

碳氢靶强激光烧蚀特性

冯 杰 李三伟 丁永坤 温树槐 何海恩
丁耀南 成金秀 王大海 郑志坚

(中物院核物理与化学研究所, 成都525信箱, 610003)

摘 要 给出了准稳态情况下强激光烧蚀碳氢靶的实验结果, 并与理论定标关系进行对比。实验中采用晶体谱仪时间积分和 X 射线条纹相机同时获取碳氢平面靶强激光烧穿厚度和烧穿时间。采用基频光大能量注入, 大焦斑 ($\Phi 400\mu\text{m}$), 光束经列阵透镜均匀化后, 烧蚀碳氢平面靶, $I_a = 0.55 \times 10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$, 晶体谱仪获得的结果是 $\dot{m} = 2 \times 10^5 \text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$, X 射线条纹相机获得的结果是 $\dot{m} = 1.35 \times 10^5 \text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$, $p = 1.6 \times 10^{12} \text{Pa}$, 并与收集到的国外数据进行了比较, 在误差范围一致。

关键词 激光烧蚀 碳氢平面靶 激光核聚变

在直接驱动研究中, 低预热和高均匀性激光驱动的烧蚀过程是达到热核燃烧所需的高压缩度的一条合理途径。激光对低 Z 材料的烧蚀, 电子热传导在能量输运中起了主导作用。短波长激光对能量的吸收转换更为有利, 可以获得更高的烧蚀速率和烧蚀压。近年来, 间接驱动黑腔靶中为了使 DT 小丸达到更理想的压缩, 黑腔内增设 CH 阻光膜, 使激光烧蚀 CH 材料的工作具有更积极意义。通过强激光对材料烧蚀规律的实验研究, 还可以加深对激光和靶、激光和等离子体相互作用机制的认识, 为腔靶物理的研究和激光驱动内爆动力学的研究打下基础, 也可以为建立正确的理论模型和校核参数提供部分实验数据。

八十年代国外的几家实验室做了不少激光烧蚀靶材的实验研究, 钽玻璃激光器基频光烧蚀碳氢靶的数据也有一些^[1-7], 但大多数是在小功率激光器上, 通过缩小焦斑来提高功率密度的办法进行烧蚀实验, 横向传热损失可能比较严重。光束均匀化程度也未作说明。我们本次实验采用大激光能量注入, 大焦斑, 光束采用列阵透镜均匀化后烧蚀碳氢平面层靶, 采用时间积分晶体谱仪测定烧穿厚度的同时, 用 X 射线条纹相机测定了烧穿时间。

1 理论描述

临界面附近的电子在吸收激光后向靶的内部传热, 受热的介质迅速向真空膨胀, 这就是激光烧蚀过程。根据动量守恒定律, 这一过程在烧蚀波头形成高压, 同时产生一个向内传播的冲击波。图1是激光打靶条件下的温度、密度、压力和马赫数 ($M = u/c_r$, c_r 为等温声速) 的空间分布示意图。图中, X_s , X_a 和 X_c 分别为冲击波、烧蚀面和临界面的位置。

由于激光烧蚀产生的等离子体是由大量带电粒子组成的动力学系统, 粒子之间存在着库仑相互作用, 研究这种大量粒子构成的系统的适宜方法是动力学理论。动力学理论相当复杂, 因此我们常常把等离子体近似地当作导电流体用流体力学方法来研究。

国家863惯性约束聚变领域资助项目。
1997年7月4日收到原稿, 1997年9月9日收到修改稿。
冯杰, 男, 1941年2月出生, 副研究员。

我们采用稳态烧蚀理论。所谓稳态烧蚀,烧蚀区是定态,从烧蚀面烧出来多少物质,从临界面就飞散多少,临界面附近沉积的激光能量用于维持烧蚀物质真空等温膨胀(冲击波带走的能量约1%)。稳态烧蚀有下述假设:(1)激光能量的吸收发生在临界面或其附近的区域,吸收的激光能量基本上用于加热电子。(2)靶材的原子序数为中等以下介质。(3)烧蚀区,准定态。(4)电晕区,等温近似。稳态烧蚀的条件是 $\tau \gg (X_c - X_a)/c$, τ 为激光脉宽, c 为当地声速。理论分析表明在目前“星光”和“神光”长脉冲运行打靶的状况下,上述假设基本上是成立的。分别在定态区和等温区求解一维平面对称流体力学方程组

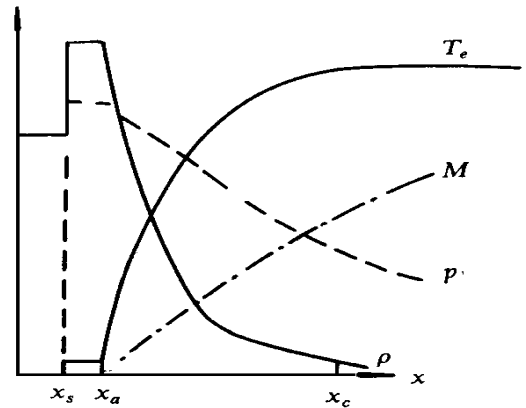


Fig 1 Space distribution of ρ, T_e, p, M for laser-plasma interaction

图1 激光打靶条件下的物理量空间分布

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + p) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon + \rho \frac{u^2}{2}) + \frac{\partial}{\partial x}[\rho u(\frac{u^2}{2} + \epsilon + \frac{p}{\rho}) + F] &= \frac{\partial Q}{\partial x} \end{aligned}$$

其中 ρ 是密度; u 是流体速度; p 为单位面积上的压力; ϵ 为单位质量的内能(热能和势能); F 为能流; Q 为能源项。针对本次实验条件,激光波长 $\lambda = 1.05 \mu\text{m}$ 、 I_a 约 $10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$ 、临界面马赫数 $M_c = 1$, 于是在 $M_c = 1$ 处, 将定态区和等温区的解连结起来, 得到下述定标关系

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \rho_c c \tau I_a^{1/3} \lambda^{4/3} \\ p_a &= 2p_c \sim I_a^{2/3} \lambda^{-2/3} \end{aligned}$$

其中 \dot{m} 是质量烧蚀速率; p_a 是烧蚀压; I_a 是激光吸收功率密度, 可以通过实验测定。实验结果可以验证这些定标关系, 为理论计算提供部分实验数据。

2 实验原理和方法

按质量烧蚀率的定义 $\dot{m} = \rho d/\tau$, \dot{m} 是单位面积质量烧蚀率 ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$); ρ 和 d 是烧蚀材料的密度 (g/cm^3) 和厚度 (cm); τ 是某一功率密度下靶厚 d 相应的烧穿时间 (s)。有两种方法可以获得 \dot{m} : (1) 固定 d , 直接测量某一功率密度下 d 相应的烧穿时间 τ ; (2) 认为烧穿时间就是激光脉宽 τ , 固定功率密度, 测被烧蚀材料不同厚度情况下衬底材料高剥态特征谱线的相对强度, 外推烧蚀厚度 d 。上述第二种方法我们称之为晶体谱仪时间积分测量。晶体谱仪时间积分测量, 烧穿时间是假定的, 而且确定被烧蚀料烧穿厚度的方法需要较多的实验发次。对于铝等金属靶材烧穿时间的测定国外一般采用晶体谱仪配条纹相机。但是碳靶, 特征线波长长(几纳米), 强度弱不宜采用这种方法。文献[7]介绍了一种球形靶上碳氢层烧穿时间的测量方法, 于是, 采用 $\text{Ti} + \text{CH} + \text{Si}$ 平面层靶同时来测定碳氢材料的烧穿时间和烧穿厚度, Ti 为 $0.01 \mu\text{m}$, 采用 X 射线条纹相机加针孔测量, 针孔前加 $25 \mu\text{m}$ 的 Be 膜, 测量 1keV 以上的 X 射线。

激光入射在 Ti 上作为 CH 烧蚀的起点。烧蚀 CH 的过程中, CH 发出的 X 射线很弱, 热波阵面传到 Si 层时, Si 发出的增强 X 射线表示 CH 烧穿。Ti 和 Si 发光时间差, 就是 CH 的烧穿时间。用晶体谱仪测定不同厚度 CH 靶底衬硅特征线 Si^{+13} 的 $1s-2p$ 线的相对强度外推获得烧穿厚度。

按火箭模型, 烧蚀压可由动量守恒获得, $p = \dot{m} \bar{v}$, 式中 p 为烧蚀压 (Pa), \bar{v} 是等离子喷射的平均速度 (cm/s)。烧蚀压还可以从能量守恒关系中得到: $p = (2m I_a)^{1/2}$ 。

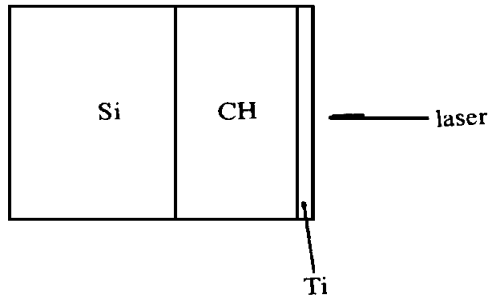


Fig 2 Schematic of CH layer plane targets
图2 Ti+CH+Si 平面层靶示意图

3 实验

现场实验在中国工程物理研究院所属的“星光”装置上进行。“星光”装置是固体钕玻璃激光器。基频光波长 $1.05\mu m$, 本次实验过程中能量范围 $148\sim 164J$, 光束经列阵透镜^[10]均匀化后照射在平面靶上, 焦斑直径约 $\Phi 400\mu m$, 激光脉宽约 $750ps$ 。现场的探测器有: 晶体谱仪2台(晶体为 TAP)、X 射线条纹相机2台、X 射线针孔相机一台(监测 X 射线焦斑)、法拉第离子探头2个。靶室内实验布局如图3。

靶为平面层靶。碳氢平面层靶的底衬为生产半导体所用硅片, 可认定为纯硅片, $3mm \times 3mm \times 0.2mm$ 。碳氢层厚为 $0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0\mu m$ 。碳氢层表面蒸镀 $10nm$ 钛。厚度均匀性和测厚精度好于 $\pm 1\%$ 。

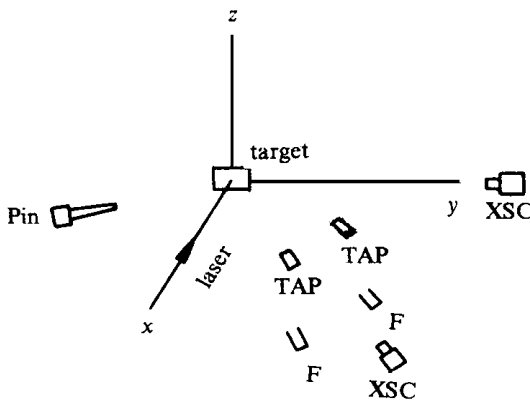


Fig 3 Experimental apparatus

TAP: crystal spectrometer; F: Faraday-cup;
Pin: pinhole camera; XSC: X-ray streak camera
图3 实验现场探头方位示意图。TAP: 晶体谱仪;
F: 离子探头; Pin: 针孔相机; XSC: X 射线条纹相机

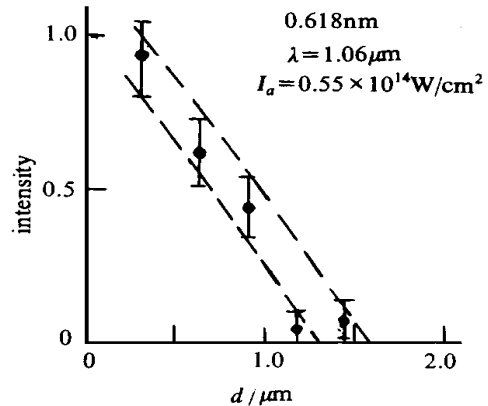


Fig 4 Relative intensity of the $1s-2p$ line of Si^{+13} at $2.0keV$ as a function of CH coating thickness

图4 基频强激光烧蚀 CH 平面靶获得的谱线强度值随靶厚的变化

4 实验结果与讨论

4.1 晶体谱仪获得的强激光烧蚀碳氢平面靶的实验结果

采用晶体谱仪和 X 射线条纹相机同时进行测量, 晶体谱仪测到了衬底特征线就算烧穿,

否则就认为未烧穿。基频光入射吸收效率 η 的数据取自文献[1]。当 $I_L \sim 1 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$ 时, $\eta \sim 0.4$ 。

表1 ω_0 激光参数、碳氢平面靶参数

Table 1 Parameters of laser and CH plane targets

No.	951202	951203	951204	951205	951206	951207
$d/\mu\text{m}$	0.350	0.632	0.889	1.44	1.18	1.18
E_{ω}/J	148.9	161	156.7	161	164.7	148
τ/ps	756	745	767	794	738	732
$\Phi/\mu\text{m}$	400	400	400	400	400	400
$I_a/10^{14}\text{W}$	0.52	0.58	0.55	0.54	0.56	0.54
t/ps			650	1100		

表1列出了实验过程中相应的激光参数, t 为烧穿时间。从表中数据可以看出激光参数涨落很小, 确保了外推烧穿厚度的精度。图4显示了基频强激光烧蚀碳氢靶获得的谱线强度随靶厚的变化。从图4外推 $I_a \sim 0.55 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$ 时碳氢平面靶烧穿厚度约为: $d = 1.5 \pm 0.2 \mu\text{m}$ 。 ρ 取 1.0g/cm^3 , $\tau = 750 \text{ps}$, 离子速度取 $I_a \sim 0.55 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$ 的相应发次平均, $\bar{v} = 8 \times 10^7 \text{cm/s}$, 于是得 $\dot{m} = 2 \times 10^5 \text{g/cm}^2 \cdot \text{s}$, $p = 1.6 \times 10^{12} \text{Pa}$, 将 \dot{m} 和 I_a 的值代入能量守恒关系式, 得 $p = 1.5 \times 10^{12} \text{Pa}$ 。两种不同的测量途径得到的压力在实验误差范围内一致。

4.2 X射线条纹相机获得的强激光烧蚀碳氢平面靶的实验结果

图5为X射线条纹相机测试结果之一。在时间轴方向, 照片上明显存在层次, X射线条纹相机只测得2发烧穿时间(列于表1), 相应的质量烧蚀率是1.4和1.3 ($\times 10^5 \text{g/cm}^2 \cdot \text{s}$)。与晶体谱仪时间积分测量相比, X射线条纹相机方法获得的质量烧蚀率比前者小一点, 这是两种方法的系统偏差。

4.3 实验结果比较

图6是我们收集到的国外文献上发表的基频光烧蚀碳氢平面靶的数据汇集, \dot{m} 取自文献[2~5], p 取自文献[6], 图上也标出了我们用晶体谱仪时间积分和用X射线条纹相机获得的结果, 基本上也是一致的。只是高功率的个别点似乎偏低。因为该功率水平下, 超热电子占去相当的能量份额; 另外 F. Amiranoff 和 F. C. Young 的实验点是在小功率激光器, 采用短脉冲(100ps)和缩小焦斑来获得高的功率密度, 所以横向传热可能比较严重, 也偏离稳定烧蚀的前提条件。按图6前面几个数据点回归 $\dot{m} \sim I_a^{3/5}$, 与理论定标关系 ($\dot{m} \sim I_a^{1/3}$) 有偏离, 即使考虑 T. J. Goldsack 在英国卢瑟福(Rutherford Lab.)获得的实验点 ($I_a = 4 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$), I_a 上的指数也大于1/3。实验上拟合获得的压力 p 随功率密度的变化关系是 $p \sim I_a^{4/5}$, 而理论给出

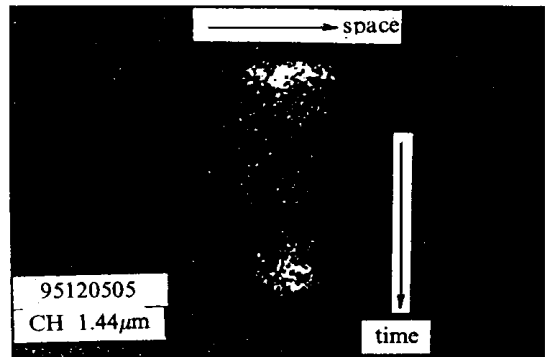


Fig 5 Image of the laser-layer plane targets interaction on screen of X-ray streak camera

图5 X射线条纹相机获得的基频光轰击

Ti-CH-Si平面靶的图象

的定标关系是 $p \sim I_a^{2/3}$ 。用解析解的办法解流体力学方法获得的解只是一种近似解, 所以实验获得的定标律与流体力学方法获得的定标律不一致, 也是可理解的。更严格的方法要采用数值解。实验上由动量守恒和能量守恒获得的压力, 应理解是某种平均结果, 这样获得的压力不够精确, 只可用作了解压力随 I_a 的变化趋势。另外, 实验拟合涉及的吸收功率密度也小于理论模型假定值。还缺乏在高功率处的实验数据, 需要补充一些数据点。

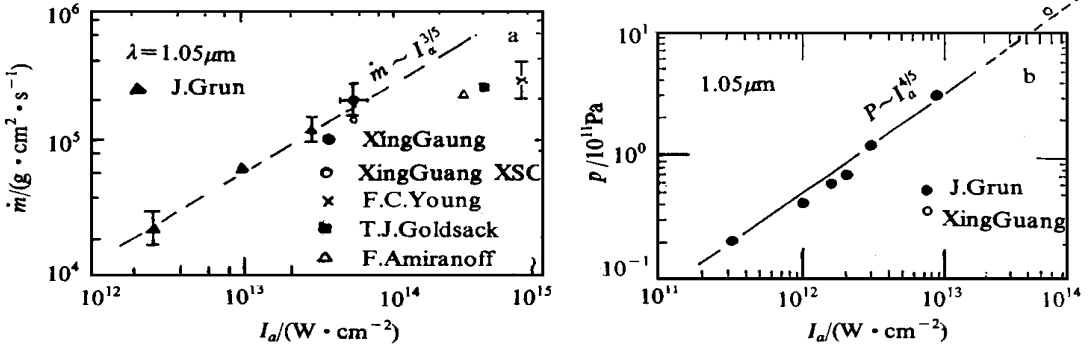


Fig 6 Comparison between our data and the others

图6 基频强激光烧蚀碳氢平面靶的国内外数据对照

致 谢 感谢北京应用物理与计算数学研究所赖东显在理论方面给予的指导和有益的建议, 感谢制靶人员和激光器运行人员的全力合作, 感谢上海高功率激光物理联合实验室为本课题组提供阵列透镜。

参考文献

- 1 Key M H et al *Phys Fluids*, 1983, **26**: 2011
- 2 Grun J, Decoste R, Ripin B H, and Gardner J. *Appl Phys Lett*, 1981, **39**: 545
- 3 Amiranoff F, Fabbro R, Fabre E, Garban C, Vimont T, and Weinfeld M. *Phys Rev Lett*, 1979, **43**: 522
- 4 Goldsack T J, et al *Phys Fluids*, 1982, **25**: 1634
- 5 Young F C, et al *Appl Phys Lett*, 1977, **30**: 45
- 6 Faiz Dahmani *Phys Fluids*, 1992, **B4**: 1585
- 7 Tarvin J A, et al *Phys Rev Lett*, 1983, **51**: 1355
- 8 常铁强等 激光等离子体相互作用与激光聚变 长沙: 湖南科学技术出版社, 1991
- 9 Remy Fabbro, Claire Max, and Edouard Fabre *Phys Fluids*, 1985, **28**: 1463
- 10 邓锡铭, 梁向春, 陈泽尊, 余文炎, 马仁勇 中国激光, 1985, **12**: 257

ABLATION BEHAVIOR OF CH TARGETS BY HIGH POWER LASER

Feng Jie, Li Sanwei, Ding Yongkun, Wen Shuhuai, He Haien, Ding Yaonan,

Cheng Jinxu, Wang Dahai, and Zheng Zhijian

Institute of Nuclear Physics and Chemistry, P. O. Box 525-77, Chengdu, 610003

ABSTRACT The experimental results of ablation of CH targets by high power laser and the comparison with the theory have been given. The ablation thickness and time were synchronously measured with time integrated X-ray crystal spectrometers and a X-ray streak camera. Using a lens array to make the laser energy distribution uniform, the diameter of focus spot $\Phi 400\text{mm}$, $I_a = 0.55 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$, CH plane targets, $\dot{m} = 2 \times 10^5 \text{g/cm}^2 \cdot \text{s}$ from the crystal spectrometers, $\dot{m} = 1.35 \times 10^5 \text{g/cm}^2 \cdot \text{s}$ from X-ray streak camera, $p = 1.6 \times 10^{12} \text{Pa}$. The comparison between our data and others' shows correspondence between them within experimental error.

KEY WORDS laser ablation, CH plane targets, laser fusion