

核电厂无源启动中子探测器选型与试验研究

蒋天植, 李彪, 张芸, 王银丽, 李文平, 黄有骏, 沈峰, 孙聪健

Selection and Experimental Research of the Passive Start-Up Neutron Detector in Nuclear Power Plant

Jiang Tianzhi, Li Biao, Zhang Yun, Wang Yinli, Li Wenping, Huang Youjun, Shen Feng, and Sun Congjian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.03.0139>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[反应堆堆芯中子-温度测量探测器研制改进及试验验证](#)

Improvement and Test Verification of Reactor-Core Neutron and Temperature Detector

核动力工程. 2021, 42(2): 105-109

[快中子探测器辐照样件设计及温度特性研究](#)

Design of Fast Neutron Detector Irradiation Sample and Study of Its Temperature Characteristics

核动力工程. 2021, 42(S2): 60-64

[某核电厂在线式硼表测量准确度超标原因分析及改造研究](#)

Reason Analysis for Unsatisfactory of Accuracy and Improvement of Accuracy of On-line Boron Meter in a Nuclear Power Plant

核动力工程. 2020, 41(2): 102-108

[先进三代核电机组反应堆达临界方式及特性分析](#)

Initial Criticality Achieving Manner and Characteristic Analysis of Reactors in Advanced Nuclear Power Units of Third Generation

核动力工程. 2020, 41(3): 14-18

[反应堆核加热冷启动压力控制及超压问题仿真分析](#)

Simulated Analysis of Pressure Control and Overpressure Problem of Reactor Cold Start-up with Nuclear Heating

核动力工程. 2020, 41(5): 84-88

[基于根轨迹法的核电厂棒位探测器电源PR控制的研究](#)

Research on PR Control for Rod Position Detector Power Supply in Nuclear Power Plant Based on Root-Locus Method

核动力工程. 2021, 42(1): 113-117



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2022)03-0139-05; DOI:10.13832/j.jnpe.2022.03.0139

核电厂无源启动中子探测器选型与试验研究

蒋天植^{1,2}, 李彪³, 张芸², 王银丽², 李文平²,
黄有骏², 沈峰², 孙聪健²

1. 电子科技大学自动化工程学院, 成都, 611731; 2. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213;
3. 中核控制系统工程有限公司, 北京, 100176

摘要: 为监测核电厂首循环装料、停堆以及启动过程中的堆芯状态, 国内外核电厂一般在堆芯引入 2 个一次中子源组件, 但一次中子源均为国外进口, 存在进口受限的问题。为解决此问题, 研究首循环取消一次中子源组件, 采用燃料组件自发裂变产生的中子作为启动用中子源。燃料组件自发裂变产生的中子强度远低于一次中子源。针对以上情况, 需在堆外采用更高灵敏度的探测器进行中子注量率的监测。本文在分析各种高灵敏度探测器基本原理的基础上, 给出高灵敏度中子探测器的选型建议, 并对其性能进行了试验验证, 试验结果表明: ³He 正比计数管即使在 γ 剂量率大于 0.1 Gy/h 时, 设置合适的甄别电压, 也可以有效甄别 γ 噪声, 试验验证的最大 γ 剂量率为 1.0 Gy/h。

关键词: 无源启动; 中子; 探测器; 正比计数管; 高灵敏度

中图分类号: TL812 **文献标志码:** A

Selection and Experimental Research of the Passive Start-Up Neutron Detector in Nuclear Power Plant

Jiang Tianzhi^{1,2}, Li Biao³, Zhang Yun², Wang Yinli², Li Wenping²,
Huang Youjun², Shen Feng², Sun Congjian²

1. College of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, 611731, China; 2. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China;
3. China Nuclear Control System Engineering Co., Ltd., Beijing, 100176, China

Abstract: In order to monitor the reactor core during the first cycle charging, shutdown and start-up of nuclear power plants, domestic and foreign nuclear power plants generally introduce two primary neutron source components in the core, but the primary neutron sources are imported from the United States, which has the problem of import limitations. In order to solve this problem, it is studied to cancel the primary neutron source component in the first cycle and use the neutrons produced by the spontaneous fission of the fuel assembly as the starting neutron source. The neutron intensity produced by spontaneous fission of fuel assembly is much lower than that of primary neutron source. In view of the above situation, it is necessary to use a higher sensitivity detector to monitor the neutron fluence rate outside the reactor. Based on the analysis of the basic principles of various high-sensitivity detectors, this paper gives suggestions on the selection of high-sensitivity neutron detectors, and verifies their performance by experiments. The experiment results show that even when the γ dose rate is greater than 0.1 Gy/h, the ³He proportional counter tube can be set with an appropriate discriminating voltage, and can effectively discriminate γ noise. The maximum γ dose rate verified by the experiment is 1.0 Gy/h.

Key words: Passive start-up, Neutron, Detector, Proportional counter tube, High sensitivity

收稿日期: 2021-04-21; 修回日期: 2022-04-12

作者简介: 蒋天植(1990—), 男, 工程师, 现主要从事反应堆仪表与控制系统核测量工作, E-mail: 13699422315@163.com

0 引言

核电站反应堆堆芯中子注量率直接表征反应堆堆芯功率水平、功率变化以及功率分布等状态信号。核电站设置有专用堆外核测仪表监测堆芯泄漏的中子注量率，并产生用于反应堆控制和保护的信号。

在核电站反应堆装料和物理启动过程中，要求严格控制堆芯中子有效增殖系数 (k_{eff}) 的增长速度，以防止反应堆达到无法控制的瞬发临界状态。为了保证堆外核测仪表监测能够覆盖尽可能多的堆芯状态，一般采用在堆芯中引入 2 个一次中子源组件，将反应堆在次临界状态下的堆外核测仪表探测器处中子注量率提高到较高的初始水平，使得堆外核测仪表探测器能以较好的统计特性监测堆芯内中子注量率变化。

国内压水反应堆一般在首循环布置 2 个一次中子源组件，从第 2 循环开始不再使用一次中子源组件，只使用二次中子源组件。为解决一次中子源进口受限问题，开展了核电站无源启动技术研究工作。本文着重于核电站无源启动技术研究过程中高灵敏度中子探测器选型及相关试验内容，为中子探测器的选型及工程应用提供支撑。

1 核电站堆外中子探测系统简介

为连续监测反应堆功率、功率水平变化以及反应堆轴向功率分布，核电站在反应堆压力容器外设置了一系列测量中子注量率的探测器。中子探测器对中子敏感，输出正比于中子注量率的电信号，电信号被信号处理设备调理、处理，产生供核电站操作员参考的指示和记录信号。

核电站堆外中子探测系统示意图见图 1。该系统主要由中子探测器、信号传输电缆及信号处理设备组成。中子探测器将堆外中子注量率转化为电流或者脉冲信号，并通过信号传输电缆传输至信号处理设备，然后对中子信号进行滤波、放大、甄别、计数等处理后输出供操作员查看的指示信号以及送往其他系统的控制、保护信号。

核电站堆外中子探测系统需监测反应堆从堆芯装/换料直至满功率的中子注量率水平，跨越约 10 个量级^[1]。通常采用不同种类的中子探测器，分为几个相互衔接的测量区段，以便实现对整个测量范围的监测。

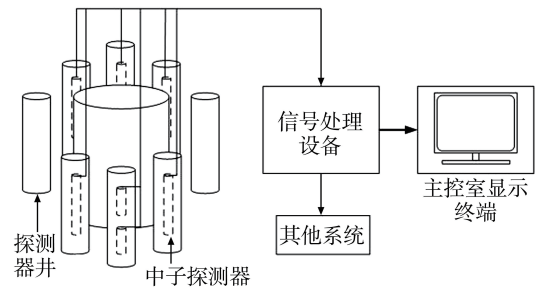


图 1 核电站堆外中子探测器系统示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Off-reactor Neutron Detector System in Nuclear Power Plant

本研究的探测器用于无源启动状态下反应堆堆芯装/换料及停堆状态下堆芯中子注量率监测。此时中子注量率较低，要求中子探测器灵敏度高。

2 无源启动中子探测器选型研究

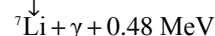
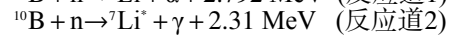
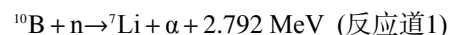
2.1 中子探测基本原理

由于中子不带电，不能直接引起物质原子的电离与激发。探测中子都是间接地利用中子与物质原子核的作用产生次级带电粒子而实现。中子与物质的相互作用主要有散射和俘获 2 种类型^[2]。

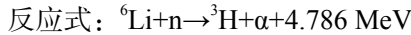
中子散射是中子与原子核发生弹性与非弹性碰撞并产生核反冲。在中子探测器应用中主要利用弹性散射，其中靶核没有发生状态变化，散射前、后中子与靶核的总动量不变。最常用的弹性散射是中子与质子（氢核）发生的弹性散射，如基于高含氢材料的闪烁体快中子探测器。

中子俘获是指中子与物质原子核俘获而形成复合核。复合核可能发射 1 个或多个光子后回到基态，称为辐射俘获。复合核也可能蜕变产生包括带电的次级粒子，即发生了核反应。基于中子俘获的核反应法是目前核探测器的主流方式，常见的核反应有： $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 反应、 $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$ 反应、 $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ 以及裂变反应。

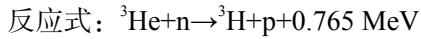
(1) $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 反应



反应产物 ^7Li 可以处于基态（反应道 1），也可以处于激发态（反应道 2）。对于热中子来说，反应道 1 仅占 6.3%，即 93.7% 的中子俘获反应是按照反应道 2 进行的，放出能量约为 0.48 MeV 的 γ 光子。

(2) ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ 反应

当中子动能忽略不计时，反应产物氚核 (${}^3\text{H}$) 的能量为 2.73 MeV， α 粒子能量为 2.05 MeV。当入射中子能量很低时，反应生成的 α 粒子与氚核运动方向相反。

(3) ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ 反应

(4) 裂变反应

裂变反应法是通过记录中子俘获导致重核裂变所产生的裂变碎片来探测中子的。

裂变反应产生的较轻原子核称为“裂变碎片”，此类碎片的电荷数大、能量高，能在物质中产生强烈的电离效应。

基于裂变反应法的中子探测器最大特点是输出脉冲幅度极大，容易通过脉冲幅度甄别去除其他干扰信号（如 γ 光子引起的干扰脉冲）。

2.2 中子探测器选型

目前，核电厂反应堆堆外中子探测器主要采用基于核反应法的气体探测器。在气体探测器内部，外加电场作用下，电子和正离子分别向正、负电极漂移，产生输出信号，该信号与外加电场的电压关系，可通过“电压-电流”（V-A）曲线来表示。气体探测器按照 V-A 曲线上的工作区域，分为正比计数管、电离室、盖革计数管等。正比计数管是工作在 V-A 曲线正比区的脉冲气体探测器，V-A 曲线正比区的特点是气体放大倍数大于 1。正比计数管相较于其他气体探测器，具有更高的中子灵敏度，所以常用于低注量率水平的中子注量率测量。主要类型有： BF_3 正比计数管、 ${}^3\text{He}$ 正比计数管和 ${}^{10}\text{B}$ 正比计数管。根据工程经验，3 种正比计数管的特性对比见表 1。

从表 1 的对比可知，相同条件下， ${}^3\text{He}$ 正比计数管理论上具有最高的中子灵敏度，相对较好的耐中子辐照性能，但是耐 γ 辐照性能最差。在无源启动条件下，堆外中子探测位置处中子注量率极低，所以为提高监测下限，选择 ${}^3\text{He}$ 正比计数管作为核电厂无源启动中子探测器，并进行耐 γ 辐照试验，以验证其性能。

3 γ 甄别特性试验验证

γ 辐照在 ${}^3\text{He}$ 正比计数管会产生与中子辐照

表 1 三种正比计数管特性对比

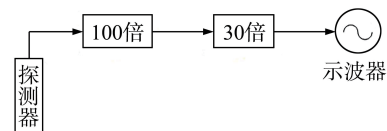
Tab. 1 Comparison of the Characteristics of Three Proportional Counter Tubes

参数	BF_3 正比计数管	${}^3\text{He}$ 正比计数管	${}^{10}\text{B}$ 正比计数管
工作电压	最高 (2500~3200 V)	居中 (1200~1800 V)	最低 (700~1200 V)
燃耗寿命 ^①	最短 ($<10^{12}\text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	居中 ($<10^{15}\text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	最长 ($10^{17}\text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
耐 γ 辐照能力	居中 (10 Gy/h)	最差 (1 Gy/h)	最好 (10^3 Gy/h)
耐温性能	最差 ($<120^\circ\text{C}$)	最好 ($<200^\circ\text{C}$)	居中 ($<150^\circ\text{C}$)
中子灵敏度	居中 [典型应用： $8\text{ cps}/(\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$]	最高 [典型应用： $30\text{ cps}/(\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ 及以上]	最低 [典型应用： $4\text{ cps}/(\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$]
坪斜 ^②	最好 ($<1\%/100\text{V}$)	较好 ($<3\%/100\text{V}$)	最差 ($<40\%/100\text{V}$)
坪长 ^③	$>500\text{ V}$	$>200\text{ V}$	$\geq 100\text{ V}$

注：①cps—每秒计数；②坪斜—高压变化 100 V，cps 的变化，越小越好；③坪长—探测器坪区宽度，越长越好；④燃耗寿命—表征探测器在累计中子注量率辐射下的性能

相同的脉冲信号，但是 γ 粒子能量相对中子能量较小，所以在 ${}^3\text{He}$ 正比计数管中产生的脉冲幅度较小，可通过在信号处理设备中设置脉冲幅度甄别电压进行消除。但随着 γ 剂量率增强， γ 辐照产生的脉冲增加，脉冲之间相互堆叠，以至于达到中子产生的脉冲幅度，此时在信号处理设备中设置脉冲幅度甄别电压已不能消除 γ 辐射产生的脉冲，探测器失效。为验证 ${}^3\text{He}$ 正比计数管的 γ 甄别特性，可将探测器放置在不同的 γ 辐照水平下，通过调整信号处理设备中的脉冲幅度甄别电压进行试验。

为验证 ${}^3\text{He}$ 正比计数管的 γ 甄别特性，试验选取厂家标称中子灵敏度为 $330\text{ cps}/(\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ 的标准 ${}^3\text{He}$ 正比计数管，按照如图 2 所示的结构搭建试验平台。

图 2 ${}^3\text{He}$ 正比计数管试验配置示意图Fig. 2 Schematic Diagram of ${}^3\text{He}$ Proportional Counter Tube Test Configuration

将 ${}^3\text{He}$ 正比计数管在中子注量率为 $27.3\text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的中子源上进行坪特性、甄别特性测试。根据测量结果，对信号处理设备选取合适的测试参数，计算不同甄别电压下 ${}^3\text{He}$ 正比计数管的中子灵敏

度。试验步骤为:

第1步:将 ^3He 正比计数管置于 γ 剂量率为0.04 Gy/h位置,无 γ 源时,进行本底甄别特性测试。

第2步:将 ^3He 正比计数管置于 γ 剂量率为0.04 Gy/h位置,有 γ 源时,进行甄别特性测试。

第3步:将 ^3He 正比计数管置于 γ 剂量率为0.01 Gy/h位置,无 γ 源时,进行本底甄别特性测试。

第4步:将 ^3He 正比计数管置于 γ 剂量率为0.10 Gy/h位置,有 γ 源时,进行甄别特性测试。

第5步:将 ^3He 正比计数管置于 γ 剂量率为0.20 Gy/h位置,无 γ 源时,进行本底甄别特性测试。

第6步:将 ^3He 正比计数管置于 γ 剂量率为0.20 Gy/h位置,有 γ 源时,进行甄别特性测试。

第7步:将 ^3He 正比计数管置于 γ 剂量率为0.40 Gy/h位置,无 γ 源时,进行本底甄别特性测试。

第8步:将 ^3He 正比计数管置于 γ 剂量率为0.40 Gy/h位置,有 γ 源时,进行甄别特性测试。

第9步:将 ^3He 正比计数管置于 γ 剂量率为0.60 Gy/h位置,无 γ 源时,进行本底甄别特性测试。

第10步:将 ^3He 正比计数管置于 γ 剂量率为0.60 Gy/h位置,有 γ 源时,进行甄别特性测试。

第11步:将 ^3He 正比计数管置于 γ 剂量率为1.0 Gy/h位置,无 γ 源时,进行本底甄别特性测试。

第12步:将 ^3He 正比计数管置于 γ 剂量率为1.0 Gy/h位置,有 γ 源时,进行甄别特性测试。

3.1 坪特性和甄别特性测试

坪特性测试结果见表2,其中脉冲幅度甄别电压为0.4 V。

表2 坪特性测试结果

Tab. 2 Test Results of Plateau

计数率/cps	工作电压/V				
	1150	1200	1250	1300	1350
6177	7807	8369	8441	8557	
坪区 ^① /V	1250~1350				
坪斜	2.21%/100 V				

注:①坪区—工作电压的设置范围

根据表2的测试结果,选取 ^3He 正比计数管工作电压为1250 V,进行甄别特性测试并计算不同甄别电压下的灵敏度。测试结果见表3所示。

表3 甄别特性测试结果

Tab. 3 Test Results of Discriminating Characteristics

甄别电压/V	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
计数率/cps	8494	8436	8390	8224	7839	7417
中子灵敏度/ [cps/(cm ² ·s ⁻¹)]	311	309	307	301	287	272
甄别电压/V	0.8	1.0	1.2	1.5	1.8	2.0
计数率/cps	6925	5906	4865	3815	3015	2621
中子灵敏度/ [cps/(cm ² ·s ⁻¹)]	254	216	178	140	110	96

根据坪特性及甄别特性测试结果,选取1250 V作为后续工作电压,此时设置甄别阈值为0.4 V,中子脉冲信号幅度约为3 V,中子灵敏度约为307 cps/(cm²·s⁻¹)。

3.2 0.04 Gy/h γ 剂量率测试结果

根据3.1节的测试结果,设置 ^3He 正比计数管工作电压为1250 V,在 γ 剂量率为0.04 Gy/h的环境下得到表4所示的试验结果。

表4 0.04 Gy/h γ 剂量率测量结果

Tab. 4 Measurement Results of 0.04 Gy/h γ Dose Rate

甄别电压/V	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0
本底计数率/cps	5.37	4.86	4.59	4.58	3.70	3.33
有 γ 源时计数率/cps	—	—	13.29	5.17	3.74	3.08

“—”表示无数据

从示波器观察,此时噪声信号幅度约为0.7~0.8 V。从表4可得,当甄别阈值大于0.8 V时,测得计数几乎等于本底中子计数,因此在此剂量率下,将甄别阈值设置为0.8 V以上可以满足信噪比要求。

3.3 0.1 Gy/h γ 剂量率测试结果

根据3.1节的测试结果,设置 ^3He 正比计数管工作电压为1250 V,在 γ 剂量率为0.1 Gy/h的环境下得到表5所示的试验结果。

从示波器观察,此时噪声信号幅度约为0.9 V。从表5可看出,当甄别电压大于1.0 V时,测得有 γ 源时的计数几乎等于本底中子计数,因此在此剂量率下,将甄别电压设置为1.0 V以上可以满足信噪比要求。

表5 0.1 Gy/h γ 剂量率测量结果Tab. 5 Measurement Results of 0.1Gy/h γ Dose Rate

甄别电压/V	0.7	0.8	1.0	1.2	1.5
本底计数率/cps	5.3	4.0	4.5	4.1	2.5
有 γ 源时计数率/cps	49.1	10.0	4.1	2.7	2.6

3.4 0.2 Gy/h γ 剂量率测试结果

根据 3.1 节的测试结果，设置 ^3He 正比计数管工作电压为 1250 V，在 γ 剂量率为 0.2 Gy/h 的环境下得到表 6 所示的试验结果。

表6 0.2 Gy/h γ 剂量率测量结果Tab. 6 Measurement Results of 0.2 Gy/h γ Dose Rate

甄别电压/V	1.0	1.2	1.5
本底计数率/cps	4.60	3.82	3.07
有 γ 源时计数率/cps	9.31	3.85	3.10

从示波器观察，此时噪声信号幅度约为 1.0~1.1 V。从表 6 可得，当甄别电压大于 1.2 V 时，测得有 γ 源时的计数几乎等于本底中子计数，因此在此剂量率下，将甄别电压设置为 1.2 V 以上可以满足信噪比要求。

3.5 0.4 Gy/h γ 剂量率测试结果

根据 3.1 节的测试结果，设置 ^3He 正比计数管工作电压为 1250 V，在 γ 剂量率为 0.4 Gy/h 的环境下得到表 7 所示的试验结果。

表7 0.4 Gy/h γ 剂量率测量结果Tab. 7 Measurement Results of 0.4 Gy/h γ Dose Rate

甄别电压/V	0.8	1.0	1.5	2.0
本底计数率/cps	5.97	4.64	3.08	2.34
有 γ 源时计数率/cps	—	93.03	2.47	1.60

从示波器观察，此时噪声信号幅度约为 1.4 V。从表 7 可得，当甄别电压大于 1.5 V 时，测得有 γ 源时的计数几乎等于本底中子计数，因此在此剂量率下，将甄别电压设置为 1.5 V 以上可以满足信噪比要求。

3.6 0.6 Gy/h γ 剂量率测试结果

根据 3.1 节的测试结果，设置 ^3He 正比计数管工作电压为 1250 V，在 γ 剂量率为 0.6 Gy/h 的环境下得到表 8 所示的试验结果。

从示波器观察，此时噪声信号幅度约为 1.4 V。从表 8 可得，当甄别电压大于 1.5 V 时，测得有

表8 0.6 Gy/h γ 剂量率测量结果Tab. 8 Measurement Results of 0.6 Gy/h γ Dose Rate

甄别电压/V	1.2	1.5	1.8
本底计数率/cps	4.16	3.41	2.6
有 γ 源时计数率/cps	14.53	2.82	1.95

γ 源时的计数几乎等于本底中子计数，因此在此剂量率下，将甄别电压设置为 1.5 V 以上可以满足信噪比要求。

3.7 1.0 Gy/h γ 剂量率测试结果

根据 3.1 小节的测试结果，设置 ^3He 正比计数管工作电压为 1250 V，在 γ 剂量率为 1.0 Gy/h 的环境下得到表 9 所示的试验结果。

表9 1.0 Gy/h γ 剂量率测量结果Tab. 9 Measurement Results of 1.0 Gy/h γ Dose Rate

甄别电压/V	1.2	1.5	1.8
本底计数率/cps	3.8	3.0	2.7
有 γ 源时计数率/cps	29.6	24.7	1.9

从示波器观察，此时噪声信号幅度约为 1.45 V。从表 9 可得，当甄别电压大于 1.8 V 时，测得有 γ 源时的计数几乎等于本底中子计数，因此在此剂量率下，将甄别电压设置为 1.8 V 以上可以满足信噪比要求。

4 总 结

根据本文理论分析结果，选取了 ^3He 正比计数管作为无源启动高灵敏度中子探测器，并按照试验步骤对 ^3He 正比计数管的 γ 甄别特性进行了试验。试验结果表明， ^3He 正比计数管即使在 γ 剂量率大于 0.1 Gy/h 时，只要设置合适的甄别电压，也可以有效甄别 γ 噪声，试验验证的最大 γ 剂量率为 1.0 Gy/h。但是随着甄别电压的提高，会损失相应的中子计数，从而使 ^3He 正比计数管中子灵敏度下降，因此实际工程应用中需结合现场工作条件选择合适的甄别电压。

参考文献：

- [1] 凌球. 核电站辐射测量技术[M]. 北京：中国原子能出版社，2001：12.
- [2] 汲长松. 中子探测实验方法[M]. 北京：中国原子能出版社，1998：7.

(责任编辑：刘 君)