

涂硼正比计数管中热中子响应函数理论计算及模拟验证

方美华¹ 魏志勇² 张紫霞¹ 陈国云¹ 黄三玻² 雷升杰²

(1. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京, 210016; 2. 南京航空航天大学航天学院, 南京, 210016)

摘要:对涂硼正比计数管的热中子响应函数计算公式进行了理论推导。在圆柱形几何结构下,热中子在垂直柱面径向入射和任意角度入射两种情况时的响应函数得到了一种普适性的响应函数表达式,并选取正比管典型尺寸(内径 10 mm,涂层厚度 3 μm)进行蒙特卡罗模拟,对理论推导公式进行模拟验证,理论计算结果与模拟结果基本一致。研究表明,在垂直柱面任意角度入射的情况下,热中子的响应率随入射方向与圆柱中心距离 y 的增加呈规律性分布,即先增加后迅速降低,有一个峰值。在本文尺寸下,正向峰值在 9 900~1 000 μm 之间,而反向峰值在 9 700~9 800 μm 之间,反向较正向数值上偏小。此外,对理论计算值与模拟值、理论值与实验值的偏差进行了分析,并给出了解释。

关键词:涂硼正比管;蒙特卡罗模拟;响应函数;热中子;响应率

中图分类号:TL811.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2012)01-0081-06

Theoretical Calculation and Simulation of Thermal Neutron Response Function for Boron-Lined Proportional Counter

Fang Meihua¹, Wei Zhiyong², Zhang Zixia¹, Chen Guoyun¹, Huang Sanbo², Lei Shengjie²

(1. College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. College of Aeronautics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The thermal neutron response functions for boron-lined proportional counters are derived theoretically and simulation of responsivity is conducted with Monte-Carlo-based toolkit-Geant4. The results of theoretical calculation are coincident with the simulational ones. In the present study, it is found that responsivity varies along with the increase of the distance between incident direction and counter's central line and there is a responsivity peak in the case of vertical injection. The deductive expression is a simpler and effective method compared with Monte-Carlo simulation and the results are reliable. This is helpful for proportional counter design.

Key words: boron-lined proportional counter; Monte-Carlo simulation; response function; thermal neutron; responsivity

涂硼正比计数管是常用于热中子探测的气体探测器,与同类型的探测器³He 正比计数管和 BF₃ 正比计数管相比,虽然前者在探测效率上不如后者^[1-2],但涂硼正比管具有如下独特的优点:(1)能在高 gamma 背景辐射的环境中使用;(2)可在较高温度下工作;(3)电极两端所加电压低;(4)寿命长。

涂硼正比计数管探测原理基础为核反应法,中

子与正比管内表面涂层材料中的¹⁰B 发生核反应,产生带电粒子 α 和 Li 离子,通过这两种带电粒子产生的电信号进行中子探测。中子与¹⁰B 发生反应的概率称为反应截面,不同能量中子与¹⁰B 发生(n, α)反应截面如图 1 所示。从图中可以看出,中子与¹⁰B 的反应截面在很宽的能量范围内与 $1/v$ (v 为中子速度)呈正比,热中子与¹⁰B 的反应截面为

(3 840±11) mb。涂硼正比管中 ^{10}B 的含量、涂层的厚度、面积等因素对中子探测效率影响很大。为提高探测效率,涂硼层一般选择浓缩硼,即 ^{10}B 的含量在90%以上,比天然硼中 ^{10}B 含量(约18.98%)要高得多。研究表明,涂硼层的最佳厚度选取为0.4~0.8 mg/cm^[2-3],降低厚度会降低探测效率,而增加涂层厚度不仅会降低探测效率,同时也浪费材料。增加涂硼层的面积也是提高探测效率的有效方式,因此,有研究工作通过改变正比管的结构,增加涂硼面积^[4]。

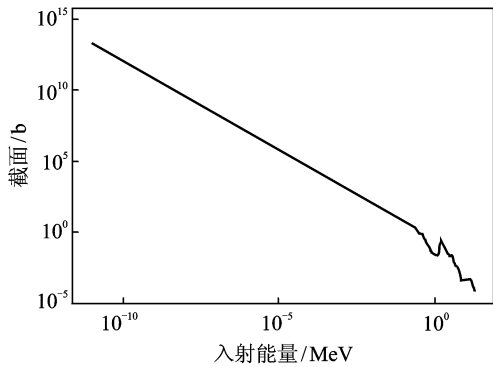


图1 $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 核反应截面

定义通过核反应进入敏感体积的带电粒子数目与入射中子的函数关系称为响应函数,两者的比值称为响应率。响应函数以及对应的响应率是探测器探测效率的重要表征。对响应函数进行理论推导,并初步总结了正比管响应率的一般规律。此外,以基于蒙特卡罗方法的Geant4^[5-6]平台为基础,选取典型正比管尺寸即内径为10 mm,涂硼厚度为3 μm,外壳为0.5 mm的不锈钢,内充P10气体,气压为26 344.5 Pa(0.26 atm),对涂硼正比管进行模拟,同时对理论计算结果进行验证。

1 响应函数理论推导

1.1 基本推导思路

热中子与硼中 ^{10}B 发生 (n, α) 反应,产生带电粒子被正比管探测记录。核反应截面计算基本公式为

$$\sigma = \frac{N'}{IN_s} \quad (1)$$

式中: σ 为反应截面; N' 为单位时间发生的反应数; I 为单位时间的入射粒子数; N_s 为单位面积的靶核数。从式(1)得到

$$N' = \sigma IN_s \quad (2)$$

当中子发生 $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 反应后,能否进入探测器的灵敏体积,由粒子种类、产生位置、出射方向等

决定。由于重带电粒子在物质中的径迹可基本视为直线,且假设产生的 α 粒子与Li离子出射方向正好相反,所以,由图2所示,粒子射程 R 、出射角度 θ 及粒子产生位置 x 3个参数共同决定了带电粒子可否进入灵敏体积。由Geant4计算得到1.47 MeV的 α 粒子与0.84 MeV的Li离子射程分别为:3.5和1.7 μm。

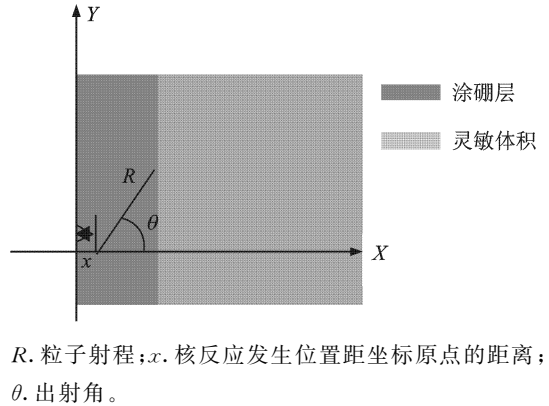


图2 响应函数计算示意图

设 r 为探测器内径,当涂层厚度 $T \ll r$ 时,可近似做平面处理,那么带电粒子在某一位置出射,能进入灵敏体积的临界角可定义为

$$\theta = \arcsin\left(\frac{T-x}{R}\right) \quad (3)$$

则进入灵敏体积的带电粒子的概率可近似为半径为 R ,所张角度为 θ 的球冠面积与半径为 R 的球面积之比,即

$$\frac{2\pi R(R-T+x)}{4\pi R^2} = \frac{R-T+x}{2R} \quad (4)$$

下面从两种基本情况出发,分析中子的响应函数。

1.2 垂直柱面径向入射

如图3所示为径向入射示意图,中子沿着径向射入正比管中。

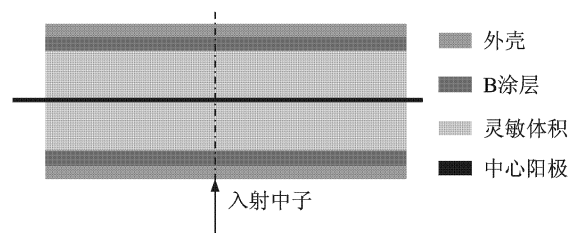


图3 径向入射示意图

中子不带电荷,它在发生核反应之前的径迹可视为直线,且 $T \ll r$,那么径向入射可简化为二维处理,即如图2所示。由于圆柱形正比计数器的几何

结构特点,需要考虑对称性,因此将响应函数分为两部分。当中子从探测器外部进入涂硼层时,显然,核反应产生的带电粒子如果前向出射,则有可能进入敏感体积,对响应率产生贡献,而当子从探测器内部向外出射时,则带电粒子反向出射有可能进入敏感体积。设响应率贡献的第一部分为正向,第二部分为反向。以正向为例,假设中子入射通量为 1,在位置 $(x,0)$ 处发生核反应,那么在此位置中子通量为

$$\phi_x = \exp(-N\sigma x) \approx 1 - N\sigma x \quad (5)$$

式中: $N = \frac{N_A \rho}{A}$ 为单位体积中的靶原子数, N_A 为阿伏伽德罗常数, ρ 为涂层密度, A 为原子量。

由式(2,4,5)得到在 $(x,0)$ 处产生带电粒子能进入灵敏体积的概率为

$$\varepsilon' = N' \times \frac{R - T + x}{2R} = \sigma \phi_x N_s \times \frac{R - T + x}{2R} =$$

$$\sigma \times (1 - N\sigma x) \times N\Delta x \times \frac{R - T + x}{2R} = \frac{\sigma N}{2R} (1 - N\sigma x) (R - T + x) \Delta x \quad (6)$$

则探测器的响应函数为

$$\varepsilon = \frac{\sigma N}{2R} \int_0^T (1 - N\sigma x) (R - T + x) dx \quad T < R \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma N}{2R} \int_{T-R}^T (1 - N\sigma x) (R - T + x) dx \quad T > R \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma N}{2R} \int \exp(-N\sigma(\sqrt{R_1^2 - y^2} - \sqrt{R'^2 - y^2})) \frac{R'}{\sqrt{R'^2 - y^2}} (R - R' + R_2) dR' \quad (14)$$

(1) 当 $y < R_2$ 时

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma N}{2R} \int_{R_2}^{R_1} \exp(-N\sigma(\sqrt{R_1^2 - y^2} - \sqrt{R'^2 - y^2})) \frac{R'}{\sqrt{R'^2 - y^2}} (R - R' + R_2) dR' & T < R \\ \varepsilon = \frac{\sigma N}{2R} \int_{R_2}^{R_2+R} \exp(-N\sigma(\sqrt{R_1^2 - y^2} - \sqrt{R'^2 - y^2})) \frac{R'}{\sqrt{R'^2 - y^2}} (R - R' + R_2) dR' & T > R \end{cases} \quad (15)$$

(2) 当 $y > R_2$ 时

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma N}{2R} \int_y^{R_1} \exp(-N\sigma(\sqrt{R_1^2 - y^2} - \sqrt{R'^2 - y^2})) \cdot \frac{R'}{\sqrt{R'^2 - y^2}} (R - R' + R_2) dR' & T < R \\ \varepsilon = \frac{\sigma N}{2R} \int_y^{R_2+R} \exp(-N\sigma(\sqrt{R_1^2 - y^2} - \sqrt{R'^2 - y^2})) \cdot \frac{R'}{\sqrt{R'^2 - y^2}} (R - R' + R_2) dR' & T > R \text{ 且 } y - R_2 < R \\ \varepsilon = 0 & T > R \text{ 且 } y - R_2 \geq R \end{cases} \quad (16)$$

反向时推导得如下结果:

(1) 当 $y < R_2$ 时

而反向响应函数同理可推得

$$\varepsilon = \frac{\sigma N}{2R} \exp(-N\sigma T) \int_0^T (1 - N\sigma x) (R - x) dx \quad T < R \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma N}{2R} \exp(-N\sigma T) \int_0^R (1 - N\sigma x) (R - x) dx \quad T > R \quad (10)$$

1.3 垂直柱面任意角度入射

在垂直柱面入射的情况下,当中子以任意角度入射时,可将坐标规划成如图 4 所示(同样以正向为例),以截面中心为圆心,平行于入射方向为 x 轴。设内圆柱半径为 R_1 ,外圆柱半径为 R_2 ,发生核反应点 (x,y) 的半径为 R' 。则进入灵敏体积的带电粒子的概率需改为

$$\frac{2\pi R(R - R' + R_2)}{4\pi R^2} = \frac{R - R' + R_2}{2R} \quad (11)$$

单位面积靶核数为

$$N_s = N\Delta x = N \frac{R'}{\sqrt{R'^2 - y^2}} \Delta R' \quad (12)$$

在位置 (x,y) 处中子通量

$$\phi_R = \exp(-N\sigma(\sqrt{R_1^2 - y^2} - \sqrt{R'^2 - y^2})) \quad (13)$$

同理得到响应函数

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon = \frac{\sigma N}{2R} \exp(-N\sigma(\sqrt{R_1^2 - y^2} - \sqrt{R_2^2 - y^2})) \cdot \\ \int_{R_2}^{R_1} \exp(-N\sigma(\sqrt{R'^2 - y^2} - \sqrt{R_2^2 - y^2})) \frac{R'}{\sqrt{R'^2 - y^2}} (R - R' + R_2) dR' \quad T < R \\ \epsilon = \frac{\sigma N}{2R} \exp(-N\sigma(\sqrt{R_1^2 - y^2} - \sqrt{R_2^2 - y^2})) \cdot \\ \int_{R_2}^{R_2+R} \exp(-N\sigma(\sqrt{R'^2 - y^2} - \sqrt{R_2^2 - y^2})) \frac{R'}{\sqrt{R'^2 - y^2}} (R - R' + R_2) dR' \quad T > R \end{array} \right. \quad (17)$$

(2) 当 $y > R_2$ 时

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon = \frac{\sigma N}{2R} \exp(-N\sigma(\sqrt{R_1^2 - y^2} - \sqrt{R_2^2 - y^2})) \cdot \\ \int_y^{R_1} \exp(-N\sigma(\sqrt{R'^2 - y^2} - \sqrt{R_2^2 - y^2})) \cdot \\ \frac{R'}{\sqrt{R'^2 - y^2}} (R - R' + R_2) dR' \quad T < R \\ \epsilon = \frac{\sigma N}{2R} \exp(-N\sigma(\sqrt{R_1^2 - y^2} - \sqrt{R_2^2 - y^2})) \cdot \\ \int_y^{R_2+R} \exp(-N\sigma(\sqrt{R'^2 - y^2} - \sqrt{R_2^2 - y^2})) \cdot \\ \frac{R'}{\sqrt{R'^2 - y^2}} (R - R' + R_2) dR' \quad T > R \text{ 且 } y - R_2 < R \\ \epsilon = 0 \quad T > R \text{ 且 } y - R_2 \geq R \end{array} \right. \quad (18)$$

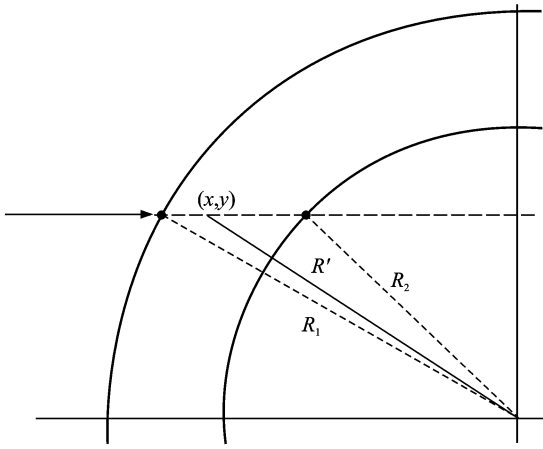


图4 垂直柱面任意角度入射示意图

2 结果与分析

若正向中子入射通量为 1, 则反向为 $\exp(-N\sigma T')$, 其中 T' 为正向通过硼的厚度。

选取典型正比管尺寸即内径为 10 mm、涂硼厚度为 $3 \mu\text{m}$ 、外壳为 0.5 mm 的不锈钢, 内充 P10 气体、气压为 26 344.5 Pa (0.26 atm) 为例, 对理论计算结果和 Geant4 模拟结果进行如下对比分析。

2.1 垂直柱面径向入射

α 粒子的射程 $R_\alpha > T$, Li 离子的射程 $R_{\text{Li}} < T$, 则 α 粒子和 Li 离子进入灵敏体积的概率根据

式(7~10)得到的结果以及 Geant4 程序模拟结果如表 1 所示。从表中可以看出, 模拟结果与计算结果基本符合, 偏差较小。

表 1 径向入射热中子响应率

粒子种类	正向/%	反向/%	总和/%	模拟值/%
α 粒子	4.17	3.70	11.77	10.84
Li 离子	2.00	1.90		

2.2 垂直柱面任意角度入射

由式(15~18)可以看出, 对于不同的 y (图 4) 得到的响应率不同。选取 $y=0, 2, 4, 6, 8, 9, 9.2, 9.5, 9.7, 9.999, 10.001, 10.002 \text{ mm}$ 分别进行计算并与模拟结果进行对比, 见表 2。从表中可以看出, 计算值与模拟值趋势符合较好, 但计算值普遍较模拟值大。在 $y=0$ 处, 与表 1 相比, 计算值略微增加, 这是由于在垂直柱面径向入射的情况下, 对薄层的中子通量进行了近似处理, 而在垂直柱面任意角度入射情况下, 中子通量方面未作近似处理。

垂直柱面任意角度入射情况下, 不同的圆心距 y , 探测粒子分别为 α 和 Li 离子时的响应率如图 5 所示。从图中可以看出, 虽然进入灵敏体积的粒子不同, 响应率随 y 的变化都遵循一定的规律, 先增加后迅速降低。这一规律可解释为: 热中子的响应率由两个主要因素决定, 一个是核反应的数目, 一

表 2 垂直柱面任意角度入射热中子响应率

y/mm	正向/%	反向/%	总和/%	模拟值/%
0	6.21	5.61	11.82	10.84
2	6.32	5.70	12.03	11.03
4	6.71	6.00	12.71	11.68
6	7.55	6.65	14.20	12.84
8	9.62	7.12	17.74	15.72
9	12.37	9.80	22.17	19.1
9.2	13.39	10.32	23.71	20.22
9.5	15.67	11.31	26.98	22.45
9.7	18.28	12.03	30.31	24.56
9.999	14.83	0.04	14.87	11.89
10.001	12.03	0	12.03	9.29
10.002	10.44	0	10.44	8.13

个是进入敏感体积的概率。而当热中子入射时,核反应的数目只与中子通量有关,进入敏感体积的概率则与产生带电粒子的位置有关。由于热中子经过

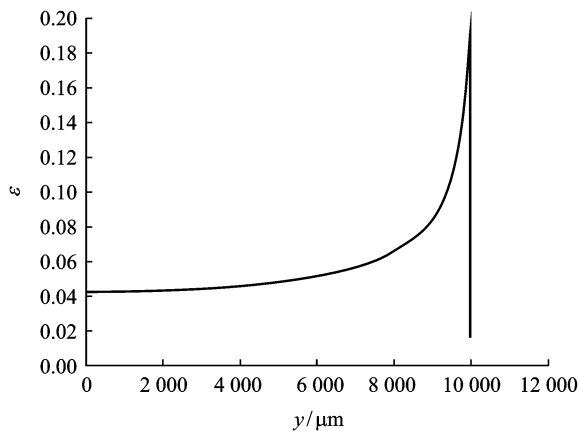
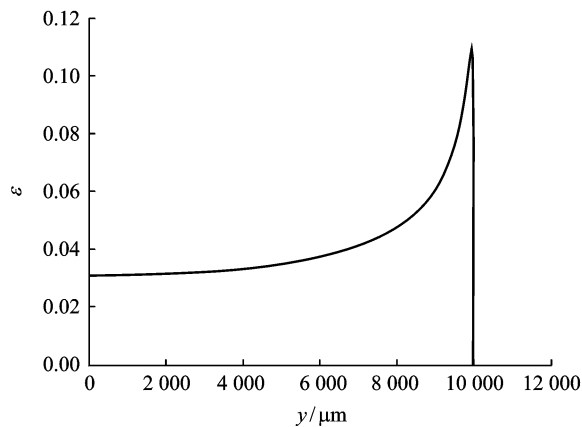
硼的厚度增加,产生核反应数目增加,而同一位置带电粒子进入敏感体积的概率不变,所以导致了响应率增加,但增加到一定程度后,由于靠近敏感体积的中子通量随着经过硼厚度增加而呈指数下降,导致了响应率随之下降,响应率有个最高点。反向的响应率变化较正向平缓,这是由于反向热中子通量有所降低且通量变化为: y 越大通量越小。反向响应率的最高点在 $y=9\ 700\sim 9\ 800\ \mu\text{m}$ 之间,而正向在 $y=9\ 900\sim 10\ 000\ \mu\text{m}$ 之间,反向响应率最高点有所偏移,这也是由于中子经过硼后通量变化所致。

2.3 垂直柱面平面入射

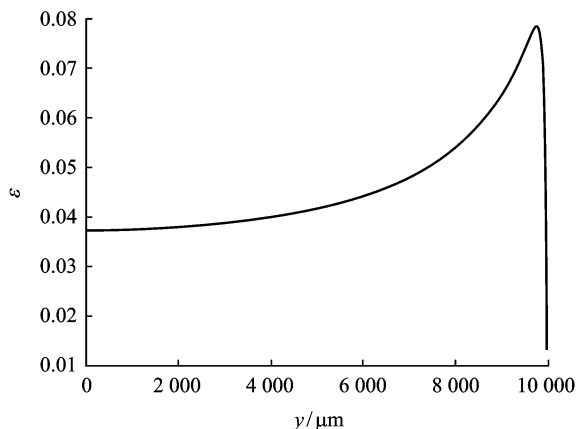
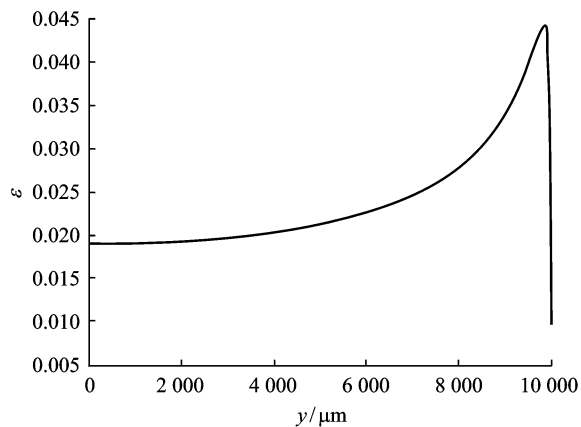
同样可以用式(15~18)来分析平面源入射情况下,计算热中子响应率,得到结果如表 3 所示。

表 3 平面源热中子的响应率

粒子种类	正向/%	反向/%	总和/%	模拟值/%
α 粒子	5.73	4.58	15.36	13.73
Li 离子	2.66	2.39		

(a) α 正向响应率

(b) Li 正向响应率

(c) α 反向响应率

(d) Li 反向响应率

图 5 热中子响应率随圆心距 y 和探测粒子(α 和 Li)的变化

3 结束语

对涂硼正比技术管热中子响应率的计算公式进行了理论推导并将计算结果与蒙特卡罗模拟结果进行了对比分析,理论计算值与模拟结果基本符合,这说明了用本文推导得到的普适性的公式可快速、简单的对涂硼正比管的热中子响应进行计算,且计算值可作为探测器设计重要的且可靠性较高的参数,而蒙特卡罗模拟相比而言具有耗时、编写复杂的缺点。

从表(1~3)中可以看出,理论计算和模拟仿真存在一些偏差,理论计算值都普遍大于模拟值,且 y 越大则偏差越大,这主要是因为理论推导中,考虑到涂层厚度 $T \ll r$,在计算进入灵敏体积的粒子的概率中,将圆柱形几何做了平板近似处理,这个处理将使得概率计算值比实际值偏大。

在理论推导和模拟计算中,热中子响应率均大于10%,而在实验测量时,小于10%^[2]。这是由于:

(1)响应率计算针对热中子,而实验中的中子源的中子谱为连续谱;

(2)仅考虑的是正比管,后续的电子学设备并未考虑。

从涂硼正比管对热中子响应率的理论推导得到了一套较为完备、普适性强的响应函数计算公式,对垂直柱面入射的热中子响应函数的规律进行了总结,并对不完善点进行了分析,在优化探测器设计方面具有实际指导作用。本文与前期的工作^[7]都对中子探测器的响应特点进行了分析,得到的结果是自洽的,而研究对象和侧重点有所区别,本文的重心在响应函数推导,对响应函数计算方法进行了改进和完善,可快速、简便地进行计算,而且计算结果又不失可靠性,旨在从响应函数这个重要参数指导探测器优化设计。

参考文献:

- [1] Lintereur A T, Kouzes R T, Ely J H, et al. Boron-lined neutron detector measurements[R]. Washington: Pacific Northwest National Laboratory, 2009.
- [2] 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,2007,27(2):367-371.
Liao Junhui, Xie Yigang, Chen Yuanbo, et al. Research on the performance of thermal neutron proportional counters and the effect of one-dimension 3He position sensitive detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2007, 27(2): 367-371.
- [3] Mazed D. Experimental gas amplification study in boron-lined proportional counters for neutron detection[J]. Radiation Measurement, 2007, 42(2): 245-250.
- [4] Dighe P M, Prasad D N, Prasad K R, et al. Boron-lined proportional counters with improved neutron sensitivity[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2003, 496(1): 154-161.
- [5] Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. Geant4-a simulation toolkit [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2003, 56(1): 250-303.
- [6] Allison J, Amako K, Apostolakis J. Geant4 developments and applications[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, 53(1): 270-278.
- [7] 陈国云,魏志勇,辛勇方,等.涂硼电离室中子探测效率和灵敏度[J].原子能科学技术,2010,45(2):244-249.
Chen Guoyun, Wei Zhiyong, Xin Yongfang, et al. Detection efficiency and sensitivity of boron-lined ionization chamber for neutron[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(2): 244-249.