



Study on Thermal Neutron Sensitivity of Boron-Lined Ionization Chamber

Hui Li, Rui Yang

Chengdu University of Technology, Chengdu, China

Email: 1219276260@qq.com

How to cite this paper: Li, H. and Yang, R. (2022) Study on Thermal Neutron Sensitivity of Boron-Lined Ionization Chamber. *Open Access Library Journal*, 9: e9303. <https://doi.org/10.4236/oalib.1109303>

Received: September 12, 2022

Accepted: September 27, 2022

Published: September 30, 2022

Copyright © 2022 by author(s) and Open Access Library Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

With the development of science and technology, neutron detection plays an increasingly important role in many fields, such as national defense security, medical imaging and aerospace. Gas detector is a commonly used neutron detector. It takes gas as the working medium and produces electrical signal by ionization effect of incident particles. In recent years, as the expensive price of ^3He gas detector, and environmental hazard of BF_3 gas detector, the boron-lined ionization chamber, which is developed to replace BF_3 gas detector, has been widely used. The structure size, thickness of boron lining and the composition of working gas greatly influence the sensitivity of the boron-lined ionization chamber, while the sensitivity is one of the important indicators to evaluate its application site and decide the choice of subsequent electronic analysis equipment. In this paper, Monte Carlo simulation software, Geant4, is used to study the variation of thermal neutron sensitivity of boron-lined ionization chamber under different technical parameters (detector structure size, boron lining thickness, composition of working gas), which provides reference for the structure design of boron-lined ionization chamber.

Subject Areas

Nuclear Physics

Keywords

Boron-Lined Ionization Chamber, Sensitivity, Thermal Neutron

1. 引言

核科学技术的不断深入研究发展始终离不开对中子的探测，而中子本身不带电，不能使用普通的探测器进行直接探测而要使用中子探测器。中子探

测器按照工作机理可以分为气体电离探测器、半导体探测器、闪烁体探测器、径迹探测器及自给能探测器等。气体探测器是指以气体为工作介质，有入射粒子在其中产生的电离效应引起输出电信号的探测器，其基本原理就是辐射在气体介质中产生电子-离子对，这些离子对在探测器灵敏体积的电场中运动而形成输出信号[1]。而根据产生电信号的工作机制不同，气体探测器又可划分为电离室、正比计数器、G-M 计数器等类型。

近年来，由于 ^3He 气体探测器造价昂贵，密封难度高，而 BF_3 气体探测器会对环境产生危害，为替代 BF_3 气体探测器而研制的涂硼气体探测器逐渐成为一种主要中子探测工具[2]。涂硼电离室中子探测器结构尺寸、涂硼质量厚度、工作气体成分对中子的灵敏度有较大的影响[3]。涂硼气体探测器的灵敏度是评价其应用场合及决定后续电子分析设备选择的重要指标之一。现有的硼膜制作工艺已可以制造生产高质量的涂硼气体探测器，而对涂硼气体探测器热中子灵敏度的研究是中子探测技术发展的关键。本文主要研究了涂硼电离室在不同技术参数(探测器结构尺寸、涂硼质量厚度、工作气体成分)下对热中子灵敏度的变化规律，为涂硼气体探测器的设计提供参考依据。

2. 涂硼电离室结构与原理

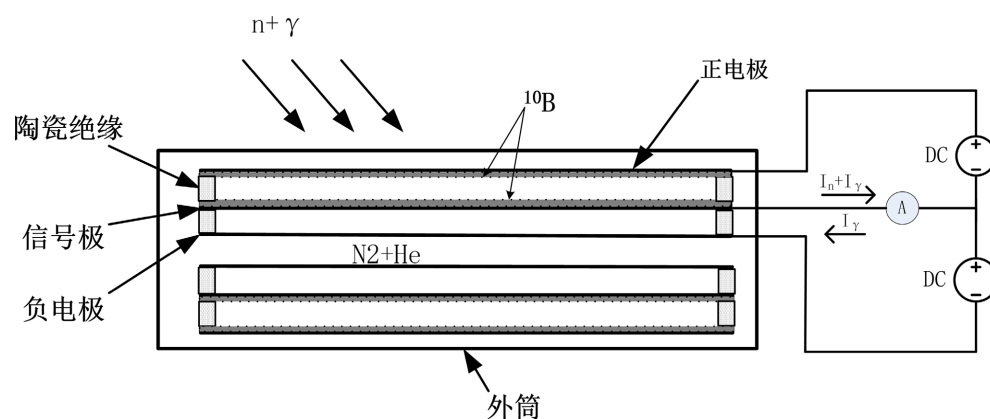
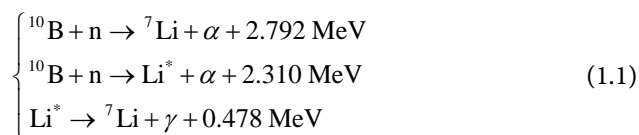


图 1. 涂硼 γ 补偿中子电离室结构原理示意图

γ 补偿中子电离室包含由外到内包含正、信号和负高压三个圆筒状电极，正极内表面与信号极外表面涂覆高丰度硼粉(^{10}B) (如图 1 所示)。正高压电极与收集极形成中子室，在核反应堆 n 和 γ 射线的辐射场中形成中子电流和 γ 电流。在负高压电极与收集极形成 γ 室，在核反应堆 n 和 γ 射线的辐射场中仅形成 γ 电流，电流方向与中子室相反。通过调节负电极的电压大小，使得 γ 室的 γ 电流与中子室的 γ 电流大小相等，从而实现 γ 的补偿，最终电离室测得的电流即为中子电流。电流经对数放大器处理后，其输出电流用于反应堆周期计算、功率显示以及反应堆保护。

中间量程 γ 补偿电离室：阳极筒： $\Phi 63 \times 2.5 \text{ mm}$ ，零电极筒： $\Phi 50 \times 2.5 \text{ mm}$ ，
负电极筒： $\Phi 34 \times 2 \text{ mm}$ ，阳极筒内壁和零电极筒外壁涂硼，涂硼厚度 0.8 mg/cm^2 ， $^{10}\text{B} > 96\%$ ；灵敏区长度 420 mm ；工作气体： $2 \text{ atm He} + 0.1 \text{ atm N}_2$ 。

^{10}B 与中子发生的核反应如下[4]：



其中， ${}^{10}\text{B}$ 生成 ${}^7\text{Li}$ 的反应占 6.1%，生成激发态 Li^* 的反应占 93.9%，激发态 Li^* 不稳定，退激为 ${}^7\text{Li}$ ，并放出伽马光子。

3. 涂硼气体探测器灵敏度及燃耗计算

选用 GEANT4 模拟涂硼电离室置于中子注量率恒定的中子场，物理过程为 QGSP_BERT_HP，中子能量为 0.0253 eV。中子从探测器外表面各向同性发射，每次注入的热中子数为 $1 \times 10^6 \text{ n}$ ，此时的中子注量 ϕ 为

$$\phi = N/2HR \quad (2-1)$$

式中， N 为注入的中子数， H 为体源(圆柱体)的长度， R 为体源的半径。模拟得到电离室的能量沉积，将沉积能量除以平均电离能和中子注量，可得到探测器的灵敏度。

3.1. 不同结构尺寸涂硼电离室灵敏度

Ziegler 等人[5]通过模拟计算发现，对于厚度为 0.47~0.88 mg/cm^2 的涂硼厚度，可达到较高的探测效率。根据如表 1 所示技术参数条件，分别模拟涂硼厚度 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 mg/cm^2 下的热中子灵敏度，能量沉积的能量区间为 0~1800 keV (单位中子注量率下探测器的计数率 $\text{cps}/\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。模拟计算结果如图 2 所示。

表 1. 涂硼电离室参数条件

正电极 尺寸/mm	信号极 尺寸材/mm	电极 材料	灵敏区 长度/mm	外壳 尺寸/mm	外壳 材料	充气压力
$\Phi 43 \times 1$	$\Phi 37 \times 1$	6061 铝合金	450	$\Phi 50 \times 1$	TA2	4 atm He +
$\Phi 43 \times 1$	$\Phi 37 \times 1$	6061 铝合金	450	$\Phi 50 \times 1$	304 不锈钢	0.2 atm N_2
$\Phi 63 \times 2.5$	$\Phi 50 \times 2.5$	6061 铝合金	450	$\Phi 80 \times 1.5$	TA2	2 atm He +
$\Phi 63 \times 2.5$	$\Phi 50 \times 2.5$	6061 铝合金	450	$\Phi 80 \times 1.5$	304 不锈钢	0.1 atm N_2

图 2 中，横坐标为涂硼厚度，单位为 mg/cm^2 ；纵坐标为不同结构尺寸的探测器的灵敏度，单位为 $\text{A}/(\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ 。图中六条曲线从下到上依次为外壳尺寸 $\Phi 80 \times 1.5 \text{ mm}$ 材料 TA2，灵敏区长度 450 mm；外壳尺寸 $\Phi 80 \times 1.5 \text{ mm}$ ，材料 304 不锈钢，灵敏区长度 450mm；外壳尺寸 $\Phi 50 \times 1 \text{ mm}$ ，材料 TA2，灵敏区长度 450 mm；外壳尺寸 $\Phi 50 \times 1 \text{ mm}$ ，材料 304 不锈钢，灵敏区长度 450 mm 的探测器。可知涂硼厚度在 0.4 mg/cm^2 时的灵敏度最大。同一尺寸的探测器，外壳材料为 304 不锈钢的灵敏度比外壳材料为 TA2 的灵敏度大。

计算结果偏小，若是加上硼层的能量沉积，可得到最大的灵敏度限度。

在以下模拟加入硼层能量沉积进行计算：外壳尺寸 $50 \times 1 \text{ mm}$ ，材料 TA2

不锈钢, 灵敏区长度 450 mm, 气体 4 atm He + 0.2 atm N₂。结果如图 3 所示。

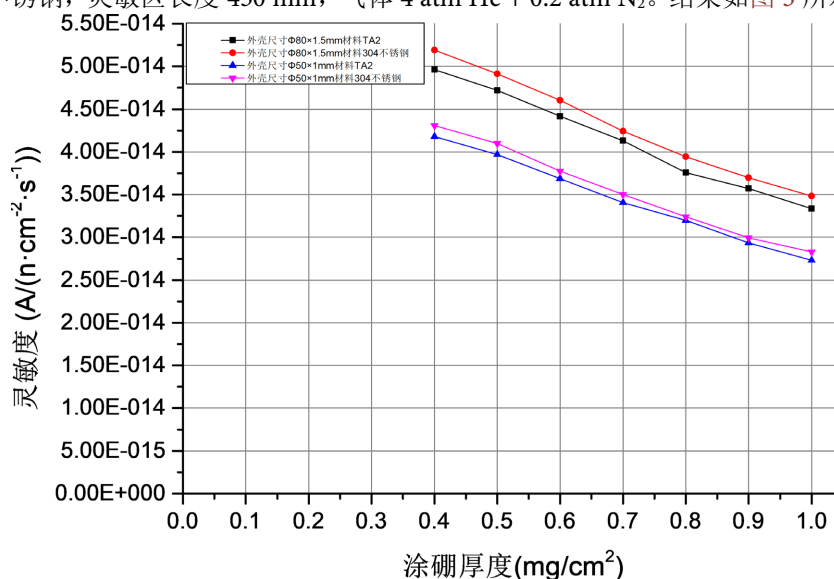


图 2. 探测器灵敏度随涂硼厚度变化曲线

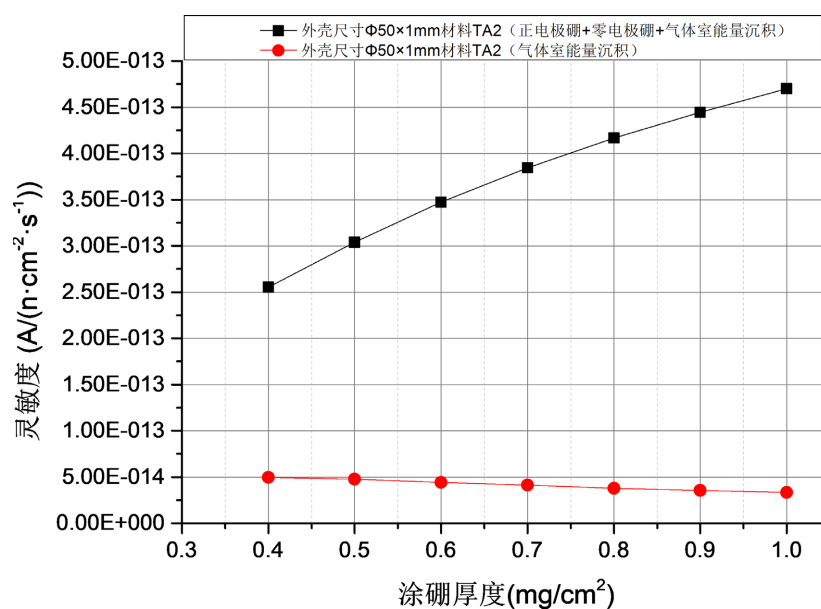


图 3. 探测器灵敏度(加上硼层能量沉积)随涂硼厚度变化曲线

图 3 中, 横坐标为涂硼厚度, 单位为 mg/cm^2 ; 纵坐标为探测器的灵敏度, 单位为 $\text{A}/(\text{n}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$ 。上方黑色曲线为气体室的能量沉积, 加上了涂的两层硼的能量沉积。下方红色曲线为单纯的气体室的能量沉积得到的灵敏度。在加上硼层能量沉积后, 总灵敏度随涂硼厚度的增大而增加。

在以下模拟加入硼层能量沉积进行计算: 外壳尺寸 $\Phi 80 \times 1.5 \text{ mm}$, 材料 TA2, 灵敏区长度 450 mm, 气体 2 atm He + 0.1 atm N₂。结果如图 4 所示。

图 4 中, 横坐标为涂硼厚度, 单位为 mg/cm^2 ; 纵坐标为探测器的灵敏度, 单位为 $\text{A}/(\text{n}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$ 。上方黑色曲线是气体室的能量沉积, 加上了涂的两层硼的能量沉积。下方红色曲线是单纯的气体室的能量沉积得到的灵敏度。在

加上硼层能量沉积后，总灵敏度随涂硼厚度的增大而增加。由于涂硼电离室的硼层结构是小孔结构，无法模拟，只能计算得到其灵敏度区间，无法得到确切的灵敏度。

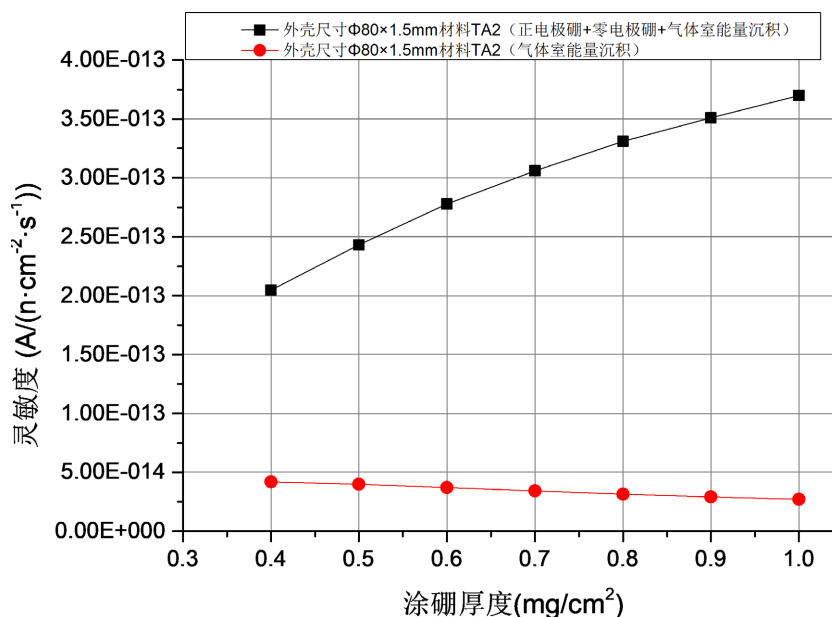


图 4. 探测器灵敏度(加上硼层能量沉积)随涂硼厚度变化曲线

3.2. 不同工作气体成分及压力下探测器的灵敏度

确定尺寸和涂硼厚度下，不同工作气体成分及压力下，探测器灵敏度计算的基本规律。电离室的结构及尺寸如表 2 所示：

表 2. 涂硼电离室的结构及尺寸

正电极 尺寸/mm	信号极 尺寸材/mm	电极材料	灵敏区 长度/mm	外壳 尺寸/mm	外壳材料
Φ43 × 1	Φ37 × 1	6061 铝合金	450	Φ50 × 1	TA2

计算如表 3 气压、气体成份下，探测器热中子灵敏度。

选用 GEANT4 模拟涂硼电离室置于中子注量率恒定的中子场，物理过程为 QGSP_BERT_HP，中子能量为 0.0253 eV。探测器外壳尺寸 Φ50 × 1 mm，材料 TA2，灵敏区长度 450 mm。中子从探测器外表面各向同性发射，每次注入的热中子数为 1×10^6 n。模拟得到不同气压及气体成分下的能量沉积，将沉积能量除以平均电离能和中子注量，可得到探测器的灵敏度，如图 5 所示。

图 5 中，横坐标为气体成分及气压；纵坐标为不同气体成分及气压的探测器的灵敏度，单位为 $A/(n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1})$ 。图中黑色曲线为外壳尺寸 Φ50 × 1 mm，材料 TA2，灵敏区长度 450 mm；涂硼厚度为 0.5 mg/cm² 的探测器灵敏度随气体成分气压变化的曲线；红色曲线为外壳尺寸 Φ50 × 1 mm，材料 TA2，灵敏区长度 450 mm；涂硼厚度为 0.8 mg/cm² 的探测器灵敏度随气体成分气压变化的曲线。涂硼厚度在 0.5 mg/cm² 时的灵敏度比涂硼厚度为 0.8 mg/cm² 的灵

敏度大。填充 2 atm Ar 时探测器的灵敏度最大。

表 3. 气压、气体成份参数

涂硼厚度	气体成分
0.5mg/cm ²	4 atm He + 0.2 atm N ₂
	4.2 atm He
	3.5 atm He + 0.7 atm N ₂
	2 atm N ₂
	2 atm Ar
0.8mg/cm ²	2 atm Ar + 0.2 atm N ₂
	4 atm He + 0.2 atm N ₂
	4.2 atm He
	3.5 atm He + 0.7 atm N ₂
	2 atm N ₂
2 atm Ar	
	2 atm Ar + 0.2 atm N ₂

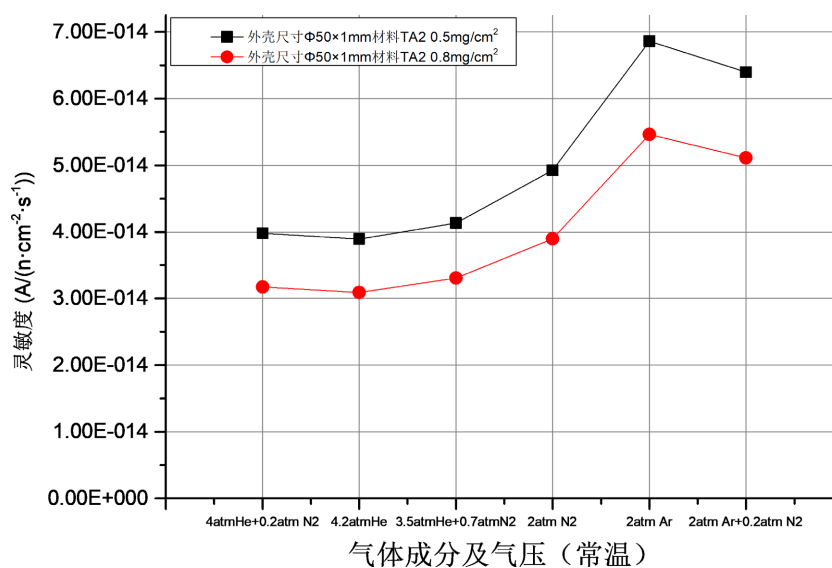


图 5. 探测器灵敏度随气体成分及气压的变化曲线

4. 结论

本文通过使用 Geant4 软件对不同蚕食条件的涂硼电离室的热中子灵敏度进行模拟计算。实验结果表明，当只考虑气体中能量沉积时，灵敏度变化不大；而在加上硼层能量沉积后，总灵敏度随涂硼厚度的增大而增加。同一尺寸的探测器，外壳材料为 304 不锈钢的灵敏度比外壳材料为 TA2 的灵敏度大，涂硼厚度在 0.4 mg/cm² 时的灵敏度最大。涂硼厚度在 0.5 mg/cm² 时的灵敏度比涂硼厚度为 0.8 mg/cm² 的灵敏度大。填充 2 atm Ar 时探测器的灵敏度最大。本文通过使用 GEANT4 软件对涂硼电离室进行模拟，分析研究了不同

探测器结构尺寸、涂硼质量厚度、工作气体成分对探测器灵敏度的影响，为涂硼电离室的设计提供参考。

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- [1] 陈伯显, 等. 核辐射物理及探测学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011.
- [2] 陈国云, 魏志勇, 辛勇, 等. 涂硼电离室中子探测效率和灵敏度[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(2): 244-249.
- [3] 廖俊辉, 谢一冈, 陈元柏, 等. 用于热中子探测的正比管性能研究[J]. 核电子学与探测技术, 2007(2): 367-371.
- [4] 陈国云. 中子灵敏涂硼材料组合探测器及 n/γ 辐射场实验测试[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [5] James, F.Z. (2004) SRIM-2003. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **219-220**, 1027-1036. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2004.01.208>

Appendix 1. Abstract and Keywords in Chinese

涂硼电离室热中子灵敏度研究

摘要: 随着科技水平的提高, 中子探测在国防安全、医疗成像、航天航空等众多领域发挥着越来越重要的作用。气体探测器是一种常用的中子探测器, 它以气体为工作介质, 由入射粒子在其中产生的电离效应引起输出电信号的探测器。近年来, 由于 ^3He 气体探测器造价昂贵, 密封难度高, 而 BF_3 气体探测器会对环境产生危害, 为替代 BF_3 气体探测器而研制的涂硼电离室逐渐成为主要中子探测工具。涂硼电离室中子探测器结构尺寸、涂硼质量厚度、工作气体成分对中子的灵敏度有较大的影响, 灵敏度是评价其应用场合及决定后续电子分析设备选择的重要指标之一。本文使用蒙特卡洛模拟软件 Geant4 研究了涂硼电离室在不同技术参数(探测器结构尺寸、涂硼质量厚度、工作气体成分)下对热中子灵敏度的变化规律, 为探测器结构设计提供参考依据。

关键词: 涂硼电离室, 灵敏度, 热中子