

基于小型加速器的编码中子源成像研究*

王胜 邹宇斌[†] 温伟伟 李航 刘树全 王泚 陆元荣[‡] 唐国有 郭之虞

(北京大学, 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

(2012年11月26日收到; 2013年1月9日收到修改稿)

编码中子源成像可以在对中子注量率影响不大的情况下大大提高成像的准直比, 从而提高成像质量. 北京大学开展了基于小型加速器的编码中子源成像技术研究工作. 不同于已有的基于反应堆的小面积编码板的研究工作, 北京大学建立了基于小型加速器的大面积编码板的编码中子源成像实验平台, 并对加速器中子源上的实验方法和数据处理进行了探索, 对比了重建算法, 获得了初步的重建照片. 研究工作表明, 编码中子源成像技术可用于加速器中子源, 但重建图像质量仍须提高.

关键词: 加速器中子源, 中子成像, 编码源成像, 图像重建

PACS: 28.20.Pr, 29.25.Dz, 42.30.Wb

DOI: 10.7498/aps.62.122801

1 引言

中子成像作为无损探测的重要方法之一, 在国内外的研究和应用中越来越受到重视. 相对于 X 射线, 中子对低原子序数元素更加敏感, 中子成像在富含有机物的新材料检测等方面有着更大的优势. 常规中子成像的成像效果主要取决于两个方面: 一是中子注量, 中子的注量越高, 图像的信噪比越好; 二是中子束的准直比, 即中子源到成像面的距离 L 和中子源发射面的大小 D 的比值 (L/D), L/D 越大, 其成像的分辨率越好. 但是对于产额较低的中子源而言, 由于中子注量率按距离平方反比衰减, 不能以过度提高 L 的方式来提高成像分辨率, 因为那样会大大增加成像的时间. 为了提高中子的利用效率和成像系统的分辨率, 近年来国际上多个实验室开始研究编码中子源成像技术. 编码中子源成像将中子发射面拆分为多个孤立的小面积中子源, 这样既提高了成像准直比, 同时又不会过多地减少中子发射的总面积, 其示意图见图 1.

国际上已有的研究工作主要集中在模拟计算和基于反应堆中子源的成像实验, 对图像的重建主要使用了维纳滤波反卷积算法和最大似然法

迭代两种^[1-7]. 2005 年, 德国慕尼黑工业大学的 Grunauer^[2] 采用随机阵列和非冗余阵列 (NRA) 编码板进行了编码中子成像的 MCNP 模拟, 证明了编码中子源成像可以改善重建图像的质量, Grunauer 于 2006 年在 FRM-II 反应堆上成功进行了编码中子源成像实验, 实验表明编码中子源成像的重建图像质量远好于单小孔成像结果. 2006 年, MIT 的 Damato 等^[3] 总结了编码源成像的基本公式, 并于 2007 年提出了在 MIT 的反应堆上进行编码中子源相衬成像的想法. 2009 年, 美国北卡罗琳娜大学开始在反应堆上开展编码中子源成像的模拟和实验研究工作^[4]. 从 2009 年开始, 北京大学和清华大学分别针对基于加速器的小型中子成像装置进行了初步的编码中子源成像的模拟计算工作^[1,5,6]. 2009 年北京邹宇斌等^[7] 在 FRM-II 反应堆上进行了小尺寸编码板的编码中子源成像实验, 由于反应堆中子引出孔道限制, 使用的编码板尺寸较小, 带来的中子注量率的增益不显著, 使得成像效果比单孔成像优势不明显. 到目前为止, 在加速器中子源上还没有编码中子源成像的实验研究报道.

与基于反应堆的编码中子源成像^[2-4,7] 不同, 基于小型加速器的编码中子源成像具有产额相对

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB833106) 和北京大学仪器设备基金资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: zouyubin@pku.edu.cn

[‡] 通讯作者. E-mail: yrlu@pku.edu.cn

低、束流能谱复杂、本底信号相对较强等困难;但同时,基于加速器的编码中子源成像可以对引出结构进行灵活调整,能够允许使用较大面积的编码板从而获得更大的中子注量率增益.本工作对编码中子源成像的物理模型进行了研究,并在北京大学的中子成像装置 PKUNIFTY (Peking University Neutron Imaging Facility)^[8] 上首次进行了基于加速器的编码中子源成像实验研究.

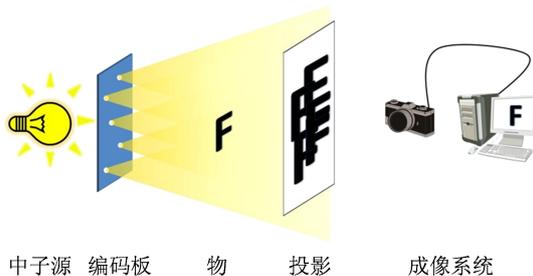


图1 编码中子源成像示意图

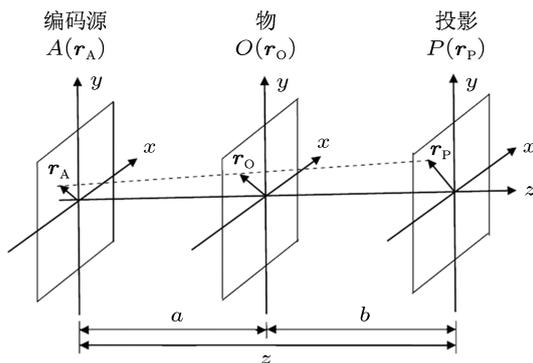


图2 编码中子源成像的物理模型

2 物理原理

编码中子源成像的物理模型^[1-3]如图2所示.源在编码板处被分割为多个小面积的点源并编码,每个点源照射物体后在投影平面上形成投影.

投影在探测器平面的分布函数满足公式

$$P(\mathbf{r}_p) = \iint A(\mathbf{r}_A) O(\mathbf{r}_O) \frac{1}{4\pi z^2} \cos^3(\theta) d^2 \mathbf{r}_A, \quad (1)$$

其中 \mathbf{r}_p , \mathbf{r}_A 和 \mathbf{r}_O 表示在探测器、编码板和物平面上的位置矢量, $P(\mathbf{r}_p)$, $A(\mathbf{r}_A)$ 和 $O(\mathbf{r}_O)$ 表示在探测器、编码板和物平面上的中子分布函数,有关系

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{|\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_A|}{z} \right),$$

$$\mathbf{r}_O = \mathbf{r}_A + \frac{a}{z} (\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_A),$$

如果定义

$$\mathbf{r}'_A = -\frac{b}{a} \mathbf{r}_A,$$

$$A'(\mathbf{r}) = A\left(-\frac{b}{a} \mathbf{r}\right),$$

$$O'(\mathbf{r}) = O\left(-\frac{a}{z} \mathbf{r}\right),$$

可以重写公式为

$$P(\mathbf{r}_p) \propto \iint A\left(-\frac{a}{b} \mathbf{r}'_A\right) O\left(\frac{a}{z} (\mathbf{r}_O - \mathbf{r}'_A)\right) \times \frac{1}{4\pi z^2} \cos^3(\theta) d^2 \mathbf{r}'_A$$

$$= \iint A'(\mathbf{r}'_A) O'(\mathbf{r}_O - \mathbf{r}'_A) \times \frac{1}{4\pi z^2} \cos^3(\theta) d^2 \mathbf{r}'_A, \quad (2)$$

当 \mathbf{r}_p , \mathbf{r}_A 和 \mathbf{r}_O 均远小于 z 时, $\cos \theta$ 可视为常数,那么投影分布可以视为编码板分布和物分布的卷积过程.将分布函数进行离散化,并添加上噪声项,那么投影函数的矩阵形式变为

$$\mathbf{P} = \mathbf{A} \otimes \mathbf{O} + \mathbf{N}. \quad (3)$$

假设码板分布是一个 $p \times p$ 的矩阵,投影分布是一个 $q \times q$ 的矩阵,物的分布是一个 $r \times r$ 的矩阵,考虑边界条件,有关系

$$r = q - p + 1. \quad (4)$$

根据几何结构,我们要求物平面位置满足关系

$$\frac{a}{b} = \frac{d_A}{d_p}, \quad (5)$$

其中 $d_A \times d_A$ 表示编码板像素的几何尺寸, $d_p \times d_p$ 表示投影像素的几何尺寸.若以 d_O 表示物上像素的边长,则

$$d_O = \frac{1}{1/d_A + 1/d_p}. \quad (6)$$

而视场大小 FOV (field of view) 取决于物上像素的数目及像素的边长,有

$$FOV = (d_O \times r) \times (d_O \times r). \quad (7)$$

由于投影是多个点源的投影叠加,因此我们要通过重建算法将物分布矩阵计算出来.常用的重建算法包括反卷积算法和迭代算法.本实验中采用了基于(8)式的带维纳滤波的反卷积算法^[2],和基于(9)式的 Lucy-Richardson 最大似然法迭代算法^[2].

$$O_{\text{wiener}} = R F^{-1} \left\{ \frac{F(P) |F(A)|^2}{F(A) |F(A)|^2 + C_{\text{wiener}}} \right\}, \quad (8)$$

上式中 F 和 F^{-1} 为傅里叶和反傅里叶变换, R 为反射算子.由于 $F(A)$ 有可能有小项存在,导致噪声在解码过程中占优,会引起较大的误差.在分母中添加维纳滤波项可以抑制噪声带来的影响.

$$O_{\text{guess}}^{\text{new}}(x, y) = O_{\text{guess}}^{\text{old}}(x, y)$$

$$\times \frac{P(x,y) \otimes A(-x,-y)}{[A(x,y) \otimes O_{\text{guess}}^{\text{old}}(x,y)] \otimes A(-x,-y)}. \quad (9)$$

迭代算法在计算过程中不仅把物矩阵进行了重现,同时把噪声也进行了重现.

3 实验方法

本工作的编码中子源成像实验研究是在 PKU-NIFTY 上进行的. 该装置基于一台 2 MeV 小型强流 RFQ 加速器, 通过加速氦离子轰击金属铍靶产生中子^[8]. 实验中的氦束平均流强为 0.35 mA, 快中子产额为 $2.6 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$. 快中子经过 4 cm 厚的聚乙烯慢化, 在发射面处的平均热中子注量率为 $4.38 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. 实验平台示意图见图 3.

经聚乙烯慢化层慢化后的热中子被金属钷制成的编码板编码得到编码源. 编码板厚 0.1 mm, 采用 MURA 编码模式, 矩阵大小 61×61 , 栅格大小为 1 mm, 编码为 1 的栅格用激光开直径为 0.8 mm 的通孔.

探测器平面距离编码板平面 2030 mm. 利用转换屏, 暗盒和 CCD 相机组成的像探测系统获取

投影图像. 由于通过 CCD 相机记录的转换屏上的图像是由离散的像素构成的, 源物距和物屏距的比值 ((5) 式中的 a/b) 需要满足特定的比例以使有效的投影像素大小与成像系统像素大小匹配. 成像系统每像素边长为 0.238 mm, 可以选取不同的转换屏上的像素合并数来调节成像位置和视场大小, 即改变有效的投影像素大小 (即 (5) 式中的 d_p). 我们选取了三个有效的投影像素大小 0.952, 0.714 和 0.476 mm, 对应的源物距和物屏距的比值为 1.05 : 1, 1.40 : 1 和 2.10 : 1, 对应的理论物平面分辨率为 0.488, 0.417 和 0.323 mm.

本工作分别对两组混合样品 (见图 4) 进行成像, 样品组 A 包括石墨长条 (厚度 10 mm, 孔直径为 4, 3, 2, 1 和 0.5 mm), 轧箔制作的线对卡和聚乙烯台阶 (各级厚度分别为 2, 4, 6, 8 和 10 mm), 置于开口边长 100 mm 的物光阑中, 选定视场大小为 $107 \text{ mm} \times 107 \text{ mm}$. 样品组 B 表示镅片形状组合, 包括中间有面积为 1 cm^2 圆孔的镅板, 置于铝片上的楔形金属镅条, 以及宽度分别为 2, 1, 0.5 和 0.2 mm 的镅缝和镅条. 样品 B 置于开口边长 55 mm 的物光阑中, 选定视场大小为 $68.3 \text{ mm} \times 68.3 \text{ mm}$.

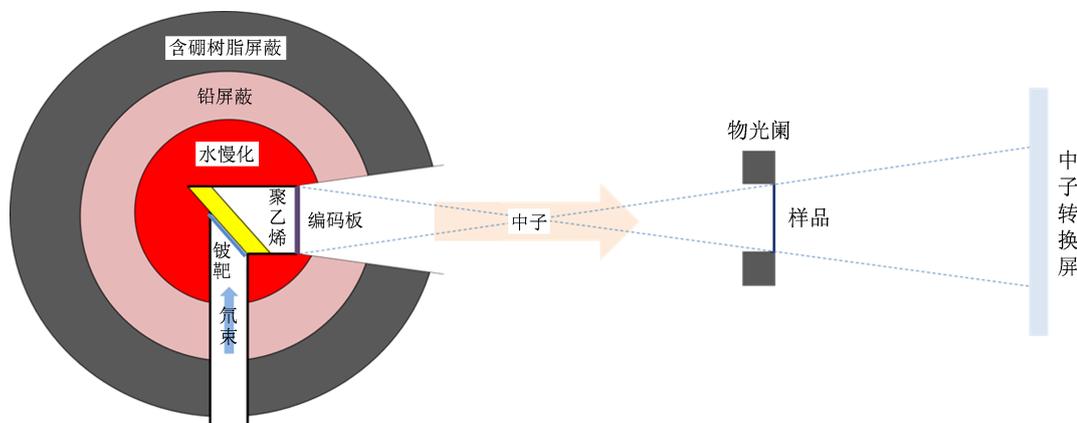


图 3 整个实验装置示意图

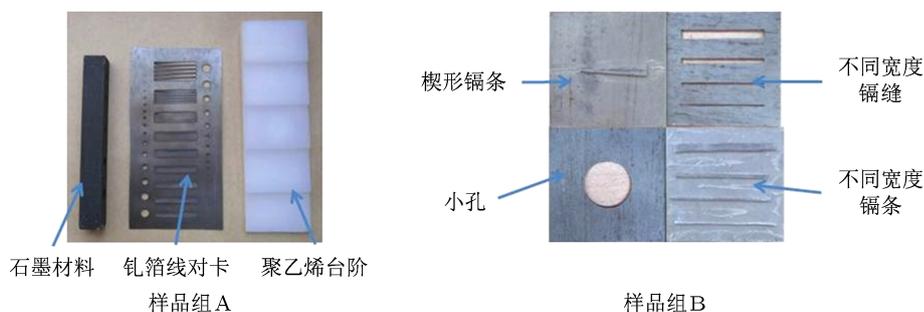


图 4 实验样品

考虑到加速器中子源的中子能谱中有大量的超热及以上中子成分,而我们采用的编码板材料钨箔对超热中子及能量更高的中子几乎是透明的,因此在实验过程中我们需要采集除热中子信号以外的本底信号,包括散射本底和超热及能量更高的中子. 我们通过在编码板处挡 0.5 mm 厚镅片的方法测量本底信号,包括散射本底和镅上中子(指能穿过镅吸收层的能量高于 0.3 eV 的中子),使用挡镅片方法得到的本底信号作为编码源成像中的本底信号.

4 结果与分析

在 $a/b = 2.10$, 转换屏上的积分热中子注量为 $2.85 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ 时,对样品组 B 原始投影进行重建,得到结果如图 5(a) 所示. 由于原始投影实际上是理想投影叠加了本底信号,这些信号会引起较大的重建误差. 反卷积算法对这种近均匀本底会直接在重建图像上反解出一个均匀信号,将对对比度变差,但不会影响整体形貌;而 LR 迭代算法(以下所有结果皆为 400 次迭代)的重建结果就完全不能观察到实际物的形貌,这是由于本底信号部分非编码源成像,LR 迭代算法处理这部分信号会产生很强的伪影,将信号完全淹没. 扣除散射本底和隔上中子后重建结果见图 5(b),可以看到,由于扣除本底引入了本底信号的统计噪声,反卷积算法对这种噪声敏感,得到的重建图像噪声较大,重建图像的对比度相对去本底前有所提升. 去本底后迭代算法的重建效果提升更明显,且迭代算法的重建结果噪声抑制更好.

对图 5(a) 和 (b) 中扣本底前后样品组 B 反卷积算法重建图像进行亮度归一,得到的结果见图 6. 对两幅图像中镅缝和镅条中线一定宽度内的相同像素进行平均并做灰度曲线,这样可以减少噪声对图像对比度观察的影响,可以看到去本底后对比度明显提高,但图像噪声大于去本底前.

使用和上面相同的成像参数对样品组 A 投影,扣除散射本底和镅上中子后进行重建,其结果见图 5(c). 相比图 5(b) 中镅片组成的样品组 B 的重建结果,样品组 A 的重建图中存在明显的伪影,并且在较厚的聚乙烯台阶处不能反映样品的实际分布. 因为采用在编码板处挡镅片的方法来测量本底信号,该方法测到的本底包含来自大厅散射本底及穿过镅片的镅上中子. 对样品组 A,镅上中子穿过聚乙

烯时会产生明显的衰减,镅上中子形成了非编码源成像,使得在原始投影中的实际本底不再是近似均匀的. 这样,在样品图像中我们测得的镅上中子成分实际上偏小,按照近似均匀本底扣除后在较厚的聚乙烯台阶处出现了大量负值,在重建图像中带来明显的伪影. 而对样品组 B,镅上中子透过镅片的损失可以忽略,镅上中子不成像,将其作为本底是合理的,因此重建效果更佳.

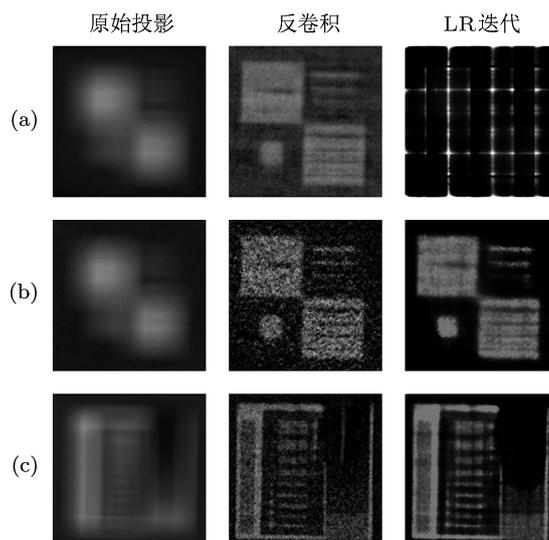


图 5 对比样品组 A 和样品组 B 的重建效果(中子注量为 $2.85 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$) (a) 样品组 B 未扣除散射本底和隔上中子; (b) 样品组 B 扣除散射本底和隔上中子; (c) 样品组 A 扣除散射本底和隔上中子

根据理论分析,有 a/b 越大理论分辨率越高. 在转换屏上的积分热中子注量为 $7.12 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 时,对比 $a/b = 1.05, 1.40$ 和 2.10 时样品组 B 的重建结果见图 7,并附有 LR 迭代算法重建结果中镅缝和镅条中线一定宽度内的相同像素进行平均并做灰度曲线结果. 从重建图像来看,在 $a/b = 2.10$ 时的重建效果明显更好. 从灰度曲线上来看,随着 a/b 的增大,镅缝和隔条部分图像对比度提高,条纹的分辨能力也增强. 例如对 2 mm 宽的镅缝,从灰度曲线来看,在 $a/b = 1.05, 1.40$ 和 2.10 时,对应半高宽为 5, 5 和 6 个像素,根据每像素理论宽度可以计算镅缝的宽度为 2.44, 2.09 和 1.94 mm,在 $a/b = 2.10$ 时与实际情况最为接近.

转换屏上的积分热中子注量越大,图像上的统计噪声就越小,比较不同的积分热中子注量下的重加结果,可以判断统计噪声对编码中子源成像的影响. $a/b = 2.10$ 时,在转换屏上的积分热中子注量分别为 $7.12 \times 10^6, 1.42 \times 10^7$ 和 $2.85 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ 时,对比样品组 B 的重建结果见图 8,并附有 LR 迭代算

法重建结果中镅缝和镅条中线一定宽度内的相同像素进行平均并做灰度曲线结果. 可以看到, 随着积分热中子注量增加, 反卷积算法和 LR 迭代算法的重建效果都会变好. 从灰度曲线来看, 随着转换屏上的积分热中子注量增加, 图像上镅缝的对比度增加, 镅条的噪声变小. 例如, 在 $2.85 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ 时,

能清楚地区分 0.5 和 0.2 mm 的镅条, 将灰度值大于 40000 的像素均作为亮度本底, 可以得到四个镅条的凹陷半宽度对应像素数为 6, 3, 1.5 和 1, 计算得到镅条的宽度为 1.94, 0.97, 0.48 和 0.32 mm, 和实际情况对应.

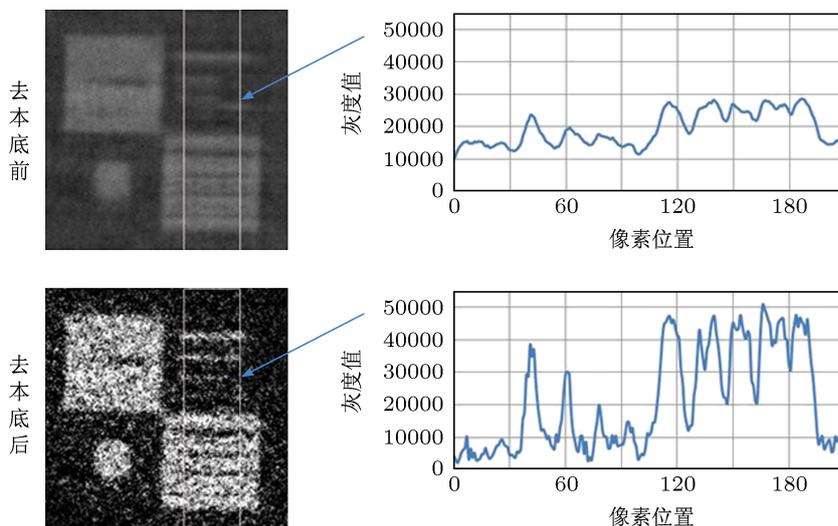


图 6 对比去本底前后样品组 B 反卷积算法重建图像对比度

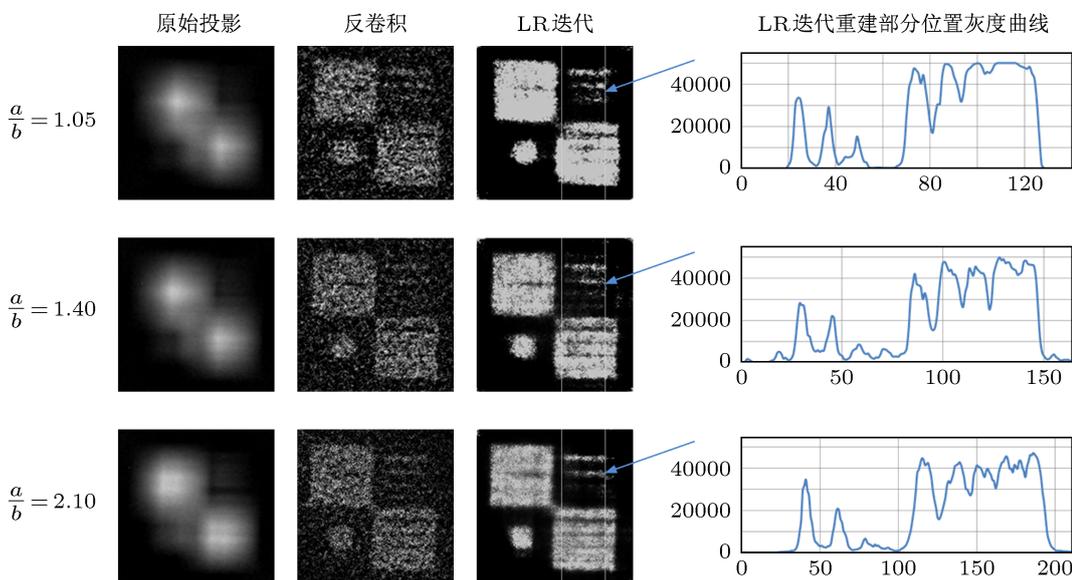


图 7 对比样品组 B 在不同成像位置的重建效果 (中子注量为 $7.12 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$)

5 结论及展望

本工作在基于小型加速器的中子成像装置上进行了编码中子源成像的初步实验研究, 使用了在反应堆上很难实现的大尺寸编码板. 验证了较大尺寸编码源用于编码中子源成像是可行的, 并获得了

初步的编码中子源成像重建图片. 实验中总结的实验和数据处理方法为以后的编码中子源成像研究工作积累了经验. 综合对比不同成像位置和不同中子注量的重建结果, 认为编码中子源成像的分辨率达到了预期效果. 但本工作中获得的图像信噪比尚不够理想, 主要是源于中子累计注量不高. 由于

PKUNIFTY 尚处于调试阶段, 其目标中子产额比现阶段要高一个量级, 这将有利于在未来的研究中降低统计噪声的影响.

在目前的实验装置上, 散射本底和镅上中子是影响重建的主要因素. 在本工作中尝试了对本底进

行测量并据此对成像投影进行修正的方法来消除其影响, 这个方法对于镅样品是基本可行的, 尽管会引入一些噪声. 对于聚乙烯等样品, 镅上中子形成的非编码源成像会影响图像重建效果, 进一步的研究工作还需解决这一问题.

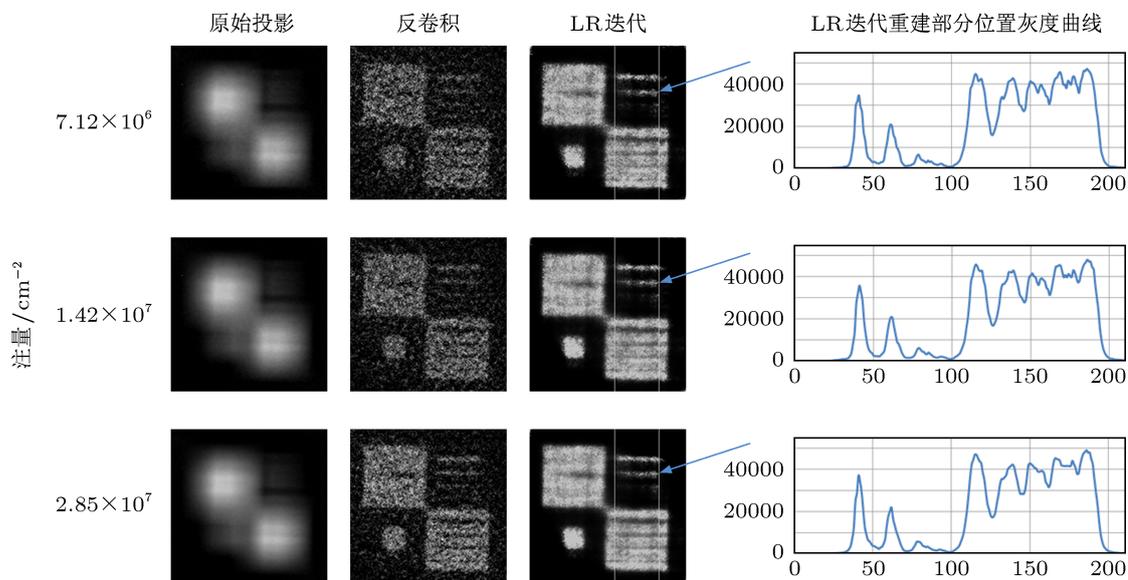


图 8 对比样品组 B 在不同中子注量下的重建效果 ($a/b = 2.10$)

- [1] Zhang X S 2010 *M. S. Dissertation* (Beijing: Peking University) (in Chinese) [张雪霜 2010 硕士学位论文 (北京: 北京大学)]
- [2] Grunauer F 2005 *Ph. D. Dissertation* (Germany: Technische Universitaet Muenchen)
- [3] Damato A L, Binns P, Lanza R C 2007 *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record 2007* Hawaii, USA, October 28–November 3, 2007 p1725
- [4] Xiao Z Y, Mishra K K, Hawari A I, Ayman I, Bilheux, Hassina Z, Bingham, Philip R, Tobin J, Kenneth W 2009 *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record 2009* Orlando, USA, October 24–November 1, 2009 p1289
- [5] Li Y J, Huang Z F, Chen Z Q, Kang K J, Xiao Y S, Wang X W, Wei J, Long C K 2011 *Nucl. Instr. Meth. A* **651** 131
- [6] Wang S, Zou Y B, Zhang X S, Lu Y R, Guo Z Y 2011 *Nucl. Instr. Meth. A* **651** 187
- [7] Zou Y B, Schillinger B, Wang S, Zhang X S, Guo Z Y, Lu Y R 2011 *Nucl. Instr. Meth. A* **651** 192
- [8] Zou Y B, Wen W W, Guo Z Y, Lu Y R, Peng S X, Zhu K, Yan X Q, Gao S L, Zhao J, Li H, Zhou Q F, Ren H T, Zhang M, Lü P N, Guo J M, Tang G Y, Mo D W, Chen J E 2011 *Nucl. Instr. Meth. A* **651** 62

Study of coded source neutron imaging based on a compact accelerator*

Wang Sheng Zou Yu-Bin[†] Wen Wei-Wei Li Hang Liu Shu-Quan
Wang Hu Lu Yuan-Rong[‡] Tang Guo-You Guo Zhi-Yu

(State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China)

(Received 26 November 2012; revised manuscript received 9 January 2013)

Abstract

Compact accelerator based neutron source has lower cost and better flexibility than nuclear reactor. Neutron imaging using such a neutron source has attracted more and more attention in recent years, in spite of its relatively low neutron fluence. In order to keep a definite neutron flux above a reasonable level on a compact accelerator based neutron imaging system, one could not set the collimation ratio to be as high as the reactor neutron source to obtain a high resolution. Coded source could increase the collimation ratio without reducing the neutron flux much. It may benefit neutron imaging system in the case of low yield neutron source. Since 2005, several laboratories in Germany and USA have carried out simulation and experiments of coded source neutron imaging. Those experiments are based on the reactor neutron sources, which have high neutron yield and low scattered neutron background. Recently, a preliminary coded source neutron imaging experiment was carried out on PKUNIFTY (Peking University Neutron Imaging Facility), which is based on a 2 MeV deuteron RFQ accelerator. It is the first time that coded source neutron imaging has been applied to an accelerator-based neutron source. Projections of coded neutron source are taken with a neutron yield of $2.6 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$. With Wiener filter deconvolution and Lucy-Richardson maximum likelihood iteration algorithm, the experimental projections are reconstructed successfully. Because the accumulated neutron fluence is low and the neutron background is high, the signal-to-noise ratio of reconstructed images is not good enough, which will be improved by reducing the neutron background.

Keywords: accelerator-based neutron source, neutron imaging, coded source imaging, image reconstruction

PACS: 28.20.Pr, 29.25.Dz, 42.30.Wb

DOI: 10.7498/aps.62.122801

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB833106) and the Instrument and Equipment Projects of Peking University, China.

[†] Corresponding author. E-mail: zouyubin@pku.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: yrlu@pku.edu.cn