

# 射线半影编码孔点扩散函数锐度展宽模拟评估

吴岳雷<sup>1</sup>, 郑向阳<sup>1,2</sup>, 张博平<sup>1</sup>, 胡华四<sup>1,\*</sup>

(1. 西安交通大学 核科学与技术学院, 陕西 西安 710049; 2. 国家环境保护部 核与辐射安全中心, 北京 100088)

**摘要:** 阐述了射线半影编码成像系统点扩散函数锐度展宽与一般系统点扩散函数半高宽的区别与联系, 确立了半影编码成像系统锐度展宽概念, 建立了半影编码孔成像系统蒙特卡罗模型。计算获得了 0.662、1.25、2.45、5.0、10.0、14.06 MeV 等一系列能量点的  $\gamma$  射线与中子在半影编码成像系统点扩散函数, 并按照定义算出  $\gamma$  射线与中子各能量系统点扩散函数的锐度展宽; 得到  $\gamma$  射线和中子能量与半影编码成像系统锐度展宽函数关系, 分析了半影编码成像系统点扩散函数锐度展宽的原因, 为今后编码孔设计的改进提供理论依据。

**关键词:** 中子半影成像; 编码孔; 锐度展宽; 点扩散函数

中图分类号: TN25; TP751

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2010)04-0508-05

## Evaluation by Simulation to Point Spread Function of Emission Penumbral Imaging Encoding Pinhole

WU Yue-lei<sup>1</sup>, ZHENG Xiang-yang<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo-ping<sup>1</sup>, HU Hua-si<sup>1,\*</sup>

(1. School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Nuclear and Radiation Safety Centre, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Beijing 100088, China)

**Abstract:** The differences and relations between sharpness broadening of penumbral imaging system and full width at half maximum (FWHM) of general system's point spread function (PSF) were illuminated and the concept of sharpness broadening of penumbral imaging system was determined. The penumbral encoding pinhole imaging system Monte-Carlo model was built; the system PSFs of  $\gamma$  ray and neutrons in energy of 0.662, 1.25, 2.45, 5.0, 10.0, 14.06 MeV and so on were calculated respectively. The function of the PSFs sharpness broadenings vs  $\gamma$  ray and neutron energy was obtained and the broadening reasons of the system sharpness were analyzed in detail, the theoretical reference was presented for the future design improvement of encoding pinhole.

**Key words:** neutron penumbral imaging; encoding pinhole; sharpness broadening; point spread function

收稿日期: 2009-05-25; 修回日期: 2009-07-06

基金项目: 国家自然科学基金与中国工程物理研究院联合基金资助项目(10576022)

作者简介: 吴岳雷(1972—), 男, 河北石家庄人, 博士研究生, 核科学与技术专业

\* 通信作者: 胡华四, E-mail: huasi\_hu@mail.xjtu.edu.cn

在惯性约束聚变(ICF)实验中,通过探测氦氖靶丸发生热核聚变放出的射线和粒子,获得聚变热核内部信息。美国、日本、欧洲相关科研单位自20世纪70、80年代至今,尝试了各种探测手段和方法<sup>[1-6]</sup>。微型激光 ICF 实验聚变源规模尺寸小,出射的粒子与射线产额低,为探测内部热核反应的情况,人们增大了准直器孔径,使其大于目标聚变源区尺度,随之小孔成像也就变成了半影成像,小孔也变成了半影编码孔<sup>[7-9]</sup>。半影编码孔提高了成像射线与粒子的孔径穿透率,但半影像是编码图像,需要大量的数据解码运算。近些年随着计算机技术的高速发展,快捷出色的数据处理能力使得聚变核反应辐射成像成为可能。由此,半影编码成像技术也成为微型激光惯性约束 DT 聚变核反应诊断的必要手段之一<sup>[10-12]</sup>。

一般成像系统对源区空间分辨率主要由准直孔与辐射探头两部分决定。通常准直孔径尺寸小,系统空间分辨率好,但视野小;准直孔径大,视野大,但系统空间分辨率低。相比目标源区尺寸,用于小孔成像的准直孔尺寸非常小,针孔的孔径展宽对整个系统空间分辨率恶化贡献非常小,其成像射线一般是低能的光子,穿透力弱,准直孔边缘效应可忽略不计,因此,小孔成像的源空间分辨率主要由闪烁晶体厚度弥散传输造成<sup>[13]</sup>。相比小孔成像,半影孔成像的目标源区实际尺寸非常小,半影成像的孔径只是相对比目标源区尺寸大,但其实际的尺寸非常小(亚mm量级)。设计孔厚一般为2~3个射线自由程,约为6~7 cm(MeV量级的中子在钨材料中自由程约为3.4 cm),而孔径是 $\mu\text{m}$ 量级,因此,实际半影孔径的准直比可达 $10^2$ 左右。同时,半影成像系统的物距(半影孔到目标源区的距离)为cm量级,因此,半影孔径对目标源区张角的弧度(孔径/物距)也非常小。成像中子如此高的准直度可近似为平行于闪烁光纤中轴,因此,闪烁光纤阵列中光纤之间串扰对系统点扩散函数的锐度展宽可不予考虑。成像的高能射线与粒子对成像孔径的边缘展宽对系统空间分辨的恶化贡献占据主导因素。因此,研究成像射线对编码孔孔径展宽性质具有实质意义。

## 1 半影点扩散函数锐度展宽定义

半影编码成像系统成像对象一般是高能粒子

(中子)和射线( $\gamma$ ),其穿透力非常强,准直孔(半影编码孔)边缘效应亦非常强,边缘效应对系统点扩散函数锐度展宽贡献较大,因此,半影成像系统中准直孔的边缘效应成为系统对源区空间分辨好坏的决定因素。锐度展宽为半影成像系统获得点源投影斑除去中间坪区而形成伪点扩散函数的半高宽,如图1所示。图1a、b、c和图1a'、b'、c'表明了系统点扩散函数一般意义上的半高宽与锐度展宽概念的区别与联系。半影成像系统的锐度展宽是反映系统空间分辨率的重要指标,是决定系统空间分辨率的关键硬件参数。

半影成像系统锐度展宽主要取决于系统编码孔(半影孔)对强成像射线的边缘效应,故锐度展宽也成为考核编码孔优劣的关键指标之一。系统的空间分辨率是衡量成像系统成像质量的重要指标,理想状态下系统空间分辨率为几何光学分辨率,系统对源区分辨率为:

$$\Delta S = 2\delta_{\text{pix}}/M \quad (1)$$

其中: $\delta_{\text{pix}}$ 为闪烁光纤阵列单根光纤的半径; $M$ 为系统几何放大倍数。

成像实验中,理想系统几何光学源区空间分辨须接受许多不利因素的贡献与修正,理论上可考虑到的因素有:图像处理傅里叶变换过程、半影孔径大小、事件反冲质子在闪烁光纤中反冲路程、事件中子统计涨落、机械准直、部件组装及各部件制作过程中的机械误差,系统的源区空间分辨率修正公式为:

$$\Delta S = \left[ \frac{1}{K_c^2} + \delta_{\text{ap}}^2 + \delta_{\text{coll}}^2 + \delta_{\text{mech}}^2 + \delta_{\text{stat}}^2 + \left( \frac{\delta_{\text{rec}}}{M} \right)^2 + \left( \frac{2\delta_{\text{pix}}}{M} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

其中: $K_c$ 为傅里叶变换频域中空间截止频率; $\delta_{\text{ap}}$ 为半影针孔的点扩散函数边缘延展半高宽(锐度展宽); $\delta_{\text{coll}}$ 为各部件装配和光路准直带来的误差; $\delta_{\text{mech}}$ 为综合机械误差(孔径内表面、光纤阵列迎光面的平整度,光纤不均匀性等); $\delta_{\text{stat}}$ 为统计涨落造成的误差; $\delta_{\text{rec}}$ 为事件反冲质子在闪烁光纤中反冲路程在光轴垂直方向上的投影。

实际上,成像系统对源区空间分辨可近似地认为受式(2)中 $\delta_{\text{ap}}$ 与 $\delta_{\text{pix}}$ 的制约。理论上可看出,阵列单根半径越小,系统放大倍数越大,整个系统的空间分辨率就越好,但实际设计中两者均受系统其他参数的制约, $M$ 与 $\delta_{\text{pix}}$ 均存在优化问题,我们今后将作进一步的深入研究。

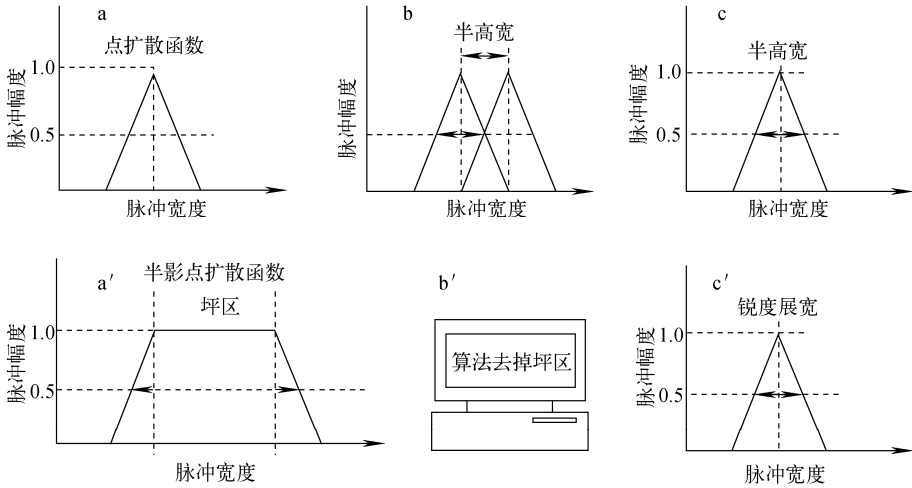


图1 半影成像点扩散函数锐度展宽定义示意图

Fig. 1 Diagram of penumbral point spread function sharpness broadening definition

## 2 系统蒙特卡罗模型的建立

半影成像系统如图2所示,主要包括:等待诊断探测的DT聚变源、半影针孔、闪烁光纤阵列、图像光电数字转化装置(CCD)、用于数字重建计算的并行计算机工作站及相关数据处理和显像软件。源、半影孔径、闪烁光纤阵列为主要成像元件,其中,半影编码孔是关键部分,也是技术瓶颈,使得半影成像诊断技术难以取得实质进展与重大突破<sup>[14-15]</sup>。

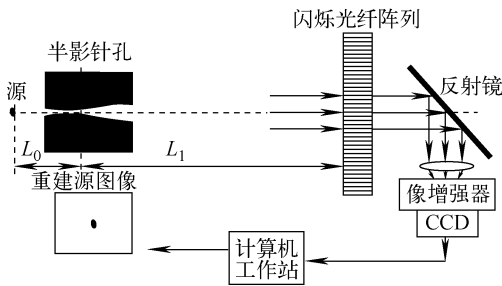


图2 射线半影成像系统示意图

Fig. 2 System sketch of radiation penumbral imaging

本工作采用MCNP模拟软件,依据本单位实际设计的激光质量聚变半影成像诊断系统装置各部件的位置分布和其材料构成,选定关键部分,建立如图3所示的系统模型。系统简化为源区、半影孔径、闪烁光纤阵列3大部分,半影编码孔的内径为两段钨锥孔,钨孔厚6 cm,闪烁光纤阵列为 $100 \times 100$ 根直径 $500 \mu\text{m}$  BCF-10闪烁光纤阵列,其余空间为空气。

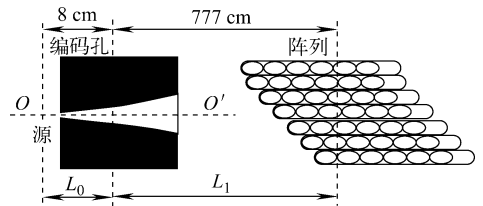


图3 半影成像系统模型示意图

Fig. 3 System model sketch of penumbral imaging

## 3 半影编码孔径展宽的评估

对半影编码孔评估需考核多种参数,如机械精度、准直度等,这里仅对编码孔(半影孔)的成像能力进行考核与论述。锐度展宽是考核编码钨孔成像能力的重要指标参数,按照定义,系统锐度展宽越大(越钝挫),系统成像能力越差,锐度展宽造成的系统空间分辨恶化是任何重建软件不可挽回的。系统点扩散函数越锋利,锐度展宽越小,即点扩散函数边缘越陡峭,系统成像能力越强。优良的重建算法可使系统源区分辨无限接近理想状态下系统几何光学分辨率,如式(2),从而抵消系统点扩散函数的锐度展宽对源区分辨的恶化。半影编码成像系统点扩散函数的锐度展宽受多种因素影响,MCNP模拟计算综合包含了系统各不利因素的诸多贡献(统计误差和孔壁材料的散射作用),由此求得的系统点扩散函数锐度展宽是可靠的,能真实反映半影系统的空间分辨的优劣<sup>[16]</sup>。

运用MCNP并行版模拟,在西安交通大学核科学与技术学院并行工作站进行运算,耗费

约 80 个机时。每次运算抽样 10 亿次,接近实际产额,运算结果相对误差小于 2%。

通常当成像系统设计完善后,系统对目标源区空间分辨是固定不变的。但半影编码成像系统用于高能射线与粒子的成像,系统的源区分辨随着成像射线与粒子能量变化而变化(图 4、5)。成像射线与粒子能量越高、穿透力越强,编码孔边缘效应越明显,系统的源区分辨越差。此外,编码孔构成材料的物质核素对成像射线与粒子的散射作用截面也是影响边缘效应的重要因素,散射作用截面与系统锐度展宽成负相关,作用截面越大,锐度展宽越少,散射作用截面越小,锐度越钝挫,因此,在选择编码孔材料时应尽量采用散射作用截面大的核素材料。

由于编码孔具有等晕性,系统点扩散函数左右对称,图 4a 为  $\gamma$  各能量系统点扩散函数右半部分,由图 4a 可知,系统纯光学编码孔边缘效应最小,系统点扩散函数近似为方波,系统点扩散函数锐度最锐利,系统光学源区分辨为光纤直径与成像系统放大倍数的比值,这里设计约为  $5 \mu\text{m}$ 。由于准直孔孔壁的隔挡,点源出射的低

能光子经编码孔仅能够投射第 48 根光纤 80% 的面积,因此,第 48 根光纤光通量未灌满,略低于坪区。随着  $\gamma$  能量的增加,点扩散函数尾部逐渐上翘,系统点扩散函数的锐度也随之变钝挫,这是由于随着  $\gamma$  能量的增加,钨元素的散射截面减小,孔壁边缘效应变大,当  $\gamma$  能量升至为 5 MeV 左右时,系统锐度展宽达到顶点。之后,随着  $\gamma$  能量增大,钨元素对  $\gamma$  散射作用截面增大,孔壁边缘效应减小,系统锐度展宽随之变小。

图 5b 为中子各能量所对应的点扩散函数以及中子各能量所对应系统锐度展宽图,原理同图 4。中子是基本粒子,高能中子穿透力较  $\gamma$  射线更强,孔壁边缘效应也更为明显,其运输也更为复杂,两者各能量点所对应的系统锐度展宽的比较如图 6 所示。

由图 6 可知,成像射线的种类不同,系统锐度展宽也不同。钨元素对相同能量下的中子散射作用截面比对  $\gamma$  射线散射作用截面小许多,因此,中子的孔壁边缘效应比  $\gamma$  射线高,中子的系统锐度展宽随能量的升高虽有波动,但相比于  $\gamma$  射线,其系统锐度展宽高出很多,这给系统编

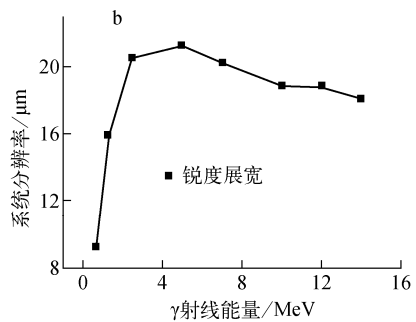
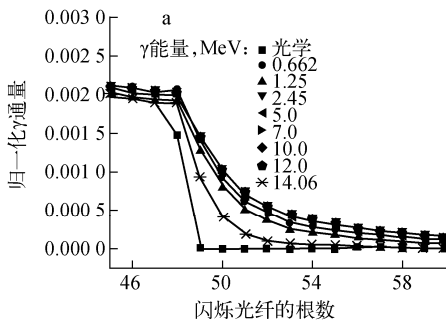


图 4 半影系统对  $\gamma$  射线各能量点扩散函数(a)及各能量点所对应的锐度展宽(b)

Fig. 4 Point spread function vs  $\gamma$  rays energy (a) and sharpness broadening vs energy (b)

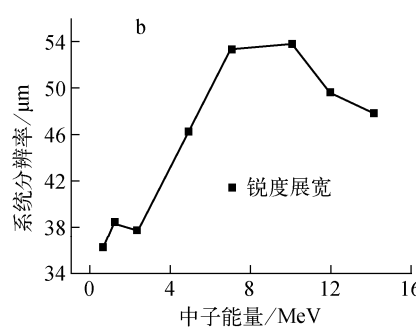
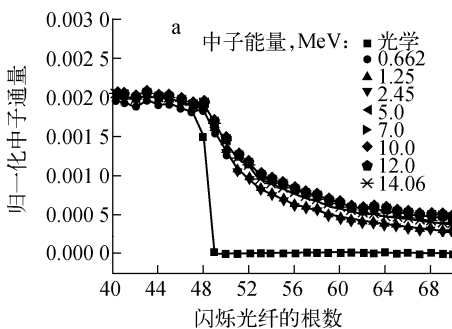


图 5 半影系统对中子各能量点扩散函数(a)及各能量点所对应的锐度展宽(b)

Fig. 5 Point spread function vs neutrons energy (a) and sharpness vs energy (b)

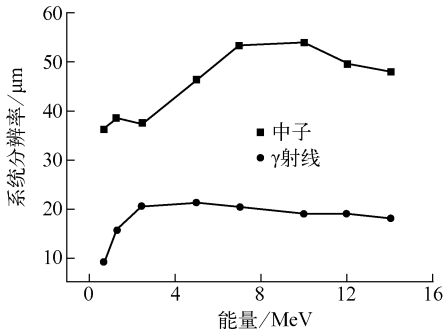


图6  $\gamma$ 射线与中子锐度展宽比较

Fig.6 Comparison between  $\gamma$  rays and neutron sharpness broadening

码孔设计带来较大困难。今后所有编码孔设计工作均是为抑制高能中子造成的锐度恶化,与其他系统指标综合考虑予以折衷优化。

#### 4 结论

本工作建立了射线半影成像系统的蒙特卡罗模型;获得了不同能量下 $\gamma$ 射线与中子的系统点扩散函数及其锐度展宽;得到射线和粒子能量与其锐度展宽函数关系,证明了高能中子与 $\gamma$ 射线对成像孔径的边缘展宽(即点扩散函数及锐度展宽)对系统空间分辨的恶化具有主导因素。为中子半影编码孔的设计与改进提供了理论依据。今后我们将进一步优化系统编码孔构成材料与内径形状以及厚度等参数,增大系统空间分辨设计的冗余。

#### 参考文献:

[1] NUGENT K A, LUTHER D B. Penumbra imaging of high energy X-rays from laser-produced plasmas [J]. Opt Commun, 1984, 49: 393-401.

[2] RESS D, LERCHE R A, EILL R J, et al. Neutron imaging of laser-fusion targets[J]. Science, 1988, 241: 956-960.

[3] MOSINSKI G, ROY B. Diagnostic development at LLNL for national ignition facility, 79/DR 83 [R]. Livermore; [s. n.], 1983.

[4] SOMMARGREN G E, LERCHE R A. Neutron imaging of ICF target plasmas, CA, UCID-19317 [R]. Livermore; [s. n.], 1988.

[5] DISDIER L, ROUYER A, FEDOTOFF A, et al. Neutron imaging of ICF target plasmas invited[J]. Rev Sci Instrum, 2003, 74(3):1 832-1 836.

[6] DISDIER L, LERCHE R A, BOURGADE J L. Capillary detector with deuterated scintillator for inertial confinement fusion neutron images [J]. Rev Sci Instrum, 2004, 75: 2 134-2 139.

[7] NUGENT K A. Coded imaging of thermonuclear neutron[J]. Rev Sci Instrum, 1988, 59(8): 1 658-1 659.

[8] ROUYER A. A new simple method for decoding penumbra image: The filtered autocorrelation[J]. Rev Sci Instrum, 2003, 74(3): 1 234-1 236.

[9] DISDIER L, ROUYER A, WILSON D C, et al. High-resolution neutron imaging of laser imploded DT targets[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res A, 2002, 489(123): 496-502.

[10] 陈法新,杨建伦,温树槐. ICF中子针孔成像数值模拟研究[J]. 强激光与粒子束,2005,17(6):883-887. CHEN Faxin, YANG Jianlun, WEN Shuhuai. ICF neutron pinhole imaging numerical simulation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(6): 883-887(in Chinese).

[11] 刘东剑,唐旭环,赵宗清,等. 中子半影成像图像反演方法研究[J]. 强激光与粒子束,2006,18(7):1 199-1 202. LIU Dongjian, TANG Xuhuan, ZHAO Zongqing, et al. Neutron imaging penumbral image inversion method[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(7): 1 199-1 202 (in Chinese).

[12] 陈法新,郑坚,杨建伦. 中子厚针孔成像数值模拟研究[J]. 物理学报,2006,55(11):5 947-5 952. CHEN Faxin, ZHENG Jian, YANG Jianlun. Thick neutron pinhole imaging numerical simulation[J]. Acta Phys Sin, 2006, 55(11): 5 947-5 952(in Chinese).

[13] RESS D. Design of thick apertures for high-resolution neutron penumbral imaging [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1996, 37(2): 155-160.

[14] WU Yuele. Crosstalk and time response of a plastic scintillation optical fibers array for neutron imaging[C]//Proceedings of the 16th International Conference on Nuclear Engineering. Orlando: ASME, 2008: 256-260.

[15] HU Huasi, WANG Qunshu, JUAN Qin, et al. Study on composite material for shielding mixed neutron and  $\gamma$ -rays [J]. IEEE Transactions On Nuclear Science, 2008, 55(4): 2 376-2 384.

[16] GEOFF G, IAIN M. Reconstruction of X-ray sources from penumbral images[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1979, 11: 227-241.