

文章编号: 1007-4627(2019)01-0071-07

基于 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 转换体的多层多丝正比室中子探测器模拟

田立朝¹, 赵子甲¹, 陈忠^{1, 2, 3}, 姜静¹, 吕中良¹, 马燕云¹

(1. 国防科技大学文理学院, 长沙 410073;

2. 西南科技大学, 四川 绵阳 621010;

3. 中国科学院中子输运理论与辐射安全重点实验室, 合肥 230031)

摘要: 随着国内高通量中子源及中子散射谱仪的快速发展, 对高探测效率、高位置分辨、低伽玛灵敏度的位置灵敏型热中子探测器需求日益迫切。目前国际上中子散射谱仪大多数采用了基于 ^3He 的热中子探测器, 由于当前 ^3He 价格昂贵, 寻求 ^3He 替代型热中子探测器的相关研究任务紧迫。提出了一种基于 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 转换体的多层多丝正比室新型二维位置灵敏型热中子探测器, 并利用蒙特卡罗模拟软件 Geant4 和 Garfield++ 对其探测效率、位置分辨、 n/γ 抑制比等性能展开了详细的模拟研究。结果表明, 当多丝正比室单元为 40 层, 阈值为 200 keV 时, 热中子 ($E = 0.025$ eV) 探测效率可达到 $\sim 54\%$, 位置分辨为 2.6 mm (FWHM), n/γ 抑制比为 $\sim 10^7$, 可以满足大多数中子散射谱仪的需求, 为此类探测器设计及实验研究提供了理论依据。

关键词: 涂硼; 热中子探测器; 多丝正比室; 模拟

中图分类号: O571.53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/ NuclPhysRev.36.01.071

1 引言

中子是研究材料内部结构的理想探针之一, 中子散射技术在材料科学、生命科学等方面具有非常广泛的应用^[1]。随着国内反应堆中子谱仪和散裂中子源谱仪的陆续建成, 对大面积、高效率、高位置分辨、低 γ 灵敏度的二维位置灵敏热中子探测器需求越来越迫切^[2-3]。国际上, 早期的中子散射谱仪几乎全部采用基于 ^3He 气体的热中子探测器。

近些年, 由于 ^3He 资源的紧缺, 科研人员开始研究取代 ^3He 的新型热中子探测器。由于 ^{10}B 与热中子(文中提到的热中子能量均为 0.025 eV) 具有很大的反应截面 (~ 3800 b), 且在自然界中丰度较高 (19.8%), 易于提纯, 成为取代 ^3He 气体的首选对象。目前国际上已陆续研制出基于 ^{10}B 的正比计数管、GEM 探测器、稻草管探测器等^[4-7]。

本文提出一种基于 ^{10}B 转换体的多层多丝正比室新型结构二维位置灵敏型热中子探测器, 并利用蒙特卡罗方法对其物理特性进行了模拟计算, 表明该结构探测器具有探测效率高、位置分辨好、低 γ 灵敏度等优点, 可以满足中子散射谱仪的需求。

2 探测器基本结构

探测器由多个多丝正比室单元组成, 每个单元基本结构示意图如图 1 所示。

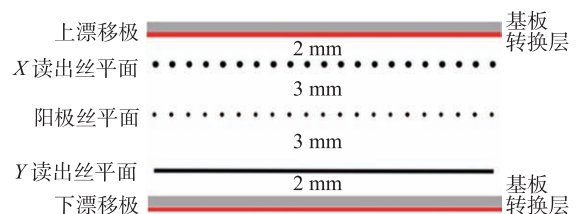


图 1 (在线彩图) 单层多丝正比室单元基本结构示意图

由上往下依次为上漂移极、X 读出丝平面、阳极丝平面、Y 读出丝平面以及下漂移极, 各平面间距依次为 2, 3, 3, 2 mm。其中, 上漂移极由 100 μm 厚的铝箔上涂一层 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 组成, 兼作本单元的中子转换层, 工作高压为负高压; 阳极丝平面由一组间距为 2 mm、直径为 25 μm 的镀金钨丝组成, 工作高压为正高压; X 读出丝平面由间距为 2 mm、直径为 50 μm 的镀金钨丝组成, 方向与阳极丝平行, 地电位; Y 读出丝平面由间距为 2 mm、直径为 50 μm 的镀金钨丝组成, 方向与阳极丝垂直, 地电位; 下漂移极由 100 μm 铝箔上涂一层 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 组成, 兼作下一个多丝正比单元的漂移极和中

收稿日期: 2018-06-07; 修改日期: 2018-07-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11505287); 特殊环境机器人技术四川省重点实验室项目 (17kftk01); 中国科学院中子输运理论与辐射安全重点实验室项目 (NEUTRON201707)

作者简介: 田立朝 (1984-), 男, 河北石家庄人, 讲师, 博士, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: tianlichao@nudt.edu.com

子转换层,工作高压为负高压。各平面组合在一起密封在一个铝合金容器内,工作气体为Ar/CO₂ (90/10)混合气体^[8]。

3 模拟工具及程序框架

利用蒙特卡罗模拟软件Geant4.10.03和Garfield++对探测器的物理性能进行了系统模拟研究。Geant4是由欧洲核子中心开发的广泛应用于粒子物理、核物理、天体物理等领域的大型蒙特卡罗模拟程序,可模拟大部分已知粒子与物质的各种相互作用,并可跟踪记录每一步的粒子信息,包括粒子能量、动量、位置等等^[9]。Garfield++是主要应用于气体探测器和半导体探测器模拟的程序包,可根据探测器结构计算内部电场分布,并可以详细跟踪电子、离子的漂移、扩散、吸附、电子的雪崩放大、感应信号的计算等物理

过程^[10]。由于Geant4适用的最小电子能量为100 eV,而且不能计算电场分布,因此不能完整地模拟探测器中的整个物理过程。本文通过Geant4和Garfield++的有机结合实现全物理过程模拟。模拟流程如图2所示。Geant4强子物理过程QGSP_BERT_HP过程包含了中子的弹性散射、非弹性散射和中子俘获等物理过程,适用于低能中子的精确模拟计算^[11-13]。利用该物理过程及电磁相互作用过程获得中子被¹⁰B俘获后释放的次级离子进入工作气体时的能量、出射方向以及在工作气体中的沉积能量分布,将该信息导入Garfield++程序中,根据气体中的沉积能量分布产生原初电子-离子对,原初电离电子在电场作用下漂移到阳极丝附近产生雪崩,雪崩后的正离子向漂移极漂移,同时在X和Y方向读出丝上产生感应信号,通过重心法获得中子的入射位置。

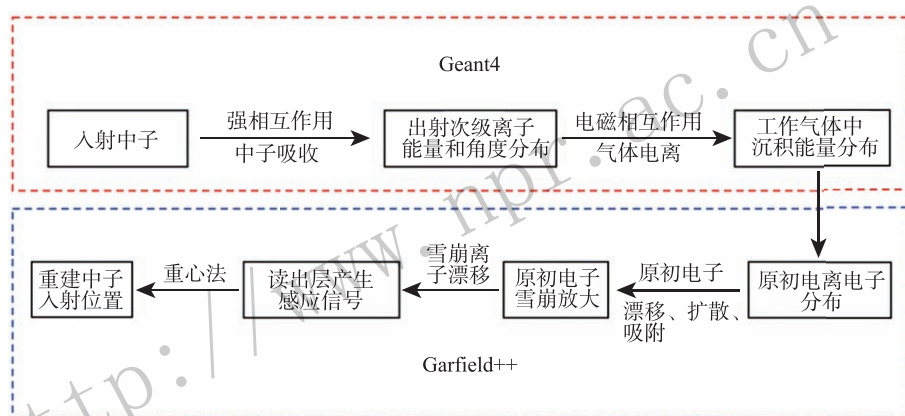


图2 (在线彩图) 蒙特卡罗模拟流程图

4 模拟结果

对中子探测效率、位置分辨及 γ 灵敏度进行了模拟计算。Geant4程序中漂移极基板厚度为100 μm ,材质为天然丰度的铝,密度为2.7 g/cm^3 ;转换层材质为¹⁰B丰度为100%的碳化硼,密度为2.34 g/cm^3 ;工作气体是体积比为90:10的Ar/CO₂混合气体,气体压强为 1.013×10^5 , 2.026×10^5 , 3.039×10^5 和 4.052×10^5 Pa时对应的密度分别为1.8, 3.6, 5.4和7.2 mg/cm^3 。Garfield++程序按照图1中几何尺寸进行1:1建模,两个漂移极位于 $x=0$ 和 $x=1$ cm平面内,工作电压为-1200 V; X读出丝位于 $x=0.2$ cm平面内,方向与纸面垂直,地电位;阳极丝位于 $x=0.5$ cm平面内,方向与纸面垂直,工作电压为+1800 V; Y读出丝位于 $x=0.8$ cm平面内,方向与纸面平行,地电位。中子从(0, -0.05 cm, 0)位置垂直于漂移极平面入射,被¹⁰B俘获释放的 α 粒子进入工作气体后引起的电离、漂移如

图3所示,原初电子沿着电场线向阳极丝运动,最后在阳极丝表面发生雪崩后被阳极丝吸附。

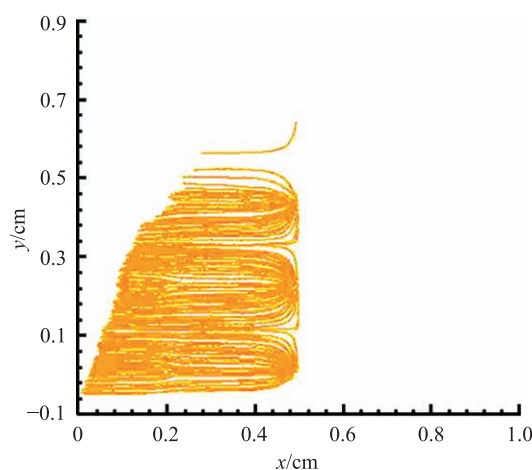
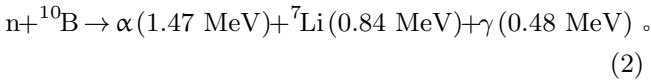
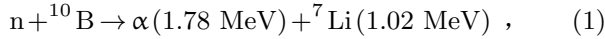


图3 (在线彩图) Garfield++模拟中子被俘获后释放的 α 在气体中产生原初电离电子漂移示意图

4.1 探测效率

热中子在转换层被 ^{10}B 俘获，生成 α 和 Li 离子，反应式如式(1~2)所示，分支比为 6:94^[14]：



热中子探测效率可用公式 $\varepsilon = \varepsilon_c \cdot \varepsilon_{\text{ion}}$ 表示，其中 ε_c 表示中子转换成次级带电离子的效率，即中子被 ^{10}B 俘获并释放出 α 和 Li 离子的概率， ε_{ion} 表示离子的探测效率，即核反应生成的 α 或 Li 离子进入多丝正比室工作气体内并沉积足够能量(如 $>200 \text{ keV}$) 的概率。通过记录在多丝正比单元中的沉积能量，计算过阈粒子数与入射粒子数比值即可得到中子探测效率。

由动量守恒定律， α 和 Li 离子将向相反的方向运动，其中一个离子被转换层吸收，另一个离子进入多丝

正比室单元被探测到。中子转换效率随着 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 层厚度增加而增加，但由于 α 和 Li 离子在 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 中的平均射程很短 ($\sim 3.6 \mu\text{m}$, $\sim 1.9 \mu\text{m}$)，其进入工作气体中前会有部分能量损失在 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 层内，导致在气体中沉积能量减少，如图4(a)所示。为了保证其可以穿过 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 层进入工作气体， $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 层不能太厚，为了提高热中子探测效率，必须增加转换层数目。利用 Geant4 程序模拟了热中子探测效率随着转换层数目及 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 厚度的变化关系。从图4(b)中可以看出，随着 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 厚度的增加，热中子探测效率先增加后减小，存在一个最优厚度。随着中子转换层数目的增加， $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 的最优厚度在逐渐减小，而且为保证热中子探测效率的均匀性，对 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 的厚度均匀性要求也越高。当中子转换层数目为 40 层时，最佳厚度为 $1 \mu\text{m}$ ，阈值为 200 keV 时，热中子探测效率为 54%。

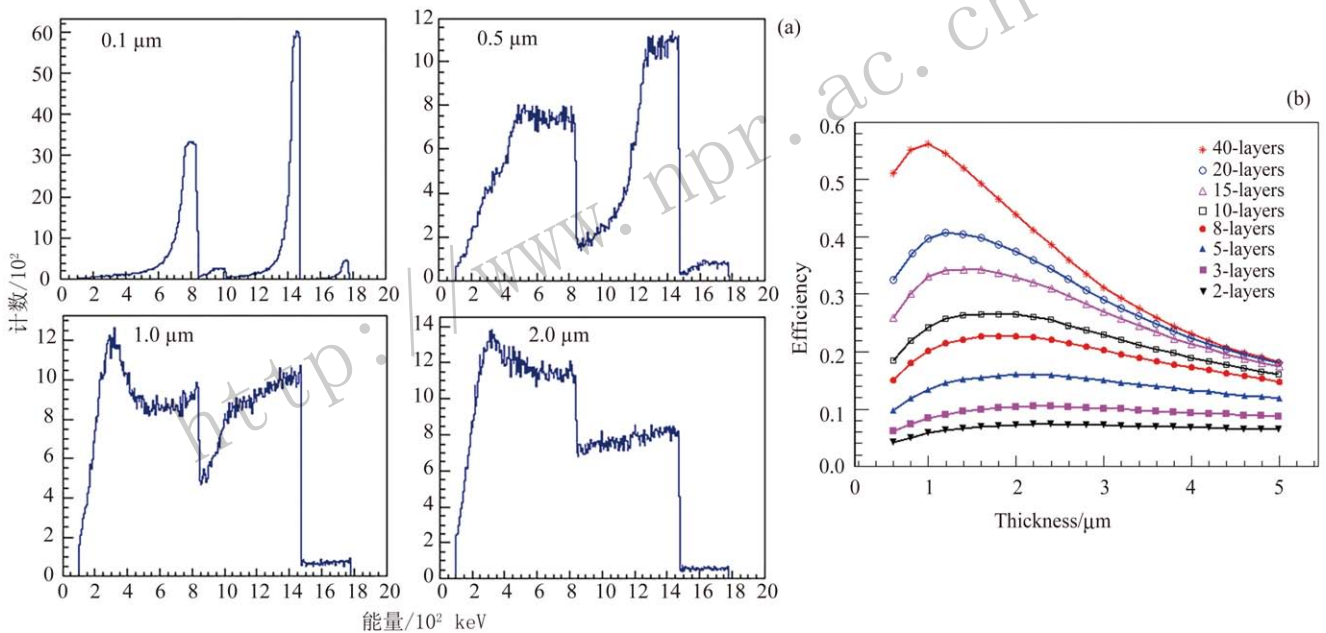


图 4 (在线彩图) Garfield++ 模拟的次级离子在气体中的沉积能量(a) 以及热中子探测效率(b) 随 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 厚度变化关系 (Geant4.10.03, $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 密度为 2.34 g/cm^3)

4.2 位置分辨及二维成像

中子的位置分辨与次级离子在气体中的射程密切相关，次级离子在工作气体中的射程越长，原初电离中心偏离中子俘获位置越远，位置分辨将越差。首先比较了利用 Geant4 和 SRIM^[15] 得到的 1.47 MeV α 粒子在标准大气压工作气体中的沉积能量分布，二者吻合得非常好，如图 5 所示。接着模拟了多丝正比单元为 40 层时的中子位置分辨率，通过记录读出平面各读出丝上的感应电荷，利用重心法重建中子入射位置，得到不同气体

压强对应的中子位置分辨率，如图 6 所示，当气体压强为 1.013×10^5 , 2.026×10^5 , 3.039×10^5 和 $4.052 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时，对应的中子位置分辨率 (FWHM) 分别为 2.61 , 1.37 , 0.92 , 0.72 mm 。

同时，为了研究探测器的二维成像能力，一束平行中子束垂直照射到放置在探测器入射窗前的厚度为 2 mm “H” 字母镂空的镅片上，字母笔画宽度为 1 mm ，随着气体压强增加，重建二维成像的字母边缘也越清晰，如图 7 所示。

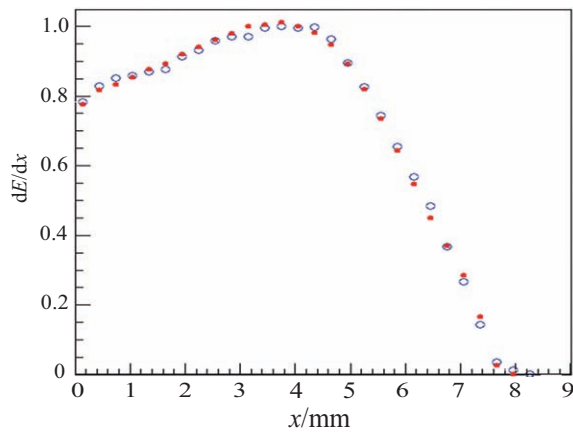


图 5 (在线彩图) 1.47 MeV α 粒子在工作气体中的沉积能量分布
 气体成分: Ar/CO₂ (90/10), 密度: 1.8 mg/cm³。图中数据已归一化, Geant4: 蓝色空心圆圈, SRIM: 红色实心圆点。

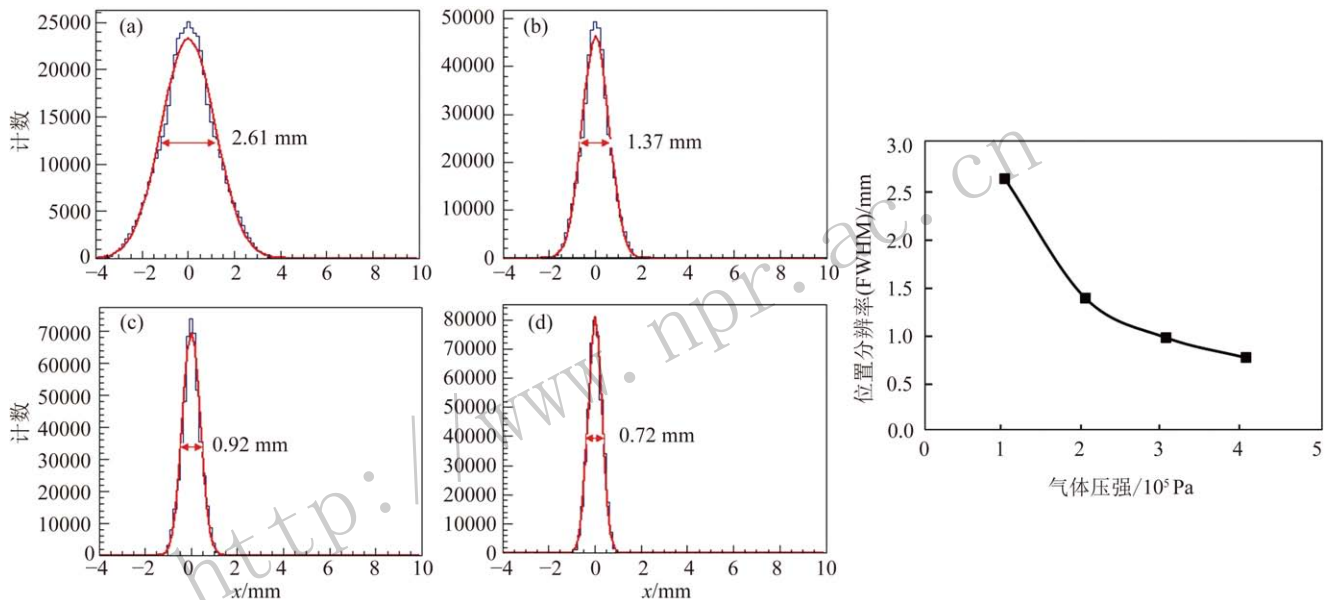


图 6 (在线彩图) Geant4 联合 Garfield++ 程序模拟获得中子位置分辨随工作气压的变化关系
 探测器采用 40 层结构, ¹⁰B₄C 厚度 1 μ m, 密度 2.34 g/cm³, 工作气体 Ar/CO₂ (90/10), 密度依次为 1.8, 3.6, 5.4, 7.2 mg/cm³; Garfield++ 中阳极电压 +1 800V, 阴极电压 -1 200 V。

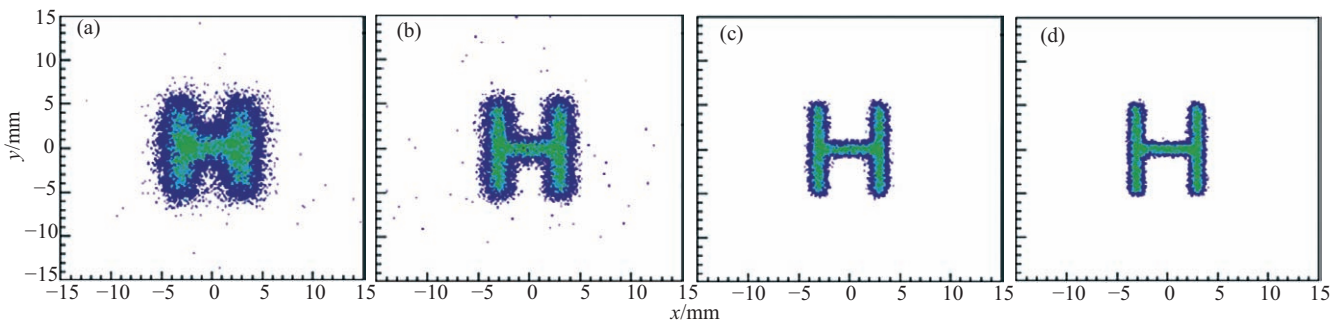


图 7 (在线彩图) Geant4 联合 Garfield++ 程序模拟获得探测器二维成像能力随工作气压的变化关系 (模拟条件同图 6)

4.3 γ 灵敏度

中子测量环境中会含有大量的 γ 本底, 其中部分来自于中子与周围物质的非弹性散射, 能量为 MeV 左右, 另一部分来自于中子与 ¹⁰B 反应释放的 γ 射线, 能量

为 480 keV。这些 γ 射线将对热中子探测带来一定的干扰。程序模拟了探测器对 ¹³⁷Cs 释放的 γ 射线的响应。 γ 射线与物质相互作用产生的次级电子相对于中子俘获释放的重离子为弱电离粒子, 在探测器工作气体中沉积能量较低, 如图 8(a) 所示, 通过选择恰当的能量阈

值, 可以将 γ 射线与中子有效区分开, 但同时也会损失部分热中子探测效率。图 8 (b) 表示了对于 40 层多丝正比室单元不同工作气体压强时, 中子和 γ 射线的探测效率随着能量阈值的变化关系, 阈值越高, 气体压强越小, γ 射线探测效率越低。将中子和 γ 射线探测效率的比值定义为 n/γ 抑制比, 不同条件下的 n/γ 抑制比

见表 1。模拟结果显示, 随着气体压强增加, 中子位置分辨率变好的同时由于 γ 射线在气体中沉积能量增加, n/γ 抑制比将变差。当气体压强为 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$, 能量阈值为 200 keV 时, 热中子探测效率大于 54%, n/γ 抑制比好于 10^7 。 n/γ 抑制比与其他气体类中子探测器相当^[16], 好于闪烁体类探测器^[17]。

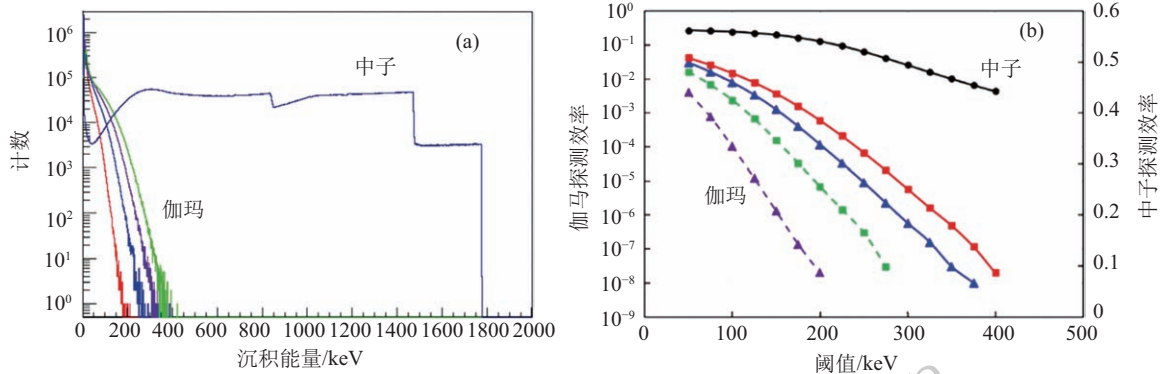


图 8 (在线彩图) Geant4 模拟获得中子和 γ 在探测器中不同气压下的沉积能量分布 (a) 以及中子和 γ 探测效率随阈值的变化关系 (b) (探测器采用 40 层结构, $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 厚度 $1 \mu\text{m}$, 密度 2.34 g/cm^3 , 工作气体 $\text{Ar}/\text{CO}_2(90/10)$, 密度依次为 $1.8, 3.6, 5.4, 7.2 \text{ mg/cm}^3$)

表 1 Geant4 模拟获得 n/γ 抑制比随气体压强的变化关系

气压/Pa	n/γ 阈值							
	50 keV	100 keV	150 keV	200 keV	250 keV	300 keV	350 keV	400 keV
1.013×10^5	1.4×10^2	5.4×10^3	4.2×10^5	2.7×10^7				
2.026×10^5	3.4×10^1	2.3×10^2	3.6×10^3	7.8×10^4	1.7×10^6			
3.039×10^5	1.9×10^1	7.2×10^1	4.4×10^2	4.7×10^3	5.8×10^4	8.5×10^5	1.6×10^7	
4.052×10^5	1.3×10^1	3.8×10^1	1.5×10^2	9.0×10^2	7.6×10^3	8.2×10^4	9.3×10^5	2.2×10^7

5 中子源测试

探测器样机在 ^{252}Cf 裂变中子源上进行了初步测试, 中子发射率为 $2.86 \times 10^6 \text{ Bq}$ (标定时间 2010.02)。中子源屏蔽体中开有一条内径为 10 cm 的水平中子束引出孔

道。为了对中子进行充分慢化, 设计了直径为 10 cm、长度为 8 cm 的圆柱形聚乙烯作为中子慢化体插入水平孔道, 在探测器入射窗前放置了一块刻有 2 mm 宽狭缝的铝板用于吸收热中子, 铝板厚度为 2 mm。

图 9 为中子源测试结果, 图 (a) 为二维散点图, 可

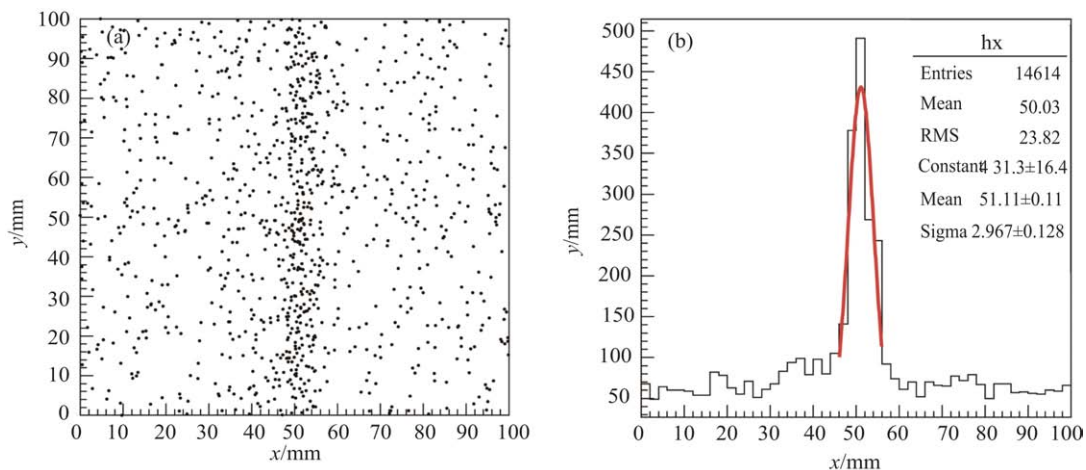


图 9 (在线彩图) 中子测试二维散点图及位置分辨

以清楚地看到狭缝位置, 图(b)为散点图在 x 方向上的投影, 在未扣除狭缝宽度影响的情况下进行高斯拟合后获得位置分辨约为 $\text{FWHM} = 2.964 \times 2.355 = 6.98 \text{ mm}$, 与模拟结果有一定差距。主要原因是经过慢化体后的中子出射角为连续分布, 斜入射中子存在较大比例, 中子穿过狭缝与 ^{10}B 发生核反应的位置和狭缝位置有所偏差; 此外, 慢化后的中子能量为连续分布, 大量的慢中子对探测器的位置分辨率测量带来影响, 导致测试结果较差。下一步工作将继续完善探测器样机性能测试, 在反应堆或加速器中子源上利用准直热中子束线对探测器样机的探测效率、不同气体压强下的位置分辨率以及 n/γ 抑制比等物理性能进行系统测试, 预计将获得较好的测试结果。

6 结论

为了满足国内中子散射谱仪对热中子探测器的迫切需求, 提出了一种基于 ^{10}B 转换体的多层多丝正比室热中子探测器, 并利用蒙特卡罗模拟程序 Geant4.10.03 和 Garfield++ 对探测器的物理性能进行了系统的模拟研究。模拟结果显示, 当探测器结构为 40 层, 工作气体为 Ar/CO_2 (90/10 混合气体), 气压为 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时, 热中子探测效率大于 54%, 中子位置分辨为 2.6 mm (FWHM), n/γ 抑制比好于 10^7 , 可以满足大多数中子散射谱仪的要求, 为此类探测器的设计与实验研究提供了理论基础。

参考文献:

- [1] YE Chuntang, LIU Yuntao. *Physics*, 2006, **35**(11): 961. (in Chinese)
(叶春堂, 刘蕴韬. *物理*, 2006, **35**(11): 961.)
- [2] LIU Yuntao, CHEN Dongfeng. *Physics*, 2013, **42**(8): 534. (in Chinese)
(刘蕴韬, 陈东风. *物理*, 2013, **42**(8): 534.)
- [3] CHEN Hesheng. *Modern Physics*, 2016, **38**(1): 3. (in Chinese)
(陈和生. *现代物理知识*, 2016, **38**(1): 3.)
- [4] KOUZES R T, ELY J H, ERIKSON L E, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2010, **623**(3): 1035.
- [5] WANG Yanfeng, SUN Zhijia, ZHOU Jianrong, *et al.* *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2013, **56**(10): 1987.
- [6] JEFFREY L, ATHANASIADES A, SUN Liang, *et al.* *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record[C]*. Orlando:IEEE, 2009: 119.
- [7] XIE Zhaoyang, ZHOU Jianrong, SONG Yushou, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2018, **888**: 235.
- [8] WANG Xiaohu, ZHU Qiming, CHEN Yuanbo, *et al.* *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 2009, **29**(4): 756. (in Chinese)
(王小胡, 朱启明, 陈元柏, 等. *核电子学与探测技术*, 2009, **29**(4): 756.)
- [9] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, *et al.* 2003, **506**: 250.
- [10] Available on the web <http://garfieldpp.web.cern.ch/garfieldpp>.
- [11] VAN DER ENDE B M, ATANACKOVIC J, ERLANDSON A, *et al.* *Nucl Instr Meth A*, 2016, **820**: 40.
- [12] VAN DER ENDE B M, RAND E T, ERLANDSON A, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2018, **894**: 138.
- [13] JAMIL M, RHEE J T, KIM H G, *et al.* *Applied Radiation and Isotopes*, 2015, **95**: 90.
- [14] ANDERSEN K, BIGAULT T, BIRCH J, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2013, **720**: 116.
- [15] Available on the web <http://www.srim.org/>.
- [16] NELSON K A, BELLINGER S L, BENJAMIN W, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2012, **669**: 79.
- [17] NAKAMURA T, KAWASAKI T, HOSOYA T, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2012, **686**: 64.

Simulation of a Novel Neutron Detector Based on Multi-layer MWPC with $^{10}\text{B}_4\text{C}$ Converter

TIAN Lichao^{1,1)}, ZHAO Zijia¹, CHEN Zhong^{1, 2, 3}, JIANG Jing¹, LÜ Zhongliang¹, MA Yanyun¹

(1. College of Liberal Arts and Sciences, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Southwest University of Science and Technology, Mianyan 621010, Sichuan, China;

3. Key Laboratory of Neutronics and Radiation Safety of CAS, Hefei 230031, China)

Abstract: As the development of high flux neutron sources and neutron scattering spectrometers in China, more and more neutron detectors with high detection efficiency, high position resolution, high time resolution and low gamma sensitivity are need ungently. ^3He based neutron detector is one of the best options. Recently, because of the ^3He gas shortage and its expensive price, we must find a new replacement of ^3He . A two-dimensional position sensitive neutron detector based on multi-layer Multi Wires Proportional Chambers (mMWPC) with $^{10}\text{B}_4\text{C}$ converter was proposed in this paper. The neutron detection efficiency, position resolution and γ compression were simulated with Geant4 and Garfield++. The results show that with 40 layers of neutron converter, high thermal neutron ($E = 0.025$ eV) detection of $\sim 54\%$, best position resolution of 2.6 mm (FWHM) and high n/ γ rejection ratio of $\sim 10^7$ with the threshold of 200 keV can be achieved, which can meet the requirements of most spectrometers. This simulation results lay a good foundation for the next step of detector construction and test.

Key words: boron coated; thermal neutron detector; MWPC; simulation

Received date: 7 Jun. 2018; **Revised date:** 22 Jul. 2018

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11505287); Fun of Robot Technology Used for Special Environment Key Laboratory of Sichuan Province (17kftk01); Opening Foundation of Key Laboratory of Neutronics and Radiation Safety of CAS (NEUTRON201707)

1) E-mail: tianlichao@nudt.edu.cn.