

# 激光核聚变研究中对靶丸进行 X 射线针孔照相\*

茅 建 华

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

在激光核聚变研究中,利用靶丸等等离子体所产生的 X 射线,对靶丸进行针孔照相,以观察等等离子体密度  $\rho$ 、温度  $T$  的分布,并可测量出等等离子体的爆聚压缩度,以及提供在爆聚过程中流体力学状态的直观积分图象。同时可以用在多路激光束打靶的物理实验中,对各路光束作用在靶丸表面的时间同步性和空间对称性进行监察。

## 一、原理和方法

在激光加热等离子体的惯性约束过程中,靶丸单位体积韧致辐射的能量  $E$  为

$$E = \int_0^t p dt = \int_0^t 4.79 \times 10^{-24} Z^2 \bar{n}_i \bar{n}_e \sqrt{t} dt, \quad (1)$$

其中  $p$  是单位体积韧致辐射功率,  $t$  是惯性约束时间,  $\bar{n}_i$  是平均离子密度,  $\bar{n}_e$  是平均电子密度,  $T$  是等等离子体温度,  $Z$  是原子序数。

以上是按经典韧致辐射理论所作的估计,因此,在针孔成像的像面上是一个积分图像。如果配以 X 射线条纹相机,便可得到时间-空间-密度分布的直观的爆聚压缩过程的物理图像。

针孔成像是一种古典的几何光学成像原理,其最突出的优点是不受 X 射线能量限制,在 X 光光源研究中通常用来观察 X 光源的焦点,其所需的分辨率一般在数十微米至毫米范围。对于爆聚压缩靶丸进行 X 射线针孔照相时,需要很高的空间分辨率,因为靶丸压缩后的直径仅十几个微米。为了观察压缩后的靶丸中的结

构,针孔照相要具有相应的分辨率。

通常靶丸的初始直径一般在 100 微米左右,如果其体压缩度达到 100—1000 倍之间,则压缩后的靶丸直径将在 10—20 微米范围内。为了使所获得的图像可分辨,针孔相机的分辨率至少应与这个量级相当,如图 1 所示。图 1 是一个针孔成像原理图。针孔相机的空间分辨率  $\Delta$  为

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2, \quad (2)$$

其中  $\Delta_1$  是几何分辨率,  $\Delta_2$  是衍射极限分辨率。

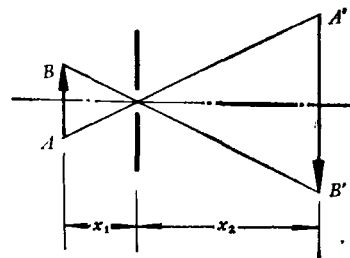


图 1 针孔成像原理图

$$\Delta_1 = d \left( \frac{x_1 + x_2}{x_2} \right) = d \left( \frac{1}{M} + 1 \right), \quad (3)$$

$$\Delta_2 = x_2 \frac{2.44 \lambda}{d}, \quad (4)$$

把(3)式、(4)式代入(2)式,得

$$\begin{aligned} \Delta &= \Delta_1 + \Delta_2 \\ &= d \left( \frac{1}{M} + 1 \right) + x_2 \left( \frac{2.44 \lambda}{d} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $M$  是线度比,  $\lambda$  是 X 射线最长波长,  $d$  是针孔孔径,  $x_1$  是靶丸至针孔间距,  $x_2$  是像面至针孔

\* 1978 年 10 月 4 日收到。

间距。

## 二、实验装置

在实验中曾采用两种不同的图像记录方式：

### 1. 单级像增强器针孔照相装置

如图 2 所示，这一装置主要是在增大  $x_2$  以提高空间分辨率的同时，为了弥补接收灵敏度，采用了微光管作图像增强，以碘化铯(铊)薄膜镀层(40 微米厚)作 X 射线-可见光图像转换，用 27 Din 全色胶片直接在荧光屏端面记录。用

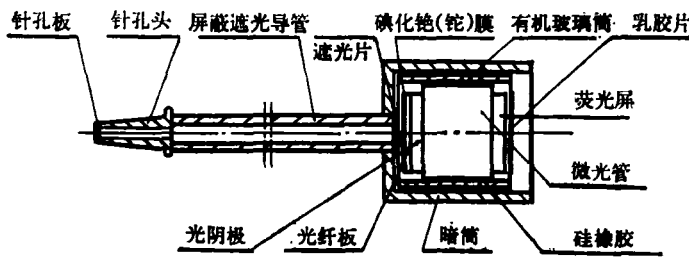


图 2 单级像增强器针孔照相装置

此装置已获得初步结果。

### 2. 用胶片直接记录针孔照相装置

由于胶片的感光灵敏度有限，在采用胶片直接记录 X 光图像时，像面上要有足够的 X 光照度。当 X 射线波长在 1—10 埃范围内，采用胶片增感技术是困难的。因此，只有加大针孔所张的有效立体角，并缩小  $x_2$  以增加像面照度，这样便不能增大线度比，所获得的是一个小小光斑图像。如图 3 所示，在胶片暗盒中除了用 3.8 微米厚铝箔作遮光片外，并加上适当的不同厚度的 X 射线吸收滤光片，使所记录的图像具

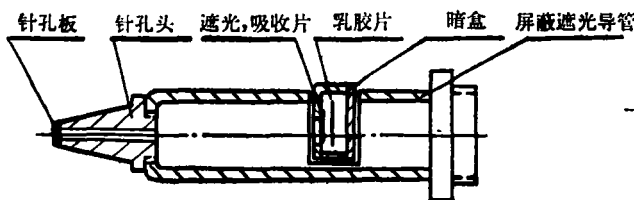


图 3 乳胶片直接记录针孔照相装置

有一定的 X 射线波长范围。

在实验装置中必须解决靶丸-针孔-像面的准直问题。这里给出靶心偏离轴线的最大允许位移量  $\Delta y$  (如图 4 所示)，以便采用适当的准直机构进行调整。

表 1 两种装置的有关参数

记录方式	针孔孔径 (微米)	$x_1$ (厘米)	$x_2$ (厘米)	$M$ 线度比	系统分辨率 (微米)	吸收滤光片 铝箔 (微米)
像增强器	30	1.0	20	20	$\approx 32.3$	7.6
胶片直接	10	0.6	4.2	7	13	3.8
胶片直接	20	0.6	4.2	7	23.5	3.8

$$\Delta y \approx x_1 \operatorname{tg} \theta / 2 - d_0 / 2,$$

$$\theta = 2 \operatorname{tg}^{-1} d / \delta,$$

其中  $d$  是针孔孔径， $d_0$  是靶丸外径， $\delta$  是针孔板厚。针孔板采用 0.5 毫米厚的钽金属片，用电子束加工针孔，可获得小于 10 微米的孔径。上述两种装置的有关参数列于表 1。

## 三、实验结果

在六路激光束打靶物理实验中，针孔相机的投影部位是其光轴和其中四路光束处于同一平面内，并与相邻两束成  $45^\circ$  角的位置。图 5 是在直径为 270 微米的氟化聚乙烯实心靶丸和针孔孔径为 30 微米的情况下，用六路激光束作三维对称打靶所得的图像。由于多路光束的时间非同步性和能量不平衡性，使所得图像近似于一个椭圆形。

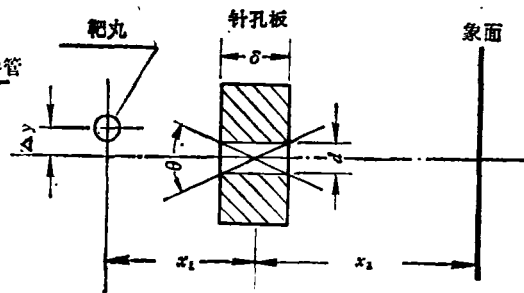


图 4 准直图

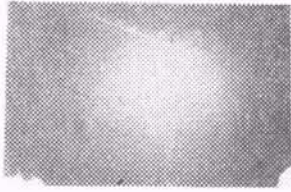


图 5

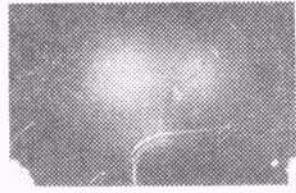


图 6



图 7

图 6 是在直径为 360 微米的氟化聚乙烯实心靶丸和针孔孔径为 30 微米的情况下,用五路光束作三维不对称打靶所得的图像。因为靶丸直径较大以及加热不对称,电子热传导的切向分量未能形成对靶丸整体加热,因此在图上仅能观察到三个局部加热所引起的光斑。

用乳胶片直接记录的实验结果介绍如下:图 7 是直径为 110 微米、壁厚为 3.6 微米的二氧化硅玻璃空心靶丸(中心仅有制靶过程中残留气体),用四束激光作二维打靶,各路光束的能量分别为  $E_1 = 28.2$  焦耳,  $E_2 = 27.5$  焦耳,  $E_3 = 23.5$  焦耳,  $E_4 = 24$  焦耳。从照片中看到:左上角突出部位是由靶丸支撑杆所造成的;右上角弱发光部位是由于激光束和靶丸作用点偏向靶杆所形成的切向热导不均匀。在照片中中心有一个圆光斑,但其照度并不比外环强,可以认为具有弱爆聚的特征。

图 8 是照片的黑度描述。从图中可以粗略地给出靶丸初始直径以及压缩后的中心光斑直径。根据体压缩度关系式

$$\sigma = \left(\frac{d'_0}{d'}\right)^3,$$

可以求得压缩度  $\sigma$ ,其中  $d'_0$  为靶丸初始直径,  $d'$  为压缩后靶丸直径(即中心光斑直径)。

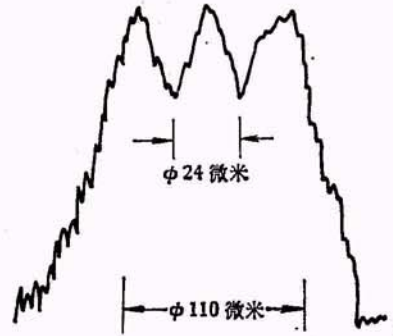


图 8 胶片黑度描述

从照片的黑度描述,通过胶片乳剂特性的标定,便可给出靶丸各点辐射 X 射线的强度分布。

具有高空间分辨率的针孔照相装置,还可以用于对靶丸中核燃料,如氘或氚所发生的聚变核反应所产生的  $\alpha$  粒子进行照相,以获得  $\alpha$  粒子的辐射强度分布。

### 参 考 文 献

- [1] D. T. Attwood, L. W. Coleman, *Physical Review Letters*, 38-6(1977), 282.
- [2] 王祝翔,核物理探测器及其应用,科学出版社,(1964), 157.
- [3] V. E. Cosslett & W. C. Nixon, *X-Ray Microscopy*, Cambridge at The University Press, (1960), 48.
- [4] Hans R. Griem, *Plasma Spectroscopy*, McGraw-Hill Book Company, (1964), 176.