

研究堆直接引出裂变中子的超视场成像 技术研究

王胜 李航 罗昕 吴洋 霍合勇 刘斌 尹伟
曹超 孙勇 杨鑫 李润东 唐彬

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所 绵阳 621900)

摘要 中子成像是一种重要的无损检测方法,快中子(MeV级能量)成像技术,能够在中大型样品的轻材料缺陷检测发挥其独特优势。经过理论分析和蒙特卡罗模拟设计,采用过滤结构将绵阳研究堆热中子束线的裂变中子份额大大提高,在等效准直比约260情况下,成像位置的裂变中子注量率可以达到 $3 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。采用快中子荧光屏作为探测器,通过研发的大视场成像装置,形成了一套直接视场可达 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$,分辨率优于 0.5 mm 的裂变中子成像系统。利用超视场成像技术,该系统还能够检测横向尺寸不超过 600 mm 的大型样品。

关键词 研究堆, 中子成像, 裂变中子, 超视场层析

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.030201

Super field of view neutron imaging by fission neutrons elicited from research reactor

WANG Sheng LI Hang LUO Xin WU Yang HUO Heyong LIU Bin YIN Wei
CAO Chao SUN Yong YANG Xin LI Rundong TANG Bin

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract [Background] Neutron radiography (NR) is an important nondestructive testing method. NR is particularly useful for detection of light materials in medium and large heavy samples. Especially, the fast neutrons can penetrate the heavy materials and reveal the structure of the light materials. Compared to accelerator neutron sources, the fission neutrons elicited from a reactor are stable and of high quality. The fission neutron imaging is a useful complementary testing technology, especially for industrial applications that require high throughput and large-scale testing. [Purpose] This study aims to investigate the super field of view neutron imaging by fission neutrons elicited from research reactor. [Methods] Based on theoretical analysis and Monte-Carlo simulation, one filter combination was employed to improve the proportion of fission neutrons in the thermal neutron beamline at China Mianyang Research Reactor (CMRR). A fission neutron imaging system was constructed by employing a large field fast neutron fluorescent screen, short focus distance lens, and scientific charge coupled device (CCD) camera. Finally, some samples were tested using fission neutron tomography. [Results] The fission neutron flux reaches up to $3 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ when the L/D ratio is about 260. The field of view of NR is up to $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ with resolution was better than 0.5 mm . Using super field of view method, samples less than 600 mm can be tested with this new

国家重点研发计划(No.2022YFA1604002)、国家自然科学基金面上项目(No.12075217)、四川省科技计划(No.2019ZDZX0010)资助

第一作者: 王胜, 男, 1985年出生, 2013年于北京大学获博士学位, 主要从事中子成像和中子探测技术研究

通信作者: 曹超, E-mail: cldyq@gmail.com

收稿日期: 2022-07-28, 修回日期: 2022-12-19

Supported by National Key R&D Program of China (No.2022YFA1604002), National Natural Science Foundation of China (No.12075217), Sichuan Provincial Science and Technology Program (No.2019ZDZX0010)

First author: WANG Sheng, male, born in 1985, graduated from Peking University with a doctoral degree in 2013, focusing on neutron imaging and neutron detection technology

Corresponding author: CAO Chao, E-mail: cldyq@gmail.com

Received date: 2022-07-28, revised date: 2022-12-19

system. [Conclusions] Combination of theoretical calculation and experimental methods, fission neutron imaging can be improved to overcome some of the limitations of traditional neutron radiography techniques, and meet the needs of large sample detection in the future.

Key words Research reactor, Neutron imaging, Fission neutrons, Super field of view

中子成像技术是一种十分重要的无损检测方法,基于研究堆或散裂中子源能够引出高品质低能中子,用于含氢材料检测^[1-4]。近年来,基于加速器中子源的快中子(MeV级能量)成像技术发展迅速,利用快中子的强穿透能力,快中子成像技术能够在中大型样品的轻材料缺陷检测领域发挥其独特优势^[5-11]。

目前,因采用的核反应类型不同,加速器中子源包括 D-D 中子源^[5-6]、D-T 中子源^[7-11]、D-Be 中子源^[12-13]、p-Be 中子源^[14-16]等。受限于加速器的离子束流强度和靶的性能,加速器中子源连续稳定运行时间一般有所限制,其提供的中子源强度一般在 $10^{11} \sim 10^{13} \text{ s}^{-1}$,到达成像位置(按 300 准直比计算)的 MeV 级中子注量率一般不超过 $10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

绵阳研究堆热中子成像装置通过准直孔道直接引出堆内慢化后的热中子,充分慢化后的热中子谱比可达 15 以上,成像位置中子注量率近 $10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。理论计算分析该束线,发现其束流中仍存在大量能量在 0.1 MeV 以上的裂变能区中子。在不改变堆内引出结构的基础上,通过蒙特卡罗模拟设计并最终加工了碳化硼-铅-镉组合的过滤结构,将束流中的裂变中子份额大大提高。

依托绵阳研究堆的稳定运行,该束线可以提供长时间的中子束流用于快中子成像实验研究。通过研发大视场暗盒,匹配加工成像系统屏蔽体,采用荧光压制屏耦合(Charge Coupled Device, CCD)相机,目前形成了一套大视场裂变中子成像系统。利用超

视场成像技术,该系统还具备检测大型样品的能力。

1 绵阳研究堆热中子成像装置

绵阳研究堆热中子成像装置已连续运行多年,该装置利用堆内引出的水平孔道束线开展检测,装置包括闸阀-光阑-准直器-承载平台和成像系统。其整体装置如图 1 所示。

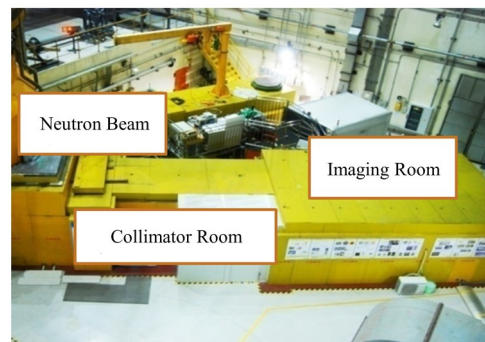


图1 热中子成像装置照片
Fig.1 Snapshot of thermal neutron imaging facility

为了充分发挥该装置的检测性能,提升其对检测样品尺寸的冗余程度。近年来,开发了一套大视场热中子成像系统。该系统由大面积热中子荧光屏、大视场暗盒、大数值孔径定制镜头和 4 k×4 k 大靶面 CCD 相机组成,为了获取面积足够大的束流面,还对原准直器进行了升级改造。最终形成了一套探测视场达到 400 mm×400 mm 的大视场热中子成像系统,其成像暗盒示意图和束流测试结果如图 2 和图 3 所示。

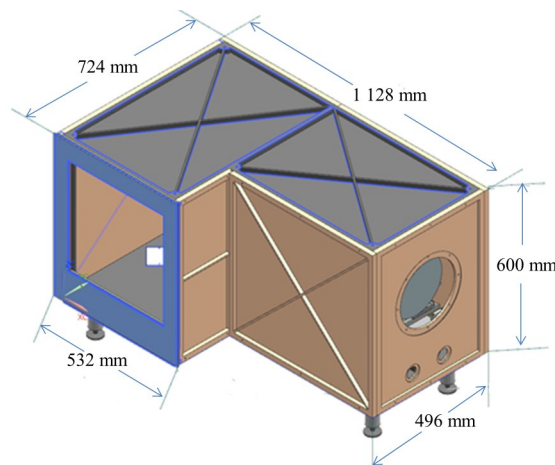


图2 大视场暗盒示意图
Fig.2 Schematic diagram of large field of view dark shielding case

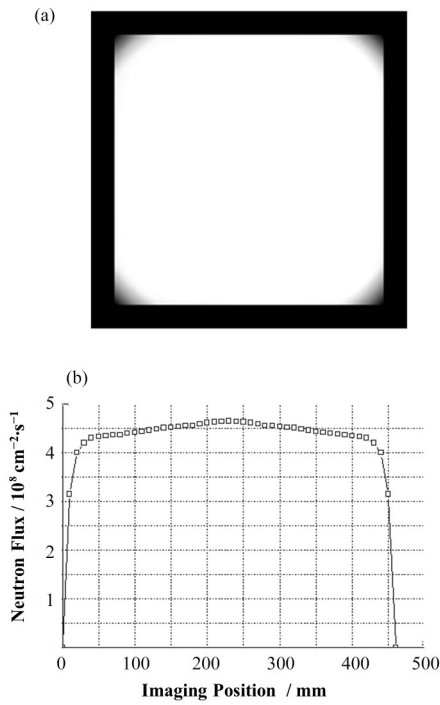


图3 大视场热中子成像系统测试结果
(a) 平场图像, (b) 成像面中子分布

Fig.3 Testing results of large field of view thermal neutron imaging system
(a) White image, (b) Neutron distribution at imaging plane

在硬件能力升级基础上,采用边缘截断对称数据补充方法,还可以进一步扩展热中子成像水平方向的检测范围,其数据处理方法如图4所示。利用该方法,对样品的检测结果见图5。可以看到,对合金样品补充完数据后能够实现优良的重建效果,可以用于实际的检测应用。

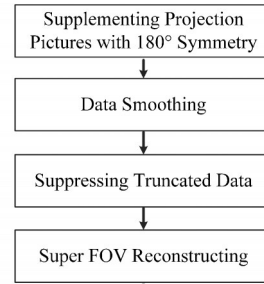


图4 超视场成像技术流程
Fig.4 Flowchart of super field of view methods

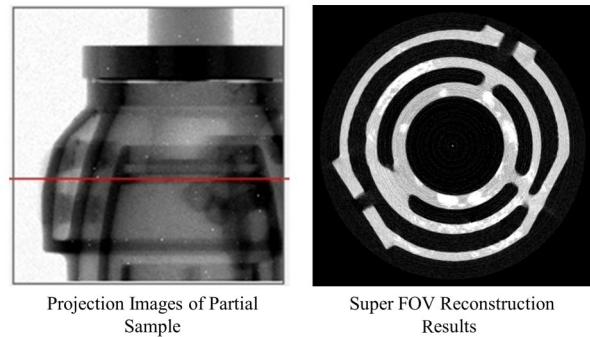


图5 超视场热中子层析实验结果
Fig.5 Experimental results of thermal neutron tomography based on super field of view methods

2 裂变中子成像装置初步设计

经过分析,绵阳研究堆热中子成像装置的中子束线中,仍存在大量超热及裂变中子能区的快中子成分,通过在孔道束流出口处增加镉片,过滤掉镉下中子,并将热中子转换屏替换快中子荧光压制屏,可以直接开展裂变中子成像研究,初期开展的裂变中子成像原型装置设计如图6所示。

对束流分布进行了成像实验,单幅图像采集时间为160 s,共采集40幅,通过对高亮信号进行剔除

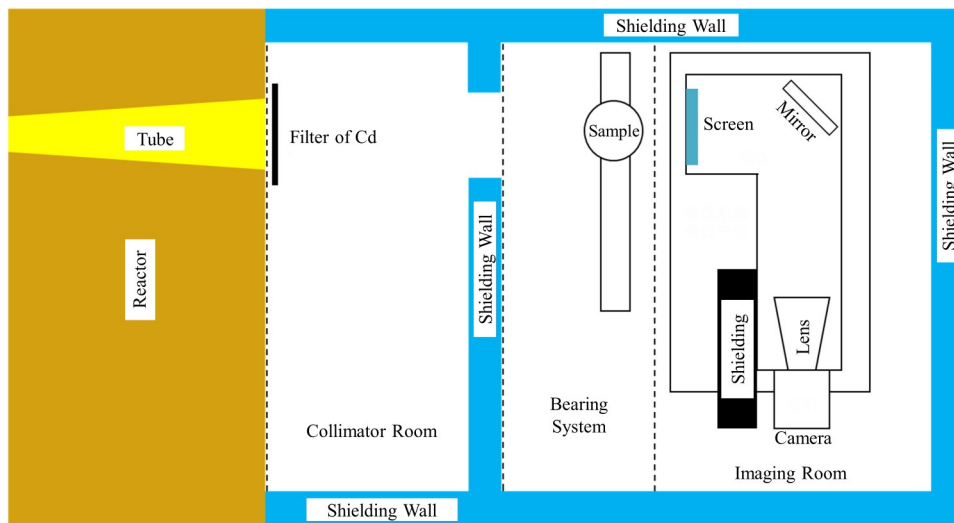


图6 裂变中子成像初步设计示意图
Fig.6 Preliminary design diagram of fission neutron imaging

后获得最终的平场图像,结果如图7所示。可以看到,该方法较为简单地实现了快中子成像,但由于镉片的过滤能力有限,束流中的低能中子(约0.5 eV以上)成分仍然较多,在平场图像中能够隐约看到堆内引出孔方形影像,表明孔道束流出口处的镉片过滤实际上形成了类似小孔成像的效果。同时,由于大量低能区中子的存在,平场图像的对比度也不理想。

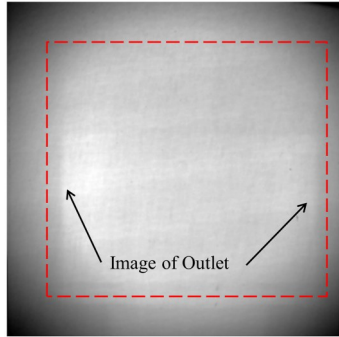


图7 镉片过滤裂变中子成像平场图像
Fig.7 Fission neutron imaging flat field by cadmium plate filter

3 裂变中子能谱优化

利用蒙特卡罗程序对束线进行了计算分析,在无任何过滤材料情况下,满功率情况下(下同)得到

成像位置束线中0.1 MeV以下中子注量率为 $1.48 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 0.1 MeV以上中子注量率为 $9.11 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

参考FRM-II裂变中子成像装置的过滤材料组成(1 cm厚碳化硼+不同厚度铅材料)^[17],在图6中孔道内设置过滤材料,沿束流方向设置1 cm厚碳化硼+1 cm厚铅+2 mm厚镉+不同厚度铅(0~5 cm)的过滤组合,如图8所示。

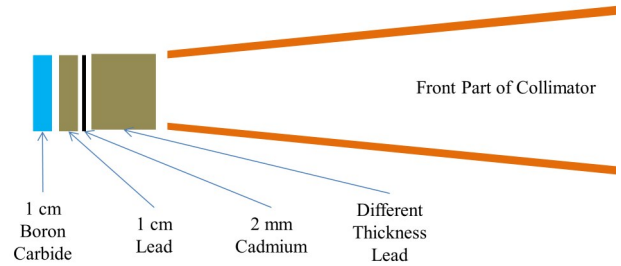


图8 过滤材料布局示意图
Fig.8 Layout diagram of filter material combination

进一步进行了模拟计算,计算中对比了前端有无碳化硼过滤和后端不同厚度铅情况下中子注量率和 γ 射线相对强度数据,见表1和表2。可以看到,有碳化硼过滤时,0.1 MeV以上中子份额明显提高,增加铅厚度有利于降低 γ 射线强度,但同时会降低

表1 有碳化硼过滤情况下的蒙特卡罗计算结果
Table 1 Monte-Carlo calculation results with boron carbide filter

后端铅厚度 Thickness of Pb /cm	0.1 MeV以下中子注量率 Neutron flux below 0.1 MeV / $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	0.1 MeV以上中子注量率 Neutron flux above 0.1 MeV / $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	γ 相对计算值 Relative γ flux	0.1 MeV以上中子注量率/ 0.1 MeV以下中子注量率 Ration of neutron flux above to below 0.1 MeV
0	1.04×10^5	3.49×10^5	5.42×10^{-2}	3.36
1	7.54×10^4	2.89×10^5	4.03×10^{-2}	3.83
2	4.70×10^4	2.18×10^5	3.44×10^{-2}	4.63
3	3.56×10^4	1.59×10^5	2.81×10^{-2}	4.48
4	2.37×10^4	1.29×10^5	2.22×10^{-2}	5.44
5	1.66×10^4	1.09×10^5	1.47×10^{-2}	6.54

表2 无碳化硼过滤情况下的蒙特卡罗计算结果
Table 2 Monte-Carlo calculation results without boron carbide filter

后端铅厚度 Thickness of Pb /cm	0.1 MeV以下中子注量率 Neutron flux below 0.1 MeV / $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	0.1 MeV以上中子注量率 Neutron flux above 0.1 MeV / $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	γ 相对计算值 Relative γ flux	0.1 MeV以上中子注量率/ 0.1 MeV以下中子注量率 Ration of neutron flux above to below 0.1 MeV
0	3.25×10^6	6.78×10^5	2.89×10^{-1}	0.21
1	2.30×10^6	5.11×10^5	2.38×10^{-1}	0.22
2	1.58×10^6	3.56×10^5	2.21×10^{-1}	0.23
3	1.12×10^6	2.71×10^5	1.85×10^{-1}	0.24
4	7.91×10^5	2.38×10^5	1.52×10^{-1}	0.30
5	5.17×10^5	1.77×10^5	9.59×10^{-2}	0.34

0.1 MeV 以上中子注量率。综合考虑,按照 1 cm 厚碳化硼+1 cm 厚铅+2 mm 厚镉设置过滤器。

最终,在原束流和过滤器两种情况下,计算得到的能谱如图 9 和图 10 所示,结果同样表明,过滤器能够有效抑制低能区中子的份额。

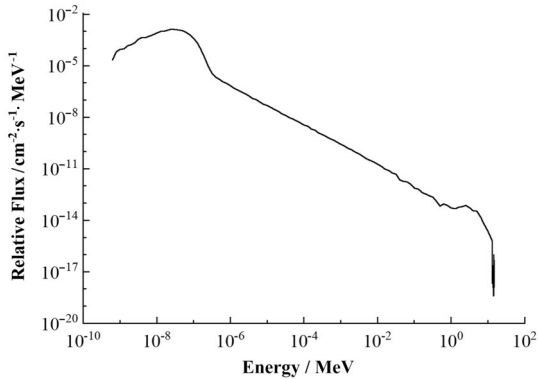


图 9 无过滤情况下成像位置能谱

Fig.9 Energy spectra at imaging position without of BC filter

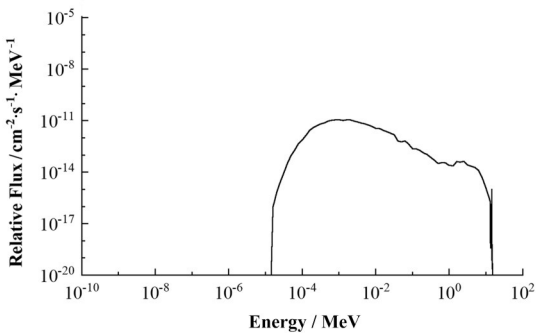


图 10 有过滤情况下成像位置能谱

Fig.10 Energy spectra at imaging position with BC filter

4 实验结果

根据前文的模拟计算结果研制了过滤器。采用完全相同的成像系统,在与前文镉片过滤情况完全相同的图像采集参数下,对束流分布进行了成像实验,同样通过多幅处理后得到最终平场图像,如图 11 所示。可以看到,图像对比度明显提高,能够识别荧光屏中的刷痕和分布不均等情况。

采用新的过滤组合并配合大视场成像系统,针对气泵样品(长端 470 mm)进行了超视场裂变中子成像检测。综合考虑检测效率,采用了 2 k×2 k 深制冷 CCD 相机,85 mm 定焦商业光学镜头,在总光程约 1 500 mm 下,单像素宽度约 0.2 mm。单幅图像采集时间 100 s,每个位置采集 8 幅图像,再多幅处理得到最终投影图像。实验时,样品偏心放置,水平方向上确保一半以上的样品处于检测范围以内,直接投影图和采用水平旋转 180°的投影图像拼接完成的完整投影图像如图 12 所示。

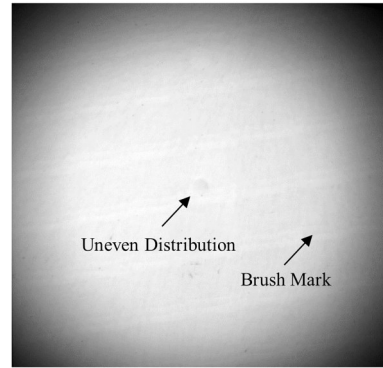


图 11 新过滤下平场图像

Fig.11 Flat field image by new filter combination

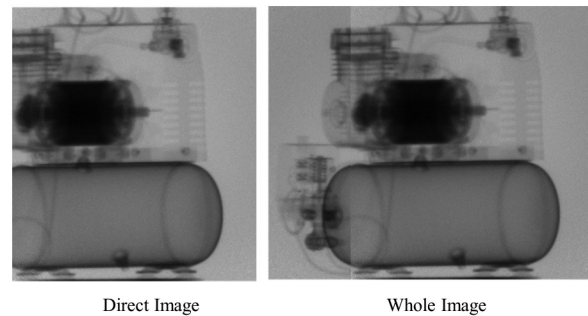


图 12 采用新的过滤组合后的气泵样品实验结果
Fig.12 Experimental results of air pump by new filter combination

按照 1°间隔完成了一周的图像采集,对全部投影数据进行补全处理,获得了完整的一周投影图像。基于获得的完备数据,通过平场校正、强度归一、转轴校正并生成正弦图,再通过滤波反投影算法进行重建^[18],最终利用各断层图像生成三维结果,如图 13 所示。可以看到,该裂变中子成像系统具备层析检测能力,且采用超视场层析方法,可以获取超过其视场大小的大尺寸气泵样品整体结构及其内部分布检测结果。

基于该裂变中子成像系统,对分辨率测试件开展了检测实验。测试件由铁制作,内含不同直径大小、不同深度的孔洞,以及不同宽度的双缝。采用 2 k×2 k 深制冷 CCD 相机,单像素宽度约 0.2 mm 情况下,样品紧贴荧光屏放置,测试件中孔洞开孔方向与束流方向一致,均为水平方向,采用前文平场测试的实验参数开展投影检测,多幅处理后并进行平场校正,最终得到投影结果如图 14 所示。可以看到,投影图像中可以识别的最小线对宽度为 0.4 mm。调整测试件位置,将孔洞开孔方向调整为垂直方向,且样品中心距离快中子荧光压制屏约 200 mm 情况下,采用与气泵样品裂变中子层析相同的采集参数开展裂变中子层析检测,图像重建结果和灰度分布曲线同样见图 14。可以看到,层析重建的线对分辨

能力可以达到0.5 mm。

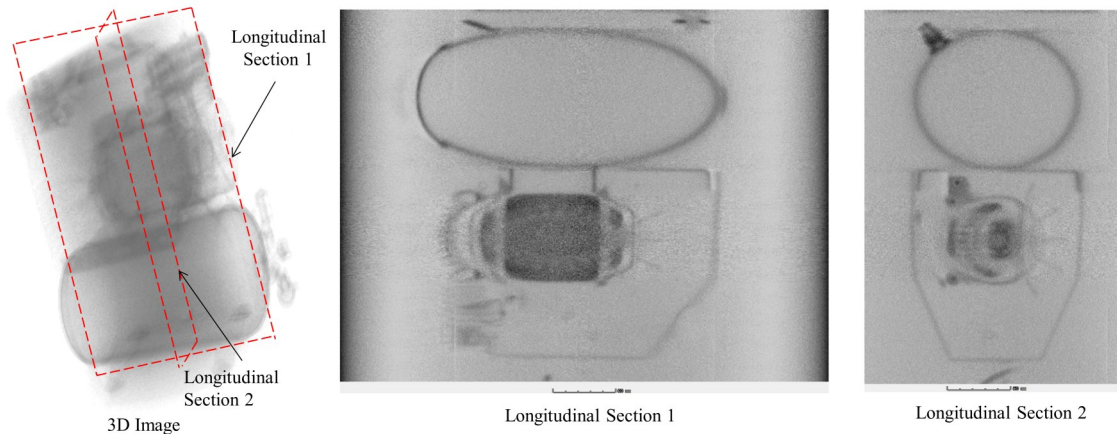


图13 气泵样品超视场裂变中子层析重建结果
Fig.13 Fission neutron tomography results of air pump based on super field of view

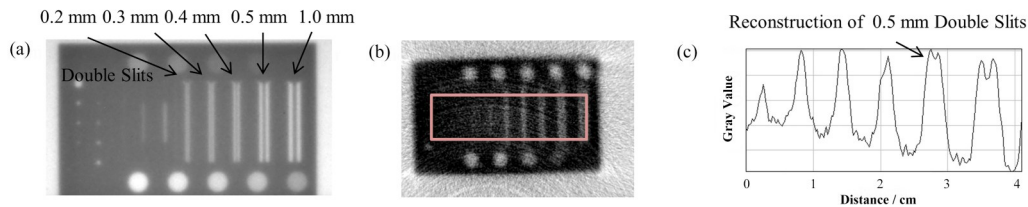


图14 分辨率测试件裂变中子成像结果 (a) 投影图像, (b) 重建图像, (c) 重建图像的灰色分布
Fig.14 Fission neutron radiography and tomography results of resolution test sample
(a) Projection image, (b) Reconstruction image, (c) Gray distribution in reconstruction image

5 结语

针对绵阳研究堆热中子束线,在不改变堆内引出结构的基础上,通过蒙特卡罗模拟设计并最终加工了碳化硼-铅-镉组合的过滤结构,将束线中的裂变中子份额大大提高,成像位置(等效准直比约260)裂变中子注量率可以达到 $3 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。通过研发大视场暗盒,匹配加工成像系统屏蔽体,采用荧光压制屏耦合CCD相机,目前形成了一套直接视场可达 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$,分辨率优于0.5 mm的裂变中子成像系统。利用超视场成像技术,该成像系统还具备开展大型样品(尺寸不超过600 mm)的裂变中子层析检测能力。

作者贡献说明 王胜:负责研究的提出及设计、数据的收集和整理、文章的起草和最终版本的修订;李航:负责文章的起草和修订;罗昕:负责数据的收集和整理;吴洋:负责实验的设计和和实施;霍合勇:负责蒙卡计算;刘斌:负责图像的处理和分析;尹伟:负责图像的重建;曹超:负责图像的采集;孙勇:负责蒙卡建模;杨鑫:负责图像的采集;李润东:负责实验数据的收集;唐彬:负责项目的监督和管理。

参考文献

- 1 貂大卫,刘以思,金光宇,等.中子照相[M].北京:原子能出版社,1996.
MO Dawei, LIU Yisi, JIN Guangyu, *et al.* Neutron radiography[M]. Beijing: Atomic Press, 1996.
- 2 Lehmann E H, Vontobel P, Hermann A, *et al.* Non-destructive analysis of nuclear fuel by means of thermal and cold neutrons[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, **515**(3): 745 - 759. DOI: [10.1016/j.nima.2003.07.059](https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.07.059).
- 3 Bennett L G, Bickerton M L, Lewis W J, *et al.* Development of techniques for the neutron radiography of CF188 flight control surfaces[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1999, **424**(1): 104 - 112. DOI: [10.1016/s0168-9002\(98\)01243-1](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(98)01243-1).
- 4 Tan Z X, Tang J Y, Jing H T, *et al.* Energy-resolved fast neutron resonance radiography at CSNS[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:

- Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, **889**: 122 - 128. DOI: [10.1016/j.nima.2018.01.099](https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.01.099).
- 5 裴宇阳, 唐国有, 郭之虞, 等. 快中子照相胶片成像法的初步试验[J]. 原子核物理评论, 2005, **22**(1): 79-80. DOI: [10.3969/j.issn.1007-4627.2005.01.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-4627.2005.01.024).
- PEI Yuyang, TANG Guoyou, GUO Zhiyu, *et al.* Preliminary experiment of fast neutron imaging with direct-film method[J]. Nuclear Physics Review, 2005, **22** (1): 79-80. DOI: [10.3969/j.issn.1007-4627.2005.01.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-4627.2005.01.024).
- 6 裴宇阳, 唐国有, 郭之虞, 等. 用4.5 MV静电加速器开展快中子照相的研究[J]. 原子能科学技术, 2006, **40**(1): 79-82. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6931.2006.01.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6931.2006.01.018).
- PENG Yuyang, TANG Guoyou, GUO Zhiyu, *et al.* Research on fast neutron radiography with 4.5 MV Van de Graaff accelerator of peking university[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2006, **40**(1): 79-82. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6931.2006.01.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6931.2006.01.018).
- 7 章法强, 杨建伦, 李正宏, 等. 数值模拟高能中子照相[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(2): 325-329.
- ZHANG Faqiang, YANG Jianlun, LI Zhenghong, *et al.* Numerical simulation of high energy neutron radiography [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, **18**(2): 325 - 329.
- 8 唐彬, 周长庚, 霍合勇, 等. 14 MeV快中子数字照相初步实验研究[J]. 中国科学(G辑:物理学力学天文学), 2009, **39**(8): 1090 - 1096. DOI: [10.1007/s11433-009-0184-0](https://doi.org/10.1007/s11433-009-0184-0).
- TANG Bin, ZHOU Changgeng, HUO Heyong, *et al.* The pilot experimental study of 14 MeV fast neutron digital radiography[J]. Science in China (Series G: Physics, Mechanics & Astronomy), 2009, **39**(8): 1090 - 1096. DOI: [10.1007/s11433-009-0184-0](https://doi.org/10.1007/s11433-009-0184-0).
- 9 Tang B, Wu Y, Li H, *et al.* The physics analysis and experiment study of zinc sulphide scintillator for fast neutron radiography[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2013, **729**: 327 - 333. DOI: [10.1016/j.nima.2013.07.063](https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.07.063).
- 10 尹伟, 王胜, 李航, 等. 基于小型加速器中子源的快中子层析实验研究[J]. 核技术, 2019, **42**(4): 040201. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.040201](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.040201).
- YIN Wei, WANG Sheng, LI Hang, *et al.* Experimental study of fast neutron tomography based on an compact accelerator neutron source[J]. Nuclear Techniques, 2019, **42**(4): 040201. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.040201](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.040201).
- 11 Wang S, Yin W, Liu B, *et al.* A moveable neutron imaging facility using D-T neutron source based on a compact accelerator[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2021, **169**: 109564. DOI: [10.1016/j.apradiso.2020.109564](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109564).
- 12 Zou Y B, Wen W W, Guo Z Y, *et al.* PKUNIFTY: a neutron imaging facility based on an RFQ accelerator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2011, **651**(1): 62 - 66. DOI: [10.1016/j.nima.2011.02.011](https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.02.011).
- 13 Dangendorf V, Laczko G, Reginatto M. *et al.* Detectors for time-of-flight fast-neutron radiography 1. Neutron-counting gas detector[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2005, **542**(1 - 3): 197 - 205. DOI: [10.1016/j.nima.2005.01.100](https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.01.100).
- 14 Wang X, Xing Q, Zheng S. *et al.* Status report on accelerator and neutron activities of CPHS at Tsinghua University[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, **1021**: 012006. DOI: [10.1088/1742-6596/1021/1/012006](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1021/1/012006).
- 15 Tasaki S, Nagae T, Hirose M. *et al.* Properties and possible applications of Kyoto university accelerator based neutron source (KUANS) [J]. Physics Procedia, 2014, **60**: 181 - 185. DOI: [10.1016/j.phpro.2014.11.026](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.11.026).
- 16 Hiraoka E. Neutron radiography with cyclotron[C]. Proceedings of the Eleventh International Conference on Cyclotrons and their Applications, Tokyo, Japan, 1985: 587 - 592.
- 17 Bücherl T, Lierse von Gostomski C, Breikreutz H, *et al.* NECTAR—a fission neutron radiography and tomography facility[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2011, **651**(1): 86 - 89. DOI: [10.1016/j.nima.2011.01.058](https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.01.058).
- 18 Qu G R. Convergence of FBP algorithm for tomography [J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, English Series, 2016, **32**(4): 963 - 968. DOI: [10.1007/s10255-016-0617-2](https://doi.org/10.1007/s10255-016-0617-2).