

文章编号: 1007-4627(2013)04-0403-04

中子注量率波动修正因子及其应用

贺国珠¹, 兰长林²

(1. 中国原子能科学研究院核数据重点实验室, 北京 102413;

2. 兰州大学核科学与技术学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 在中子核反应研究中, 尤其是在利用活化法进行中子核反应截面测量研究时, 需要准确测量样品辐照的中子注量。监督反应标准截面法简便可行, 在一些核反应截面测量研究中经常用来定量样品辐照的中子注量。在利用监督片核反应剩余核的放射性活度计算平均中子注量率时, 中子注量率波动修正因子是一个很重要的参数。对中子注量率波动修正因子进行了详细阐述, 通过理论推导给出了中子注量率波动修正因子的定义, 从实际应用出发讨论了中子注量率波动修正因子的使用条件和监督反应的选择原则。

关键词: 中子注量率; 修正因子

中图分类号: O571.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.04.403

1 引言

在中子核反应研究中, 尤其是在中子核反应截面测量研究中, 样品中子注量的测量精度直接关系核反应截面的精度, 如何准确定量辐照样品的中子注量是实验的重要内容。由于种种原因, 使用中子探测器直接准确测量辐照样品的中子注量常常不容易实现。在活化法中子核反应截面测量研究中, 通过测量监督片反应剩余核的放射性活度, 并结合监督反应标准截面数据对样品中子注量进行定量的方法简便可行, 是大家经常采用的方法^[1]。

在应用监督反应标准截面方法定量辐照样品的中子注量时, 特别是在加速器中子源上应用该方法定量辐照样品的中子注量时, 须考虑中子注量率波动的影响。这是因为, 虽然人们希望辐照过程中中子注量率保持不变, 但由于束流不稳和靶老化等诸多因素, 中子注量率往往是变化的。中子注量率的波动会对通过监督反应定量中子注量的方法产生影响。为了减小这种影响, 需要对辐照过程中中子注量率的变化情况进行记录, 然后用中子注量率波动修正因子进行修正, 从而较准确地得到样品的中子注量。因此, 中子注量率波

动修正因子在基于加速器中子源、应用活化法进行核反应截面测量研究中, 是一个很重要的参数。

截至目前, 国内还没有详细阐述中子注量率波动修正因子的文献, 所以中子注量率波动修正因子的物理含义不甚明晰, 在中子注量率波动修正因子公式^[2-3]的具体使用过程中, 还有些容易混淆的地方。本文对中子注量率波动修正因子进行了详细阐述, 并给出了一些应用例子, 目的是明确中子注量率波动修正因子的物理含义, 避免在中子注量率波动修正因子使用中发生错误。

2 中子注量率波动修正因子的定义

在通过标准截面法测量辐照样品中子注量时, 监督片中发生的核反应遵循核反应的一般规律^[4]。设监督片单位体积内原子数目为 N_0 , 中子注量率为 $I(t)$, 核反应截面为 σ , 反应中生成核的数目为 $N(t)$, 生成核的衰变常数为 λ , 则有:

$$\frac{dN(t)}{dt} = N_0\sigma I(t) - \lambda N(t) \quad (1)$$

令 $0 \rightarrow t_1$ 为照射时间, $t_1 \rightarrow t_2$ 为冷却时间, $t_2 \rightarrow t_3$ 为

收稿日期: 2013-04-19; 修改日期: 2013-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10975195)

作者简介: 贺国珠(1963-), 男, 河南新乡人, 教授, 理学博士, 从事实验核物理研究; E-mail: hegz@ciae.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>

活度测量时间, 则 t_1 , t_2 和 t_3 时刻监督片中剩余核数目分别为

$$N_1 = N_0 \sigma e^{-\lambda t_1} \int_0^{t_1} I(t) e^{\lambda t} dt, \quad (2)$$

$$N_2 = N_0 \sigma e^{-\lambda t_1} e^{-\lambda(t_2-t_1)} \int_0^{t_1} I(t) e^{\lambda t} dt, \quad (3)$$

$$N_3 = N_0 \sigma e^{-\lambda t_1} e^{-\lambda(t_2-t_1)} e^{-\lambda(t_3-t_2)} \int_0^{t_1} I(t) e^{\lambda t} dt, \quad (4)$$

则 $t_2 \rightarrow t_3$ 测量时间内的总衰变数为

$$N_{23} = N_0 \sigma \left[e^{-\lambda(t_2-t_1)} - e^{-\lambda(t_3-t_1)} \right] \int_0^{t_1} I(t) e^{-\lambda(t_1-t)} dt. \quad (5)$$

对于上式中的积分项 $\int_0^{t_1} I(t) e^{-\lambda(t_1-t)} dt$, 可以将辐照分成中子注量率稳定和中子注量率波动两种情况进行讨论。

2.1 中子注量率稳定

若中子注量率稳定

$$I(t) = I, \quad (6)$$

则, 积分项可以表示为

$$\int_0^{t_1} I(t) e^{-\lambda(t_1-t)} dt = \int_0^{t_1} I e^{-\lambda(t_1-t)} dt = \frac{1}{\lambda} I [1 - e^{-\lambda t_1}], \quad (7)$$

那么, 反应剩余核的衰变数精确可解, 即

$$N_{23} = \frac{N_0 I \sigma}{\lambda} [1 - e^{-\lambda t_1}] [e^{-\lambda(t_2-t_1)} - e^{-\lambda(t_3-t_1)}]. \quad (8)$$

根据实验测量的监督片剩余核的放射性活度, 辐照样品的中子注量精确可得, 即:

$$I = \frac{\lambda N_{23}}{N_0 \sigma} \frac{1}{[1 - e^{-\lambda t_1}] [e^{-\lambda(t_2-t_1)} - e^{-\lambda(t_3-t_1)}]}. \quad (9)$$

2.2 中子注量率波动

如果辐照过程中子注量率有波动, 可以根据中子源强监测探测器测得的数据, 将辐照持续时间 $0 \rightarrow t_1$ 划分成若干个时间段, 在各辐照时段内中子注量率稳定。

若第 i 段辐照中子注量率为 I_i , 时间长度为 $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$, 辐照结束时刻到总辐照结束时刻 t_1 的时间间隔为 T_i , 则第 i 段辐照对应的积分项为

$$\int_{t_{i-1}}^{t_i} I_i e^{-\lambda(t_1-t)} dt = \frac{1}{\lambda} I_i [1 - e^{-\lambda \Delta t_i}], \quad (10)$$

第 i 段辐照生成的核在 t_1 时刻还有:

$$\frac{1}{\lambda} I_i [1 - e^{-\lambda \Delta t_i}] e^{-\lambda T_i}. \quad (11)$$

忽略辐照过程靶核损耗的影响, 则可以认为各段辐照之间互相独立, 各段辐照在 t_1 时刻贡献之和为

$$\frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n I_i (1 - e^{-\lambda \Delta t_i}) e^{-\lambda T_i}. \quad (12)$$

所以, 当中子注量率不稳定时, 式(5)中的积分项可以表示为

$$\int_0^{t_1} I(t) e^{-\lambda(t_1-t)} dt = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n I_i (1 - e^{-\lambda \Delta t_i}) e^{-\lambda T_i}. \quad (13)$$

用式(13)除以式(7), 可得到:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n I_i (1 - e^{-\lambda \Delta t_i}) e^{-\lambda T_i}}{I (1 - e^{-\lambda t_1})}. \quad (14)$$

将上式定义的 K 称为中子注量率波动修正因子(也称: 中子通量波动因子)。表示了中子注量率波动时相对于中子注量率恒定时辐照样品的反应剩余核活度的变化。

由式(8)可见, 中子注量的大小、靶核量、反应截面和辐照时间决定着生成核的生成几率。当样品量相同、中子注量率不随时间变化时, 监督反应生成核的生成几率相等; 当中子注量率有波动时, 辐照结束时剩余核的生成量与中子注量率恒定时不同, 或者说活度不一样。也就是说, 由于中子注量率的波动, 会导致根据监督片活度测量所确定的辐照样品的中子注量数据出现偏差。中子注量率波动修正因子反映了中子注量率稳定和中子注量率有波动两种辐照情况下监督反应剩余核放射性活度的差异, 利用中子注量率波动修正因子可对这种偏差进行修正。

引入中子注量率波动修正因子后, 式(13)可以表示为

$$\int_0^{t_1} I(t) e^{-\lambda(t_1-t)} dt = K I \frac{(1 - e^{-\lambda t_1})}{\lambda}, \quad (15)$$

式(5)可以表示为

$$N_{23} = K \frac{N_0 I \sigma}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_1}) [e^{-\lambda(t_2-t_1)} - e^{-\lambda(t_3-t_1)}], \quad (16)$$

式(9)可以表示为

$$I = \frac{\lambda N_{23}}{K N_0 \sigma} \frac{1}{(1 - e^{-\lambda t_1}) [e^{-\lambda(t_2-t_1)} - e^{-\lambda(t_3-t_1)}]}, \quad (17)$$

其中, I 为经修正后的辐照平均中子注量。

可见, 即使辐照过程中子注量率有波动, 应用中子注量率波动修正因子, 也可以比较方便地求解样品辐照平均中子注量率。所以, 中子注量率波动修正因子就是当辐照过程中子注量率不稳定时, 仍把辐照假设成以平均中子注量率稳定地辐照和根据剩余核放射性活度计算平均中子注量率时的一个修正因子。

从宽泛意义上理解, 剩余核活度是一状态量, 中子注量率是一过程量并在辐照结束后被装在黑匣子中。在过程量有波动时, 状态量不能准确反映过程量。对辐照过程中子注量率的变化趋势进行跟踪记录和应用波动修正因子进行修正, 可以提高由状态量求解过程量的精度。

3 中子注量率波动修正因子的应用

3.1 中子核反应截面测量

活化法是中子核反应截面测量的重要方法之一。经过样品辐照、活度测量和数据分析等步骤, 得到核反应截面。辐照时要尽量避免中子注量率大幅波动, 并且要对辐照过程中子注量率的变化跟踪记录。由于式(14)表达的是中子注量率相对变化的一种趋势, 因此对检测中子源强度探测器效率的精度不用提过高要求。例如, 在中子源附近用一个铀裂变电离室、或 ^3H 中子管来测量中子强度的变化; 在对 $^3\text{H}(\text{d}, \text{n})^4\text{He}$ 反应产生的 14 MeV 中子强度监督时, 可以用一个半导体探测器测量 $^3\text{H}(\text{d}, \text{n})^4\text{He}$ 反应的伴随 α 粒子。

例如, 假设测量 14 MeV 中子引起的 $^{98}\text{Ru}(\text{n}, 2\text{n})^{97}\text{Ru}$ ($T_{1/2} = 2.9 \text{ d}$) 反应截面, 选用 Nb 做监督片, 通过 $^{93}\text{Nb}(\text{n}, 2\text{n})^{92\text{m}}\text{Nb}$ 反应监督样品中子注量, 用金硅面垒探测器测量伴随 α 粒子记录辐照过程中子注量率的变化以对中子注量率波动进行修正。如图 1 所示, α

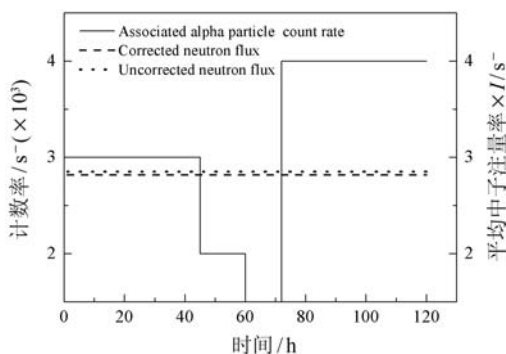


图 1 中子注量率波动和平均中子注量率修正

粒子的计数率反映了中子源强度随时间的变化规律。由此变化规律, 可将辐照过程描述为 4 个阶段: 旧氙靶、加速器状态较好辐照阶段; 旧氙靶、加速器状态变差辐照阶段; 换氙靶、加速器检修阶段; 新氙靶、加速器状态检修后辐照阶段。4 个阶段分别持续 45, 15, 12 和 32 h; α 粒子的计数率分别为 3×10^3 , 2×10^3 , 0×10^3 , $4 \times 10^3/\text{s}$ 。

由于中子注量率和 α 粒子计数率成正比, 所以可假设 4 个阶段 Nb 监督片的中子注量率分别为 $3I$, $2I$, 0 和 $4I$ 。则辐照过程中子注量率的实际平均值应为

$$\bar{I} = \frac{(3I \times 45 + 2I \times 15 + 0 \times 12 + 4I \times 32)}{(45 + 15 + 12 + 32)} = 2.82I。$$

若不对辐照过程进行记录, 只是根据辐照结束后监督片中 $^{92\text{m}}\text{Nb}$ 的活度来定量中子注量, 计算得平均中子注量为 $2.85I$ 。根据式(14)可以求得中子注量率波动修正因子为 1.007, 对上述 $2.85I$ 进行修正, 所得的中子注量平均值为 $2.83I$ 。

可见, 通过中子注量率波动修正因子的修正, 根据监督片剩余核放射性活度得到的样品辐照中子注量平均值更接近实际情况。

对于被研究核反应 $^{98}\text{Ru}(\text{n}, 2\text{n})^{97}\text{Ru}$ 而言, ^{97}Ru 的半衰期为 2.9 d, 根据式(14)计算得的中子注量率波动修正因子为 1.03, 相应修正量变大。

3.2 其他应用

在基于反应堆中子源的中子活化分析中, 辐照过程也会遇到堆功率调整和暂时停堆检修等, 这其实也是一种波动, 也可以通过相应的中子注量率波动修正因子修正, 提高数据的精度。

在标定中子源产额时, 标准截面法简单可行。可以选择一组具有不同能量阈值和截面比较准确的核反应, 分别测量辐照后各反应道剩余核的放射性活度, 从而分析相应能区中子产额的信息。由于辐照过程可能存在波动, 各反应道剩余核的半衰期均不相等, 所以波动现象对各反应道所产生的影响也不相同, 借助中子注量率波动修正因子修正可以提高数据精度。

4 讨论

在中子核反应截面测量研究中, 通过对监督片和被研究核反应样品的形状和位置的合理布局, 可以使被研究核反应样品和监督片之间的中子注量存在简单

的数学关系。例如,使用三明治样片叠放法,使监督片和被研究核反应样片之间的中子注量近似相等;在截面计算时,只要求得各反应道对应的波动修正因子即可,没有必要计算中子注量的绝对值。

在利用标准截面法监督中子注量时,选择监督反应(片)要遵循:(1)制备监督片的材料容易得到,而且其物理性质和化学性质稳定;(2)监督反应的截面数据准确;(3)监督反应的能量阈值符合要求。除了以上3个主要原则外,还要考虑监督反应剩余核的半衰期,因为中子注量率波动修正因子的大小和监督反应生成核的半衰期长短有关,若辐照持续时间超过了监督反应剩余核半衰期2倍以上,则通过监督反应计算得到的中子注量存在较大的误差。

中子注量率稳定和生成核半衰期较长的辐照所对应的中子注量率波动修正因子等于1或近似等于1。当辐照的后半时段中子源较强时,波动修正因子大于1;当辐照的前半时段中子源较强时,波动修正因

子小于1。计算中子注量率波动修正因子时,要对辐照过程进行时间分割,分割多少段没有强行规定,但分割要能反映中子注量率的变化,尽量确保各分段时间内中子注量率稳定。

参考文献(References):

- [1] DING Dazhao, YE Chuntang, ZHAO Zhixiang. Neutron Physics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2005: 153. (in Chinese)
(丁大钊, 叶春堂, 赵志祥, 等. 中子物理学[M]. 北京: 原子能出版社, 2005: 153.)
- [2] BAO Zongyu, RONG Chaofan, YANG Xiaoyun, *et al.* Chin J Nucl Phys, 1993, **15**(4): 341.
- [3] HE Guozhu, LUO Junhua, KONG Xiangzhong, *et al.* Annals of Nuclear Energy, 2006, **33**: 37–42.
- [4] LU Xiting. Nuclear Physics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2000: 242–245. (in Chinese)
(卢希庭. 原子核物理学[M]. 北京: 原子能出版社, 2000: 242–245.)

Neutron Flux Fluctuation Correction Factor and its Application

HE Guozhu^{1, 1)}, LAN Changlin²

(1. Key Laboratory of Nuclear Data, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;
2. College of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Incident neutron flux has to be measured accurately in the neutron reaction study especially in the neutron reaction cross-section measurement with activation method. Average neutron flux in the irradiated sample is usually determined by the monitor reaction with reference cross-section values. However, the average incident neutron flux, based on the radioactivity of the residual nuclei produced in the monitor reaction, is dependent upon the neutron flux fluctuation. In the procedure of the average neutron flux calculation, the correction factor for the neutron flux fluctuation plays a key role. In this paper, definition of the neutron flux fluctuation correction factor is inferred theoretically. The selection principles of the monitor reaction and the utilization of the correction factor have been discussed.

Key words: neutron flux; correction factor

Received date: 19 Apr. 2013; Revised date: 20 May 2013

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (10975195)

1) E-mail: hegz@ciae.ac.cn

<http://www.npr.ac.cn>