

文章编号: 1007-4627(2019)02-0266-06

## 主动中子多重性铀质量测量模拟研究

孙诗奇, 胡力元, 侯英伟, 刘辉兰, 宋玉收<sup>†</sup>

(哈尔滨工程大学核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 中子多重性技术常用于测量和核查核材料, 尤其针对具有较厚屏蔽的对象具有不可替代的优势。钚的自发裂变率较高, 可以采用被动测量方法, 目前已有多款不同的测量装置。然而铀材料的自发裂变率较低只能采用主动测量方法。现有的主动井型符合计数器 (AWCC) 能够进行主动中子多重性测量铀材料质量, 但依然存在探测效率较低, Am-Li 中子源产生偶然符合大等缺点。为提高铀材料测量的效率和精度, 对主动中子多重性测量方法开展深入研究非常必要。本文参考 AWCC 模型, 利用 Geant4 软件对探测器和粒子的运输过程进行建模。研究了多重性移位寄存器的不同符合门宽、不同延迟时间对铀测量结果相对偏差的影响规律。计数器的最佳门宽为 44  $\mu\text{s}$ , 门宽取值范围在计数器衰减时间的 1.5 倍左右合适; 延迟时间大于 3 倍计数器衰减时间后, 相对偏差显著减少。最后讨论了  $^{235}\text{U}$  富集度变化对主动中子多重性测量结果的影响。为后续主动中子多重性铀质量测量仪器的设计提供了参考。

**关键词:** 主动中子多重性; 铀质量测量; 模拟

**中图分类号:** TL816<sup>+</sup>.3

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.02.266

### 1 引言

核保障监督是防止核扩散的有效措施。铀材料测量是核保障监督的一项重要技术手段<sup>[1]</sup>。铀材料测量有破坏性分析 (DA) 和非破坏性分析 (NDA) 两种方式。DA 能够准确测量铀材料中铀的含量与同位素组成。对于铀材料分布不均匀的情形, 取样不具有代表性, DA 无法完成铀材料测量<sup>[2]</sup>。NDA 测量核材料自发或诱发辐射来获得核材料质量、同位素组成等属性。NDA 不用破坏容器和铀材料的物理、化学形态就能够获得铀材料质量<sup>[1]</sup>。

铀同位素衰变和自发裂变发射特征  $\gamma$  射线和中子, 通过测量  $\gamma$  射线和中子可以获得铀材料同位素组成和质量。在无屏蔽或轻屏蔽情况下, 测量  $\gamma$  射线能够很好地测量铀材料, 并且能够给出铀材料同位素组成。然而由于  $^{235}\text{U}$  发射的主要特征  $\gamma$  射线能量仅为 186 keV, 一旦铀材料装在重金属等高密度容器中,  $\gamma$  射线迅速衰减而无法从容器中逸出, 导致无法进行  $\gamma$  测量<sup>[3]</sup>。中子具有很强的穿透性能够从较厚的容器中逸出, 因此可以通过中子测量确定铀材料属性。较早的中子测量是利用  $^3\text{He}$  管进行总中子计数测定样品质量, 但是由于本底干扰和样品增殖效应导致测量精度不高<sup>[4]</sup>; 为了解决大量的本

底计数干扰问题人们发展了中子符合计数测量, 通过符合计数抑制本底干扰提高了测量精度<sup>[5]</sup>; 由于符合测量依然存在样品增殖问题且对于大质量样品非常敏感, 美国洛斯阿拉莫斯实验室开发了中子多重性计数方法, 通过建立点模型方程与中子多重性分布实现了样品增殖问题的数学描述<sup>[6]</sup>。

目前基于  $^3\text{He}$  管热中子测量的中子多重性计数发展已比较成熟, 多重性测量系统已经能够用于铀钚材料表征测量, 近年来主要在进行测量系统的优化工作。2008 年意大利研究人员进行了中子多重性计数的不确定度评估<sup>[7]</sup>; 2015 年德国研究人员改善了中子多重性增殖系数的空间依赖性<sup>[8]</sup>。2016 年美国 Oak Ridge 实验室研究人员完成了 Am-Li 中子能谱对主动中子多重性测量影响的评估, 研究了十四个不同能谱 Am-Li 中子源对中子多重性模拟结果的影响<sup>[9]</sup>。

针对铀材料质量测量, 国内引进主动中子多重性计数方法, 并于 2014 年完成了中子多重性测量系统的搭建<sup>[10]</sup>。火箭军工程大学的黎素芬等<sup>[11]</sup>开展了大量的计算机模拟研究, 实现了铀材料中子多重性测量过程全模拟。为了优化铀材料主动中子多重性测量, 中国工程物理研究院研究了不同参数对中子多重性测量的影响<sup>[12]</sup>。铀材料富集度、符合门宽、Am-Li 中子源强度等均对中

收稿日期: 2018-09-12; 修改日期: 2019-03-06

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (HEUCFP201851)

作者简介: 孙诗奇 (1994-), 男, 四川三台人, 硕士研究生, 从事核辐射探测技术相关研究; E-mail: sunshiqi127@163.com

<sup>†</sup> 通信作者: 宋玉收, E-mail: songyushou80@163.com。

子多重性测量造成影响。因此研究主动中子多重性计数中各项参数变化对铀材料质量测定的影响, 对提高主动中子多重性计数的测量精度具有重要意义。

本文使用主动中子多重性方法模拟铀材料的质量测量。首先设置基准问题检验 Geant4 处理中子输运和测量过程的正确性, 保证中子多重性模拟的有效性。然后利用 Geant4 软件包构建计数器模型, 编写多重性方程计算代码, 实现主动中子多重性测量铀质量的全模拟。改变模拟移位寄存器的门宽和延迟时间, 研究多重性测量参数变化对铀质量测量结果的影响规律。最后讨论  $^{235}\text{U}$  富集度变化对中子多重性测量影响的因素。

## 2 主动中子多重性原理及建模

### 2.1 中子多重性测量原理

中子多重性测量最终要得到被测核材料的质量信息。被动中子多重性测量得到被测核材料自发裂变率就能够求解出质量<sup>[6]</sup>。由于主动中子多重性测量是利用外部中子源诱发铀材料裂变, 所以测量得到的诱发裂变率与铀材料质量、外部中子源强度以及核材料与外部中子源之间的耦合系数有关, 不能单独通过诱发裂变率求得铀材料质量<sup>[13]</sup>。其质量求解公式如下:

$$m = \frac{F}{CY}, \quad (1)$$

其中:  $m$  是  $^{235}\text{U}$  质量;  $Y$  是外加中子源强度;  $F$  是诱发裂变率;  $C$  是耦合系数。

诱发裂变率  $F$  和耦合系数  $C$  均为未知量, 外加中子源强度是已知量。所以要求解质量首先需要求解出诱发裂变率和耦合系数。

耦合系数与样品的几何结构、密度、材料组成、化学成分, 以及样品在样品室中的位置等众多因素有关, 其难以通过理论方法求出。Krick 等<sup>[14]</sup> 研究揭示了耦合系数和增殖系数之间的经验关系式, 其中增殖系数  $M$  与质量和耦合系数都无关, 通过主动中子多重性方程可以独立求解出增殖系数。求解出增殖系数  $M$  后, 通过  $C-M$  的经验关系式便可求解出耦合系数。如公式 2 所示:

$$C = a - \frac{b(M-1)}{1+c(M-1)}, \quad (2)$$

其中:  $a, b, c$  是刻度系数, 通过一系列模拟或者刻度实验就能够得到  $C-M$  刻度曲线。

中子多重性方程组是基于“点模型”等假设<sup>[15]</sup> 建立起来的。方程建立了多重性计数率与样品裂变率和增殖

系数的关系。主动中子多重性方程组参考文献<sup>[16]</sup>, 通过该方程组即可求解出诱发裂变率和增殖系数。

方程组中未知参数只有诱发裂变率  $F$  和增殖系数  $M$ ; 其中  $S, D, T$  等其他参数均为可测量已知值; 利用测量值  $D$  和  $T$ , 可以在未知诱发裂变率  $F$  的情况下算出样品的增殖系数  $M$ , 由  $T/D$  过程消除得到关于增殖系数  $M$  的方程:

$$\alpha + \beta M + \delta M^2 + M^3 = 0, \quad (3)$$

式中,  $\alpha, \beta, \delta$  均为方程已知系数<sup>[16]</sup>, 求解方程得到增殖系数  $M$  值后, 代入多重性方程组求解出诱发裂变率  $F$ 。

求解出增殖系数  $M$  和诱发裂变率  $F$  后, 代入方程 (1)、(2) 求解出裂变  $^{235}\text{U}$  质量, 最后根据  $^{235}\text{U}$  富集度计算出样品总质量。

### 2.2 模拟测量

#### 2.2.1 基准问题检验

Geant4 是一个应用广泛的综合性粒子输运模拟软件包, 不但涉及到复杂的物理过程, 还包括了几何模型、材料、中子输运等部分。为保证中子多重性测量仪进行铀质量测量模拟的有效性, 在进行模拟之前, 通过设置基准问题对 Geant4 处理中子输运和测量过程进行了检验。

该模拟涉及铀同位素裂变、中子慢化、 $^3\text{He}$ 、中子探测等过程。基准问题选择模拟涉及到的  $^{235}\text{U}$  诱发裂变和  $^3\text{He}(n, p)$  两个重要核反应进行检验。设置 1 mm 厚度的  $^{235}\text{U}$  及  $^3\text{He}$  薄靶, 使不同能量的中子垂直入射靶材料, 靶周围设置虚拟探测器分别记录中子与  $^3\text{He}$  薄靶发生的  $(n, p)$  反应以及与  $^{235}\text{U}$  薄靶发生的裂变反应的产物。根据测量到的反应产物重构出反应截面, 并与 Geant4 截面库和标准截面库对比, 结果如表 1、表 2 所列。

在模拟的能量范围内,  $^3\text{He}(n, p)$  反应截面模拟值和标准截面的相对偏差在 1% 左右, 与标准库截面数据基本吻合, 保证了中子探测的正确性。 $^{235}\text{U}$  裂变截面验证时, 对于大部分能量点模拟重构的截面值与 Geant4 截面库和标准截面库 (ENDF/B-VII) 的数据基本吻合。在共振区 (如: 100 eV 和 1 keV 处) Geant4 的截面库与 ENDF/B-VII 标准截面库存在一定差异。但模拟表明, 通过标准问题模拟重构的截面与 Geant4 截面库符合较好, 说明了模拟和数据处理过程的有效性。主动中子多重性测量过程中使用的 Am-Li 中子源诱发铀材料 (主要是其中的  $^{235}\text{U}$ ) 发生裂变。 $^{235}\text{U}$  的诱发裂变主

要由热中子能区的中子引发，此区域的  $^{235}\text{U}$  裂变截面相对偏差在 1% 附近，能够满足模拟的需求。

表 1  $^3\text{He}(n,p)$  反应截面

$E/\text{eV}$	$\sigma_{\text{模拟}}/\text{b}$	$\sigma_{\text{ENDF}}/\text{b}$	相对偏差
$1.00 \times 10^{-4}$	$8.55 \times 10^4$	$8.46 \times 10^4$	$1.06 \times 10^{-2}$
$1.00 \times 10^{-3}$	$2.71 \times 10^{+04}$	$2.68 \times 10^4$	$1.12 \times 10^{-2}$
$1.00 \times 10^{-2}$	$8.58 \times 10^3$	$8.46 \times 10^3$	$1.42 \times 10^{-2}$
$1.00 \times 10^{-1}$	$2.70 \times 10^3$	$2.67 \times 10^3$	$1.12 \times 10^{-2}$
1	$8.54 \times 10^2$	$8.46 \times 10^2$	$9.46 \times 10^{-3}$
10	$2.68 \times 10^2$	$2.67 \times 10^2$	$3.75 \times 10^{-3}$
100	$8.48 \times 10^1$	$8.34 \times 10^1$	$1.68 \times 10^{-2}$
$1.00 \times 10^3$	$2.57 \times 10^1$	$2.56 \times 10^1$	$3.91 \times 10^{-3}$
$1.00 \times 10^4$	$7.43 \times 10^0$	$7.34 \times 10^0$	$1.23 \times 10^{-2}$
$1.00 \times 10^5$	$1.82 \times 10^0$	$1.82 \times 10^0$	0
$1.00 \times 10^6$	$8.77 \times 10^{-1}$	$8.38 \times 10^{-1}$	$4.65 \times 10^{-2}$

表 2  $^{235}\text{U}$  裂变反应截面

$E/\text{eV}$	$\sigma_{\text{模拟}}/\text{b}$	$\sigma_{\text{Geant4库}}/\text{b}$	$\sigma_{\text{ENDF}}/\text{b}$	相对偏差
$1.00 \times 10^{-4}$	$9.97 \times 10^3$	$9.93 \times 10^3$	$9.93 \times 10^3$	$4.00 \times 10^{-3}$
$1.00 \times 10^{-3}$	$3.15 \times 10^3$	$3.13 \times 10^3$	$3.13 \times 10^3$	$6.40 \times 10^{-3}$
$1.00 \times 10^{-2}$	$9.76 \times 10^2$	$9.60 \times 10^2$	$9.60 \times 10^2$	$1.67 \times 10^{-2}$
$1.00 \times 10^{-1}$	$2.55 \times 10^2$	$2.51 \times 10^2$	$2.52 \times 10^2$	$1.19 \times 10^{-2}$
1	$6.85 \times 10^1$	$6.74 \times 10^1$	$6.78 \times 10^1$	$1.03 \times 10^{-2}$
10	$1.50 \times 10^1$	$1.47 \times 10^1$	$1.55 \times 10^1$	$3.23 \times 10^{-2}$
100	$5.27 \times 10^0$	$5.17 \times 10^0$	$6.97 \times 10^0$	$2.44 \times 10^{-1}$
$1.00 \times 10^3$	$3.32 \times 10^0$	$3.25 \times 10^0$	$6.89 \times 10^0$	$5.187 \times 10^{-1}$
$1.00 \times 10^4$	$2.79 \times 10^0$	$2.78 \times 10^0$	$2.78 \times 10^0$	$3.60 \times 10^{-3}$
$1.00 \times 10^5$	$1.56 \times 10^0$	$1.58 \times 10^0$	$1.58 \times 10^0$	$1.27 \times 10^{-2}$
$1.00 \times 10^6$	$1.20 \times 10^0$	$1.20 \times 10^0$	$1.20 \times 10^0$	0
$1.00 \times 10^7$	$1.76 \times 10^0$	$1.76 \times 10^0$	$7.48 \times 10^{-1}$	$1.3505 \times 10^{+0}$

### 2.2.2 模拟流程

根据中子多重性测量工作原理<sup>[6]</sup>，将模拟过程分解为 Geant4 模拟、多重性模拟、结果处理三部分。首先利用 Geant4 软件构建了计数器模型和诱发中子源以及铀材料，模拟中子在计数器中的一系列物理过程，得到中子模拟探测数据。模拟中子探测数据具有中子多重性测量所需的全部信息。利用程序将中子探测数据的时间信息提取出来，根据中子被探测到的时间先后顺序进行排序得到中子脉冲时间序列，然后利用程序模拟多重性移位寄存器功能得到中子多重性分布，最后通过数据处理程序计算多重性分布和求解中子多重性方程。整个模拟流程如图 1 所示。

### 2.2.3 探测器模型构建

参考主动井型符合计数器 (AWCC) 结构模型建立模拟实验装置<sup>[17]</sup>。模拟计数器整体为圆柱型；外部是

高密度聚乙烯，一方面将腔室扩散出的裂变中子慢化为热中子以便被  $^3\text{He}$  管探测；另一方面阻止环境中子进入计数器以降低本底中子； $^3\text{He}$  管探测器均匀分布在聚乙烯中，裂变中子在聚乙烯中慢化为热中子后即被  $^3\text{He}$  管探测到；最内部是用于放置核材料的样品腔室；腔室正上方和正下方是外部中子源；在聚乙烯和腔室之间有一圈镉衬片 (厚度 0.5 mm) 用于吸收慢化后返回腔室的热中子，以减小测量误差<sup>[18]</sup>。模拟计数器示意图如图 2 所示。中子多重性模拟需要较高的中子探测效率，然而标准的 AWCC 模型探测效率较低；因此，本次模拟增加了  $^3\text{He}$  管探测器数量。 $^3\text{He}$  管探测器围绕样品腔室环形布置，共布置五环  $^3\text{He}$  管探测器；最内环  $^3\text{He}$  管距离样品腔室轴心 140.5 mm，每环  $^3\text{He}$  管探测器相距 4 cm； $^3\text{He}$  管内气压为  $4.04 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，温度设定为 293 K。具体建模参数依据表 3 数据。

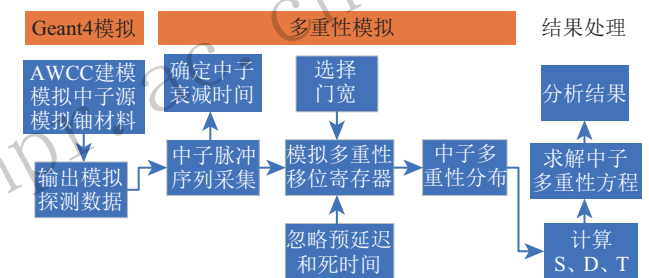


图 1 (在线彩图) 主动中子多重性模拟测量流程图

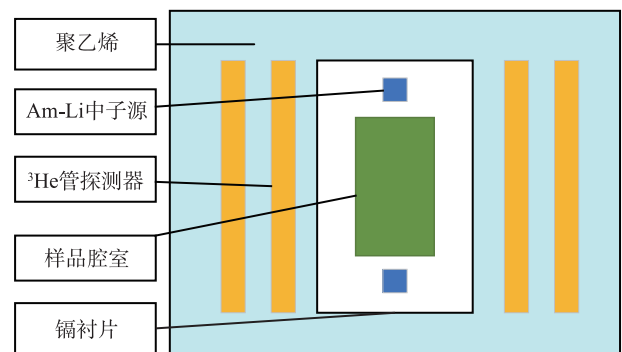


图 2 (在线彩图) 模拟计数器结构示意图

表 3 模拟计数器参数

计数器结构	参数/mm
计数器整体高度	508
计数器半径	410.5
样品腔室高度	200
样品腔室半径	80
镉片厚度	0.5
$^3\text{He}$ 管半径	12.7



### 3 结果与分析

裂变中子脉冲时间序列服从 Rossi- $\alpha$  分布。通过一个中子探测事件触发一个信号门，用以记录裂变引发的关联中子；然后经过一个确定时长的延迟，从而保证 Rossi- $\alpha$  分布充分衰减。随后使用同样的门宽记录随机中子，改变门宽和延迟时间均会导致多重性分布的真符合计数和偶然符合计数发生变化。因此，不同的门宽和延迟时间会对中子多重性测量造成偏差。改变门宽和延迟时间，研究测量偏差的规律，分析造成偏差的原因，有助于对多重性移位寄存器模块的优化提供参考。

模拟设置源强为 10 000 n/s，延迟时间设定为 4 096  $\mu$ s。门宽的取值范围一般为 1~2 倍的中子衰减时间。模拟中子在探测器中的衰减时间约为 31  $\mu$ s，因此此次的门宽模拟取值范围为 29~65  $\mu$ s。门宽与质量相对偏差的关系如图 3 所示。在富集度不变的情况下，符合门宽有最佳值使得测量偏差最小，本次模拟结果的最佳门宽是约 44  $\mu$ s。当门宽小于裂变中子衰减时间时，由于漏记具有时间关联的裂变中子，导致前门内的真符合计数减少，从而使模拟质量偏差增大。当门宽逐渐增大后，符合门内真符合计数增多，测量偏差减小，最终得到一个最佳门宽。但是当门宽过大时会导致符合门内记录到更多的随机中子或本底中子，从而使测量偏差增大。因此门宽取值在裂变中子衰减时间的 1.5 倍左右较为合适。

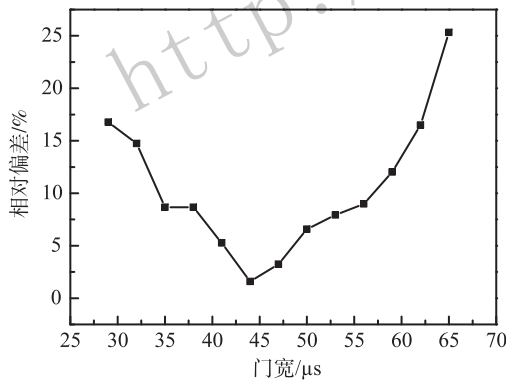


图 3 样品中  $^{235}\text{U}$  质量测量值的偏差随门宽的变化

设置源强为 10 000 n/s，门宽 44  $\mu$ s， $^{235}\text{U}$  富集度为 16%。改变延迟时间，模拟得到对应  $^{235}\text{U}$  质量的相对偏差与延迟时间的关系，如图 4 所示。当延迟时间大于 100  $\mu$ s 时，即大于 3 倍的中子衰减时间时，相对偏差显著减小。延迟时间变大后，后门内含有的裂变中子概率减小，后门记录的裂变中子数减少，偶然符合计数减小，从而测量偏差减小。因此，在多重性测量过程中，前后门之间的延迟时间必须大于数倍裂变中子衰减时间；但是不能过大以免增加不必要的测量时间。

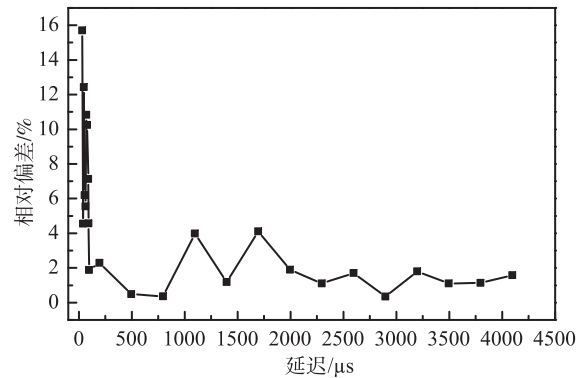


图 4 样品中  $^{235}\text{U}$  质量测量值的偏差随延迟时间的变化

另外， $^{235}\text{U}$  富集度变化对中子多重性测量精度也有影响。主动中子多重性是通过测量  $^{235}\text{U}$  诱发裂变关联中子的多重性分布确定铀材料质量。本底中子和  $^{238}\text{U}$  裂变中子会对测量造成干扰，影响多重性测量精度。富集度较小情况下， $^{238}\text{U}$  通过自发裂变和 Am-Li 源中子诱发裂变产生裂变中子，这些  $^{238}\text{U}$  裂变中子在多重性测量过程中被符合门记录下来，被认为是  $^{235}\text{U}$  的裂变中子，造成  $^{235}\text{U}$  测量质量偏大。富集度较大情况下， $^{238}\text{U}$  自发裂变和 Am-Li 中子源诱发的中子数减少，但  $^{235}\text{U}$  裂变中子大量增加，导致更多不同  $^{235}\text{U}$  裂变事件的不相关中子被同一个符合门记录下来，偶然符合计数明显增加，测量误差变大。此时，缩短门宽可以减小偶然符合，但同样减小了真符合计数，导致误差变大。因此，在高富集度(大质量)情况下，在最佳符合门宽和延迟时间下的测量结果依然有较大的误差，需通过优化计数器减小中子衰减时间以获得更小的门宽来减小测量误差。

### 4 结论与展望

利用 Geant4 软件构建了计数器模型，实现了主动中子多重性测量的全过程模拟。研究了符合门宽、延迟时间对样品质量偏差的影响规律，门宽和延迟时间变化均会改变真符合计数和偶然符合计数变化，最终导致多重性分布变化。门宽与延迟时间的确定与中子衰减时间有关，其门宽的取值在衰减时间的 1.5 倍左右较为合适，延迟时间取值在 3 倍中子衰减时间左右合适。分析讨论了  $^{235}\text{U}$  富集度变化时， $^{238}\text{U}$  自发、诱发裂变中子对主动中子多重性测量的影响。这些结果对优化主动中子多重性实际测量具有一定参考意义。

后期将更加细致地研究  $^{235}\text{U}$  富集度变化对多重性测量结果的影响。 $^{238}\text{U}$  自发、诱发裂变的中子对  $^{235}\text{U}$  裂变中子产生干扰，造成测量误差。通过研究 Am-Li 源中子强度和能谱，一方面减少 Am-Li 源随机中子产生

的偶然符合, 另一方面减少 $^{238}\text{U}$ 的诱发裂变中子。针对高富集度 $^{235}\text{U}$ 裂变中子大量增加造成偶然符合增大的情况, 可通过进一步优化计数器模型, 减少裂变中子衰减时间来减小不同 $^{235}\text{U}$ 裂变事件的中子产生偶然符合的概率。根据模拟的结果设计铀材料主动中子多重性测量系统, 开展铀材料质量测量实验研究。

#### 参考文献:

- [1] REILLY D, ENSSLIN N, SMITH JR H, *et al.* Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials[R]. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Office of Nuclear Regulatory Research; Los Alamos National Lab, NM (United States), 1991.
- [2] WANG Xiaozhong, JIA Xiangjun. Atomic Energy Science and Technology, 1998, **32**(3): 256. (in Chinese) (王效忠, 贾向军. 原子能科学技术, 1998, **32**(3): 256.)
- [3] ZHAO Deshan, CHEN Qi, CHEN Xianglin. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2004, **24**(6): 726. (in Chinese) (赵德山, 陈琦, 陈想林. 核电子学与探测技术, 2004, **24**(6): 726.)
- [4] SPRINKLE J. Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials, NUREG/CR-5550, United States Nuclear Regulatory Commission, 1991: 435.
- [5] KRICK M S, MENLOVE H O. High-level neutron coincidence counter (HLNCC): Users' Manual[R]. Los Alamos Scientific Lab, 1979.
- [6] ENSSLIN N, HARKER W C, KRICK M S, *et al.* Los Alamos Report LA-13422-M, 1998.
- [7] PEERANI P, FERRER M M. *Nucl Instr and Meth A*, 2008, **589**(2): 304.
- [8] GÖTTSCHE M, KIRCHNER G. *Nucl Instr and Meth A*, 2015, **798**: 99.
- [9] GODDARD B, CROFT S, LOUSTEAU A, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2016, **830**: 256.
- [10] CHEN Ligao, LIU Xiaobo, GONG Jian, *et al.* *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2015, **54**(2): 159. (in Chinese) (陈利高, 刘晓波, 龚建, 等. 清华大学学报: 自然科学版, 2015, **54**(2): 159.)
- [11] LI Sufen, ZHANG Quanhu, DI Yuming, *et al.* Computer Simulation of Active Neutron Multiplicity Measurement[C]// The 16th National Conference on Nuclear Electronics and Nuclear Detection Technology, Mianyang, 2012. (in Chinese) (黎素芬, 张全虎, 弟宇鸣, 等. 有源中子多重性测量计算机模拟研究[C]//第十六届全国核电子学与核探测技术学术年会, 绵阳, 2012.)
- [12] ZHU Jianyu, XU Xuefeng, JIANG Yimin, *et al.* Nuclear Physics Review, 2015, **32**(3): 323. (in Chinese) (朱剑钰, 徐雪峰, 蒋翊民, 等. 原子核物理评论, 2015, **32**(3): 323.)
- [13] ENSSLIN N, KRICK M S, LANGNER D G, *et al.* Active Neutron Multiplicity Counting of Bulk Uranium[R]. Los Alamos National Lab, NM (United States), 1991.
- [14] KRICK M S, ENSSLIN N, CEO R N, *et al.* Analysis of Active Neutron Multiplicity Data for Y-12 Skull Oxide Samples[R]. Los Alamos National Lab, 1996.
- [15] CIFARELLI D M, HAGE W. *Nucl Instr and Meth A*, 1986, **251**(3): 550.
- [16] KRICK M S, ENSSLIN N, LANGNER D G, *et al.* Active Neutron Multiplicity Analysis and Monte Carlo Calculations[R]. Los Alamos National Lab, 1994.
- [17] MENLOVE H O. Description and Operation Manual for The Active Well Coincidence Counter[R]. Los Alamos Scientific Lab, 1979.
- [18] FERRARI F, PEERANI P. *Radiation Measurements*, 2010, **45**(9): 1034.

## Simulation of Uranium Mass Measurement Based on Active Neutron Multiplicity

SUN Shiqi, HU Liyuan, HOU Yingwei, LIU Huilan, SONG Yushou<sup>†</sup>

(*Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

**Abstract:** Neutron multiplicity technique is commonly used to measure and verify nuclear materials, especially for objects with heavy shields. Plutonium material has high spontaneous fission rate and passive measurement is available. Currently, there are many different measurement devices. However, uranium material measurement can only be performed by active method due to its low spontaneous fission rate. The existing active well type coincidence counter (AWCC) is capable of performing active neutron multiplicity measurement of uranium. But the detection efficiency is low and there are lots of accidental coincidence counts caused by the Am-Li neutron source. In order to improve the efficiency and the accuracy it is necessary to carry out comprehensive investigation on active neutron multiplicity measurement method. A neutron multiplicity measurement system was modeled based on Geant4 referring to the AWCC structure. The effects of different gate width and delay time on the measurement deviation were studied. The optimal gate width of the counter is 44  $\mu\text{s}$  and the range of the gate width is suitable for about 1.5 times of the counter die-away time; after the delay time is greater than 3 times the counter die-away time, the relative deviation is significantly reduced. The influence of  $^{235}\text{U}$  enrichment on the result was also discussed. This work provides a reference for the design of the active neutron multiplicity counter.

**Key words:** active neutron multiplicity; uranium mass measurement; simulation

<http://www.npr.ac.cn>

---

**Received date:** 12 Sep. 2018; **Revised date:** 6 Mar. 2019

**Foundation item:** Special Fund for Basic Scientific Research Business Fees of Central Universities (HEUCFP201851)

<sup>†</sup> **Corresponding author:** SONG Yushou, E-mail: [songyushou80@163.com](mailto:songyushou80@163.com).