

CNIC-01214

NINT-0001

n - γ 分辨快中子探测系统

欧阳晓平 黄 豹 曹锦云

(西北核技术研究所, 西安)

摘 要

介绍了一种可在 $n+\gamma$ 混合场中对中子参数进行绝对测量, 具有 10^{-4} Pa 级静态高真空长久保持的新型中子探测系统—— n - γ 分辨快中子探测系统。该系统具有适中的中子探测灵敏度, 快的时间响应和大的线性电流输出。并在实际工作中得到应用。

Fast-Neutron Detecting System with n, γ Discrimination

(In Chinese)

OU YANG Xiaoping, HUANG Bao, CAO Jinyun
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an)

ABSTRACT

In the present work, a new type neutron detecting system is reported, which can absolutely measure neutron parameters in $n+\gamma$ mixed fields and has a long continuance of static high vacuum of 10^{-4} Pa. The detecting system, with middle neutron-detecting sensitivity, short time response and big linear current output, has applied successfully in pulsed neutron beam measurement.

引言

在高强度脉冲中子束的测量中,探测系统是整个测量的核心,其性能指标直接影响测量数据的质量。探测系统的性能参数主要是中子的探测灵敏度、脉冲信号的响应速度、输出的线性电流范围、抗辐射干扰能力及系统的真空特性等。在某些混合场中测量中子参数时,需要一种对中子的探测灵敏度介于以 PIN 半导体探测器为探测元件的 PIN 探测系统和以同轴 F. C 为探测元件的同轴 F. C 探测系统之间,能在高强度 $n+\gamma$ 混合场中测量各种中子参数的中子探测系统—— $n-\gamma$ 分辨快中子探测系统。这种探测系统已研制成功并在实际工作中得到应用。实践表明: $n-\gamma$ 分辨快中子探测系统具有很好的时间特性和较大的线性电流输出,同时又具有静态真空长久保持性能和强的抗辐射干扰能力,因而对脉冲中子束测量技术研究具有重要意义。

1 系统结构与测量原理

图 1 是该探测系统的结构示意图,它由物理探测部分和真空系统两大部分组成。腔体容积约 3 L,物理探测部分原理性结构如图 2 所示。它由入射极板、中间极板和出射极板构成,中间极板由含铝吸收片、含氢靶材料及阈能量吸收片组成。入射极板和出射极板为铝质材料,它们的内表面及中间极板的两表面都蒸上金的薄覆盖层。当中间极板的含氢材料受到快中子轰击时,将产生反冲质子,反冲质子经过阈能量吸收片滤去低能部分后,穿出中间极板表面的金覆盖层时,将产生二次电子发射,由于出射极板加正高压,这些二次电子将被其收集,从而在中间极板输出一个正的电流信号,实现对中子的探测。中子辐射场常伴随大量的 γ 射线, γ 射线作用在各极板时,通过光电效应、康普顿效应及电子对效应,也要使中间极板发射电子,形成对中子信号的干扰。为排除这些干扰,必须在结构设计时,通过仔细的研究计算和实验,选择适当的极板结构参数,使 γ 射线在中间极板产生的信号相互抵消,从而实现 n, γ 分辨。此外,选择好阈能量吸收片的厚度,系统将有很强的抗辐射干扰能力。为保证线性电流输出,极板所加的偏压应足够高,因而,系统工作时的真空度要好于 5×10^{-3} Pa。

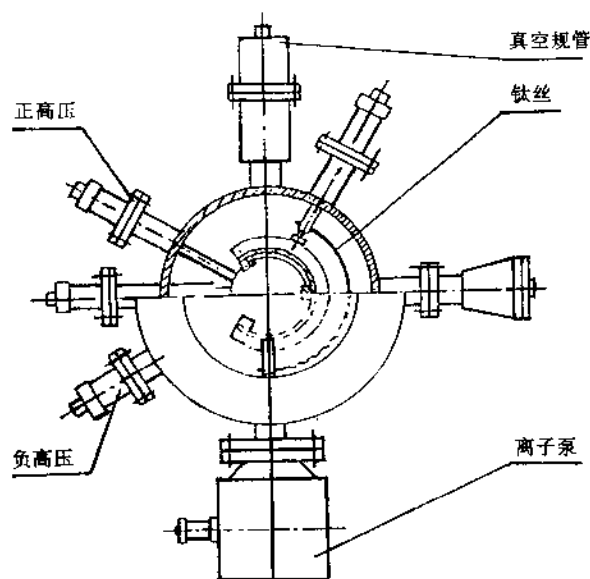


图 1 $n-\gamma$ 分辨快中子探测系统结构图

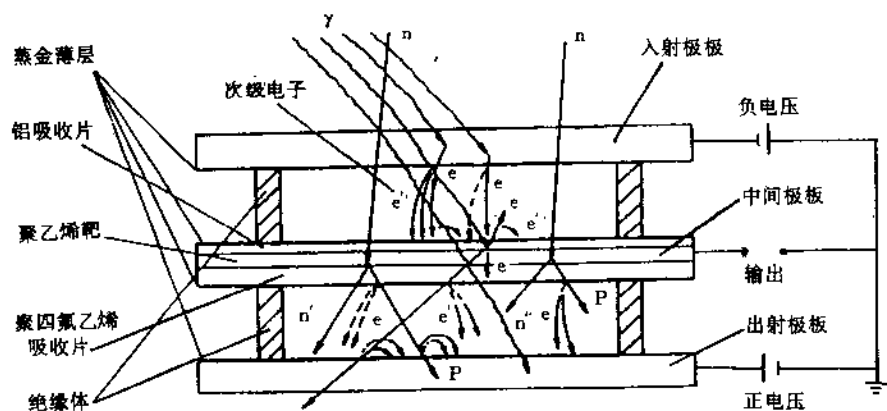


图2 n- γ 分辨快中子探测系统原理图

2 极板结构参数的选择方法

2.1 极板材料的选择

选择合适的极板结构和材料，对实现系统的 n , γ 分辨非常重要。

作为极板材料，极板下必须为固态，无毒无放射线，具有很好的稳定性，易于机械加工。同时，所用材料与 γ 射线的作用几率（截面）、放气率及中子活化截面均较小，探测时引起的次级效应可以忽略。此外亦希望有合适的成本和价格。

对于入射极板和出射极板，要加数千伏的偏压，从 n , γ 分辨的角度来考虑，铍是最佳选择，但铍不仅价格昂贵，且有毒性，不易加工。选择铝作极板，虽会使 n , γ 分辨的难度加大，但既便宜，易加工，又易获得。

中间极板是探测的核心，由三种材料组成：铝吸收片、含氢靶材料及阈能量吸收片。阈能量吸收片的选择，需要作细致的研究确定。

要实现较好的 n , γ 分辨，必须选择适当的极板结构参数。极板结构参数的选择，可通过理论计算和实验研究同时进行。

2.2 γ 射线本底信号的抵消机理

γ 射线与探测系统的各个极板相互作用，通过光电效应、康普顿散射和电子对形成等物理过程，极板将发射一次电子，一次电子在输运中又产生二次慢电子。 γ 射线本底信号的相互抵消作用，包括一次电子抵消作用和二次电子抵消作用两个方面。

γ 射线本底信号的抵消作用，就是在结构设计时，用理论计算和实验找出各极板（各层）的最佳组合尺寸，使 γ 射线在入射极板、出射极板及中间极板中产生的各种电子经输运最后到达中间极板导电部分的净电子数等于或接近于零，从而实现 n , γ 分辨。

2.3 γ 射线灵敏度的理论计算

本计算用分层分块分圈的方法和 M-C 方法同时进行，计算时根据 γ 射线与物质的相互作用几率，求得相应的电子发射几率及角分布。再根据电子在物质中的输运过程，通过等效厚度的计算、电子从物质表面逸出份额的计算来获得电子的正向发射系数和反向发射系数。用等效的方法及二次电子的发射理论，求出二次电子的产额。用分层分块分圈的办法，计算出各极板得到的电子数，进而给出中间极板获得的净电子数并求出探测系统的 γ 灵敏度。用 M-C 方法计算系统的 γ 灵敏度，则用压缩历史法，运用 G-S 多次散射理论，来模拟 γ 电子在探测系统中的联合输运，最后求

出中间极板得到的净电子数。

2.4 系统 γ 灵敏度测量

n - γ 分辨快中子探测系统对 γ 射线的探测机理是 γ 射线与物质的相互作用。对于 ^{60}Co 源 1.25 MeV 的 γ 射线,康普顿效应占优势,当 γ 射线射入时,三个极板都将发射和接收电子。中间极板得到的净电子数(在导电部分)将形成输出信号。

设探测系统入射窗处的 γ 射线通量为 ϕ_γ ($\gamma/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$),入射窗的衰减系数为 S ,准直孔面积为 A ,则输出电流为:

$$I_\gamma = \phi_\gamma S A S_\gamma \quad (1)$$

式中 S_γ 为探测系统的 γ 灵敏度,单位为(A/ γ)

由(1)知:

$$S_\gamma = I_\gamma / (\phi_\gamma S A) \quad (2)$$

$$\text{而} \quad I_\gamma = V/R \quad (3)$$

$$\phi_\gamma = \alpha k P_\gamma / (E_{\gamma\text{平均}} \times 60) \quad (4)$$

所以

$$S_\gamma = V R E_\gamma \times 60 / (S \alpha A k p_\gamma) \quad (5)$$

式中

V : 小电流测量仪的电压指示;

R : 测量挡的电阻;

$E_{\gamma\text{平均}}$: γ 射线的平均能量;

α : 剂量率与注量率之间的换算系数;

k : 空气的温度、压力的修正系数。

在理论计算和实验测量中,改变各极板的参数,使中间极板得到的净电子数最小,进而得到最佳结构参数。

3 系统静态高真空的长久保持

由于采用了中子-反冲质子-卡门-二次电子测量方法,因而系统内部含有含氢聚合物等有机出气材料,腔体容积又小,静态高真空的长久保持具有很大难度。通过大量实验研究,获得了 $\approx 10^{-4}$ Pa 级的静态高真空长久保持技术,解决了系统工作对真空度的要求。

3.1 真空系统的设计

真空系统以钛升华泵为主泵,溅射离子泵为辅助泵。启动钛升华泵后系统的真空度可达 2.7×10^{-2} Pa,影响真空度进一步提高的主要原因是系统内惰性气体分压的存在。用溅射离子泵可帮助抽掉惰性气体,使探测系统工作真空度大大提高。我们选用 ZL-15 型三级式离子泵,对空气抽速为 11 L/s,对氦气抽速为 2.5 L/s,因此钛升华泵启动后离子泵只需工作 1~2 s 即可使探测系统真空度由 10^{-2} Pa 量级升至 10^{-5} Pa 量级以上。

3.2 系统结构设计

真空密封全部采用金属密封,法兰参照超高真空法兰国家标准,内部结构尽可能避免死空间,内部材料也尽量少用出气较大的材料。

3.3 设法降低出气速率

材料出气是探测系统最主要的气源。在结构、材料、容积已确定的情况下,降低内部出气速率主要有两个途径:一是烘烤,二是延长常温出气时间。出气时间延长一个量级,出气速率通常

可降低半个到一个量级。常温下出气对于我们的工作是不允许的。如在常温下出气半年, 出气速率只降到 $2 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 而在 90°C 下烘烤 24 h, 平均出气速率为 $7.1 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 比常温下半年出气效果还要好。为此我们建立了低温烘烤间隙式动态式抽气降低出气速率的方法, 即在烘烤过程中, 每隔一定时间抽气一次, 最后使出气速率满足真空设计要求。

3.4 清洗、组装、检漏

清洗、组装、检漏是系统真空研制的重要环节。为此我们采用中国科学院兰州近代物理研究所研制的 TX-1B 特种清洗剂清洗加工工件, 对降低材料出气量有显著效果。组装时带医用乳胶手套, 严格按真空卫生进行。钛膜凝结面应事先用金相砂纸打毛, 然后彻底清洗。以便钛膜牢而地附着, 否则吸气饱和后的陈旧钛膜易于脱落, 造成大量气体解吸而使真空骤然变坏, 探测系统在低温烘烤后, 均用 ZLS-24 型氦质谱检漏仪进行仔细检漏, 以确保总漏气率小于 $10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 由于采用了双面往复式焊接新工艺, 实际上总漏气率通常都小于 $1.2 \times 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

3.5 结果

工作真空度 $\leq 2 \times 10^{-6} \text{ Pa}$, 静态高真空 $\approx 10^{-4} \text{ Pa}$ 量级保持达 180 d 以上。

4 中子灵敏度的实验测量

n- γ 分辨快中子探测系统中子、 γ 灵敏度的实验测量技术, 是探测系统研制和应用中的关键技术之一。按常规标定方法, 在产额为 $\approx 10^{11} \text{ n/s}$ 的高压倍加器中子源上标定, 探测系统的输出电流仅为 $\approx 10^{-15} \sim 10^{-16} \text{ A}$, 小电流测量仪器的测量范围一般在 $10^{-12} \sim 10^{-13} \text{ A}$ 。对更弱的电流信号, 难以进行精确的测量。为了提高电流输出, 将探测系统紧贴中子源, 使之被置于非均匀中子场中, 中子注量率可提高 2 个量级。但这样进入探测系统的中子数的计算就比较面难。

4.1 进入靶的中子数测量方法

取很薄的四片大小质量均相同的铝活化片分别放在 A, B, C, D 四点, 其中放在 A 点的活化片照射的中子数可由伴随粒子法准确推出, B, C, D 三点的活化片照射量用来推算通过含氢靶物质的中子数。通过测量与 A, B, C, D 四点中子的活化强度的比, 来推算它们在相同时间内中子的照射量之比, 进而给出进入靶的中子数。

4.2 有关计算

设探测系统接收的中子数为 φ , 探测系统相应的输出电流 I 。则探测系统的中子灵敏度为

$$S_n = I/\varphi \quad (\text{A/n}) \quad (6)$$

φ 由四点活化法给出。

(1) 标准活化片中子注量率计算

$$\varphi_{90} = 5.796 \times 10^7 \times N_{90} \times A / (4\pi R^2) \quad (\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})) \quad (7)$$

式中:

N_{90} 为 90° 方向 α 的平均每秒计数;

A : 为各向异性因子;

R : 为标准活化片距靶源中心的距离 (cm);

(2) 测点中子注量率计算 (两活化片完全同时)

$$\varphi = N_i \cdot \exp [\lambda (t_{wi} - t_{w90})] / N_{90} \quad (8)$$

式中:

N_i : 被测活化片的 γ 计数;

$N_{\text{标}}$: 标准活化片的 γ 计数;

$\varphi_{\text{标}}$: 标准活化片处的中子注量率;

φ : 待测活化片处的中子注量率;

λ : 衰减寿命;

$t_{\text{测}}$: 被测活化片停止辐照活化后等待测量时间;

$t_{\text{标}}$: 标准活化片停止辐照活化后等待测量时间;

公式使用条件:

(7) 式 $R > 30 \text{ cm}$ 。

(8) 式被测片与标准片成分、表面积、厚度、纯度等必须完全相同。且不考虑片与束流角度的差别 (实际上非常小)。

用铝活化片 (纯度为 99.9%) 反应道 $^{26}\text{Al} (n, p) ^{26}\text{Mg}$, ^{26}Mg 退激时放射出 $E_{\gamma} = 0.84 \text{ MeV}$ 的 γ 射线, 半衰期 $T = 9.5 \text{ min}$ 。

反应产额:

$$Y_i = m_i N_A f_i \sigma_i \epsilon k / \rho \quad (9)$$

式中:

m_i : 活化片质量;

ρ : 活化片密度;

N_A : 阿伏加德罗常数;

f_i : 反应分支比;

σ_i : (E) 第 i 反应道的反应分支比;

ϵ, k : 其它修正因子。

对于相同材料的活化片:

$$y_i / y_{\text{标}} = \sigma_i / \sigma_{\text{标}} \quad (10)$$

5 结束语

n - γ 分辨快中子探测系统, 已应用于脉冲中子束的测量工作中, 并取得了较好的结果, 显示了该探测系统的优势, 达到了设计要求。

参 考 文 献

- 1 欧阳晓平. M-C 模拟 γ -电子联合输运及其在 n - γ 分辨快中子探测器 γ 灵敏度计算中的应用, [硕士论文], 西北核技术研究所
- 2 龙敖, 欧阳晓平, 张国斌等. n - γ 分辨快中子探测器的静态高真空的长久保持. 试验与研究, 1993. 1