

14 MeV 快中子照相用光纤转换屏研究

吴洋^{1,2}, 霍合勇^{1,2}, 李航^{1,2}, 王胜^{1,2}, 曹超^{1,2}, 孙勇¹,
尹伟¹, 刘斌¹, 唐彬^{1,2,*}

(1. 中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900;
2. 中国工程物理研究院 中子物理学重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要:快中子照相技术因其超强的样品透视能力而成为射线无损检测技术近年来研究的热点,转换屏是中子照相装置的关键部件。光纤转换屏是一种新型的快中子照相转换屏,较大程度兼顾了光纤阵列的高探测效率和荧光屏的高成像质量,具有很好的应用前景。本文以 D-T 加速器为中子源,用 ZnS 和环氧树脂以及光纤研制了快中子照相光纤转换屏,耦合科学级 CCD 数字成像系统,进行了快中子数字照相技术研究,获取了不同光纤排列方式的光纤转换屏积分曝光图像,同时测量了快中子荧光屏和塑料闪烁体等其他快中子照相用转换屏的发光效率,实验结果表明,光纤转换屏的发光效率高于其他类型转换屏的。

关键词:快中子;照相;光纤转换屏

中图分类号:TL99 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-6931(2019)12-2460-05

doi:10. 7538/yzk. 2018. youxian. 0913

Study on Optical Fiber Conversion Screen for 14 MeV Fast Neutron Radiography

WU Yang^{1,2}, HUO Heyong^{1,2}, LI Hang^{1,2}, WANG Sheng^{1,2}, CAO Chao^{1,2},
SUN Yong¹, YIN Wei¹, LIU Bin¹, TANG Bin^{1,2,*}

(1. *Institute of Nuclear Physics and Chemistry,*

China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Key Laboratory of Neutron Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Fast neutron radiography technology has become a hot spot in recent years because of its strong sample transmission ability. Conversion screen is the key component of neutron radiography device. Optical fiber conversion screen is a new type of fast neutron radiography conversion screen, which takes into account the high detection efficiency of fiber array and the high imaging quality of the fluorescent screen, and has a good application prospect. Using D-T accelerator as neutron source, fast neutron radio-

收稿日期:2018-12-21;修回日期:2019-02-25

基金项目:国防基础科研计划资助项目(jcky201712b002);核安全项目资助(41426020401);国家重点研发计划资助项目(2016YFA0401502);国家自然科学基金资助项目(11605168,11675153)

作者简介:吴洋(1980—),男,辽宁新民人,副研究员,硕士,核技术及应用专业

*通信作者:唐彬,E-mail: 33749182@qq.com

网络出版时间:2019-04-30;网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20190429.1204.004.html>

graphy optical fiber conversion screen was developed by ZnS, epoxy resin and optical fiber, coupled with scientific CCD digital imaging system. The fast neutron radiography technology was studied. The integrated exposure images of optical fiber conversion screen with different optical fiber arrangement modes were obtained. Meanwhile, the detection efficiencies of fast neutron fluorescence screen and plastic scintillator were measured. The result shows that the detection efficiency of optical fiber conversion screen is better than that of other conversion screen.

Key words: fast neutron; radiography; optical fiber conversion screen

快中子(能量超过 10 MeV 以上的中子)较热中子和冷中子具有更高的能量和穿透能力,因此快中子照相技术在厚重样品或热中子强吸收材料(如 U 材料)方面弥补了冷中子、热中子照相技术和其他射线照相技术的不足,具有很大的发展潜力和较好的应用空间^[1-8],但快中子照相技术与相对成熟的热中子照相技术相比,由于快中子探测效率低、散射影响大以及对某些材料属性的影响大等难题,具有很高的技术难度,是目前中子照相领域研究的重点和难点。

中子探测技术是快中子照相的关键技术。极低的探测效率(1%以下)一直是制约快中子照相技术发展的瓶颈问题,2005 年美国的研究人员通过微通道板作为探测器开展了快中子照相实验^[8],将探测效率提升到 5%左右,但该方法由于成本高昂、探测面积小(cm 级)等问题,迄今也仅处于探索阶段,基本不具备工程化应用的价值。有学者采用气体探测器和塑料闪烁体耦合光电倍增管开展过相关研究,但都因种种原因效果欠佳,也没有后续进展的报道。目前主流的快中子照相系统多采用中子-可见光转换屏通过光学透镜组耦合科学级 CCD 或 CMOS 相机,该类系统具有探测视场大、部件成熟度高、成本相对低廉等优势。转换屏的主要作用是将中子转换为可见光而被探测系统接收成像,其性能对成像效果的影响很大。目前可用于快中子照相的转换屏有混压荧光屏、塑料闪烁体、光纤阵列等,基本原理均通过中子轰击转换屏内氢元素产生反冲质子后激发荧光物质发光而实现对快中子的探测,因此屏内的材料含氢量、荧光物质光激发特性、屏结构等对转换屏综合性能的影响很大。光纤转换屏作为近年才出现的新型转换屏,结合了荧光屏的高成

像质量和塑料闪烁体的高探测效率,有望在较大程度上提升快中子照相水平,具有很好的发展前景。

移波光纤转换屏是近年提出的一种新型快中子照相用转换屏,2003 年,日本 Matsubayashi 等^[9]首次提出将光纤盒荧光屏结合作为转换屏的思路,却一直未见后续报道,2009 年,北京大学开展了相关技术的初步研究,取得了光纤转换屏耦合 CCD 相机的快中子照相图像^[10],但此研究工作主要针对采用该模式进行快中子照相的可行性研究,对于光纤转换屏本身特性的研究基本未开展。作为一种极具发展潜力的转换屏技术,光纤转换屏目前的研究工作开展尚不充分,亟待进一步的研究。本文以 D-T 加速器为中子源,用 ZnS 和环氧树脂以及光纤研制快中子照相光纤转换屏,耦合科学级 CCD 数字成像系统,进行快中子数字照相技术研究,进行试制光纤转换屏和荧光屏性能、成像质量的实验分析。

1 快中子照相转换屏的分类

转换屏对成像效率和质量有决定性影响,因此转换屏技术研究多年来一直是快中子照相技术研究的重点内容,可用于快中子照相的转换屏有混压荧光屏(polyethylene-ZnS converter, PZC)、塑料闪烁体(plastic scintillator, PS)、光纤阵列(fiber matrix, FM)和光纤转换屏(optical fiber conversion screen, OFCS)等,除塑料闪烁体外,其他 3 类均无标准产品,塑料闪烁体并非专为快中子照相研发,一般快中子照相系统中采用的塑料闪烁体厚度多在 cm 量级以上,其体发光特性导致像扩散严重,在超高准直条件下成像空间分辨率仅约 2 mm,且塑料闪烁体本身对伽马射线敏感,故本底伽马噪声

严重,因此塑料闪烁体并不是一种理想的快中子照相用转换屏。光纤阵列是由塑料闪烁体光纤粘合拼接而成的立方体结构,故也存在伽马本底高的特性,同时制造成本远高于塑料闪烁体,另外光纤之间的光子串扰噪声和光纤边界伪影难以消除的问题也会较大程度影响成像质量。由富氢材料(聚乙烯、聚丙烯、环氧树脂等)与荧光材料(多为 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 或 $\text{Gd}_2\text{S}_2\text{O}$ 荧光材料)组成的混压转换屏一般采用物理加热混合均匀后,压制成为荧光转换屏,添加 70% 左右的 ZnS 粉、增韧剂和偶联剂,混合均匀后热压或冷压成型。混压荧光屏为面发光,因此具有分辨率高、成像效果好的特点,现阶段成像分辨率可达 0.5 mm 左右,另外其采用 ZnS 作光激活剂,对伽马不敏感,可有效降低伽马本底噪声干扰,但因混压荧光屏自身不透明,对内部产生光子自吸收现象严重,所以该类转换屏的厚度均在 mm 量级,导致其探测效率不高,仅为其他类别转换屏的几分之一。光纤转换屏是基于混压荧光屏发展而来,其通过在混压荧光屏内植入光纤而使反冲质子激发 ZnS 产生可见光经转换屏内的光纤导出,这在较大程度上克服了混压荧光屏对光的自吸收,故光纤转换屏的厚度可增至几 cm,很大程度上提升了其探测效率,经测试此转换屏在厚度相同的情况下,发光效率甚至高于塑料闪烁体,另外光纤转换屏内部光纤由不透明基材隔离,较大程度解决了光子串扰问题。

2 光纤转换屏的工作原理及光纤排列方式分析

光纤转换屏的工作原理为:中子和屏内的含氢材料发生反应产生反冲质子激发 ZnS 发光,产生的可见光经屏内的移波光纤导出,在较大程度上避免了屏对光的自吸收,在这种情况下荧光屏的厚度可增至几 cm,故移波光纤转换屏既有较高的探测效率又可获取较好的成像质量^[9]。影响光纤转换屏探测效率和成像质量的参数有闪烁材料的发光效率,荧光粉的发光光谱与移波光纤的吸收光谱的耦合程度,光纤的直径、间距、排列方式等。

光纤在荧光屏内可呈正位排列和错位排列,其中正位排列即光纤排列为正方形,而错位排列即光纤排列为正三角形。中子轰击光纤转

换屏后起始发光点在荧光粉内,发光点发出的光在周边介质内基本呈指数衰减,可近似认为传入光纤转换屏内的光纤的荧光大部分来自其邻近区域,因此光纤密度决定了光纤转换屏的光输出效率,正三角形排列的光纤密度约为正方形排列的 1.15 倍,在制备加工难度相仿的情况下,光纤排布方式应首选错位排列。

3 光纤转换屏快中子照相实验

光纤转换屏快中子照相实验基于中国工程物理研究院加速器中子源进行,实验装置布局示于图 1。中子源通过氘氘反应产生 14 MeV 快中子,中子源靶点尺寸为 15 mm,产额为 $5 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$,中子到达转换屏被转换为可见光信号,CCD 相机将光学图像信号转换为数字图像信号,传送给图像采集处理分析系统,后者对采集的图像进行处理分析和判读。

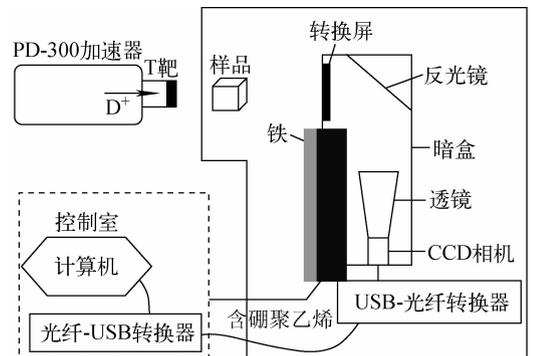


图 1 快中子照相装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fast neutron radiography system

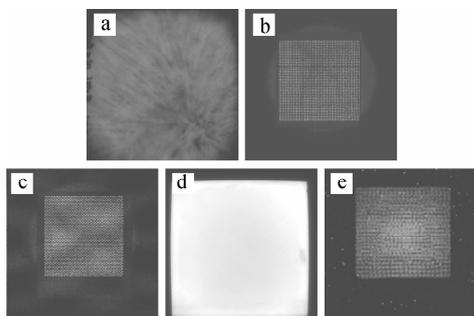
实验对塑料闪烁体、光纤阵列、采用聚丙烯和 ZnS 荧光粉混合压制荧光屏和光纤转换屏的探测效率进行了测试。实验中中子源与光纤转换屏的距离为 37 cm,单幅曝光时间为 5 min。

实验结果见图 2 和表 1。因为测试的各类转换屏厚度不同,而厚度又与其探测效率正相关,为全面分析各类转换屏的探测效率,本文又对其单位厚度探测效率进行了计算,即表 1 中的归一到 1 mm 探测效率,结果表明错排光纤的探测效率较正排光纤高 20%,另外两种光纤转换屏的探测效率均高于压制荧光屏 40% 以上,均低于 2 cm 厚的塑料闪烁体,但对单位厚度转换

屏而言,3 mm 厚的聚丙烯和 ZnS 荧光粉混合压制荧光屏最高,而 10 cm 厚的光纤阵列最低。

料闪烁体的分辨率。实验中采用分辨率较好的 1 mm 厚压制荧光屏、2 cm 厚 ST401 塑料闪烁体和 1 cm 厚光纤转换屏,光纤转换屏的光纤间距 1 mm,光纤直径 0.5 mm,采用国产光纤制备,基材成分为富氢材料与荧光粉重量比 1 : 1。

实验测试样品(图 3)为开有不同宽度对缝的铁样品。铁样品厚度 40 mm,样品内线对宽度为 0.5~5 mm 不等。



a——PZC(经灰度拉伸);b——正排 OFCS;
c——错排 OFCS;d——PS;e——FM

图 2 不同转换屏成像结果

Fig. 2 Imaging result of different converters

表 1 各种转换屏探测效率对比

Table 1 Efficiency of different converters

规格	单个中子产生的灰阶	探测效率/%	归一到 1 mm 探测效率/%
1 cm 错排 OFCS	0.012	1.42	0.142
1 cm 正排 OFCS	0.01	1.18	0.118
2 cm PS	0.017	2.01	0.101
3 mm PZC	0.006	0.71	0.237
10 cm FM	0.027 9	3.3	0.033

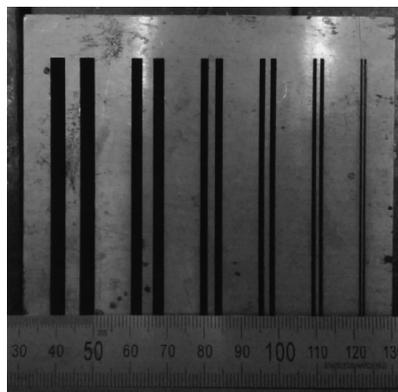
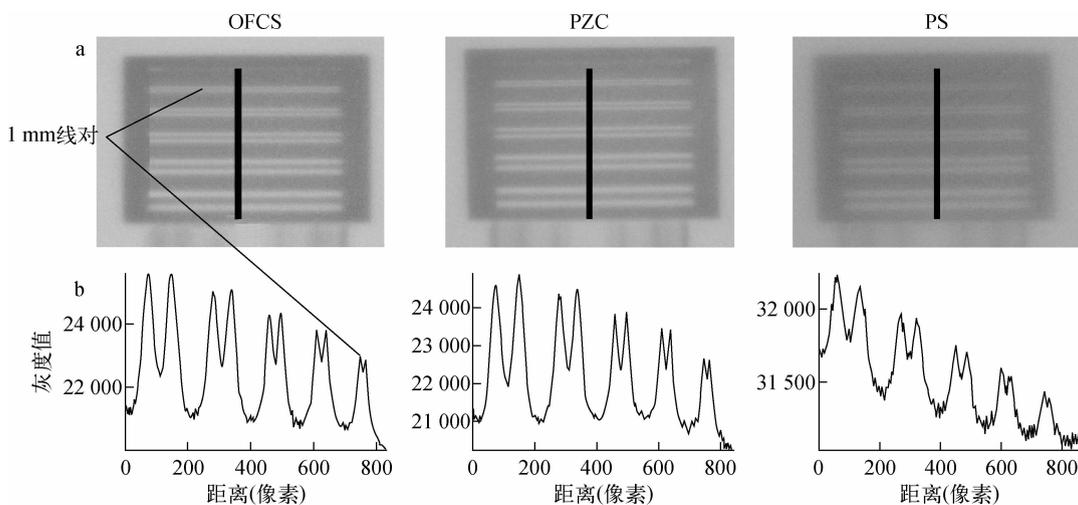


图 3 铁样品实物图

Fig. 3 Photography of iron sample

实验结果如图 4 所示。实验中源-屏距为 137 cm,样品与转换屏紧贴,光纤转换屏成像参数为 3 min×12 次,PZC 成像参数为 5 min×12 次,ST401 成像参数为 1 min×12 次。成像结果表明,除 2 cm 厚 ST401 外,1 cm 厚光纤屏和

然后测试光纤转换屏和压制荧光屏以及塑



a——成像结果;b——黑线处灰度曲线

图 4 铁样品成像结果

Fig. 4 Imaging result of iron sample with slot

1 mm 厚压制荧光屏均可分辨样品上 1 mm 的线对;成像结果灰度曲线表明,采用混压荧光屏获取的线对图像,其对比度高于采用光纤屏获取的线对图像,说明该屏在极限分辨率上要优于光纤屏的;ST401 为体发光,其分辨率低,同时由于成像时间较短和闪烁体对伽马射线非常敏感,相对噪声也高于其他两种屏。

4 结论

1) 光纤转换屏内部光纤的植入方式对其探测效率影响较大,错排光纤较正排光纤效率提升约 20%。

2) 因测试用的塑料闪烁体厚度较光纤转换屏大 1 倍,其测试效率虽较光纤转换屏的高,但归一到相同厚度后其绝对效率低于光纤转换屏的,而压制荧光屏厚度超过 3 mm 后因自吸收效应其探测效率会下降,故各类转换屏中光纤转换屏效率最高,塑料闪烁体次之,压制荧光屏最低。

3) 压制荧光屏在中子束流准直比相同的情况下分辨率最高(优于 1 mm),光纤转换屏次之,塑料闪烁体最差。

4) 理论上增大光纤转换屏厚度可进一步提升其效率,该类转换屏在分辨率和效率两方面达到了较好的平衡,压制荧光屏可用于对分辨率要求较高的快中子照相场景,而塑料闪烁体仅适用于强中子源、大准直比条件下的快中子照相,且其对伽马射线的高敏感性会对成像质量有较大影响。

参考文献:

[1] HALL J, DIETRICH F, LOGAN C, et al. Development of high-energy neutron imaging for use in NDE applications, UCRL-JC-134562[R]. US; LLNL, 1999.

[2] FUJINES S, YONEDA K, YOSHII K, et al. Development of imaging techniques for fast neutron radiography in Japan[J]. Nuclear Instruments Methods in Physics Research A, 1999, 424: 190-199.

[3] MIKEROV V. Fast neutron fields imaging with

a CCD-based luminescent detector[J]. Nuclear Instruments Methods in Physics Research A, 1999, 424: 48-52.

- [4] LEHMANN E, FREI G, NORDLUND A, et al. Neutron radiography with 14 MeV neutrons from a neutron generator[C]//Proceedings of the Seventh World Conference. Rome; ENEA, 2002: 411-418.
- [5] 吴洋,唐彬,霍合勇,等. NIP 成像板在快中子照相实验中的应用研究[J]. 核技术,2012,35(7): 515-518.
- WU Yang, TANG Bin, HUO Heyong, et al. The applicability of imaging plate in fast neutron radiography[J]. Nuclear Techniques, 2012, 35(7): 515-518(in Chinese).
- [6] 蒋诗评,陈亮,陈阳,等. 快中子照相的实验研究[J]. 核技术,2005,28(2):151-154.
- JIANG Shiping, CHEN Liang, CHEN Yang, et al. Experimental study on fast neutron radiography[J]. Nuclear Techniques, 2005, 28(2): 151-154(in Chinese).
- [7] 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,2009,39(8): 1 091-1 096.
- TANG Bin, ZHOU Changgeng, HUO Heyong, et al. The pilot experimental study on 14 MeV fast neutron digital radiography [J]. Scientica Sinica, 2009, 39(8): 1 091-1 096(in Chinese).
- [8] BEAULIEU D R, GORELIKOV D, KLOTZSCH H, et al. Timing resolution of fast neutron and gamma counting with plastic microchannel plates [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2011, 659: 394-398.
- [9] MATSUBAYASHI M, HIBIKI T, MISHIMA K, et al. Development of a fast neutron radiography converter using wavelength-shifting fibers [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2003, 510(3): 325-333.
- [10] ZOU Y, GUO L, GUO Z, et al. Development of a converter made of scintillator and wavelength-shifting fibers for fast neutron radiography[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2009, 605(1): 73-76.