

提高腔靶激光能量注入率的新途径*

陈家斌 郑志坚 唐道源 滕 浩 丁永坤 陈红素 李雅轩

(中物院核物理与化学研究所, 高温高密度等离子体物理重点实验室, 成都 525 信箱, 610003)

摘 要 在“星光 II”上测量了入射孔边缘镀 CH 膜的孔靶激光能量注入率, 给出了注入率随入射激光能量和波长变化的经验公式, 同时对堵口现象物理机理进行了一维数值模拟。实验结果表明: 镀 CH 膜是增加激光能量注入率、提高腔靶辐射温度的有效方法。

关键词 镀 CH 膜 激光能量注入率 堵口机理 数值模拟

中图分类号 TN 249

当强激光进入靶孔时, 由于焦斑的空间分布及入射孔的孔径小, 有一部分能量会照射在靶孔边缘物质上, 将其加热产生高温等离子体, 等离子体以近似离子声速向孔心膨胀。当喷射到孔内物质的平均密度超过激光临界密度时, 入射激光被阻产生堵口效应, 直接降低了入射激光的能量注入。多年腔物理研究表明, 堵口是影响靶腔内 X 光辐射温度的重要因素。

提高靶腔内 X 光辐射温度的方法很多, 例如缩短入射激光波长、利用高 Z 材料提高 X 光转换效率等。但在入射孔边缘镀 CH 膜是美国 LLNL 九十年代初提出并应用的, 直到 1994 年才解密。实验中我们在金靶激光注入孔边缘镀上低 Z 物质(10 μ m 的 CH 膜)。由于轻物质对激光的能量吸收率低, 因此堵口效应将大大降低, 从而起到提高靶腔内 X 光辐射温度的作用。

1 理论计算

1.1 堵口物理图像及其基本方程

当靶孔边缘受到强激光照射时便形成烧蚀云, 等离子体以速度 v 向入射孔中心膨胀。假设小孔边缘的能量吸收仅在临界界面附近发生且电子离子等温, 则由质量守恒、动量守恒和能量守恒可得柱坐标系中离子的径向运动基本方程组

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) = - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} [r(p + \rho v^2)] + \rho G - \frac{I}{c} \delta(r - r_c) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3p}{2} + \frac{\rho v^2}{2} \right) = - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r \rho v (h + \frac{v^2}{2}) + r q] + \rho v G + I_a \delta(r - r_c) \quad (3)$$

式中 ρ 为离子密度; p 为压力; I_a 为激光吸收强度; q 为热流; h 为焓; r_c 为临界密度点; I/c 为有质动力的简化形式; ρG 是来自于描述方程参照系加速度的惯性力。

在解方程(1)~(3)中, 如果忽略有质动力, 并且假设描述方程的参照系无惯性力($G=0$), 则得靶对激光的吸收强度

$$I_a = 4\rho_c c v^3 \quad (4)$$

* 中国工程物理研究院科学基金资助项目

1997 年 12 月 29 日收到原稿, 1998 年 3 月 19 日收到修改稿。

陈家斌, 男, 1960 年 8 月出生, 大学毕业, 副研究员

式中 ρ_c 为临界面离子密度; c_0 为等温声速。假定等离子体电中性, 则由文献[1]得

$$\rho_c = n_c m_i = \frac{n_c m_i}{Z} = \frac{\pi}{Z} \cdot \frac{c^2}{\lambda^2} \cdot \frac{m_e}{e^2 m_i} \tag{5}$$

式中 c 为光速; λ 为波长; m_e 和 e 为电子质量和电荷; m_i 是离子质量。将有关数值代入得

$$\frac{\rho_c}{\text{g/cm}^3} = \frac{1.84 \times 10^{-3}}{(\lambda/\mu\text{m})^2} \cdot \frac{A}{Z} \tag{6}$$

由文献[2]知, 烧蚀物质以约 3 倍声速向真空膨胀。故烧蚀云充满入射孔的时间

$$t_f = R_0/3c_0 \tag{7}$$

式中 R_0 为入射孔半径; c_0 由式(4)给出。

1.2 能量注入率

设烧蚀云单位面积质量 $m(t) = m^\circ(t) \cdot d t_0$ 。由于烧蚀云中物质很少, 其密度可用体平均密度 $\bar{\rho}$ 近似代替^[3]

$$\bar{\rho} = m(t) \cdot f_d(t) / 3c_0 t \tag{8}$$

$f_d(t) = 0.5(1 + t/2t_f)$ 是烧蚀云散开的几何因子。 $t \geq t_f$ 时, $f_d = 0.75$ 。设烧蚀云沿孔心轴向方向的深度 $\Delta l = 3c_0 t$, 那么 $\bar{\rho} \cdot \Delta l = m(t) \cdot f_d(t)$ 。激光在烧蚀云中衰减因子为 $k_\lambda(\text{cm}^2/\text{g})$, $k_\lambda \bar{\rho} \cdot \Delta l = k_\lambda m(t) f_d(t)$ 。透过孔靶的激光能量

$$E_T = \begin{cases} \int_0^{R_1(t)} 2\pi r \cdot I(r) \cdot dr + \int_{R_1(t)}^{R_0} 2\pi r \cdot I(r) \cdot e^{-k_\lambda m(t) f_d(t)} \cdot dr & (t < t_f) \\ \int_0^{R_0} 2\pi r \cdot I(r) \cdot e^{-k_\lambda m(t) f_d(t)} \cdot dr & (t \geq t_f, R_1(t) = 0) \end{cases} \tag{9}$$

式中 $R_1(t)$ 是 t 时刻烧蚀云前沿至孔心的距离, 由此定义孔靶能量注入率

$$\eta = E_T/E_L \tag{10}$$

2 实验测量

2.1 实验原理及布置

孔靶能量注入率由式(10)定义。式中 E_L 为到达靶面的入射激光能量, 其值由靶场给出。 E_T 为透过孔靶的入射激光能量, 是本实验要测量的量, 其值由阿波罗卡计给出。在图 1 所示的实验布置下, 已标定出阿波罗能量卡计的灵敏度为 1/3 焦耳每字。由数字仪读数获取 E_T 值。

2.2 测量结果

我们在“星光 II”上测量了 1.053 μm 正入射激光对孔靶的能量注入率 η 。靶孔径

$\Phi 200 \mu\text{m}$, 在激光入射孔边缘涂 CH 膜。入射激光能量 (E_L) 分别为 18.5、50.3、113、215J 时, 对应的 η 分别为 98%、90.2%、80.1%、65.4%。将测得的实验数据进行曲线拟合, 得到经验公式

$$\eta(E_L) = 1.36 E_L^{-0.1104}, \quad (18\text{J} < E_L < 130\text{J}) \tag{11}$$

$$\eta(E_L) = 0.96 - 30.6(315 - E_L)^{-1}, \quad (100\text{J} < E_L < 220\text{J}) \tag{12}$$

图 2 给出了激光能量注入率 η 随入射激光能量 E_L 的变化曲线。文献[4]所给激光能量注

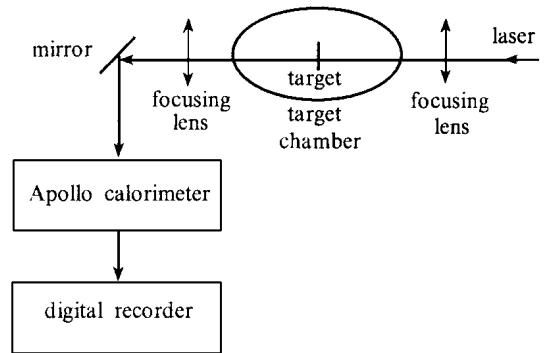


Fig 1 Experimental setup
图 1 实验布置

入率拟合曲线对低能段 ($E_L < 100\text{J}$) 和高能段 ($100 < E_L < 1000\text{J}$) 在形式上都是一样的 (与公式 (11) 相同)。我们对高能段的拟合结果形式上不同, 这是因为文献 [4] 中高能段能区范围太宽, 与实验值吻合不好。为了减少拟合曲线与实验点之间的差异, 我们给出了能区范围窄的拟合式 (12)。公式中的常数实际上就是该经验公式限制入射激光能量和注入率的系数。从图中可看出实验值和拟合值很接近, 且高能段和低能段的两个表达式在 $100\sim 130\text{J}$ 范围内连接很光滑。

2.3 等离子体堵口时间

激光焦斑 Φ 可直接测量, 也可由 X 光焦斑 Φ_x 粗估。通常 $\Phi_x \approx 1.4\Phi$ 。精密测量激光焦斑是很困难的, 根据经验, 计算中取“星光 II”激光焦斑 $\Phi = 80\mu\text{m}$, 即激光焦斑半径 $r_0 = 40\mu\text{m}$

为简单起见, 设光能分布函数 $E(r)$ 服从 Gauss 分布 (只考虑空间行为), 即 $E(r) = A e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}$ 。由定义知, 在激光焦斑 $2r_0$ 内的能量为总激光能量的 70%。由此得 $\sigma = 0.644r_0$, 即 $E(r) = A e^{-\frac{r^2}{0.83r_0^2}}$ 。由 $E_L = \int_0^{r_0} E(r) 2\pi r dr$ 可知, $A = 0.38E_L/r_0^2$ 。已知入射激光脉冲宽度 $\tau = 0.8\text{ns} = 8 \times 10^{-10}\text{s}$, 则入射激光功率密度函数

$$I(r) = 3 \times 10^{13} E_L e^{-\frac{r^2}{1328}} \tag{13}$$

对于 $\Phi = 200\mu\text{m}$ 的孔靶, 孔边缘 ($r = R_0 = 100\mu\text{m}$) 的激光功率密度

$$I = 1.61 \times 10^{10} E_L \tag{14}$$

实验中, 激光能量在 $20\sim 200\text{J}$ 之间, 所以 $I = 3.2 \times 10^{11}\text{W}/\text{cm}^2 \sim 3.2 \times 10^{13}\text{W}/\text{cm}^2$ 。对 CH 材料, 将 $Z = 3.5, A = 6.5, \lambda = 1.053\mu\text{m}$ 及 $I_a = 0.1I$ (谢平, 能量平衡测量总结报告, 1987) 代入式 (4)、(6)、(7)、(15) 得 $c_0 = 3.0 \times 10^6 \sim 6.4 \times 10^6\text{cm}/\text{s}$ 。烧蚀云充满入射孔的时间 $t_f = R_0/3c_0 = 0.52 \sim 1.1\text{ns}$ 。

3 实验结果讨论

由于打靶发次的限制, 实验中只测量了入射孔边缘涂 CH 膜的孔靶能量注入率随入射激光能量的变化关系。对于实验中所给定入射激光能量, 等离子体充满入射孔的时间在 $0.5\sim 1.1\text{ns}$ 之间, 当 $E_L = 50\text{J}$ 时, $t_f = 0.8\text{ns}$ 。已知入射激光的脉宽为 0.8ns 。所以, 对于 $E_L < 50\text{J}$ 的情况, 等离子体运动到孔心时激光已进入孔内, 堵口不明显。当 $E_L > 50\text{J}$ 时, 激光还未完全进入入射孔, 等离子体就已运动到孔心。随着能量的逐渐增加, 堵口开始变得明显, 但仍有一部分激光能量可以穿过轻物质等离子体进入腔内。这些现象与图 2 的实验结果是一致的。

在 Au 靶孔边缘涂 CH 膜可以从两个方面改善靶腔内 X 光辐射温度。由于轻物质平均电离度低 (CH 平均电离度为 3.5, 而 Au 的平均电离度为 30~60), 对入射激光的吸收远低于重材料, 从而大大降低了等离子体对入射激光的封堵。同时, 轻物质等离子体密度稀薄, 即 $m(t)$ 小, 由式 (9) 知 E_T 增大, 即激光能量注入率提高。为了减少 X 光泄漏希望靶孔径尽量小。镀 CH

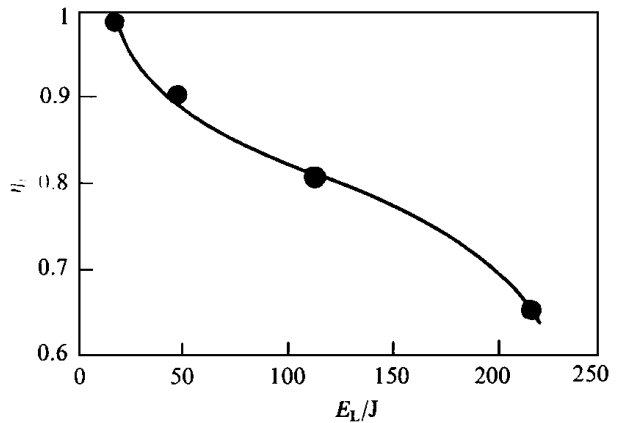


Fig. 2 Measurement results of energy injection efficiency

图 2 能量注入率实测结果

膜后,既可使注入孔径变小,又能抑制重物质等离子体堵口。现将激光能量转换成入射孔边缘功率密度,与郑志坚的文章(强激光辐照平面孔靶能量注入率和堵口时间特性测量,中物院核物理与化学研究所内部资料,1985)中未涂CH膜的实验数据进行比较(见图3)。从图中可以看出,入射孔边缘涂CH膜后激光能量注入率有明显提高。这说明在重材料的注入孔边缘涂CH膜的确是增加激光能量注入率,改善腔靶辐射温度的有效方法。

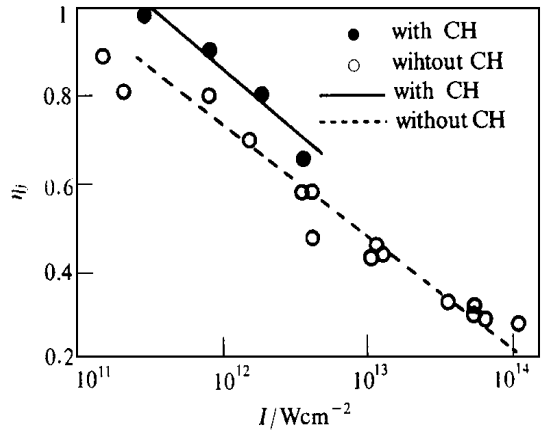


Fig 3 V aring of energy injection efficiency with power density of the edge on target holes

图3 能量注入率随靶孔边缘功率密度的变化

参考文献

- 1 常铁强, 张钧, 张家泰 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. 2
- 2 泽尔道维奇, 莱依捷尔 著 激波和高温流体动力学现象物理学 北京: 科学出版社, 1985
- 3 Hanach R J. Simple model of pinhole closure in high-energy-density experiments *Rev Sci Instrum*, 1986, **57**(8): 2192~2194
- 4 朱森昌, 常铁强 空腔靶激光能量沉积的数值模拟 强激光与粒子束, 1989, **1**(2): 145~ 152

A NEW MEASURE TO IMPROVE LASER ENERGY INJECTION EFFICIENCY

Chen Jiabin, Zheng Zhijian, Tang Daoyuan, Teng Hao, Ding Yongkun,
Chen Hongsu, and Li Yaxuan

*Laboratory for Laser Fusion, Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP,
P. O. Box 525, Chengdu, 610003*

ABSTRACT Laser energy injection efficiency was measured at "Xinguang II" under the conditions where CH foils were plated on the edge of laser entrance hole. The physics mechanism of enclosure was displayed by one-dimensional numerical simulation. The experimental results show that CH plating hole targets have higher laser energy injection efficiency.

KEY WORDS CH plating foil, laser energy injection efficiency, enclosure mechanism, numerical simulation