

核查中的中子探测技术研究*

刘 荣

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 成都 610003)

摘 要 介绍了通过探测中子辐射,用被动方法研究了包括模拟核弹头装置在内的各钚组合系统的可探测性和中子能谱等内容.用主动方法研究了核材料钚的裂变缓发中子测量技术和区分核与非核材料的方法.讨论了进一步开展的核查技术实验.

关 键 词 模拟核弹头 可探测性 中子能谱 裂变缓发中子

分 类 号 TL8

1 引 言

在核军控谈判中,核查及核查的可靠性直接关系到谈判及条约的成败.在将来核军控条约的执行中,如 START-I 与 II、NPT 及 CTBT 等,核查是双边、多边,乃至国际性的一种技术监督措施.有效的核查技术能确认弹头的存在或被裁减是否遵从了条约,以及能防止核扩散.

核武器中的核材料,一般为武器级钚和铀.核弹头的中子和 γ 辐射主要来自这些核材料的自发裂变.对于基于钚的核弹头和核材料钚的核查,采用一种较安全、方便的方法就是测量其自身放出的中子和 γ 辐射,即被动方法.只要核查方的探测器不具有侵入性,此方法是容易被接受的.由于核材料钚的中子辐射很弱,用被动方法便难以测到,这时就需要探讨另一种方法去测量,即主动方法.

本工作基于核材料钚和铀,用核物理学实验方法研究了核查技术.

2 模拟实验系统

通过探测模拟核弹头和核材料的中子辐射,研究核装置的可核查性和核查方法.根据以钚为裂变材料的原子弹假想模型^[1]进行模拟实验,实验中将核材料钚和金属球壳组合构成了模拟核弹头的系统,其结构为表1中的 g.虽然 ^{238}U 与 Al 之间缺少一层模拟炸药,但

通过测量其辐射也能得到一些对核查有意义的结果.核材料钚与不同的金属材料组合还可构成其他六种系统,如表1中的 a~f 所示.由此就可进一步观测钚在不同金属材料组合时的中子辐射场的变化情况.

表1 钚与不同金属材料的组合系统

| 编 号 | 组合系统 |
|-----|--|
| a | ^{239}Pu |
| b | $^{239}\text{Pu}/\text{Be}$ |
| c | $^{239}\text{Pu}/\text{Fe}$ |
| d | $^{239}\text{Pu}/\text{Al}$ |
| e | $^{239}\text{Pu}/^{238}\text{U}$ |
| f | $^{239}\text{Pu}/\text{Be}/^{238}\text{U}$ |
| g | $^{239}\text{Pu}/\text{Be}/^{238}\text{U}/\text{Al}$ |

组合系统放在一铝制平台上,探测器由支架支撑放在几何位置最好的半球壳顶部上方, ^3He 长计数器用于测量中子发射率,NE213液体闪烁探测器用于测量中子能谱. ^3He 长计数器和 NE213探测器的前表面与半球壳的球心相距分别为96.6 cm 和36.1 cm.

3 实验内容和结果

3.1 探测弱中子辐射源

核弹头和核材料出射的中子辐射较弱,因此对其的核查研究也就是对弱中子探测技

* 1997 - 01 - 24 收稿.

术研究. 对于弱中子辐射源的探测可用两个量来表征: 一是探测灵敏度; 二是辐射源的中子发射率^[2].

探测灵敏度是指测量装置可探测到的最少放射性, 它是本底计数率标准偏差的三倍. 在发现和探测可疑核装置或弱中子辐射源的过程中, 测量系统应有较高的探测灵敏度. 实验测得³He 长计数器的探测灵敏度为 0.303 (n/s). 由此推算出可敏感的钚材料重量不少于 10 mg.

辐射源的中子发射率测量, 其目的是用于判别弹头类型(钚弹或铀弹). 武器级钚发射的中子主要来自少量同位素²⁴⁰Pu. 实验测得, 与在表1中的其他钚组合系统的中子发射

率相比, 模拟核弹头装置的中子发射率最小, 其中子增殖系数为 0.65. 武器级铀发射的中子主要来自少量同位素²³⁸U, 实验测得所用裸钚和裸铀半球壳的中子发射率之比经质量归一后约为 $2 \times 10^3 : 1$.

3.2 可探测性研究

核查时, 可能对被核查核装置的探测范围和时间进行限制. 因此, 可探测性就是研究在一定限制条件下能否探测到被核查的核装置. 在某一限定的时间内可得出被测核装置的最大可探测距离. 最大可探测距离是指在 t 时间内测到的中子计数应大于 5 倍的本底计数平方根. 通过测量表1中各钚组合系统的中子发射率得出了最大可探测距离, 见表2.

表2 限定时间的最大可探测距离

| 组 合 系 统 r_{mt}/m t/s | a | b | c | d | e | f | g |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 8.8 | 8.5 | 8.0 | 7.9 | 8.1 | 7.8 | 7.0 |
| 60 | 24.4 | 23.5 | 22.2 | 22.0 | 22.5 | 21.7 | 19.6 |
| 3 600 | 67.8 | 65.5 | 61.7 | 61.4 | 62.7 | 60.3 | 54.5 |

从表2得到, 限定测量时间在1秒钟内, 各系统的可探测距离在小于7~9 m 以内; 1分钟内, 各系统的可探测距离在小于20~24 m 以内; 1小时内, 各系统的可探测距离在小于58~68 m 以内.

核查中, 若要在比较短的时间内和在较远的距离处发现和测量核装置, 则探测器要有较高的灵敏度.

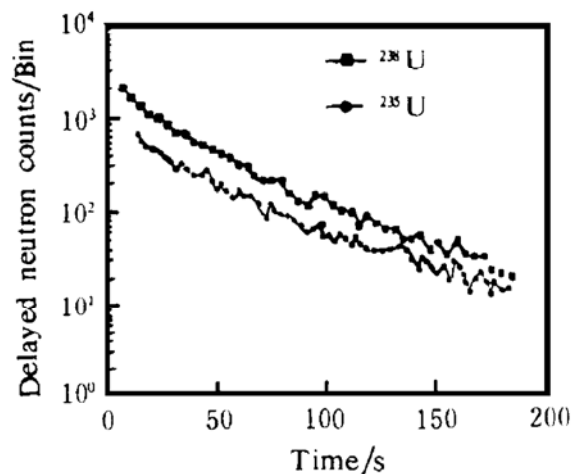
3.3 中子能谱

核弹头和核材料出射的中子能谱测量是核核查技术基础研究的另一方面. 裸钚材料的自发裂变中子能谱近似为麦克斯韦分布. 实验中, 测量了钚组合系统的泄漏中子能谱. 在 NE213 中子谱仪中, 用 n- γ 分辨技术甄别 γ 射线. 测量的中子能谱能量范围为 1~7 MeV. 通过比较中子能谱得出有和没有²³⁸U 材料时, 各钚组合系统的能谱有差异, 主要表

现在低能段^[3].

3.4 核材料铀的探测

为了更容易探测核材料铀, 实验中用了主动方法. 主动方法是指用外加辐射源增强核材料的中子辐射, 诱发核材料裂变产生易



图示 浓缩铀和贫化铀的缓发中子计数分布比较

探测到的中子信号. 所用的外加辐射源为 14 MeV 加速器中子源, 诱发裂变中子由瞬发中子组成. 通常, 瞬发中子和源中子是混在一起的, 不易分开. 因此, 实验目的是研究缓发中子测量技术. 根据缓发中子衰减比较快的特点, 用微机多道分时记录系统来记录缓发中子. 实验布局: 探测器是 ^3He 计数管阵列探测器, 铀材料为浓缩铀和贫化铀球壳, 中子源与铀材料球心相距约 12 cm, 铀材料球心与阵列探测器中心相距约 90 cm. 图示为浓缩铀和贫化铀的裂变缓发中子随时间分布的比较, 图中画出的两条曲线若做质量归一后就近似重合. 因此, 测量用 14 MeV 中子诱发核材料的裂变缓发中子, 能区分核与非核材料.

4 结束语

几年来, 通过实验对核装置的核查技术

进行了基础研究, 这方面的研究工作还将继续进行下去, 其中包括高性能的测量系统研究. 在不同屏蔽材料和不同限制条件下, 探究探测核装置的方法. 此外, 还有如何判断装在罐中的废物材料含有何种放射性元素等问题. 总之, 核查技术的研究将逐步深入, 力求从实验的研究走向实际使用的研究.

参加本工作的其他人员有: 陈渊、郭海萍、沈寄安、孙颖、亢武、刘渊和赵秋雯.

参 考 文 献

- 1 Fetter S. *Science & Global Security*, 1990, 1:225
- 2 刘 荣. *核电子学与探测技术*, 1995, 6:331
- 3 Liu Rong. *Arms Control Collected Words*, 1995:75

Experimental Study on Technique of Nuclear Verification

LIU Rong

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

Abstract In this paper, by neutron radiation detection with the passive method, the study on detectability, neutron spectra, etc. for the plutonium combined systems including the stimulated nuclear warhead assembly are introduced. The study on technique of measuring fission delayed neutrons from uranium materials and the method of distinguished nuclear from non nuclear materials with the active method are described. Further experiments on verifying technique are also discussed.

Key Words stimulated nuclear warhead detectability neutron spectra fission delayed neutrons