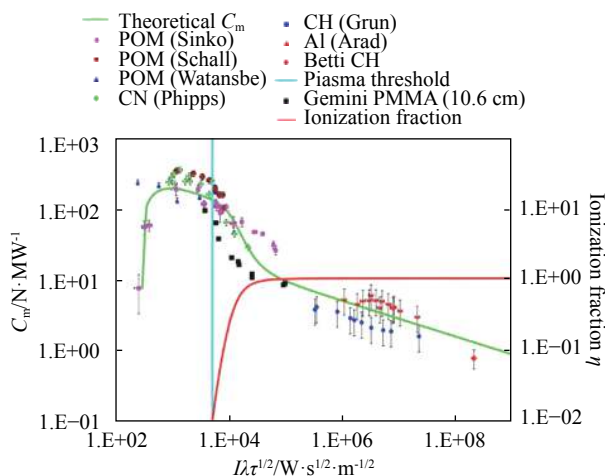


图 2 冲量耦合系数拟合曲线

Fig.2 Curve of impulse coupling coefficient

从曲线中可以发现:对于不同的材料,当三个激光参数——功率密度 I , 波长 λ 和脉宽 τ 的平方根的乘积满足一定条件时,可以得到相同的冲量耦合系数,表明不同功率密度、波长或脉宽的激光同样可以获得相同的冲量耦合,但这不代表产生的冲量也是相同的。

由冲量的定义可知,冲量等于力与作用时间的乘积。在自由振荡激光清扫空间碎片的过程中,冲量由金属蒸气的喷发带来,等于金属表面的压强 P , 光斑面积 πR^2 (R 为激光光斑半径) 和喷射持续时间 t 三者的乘积,

$$p = P \cdot \pi R^2 \cdot t \quad (2)$$

可以看出,压强 P 和喷射持续时间 t 都与冲量成线性正比关系。因此,衡量激光产生冲量的能力,除了激光带来的压强,压强的持续时间同等重要。

1.2 自由振荡脉冲激光冲量分析

自由振荡激光的脉冲持续时间与泵浦光的维持时间有关,一般情况下比大部分脉冲激光的脉宽都要长,多为几百微秒至几毫秒。这里假定自由振荡激光的脉冲宽度为 1 ms。

为了便于分析比较,假设不同脉宽的激光通过调整功率密度(假设波长一致),使各自的激光参数都满足 $I\lambda\sqrt{\tau} = 1000$ 。根据图 2 的曲线,此时的冲量耦合系数为 100,由此可以得到压力与冲量随脉宽变化的曲线,如图 3 所示。

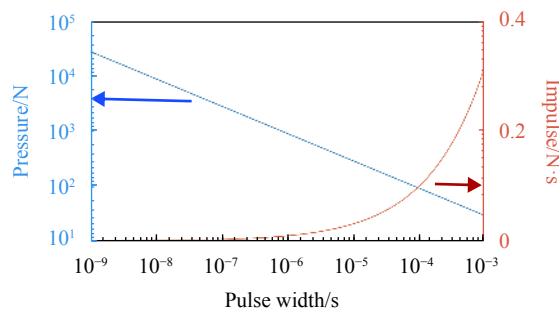


图 3 不同激光产生的压力与冲量(图中曲线中的压力和冲量数据为 1 cm^2 上计算得到,冲量耦合系数为 100)

Fig.3 Pressure and impulse from different laser (Pressure and impulse data of curves were calculated from 1 cm^2 , impulse coupling coefficient was assumed to be 100)

图 3 中能够发现处于横坐标左侧的短脉冲激光所产生的压力比右侧的自由振荡激光大,但由于作用时间很短,所能产生的冲量远远小于自由振荡脉冲激光。这说明:在获得相同耦合系数的条件下,自由振荡激光在单位面积上产生了更多的冲量。

单纯从公式(1)来看,继续增大脉冲能量,短脉冲也可以产生更高的冲量。但实际上并非所有注入的激光能量都能参与向冲量的转化,转化量的多少还要受到激光与材料作用机制的限制。短脉冲激光利用等离子体喷发实现碎片的清扫,但大量的等离子体却对激光产生强烈的吸收和散射,阻止了激光与碎片的进一步作用,因此限制了激光能量的利用。而自由振荡激光是利用与碎片作用时产生的蒸气反喷实现对碎片的清扫。所产生的金属蒸气对于激光是近似透明的,因此碎片在与自由振荡激光脉冲相互作用时对能量的利用率更高。理论上自由振荡激光功率密度从产生金属蒸气的阈值 $10^5 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$ 开始,一直到

产生等离子体的阈值 $10^8 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$ 前, 都可以认为激光不受阻碍的与金属相互作用。对比实验结果表明: 自由振荡激光所产生的喷溅物没有对激光能量注入造成明显影响; 整个激光脉冲持续时间内, 大量的能量参与了向冲量的转化, 所产生的冲量与能量增加呈正比, 而没有出现高功率密度条件下常见的等离子体屏蔽激光现象^[14]。

1.3 自由振荡激光喷溅“微碎片”的模型

自由振荡脉冲激光在使金属产生蒸气反喷的作用过程中会附带喷溅“微碎片”。关于这些“微碎片”能否对航天器构成威胁的问题, 可以从自由振荡激光与金属碎片作用的机理进行分析。

在自由振荡脉冲激光与金属作用的实验中, 可以观察到脉冲持续时间内不断地有液态金属喷溅, 这说明金属的熔化和喷溅是同时进行的。为了便于分析, 假定熔化和喷溅过程是相互独立的, 即在某一时刻只发生金属熔化或者液态金属喷溅, 二者交替进行, 每个熔化或喷溅的持续时间都很短, 在一个自由振荡脉冲持续时间内, 发生多次交替。

在金属熔化过程中, 固态金属表面被激光加热, 金属内部通过热传导的方式被加热。持续的加热使固态金属由表面向深层熔化, 形成熔池。在激光脉冲加热的短暂时间内, 熔池的深度由热扩散率、热导率和激光功率密度, 以及激光作用时间来决定。在此过程中, 假设激光并未使金属发生气化。

根据金属液化速率和热扩散速率的相对关系, 可以发现: 当激光在 t 时间内使金属形成熔池的深度刚好等于材料的热扩散深度, 即下式成立时^[17],

$$\left(\frac{\alpha I}{\rho L_m + \rho C(T_m)}\right) \cdot t = \sqrt{Dt} \quad (3)$$

式中: α 为金属对激光的吸收率; ρ 、 C 、 L_m 、 T_m 分别为金属的密度、比热容、液化潜热和液化温度。在热扩散深度 \sqrt{Dt} 内的所有金属均转化为液态, 其温度为金属的熔化温度, 而固态金属部分并未受到激光照射的影响, 保持着原来的温度, 此时熔池深度最大。

通过对公式 (3) 的模拟可以得到不同激光功率密度与作用时间之间的关系曲线 (以铝为例)。如图 4 中实线所示。而虚线描绘出不同时间热量能够扩散的深度, 当公式 (3) 得到满足时, 这个热扩散深度即为形成的熔池深度。从中可以看出, 因为高功率密度激

光能够迅速将热传导范围内的金属熔化, 达到公式 (3) 所表达的匹配状态, 所以形成的熔池深度较浅; 而低功率密度的激光需要更长的时间达到平衡状态, 同时熔池的深度也越深。当 1 ms 激光达到气化阈值的功率密度 (以 $5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 记) 时, 图 4 中曲线上所对应的作用时间约为 50 μs , 此时的熔池深度约为 60 μm 。当进一步增加激光能量时, 满足公式 (3) 所需的时间更短, 从而熔池的深度也越浅。

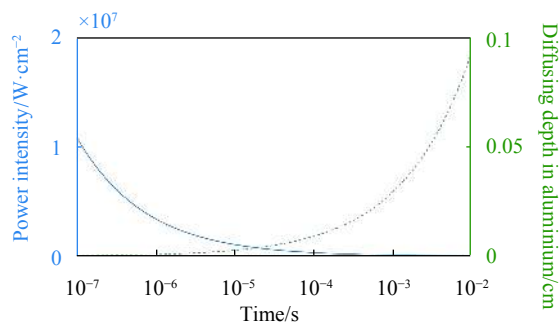


图 4 激光功率密度与铝中热扩散深度的对应关系 (曲线上的数据根据公式 (3) 计算得到, 实线表示功率密度, 虚线为热扩散深度, 即熔池深度曲线)

Fig.4 Power intensity of laser and diffusing depth in aluminum (Data of curves were calculated from Eq.3, the real curve stands for power intensity and the broken one for diffusing depth, which is also the depth of melting pool curve)

K.T.Voise 的实验研究表明, 喷溅出的金属液滴的直径大小与熔池的深度基本相同^[18]。因此, 可以认为 1 ms 激光清扫空间碎片过程中不易形成直径大于 60 μm 的液态金属喷溅液滴。

据统计, 目前围绕地球飞行的小于 1 mm 的碎片估计超过百亿个, 所幸的是其造成的损害不足以短时间内危害航天器的核心功能, 目前已经广泛报导的被动防护手段是对付这种碎片可行且有效的方式。因此, 用自由振荡脉冲激光清扫空间碎片时产生的“微碎片”是相对安全的。

1.4 “微碎片”对清扫过程的影响

对完成固液相变的液态金属继续加热, 将导致液态金属继续升温, 产生气化。蒸气压力是液态金属喷溅过程中的动力来源。可由克劳修斯-克拉柏龙方程获得平衡态时蒸气的状态。此时蒸气对金属表面的压力 p_1 为^[17]:

$$p_1 = \frac{\alpha' I \sqrt{R_{gm} T_v}}{L_v} \quad (4)$$

$$R_{gm} = \frac{R_g}{M_a} \quad (5)$$

式中： I 为功率密度； α' 为液态金属对激光的吸收率； T_v 为气化温度； L_v 为气化潜热； R_g 为气体常数； M_a 为金属的相对原子质量。根据公式(4)所描述的动力学过程，可以看出激光功率密度是蒸气压力的主要影响因素。

实验研究表明，在不同激光功率密度和液滴质量条件下，液滴脱离金属的相对速率从 1~180 m/s 不等，每次液滴的喷溅持续时间可以维持几十微秒^[19]。对于 1 ms 脉冲宽度的激光来说，将会出现多次的喷溅。如果假设蒸气喷发的持续时间约为 50 μ s，并且液态金属全部喷溅出去，结合图 4 所示的模拟结果可知，对于功率密度为 5×10^6 W/cm² 的 1 ms 脉冲激光，在一个脉冲时间内，可以认为一共发生了 10 次金属熔化和 10 次液态金属喷溅。在其他功率密度激光作

用下，金属熔化和喷溅交替的速率会有所不同。

碎片在液滴喷溅的过程中自身的质量也在减小，相对地，在同样激光脉冲的作用下所获得的动量改变量也在增大。在第 N 次激光脉冲照射时，碎片的动量改变量 Δp 为：

$$\Delta p = [m_T - (N - 1)m_E] \Delta v_T = m_E \cdot v_E \quad (6)$$

式中： m_T 和 m_E 分别代表碎片总质量和每个脉冲作用下喷溅出的液态金属质量； Δv_T 为碎片速率的改变量； v_E 为喷溅出的液态金属相对于碎片的速率。

如果以一个外形尺寸为 $\Phi 10$ cm \times 0.5 cm，质量为 106 g 的平板铝碎片为靶目标，假设用 1 ms 自由振荡脉冲激光照射它的表面，脉冲能量为 1000 J，调整光斑大小使靶面功率密度为 5×10^6 W/cm²。根据前面的分析，每次脉冲将使碎片损失质量 0.0324 g，带来冲量 0.032 N·s。当照射次数较小时，对碎片的速率影响较小；当照射次数较多，碎片的质量损失积累到一定程度后，喷溅对速率的影响变得较为明显。具体数据如表 1 所示。

表 1 喷溅对碎片速率变化量的影响

Tab.1 The influence of ejection on velocity variation of debris

Shooting times	Mass lost in ejection/g	Velocity variation (with mass loss) $V_1/m \cdot s^{-1}$	Velocity variation (without mass loss) $V_2/m \cdot s^{-1}$	$(V_1 - V_2)/V_1$
100	3.24	30.65	30.19	1.52%
500	16.2	163.78	150.94	7.84%
1000	32.4	360.22	301.89	16.19%
1500	48.6	605.69	452.83	25.24%
2000	64.8	933.10	630.77	35.29%

2 天基自由振荡激光器的可实现性

架设在天基平台的激光器首先需要考虑的是能量供给问题。以脉冲能量 1000 J，重复频率 10 Hz 的 1 ms 脉冲激光器为例，假设电光转换效率为 20%，那么所需电功率 50 kW，以太阳能帆板 500 W/m² 的转换效率计，需要 100 m² 的太阳能帆板。这个面积的帆板在大型航天器上是能够实现的。

天基激光器需要同时具有大能量、高效率、高光束质量、高可靠、小型轻量化等特点。自由振荡激光器包含光学元件相对较少，结构紧凑，光路简单易实现，可靠性高，为太空中长时间稳定运行提供了保障；它不经过调 Q 而直接发射激光，“光—光”转换效率

高，腔内能量密度远低于光学元件损伤阈值，使激光能量容易放大。因此，自由振荡激光应用于天基平台具有优势。

3 结 论

文中研究了自由振荡脉冲激光应用于天基清扫空间碎片的可能性。通过对脉冲宽度与功率密度相对关系的分析与模拟验证，发现相对于更短脉宽的激光，自由振荡脉冲激光较少受到碎片反喷物的影响，易获得大冲量。提出了自由振荡激光与金属相互作用的模型，据此分析得到了自由振荡激光所导致的金属喷溅液滴尺寸。当功率密度大于 5×10^6 W/cm² 时，

金属液滴的直径一般不大于 60 μm , 而且直径会随着功率密度增高而进一步变小, 不会对航天器造成致命威胁。而且, 蒸气动力学模型显示高功率密度对产生大冲量更有利。经过进一步的分析发现, “微碎片”的喷溅在一定条件下有利于增加碎片动量的改变量。通过对天基平台能量供给的简单估算和对自由振荡激光器的特点分析, 笔者所在课题组认为自由振荡激光器是较为理想的清扫空间碎片的激光光源。

参考文献:

- [1] Wang L, Stark P W. Direct simulation of space debris evolution [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1999, 36(1): 114-125.
- [2] Krisko P H. Micro-debris modeling at NASA ODPO[C]//29th IADC Meeting, 2011.
- [3] Phipps C R, Albrecht G, Friedman H. ORION: Clearing near-earth space debris using a 20 kW, 530 nm, Earth-based, repetitively pulsed laser [J]. *Laser and Particle Beams*, 1996, 14(1): 1-44.
- [4] Bruno Esmiller, Christophe Jacqueland. CLEANSPACE "small debris removal by laser illumination and complementary technologies"[C]//AIP Conf Proc, 2011, 1402: 347.
- [5] Fang Yingwu, Yang Liwei, Zhao Shanghong. Numerical simulation and experiments of ground-based laser irradiating small scale space debris [J]. *Optik*, 2016, 127: 1078-1083.
- [6] Schall Wolfgang O. Laser radiation for cleaning space debris from lower earth orbits [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2002, 39(1): 81-91.
- [7] Wen Quan, Yang Liwei, Zhao Shanghong. Impacts of orbital elements of space-based laser station on small scale space debris removal [J]. *Optik*, 2018, 154: 83-92.
- [8] Chen Chuan, Yang Wulin, Yu Qian, et al. A laser driven relay small satellite constellation for space debris active removal and feasibility study [J]. *Journal of Astronautics*, 2019, 40(2): 156-163. (in Chinese)
- [9] Wen Quan, Yang Liwei, Zhao Shanghong. Research on de-orbiting model of small scale space debris removal using space-based laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0329004. (in Chinese)
- [10] 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. (in Chinese)
- [11] Toshikazu Ebisuzaki, Mark N Quinn, Satoshi Wada. Demonstration designs for the remediation of space debris from the International Space Station [J]. *Acta Astronautica*, 2015, 112: 102-113.
- [12] Abdellaoui G, Abe S, Acheli A, et al. Cosmic ray oriented performance studies for the JEM-EUSO first level trigger [J]. *Nuclear Inst and Methods in Physics Research*, 2017, 866: 150-163.
- [13] Schall Wolfgang O. Removal of small space debris with orbiting lasers[C]//Proc of SPIE, 1998, 3343: 564-574.
- [14] Zhu Mengzhen, Cheng Yong, Chen Xia, et al. Study on impulse coupling effects of different mode pulsed laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(8): 0805004. (in Chinese)
- [15] 程勇. 天基激光清扫空间碎片关键技术研究思考[C]//第二届空间目标与碎片监测、清理技术学术研讨会, 2015.
- [16] Phipps C R, Bonnal C. A spaceborne, pulsed UV laser system for re-entering or nudging LEO debris, and re-orbiting GEO debris [J]. *Acta Astronautica*, 2016, 118: 224-236.
- [17] 孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 45, 123.
- [18] Voisey K T, Klocker T, Clyne T W. Measurement of melt ejection velocities during laser drilling of steel, using a novel droplet stream interception technique [J]. *Acta Materialia*, 2002, 50(17): 4219-4230.
- [19] Bekir S Yilbas. Study of liquid and vapor ejection processes during laser drilling of metals [J]. *Journal of Laser Applications*, 1995, 7(3): 147-152.