

文章编号: 1007-4627(2012)02-0169-04

用于中子测量的俘获探测器研究

王 玫, 温中伟, 林菊芳, 蒋 励, 刘 荣, 王大伦
(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了在弱中子场和有限小空间内测量绝对裂变率, 制作了俘获探测器, 研究了俘获探测器的性能。介绍了用于中子测量的俘获探测器和铅屏蔽室, 以及该探测器系统在特定条件下测量裂变反应率的结果, 并与裂变室测量结果进行了比较。探讨了铅屏蔽室大小对测量结果的影响。

关键词: 中子探测; 俘获探测器; 裂变反应率

中图分类号: O571.1 **文献标志码:** A

1 引言

核裂变法是探测中子的常用方法之一, 对裂变碎片的测量, 较多采用铀裂变室和固体径迹探测器等进行测量^[1-2]。在本实验中, 由于有些测点测量空间狭小, 不能使用裂变室, 需要采用更小体积的探测器并使用核裂变法测量中子。所以采用聚酯膜夹铀片做成了小探测器, 即俘获探测器, 通过测量聚酯膜上俘获的裂变碎片的 γ 活性来间接测量裂变碎片^[3], 从而实现测量中子的目的。俘获片上裂变碎片的 γ 射线用 NaI(Tl) 闪烁探测器测量。为此, 专门设计了用于 NaI(Tl) 闪烁探测器的铅屏蔽室。深入研究 NaI(Tl) 闪烁探测器系统在俘获法测量中子中的应用。

2 俘获法和探测器

2.1 俘获法

俘获法是指中子照射铀片后, 铀片产生的裂变碎片由聚酯膜俘获, 然后测量聚酯膜上裂变碎片的 γ 活性, 经过转换得到裂变计数, 对裂变计数修正后便可得到裂变反应率, 从而实现对中子的测量。裂变碎片所发射的在某一能阈以上的积分 γ 计数正比于裂变碎片数。因此, 裂变反应数 N_f 与裂变碎片所发射的积分 γ 计数 N_γ 有如下关系:

$$N_f = KN_\gamma, \quad (1)$$

其中, K 为转换系数, 可预先由裂变室刻度出。

积分 γ 计数由下式表示:

$$N_\gamma = N_{\gamma_s} - N_{\gamma_b}, \quad (2)$$

其中: N_{γ_s} 为信号计数; N_{γ_b} 为本底计数。

2.2 俘获探测器

“俘获探测器”测量绝对裂变率的基本原理是: 将裂变材料发射的裂变碎片捕集到有机薄膜上, 通过测量裂变碎片的积分 γ 活性和预先刻度好的 γ 活性和裂变率 f 间的转换因子, 得到绝对裂变率。

为提高计数率, 将多片聚酯膜(俘获片)和多片铀片组合成夹心饼干式的俘获探测器。铀片尺寸为 $\phi 24 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 。聚酯膜直径 $\phi 30 \text{ mm}$, 厚 $50 \mu\text{m}$ 。这里要求聚脂膜与铀片要紧贴, 若用多个铀片, 铀片要对心, 不能错位。为了解决这些问题, 提高测量的准确性, 本实验设计了一对铝压环。铝压环内径 $\phi 22 \text{ mm}$, 外径 $\phi 31 \text{ mm}$, 成对使用。俘获探测器的结构示意图如图 1 所示。这种结构的探测器不论如何摆放, 多个铀片都不会错位且能压紧, 聚酯膜取放方便, 可减少冷却时间。这种俘获探测

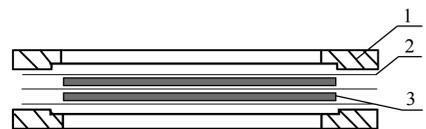


图 1 俘获探测器的结构示意图

1 铝压环, 2 俘获片, 3 铀片。

器使用时,在中子场中照射后,取出铀片,利用 NaI(Tl)探测器测量聚酯膜上俘获的裂变碎片的 γ 活性。

3 NaI(Tl)探测器和铅屏蔽室

式(1)中裂变碎片的 γ 放射性 N_γ 用 NaI(Tl)探测器测量。由于在聚脂膜上裂变碎片的 γ 活度低,所以 NaI(Tl)探测器需要屏蔽效果良好的铅室,以提高信号本底比。为此研制了 NaI(Tl)探测器的铅屏蔽室,建立了 NaI(Tl)探测器系统。NaI(Tl)探测器的尺寸为 $\phi 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。

图 2 给出了铅室结构示意图。铅室中铅层外部尺寸 $320 \text{ mm} \times 340 \text{ mm}$,内部尺寸 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,高 520 mm ,铅层厚 100 mm ,由铅砖组成。内腔衬以 8 mm 厚的钢板。由于实验中测量点较多,且要多次测量,所以要求在该屏蔽室上取放探测器要操作灵活方便和使用安全可靠,故铅室顶盖设计成小车形式,可方便地取放探测器。顶盖铅层厚 100 mm 。

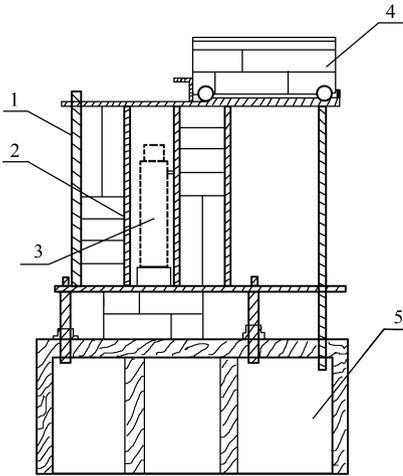


图 2 铅室结构图

1 铅砖, 2 钢板, 3 探测器, 4 铅砖小车, 5 木底座。

由于俘获片有一定大小,且要多次重复测量,需要定位准确,放在 NaI(Tl)探测器顶端的中心位置,为此设计了定位盒,使俘获片定位于 NaI(Tl)探测器上,且能保证多片俘获片不错位并压紧。俘获片取出后放在定位盒中,定位盒放在 NaI(Tl)探测器上测量俘获片上的 γ 射线。

该系统 $^{137}\text{Cs}\gamma$ 的 0.662 MeV γ 射线,能量分辨率为 7.9% 。NaI(Tl)探测器在铅室中,测量了铅

室屏蔽 γ 射线本底的性能。分别测量了无铅室、有铅室、无上盖小车、无下底屏蔽、有铅室和内腔加 1 mm 厚铅皮等 5 种情况的本底平均计数率,测量结果如表 1 所示。放大倍数粗调取 32 和 64,细调为 0.07。

表 1 本底测量结果

| 放大倍数 | 状 态 | | | | |
|------|------|--------|-----------|-----------|-----------------|
| | 有铅室 | 无铅室 | 无上盖 小车 | 无下底 铅砖 | 有铅室加 1 mm 铅皮 |
| 32 | 2.06 | 42.64 | 7.63 | 2.21 | 2.01 |
| 64 | 2.94 | 102.73 | 17.2 | 3.14 | 2.69 |

该 NaI(Tl)铅屏蔽室应用在实验测量中,测量和比较了有和没有铅屏蔽室的 γ 本底。有铅屏蔽室时,在实验用 $0.185 \sim 3.388 \text{ MeV}$ 的能量范围内,可使 γ 本底分别降低约 95% 和 97% 倍。能满足实验测量俘获片 γ 计数的要求。

4 应用

4.1 俘获探测器性能研究

俘获探测器的使用过程分 3 步:(1)刻度、(2)照射和(3) γ 积分活性的测量。因此在 γ 积分活性的测量过程中必须保证刻度、照射和 γ 积分活性的测量条件的一致性:

(1) 刻度条件的一致性: 1)刻度和裂变率测量时所选择的铀片数量必须相同; 2)刻度和裂变测量时的照射条件和 γ 活性的测量条件必须一致。

(2) 照射条件的一致性: 1)俘获探测器的照射时间固定并保证一致; 2)停照至 γ 积分活性测量的时间间隔要一致; 3)每次照射中铀片和俘获探测器膜的接触条件要一致(如铀片和聚脂膜结合的间隙、边界条件等)。

(3) γ 积分活性测量条件的一致性: 1)各次的测量时间要一致; 2)各次测量中的阈值固定不变; 3)俘获片和 γ 探头间要准直,要保持接触条件(立体角)不变; 4)俘获片的正反面和照射中的上下位置要按同一方式放置于 γ 探头上。

要选择合适的铀片数量、照射时间、冷却时间和测量时间等测量条件。在中子通量下确保有足够的 γ 统计数,统计误差约 1% 。叠放的铀片

数量不可太多，否则会影响位置的准确性。

4.2 测量俘获片上的 γ 射线

实验中采用的中子源为 14 MeV D-T 中子源，产额约 2×10^{10} neutrons/s。在实验过程中需保证照射和测量条件一致、中子源强度稳定、裂变碎片 γ 谱的下阈固定、刻度和测量时的条件一致、重复性好等。

通过测量裂变碎片 γ 谱和 γ 射线随时间的变化以及不同铀片数量和不同照射时间的测量结果，最终确定了俘获探测器的测量条件为 5 片聚脂膜夹 4 片铀片，照射时间为 1 800 s，俘获片的冷却时间为 240 s，测量 γ 射线的时间为 600 s。

4.3 实验测量中子结果

采用俘获探测器和 NaI(Tl) 闪烁探测器系统相结合的方法测量中子，已用于实验测量中。在图 3 所示的实验布置中，实验测点在球壳水平赤道方向上的 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内，每隔 30° 一个测点，共 7 个测点。在 0° 、 30° 和 45° 3 个测点上的空间位置狭小，采用俘获探测器(包镅)测量 ^{235}U 和 ^{238}U 裂变反应率，其余点采用裂变室(包镅)测量。球壳用于观测小空间内裂变计数变化，便于探测器定位，屏蔽吸收材料用于屏蔽直穿的源中子。测量结果如图 4 所示。裂变反应率归一到一个源中子和一克裂变材料。

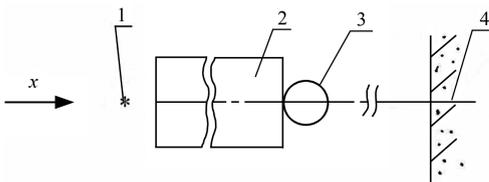


图 3 实验布置示意图

1 中子源, 2 屏蔽和吸收材料, 3 球壳, 4 水泥屏蔽体。

实验结果反映出球壳上各测点处的中子能谱和中子通量的综合作用趋势。对于反应阈值在快中子能区的 ^{238}U 裂变反应而言，反应率变化对路径上材料和路径长度的细微变化不敏感，而 Fe 材料的弹散作用和和中子通量的下降则使得反应率会出现明显的反应；而对于无阈的 ^{235}U 裂变反应而言，屏蔽吸收材料和空气中的轻元素虽对快中子的散射较弱，但 ^{235}U 低能区的大中子反应截面使得反应率在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 都一直保持增长趋势，仅在之后的测点中由

于中子通量的下降而有所回落。

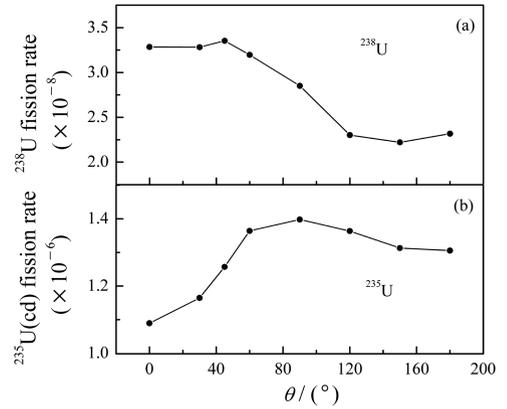


图 4 实验模型上的 ^{238}U 和 ^{235}U (包镅) 裂变反应率分布

5 讨论

5.1 俘获探测器与裂变室测量结果的比较

在测点处分别用裂变室和俘获探测器测量，测量值由 α 粒子计数归一后得出刻度系数。虽然裂变截面受中子能谱的影响比较大，但这里的刻度系数是个相对概念，受中子能谱的影响较小。对于实验中使用的刻度系数，曾进行过中子能谱的敏感性实验。结果表明，在不同能谱实验环境中刻度系数的变化都能保持在不确定度范围内^[3]。对于某一系统，在不同测点可用俘获探测器测量积分 γ 计数，再由事先刻度好的系数转换为裂变计数。表 2 列出了裂变室和俘获探测器在某测点给出的中子引起纯 ^{238}U 裂变计数的比较。裂变计数经 α 粒子和铀材料质量归一。用浓缩铀裂变室扣除了贫化铀裂变室中 ^{235}U 同位素对计数的贡献。从表 2 看出，裂变室和俘获探测器得到的裂变计数在 2% 内是符合的。

表 2 俘获探测器与裂变室测量结果的比较

| 探测器(不包镅) | 裂变计数 ($\times 10^{-3}$ fissions/ α) | |
|----------|--|------------------|
| | $N_f(120^\circ)$ | $N_f(150^\circ)$ |
| 贫化铀裂变室 | 0.526 | 0.499 |
| 俘获探测器 | 0.535 | 0.491 |

5.2 不同铅屏蔽室本底比较

为了比较实验测量中所用的铅屏蔽室与标准铅屏蔽室在俘获法测量中子中的应用情况有无差别，以及对 NaI(Tl) 探测器系统的屏蔽效果有多大的差别，进行了补充实验。实验所比较的标准铅室是从美国 ORTEC 公司引进的高纯锗低本底铅屏蔽铅

室。具体为 ϕ 内 $11'' \times 16''$ ($1'' = 2.54 \text{ cm}$), 铅层厚 $4''$, 外层钢板 $(3/8)''$, 内层为 $\text{Cd } 0.2'' + \text{Cu } 0.64''$ 。参照此铅室的结构并结合原有铅室的结构, 重新搭建了一个。新搭建的铅室结构尺寸为: 内腔 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 高 520 mm , 铅层厚 100 mm , 外形尺寸为 $520 \text{ mm} \times 520 \text{ mm}$, 内腔钢板厚 100 mm 。实验分析比较了大小铅室情况下的本底情况, 表 3 为大小铅屏蔽室的本底计数情况。

表 3 铅屏蔽室本底测量结果

| | 标准铅室 | 自建铅室 |
|-------------|-------|-------|
| 计数(2 000 s) | 3 822 | 3 780 |
| 计数率 | 1.911 | 1.854 |

由表 3 可知, 在相同测量时间情况下, 自建铅室本底比标准铅室本底计数率低 2.98% 。

6 结束语

通过严格控制中子注量稳定性、聚酯膜与铀片的贴紧程度等影响因素, 结合裂变室效率刻度, 利用俘获探测器, 可实现更狭小空间的反应率测量, 对于进行特殊实验环境下的中子输运实验研究提供可行的手段。

NaI(Tl) 闪烁探测器测量 γ 计数, 是一种成熟、稳定的测量方法, 已应用多年。俘获探测器具有体积小和位置灵敏的特点, 其与 NaI(Tl) 闪烁探测器结合的方法, 经实验检验具有方便和方法易于掌握的特点, 已应用于测量弱中子的实验中, 获得了裂变率的测量结果。

参考文献 (References):

- [1] WU Zhihua. Nuclear Physics Experiment Method. Beijing: Atomic Energy Press, 2001, 300–310(in Chinese). (吴治华. 原子核物理实验方法. 北京: 原子能出版社, 2001, 300–310.)
- [2] LU Xiting. Nucleus Physics. Beijing: Atomic Energy Press, 1996, 68–86(in Chinese). (卢希庭. 原子核物理. 北京: 原子能出版社. 1996, 68–86.)
- [3] LIU Rong, LIN Libing, WANG Dalun, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, 2000, **20**(3):164(in Chinese). (刘荣, 林理彬, 王大伦, 等. 核电子学与探测技术, 2000, **20**(3): 164.)

Study of Fission Fragment Trapping Detector Used in Neutron Detection

WANG Mei¹⁾, WEN Zhong-wei, LIN Ju-fang, JIANG Li, LIU Rong, WANG Da-lun
(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: To detect the absolute neutron flux in a weak neutron field and restricted space, the fission fragment trapping detector was fabricated and the properties of the detector were studied. In this paper, the detector and shielding chamber used in neutron detection were described and the experimental measurements of the fission rate in specific condition were performed with the detection system and the result has been compared with that obtained by fission chamber. The influence of the shielding chamber on the measured results was analyzed.

Key words: neutron detection, fission fragment trapping detector, fission rate

Received date: 10 Jun. 2011; Revised date: 22 Sep. 2011

Foundation item: Science Foundation of Chinese Academy of Engineering(990212)

1) E-mail: Wangmei191@tom.com