

# 近地小行星材料特性对激光烧蚀驱动效率的影响试验分析

宋光明<sup>1</sup>, 任思远<sup>1</sup>, 龚自正<sup>1,2</sup>, 张品亮<sup>1</sup>, 陈川<sup>1</sup>, 武强<sup>1,2</sup>, 曹燕<sup>1</sup>

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094; 2. 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100094)

**摘要:** 基于激光驱动效果和小行星材料特性密切相关的问题, 针对脉冲激光对近地小行星物质的烧蚀驱动效率开展了试验研究, 选用不同材质、孔隙率的类小行星试验样品, 开展了冲量耦合规律测量试验。试验结果表明: 在脉冲激光烧蚀的作用下, C型小行星比S型小行星具有更高的冲量耦合效率; 随着小行星孔隙率的升高, 冲量耦合效率降低, 激光烧蚀驱动的效率下降。此外, 还对激光烧蚀类小行星物质质量变化的规律进行试验, 试验结果表明存在使得小行星质量烧蚀效率最佳的激光功率密度。对于需长期预警时间的威胁小行星, 在烧蚀驱动偏转其轨道的同时, 以最快速率减少其质量, 可进一步提升防御效率, 实现防御的目的。

**关键词:** 激光驱动; 烧蚀; 小行星孔隙率; 预警时间

**中图分类号:** TK124

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2024)02-0203-08

**DOI:** 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230109

**引用格式:** 宋光明, 任思远, 龚自正, 等. 近地小行星材料特性对激光烧蚀驱动效率的影响试验分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(2): 203-210.

**Reference format:** SONG G M, REN S Y, GONG Z Z, et al. Experimental study on influence of near-Earth asteroid material characteristics on laser ablation driving efficiency[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(2): 203-210.

## 引言

太阳系中有着海量的小行星, 其中近地小行星是指近日点距离 $q$ 小于1.3 AU ( $1 \text{ AU} = 1.496 \times 10^8 \text{ km}$ ), 轨道与地球接近或相交的小行星, 存在撞击地球的风险<sup>[1-2]</sup>。根据美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)近地物体研究办公室的统计数据<sup>[3]</sup>, 截至2023年6月30日, 共发现已编目的近地小行星32 279个, 如图1所示。其中尺寸在140 m以上的近地小行星共有10 503个, 尺寸在1 km以上的近地小行星853个。

对于直径大于140 m, 距离地球最小轨道距离小于0.05 AU ( $7.5 \times 10^6 \text{ km}$ )的小行星, 称为潜在威胁小行星。此类小行星撞击地球的概率较小, 但风险极高, 是有可能对人类文明可持续发展产生重大影响的黑天鹅事件。此外, 数量众多的几十米级尺寸小行星若撞击至人口密集区域也会对人类生命财产造成重大的灾难, 此类小行星撞击频率为百年一遇, 撞击概率较高, 是短期内可能对人类具有重大影响的威胁事件, 必须予以重点关注。

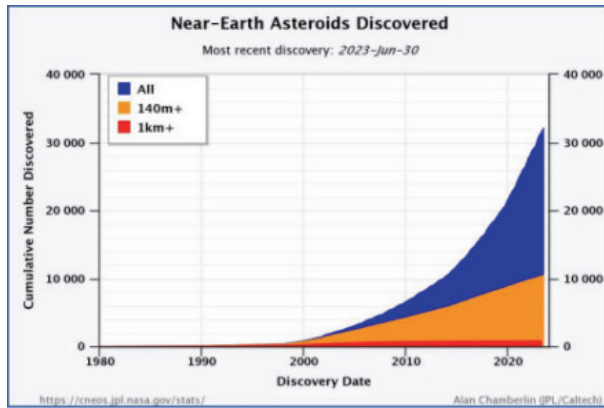


图1 已发现编目近地小行星数量(数据来源: NASA, 2023.6.30)<sup>[3]</sup>  
Fig. 1 Number of near-Earth asteroids discovered and catalogued (data source: NASA, Jun. 30th, 2023)<sup>[3]</sup>

国际小行星防御相关研究起步于1990年代开始, 特别是1994年彗木相撞<sup>[4]</sup>(人类首次观测的太阳系行星撞击事件)和2013年俄罗斯车里雅宾斯克小行星撞击事件<sup>[5]</sup>使得行星防御得到了全世界的广泛关注。国外主要航天大国针对行星防御相关技术开展了广泛深入的

研究,根据不同威胁小行星的尺寸和预警时间,提出了核爆<sup>[6-7]</sup>、动能撞击<sup>[8-9]</sup>、引力牵引<sup>[10-11]</sup>、激光烧蚀驱动<sup>[12-13]</sup>、质量驱动<sup>[14]</sup>、离子束<sup>[15]</sup>等防御技术。

激光烧蚀驱动是一种长期作用的防御技术,基本原理为使用激光辐照小行星表面,利用表面材料烧蚀气化甚至等离子体气化喷射流所带来的反作用力,使其轨道发生改变,从而实现防御目的。相比其它长期作用的防御技术,激光烧蚀驱动技术具备的优势:①更高效的偏转效率;②避免了小行星解体,防止碎片的二次撞击威胁;③小行星本身被用作偏转“推进剂”,无特别的发射质量限制;④无需考虑附着小行星,以避免增加物理连接和着陆装置等复杂机构带来的技术风险。随着激光器系统的发展进步,激光烧蚀驱动技术的驱动能力将远超其它长期作用技术,是极具发展前景的未来防御技术之一。

由于高功率密度激光与物质相互作用过程的复杂性,激光与小行星相互作用的理论模型主要是在试验的基础上获得的。目前国内尚无公开文献开展激光烧蚀驱动防御近地小行星的试验研究工作,国外学者<sup>[16-18]</sup>主要针对某一种特定类型的小行星,选取天然或特制的小行星模拟物开展试验研究,通过喷射羽流或烧蚀驱动力的测量,获得激光烧蚀驱动规律,校验理论模型。

激光烧蚀防御近地小行星任务设计中,在轨道优化设计的基础上,还应充分考虑近地小行星特性(材料类型、孔隙率等)对驱动效率的影响,进一步提高防御效率。本文针对不同近地小行星特性对烧蚀驱动效果影响的问题,选用不同类型的小行星陨石、模拟物开展脉冲激光烧蚀试验,以获得试验环境、不同小行星材料特性和孔隙率等因素对烧蚀驱动效率的影响规律。此外,鉴于激光的长期烧蚀作用可导致小行星质量的缓慢减少,开展了不同激光能量和作用时间的小行星模拟样品烧蚀试验,以获得小行星模拟样品的质量变化规律,从而能够进一步对高效的防御任务参数设计提供帮助。

## 1 激光烧蚀驱动方法

激光与小行星相互作用的力学耦合过程是激光能量向小行星动能转化而形成冲量的过程。其主要物理过程为高功率密度脉冲激光辐照小行星,导致辐照区域温度升高,当小行星表面温度超过气化温度时,表面发生气化,激光强度足够高时,烧蚀产生的气体会进一步吸收入射激光能量,电离形成高温高压的等离子体,高温高压等离子体迅速膨胀和扩散的方向决定了小行星获得的冲量方向,同时在辐照表面产生压

力,对小行星传递冲量。

冲量耦合系数反映了消耗单位激光能量获得物体冲量的能力,是表征激光烧蚀驱动效率的重要参数。因此通过测量不同小行星特性影响的冲量耦合系数变化规律,可获得近地小行星特性对激光烧蚀驱动效率的影响规律。设激光单脉冲能量为 $E$ ,对于规则平面目标,冲量耦合系数 $C_m$ 为

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

其中: $I$ 为激光单脉冲产生的冲量。

冲量耦合系数可通过试验测量激光烧蚀物体表面产生的冲量计算获得。限于实验室脉冲激光器出光能量限制,烧蚀产生的冲量大小一般为 $10^{-5}$  N·s,甚至为更小的量级,因此需专门的微冲量装置来进行测量,目前国内普遍采用扭摆微冲量装置测量微冲量。用于微冲量测量的扭摆结构示意图如图2所示,扭摆微冲量测量系统由振动装置、位移测量装置组成,其中枢轴提供横梁摆动的回复力,使横梁能在平衡位置往复摆动。

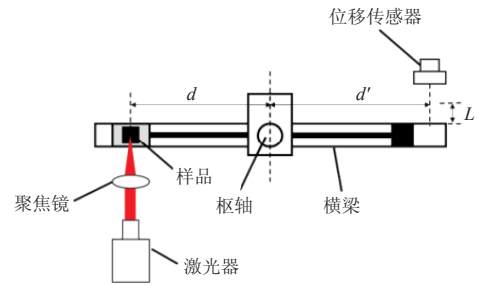


图2 用于微冲量测量的扭摆框架结构示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of a torsion pendulum frame structure for micro impulse measurement

脉冲激光作用产生瞬间冲量后,扭摆振动系统开始往复运动,当扭摆横梁由平衡位置开始运动到第一次极值扭转角时,冲量 $I$ 为

$$I = \frac{J\omega_n}{d} \exp\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right) \theta_{\max} \quad (2)$$

其中: $\theta$ 为横梁的扭转角; $J$ 为扭摆系统的转动惯量; $d$ 为外力的作用力臂; $\zeta$ 为扭摆系统的阻尼比; $\omega_n$ 为固有频率。

扭摆微冲量测量系统横梁往复振动的角度较小,因此可近似得到

$$\theta_{\max} \approx \sin\theta_{\max} \approx \frac{L}{d'} \quad (3)$$

其中: $L$ 为扭摆系统振动横梁上测量臂 $d'$ 往复运动中的最大摆动线位移,该线位移可高精度由位移传感器测量得到,则冲量表达式(2)可进一步表示为

$$I = \frac{J\omega_n}{dd'} \exp\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right) L \quad (4)$$

其中: 系统参数测量臂 $d'$ 、激光烧蚀作用力臂 $d$ 可直接测量; 固有振动频率 $\omega_n$ 、阻尼比 $\zeta$  (和振动横梁转动惯量 $J$ )可通过标定得到, 利用位移传感器测量出在脉冲激光作用后扭摆系统的系统响应; 最后选取第一个极值点, 测量臂摆动的最大线位移, 即可求得微冲量大小, 求得微冲量后, 即可由式(1)求得待测样品的冲量耦合系数。

## 2 小行星陨石样品

### 2.1 试验样品来源

小行星陨石是小行星进入大气后到达地面的残余物, 小行星是陨石的母体, 小行星陨石是地面研究小行星特性的重要样本。因此, 在本文激光烧蚀近地小行星的试验研究中, 选取小行星陨石作为试验样品, 以获得接近烧蚀真实小行星的结果。由于小行星陨石数量有限, 还选取了天然玄武岩、浮石、特制小行星模拟物等作为石质(S型)小行星和含孔隙度小行星的模拟物。

在冲量耦合特性测量试验中, 选取二连浩特002(L5)陨石、NWA13530(CV3)陨石作为试验样品, 其中“二连浩特002(L5)”和“NWA13530(CV3)”陨石为经过国际陨石学会命名的石质(S型)和碳质(C型)小行星陨石。此外, 玄武岩一般作为S型小行星的地球天然矿物模拟物。本文将3种样品加工为 $2.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$ 长方体形状, 如图3所示。

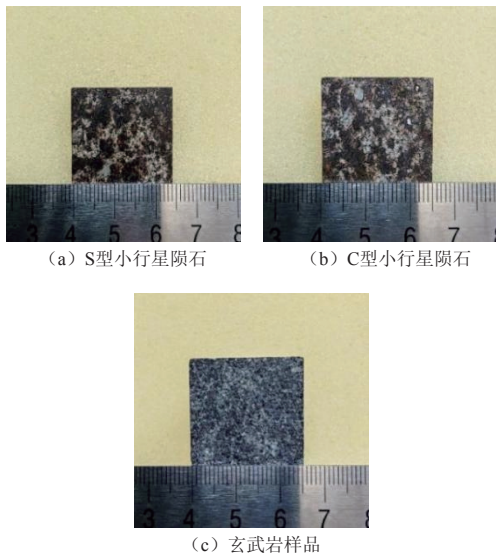


图3 试验模拟样品  
Fig. 3 Experimental simulation samples

此外, 真实小行星或多或少存在一定的孔隙率, 特别是碎石堆结构小行星孔隙率可能高达60%以上。因此有必要开展孔隙率对冲量耦合系数影响规律的研究。针对孔隙率可能对烧蚀驱动效率的影响, 选取4种不同孔隙率的小行星模拟物, 包括天然浮石(孔隙率 $>50\%$ )和3种不同的孔隙率(孔隙率分别为 $5\% \sim 10\%$ 、 $15\% \sim 20\%$ 、 $30\% \sim 35\%$ )特制S型小行星模拟物样品, 如图4所示。特制模拟物的主要成分如表1所示, 孔隙率大小通过质量体积方法测量, 不同的孔隙率范围通过控制制备过程中的压实压力实现。

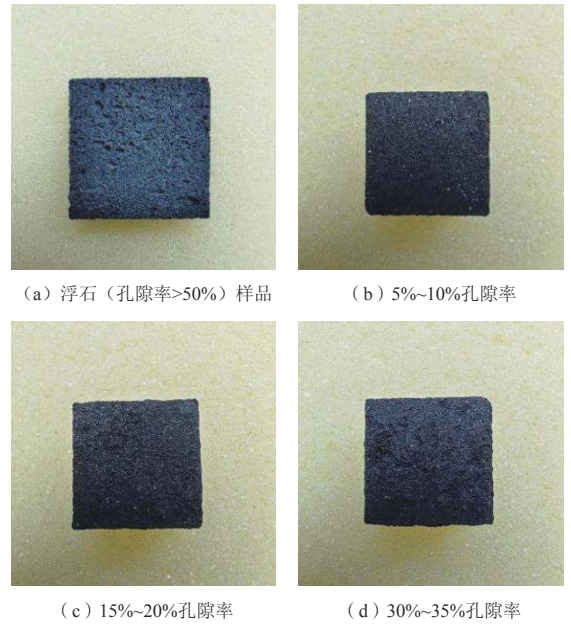


图4 不同孔隙率试验样品  
Fig. 4 Experimental samples with different porosities

表1 特制S型小行星模拟物配比  
Table 1 Special S-type asteroid simulator ratio wt%

模拟物	数值
橄欖石	38.7
輝石	31.3
钠长石	9.4
蛇纹石	/
黄铁矿	7.2
磁铁矿	/
铁	10.6
镍	0.8
碳粉	/

### 2.2 试验方法

试验过程中所用的试验设备为扭摆微冲量测量装置、DAWA-200 YAG和SGR-Extra-08脉冲激光器, 分别在试验室常温常压环境和真空环境( $10^{-3}\text{ Pa}$ )开展。扭摆微冲量测量装置如图5所示, 微冲量测量分辨率为 $10^{-7}\text{ N}\cdot\text{s}$ , 主要性能参数如表2所示。试验时扭摆微冲量

测量装置放置于真空舱室中,真空度可在常压至优于 $10^{-3}$  Pa的范围内调节。

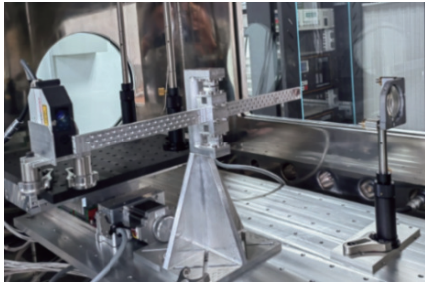


图5 扭摆微冲量测量装置

Fig. 5 Torsion pendulum micro impulse measurement device

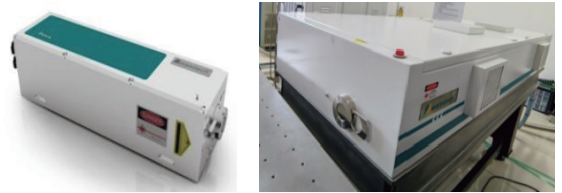
表2 扭摆微冲量测量装置参数

Table 2 Parameters of torsion pendulum micro impulse measurement device

系统参数	标定值
测量臂 $d$ /mm	193.5
烧蚀力臂 $d$ /mm	200.1
固有频率 $\omega_n$ (rad·s <sup>-1</sup> )	5.194
阻尼比	$1.989 \times 10^{-3}$
转动惯量 $J$ /(kg·m <sup>2</sup> )	$1.839 \times 10^{-3}$

试验选用的DAWA-200 YAG和SGR-EXTRA YAG脉冲激光器如图6所示。其中DAWA-200激光器最大能量200 mJ、激光波长1 064 nm、激光脉宽10 ns、最大激光发射频率20 Hz。SGR-EXTRA YAG激光器最大能

量8 J、激光波长1 064 nm、激光脉宽10 ns、最大激光发射频率10 Hz。



(a) 200 mJ脉冲激光器

(b) 8 J脉冲激光器

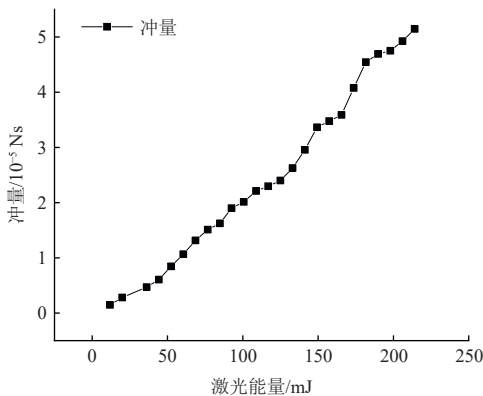
图6 试验选用的脉冲激光器

Fig. 6 Pulsed laser selected for experiment

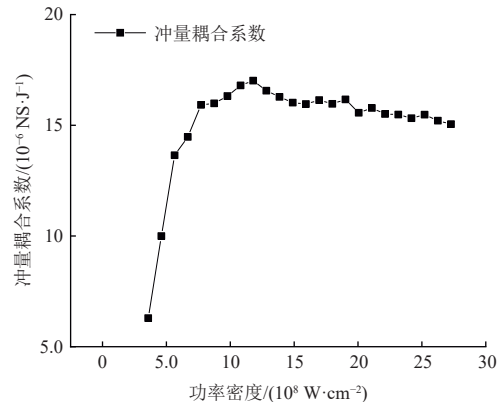
### 3 试验结果分析

#### 3.1 激光与类小行星材料相互作用的试验结果

真空环境下单脉冲激光与天然玄武岩样品相互作用的冲量和激光能量的关系,以及冲量耦合系数和功率密度的关系曲线如图7所示。由图7可知,冲量大小随激光能量的增加而增大。随着激光功率密度的增加,小行星模拟物表面材料发生气化,此时随着功率密度的增加,冲量耦合系数迅速增加。当激光功率密度增加到一定程度时烧蚀材料进一步等离子体化,冲量耦合系数达到最大值,此后随着功率密度的继续增加,更多的能量被等离子体屏蔽,冲量耦合系数并没有进一步的增加,甚至出现缓慢下降的趋势。



(a) 激光能量-冲量



(b) 功率密度-冲量耦合系数

图7 脉冲激光与玄武岩样相互作用典型关系曲线

Fig. 7 Typical relationship curve between pulse laser and basalt sample interaction

#### 3.2 激光烧蚀驱动效率影响规律

##### 1) 试验环境对冲量耦合系数的影响

针对试验环境可能对冲量耦合系数造成影响,选取天然玄武岩样品分别在大气环境和真空环境( $10^{-3}$  Pa)下测量冲量耦合系数,获得的冲量耦合系数变化曲线如图8所示。

由图8可知,真空环境和大气环境冲量耦合系数随功率密度的变化趋势相同;真空环境和大气环境的冲量耦合系数有显著差异,大气环境冲量耦合系数大于真空环境,玄武岩在大气环境中的冲量耦合系数是真空环境的近4倍。产生如此差异的原因一方面是由于真空中烧蚀羽流自由扩散,消除了大气中气体及颗粒物的

反向压力作用<sup>[16]</sup>; 另一方面可能是由于大气中存在烧蚀物质与大气成分的剧烈反应, 进而可能产生较为强烈的激光维持的燃烧波 (Laser-Supported-Combustion) 或爆轰波 (Laser-Supported-Detonation), 因此增加了耦合作用强度<sup>[19]</sup>。

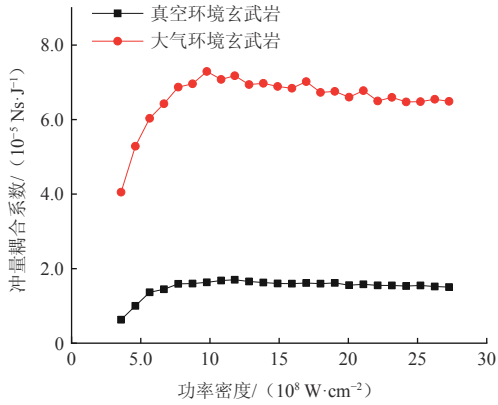


图 8 玄武岩在大气环境和真空环境 (10<sup>-3</sup> Pa) 下的冲量耦合系数变化规律

Fig. 8 Variation law of impulse coupling coefficient of basalt in atmospheric and vacuum environments (10<sup>-3</sup> Pa)

由于真空环境和常压大气环境下小行星冲量耦合系数的差异, 为尽可能的获取接近真实环境的冲量耦合规律, 试验应在真空环境下开展。

### 2) 孔隙率对冲量耦合系数的影响

真空环境下, 3种不同孔隙率的特制模拟物 (孔隙率分别为5%~10%、15%~20%、30%~35%) 和浮石 (孔隙率大于50%) 在激光作用下的冲量耦合系数规律如图9所示。

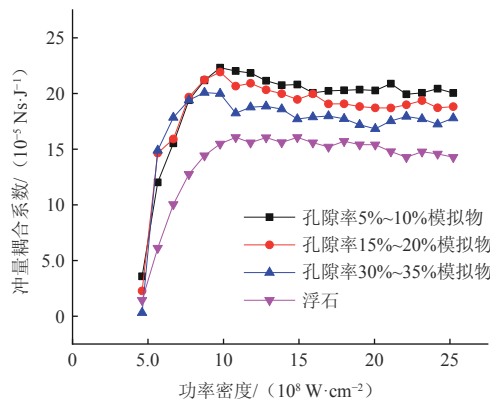


图 9 不同孔隙率材料冲量耦合系数对比

Fig. 9 Comparison of impulse coupling coefficients of materials with different porosity

由图9可知, 不同孔隙度材料的冲量耦合系数随功率密度的变化趋势相同; 随着孔隙度的增加, 冲量耦合系数整体呈下降趋势。由此可见, 小行星孔隙率会对激光烧蚀驱动防御小行星的效率产生一定的影响,

较高的孔隙率会在一定程度降低防御的效率。

### 3) 冲量耦合系数拟合函数模型

如图7所示, 由于激光与小行星物质作用的机理不同, 冲量耦合系数 $C_m$ 与注入表面的激光功率密度 $I$ 存在极大值关系。 $I < I_0$ 时, 随着功率密度的升高, 表面发生气化直至等离子体化, 大部分区间内气化机理起主要作用;  $I > I_0$ 时, 表面等离子体形成机理起主要作用, 随着功率密度的继续升高, 等离子体对激光能量的屏蔽作用越发明显。因此,  $C_m=f(I)$ 是分段的复杂非线性函数。

工程中希望选择简单方便的 $C_m=f(I)$ 函数形式, 以便于应用, 同时其函数关系能够反映激光与小行星物质相互作用机理。美国学者菲普斯等<sup>[20]</sup>针对激光烧蚀空间碎片开展了大量的冲量耦合系数测量试验, 并通过试验数据分析, 提出了曲线拟合方法, 即

$$\ln C_m = \begin{cases} \ln C_{\max} + A [\ln(I_0/I)]^B, & I < I_0 \\ \ln C_{\max} + A [\ln(I/I_0)]^B, & I > I_0 \\ \ln C_{\max}, & I = I_0 \end{cases} \quad (5)$$

试验获得的S型陨石和C型陨石的冲量耦合系数如图10所示, 依据上述曲线拟合方法, 可得到S型和C型小行星的冲量耦合系数拟合函数模型如式(6)和(7)所示。

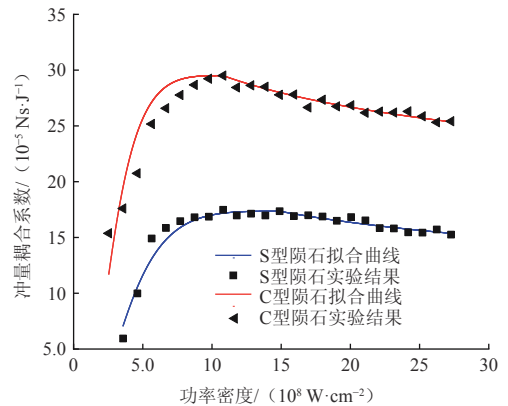


图 10 S型和C型陨石冲量耦合系数曲线

Fig. 10 S-type and C-type meteorite impulse coupling coefficient curve

S型小行星冲量耦合系数拟合函数模型为

$$\lg C_m = \begin{cases} \lg C_{\max} - [1.178 \lg(I_0/I)]^3, & I < I_0 \\ \lg C_{\max} - 0.200 4 \lg(I/I_0), & I > I_0 \\ \lg C_{\max}, & I = I_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $C_{\max} = 1.735 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s} / \text{J}$ ,  $I_0 = 1.489 \times 10^9 \text{ W} / \text{cm}^2$ 。

C型小行星冲量耦合系数拟合函数模型为

$$\lg C_m = \begin{cases} \lg C_{\max} - [1.173 \lg_{10}(I_0/I)]^3, & I < I_0 \\ \lg C_{\max} - 0.163 3 \lg_{10}(I/I_0), & I > I_0 \\ \lg C_{\max}, & I = I_0 \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $C_{\max}=2.950 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{J}$ ,  $I_0=1.081 \times 10^9 \text{ W}/\text{cm}^2$ 。

比较S型和C型小行星冲量耦合系数拟合函数模型可知, C型小行星冲量耦合系数整体大于S型小行星, 且C型小行星达到最大冲量耦合系数所需的脉冲激光功率密度低于S型小行星, 因此激光烧蚀C型小行星的效率更高, 这可能与C型和S型小行星成分的差异性有关, 两者组成成分的差异使得其与激光相互作用的强烈程度不同, C型小行星与激光作用时产生的等离子体反喷强度更高, 冲量耦合效率更高。

### 3.3 激光烧蚀驱动质量变化规律

激光烧蚀偏转防御小行星是一种中长期防御手段, 在激光的长时间作用下, 小行星质量是缓慢减少的, 通过对激光烧蚀类小行星材料质量变化规律的研究, 可为激光烧蚀偏转防御模型提供质量变化规律输入。

试验过程中, 固定光斑直径1 cm, 激光脉宽10 ns, 重复频率5 Hz时, 记录激光脉冲在能量为3、4、5 J时分别作用天然玄武岩样品100次(20 s)、200次(40 s)、300次(60 s)后的样品质量变化情况, 3种能量条件下作用的实际出光平均能量分别为2.22、3.81、5.57 J。试验结果如表3所示。

表3 3种激光能量烧蚀试验质量变化记录表

Table 3 Record of quality changes in three laser energy ablation experiments

试验编号	试验前/g	100次/g	200次/g	300次/g	变化量/g
3 J	3-1	64.166	64.153	—	0.013
	3-2	65.007	—	64.989	0.018
	3-3	68.448	—	—	68.406
4 J	4-1	69.058	69.035	—	0.023
	4-2	67.918	—	67.883	0.035
	4-3	68.341	—	—	68.291
5 J	5-1	64.369	64.342	—	0.027
	5-2	63.707	—	63.664	0.043
	5-3	71.899	—	—	71.848

由表3可以获得3种激光能量下不同烧蚀次数(烧蚀时间)对应的样品质量变化量, 变化规律如图11所示。由图11可知, 光斑大小为1 cm时, 3种激光能量条件下样品的质量变化量均随着烧蚀时间的增加而增大; 激光能量较低时, 质量变化量随着烧蚀时间的增加呈现递增趋势(斜率增加), 而随着能量的提高, 质量变化量的斜率减小。试验结果表明, 在3~5 J范围内, 存在能量不是最大而质量变化最快的激光能量, 在对应的功率密度下, 激光对试验样品的烧蚀效率最佳。在实施激光烧蚀驱动防御小行星任务时, 希望以最小的激光能量需求实现最大的防御效果, 试验表明在特定的激光功率密度条件下, 可以实现以较小的激光能量需求实现最佳质量烧蚀效率的目的。

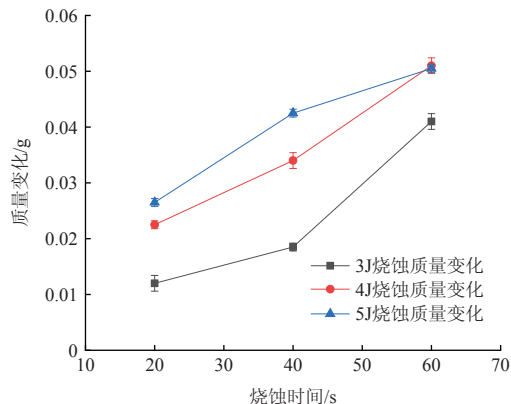


图11 不同烧蚀时间对应的样品质量变化规律

Fig. 11 Variation pattern of sample quality corresponding to different ablation times

## 4 结论

激光烧蚀防御技术是应对潜在威胁近地小行星撞击风险的有效手段。本文针对脉冲激光烧蚀小行星的驱动效率问题, 选用真实小行星陨石、特制小行星模拟物等试验样品开展了试验研究, 结果表明:

1) 试验环境对激光烧蚀小行星的冲量耦合系数存在较大的影响。在大气环境下由于激光与模拟物、大气的综合反应过程, 使得羽流更加剧烈, 反喷强度更强。此外反喷羽流还受到大气中气体和颗粒物的反向压力, 进一步增强了反作用效果。因此大气环境下激光烧蚀冲量耦合系数明显大于真空环境, 为反映真实的激光与小行星作用过程, 试验应在真空环境下开展。

2) 高孔隙率材料会对激光烧蚀驱动效率产生一定的影响。相同激光辐照条件下, 冲量耦合系数随着小行星模拟物孔隙率的升高呈现下降趋势, 激光烧蚀高空隙近地小行星产生的驱动效果要低于孔隙率较低的近地小行星, 在开展防御任务设计和评估工作的过程中应予以关注。

3) 获得了S型陨石和C型陨石的冲量耦合系数变化规律, 结合分段函数拟合方法, 构建了S型/C型小行星的冲量耦合系数拟合函数模型, 拟合函数模型可作为激光烧蚀驱动防御近地小行星任务的作用模型输入。拟合函数模型显示, C型小行星最大冲量耦合系数大于S型小行星, 因此激光烧蚀冲量耦合效率更高。

4) 不同激光能量和作用时间的烧蚀试验显示存在使得小行星质量烧蚀效率最佳的激光功率密度, 在此功率密度下, 可实现以较小能量代价产生较大的质量变化。激光烧蚀驱动防御近地小行星是一种中长期防御技术, 在激光的长时间作用下, 小行星质量缓慢减少, 出于提高防御效率目的, 在任务设计的过程中综

合考虑冲量耦合系数与烧蚀质量变化率确定激光性能参数,综合评估防御效率。

## 参 考 文 献

- [1] 龚自正,李明,陈川,等.小行星监测预警、安全防御和资源利用的前沿科学问题及关键技术[J].*科学通报*,2020,65(5):346-372.  
GONG Z Z,LI M,CHEN C,et al. The frontier science and key technologies of asteroid monitoring and early warning, security defense and resource utilization[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(5): 346-372.
- [2] 李毅,陈鸿,兰胜威,等.一种提升近地小行星防御中拦截效率的方法[J].*航天器环境工程*,2017,34(6):585-592  
LI Y,CHEN H,LAN S W,et al. A method to improve interception efficiency in the defense against near-Earth asteroids[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2017, 34(6): 585-592
- [3] NASA. Center for Near Earth Object Studies of NASA, CNEOS Discovery Statistics of Near-Earth Asteroids[EB/OL]. (2021-7-26) [2023-7-6]. <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/>.
- [4] AHRENS T J, TAKATA T, O'KEEFE J D, et al. Impact of comet Shoemaker-Levy 9 on Jupiter[J]. *Geophysical Research Letters*, 1994, 21: 1087-1090.
- [5] POPOVA O P, JENNISKENS P, EMEL'YANENKO V, et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery and characterization[J]. *Science*, 2013, 342(6162): 1069-1073.
- [6] BARBEE B W, WIE B, STEINER M, et al. Conceptual design of a flight validation mission for a hypervelocity asteroid intercept vehicle[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 106: 139-159.
- [7] LOMOV I, HERBOLD E B, ANTOUN T H, et al. Influence of mechanical properties relevant to standoff deflection of hazardous asteroids[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 58: 251-259.
- [8] CHENG A F, ATCHISON J, KANTSIPER B, et al. Asteroid impact and deflection assessment mission[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 115: 262-269.
- [9] WIE B, ZIMMERMAN B, LYZHOFT J, et al. Planetary defense mission concepts for disrupting/pulverizing hazardous asteroids with short warning time[J]. *Astrodynamics*, 2017, 1: 3-21.
- [10] MCINNES C R. Near Earth Object orbit modification using gravitational coupling[J]. *Journal of Guidance Control Dynamics*, 2007, 30: 870-873.
- [11] LU E T, LOVE S G. Gravitational tractor for towing asteroids[J]. *Nature*, 2005, 438: 177-178.
- [12] LUBIN P, HUGHES G B, BIBLE J, et al. Toward directed energy planetary defense[J]. *Opt Engineering*, 2014, 53: 025103.
- [13] Vasile M, Maddock C A. Design of a formation of solar pumped lasers for asteroid deflection[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 50(7): 891-905.
- [14] OLDS J, CHARANIA A C, SCHAFFER M G. Multiple mass drivers as an option for asteroid deflection missions[C]//Proceedings of 2007 Planetary Defense Conference. Washington DC: PDC, 2007.
- [15] BOMBARDELLI C, URRUTXUA H, MERINO M, et al. The ion beam shepherd: a new concept for asteroid deflection[J]. *Acta Astronautica*, 2013, 90: 98-102.
- [16] GIBBINGS A, VASILE M, WATSON I, et al. Experimental analysis of laser ablated plumes for asteroid deflection and exploitation[J]. *Acta Astronautica*, 2013, 90(1): 85-97.
- [17] BRASHEARS T, LUBIN P, HUGHES B G, et al. Directed-energy deflection laboratory measurements of common space-based targets[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9981: 1-8.
- [18] SLOANE J B, SEDWICK R J. Direct force measurement of pulsed laser ablation of asteroid simulants[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2020, 36(2): 1-9.
- [19] 李修乾,陈谷仓.烧蚀模式激光推进[M].北京:国防工业出版社,2012.  
LI X Q, CHEN G C. Laser-ablation propulsion[M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 2012.
- [20] 洪延姬,金星.激光清除空间碎片方法[M].北京:国防工业出版社,2013.

作者简介:

**宋光明**(1987-),男,工程师,主要研究方向:近地小行星防御,空间碎片环境及航天器防护。

通信地址:北京市海淀区友谊路104号院(100094)

电话:(010)68746609

E-mail: [guangming.012@163.com](mailto:guangming.012@163.com)

**龚自正**(1964-),男,研究员,主要研究方向:近地小行星防御、空间碎片环境治理与航天器防护。**本文通信作者。**

通信地址:北京市海淀区友谊路104号院(100094)

电话:(010)68746609

# Experimental Study on Influence of Near-Earth Asteroid Material Characteristics on Laser Ablation Driving Efficiency

SONG Guangming<sup>1</sup>, REN Siyuan<sup>1</sup>, GONG Zizheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Pinliang<sup>1</sup>,  
CHEN Chuan<sup>1</sup>, WU Qiang<sup>1,2</sup>, CAO Yan<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;

2. Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering Laboratory, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Based on the issues closely related to the laser driving effect and the characteristics of asteroid materials, experimental research was conducted on the ablation driving efficiency of pulsed laser on near Earth asteroid materials. Different materials and porosity of asteroid like test samples were selected to measure the impulse coupling law. The experimental results show that under the action of pulsed laser ablation, C-type asteroids have higher impulse coupling efficiency than S-type asteroids; As the porosity of asteroids increases, the efficiency of impulse coupling decreases, and the efficiency of laser ablation driving decreases. In addition, experiments were conducted on the changes in mass of laser ablated asteroid like materials, and the results showed the existence of a laser power density that maximizes the efficiency of asteroid mass ablation. For threat asteroids that require long-term warning time, reducing their mass at the fastest rate while ablating and deflecting their orbits can further improve defense efficiency and achieve defense objectives.

**Keywords:** laser driving; ablation; porosity of asteroids ; warning time

## Highlights:

- Measurements of impulse coupling characteristics of pulse laser ablation of asteroid meteorites.
- Obtained the influence of porosity and other factors on the impulse coupling coefficient.
- Established fitting function models for impulse coupling coefficient of pulse laser ablation of S-type and C-type asteroids.
- Compared to S-type asteroids, C-type asteroids have higher laser ablation efficiency.
- The determination of laser parameters should comprehensively consider the impulse coupling coefficient and the mass ablation rate of asteroids.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]