

地基激光辐照近地轨道小尺度空间碎片作用规律研究

方英武, 赵尚弘, 杨丽薇, 王 轶, 楚兴春, 蒙 文, 林宝勤

(空军工程大学 信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

摘 要: 通过研究脉冲激光与铝靶碎片的膨胀运动以及冲量耦合的相互作用, 仿真分析了铝靶碎片在等离子体作用下的速度和压力时空分布规律以及冲量耦合系数与激光功率密度之间的定量关系; 在此基础上, 建立了基于地基的脉冲激光辐照近地轨道小尺度空间碎片动力学变轨仿真模型, 模拟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。结果表明: 在最优冲量耦合系数作用下, 当脉冲数目达到 180 次轨道偏心率为 0.071 时, 基于此文的条件可实现近地轨道小尺度空间碎片的有效移除。预期成果可为高能激光移除近地空间碎片技术的应用提供技术指导。

关键词: 地基激光; 近地轨道; 小尺度空间碎片; 变轨模型

中图分类号: TG174.44 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0229002

Research on action rules of ground-based laser irradiating small scale space debris in LEO

Fang Yingwu, Zhao Shanghong, Yang Liwei, Wang Yi, Chu Xingchun, Meng Wen, Lin Baoqin

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

Abstract: The effect of expansion moving and impulse coupling in pulse laser and aluminum target debris were investigated, the spatial and temporal distribution rules of velocity and pressure in aluminum target debris and plasma were analyzed by numerical simulation, and the quantitative relation of impulse coupling coefficient and laser power densities was also discussed. Further, a dynamic deorbit model of ground-based pulse laser irradiating small scale space debris in low earth orbit (LEO) was established, and the effects of orbital eccentricity and perigee altitude with different number of pulses were simulated in the process of removing small scale space debris in LEO. The results indicate that the small scale space debris in LEO could be deorbited availably by optimal impulse coupling coefficient when the number of pulses was 180 times, orbital eccentricity was 0.071 based on the condition of this paper. The prospective achievements can provide technical guidance for the application of high power laser removing space debris in LEO.

Key words: ground-based laser; low earth orbit; small scale space debris; deorbit model

收稿日期: 2015-12-16; 修订日期: 2016-01-25

基金项目: 陕西省科技计划项目(2013K07-17); 国家自然科学基金(61205002, 61471387)

作者简介: 方英武(1971-), 博士后, 主要研究方向为激光辐照技术。Email: fangyw72@126.com

0 引言

空间碎片又称太空垃圾,多为人类空间活动的副产物,主要集中在近地轨道和地球同步轨道^[1]。据美国国家空间宇航局的分析统计,空间碎片的数量正以每年 3%~5% 的速度急速增长,当在轨的空间碎片达到一定数目时,碎片间的连续碰撞会导致碎片的数量和碰撞几率急剧增加^[2-3]。空间碎片环境的日趋恶化对航天活动构成很大威胁,已成为危害卫星安全的潜在杀手^[4]。

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。其中对于尺寸小于 1 cm 的空间碎片,一般采用航天器设计与防护结构相结合的方式被动防护;对于尺寸大于 10 cm 的空间碎片可对其进行跟踪编目和监测预警,航天器一般采用捕获与离轨相结合的方式主动防护;对于尺寸在 1~10 cm 量级的小尺度空间碎片,具有较大的动能,既难以监测、跟踪、编目,又缺乏合理的防护措施,被国际社会公认为是威胁最大的危险碎片^[5-6]。由于现有的碎片减缓与防护措施已不能有效限制这类危险碎片数量的继续增长,主动移除厘米级小尺度空间碎片势在必行^[7]。为了最大限度地保障空间环境特别是近地轨道航天器的安全,世界上主要的航天国家正积极开展空间碎片主动移除技术的研究,提出了许多清除方案和技术^[8]。其中高能脉冲激光移除小尺度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高效方法^[9-10]。

高能脉冲激光移除空间碎片技术按照激光能源所在位置分为天基和地基(含空基)两种方式,每种方式对激光器的性能参数要求不同^[11]。对比分析这两种移除方式各有优缺点,没有哪一种移除方法具有绝对优势。美、德等国开展激光移除空间碎片研究起步较早,部分关键技术已开展演示验证。而国内对于空间碎片的激光主动移除工作,仍处于概念、模型研究阶段^[12-13]。综上分析,此文以近地轨道 10 cm 量级的铝合金空间碎片材料为研究对象,通过建立基于地基的脉冲激光辐照近地轨道小尺度空间碎片动力学变轨仿真模型,以此研究地基激光主动移除小

尺度空间碎片的作用机理,为高能脉冲激光清除近地轨道小尺度空间碎片技术的应用提供必要的理论基础。

1 理论分析

高能脉冲激光辐照过程中,靶材辐照区域因为具体条件的不同会发生升温、熔融、气化、产生等离子体等各种复杂的变化,激光辐照靶材的不同状态过程如图 1 所示。

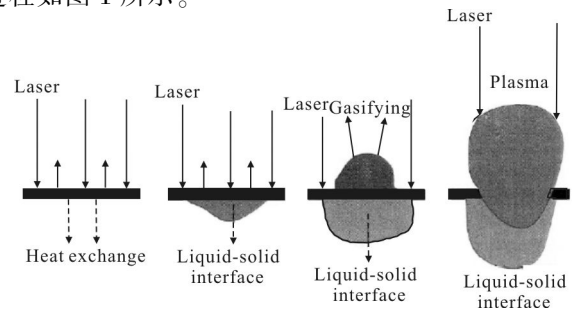


图 1 激光辐照靶材的不同状态示意图

Fig.1 Sketch map of different states of laser irradiating target

脉冲激光与靶材相互作用将在靶表面形成压力脉冲,该脉冲在靶材内部的传播就是冲击波,冲击波的变化过程主要与激光参数和靶材特性有关^[14-15]。为了分析高能脉冲激光作用下高温等离子体状态参数的动态变化,将等离子体视为流体,忽略粘性和热传导,则描述靶面蒸气等离子体膨胀运动的控制方程可表示为^[16]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho V}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \rho V}{\partial t} + \frac{2(P + \rho V^2)}{\partial x} = 0 \\ \frac{2(E + 0.5\rho V^2 + P)}{\partial x} + \frac{2(E + 0.5\rho V^2)}{\partial t} + QI(x, t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 为材料密度; V 为等离子体喷溅方向的速度; E 为单位体积的内能; P 为等离子体压强; Q 为等离子体相应的吸收系数; $I(x)$ 为沿激光入射方向的功率密度。

假定地基激光的脉宽为纳秒量级,当纳秒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 2 所示。

根据图 2,对于质量为 m 的碎片靶材,靶上能量

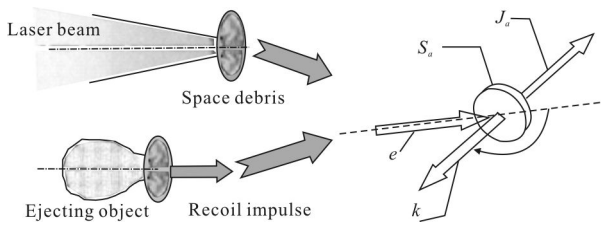


图 2 激光辐照碎片获得反冲冲量

Fig.2 Sketch map of obtaining recoil impulse of laser irradiating debris

密度为 φ , 冲量耦合系数为 C_m 。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 。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:

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

根据公式(2), 强脉冲激光照射靶材引起蒸气、等离子体的流体力学运动及其在凝聚态靶中的动态响应, 形成了激光对靶的力学效应, 而蒸气、等离子体的作用将占据明显的能量比例^[17]。分析动力学机制对激光与靶的耦合作用, 速度增量 Δv 可表示为:

$$\begin{cases} C_m = \frac{P}{I} \\ P = (\alpha\tau)^{-0.125} P^{0.75} \\ \Delta v = \eta C_m \frac{4W\varepsilon}{\mu\pi d_s^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: I 为入射激光功率密度; S 为激光光斑在靶材上的面积; P 为靶材表面的峰值压力; ε 为传输系数; W 为脉冲能量; μ 为碎片材料的面质比; η 为速度变化因子; a 为与入射激光波长和靶材原子有关的参数; τ 为激光脉宽。

下面建立脉冲激光辐照作用下空间碎片的动力学变轨仿真模型。假定在地心赤道惯性坐标系下空间碎片获得的速度增量为 Δv , 在轨道坐标系下的径向分量为 Δv_r , 周向分量为 Δv_θ , 法向分量为 Δv_n , 则^[18]:

$$\begin{bmatrix} \Delta v_r \\ \Delta v_\theta \\ \Delta v_n \end{bmatrix} = [H] \begin{bmatrix} \Delta v \frac{(r-r_{laser})}{|r-r_{laser}|} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: H 为相应的坐标转换矩阵; r 为碎片与地核间的绝对距离。

由于激光辐照碎片产生的速度增量数量级较小, 可当成摄动加速度与激光脉宽的乘积, 则轨道根

数的变化可表示为:

$$\begin{cases} \Delta a = \frac{2}{M\sqrt{1-e^2}} [\Delta v_e \sin f + \Delta v_\theta (1 + e \cos f)] \\ \Delta \omega = \frac{\sqrt{1-e^2}}{Mae} [\Delta v_\theta (1 + \frac{1-e \cos z}{1-e^2} \cos f - \Delta v_e \cos f)] \\ \Delta e = \frac{\sqrt{1-e^2}}{Mae} [\Delta v_e \sin f + \Delta v_\theta (\cos z + \cos f)] \\ \Delta i = \frac{rcos(f+\omega)}{Ma^2\sqrt{1-e^2}} \Delta v_n \end{cases} \quad (5)$$

式中: a 为空间碎片轨道半长轴; e 为空间碎片轨道偏心率; i 为空间碎片轨道倾角; ω 为近地点幅角; M 为碎片的平均转动角速度; f 为真近点角; z 表示偏近点角。

2 仿真与结果分析

铝合金材料是近地轨道空间碎片的主要成分之一, 下面分析铝靶碎片在等离子体作用下的速度和压力时空分布规律以及冲量耦合系数与激光功率密度之间的定量关系, 以此研究不同激光参数对移除小尺度空间碎片的影响规律。

假定 x 方向为等离子体的膨胀方向, 忽略熔融和气化过程中的迟滞时间, 取 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$, 铝靶密度为 $2.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 通过仿真得到不同时刻铝靶与激光相互作用后等离子体的速度和压力随时间和空间的分布规律以及冲量耦合系数与激光功率密度间的变化关系, 图 3 给出了第 $t = 2 \text{ ns}, 4 \text{ ns}, 7 \text{ ns}$ 时刻等离子体的速度分布曲线, 图 4 给出了第 $t = 2 \text{ ns}, 4 \text{ ns}, 7 \text{ ns}$ 时刻的等离子体冲击波压力轮廓分布, 图 5 示出冲量耦合系数随激光功率密度变化的关系曲线。

由图 3 的仿真结果可知, 高功率激光入射铝靶

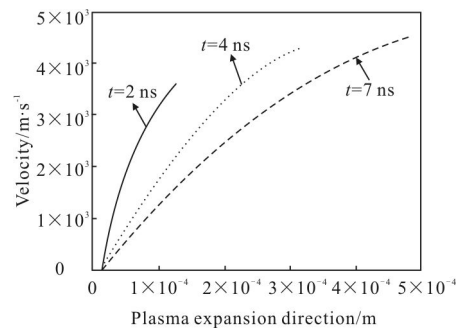


图 3 不同时刻下等离子体速度分布曲线
Fig.3 Distribution curves of plasma velocity at different time

表面后，等离子体沿着激光入射方向的速度迅速增加，其运动速度与等离子体膨胀产生的冲击波特性相关。主要是因为等离子体冲击波界面和周围气体形成的动态压力，在等离子体区中距靶面越远其密度迅速减小，使得其峰值压力有较大波动。

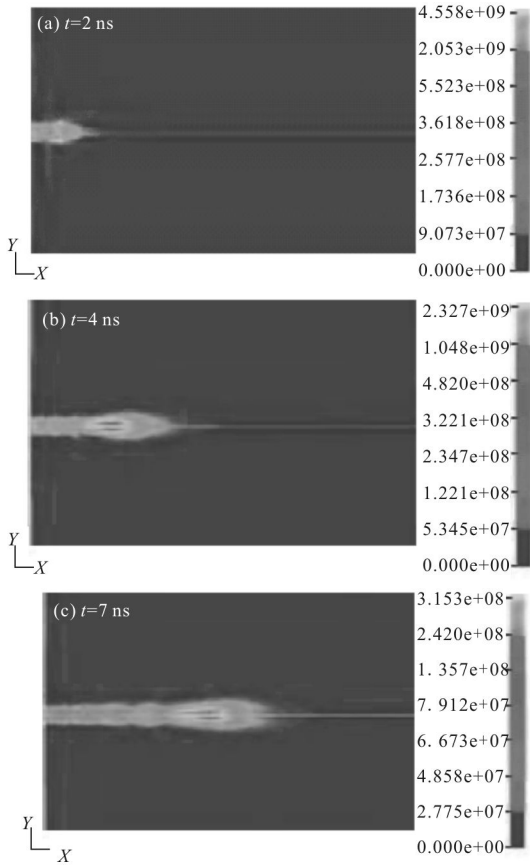


图 4 不同时刻的冲击波压力轮廓分布图

Fig.4 Contour on the impact pressure of plasma shock wave

根据图 4 可知，在 2 ns 时刻激光冲击波接近靶材表面，此时峰值压力达到 4.6 GPa，在 4 ns 时刻等离子体冲击波从靶材表面传入靶材内部时的峰值压力为 2.3 GPa，当 7 ns 时刻等离子体冲击波的峰值压力衰减到 0.3 GPa。这主要是因为脉冲激光作用后弹性卸载超过塑性波的速度，冲击压力最大值区域靠近靶材表面。由图 5 的仿真结果可知，由于受等离子体屏蔽的影响，冲量耦合系数随激光功率密度表现为先增后减的趋势，最优冲量耦合系数可达到 $(5\pm 2)\times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{J}^{-1}$ 。

进一步地，下面通过仿真分析厘米级铝靶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的变化关系，以此研究纳秒脉冲激光辐照过程中

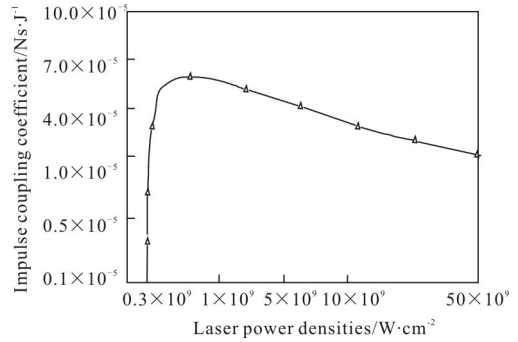


图 5 冲量耦合系数随激光功率密度变化的关系曲线

Fig.5 Relation curves of impulse coupling coefficient with laser power densities

空间碎片的轨道状态及移除效果。假定铝靶碎片分布在 1 000 km 的近地轨道，且碎片一次过顶过程中地基激光器处于连续工作状态，激光束能够始终瞄准空间碎片。铝靶碎片厚度 1 mm，尺寸大小为 10 cm×10 cm。由于冲量耦合系数存在极值点，考虑到在仿真分析中处理这种非线性关系涉及到的物理参数较多^[10]，目前还没有得到比较满意的结果。所以在文中的实例计算中冲量耦合系数假定为最优值来研究理想条件下空间碎片的降轨问题，最优的冲量耦合系数假定为 $5\times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{J}^{-1}$ 。最终，通过仿真得到了轨道偏心率与近地点高度随激光脉冲数目的变化关系曲线，如图 6、图 7 所示。

由两图的仿真结果可知，轨道偏心率随激光脉冲数目的增加而增加，而近地点轨道高度随激光脉冲数目的增加而减小。特别地，当脉冲数目达到 180 次时轨道偏心率为 0.071，通过一次过顶空间碎片的近地点高度下降到 200 km 左右，也即空间碎片进入临界轨道高度，通过稠密大气层的作用可被有效清除。

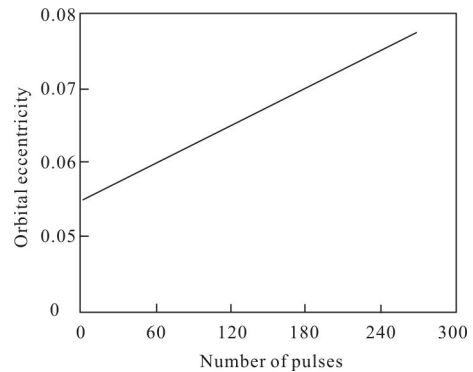


图 6 轨道偏心率随脉冲数变化的关系曲线

Fig.6 Curve of orbital eccentricity with different number of pulses

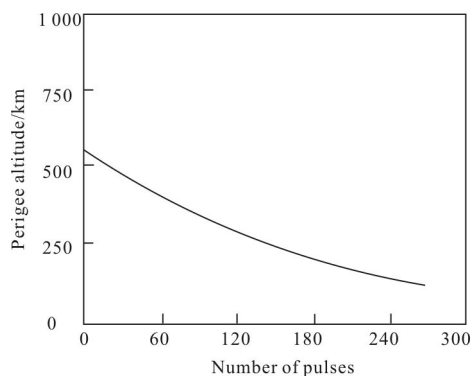


图 7 近地点高度随脉冲数变化的关系曲线

Fig.7 Curve of perigee altitude with different number of pulses

3 结 论

空间碎片主动移除技术是全世界航天界面临的挑战和难题,也是现在的热点。此文主要通过理论分析和数值仿真研究了地基激光辐照近地轨道厘米级小尺度空间碎片的作用机理。主要结论:采用地基激光辐照空间碎片,等离子体沿激光入射方向的速度波动较大,等离子体压力呈现先增后减的趋势,且随着激光功率密度的增加存在最佳的冲量耦合作用区域,最优冲量耦合系数可达 $(5\pm 2)\times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{J}^{-1}$ 。特别地,采用文中的计算条件,当脉冲数目为 180 次时轨道偏心率为 0.071 即可实现空间碎片的有效降轨。

由于轨道碎片属于非合作目标,运动状态复杂,如何深入探讨激光参数与冲量耦合系数之间的非线性对应关系,通过选择满足实际应用的冲量耦合系数高效建立反映近地轨道特性的脉冲激光辐照动态响应模型,在这方面仍需展开全面系统的研究工作。

参考文献:

[1] Johnson N L. Developments in space debris mitigation policy and practices [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2007, 221: 907-909.

[2] 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.

[3] Bonnal C, Ruault J, Desjean M. Active debris removal: recent progress and current trends [J]. *Acta Astronautica*, 2013, 85: 51-60.

[4] 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.

[5] 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.

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.

[6] Phipps C R, Baker K L, Bradford B, et al. Removing orbital debris with lasers [J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49: 1283-1300.

[7] Soulard R, Quinn M, Tajima T, et al. ICAN: a novel laser architecture for space debris removal [J]. *Acta Astronautica*, 2014, 105: 192-200.

[8] 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.

[9] Phipps C R, Baker K L, Libby S B, et al. Removing orbital debris with pulsed lasers [C]// AIP Conference Series, 2012, 1464: 468-480.

[10] Phipps C R, Luke J R, Lippert T, et al. Micro propulsion using laser ablation[J]. *Applied Physics A*, 2004, 79: 1385-1389.

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

[12] Benvenuto R, Salvi S, Lavagna M. Dynamics analysis and GNC design of flexible systems for space debris active removal[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 110: 247-265.

[13] Fang Yingwu, Yang Liwei, Zhao Shanghong, et al. Numerical simulation and experiments of ground-based laser irradiating small scale space debris [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(3): 1078-1083.

[14] Liou J C. An active debris removal parametric study for LEO environment remediation [J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47: 1865-1876.

[15] 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.
- [16] Song L H, Wei Q, Bai Y, et al. Impact effects on fused quartz glass by ground simulating hypervelocity space debris [J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56 (3): 724–731.
- [17] Ye Jifei, Hong Yanji, Li Nanlei. Impulse coupling performance of liquid propellant with ns laser micro ablation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (1): 102–106. (in Chinese)
叶继飞, 洪延姬, 李南雷. 纳秒激光烧蚀液态工质冲量耦合特性研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 102–106.
- [18] 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.
- [19] Zheng Yijun, Tan Rongqing, Shi Haixia. Experimental study (II) on impulse coupling coefficient of laser ablating aluminum target in air ambient [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 76–79. (in Chinese)
郑义军, 谭荣清, 石海霞. 空气中激光烧蚀铝靶冲量耦合系数实验(II) [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 76–79.