

用裂变径迹方法刻度氢化锆 零功率堆的绝对热中子通量

赵品台 成文华 李文虎 杨大华

关键词 零功率堆, 热中子通量, 裂变径迹, 聚碳酸脂。

一、引言

在零功率堆上刻度绝对热中子通量, 通常采用活化法, 将薄的金箔或锰箔放到待测通量处, 照射后用 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合装置测量箔片的活性, 进而计算出绝对热中子通量。对于低功率水平的中子通量, 一般用相对测量方法进行刻度。这种活化法虽然精度比较高, 但不能直接测量零功率堆低功率水平的中子通量。因为零功率堆不允许照射时间太长, 在低功率水平下照射, 因箔片活性太低, 严重影响测量结果的精度。为了直接刻度低功率水平的热中子通量, 我们采用高探测效率的裂变径迹探测器, 方法比较简单, 不需要复杂的仪器系统, 对探测薄膜的蚀刻和计数都比较容易。在较高的功率水平, 这种方法与金箔活化法得到的测量结果在误差范围内是一致的(金箔活化法的相对误差约为 $\pm 3\%$)。

二、原理

重带电粒子穿过固体径迹探测器时, 可以使探测器物质发生分解, 产生径迹。我们用薄的天然铀片与聚碳酸脂薄膜紧紧地贴在一起, 然后将它们放到待测中子通量处, 在中子照射下, 铀原子产生裂变, 裂变碎片在聚碳酸脂薄膜中留下径迹, β 和 γ 射线都不能在聚碳酸脂中形成径迹, 而 α 粒子在所选择的条件下, 也不能形成可观测到的径迹。

假定天然铀片中可裂变原子的浓度是均匀的, 聚碳酸脂对裂变碎片的探测效率 ε 是已知的, 这样, 穿过聚碳酸脂表面的裂变径迹数目 Q 可以用下式表示:

$$Q = \varepsilon \Sigma \phi T. \quad (1)$$

Q 为聚碳酸脂表面每 cm^2 上的裂变径迹数目; Σ 为铀原子的宏观裂变截面; ϕ 为待测处的中子通量; T 为中子照射时间。

因为铀裂变可分为热中子裂变和快中子裂变。对天然铀裂变源, 每 cm^2 上总的裂变径迹 $Q_{\text{总}}$ 可以由下面的公式表示:

$$Q_{\text{总}} = \varepsilon T \int_0^{\infty} (\Sigma_5 + \Sigma_8) \phi(E) dE. \quad (2)$$

脚标 5 和 8 分别表示 ^{235}U 和 ^{238}U 。用 E_T 表示镅切割能, 镅上中子产生的裂变径迹 $Q_{\text{镅}}$ 可由下式表示:

$$Q_{\text{镅}} = \varepsilon T \int_{E_T}^{\infty} (\Sigma_5 + \Sigma_8) \phi(E) dE. \quad (3)$$

这样, 总的裂变径迹又可以表示为:

$$Q_{\text{总}} = \varepsilon T \left\{ \int_0^{E_T} \Sigma_5 \phi(E) dE + \int_{E_T}^{\infty} (\Sigma_5 + \Sigma_8) \phi(E) dE \right\}. \quad (4)$$

若热中子的截面用平均截面 $\bar{\Sigma}_5$ 代替,热中子通量可以表示为:

$$\phi_{\text{热}} = \int_0^{E_T} \phi(E) dE = \frac{Q_{\text{总}} - Q_{\text{镅}}}{\varepsilon T \bar{\Sigma}_5} = \frac{Q_{\text{总}} - Q_{\text{镅}}}{\varepsilon N_5 \sigma_r T} \quad (5)$$

N_5 为每 cm^3 内 ^{235}U 的原子数目; σ_r 为有效微观裂变截面。

三、实验安排

本实验使用的固体径迹探测器是朝阳塑料厂生产的聚碳酸酯,使用的裂变源是天然铀和浓缩铀两种,将裂变源镀在厚为 0.5 mm 的不锈钢薄片上。天然铀片的质量厚度约为 $200 \mu\text{g}/\text{cm}^2$,浓缩铀的质量厚度约为 $24 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。因为裂变碎片在铀裂变源内的平均裂变射程约为 $10 \text{mg}/\text{cm}^2$,所以裂变碎片在裂变源内的自吸收可以忽略掉。在我们实验中一般都是使用天然铀源,只在低功率时才使用浓缩铀裂变源。裂变源直径均为 $\phi 20 \text{mm}$ 。

将聚碳酸酯薄膜与裂变源薄片用有机玻璃片固定在支架上,使两者的表面紧紧地贴在一起。支架上固定着两个相同的探测器,一个是裸的,一个是包有厚 0.5 mm 的镅片。有机玻璃支架的位置可以在操纵台控制。开堆前,将有机玻璃支架置于待测中子通量管道的上方,在提升功率过程中,支架一直在管道上方。当功率提升到预定值时,操纵员按放下探测器支架的按钮,探测器立即到达待测通量的位置,同时记录开始照射的时间,这样既可以避免在提升功率过程中裂变径迹占稳定功率时裂变径迹份额的修正,也可以使照射时间测量得比较准确。

照射以后,将聚碳酸酯薄膜置于 6.2 N KOH 溶液中,用水浴锅在 55°C 蚀刻 120 分钟,蚀刻以后将薄膜冲洗干净,然后用光学显微镜观测裂变径迹的数目。由裸探测器测到的是全部裂变径迹的数目;由包镅探测器得到的是超热中子裂变径迹和快中子裂变径迹的总和。由公式(5)可以得到待测处的热中子通量。

活化方法使用的金箔厚为 0.02 mm,直径为 10 mm。用 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合装置测量金箔的活性。活性计算中的修正因子是用 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合与 $2\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合相结合的方法直接测到的结果^[1]。

四、裂变径迹的计数

用光学显微镜(物镜 $40\times$,目镜 $10\times$)测量裂变径迹的数目。我们所测量的径迹密度都小于 $2\times 10^5/\text{cm}^2$,在测量中没有观测到径迹的堆砌现象,因而这方面的计数损失是可以忽略的。使用的计数方法与径迹密度有关,在径迹密度比较低时,转动标尺,使之在一个方向连续移动。当径迹通过中心线时被记录,在径迹密度高时,数一个方形视野中的计数。

在径迹计数中,应用了泊松分布计算标准偏差。我们用实验验证了泊松分布。实验数据是在游泳池式反应堆热柱上照射得到均匀的热裂变计数。测量时,聚碳酸酯膜在面积为 0.01686mm^2 的方块中扫描,观测了 350 个方块,总共 9092 个径迹计数,平均每个方块内有 26 个计数。用这些数据可以画出频率分布图。同时,我们又直接按泊松分布公式画出泊松分布曲线(见图 1)。由图可以看出,泊松分布与频率分布符合得比较好。按标准偏差公式直接由径迹数据得到的标准偏差是 5.071,而用泊松分布得到的标准偏差为 5.099。这表明,在径迹计数中完全可应用泊松分布。

五、测量结果和误差分析

在氢化锆零功率堆中心孔道物理中心处，分别测量了四个不同功率水平下的热中子通量，在电离室电流指示为 $0.012 \mu\text{A}$ 档，分别用径迹法和活化法测量了该处的热中子通量。表 1 给出了测量结果，图 2 画出了中子通量随不同功率水平的变化。

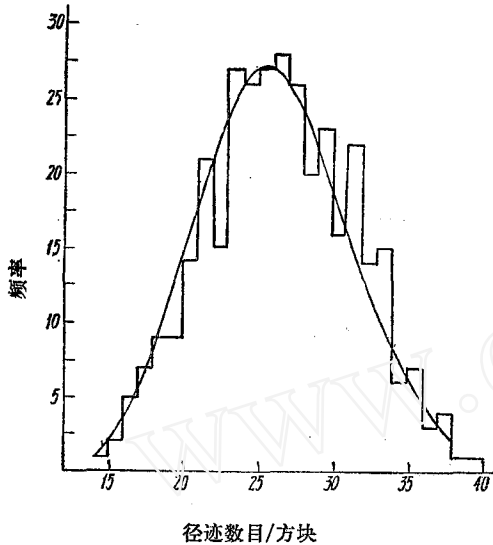


图 1 由热柱照射数据得到的频率分布图
折线为测量值；曲线为泊松分布。

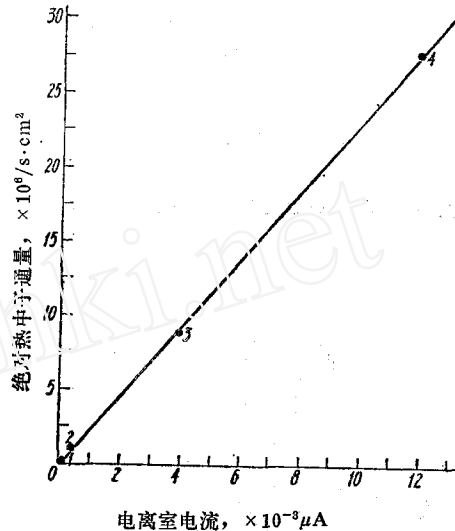


图 2 热中子通量随不同功率水平的变化
1—4 即表 1 的实验点序号。

表 1 中子通量随不同功率水平的变化

实验点序号	功率表指示	电离室电流, μA	$Q_{\text{总}}$, cm^{-2}	$Q_{\text{漏}}$, cm^{-2}	热中子通量, $\text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	
					裂变径迹法	金箔活化法
1	II, 0.6	0.00006	12921	470	1.21×10^5	
2	IV, 0.5	0.0005	9212	632	1.10×10^5	
3	VI, 0.4	0.004	74370	5292	8.88×10^5	
4	VII, 0.4	0.012	235515	19085	2.78×10^7	2.94×10^7

由公式(5)可以看出，根据误差传递公式， $\phi_{\text{热}}$ 的最大相对误差为：

$$\frac{\Delta\phi_{\text{热}}}{\phi_{\text{热}}} = \left| \frac{\Delta Q}{Q} \right| + \left| \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} \right| + \left| \frac{\Delta\sum_5}{\sum_5} \right| + \left| \frac{\Delta T}{T} \right| \quad (6)$$

实验中每次裂变径迹计数一般都大于 2500 个以上，相对误差约为 2%；聚碳酸酯膜的探测效率 ε 为 0.955^[2]，其相对误差小于 1%；宏观裂变截面的相对误差主要由铀含量的相对误差及有效微观裂变截面的误差引起，铀含量的相对误差约为 2—3%，有效微观裂变截面的计算中，用到对应 2200 m/s 的热裂变截面 σ_{f0} ，取为 580 b。按 (6) 式计算，所测热中子通量的相对误差为 6%。

参 考 文 献

- [1] 赵品台等，用锰箔和金箔刻度 101—2 重水零功率堆的绝对热中子通量，原成 [81]—009，内部资料，1981年。
- [2] 郭士伦等，原子能科学技术，1，65(1976)。
- [3] R. Gold et al., Nucl. Sci. Eng., 34, 13(1968)。
- [4] R. Gold et al., Nucl. Appl., 5, 247(1968)。
- [5] P. R. Prevo et al., J. Appl. Phys., 35, 2636(1964)。

(编辑部收到日期：1982年5月6日)