

# 辐射加热腔诊断孔堵口特性实验研究

孙可煦 易荣清 敬守勇 马洪良

黄天暄 崔延莉 唐道源 郑志坚 温树槐

(中国工程物理研究院, 高温高密度等离子体物理重点实验室, 成都 610003)

**摘 要** 研究辐射加热腔诊断孔堵口现象。实验采用波长为  $1.053 \mu\text{m}$ 、能量为  $300\sim 400 \text{ J}$ 、脉宽为  $\sim 800 \text{ ps}$  的高斯型激光脉冲, 双束对打具有双源区的腔靶。在激光入射口及内爆腔诊断口用两台亚千电子伏特 X 射线能谱仪监测源区与内爆区发射的 X 光谱。定性分析和讨论了堵口现象。

**关键词** 腔靶, 诊断口, 堵口。

## 1 引 言

在激光间接驱动惯性约束聚变(ICF)实验中, 为了研究腔内辐射场状况, 通常在腔壁上

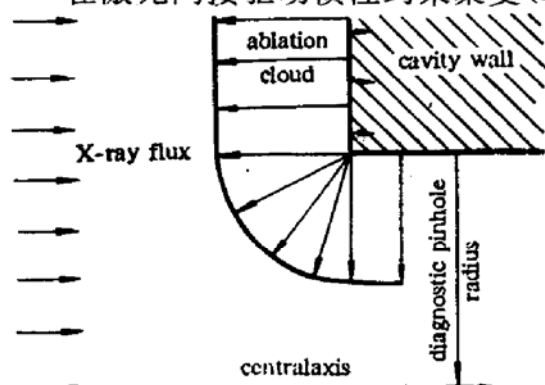


Fig. 1 Schematic diagram of cutaway side view of pinhole closure showing ablation of material, driven by absorption of X-rays in a thin surface layer

开一个或几个诊断孔, 用诊断设备观察腔内 X 光发射。

诊断口边缘物质在辐射能加热下(若是源区诊断口则还有激光能加热), 迅速汽化形成等离子体云, 离子云膨胀有两个方向, 一是沿柱型腔的径向, 二是沿诊断口的径向, 如图 1 所示。由于离子云对所观察的 X 光流具有阻挡作用, 从诊断口边缘作径向运动的离子云直接影响 X 光的通过<sup>[1, 2]</sup>, 即发生堵口现象, 使观测信号产生畸变。

本文通过具有不同孔径诊断口的腔靶实验, 从所观测到的 X 光发射强度及时间过程, 定性分析、讨论堵口现象, 为进一步研究堵口定标律提供实验依据。

## 2 实验条件及装置

实验排布如图 2 所示。

实验在中国科学院上海光学精密机械研究所的高功率激光系统(LF-12)上进行。激光波长为  $1.053 \mu\text{m}$ , 每束能量为  $300\sim 400 \text{ J}$ , 脉冲宽度为  $700\sim 1100 \text{ ps}$ , 信噪比  $> 10^6$ , 用  $f/1.7$  非球面透镜聚焦。靶室真空度为  $(2\sim 5) \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。

亚千电子伏特 X 射线能谱仪<sup>[3]</sup> Dante-1(时间分辨为  $0.7 \text{ ns}$ , 能量分辨为  $20\sim 200 \text{ eV}$ )通

过激光注入口监测源区辐射场状况。Dante-2(时间分辨为 0.4 ns, 能量分辨为 20~200 eV)通过诊断口监测内爆区辐射场状况。

实验采用双源区柱型腔靶, 柱腔尺寸为  $\phi 600 \times 1100 \mu\text{m}$ ; 腔壳材料为金; 诊断口直径有三种:  $\phi 100 \mu\text{m}$ 、 $\phi 200 \mu\text{m}$  和  $\phi 250 \mu\text{m}$ 。

### 3 实验结果

由于影响实验结果的因素较多, 而主要研究对象是内爆区诊断口面积的影响, 因此在表 1 列出了由 Dante-2 不同探测道记录的不同诊断口尺寸的三发实验数据。为了便于分析, 把源区辐射场当作初始条件, 在表 2 中列出了由 Dante-1 不同探测道记录的这三发实验的源区辐射脉冲数据, 观察口尺寸均为  $\phi 250 \mu\text{m}$ 。图 3 和图 4 分别给出了诊断口为  $\phi 200 \mu\text{m}$  和  $\phi 100 \mu\text{m}$  腔靶内爆区的典型脉冲照片。

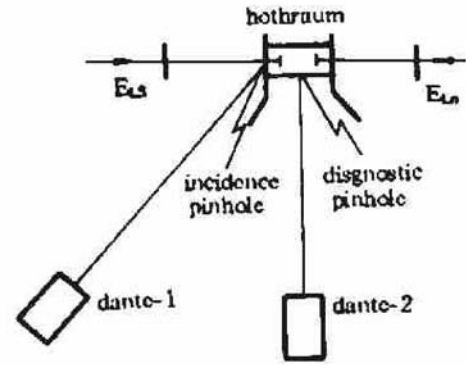


Fig. 2 Schematic diagram of the experiment setup for study of pinhole closure

Table 1. The detection signal of different energy channel through diagnostic pinhole of different area of implosion region in two beams-cavity experiment<sup>a</sup>

| channel<br>signal<br>shot | diagnostic<br>pinhole<br>( $\mu\text{m}$ ) | $E_{L1}/\tau_{L1}$ | $E_{L2}/\tau_{L2}$ | B+M <sup>b</sup> | C+M <sup>b</sup> | Ti      | Cr      | Ni      | Zn     | Al      |
|---------------------------|--|--------------------|--------------------|------------------|------------------|---------|---------|---------|--------|---------|
|                           |  | (J/ps)             | (J/ps)             | (mV/ns)          | (V/ns)           | (V/ns)  | (V/ns)  | (V/ns)  | (V/ns) | (mV/ns) |
| 92-94                     | $\phi 250$                                 | 299/922            | 297/670            | ~160/~2.5        | 2.5/2.2          | 4.4/1.7 | 0.7/1.5 | 1.3/1.7 | 40/1.5 | 220/1.2 |
| 92-91                     | $\phi 200$                                 | 321/1110           | 334/730            | 170/2.3          | 2.6/1.6          | 6.8/1.3 | 1.0/1.2 | 1.6/1.4 | 50/1.2 | 520/0.9 |
| 92-92                     | $\phi 100$                                 | 329/--             | 335/--             | 65/1.9           | 1.6/1.4          | 4.6/1.2 | 0.7/1.1 | 0.8/1.4 | 20/1.1 | 350/1.0 |

- a. Detection solid radian of Dante-2  $\sim 6.26 \times 10^{-5}$  sr
- b. B+M is B filter and planar mirror, C+M is C filter and planar mirror

Table 2. The detection signal of different energy channel from source region in two beams-cavity experiment<sup>a</sup>

| channel<br>signal<br>shot | B       | C+M <sup>b</sup> | Ti      | Cr      | Fe      | Ni      | Cu      | Zn      | Al      | Tr   |
|---------------------------|---------|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------|
|                           | (V/ns)  | (mV/ns)          | (V/ns)  | (mV/ns) | (V/ns)  | (V/ns)  | (mV/ns) | (V/ns)  | (mV/ns) | (eV) |
| 92-94                     | 1.6/1.5 | 400/1.7          | 1.3/1.6 | 380/1.3 | 1.8/1.3 | 0.9/1.1 | 240/1.4 | 0.7/1.3 | 300/1.3 | 122  |
| 92-91                     | 2.9/1.4 | 500/1.6          | 1.8/1.5 | 580/1.2 | 3.0/1.2 | 2.2/1.2 | 400/1.4 | 1.2/1.2 | 520/1.2 | 134  |
| 92-92                     | 2.7/1.3 | 420/1.6          | 1.6/1.4 | 550/1.1 | 3.0/1.1 | 1.8/1.0 | 420/1.3 | 1.2/1.1 | 500/1.1 | 132  |

- a. Detection solid radian of Dante-1  $\sim (1.04 \sim 1.78) \times 10^{-5}$  sr

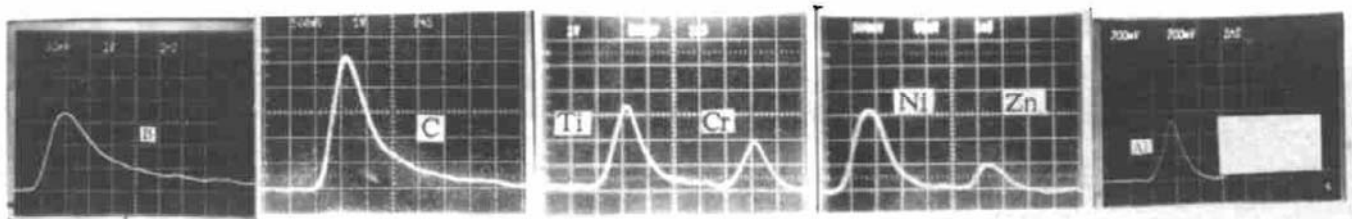


Fig. 3 Shot 92-91, the X-ray signals recorded with Dante-2 through diagnostic hole  $\sim 200 \mu\text{m}$  on two beams hohlraum

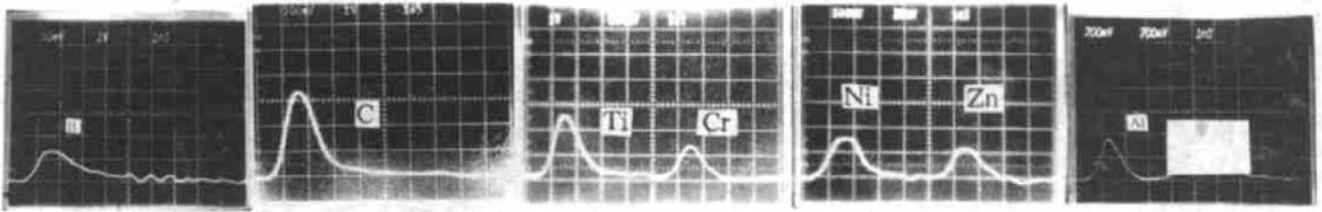


Fig. 4 Shot 92-92, the X-ray signals recorded with Dante-2 through diagnostic hole  $\sim \phi 100 \mu\text{m}$  on two beams hohlraum

#### 4 数据分析

如果腔靶诊断口不存在堵口现象, 从诊断口发射的 X 射线的时间过程应不受发射口面积影响, 而发射通量应正比于诊断口面积, 事实并非如此。由表 1、表 2 及图 3、图 4 中的数据明显可见, 从诊断口观测到的 X 光脉冲信号其脉冲宽度与诊断口面积有关, 并且其发射通量不正比于发射口面积, 说明诊断口确实存在堵口现象。

把表 2 中的三发源区碳能道测到的脉冲信号放在一起并以峰值归一作比较[见图 5(a)], 观测口尺寸均为  $\phi 250 \mu\text{m}$ , 91 发与 92 发注入激光能量差不多, 其碳能道脉冲波形也差不多。而 94 以注入激光能量约比前二发小 10% 左右, 脉冲幅度略小些这是好理解的, 其脉冲宽度反而略宽些, 这个问题涉及到堵口速率。当源区注入激光能量大时, 形成辐射场温度则高, 入射口边缘受到的辐照强度(除 X 光辐照外, 还有激光辐照)也高, 入射口边缘烧蚀形成的等离子体喷射速率增大, 形成空间离子云堵口的速率也加快, 造成在图 5(a)中的观察结果。

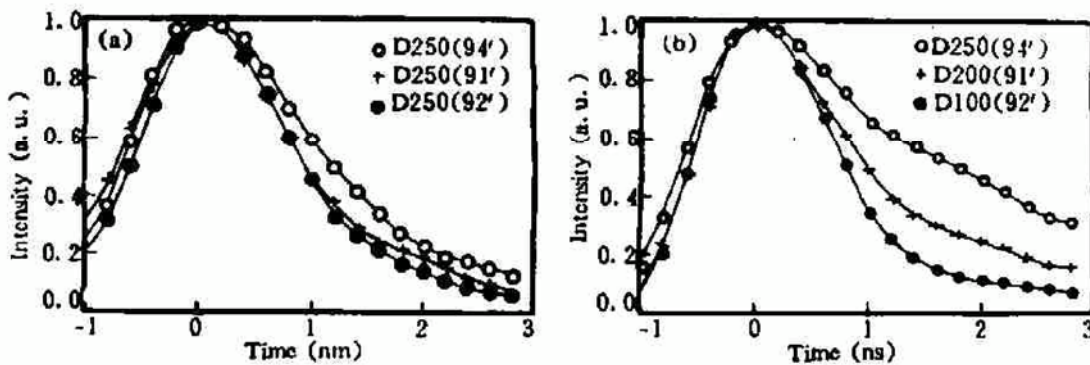


Fig. 5 The same C-channel X-ray pulse comparison of three shots have been normalized, (a) source region, (b) Implosion region

图 5(b)是上述三发典型实验内爆区用碳能道记录的 X 光脉冲信号相对值(以峰值归一, 暂不考虑发射强度), 由图明显可见, 94 发诊断口直径最大( $\sim \phi 250 \mu\text{m}$ ), X 光脉冲宽度最宽( $\sim 2.2 \text{ ns}$ ), 92 发诊断口直径最小( $\sim \phi 100 \mu\text{m}$ ), 其 X 光脉冲宽度也最小( $\sim 1.4 \text{ ns}$ ), 这说明在其它实验条件相同情况下, 诊断口小则造成堵口严重。

为了进一步描述辐射场温度对诊断口堵口速率的影响, 图 6 为源区与内爆区具有同样诊断口(均为  $\phi 250 \mu\text{m}$ )时 92-94 发碳能道记录的脉冲信号相对比较, 内爆区脉冲信号宽度( $\sim 2.2 \text{ ns}$ )明显大于源区脉冲信号宽度( $\sim 1.7 \text{ ns}$ ), 根据过去同类实验的经验, 源区辐射场温度约比内爆区高 10% 以上<sup>[2]</sup>, 由此更说明了在腔靶辐射场观测中, 诊断口堵口速率与辐射温度密切相关, 且正比于辐射场温度。

堵口现象是一个十分复杂的物理问题, 辐射能烧蚀内爆腔壁及诊断口边缘物质, 形成喷

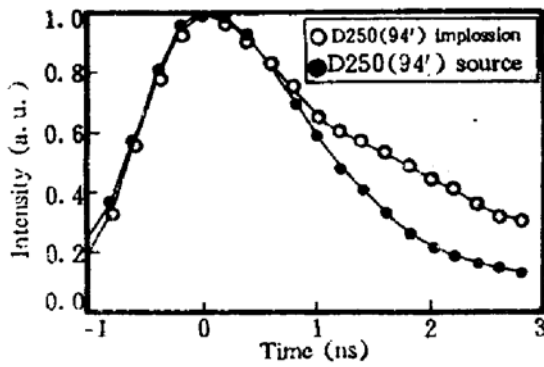


Fig. 6 The same C-channel X-ray pulse of both source region and implosion region of shot 92-94 have been normalized to peak value

射等离子体云，在诊断口附近，离子云运动指向诊断孔中心，离子云所到之处，影响 X 光通过(吸收)。甚至 X 光完全不能通过，如果把堵口看成刚性缩孔，只要知道离子运动速度，即可计算出发射口面积随时间变化过程，由此反推腔内辐射场实际强度。根据文献[4]给出的离子速度，对于  $\phi 200 \mu\text{m}$  的诊断口来说，离子云到达诊断孔中心的时间  $\leq 1 \text{ ns}$ 。但从图 3 可见不同能区 X 光发射时间均远超过 1 ns，因此堵口过程不能看作刚性缩孔。

为了进一步分析堵口现象，通过不同尺寸诊断口观测 X 光发射通量随时间及能区变化过程，寻求影响堵口的因素及规律。以 92-91 及 92-92 两发为例，这两发实验靶型类似，注入激光能量相近，源区辐射场发射强度(见表 2)也相近，差别仅在于内爆区诊断口尺寸，92-91 发诊断口为  $\phi 200 \mu\text{m}$ ，92-92 发诊断口为  $\phi 100 \mu\text{m}$ ，即诊断口面积差 4 倍。设这两发辐射运输过程基本相同，那么内爆腔辐射场状况也应基本相同。

图 7 给出这两发不同能道测到的通量比随时间变化过程(测量过程未加精确时标作时间绝对定位，仅以脉冲峰值定位；测量系统时间分辨  $\sim 0.4 \text{ ns}$ ，测量信号未作系统响应时间回推)，由图可见，除二个高能道外(Zn 和 Al 道)，其余能道(分布在主要能区)通量比曲线都类似。X 光发射初始时刻通量比较大(最大值趋近于诊断口面积比)，随后比值下降，至脉冲信号峰值时刻，通量比最低，此后又随时间增加，最终仍趋向于诊断口面积比。X 光发射初始时刻，诊断口边缘所形成的离子云稀薄，堵口影响不太严重，发射通量比依赖于发射口面积。随着喷射离子云向中心逼近，堵口效应影响逐渐加重，通量比逐渐下降；根据离子运动速度，对于  $\phi 200 \mu\text{m}$  的诊断口，离子到达中心的时间约  $\leq 1 \text{ ns}$ ，而对于  $\phi 100 \mu\text{m}$  的诊断口，离子云则较早到达中心并汇聚形成具有一定密度的空间发射区，此时发射由两部分组成，有来自腔内的壁发射，也有诊断口的空间等离子团发射，造成此时刻发射通量比最低。此后， $\phi 200 \mu\text{m}$  的诊断口中心也开始形成汇聚等离子团，也开始产生空间体发射<sup>[5]</sup>，并逐渐增强，从而发射通量比逐渐增大。发射后期，诊断口空间等离子体聚集越来越多，虽然腔内辐射场温度已较低，来自腔内的发射已很少，但诊断口空间已充满稠密等离子体，此时观测到的发射主要来自这个区域，因此，通量比趋近于面积比。

为了进一步分析堵口现象，通过不同尺寸诊断口观测 X 光发射通量随时间及能区变化过程，寻求影响堵口的因素及规律。以 92-91 及 92-92 两发为例，这两发实验靶型类似，注入激光能量相近，源区辐射场发射强度(见表 2)也相近，差别仅在于内爆区诊断口尺寸，92-91 发诊断口为  $\phi 200 \mu\text{m}$ ，92-92 发诊断口为  $\phi 100 \mu\text{m}$ ，即诊断口面积差 4 倍。设这两发辐射运输过程基本相同，那么内爆腔辐射场状况也应基本相同。

图 7 给出这两发不同能道测到的通量比随时间变化过程(测量过程未加精确时标作时间绝对定位，仅以脉冲峰值定位；测量系统时间分辨  $\sim 0.4 \text{ ns}$ ，测量信号未作系统响应时间回推)，由图可见，除二个高能道外(Zn 和 Al 道)，其余能道(分布在主要能区)通量比曲线都类似。X 光发射初始时刻通量比较大(最大值趋近于诊断口面积比)，随后比值下降，至脉冲信号峰值时刻，通量比最低，此后又随时间增加，最终仍趋向于诊断口面积比。X 光发射初始时刻，诊断口边缘所形成的离子云稀薄，堵口影响不太严重，发射通量比依赖于发射口面积。随着喷射离子云向中心逼近，堵口效应影响逐渐加重，通量比逐渐下降；根据离子运动速度，对于  $\phi 200 \mu\text{m}$  的诊断口，离子到达中心的时间约  $\leq 1 \text{ ns}$ ，而对于  $\phi 100 \mu\text{m}$  的诊断口，离子云则较早到达中心并汇聚形成具有一定密度的空间发射区，此时发射由两部分组成，有来自腔内的壁发射，也有诊断口的空间等离子团发射，造成此时刻发射通量比最低。此后， $\phi 200 \mu\text{m}$  的诊断口中心也开始形成汇聚等离子团，也开始产生空间体发射<sup>[5]</sup>，并逐渐增强，从而发射通量比逐渐增大。发射后期，诊断口空间等离子体聚集越来越多，虽然腔内辐射场温度已较低，来自腔内的发射已很少，但诊断口空间已充满稠密等离子体，此时观测到的发射主要来自这个区域，因此，通量比趋近于面积比。

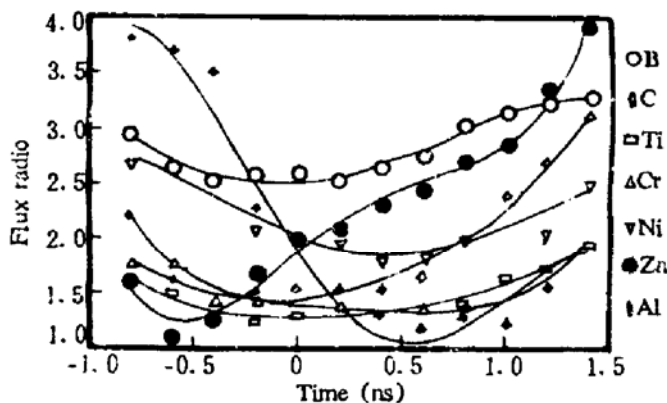


Fig. 7 The different channel X-ray emission flux ratio of both shots 92-91 and 92-92 versus time

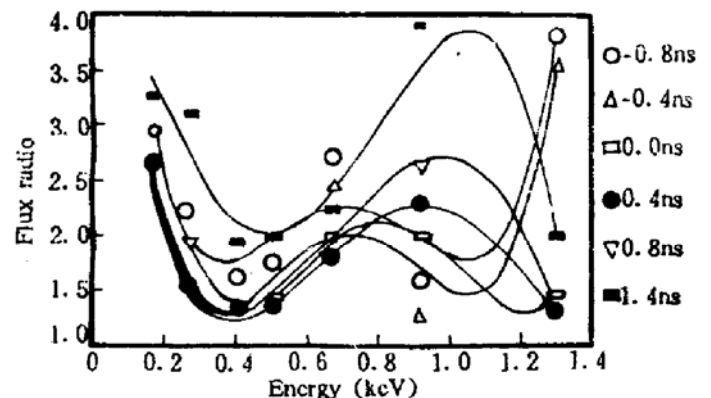


Fig. 8 In the different time X-ray emission flux ratio of both shots 92-91 and 92-92 versus energy

图 8 给出 92-91 发对 92-92 发不同时刻发射通量比随能量变化曲线。从曲线形状看, 大致可分为两部分, 给好以峰值时刻为界。峰值发射前, 通量比随能量变化呈三个峰, 三个峰位分别在 0.17 keV、0.7 keV 和大于 1.3 keV 附近, 并且第一峰与第三个峰峰值更大些。峰值发射时刻后, 通量比呈两个峰, 峰值分别在 0.17 keV 和 0.9 keV 附近, 第二个峰的峰位明显后移, 并且其比值随时间逐渐增大。X 光发射初期, 堵口不太严重, 发射通量依赖于面积, 高能 X 光穿透率强, 通量比更趋近于面积比, 都好理解。为什么低能端发射通量比也比中等能量的比值相对高些呢, 这可能与诊断口边缘烧蚀等离子体的低温辐射有关。峰值时刻后的曲线, 正如时间过程描述的那样, 由于膨胀离子云已在中心汇聚形成空间体发射区, 空间发射离子团随时间扩大并变得更稠密, 加上腔内辐射场温度下降, 通过离子云的发射逐渐减少, 观测发射越来越依赖于空间体发射, 而体发射以带发射为主<sup>[5]</sup>, 因此, 在带发射级区, 发射通量比越来越依赖于面积比。

## 5 结 论

激光腔靶实验中, 研究腔内辐射场状况的诊断口存在堵口现象, 堵口速率与腔内辐射场温度紧密相关, 腔内辐射场温度高, 则堵口形成速率快, 堵口严重。造成堵口现象的直接因素是诊断口空间离子云, 离子云主要来自诊断口边缘被辐射能流加热的物质, 离子云运动速度及发射速率正比于加热辐射流(即辐射场温度), 堵口速率直接影响 X 光发射时间。

相近打靶条件下, 不同尺寸诊断口的发射通量比说明, X 光发射初期, 堵口不太严重, 发射通量依赖于诊断口面积(高能端更为明显), 诊断口边缘被加热所形成离子云也要发射 X 光, 初期温度很低, 主要为低能份额。离子云随时间作向心运动, 逐渐逼近中心, 堵口效应也逐渐增强。目前打靶条件下, 对于  $\phi 200 \mu\text{m}$  诊断口而言, 在小于 1 ns 时间内, 离子云到达中心, 堵口最严重。此后, 中心离子云汇聚成稠密等离子体, 体积逐渐扩大, 并且这个区域形成的体发射也随时间增强、面积逐渐扩大, 对所观测信号的贡献也随时间增大, 至 X 光发射后期, 稠密离子云充满诊断口空间, 成为观测信号的主要贡献部分。

由不同时间的观测谱形看, 由于空间体发射区域处在冷热剧烈变化的界面, 不可能趋向于热动平衡状态, 因此, 这个区域的辐射为非平衡辐射, 即以带发射为主。特别是 X 光发射后期, 诊断口空间充满稠密等离子体, 腔内辐射场温度变低, 辐射很难穿过此时的稠密离子云, 观测信号主要来自这部分非平衡辐射。这从文献[6]中描述的带发射能区脉冲宽度明显展宽也可得到验证。

实验受到制靶人员、激光器运行人员及电子学工作人员大力支持, 并得到彭翰生、江文勉、常铁强、赖东显和张钧等同志关心和指导, 在此一并表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- [1] R. J. Harrach, Simple model of pinhole closure in high-energy density experiments. *Rev. Scient. Instrum.*, 1986, 57(6): 2192~2194
- [2] 张 钧, 古培俊, 裴文兵等, 腔靶诊断孔辐射堵口的简化描述. *强激光与粒子束*, 1993, 5(3): 405~414
- [3] 孙可煦, 杨建国, 郑志坚, 用于激光等离子体诊断的亚千 X 射线能谱仪. *强激光与粒子束*, 1990, 2(1)

· 16~22

- [4] 丁永坤, 郑志坚, 腔靶离子发射特性实验. 强激光与粒子束, 1992, 4(3): 455~460
- [5] 孙可煦, 易荣清, 成金秀等, 激光腔靶 X 射线面、体发射特性实验研究. 物理学报, 1994, 43(5): 748~755
- [6] 孙可煦, 易荣清, 马洪良等, 激光腔靶辐射时间特性研究. 光学学报, 1994, 14(6): 561~567
- [7] 孙可煦, 徐和平, 唐永键等, 双束黑洞靶辐射特性实验研究. 强激光与粒子束, 1990, 2(4): 401~408

## Experimental Study on Pinhole Closure of Diagnostic Pinhole in the Radiation Heated Cavity

Sun Kexu    Yi Rongqing    Jing Shouyong    Ma Hongliang  
Huang Tianxuan    Cui Yanli    Tang Daoyuan  
Zheng Zhijian    Wen Shuhuai

(Laboratory for Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610003)

(Received 29 August 1994; revised 17 November 1994)

**Abstract** The study on pinhole closure of diagnostic pinhole in the cavity heated by radiation is reported. Laser Wavelength of  $1.053 \mu\text{m}$ , energy  $300\sim 400 \text{ J}$ , pulse width  $\sim 800 \text{ ps}$  with Gaussian shape are used in the experiments. Two laser beams drive the cavity target with two source regions. The sub-keV X-ray spectrum from source region and implosion region were measured by two sub-keV X-ray energy spectrometers respectively through laser incidence hole and diagnostic hole. The pinhole closure problem was qualitatively analysed and discussed.

**Key words** cavity target, diagnostic hole, pinhole closure.