

用 $4\pi\beta-\gamma$ 符合参数法测量燃耗 监测体 ^{144}Ce 的活度

楊留成 呂 峯 陈国安

一、前 言

采用 $4\pi\beta-\gamma$ 符合吸收法^[1]测量燃耗监测体 ^{144}Ce 的活度, 此种方法准确度较高, 且不需要知道衰变纲图的核参数, 但是对于大量测量来说, 显得太烦琐费时。同时, 为提供一种可作比较的方法, 对参数法也做了一些工作, 并与符合吸收法进行比较, 二者在 1% 左右符合。

二、参数法简述

参数法^[2]是选择核衰变中相对强度已知的一个(或几个)分支, 合理设计 γ 道窗, 进行符合测量, 定出这一个(或几个)分支的 β 探测效率。再利用衰变纲图所提供的有关核参数, 通过一定的计算, 从而求出修正因子 K 。最后由符合方程式求出源的绝对衰变数。

在测量中, 选择分支比为 19.4% 的 β_1 分支与其级联发射的 133.53 keV γ 射线进行符合测量, 求出其效率 ε_{β_1} , 再根据自吸收与能量成反比的关系式求出 $\varepsilon_{\beta_2}, \varepsilon_{\beta_3}, \varepsilon_{\beta_4}, \varepsilon_{\beta_5}, \varepsilon_{\beta_6}$, 然后将有关的核参数代入 K 表达式实现 K 因子的计算。最后由实际测得的 $N'_\beta, N'_\gamma, N'_c$ 值, 经本底、死时间及偶然符合修正之后, 通过符合方程式:

$$\frac{N_\beta N_\gamma}{N_c} = N_0 \cdot K,$$

求出所测源的绝对衰变数 N_0 。

$$\text{其中: } K = p_1 + p_2 \frac{\varepsilon_{\beta_2}}{\varepsilon_{\beta_1}} + p_3 \frac{\varepsilon_{\beta_3}}{\varepsilon_{\beta_1}} + p_4 \frac{\varepsilon_{\beta_4}}{\varepsilon_{\beta_1}} + p_5 \frac{\varepsilon_{\beta_5}}{\varepsilon_{\beta_1}} + p_6 \frac{\varepsilon_{\beta_6}}{\varepsilon_{\beta_1}} + \frac{1 - \varepsilon_{\beta_1}}{\varepsilon_{\beta_1}} \times I_{t1} + \frac{1 - \varepsilon_{\beta_2}}{\varepsilon_{\beta_1}} \times I_{t2} + \frac{I_{t3}}{\varepsilon_{\beta_1}}.$$

这里, $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$ 分别为相应 β 分支的分支比, $\varepsilon_{\beta_1}, \varepsilon_{\beta_2}, \varepsilon_{\beta_3}, \varepsilon_{\beta_4}, \varepsilon_{\beta_5}, \varepsilon_{\beta_6}$ 分别为相应 β 分支的 β 探测效率, I_{t1}, I_{t2} 分别为与 β_1, β_2 相关的内转换强度, I_{t3} 为 59.03 keV γ 跃迁在平衡时的内转换强度。 $N'_\beta, N'_\gamma, N'_c$ 分别为 β 道、 γ 道、符合道的观测计数率, N_β, N_γ, N_c 分别为经本底、死时间及偶然符合修正之后的各道计数率。

实验时把 γ 窗卡在 133.53 keV 峰区, 所以:

$$\varepsilon_{\beta_1} = \frac{N_c}{N_\gamma}.$$

由原已计算出的表(略)中可以查出对应于 ε_{β_1} 的 K 值, 代入符合方程式便可算得 N_0 。由

$$A = \frac{N_0}{2M},$$

即可求得¹⁴⁴Ce的活度。其中A为¹⁴⁴Ce的活度，M为¹⁴⁴Ce源的重量。

本计算中所采用的衰变纲图^[37]如图1所示，所采用的参数值如下：

$$\begin{aligned}
 p_1 &= 0.194; & p_2 &= 0.042; & p_3 &= 0.758; \\
 p_4 &= 0.0102; & p_5 &= 0.011; & p_6 &= 0.978; \\
 I_{t1} &= 0.0901; & I_{t2} &= 0.0298; & I_{t3} &= 0.012.
 \end{aligned}$$

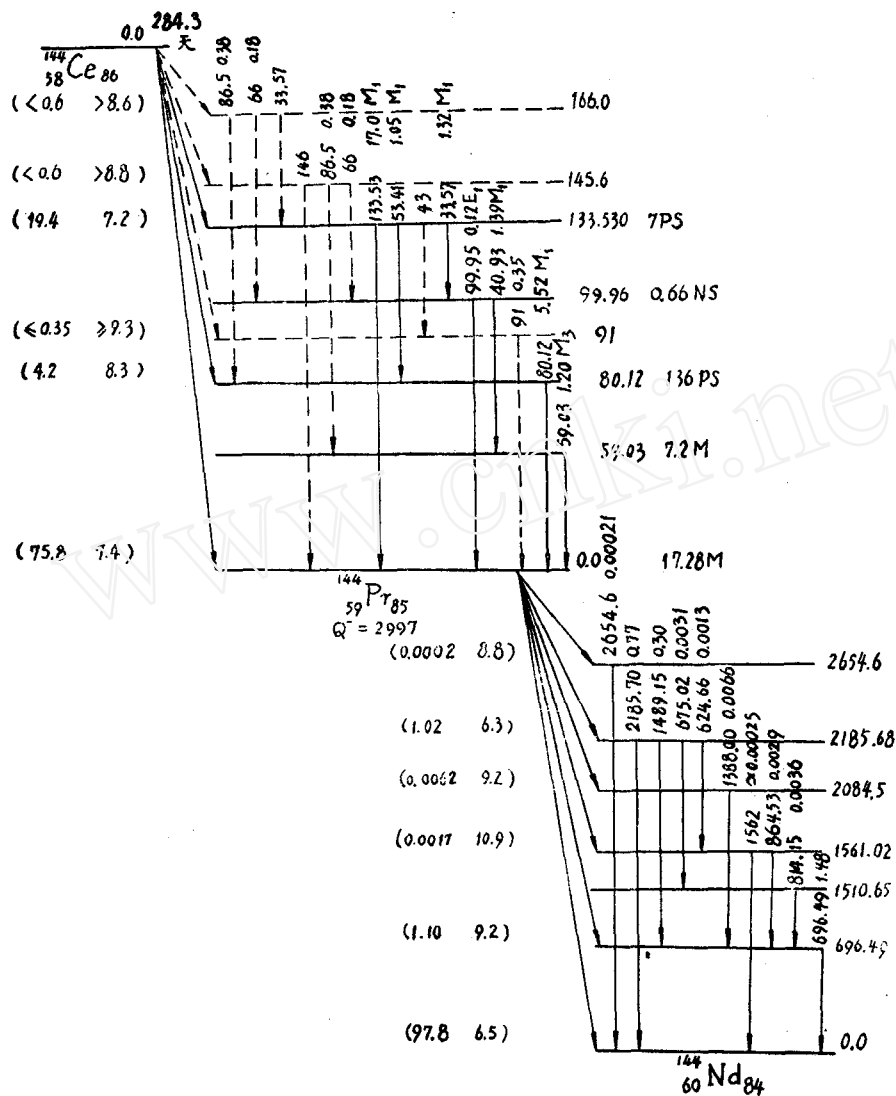


图1 ¹⁴⁴Ce-¹⁴⁴Pr衰变纲图

三、实验条件

实验装置及有关特性曲线可参阅[1,4]。这里仅列出最后所采用的实验条件：

1. β道：甄别阈为0.1V，高压为3000V，道死时间为4.2μs。
2. γ道：甄别阈为2.0V，单道道宽为2.0V，放大器放大倍数用Ⅱ档，道死时间为

4.2 μs , 两个 NaI(Tl)探头所用高压分别为 780 和 720 V, 单道谱仪对 ^{137}Cs (662 keV)的分辨率约为 11.5%。

3. 符合道: 分辨时间为 0.975 μs , 延迟时间为 0.5 μs 。

4. 流气速度: 60~100 滴/分。

四、实验结果及误差分析

对符合吸收^[1]所得结果, 我们用参数法予以核对, 两者在 1% 左右符合。并把国家计量总局于 1978 年 4 月发来的国外标准溶液 ^{144}Ge 测量结果, 用两种方法进行了处理, 比较结果见表 1。

表 1 两种方法处理的结果比较

源号	63	59	58	56	46	28
符合吸收法结果, dps/mg	90.84	91.45	91.57	91.24	91.35	91.29
参数法结果, dps/mg	91.50	92.52	92.58	92.05	91.49	92.23

1. 偶然误差。由 β 道、 γ 道、符合道的本底及计数涨落及天平称重的偶然误差等对测量结果的偶然误差的贡献, 可用平均值的标准偏差表示如下:

$$S_m = \left[\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}{n(n-1)} \right]^{1/2}$$

其中, S_m 为平均值的标准偏差; n 为独立测量的源个数; x_j 为第 j 个源的活度; \bar{x} 为 n 个源的平均活度。

2. 系统误差。参数法误差主要依赖于所用各种参数的准确程度, 对于 ^{144}Ge 而言, 其各 β 分支能量相近, 故各 β 分支对应的效率亦相接近, 这样分支比带来的误差很小。

另外, 我们利用了自吸收与能量成反比的近似关系式, 对结果影响很小。

① 参数不准引入的系统误差约 $\pm 0.3\%$, ② 分辨时间不准引入的系统误差约 $\pm 0.05\%$, ③ 死时间不准引入的系统误差约 $\pm 0.05\%$, ④ 称重不准引入的系统误差约 $\pm 0.1\%$, ⑤ 本底不准引入的系统误差约 $\pm 0.05\%$, 总的系统误差 $\delta = \sum \delta_i = 0.55\%$ 。

以上述所列参数法所得结果为例: 平均值标准偏差为 $S_m = 0.20$ dps/mg; 相对标准偏差为 $\sigma = \frac{S_m}{N_0} = 0.21\%$; 如果置信度为 95%, 自由度取 $n-1=5$, 对应 t 值为 2.571。总的
不确定度 $\eta = \pm (t\sigma + \delta) = \pm (0.55\% + 0.55\%) = \pm 1.1\%$ 。

五、小 结

这里所用 K 因子表达式是对 ^{144}Ge - ^{144}Pr 核素推导出来的并非一般表示式。对一个具体核素, 只要对其衰变纲图仔细分析, 选择 β 分支并合理设计一个 γ 道窗, 建立 K 因子表示式, 即可实现对 K 的计算。加之高分辨 Ge(Li) γ 谱仪的广泛应用, 对衰变纲图中的各项参数的测量越来越准确。这样, 参数法就有可能用于许多衰变纲图比较复杂的核素之绝对测

(下转第 167 页)

参 考 文 献

- [1] M. J. Kelly et al., *IRE, NS-8*, 4, 89(1961).
 [2] C. R. McGowan et al., *Progress in Nuclear Energy, Series IX, Anal. Chem. vol. 7*, p. 122—134, Pergamon (1966).
 [3] J. R. Prall, NLCO-1041 (1969).
 [4] И. П. Алимарин, “Аналитическая Химия Урана” М., Изд-во АН СССР, 1962, стр. 107.
 [5] Н. Schmier, 在硝酸与 ТВР 的正烷属烃溶液中, Pu(III), Pu(IV), Pu(VI), U(IV) 和 U(VI) 的吸收光谱及其在自动化控制过程中的应用, 原子能出版社, 1974, p. 28; 43.
 [6] 张焯兰等, 1974年流线分析会议资料选编, 原子能出版社, 1976, p. 34.

(上接第 233 页)

量。如果 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合装置中所用的 γ 探头改用大体积 Ge(Li) 探测器, γ 道窗的设计将更为方便。

虽然建立 K 因子要进行一定的选择与计算, 但 K 因子一经建立, 数据处理十分方便。故这种方法比吸收法不仅物理意义明确, 测量简单, 而且也可以达到与吸收法相近的精确度。所以对于测量任务重的情况, 采用此法就有它的优越之点。同时又可作为一种比较手段, 因而参数法也是放射性核素标准化中一种很重要的方法。

参 考 文 献

- [1] 杨留成等, 用 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合吸收法测量燃料监测体 ^{144}Ge 的活度, 内部资料, 1978。
 [2] 中国计量科学院分院放射性室编, 放射性核素测量资料汇编, 内部资料, 1978。
 [3] *Nucl. Data Sheets* 16, № 2(1975).
 [4] 国营二六一厂, FH-424 G₂ $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合测量装置使用说明书, 内部资料, 1974.

(上接第 245 页)

子谱。

参 考 文 献

- [1] W. Marshall & S. W. Lovesey, *Theory of Thermal Neutron Scattering*, Oxford, 1971.
 [2] G. L. Squires, *Introduction to the Theory of Thermal Neutron Scattering*, Cambridge, 1978.
 [3] В. Ф. Турчин, *Медленные Нейтроны*, Москва, 1963.
 [4] D. Pines, *Elementary Excitation in Solids*, New York, 1963.
 [5] Van-Hove, *Phys. Rev.*, **95**, 249(1954).
 [6] E. L. Slagge, *J. Phys. Chem. Solids*, **29**, 923(1968).
 [7] 萨本豪等, *原子能科学技术*, **3**, 193(1978).
 [8] P. A. Egelstaff & P. Schofield, *Nucl. Sci. Eng.*, **12**, 260(1962).
 [9] 阮景辉等, *高能物理与核物理*, **2**, 441(1978).
 [10] KFK-2054(1974); KFK-2183(1975).
 [11] М. М. Бредов, *ФТТ*, **9**, 287(1967);
 В. С. Оскоцкии, *ФТТ*, **9**, 550(1967);
 F. Gompf et al., *Inelastic Scattering of Neutrons (Proceeding of the Symposium on Inelastic Scattering of Neutron, held at Grenoble, 1972)*, IAEA, Vienna, 1972, p. 137.