

Z 箍缩动态黑腔阴影像诊断研究*

陈法新[†] 冯璟华 李林波 杨建伦 周林 徐荣昆 许泽平

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

(2012年6月27日收到; 2012年9月26日收到修改稿)

为了获得填充泡沫的钨丝阵动态黑腔动力学演化图像, 研究钨等离子体与泡沫柱的相互作用形式, 在 1 MA 脉冲功率装置上设计了四分幅紫外探针光 (266 nm) 阴影成像系统, 该系统时间分辨为 2.5 ns, 静态空间分辨优于 70 μm , 径向阴影图像展示了从固体丝膨胀消融到先驱等离子体与泡沫相互作用, 从泡沫的箍缩到反弹膨胀的全过程. 图像显示了在长约 50 ns 时间内丝等离子体以“雨”的形式持续与泡沫相互作用, 在整个箍缩阶段并未观察到等离子体壳层结构. 定量分析表明泡沫柱的最小箍缩速度为 1.0×10^6 cm/s, 最大箍缩速度为 6.0×10^6 cm/s, 在轴上停滞的直径约为 1 mm. 通过对数值模拟计算结果的讨论, 明确了在 Z 箍缩等离子体状态下阴影成像结果主要反映了逆韧致吸收效应, 与径向功率波形的时间关联给出了钨等离子体主体与泡沫柱相互作用时刻的图像.

关键词: 动态黑腔, 阴影像, 箍缩速度

PACS: 52.70.-m, 52.70.La

DOI: 10.7498/aps.62.045204

1 引言

Z 箍缩黑腔研究是 Z 箍缩聚变研究中的关键环节, 其中动态黑腔 (见图 1) 是在软 X 射线波段实验室内可以实现的最接近黑体辐射的源之一, 同时也是辐射输运基础研究和间接驱动的惯性约束聚变最有力的 X 射线源^[1], 因此在各种黑腔研究中受到广泛的重视. 目前动态黑腔的实验研究主要集中在辐射场诊断方面, 测量由轴向诊断孔辐射的 X 光功率和 X 光图像^[2,3], 部分实验测量了示踪元素的能谱^[4]. 这些黑腔实验基本上都是在具有大脉冲电流的 Z 装置上开展的, 而在小电流装置上, 如 1 MA 左右, 基本没有开展过类似实验, 因为小电流装置上的 Z 箍缩轴向黑腔辐射场测量有很大困难, 一方面在这类装置上黑腔辐射温度低, X 光辐射强度也很低, 这就要求用于轴向测量的黑腔靶上诊断孔尽量大, 另一方面又要求在轴向诊断视野内尽量不要有丝等离子体进入, 否则丝等离子体的辐射会对测量结果产生极大的干扰, 这就要求诊断孔尽量小, 因此选择大小合适的轴向诊断孔至关重要. 如何确

定轴向诊断孔的大小, 在这样小的脉冲电流装置上径向探针光阴影像不失为一个有力的工具, 通过分幅阴影像的定量分析可以提供动态黑腔径向箍缩数据, 为轴向诊断孔径的选择提供依据. 另外, 对带泡沫柱的动态黑腔中丝等离子体与泡沫相互作用的时间演化图像未见有文献报道, 而该类数据对提高动态黑腔物理认识非常重要. 本文正是通过分幅

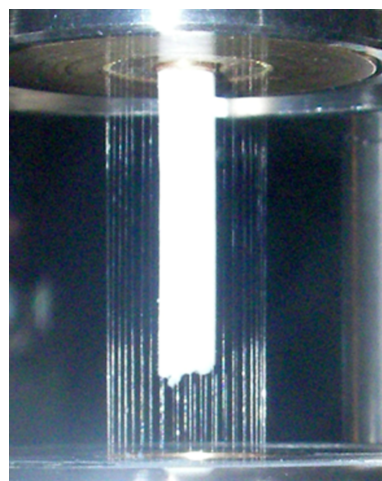


图 1 含泡沫柱钨丝阵动态黑腔实物图

* 国家自然科学基金 (批准号: 11005095) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: chenfarxin@gmail.com

阴影像呈现了从固体丝膨胀消融到先驱等离子体与泡沫相互作用,从泡沫的箍缩到反弹膨胀的全过程演化图像,同时提供动态黑腔的径向箍缩速度,这些数据也为黑腔动力学模拟程序提供了定标参数.

2 阴影像的物理内涵

利用准平行激光束作为探针光源,令其入射到Z箍缩等离子体上,由于激光同等离子体相互作用,一方面逆韧致吸收等吸收机制导致通过等离子体后的激光光强被衰减,衰减量与激光通过的不同路径上的等离子体状态参量如密度、温度的不同而

不同,另一方面由于等离子体密度分布的不均匀,其等效折射率也发生了变化,透过的激光光线就会发生偏折,这也会导致激光光强分布发生变化^[5].激光在等离子体中的运输结果到底哪种物理机制起主导作用还是两者不可偏废,既反映了本次实验探针光阴阴影像的物理内涵,同时对诊断系统的参数设计亦具有指导意义.因为如果吸收机制起主导作用,那么透过等离子体的光强分布就取决于准平行入射后光线的衰减变化,诊断系统对收光角的要求就会大为降低,即不用追求大的收光角以增加可测等离子体的密度梯度范围;相反,如果偏折机制起主导作用,势必要尽量增大收光角.

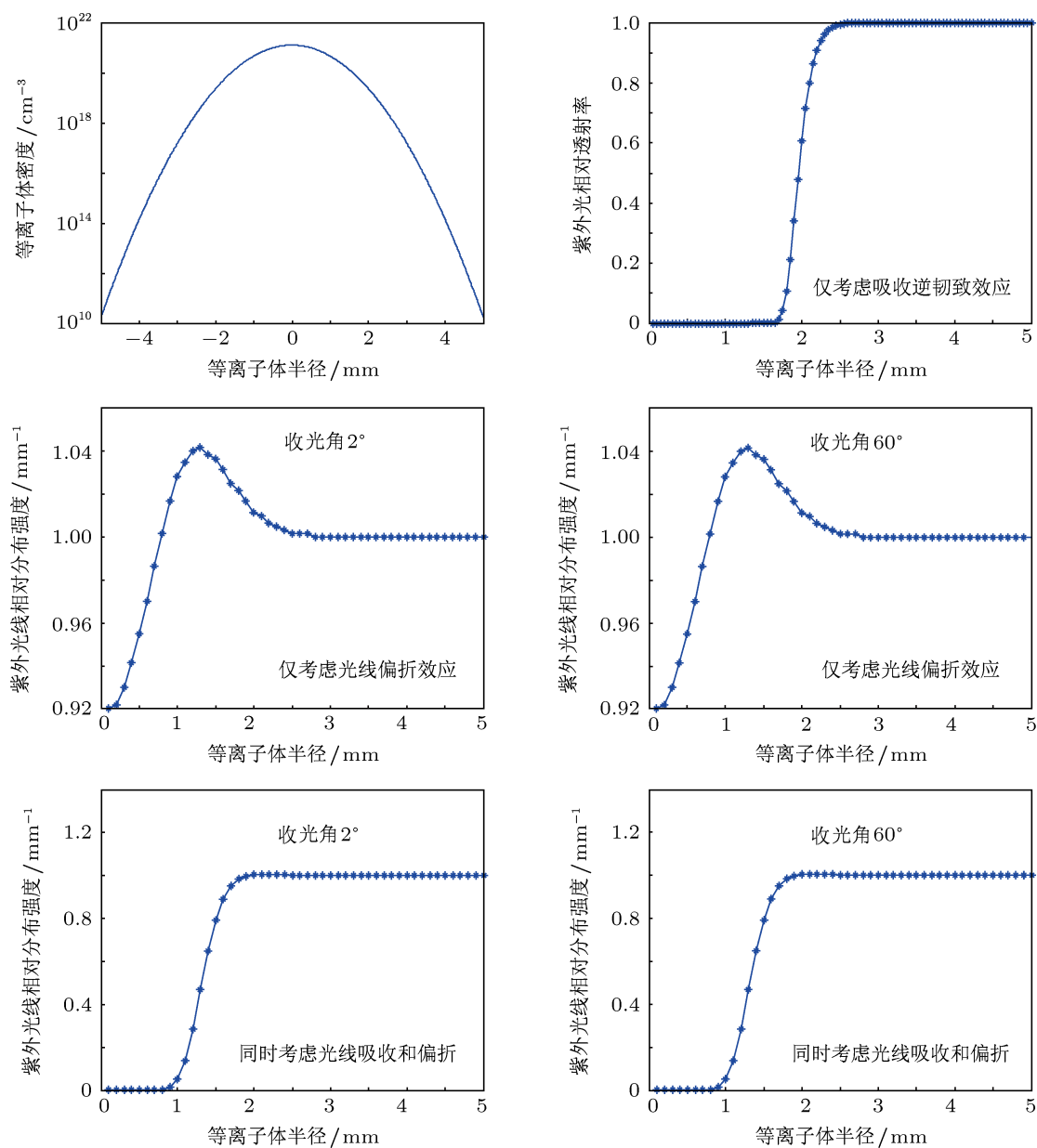


图2 266 nm 激光与密度钟形分布等离子体作用后的光强分布

鉴于探针光用的激光光强较弱(本次实验为12 ns, 脉冲能量为 30 mJ), 吸收效应仅考虑线性吸收即可. 为了能够定量地提供判据, 针对 Z 箍缩等离子体的密度分布特点, 设计了两种具有代表性的轴对称密度分布形式: 钟形分布和双峰分布. 通过光迹追踪的办法模拟计算了两种密度分布形式下吸收与偏折效应的比较结果, 其中, 线性逆韧致吸收中线性吸收系数为^[6]

$$K = 2.91 \times 10^{-21} \frac{Z \ln \Lambda (n_e/n_c)^2 n_c}{\sqrt{1 - \frac{n_e}{n_c}} T_e^{3/2} (\text{keV})} \text{ cm}^{-1}, \quad (1)$$

式中, n_e, n_c 为等离子体密度和对应探针光波长的截止密度 ($1/\text{cm}^3$), Z 为等效电荷数, T_e 为等离子体

电子温度 (keV), $\ln \Lambda$ 为库仑对数. 而光线输运偏折计算采用正则方程:

$$\begin{aligned} \frac{dr}{ds} &= \frac{v}{v}, \\ \frac{dv}{ds} &= -\frac{c^2}{2v} \nabla \frac{n_e}{n_c}. \end{aligned} \quad (2)$$

当密度仅沿半径方向变化时, 则光线径迹方程为

$$\begin{aligned} r_{n+1} &= r_n + \frac{v_n}{v_n} ds, \\ v_{n+1} &= v_n - 2 \frac{c^2}{v_n} \nabla \frac{n_e(r_{n+1})}{n_c}. \end{aligned} \quad (3)$$

在钟形密度分布下, 计算结果如图 2 所示, 在双峰分布下的计算结果如图 3 所示. 其中, 探针光波长为 266 nm.

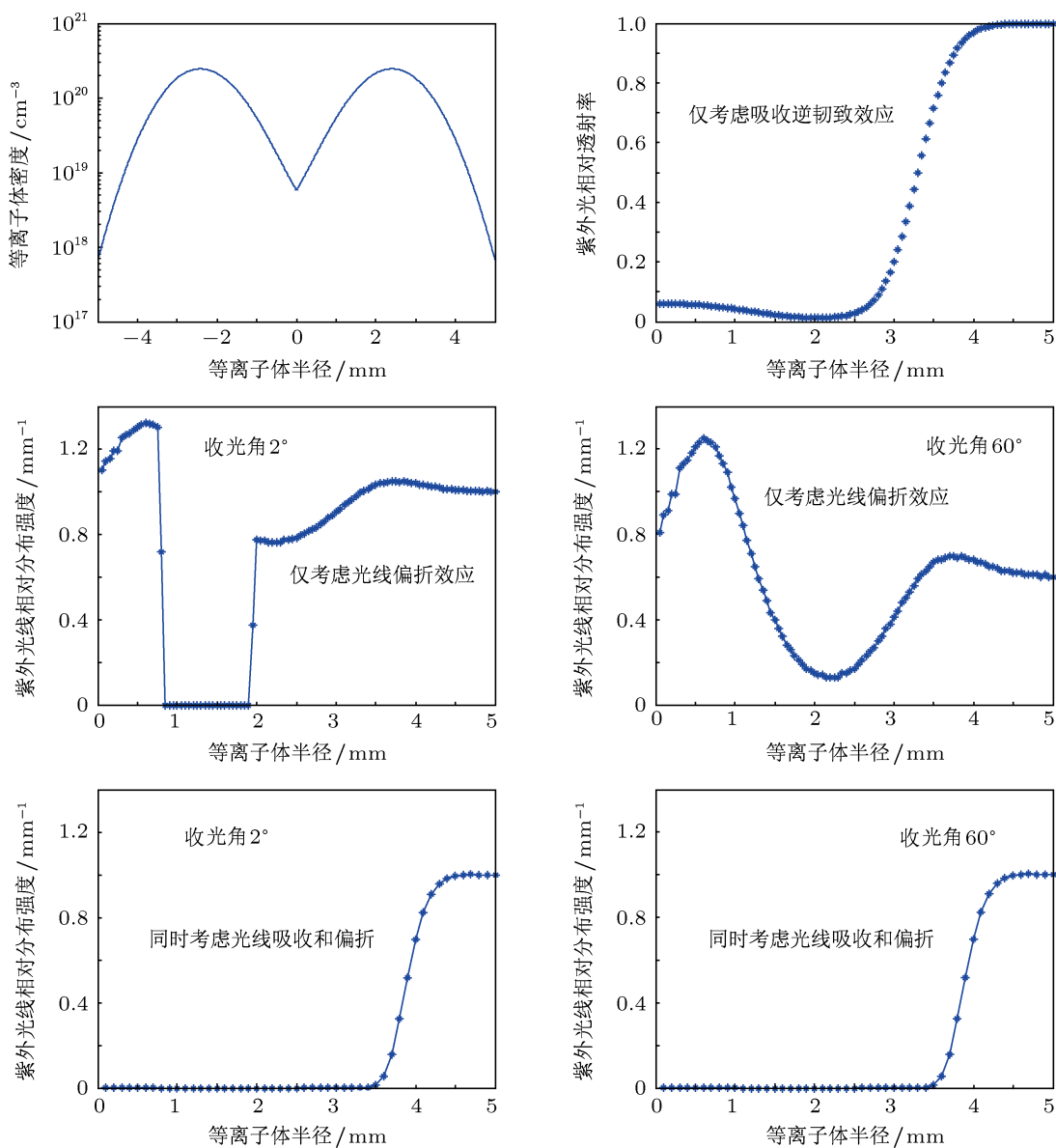


图3 266 nm 激光与密度双峰分布等离子体作用后的光强分布

由图 2 和图 3 可知, 两种密度分布形势下, 虽然探针光经过等离子体时仅考虑吸收效应和仅考虑偏折效应造成的出射光强分布很不相同, 在双峰分布时, 由于偏折角很大, 不同收光角下的分布也很明显, 但当同时计及逆韧致吸收和偏折效应时, 即光迹追踪的每一步的空间位置由偏折效应确定, 运输的权重由吸收效应确定, 最后出射的光强分布与仅计算吸收效应时的光强分布相当. 因此, 从这些计算结果来看, Z 箍缩探针光阴影成像主要反映了激光与等离子体相互作用的逆韧致吸收效应.

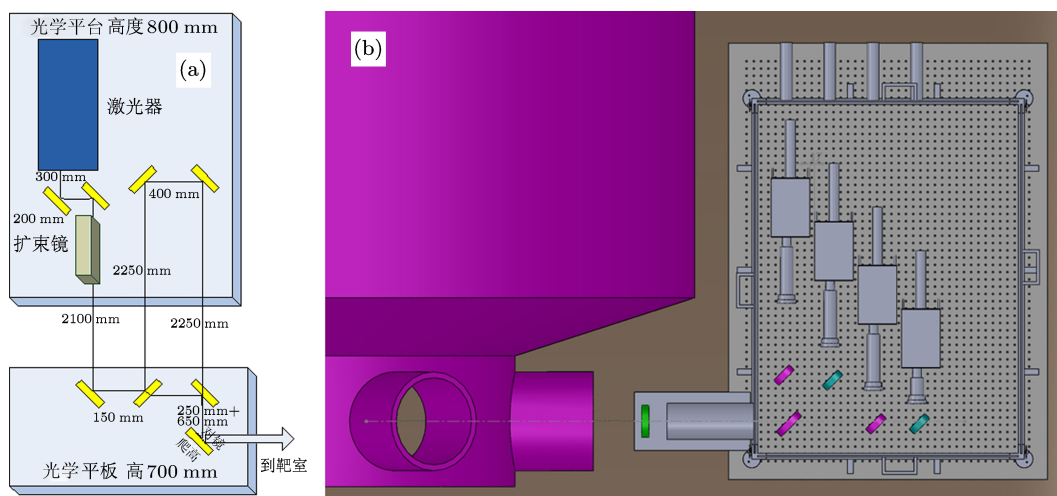


图 4 (a) 分光入射; (b) 成像单元示意图

4 实验布局及结果分析

实验在西北核技术研究所的“强光一号”脉冲功率装置上开展, 负载脉冲电流峰值约为 1.3 MA, 上升时间 (10%—90%) 约为 80 ns, 动态黑腔负载如图 1 所示. 钨丝阵直径有 8 和 12 mm 两种, 均为 42 根直径 4.2 μm 的钨丝构成, 泡沫 ($\text{C}_{15}\text{H}_{20}\text{O}_6$) 柱直径 3 mm.

首先, 以 $\Phi 8$ mm 钨丝阵为例, 不同发次按时间顺序将典型时刻的箍缩演化图像列于图 5 中, 其中某些图像中心的亮点是成像系统自身的缺陷所致, 阴影像中的时间参考零点均是每发次的径向 X 光功率峰值时刻.

从图 5 中可以明显看出, 在 X 光峰前约 70 ns 时先驱等离子体已经与泡沫柱有明显的相互作用, 此时丝直径也已由最初的 4.2 μm 膨胀到 70—200 μm , 后续的时间里可以清楚地看到先驱等离子体向内箍缩运动径迹, 在 X 光峰前 45 ns 时静态丝位置还留有大量剩余质量, X 光峰前约 24 ns 时由

3 诊断系统主要构成

实验用激光器具备 12 ns 脉宽和 30 mJ/266 nm 激光脉冲能量输出能力. 将激光器输出的 12 ns 脉冲分成两束, 相对延时后有效宽度近 30 ns, 系统的时间分辨是基于记录单元像增强器的门宽. 系统具备四分幅成像能力, 时间分辨约为 2.5 ns, 静态空间分辨优于 70 μm , 系统分光入射单元和分幅成像单元光路图见图 4.

阴影像上已经无法再看到残留在丝原位上的质量, 此时大部分钨丝质量极有可能已经消融殆尽, 而具有内爆聚芯行为的等离子体相互融合成“尖刺”状向内发展, X 光峰前约 14 ns 时钨等离子体主要质量已经作用到泡沫上, 此时泡沫的直径也明显被压缩, 由 $\Phi 3$ mm 变为约 $\Phi 2$ mm. 由前述过程很明显可以看出, 首先, 先驱等离子体形成并向轴向运动, 该过程一直持续到钨丝几乎全部消融 (在丝原位已看不到丝的本来形状). 可以认为这一过程是先驱等离子体不断向轴向注入, 且泡沫柱上的钨等离子体质量是不断增加的. 随着钨丝几乎全部消融, 主体钨等离子体开始向轴运动, 但是可以看出这时的等离子体并非以较薄的壳层结构向内箍缩, 而是分布在整个有效的半径空间. 因此作用到泡沫上的等离子体是持续且不断增多的, 当然或许在某个瞬间有钨等离子体质量上的陡然增加 (即钨主体等离子体与泡沫作用瞬间), 这种作用形式很难形成良好的黑腔壁, 进而影响泡沫中黑腔辐射场的品质. 在 X 光峰附近泡沫柱与部分钨等离子体的混合边界平均

直径仅为 $\Phi 1$ mm, X 光峰后 16 ns 明显看出箍缩到芯后的反弹膨胀, 此时泡沫与钨等离子体混合柱已经膨胀到约 $\Phi 3.6$ mm. 对于 $\Phi 12$ mm 的丝阵阴影像反映的黑腔动力学演化图像与 $\Phi 8$ mm 丝阵是一致的.

接下来, 对不同发次探针光阴影像参考时间“标准点”, 是采用每发次径向 X 光功率峰时刻还是负载电流时间波形中某些特征时间点的合理性做出判断.

为了回答该问题, 我们先将每发次相对 X 光峰值不同时刻泡沫柱 (覆盖有钨等离子体) 平均半径

进行判读, 再根据每发次 X 光峰值相对电流波形的时间, 将泡沫柱的判读数据关联到电流波形的特征时刻.

各分幅成像时刻以 X 光功率峰值时刻、电流峰的 10% 幅度和电流峰的 70% 幅度时刻为参考, 如图 6(a)—(c) 所示, 上面的十字叉代表了每幅图像的拍摄时刻在相应时间波形上的位置; 图 6(d)—(f) 是相应的以该拍摄时间序列为参考, 泡沫箍缩半径随时间的演化图像, 可以看出泡沫箍缩过程的物理图像发展以 X 功率峰为参考时间点有明显的箍缩 - 停滞 - 反弹三个阶段, 而以电流波形

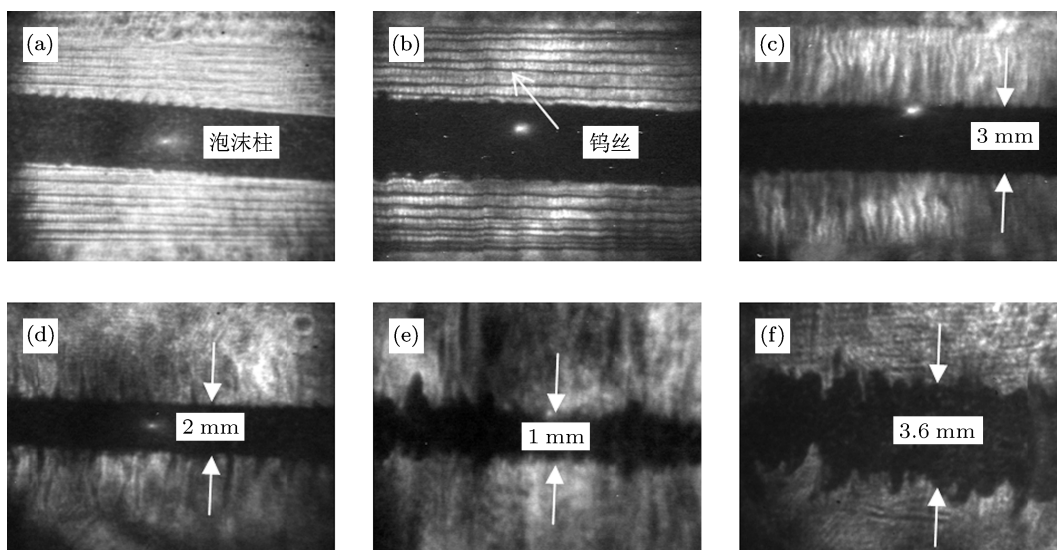


图 5 动态黑腔动力学演化过程 (a) -69.5 ns, 289#; (b) -45.5 ns, 288#; (c) -24.3 ns, 292#; (d) -13.7 ns, 303#; (e) 0.2 ns, 301#; (f) 15.9 ns, 302#

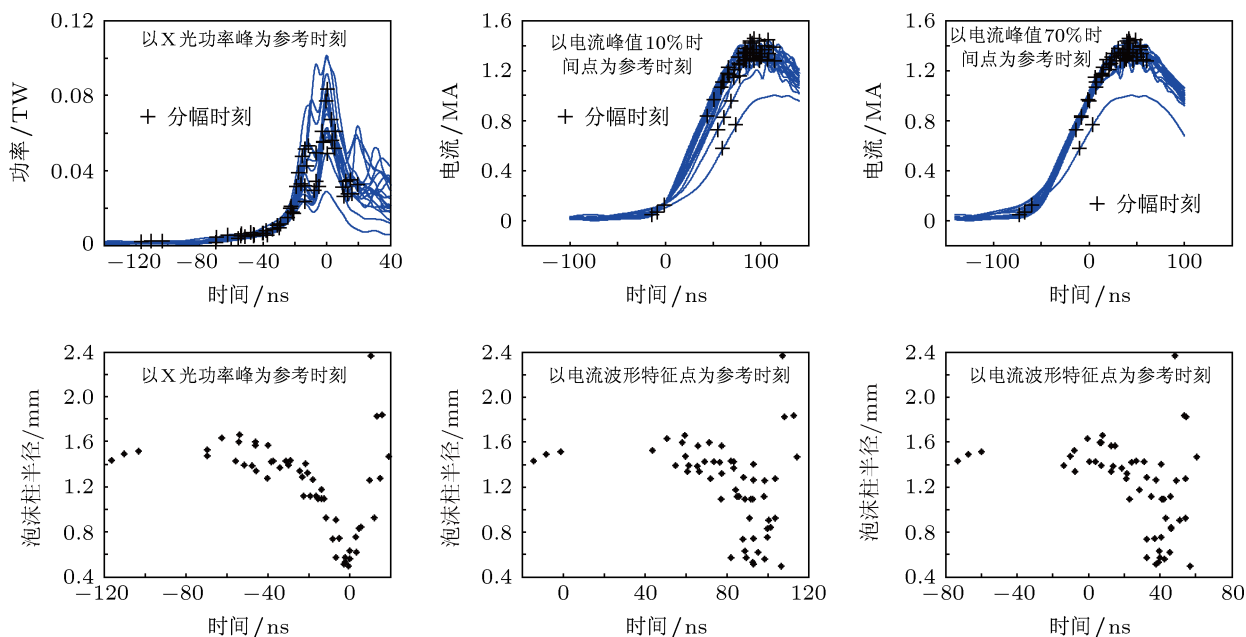


图 6 以不同特征时间点为参考成像时刻分布以及相应分布下的泡沫半径演化

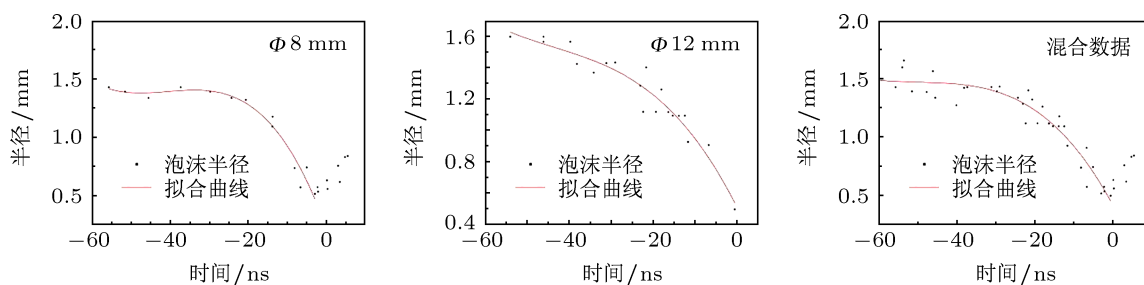


图7 泡沫柱与钨等离子体混合界面径向时间演化曲线

特征点为参考时间点数据显得较为杂乱, 因此以 X 光功率峰为参考时间点更具合理性.

下面以 X 光功率峰为参考时刻, 对 $\Phi 8\text{ mm}$, $\Phi 12\text{ mm}$ 和混合不分类 (是指将 $\Phi 8\text{ mm}$ 和 $\Phi 12\text{ mm}$ 的丝阵数据不区分的放在一起) 三种情况下的泡沫柱半径随时间的演化曲线进行 3 阶多项式拟合 (图 7), 通过拟合得到的表达式, 求解瞬时箍缩速度 (图 8), 不分类负载泡沫柱最小箍缩速度为 $1.0 \times 10^6\text{ cm/s}$, 最大箍缩速度为 $6.0 \times 10^6\text{ cm/s}$.

图 8 的泡沫柱径向箍缩速度演化曲线有一个交叉点, 该时刻之前 $\Phi 12\text{ mm}$ 丝阵泡沫柱径向箍缩速度较大, 随着时间的推移, $\Phi 8\text{ mm}$ 丝阵泡沫柱径向箍缩速度越来越大, 但由于 $\Phi 12\text{ mm}$ 丝阵统计数据还不够多, 因此该结论还需要有更多实验数据支持.

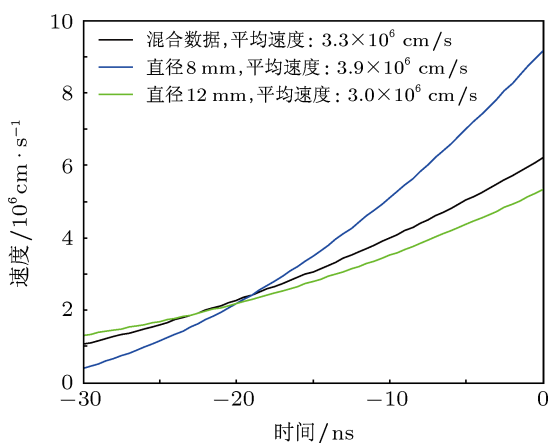


图8 箍缩速度演化

图 9 展示了不同发次带泡沫柱钨丝阵径向 X 光功率的时间演化. 由图 9 中可以看出, X 光功率呈现双峰结构, 而第一个 X 光峰主要位于主 X 光峰 (幅度最大者) 前 10—16 ns 范围内, 由丝阵的动力学演化过程可以判断, 主 X 光峰是泡沫柱箍缩到芯时刻爆发的 X 光辐射, 那么可以判断第一个 X 光

峰应该是主体钨等离子体与泡沫相互作用的时刻, 此时大量钨等离子体携带的动能转化为泡沫等离子体内能, 并以辐射能的形式释放出来. 所以, 第一个峰值时刻对应的阴影图像恰好反映了主体钨等离子体与泡沫柱相互作用的形态. 该时刻所对应的阴影像如图 10 所示, 其在整个时间演化图像 (见图 5) 中的图像形态 (即泡沫径向边界外已观测不到等离子体) 符合以上的判断, 说明结果是自洽的.

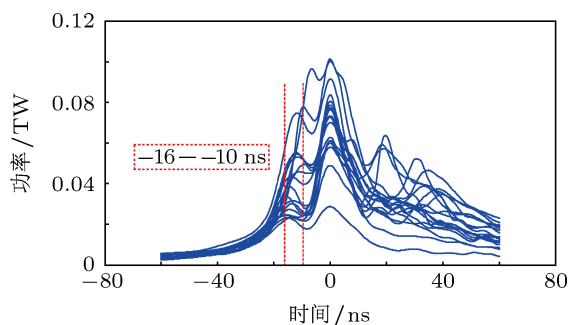


图9 不同发次径向 X 光功率

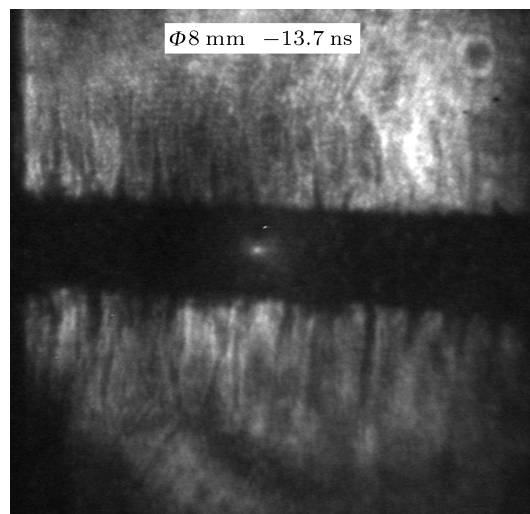


图10 第一个 X 光峰值时刻的阴影图像

5 结论

通过探针光阴影像的诊断方式获得了 Z 箍缩动态黑腔的径向分幅图像, 不同发次不同时刻的阴影图像展示了从钨丝膨胀消融到先驱等离子体向心运动, 从先驱等离子体与泡沫柱相互作用到泡沫柱的箍缩滞止反弹膨胀等一系列动力学过程的演化图像.

基于 Z 箍缩等离子体密度轴对称分布模型, 建立了径向密度呈钟形分布和双峰分布的两种密度分布形式, 通过模拟计算 266 nm 激光与等离子体相互作用的两种不同效应: 逆韧致吸收和光线偏折,

结果显示激光透射出等离子体后的光强分布主要表征了逆韧致吸收效应的影响, 说明类似实验中可测等离子体密度梯度范围和成像系统灵敏度与增大收光角关系不大.

阴影图像时间演化说明, 在长达约 50 ns 时间内丝等离子体以“雨”的形式持续与泡沫相互作用, 在整个箍缩阶段并未观察到形成等离子体壳层结构. 定量数据分析表明, 泡沫柱的最大箍缩速度为 6.0×10^6 cm/s, 最小箍缩速度为 1.0×10^6 cm/s, 在轴上滞止的直径约为 1 mm. 该数据也为动态黑腔轴向辐射测量诊断孔的选择提供了定量的参考.

- [1] Apruzese J P, Clark R W, Kepple P C, Davis J 2005 *Phys. Plasmas* **12** 012705
- [2] Sanford T W L, Lemke R W, Mock R C, Chandler G A 2004 *Phys. Plasmas* **9** 3573
- [3] Sanford T W L, Nash T J, Mock R C 2005 *Phys. Plasmas* **12** 022701
- [4] Sanford T W L, Nash T J, Mock R C 2006 *Phys. Plasmas* **13** 012701

- [5] Hutchinson I H 2002 *Principle of Plasma Diagnostics* (Cambridge: Cambridge University Press) p129
- [6] Chang T Q 1991 *Laser Plasma Interaction and Laser Fusion* (Changsha: Hunan Science and Technology) p23 (in Chinese) [常铁强 1991 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) 第 23 页]

Study of Z-pinch dynamic hohlraum shadowgraphy*

Chen Fa-Xin[†] Feng Jing-Hua Li Lin-Bo Yang Jian-Lun Zhou Lin
Xu Rong-Kun Xu Ze-Ping

(*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

(Received 27 June 2012; revised manuscript received 26 September 2012)

Abstract

In order to obtain the dynamic evolution image of tungsten array for foam padding, and to research the form of interaction between tungsten plasma and foam column, a shadow imaging system of four-frame ultraviolet probe laser (266 nm) is designed on 1 MA pulse power device. The time resolution of the system is 2.5 ns, and static space resolution is superior to 70 μm . The radial shadowgraphy image reveals the whole process from the melting and expansion of solid wire to the interaction between the precursor plasma and the foam, from the pinch to rebound inflation. The image shows the continuous interaction between tungsten plasma and foam in the form of "Raining" within a time of about 50 ns, the plasma shell structure is not found in the whole period of pinch. The quantitative analysis indicates that the minimum pinching speed of the foam column is 1.0×10^6 cm/s, and maximum pinching speed is 6.0×10^6 cm/s, and the axial stagnation diameter is about 1 mm. Shadowgram mainly shows the inverse bremsstrahlung effect of interaction between laser and plasma through simulation calculating, and main tungsten plasma interacting with foam column image is shown through synchronizing radial power profile.

Keywords: dynamic hohlraum, shadowgram, pinching speed

PACS: 52.70.-m, 52.70.La

DOI: 10.7498/aps.62.045204

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11005095).

[†] Corresponding author. E-mail: chenfarxin@gmail.com