

时间关联符合法铀部件质量测量中的几何影响

黄坡, 李建胜, 叶岑明, 谢奇林

(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:外中子源注入铀部件后,根据两路探测器间的中子和 γ 粒子时间关联符合计数分布可获得铀部件的质量等特性。本文利用粒子蒙特卡罗输运程序,对富集度相同、几何尺寸各异的4块半球壳形状的金属铀部件质量测量实验进行模拟,获得对应粒子的时间关联符合计数分布。然后,根据模拟计算结果,评估几何形状对质量分辨的影响。研究表明,4块半球壳金属铀部件的形状对其质量测量的影响不大。

关键词:时间关联符合法;铀部件质量测量;铀部件几何

中图分类号:O571.56

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2012)S0-0053-04

Influence of Uranium Components Geometry on Time Correlation Coincidence Mass Measurement

HUANG Po, LI Jian-sheng, YE Cen-ming, XIE Qi-lin

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Source-driven time correlation coincidence measurements can provide time-dependent coincidence distribution between two detectors that can be related to the mass of uranium components. The measurement process on four half shell uranium components with different masses but the same enrichment were simulated by Monte Carlo code. And the corresponding time dependent coincidence distribution of particles was obtained. The research shows that the influence of geometry from four uranium components is so small that it hardly affects the results of uranium components mass identification.

Key words: time correlation coincidence measurement; mass measurement about uranium components; uranium components geometry

铀部件认证技术是核裁军核查认证中一项重要内容。原则上讲,中子和 γ 粒子的被动探测可探明铀部件属性,但铀材料本身的自发裂变中子和 γ 粒子的发射强度较弱, γ 粒子的能

量较低,且对 γ 粒子具有较强的自屏蔽效应,因而很难通过被动探测的方法探明铀部件的属性。对于铀部件认证,国际上普遍采用主动法。目前,铀部件认证技术是国外军控研究的热点。

收稿日期:2012-05-30;修回日期:2012-07-30

基金项目:中国工程物理研究院科学技术发展基金资助项目(2011B0103018,2011B0103015)

作者简介:黄坡(1981—),男,江苏靖江人,助理研究员,硕士,粒子物理与原子核物理专业

铀部件质量属性测量研究主要包括实验测量研究以及计算机蒙特卡罗模拟研究两个方面。实验研究方面,美国开发了核武器识别测量系统(NWIS)^[1-2]、核材料识别测量系统(NMIS)^[3];计算机蒙特卡罗模拟研究方面,美国和意大利基于 MCNP 程序平台分别开发了 MCNP-DSP^[4]及 MCNP-POLIMI^[5]程序。铀部件质量属性的测量通常采用源驱动时间关联符合测量法,获得外源与探测器间时间关联符合计数分布 $C_{12}(\tau)$ 或多路探测器条件下两路探测器间的时间关联符合计数分布 $C_{23}(\tau)$, 作为被测铀部件的标签参数,用于识别几何形状相似、富集度相同、质量不同的铀部件。驱动外源需选择定时中子源,如 ^{252}Cf 电离室^[6]或定时 D-T 中子源。

虽然国外对铀部件属性测量做了较多研究,但至今没有令人满意的结果。近来,铀部件核查研究也逐渐成为国内军控研究的热点。外源驱动时间关联符合法是测量铀部件属性的一种方法,用理论模拟实验测量过程可以优化实验前端布局、探测器设置,并深化对测量结果的分析,基于此,本文拟对定时 D-T 中子源驱动时间关联符合法测量铀部件属性实验进行数值模拟。主要模拟定时 D-T 中子源注入被测铀部件后测量系统内的中子和 γ 粒子输运过程,探测器对粒子的响应过程以及两路探测器间中子和 γ 粒子时间关联符合响应计数分布。最后根据这些模拟数据,结合相应的实验测量结果,评价铀部件的几何形状对质量分辨的影响。

1 实验原理及布局

采用 3 路定时 D-T 中子源驱动噪声分析法来测量铀部件的标签参数,用于几何形状相近、富集度相同、不同质量铀部件之间的识别。

定时 D-T 中子源驱动时间关联符合法测量布局如图 1 所示。系统分 3 路,第 1 路是定时 D-T 中子管,为测量系统输入驱动中子噪声源,并作为 1 个探测器,提供与输入驱动中子时间相关的脉冲时间序列信号。第 2 路探测次临界系统的泄漏中子或 γ 射线,作为测量系统的第 2 路输出信号。第 3 路也是探测次临界系统的泄漏中子或 γ 射线,作为测量系统的第 3 路输出信号。此外,该测量系统可扩展为单路输入 3 路或更多路输出随机信号的结构,可实现

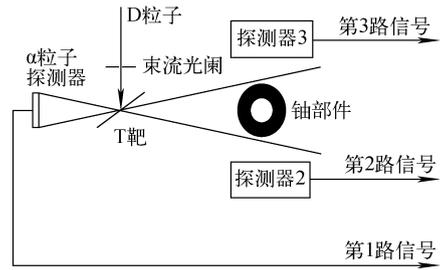


图 1 定时 D-T 中子源驱动时间关联符合法测量布局
Fig. 1 Layout of timing D-T neutron source-driven time correlation coincidence method

多路信号的同步采集。第 2、3 路探测器信号的采集由第 2 路定时 D-T 中子源信号触发,或由记录系统内部控制,统计结果与触发方式无关。源信号与探测器信号相互关联,最后根据采集到的数据分析获得两路探测器间的中子和 γ 粒子的时间关联符合计数分布 $C_{23}(\tau)$ 。

两路探测器间的中子和 γ 粒子的时间关联符合计数分布 $C_{23}(\tau)$ 反映了一路探测信号 $X(t)$ 与另一路探测信号 $Y(t)$ 之间的时间关联符合特性,其定义为:

$$C_{23}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X(t)Y(t+\tau)dt \quad (1)$$

其中: T 为观测时间; τ 为延迟时间。

为定量研究铀部件的质量属性,定义时间关联符合积分计数 $R_{23}(\tau_1, \tau_2)$:

$$R_{23}(\tau_1, \tau_2) = \int_{\tau_1}^{\tau_2} C_{23}(\tau)d\tau \quad (2)$$

其中: τ_1 为积分时间起点; τ_2 为积分时间终点。

选择合适的积分时间区间, $R_{23}(\tau_1, \tau_2)$ 能灵敏地反映出几何形状相似、富集度相同、不同质量金属铀部件的质量属性。

2 实验模拟计算

基于 MCNP4C 程序进行二次开发,二次开发主要集中在粒子输运子程序的修改及数据处理程序的添加方面。对定时 D-T 中子源驱动时间关联符合法测量金属铀部件质量实验进行模拟,统计两路探测器间的中子和 γ 粒子的时间关联符合计数分布 $C_{23}(\tau)$ 。

模拟实验采用的驱动中子源为定时 D-T 中子管。模拟实验测量几何形状相似、富集度相同、质量不同的 4 块半球壳形状的金属铀部件。4 块半球壳铀部件参数分别为: 部件 1, 内半径

6.5 cm、外半径 7.3 cm、质量 4.49 kg; 部件 2, 内半径 4.0 cm、外半径 6.5 cm、质量 8.27 kg; 部件 3, 内半径 1.2 cm、外半径 6.5 cm、质量 10.72 kg; 部件 4, 内半径 1.2 cm、外半径 7.3 cm、质量 15.21 kg。实验采用的探测器阈值可调, 前端面分别为 $\phi = 4.80$ cm、 $\phi = 12.60$ cm 的闪烁体探测器。

按照图 1 的布局, 分别针对上述 4 块铀部件的测量实验进行蒙特卡罗数值模拟, 模拟计算结果如图 2、3 所示。图 2 是探测器 2 和探测器 3 之间的中子时间关联符合计数分布图。图 3 是这两路探测器间中子和 γ 粒子的时间关联符合计数分布图。图 2、3 的纵坐标对应的是平均 1 个源中子引发的两路探测器探测事件关联计数对的个数, 横坐标对应的是两路探测器探测事件的时间差, 即延迟时间。其中, 图 2 反映的是探测器 2 和探测器 3 之间探测中子关联计数对随延迟时间 τ 的变化分布, 图 3 反映的是这两路探测器之间中子和 γ 粒子混合关联计数对随延迟时间 τ 的变化分布。

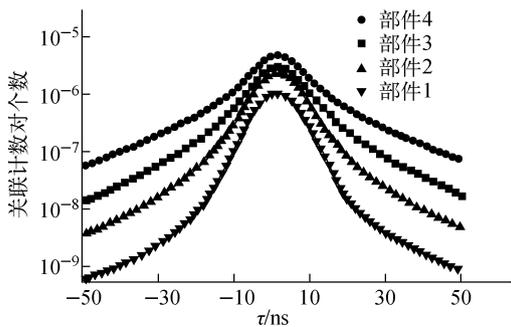


图 2 两路探测器间的中子时间关联符合计数模拟计算结果

Fig. 2 Simulation results of neutron time correlated pairs between two detectors

根据时间关联符合积分计数 $R_{23}(\tau_1, \tau_2)$ 的定义, 积分时间起点 τ_1 取为 -50 ns, 积分时间终点 τ_2 取为 50 ns, 可得到 $R_{23}(-50, 50)$ 的模拟统计结果, 如图 4 所示。设质量最小的半球壳铀部件对应的积分计数 $R_{23}(-50, 50)$ 为 1, 可定义不同质量铀部件的相对积分计数, 即:

$$\text{铀部件的相对积分计数} = \text{铀部件对应的 } R_{23}(50, 50) / \text{铀部件 1 对应的 } R_{23}(50, 50) \quad (3)$$

模拟计算结果如图 5 所示。

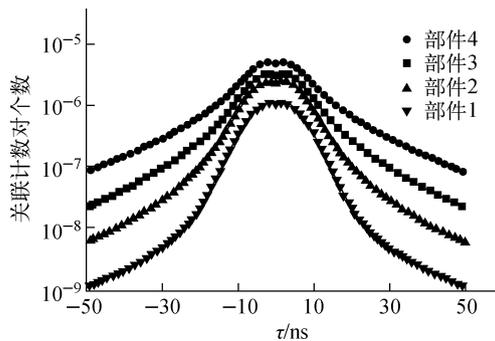


图 3 两路探测器间的中子和 γ 粒子的时间关联符合计数模拟计算结果

Fig. 3 Simulation results of neutron and gamma time correlated pairs between two detectors

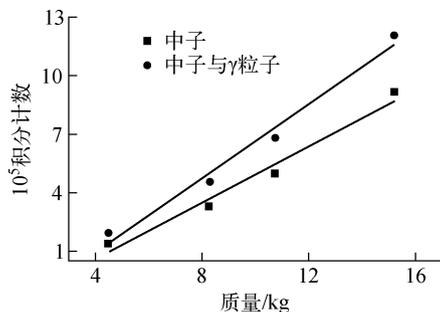


图 4 积分计数质量图

Fig. 4 Area under signal vs mass

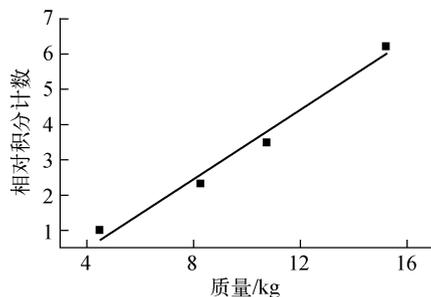


图 5 模拟相对积分计数质量图

Fig. 5 Simulation relative area under signal vs mass

3 讨论

利用 MCNP4C 程序, 还可得到 4 块金属铀部件的净增殖^[7]。图 6 示出了 4 块铀部件的净增殖随其质量的变化关系。从图 6 可看出, 这 4 块铀部件对应的净增殖几乎落在同一条直线上, 即 4 块铀部件形状上的差异对铀部件对应净增殖的影响很小, 可忽略。此外, 根据图 4、5

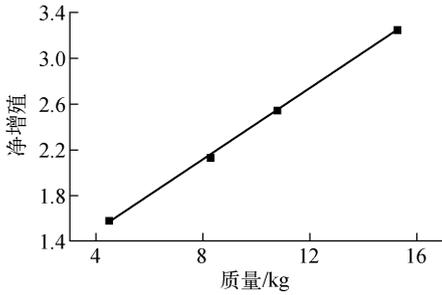


图6 净增殖质量图

Fig. 6 Net multiplication vs mass

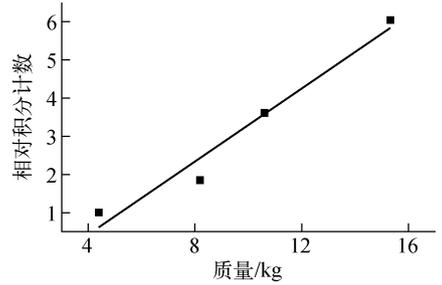


图8 实验所得相对积分计数质量图

Fig. 8 Experimental relative area under signal vs mass

易得到,形状对铀部件质量的影响很小。

按图1进行实验布局,实验测量的结果如图7所示。其中,实验中被测铀部件的尺寸与计算模拟中的尺寸一致。

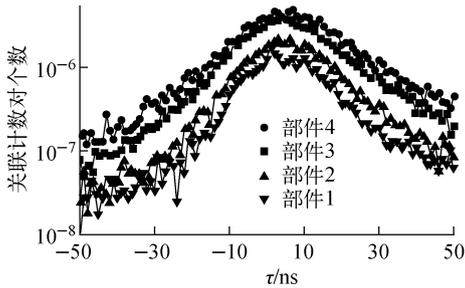
图7 两路探测器间的中子和
 γ 粒子的时间关联符合计数实验结果

Fig. 7 Experimental results of neutron and gamma time correlated pairs between two detectors

根据相对积分计数的定义,可得到实验条件下的相对积分计数随质量变化分布(图8)。从图8可知,4个半球壳形状的铀部件的几何形状对其质量测量的影响是存在的,但不大。

4 结论

通过对源驱动时间关联符合法测量铀部件质量属性实验的模拟,获得两路探测器间的时间关联符合计数。数值模拟和实验结果均表明,半球壳形状的铀部件的几何形状对其质量测量的影响是存在的,但不大。

参考文献:

- [1] MIHALCZO J T, PARÉV K. Nuclear weapons identification system[J]. Nuclear Science Symposium, 1996(1): 44-45.
- [2] MIHALCZO J T, MULLENS J A, MATTINGLY J K, et al. Physical description of nuclear materials identification system (NWIS) signatures[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2000, 450: 531-555.
- [3] MIHALCZO J T, MATTINGLY J K, NEAL J S, et al. NMIS plus gamma spectrometry for attributes of HWU, Pu and He detection[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2004, 213: 378-384.
- [4] VALENTINE T E, MIHALCZO J T. MCNP-DSP: A neutron and gamma ray Monte Carlo calculation of source-driven noise-measured parameters[J]. Annals of Nuclear Energy, 1996, 23: 1 271-1 287.
- [5] MARSEGUERRA M, PADOVANI E, POZZI S A. Use of the MCNP-POLIMI code for time-correlation safeguards measurements[J]. Process in Nuclear Energy, 2003, 43: 305-311.
- [6] 李建胜,张翼,金宇,等. ^{252}Cf 快裂变室研制[J].核电子学与探测技术,2001,21(4):264-267. LI Jiangsheng, ZHANG Yi, JIN Yu, et al. Development of ^{252}Cf fast fission chamber[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2001, 21(4): 264-267(in Chinese).
- [7] JUDITH F B. MCNP—A general Monte Carlo N-particle transport code, LA-13709-M [R]. US: Los Alamos National Laboratory, 2000.