

文章编号: 1007-4627(2019)02-0190-07

用于GPPD谱仪的大面积闪烁体中子探测器性能测试

黄畅^{1,2,3}, 唐彬^{2,3,†}, 刘云^{2,3}, 陈少佳^{2,3}, 王修库^{2,3}, 孙志嘉^{2,3,4}, 陈元柏^{2,3}, 姚泽恩^{1,†}

- (1. 兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000;
2. 中国科学院高能物理研究所东莞分部, 广东 东莞 523803;
3. 散裂中子源科学中心, 广东 东莞 523803;
4. 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049)

摘要: 中国散裂中子源(Chinese Spallation Neutron Source, CSNS)的建成为中子散射技术的发展和应奠定了基础。通用粉末衍射谱仪(general purpose powder diffractometer, GPPD)是CSNS一期建设的三条谱仪之一。研制了用于GPPD的大面积闪烁体探测器阵列, 在CSNS的BL20中子束线上开展了探测器关键性能参数的实验测试。测试结果显示, 对波长为1.4 Å和2.8 Å的中子, 其探测效率分别为(38.5±1.7)%和(56.1±1.1)%, 模拟与实验相结合, 给出对2 Å的中子, 其探测效率约为(46.1±2.0)%, 有效面积内的探测效率不均匀度约为19.6%, 经优化后可以降低到14.9%; 探测器位置分辨可以达到4.0 mm×4.0 mm, 最高计数率约79 kHz。探测器单元的整体性能指标能满足GPPD的物理需求。

关键词: 中国散裂中子源; 通用粉末衍射谱仪; 闪烁体探测器; 探测效率; 位置分辨

中图分类号: TL812 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.02.190

1 引言

中子散射技术是研究材料微观结构和观测材料内部动力学行为的有效手段, 由于中子具有穿透性强、有磁矩、对轻元素敏感、无破坏性等独特的优势, 近年来中子散射技术被广泛地应用在生物、材料、地质、生命科学、能源、航空与国防建设等众多研究领域^[1]。中国散裂中子源(Chinese Spallation Neutron Source, CSNS)的建成为中子散射技术的发展和应奠定了基础^[2], 通用粉末衍射谱仪(General purpose powder diffractometer, GPPD)是CSNS一期建设的三条谱仪之一, 主要用于研究物质的结构与磁性。位置灵敏中子探测器是中子散射谱仪的关键器件, 其原理是通过入射中子与探测器内的转换材料相互作用产生带电粒子实现对中子的位置灵敏探测^[3]。

基于³He气体的探测器是探测中子位置的理想探测器, 截至到2007年, 世界上基于³He气体的中子谱仪数量占总中子谱仪的75%以上。但近年来随着³He气体价格的飞涨, 使得基于³He气体的位置灵敏中子探测器的成本快速上升^[4]。基于闪烁体与光电技术的闪烁体中子探测器近年来发展迅速, 已成为较广泛使

用的位置灵敏中子探测器之一, 该类型探测器已经在英国散裂中子源(ISIS)粉末衍射仪GEM的主探测器、美国散裂中子源(SNS)粉末衍射仪POWGEN3的主探测器以及日本散裂中子源(J-PARC)工程材料衍射谱仪TAKUMI的主探测器上得到了成功的应用^[5-7]。中国散裂中子源探测器课题组, 基于ZnS/⁶LiF闪烁屏、波移光纤(wavelength shifting fiber, WLSF)阵列和多阳极光电倍增管(multi-anode photo multiplier tubes, M-PMT), 自主研制了位置灵敏大面积阵列中子探测器, 该探测器已成功应用于GPPD谱仪, 并实现对样品的测试预分析^[8]。本文利用CSNS提供的中子测试束, 测试了该探测器的关键性能指标。

2 探测器结构及工作原理

如图1所示, 位置灵敏闪烁体中子探测器由ZnS/⁶LiF闪烁屏(Eljen Technology/EJ426/300 μm)、WLSF读出阵列(Kuraray/Y-11(200)MS/1mm)、M-PMT(Hamamatsu/H8500)以及配套读出电子学组成。为了提高热中子的探测效率, 探测器头部采用双层ZnS/⁶LiF闪烁屏与WLSF阵列紧密排布的双层夹

收稿日期: 2018-09-14; 修改日期: 2018-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1832111, 11875273); 广东省自然科学基金项目(2016A030313126, 2015A030310006)

作者简介: 黄畅(1993-), 男, 湖北麻城人, 在读硕士, 从事中子探测器研究; E-mail: huangch16@lzu.edu.cn

† 通信作者: 唐彬, E-mail: tangb@ihep.ac.cn; 姚泽恩, E-mail: zeyao@lzu.edu.cn.

心结构，WLSF 分别沿 X, Y 方向均匀排布，光纤外径为 1 mm，芯间距 2 mm，两块 ZnS/⁶LiF 闪烁屏分别置于 X, Y 方向光纤阵列平面上下两侧。

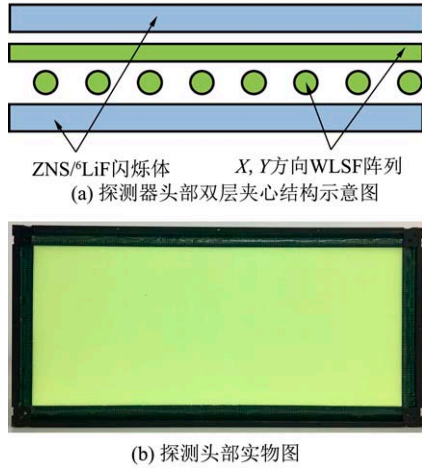


图 1 (在线彩图) 探测器头部结构示意图

其工作原理为入射中子与闪烁体中的⁶Li 发生反应产生 α 粒子与氦核，α 粒子与氦核与闪烁体作用产生闪烁光子，闪烁光子被附近的 WLSF 收集后重发射传输至光纤端面与光倍管耦合进入 M-PMT 入射窗，M-PMT 将光信号转化为电脉冲信号，后端 ASIC 电子学对电脉冲信号放大、整形和甄别后记录触发通道号及触发时间并将数据传输至数据获取系统，通过对数据进行解析得到入射中子的位置与时间信息，整套系统信号飞行时间的起始时刻 T 是加速器提供的质子打靶时间。与传统的光纤编码方式读出不同^[9]，该探测器使用了 3 个 64 通道的 M-PMT(X 方向 2 个，Y 方向 1 个) 实现单通道信号独立数字化读出，可以有效降低中子位置重建算法的复杂度并消除由光纤编码方式读出产生的伴随重影现象^[10]。

3 探测器性能测试

3.1 实验测试条件与方法

根据 GPPD 总体物理设计，闪烁体探测器单元主要参数需满足如表 1 中所列指标要求。为了考察所研制的闪烁体探测器单元能否满足总体设计要求，在 CSNS 的 BL20 中子束线上，开展了典型中子波长范围的探测器探测效率、位置分辨、计数率等重要性能参数的实验测试。BL20 中子束线采用了退耦合窄化液氢慢化器，慢化器出来的中子经多次准直与吸收后到达距离慢化器 8.95 m 的束流出口，出口处中子束斑直径为 φ20 mm，中子注量率约为 10⁶ n/cm²·s，中子波长范围 0~10 Å。

表 1 GPPD探测器的主要参数

主要技术参数	指标要求
中子探测效率	>40%@2 Å
探测中子波长范围	0.1~4.9 Å
位置分辨	<5 mm×50 mm
计数率	>30 kHz

(1) 探测效率测试

探测效率测试实验布置示意图及现场照片见图 2。由于 BL20 出射中子波长分布较宽，使用了单色器，BL20 出口的中子束以 45° 入射角入射到锗 [220] 单色器上，单色后的中子经过狭缝准直后进入具有确定探测效率的标准³He 管(LND 252299/气压 20 atm(1 atm=1.01×10⁵ Pa)/直径 1 英寸)灵敏区，标准³He 管记录其时间与计数信息。然后移去标准³He 管，测量同样条件下闪烁体探测器的中子计数，为降低束流不稳定因素对实验结果的影响，实验过程中用低气压³He 束流监测器(Ordela 4560N)标定测试时间内束流出口中子总

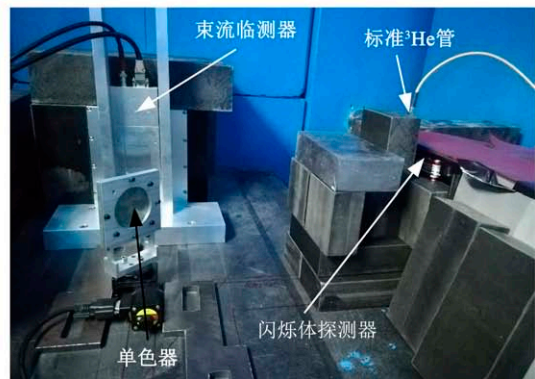
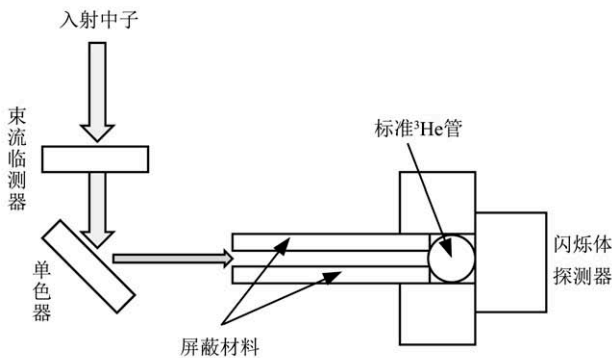


图 2 (在线彩图) 探测效率测试实验布置示意图及现场照片

数, 最终对标准³He管和闪烁体探测器的中子计数归一, 闪烁体探测器探测效率 η_{SD} 可用下列公式计算, 即

$$\eta_{SD} = \frac{N_{SD}}{N_{^3He}} \times \eta_{^3He}, \quad (1)$$

其中, N_{SD} 和 $N_{^3He}$ 分别为归一后的闪烁体探测器和标准³He管中子计数, $\eta_{^3He}$ 为标准³He管探测器的探测效率。

(2) 位置分辨和最高计数率测试

设计的探测器像素大小为4.0 mm×4.0 mm, 通过测试闪烁体探测器对2 mm宽狭缝成像来验证探测器位置分辨与像素大小是否一致, 狭缝由4 mm厚金属铝板加工而成。测试时先将狭缝置于闪烁体探测器之前, 让中子束入射在铝板狭缝上, 依靠金属铝板对热中子的强烈吸收, 形成狭缝宽度的窄中子束, 通过闪烁体探测器对窄中子束的计数形成的图像来确定探测器的位置分辨。另外, 利用此测试, 通过分析探测器的中子事例时间谱, 还可以获得探测器的最高计数率, 具体方法见第3.2节。

(3) 探测器计数不均匀度测试

计数不均匀度指二维位置灵敏探测器各像素之间计数的不均匀性。探测器计数不均匀度与闪烁屏的厚度均匀性、各WLSF的光传输效率、M-PMT各个工作单元增益一致性等相关。谱仪虽然对探测器的面探测效率未提出指标要求, 但该参数会直接影响谱仪在样品测试中各个衍射峰的峰计数比, 从而影响谱仪的分辨率。测试时将4 cm厚的聚乙烯放置于BL20出口使中子束进一步慢化, 并将探测器放置距离出口7 m位置, 通过慢化后中子在闪烁体探测器面上计数分布得到探测器计数不均匀度。为验证入射中子空间分布均匀性, 测试时先用二维多丝正比室(multiwire proportional chamber, MWPC)测试了该位置中子二维分布。

3.2 测试结果及讨论

(1) 探测器探测效率

锗[220]单色器在45°入射条件下, 在测量方向可以获得中子波长为1.4 Å和2.8 Å的单色中子束。分别利用标准³He管和闪烁体探测器测量了单色后的中子飞行时间谱, 由中子飞行时间法能谱计算公式^[11]和德布罗意波长公式^[12]计算得到中子波长 $\lambda(\text{Å})$ 与飞行时间 t 及飞行距离 L 之间关系, 即

$$\lambda(\text{Å}) = \frac{h}{\sqrt{2m_n E_n}} = \frac{h}{m_n} \cdot \frac{t}{L} \approx 3.9558 \cdot \frac{t(\mu\text{s})}{L(\text{mm})}, \quad (2)$$

式中: h 为普朗克常量; m_n 为中子质量。计算得到中子波长谱见图3, 从图中可以明显看到单色后的中子峰(图3插图为其细节图)。

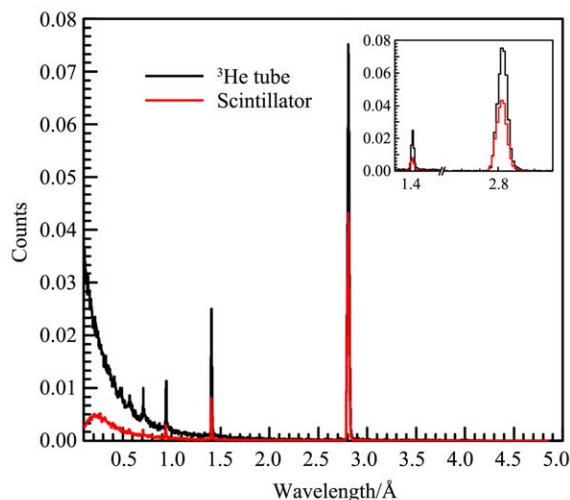


图3 (在线彩图) 标准³He管及闪烁体探测器测得中子波长谱

将两探测器测得的各波长下中子计数分别扣除其本底计数并用束流探测器计数归一后, 得到归一后的计数 N_{SD} 和 $N_{^3He}$, 已知标准³He管对1.4 Å和2.8 Å中子的探测效率 $\eta_{^3He}$ 分别为99.8%和100.0%, 则利用公式(1)计算得到闪烁体探测器对1.4 Å和2.8 Å中子的探测效率分别约为(38.5±1.7)%和(56.1±1.1)%。

实验上只测试了两个中子能量点闪烁体探测器的探测效率, 为了得到验收指标2 Å波长中子的探测效率和更宽波长范围内的探测效率及变化规律, 采用Geant4程序模拟了闪烁体探测器对不同波长中子的探测效率, 并与实验结果对比, 结果见图4。由图中可以看出, 模拟数据和实验结果符合很好, 随着中子波长的增大, 闪烁体探测器的探测效率也逐渐提高, 但效率提高逐渐变缓, 当中子波长大于约7 Å时, 探测效率保持在70%左右。结合实验测试结果和模拟数据, 采用插值法计算得到了闪烁体探测器对2 Å波长中子的探测效率约为(46.1±2.0)%, 满足表1中的验收指标。

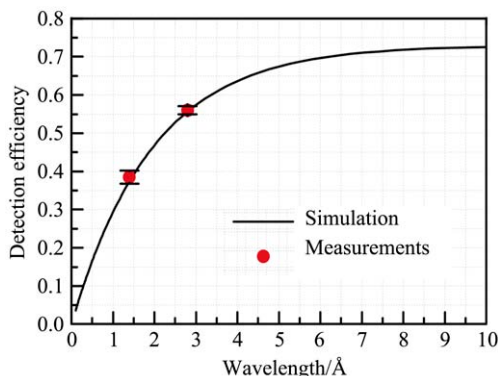


图4 (在线彩图) 不同波长下闪烁体探测器探测效率

(2) 探测器位置分辨和最高计数率

首先, 利用闪烁体探测器测量了BL20中子束线准直中子束的束斑, 测得的束斑图像如图5所示, 由图中的测试图像可以看出, 束斑图像直径略大于20 mm, 考虑中子的散射影响, 测量值和BL20中子束线的设计值

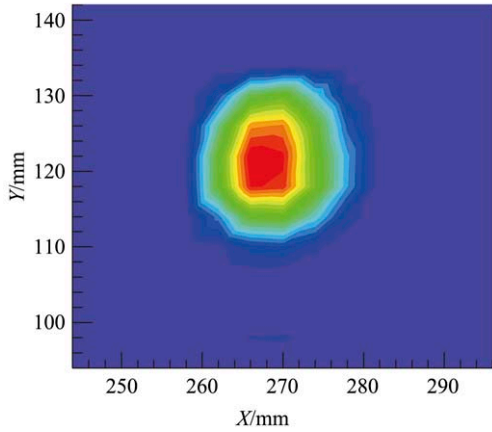


图 5 (在线彩图) 闪烁体探测器测得BL20束斑图像

$\phi 20\text{ mm}$ 基本一致, 说明闪烁体探测器对中子束有良好的响应。

将狭缝垂直于X方向放置, 利用闪烁体探测器开展了狭缝图像的测试, 图6(a)为测得的狭缝图像, 狭缝高度略大于20 mm, 靠近束斑中心, 证明了探测器具有良好二维成像能力。将闪烁体探测器沿其X负方向移动4.0 mm(即一个像素), 移动前后狭缝图像计数沿X方向的分布如图6(b)所示。从结果可以看出, 2.0 mm狭缝投影出来的图像宽度为4.0 mm, 探测器移动4.0 mm后, 狭缝图像在X方向也移动了4.0 mm, 且狭缝投影图像宽度不变。由此可以证明, 探测器X方向位置分辨为4.0 mm, 与像素大小一致。

将狭缝垂直于Y方向放置, 采用同样方法测试闪烁体探测器Y方向位置分辨, 探测器移动前测得狭缝图像如图6(c)所示, 图6(d)为移动前后狭缝图像计数沿Y方向的分布, 结果与X方向基本一致, 探测器Y方向位置分辨为4.0 mm。故闪烁体探测器二维位置分辨为4.0 mm \times 4.0 mm, 满足表1中的指标要求。

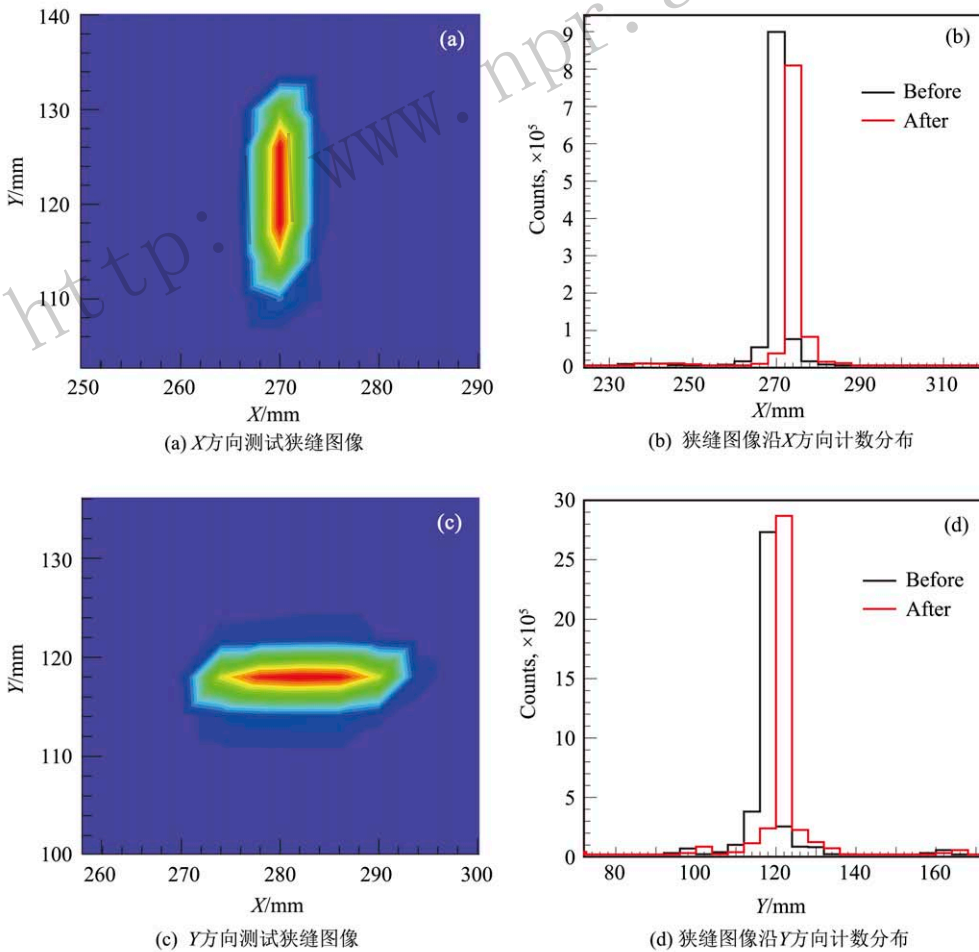


图 6 (在线彩图) 位置分辨测试结果

分析探测器位置分辨测试的中子事例时间谱即可得到探测器最高计数率。图 7 为测试 Y 方向位置分辨时的中子飞行时间谱。由中子物理组测试 BL20 出口中子飞行时间谱可知^[13]，束流出口中子注量率随飞行时间增加呈下降趋势。如图 7 示，当飞行时间小于 6 000 μs 时，中子注量率较高，探测器处于过饱和状态，由于位置重建算法会将 X-Y 符合时间内有多次击中事例丢弃，所以在饱和区随着中子注量率降低，X-Y 符合时间内多次击中事例减少，探测器有效中子事例数呈上升趋势。在 6 000 μs 左右，探测器处于饱和与非饱和的临界状态，

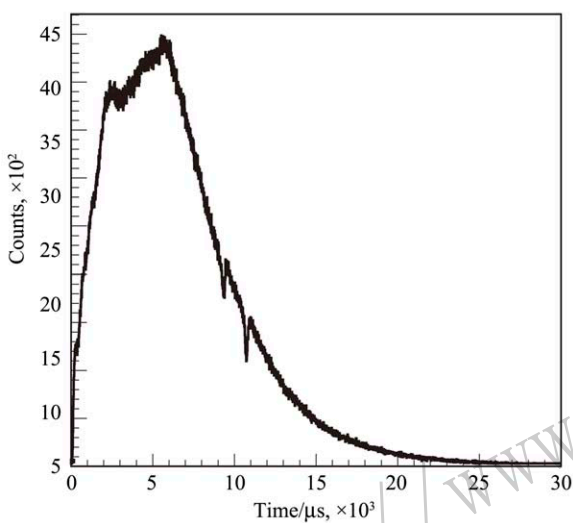


图 7 (在线彩图) 位置分辨测试(Y方向)得到中子飞行时间谱

经计算此时计数率为 79 kHz，即为探测器最高计数率，达到了表 1 中的指标要求。

(3) 探测器计数不均匀度

BL20 出口中子被 4 cm 厚聚乙烯慢化后，首先用 MWPC 在距束流出口 7 m 位置测试了波长大于 1 Å 中子的空间均匀性，结果如图 8 所示，波长大于 1 Å 中子总体上分布均匀。然后将闪烁体探测器置于该位置测试同样条件下的中子二维分布，结果如图 9(a) 所示，图中有些 X 和 Y 通道计数差别较大。根据实验测得探测器中子信号电荷谱，可以通过在一定范围内调整各通道电子学阈值改变其探测效率，优化探测器计数不均匀度。图 9(b) 为多次修改各通道阈值后测试的中子二维位置图，优化后探测器整体均匀性得到改善。图 9(c) 和(d) 分别 X 方向和 Y 方向阈值优化前后中子计数分布对比图，从结果可以看出，优化后 X 和 Y 方向计数不均匀度得到较大改善。

探测器计数不均匀度 U_{SD} 可由下列公式计算，即

$$U_{SD} = \frac{1}{\bar{X}} \sigma \tag{3}$$

其中： \bar{X} 和 σ 为闪烁体探测器所有像素计数的平均值和标准差。计算得到优化前后 U_{SD} 分别为 19.6% 和 14.9%。优化后探测器计数不均匀度得到较大改善，对提高谱仪分辨率有重要意义。测试还发现，探测器在 X 方向存在一个坏道，是由电子学通道问题导致。

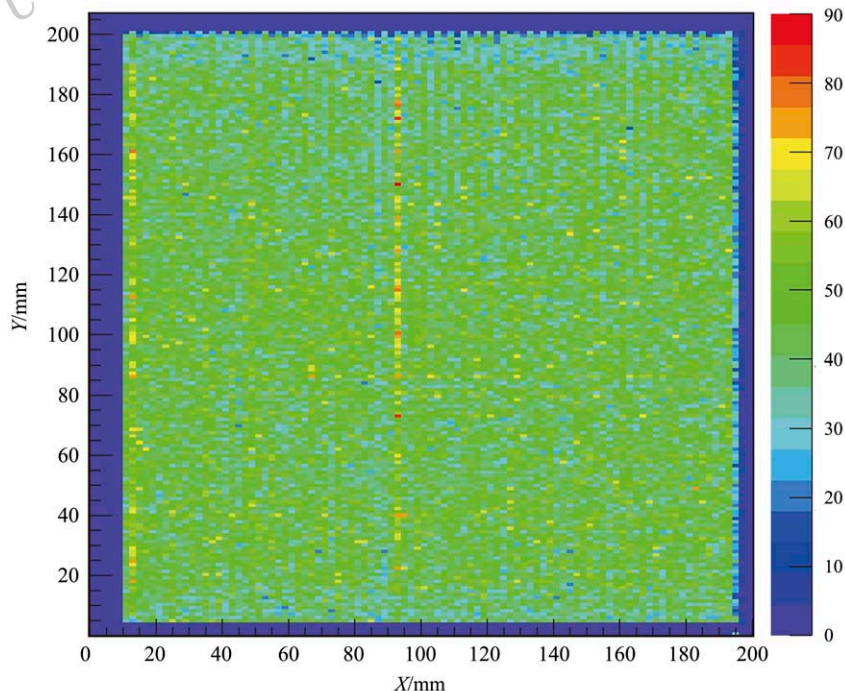


图 8 (在线彩图) MWPC 测得聚乙烯慢化后波长大于 1 Å 中子二维分布

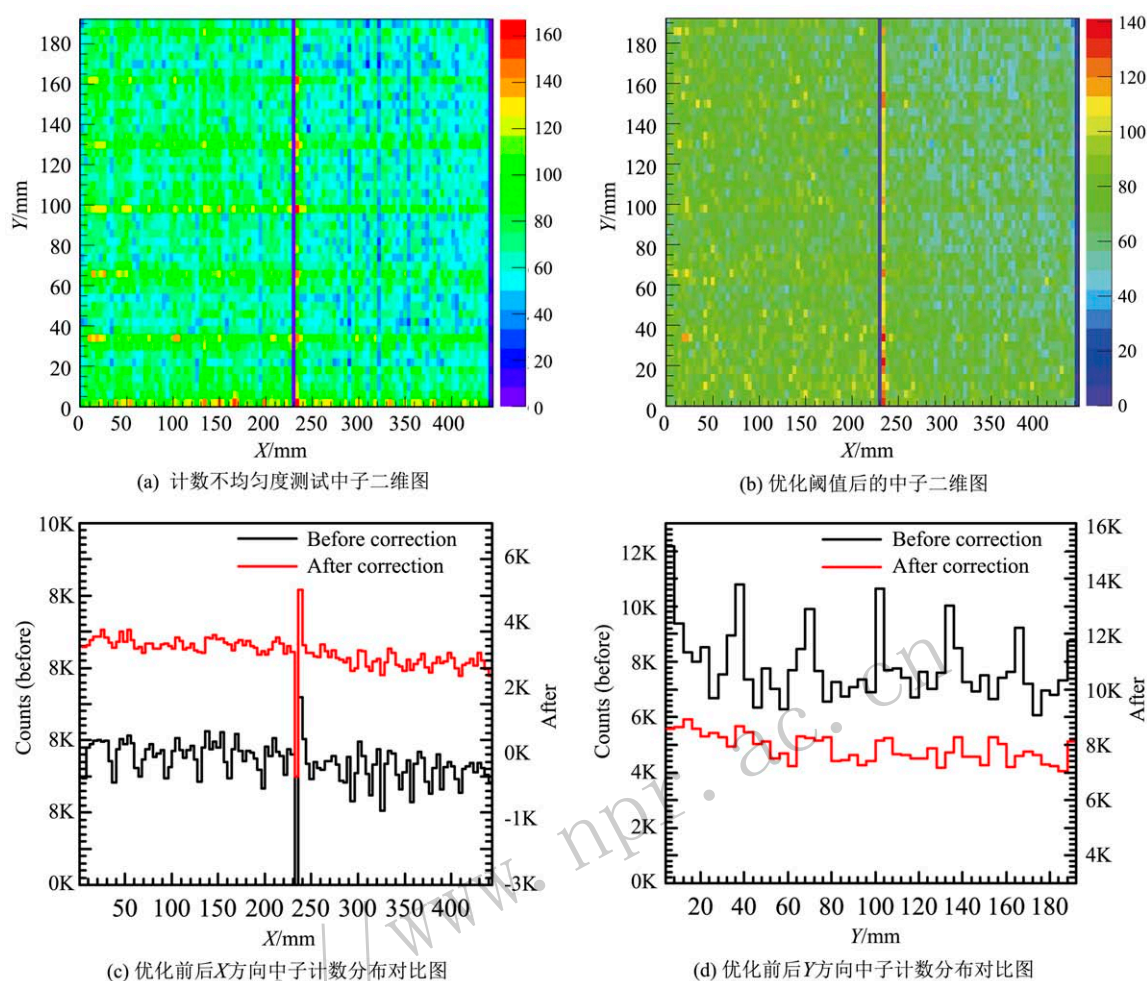


图 9 (在线彩图) 探测器计数不均匀度测试及优化结果

4 总结与展望

针对所研制的用于通用粉末衍射谱仪的大面积闪烁体探测器, 在 CSNS 的 BL20 慢化准直中子束线上开展了探测器探测效率、二维位置分辨、计数不均匀度等重要性能参数的实验测试研究, 结果显示, 探测器对波长为 1.4 \AA 和 2.8 \AA 的单能中子, 其探测效率分别为 $(38.5 \pm 1.7)\%$ 和 $(56.1 \pm 1.1)\%$, 通过模拟并结合实验测试数据, 推算出对 2 \AA 的单能中子, 此探测器的效率约为 $(46.1 \pm 2.0)\%$, 有效面积内计数不均匀度约为 19.6% , 经优化后可以降低到 14.9% 。探测器 X 方向和 Y 方向的二维位置分辨可以达到 $4.0 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$, 探测器最高计数率约 79 kHz 。测试表明, 所研制的大面积闪烁体探测器的整体性能指标能满足 GPPD 的物理需求。

当前 38 台闪烁体探测器单元已全部安装在 GPPD, 工作稳定。但探测器仍存在一些待解决问题: (1) 某些探测器个别通道出现坏道; (2) 探测器有些通道增益过

低, 修改阈值无法解决均匀性问题。针对以上问题, 下一步工作将进一步排查探测器出现坏道的原因, 寻找解决办法, 并尝试用硅光电倍增管 (Silicon Photomultiplier, SiPM) 阵列替代 M-PMT。

参考文献:

- [1] HAN Songbai, LIU Yuntao, CHEN Dongfeng. Chinese Science Bulletin, 2015, **60**(22): 2068. (in Chinese)
(韩松柏, 刘蕴韬, 陈东风. 科学通报, 2015, **60**(22): 2068.)
- [2] CHEN Hesheng. Modern Physics, 2016, **66**: 1726. (in Chinese)
(陈和生. 现代物理知识, 2016, **66**: 1726.)
- [3] TANG Junjie, WANG Tuo, ZHANG Qiang, et al. Chinese Journal of Luminescence, 2013, **34**(1): 78. (in Chinese)
(唐军杰, 王拓, 张强, 等. 发光学报, 2013, **34**(1): 78.)
- [4] OHSHITA H, UNO S, OTOMO T, et al. Nucl Instr and Meth A, 2010, **623**(1): 126.
- [5] COOPER R G. Nucl Instr and Meth A, 2004, **529**: 394.
- [6] CZIRR J B, MCKNIGHT T K. Nucl Instr and Meth A, 2004, **529**: 268.

- [7] SAKASAI K, NAKAMURA T, KATAGIRI M, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2009, **600**(1): 157.
- [8] XIAO Y G, LIU T C, LIU J J, *et al.* *Nano Energy*, 2018 **49**: 77.
- [9] NAKAMURA T, SCHOONEVELD E M, RHODES N J, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2009, **606**: 675.
- [10] WANG C L, CLONTS L G, DIAWARA Y, *et al.* *Review of Scientific Instruments*, 2013, **84**(1): 127.
- [11] JI Changsong. Neutron Detection[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2014: 323. (in Chinese)
- (汲长松. 中子探测[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2014: 323.)
- [12] Xu Yadi. Physics and Engineering, 2011, **21**(3): 4. (in Chinese)
- (许亚娣. 物理与工程, 2011, **21**(3): 4.)
- [13] ZHAO Zongfang. Study on Measurement Method and Technology of Neutron Beam Parameters for China Spallation Neutron Source[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018. (in Chinese)
- (赵宗方. 中国散裂中子源中子束参数测量方法与技术研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.)

Performance Test of the Array Scintillator Detector with a Large Area for GPPD

HUANG Chang^{1,2,3}, TANG Bin^{2,3,†}, LIU Yun^{2,3}, CHEN Shaojia^{2,3}, WANG Xiuku^{2,3},
SUN Zhijia^{2,3,4}, CHEN Yuanbo^{2,3}, YAO Zeen^{1,†}

(1. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Dongguan Branch, Dongguan 523803, Guangdong, China;

3. Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, Guangdong, China;

4. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049, China)

Abstract: The construction of Chinese Spallation Neutron Source (CSNS) laid the foundation for the development and application of neutron scattering technology General Purpose Powder Diffractometer (GPPD), which is one of the three spectrometers of CSNS in the first phase. The large area scintillator detector array for GPPD was developed and the key performance parameters of the detector has been tested on the BL20 of CSNS. The test results showed that the detection efficiency for 1.4 Å and 2.8 Å neutrons is (38.5±1.7)% and (56.1±1.1)% respectively. In accordance with simulation results, the detection efficiency is about (46.1±2.0)% for 2.0 Å neutrons. The position resolution of the detector is 4.0 mm×4.0 mm, the maximum counting rate is about 79 kHz and the count nonuniformity is about 19.6% and reduced to 14.9% after optimization. The performance of the detector unit can fulfill the physical requirements of GPPD.

Key words: CSNS; GPPD; scintillator detector; detection efficiency; position resolution

Received date: 14 Sep. 2018; **Revised date:** 9 Dec. 2018

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(U1832111, 11875273); Natural Science Foundation of Guangdong Province(2016A030313126, 2015A030310006)

† **Corresponding author:** TANG Bin, E-mail: tangb@ihep.ac.cn; YAO Zeen, E-mail: zeyao@lzu.edu.cn.