

# 涂硼正比计数管性能参数优化研究进展

赵修良,程晓龙,周剑良,刘丽艳,杨志远

南华大学核科学技术学院,湖南衡阳 421001

**摘要** 介绍了与涂硼正比计数管性能参数相关的因素,从涂硼管自身的结构设计、制作工艺、管外慢化体设计的角度,对提高其性能的技术方法进行了综述分析,推导了硼含量和涂硼层厚度与探测效率间的关系,明确了当前提高涂硼层面积、涂硼工艺、耐高温设计的技术动态。分析表明,涂硼正比计数管应向选择性能更佳的填充气体、更成熟的阳极丝安装工艺和涂硼层制作工艺等方向发展。

**关键词** 涂硼正比计数管;硼层;阳极丝;填充气体;耐高温技术

**中图分类号** TL816.3

**文献标志码** A

**DOI** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.33.012

## Improvement of the Performance Parameters of Boron-lined Proportional Counter

ZHAO Xiuliang, CHENG Xiaolong, ZHOU Jianliang, LIU Liyan, YANG Zhiyuan

School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, Hunan Province, China

**Abstract** The factors related to the performance parameters of a Boron-lined proportional counter are discussed in this paper, the approaches and techniques for improving the performance are summarized and analyzed based on the structure design, the manufacture technique and the moderator of the Boron-lined proportional counter. The effects of an enriched  $^{10}\text{B}$  and the Boron-lined floor thickness on the detection efficiency are determined, the technical tendency of adding the surface area, the Boron-lined method and the thermostability is illustrated. The Boron-lined proportional counter will be developed in the way of choosing more suitable filling gas, better-developed anode wire mounting technology and Boron-lined technique in the future.

**Keywords** Boron-lined proportional counter; Boron floor; anode wire; filling gas; thermostability technique

### 0 引言

涂硼正比计数管一般应用于热中子探测。与传统的  $\text{BF}_3$  和  $^3\text{He}$  正比计数管相比,具有易实现更高的中子探测效率、更好的抗背景  $\gamma$  辐射和长期工作稳定性好等特点,尤其适合在反应堆附近存在高温或强  $\gamma$  干扰的环境中进行中子探测<sup>[1,2]</sup>。高剂量  $\gamma$  辐射会使  $\text{BF}_3$  气体分解产生含氟自由基,这些自由基会给环境带来一定安全隐患<sup>[3]</sup>,同时这些自由基具有电负性,能吸附电子而减少电子脉冲的数量,影响探测性能。 $^3\text{He}$  正比计数管在环境  $\gamma$  剂量超过几十  $\mu\text{Sv/h}$  时,必须采取防护措施<sup>[4]</sup>。目前面临最大的问题是  $^3\text{He}$  气体的缺乏,随着  $^3\text{He}$  正比计数管的广泛应用,世界每年所需的  $^3\text{He}$  量约为 65000L,而供应量却只有约 15000L,仅美国 1 年用于国土安全监测的  $^3\text{He}$  量就超过了世界供应量<sup>[5,6]</sup>。基于上述原因,涂硼正比计数管得到更快的发展,本文分别从涂硼正比管自身的涂硼层厚度、硼膜面积、涂硼工艺、耐高温设计和涂硼正比计数管周围

慢化体等角度,讨论提高计数管性能参数的措施,对现有技术进行了总结及展望。

### 1 涂硼正比计数管的性能影响

涂硼正比计数管中  $^{10}\text{B}$  的含量、涂硼层厚度、涂硼面积对中子的探测效率和灵敏度均有较大影响,涂硼工艺关系到硼膜的均匀性,也直接影响到探测效率,合理的阳极丝的安装工艺可提高计数管耐高温的性能。

#### 1.1 $^{10}\text{B}$ 的含量及涂层厚度对中子探测效率的影响

涂硼正比管测量中子的原理<sup>[7]</sup>是:在阴极壁内侧涂上一定厚度的硼膜,入射的热中子与硼发生反应生成  $\alpha$  粒子和  $\text{Li}$  粒子,粒子逸出硼膜与管内气体分子碰撞生成新的电子离子对,在外加电场的作用下分别向阴阳极漂移并在阳极形成电子雪崩,阳极输出脉冲测量中子信息,如图 1 所示。

收稿日期:2013-07-15;修回日期:2013-09-23

基金项目:国家国防科技工业局军品配套科研项目(JPPT-115-5-882)

作者简介:赵修良,教授,研究方向为核电子学与测控技术,电子信箱:zxl13327341099@163.com

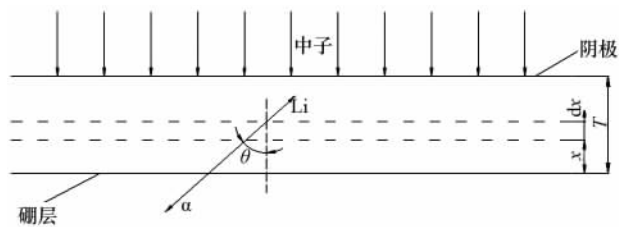
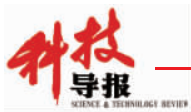


图1 中子与涂硼正比计数管管壁相互作用示意  
Fig. 1 Interaction between neutron and wall of Boron-lined proportional counter

入灵敏体内的粒子将其全部能量沉积在填充气体中而被探测,中子探测效率为

$$\varepsilon = N/\phi S \quad (1)$$

式中,  $N$  为单位时间正比计数管可探测到的中子数,  $n/s$ ; 入射中子注量率为  $\phi, cm^2 \cdot s^{-1}$ ; 硼膜表面积  $S, cm^2$ ; 单位时间入射到硼膜上的中子数为  $\phi S$ 。

入射热中子与硼原子发生碰撞,生成的  $\alpha$  粒子和 Li 粒子沿着相反的方向运动,每次只能有一种粒子逸出涂硼层,由于  $E_{\alpha}=1.47MeV, E_{Li}=0.84MeV$ ,多数情况下优先考虑  $\alpha$  粒子。在  $x$  处取厚度为  $dx$  的薄膜层,单位时间中子在  $dx$  内与  $^{10}B$  发生反应数为  $\phi \sigma n S dx$ 。进而,生成的粒子中出射在  $\theta$  方向上、立体角为  $d\Omega$  内的数目为

$$dN = \phi \sigma n \frac{2\pi \sin\theta d\theta}{4\pi} dx \quad (2)$$

式中,  $\sigma$  为中子与  $^{10}B$  的反应截面,  $10^{-24}cm^2$ ; 硼膜线性厚度为  $x, cm$ ; 原子密度为  $n, cm^{-3}$ 。在  $x$  处沿  $\theta$  方向出射的  $\alpha$  粒子的路程为

$$l_{\alpha} = x/\cos\theta \quad (3)$$

$\alpha$  粒子逸出硼膜的条件是硼膜内经过的路程小于硼膜内的射程,其射程满足连续慢化近似条件,最终积分计算出单位时间内从厚度为  $x$  的硼膜中逸出进入灵敏体内的  $\alpha$  粒子数为

$$N = \phi S \frac{\sigma n}{2} x \left(1 - \frac{x}{2R}\right) \quad (4)$$

式中,  $R$  为 Li 粒子在硼膜中的射程,  $cm$ 。结合式(1)可得出  $\alpha$  粒子对探测效率的贡献为

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\sigma n}{2} x \left(1 - \frac{x}{2l_{\alpha}}\right) \quad (5)$$

同理计算出 Li 粒子对正比管探测效率的贡献为

$$\varepsilon_{Li} = \frac{\sigma n}{2} x \left(1 - \frac{x}{2l_{Li}}\right) \quad (6)$$

从式(5)可以看出,中子探测效率和  $n$  成正比,天然  $^{10}B$  丰度约为 18%,现在浓缩技术可实现 98%的丰度值,目前多数的涂硼正比管采用的是 96%丰度的  $^{10}B^{91}$ 。

从式(5)、式(6)可以看出,硼膜的厚度与探测效率相关:当  $x < l_{\alpha}$  时,探测效率随厚度增大而增加;当  $l_{Li} < x < l_{\alpha}$  时,中子与硼发生反应产生的 Li 和  $\alpha$  粒子数目增加,同时沉积在硼层中

Li 粒子也增加, Li 粒子的逸出可近似为不变,但是  $\alpha$  粒子增加导致探测效率继续变大;当  $x > l_{\alpha}$  时探测效率达到饱和,继续增加会降低效率。文献[9]表明,最佳的涂硼层厚度为 0.4~0.8mg/cm<sup>2</sup>, Ziegler 等<sup>[10]</sup>利用 SRIM 程序计算发现,当  $^{10}B$  的丰度为 90%、硼膜密度为 2.195g/cm<sup>3</sup>、厚度为 0.47~0.88mg/cm<sup>2</sup> 时,可达到较高的探测效率,同时也为计算机程序在硼膜设计中的应用提供了参考。方美华等<sup>[11]</sup>对涂硼正比计数管的热中子响应函数计算公式进行了推导,并得出了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 2 种情况时的响应函数得到一种普适的响应表达式,在计算探测效率方面有很好的参考价值。

### 1.2 阴极涂硼层面积对正比计数管灵敏度的影响

目前应用的涂硼正比计数管结构如图 2 所示<sup>[12]</sup>,丰度 90% 以上的  $^{10}B$  涂敷在计数管阴极壁内侧,阳极由几十  $\mu m$  直径的镀金钨丝从计数管中部贯穿,阴极直径在几十 mm 之间。

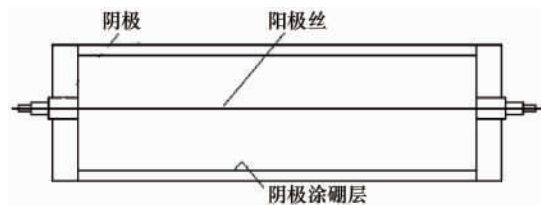


图2 圆柱形正比计数管  
Fig. 2 Schematic diagram of Boron-coated counter of cylindrical shape

文献[13]表明,管内电场强度在阳极丝附近的范围骤增,电子雪崩也发生在很窄小的区域,靠近阴极的电场强度很小,如果计数管直径较大则会使形成的电子离子对漂移较长时间才可达阳极,从而使成形脉冲上升时间变长,降低快时间测量性能。而阴极涂硼面积的增加会增大计数管的灵敏度,因此高灵敏的正比计数管是通过增加灵敏体的长度来实现,而不是靠增加直径<sup>[14-15]</sup>。直径变大对环境  $\gamma$  辐射的灵敏度也会增加,所需的工作电压也随之增强。目前增加涂硼面积的方法有以下 2 种:(1) 将多个计数管并联放置在一个大的圆柱体内,形成探测阵列,计数管的数目根据实际设计需求而不同,如图 3 所示<sup>[12]</sup>;(2) 在阴极表面焊接多个环形阴极栅或者将多个小尺寸的环状阴极栅焊接在一起,如图 4 所示<sup>[12]</sup>。

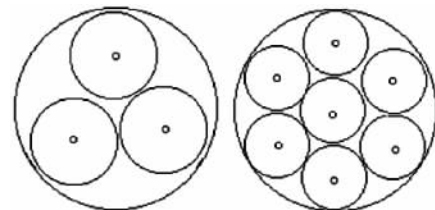


图3 涂硼管阵列  
Fig. 3 Boron-lined counter with multiple cathode assembly

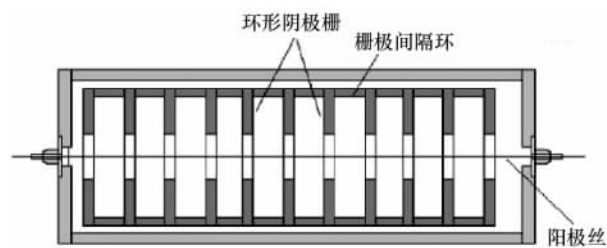


图 4 具有阴极栅的涂硼正比计数管

Fig. 4 Boron-lined counter with annular baffles

第 1 种方法是从  $^3\text{He}$  阵列探测器<sup>[16-18]</sup>发展出来的,具体形式为在一个不锈钢材质的圆柱体内放置现成的涂硼计数管,一般涂硼管的外径在 15~30mm,根据圆柱体尺寸和探测面积的需要决定计数管的数目。各计数管并列放置,所有的阳极丝由一根共同的结点连接,输出脉冲信号,阴极壁全部接地即可。经过实验发现计数管的灵敏度和探测效率有所增加,但并不随管数的增加成正比关系,是因为当多个管排列在一起时,有互相重叠的区域,且有效面积增加较少<sup>[12]</sup>。该方法的主要优点是,充分利用现有的产品进行简单的组装即可达到较高的探测效率并实现大面积测量,目前该方法是用涂硼管替代  $^3\text{He}$  正比管实现大面积港口检测的主要方式<sup>[19-21]</sup>;缺点是达到较高的探测效率需要更多的计数管,成本增加。

第 2 种方法由 Dighe 等<sup>[12,22]</sup>提出,具体形式为,将计数管阴极设计成为由若干个环形阴极栅和阴极间隔环焊接成的组合阴极,每个阴极栅和间隔环采用浸涂涂硼工艺,附着一定质量厚度的浓缩  $^{10}\text{B}$ ,这样在增加了阴极表面积的同时并没有改变阴极直径大小,同时也可通过增减栅-环数目来适应不同的计数管长度需求。通过 Infosys 5.6 程序包,对内部电场分析,结果表明增加阴极栅并没有对原有的电场分布造成影响。经过与同样尺寸的涂硼管对比实验发现,二者抗背景  $\gamma$  辐射干扰性能基本一致。而新式涂硼管阴极表面积扩大了 2.8 倍,灵敏度扩大了近 3 倍。该方法的主要优点是,仅改变阴极结构而计数管外部结构及配置电压均不需要改变,栅-环组合灵活,且与传统的阴极整体涂硼相比,更易采用浸涂工艺实现厚度均匀的硼膜。有学者<sup>[23]</sup>在此基础上,将栅-环的表面设计成为金字塔型的结构,通过实验也得到了较好的探测性能。该方法的缺点主要在于对栅-环焊接及阴极组装工艺要求较高,反之会使探测到的故障脉冲增加。

### 1.3 硼膜制作及阳极丝安装工艺

硼膜的制作是研制涂硼正比管的关键,硼膜的厚度均匀性决定着探测器的性能和最佳使用工况的选择。目前关于硼膜制作工艺的详细报道较少,且没有涉及涂抹细节。陈国云等<sup>[24,25]</sup>以芳华树脂、硼粉和 1,2-二氯乙烷为原料,提出了浸没涂硼和手工涂硼 2 种方法。浸没涂硼是将涂面完全浸没在配制好的溶液中,保持几分钟后取出,再放入烘烤箱中烤干的方法。这种方法的缺点是需要的原料较多且浪费。手工刷涂是将配制好的溶液缓慢浇注在待涂面上,同时用刷子均匀刷

涂,直至溶液用完,然后在进行烘烤即可。清华大学 CPHS 团队<sup>[26]</sup>采用电蒸发法、电泳法和原子层沉积法对涂硼层制作进行了研究。电蒸发法做出的硼膜具有较好的黏附性,但是厚度的均匀性还需要进一步提升;原子沉积法可以得到大面积且均匀的硼膜,有报道利用该法制作成  $8\text{m}^2$ ,且不均匀性小于  $\pm 2\%$  的硼膜<sup>[27]</sup>。

一般的涂硼正比计数管或  $\text{BF}_3$ 、 $^3\text{He}$  计数管在  $120^\circ\text{C}$  的环境温度下正常工作,在更高的温度各项性能就会降低,甚至无法使用。文献<sup>[28]</sup>报道了一种涂硼正比计数管可在  $200^\circ\text{C}$  的环境温度下达到  $10\text{cps/nv}$  的灵敏度。而最新发展出的快增殖堆,需要中子探测器在  $250^\circ\text{C}$  温度下具有较高的灵敏度。高温裂变计数管能在  $600^\circ\text{C}$  高温下工作,但是灵敏度小于  $1\text{cps/nv}$ 。Dighe 等<sup>[29]</sup>从阳极丝安装工艺的角度出发,设计了新的安装方案,不仅提升了涂硼计数管耐高温能力,且在  $250^\circ\text{C}$  的快增殖堆周围探测器的灵敏度达到  $60\text{cps/nv}$ 。Roy 等<sup>[30]</sup>也提出用特氟龙做绝缘材料的  $4\pi$  正比管的阳极丝安装工艺,但是特氟龙材料不适用于在反应堆环境下使用。

## 2 慢化体的影响

涂硼正比计数管对热中子有很高的探测效率,对于快中子的探测则需要增加合适的慢化体。常用的慢化材料有聚乙烯、石蜡和石墨,其中聚乙烯的慢化效果最好,石墨最差<sup>[31,32]</sup>。慢化体的结构和尺寸都会影响探测器的探测效<sup>[33,34]</sup>。一般衡量计数管探测效果采用相对探测效率和绝对探测效率<sup>[35]</sup>。相对探测效率与上文中提到的探测效率概念类似,又被称为本征探测效率;绝对探测效率是指与计数管灵敏体材料发生反应并被记录的中子数与放射源发出的中子数的比值,又称作源效率。现有的分析方法多是采用蒙特卡洛模拟的方法<sup>[36-38]</sup>,陈学勇等<sup>[39]</sup>模拟计算了涂硼计数管在不同慢化体厚度情况下,对各能量单能中子的相对探测效率和绝对探测效率的关系,并应用典型的快堆中子能谱进行了验证。其结论可作为涂硼管在不同慢化体和不同中子能量下的设计指导,即在中子能量  $0.025\text{eV}\sim 15\text{MeV}$  范围内,慢化层厚度不变时,计数管的相对探测效率会随着能量的增加逐渐降低;而绝对探测效率先增加后降低,最大值多在  $1\text{MeV}$  左右,且绝对探测效率最大值前有一段较长的平坦区,区域中的绝对探测效率随入射中子的能量增加变化不大,这是  $^{10}\text{B}$  作为灵敏材料与  $^3\text{He}$  相比的一个突出的优点;入射中子能量不变时,随着慢化层厚度的增加相对探测效率也有所增加。

## 3 发展前景

涂硼正比计数管与  $\text{BF}_3$  和  $^3\text{He}$  正比计数管相比的优势在于:(1) 工作电压低(一般低于  $1000\text{V}$ );计数率高(实验表明  $250\text{V}$  工作电压下的计数率是  $800\text{V}$  电压下  $\text{BF}_3$  的 2.5 倍左右);(2) 可选择适当的工作气体使脉冲上升时间缩短(LND, INC 的 232 型<sup>[40]</sup>涂硼管脉冲上升时间  $200\text{ns}$ )可实现快测量;

(3) 抗  $\gamma$  辐射干扰 (ICRP 2011 报道涂硼管的抗  $\gamma$  剂量可达 1000R/h); (4) 由于其较低的工作电压和充气气压, 具有长时间的使用周期。

基于测量原理, 涂硼管也存在固有的缺陷。由于中子和硼原子的反应发生在管壁, 每次与灵敏气体反应的只有部分生成粒子, 在能谱测量中没有全能峰, 也没有明显的电压-计数率坪曲线, 造成了探测效率低 (约为 10%, 一般  $^3\text{He}$  管为 77%、 $\text{BF}_3$  管为 40%), 长期应用时, 计数稳定性较差。针对上述优缺点目前的研究方向主要为: (1) 提升硼膜制作工艺, 包括增加硼膜面积、提高硼膜均匀性和改良硼膜成分等, 目前有采用  $\text{B}_4\text{C}$  和  $\text{B}_2\text{O}_3$  作为转换层的报道<sup>[26,40]</sup>, 并取得了一定进展; (2) 通过改变气体组分和组成探测阵列提高探测效率, 目前研制的“稻草”阵列探测器<sup>[41,42]</sup>取得了近似  $^3\text{He}$  的探测效率, 且在海港进出口放射性检测上得到应用; (3) 耐高温和耐高  $\gamma$  辐射设计, 目前的产品的工作温度多在  $-50\sim 120^\circ\text{C}$ <sup>[29]</sup>, 文献[28]也提出有耐  $200^\circ\text{C}$  高温的报道, 但是随着快增殖堆的应用需要耐高温程度达到  $250^\circ\text{C}$  以上, 目前的耐高温技术多是在改善管壁绝热材料、阳极丝端部隔离层材料和填充气体的性质这些方面开展, 但对于反应堆周围中子剂量监控, 由于涂硼管具有很高的抗  $\gamma$  背景辐射和填充气体选择灵活的特点, 是目前研究的热点<sup>[43]</sup>; (4) 探测更短时间的核信号, 组建更快的时间测量系统, 目前可达到几百 ns 量级, 研究表明<sup>[44]</sup>可通过优化气体组分, 填充合适的猝灭气体达到更短的脉冲上升时间。

#### 4 结论

现有的  $^{10}\text{B}$  富积技术、气体密封技术和硼膜制作工艺, 已达到生产较高质量的涂硼正比计数管的水平。提高涂硼管的探测效率是技术发展的关键, 结合蒙特卡洛模拟程序可以为慢化层的最优设计提供参考。基于  $^3\text{He}$  正比计数管和  $\text{BF}_3$  正比计数管的固有缺陷, 涂硼正比计数管是将来替代二者的最佳选择。

#### 参考文献 (References)

- [1] Baalounamer M, Belaragueb C, Mazed D. Gas gain measurement in helium-isobutane mixtures filled proportional counter[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1996, 382(3): 490-494.
- [2] Zhou T, David R, Sicco B, et al. Neutron detection based on a boron shielded gamma detector: WO, 2012/012101[P]. 2012-01-26.
- [3] Mazed D. Experimental gas amplification study in boron-lined proportional counter for neutron detection[J]. Radiation Measurement, 2007, 42(2): 245-250.
- [4] Ravazzani A, Para F, Jaime R, et al. Characterisation of  $^3\text{He}$  proportional counters[J]. Radiation Measurements, 2006, 41(5): 582-593.
- [5] Kouzes R T, Ely J H, Erikson L E, et al. Neutron detection alternatives to  $^3\text{He}$  for national security applications[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2010, 623(3): 1035-1045.
- [6] Tomasin A, Peerani P, Greet J M. On the optimization of the use of  $^3\text{He}$  in radiational portal monitors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2013, 700(1): 81-85.
- [7] 吴治华, 齐卉荃, 沈能学, 等. 原子核物理实验方法 [M]. 北京: 原子能出版社, 1997.  
Wu Zhihua, Qi Huiquan, Shen Nengxue, et al. Nuclear physics experiment method[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1997.
- [8] Runkle R C, Chichester D L, Thompson S J. Rattling nucleons: New developments in active interrogation of special nuclear material[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2012, 663(1): 75-95.
- [9] Braby L A, Badhwar G D. Proportional counter as neutron detector[J]. Radiation Measurements, 2001, 33(3): 265-267.
- [10] Ziegler J F. SRIM-2003[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2004, 219-220: 1027-1036.
- [11] 方美华, 魏志勇, 张紫霞, 等. 涂硼正比计数管中热中子响应函数理论计算及模拟验证[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(1): 81-86.  
Fang Meihua, Wei Zhiyong, Zhang Zixia, et al. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(1): 81-86.
- [12] 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.
- [13] 陈国云, 魏志勇, 辛勇, 等. 圆柱形正比计数管倍增研究[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(11): 1356-1360.  
Chen Guoyun, Wei Zhiyong, Xin Yong, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(11): 1356-1360.
- [14] Baddingfield D H, Johnson N H, Menlove H O.  $^3\text{He}$  neutron proportional counter performance in high gamma-ray dose environments[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2000, 455(3): 670-682.
- [15] Kudo K, Takeda N, Uritani A, et al. Ideal response function of a  $^3\text{He}$  proportional counter to thermal neutrons determined by different length counters [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2004(213): 305-309.
- [16] Yaar L, Peysakhov. A multiple-detector radioactive detection spectroscopic (RMDS) portal [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2013, 712(1): 62-74.
- [17] Loiza D J. High-efficiency  $^3\text{He}$  proportional counter for the detection of delayed neutron [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1999, 422(1): 43-46.
- [18] 王中杰, 张全虎, 刘杰, 等. 基于 MCNP 模拟的中子多重性计数器  $^3\text{He}$  管的设计[J]. 核电子学与探测技术, 2010, 30(12): 1626-1630.  
Wang Zhongjie, Zhang Quanhu, Liu Jie, et al. Nuclear Electronic & Detection Technology, 2010, 30(12): 1626-1630.
- [19] Henzlova D, Evans L G, Menlove H O, et al. Experimental evaluation of a boron-lined parallel plate proportional counter for use in nuclear safeguards coincidence counting[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2013, 697(1): 114-121.
- [20] Tsohatzoglou K, McKeag R D. Novel and efficient  $^{10}\text{B}$  lined tubelet detector as a replacement for  $^3\text{He}$  neutron proportional counters[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2011, 652(1): 381-383.
- [21] Andersen K, Bigault T, Birch J, et al.  $^{10}\text{B}$  multi-grid proportional gas counters for large area thermal neutron detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods A, 2013, 720(21): 116-121.
- [22] Dighe P M. New cathode design boron lined proportional counters for neutron area monitoring application [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007, 575(3): 461-465.

- [23] Stefanescu I, Abdullahi Y, Birth J, et al. Development of a novel macrostructured cathode for large-area neutron based on the  $^{10}\text{B}$ -containing solid converter [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2013, 727(1): 109-125.
- [24] 陈国云, 魏志勇, 黄福成, 等. 浸酯涂硼-中子探测器灵敏层制作方法[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(3): 485-490.  
Chen Guoyun, Wei Zhiyong, Huang Fucheng, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(3): 485-490.
- [25] 陈国云, 魏志勇, 黄福成, 等. 辐射探测器定量涂硼技术[J]. 核电子学与探测技术, 2012, 32(9): 1066-1069.  
Chen Guoyun, Wei Zhiyong, Huang Fucheng, et al. Nuclear Electronics & Detector Technology, 2012, 32(9): 1066-1069.
- [26] Putkone M, Niinistö L. Atomic layer deposition of  $\text{B}_2\text{O}_3$  thin films at room temperature[J]. The Solid Films, 2006, 514(1): 145-149.
- [27] Putkonen M, Sajavaara T, Rakkila P, et al. Atomic layer deposition and characterization of biocompatible hydroxyapatite thin films[J]. Thin Solid Films, 2009, 517(20): 5819-5824.
- [28] Linterur A T, Kouzes R T, Ely J H, et al. Boron-lined neutron detector measurements[R]. Richland, USA: Pacific Northwest National Laboratory, 2009.
- [29] Dighe P M, Prasad D N, Rao K V, et al. Anode wire mounting technique for high temperature boron-10 lined proportional counter[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2010, 621(1): 713-715.
- [30] Roy J C. Technique for mounting an anode wire in a  $4\pi$  proportional counter [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1970, 87(2): 323.
- [31] 罗鹏, 姚泽恩, 梁一, 等.  $\text{T}(d,n)^4\text{He}$  反应快中子屏蔽体优化设计的蒙特卡罗模拟[J]. 核技术, 2008, 31(10): 757-760.  
Luo Peng, Yao Zeen, Liang Yi, et al. Nuclear Techniques, 2008, 31(10): 757-760.
- [32] 曾心苗, 周鹏, 秦培中, 等. 不同材料的中子透射 Monte Carlo 模拟计算[J]. 核技术, 2011, 34(3): 188-192.  
Zeng Xinmiao, Zhou Peng Qin Peizhong, et al. Nuclear Techniques, 2011, 34(3): 188-192.
- [33] 刘高杰. 正比计数管及其屏蔽厚度的 Monte Carlo(MCNP)研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2011.
- Liu Gaojie. Monte carlo simulation of proportional counter tube and the shielding layer thickness[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2011.
- [34] 陈学勇, 廖燕飞, 祝庆军, 等. 涂硼正比计数管慢化体对中子探测效率影响研究[J]. 核科学与工程, 2013, 33(1): 55-59.  
Chen Xueyong, Liao Yanfei Zhu Qingjie, et al. Nuclear Science and Engineering, 2013, 33(1): 55-59.
- [35] 凌球, 郭兰英. 核辐射探测[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.  
Ling Qiu, Guo Lanying. Nuclear radiation detection[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2002.
- [36] Takeda N, Kudo K, Sugita T, et al. Monte Carlo simulation of gamma-ray response functions for a proportional counter used for neutron measurement[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2000, 53(4): 893-896.
- [37] Kudo K, Takeda N, Uritani A, et al. Ideal response function of a He proportional counter to thermal neutrons determined by different length counters[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2004(213): 305-309.
- [38] Alkaa A, Mitev K, Segur P. A fast technique for Monte Carlo simulation of the process of gas multiplication in cylindrical proportional counters [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007, 580(1): 161-164.
- [39] LND 232. Boron lined neutron proportional counter[EB/OL]. [20132-05-31]. <http://lndinc.com/products/597/>.
- [40] 单卿, 曾捷, 贾文宝, 等. 涂硼 MRPC 热中子探测器性能的模拟研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(1): 66-70.  
Shan Qing, Zeng Jie, Jia Wenbao. Science China: Technological Sciences, 2013, 43(1): 66-70.
- [41] Lacy J L, Athanasiades A, Sun L, et al. Boron-coated straws as a replacement for  $^3\text{He}$ -based neutron detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2011, 652(1): 359-363.
- [42] Gervino G, Balma M, Devona D, et al. Preliminary results of a new boron coated neutron detector [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2013, 718(1): 143-144.
- [43] 孔德萍, 廖泽军. 秦山一期反应堆的中子计数率监测[J]. 核动力工程, 2001, 22(2): 109-113.  
Kong Deping, Liao Zejun. Nuclear Power Engineering, 2001, 22(2): 109-113.

(编辑 回恬)

## 《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿: [www.kjdb.org](http://www.kjdb.org)。