

用 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合吸收法测量 ^{56}Mn 的 活度并计算中子注量率

钱德丰 奚烈

(西北核技术研究所, 西安, 710024)

用 14 MeV 中子辐照一组厚度分别为 35、75、100、150 及 200 μm 的纯 Fe 箔, 用 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合吸收效率外推法测量 $^{56}\text{Fe}(\text{n}, \text{p})^{56}\text{Mn}$ 反应产物 ^{56}Mn 的活度, 计算得中子注量率的相对总不确定度为 1.9%。与 α 伴随粒子法绝对测量结果相比较, 相对偏差小于 2%。

关键词 活度 效率外推 中子注量率

14 MeV 中子注量率比对中, 常用一定厚度、一定直径的纯铁箔 (^{56}Fe) 作为传递样品, 在 14 MeV 中子能区的 $^{56}\text{Fe}(\text{n}, \text{p})^{56}\text{Mn}$ 反应截面, 国内外已有几家标准实验室作过精确的测量。1973—1978 年, 第一次国际中子注量率比对中曾给出中子能量为 14.74 MeV Fe 的 (n, p) 反应截面 $\sigma_{\text{Fe}} = (109.2 \pm 1.0) \times 10^{-27} \text{cm}^2$, 并给出了该能量的 $d\sigma_{\text{Fe}}/dE = (0.0123 \pm 0.0006) \text{keV}^{-1} \cdot 10^{-27} \text{cm}^2$ 。由此可以得到 14.60 MeV 附近中子的 $^{56}\text{Fe}(\text{n}, \text{p})^{56}\text{Mn}$ 反应截面。这为采用 Fe 箔作活化样品测量 14 MeV 中子注量率提供了必要的条件; 其次, 由于 ^{56}Mn 半衰期适中, 容易获得饱和活性, 利于活度测量。

Fe 箔样品均有一定的大小和厚度, 绝对测量其活度比较困难。本文采用 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 绝对计数技术^[1]测定反应产物 ^{56}Mn 的活度, 同时采用 $90^\circ\alpha$ 伴随粒子法监测中子注量率。

1 原理与方法

活化法采用的中子注量率 $\Phi(\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ 的公式如下:

$$\Phi = \frac{\lambda N_0}{n \cdot K \cdot (1 - e^{-\lambda T}) \sigma_{\text{act}}} \quad (1)$$

式中: λ ——生成的放射性核的衰变常数 (s^{-1}); N_0 ——为参考时刻单位质量核素的原子数; n ——靶原子数; σ_{act} ——核反应活化截面 (cm^2); T ——辐照时间 (s); K ——样品照射期间中子注量率的变化引起的对活度的修正因子^[2]。

收稿日期: 1993-11-15 收到修改稿日期: 1994-02-05

$$K = q \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda T/q)}{\exp(\lambda T) - 1} \cdot \frac{\sum_i a_i \exp(i\lambda T/q)}{\sum_i a_i} \quad (2)$$

式(2)中 q 为整个照射过程分划的时间间隔数, i 和 a_i 分别为第 i 个时间间隔及相应的相对注量率。

根据衰变纲图, 反应产物 ^{56}Mn 将放出 β, γ , 衰变到基态 ^{56}Fe 。 N_0 则由 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合效率外推法根据式(3)计算得到。

$$N_\beta = F(N_c/N_\gamma) \\ N_0 = F(1)/\lambda \quad \text{当 } N_c/N_\gamma \rightarrow 1 \text{ 时} \quad (3)$$

其中: N_c 为符合道计数; N_γ 为 γ 道计数。

当具有 n 组 β 分支, 而对每一分支后伴有瞬发的 γ 射线作符合测量时, 其效率外推满足一定的物理条件时^[3], 其 β 道计数才可用式(3)表示。

函数 F 是没有具体化的普遍形式, 实际上可简单地将它定义为 N_c/N_γ 的多项式。式(3)不直接依赖衰变纲图参量, 它是唯一可观察的函数。任何有依赖关系的影响都被归纳到“效率函数” F 的参量中, F 借助于实验, 通过改变 β 探测效率来确定。

本工作通过改变源的自吸收改变 β 探测效率 ϵ_β , 再用最小二乘法拟合获得 N_0 ^[4]。

2 实验安排

实验在法制 KR-400T 型高压倍加器上进行, 利用 $\text{T}(d, n)^4\text{He}$ 反应产生的 14 MeV 中子, 入射氦能为 200 keV。实验安排示于图 1。

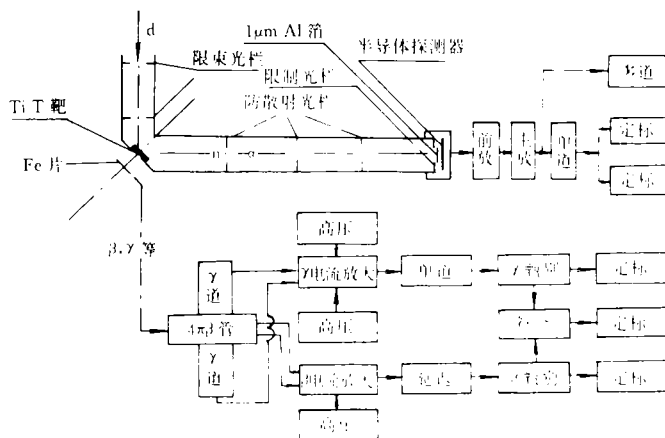


图 1 实验装置及 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合装置框图

Fig. 1 Block diagram of experimental facility and $4\pi\beta\text{-}\gamma$ coincidence equipment

将 $\phi 20$ mm, 质量分别为 84.80、147.10、207.70、275.90、428.95 mg, 纯度为 0.9995 的一

组 Fe 箔紧迭在一起,外包 Cu 皮,固定在 3 根 0.1 mm W 丝夹住的样品架上,置于 14 MeV 中子场中辐照;样品与入射氘束成 45° ,距靶 d 为 5 cm,且与靶面平行。TiT 靶由中国原子能科学研究院提供,Mo 底衬 $\phi 14$ mm,厚 0.2 mm,活性区为 $\phi 12$ mm;采用滴水冷却。考虑到靶点和样品都有一定的大小,靶到样品的距离需用有效距离 \bar{d} 来表示。

$$\bar{d} = \sqrt{d^2 + \frac{r^2}{2} + \frac{R^2}{2}} \quad (4)$$

式中: r 为靶点半径; R 为样品半径。

实验共进行两轮,照射时间分别为 144 和 130 min。样品活化后,反应产物 ^{56}Mn 的放射性在 FH-424 型 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合装置上测量。

采用 ^{60}Co 源标定 $4\pi\beta$ 管的坪曲线。 β 道对 ^{60}Co 坪长约 350 V,坪斜为 0.15%/100V,确定工作点为 2950 V, β 道甄别阈为 1.0 V,死时间为 1.05 μs 。 γ 道探头由 $\phi 40 \times 30$ 的 NaI(Tl) 晶体及 GDB-44 型光电倍增管组成。 γ 道死时间为 0.93 μs ,延迟时间为 0.5 μs 。

实验测量到的 ^{56}Mn 的 β 活性,主要来自 $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$,少量来自 $^{57}\text{Fe}(n, np + pn + d)^{56}\text{Mn}$ 反应。此外,为了扣除长寿命的 ^{54}Mn 的 β 活性的影响,在每次照射前必须测量 Fe 片的本底计数。实验中选取最低 $E_\gamma = 0.845$ MeV 的光电峰作为单道的 γ 甄别窗。

实验中同时采用 α 伴随粒子法进行中子注量率绝对测量,照射期间中子注量率随时间的变化由 α 计数进行监视。

Fe 的截面 $\sigma_{\text{Fe}}(E_n)$ 在 14.60 MeV 附近随能量变化较快,为了选准 σ_{Fe} 值,采用上海原子核研究所生产的电阻率为 15000 $\Omega \cdot \text{cm}$ 的高阻金硅面垒型半导体探测器测量样品所在位置角度的中子平均能量。事实上 \bar{E}_n 的直接测量亦为 α 伴随粒子法的各向异性修正因子的计算提供了必要的实验数据。

3 结果与误差

3.1 活化法测中子注量率

活化样品的单位质量衰变率对 $(1 - \epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ 在 $\epsilon_\beta > 0.6$ 的区域是一条直线^[1]。以第二轮实验数据为例,将活化后 Fe 片的活度测量结果示于图 2。图中直线为最小二乘法拟合结果。

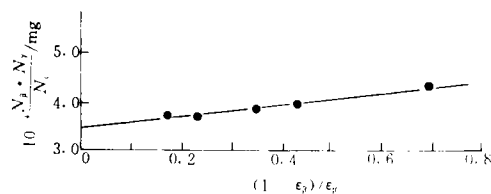


图 2 ^{56}Mn 测量数据及外推结果

Fig.2 Measured data and extended result of ^{56}Mn

由截距按式(1),可算出样品位置的中子注量率。计算中对靶头及空气的散射和吸收^[5]、 ^{57}Fe 干扰反应、前样品对后样品的减弱及 K 因子均作了修正。修正后的中子注量率及有关参数列于表 1。

表1 中子注量率及有关参数

Table 1 Neutron flux density and parameter concerned

实验 轮次	停机时刻 衰变核数 N/mg	平均中子 能 量 E _n /MeV	截面 σ _{Fe} (E _n) /10 ⁻²⁷ cm ²	注量率波动 修正因子 K	照射时间 T/min	有效距离 d/cm	总修正系数 /%	中子注量率 Φ /10 ⁶ s ⁻¹ ·cm ⁻²
No.1	36128.1	14.53	111.79	0.9843	144	5.08	+0.1	5.2465
No.2	35743.8	14.51	112.09	0.9847	130	5.08	+0.1	5.6694

利用⁵⁶Fe(n, p)⁵⁶Mn 反应,活化法测量中子注量率的各项误差列于表2。

表2 活化法测量中子注量率的误差

Table 2 Error of Neutron flux density by activated method

实验轮次	误 差 项						
	靶头和空气 散射/%	样品称重 误差/%	样品距离 误差/%	干扰反应 /%	⁵⁶ Fe(n, p) ⁵⁶ Mn 截面误差/%	活性测量 误差/%	总不确定度 /%
No.1	0.1	0.1	1.0	0.2	1.0	1.0	1.8
No.2	0.1	0.1	1.0	0.2	1.0	1.2	1.9

3.2 活化法与 α 伴随粒子法的比较

样品照射的同时,用 α 伴随粒子法(90° α 伴随靶管)测得两轮中子注量率数据,2 种方法所得结果比较列于表3。

表3 活化法与 α 伴随粒子法测量中子注量率的结果比较

Table 3 Comparison of activation method with associated α particle method for measurement of neutron flux density

实验轮次	活化法测得 Φ _活 /10 ⁶ s ⁻¹ ·cm ⁻²	活化法测量误差 /%	α-伴随粒子法测得 Φ _伴 /10 ⁶ s ⁻¹ ·cm ⁻²	α-伴随粒子法测量 误差/%	相对偏差 Φ _活 - Φ _伴 /Φ _伴 /%
No.1	5.2465	1.8	5.2068	1.2	0.8
No.2	5.6694	1.9	5.6212	1.2	0.9

由表3可知,2种方法在误差范围内较好地符合。

本实验所用 Fe 箔最薄的一片为 35 μm,其 ε_β 达 85%。ε_β 越高,外推越可靠。为了获得较高的 ε_β,需尽量采用薄的 Fe 箔。另外,实验时样品周围要空旷一些,以减少散射中子的影响。

工作中得到黄豹同志的关心和支持,赵青振、张立军同志积极予以配合。在此一并表示感谢。

谢。

参 考 文 献

- 1 KUDO K. Absolute Measurement of the $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ Cross Section of 14.8 MeV Using an On-line Monitoring System for the Time Variation of Neutron Flux. Nucl Instrum Methods, 1977, 141:325—328.
- 2 马鸿昌, 卢涵林. 14.60 MeV 快中子注量比对报告, 中国原子能科学研究院资料, 1982.
- 3 Baerg AP. 符合计数中的效率外推法. 第一届国际放射核素计量学讨论会论文集, 中国计量科学研究院资料, 1976.
- 4 高福中. 见: $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合测量基本原理. 放射性强度的绝对测量. 1979年讨论会资料选编.
- 5 Thomas DJ, Lewis VE. Standardization of Neutron Fields Produced by the $^3\text{H}(d, n)^4\text{He}$ Reaction. Nucl Instrum Methods, 1981, 179:397.

CALCULATION OF NEUTRON FLUX DENSITY AND THE ACTIVITY MEASUREMENT OF ^{56}Mn BY $4\pi\beta\text{-}\gamma$ COINCIDENCE ABSORPTION METHOD

QIAN DEFENG DOU LIE

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, 710024)

ABSTRACT

A series of pure iron-foils which have the thickness of 35、75、100、150 and 200 μm , respectively is irradiated with 14 MeV neutron. Calculation of neutron flux density and the absolute activity of ^{56}Mn produced by the reaction of $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ with the $4\pi\beta\text{-}\gamma$ coincidence absorption efficiency - extrapolation method are measured. The overall relative uncertainties is 1.9%. The relative standard deviation is less than 2% in comparison with associated α particle method.

Key words Activity Efficiency extrapolation Neutron flux density