

文章编号: 0258-7025(2007)01-0139-06

# 由激光靶冲量耦合实验结果判定 激光支持爆轰波点燃阈值

杨 波<sup>1</sup>, 朱金荣<sup>1,2</sup>, 杨雁南<sup>1,3</sup>, 沈中华<sup>1</sup>, 陆 建<sup>1</sup>, 倪晓武<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094;

<sup>2</sup> 扬州大学物理科学与技术学院, 江苏 扬州 225002; <sup>3</sup> 南京航空航天大学理学院, 江苏 南京 210016

**摘要** 根据激光吸收区等离子体组分与激光功率密度的关系判定激光支持爆轰波(LSDW)的点燃阈值。在激光靶冲量耦合实验的基础上,用悬摆动力学方程计算了激光支持爆轰波对铝靶冲量和冲量耦合系数;继而由靶冲量与激光吸收区膨胀介质(等离子体和气体)比热比的 Jouguet 条件,以及由二维流体动力学数值模拟获得的激光靶冲量随时间的变化过程,得到了激光吸收区介质的比热比随激光功率密度的变化情况,由此可得激光吸收区介质比热比随激光功率密度的增大而减少的结论;根据等离子体和气体比热比的差异定量分析了不同激光功率密度条件下激光吸收区气体和等离子体的构成。由等离子体含量随激光功率密度的变化关系得到了激光支持爆轰波的点燃阈值在  $(1.62 \pm 0.01) \times 10^8 \sim (2.10 \pm 0.07) \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  间的结果。

**关键词** 激光技术;激光与材料相互作用;激光支持爆轰波点燃阈值;Jouguet 条件;激光吸收区;比热比;气体;等离子体;组分

中图分类号 TN 249 文献标识码 A

## Determination of the Laser Supported Detonation Wave Ignition Threshold from Impulse Coupling between Laser and Target

YANG Bo<sup>1</sup>, ZHU Jin-rong<sup>1,2</sup>, YANG Yan-nan<sup>1,3</sup>,

SHEN Zhong-hua<sup>1</sup>, LU Jian<sup>1</sup>, NI Xiao-wu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Applied Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China  
<sup>2</sup> College of Physics Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225002, China  
<sup>3</sup> College of Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

**Abstract** The ignition threshold of laser supported detonation wave (LSDW) can be determined based on the component variation of plasma in the laser absorption zone with laser power density. A kinetic pendulum equation is presented for being adopted in the experiment of impulse coupling between laser supported detonation wave and aluminum target. Then considering the Jouguet relation between impulse and specific heat ratio of medium in the laser absorption zone (plasma and gas), the relation between specific heat ratio and laser power density can be obtained for analyzing the result of two-dimensional hydrodynamic simulation. The specific heat ratio decreases while laser power density increasing. Finally, considering the difference between plasma and gas, the component of plasma and gas can be determined. The laser supported detonation ignition threshold is calculated in the space interval from  $(1.62 \pm 0.01) \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  to  $(2.10 \pm 0.07) \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ . By comparing to the ignition threshold determined by the impulse-coupling coefficient, there is an ideal concordance in these two ways.

**Key words** laser technique; interaction between laser and material; ignition threshold of laser supported detonation wave; Jouguet condition; laser absorption zone; specific heat ratio; gas; plasma; component

收稿日期:2006-06-21;收到修改稿日期:2006-09-16

基金项目:国家自然科学基金(60578015,60208004),博士点基金(20050288025)和教育部高校优秀青年教师奖励计划资助项目。

作者简介:杨 波(1979—),男,江苏南京人,博士研究生,主要从事激光推进方面的研究。E-mail:yangb919@163.com

导师简介:倪晓武(1955—),男,江苏苏州人,博士生导师,从事激光物理、激光超声、光生物医学和激光测试技术等方面的研究。E-mail:nxw@mail.njust.edu.cn

## 1 引 言

当高功率脉冲激光束聚焦于靶表面时,靶物质被气化成物质蒸气继而与靶表面附近的环境气体一起发生电离以致击穿<sup>[1]</sup>,击穿后的等离子体将继续吸收激光能量形成激光支持爆轰波(LSDW),使靶材获得冲量。

随着激光和电子技术的不断发展,PVDF 压电传感器成为实时测量激光引发的冲击波压力的主要手段<sup>[2]</sup>。结合激光推进的背景,对冲量耦合系数及其影响下推进性能的研究成为一大热点<sup>[3~9]</sup>。与此同时,激光与靶相互作用理论模型的研究也得到了发展<sup>[10,11]</sup>。在激光支持爆轰波点燃阈值的研究方面,M. Han<sup>[12]</sup>与陆建<sup>[13]</sup>等分别对其进行了理论和实验研究。

本文在激光与靶冲量耦合以及稀疏波对冲击波作用时间的实验研究基础上,由摆动力学方程计算了稀疏波与冲击波作用结束时激光支持爆轰波对靶的冲量;进而根据与流体动力学数值模拟结果比较得到了靶材冲量与激光吸收区膨胀介质的比热比之间的关系和激光吸收区膨胀介质比热比随激光功率密度变化的关系。并由此定量分析了激光吸收区内运动气体和等离子体的构成,通过对激光吸收区介质中等离子体随激光功率密度变化关系的讨论,激光支持爆轰波点燃阈值就可从激光吸收区中等离子体的含量变化来判定。进而将获得的结果与从冲量耦合系数角度<sup>[14]</sup>得到的判定结果进行比较,得到一致结果。

## 2 实 验

### 2.1 冲量耦合实验结果

激光与靶冲量耦合实验采用的装置见参考文献<sup>[15]</sup>。在考虑空气阻力  $f = \frac{1}{2}c\rho_a\bar{v}^2S$ ,空气浮力,摆线质量情况下,由功能原理  $-A_f = \Delta(E_{kc} + E_{pc})$  ( $E_{kc}$  为质心动能,  $E_{pc}$  为质心势能) 可得,摆角随时间的变化关系为<sup>[15]</sup>

$$\sum_{i=1}^3 I_i \frac{d^2\theta}{dt^2} + \sum_{i=1}^3 (M_i g l_i - \rho_a g V_i) \sin\theta \pm \frac{\sum_{i=1}^3 (S_i c_i l_i^3) \rho_a}{2} \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 = 0, \quad (1)$$

根据(1)式可以得到运动系统获得的冲量<sup>[15]</sup>。

### 2.2 冲量耦合实验结果的讨论

通过改变靶表面与聚焦透镜间的距离就可以对作用于靶材的激光光斑面积进行改变,从而改变作用于靶材表面的激光功率密度。在聚焦透镜与靶间距离小于透镜焦距时,不同作用激光功率密度下靶获得的冲量和冲量耦合系数实验结果如图 1 和 2 所示。

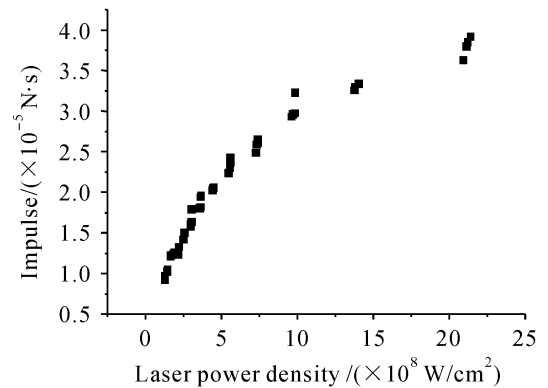


图 1 激光功率密度和冲量关系

Fig. 1 Relation between laser power density and impulse

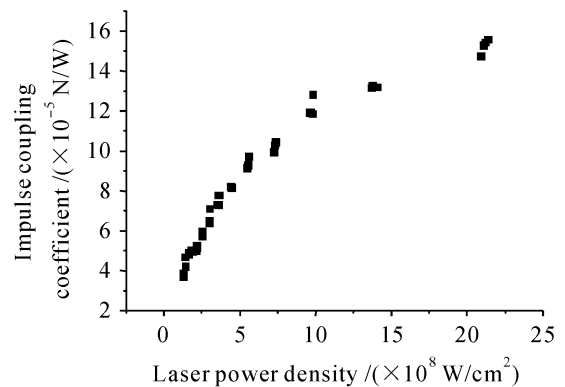


图 2 冲量耦合系数随激光功率密度的变化关系

Fig. 2 Relation between impulse coupling coefficient and laser power density

由图 1 和 2 可见,当作用激光能量不变,且聚焦透镜与靶间距离小于透镜焦距时,靶面附近由于激光支持爆轰波的存在会形成激光支持爆轰波的波后流场。随着作用于靶面的激光功率密度增大,其中激光吸收区中撞击靶表面的介质粒子能量随之增加,因此靶获得的冲量和冲量耦合系数也随之增大。但当作用激光功率密度进一步增大时,由于激光吸收区内介质粒子中能量较小的粒子比能量较大的粒子数多,因而使靶体传递动量的效率降低,即靶冲量和冲量耦合系数增速减缓。另外,从物理角度分析,随着入射激光功率密度的提高,靶面附近激光支持爆轰波被点燃,且以很高的速度离开靶面,因而对靶面影响更大,从而靶能获取更多的冲量。因此可以

通过分析激光靶冲量耦合系数的实验数据,得到激光支持爆轰波的点燃阈值。从图 2 可以看出当激光功率密度为  $(1.62 \pm 0.01) \times 10^8 \sim (2.10 \pm 0.07) \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时,冲量耦合系数迅速突变,可以判断激光支持爆轰波已被点燃。

### 3 激光支持爆轰波点燃阈值的判定

#### 3.1 二维稀疏波与冲击波相互作用时间的确定

当激光入射方向与靶面垂直时,激光支持爆轰波逆着激光入射方向运动。与此同时,由于等离子体的扩展或冲击波阵面的弯曲,形成侧向传播的冲击波。激光支持爆轰波波后流动必然受到旁侧稀疏波的影响。当激光脉冲结束后,激光支持爆轰波反射传向靶面产生轴向稀疏波。在考虑激光支持爆轰波与靶的冲量传递时,必须考虑到侧向稀疏波和纵向稀疏波的影响。由激光支持爆轰波的相关参数可以得到侧向稀疏波传至光斑中心的时间,以及纵向稀疏波到达靶面的时间。

图 3(a) 给出了侧向冲击波和激光支持爆轰波传播时,侧向稀疏波的运动情况。此时侧向稀疏波以激光支持爆轰波波后介质声速进行传播,其沿径向传至光斑中心的时间为<sup>[16]</sup>

$$t_{2D} = R_s / c_j, \quad (2)$$

式中  $R_s$  为 Nd:YAG 激光束照射在靶表面的半径;

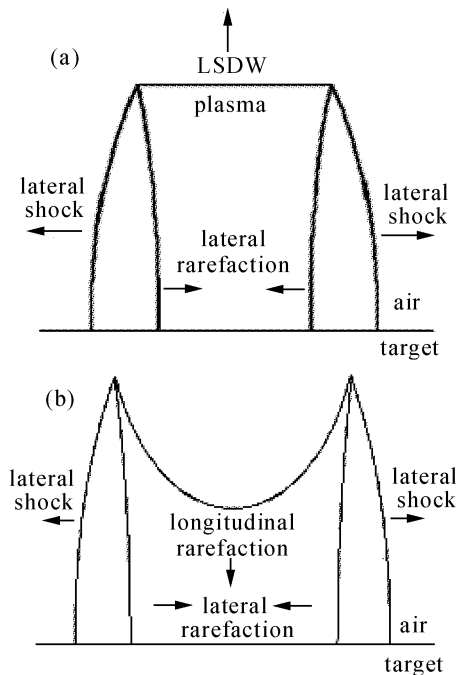


图 3 激光支持爆轰波作用时侧向稀疏波的作用(a)和作用结束后纵向稀疏波的作用(b)

Fig. 3 Influence of lateral rarefaction when LSD propagating (a) and longitudinal rarefaction when LSD finishing (b)

$c_j = \frac{\gamma \cdot D_j}{\gamma + 1}$  为激光支持爆轰波波后介质声速,式中  $D_j = \left[ 2(\gamma^2 - 1) \frac{I_0}{\rho} \right]^{1/3}$  为激光支持爆轰波波速, $\gamma$  为等熵指数, $I_0$  为激光的功率密度, $\rho$  为空气密度。

如图 3(b) 所示,当激光支持爆轰波作用结束时,稀疏波从纵向传至靶面的时间为<sup>[16]</sup>

$$t_z = t_p + \frac{D_j t_p}{c_j} = \frac{(2\gamma + 1)t_p}{\gamma}, \quad (3)$$

式中  $t_p$  为激光脉宽。

当稀疏波沿纵向或径向传播时,冲击波亦可分为纵向传播的激光支持爆轰波和侧向冲击波,取  $t = \max(t_{2D}, t_z)$ , 这就是光斑中心处压力保持的时间。由于在流体动力学数值计算中冲击波和稀疏波对靶材作用的等效结果是光斑中心处压力随时间的变化关系,这就为激光靶冲量的积分计算提供了一个时间上限,同时也为摆动力学方程的计算确定了上限。

#### 3.2 冲量 $I$ 与比热比 $\gamma$ 的关系

由于激光吸收区位于冲击波阵面(激光支持爆轰波、侧向冲击波)和靶之间,其间混杂有气体和等离子体,如图 4 所示。

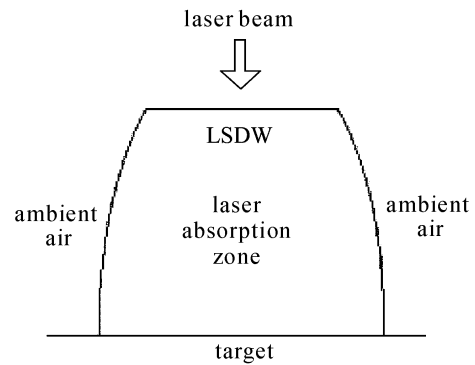


图 4 激光辐照下激光吸收区的情况

Fig. 4 Condition of coronal zone under laser radiation

图 4 中的正向冲击波为激光支持爆轰波,其于戈尼奥(Hugoniot)曲线表达式为<sup>[16]</sup>

$$p_1 = \left[ 2 \left( 1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{1/2} \left( \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right)^{-1} I_0 \rho_1^{1/2} \right]^{2/3}, \quad (4)$$

瑞利(Rayleigh)线的表达式为<sup>[16]</sup>

$$p_2 = \rho_1 v_1^2 \left( 1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right), \quad (5)$$

式中  $\rho_1, v_1, p_1$  分别为激光支持爆轰波波前的密度、速度、压强; $\rho_2, p_2$  分别为激光支持爆轰波波后的密度、压强; $I_0$  为作用激光功率密度。

式(4)和(5)的函数图像如图 5 所示。图 5 中曲

线  $CBJA$  是于戈尼奥曲线, 直线  $CJR$  代表给定激光功率密度  $I_0$  时最低激光支持爆轰波速度的瑞利线  $R_1$ , 且  $R_1$  与于戈尼奥曲线相切, 切点  $J$  满足 Jouguet 条件:  $(v_1 - v_2)^2 = c^2 = \gamma \cdot p / \rho$ ,  $c$  为声速,  $v_2$  为激光支持爆轰波波后速度。在激光支持爆轰波的速度更高情况下, 直线  $CBAR'$  代表瑞利线  $R_2$ , 其对应物理意义是激光支持爆轰波波阵面后粒子速度为亚声速。被激光加热的气体膨胀形成的纵向和侧向稀疏波使得激光支持爆轰波衰减到  $J$  点, 即满足 Jouguet 条件<sup>[16]</sup>。由此可见, 只要除了二维稀疏作用以外, 不存在别的吸收机制, 激光支持爆轰波表面始终满足 Jouguet 条件。

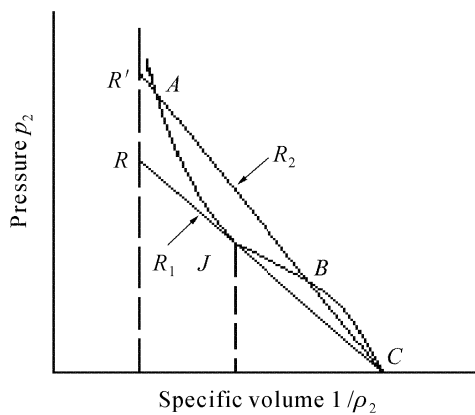


图 5 激光支持爆轰波的于戈尼奥线和瑞利线  
Fig. 5 Hugoniot and Rayleigh lines of LSDW

因而可得

$$\iint \gamma p dS dt = \bar{\gamma} \iint p dS dt = \iint \rho (v_1 - v_2)^2 dS dt = I. \quad (6)$$

侧向冲击波由于波阵面弯曲, 在波阵面上取一微元, 设其法线方向与靶面法线方向夹角为  $\theta$ 。根据膨胀气体定常运动的要求, 可认为激光吸收区中介质粒子撞击靶面的相对速度正好等于当地声速  $c_1$ , 即  $u_1 - c_1 = -U_v \cos\theta$ 。式中  $u_1$  为激光吸收区介质粒子撞击靶面的运动速度,  $U_v$  为凝聚态靶的气化速度。由于激光吸收区中等离子体的存在, 可假定凝聚态靶的气化速度  $U_v$  为 0。故有  $\frac{\gamma \cdot p}{\rho} = c_1^2 = u_1^2$ , 则有

$$\iint \gamma p dS dt = \bar{\gamma} \iint p dS dt = \iint \rho u_1^2 dS dt = I. \quad (7)$$

式中  $p$  为通过二维流体动力学数值模拟获得的激光支持爆轰波对靶的压强分布;  $\bar{\gamma}$  为激光吸收区平均比热比;  $I$  为靶材所受的冲量;  $S$  为冲击波与靶的作用面积。

由此可知激光支持爆轰波与侧向冲击波均满足 Jouguet 条件, 则冲量与膨胀介质的比热比的关系

式为

$$\bar{\gamma} = \frac{I}{\iint p dS dt}. \quad (8)$$

根据流体动力学理论可以进行数值模拟, 得到受热气体对靶压力随时间的变化关系。但是, 靶所受的压力可以认为是激光吸收区介质粒子(运动气体和等离子体)撞击在靶面上形成的。因而从激光支持爆轰波产生的时刻 0 开始至稀疏波与冲击波相互作用结束时刻为止, 对结果进行积分, 再根据式(6)和(7)就可分别求得激光支持爆轰波和侧向冲击波对靶的冲量。

由于二维流体动力学数值模拟的计算工作量较大, 仅取 7 组具有代表性的点进行数值模拟, 获得了激光支持爆轰波波阵面压强分布  $p$ 。然后再对由式(6)和式(7)所计算得到的冲量叠加即可得到靶所受的冲量, 根据靶所受冲量与膨胀介质的比热比的关系式(8)可得到比热比随激光功率密度的变化关系, 如图 6 所示。

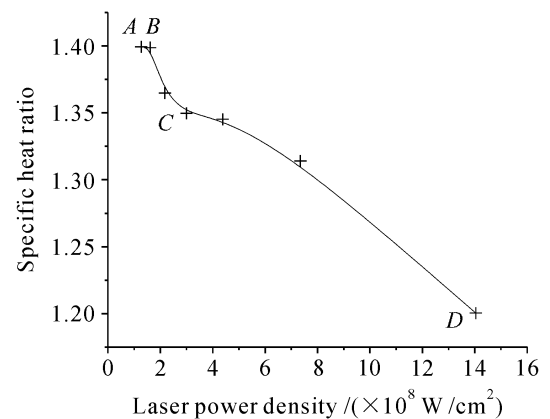


图 6 比热比随作用激光功率密度的变化关系  
Fig. 6 Relation between specific heat ratio and laser power density

由图 6 见, 随着作用激光功率密度的增加, 在激光吸收区中等离子体的比例逐步增加, 并将导致比热比值的下降, 此处的物理意义可结合图 1 和图 2 靶冲量传递效率的降低进行解释。当作用激光功率密度增大时, 此时有部分激光能量成为游离态或电离态蒸气粒子的内自由度具有的能量, 即好象“增加”了粒子的自由度(定容摩尔热容量  $C_V^{\text{mol}}$  增加), 这些能量对于激光冲量耦合过程没有贡献, 这就是图 1 和图 2 靶冲量传递效率的降低的微观解释。考虑将等离子体近似为理想气体处理, 有<sup>[17]</sup>

$$C_p^{\text{mol}} - C_V^{\text{mol}} = R, \quad (9)$$

式中  $C_p^{\text{mol}}$  为定压摩尔热容量;  $R$  为普适气体常量。

由式(9)可得

$$\gamma = 1 + R/C_{\text{V}}^{\text{mol}}. \quad (10)$$

当激光功率密度增加时,  $C_{\text{V}}^{\text{mol}}$  将增加, 而  $\gamma$  将减小。

图 6 中的曲线有按不同规律变化的三段区间, 曲线从 A 到 B 阶段比热比接近于 1.4, 说明激光吸收区中的介质基本尚未发生电离; 从 B 到 C 阶段比热比值急剧下降说明激光吸收区内介质发生显著电离, 从而影响了激光吸收区中的电离度; 而从 C 到 D 阶段比热比值变化较 B 到 C 阶段要缓慢。

### 3.3 比热比 $\gamma$ 与吸收区组分的关系

激光吸收区由气体和等离子体组成, 气体和等离子体可近似为理想气体。设  $x$  为激光吸收区的气体含量,  $y$  为激光吸收区的等离子体含量, 可得

$$x + y = 1, \quad (11)$$

$$\frac{x}{\gamma_x - 1} + \frac{y}{\gamma_y - 1} = \frac{1}{\bar{\gamma} - 1}, \quad (12)$$

式中  $\gamma_x$  为气体比热比取 1.4;  $\gamma_y$  为等离子体比热比取 1.2。在测得不同激光功率密度的靶冲量  $I$  后, 由式(8)可求得对应的  $\bar{\gamma}$ , 代入式(11)和(12)可求得不同激光功率密度作用下, 激光吸收区的气体含量  $x$  和等离子体的含量  $y$ 。用比热比值确定出在一定作用激光能量下, 等离子体和未电离气体的含量随激光功率密度的变化关系, 如图 7 所示。

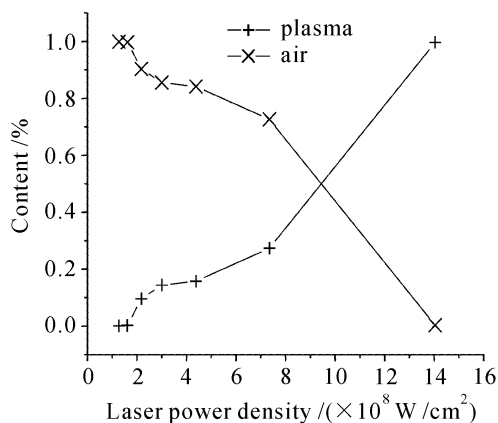


图 7 等离子体含量和气体含量随激光功率密度的变化关系

Fig. 7 Relation between component content and laser power density in the coronal zone

由激光吸收区中等离子体含量可以判断激光支持爆轰波的点燃阈值。由图 7 可见, 随着激光功率密度的变大, 激光吸收区中未电离的气体含量减少, 而等离子体含量增加。当作用激光功率密度超过  $(1.62 \pm 0.01) \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时, 等离子体含量迅速

升高, 直至  $(2.10 \pm 0.07) \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  才平缓, 认为激光支持爆轰波点燃阈值在这一区间内。这为激光支持爆轰波点燃阈值提供了一种新的判断方法。这与文献[14]所给结果基本一致。

## 4 结 论

在相同作用激光能量下, 当透镜与靶距离小于焦距时, 随着作用于靶面激光功率密度的增大, 靶面温度和激光吸收区中撞击靶表面蒸气粒子能量随之增加, 因此靶冲量和冲量耦合系数也随之增大。激光功率密度进一步增大时, 靶冲量和冲量耦合系数增速减缓; 比热比随激光功率密度的增加而减少的曲线具有二种变化规律(图 6)。其中曲线从 B 到 C 阶段, 比热比急剧下降, 表明在此阶段激光吸收区中离化粒子含量急剧增加; 从 C 到 D 阶段则变化明显变缓; 通过对靶获得的冲量或冲量耦合系数可以判别激光吸收区的物质组分。根据激光吸收区的物质组分, 可以判定激光支持爆轰波的点燃阈值在  $(1.62 \pm 0.01) \times 10^8 \sim (2.10 \pm 0.07) \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  之间。

## 参 考 文 献

- 1 Man Baoyuan, Miao Yong, Guo Xiangxin *et al.*. Emission spectra produced by laser ablation of metal AL at different ambient pressures [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 1997, **42**(13):1139 ~ 1142
- 2 Wu Bian, Wang Shengbo, Guo Dahao *et al.*. Research of material modification induce by laser shock processing on aluminum alloy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10):1352 ~ 1356  
吴 边, 王声波, 郭大浩 等. 强激光冲击铝合金改性处理研究 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(10):1352 ~ 1356
- 3 W. O. Schall, H.-A. Eckel, W. Riede. Laser propulsion experiments with high-power pulsed CO<sub>2</sub>-laser [C]. *SPIE*, 2003, **5120**:618 ~ 622
- 4 Jin Xing, Hong Yanji, Cui Cunyan *et al.*. Measure method of impulse coupling-coefficient of laser propulsion [J]. *High Power and Particle Beams*, 2004, **16**(7):861 ~ 864  
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
- 5 Zheng Yijun, Tan Rongqing, Wang Donglei *et al.*. Effect of laser pulse repetition rate on momentum coupling coefficients [J]. *High Power and Particle Beams*, 2005, **17**(7):979 ~ 982  
郑义军, 谭荣清, 王东蕾 等. 激光脉冲重复频率对冲量耦合系数的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(7):979 ~ 982
- 6 Zheng Yijun, Gong Ping, Tan Rongqing *et al.*. Experimental study of coupling coefficients for air-breathing mode laser propulsion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7):889 ~ 893  
郑义军, 龚 平, 谭荣清 等. 大气模式激光推进耦合系数的实验研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(7):889 ~ 893
- 7 Cui Cunyan, Hong Yanji, Wang Jun *et al.*. Influence of focusing system structure on propulsion performance of laser thruster [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6):739 ~ 742

- 崔村燕,洪延姬,王 军等. 聚光系统构形对激光推力器推进性能的影响[J]. 中国激光, 2006, **33**(6):739~742
- 8 Xu Jianbo, Lin Junde, Liu Jin *et al.*. Impulse coupling to targets in air by pulse laser [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, **22**(3):285~288  
徐建波,林俊德,刘 晋等. 气压对脉冲激光冲量耦合系数的影响[J]. 爆炸与冲击, 2002, **22**(3):285~288
- 9 C. R. Phipps, Jr., T. P. Turner, R. F. Harrison *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):1083~1086
- 10 C. Sun, S. Zhuang, F. Luo *et al.*. Laser induced pressure and impulse on a solid surface in air [R]. AIAA 24<sup>th</sup> Plasma Dynamics & Lasers Conference, 1993. 1
- 11 Duluo Zuo, Hong Lu, Zuhai Cheng. Studies on a 100-Joule UV-preionized TEA CO<sub>2</sub> laser [C]. *SPIE*, 2005, **5777**:442~445
- 12 M. Han, K. P. Lieb, E. Carpena *et al.*. Laser-plume dynamics during excimer laser nitriding of iron [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **93**(9):416~427
- 13 Lu Jian, Ni Xianwu, Shen Zhonghua. Physics mechanisms of ignition of a high-power laser supported detonation wave [C]. *SPIE*, 1997, **3173**:168~172
- 14 Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. The Physics of Interaction between Laser and Material [M]. Beijing: China Machine Press, 1996. 115, 167  
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. 115, 167
- 15 Zhu Jinrong, Yang Yannan, Yang Bo. The determination of component in coronal region from impulse coupling between laser and target [J]. *Journal of Ballistics* (to be published)  
朱金荣,杨雁南,杨 波. 由激光靶冲量耦合判定激光吸收区组分的大致构成[J]. 弹道学报(已录用)
- 16 Sun Chengwei. The Effect of Laser Irradiation [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 101~109  
孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. 101~119
- 17 Zhao Kaihua, Luo Weiyin. The Physical Text-Book on the New Concept Thermotics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. 142  
赵凯华,罗蔚茵. 新概念物理教程热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2002. 142