

## 集束实验针孔成像与仿真分析

李颖洁<sup>1</sup>,董建军<sup>1</sup>,朱京涛<sup>2</sup>,杨正华<sup>1</sup>,杨品<sup>1</sup>,张兴<sup>1</sup>,李晋<sup>1</sup>,杨志文<sup>1</sup>,胡昕<sup>1</sup>,  
刘慎业<sup>1</sup>,任宽<sup>1</sup>,李三伟<sup>1</sup>,肖云青<sup>1</sup>,郭怀文<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心,四川 绵阳 621900;2. 同济大学物理科学与技术学院,上海 200092)

**摘要:**在激光装置实验中,通过小孔成像原理可获取黑腔靶中发射的X光图像的时间积分。提出一种3倍放大的新型成像设备用于集束实验,通过在与靶轴线夹角30°方向安装带多层镜选能的成像设备从而获取低能和高能段的X光时间积分图像,观察腔壁的再辐射现象。开展了用于集束实验针孔相机的研制工作,包括光路设计与结构设计,通过离线进行测试,在线实验进行打靶考核。进行成像光路仿真,模拟计算了两种镜子的选能效果,并通过光路仿真得到了多层镜、滤片和谱分布对成像结果的影响。采用FLASH对实验辐射场分布进行仿真,作为成像仿真的输入。最后,将此设备获取的成像结果与仿真计算得到的结果进行比较,实验结果与仿真结果基本一致,得到了X光信号强度的分布情况,获取了理想的实验数据,加深了对内部物理现象的理解。由此,建立了针孔成像的仿真能力,能够对成像结果进行预判,指导针孔相机的设计。

**关键词:**X光图像;时间积分;结构设计;光路设计;成像仿真

**中图分类号:**0434;TN29 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.07.017

## Simulation and analysis of pinhole imaging in first laser plasma interaction experiments

LI Ying-jie<sup>1</sup>, DONG Jian-jun<sup>1</sup>, ZHU Jing-tao<sup>2</sup>, YANG Zheng-hua<sup>1</sup>, YANG Pin<sup>1</sup>,  
ZHANG Xing<sup>1</sup>, LI Jin<sup>1</sup>, YANG Zhi-wen<sup>1</sup>, HU Xin<sup>1</sup>, LIU Shen-ye<sup>1</sup>, REN Kuan<sup>1</sup>, LI San-wei<sup>1</sup>,  
XIAO Yun-qing<sup>1</sup>, GUO Huai-wen<sup>1</sup>

(1. Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. School of Physical Science and Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In the laser device experiment, the time integral of X-ray image emitted from black cavity target can be obtained by the principle of keyhole imaging. A new imaging device with triple magnification is proposed for the first laser plasma interaction experiments, where X-ray time integral images in the low and high energy segments are obtained by installing the imaging device with multi-layer mirror at an angle of 30° to the target axis to observe the re-radiation of the cavity wall. The development of a keyhole camera for the first laser plasma interaction experiments is carried out, including optical design and structural design. The system performance is tested off-line and experimented on-line. The imaging optical path and the energy selection effect of two kinds of mirrors are simulated, and the effect of multi-layer mirror, filter and spectrum distribution contribution on the imaging results is obtained through the simulation of the optical path simulation. FLASH is used to simulate the experimental radiation field distribution as an input

to the imaging simulation. Finally, the imaging results obtained by the device are compared with the results obtained from the simulation calculations. The experimental results are basically consistent with the simulation results, obtaining the distribution of the X-ray signal, the ideal experimental data, and deepening the understanding of the internal physical phenomena. Therefore, the simulation capability of pinhole imaging is established, which can predict the imaging results and guide the design of pinhole cameras.

**Keywords:** X-ray image; time integral; structural design; optical design; imaging simulation

## 1 引言

在间接驱动惯性约束聚变实验中,整形激光向黑腔中传递兆焦能量。在激光吸收过程中,等离子体膨胀和辐射是一个复杂的现象,目前已发展了各种成像诊断设备用于研究黑腔内部的物理现象<sup>[1]</sup>。采用小孔成像原理测量黑腔实验中的注入孔图像是普遍采用的一种 X 光成像技术,其结构简单,操作容易,具有极宽能区,便于实现多通道 X 光成像。美国 NIF 装置<sup>[2-8]</sup>,我国神光装置<sup>[9-12]</sup>等激光装置均有此类成像设备用于激光注入的测量,并作为常规诊断参与几乎所有试验发次。

集束实验是惯性约束聚变实验的验证实验,靶室内直径为 1.4 m,采用 12 kJ 的激光束,聚焦于直径 2.5 mm,长度 3~5 mm 的柱腔靶前端注入孔中心入射。黑腔内存在激光烧蚀、等离子体膨胀、再辐射等复杂的物理过程<sup>[1]</sup>。针孔相机从与靶轴线夹角 30°方向观察注入孔,可以通过黑腔内部解释注入孔图像。本文采用小孔成像原理,根据实验条件进行光路设计与结构设计,通过两块多层镜进行选能,获取集束实验中 2~3 keV 和 5~6 keV 两个不同能段的 X 光时间积分图像。其中低能通道的图像信号基本由辐射温度和金 M 带发光组成,高能通道的图像中还包含了韧致辐射信号。对成像光路与辐射过程进行仿真,模拟实验结果。通过对模拟计算与试验结果进行比较,分析并解释注入孔图像,并对成像与仿真设计进行改进。

本文主要分为三个部分,第一部分介绍设备的研制,包括成像原理,结构设计,光路设计,最终实现 3 倍放大,25 μm 空间分辨率,14 mm 视场及可实现低能 2~3 keV,高能 5~6 keV 两个能段的双通道测量等性能指标;第二部分介绍实验中靶内部辐射场分布的仿真及成像设备的仿真:靶内

辐射场分布仿真主要是根据实验条件设置激光条件及靶参数,采用 FLASH 模拟计算得到腔靶内部辐射场分布,成像仿真主要考虑了滤片,多层镜及能谱分布对成像结果的影响,将辐射场分布作为成像仿真的输入,模拟设备对仿真计算辐射场分布的成像结果;第三部分将仿真结果与试验结果进行比较,验证仿真与设计的可靠性,并对得到的实验数据进行分析,得到腔壁再辐射随不同腔靶长度,不同腔靶材料的变化。

## 2 注入孔成像设备的研制

激光实验中,通过注入孔图像可以获取黑腔内部的物理信息<sup>[13]</sup>,如图 1 所示,集束实验中激光注入腔底,腔内充 C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>,气压 0.6 atm。通过在与靶轴线夹角 30°方向安装注入孔成像设备来观察黑腔内部。注入孔成像设备采用小孔成像原理,合理设计光路,滤片,多层镜,通过 X 光 CCD 获取两个能量通道的 X 光图像。对此系统进行光路与结构设计并用于集束实验中,进行 X 光成像诊断。

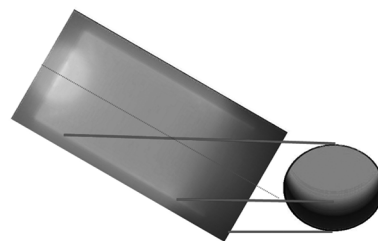


图 1 黑腔内发射的等离子体对注入孔图像的贡献

Fig. 1 Contribution of emitting hohlraum to laser-entrance-hole image

### 2.1 小孔成像原理

针孔成像的原理是光沿直线传播,如图 2 所示。X 射线注入孔成像设备具有简易方便的优点,但其收光效率与空间分辨率相互制约。

注入孔成像设备的分辨率指的是可以区分的物平面上最近两个物点之间的距离。影响空间分辨率的因素包括由放大倍数 ( $M = D_i/D_o$ ) 引起的几

何分辨  $\Delta$  和由针孔衍射引起的衍射分辨  $\Delta_i$ , 并可计算出最佳针孔直径和最佳分辨率<sup>[14]</sup>。

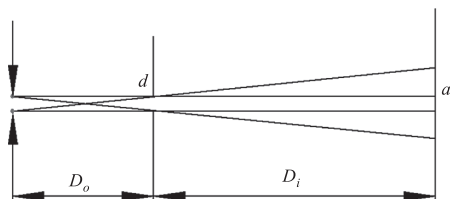


图2 小孔成像原理图

Fig.2 Pin-hole imaging schematic

注入孔成像设备的分辨率:

$$\Delta_s = \sqrt{\Delta^2 + \Delta_i^2} \quad (1)$$

几何分辨:

$$a = (D_o + D_i) \cdot \frac{d}{D_o} \quad (2)$$

$$\Delta = \frac{a}{M} = \left(1 + \frac{1}{M}\right)d$$

衍射分辨:

$$\Delta_i = \frac{2.44\lambda D_o}{d} \quad (3)$$

$s = \sqrt{(1 + 1/M)^2 d^2 + (2.44\lambda/d)^2 D_o^2}$  的极小值,也是函数  $s^2 = (1 + 1/M)^2 d^2 + (2.44\lambda/d)^2 D_o^2$  的极小值。 $s^2$  对  $d$  求导数可得最佳针孔直径:

$$\begin{cases} \frac{ds^2}{d(d)} = 2d_{\min} \left(1 + \frac{1}{M}\right)^2 - 2 \frac{2.44^2 \lambda^2 D_o^2}{d_{\min}^3} = 0 \\ d_{\min} = \sqrt{\frac{2.44\lambda D_o}{\left(1 + \frac{1}{M}\right)}} \end{cases} \quad (4)$$

可得系统的空间分辨为:

$$s_{\min} = \sqrt{4.88 \left(1 + \frac{1}{M}\right) \lambda D_o} \quad (5)$$

注入孔成像设备的收光立体角很小,导致它对给定光源的探测效率很低。注入孔成像设备接收到的通量份额由其接收立体角来表征<sup>[14]</sup>,即:

$$\Omega \approx \frac{\pi d^2}{4D_o^2} \quad (6)$$

## 2.2 结构设计

注入孔成像设备的结构件主要包括针孔、多层镜、滤片、前端调节机构、后端调节机构、保护罩等(如图3所示)。集束长工作距离注入孔成像设备的设计主要为观察集束实验中黑腔内部,并通

过设计多层镜进行选能,实现两个通道分别测量 2 ~ 3 keV, 5 ~ 6 keV 双能带的光斑信号。根据两通道选能效果不同,为达到最优分辨率,可由(4)式分别计算出针孔直径。上针孔为高能通道,  $d_1 = 19 \mu\text{m}$ , 下针孔为低能通道,  $d_2 = 13 \mu\text{m}$ 。注入孔成像设备前端应避免与靶室内散射光测量系统干涉,因而物距设计为 400 mm, 即小孔位于安装法兰轴线具靶室中心 400 mm 位置,放大倍数为 3 倍,根据  $M = D_i/D_o$  得像距为 1200 mm, 由此确定记录面的位置。集束靶室端面距法兰中心距离为 700 mm, 因此,设备在靶室外长度为 900 mm。注入孔成像设备多层镜位于针孔后端保护罩内,前端采用模拟靶复位的方式保证物点的瞄准精度,后端采用准直激光器复位的方式调节像点位置。前端位于靶室内,为避免影响散射光的测量,在前端增加发黑处理的保护罩,同时可减少杂散光对注入孔成像设备光路的影响。由于打靶时靶室为真空,因而成像光路所在筒结构应具备真空密封性,连接处采用胶圈密封。

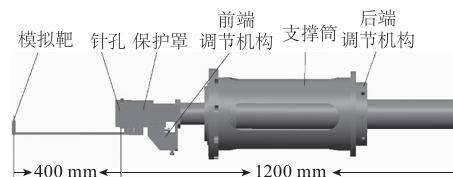


图3 注入孔成像设备结构图

Fig.3 Laser entrance hole image rstructural diagram

离线测试结果:两个通道可分别测量 2 ~ 3 keV, 5 ~ 6 keV 双能带;空间分辨率优于  $25 \mu\text{m}$ ;视场为 14 mm,放大倍数为 3 倍;瞄准精度优于  $50 \mu\text{m}$ 。系统装配完成后进行漏率测量,测得系统的漏率为  $5 \times 10^{-11} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ , 满足实验要求。该注入孔成像设备可用于集束装置进行实验。

## 2.3 光路设计

成像系统光路设计如图4所示,本文光路中角度入射范围为  $0.9803^\circ \sim 3.0143^\circ$ , 角度离散如表1所示。理想入射角为  $1.5^\circ$ , 镜子相对水平位置偏转  $0.4063^\circ$ 。在  $1.5^\circ$  入射角下, Cr/C 对 2 ~ 3 keV 能段有较好选能效果,如光路①所示, W/Si 对 5 ~ 6 keV 能段有较好选能效果,如光路②所示。两个光路可

以分别实现不同能段的 X 光成像,两块镜子在不同角度下的选能效果如图 5 所示。

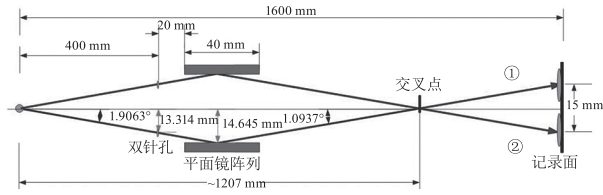


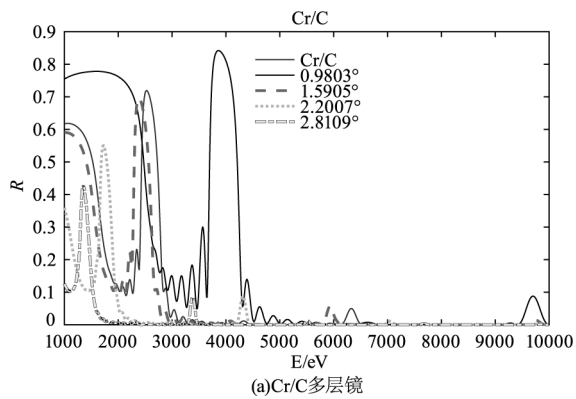
图 4 注入孔成像设备光路图

Fig. 4 Optical pathway diagram of laser entrance hole imager

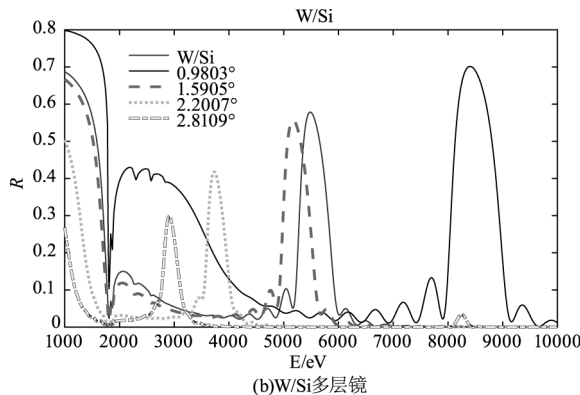
表 1 视场范围内角度离散表

Tab. 1 Angular discretization in the field of view

data1/(°)	data3/(°)	data5/(°)	data7/(°)
0.9803	1.5905	2.2007	2.8109



(a)Cr/C多层镜



(b)W/Si多层镜

图 5 多层膜镜在不同角度下反射率随能量变化曲线

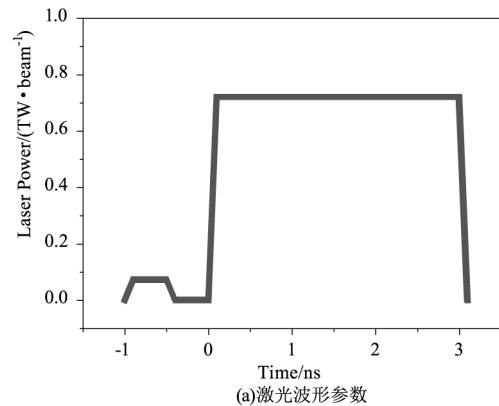
Fig. 5 Reflectance versus energy curve of multilayer membrane mirror in different angle of incident

### 3 仿真与实验

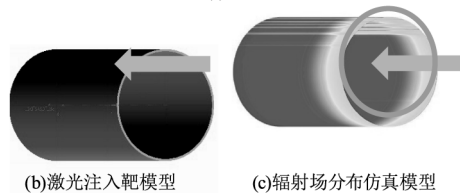
#### 3.1 实验辐射场分布仿真

通过模拟计算,可以获取实验过程中辐射场在靶内部的分布<sup>[13-15]</sup>。采用封底金腔靶,靶尺寸为  $\Phi 2.5 \text{ mm} \times 5.0 \text{ mm}$ ,前端注入孔  $\Phi 2.5 \text{ mm}$ ,腔内充气,  $\text{C}_3\text{H}_{12}$ ,气压 0.6 atm。靶水平放置,靶轴线

平行于激光入射方向,靶中心置于靶室基准位。A1 束组三倍频激光集束打靶,8 路激光束焦点位于靶前端的注入孔中心入射,3 ns 方波主脉冲,1.5 kJ/束。8 束能量平衡度好于 10%,打靶精度好于 80  $\mu\text{m}$ 。注入孔成像设备轴线与靶轴线夹角 30°,从注入孔成像设备方向观察靶图像及 FLASH 仿真得到 0 ~ 3 ns 靶内部辐射场分布时间积分结果如图 6 所示。右图表示靶内辐射强度分布,可以看出,辐射强度从腔底到腔口逐渐减弱,距注入孔最近区域信号强度最弱,椭圆表示注入孔。为获取黑腔内部物理信息,需要成像设备瞄准注入孔位置。根据仿真结果得到的信号强弱可合理选择成像光路中滤片的配置。



(a)激光波形参数



(b)激光注入靶模型

(c)辐射场分布仿真模型

图 6 实验参数与模型

Fig. 6 Experimental parameters and models

#### 3.2 光路仿真

实验中靶的注入孔经针孔放大,经过滤片衰减,再经平面镜反射后,得到 CCD 上记录的注入孔图像。为研究成像设备对信号的作用,先不考虑输入信号强度分布,假设物面内各点光强度均匀分布,光源取视场内圆形平面,下面镜子镀 Cr/C,上面镜子镀 W/Si,光路折转后,光路①为上图像选低能,光路②为下图像选高能。上方的成像光斑为光路①Cr/C 镜选低能的效果,下方的成像光斑为光路②W/Si 镜选高能的效果。光路①为低能通道加 30  $\mu\text{mBe}$ ,光路②为高能通道加 40  $\mu\text{mAl}$ ,Be 和 Al 的衰减曲线

分别如图 7 所示。

分别对 2500 eV 光源和 5500 eV 光源成像, 仿真成像结果如图 8 图 9 所示。入射光为 2500 eV 时, 光路①占主导, 入射光为 5500 eV 时, 光路②占主导。成像效果与反射率曲线所反应的选能效果一致。图像中间部分由于入射角为 1.5°, 多层镜选能效果最好。

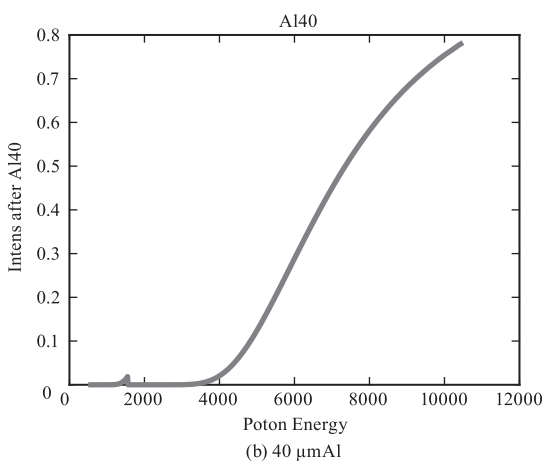
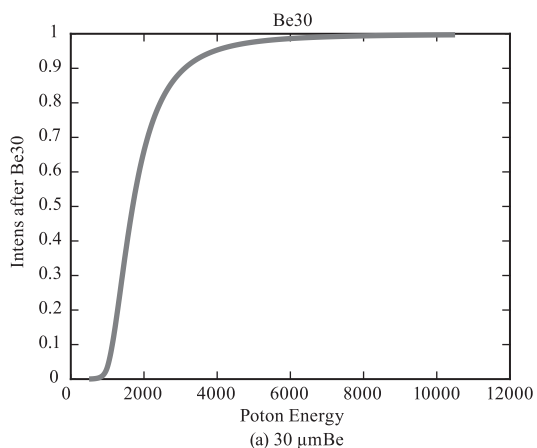


图 7 滤片的透过率曲线

Fig. 7 Transmittance curves of filters

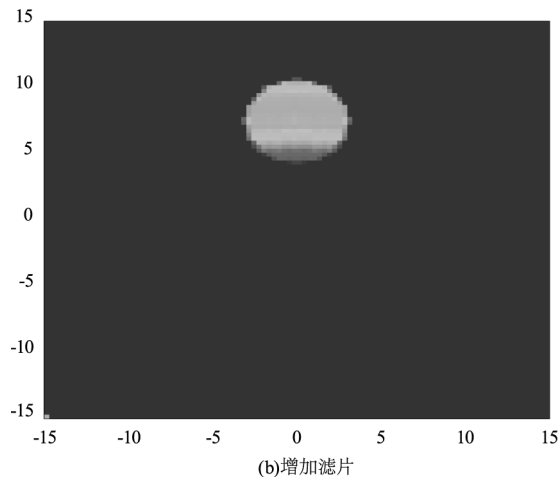
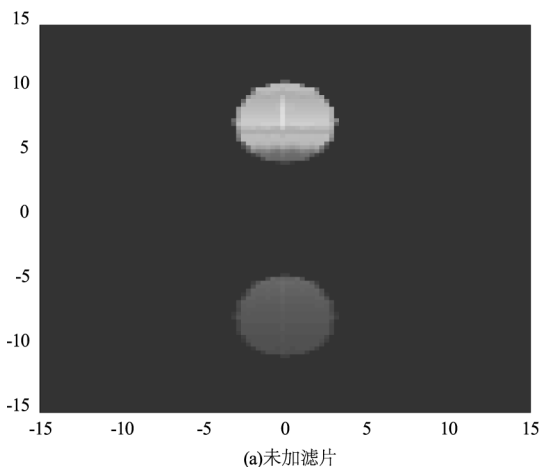


图 8 2500 eV 光源考虑镜子选能作用仿真结果

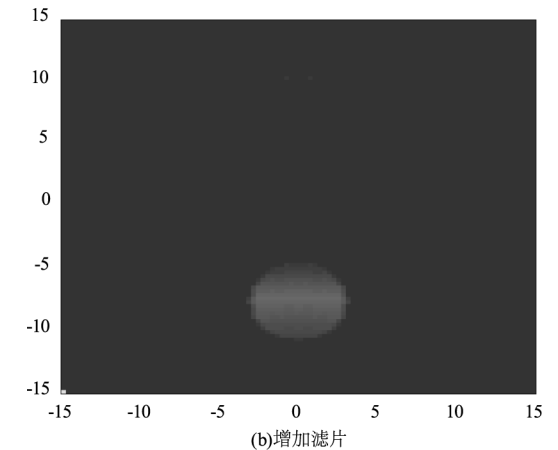
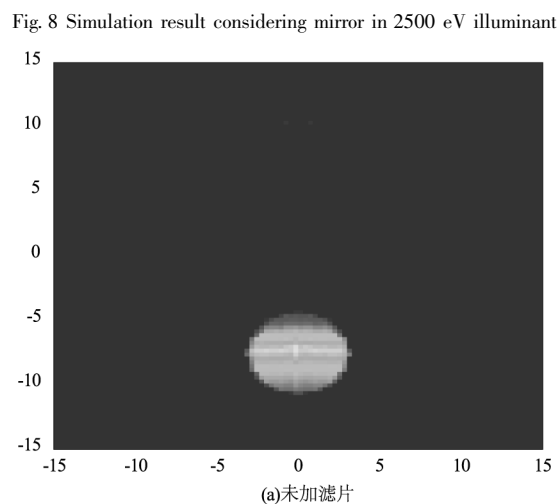


图 9 5500 eV 光源考虑镜子选能作用仿真结果

Fig. 9 Simulation result considering mirror in 5500 eV illuminant

假设入射光线发射能量在 2000 eV ~ 3000 eV, 此时光路①占主导, 谱分布如图 10 中带星号曲线所示。对比考虑能谱分布与不考虑能谱分布的成像差异(如图 11 所示)。可以看出, 考虑谱分布后所关注区域的信号强度增加, 在入射角为 1.5° 时具有较

好的选能效果,可以更好地得到关注能段的成像效果。

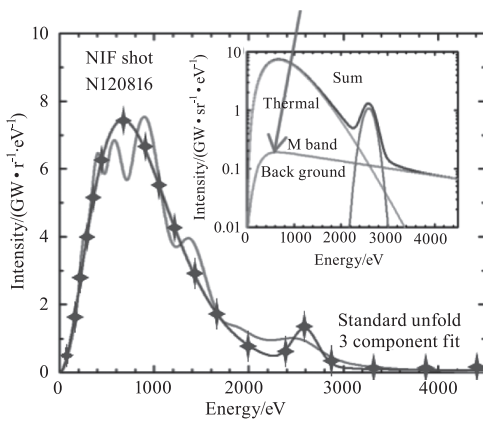


图 10 光源能谱分布曲线

Fig. 10 Energy spectrum distribution curve of light source

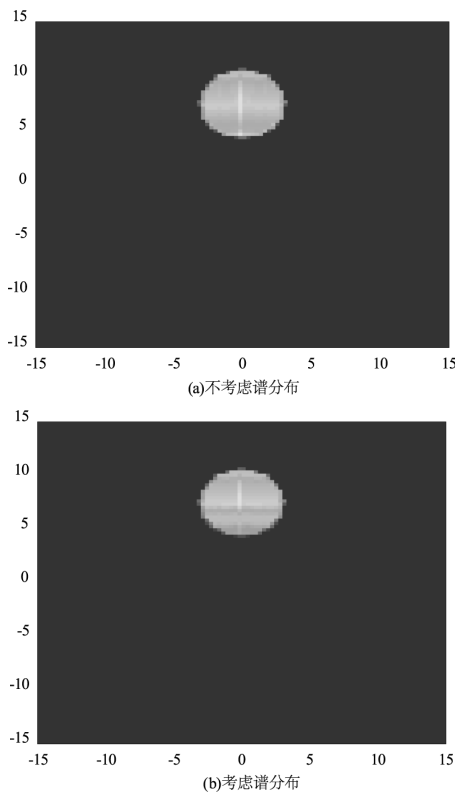


图 11 入射光线发射能量在 2 ~ 3 keV 时成像结果

Fig. 11 Simulation result considering mirror, filter in 2000 ~ 3000 keV illuminant

### 3.3 实验结果及分析

根据图 6 右图已计算出的辐射场强度分布结果,考虑靶内部各位置能谱分布均按照图 10 曲线分布,此时光路①占主导,进行针孔成像仿真。采用本文注入孔成像设备,可分别测得两个能段的双通道

图像,其中,光路①2 ~ 3 keV 的仿真结果与试验结果如图 12 所示,光路②得到的高能信号形成原因为复杂,此处不作分析。可得图示 X 方向的强度分布如图 13 所示。可以看出模拟结果与试验结果基本一致。验证了仿真方法的可靠性,并可以得到注入孔图像沿 X 方向强度分布差异主要由辐射强度沿腔壁位置分布引起,Y 方向强度分布差异主要由多层镜及能谱分布引起。

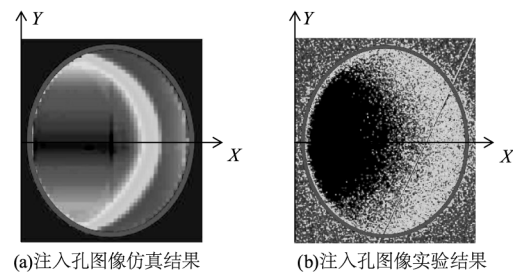


图 12 激光注入孔图像

Fig. 12 Images of laser entrance hole

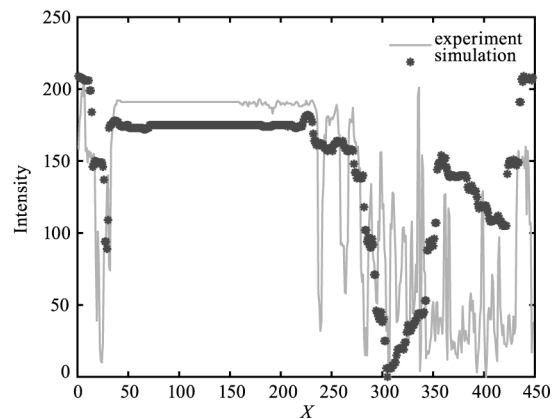


图 13 X 方向强度分布仿真计算与试验结果比较

Fig. 13 Compare the intensity distribution results in X direction of simulation result and experimental result

为进一步获取靠近腔底部辐射强度分布,改变腔长度为 3 mm ;更改材料为玻璃,腔长仍为 5 mm。分别进行实验,打靶测得 X 光信号分布图像如图 14 所示。根据实验结果,当腔长改为 3 mm 时,低能通道可以明显看出激光注入到腔底部的信号和腔壁的再辐射信号;当材料为玻璃时,高能通道可以看到透过玻璃的再辐射信号,且高能通道信号更强。

根据想要监测的对象与使用环境对成像设备的结构和光路进行设计,根据以上仿真结果可以对实验结果进行预判,指导成像光路的设计,包括滤片的



配置,像面尺寸等。根据所研制设备测得的实验结果可以验证仿真方法的准确性,设备设计的合理性,同时加深对物理现象的认识。

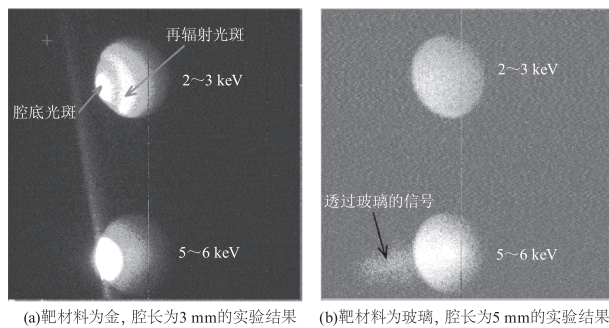


图 14 改变实验条件测得的结果

Fig. 14 The experimental results obtained by changing experimental conditions

#### 4 结 论

本文中,采用研制的双通道成像设备测得了集束实验中注入孔图像,并采用设备光路模拟与FLASH数值模拟相结合的方法计算了低能通道的数值结果,与试验获取结果基本一致。加深了对注入孔图像的理解,可以得到:竖直方向注入孔图像的信号强度分布主要与多层镜入射角度有关,水平方向注入孔图像的信号强度分布主要与辐射强度分布有关。根据改变腔长得到的实验结果,可以看出激光射入腔底部,会在腔壁产生较强的再辐射光斑,改变材料为玻璃时,会产生较强的高能信号。

研制的设备成功完成了此轮集束实验的所有发次注入孔X光图像的测量。后面将进一步完善仿真工作,建立对不同实验条件下实验结果的仿真能力。

#### 致谢:

感谢激光聚变研究中心集束实验团队的指导和帮助。

#### 参考文献:

[1] Chen Hui, Marc Vandenboomgaerde. Advances in mapping of X-ray emission from NIF hohlraums[J]. High Energy Density Physics, 2020, 36: 100793.

[2] Landen O L, Farley D R, Glendinning S G, et al. X-ray backlighting for the national Ignition facility (invited) [J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(1): 627 - 634.

[3] MD Landon, Koch J A, Alvarez S S, et al. Design of the national ignition facility static X-ray imager[J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(1): 698 - 700.

[4] Smalyuk V A, Yaakobi B, Delettrez J A, et al. Compressed-shell integrity measurements in spherical implosion experiments [J]. Physics of Plasmas, 2001, 8(6): 2872 - 2882.

[5] Schneider M B, Jones O S, Meezan N B, et al. Images of the laser entrance hole from the static x-ray imager at NIF [J]. The Review of scientific instruments, 2010, 81(10): 10E538.

[6] MD Landon, Koch J A, Alvarez S S, et al. Design of the national ignition facility static x-ray imager[J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(1): 698 - 700.

[7] Nagayama T, Mancini R C, Mayes D, et al. An important criterion for reliable multi-monochromatic x-ray imager diagnostics and its impact on the reconstructed images [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2015, (3): 59 - 65.

[8] Schneider M B, Meezan N B. Soft x-ray images of the laser entrance hole of NIC hohlraums (paper, HTPD2012) [J]. The Review of Scientific Instruments, 2012, 83(10): 10E525.

[9] Hou Lifei, Wei Minxi, Yuan Yongteng, et al. Development of X-ray pinhole camera on Shenguang II-up equipment [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25: 2313 - 2316. (in Chinese)

侯立飞, 韦敏习, 等. 神光升级装置 X 光针孔相机研制 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25: 2313 - 2316.

[10] Jiang Shaoen, Yu Yanning, et al. X-ray pinhole camera used on Shenguang II facility [J]. Science technology and engineering, 2005; 2005, 56227: 1713 - 1716. (in Chinese)

江少恩, 于燕宁等. 用于神光激光装置的 X 光针孔相机 [J]. 科学技术与工程, 2005; 2005, 56227: 1713 - 1716.

- [11] Wen Shuhuai, Ding Yongkun, et al. Laser inertial confinement fusion diagnostics [M]. National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)  
温树槐, 丁永坤, 等. 激光惯性约束聚变诊断学 [M]. 国防工业出版社, 2012.
- [12] Yang Pin, Yang Zhenghua, et al. Design and development of a static X-ray imaging system used on SG-III laser facility [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25:11. (in Chinese)  
杨品, 杨正华, 等. 神光装置 X 光静态成像系统研制 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25:11.
- [13] Chen Hui, N. Palmer, M. Dayton, etc, A high-speed two-frame, 1 – 2ns gated X-ray CMOS imager used as a hohlraum diagnostic on the National Ignition Facility (invited) [J]. Rev. Sci. Instrum, 2016, 87:11E203.
- [14] Zhang Wenhai, Liu Shenye, Shang Wanli, etc. The design and application of pinhole camera used in Shenguang III prototype [J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2012, 32(9):1027 – 1029. (in Chinese)  
张文海, 刘慎业, 尚万里, 等. 神光 III 原型针孔相机的研制与应用 [J]. 核电子学与探测技术, 2012, 32(9):1027 – 1029.
- [15] Chen Hui, Nathan Palmer, et al. Advancing the capability of the gated laser-intrance-hole imager on the national ignition facility [J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89:10G103.