

532 nm/1 064 nm 激光烧蚀铝靶冲量耦合特性实验研究

文 明, 李南雷, 吴 洁

(航天工程大学 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

摘 要: 激光清除空间碎片技术在厘米级空间碎片清除中具有重要的应用前景。进行了激光烧蚀典型空间碎片材料的冲量耦合特性实验研究。实验中采用 532 nm/1 064 nm 波长, 8 ns/15 ns 脉宽的激光烧蚀金属铝靶材, 运用扭摆测试系统测量了烧蚀冲量, 并分析了不同激光参数对冲量耦合系数的影响。实验结果表明, 铝靶冲量耦合系数随着激光功率密度的增加是先上升后下降的变化趋势, 存在最优冲量耦合系数; 激光烧蚀铝靶过程以气化机制为主时, 减小激光波长或是增加脉宽都可有效提高冲量耦合系数; 烧蚀过程以离化机制为主导时, 实验结果表明 532 nm 波长激光的等离子体屏蔽较弱, 在等离子体形成初期实现最优冲量耦合。

关键词: 空间碎片清除; 激光烧蚀; 冲量耦合; 激光推进

中图分类号: TN2; V43 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.S106005

Experimental study on impulse coupling characteristics of 532 nm/1 064 nm laser ablated Al target

Wen Ming, Li Nanlei, Wu Jie

(State Key Laboratory of Laser Propulsion and Application, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: Using laser in centimeter scale space debris removal has important application prospect. Impulse coupling characteristics of laser ablated material of space debris was experimentally studied. Laser of 532/1 064 nm wavelength and 8/15 ns pulse width were used in experiment, and aluminum as the ablation target. Torsional balance system was used to measure impulse, and influence of laser parameter on impulse coupling coefficient was studied. Experiment results show that impulse coupling coefficient of Al shows a trend from rise to decline, and exists the optimal value. When ablation depended on gasification mechanism, decrease wavelength or increase pulse width can effectively improve impulse coupling coefficient; When ablation depended on ionization mechanism, plasma shielding effect of 532nm laser is weakened, achieving the optimal impulse coupling coefficient on initial formation of plasma.

Key words: space debris removal; laser ablation; impulse coupling; laser propulsion

收稿日期: 2017-06-11; 修订日期: 2017-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(11372357)

作者简介: 文明(1978-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事激光航天应用技术方面的研究。Email: wujiewm@163.com

0 引言

随着太空中空间碎片数目急剧增加,国内外学者一直在探寻清除厘米级空间碎片的有效方法,高能纳秒脉冲激光清除方法脱颖而出,受到各个航天大国的重视^[1-4]。厘米量级的空间碎片对航天器的威胁最大,用高能激光清除被认为是减少其危害性的重要手段之一^[5-8]。激光清除空间碎片技术是激光技术与推进技术的交叉和融合。高能激光清除厘米量级空间碎片的过程是通过激光辐照空间碎片,引起等离子体反喷形成反喷冲量,产生速度增量,降低碎片的近地点轨道高度,使其再入大气层,在气动阻力作用下烧毁。

激光清除空间碎片中的一个重要参数就是激光烧蚀冲量耦合系数,单位入射激光能量使靶材料获得的冲量称为激光与靶的冲量耦合系数,冲量耦合系数越大,表明激光能量转换为碎片动量的能力越强。因此,冲量耦合系数是激光清除空间碎片建模仿真计算中的重要参数,通过实验测量空间碎片典型材料冲量耦合系数,是激光清除空间碎片研究中的关键环节。

实验研究了 532 nm 和 1 064 nm 激光辐照金属铝靶材的冲量耦合特性。运用扭摆系统测量了激光烧蚀冲量和冲量耦合系数,与激光烧蚀铝靶理论计算模型进行了对比。分析了波长、脉宽、功率密度对冲量耦合性能的影响,得到了铝靶冲量耦合系数的变化规律。

1 实验系统设置

1.1 实验装置

实验使用 Nd:YAG 激光器作为能量源,激光波长分别为 532 nm 和 1 064 nm,脉宽分别为 8 ns 和 15 ns,最大能量 200 mJ,激光束经过聚焦后功率密度可达 10^9 W/cm^2 量级。实验中使用金属铝作为靶材,进行激光烧蚀冲量耦合实验研究。实验系统设置如图 1 所示,实物如图 2 所示。

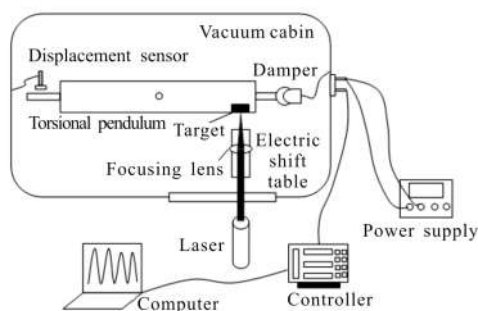


图 1 实验系统示意图

Fig.1 Schematic of experimental system

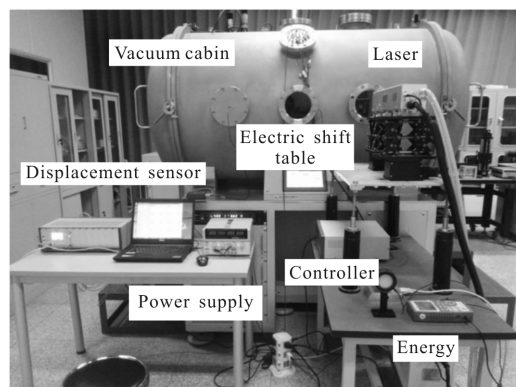


图 2 实验系统实物图

Fig.2 Physical drawing of experimental system

1.2 实验系统参数标定

根据扭摆振动模型可知^[9-11],推力作用下的扭摆系统响应为:

$$\theta(t) = \frac{L_f}{J\omega_d} \int_0^t f(\tau) e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)} \sin\omega_d(t-\tau) d\tau = \frac{L_f}{J\omega_d} \int_0^t f(t-\tau) e^{-\zeta\omega_n\tau} \sin\omega_d\tau d\tau \quad (1)$$

如果推力作用时间 T_0 很小,认为推力瞬间作用,推力表示为 $f(\tau) = S\delta(\tau)$, S 为推力的冲量,可得:

$$\theta(t) = \frac{SL_f}{J\omega_d} \int_0^t \delta(\tau) e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)} \sin\omega_d(t-\tau) d\tau = \frac{SL_f}{J\omega_d} e^{-\zeta\omega_n t} \sin\omega_d t \quad (2)$$

这就是冲量瞬间作用下系统响应。

当阻尼比 $\zeta = 0$ 时,极值点扭转角最大($\sin\omega_d t = 1$),最大扭转角为:

$$\theta_{\max} = \frac{SL_f}{J\omega_d} \quad (3)$$

上式给出了瞬间作用冲量与最大扭转角之间的关系。冲量 I 与最大转角 θ_{\max} 的关系为:

$$I = \frac{J\omega_n}{d} \exp\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right) \theta_{\max} \quad (4)$$

由于微冲量导致的横梁摆动满足小角度假设条件,因此有

$$\theta_{\max} \approx \sin\theta_{\max} \approx \frac{L}{d'} \quad (5)$$

将公式(5)代入公式(4)得到冲量 I 与位移传感器测量值 L 的关系为:

$$I = \frac{J\omega_n}{dd'} \exp\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right) L \quad (6)$$

式中:扭摆转动惯量 J 、振动频率 ω_n 、阻尼比 ζ 、烧蚀力臂 d 和测量力臂 d' 为测量系统参数,运用脉冲响应法标定得到^[12-13]。系统参数的标定结果见表 1 所示。

表 1 系统参数标定结果

Tab.1 Calibration results of system parameter

Parameter	Result	Standard deviation
Ablation arm d/mm	90	0.54
Measure arm d'/mm	145	0.45
Vibration frequency $\omega_d/rad \cdot s^{-1}$	4.258 98	0.057 63
Damping ratio ζ	$9.299\ 72 \times 10^{-4}$	$2.828\ 8 \times 10^{-4}$
Moment of inertia $J/kg \cdot m^2$	$3.689\ 26 \times 10^{-4}$	$8.926\ 5 \times 10^{-6}$

1.3 实验系统的测量误差分析

系统响应公式(2)中的系数是采用系统参数标定方法得到的,总是存在标定误差,这种标定误差将造成冲量测量误差。冲量测量时一般选取前一个周期的极值点,即 $\omega_d t \leq 2\pi$,由于转动惯量误差 dJ 、振动频率误差 $d\omega_d$ 和阻尼比误差 $d\zeta$ 等,造成冲量测量误差 dS 。

由于极值点处($\sin\omega_d t=1$),有

$$d(\sin\omega_d t) = \cos\omega_d t d(\omega_d t) = 0 \quad (7)$$

即 $\sin\omega_d t$ 项误差影响可忽略不计。

由于

$$d(e^{-\zeta\omega_d t}) = d\left(e^{-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\omega_d t}\right) = -\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\omega_d t e^{-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\omega_d t} \left[\frac{1}{1-\zeta^2} \frac{d\zeta}{\zeta} + \frac{d\omega_d}{\omega_d} \right] \quad (8)$$

阻尼比很小且 $\omega_d t \leq 2\pi$,该项误差相对振动频率误差和阻尼比误差可忽略不计。即有

$$S \approx \frac{J\omega_d}{L_f} \theta(t) \quad (9)$$

可得误差和相对误差分析公式

$$dS \approx \frac{\omega_d}{L_f} \theta(t) dJ + \frac{J}{L_f} \theta(t) d\omega_d + \frac{J\omega_d}{L_f} d[\theta(t)] - \frac{J\omega_d \theta(t)}{L_f^2} dL_f \quad (10)$$

$$\frac{dS}{S} \approx \frac{dJ}{J} + \frac{d\omega_d}{\omega_d} + \frac{d[\theta(t)]}{\theta(t)} - \frac{dL_f}{L_f} \quad (11)$$

式中:扭摆的扭转角分辨率为 10^{-6} rad 量级,扭转角为 10^{-3} rad 量级,量级上 $|d[\theta(t)]/\theta(t)| < 0.1\%$,因此扭转角误差可忽略不计,力臂长度采用千分尺测量,可保证 $|dL_f/L_f| < 0.2\%$,力臂的误差可忽略不计。因此,对于设计和制作的扭摆冲量测量系统,相对误差为:

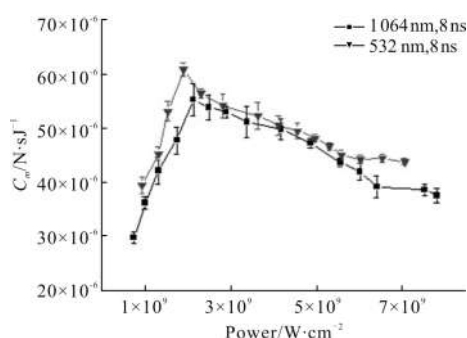
$$\left| \frac{dS}{S} \right| \leq \left| \frac{dJ}{J} \right| + \left| \frac{d\omega_d}{\omega_d} \right| \quad (12)$$

式中:通过标定转动惯量相对误差为 2.42%,振动频

率的相对误差为 1.35%,因此,冲量实验测量的相对误差小于 5%。

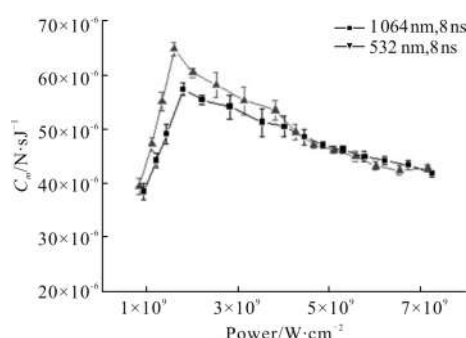
2 实验结果讨论

实验中选取了 15 个功率密度,涵盖了激光烧蚀铝靶的气化机制和离化机制,并对每个功率密度进行了五次测量,得到冲量耦合系数的平均值和误差,实验结果曲线如图 3、图 4 所示。



(a) 激光脉宽 8 ns

(a) Laser pulse width 8 ns



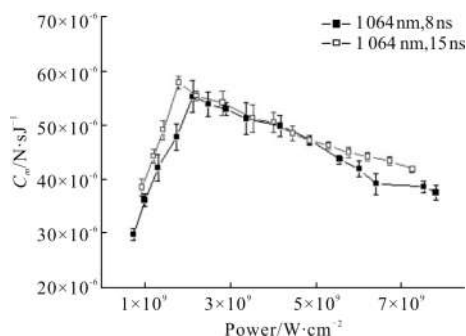
(b) 激光脉宽 15 ns

(b) Laser pulse width 15 ns

图 3 相同激光脉宽,不同波长时的冲量耦合系数曲线

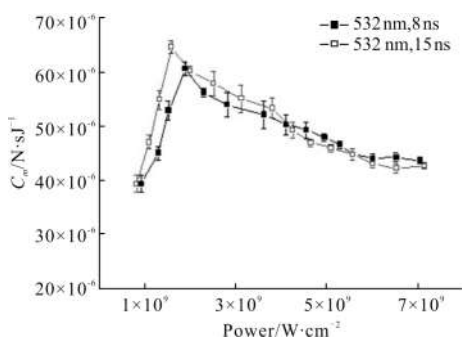
Fig.3 Curves of coupling coefficient of impulse with different

laser wavelength



(a) 激光波长 1 064 nm

(a) Laser wavelength 1 064 nm



(b) 激光波长 532 nm

(b) Laser wavelength 532 nm

图 4 相同激光波长,不同脉宽时的冲量耦合系数曲线

Fig.4 Curves of coupling coefficient of impulse with different laser pulse width

2.1 激光波长对冲量耦合的影响

实验测得的空间碎片材料在不同激光参数下,冲量耦合系数对应不同激光功率密度的实验值。实验结果的相对误差均小于 5%,说明实验结果的重复性较好。激光脉宽相同时,不同波长参数下的激光烧蚀冲量耦合系数曲线。从结果可知,激光波长主要影响着气化机制下的冲量耦合和冲量耦合最优值。在气化机制下,由于靶材对不同激光波长的吸收深度和热扩散不同,导致冲量耦合系数差别明显,冲量耦合系数从高到低是 532 nm、1 064 nm;在等离子机制下,波长对冲量耦合作用的影响不再明显,在不同波长下均发生了等离子体屏蔽现象,导致冲量耦合系数迅速下降。

下面分析激光波长对冲量耦合最优值的影响。不同波长时,最优冲量耦合值与激光功率密度的对应关系见表 2 所示。根据结果可知,在短波长时,靶

表 2 不同激光波长对应的最优冲量耦合系数

Tab.2 Optimal coupling coefficient of impulse in different laser wavelength

Laser wavelength/ pulse width	1064 nm/ 8 ns	532 nm/ 8 ns	1064 nm/ 15 ns	532 nm/ 15 ns
Optimal coupling coefficient of impulse/ $\mu\text{Ns} \cdot \text{J}^{-1}$	55.2	60.8	57.3	64.7
Laser power density/ $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	2.1×10^9	1.9×10^9	1.8×10^9	1.6×10^9

材需要较小的激光功率密度就能得到更高的冲量耦合系数。但是冲量耦合系数提高的幅度并不可观,从

1 064 nm 的 $55.2 \mu\text{Ns}/\text{J}$ 提高到 532 nm 的 $60.8 \mu\text{Ns}/\text{J}$, 提高了 10.1%。

2.2 激光脉宽对冲量耦合的影响

图 4 为激光波长相同时,不同脉宽参数下的激光烧蚀冲量耦合系数曲线。从结果可知,激光脉宽也主要影响着气化机制下的冲量耦合和冲量耦合最优值。在气化机制下,脉宽增加有助于提高冲量耦合系数;脉宽增加也有助于提高冲量耦合系数的最优值,同时降低了激光功率密度。

3 结 论

运用扭摆装置在真空环境下,测量了不同激光波长、不同激光脉宽激光烧蚀金属铝靶的冲量耦合系数,发现了冲量耦合系数的变化规律如下:

(1) 冲量耦合系数随着激光功率密度的增加是先上升后下降的变化趋势,靶材在不同波长不同脉宽激光烧蚀下的冲量耦合系数均存在最优值;波长 532 nm 脉宽 15 ns 的激光辐照铝靶,在功率密度 $1.6 \times 10^9 \text{ W}/\text{cm}^2$ 时达到最优冲量耦合系数,为 $64.7 \mu\text{Ns}/\text{J}$ 。

(2) 激光烧蚀铝靶的物理过程可分为气化机制和离化机制。当激光功率密度较小时,烧蚀过程以气化机制为主,减小激光波长或是增加脉宽都可有效提高冲量耦合系数。

(3) 当激光功率密度增高,烧蚀过程以离化机制为主导时,减小激光波长或是增加脉宽都增加了冲量耦合系数;同时最优冲量耦合系数对应的激光能量密度减小,说明 532 nm 波长激光的等离子体屏蔽较弱,更有利于靶材的冲量耦合,在等离子体形成初期实现最优冲量耦合。

参考文献:

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

[2] Kaplan M H. Survey of space debris reduction methods[R]. AJAA-2009-6619, 2009.

[3] Bruno Esmiller, Christophe Jacqueland, Hans-Albert Eckel, et al. Space debris removal by ground-based lasers: main conclusion of the European project CLEANSPACE [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(31): 45-54.

[4] James T Early, Camille Bibeau, Claude Phipps. Space debris

- de-orbiting by vaporization impulse using short pulse laser [C]//High-Power Laser Ablation V, Proceedings of SPIE, 2004, 5448(PART1): 441-449.
- [5] 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)
- [6] Remi Soulard, Mark N Quinn, Toshiki Tajima, et al. ICAN: a novel laser architecture for space debris removal [J]. *Acta Astronautica*, 2014, 105: 192-200.
- [7] Zhu Yin, Chen Hao, Xu Rong, et al. Optimized one-dimensional fluid mechanics model for laser cleaning up space debris [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S129002. (in Chinese)
- [8] Phipps C R. A laser optical system to re-enter or lower low earth orbit space debris [J]. *Acta Astronautica*, 2014, 93: 20-33.
- [9] Hong Yanji, Jin Xing, Chang Hao. Discussion of key problems in space based laser centimeter orbital debris removal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0229001. (in Chinese)
- [10] Wang Guangyu, Hong Yanji. Modeling error analysis of micro impulse measurements [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009(30): 509-512. (in Chinese)
- [11] Ye Jifei, Wang Guangyu, Wang Diankai. Measurement of laser ablation micro impulse using the torsion pendulum interferometry [C]//Second International Conference on Advanced Measurement and Test, 2011: 1078-1082.
- [12] Hong Yanji, Jin Xing. Micro Impulse and Micro Thrust Measurements [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [13] Jin Xing, Hong Yanji, Zhou Weijing. A parameter calibration method for torsion pendulum using in micro Thrust and impulse measurement [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015(36): 1554-1559. (in Chinese)