第 8 卷 第 1 期　　强 激 光 与 粒 子 束　　Vol.8, No.1
1996 年 2 月　　HIGH POWER LASER AND PARTICLE BEAMS　　Feb., 1996

等离子体喷射 X 光时空分辨测量*

何海恩　缪文勇　丁永坤　成金秀
刘忠礼　丁耀南　胡　昕

(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，邮编 610003)

摘　要　在"神光"强激光装置上对 0.53μm 激光产生的等离子体喷射进行了 X 光时空分辨诊断。首次利用多针孔阵列成像技术结合软 X 光扫描相机观察激光加热区和 X 光加热区等离子体的运动，获得了初级和次级等离子体膨胀速度等结果。

关键词　等离子体喷射　X 光时空分辨　多针孔成像　激光加热区　X 光加热区

ABSTRACT　Diagnostic of green laser-produced plasma evolution was conducted on Shenguang laser facility. By utilizing a multipinhole array coupled to a soft X-ray streak camera, the plasma evolution in laser heated area (primary plasmas) and X-ray heated area (secondary plasmas) was observed. Expansion velocities of primary plasmas and secondary were obtained, discussion was also made.

KEY WORDS　plasma evolution, space and time resolved X-ray measuring, multipinhole streak imaging, laser heated area, X-ray heated area.

0 引　言

在激光惯性约束聚变(ICF)研究中，有关等离子体喷射的认识对于 X 光驱动聚变至关重要。大块等离子体向腔内运动并与靶丸相撞会引起严重的问题，如等离子体对靶丸壳层的预热将降低流体力学效率，碰撞将引起不对称压缩；而等离子体迅速膨胀并进入腔内还将造成辐射场的不均匀分布。C.Stockl[1] 利用柱形腔靶研究辐射流体力学及堵腔效应等问题。G.D.Tsakiris[2] 利用软 X 光扫描相机结合成像狭缝研究柱形靶内等离子体的膨胀和碰撞过程。E.F.Gabl[3] 等人利用针孔结合软 X 光扫描相机并配以滤片观测 0.53μm 激光金平面靶相互作用 1/4 至 1/2 临界密度区间等离子体运动(该区 X 光辐射以 M 带为主)，其等离子体运动速度可达 $3\times10^6\sim7\times10^6$cm/s。本文介绍利用"神光"强激光装置输出的单束单脉冲 0.53μm 激光辐照柱形金腔靶内表面，产生向真空膨胀的初级等离子体；初级等离子体发射 X 光并进一步加热对面腔壁，产生向真空膨胀的次级等离子体并进一步发射 X 光。采用多针孔阵列结合一台软 X 光扫描相机沿柱轴方向观测了初级和次级等离子体沿柱腔径向的膨胀过程。文中引入了简单的等温膨胀模型以描述两个区域等离子体流体力学运动，与实验结果比较，二者符合较好。

* 本工作受国家高技术 863 计划及中国工程物理研究院基金资助。
1995 年 4 月 20 日收到原稿，1995 年 9 月 15 日收到修改稿。

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

文中第1部分对实验条件做了简要介绍，第2和第3部分分别介绍实验结果和讨论，第4部分对全文进行了总结。

1 实验条件与装置

图1为实验装置排布。激光与柱轴线夹角35°，激光能量为160J，脉宽800ps，激光入射功率密度为$1.7\times10^{14}\sim2.7\times10^{14}$ W/cm^2，有效吸收功率密度为7.1×10^{13}W/cm^2。实验采用的金腔靶内径为Φ400μm，长500μm。特定的激光—腔靶几何，可保证在第一打击区被散射的激光(接近几何反射)直接穿出腔外，从而减少二维效应的影响，创造激光打击区和X光加热区两个不同的观测目标。部分实验用靶在其柱底底部贴有一层厚度为1.0μm的有机膜，旨在研究辐射场干净性(对快离子和散射激光的阻挡特性)，该膜对X光辐射几乎全透明。实验中将多针孔阵列和X光扫描相机置于柱腔靶底部一侧，并沿柱轴方向观测激光加热区和X光加热区等离子体沿柱腔径向的运动过程。图2为多针孔扫描成像示意，其中多针孔孔径为Φ15μm，间距为250μm。针孔连线与X光扫描相机阴极狭缝的夹角为5°～10°，以确保至少有一幅针孔X光成像图象被扫描相机记录下来[4]。探测系统的空间分辨约30μm，成像倍率约11，时间分辨约33ps。

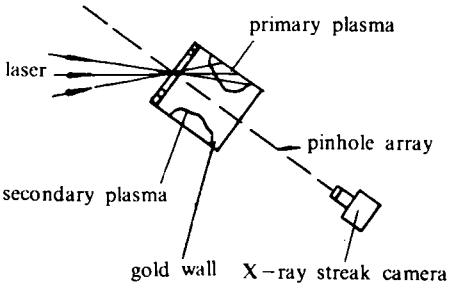

Fig 1 Schematic of experimental setup

图 1 实验装置排布示意

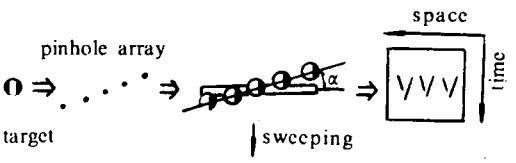

Fig 2 Schematic of multi-pinhole X-ray imaging

图 2 多针孔扫描成象示意

2 实验结果

典型的实验结果见图3和图4(分别对应第30发和第31发打靶，前者靶底部贴有机膜)，由于多针孔阵列孔间距仅为250μm，小于柱腔腔径，致使不同针孔所成图像发生重叠现象。为直观了解两区等离子体运动过程，我们将其中的一幅图象从中挑选出来，见图3(b)和图4(b)。图象左侧对应激光第一打击区(初级等离子体)X光发光区；右侧对应X光加热区(次级等离子体)X光发光区。图中，时间轴零时是以第一打击区X光发光时刻作起始点，空间座标为相对关系。

由图3和图4有下述结果：

(1)次级等离子体喷射和X光辐射迟于初级等离子体，其时延分别为287ps(图3)和173ps(图4)。

(2)X光辐射持续时间均长于激光脉宽(约800ps)，分别为2500ps(图3)和

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

3110ps(图 4)，在过去的实验中也观测到类似现象。

(3) 在激光加热期间(约 1300ps)，初级等离子体 X 光发光区除向真空界面扩展外，明显地向稠密区延伸，大约在 850ps 时刻达最大，对应的延伸量分别为 30μm(图 3) 和 45μm(图 4)，次级等离子体无此明显的现象。

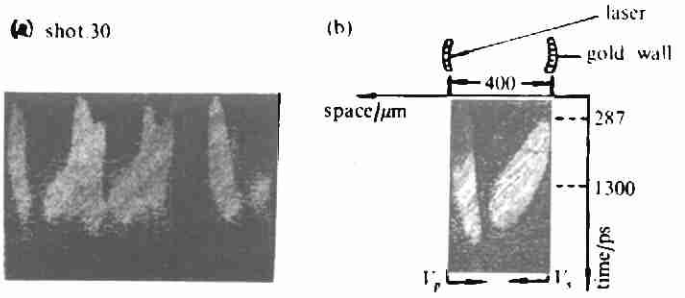

Fig 3 Result 1 (a) image overlaped (b)image abstracted

图 3 结果之一 (a) 多组图象重迭 (b) 提取出的图象

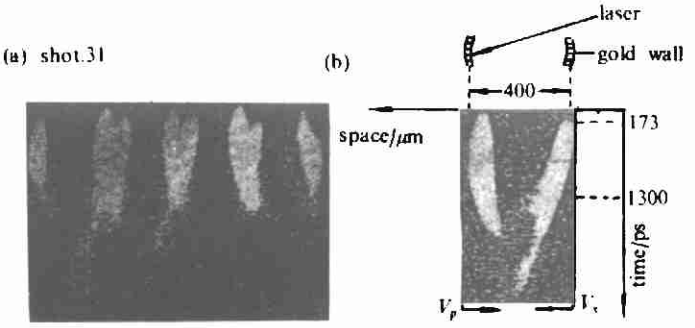

Fig 4 Result 2 (a)image overlaped (b)image abstracted

图 4 结果之二 (a) 多组图象重迭 (b) 提取出的图象

(4) 引人注目的是次级区等离子体运动速度远快于初级等离子体，图 3 中初级和次级等离子体的运动速度分别为 $2.0\times10^6\sim2.7\times10^6$cm/s、$5.9\times10^6\sim18\times10^6$cm/s。图 4 中初级和次级等离子体运动速度分别为 $1.8\times10^6\sim2.4\times10^6$cm/s 和 $5.3\times10^6\sim16\times10^6$cm/s。在初级等离子体开始膨胀后约 1300ps(对应激光加热结束时刻)，次级等离子体即已到达柱腔中心。

3 讨 论

上述结果中，柱底部有无有机膜时图象有较明显的差别(发光区宽度、脉宽)，这是由于在 X 光辐射的早期和晚期等离子体温度较低，有机膜对等离子体辐射的低能 X 光吸收严重。这里我们不打算作进一步讨论，而将讨论集中于无膜的情形。

(1) 次级等离子体 X 光发射延迟，是因为外来 X 光辐射加热次级等离子体并使其

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

温度升高到足以产生X光自发射需要一定的时间。由数值模拟结果知道，腔内产生的X射线几乎全部被金壁吸收，根据平均离子模型，当金离子被加热至50eV时，O壳层电子被激发，O带X光辐射开始。在此之前被等离子体吸收的X光能以喷射物质的动能和内能形式出现。具体的物理现象较复杂，这里不打算做进一步讨论。

(2)大量的实验结果和数值模拟表明激光等离子体X光辐射持续时间长于激光脉宽，$\tau_X \approx 1.5 \sim 2.0\tau_L$(平面靶结果)。由于腔靶结构对等离子体和X光辐射的约束作用，稠密等离子体冷却过程较慢；部分膨胀等离子体因会聚而将动能转换为热能，因而X光辐射持续时间较之开放结构靶(平面靶)更长，图3、图4结果表明X光辐射持续时间$\tau_X > 2.0\tau_L$。

(3)初级区等离子体X光发光区向真空界面的运动和向稠密区域的扩展可做如下定性解释：在激光加热期间，等离子体吸收外界激光能量后，由于动量守恒，将产生向外喷射的等离子体；同时，激光能量不断向稠密低温区域传递，因此那里的X光发射开始增强，其最大时刻与激光加热峰值时刻(850ps)大致对应。之后，由于激光加热能量减弱，稠密区域X光辐射亦开始减弱。

(4)0.53μm激光加热初级等离子体，首先形成冕区，其电子密度低于声速点密度和临界密度($n < n_s < n_c$)，激光主要在该区域被吸收并通过各种热传导机制将能量传递至声速点以上区域。在声速点以下的冕区，等离子体以超声速向真空等温膨胀；而在声速点以上等离子体则以亚声速运动，并可达到定态，X光发射主要集中于该区(亚声区)，其流体力学状态可由流体力学方程推出：

流体速度 $$V_p = C_S[1-(1-C^2/C_S^2)^{1/2}] \tag{1}$$

流体密度 $$\rho = \rho_S[1-(1-C^2/C_S^2)^{1/2}]^{-1} \tag{2}$$

其中C_S和ρ_S为声速点声速和密度，C为流体当地声速。由实验条件可得到下列参数：

冕区电子温度[3] $$T_s = 2.3 I_{14}^{0.45} \lambda_{\mu m}^{0.85}\ \text{keV} \tag{3}$$

亚声区电子温度[5] $$T = 0.506 I_{14}^{0.27} \lambda_{\mu m}^{0.25}\ \text{keV} \tag{4}$$

平均电离态[6] $$Z = 20/3\ (AT)^{1/3} \tag{5}$$

离子声速 $$C = (ZT/m_i)^{1/2} \tag{6}$$

其中I_{14}为等离子体吸收的激光功率(单位10^{14}W/cm^2)，$\lambda_{\mu m}$为激光波长(单位μm)。在前述实验条件下初级等离子体电子温度为$T = 393$eV，流体运动速度$V_P = 1.9 \times 10^6$cm/s，实验观测最大值为$1.8 \times 10^6 \sim 2.4 \times 10^6$cm/s，二者符合较好。取声速点密度位于$n_c/4$处[3]，还可知该区物质密度$\rho \approx 62.0$mg/cm^3。

对X光加热区(次级区)，我们作如下假设和近似：由初级区发射的X光加热次级区，外来辐射T_R与被加热物质处于热平衡，等离子体以等温膨胀方式向真空喷射。在声速点以外的低密度区域，等离子体以超声速等温膨胀，该区等离子体在X光扫描相机的探测范围内。在声速点以上的高密度区域因X光辐射被物质完全吸收而不能被探测系统记录下来。次级区电子温度T'应介于初级区等效辐射温度[7]$T_R = 130 \times I_{14}^{0.127}$eV和初级区等离子体电子温度$T$之间。我们取$T' = T_R$做估算有：$T' = 124$eV，由此可知离子声速为$C_S = 3.4 \times 10^6$cm/s。在等温膨胀下，次级等离子体以超声速运动($V \geqslant V_S$)，假定其最大速度V_S对应于绝热膨胀下的运动速度，即$V_S = 2C_S/(\gamma - 1)$。对金等

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

离子体，有 $\gamma=5/3$，于是 $V_S=3C_S$。在实验室座标下，流体速度 V_S 位于 C_S 至 $4C_S$ 之间，即 $V=3.4\times10^6\sim13.6\times10^6$cm/s，实验值为 $5.3\times10^6\sim16\times10^6$cm/s，二者基本符合。此外，由下式可给出次级区等离子体的密度[8]:

$$\rho=(CU/3K_Rt)^{1/2}/C_VT_R \tag{7}$$

$$K_R=239.165\rho^{0.028}T_R^{-1.179} \tag{8}$$

$$U=bT_R^4\quad(b=1.37\times10^{14}\ \text{cgs keV}) \tag{9}$$

$$C_V=1.5Zk/Am_p=1.44\times10^{15}Z/A\ \text{cgs keV} \tag{10}$$

其中，K_R 为不透明度，U 为辐射能量密度，C_V 为热容比，将(8)、(9)、(10)三式代入(7)式得到声速点密度 $\rho_S\approx498.5$mg/cm^3，最大速度点($4C_S$)密度值为 24.8mg/cm^3。在激光加热期间(1300ps)，由于次级等离子体运动较快(约 16.0×10^6cm/s)，腔中心($R\approx200\mu$m)将被等离子体迅速填充。为考虑初级等离子体和次级等离子体对靶丸的影响，我们对初级等离子体和次级(表面)等离子体的动量比(r_P)和动能比(r_K)做简单比较

$$r_P=\frac{62.0\times1.9\times10^6}{24.8\times13.6\times10^6}=34.9\%\ ;\ r_E=\frac{1/2\times62.0\times(1.9\times10^6)^2}{1/2\times24.8\times(13.6\times10^6)^2}=4.9\%$$

由此可见次级等离子体喷射动量和动能均远高于初级等离子体，如果与靶丸相撞，将引起严重的危害，从而对间接驱动内爆压缩造成不利影响；在将来的 $3\omega_0$ 激光和大能量长脉冲打靶实验中，次级区等离子体的喷射将更为严重，宜从靶设计及激光注入条件等方面入手寻求解决控制等离子体喷射的方法。

4 总　结

在 0.53μm 激光柱腔靶实验中，利用多针孔 X 光条纹成像技术首次同时观测到激光加热区和 X 光加热区等离子体喷射时空分辨图像，获得了两区等离子体运动速度等重要参数。实验结果表明次级等离子体向腔内的膨胀速度远高于初级等离子体，且温度更低，密度更高，由此决定了次级等离子体动能和动量远高于初级等离子体，其对辐射场的影响和对靶丸的碰撞效应应引起足够重视：次级等离子体发光延迟，X 光辐射时间长于激光脉宽以及初级等离子体 X 光发光区向稠密区的延伸均符合定性解释。

本文引用简单的等温膨胀模型对初级等离子体和次级等离子体流场特性做了适当的解释和描述，与实验结果相比，符合较好。需要指出的是，该模型对等离子体运动的描述是十分粗糙的，它忽略了激光、X 光与等离子体相互作用的具体物理过程，在今后的研究中还需不断完善有关物理模型，开展数值模拟工作。此外，还需完善诊断技术，开展等离子体 X 光时间、空间、能谱分辨综合诊断工作，以期完整地了解等离子体在特定空间区域和特定能量范围内的流场行为。

致谢　参加本工作的还有唐道源、郑志坚、李文洪、冯杰等同志，彭翰生、温树槐、江文勉教授曾给予了有益的指导。“神光”高功率激光装置运行人员和本所制靶工作人员付出了辛勤的劳动，在此深表感谢。

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

参 考 文 献

1 Stockl C *et al. Laser Part Beams*, 1991, **9**:725

2 Tsakiris G D. Applications of a soft X-ray streak camera, 19th International Congress on High-speed Photography and Photonics, 16th-22nd sept. 1990, Cambridge, England

3 Gabl E F *et al. Phys Fluids*, 1990, **B2**(10):2437

4 Landen O L. *Rev Sci Instrum*, 1992, **63**(10):5075

5 Dahmani F. *Phy Fluids*, 1992, **B4**(7):1943

6 Colombant D and Tonon G F. *J Appl Phys*, 1973, 44

7 Schumalz R F *et al. Phys Rev*(A), 1986, **34**(3)

8 Caruso A. Proc of the Varenna Course and Workshop on ICF, Casa Editrice Compositori, Bologna 1989, 139

SPACE AND TIME RESOLVED X-RAY MEASURING FOR PLASMA EVOLUTION

He Haien, Miao Wenyong, Ding Yongkun, Cheng Jinxiu,

Liu Zhongli, Ding Yaonan, and Hu Xin

Lab for Laser Fusion, Institute of Nuclear Physics and Chemistry,

CAEP, P.O.Box 525, *Chengdu,* 610003

Knowledge of laser-produced plasma evolution is very important to design of X-ray driven implosion target. During laser pulse, if plasmas move rapidly into the cavity, it may change the distribution of radiation and led to decrease in absorption of laser energy; it may also induce production of hot electron, which can preheat pellet and cause decrease in compression efficiency. Besides, colliding of bulk thermal ion with the pellet may result in asymmetric compression. All above mentioned may led to failure in implosion.

We have conducted an experiment on "SHEN GUANG" high power laser facility, in which one beam of green laser ($\lambda=0.53\mu$m, $I_L=2.2\times10^{14}$W/cm^2) impinged on the inner wall of gold cylinder, with the incident angle 53 °respect to cylinder axis. By utilizing a multipinhole array, combined with a soft X-ray streak camera, to observe plasma motion spatially and temporally in laser heated area and X-ray heated area, the following results were obtained: (1) X-ray emission in X-ray heated area with a delay of about 173~287ps compared to that in laser heated area. (2) Plasmas in laser heated area expand not only toward vacuum, but also toward dense gold material and reach the maxim distance of about 30~40μm at peak laser intensity. (3) During laser pulse (about 1.3ns), expanding velocity of plasma in laser-heated area is about 2.3×10^6cm/s, while that in X-ray heated area is about $0.53\times10^7\sim1.6\times10^7$cm/s.

An isothermal expansion model was adopted to describe approximatly the hydrodynamic motion of primary plasma and secondary plasma, the model matched well with the experimental results.

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.