

^{252}Cf 随机脉冲源法 测量深次临界瞬发中子衰减常数

宋凌莉, 周浩军, 金宇, 李建胜, 张翼, 李春远

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 运用 ^{252}Cf 随机脉冲源法时幅变换(TAC)方式测量系统, 实验获得高浓缩铀椭球壳核系统的瞬发中子衰减常数 α 。采用单指数和双指数最小二乘法拟合, α 值均为 $100\ \mu\text{s}^{-1}$ 。用蒙特卡罗方法模拟实验过程, α 计算值为 $110\ \mu\text{s}^{-1}$ 。结果表明, 该系统对深次临界 α 的测量是有效的。

关键词: ^{252}Cf ; 次临界; 瞬发中子衰减常数

中图分类号: TL811.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2006)06-0714-04

Measurement of Prompt Neutron Decay Constant for Deep Subcritical Assembly Using ^{252}Cf as Randomly Pulsed Neutron Source

SONG Ling-li, ZHOU Hao-jun, JIN Yu, LI Jian-sheng, ZHANG Yi, LI Chun-yuan

(China Academy of Engineering Physics, P. O. Box 919-210, Mianyang 621900, China)

Abstract: Experiments were performed for determining prompt neutron decay constant α of highly enriched uranium spherical shell by randomly pulsed neutron method with a ^{252}Cf source. α values from both least squares analysis of single exponential and two exponential fittings are in agreement and it is $100\ \mu\text{s}^{-1}$. α value calculated of $110\ \mu\text{s}^{-1}$ is also obtained by Monte-Carlo method. It is proved that the time-to-amplitude converter measuring system is effective for α determination of deep subcritical assemblies.

Key words: ^{252}Cf ; subcriticality; prompt neutron decay constant

^{252}Cf 随机脉冲源法是测量次临界核系统瞬发中子衰减常数 α 的有效方法之一, 其基本原理于上世纪60年代由美国科学家首先提出。70年代中期, J. T. Mihalczo 等^[1]成功研制出 ^{252}Cf 快电离室, 建立了 ^{252}Cf 随机脉冲源测量系统, 并用以测得圆柱形浓缩铀及带有聚乙烯反

射层核系统的 α 值。本工作采用 ^{252}Cf 随机脉冲源法时幅变换(TAC)方式测量系统测量高浓缩铀椭球壳核系统的 α 值。

1 ^{252}Cf 随机脉冲源法测量原理

利用 ^{252}Cf 自发裂变时间同时($10^{-11}\ \text{s}$ 以内)

发射 2 个裂变碎片和平均 3.76 个瞬发中子的特性, 研制 1 种纳秒级响应的快电离室^[2]。若 ²⁵²Cf 自发裂变平均时间间隔远大于核系统瞬发中子衰减时间, 则可认为 ²⁵²Cf 自发裂变中子在核系统内诱发的裂变链在时间上相互独立, 相互之间不产生影响。将电离室置于核系统旁, 1 次 ²⁵²Cf 自发裂变时, 电离室探测 1 个裂变碎片, 准确确定裂变时刻, 相应地给出 ²⁵²Cf 自发裂变中子入射核系统的时刻信号。将该信号作为起始信号触发时间分析器。用快响应中子探测器探测裂变链泄漏中子, 准确确定泄漏中子入射探测器时刻, 并用时间分析器记录泄漏中子入射时刻分布。时间分析器 1 次测量的量程 T 由裂变链衰减时间确定, 一般取 αT 值为 7。在 1 次测量时间量程范围内, 若无中子信号, 达到满量程后, 时间分析器自动停止, 恢复到初始状态, 等待下 1 次 ²⁵²Cf 自发裂变提供的起始信号; 若有中子信号, 时间分析器记录各中子脉冲信号到达的时刻分布, 达到满量程后, 时间分析器自动停止、恢复, 等待下 1 次起始信号的到来。经过上千万次重复测量, 获得核系统裂变链泄漏中子数随时间的统计分布, 即瞬发中子衰减时间分布谱。由于每次 ²⁵²Cf 裂变相当于 1 次脉冲中子注入核系统, 且 ²⁵²Cf 自发裂变时刻具有随机性, 故称这种方法为 ²⁵²Cf 随机脉冲(中子)源法。

根据点堆动力学理论, 1 次 ²⁵²Cf 自发裂变中子入射核系统后, t 时刻 dt 时间内探测到的与入射的 ²⁵²Cf 中子相关的裂变泄漏中子数 dC 为:

$$dC = \frac{\bar{\nu}_{252} I W k}{\bar{\nu} S l \bar{I}} \exp(-\alpha t) dt \quad (1)$$

式中: $\bar{\nu}_{252}$ 为 1 次 ²⁵²Cf 自发裂变产生的平均中子数; I 为 ²⁵²Cf 自发裂变中子价值; \bar{I} 为核系统平均中子价值; W 为 1 次 ²⁵²Cf 自发裂变探测器对核系统中子的总探测计数; k 为核系统瞬发中子增殖系数; $\bar{\nu}$ 为核系统每次裂变平均中子数; S 为 1 次 ²⁵²Cf 自发裂变诱发核系统裂变数; l 为瞬发中子寿命。

实际测量时, 需考虑非相关计数, 则由多道时间分析器测到的由式(1)累计的相关中子计数统计分布和非相关计数统计分布两部分用单指数形式表示为:

$$p(t)dt = \omega dt + L \exp(-\alpha t) dt \quad (2)$$

若考虑瞬发中子高次谐波的影响, 则探测到的累计中子计数统计分布用双指数形式表示为:

$$p(t)dt = \omega dt + H \exp(-\alpha_1 t) dt + L \exp(-\alpha t) dt \quad (3)$$

式中: ω 为非相关计数率; α_1 为高次谐波衰减常数; H 为瞬发中子高次谐波计数率幅度; L 为瞬发中子基波项计数率幅度。

对所测的中子时间衰减谱, 根据式(2)或(3)采用最小二乘法拟合, 即可获得核系统的 α 值。

2 测量系统

²⁵²Cf 随机脉冲源测量系统可采用一起多停的多路定标方式和一起一停的 TAC 方式。

采用 TAC 方式时, 测量系统框图示于图 1。该系统由 4 部分组成: 第 1 部分主要由自发裂变率为 1700 s^{-1} 的 ²⁵²Cf 快电离室、前置放大

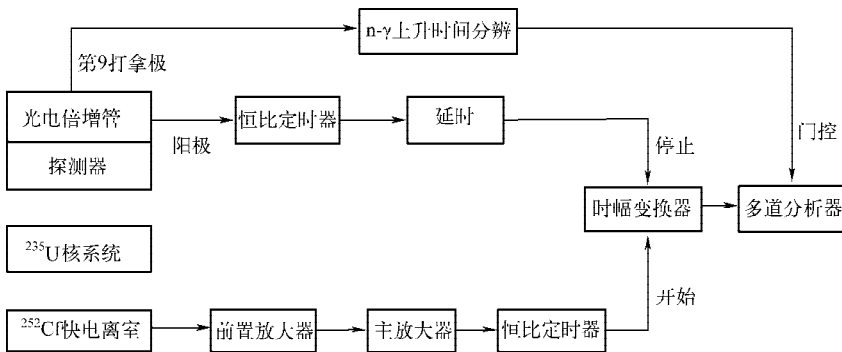


图 1 ²⁵²Cf 随机脉冲中子源法时幅变换(TAC)方式测量系统框图

Fig. 1 Schematic diagram of time-to-amplitude converter(TAC) measuring system in randomly pulsed neutron method with ²⁵²Cf as neutron source

器、主放大器和恒比定时器构成,通过探测 ^{252}Cf 自发裂变碎片,为时幅变换器提供开始信号;第2部分主要由快中子探测器和恒比定时器构成,探测器探测核系统泄漏中子或 γ 射线,为时幅变换器提供停止信号;第3部分采用脉冲上升时间法实现 n - γ 分辨功能,向多道分析器提供符合门控信号,用于甄别 γ 射线^[3];第4部分为记录系统,由时幅变换器和多道分析器组成,记录裂变链泄漏中子随时间的统计分布。

测量时,探测中子能量下阈为0.5 MeV,时幅变换器量程为200 ns。

3 深次临界核系统

被测量核系统由高浓缩铀上、下球冠壳组成。上半球冠壳内径107 mm,外径148 mm;下半球冠壳内径107 mm,外径148 mm。测量时,电离室、探测器布局示于图2。核系统放置于不锈钢支架上,中心距地面1 m。

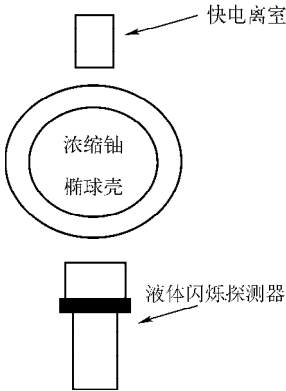


图2 探测器布局示意图

Fig. 2 Sketch for configuration of detector and ionization chamber

采用蒙特卡罗方法对所建核系统由球心抽样注入中子,模拟 ^{252}Cf 随机脉冲源法探测核系统裂变链泄漏中子统计分布,获得核系统瞬发中子衰减曲线。根据式(2)和(3),用最小二乘法拟合抽样结果,获得该深次临界核系统瞬发中子衰减常数 α 为 $110 \mu\text{s}^{-1}$ 。

4 测量结果和讨论

实验重复11次测量深次临界核系统的瞬发中子衰减曲线,每谱总计数大于30 000,测量

时间大于2 h。对于测得的谱,根据谱形特点及起始道选取的不同,采用双指数拟合或单指数最小二乘法拟合。若从谱峰后较前面时间道开始拟合,则采用双指数拟合;若避开高次谐波衰减而从较靠后的时间道开始拟合,则采用单指数拟合。

表1所列各谱单指数拟合结果及对应的最小二乘标准偏差 σ_1 , α 平均值为 $100 \mu\text{s}^{-1}$,对应贝塞尔标准偏差 σ 为 $4 \mu\text{s}^{-1}$ 。

表1 深次临界核系统TAC方式 α 测量结果

Table 1 Experimental results of α for deep subcritical uranium assembly from TAC measuring system

测量次序	$\alpha/\mu\text{s}^{-1}$	$\sigma_1/\mu\text{s}^{-1}$
1	101	4
2	104	4
3	97	3
4	103	3
5	101	2
6	98	4
7	99	2
8	97	4
9	101	2
10	98	3
11	97	2

测量得到的1个瞬发中子衰减谱示于图3。对该谱10 ns道以后数据采用双指数最小二乘法拟合,高次谐波项和基波项衰减常数分别为 $(317 \pm 9) \mu\text{s}^{-1}$ 和 $(101 \pm 2) \mu\text{s}^{-1}$,基波项衰减常数与单指数拟合结果一致,为所要测量的 α 值。

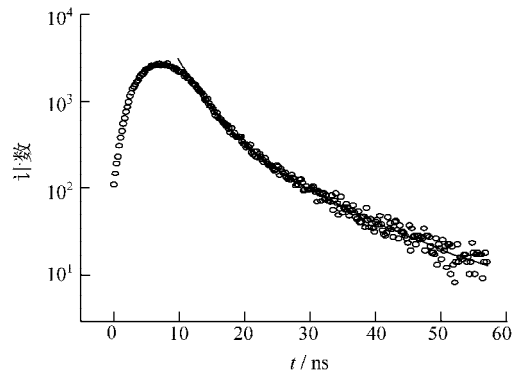


图3 核系统瞬发中子衰减曲线和双指数拟合结果

Fig. 3 Prompt neutron decay in randomly pulsed neutron measurements
○——瞬发中子衰减曲线;实线——双指数拟合曲线
 $\alpha_1 = (317 \pm 9) \mu\text{s}^{-1}$; $\alpha = (101 \pm 2) \mu\text{s}^{-1}$

TAC 方式测量系统定时精度为 1.2 ns, 定时准确。测量中,²⁵²Cf 源自发裂变率为 1700 s^{-1} , 两次裂变之间的平均时间间隔为 $588\text{ }\mu\text{s}$; 核系统 α 为 $100\text{ }\mu\text{s}^{-1}$, 瞬发中子数衰减到 0.1% 所用时间为 70 ns, 远小于两次裂变之间的平均时间间隔。因此, 不同裂变链之间相互影响很小。深次临界核系统中子增殖小, 平均每次²⁵²Cf 源自发裂变瞬发中子探测计数 W 为 2.45×10^{-3} , 1 个 TAC 量程范围内出现两个以上停止信号的几率很小。因此, 采用一起一停的 TAC 方式测量深次临界核系统 α 与严格的一起多停的测量效果几乎相同, 能够准确测量核系统瞬发中子衰减过程。

综上所述, 采用 TAC 方式的²⁵²Cf 随机脉冲源系统能够有效测量深次临界 α , 测量下限可达到 $100\text{ }\mu\text{s}^{-1}$ 。

²⁵²Cf 随机脉冲源系统建立初期, 中国原子能科学研究院张焕乔院士给予自行研制的建议, 在此特别表示感谢。感谢与中国工程物理研究院核物理与化学研究所贺仁辅老师有价值

的讨论。

参考文献:

- [1] MIHALCZO J T. The use of californium-252 as a randomly pulsed neutron source for prompt-neutron decay measurements[J]. Nucl Sci Eng, 1974, (53): 393-414.
- [2] 李建胜, 张翼, 金宇, 等. ²⁵²Cf 快裂变室研制[J]. 核电子学与探测技术, 2001, 21(4): 264-267.
LI Jiansheng, ZHANG Yi, JIN Yu, et al. Development of ²⁵²Cf fast fission chamber[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2001, 21(4): 264-267 (in Chinese).
- [3] 周浩军, 张翼, 李建胜, 等. n- γ 分辨应用于²⁵²Cf 自发裂变中子飞行时间谱测量[J]. 核电子学与探测技术(待发表).
ZHOU Haojun, ZHANG Yi, LI Jiansheng, et al. The application of n- γ discrimination in ²⁵²Cf spontaneous neutron TOF spectra measurement [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology (in press, in Chinese).