

# 涂硼电离室中子探测效率和灵敏度

陈国云<sup>1,2</sup>, 魏志勇<sup>2,\*</sup>, 辛勇<sup>1</sup>, 方美华<sup>2</sup>, 黄三玻<sup>2</sup>, 黄国庆<sup>1</sup>

(1. 南昌大学 物理系, 江西 南昌 330031; 2. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

**摘要:**从电离室工作原理导出了平板型涂硼中子电离室探测效率及灵敏度的计算公式,并求得其中子探测效率和灵敏度。电离室对热中子探测效率饱和值为 1.35%, 灵敏度饱和值为  $9.65 \times 10^{-14} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 与已有公式所得结果  $8.43 \times 10^{-14} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  相近。 $\alpha$  粒子和 Li 离子对探测效率的贡献相差不大, 但  $\alpha$  粒子对灵敏度的贡献占主导地位。适当的硼膜厚度、慢化快中子、选用浓缩硼均有利于提高涂硼电离室探测效率和灵敏度。

**关键词:**涂硼电离室; 灵敏度; 探测效率; 中子

中图分类号: TL811.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2011)02-0244-06

## Detection Efficiency and Sensitivity of Boron-Lined Ionization Chamber for Neutron

CHEN Guo-yun<sup>1,2</sup>, WEI Zhi-yong<sup>2,\*</sup>, XIN Yong<sup>1</sup>, FANG Mei-hua<sup>2</sup>,  
HUANG San-bo<sup>2</sup>, HUANG Guo-qing<sup>1</sup>

(1. Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

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

**Abstract:** Formulas for detection efficiency and sensitivity of plate boron-lined ionization chamber were derived from its working principle, and their values for thermal neutrons were obtained. The saturated value of the detection efficiency for thermal neutrons of ionization chamber is 1.35% and the sensitivity is  $9.65 \times 10^{-14} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , which approximately coincides with the result of  $8.43 \times 10^{-14} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  given by a known formula. Contribution of  $\alpha$  particles to the detection efficiency shows small difference with Li ions while that to the sensitivity is predominating. A suitable thickness of boron film, slowing fast neutron and using enriched boron can improve both detection efficiency and sensitivity of boron-lined ionization chamber.

**Key words:** boron-lined ionization chamber; sensitivity; detection efficiency; neutron

近年来,中子活化分析、照相等技术使中子探测占据了特殊地位<sup>[1]</sup>,它不仅为空间辐射生

物效应研究提供了重要参量,还能在行星找水、寻找地球外生命、行星表面混合辐射环境测量

等方面发挥重要作用<sup>[2]</sup>。中子呈电中性,一般通过它与原子核的相互作用产生带电粒子而实现探测<sup>[3]</sup>。中子探测方法主要有核反冲、核反应、核裂变和活化 4 种<sup>[4]</sup>,对应的含氢正比管和<sup>3</sup>He 管已较普及。反应<sup>3</sup>He(n,p)T 截面大、效率高,但<sup>3</sup>He 含量低(0.013%)、价格昂贵且正常情况下无固态,增加了密封难度<sup>[5]</sup>。利用反应<sup>10</sup>B(n,α)<sup>7</sup>Li 探测中子的<sup>10</sup>BF<sub>3</sub>管应用广泛,但其对环境有潜在危害而逐渐被淘汰。近年来,人们将固体硼涂抹在气体探测器阴极表面来实现中子探测,涂硼电离室就是其中一种。

灵敏度和探测效率决定了电离室的应用场合及后续电子学设备,是涂硼电离室的重要性能指标之一,但国内外有关灵敏度与探测效率的报道并不多。Gunter 等<sup>[6]</sup>发现平板结构永电体电离室对 15 MeV 以下中子灵敏度与能量和电极间距有关,后来,Endo 等<sup>[7]</sup>对 0.1~1.2 MeV 的中子求得了该依赖关系。21 世纪初,Nanjo 等<sup>[8]</sup>测得小间距平板电离室对 2.5 eV 中子探测效率为 0.13%,而 Bolozdynya 等<sup>[9]</sup>研制的充高压 Xe-<sup>3</sup>He 圆柱型电离室对热中子的探测效率达 85%。

本工作对平板型涂硼电离室的中子探测效率及灵敏度进行研究。

### 1 平板型涂硼电离室

涂硼电离室是典型的气体探测器,常见的有平板型、圆柱型及球型等,本工作讨论的是平板型涂硼中子电离室,其结构如图 1 所示。电离室两极间充工作气体,常用 P10 气体(90%Ar+10%CH<sub>4</sub>)。为测量中子,常在其阴极表面涂 1 层固体硼膜,其厚度与反应产物在硼中的射程有关。入射中子与阴极上的<sup>10</sup>B 发生核反应生成的 α 粒子和<sup>7</sup>Li 离子使 P10 气体分子电离、激发产生电子离子对。在电离室两极外加电场作用下,电子离子对分别向阳极和阴极运动,在电极上出现感应电荷形成脉冲和电流。根据所测量得到的脉冲幅度、电流和入射中子之间存在的关系即可求得入射中子信息,这分别对应着脉冲电离室和电流电离室。

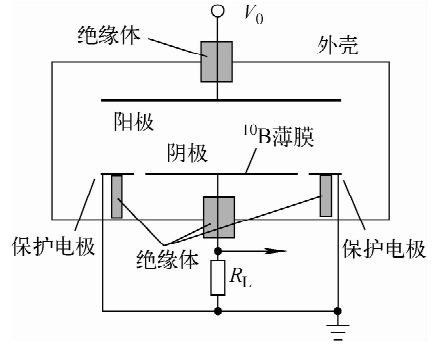


图 1 平板型涂硼电离室结构

Fig. 1 Structure of plate boron-lined ionization chamber

### 2 电离室探测效率

#### 2.1 探测效率的导出

若入射为热中子(0.025 eV),其动量相比于 α 和<sup>7</sup>Li 可忽略,出射的 α 和<sup>7</sup>Li 朝相反方向运动,于是进入电离室内的粒子为 α 或<sup>7</sup>Li,这里先考虑 α 粒子。假设涂硼中子电离室置于均匀中子场中,中子垂直入射到阴极,中子与平板电离室壁的相互作用如图 2 所示。

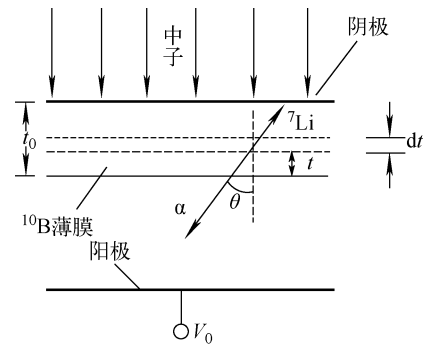


图 2 中子与平板电离室壁的相互作用

Fig. 2 Interaction between neutron and wall of plate ionization chamber

设入射中子注量率为  $\varphi$ ,与<sup>10</sup>B 的反应截面为  $\sigma$ ,硼膜线性厚度为  $t$ ,面积为  $S$ ,<sup>10</sup>B 原子数密度为  $n$ 。在  $t$  处取厚度为  $dt$  的薄硼层,则单位时间内中子在  $dt$  中与<sup>10</sup>B 发生的核反应数<sup>[10]</sup>为  $\varphi\sigma nSdt$ ,此即生成的 α 或 Li 的数目。于是,薄硼层内反应生成的 α 粒子中出射在  $\theta$  方向上(图 2)、立体角  $d\Omega$  内的数目  $dN$  为:

$$dN = \varphi\sigma nS \frac{2\pi\sin\theta d\theta}{4\pi} dt = \varphi S \frac{\sigma n}{2} \sin\theta d\theta dt \quad (1)$$

在  $t$  处沿  $\theta$  方向出射  $\alpha$  粒子在硼膜中所经路程  $R$  为:

$$R = t / \cos \theta \quad (2)$$

显然,  $\alpha$  粒子出射硼膜的条件是它在硼膜内经过的路程  $R$  小于它在硼膜内的射程  $R_\alpha$ 。 $\alpha$  属于重带电粒子, 其射程满足连续慢化近似条件<sup>[11]</sup>, 故  $\alpha$  粒子的出射条件可表示为:

$$R \leq R_\alpha \rightarrow \theta \leq \cos^{-1}(t/R_\alpha) = \theta_0 \quad (3)$$

式中:  $\theta_0$  为  $\alpha$  粒子射出硼膜的最大倾斜角。单位时间内从厚度为  $t$  的硼膜中出射而进入电离室灵敏体积的  $\alpha$  粒子数  $N$  为:

$$N = \varphi S \frac{\sigma n}{2} \int_0^{\theta_0} dt \int_0^{\theta_0} \sin \theta d\theta =$$

$$\varphi S \frac{\sigma n}{2} \int_0^{\theta_0} (1 - \cos \theta_0) dt =$$

$$\varphi S \frac{\sigma n}{2} \int_0^{\theta_0} (1 - \frac{t}{R_\alpha}) dt = \varphi S \frac{\sigma n}{2} t_0 (1 - \frac{t_0}{2R_\alpha}) \quad (4)$$

设进入电离室灵敏体积的  $\alpha$  粒子将其全部能量沉积在 P10 气体中而被探测, 则  $N$  亦可看作是单位时间内电离室所能探测到的中子数。而单位时间内入射到平板电离室硼膜面积  $S$  上的中子总数为  $\varphi S$ , 因此,  $\alpha$  粒子对平板电离室探测效率的贡献  $\epsilon_\alpha$  即为:

$$\epsilon_\alpha = \frac{N}{\varphi S} = \frac{\sigma n}{2} t_0 (1 - \frac{t_0}{2R_\alpha}) \quad (5)$$

当  $\alpha$  粒子射向阴极方向而不被记录时,  ${}^7\text{Li}$  离子射向气体被记录, 它对探测效率的贡献  $\epsilon_{\text{Li}}$  的计算方法与  $\alpha$  粒子类似, 其表达式为:

$$\epsilon_{\text{Li}} = \frac{\sigma n}{2} t_0 (1 - \frac{t_0}{2R_{\text{Li}}}) \quad (6)$$

式中:  $R_{\text{Li}}$  为反应产物 Li 离子在硼膜中的射程。

平板电离室的总探测效率  $\epsilon$  是  $\alpha$  粒子和 Li 离子贡献之和, 即:

$$\epsilon = \epsilon_\alpha + \epsilon_{\text{Li}} \quad (7)$$

## 2.2 探测效率的计算

设热中子入射, 则  $\sigma = 3.84 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ , 天然硼中  ${}^{10}\text{B}$  的丰度约为 20%, 可得  $n = 2.606 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 。由动量守恒和能量守恒知  $E_\alpha = 1.47 \text{ MeV}$ ,  $E_{\text{Li}} = 0.84 \text{ MeV}$ , 由 SRIM2006 软件求得  $R_\alpha = 3.55 \mu\text{m}$ ,  $R_{\text{Li}} = 1.84 \mu\text{m}$ , 得到探测效率与  $t$  的关系, 结果示于图 3。

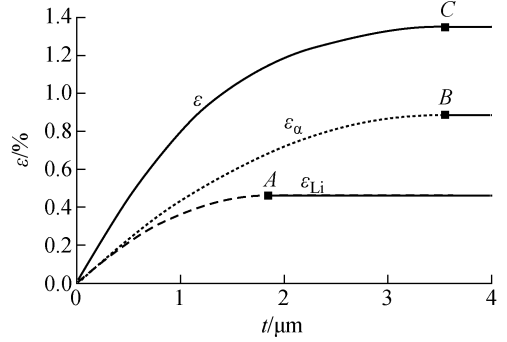


图 3 电离室探测效率与硼膜线性厚度的关系  
Fig. 3 Relationship between detection efficiency for thermal neutron and linear thickness of boron film

## 2.3 影响电离室探测效率的因素

### 1) 原子数密度

涂硼电离室中子探测效率与  $n$  成正比, 而  $n$  由硼材料决定。浓缩硼中  ${}^{10}\text{B}$  的丰度可达 98%, 故条件允许时采用浓缩硼可使探测效率提高近 5 倍。

### 2) 硼膜厚度

探测效率与硼膜厚度密切相关: 当  $t_0 < R_{\text{Li}}$  时, 探测效率随厚度增加而增大;  $R_{\text{Li}} \leq t_0 \leq R_\alpha$  时, 中子与硼发生核反应产生的 Li 离子数目将增多, 但同时沉积在硼中的 Li 也越来越多, 因此能从硼膜中出射的 Li 离子数目认为不变, 故  $\epsilon_{\text{Li}}$  在  $R_{\text{Li}}$  处达饱和值 0.46% (图 3 中的 A 点), 而此时  $\epsilon_\alpha$  继续增大;  $t_0 \geq R_\alpha$  时,  $\epsilon_\alpha$  亦达饱和值 0.89% (图 3 中的 B 点), 此时电离室饱和和总探测效率  $\epsilon$  为 1.35% (图 3 中的 C 点)。另外, 从图 3 中还可看出,  $\alpha$  和 Li 对探测效率的贡献相差不多。

### 3) 入射中子能量

根据文献[12], 慢中子反应截面与能量的关系可写为:

$$\sigma = 607.15 \sqrt{E} \quad (8)$$

对质量厚度为  $0.5 \text{ mg/cm}^2$  的硼膜, 上述能量范围内的中子探测效率列于表 1。

由表 1 可知, 电离室探测效率随着中子能量的增加而下降。热中子探测效率达 1.2%, 对 2.5 eV 中子为 0.12%, 与 Nanjo 等<sup>[8]</sup> 的结果一致。因而, 欲获得较高的探测效率, 必须先慢化快中子。

表1 涂硼电离室对慢中子的探测效率

Table 1 Detection efficiency of boron-lined ionization chamber for slow neutron

$E/\text{eV}$	$\epsilon/\%$	$E/\text{eV}$	$\epsilon/\%$	$E/\text{eV}$	$\epsilon/\%$	$E/\text{eV}$	$\epsilon/\%$
0.02	1.351	0.5	0.27	20	0.043	1 000	0.006
0.025	1.209	1	0.191	50	0.027	2 000	0.004
0.05	0.855	2	0.135	100	0.019	5 000	0.003
0.1	0.604	5	0.086	200	0.014		
0.2	0.427	10	0.06	500	0.009		

### 3 电离室灵敏度

#### 3.1 灵敏度的计算

电离室灵敏度  $\eta$  定义为单位注量率  $\varphi$  在中子辐射场中所产生的累计电流  $I^{[13]}$ , 即:

$$\eta = I/\varphi \quad (9)$$

灵敏度的计算方法有如下几种。

##### 1) 用已有公式计算

根据文献[14], 对一定能量的中子,  $\eta$  由下式决定:

$$\eta = \frac{1}{8} n\sigma (R_\alpha E_\alpha a + R_{\text{Li}} E_{\text{Li}} b) \frac{Se}{W_0} \quad (10)$$

式中:  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  C; 常数  $a$ 、 $b$  分别为  $\alpha$  粒子

和  ${}^7\text{Li}$  离子在气体中电离损失的校准因子, 选择合适的间距可使  $a=b=1$ ;  $W_0$  为工作气体平均电离能<sup>[13]</sup>。

对 P10 气体,  $W_0 = 25.7$  eV。设硼膜面积(即电离室阴极面积)  $S = 2 \times 10^3$   $\text{cm}^2$ , 则电离室的热中子灵敏度  $\eta = 8.43 \times 10^{-14}$   $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

##### 2) 灵敏度公式的推导

灵敏度的计算应考虑  $\alpha$  和 Li 各自对电流的贡献。设  $\alpha$  粒子的初始能量为  $E_\alpha$ , 单位时间内在  $t$  处、厚度为  $dt$  的薄硼层内, 出射在  $\theta$  方向的立体角  $d\Omega$  内的  $\alpha$  粒子数目  $dN$  满足式(1)。借助 SRIM2006 软件求得  $\alpha$  和 Li 在硼膜中的阻止本领, 结果列于表 2。

表2  $\alpha$  粒子和 Li 离子在硼膜中的阻止本领Table 2 Stopping power of  $\alpha$  particles and Li ions in boron film

粒子种类	$E/\text{MeV}$	电子阻止本领 $S_E$		核阻止本领 $S_N$	
		以 $\text{MeV} \cdot (\text{mg}/\text{cm}^2)^{-1}$ 为单位	以 $\text{MeV} \cdot \text{mm}^{-1}$ 为单位	以 $\text{MeV} \cdot (\text{mg}/\text{cm}^2)^{-1}$ 为单位	以 $\text{MeV} \cdot \text{mm}^{-1}$ 为单位
$\alpha$ 粒子	1.47	1.637	$3.831 \times 10^2$	$1.332 \times 10^{-3}$	$3.117 \times 10^{-1}$
Li 离子	0.84	3.161	$7.398 \times 10^2$	$7.663 \times 10^{-3}$	1.793

考虑到表 2 中  $S_N \ll S_E$ ,  $\alpha$  粒子在硼层中损失的能量可表示为  $S_E x / \cos \theta$ , 在 P10 气体中沉积的能量  $dE_r$  为:

$$dE_r = (E_\alpha - S_E \frac{t}{\cos \theta}) dN = \varphi S \frac{\sigma n}{2} (E_\alpha - S_E \frac{t}{\cos \theta}) \sin \theta dt \quad (11)$$

设所有进入电离室灵敏体积内的  $\alpha$  粒子将全部能量沉积在 P10 气体中而被探测, 则这部分  $\alpha$  粒子对累积电流的贡献为:

$$dI_\alpha = \frac{dE_r}{W_0} e \quad (12)$$

$\alpha$  粒子对电离室累计电流的贡献为:

$$I_\alpha = \varphi S \frac{\sigma n}{2} \cdot \frac{e}{W_0} \int_0^{t_0} dt \int_0^{\theta_0} (E_\alpha - S_{E(\alpha)} \frac{t}{\cos \theta}) \sin \theta d\theta = \frac{\sigma e \varphi S}{2W_0} [E_\alpha t_0 (1 - \frac{t_0}{2R_\alpha}) + S_{E(\alpha)} \frac{t_0^2}{2} (\ln \frac{t_0}{R_\alpha} - \frac{1}{2})] \quad (13)$$

类似得到 Li 离子对电离室累计电流的贡献为:

$$I_{\text{Li}} = \frac{\sigma e \varphi S}{2W_0} [E_{\text{Li}} t_0 (1 - \frac{t_0}{2R_{\text{Li}}}) +$$

$$S_{E(Li)} \frac{t_0^2}{2} \left( \ln \frac{t_0}{R_{Li}} - \frac{1}{2} \right) \quad (14)$$

电流电离室的灵敏度应为  $\alpha$  和 Li 两部分贡献之和:

$$\eta = \eta_\alpha + \eta_{Li} = \frac{I_\alpha + I_{Li}}{\varphi} =$$

$$\frac{oneS}{2W_0} \left[ E_\alpha t_0 \left( 1 - \frac{t_0}{2R_\alpha} \right) + S_{E(\alpha)} \frac{t_0^2}{2} \left( \ln \frac{t_0}{R_\alpha} - \frac{1}{2} \right) \right] +$$

$$\frac{oneS}{2W_0} \left[ E_{Li} t_0 \left( 1 - \frac{t_0}{2R_{Li}} \right) + S_{E(Li)} \frac{t_0^2}{2} \left( \ln \frac{t_0}{R_{Li}} - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (15)$$

式(15)即为涂硼电离室中子灵敏度的计算公式。

### 3) 灵敏度计算结果及评价

$\alpha$  和 Li 对累计电流的贡献  $I_\alpha$  和  $I_{Li}$  存在饱和效应,  $t_0 = R_{Li}$  时,  $\eta_{Li}$  达到饱和值, 即:

$$\eta_{Li} = \frac{\sigma n}{4} (E_{Li} R_{Li} - \frac{1}{2} S_{E(Li)} R_{Li}^2) \frac{Se}{W_0} \quad (16)$$

类似地,  $t_0 = R_\alpha$  时,  $\eta_\alpha$  达饱和值, 即:

$$\eta_\alpha = \frac{\sigma n}{4} (E_\alpha R_\alpha - \frac{1}{2} S_{E(\alpha)} R_\alpha^2) \frac{Se}{W_0} \quad (17)$$

假设入射为热中子,  $\eta_{Li} = 9.14 \times 10^{-15} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\eta_\alpha = 8.74 \times 10^{-14} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此, 电离室总灵敏度饱和值  $\eta = \eta_{Li} + \eta_\alpha = 9.65 \times 10^{-14} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 与文献[14]结果 ( $8.43 \times 10^{-14} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 基本一致。

## 3.2 影响灵敏度的因素

### 1) 硼膜厚度

当热中子入射到充 P10 气体的涂硼电离室时, 由上述参数可得灵敏度  $\eta_\alpha$ 、 $\eta_{Li}$  和  $\eta$  与硼膜质量厚度  $x$  的关系曲线(图 4)。

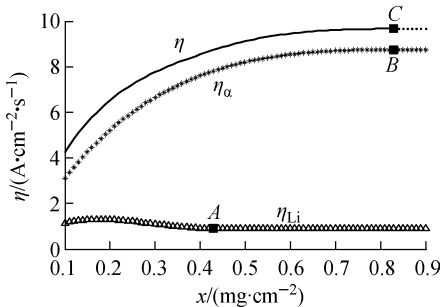


图 4 灵敏度与硼膜质量厚度的关系

Fig.4 Relationship between sensitivity

of ionization chamber and mass thickness of boron film

从图 4 可知,  $\alpha$  和 Li 对灵敏度的贡献  $\eta_\alpha$ 、 $\eta_{Li}$  均随硼膜质量厚度  $x$  的增加而增大, 其中,  $\eta_{Li}$  在  $R_{Li}$  处(A 点)达到饱和值  $0.91 \times 10^{-14} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 而  $\eta_\alpha$  在  $R_\alpha$  处(B 点)达到饱和值  $8.74 \times 10^{-14} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 故总灵敏度亦在此处(C 点)达到饱和值  $9.65 \times 10^{-14} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当  $x = 0.5 \text{ mg/cm}^2$  时, 对应电离室灵敏度为  $9.1 \times 10^{-14} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由图 4 还可看出,  $\alpha$  粒子对灵敏度的贡献在电离室中占主导地位。在  $x = 0.5 \text{ mg/cm}^2$  时,  $\alpha$  贡献约为 Li 的 9 倍。

### 2) 工作气体和气压

工作气压的影响主要是通过影响  $\alpha$  粒子射程来影响灵敏度。气压越大, P10 密度也越大,  $\alpha$  粒子在其中的射程就越小, 从而沉积更多的能量, 电离室灵敏度就越大, 从而有利于弱中子场的测量。但气压增大会导致离子复合增大、所需电压增大、电离室壁承受能力以及气体密封等问题。

### 3) 其他因素

主要包括电离室自身尺寸、中子能量、硼材料等。电离室自身尺寸影响主要来源于电极间距和阴极涂硼面积, 合适的电极间距下  $\eta$  与  $S$  成正比。Dighe 等<sup>[15]</sup>在涂硼正比管灵敏体积中运用了多挡板的阴极结构, 将灵敏度提高到了原来的 2.5 倍。因中子反应截面  $\sigma$  随能量  $E$  的增加而减小, 因而慢化中子可提高灵敏度。条件允许时采用富集硼涂抹, 可在相同条件下使灵敏度提高近 5 倍。

## 4 结果与讨论

本工作从电离室的工作原理出发导出了平板型涂硼电离室探测效率及灵敏度的计算公式, 继而得出了自制电离室对热中子的探测效率和灵敏度, 并与已有公式求得的结果进行了比较。

1) 平板型涂硼电离室探测效率与硼膜质量厚度密切相关: 当质量厚度为  $0.5 \text{ mg/cm}^2$  时探测效率为 1.2%, 在  $0.83 \text{ mg/cm}^2$  时达饱和值 1.35%。 $\alpha$  与 Li 对探测效率的贡献相差不多, 达饱和时约为 Li 的 2 倍。

2) 由电离室探测效率得到其热中子灵敏度饱和值为  $9.65 \times 10^{-14} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 与文

献[14]结果大致一致。 $\alpha$ 粒子对电离室灵敏度的贡献占主导地位,达饱和时约为Li的10倍。

3) 慢化快中子、选用浓缩硼、适当选取硼膜厚度可提高涂硼电离室探测效率与灵敏度。此外,电离室灵敏度还与其自身尺寸、工作气体和气压等因素有关。

电离室探测效率与灵敏度受各种因素制约,实际应用中通常要综合考虑、权衡利弊,既要保证电离室性能,又要简化加工过程、节约成本,以达最优性价比。

#### 参考文献:

- [1] 吴志华. 原子核物理实验方法[M]. 北京:原子能出版社,1997:296.
- [2] 张紫霞,魏志勇,方美华,等. 空间环境中子效应及测量技术[J]. 装备环境工程,2009,6(4):5-11.  
ZHANG Zixia, WEI Zhiyong, FANG Meihua, et al. Neutron radiation effects of space environment and measuring technique[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(4): 5-11(in Chinese).
- [3] 丁大钊,叶春堂,赵志祥,等. 中子物理学(上)[M]. 北京:原子能出版社,2005:92.
- [4] 丁大钊. 中子物理学[M]. 北京:原子能出版社,2001:130-147.
- [5] 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 Yuanbai, et al. Research on the performance of thermal neutron proportional counters and the effect of one-dimension  $^3\text{He}$  position sensitive detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2007, 27(2): 367-371(in Chinese).
- [6] GUNTER P. Neutron sensitivity of a polyethylene-walled electret ionization chamber[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1985, 234(1): 183-190.
- [7] ENDO S, HOSHI M, SUGA S, et al. Determination of the relative neutron sensitivity of a C-CO<sub>2</sub> ionization chamber[J]. Physics in Medicine and Biology, 1996, 41(6): 1 037-1 043.
- [8] NANJO H, BANDO T, HASUKO K, et al. Neutron sensitivity of thin dap chambers[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2005, 543: 441-453.
- [9] BOLOZDYNIA A, BOLOTNIKOV A, RICHARDS J, et al. Detection of thermal neutrons in cylindrical ionization chamber filled with high-pressure Xe+<sup>3</sup>He gas mixture[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2004, 522: 595-597.
- [10] 卢希庭. 原子核物理(修订版)[M]. 北京:原子能出版社,2000:238.
- [11] 魏志勇. 辐射剂量学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2010:1.
- [12] GLENN F K. Radiation detection and measurement [M]. Second Edition. Quebec, Canada: Quebecor Printing, 2000: 521.
- [13] 凌球,郭兰英. 核辐射探测[M]. 北京:原子能出版社,1992:45-70.
- [14] 于群. 原子核物理试验方法[M]. 北京:人民教育出版社,1961:216.
- [15] 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: 154-161.