

^{235}U 裂变电离室法及金箔活化法 测量热中子注量率的不确定度分析

于青玉, 刘书焕, 仲云红, 江新标

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 文章简述 ^{235}U 裂变电离室法及金箔活化法测量热中子注量率的基本原理, 并对测量过程中的各项不确定度因素进行了分析评定, 包括中子衰减、裂变计数率、全谱平均反应截面、金箔活性等。计算出的两种注量率测量相对合成标准不确定度满足 2%~5% 的要求。对减小中子注量率测量不确定度的方法进行了讨论。

关键词: 不确定度分析; 中子注量率; 裂变电离室; 金箔活化法

中图分类号: TL81 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2008)03-0233-06

Uncertainty Analysis of Measuring Thermal Neutron Fluence Rate by Using ^{235}U Fission Ionization Chamber and Gold Foil-Activation Methods

YU Qing-yu, LIU Shu-huan, ZHONG Yun-hong, JIANG Xin-biao

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

Abstract: The basic principle of measuring the thermal neutron fluence rate by using ^{235}U fission ionization chamber and gold foil-activation methods was discussed in the paper. And the standard uncertainty factors in the measuring process, such as the neutron decay, the fission count rate, the total average reactive cross section, and the gold foil-activity were evaluated. The calculated relative combined standard uncertainty for both measuring methods can meet the requirement of 2%-5%. The ways on minimizing the uncertainty of measuring results were discussed.

Key words: uncertainty analysis; neutron fluence rate; fission chamber; gold foil-activation method

^{235}U 裂变电离室是电子脉冲电离室, 基本原理基于中子束照射到作为阴极的 ^{235}U 镀片上使 ^{235}U 产生裂变。裂变碎片从镀片中射出, 并

使电离室中的工作气体电离。在收集电子过程中, 收集极产生脉冲, 记录裂变碎片的数目, 从而可确定入射中子的注量率。

采用金箔活化法对 ^{235}U 电离室测得的中子注量率进行比对分析。核反应 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$ 活化截面和 $^{235}\text{U}(n, f)$ 裂变截面均为IAEA推荐的标准截面,根据截面数据,并利用飞行时间法测得的中子能谱 $\varphi(E)$,可求出 $^{235}\text{U}(n, f)$ 或 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$ 的全谱平均截面:

$$\bar{\sigma} = \frac{\int \varphi(E)\sigma(E)dE}{\int \varphi(E)dE} \quad (1)$$

式中: $\sigma(E)$ 为中子反应截面, cm^2 ; $\varphi(E)$ 为中子能谱, cm^{-2} 。

由 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$ 活化产物 ^{198}Au 的测量活性,可得到金箔活化法测得的绝对中子注量率为:

$$\bar{\varphi} = \frac{A}{N\bar{\sigma}_{^{197}\text{Au}}K_{\varphi}} \quad (2)$$

式中: A 为探测样品的测量活性, Bq ; N 为探测样品核数目; $\bar{\sigma}_{^{197}\text{Au}}$ 为 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$ 反应平均截面; K_{φ} 为热中子注量率不稳定修正因子。

1 ^{235}U 电离室法测量热中子注量率的不确定度分析

1.1 数学模型建立及不确定度分量确定

用 ^{235}U 裂变电离室测量热中子注量率时,需进行中子衰减修正,为此,建立数学模型如下:

$$\bar{\varphi}_c = F\bar{\varphi} = F \frac{N_f}{\bar{\sigma}N_5K_{\varphi}} \quad (3)$$

式中: $\bar{\varphi}_c$ 为修正后的中子注量率, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; F 为总的中子衰减修正系数; $\bar{\varphi}$ 为平均中子注量率, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; N_f 为裂变计数率, s^{-1} ; $\bar{\sigma}$ 为 ^{235}U 裂变全谱平均截面, cm^2 ; N_5 为样品中 ^{235}U 的核数目。

根据不确定度计算公式,得:

$$u(\bar{\varphi}_c) = \bar{\varphi}_c \left[\left(\frac{u(F)}{F} \right)^2 + \left(\frac{u(N_f)}{N_f} \right)^2 + \left(\frac{u(\bar{\sigma})}{\bar{\sigma}} \right)^2 + \left(\frac{u(N_5)}{N_5} \right)^2 + \left(\frac{u(K_{\varphi})}{K_{\varphi}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

由式(4)可看出,用裂变电离室法计算中子注量率的不确定度来源主要有:总的中子衰减系数引起的不确定度 $u(F)$ 、裂变计数率引起的不确定度 $u(N_f)$ 、裂变全谱平均截面引起的不确定度 $u(\bar{\sigma})$ 、核数目引起的不确定度 $u(N_5)$ 、

热中子注量率不稳定修正因子引起的不确定度 $u(K_{\varphi})$ 。

1.2 各不确定度分量分析

1) 裂变计数率引起的标准不确定度 $u(N_f)$

利用测量的裂变计数谱和本底谱,对实验测量结果进行处理和修正,得到裂变计数率 N_f 为:

$$N_f = F_a(N + N_1 - N_b) \quad (5)$$

式中: F_a 为镀片自吸收修正系数; N 为计数谱进行处理后得到的裂变计数率; N_1 为脉冲幅度低于甄别阈未被计算在内的裂变计数率; N_b 为本底中子引起的裂变计数率。

故由裂变计数率引起的 $u(N_f)$ 计算公式为:

$$u(N_f) = [(N + N_1 - N_b)^2 u^2(F_a) + F_a^2 u^2(N) + F_a^2 u^2(N_1) + F_a^2 u^2(N_b)]^{1/2} \quad (6)$$

其中:计数率 N 、 N_1 、 N_b 的不确定度均采用A类不确定度分析方法,在同一实验条件下,测量得到3次实验结果,进行统计分析。表1所列为由计数谱进行处理后得到的裂变计数率 N 的标准不确定度 $u(N)$ 。

表1 计数谱进行处理后得到的裂变计数率统计分析
Table 1 Statistical analysis of fission count rate for processed counter spectra

测量列 i	N_i / s^{-1}	$(N_i - \bar{N})^2 / \text{s}^{-2}$	$u(N) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}{6}} / \text{s}^{-1}$
1	20.149	1.2532×10^{-1}	
2	20.586	6.8890×10^{-3}	0.19
3	20.774	7.3441×10^{-2}	

镀片自吸收引起的标准不确定度用B类方法评定。其自吸收修正系数为:

$$F_a = 1 + \frac{h}{2R} \left[1 + \left(\frac{\sigma}{h} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中: h 为U样品镀层的平均厚度; R 为裂变碎片在U样品中的平均射程($R = 7.5 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$); σ 为镀层厚度不均匀性标准偏差。

镀片自吸收引起的标准不确定度 $u(F_a)$ 为:

$$u(F_a) = \sqrt{\left(\frac{\partial F_a}{\partial d} \right)^2 u^2(h) + \left(\frac{\partial F_a}{\partial \sigma} \right)^2 u^2(\sigma)} \quad (8)$$

因此,关于镀片自吸收引起的不确定度,需考虑 U 样品镀层的平均厚度和镀层厚度不均匀性两个方面的不确定度来源。U 样品镀层厚度不确定度来源主要是浓缩铀浓度、同位素丰度、浓缩铀稀释后的浓度这 3 个方面。由相关测试中心信息得知, $u(h) = 0.098 \mu\text{g}/\text{cm}^2$; 镀层厚度不均匀性引起的标准不确定度分量由相关资料知,该项误差最大为 0.55%, 近似认为其为正态分布,则不确定度为 $u(\sigma) = \Delta\sigma/1.96 = 0.28\%$ 。

这样,由式(8)得 $u(F_a) = 1.15 \times 10^{-3}$ 。

同时,计算得到 $u(N_1)$ 和 $u(N_b)$ 分别为 0.03 s^{-1} 和 0.26 s^{-1} 。这样,按式(6)计算得 $u(N_f) = 0.32 \text{ s}^{-1}$ 。

2) 裂变全谱平均截面引起的标准不确定度 $u(\bar{\sigma})$

$$\bar{\sigma} = \frac{\int N(E)\sigma(E)dE}{\int N(E)dE} \quad (9)$$

式中: $N(E)$ 为实验测得的中子能谱; $\sigma(E)$ 为某一点处 ^{235}U 的中子裂变截面。

由 ENDF/B-VI 提供的中子引发 ^{235}U 裂变截面推荐值 σ 是一些非连续能点上的截面值,将非连续能点拟合给出连续截面谱 $\sigma_0(E)$,作积分计算,通过相关程序对各能点的推荐值和拟合值进行比较,进行并群和归一化处理,得出各能点的推荐值与拟合值之间的相对偏差为 3%,截面 σ 单次测量的标准偏差为 $1.497 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$,视其为正态分布,则裂变全谱平均截面引起的标准不确定度为 $u(\bar{\sigma}) = \Delta\bar{\sigma}/1.96 = 7.64 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ 。

3) ^{235}U 核数目定量引起的标准不确定度 $u(N_5)$

根据相关说明,分子电镀法给出的所有 U 样品镀片的定量精度均好于 1%。可近似认为,由核数目引起的不确定度为 $u(N_5) = 0.01$ 。

4) 热中子注量率总衰减修正系数引起的标准不确定度 $u(F)$

入射中子注量率的总衰减修正系数 F 为:

$$F = F_d F_s F_{Au} F_c$$

$$u(F) = F \left[\left(\frac{u(F_d)}{F_d} \right)^2 + \left(\frac{u(F_s)}{F_s} \right)^2 + \right.$$

$$\left. \left(\frac{u(F_{Au})}{F_{Au}} \right)^2 + \left(\frac{u(F_c)}{F_c} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

由式(10)可知,由热中子注量率不稳定修正因子引起的不确定度来源有:电离室中从镀片到裂变室前窗的距离修正 $u(F_d)$ 、不锈钢底衬对中子注量率影响修正 $u(F_s)$ 、金箔对铀样品测量结果引起的修正 $u(F_{Au})$ 、电离室外壳对中子注量率影响修正 $u(F_c)$ 。

(1) 电离室中从镀片到裂变室前窗的距离修正 $u(F_d)$

实验采用同一铀样品在不同位置上对中子注量率进行测量,并用 ^3He 正比计数管对输出中子束进行监视,以便进行归一化处理。实验中,分别记录距热柱孔道出口不同距离处的裂变室和 ^3He 正比计数管的计数,绘制 (L, N_c) (L 为裂变室距热柱孔道口距离, N_c 为裂变室计数)拟合曲线,得拟合曲线方程为:

$$F_d = 1 - Kl$$

式中: K 为裂变室计数 N 随距离 L 变化的斜率; l 为从裂变室前窗到不锈钢镀片的距离, cm。 $u(F_d)$ 则由下式计算:

$$u(F_d) = \left[\left(\frac{\partial F_d}{\partial K} \right)^2 u^2(K) + \left(\frac{\partial F_d}{\partial l} \right)^2 u^2(l) \right]^{1/2}$$

其中,曲线拟合带来的标准不确定度 $u(K)$ 按 B 类进行评定。由相关软件拟合曲线,得拟合相对偏差为 0.16%,根据实验结果,得到斜率 K 单次测量的标准偏差为 3.39×10^{-5} ,视其呈正态分布,则不确定度 $u(K) = \Delta K/1.96 = 1.73 \times 10^{-5}$ 。

裂变室前窗到不锈钢镀片的距离用千分尺测量。千分尺的分度值为 0.01 mm,半宽度为 0.01 mm。视其为均匀分布,则由此测量带来的标准不确定度 $u(l) = 5.77 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 。

这样, $u(F_d) = 1.24 \times 10^{-4}$ 。

(2) 不锈钢底衬对中子注量率影响的修正引起的标准不确定度 $u(F_s)$

中子在到达镀层引发 ^{235}U 裂变之前,穿过不锈钢底衬,所以,应考虑不锈钢底衬对中子注量率影响的修正 F_s ,有:

$$F_s = 1 + \sigma_{\text{底衬}} \frac{\rho d}{A_r} N_0$$

式中: $\sigma_{\text{底衬}}$ 为底衬平均反应总截面, cm^2 ; ρ 为底衬平均密度, g/cm^3 ; d 为底衬厚度, cm; N_0 为阿

伏加德罗常数, mol^{-1} ; \bar{A}_r 为底衬平均相对原子质量。

其中, 密度和原子量值均通过查相关标准数据库获取, 它们的不确定度分量可忽略不计。厚度不确定度由重复读数(A类)与所用刻度尺本身不确定度(B类)合成。不锈钢底衬的平均截面 $\bar{\sigma}_{\text{底衬}} = 11.27 \times 10^{-28} \text{ m}^2$ 。通过查阅截面数据库, 视相对偏差为 1%, 则底衬截面 $\Delta\bar{\sigma}_{\text{底衬}}$ 单次测量的标准偏差约为 $11.27 \times 10^{-26} \text{ cm}^2$, 视其为正态分布, 则由底衬总截面引起的不确定度 $u(\bar{\sigma}_{\text{底衬}}) = \Delta\bar{\sigma}_{\text{底衬}}/1.96 = 5.75 \times 10^{-26} \text{ cm}^2$ 。

底衬厚度引起的标准不确定度分量 $u(d)$ 包括两个分量, 即由重复读数引起的不确定度 $u(d_i)$ 和由仪器刻度带来的标准不确定度 $u(d_1)$ 。 $u(d_i)$ 按 A 类评定。在同一实验条件下, 由同一实验人员对底衬的不同径度处的厚度进行重复测量, 得到 10 组数据, 做统计分析, 得到 $u(d_i) = 5.89 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 。由仪器说明书知, 仪器分度值为 0.01 mm, 半宽度 $a = 0.01 \text{ mm}$, 视其为均匀分布, 则 $u(d_1) = a/\sqrt{3} = 5.77 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 。

这样, $u(d) = \sqrt{u^2(d_i) + u^2(d_1)} = 8.25 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 。

最终, $u(F_s) = \left[\left(\frac{\partial F_s}{\partial \bar{\sigma}_{\text{底衬}}} \right)^2 u^2(\bar{\sigma}_{\text{底衬}}) + \left(\frac{\partial F_s}{\partial \rho} \right)^2 u^2(\rho) + \left(\frac{\partial F_s}{\partial d} \right)^2 u^2(d) + \left(\frac{\partial F_s}{\partial \bar{A}_r} \right)^2 u^2(\bar{A}_r) \right]^{1/2} = 8.35 \times 10^{-4}$ 。

此外, 由金箔对铀样品测量结果的影响、电离室外壳对 neutron 注量率影响而引起的不确定度计算分别基于式(11)、(12), 这些不确定分量的计算、评定方法与之相同。具体计算结果列于表 3。

$$F_{\text{Au}} = 1 + \bar{\sigma}_{197\text{Au}} \frac{\rho_{197\text{Au}} d_{197\text{Au}}}{A_{197\text{Au}}} N_0 \quad (11)$$

$$F_c = 1 + \bar{\sigma}_c \frac{\rho_c d_c}{A_c} N_0 \quad (12)$$

式中: $\bar{\sigma}_{197\text{Au}}$ 为 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$ 全谱平均截面, cm^2 ; $\bar{\sigma}_c$ 为电离室外壳的平均截面, cm^2 ; $\rho_{197\text{Au}}$ 与 ρ_c 分别为金箔和电离室外壳密度; $d_{197\text{Au}}$ 与 d_c 分别为金箔和电离室外壳厚度; $\bar{A}_{197\text{Au}}$ 与 \bar{A}_c 分别为金箔和电离室外壳平均相对原子质量。

根据上述各项不确定度分析, 入射中子注

量率的总衰减修正系数 F 的标准不确定度

$$u(F) = F \left[\left(\frac{u(F_d)}{F_d} \right)^2 + \left(\frac{u(F_s)}{F_s} \right)^2 + \left(\frac{u(F_{\text{Au}})}{F_{\text{Au}}} \right)^2 + \left(\frac{u(F_c)}{F_c} \right)^2 \right] = 1.13 \times 10^{-3}$$

5) 热中子注量率不稳定修正因子引起的标准不确定度 $u(K_\varphi)$

实验中探测器采用 ^3He 正比计数管, 热中子注量率不稳定修正因子 $K_\varphi = 1$, 忽略该项不确定度。

6) 标准合成不确定度

将以上各项计算结果分别代入式(4), 以某次实验为例, 计算出热中子注量率的标准合成不确定度 $u(\bar{\varphi}_c) = 2.35 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 相对合成标准不确定度 $u(\bar{\varphi}_c)/\bar{\varphi}_c = 2.19\%$ 。

2 金箔活化法测量热中子注量率的不确定度分析

2.1 计算模型建立及不确定度分量确定

将活化的金箔冷却一段时间后, 利用 HPGe γ 谱仪进行测量, 并计算出金箔活化核数, 然后, 由下式计算平均热中子注量率:

$$\bar{\varphi} = \frac{A_{\text{金}}}{\bar{\sigma}_{197\text{Au}}} = \frac{c}{\bar{\sigma}_{197\text{Au}} \gamma_d \epsilon} \cdot \frac{\lambda e^{\lambda t_w}}{K_t (1 - e^{-\lambda t_c}) (1 - e^{-\lambda t_{\text{irr}}})} \cdot \frac{M}{\theta m N_0} \quad (13)$$

式中: $\bar{\varphi}$ 为平均中子注量率, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; $A_{\text{金}}$ 为金箔活率, Bq; c 为 γ 射线净全能峰计数; γ_d 为 γ 射线分支比; ϵ 为谱仪对源峰的探测效率; N_0 为 $6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$; t_c 为测量计数时间, s; M 为金箔的原子质量数; θ 为金箔 ^{197}Au 丰度; m 为金箔质量, g; λ 为金箔的衰变常量; t_{irr} 为辐照时间, s; t_w 为从辐照结束到开始测量时的时间间隔, s; K_t 为时间校正因子(近似取 1)。

标准不确定度计算模型为:

$$u(\bar{\varphi}) = \left[\left(\frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \lambda} \right)^2 u^2(\lambda) + \left(\frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \gamma_d} \right)^2 u^2(\gamma_d) + \left(\frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial c} \right)^2 u^2(c) + \left(\frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \epsilon} \right)^2 u^2(\epsilon) + \left(\frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial m} \right)^2 u^2(m) + \left(\frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \theta} \right)^2 u^2(\theta) + \left(\frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \bar{\sigma}_{197\text{Au}}} \right)^2 u^2(\bar{\sigma}_{197\text{Au}}) \right]^{1/2} \quad (14)$$

2.2 各不确定度分量评定

1) 金箔衰变常量引起的标准不确定度 $u(\lambda)$ $u(\lambda)$ 按 B 类评定。反应产物是 ^{198}Au , 查标

准放射性核素衰变纲图可知，¹⁹⁸Au 的半衰期引起的不确定度 $u(T) = 0.000\ 21\ \text{d}$ ； $\lambda = \ln 2/T$ ，则得衰变常量的不确定度 $u(\lambda_n) =$

$$\sqrt{\left(\frac{\partial \lambda}{\partial T}\right)^2} u^2(T) = 5.40 \times 10^{-10}\ \text{d}^{-1}.$$

2) γ 射线分支比引起的标准不确定度 $u(\gamma_d)$

$u(\gamma_d)$ 按 B 类评定。反应产物是 ¹⁹⁸Au，查标准源 γ 射线能量及绝对强度知，¹⁹⁸Au 的 (411.802 05 ± 0.000 17) keV 能峰的分支比为 (95.6 ± 0.5)%，不确定度为 0.5%。由此，得 $u(\gamma_d) = 5.0 \times 10^{-3}$ 。

3) 计数统计引起的标准不确定度 $u(c)$

根据谱仪说明书和相关测量软件给出的结果， $u(c) = 0.01$ 。

4) 谱仪对源的探测效率引起的标准不确定度 $u(\epsilon)$

实验所用谱仪的绝对效率用 ⁶⁰Co 标准源刻度，根据 Origin 软件提供的效率刻度曲线和拟合结果，得到 411.8 keV (谱仪绝对探测效率 $\epsilon = 0.004\ 896$) 能峰效率刻度时的相对偏差为 0.1%。半宽度 $a = \Delta\epsilon = 4.896 \times 10^{-6}$ ，视其为正态分布，则 $u(\epsilon) = a/1.96 = 2.50 \times 10^{-6}$ 。

5) 金箔质量引起的标准不确定度

(1) 重复测量引起的标准不确定度分量 $u(\bar{m}_i)$

该分量按 A 类评定。在同一实验条件下，用同一台分析天平测量 10 次，作不确定度分析，得到 $u(\bar{m}_i) = 0.01\ \text{mg}$ 。

(2) 测量仪器精度引起的标准不确定度分量 $u(m_1)$

该分量按 B 类评定。所用分析天平最小

刻度为 0.01 mg，区间半宽度 $a = 0.01\ \text{mg}$ ，视为均匀分布，则标准不确定度 $u(m_1) = a/\sqrt{3} = 5.77 \times 10^{-3}\ \text{mg}$ 。

这样，质量引起的不确定度 $u(m) = \sqrt{u^2(m_i) + u^2(m_1)} = 1.16 \times 10^{-2}\ \text{mg}$ 。

6) 金箔丰度引起的标准不确定度 $u(\theta)$

所用金箔为标准厂家研制，其纯度为 0.999 9，此项不确定度分量可忽略不计。

7) 金箔活化后谱平均截面引起的标准不确定度 $u(\bar{\sigma}_{197\text{Au}})$

通过相关程序对各能点的推荐值和拟合值进行比较、并群和归一化处理，得出两者的相对偏差为 2.2%，截面 $\Delta\bar{\sigma}_{197\text{Au}}$ 单次测量的标准偏差为 $2.04 \times 10^{-24}\ \text{cm}^2$ ，视其为正态分布，则不确定度 $u(\bar{\sigma}_{197\text{Au}}) = \Delta\bar{\sigma}_{197\text{Au}}/1.96 = 1.04 \times 10^{-2}\ \text{cm}^2$ 。

2.3 合成不确定度

将以上各项结果分别代入式 (14)，以某次实验为例，算出金箔法测量热中子注量率的标准合成不确定度 $u(\bar{\varphi}) = 1.47 \times 10^3\ \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，相对合成标准不确定度 $u(\bar{\varphi})/\bar{\varphi} = 1.25\%$ 。

3 结果与讨论

²³⁵U 裂变电离室法测量中子注量率的不确定度分析结果列于表 2。以某次实验为例，计算出相对标准不确定度为 2.19%。金箔活化法测量各项不确定度分析结果列于表 3，以测量位置为 0.32 cm 处为例，计算出相对标准不确定度结果为 1.25%。达到了这两种方法测量热中子注量率的相对合成标准不确定度满足 2%~5% 的要求。

表 2 ²³⁵U 裂变电离室法测量中子注量率的不确定度

Table 2 Uncertainty of neutron fluence rate measured by ²³⁵U fission ionization chamber method

不确定度项	来源	评定方法	标准不确定度
$u(F)$	总衰减修正系数	合成	1.13×10^{-3}
$u(F_d)$	电离室中从镀片到裂变电离室前窗的距离修正	B 类	1.24×10^{-4}
$u(F_s)$	不锈钢底衬对中子注量率影响的修正	A、B 类合成	8.35×10^{-4}
$u(F_{Au})$	金箔对铀样品测量结果引起的修正	B 类	2.49×10^{-4}
$u(F_c)$	电离室外壳对中子注量率影响	B 类	4.67×10^{-4}

续表 2

不确定度项	来源	评定方法	标准不确定度
$u(N_f)$	裂变计数率	合成	0.32 s^{-1}
$u(F_a)$	镀片自吸收	B类	1.15×10^{-3}
$u(N)$	计数谱进行处理后得到的裂变计数率	A类	0.19 s^{-1}
$u(N_1)$	脉冲幅度低于甄别阈未被计算在内的裂变计数率	A类	0.03 s^{-1}
$u(N_b)$	本底中子引起的裂变计数率	A类	0.26 s^{-1}
$u(\bar{\sigma})$	裂变全谱平均截面	B类	$7.64 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$
$u(N_5)$	核数目	B类	0.01
$u(K_\varphi)$	热中子注量率不稳定修正	B类	忽略
$u(\bar{\varphi}_c)$	标准不确定度		$2.35 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
$u(\bar{\varphi}_c)/\bar{\varphi}_c$	相对标准不确定度		2.19%

表 3 金箔活化法测量中子注量率的不确定度结果

Table 3 Uncertainty of neutron fluence rate by gold foil-activation method

不确定度项	来源	评定方法	标准不确定度
$u(\lambda)$	金箔衰变常量	B类	$5.40 \times 10^{-10} \text{ d}^{-1}$
$u(\gamma_d)$	γ 射线分支比	B类	5.00×10^{-3}
$u(c)$	计数统计	B类	0.01
$u(\epsilon)$	谱仪对源的探测效率	B类	2.50×10^{-6}
$u(m)$	金箔质量	A、B类合成	$1.16 \times 10^{-2} \text{ mg}$
$u(\theta)$	金箔丰度	B类	忽略
$u(\bar{\sigma})$	金箔活化后谱平均截面	B类	$1.04 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$
$u(\bar{\varphi})$	标准不确定度		$1.47 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
$u(\bar{\varphi})/\bar{\varphi}$	相对标准不确定度		1.25%

降低测量热中子注量率不确定度的方法有:1) 优化实验装置系统,提高测量裂变计数率的精度;2) 在样品的厚度、质量的测量过程中,使用精密度高的仪器,以降低不确定度;3) 定期对高纯锗 γ 谱仪进行效率刻度,以提高谱仪的探测效率,降低由探测效率引起的不确定度。

参考文献:

[1] 肖明耀. 测量不确定度的评定方法[J]. 中国计量, 1998(2):54-57.

[2] 肖懿群,王丽君. 测量不确定度的实际计算[J]. 中国计量,1999(4):41-43.

[3] 胡雪燕,冯宏时,王伟. 计量标准装置不确定度的计算[J]. 河北电力技术,1999,18(4):58-60.

[4] 孙淑洁. 计量标准装置总不确定度的考核方法[J]. 技术监督纵横,1998(4):48.

[5] 黄健. 计量标准装置不确定度的分析与评定[J]. 宇航计测技术,2002,22(3):59-62.

HUANG Jian. Analysis and assessment of uncertainty of metrological standard unit[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2002, 22(3):59-62(in Chinese).