

## 空气中激光烧蚀铝靶冲量耦合系数实验(II)

郑义军, 谭荣清, 石海霞

(中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 为了研究大气条件下, 正焦移距离对冲量耦合系数的影响, 采用能量为  $15.7 \times (1 \pm 6\%)$  J 的激光脉冲聚焦于铝靶前端, 通过改变激光焦点距离靶面的位置, 获得了冲量耦合系数与正焦移距离的对应关系。结果表明脉冲激光在与大气环境中的铝靶相互作用时, 靶面通过能量转移获得的冲量耦合系数与激光焦点距离靶面的位置呈非单调性变化。焦移距离在从 0~20 mm 之间变化时, 获得的冲量耦合系数从  $4.48 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/J}$  连续下降到  $1.68 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/J}$ , 随着焦移距离的进一步增大, 冲量耦合系数在 20~35 mm 间呈缓慢上升趋势, 在 35 mm 处升至  $2.21 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/J}$  后转而下降, 在 45 mm 处降至  $1.91 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/J}$ 。文中采用大气中激光支持爆轰波与固体靶面相互作用的二维模型对上述物理过程进行理论计算, 获得了与实验结果较为一致的结论。

**关键词:** 激光烧蚀; 冲量耦合系数; TEA CO<sub>2</sub> 激光器

**中图分类号:** TN249    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0076-04

## Experimental study (II) on impulse coupling coefficient of laser ablating aluminum target in air ambient

Zheng Yijun, Tan Rongqing, Shi Haixia

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** To study the effects of the positive focal shift on the impulse coupling coefficients about the CO<sub>2</sub> pulse laser focus on the aluminium target at air ambient. By changing the distance from the focus to the target, the relation between the positive focal shift and the impulse coupling coefficients is achieved. The experimental result indicates that coupling coefficients declined from  $4.48 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/J}$  to  $1.68 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/J}$ , when the focal shift changes from 0 to 20 mm. While the focal shift increase between the 20 mm and 35 mm, the coupling coefficients rise and reach  $2.21 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/J}$ , then decrease to  $1.91 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/J}$  at the 45 mm. The two-dimensional model theory of laser supported detonation wave interacting with solid target was used to calculate the coupling coefficients. The trends of theory and experiment are same.

**Key words:** laser ablation; impulse coupling coefficients; TEA CO<sub>2</sub> laser

收稿日期: 2014-05-05; 修订日期: 2014-06-10

基金项目: 中国科学院创新基金(D5087)

作者简介: 郑义军(1975-), 男, 副研究员, 主要从事激光技术及应用方面的研究。Email: yjzheng@mail.ie.ac.cn

## 0 引言

激光束经过光学系统聚焦后辐照靶材会导致靶面物质的烧蚀与汽化,由此而产生的靶蒸汽和等离子体在喷射和膨胀的过程中会反向施加给固体靶压力及冲量。单位能量的激光脉冲作用于靶面所产生的冲量定义为冲量耦合系数。2003年,谭荣清等人用聚焦后的 TEA CO<sub>2</sub> 激光束烧蚀铝靶,研究激光束的聚焦特性对冲量耦合系数的影响,得到初步的实验数据和结果<sup>[1]</sup>。美国阿拉巴马大学的 Andrew V. Pakhomov 等人在此基础上进一步研究了气压的变化与获得冲量耦合系数之间的关系,分析了气压变化时,直接烧蚀靶材和吸附气体在对总冲量耦合系数的贡献中分别所占的比重<sup>[2]</sup>。2004年,郑志远等采用波长为 1.06 μm 的激光在不同大气条件下对铝、石墨、铅和碳氢靶等进行了烧蚀研究,还对激光聚焦面积与靶面获得冲量的关系进行了试验。结果表明不同材料的靶面在大气中获得的冲量相差无几,而在真空条件下,靶面所获得的冲量受材质的影响较大<sup>[3]</sup>。2007年南京理工大学章玉珠等就离焦量对等离子体冲击波力学效应的影响进行了研究<sup>[4-5]</sup>,但现有的实验数据还不能够全面地展现激光烧蚀固体靶面获得冲量耦合系数的规律。该研究小组之前研究了负离焦条件下,大气中激光烧蚀铝靶过程中冲量耦合系数与激光功率密度的关系,并将实验结果与理论计算进行比较<sup>[6]</sup>。文中将对激光聚集点正离焦条件下,大气中激光烧蚀铝靶过程中的冲量耦合系数特性作进一步的研究,以期获得完整的实验规律,为微纳卫星的激光变轨及空间碎片的激光清除提供依据。

## 1 实验装置

实验装置由三部分组成,如图 1 所示。第一部分为光束聚焦系统:激光器 1 发出的光束经聚焦镜 3 聚焦,经过 BaF<sub>2</sub> 窗口 7 照射到固定在冲击摆下端的固体靶 8 上,数字定位导轨 4 可以精确控制聚焦镜的位置,充排气系统 9 可以控制真空仓内的气压。第二部分为激光能量监测系统:表面反射率 2.78%、透射率 75% 的 BaF<sub>2</sub> 取样镜片 2 对激光器产生的光脉冲进行取样,通过能量探头 5 以及能量显示器 6 对脉冲激光输出能量进行监测。第三部分为实验数据

读取系统:氦氖激光器 11 发出的指示光照射在固体靶背面的反射镜上,反射光斑经过一定距离投射到刻度标尺 10 上,根据指示光在标尺上移动的位置计算固体靶获得的冲量。

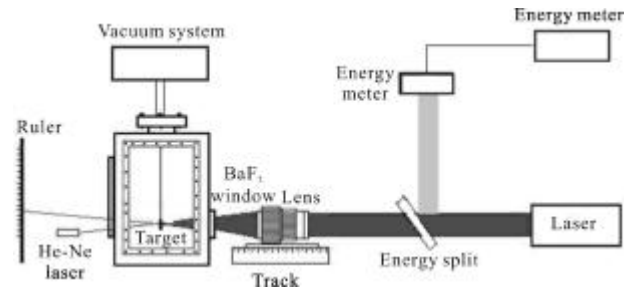


图 1 实验装置图

Fig.1 Diagram of the experimental setup

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 实验结果

实验所采用的激光脉冲能量为 15.7 J,激光脉冲由一个持续时间为 200 ns 左右的尖峰脉冲和一个长约 3 μs 的拖尾组成。为了便于描述,将聚焦镜的焦点和铝靶之间的距离定义为焦移。规定焦点在铝靶后为负焦移,在铝靶前为正焦移。为了减小激光能量不稳定引入的误差,每个焦移点采多组数据后取平均,得到 100 kPa 气压条件下,冲量耦合系数和正焦移之间的关系曲线,如图 2 所示。当焦移距离在 0~20 mm 之间变化时,获得的冲量耦合系数从  $4.48 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{J}$  连续下降到  $1.68 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{J}$ ,随着焦移距离的进一步增大,冲量耦合系数在 20~35 mm 间呈缓慢上升趋势,在 35 mm 升至  $2.21 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{J}$  后转而下降,在 45 mm 处降至  $1.91 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{J}$

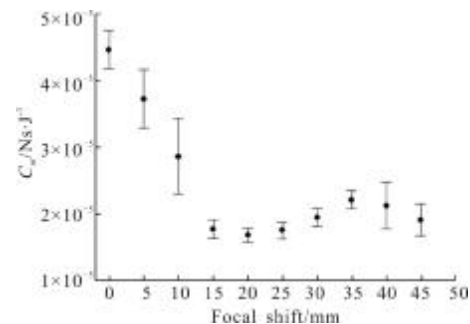


图 2 冲量耦合系数与焦移之间的关系

Fig.2 Impulse coupling coefficients versus focal shift

正焦移时,靶面获得的冲量由两部分组成。一部

分是由焦点处被击穿的空气生成等离子体后吸收激光能量而形成的激光支持等离子体爆轰波 LSDW (Laser Supported Detonation Wave) 作用于靶面而产生的冲量,另一部分是透过等离子体的激光直接烧蚀固体靶面产生的冲量。为了分析这两种作用对靶面获得冲量的贡献,实验测量了等离子体对激光能量吸收率。激光脉冲经过 BaF<sub>2</sub> 晶体分束后,能量由 Molelectron EPM1 000 能量计实时读取,透过 BaF<sub>2</sub> 晶体的激光束经 ZnSe 聚焦镜聚焦,在焦点处击穿空气产生等离子体,穿透等离子体的激光能量用 Gentec500 LIR 能量计测量,实验结果如表 1 所示。

表 1 等离子体对激光能量的吸收率

Tab.1 Absorption rate of plasma for laser energy

NO.	Laser energy in front of focal point /J	Laser energy behind focal point /J	Absorption rate of plasma/%	Average absorption rate/%
1	6.96	1.36	80.46	
2	11.41	3.23	71.70	
3	11.50	2.01	82.50	79.35
4	11.50	2.31	79.90	
5	8.86	1.58	82.20	

由此可以计算得出实验中不同正焦移位置对应靶面上的激光功率密度,结果如表 2 所示。

表 2 不同焦移对应的靶面激光功率密度

Tab.2 Different focal shift versus laser flux on target

Focal shift/mm	Laser flux /W·cm <sup>-2</sup>	Focal shift/mm	Laser flux /W·cm <sup>-2</sup>
0	2.86×10 <sup>7</sup>	25	0.074×10 <sup>7</sup>
5	0.328×10 <sup>7</sup>	30	0.072×10 <sup>7</sup>
10	0.256×10 <sup>7</sup>	35	0.068×10 <sup>7</sup>
15	0.158×10 <sup>7</sup>	40	0.052×10 <sup>7</sup>
20	0.092×10 <sup>7</sup>	45	0.047×10 <sup>7</sup>

## 2.2 分析讨论

空气击穿生成等离子体吸收激光能量产生的 LSDW 的压强为:

$$p_1 = \frac{\rho_0}{\gamma+1} v^2 = \frac{[2(\gamma^2-1)]^{2/3}}{\gamma+1} \rho_0^{1/3} (I_0)^{2/3} \quad (1)$$

式中: $\rho_0$  为空气密度; $\gamma$  为等离子体的绝热指数; $I_0$  为激光束的功率密度,其大小为  $2.86 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 。

$$\text{LSDW 到达靶面的时间为 } t_r = z \left[ 2(\gamma^2-1) \frac{I_0}{\rho_0} \right]^{-1/3},$$

$z$  为焦点距离靶面的位置。

激光脉冲结束后,根据 LSDW 波的衰减规律  $p = p_1 \left( \frac{t_p}{t} \right)^{6/5}$ , LSDW 波的压强降至环境气压  $1 \times 10^5 \text{ Pa}$  的时间  $t_{a1} = t_p \left( \frac{p_0}{p_1} \right)^{-5/6}$ , 其中  $t_p$  为激光脉冲的持续时间,  $R_T$  为固体靶的半径。

焦点处被击穿的空气生成等离子体吸收激光能量产生的 LSDW 将冲量传递给靶面的冲量

$$I_1 = \int_{t_r}^{t_a} \pi R_T^2 p_1 \left( \frac{t_p}{t} \right)^{6/5} dt = 5\pi R_T^2 p_1 t_p^{6/5} (t_r^{-1/5} - t_{a1}^{-1/5}) \quad (2)$$

根据 LSDW 与固体靶相互作用冲量计算的二维理论模型,透过等离子体的激光直接作用于固体靶面产生的冲量

$$I_2 = \pi R_s^2 P^{1D} t_{2D} + \int_{t_{2D}}^{t_a} \int_0^{R_s(t)} p^{2D} 2\pi r dr dt + \pi R_T^2 \int_{t_p}^{t_a} P^{2D} dt = \pi R_s^2 P^{1D} t_{2D} + \pi R_s^2 P^{1D} \left( \frac{t_p}{t_{2D}} \right)^{2/3} (t_a - t_{2D}) + \pi R_T^2 P^{1D} \left( \frac{t_p}{t_{2D}} \right)^{2/3} t_{2D} \ln \left( \frac{t_a}{t_p} \right) \quad (3)$$

式中: $R_s$  为入射到靶材表面的光束半径; $R_s(t)$  为  $t$  时刻时,柱型爆炸波波阵面的半径; $P^{1D}$  为忽略侧面稀疏影响时 LSDW 作用在于靶材表面的压力。

$$P^{1D} = \{ [2(\gamma^2-1)]^{2/3} \rho_0^{1/3} I_0^{2/3} \} / (\gamma+1)$$

式中: $I_0$  为透过等离子体,作用于靶面上的激光功率密度,其大小为表 2 中所列焦移从 5~45 mm 变化时所对应的值。

$P^{2D}$  为考虑侧面系数影响时 LSDW 作用于靶材表面的压力, $t_{2D}$  为侧向稀疏波传至靶中心所需时间, $t_a$  为 LSDW 作用到靶的压力降至周围环境压力所需的时间, $t_p$  为 LSDW 产生的柱面爆炸波到达靶边缘所需的时间。

$$t_{2D} = \frac{R_s(\gamma+1)}{\gamma[2(\gamma^2-1)I_0/\rho_0]^{1/3}} \quad (4)$$

$$t_a = \frac{P^{1D}}{\rho_0} \left( \frac{t_p}{t_{2D}} \right)^{2/3} t_{2D} \quad (5)$$

$$t_p = (R_T/R_s)^2 t_{2D} \quad (6)$$

实验中铝靶半径  $R_T=25\text{ mm}$ , 激光脉冲的持续时间  $t_p$  为  $3\text{ }\mu\text{s}$ , 当  $t_p=t_{2D}$  时, LSDW 传递给靶的冲量最大<sup>[7]</sup>。将  $t_p=t_{2D}$  代入公式(3), 得到有限靶获得的冲量最大值为:

$$I_{2\max}=\pi R_s^2 P^{1D} t_p+\pi R_T^2 P^{1D} t_{2D} \ln \frac{t_a}{t_p} \quad (7)$$

当  $t_p>t_{2D}$  时, 冲量按公式(8)衰减:

$$I_2=I_{2\max} \left( \frac{t_{2D}}{t_p} \right) \quad (8)$$

冲量耦合系数计算公式为:

$$C_m=\frac{I}{E} \quad (9)$$

式中:  $E$  为入射激光能量。

綜上述分析, 冲量  $I_1, I_2$  以及总冲量  $I=I_1+I_2$  所对应的冲量耦合系数  $C_{m1}, C_{m2}$  和  $C_m$  与焦移的关系, 分别如图 3(a)和(b)所示。

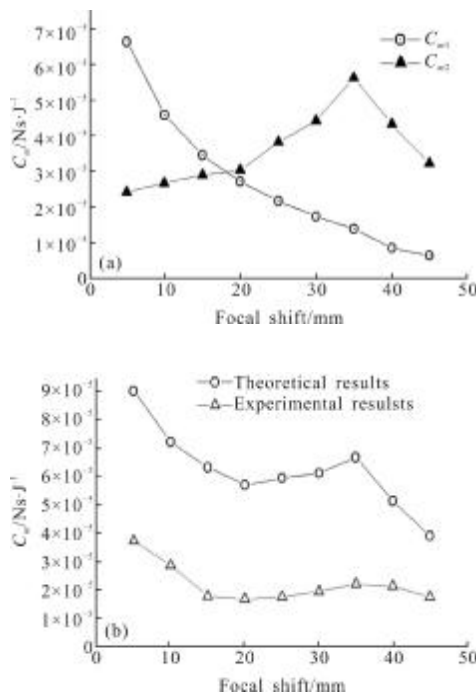


图 3 焦移对应的冲量耦合系数

Fig.3 Impulse coupling coefficients versus focal shift

由图 3(a)可知, 对于由焦点处被击穿的空气, 生成等离子体吸收激光能量产生的 LSDW 将冲量传递给靶面的冲量耦合系数随焦移距离的增加呈单调递减的趋势, 冲量耦合系数从  $6.61\text{ N}\cdot\text{s}/\text{J}$  下降到  $0.72\text{ N}\cdot\text{s}/\text{J}$ 。而对于透过等离子体的激光直接作用于固体靶面产生的冲量耦合系数, 随着功率密度的增加先呈上升趋势, 对应于焦移  $35\text{ mm}$  处达到最大

值  $5.6\text{ N}\cdot\text{s}/\text{J}$  后转而下降  $2.41\text{ N}\cdot\text{s}/\text{J}$ 。在两部分冲量共同作用下, 冲量耦合系数在  $9.02\text{ N}\cdot\text{s}/\text{J}$  到  $3.92\text{ N}\cdot\text{s}/\text{J}$  之间先呈下降趋势, 在焦移  $20\text{ mm}$  处降为  $5.71\text{ N}\cdot\text{s}/\text{J}$  转而上升至  $6.55\text{ N}\cdot\text{s}/\text{J}$  后下降到  $3.9\text{ N}\cdot\text{s}/\text{J}$ 。

图 3(b)根据理论计算所描述出来的激光聚集点正离焦条件下, 大气中激光烧蚀铝靶过程中的冲量耦合系数特性所呈现出的规律与实验得到的结论基本一致, 理论计算值较实验测量值偏高约 50%, 初步分析可能是实验中的测量系统误差所致。

### 3 结论

文中对激光聚集点正离焦条件下, 大气中激光烧蚀铝靶过程中的冲量耦合系数特性进行了研究。实验表明激光束与大气中的铝靶相互作用时, 靶面通过能量转移获得的冲量耦合系数与激光焦点距离靶面的位置呈非线性关系, 文中对上述现象给出了物理模型, 并通过理论计算获得了与实验较为一致结果。

### 参考文献:

- [1] Tan Rongqing, Lin Jun, Hughes J, et al. Experimental study of coupling coefficients for propulsion on TEA CO<sub>2</sub> laser [C]//Proceedings of the Second International Symposium on Beamed Energy Propulsion, 2004, 702: 122-128.
- [2] Andrew V Pakhomov, Jun Lin, Rongqing Tan. Air pressure effect on propulsion with Transversely Excited Atmospheric CO<sub>2</sub> laser[J]. AIAA Journal, 2006, 44(1): 136-141
- [3] Zheng Zhiyuan, Lu Xin, Zhang Jie, et al. Experimental study on the momentum coupling efficiency of laser plasma [J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(1): 192-196. (in Chinese)
- [4] Zhang Yuzhu, Wang Guangan, Zhu Jinrong et al. Influence of defocusing distance on mechanical effect of plasma shock wave induced by laser [J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(3): 318-322. (in Chinese)
- [5] Wang Guangan, Zhang Yuzhu, Ni Xiaowu, et al. Effect of deviation distance to focal spot on nanosecond-pulsed-laser drilling rates in air [J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(12): 1621-1624. (in Chinese)
- [6] Shi Haixia, Tan Rongqing, Zheng Yijun. Impulse coupling coefficient in laser ablating aluminium at air ambient [J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(6): 804-808. (in Chinese)
- [7] Sun Chengwei, Lu Qisheng, Fan Zhengxiu, et al. Laser Irradiation Effect [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 128-129. (in Chinese)