

## 不同制式脉冲激光冲量耦合效应研究

朱孟真,程勇,陈霞,魏靖松,刘旭,曹海源,谭朝勇

(陆军工程大学 军械士官学校光电技术研究所,湖北 武汉 430075)

**摘要:** 激光主动清除空间碎片已经成为国际上的研究热点。碎片靶材在脉冲激光作用下的冲量耦合效应研究是实现碎片清除的基础和关键。基于单摆法模型的高速摄影测量法分别研究了 ns 和 ms 两种不同脉宽制式激光对铝合金小球的冲量耦合系数的变化规律,并从机理上分析了两种制式激光产生冲量耦合系数特性的不同。重点指出 ms 激光能够产生的单位面积冲量远大于 ns 激光,可用于清扫空间碎片。提出采用 ns 与 ms 的复合激光能够有效提高激光的能量利用率,从而获得更大的冲量耦合系数。为激光清扫空间碎片的研究提供了一条新的思路,具有很强的指导意义。

**关键词:** 空间碎片; 冲量耦合; 不同脉宽制式; 复合

中图分类号: TN248 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0805004

## Study on impulse coupling effects of different mode pulsed laser

Zhu Mengzhen, Cheng Yong, Chen Xia, Wei Jingsong, Liu Xu, Cao Haiyuan, Tan Chaoyong

(Institute of Opto-Electronics Technology, Ordnance Non-Commissioned Officer Academy, Army Engineering University, Wuhan 430075, China)

**Abstract:** Laser space debris removal has been the hot research topic around the world. Impulse coupling introduced by high-energy pulsed laser acted on debris is the bedrock and key to achieve debris removal. To study the impulse coupling effects, the aluminium alloy-ball-hanged single pendulum movement were recorded, pushed by ns-pulsed and ms-pulsed laser respectively, with high speed camera. By analyzing the impulse coupling generation theory, difference of the impulse coupling coefficient and the variety rate between the two mode lasers was summarized. Especially, a conclusion was drew that ms-pulsed laser could produce much more unit area impulse coupling than ns-pulsed laser, available for space debris removal. Moreover, compound ms-pulsed laser with ns-pulsed laser could increase the coupling efficiency and obtain higher impulse coupling. The study in this paper indicates a new idea for laser space debris removal, which have strong directive meaning.

**Key words:** space debris; impulse coupling; different mode; complex

收稿日期:2019-03-26; 修订日期:2019-04-26

基金项目:国防预研基金(30102050101);国防科研重点项目(KYWHJWJK1702)

作者简介:朱孟真(1982-),男,讲师,硕士,主要从事固态激光器及损伤效应方面的研究。Email: mzhzhu@163.com

通讯作者:程勇(1961-),男,教授,博士,主要从事固体激光技术与工程方面的研究。Email:gdyjs@263.net

## 0 引言

人类日益频繁的航天活动造成了空间碎片的急剧增多,导致空间碰撞事件频发,严重威胁在轨航天器的安全<sup>[1]</sup>。其中,尺寸为 1~10 cm 的空间碎片,由于数目多无法编目规避,且动能较大结构防护困难,对在轨航天器威胁最大<sup>[2]</sup>。国内外学者提出了多种清除厘米级空间碎片的方法,其中,高能脉冲激光主动清除被认为是最有前景的方法。

学者分别提出了地基、天基等多种激光清除空间碎片的方案<sup>[3-12]</sup>,其中以美国提出的 Orion 计划最为著名<sup>[6-7]</sup>。近些年又提出了 LODR 计划<sup>[8-10]</sup>,分别对地基、天基平台清除小尺寸以及较大尺寸碎片的方案进行了设计和论证。激光清除空间碎片的原理是利用高能脉冲激光烧蚀碎片表面产生的反冲冲量,使空间碎片减速降轨进入大气层并烧毁,从而达到清除的目的。

无论是天基还是地基,激光主动清除空间碎片的关键技术有 3 个:(1) 高能高功率、高光束质量、小型高可靠激光器;(2) 空间碎片的高精度跟瞄技术;(3) 激光驱动碎片变轨技术,包括强激光与碎片作用的冲量耦合效应以及强激光驱动碎片的动力学行为等。因此,研究空间碎片在激光作用下的冲量耦合特性是实现碎片清除的基础和关键。

目前,大量的研究集中在 ns、ps、fs 等短脉冲,甚至紫外光<sup>[11-12]</sup>领域,对 ms 量级脉宽的激光冲量耦合效应的研究鲜有报道,但 ns、ps、fs 以及紫外等短脉宽激光主要用于激光测距、激光雷达等领域<sup>[13]</sup>,均难以实现大能量输出。大量的研究更关注清扫策略和概念方案<sup>[14-16]</sup>,对高能激光器的输出能力考虑较少,鲜有从总的冲量耦合方面进行研究的报道。

从碎片清除的角度看,更重要的是碎片单位面积上能够获得的冲量大小。文中通过分别测量 ns、ms 激光对铝合金靶材的冲量耦合系数随着能量密度/功率密度的变化,分析其变化规律,对比了其特性。从总的冲量耦合以及高能激光器的实现能力角度指出 ms 激光能够获得更大的单位面积冲量,可用于清扫空间碎片。提出采用 ns 激光与 ms 激光的复合能够有效提高激光的能量利用率,从而获得更大的冲量耦合系数。为激光清扫空间碎片的研究提供

了一条新的思路,具有很强的指导意义。

## 1 效应实验

激光主动清除空间碎片的原理是利用高能脉冲激光烧蚀碎片表面产生反冲冲量,使空间碎片减速降轨进入大气层并烧毁。冲量耦合系数反映了单位激光能量所能获得的碎片冲量,定义如下:

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

式中: $m\Delta v$  为激光作用下靶材获得的冲量; $E$  为激光脉冲的能量。冲量耦合系数表征了单位激光能量产生碎片动量的能力大小,单位  $N \cdot s/J$ ,它与激光能量、波长、脉宽、光斑面积以及靶材特性等都有关系,可以用下式表示:

$$C_m \propto f(C, I, \lambda, \tau) \quad (2)$$

费普斯 Phipps 总结了大量的实验结果,认为最佳冲量耦合能量密度与脉宽之间的存在如下关系<sup>[17-20]</sup>:

$$\Phi_{opt} = E/s = 8.5 \times 10^8 \sqrt{\tau} \text{ J/m}^2 \quad (3)$$

空间碎片最常见的物质是铝合金,激光与铝合金相互作用时,不同的激光功率密度对应着不同的作用机制,也会产生不同的冲量耦合效果。当峰值功率密度  $10^3 \sim 10^4 \text{ W/cm}^2$  时,以加热机制为主;当峰值功率密度  $10^4 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$  时,以融化机制为主;当峰值功率密度  $10^6 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$  时,以汽化机制为主;当峰值功率密度  $10^8 \sim 10^{10} \text{ W/cm}^2$  时,以等离子体机制为主。当光斑区功率密度达到材料汽化阈值以上时,在材料表面将产生蒸气以及等离子体,造成靶面烧蚀,等离子体迅速膨胀形成激光支持的爆轰波(LSD),使内能转换为动能,以极高的速度向靶外膨胀飞散,同时在烧蚀面对靶材产生反作用压力,使靶材获得冲量。

当激光脉冲的脉宽很窄,作用于靶材的压力脉冲时间很短,其宏观力学效应可以用冲量表征。按动量守恒定律  $\Delta P = C_m E = M \Delta V = \Delta m V_E$ ,其中  $M$  是碎片质量, $\Delta V$  是碎片获得的速度改变量, $M \Delta V$  是碎片获得的冲量, $\Delta m$  是烧蚀质量, $V_E$  是喷溅物远离靶表面的平均速度, $\Delta m V_E$  是烧蚀反喷产生的冲量。碎片获得的冲量越大,速度改变量越大,越容易减速降轨进入大气层烧毁,达到清除的目的。因此,冲量耦合效应研究的目的是要使碎片获得大的冲量。

### 1.1 原理和方案

目前,测量冲量耦合系数方法较多,主要有单摆

(或复摆)法、水平导轨法、平抛运动法、压力传感器法等<sup>[21-24]</sup>。其中,单摆(或复摆)法简单易用,同时有较多改进方法。作者采用基于单摆法模型的高速摄影法测量小球在不同脉宽制式脉冲激光作用下获得的冲量耦合系数。

设小球的质量为  $m$ ,摆长为  $L$ ,若小球在激光作用下获得的初速度为  $v$ ,水平位置上的改变量为  $\Delta x$ ,竖直位置上的改变量为  $h$ ,摆线偏离平衡位置的夹角为  $\theta$ ,如图 1 所示。

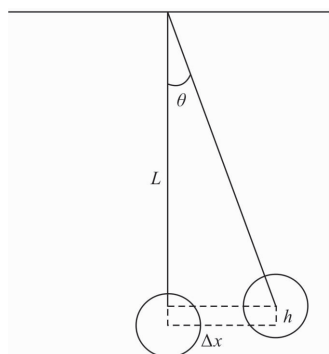


图 1 冲量耦合测量原理图

Fig.1 Sketch of impulse coupling measurement principle

$$h=L(1-\cos\theta) \quad (4)$$

$$\Delta x=L\sin\theta \quad (5)$$

由机械能守恒定律可得:

$$v=\sqrt{2gL(1-\cos\theta)} \quad (6)$$

因此,小球获得的冲量为:

$$I=mv=m\sqrt{2gL(1-\cos\theta)} \quad (7)$$

实验过程中用高速摄像机记录单摆的整个偏转过程,用图像处理软件准确地将水平位移  $\Delta x$  读出从而计算出夹角  $\theta$ ,进而求出小球获得的冲量大小。

激光能量  $E$  可以由能量计测量,由冲量耦合系数  $C_m$  的定义得:

$$C_m=\frac{I}{E}=\frac{m\sqrt{2gL(1-\cos\theta)}}{E} \quad (8)$$

构建了基于单摆原理的测量系统,见图 2 和图 3。将柔软的细铜丝连接于铝合金摆球上,小球悬挂于细铜丝下端构成单摆,细铜丝不可伸长且质量相对于铝合金摆球可忽略不计,铝合金小球质量 2.10 g,直径 10.0 mm,摆线长 450.0 mm。高能激光沿着垂直于摆线的方向照射在小球上,确保激光对小球的冲量垂直于摆线。采用德国 Mikrottron 公司生产的

Cube5 型高速 CCD 记录摆动过程,记录速度可达 20 000 帧/s。高速 CCD 垂直于入射激光束和摆线形成的平面放置,确保摄像机垂直于摆球的摆动平面。

采用脉宽分别为 ns 和 ms 两种制式高能脉冲激光冲击小球,通过测量摆线偏离平衡位置的位移,计算出产生的冲量。

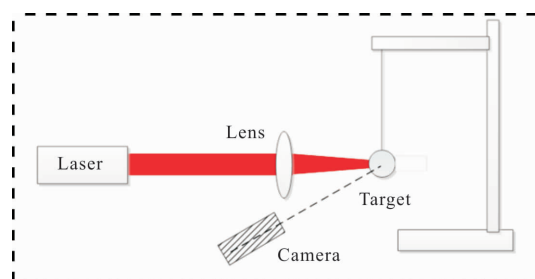


图 2 测量装置示意图

Fig.2 Schematic of experiment setup



图 3 测量实验图

Fig.3 Photo of experimental setup

## 1.2 不同能量密度下 ns 激光的冲量耦合系数

采用最大脉冲能量达 5.6 J、波长 1 064 nm、脉宽 10 ns 的高峰值功率激光冲击小球,如图 4 所示。激光通过 1 m 聚焦透镜离焦作用在小球上,光斑直径 4 mm。调节泵浦电压改变输出能量,记录不同激光能量冲击时小球的摆动位置,计算出冲量耦合系数。代入作用在小球上的光斑半径和激光的脉宽,即可计算出冲量耦合系数与能量密度以及峰值功率密度的关系,分别如图 5 所示。

脉冲激光能量为 J 量级,能量密度处于 10 J/cm<sup>2</sup> 量级,功率密度处于 10<sup>8</sup>~10<sup>9</sup> W/cm<sup>2</sup> 量级。从图中可以看出,冲量耦合系数随着峰值功率密度的增高是先变大后变小。在峰值功率密度达到 10<sup>8</sup> W/cm<sup>2</sup> 时,冲量耦合系数迅速增加,并在峰值功率密度约为 6.58×10<sup>8</sup> W/cm<sup>2</sup> 处,达到最大值为 5.50×10<sup>-5</sup> N·s/J,而后缓慢减小,直到接近 1×10<sup>-5</sup> N·s/J。



图 4 ns 激光冲击小球瞬间  
Fig.4 ns laser impact spherule

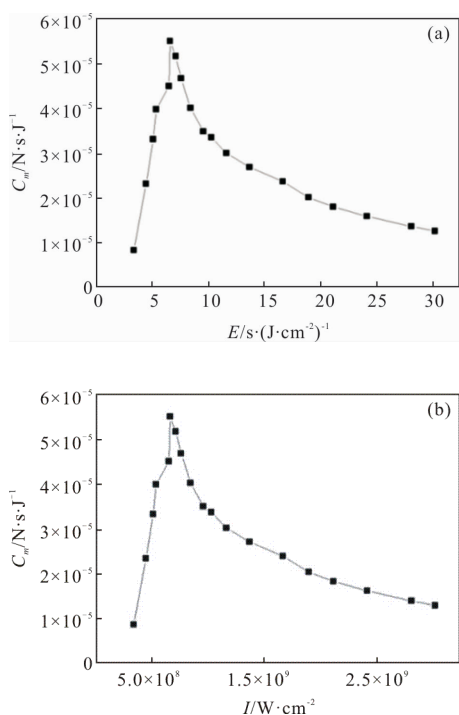


图 5 冲量耦合系数分别随 ns 激光能量密度和功率密度的变化  
Fig.5 Impulse coupling coefficients versus energy density and peak power intensity of ns laser

随着功率密度的增加，激光作用铝合金小球的机制逐渐由融化变为汽化，而后逐渐等离子化。峰值功率密度  $10^8 \text{ W/cm}^2$  即是由汽化机制为主向等离子化为主过渡的阈值，即开始产生激光支持的爆轰波。ns 激光烧蚀靶材形成冲量过程主要包括靶材烧蚀和等离子体羽流膨胀两个基本过程，这两个过程同时进行并且相互影响。蒸气电离形成的等离子体会吸收入射激光能量，阻碍入射激光烧蚀靶材，靶材的烧蚀状态又会影响到进入蒸气/等离子体羽流中的靶物质。冲量耦合系数最大值并非发生在全部是等离子体的时候，而是发生在由汽化快要全部转化为等离子体的阶段。

美国 Sinko, Phipps 等<sup>[25-26]</sup>建立了基于电离度的汽化机制向等离子体机制转化模型，认为激光烧蚀靶材的冲量耦合系数  $C_m$  可表示为：

$$C_m = \zeta C_{mp} + (1 - \zeta) C_{mv} \quad (9)$$

式中： $C_{mp}$  为等离子体与靶产生的冲量耦合系数， $C_{mp} = 5.83A^{-1/8} \psi^{9/16} (\lambda \sqrt{\tau})^{-1/4}$ ； $C_{mv}$  为汽化蒸气与靶产生的冲量耦合系数， $C_{mv} = \frac{p(\tau - t_v)}{I_r}$ ， $p \approx \gamma^{-\frac{1}{2}} L_v^{-\frac{1}{2}} B_2 I \cdot$

$\left( B_1 - \ln \frac{I}{AL_v^{3/2}} \right)^{-1/2}$ ， $t_v \approx \frac{\pi}{4B} \left( \frac{KT_v}{I} \right)^2$ ； $\zeta$  为电离度，当激光功率密度足够高， $\zeta$  电离度约等于 1，达到完全电离状态。宏观表象上总冲量为等离子体冲量与蒸气冲量之和，即  $\Delta p = \Delta m_p v_p + \Delta m_v v_v$ 。

ns 激光能量  $E_n$ ，其产生的冲击波对靶材的压力大小  $F$  为<sup>[27]</sup>：

$$F_{LSDW} = \frac{8\pi k}{25(\gamma+1)} \xi_0^3 E_n^{3/5} \rho_0^{2/5} t^{-4/5} - \frac{4\pi k^2}{25(\gamma+1)} \xi_0^2 E_n^{2/5} \rho_0^{3/5} t^{-6/5} \quad (10)$$

式中： $\xi_0 = \left[ \frac{75}{16\pi} \frac{(\gamma-1)(\gamma+1)^2}{(3\gamma-1)} \right]^{1/5}$ 。

ns 激光产生的等离子体冲击波对靶材产生压强最高可达到百 MPa。等离子体的速度约  $10^5 \text{ m/s}$  量级，蒸气的速度约  $10^3 \text{ m/s}$  量级，故冲量耦合系数较高。随着激光功率密度进一步增加，等离子体所占比重越来越高，由于等离子体羽流的屏蔽效应，冲量耦合系数逐渐降低。

最大冲量耦合系数时，烧蚀率约 10 冲量耦合，能量的利用率  $\eta = \frac{1}{2} mv^2/E = 2.2 \times 10^{-7}$  仍然很低。等离子体的膨胀作用导致了冲击波的产生，它在轴向的传播速度大于径向，轴向的冲击波压力也要比径向的大，反冲推力也主要由轴向压力产生。但在与碎片靶材相互作用产生反冲推力的过程中，由于轴向等离子体是自由膨胀，故能量利用率低，绝大部分能量作为等离子体的内能自由耗散了。

### 1.3 不同能量密度下 ms 激光的冲量耦合系数

采用最大能量 6.6 J、波长 1 064 nm、脉宽 0.5 ms 的激光冲击相同小球，如图 6 所示。激光通过 1 m 聚焦透镜聚焦作用在小球上，光斑直径 2 mm。调节电流改变激光能量，记录不同能量时小球的摆动位置，

计算出不同能量时的冲量耦合系数。代入作用在小球上的光斑半径以及激光的脉宽,即可计算出冲量耦合系数与能量密度以及峰值功率密度的关系,分别如图 7(a)、(b)所示。

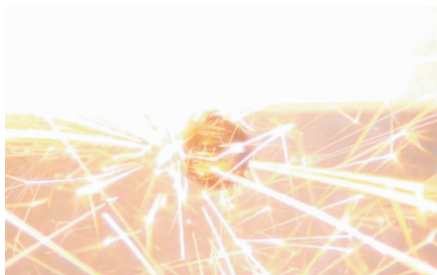


图 6 ms 激光冲击小球瞬间  
Fig.6 ms laser impact spherule

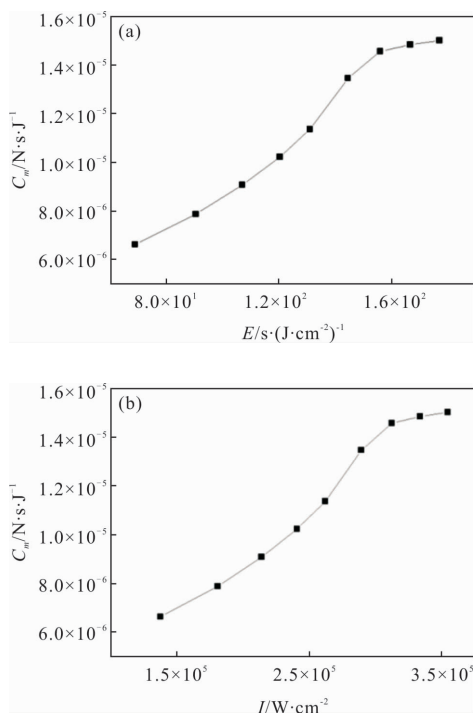


图 7 冲量耦合系数分别随着 ms 激光能量密度和功率密度的变化  
Fig.7 Impulse coupling coefficients versus energy density and peak power intensity of ms laser

脉冲激光能量为 J 量级,能量密度为  $10^2 \text{ J/cm}^2$  量级,峰值功率密度为  $10^5 \text{ W/cm}^2$  量级。从图中可以看出,采用 ms 激光冲击小球时,冲量耦合系数一直处于单调增加的状态。在实验条件所达到的激光能量/功率密度下,冲量耦合系数未发现下降的拐点。在能量较小时,冲量耦合系数为  $10^{-6} \text{ N} \cdot \text{s/J}$  量级,远小于

ns 激光的冲量耦合系数。但是当能量逐渐增加,即能量密度和功率密度逐渐增加时,冲量耦合系数也逐渐增加,这与 ns 激光作用的规律明显不同。当能量密度达到  $120 \text{ J/cm}^2$ ,功率密度为  $2.4 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  时,冲量耦合系数也达到了  $1.0 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/J}$ ,即可产生一定推力。当能量/功率密度继续增加,在能量密度为  $177 \text{ J/cm}^2$ ,功率密度为  $3.55 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  时,冲量耦合系数达到了  $1.50 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/J}$ ,与 ns 激光的冲量耦合系数处于同一个量级。若继续增加能量密度,冲量耦合系数还有进一步增加的可能。

ms 激光对铝合金等金属靶材的作用机制已有学者开展了相关研究<sup>[28]</sup>,主要是熔融和汽化机制,熔融物受到材料剧烈汽化膨胀产生的反冲压力,产生蒸气和凝聚态反喷,对靶材产生冲量耦合。金属蒸气可看作理想气体,满足理想气体状态方程:

$$PM = \rho RT \tag{11}$$

式中: $M$  为靶材原子的摩尔质量; $R$  为普适气体常数。金属蒸气的剧烈沸腾,在气/液界面处产生一个反冲压力,大小可表示为:

$$P = 0.54 P_0 \exp \left[ \frac{L_v}{k_b} \left( \frac{1}{T_v} - \frac{1}{T} \right) \right] \tag{12}$$

由于蒸气液相冲刷效应,烧蚀率较高,达到  $100 \mu\text{g/J}$  量级,是 ns 激光烧蚀率的 10 倍左右,但能量利用率低于 ns 激光。随着激光能量密度的增加,熔融物质会逐渐增加,并且蒸气产生的反冲压力也会增加,从而导致凝聚态物质的喷溅质量和速度的增加,宏观表现即是冲量耦合系数的增加。

但是,ms 激光能量一部分用来熔融靶材,一部分用来产生蒸气,蒸气压力达到一定值之后还要克服表面张力才能产生喷射,熔融凝聚态物质喷溅速度仅为  $10 \text{ m/s}$  量级,故单位能量产生的冲量较小。

## 2 结果分析

### 2.1 ns 激光冲量耦合系数较大,但 ms 激光可获得更大的冲量

对比图 5 和图 7 可以看出,ns 激光脉宽短,相比 ms 激光峰值功率密度高,冲击碎片靶材的效应主要是汽化或等离子化,产生高压冲击波,可以对靶材物质产生百 MPa 量级的压强,冲量耦合系数也更大;而 ms 激光冲击靶材的效应主要是融化和汽化效应,冲量耦合系数较小。实验结果表明,对于相同铝合金

小球,脉宽 10 ns 激光的冲量耦合系数是脉宽 0.5 ms 激光的约 3.7 倍。但是,当 ns 激光峰值功率密度超过最佳耦合峰值功率密度之后,由于等离子体的屏蔽效应,冲量耦合系数反而会下降,直到与 ms 激光的冲量耦合系数相当。

从碎片清扫的角度看,更重要的是碎片单位面积上能够产生的冲量大小。ns 激光对碎片靶材作用产生的单位面积冲量与激光能量密度的关系如图 8 所示。从图中可以看出,在能量密度达到最佳能量密度之前,单位面积冲量快速上升,但是当能量密度大于最佳能量密度之后,单位面积冲量基本不再上升,也就是说再增大能量密度,冲量耦合效果基本不变。

ns 激光在能量密度为 6.58 J/cm<sup>2</sup> 时达到最佳冲量耦合系数 5.50×10<sup>-5</sup> N·s/J,单位面积冲量为 36.2×10<sup>-5</sup> N·s/cm<sup>2</sup>。能量密度增加时,冲量耦合系数减小,当能量密度为 30 J/cm<sup>2</sup> 时,冲量耦合系数降为 1.26×10<sup>-5</sup> N·s/J,单位面积冲量仍然仅为 37.8×10<sup>-5</sup> N·s/cm<sup>2</sup>。

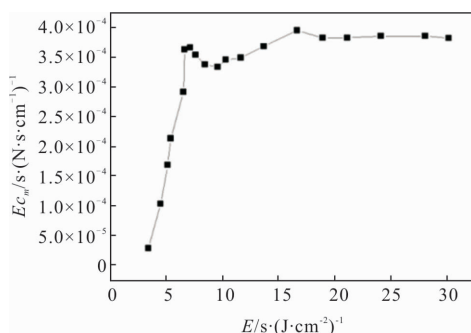


图 8 ns 激光单位面积产生的冲量与能量密度的关系

Fig.8 Impulse versus energy density of ns laser

ms 激光作用碎片靶材产生的单位面积冲量与激光能量密度的关系如图 9 所示。从图中可以看出,在实验所取的能量密度范围内,单位面积冲量随着能量密度的增加而一直单调增加。在实验所取的最低能量密度为 68.7 J/cm<sup>2</sup> 时,冲量耦合系数为 6.60×10<sup>-6</sup> N·s/J,但单位面积冲量达到 45.4×10<sup>-5</sup> N·s/cm<sup>2</sup>,大于 ns 激光所达到的单位面积冲量。在能量密度为 177 J/cm<sup>2</sup> 时,冲量耦合系数为 1.50×10<sup>-5</sup> N·s/J,与 ns 激光在能量密度为 30 J/cm<sup>2</sup> 时冲量耦合系数相当,但产生的单位面积冲量却达到 265.5×10<sup>-5</sup> N·s/cm<sup>2</sup>,远大于 ns 激光的 37.8×10<sup>-5</sup> N·s/cm<sup>2</sup>。ms 激光融合了热效应和力学效应,在冲击碎片靶材时没有等离子体屏蔽效应,且激光能量密度大,故产生的单位面积

冲量更大。

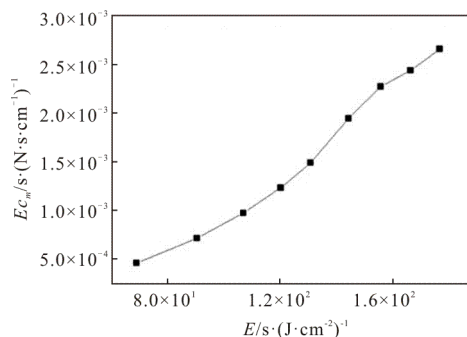


图 9 ms 激光单位面积产生的冲量与能量密度的关系

Fig.9 Impulse versus energy density of ms laser

从上面的对比中可以看出,当 ms 激光的能量密度大于 ns 激光能量密度的 10 倍时,ms 激光产生的冲量恒大于 ns 激光产生的冲量。从激光器输出能量的实现能力上看,大能量短脉冲激光的实现难度要远大于长脉冲激光。相同能量的 10 ns 激光的峰值功率是 0.5 ms 激光的 5×10<sup>4</sup> 倍,单纯从对激光晶体的损伤来说,相同尺寸激光晶体所能承受的 ns 激光能量比 ms 激光低 4 个数量级。从晶体能级寿命、泵浦能力、提取能力、ASE 等激光技术和工程角度,ms 激光的输出能力是远大于 10 倍 ns 激光。通常 10 J、10 ns 的激光从技术和工程上比 100 J、0.5 ms 的激光实现起来要更加困难。

同理,从激光技术和工程的角度,ps、fs 等短脉冲激光要想实现大能量输出的难度更是远大于 ns 激光和 ms 激光。

## 2.2 ns/ms 复合激光可有效提高冲量耦合效应

从第 1 节的实验结果可以得出,ns 激光对靶材冲击产生蒸气和等离子体反喷,速度高,但质量极少,且蒸气和等离子体以自由膨胀的方式对靶材产生推力,能量利用率较低,产生的冲量有限。ms 激光对靶材冲击产生蒸气和凝聚态反喷,虽然凝聚态质量较等离子和蒸气大,但是速度较低,故总体能量利用率较低,产生的反推冲量较小。因此,要提高冲量耦合系数可以从提高烧蚀率或者提高能量利用率着手。而提高烧蚀率需要改变激光或靶材参数,对客观条件的要求较高,因此提高能量利用率是提高冲量耦合系数的有效途径。研究表明<sup>[29]</sup>,对等离子体的有效约束可大幅提高能量利用率,从而提高冲量耦合系数。不同制式激光对靶材的复合作用往往会产生

远大于单一激光的作用效果<sup>[30]</sup>。

ns/ms 复合激光对碎片靶材作用产生凝聚态、蒸气和等离子体混合物。如图 10、11 所示。总的冲量宏观上表现为等离子体冲量、蒸气冲量以及凝聚态冲量之和。

$$\Delta p = \sum \Delta m_i v_i = m \Delta v \quad (13)$$

ns 激光与 ms 激光分别单独作用时，等离子体的膨胀速度约  $10^5$  m/s 量级，自由膨胀时对靶材的作用时间在 100 ns 以内，蒸气的膨胀速度约  $10^3$  m/s 量级，凝聚态的溅射速度约 10 m/s 量级，凝聚态的溅射速度相对于等离子体/蒸气几乎可以忽略不计。

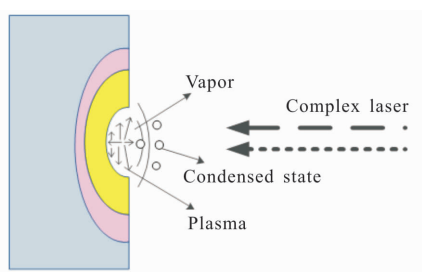


图 10 复合激光冲击碎片靶材示意图

Fig.10 Schematic of complex laser impact target

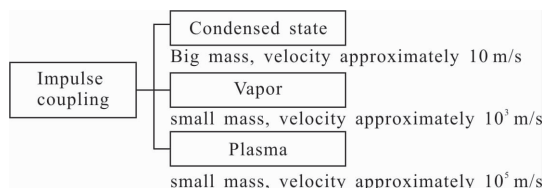


图 11 复合激光冲击靶材冲量宏观构成图

Fig.11 Impulse composing of complex laser impact target

ns 激光与 ms 激光复合作用时，ns 激光产生的等离子体以及冲击波会对凝聚态产生远大于蒸气的强烈的力学作用，速度低但质量较大的凝聚态约束了蕴含着大量内能的等离子体/蒸气的膨胀，使其处于非自由膨胀的状态，延长了等离子体/蒸气的作用时间，还可改善等离子体的屏蔽效应。凝聚态受到蒸气和等离子体冲击波的双重压力，提高了喷射速度，蒸气和等离子体的能量得到充分利用，从而提高冲量耦合系数。

### 3 结论

文中从碎片清扫的角度，分别研究了 ns 激光和

ms 激光的冲量耦合效应，测量了不同能量密度/功率密度时，ns 激光和 ms 激光冲击铝合金小球的冲量耦合系数。ns 激光冲击小球的冲量耦合系数随着能量/功率密度先快速增加，并在功率密度  $6.58 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup> 处，达到最大值为  $5.50 \times 10^{-5}$  N·s/J，而后由于等离子体的屏蔽效应而缓慢减小，直到接近  $1 \times 10^{-5}$  N·s/J。ms 激光冲击小球的冲量耦合系数随着能量/功率密度的增加单调增加，在能量密度 177 J/cm<sup>2</sup>，功率密度为  $3.55 \times 10^5$  W/cm<sup>2</sup> 时，冲量耦合系数达到了  $1.50 \times 10^{-5}$  N·s/J。

从单位面积能够产生的冲量角度，指出 ns 激光可以产生大的冲量耦合系数，但 ms 激光可产生更大的碎片靶材冲量。ns 激光达到最佳冲量耦合之后，随着能量密度的增大，单位面积产生的冲量变化不大，处于  $(35 \sim 40) \times 10^{-5}$  N·s/cm<sup>2</sup> 之间。而 ms 激光冲击靶材单位面积产生的冲量却随着能量密度一直持续增加，在实验测量的范围内达到了  $265.5 \times 10^{-5}$  N·s/cm<sup>2</sup>。计算表明，当 ms 激光的能量密度大于 ns 激光能量密度的 10 倍时，ms 激光产生的冲量恒大于 ns 激光产生的冲量。从激光技术和工程的角度，ms 激光可容易地获得大于 10 倍 ns 激光的输出能力。从提高能量利用率的角度，提出 ns 与 ms 激光的复合可充分利用产生的等离子体、蒸气以及凝聚态的特点，有望大幅提高冲量耦合系数。研究成果对于激光清扫空间碎片提供了一条新的思路，具有很强的指导意义。

### 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 Environman Engineering*, 2014, 31 (2): 129-135. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] Phipps C R, Baker K L, Libby S B, et al. Removing orbital debris with lasers[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49 (9): 1283-1300.
- [4] Metzger J D, Leclair R J, Howe S D, et al. Nuclear-powered space debris sweeper[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1989, 5(5): 582-590.
- [5] Schall W. Orbital debris removal vy laser radiation [J]. *Acta*

- Astronautica*, 1991, 24: 343.
- [6] Phipps C R, Albrecht G, Friedman H, et al. 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.
- [7] Claude Phipps. ORION: challenges and benefits [C]//High-Power Laser Ablation, Proc of SPIE, 1998, 3343: 575-582.
- [8] 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.
- [9] Claude R Phipps. A laser optical system to re-enter or lower lowearth orbit space debris [J]. *Acta Astronautica*, 2014, 93: 418-429.
- [10] Claude R Phipps. Laser space debris removal: Now, not later [C]//High-Power Laser System and Application, Proc of SPIE, 2015, 9255: 92553Q.
- [11] 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.
- [12] Claud R Phipps, Christophe Bonnal. 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.
- [13] Zhu Mengzhen, Cheng Yong, Tan Chaoyong, et al. Development of foreign spaceborne laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3241-3248. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] Claude R Phipps. L'ADROIT-A spaceborne ultraviolet laser system for space debris clearing[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 104: 243-255.
- [16] Wang Chenglin, Zhang Yan, Wang Kunpeng. Effect of impulse coupling coefficient on impulse vector of laser irradiating space debris [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53: 121404. (in Chinese)
- [17] Phipps C R, Baker K L, Libby S B, et al. Removing orbital debris with lasers [J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49(9): 1283-1300.
- [18] Phipps C. An alternate treatment of the vapor-plasma transition, Int[J]. *J Aerosp Innovations*, 2011, 3: 45-50.
- [19] Phipps C R, Turner T P, Harrison R F, et al. Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF and CO<sub>2</sub> lasers [J]. *J Appl Phys*, 1988, 64: 1083-1096.
- [20] Phipps C, Birkan M, Bohn W, et al. Laser ablation propulsion[J]. *J Propul Power*, 2010, 26: 609-637.
- [21] Zheng Zhiyuan, Zhang Jie, Hao Zuoqiang, et al. Effects of target configuration on the laser plasma momentum coupling coefficient [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55 (1): 326-330. (in Chinese)
- [22] Jin Xing, Chang Hao, Ye Jifei, et al. Methods of extreme short pulse laser ablation impulse coupling measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0329002. (in Chinese)
- [23] Wen Ming, Hong Yanji, Wang Jun, et al. High speed photography measurement of impulse coupling coefficient based on compound pendulum model [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(7): 1061-1065. (in Chinese)
- [24] Chen Jing, Tan Rongqing, Zheng Yijun, et al. Comparison of measurement methods of impulse coupling coefficient for laser propulsion [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(4): 871-874. (in Chinese)
- [25] Sinko J E, Phipps C R. Modeling CO<sub>2</sub> laser ablation impulse of polymers in vapor and plasma regimes [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(13): 1-3.
- [26] Phipps C R, Birkan M, Bohn W L, et al. Review: laser-ablation propulsion [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(4): 609-637.
- [27] Forsman A C, Banks P S, Perry M D, et al. Double pulse machining as a techniques for the enhancement of material removal rates in laser machining of metals [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(3): 033302.
- [28] Qin Yuan. Thermal and mechanical effect during millisecond laser heating of metals [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2011. (in Chinese)
- [29] Zheng Zhiyuan, Zhang Jie, Hao Zuoqiang, et al. Effects of target configuration on the laser plasma momentum coupling coefficient [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(1): 326-330. (in Chinese)
- [30] Cheng Yong, Zhu Mengzhen, Ma Yunfeng, et al. Mechanism and effects of complex laser ablation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1105005. (in Chinese)