

文章编号: 1007- 4627(2000)02-0110-04

中子源有源法核査技术研究*

刘 荣^{1,2}, 林理彬¹, 陈 渊², 沈寄安², 郭海萍²

刘 渊², 励义俊², 蒋 励², 王 玫²

1 (四川大学物理系, 四川 成都 610064)

2 (中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 成都 610003)

摘 要: 用有源(主动)方法研究了贫化铀组合系统的中子诱发裂变缓发中子探测技术. 在不同屏蔽和组合等条件下测量和比较了贫化铀系统的缓发裂变中子分布, 进一步研究了实验系统的可核査性. 探讨了区分核与非核系统的方法.

关键词: 贫化铀; 屏蔽和组合材料; 缓发裂变中子

中图分类号: O571.53 文献标识码: A

1 引言

在核军控条约的谈判、签署和实施中, 如核禁试、核裁军等条约, 都需要有高水平的核査技术作为支撑. 核材料钚和铀是核装置的核心部件, 对这些材料及其组合系统的辐射探测方法的研究, 是核裁军核査技术研究的重要内容. 钚的自发裂变中子相对较强, 其中子发射率约为 $5.6 \times 10^4 \text{ n}/(\text{s} \cdot \text{kg})^{[1]}$, 主要来自少量同位素 ^{240}Pu 的自发裂变. 所以可用无源(被动)方法进行研究. 我们曾用无源方法测量了钚组合系统的自发裂变中子^[2,3]. 铀材料的自发裂变中子发射率很低, 如浓缩铀的中子发射率为 $1.6 \text{ n}/(\text{s} \cdot \text{kg})^{[1]}$, 用无源方法是很难测到的. 可选用有源(主动)方法对其进行探测^[1]. 通过中子源诱发核装置中的核材料裂变, 可探测具有特征的缓发裂变中子. 我们用 D-T 中子源初步研究了裸浓缩铀和裸贫化铀的缓发裂变中子测量方法^[3]. 本工作在现有条件下采用有源方法进一步研究了铀及其组合系统的中子核査技术, 并从实验方面探讨了探测和发现核系统的方法.

2 实验方法和系统

有源(主动)方法是所要研究的核査方法之一.

根据假想核装置的结构^[1]以及 14 MeV 中子穿透力较强和产生的诱发裂变中子强度较高等特点, 我们选用了 14 MeV D-T 中子源进行有源核査技术的可行性研究. 人们知道, 核装置的核芯部件是武器级钚或武器级铀, 贫化铀也是核装置的结构材料. 贫化铀属可裂变材料, 它的一些辐射特性与浓缩铀相近, 通过对贫化铀的研究能反映出浓缩铀的一些诱发辐射特性. 核材料的存在决定了核弹头的辐射性质. 中子能引起钚或铀裂变, 裂变时产生诱发辐射 (n 和 γ), 诱发辐射的产生为有源核査提供了一种途径. 诱发裂变中子辐射分瞬发中子辐射和缓发中子辐射. 瞬发中子辐射与源中子混在一起, 本底较高, 不易区分和测量瞬发中子. 而缓发中子的发射是裂变材料所特有的, 所以通过测量缓发中子, 能判断被核査装置是否为核装置. 核装置的结构材料决定了辐射的穿透情况. 测量经屏蔽和组合材料后的缓发中子, 可研究对核装置的可核査性.

实验中, 利用 14 MeV D-T 中子源诱发贫化铀系统裂变, 缓发中子的平均能量为 0.45 MeV, 采用灵敏度较高的 ^3He 计数管阵列探测器测量诱发裂变的缓发中子. 缓发中子的半衰期比较短, 在零点几秒到 60 s 之间. 贫化铀球壳由四部分组成, 尺寸

* 收稿日期: 1999-01-19, 修改日期: 1999-06-10

作者简介: 刘 荣(1963-), 男(汉族), 甘肃武威人, 副研究员, 从事核物理研究.

$\Phi 100/148$ (mm), 总重 20.27 kg. 编号为 1[#] 和 2[#] 的两部分为尺寸相同的球冠, 球冠高为 62 mm. 两个球冠可组成一准球壳, 其直径内/外 \times 高的尺寸为 $\Phi 106/148 \times 124$ (mm). 具体重量见表 1.

表 1 贫化铀的重量

编号	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
重量(kg)	7.68	7.70	0.89	4.00

为了在不同屏蔽和组合条件下研究铀系统的可核查性, 实验中用了聚乙烯(CH₂)、含硼聚乙烯(10%和50% B₄C)、铁和铅等球壳作为屏蔽和组合材料. 具体与贫化铀的组合系统如表 2 所列, 括号内为球壳的内/外直径, 单位为 mm.

表 2 贫化铀与不同屏蔽和组合材料构成的系统

编 号	屏蔽组合系统
a	²³⁸ U (100/148)
b	²³⁸ U (106/148 \times 124)
c	²³⁸ U (106/148 \times 124) / CH ₂ (146/262)
d	²³⁸ U (106/148 \times 124) / CH ₂ (10% B ₄ C, 146/262)
e	²³⁸ U (106/148 \times 124) / CH ₂ (50% B ₄ C, 146/262)
f	²³⁸ U (106/148 \times 124) / Fe(146/262)
g	²³⁸ U (106/148 \times 124) / Pb(150/250)

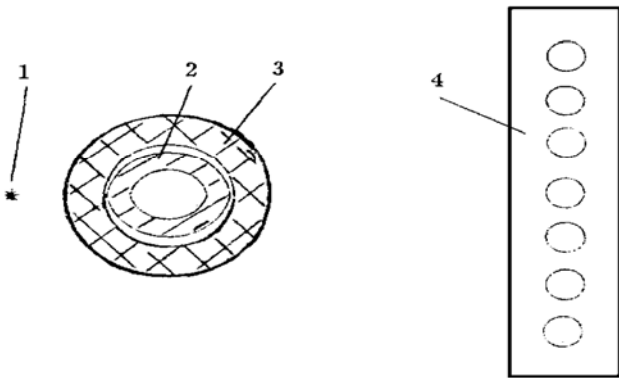


图 1 实验安排示意图

14 MeV 中子源, 2 贫化铀球壳, 3 屏蔽和组合材料球壳, 4 ³He 计数管阵列探测器.

实验安排如图 1 所示. Ti-T 靶与 ²³⁸U 球心相距约 20 cm. ²³⁸U 球心与阵列探测器中心相距约 82 cm. 中子源与核系统保持一定距离, 不放在核系统内, 这样的布置符合实际核查的需要.

3 测量结果和讨论

缓发中子随时间分布的测量结果画在图 2 中,

图中的中子计数为 $\Delta t = 2$ s 时的中子计数.

实验是在 14 MeV 中子发生器上进行的. 中子源强约 8×10^9 n/s. 中子源强通过测量伴随 α 粒子得到(下同), α 粒子由金硅面垒半导体探测器测量. 该半导体探测器放在与 D⁺ 束成 178.9° 的方向上. 根据缓发中子衰减比较快的特点, 实验中用了微机多道分时记录系统来记录缓发中子. 各系统照射时间约 5 min, 测量时间约 5 min, 测量条件均相同. 由于加速器管道中子的影响, 测量是在加速器退高压后 5 s 开始的.

图 2(a) 是无 ²³⁸U 球壳时的加速器管道中子与有 ²³⁸U 球壳时的缓发中子比较. 可见退高压后 5 s, 管道中子已没有了, 不影响缓发中子测量. 为了比较, 在图 2(b) 中画出了贫化铀和浓缩铀的缓发中子随时间分布^[3]. 贫化铀与浓缩铀球壳相同, 14 MeV 中子照射 ²³⁸U 球 5 min 后, 缓发中子就达到饱和, 即使再延长照射时间, 缓发中子总数无大的变化.

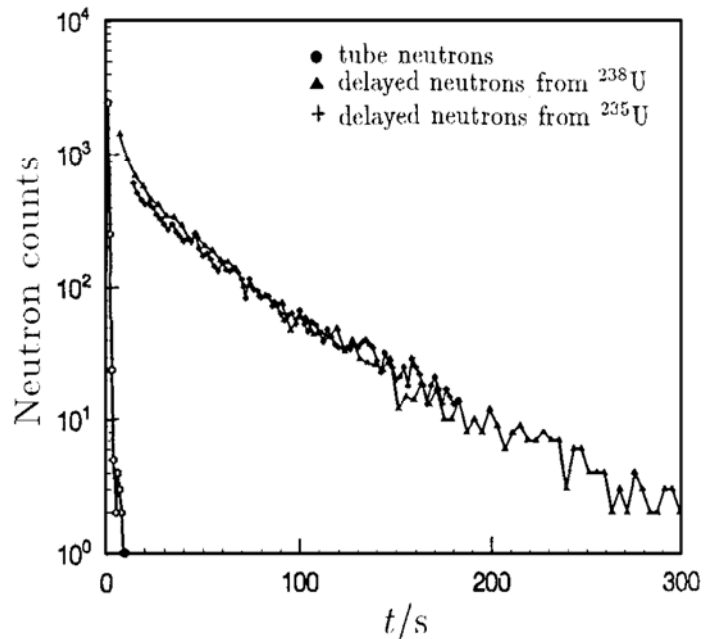


图 2 加速器管道中子与缓发中子分布以及浓缩铀的缓发中子分布比较

根据图 2 中 ²³⁸U 的缓发中子分布曲线可以近似得出三组缓发中子半衰期(T)和每组所占的份额(β), 如表 3 所列.

表 3 测量的 ²³⁸U 缓发中子半衰期和份额

组	I	II	III
$T_{1/2}/s$	55.56	20	2.7
$\beta(\%)$	2.4	17.5	80.1

在相同实验条件下, 测量了表2中 b, c, d, e, f 和 g 系统的缓发裂变中子($N_{d,n}$) 随时间的分布, 部分结果如图3所示. 表4是不同组合系统时的缓发中子积分计数.

从图3和表4得出, 聚乙烯的屏蔽效果使缓发中子减少约1/2. 有含硼(10%和50%)聚乙烯球壳时, 两种缓发中子随时间的分布曲线重合. 含硼聚乙烯的屏蔽效果使缓发中子减少1/4. 所以, 为屏蔽缓发中子, 聚乙烯的含硼量到10%就已足够了. 14 MeV 中子与铅作用可产生(n, 2n) 反应(反应阈能约7

MeV), 使中子倍增. ^{238}U 的裂变反应阈能约为 1.5 MeV. 源中子与铅作用倍增后, 能量高出1.5 MeV 的中子与 ^{238}U 发生裂变反应, 产生了较多的缓发中子, 但缓发中子与铅作用后有衰减. 所以系统 g 和 b 的缓发中子分布曲线差别不太明显, 系统 f 的情况和系统 c 的类似. 从图3的分布曲线可以看出, 测量时间超过250 s 后, 分辨不出是否用了屏蔽材料. 另外, 用有源方法探测铀系统时, 可探测时间是在6个缓发中子最大半衰期以内, 即300 s.

在中子源强分别约为 1.5×10^{10} , 0.8×10^{10} ,

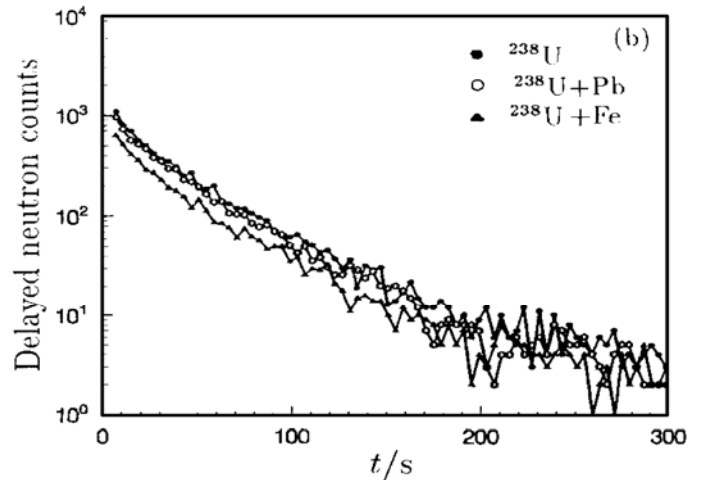
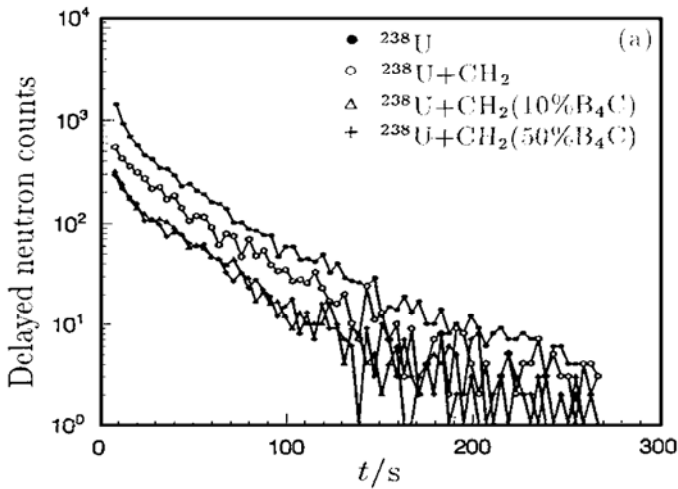


图3 (a) 系统 b, c, d 和 e 的缓发中子分布比较以及(b) 系统 b, f 和 g 的缓发中子分布比较

表4 不同组合系统时的缓发中子计数

组合系统	a	b	c	d	e	f	g
缓发中子计数	23375	16796	8713	4236	4405	10219	14720

0.4×10^{10} (n/s) 时, 测量系统 b 的缓发中子计数分布, 结果表明随中子源强的增加, 缓发中子计数也增加. 测量了不同贫化铀重量5, 7, 12, 15和20 kg 时的缓发中子计数, 结果表明缓发中子随贫化铀重量的增加而增加, 并近似与贫化铀重量成正比.

从实验结果可以看出, 中子源照射停止后, 初期缓发中子数较多, 可用较少的时间来探测和核查. 而后期缓发中子较少, 若冷却时间较长, 则不易探测和核查. 另外, 裂变中子分为瞬发中子和缓发中子. 瞬发中子的发射是在原子核裂变后小于 10^{-15} s 内完成的. 裂变的初级产物是丰中子的核素, 经过 β 衰变或多次 β 衰变链最后转变为稳定的核素. 缓发中子就是在 β 衰变过程中发射出来的, 它的半衰期由 β 衰变母核(或称缓发中子先驱核)的

半衰期决定. 本实验是在加速器退高压5 s 后开始测量的, 因此测量的缓发中子随时间的分布来自于表3中I 和II 组缓发中子. 这两组缓发中子对应的先驱核分别为 ^{87}Br , ^{137}I - ^{88}Br , 而且半衰期较短的缓发中子所占的份额较多.

测到了缓发中子随时间的分布, 说明被探测和核查对象为有核材料的装置. 若探测缓发 γ 射线, 会遇到很强的 γ 射线本底, 且 γ 射线穿透较差, 因此测量缓发 γ 射线会比测量缓发中子更困难, 故测量缓发中子是较有效的方法. 另外, 对 ^{238}U 而言缓发中子与瞬发中子之比约为0.015, 缓发中子的发射是比较弱的. 若要在一定的距离和时间内探测缓发中子, 实验上一方面在允许的情况下提高中子源强度, 另一方面可用高灵敏度的中子探测器探测,

如 ^3He 计数管阵列探测器. 若要测量相对较强的瞬发中子, 理论上可用能量低于瞬发中子能量的中子源测量能量高于源中子的瞬发中子, 但强度较高的低能中子源不易得到. 即便能得到, 也会存在辐射剂量较大或设备较大等问题. 相比之下, 测量缓发中子比较方便, 尤其是特征性较强.

根据缓发裂变中子的特点, 实际应用时可用具有开关特点且可移动的便携式加速器脉冲中子源(如中子管), 在照射被核查物若干秒后, 退掉加速器高压, 停止照射, 接着探测缓发中子. 用这样的中子源, 来探测缓发中子, 可减少在现场人员的辐射剂量. 对于一定源强的中子源, 可通过在一定的测量时间和距离内用较高灵敏度的探测器探测特征辐射. 对于中子源有源法核查技术的实际应用还存

在核查与被核查双方对中子源强大小、探测器灵敏度的接受程度等问题, 这些将有待于深入研究.

4 结论

研究和测量了贫化铀在不同屏蔽和组合条件下的诱发裂变缓发中子. 含硼(10%或50% B₄C)聚乙烯对核系统的屏蔽可使缓发中子计数减少1/4. 有无铅球壳时, 缓发中子分布曲线差别不大. 随着中子源强和核材料重量的增加, 缓发中子计数也增加. 通过测量14 MeV中子诱发铀的裂变缓发中子, 不易区分浓缩铀和贫化铀部件, 但可以区分核与非核系统. 所以, 通过探测缓发裂变中子进行有源核查技术研究是可行的.

参 考 文 献:

- 1 Fetter S. Detecting Nuclear Warhead [J]. Science & Global Security, 1990, 1: 225~ 253.
- 2 Liu Rong. Experimental Studies on Technique of Nuclear

- Verification [C]. Arms Control Collected Works, 1995, 75~ 79.
- 3 刘 荣. 核查中的中子探测技术研究 [J]. 原子核物理评论, 1997, 15(2): 118~ 120.

Study on Verifying Technique by Using an Active Method with Neutron Source

LIU Rong^{1,2}, LIN Li-bin¹, CHEN Yuan², SHEN Ji-an², GUO Hai-ping²,
LIU Yuan², LI Yi-jiang², JIANG Li², WANG Mei²

1 (Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

2 (Institute of Nuclear Physics and Chemistry of China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610003, China)

Abstract: The technique for detecting the delayed neutrons from neutron-induced fission in uranium systems was studied by using an active method with ^3He proportional counting tube array and a 14 MeV D-T neutron source. Under the conditions of different shielding and combination, the distributions of delayed fission neutrons from depleted uranium systems were measured and the reliability of the systems was studied. The method to distinguish a nuclear system from a non-nuclear one was discussed.

Key words: depleted uranium; shielding; combining material; delayed fission neutron