

文章编号: 1001-3806(2007)06-0659-04

功率密度对等离子体冲击波力学效应的影响

章玉珠, 王广安, 沈中华, 倪晓武, 陆建*

(南京理工大学 应用物理系, 南京 210094)

摘要: 为了研究入射激光功率密度对等离子体冲击波力学效应的影响, 利用波长 $1.06\mu\text{m}$, 脉冲能量 $42\text{mJ} \sim 320\text{mJ}$ 脉宽 10ns 的 Nd:YAG 激光作用在 Al 靶上, 研究了冲量耦合系数 C_m 和激光功率密度 I_0 的关系。实验发现靶材在离焦距 x 不同时, C_m 和 I 的变化关系相似, 而对应的最佳功率密度明显不同。在功率密度由低慢慢升高过程中, 冲量耦合系数先随功率密度升高而增加, 升到最大值后随功率密度增加而减小。通过分析激光等离子体的吸收作用和离焦距不同时激光和靶相互作用机理的不同, 认为 C_m 出现峰值主要是受等离子体屏蔽效应的影响, 稀疏波的作用使得焦斑处最佳功率密度最大, 而焦斑处空气击穿消耗能量导致焦后 C_m 峰值减小。

关键词: 激光技术; 功率密度; 等离子体冲击波; 冲量耦合系数

中图分类号: TN249 文献标识码: A

Influence of intensity on mechanical effect of laser plasma shock wave

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

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

Abstract The dependence of the mechanics effect to the target induced by laser on laser intensity was reported. The experiments were performed by focusing output pulses of the Nd:YAG laser (10ns pulse width at $1.06\mu\text{m}$ wavelength and $42\text{mJ} \sim 320\text{mJ}$ pulse energy) on aluminum targets mounted on a ballistic pendulum. The data showed that there were different optimum intensities which gave a maximum C_m at different extent of depart from the focus (x). And the impulse coupling coefficients (C_m) was determined by similar functions of intensity in the different x . The C_m increases slowly with the increasing of laser intensity and decreases after it gets maximum quantity. According to the absorption of the plasma and the different laser target interaction mechanisms at the different x , the results show that there is the maximum C_m because of the plasma shielding effect, the optimum intensity is largest at the focus because of the effect caused by the rarefaction wave and the maximum C_m at $x > 0$ is smaller than the others due to the energy consuming of the air breakdown at the focus.

Key words laser technique; laser intensity; plasma shock wave; impulse coupling coefficient

引 言

激光辐照固态靶, 引起靶中热应力、熔融、气化和烧蚀, 靶蒸气等离子体吸收入射激光, 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, 完成了激光和靶的动量耦合。激光吸收波的产生及类型直接受激光功率密度影响, 所以长期以来, 激光功率密度对激光和靶能量动量耦合的影响一直受到研究者的关注, 但由于问题本身的复杂程度及研究环境的不同没有形成统一的结论和理论模型^[1-3]。近年来由于激光推进技术的迅速发展^[4-6], 激光参数、环境参

数对激光和靶相互作用影响的研究又重新得到了关注^[7,8], 研究功率密度对冲击波力学效应的影响有助于合理的选择推进方式和有效地利用激光能量。冲量耦合系数 C_m 是描述单位入射激光能量转换成靶动量的物理量, 本文中通过实验测量了不同离焦量情况下冲量耦合系数 C_m 和功率密度 I 的关系, 并结合相关理论, 定性地解释了实验规律。

1 实验装置与原理

1.1 实验装置

实验装置如图 1a 所示。实验采用 Nd:YAG 脉冲激光器 1, 相关技术参数为: 波长 $1.06\mu\text{m}$, 脉宽 10ns , 单脉冲能量 320mJ 。激光器 1 输出的脉冲激光经过反射镜 2 和分光镜 3 后, 通过一个焦距为 147mm 的凸透镜 4, 作用在圆形平面铝靶 5 上。靶结构为一单摆, 当激光作用时该单摆将产生微摆动, 靶的摆速由光电传感器测得, 如图 1b 所示。HeNe 激光器 6 发出的波长

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60578015)

作者简介: 章玉珠 (1974-), 女, 讲师, 博士研究生, 主要从事激光和物质相互作用方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: lujian@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2006-09-04 收到修改稿日期: 2006-10-31

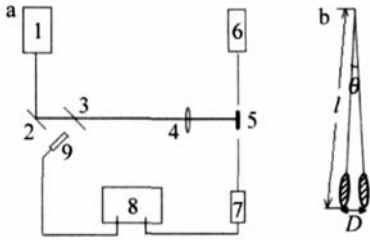


Fig 1 Sketch map of the experimental setup and the calculation of target angle velocity
a) experimental setup b) sketch map of target

为 632.8nm 激光作为探测光束, 照在靶 5 上。当靶偏离平衡位置时, 通过玻璃窗照在光电传感器 7 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强最弱, 将光电传感器接入示波器 8 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 1b 所示: 靶通过光电传感器细缝 D 的时间 Δt 由光电传感器测得, 靶通过细缝的角位移 $\Delta\theta = \frac{D}{l}$, 靶通过时的角速度 $\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$, 靶的动量 $P = \frac{L}{l} = \frac{J\omega}{l}$ (式中 L 是角动量, J 是靶摆的转动惯量), 冲量耦合系数 $C_m = \frac{P}{E} = \frac{J\Delta\theta}{E\Delta tl} = \frac{JD}{E\Delta tl^2}$ 。本实验中采用圆形铝靶直径为 2.38cm, 质量为 0.20g, 靶摆悬点到靶底部边缘距离 $l = 46.80\text{cm}$, 光电传感器通光缝宽 0.70mm。

2 实验结果和讨论

实验中离焦量和光斑直径示意图如图 2 所示。定

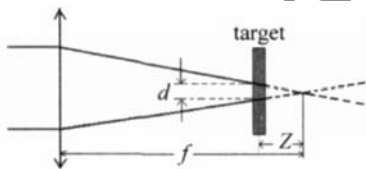


Fig 2 Defining Z and d

义一个无量纲参量 $x = \frac{Z}{f}$ 表示靶材的离焦程度, 光斑是在平均脉冲能量 $E = 2.0\text{mJ}$ 时烧蚀处于不同离焦量感光相纸得到, d 是 5 次测量平均值。表 1 中列出了实验所用参量。

Table 1 The relation of the Z, x and d

| | | | |
|------|------|--------|-------|
| Z/mm | 0 | -9 | 9 |
| x | 0 | -0.061 | 0.061 |
| d/mm | 0.30 | 0.80 | 0.78 |

2.1 焦斑位置 (x = 0)

实验得到焦斑位置靶冲量耦合系数和入射激光功率密度关系如图 3 所示。

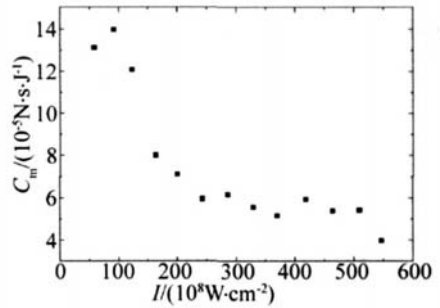


Fig 3 The relationship between C_m and I at $x = 0$

2.2 焦前 9mm (x = -0.061)

焦前 9mm 处靶冲量耦合系数和入射激光功率密度关系如图 4 所示。

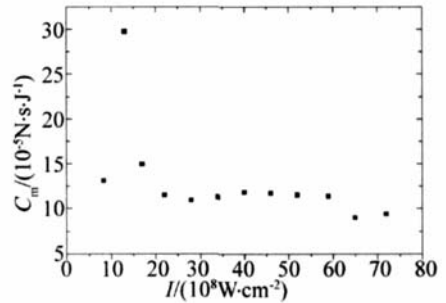


Fig 4 The relationship between C_m and I at $x = -0.061$

2.3 不同离焦度 Cm 和 E 的关系

实验得到焦后 9mm ($x = 0.061$) C_m 和 E 的关系, 由于激光在辐照到焦后靶面前先发生了焦斑处空气击穿, 增加了靶面功率密度计算的复杂程度, 为了更好地比较实验结果, 图 5 中给出了不同离焦度下 C_m 和 E 的变化关系。

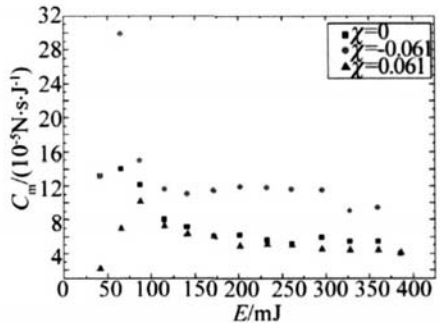


Fig 5 The relationship of C_m and E at different x

由图 3~图 5 实验曲线可知, 在不同离焦情况下 C_m 和 I 的变化规律大体相同, 在功率密度由低慢慢升高过程中, 冲量耦合系数先随功率密度升高而增加, 升到最大值后随功率密度增加而减小。 $x = -0.061$ 处的最佳功率密度是 $1.2 \times 10^9 \text{W/cm}^2$, 而 $x = 0$ 位置最佳功率密度为 $9.30 \times 10^8 \text{W/cm}^2$ 。焦后由于存在焦斑位置空气击穿, 辐照在靶面的实际功率密度难以计算, 但由图 5 $x = 0$ 处 C_m 最大时所需能量和 $x = -0.061$ 处一样, 都是 65.3mJ 只是峰值 $13.9 \times 10^{-5} \text{N} \cdot \text{s/J}$ 明显

低于后者的 $29.8 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{J}$ $x = 0.061 \text{ cm}$ 峰值对应能量是 87.1 mJ 明显高于前面两种情况, 但 C_m 峰值只有 $10.1 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{J}$

3 讨论

在功率密度 I_0 增大到最佳功率密度前, C_m-I_0 的上升趋势是不同光强下不定常汽化过程的体现, ROSON 的研究很好地描述了这一阶段 C_m-I_0 的变化关系^[3]。下面着重讨论实验曲线下降的原因。

3.1 等离子体屏蔽的影响

$x \leq 0$ 时, C_m 与 I 的变化规律类似, 这主要是由于等离子体屏蔽效应在不同离焦量情况下, 功率密度较大时均有很大影响。定义等离子体吸收系数:

$$K_{\text{ab}} = \frac{1}{L_p} \ln \frac{I_0}{I} \quad (1)$$

式中, L_p 为等离子体厚度, I_0 为入射激光功率密度, I 为穿过等离子体辐照到靶上的功率密度。

LU 在理论和实验上均证实等离子体吸收系数随功率密度线性增长^[9]。将此关系描述为:

$$K_{\text{ab}} = \frac{1}{L_p} \ln \frac{I_0}{I} = kI_0 \quad (2)$$

式中, k 为比例系数, 由文献 [10] 中实验曲线读出 $k = \frac{3.5}{14 \times 10^6} \text{ cm/W}$, 则有:

$$I = \frac{I_0}{e^{kI_0 L_p}} \quad (3)$$

冲量耦合系数定义为 $C_m = \frac{m v}{E}$, 靶动量主要来自于等离子体冲击波的反冲作用, 即主要来自于作用于靶面产生等离子体的能量, 定义动能转换效率 $\eta = \frac{E_t}{E}$, E 为激光入射能量, E_t 为辐照到靶面的能量 (包含点燃等离子体的能量以及等离子体产生后透射到靶面的能量)。当等离子体点燃时间 t 和激光脉宽 τ 的关系为 $t \leq \tau$ 时:

$$C_m \propto \eta = \frac{E_t}{E} = \frac{[I_0 t + I(\tau - t)] S}{E} = \frac{I_0 S}{E} \frac{(e^{kL_p I_0} - 1)t + \tau}{e^{kL_p I_0} \tau} = \frac{(e^{kL_p I_0} - 1)t + \tau}{e^{kL_p I_0} \tau} \quad (4)$$

式中, S 为靶面积, $I_0 t$ 表示点燃等离子体的能量, $I(\tau - t)$ 表示等离子体产生后透射到靶面的能量。

WALTERS 的实验证明, 脉冲功率密度越大, 脉宽越短, 等离子体产生时间越短^[11]。ROSON 和 PRR I 也从理论上计算了等离子体的产生时间^[2, 9]。用从激光加热到气化开始的时间间隔作为等离子体点燃时间的近似估计^[12], 当入射功率密度为 I_0 的激光作用在

密度为 ρ 的靶材上时, 汽化靶厚度为 δ 该过程由能量守恒定律可得:

$$\langle A \rangle I_0 t = \delta \rho [c_v (T_v - T_0) + L_v] \quad (5)$$

$$t = \frac{\delta \rho [c_v (T_v - T_0) + L_v]}{\langle A \rangle I_0} \quad (6)$$

式中, $\langle A \rangle$ 为平均吸收系数, c_v 为平均比热容, L_v 为熔融潜热, T_v 为汽化温度, T_0 为初始温度。对于纯铝 $L_v = 400 \text{ J/g}$, $T_v = 2767 \text{ K}$, $c_v = 1.3 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$, $\langle A \rangle = 0.1$, $\delta = 0.2 \text{ } \mu\text{m}$, $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$, $T_0 = 293 \text{ K}$ 。将以上数据代入 (6) 式, 得:

$$t = \frac{1.2 \times 10^8}{I_0} (\text{ns}) \quad (7)$$

将 (7) 式代入 (4) 式, 得:

$$C_m \propto \eta = \frac{(e^{kL_p I_0} - 1) \cdot \frac{1.1 \times 10^8}{I_0} + \tau}{e^{kL_p I_0} \tau} \quad (8)$$

图 6 为 (8) 式的曲线。

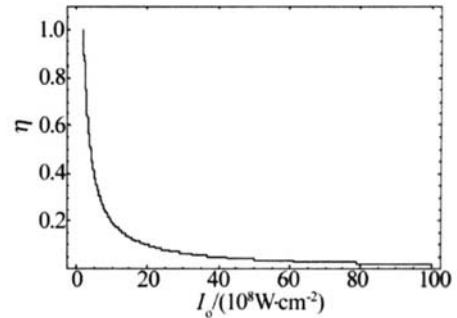


Fig 6 The relationship of η and I_0

如图 6 所示, 在激光等离子体屏蔽效应发生之后, 屏蔽效应导致冲量耦合系数随着入射激光功率密度增加而减小, 这与得到的实验结果相吻合。

3.2 稀疏波的影响

$x = 0$ 处最佳功率密度大于 $x < 0$ 处, 主要是由于焦斑处光斑半径最小、功率最大、稀疏波影响最强。稀疏波起到降低等离子体区粒子密度的作用, 延缓了等离子体屏蔽的过程, 导致屏蔽效应发生在更大的功率密度处^[13, 14]。

3.3 作用机制不同的影响

$x > 0$ 处, 激光和靶的作用机制不同, 靶受到 3 种力的作用: (1) 焦点空气发生光学击穿产生的爆轰波的反冲作用; (2) 在空气发生击穿前辐照到靶面的能量, 以及在空气击穿过程中透过到靶面的激光能量导致靶面空气击穿, 由此产生的爆轰波的反冲作用; (3) 质量迁移的反冲作用。焦斑空气击穿和靶面空气击穿产生的等离子体同样对击穿后的激光存在屏蔽效应, 所以 C_m 和 E 的变化规律和 $x \leq 0$ 时类似。由于存在在焦斑位置的空气击穿, 能量部分耗散在空气中, 耦合到

靶上的能量随 Z 增大变少, 冲量耦合系数的峰值也随之减小。

4 结 论

(1) 不同离焦情况下 C_m 和 $E(I)$ 的变化关系类似, 在 I 增大过程中, 开始 C_m 随 I 增大而增大, 到达最大值后随 I 增大而减小。出现此种变化的主要原因是功率密度足够大时出现了等离子体屏蔽效应。

(2) $x = 0.061$ 处最佳功率密度小于焦斑位置, 主要是由于在焦斑位置除受等离子体屏蔽效应之外, 稀疏波的作用要强于 $x = -0.061$ 处。

(3) $x = -0.061$ 处和 $x = 0$ 处 C_m 峰值对应能量接近, $x = 0.061$ 处 C_m 峰值对应能量明显升高, 但 C_m 峰值在三者中最小。这主要由于 $x > 0$ 处, 激光和靶的作用机制不同, 发生在焦斑处的空气击穿, 使能量耗散在空气中部分增大, 导致 C_m 峰值较 $x \leq 0$ 时小。

参 考 文 献

- [1] ARAD B, ELIEZER S, GAZIT Y *et al*. Burn-through of thin aluminum foils by laser-driven ablation [J]. J A P, 1979, 50(11): 6817~6821.
- [2] ROSON D, MITTELDORF I J, KOTHANDARAMAN G. Coupling of pulsed $0.35\mu\text{m}$ laser radiation to aluminum alloys [J]. J A P, 1982, 53(8): 3190~3220.
- [3] MAN B Y, WANG X T. In-pulse coupling to HgCdTe by a pulsed laser [J]. Acta Optica Sinica 1998, 18(8): 1010~1014 (in Chinese).

- [4] PHIPPS C R, LUKE J R, LPPERT T *et al*. Micropropulsion using laser ablation [J]. Appl Phys 2004, A79(4~6): 1385~1389.
- [5] SCHALL W O, BOHN W L, ECKELEL H A. Lightcraft experiments in Germany [J]. Proc SPIE, 2000, 4065: 472~481.
- [6] HORISAWA H, KAWAKAMI M, KMURA I. Laser-assisted pulsed plasma thruster for space propulsion applications [J]. Appl Phys 2005, A81(2): 303~310.
- [7] MA F J, TIAN Y W, HE F F *et al*. Ultra-short pulse laser induced damage in transparent materials [J]. Laser Technology, 2004, 29(5): 207~210 (in Chinese).
- [8] QIN H, ZHENG R E, YANG A L. Influence of moist environment on the ablation threshold of copper [J]. Laser technology, 2003, 27(6): 497~499 (in Chinese).
- [9] LIU Ch L, LO F, LU X F *et al*. Investigation of incident laser absorption by vapor plume [J]. High power laser and particle beams 1990, 2(3), 366~371 (in Chinese).
- [10] PRR I A N. Momentum transfer and plasma formation above a surface with a high power CO_2 laser [J]. Physics Fluids 1973, 16(9): 1435~1440.
- [11] WALTERS C T, BAGNES R H, BEVERLY R E. Initiation of laser-supported-detonation (LSD) waves [J]. J A P, 1978, 49(5): 2937~2949.
- [12] LIU J NIX W, HE A Zh. Physics of laser material interaction [M]. Beijing Machinery Industry Press 1996: 65~68 (in Chinese).
- [13] ELLIOT L K, STANANLEY R B. Measurement of subsonic laser absorption wave propagation characteristics at $10.6\mu\text{m}$ [J]. J A P, 1974, 45(11): 4751~4759.
- [14] PHIPPS C R, Jr TURNER T P, HARRISON R F *et al*. In-pulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO_2 single-pulse lasers [J]. J A P, 1988, 64(3): 1083~1096.

(上接第 658 页)

于这两个因素单独作用的影响。而激光能量和脉宽、光斑直径和脉宽的交互作用影响较小, 在进一步的参数优化设计可以忽略不计。(3) 除以上因素外, 激光冲击次数、约束层及吸收层的厚度和材料均与喷丸后板料表面压应力大小密切相关。其中冲击次数不仅影响了表面残余压应力的大小, 还使得材料内部残余压应力所达到的深度以及深度方向的应力值均得到增加。约束层能有效地提高激光诱导的冲击波的峰压值, 吸收层保护工件烧蚀的同时提高了激光吸收率。进一步的优化中, 在分析主要参数的同时要综合考虑其他因素的影响。

参 考 文 献

- [1] HACKEL L, HARRIS F. Contour forming of metals by laser peening [P]. USA: WO01/05549A2 2002-06-25.
- [2] HACKEL L A, CHEN H L. Laser peening—a processing tool to strengthen metals or alloys to improve fatigue lifetime and retard stress-induced corrosion cracking [R]. New York: Laser Science and Technology 2003. 1058~1061.
- [3] FAN Y, WANG Y, VUKELIC S. Wave solid interactions in laser-

- shock-induced deformation processes [J]. J A P, 2005, 98(10): 1~11.
- [4] WANG G L, ZHOU J Zh, YANG Ch J. Application of laser induced shock wave in surface modification and forming of sheet metal [J]. The Transaction of Agriculture Engine 2005, 36(12): 148~152 (in Chinese).
- [5] ZHANG X Q, ZHOU J Zh, GU Y Y. Research on technology of metal plate plastic forming by laser shot peening [J]. Journal of Lanzhou University of Technology 2006, 32(2): 31~33 (in Chinese).
- [6] OROS C. Investigations involving shock waves generation and shock pressure measurement in direct ablation regime and confined ablation regime [J]. Shock Waves 2002, 11(5): 393~397.
- [7] ZHOU J Zh, ZHANG Y K, ZHOU M. Study on technique of laser shock forming of metal sheet [J]. Laser Technology 2002, 26(6): 478~480 (in Chinese).
- [8] ZHOU J Zh, ZHANG Y K, ZHOU M. Theoretical analysis on deformation of sheet metal under one laser shot loading [J]. Chinese Journal of Laser 2005, 32(1): 135~138 (in Chinese).
- [9] The Compile Group of Orthogonal Experimentation. Orthogonal experimentation [M]. Beijing National Defence Industry Press 1976. 1~5 (in Chinese).
- [10] JIN L Ch. Orthogonal design and multi-target analysis [M]. Beijing China Railroad Publishing Company, 1988. 41~47 (in Chinese).