

文章编号: 1001-4322(2007)04-0585-04

# 等离子体屏蔽和稀疏波对冲量耦合系数的影响\*

章玉珠, 王广安, 沈中华, 倪晓武, 陆建

(南京理工大学 理学院, 南京 210094)

摘要: 利用脉冲 Nd:YAG 激光作用在铝、铜靶上, 研究了不同入射激光能量下冲量耦合系数和离焦量之间的关系, 以及不同功率密度情况下冲量耦合系数和光斑直径的关系。实验表明铝靶在入射激光脉冲能量由 75.8 mJ 增加到 382.3 mJ 时, 冲量耦合系数峰值对应的最佳离焦量由 -10 mm 处远离焦点向透镜方向移到 -18 mm, 而对应的激光功率密度仅由  $2.0 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$  增加到  $3.9 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 。铜靶实验规律和铝靶类似。等离子体屏蔽的吸收作用导致了冲量耦合系数达到最大值后迅速降低。铝靶在入射激光功率密度由  $0.7 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$  增大到  $1.0 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$  时, 冲量耦合系数随光斑直径增大而增大, 对应变化斜率由  $5.2 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/(\text{mm} \cdot \text{J})$  增大到  $49.2 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/(\text{mm} \cdot \text{J})$  表明了稀疏波对冲量耦合系数的削弱作用随入射激光功率密度增加而增加, 随光斑直径增大而减小。

关键词: 等离子体屏蔽; 稀疏波; 冲量耦合系数; 力学效应

中图分类号: O381; TN249

文献标识码: A

激光作用于凝聚态靶物质, 引起靶的熔融、气化和烧蚀, 并在靶中产生热应力。而靶蒸气等离子体吸收入射激光后, 产生以热传导或流体动力学机制传播的激光吸收波, 即激光维持的燃烧波和爆轰波。激光吸收波的反冲作用将动量传递给靶, 完成了激光和靶动量耦合。激光冲量耦合系数  $C_m$  是描述单位激光能量转换成动量大小的物理量, 是衡量激光等离子体冲击波力学效应的重要参量。从 20 世纪 60 年代各国学者就开始了各种相关参数的研究, 结果表明冲量耦合系数同作用激光参数<sup>[1]</sup>、靶材具体参数<sup>[2]</sup>以及环境参数<sup>[3-4]</sup>都密切相关。激光推进概念是 1972 年由美国人 Kantrowitz 提出的<sup>[5]</sup>, 近 20 年该技术得到世界各国的广泛研究<sup>[6-10]</sup>。从激光与靶相互作用机制来看, 推进模式、光船形状、工质材料以及环境对推进效果的影响, 实质上都是对激光维持爆轰波的产生和传播的影响。本文实验研究了不同入射能量下离焦量以及不同功率密度下光斑直径对冲量耦合系数的影响, 以期验证等离子体屏蔽和稀疏波对冲击波力学效应影响的机理, 为进一步研究提供参考。

## 1 实验装置与原理

### 1.1 实验装置

实验装置如图 1(a)所示。

实验采用 Nd:YAG 脉冲激光器, 相关技术参数为: 波长  $1.06 \mu\text{m}$ , 脉宽 10 ns, 单脉冲能量 40 ~ 400 mJ。激光器输出的脉冲激光经过反射镜和分光镜后, 通过一个焦距为 147 mm 的凸透镜, 作用在圆形平面铝(铜)靶上。靶结构为一单摆, 当激光辐照时该单摆将产生微摆动, 靶的摆速由光电传感器测得。He-Ne 激光器发出波长为 632.8 nm 激光作为探测光束, 辐照在靶上。当靶偏离平衡位置时, 辐照在光电传感器上的光强最强。当靶回到平衡位置时光电传感器上接收的光

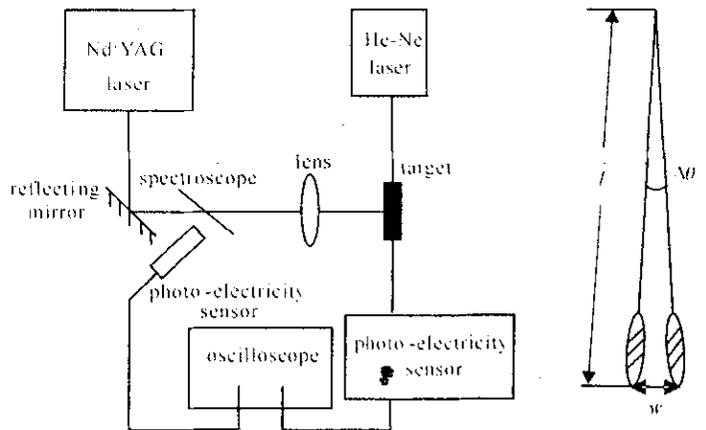


Fig. 1 Sketch map of experimental setup and calculation model of target angle velocity  
图 1 实验装置及靶角速度计算示意图

\* 收稿日期 2006-12-05; 修订日期 2007-03-19  
基金项目 国家自然科学基金资助课题(60578015)  
作者简介 章玉珠(1974—),女,辽宁人,博士,讲师,从事激光和物质相互作用方面的研究, zjyz@sohu.com。

强最弱,将光电传感器接入示波器,通过示波器的电位对时间的变化信号得出靶经过光电传感器通光缝宽的时间。

### 1.2 冲量耦合系数计算

如图1(b)所示,靶通过光电传感器细缝的时间 $\Delta t$ 由光电传感器测得。靶通过细缝的角位移 $\Delta\theta$ , $\Delta\theta$ 很小,等于 $w/l$ ,靶通过时的角速度 $\omega = \Delta\theta/\Delta t$ ,靶的动量 $p = L/l = J\omega/l$ (式中 $J$ 是靶摆的转动惯量),冲量耦合系数 $C_m = P/E = J\Delta\theta/E\Delta t l = Jw/E\Delta t l^2$ 。本实验中采用圆形铝(铜)靶直径为2.38 cm,靶摆悬点到靶底部边缘距离 $l = 46.80$  cm,光电传感器通光缝宽 $w = 0.70$  mm。

## 2 实验结果

定义图2中 $z$ 为离焦量, $z$ 为负值表示靶处于焦前,即几何焦斑和透镜之间; $z$ 为正值时靶位于焦后; $d$ 为光斑直径。

### 2.1 不同能量的激光作用铝时 $C_m$ 和 $z$ 的关系

实验得到不同入射激光能量下铝靶冲量耦合系数随离焦量的变化关系。如图3所示,在激光入射能量不同的情况下,冲量耦合系数均先随离焦量增大而增大,达到最大值后随离焦量增大而迅速下降,在焦斑附近有一微小波动。取入射能量由75.8 mJ增加到382.3 mJ,冲量耦合系数峰值对应的最佳离焦量由-10 mm左移到-18 mm,而对应的功率密度也由2.0 GW/cm<sup>2</sup>增加到3.9 GW/cm<sup>2</sup>。

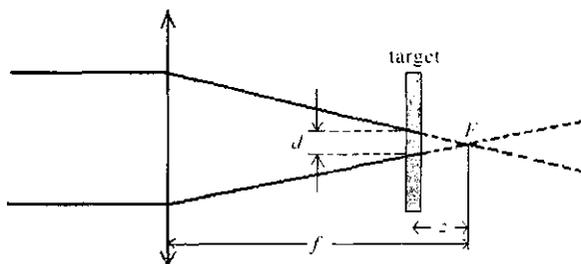


Fig. 2 Defining  $z$  and  $d$

图2 实验参量示意图

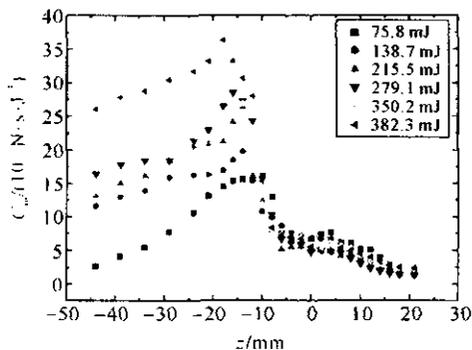


Fig. 3 Relationship between  $C_m$  and  $z$  at different incident laser energy (target Al)

图3 不同入射激光能量下铝靶 $C_m$ 和 $z$ 的关系

### 2.2 不同能量的激光作用铜靶时 $C_m$ 和 $z$ 的关系

选择铜靶对上述规律进行验证。图4表明在不同入射激光能量下铜靶的变化规律和铝靶类似,能量由138.7 mJ增至382.3 mJ, $C_m$ 峰值对应离焦量由-14 mm左移到-20 mm,对应功率密度由2.2 GW/cm<sup>2</sup>增加到3.0 GW/cm<sup>2</sup>。

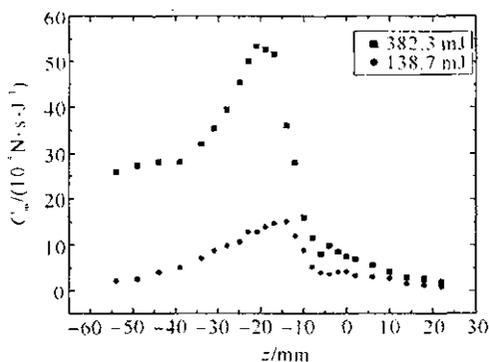


Fig. 4 Relationship between  $C_m$  and  $z$  at different incident laser energy (target Cu)

图4 不同入射激光能量下铜靶 $C_m$ 和 $z$ 的关系

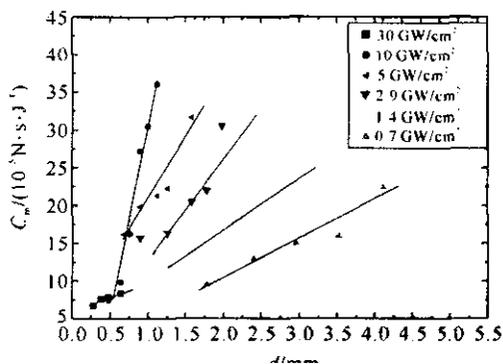


Fig. 5 Relationship between  $C_m$  and  $d$  at different incident laser intensity (target Al)

图5 不同功率密度入射激光作用铝靶时 $C_m$ 和 $d$ 的关系

### 2.3 不同功率密度的激光作用铝靶时 $C_m$ 和光斑直径的关系

图5是不同功率密度下铝靶冲量耦合系数和光斑直径 $d$ 的关系曲线,曲线表明在不同功率密度下,冲量耦

合系数均随光斑半径增大而增大,呈线性关系。功率密度由  $0.7 \text{ GW/cm}^2$  增大到  $10 \text{ GW/cm}^2$  对应  $C_m$  沿  $d$  的变化斜率由  $5.2 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/(\text{mm} \cdot \text{J})$  增大到  $49.2 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/(\text{mm} \cdot \text{J})$ ,但功率密度增大到  $30 \text{ GW/cm}^2$  时,斜率  $k$  却下降到  $4.1 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/(\text{mm} \cdot \text{J})$ ,见表 1。

### 3 分析和讨论

由图 3 可知,在入射激光能量相同时,存在一个对应冲量耦合系数峰值的最佳离焦量,峰值前冲量耦合系数随离焦量增加而增加,峰值后随离焦量增加而迅速下降。实验证明导致冲量耦合系数下降的原因主要是等离子体屏蔽和稀疏波的作用。

#### 3.1 等离子体屏蔽影响

激光辐照靶表面,引起靶表面气化。产生的蒸气继续吸收激光能量,使温度升高,最后在靶表面上产生高温高密度的等离子体。这种等离子体向外迅速膨胀,在膨胀的过程中等离子体继续吸收入射激光,并阻止激光到达表面,切断了激光和靶的能量耦合,这种效应称为等离子体屏蔽,是高功率激光与材料相互作用过程中非常重要的现象。入射激光功率密度大于  $10^9 \text{ W/cm}^2$  时就能在空气中发生光学击穿,而金属靶面的光学击穿阈值还要低 2 个数量级。本实验采用的激光功率密度范围为  $10^7 \sim 10^{10} \text{ W/cm}^2$ ,可能发生光学击穿。发生光学击穿后,等离子体由于逆韧致吸收,会部分甚至全部吸收激光能量,将靶的进一步烧蚀屏蔽掉。Yuan Gang 等<sup>[11]</sup>研究了等离子体屏蔽和能量耦合系数的关系,定义能量耦合系数  $C_e$ ,等离子体吸收系数  $C_a$ ,靶面反射系数  $C_r$ ,有

$$C_a + C_r + C_e = 1 \quad (1)$$

式中  $C_e = E_{in}/E_{co}$ ,  $E_{in}$  是激光入射能量,  $E_{co}$  是耦合到靶上的能量。研究表明,  $C_e$  随激光入射能量升高而减小,在功率密度约为  $10^8 \text{ W/cm}^2$  时只有 3% 左右<sup>[11]</sup>。  $C_r$  随入射能量升高而减小,Al 在  $10^7 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$  时反射率较高,约为 80%,而功率密度升高到约  $10^9 \text{ W/cm}^2$  时,  $C_r$  降到 40% 左右;Cu 的反射率则由 40% 降到 20%<sup>[12]</sup>。  $C_r$  和  $C_e$  随入射激光功率密度的变化表明  $C_a$  必然随入射能量增加而增大。由公式(1),在功率密度升高到约  $10^9 \text{ W/cm}^2$  时等离子体吸收率至少达到 57%(Al)和 87%(Cu)。图 3、图 4 表明铝靶和铜靶在入射激光能量增加时,最佳离焦量均向左移,即向光斑半径增的大方向移动,而对应的功率密度在  $(2.0 \sim 3.9) \times 10^9 \text{ W/cm}^2$  较小范围内变化证明了在这一功率密度范围等离子体对激光的高吸收率导致冲量耦合系数达到最大值后迅速降低。

#### 3.2 稀疏波的影响

激光脉冲作用结束后,激光支持爆轰波的传播在逆激光方向无激光能量吸收,侧向稀疏波的影响将占主导。侧向稀疏波传播过程将降低等离子体区的压强,从而降低激光等离子体对靶的能量耦合。其传到光斑中心的时间是

$$t = d/D \quad (2)$$

式中  $D$  是激光支持爆轰波的传播速度<sup>[13]</sup>。由 Pirri 的理论<sup>[14]</sup>对应于给定入射激光强度  $I_0$  下激光支持爆轰波的最低波速

$$D_{min} = [2(\gamma^2 - 1)I_0/\rho_0]^{1/3} \quad (3)$$

式中  $\rho_0$  与  $\gamma$  分别是靶周围大气密度和等熵指数。由公式(3)可以看出,当  $I_0$ ,  $\rho_0$  及  $\gamma$  相同时,激光支持爆轰波波速  $D$  相同,  $t$  随  $d$  增加而增大,即稀疏波的作用随光斑直径增大而减弱,冲量耦合系数则随光斑半径增大而增大。当功率密度增大,  $D$  随之增大,  $t$  减小,稀疏波作用加强,靶面压力衰减更快,冲量耦合系数随光斑半径变化也更快,这与图 5 中功率密度大的直线斜率大相吻合。功率密度为  $30 \text{ GW/cm}^2$  的实验曲线由于脉冲作用期间等离子体屏蔽掉太多能量,冲击波速小,稀疏波作用弱,所以直线斜率最小。

### 4 结论

实验测量了不同入射激光能量铝和铜冲量耦合系数和离焦量的关系,以及不同功率密度铝冲量耦合系数

表 1 不同功率密度入射激光作用铝靶时  $C_m$  随  $d$  的变化率

Table 1 Slop of  $C_m$  along  $d$  at different laser intensity (Al target)

$I/(\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2})$	$k/(10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{J}^{-1})$
30	4.1
10	49.2
5	15.9
2.9	13.4
1.4	6.8
0.7	5.2

与光斑直径关系。结论如下 ( 1 )随着入射能量的增加 ,冲量耦合系数峰值对应的离焦量向靠近透镜、远离焦点的方向移动 ,且对应功率密度相差不大 ,这证明等离子体屏蔽导致冲量耦合系数达到峰值后迅速下降。( 2 )在相同入射激光功率密度下 ,冲量耦合系数随光斑直径增大呈线性增加 ,并且随功率密度增大 ,变化斜率增大 ,表明了稀疏波对冲量耦合系数的削弱作用随入射激光功率密度增加而增加 ,随光斑直径增大而减小。该研究对于激光推进研究中激光能量以及聚焦系统的选择有参考意义。

### 参考文献 :

- [ 1 ] Phipps C R Jr , Turner T P , Harrison R F , et al. Impulse coupling to targets in vacuum by KrF , HF , and CO<sub>2</sub> single-pulse lasers[ J ]. *J Appl Phys* , 1988 , **64**( 3 ) :1083-1096.
- [ 2 ] Nehls M , Edwards D , Gray P. Ablative laser propulsion using multi-layered material systems[ C ]//Proc of 33<sup>rd</sup> AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference. 2002 20-23.
- [ 3 ] Bass M , Nassar M A , Swimm R T. Impulse coupling to aluminum resulting from Nd glass laser irradiation induced material removal[ J ]. *J Appl Phys* , 1987 , **61**( 3 ) ,1137-1144.
- [ 4 ] Pakhomov A V , Lin J , Kenneth A H. Effect of air pressure on propulsion with TEA CO<sub>2</sub>[ C ]//Proc of SPIE. 2004 **5448** :1017-1027.
- [ 5 ] Kantrowitz A. Propulsion to orbit by ground-based laser[ J ]. *Astronautics and Aeronautics* , 1972 , **10**( 5 ) :74-76.
- [ 6 ] Phipps C R , Luke J R , Lippert T , et al. Micropropulsion using laser ablation[ J ]. *Appl Phys A* 2004 **79**( 4-6 ) :1385-1389.
- [ 7 ] Schall W O , Bohn W L , Eckel H A. Lightcraft experiments in Germany[ C ]//Proc of SPIE. 2000 **4065** :472-480.
- [ 8 ] Pakhomov A V , Lin L , Thompson M S. Specific impulse of ablative laser propulsion[ C ]//Proc of 42<sup>nd</sup> AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit. 2004 5-8.
- [ 9 ] 童慧峰 ,唐志平 ,胡晓军 ,等. 烧蚀模式激光推进实验研究[ J ]. 强激光与粒子束 , 2004 , **16**( 11 ) :1380-1384. ( Tong H F , Tang Z P , Hu X J , et al . Experimental study of ablation mode laser propulsion. *High Power Laser and Particle Beams* , 2004 , **16**( 11 ) :1380-1384 )
- [ 10 ] 金星 ,洪延姬 ,崔村燕 ,等. 激光推进冲量耦合系数的测量方法[ J ]. 强激光与粒子束 , 2004 , **16**( 7 ) :861-864. ( Jin X , Hong Y J , Cui C Y , et al . Measurement method of impulse coupling-coefficient of laser propulsion. *High Power Laser and Particle Beams* , 2004 , **16**( 7 ) :861-864 )
- [ 11 ] Yuan G. Experimental investigation of 1.06 μm laser interaction with Al target in air[ C ]//Proc of SPIE. 1991 **1415** :225-227.
- [ 12 ] 孙承纬. 激光辐照效应[ M ]. 北京 :国防工业出版社 , 2002 21-23. ( Sun C W. Effect of laser irradiation. Beijing : National Defense Industry Press , 2002 21-23 )
- [ 13 ] 陆建 ,倪晓武 ,贺安之. 激光与材料相互作用物理学[ M ]. 北京 :机械工业出版社 , 1996 :144. ( Lu J , Ni X W , He A Z. Physics of laser-material interaction. Beijing : China Machine Press , 1996 :144 )
- [ 14 ] Pirri A N. Momentum transfer and plasma formation above a surface with a high-power CO<sub>2</sub> laser[ J ]. *Phys Fluids* , 1973 , **16**( 9 ) :1435-1440.

## Influences of plasma shielding and rarefaction wave on impulse coupling coefficient

ZHANG Yu-zhu , WANG Guang-an , SHEN Zhong-hua , NI Xiao-wu , LU Jian

( Department of Applied Physics , Nanjing University of Science and Technology , Nanjing 210094 , China )

**Abstract :** The relationship between the impulse coupling coefficient and the distance of the target from focus at different incident laser energy , and the relationship between impulse coupling coefficient and laser spot diameter at different incident laser intensity were studied by applying Nd :YAG laser pulse on the Al( Cu ) target. The experiments show that the target position corresponding to the peak impulse coupling coefficient moves towards to the lens with the increase of the laser energy , and the increase of the optimum intensity is small. These prove that the plasma shielding induces decreases impulse coupling coefficient to decrease after the peak value. On the other hand impulse coupling coefficient increases with the increase of the laser spot diameter in a linear way at the same incident laser intensity , and the slope is increased from  $5.2 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/(\text{mm} \cdot \text{J})$  to  $49.2 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/(\text{mm} \cdot \text{J})$  with the increase of the laser intensity from  $0.7 \text{ GW}/\text{cm}^2$  to  $10 \text{ GW}/\text{cm}^2$ . This experimental result implies that the influence of the rarefaction wave on impulse coupling coefficient increases with the increase of the incident laser intensity , and decreases with the increase of the laser spot diameter.

**Key words :** Plasma shielding ; Rarefaction wave ; Impulse coupling coefficient ; Mechanical effect