

核弹头惰层厚度的反解方法

熊宗华 亢 武 龚 建 胡广春 向永春 裴永全

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 绵阳 621900)

(2002 年 3 月 31 日收到 2002 年 5 月 22 日收到修改稿)

高分辨 γ 探测技术是一种可靠的核弹头核查技术. 通过模拟计算和实验标定的方法, 研究特定核弹头模型出壳 γ 射线强度与吸收材料厚度的关系, 提出了一种简便的反解核弹头惰层厚度的方法, 并讨论了该方法的应用条件.

关键词: 核弹头, γ 谱, 惰层厚度反解, 核查

PACC: 0150M, 0650D

1. 引言

在探测、识别和提取核弹头指纹时, 一种比较可靠, 也比较可能被采用的技术就是高分辨 γ 能谱测量技术^[1,2]——直接测量裂变材料辐射的特征 γ 射线. 现在已经有一种共识, 高分辨 γ 能谱测量技术有比较好的可靠性, 但也有较强的入侵性——通过探测核弹头出壳 γ 谱可以获得比较多的敏感信息. 研究表明^[3,4]高分辨 γ 探测技术可以: 1) 判断出核弹头是铀弹或钚弹 2) 分析出裂变材料的丰度, 判断材料的等级 3) 分析出钚材料的存放时间 4) 分析出结构材料的种类 5) 粗略分析出核弹头的结构尺寸.

通过出壳 γ 谱反推核弹头结构材料厚度是一件比较复杂和难度较大的工作, 需要的参数多, 解的不确定性大. 本实验室通过对特定核弹头模型出壳 γ 谱的模拟计算与实验研究, 提出了一种简便的反解核弹头惰层厚度的方法.

2. 核弹头的结构模型

核弹头的设计细节是保密的, 但是核弹头结构的一般特点已逐渐透露出来. 核弹头一般由中子源、裂变芯、中子反射层、惰层、高效炸药、外壳组成. 马里兰大学 Steve Fetter 教授在研究中提出了一种简化的核弹头模型^[5], 见图 1. 由一系列同心球壳组成, 裂变芯材料为武器级铀(WgU)或武器级钚(WgPu), 中子反射层为铍, 惰层为钨或贫化铀, 外壳为铝.

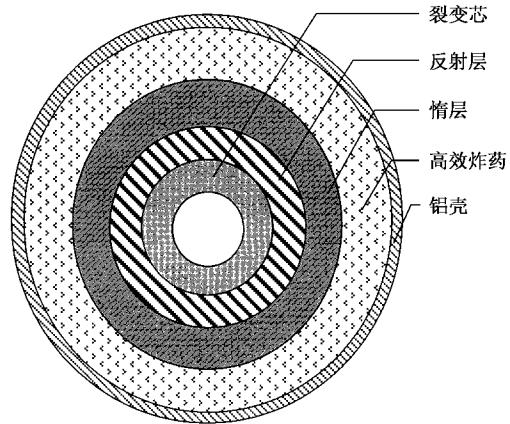


图 1 Steve Fetter 模型

Steve Fetter 模型概括核弹头结构的共性. 本文只研究裂变芯为武器级钚的这种模型.

3. γ 射线强度与核弹头结构的关系

3.1. 钚芯出射 γ 射线强度

探测器探测到的钚芯出射 γ 射线强度可以表示为

$$I_0(E_i) = A p(E_i) G(E_i) \epsilon_p(E_i), \quad (1)$$

其中 A 为源的活度, $p(E_i)$ 为能量为 E_i 的 γ 射线强度, $\epsilon_p(E_i)$ 为峰探测效率, $G(E_i)$ 为钚芯自吸收校正因子. 对于 Steve Fetter 模型, 内半径为 r , 外半径为 R , 自吸收校正因子可近似写为

$$G(E_i) \approx \frac{1}{k_p(E_i)(R-r)} \left(1 - e^{-k_p(E_i)(R-r)} \right) \quad (2)$$

式中 $\mu_p(E_i)$ 为线性吸收系数, k 是与钚芯结构尺寸

有关的常数,其近似表达式为

$$k = 4 - \frac{8}{3} e^{-0.57\sqrt{R(R-r)}}. \quad (3)$$

对于能量为 E_i, E_j 的 γ 射线,其强度比值为

$$I_0(E_i)/I_0(E_j) = [p(E_i)/p(E_j)] \varepsilon_p(E_i)/\varepsilon_p(E_j) \times [G(E_i)/G(E_j)]. \quad (4)$$

(4)式中 $p(E_i)/p(E_j)$ 为常数,对确定的探测器,确定的测量位置来说 $\varepsilon_p(E_i)/\varepsilon_p(E_j)$ 也是常数;根据核弹头结构的共性, $G(E_i)/G(E_j)$ 也是可以估计出来的。

同一种材料对不同能量的 γ 射线的吸收是不一样的,发自同一个源的两条 γ 射线,由于自吸收的影响,在自吸收厚度逐渐增加时,其强度比值将趋于一个常数。这个比值也可以通过蒙卡模拟计算的方法进行标定。表 1 列出了蒙卡方法计算的特定探测器测到的不同厚度球壳源 ^{239}Pu 的 375keV 和 414keV γ 射线强度比值。从表中可以看出,在钚芯厚超过 5mm 时,375keV 与 414keV γ 射线强度比值变化很小,在根据一定的假设估计出钚芯厚度后,完全可以通过蒙卡模拟计算的方法得出钚辐射的不同 γ 射线强度比值。

表 1 不同厚度钚芯辐射的 375keV 和 414keV 强度比值

钚芯厚度/mm	5	8	10	13
375/414	0.947	0.943	0.939	0.939

3.2. γ 射线强度与吸收材料厚度的关系

3.2.1. 模拟计算数据

为了研究 γ 射线强度与吸收材料厚度的关系,用蒙卡方法计算了钚芯 + 钼、或炸药、或铝、或铁、或贫化铀、或钨等不同吸收材料(每种材料 3—5 个不同厚度)的 ^{239}Pu 主要特征 γ 射线 375keV, 414keV, 451keV, 646keV, 769keV 的出壳强度。对同一种材料, γ 射线强度 I 与吸收厚度 t 的关系遵循的规律为

$$I = I_0 e^{-\mu t}. \quad (5)$$

有意思的是,如果用质量厚度 $t_m = \rho t$ 代替 t ,除了贫化铀和钨外,其余数据放到一起后, γ 射线强度 I 与质量厚度 t_m 的关系仍然遵循以下规律:

$$I = I_0 e^{-\mu_m t_m}, \quad (6)$$

式中 μ_m 为质量吸收系数,拟合曲线见图 2(a), (b), 相关系数大于 0.99。

3.3.2. 实验数据

实验测量了裸钚球壳、钚 + 钼、钚 + 炸药、钚 + 铝、钚 + 铁、钚 + 钼 + 炸药、钚 + 钼 + 炸药 + 铝、钚 + 钼 + 炸药 + 铁等八种状态的 γ 谱,发现其 γ 射线强度 I 与质量厚度 t_m 的关系仍然遵循(6)式的规律。

拟合曲线见图 3(a)(b), 相关系数大于 0.99。

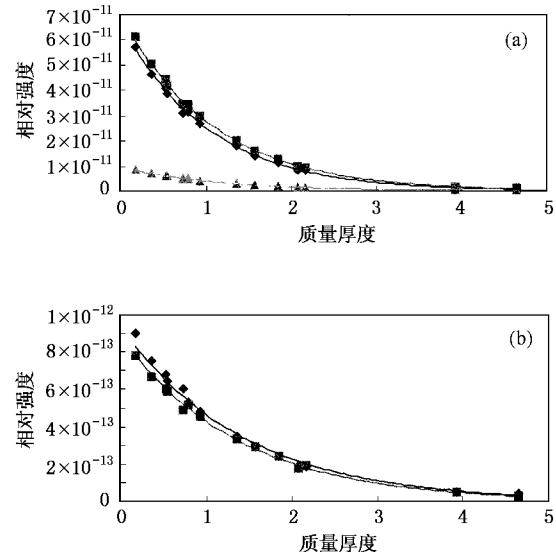


图 2 (a) 375/414/451keV 能峰强度与吸收材料厚度的关系(◆为 375; ■为 414; ▲为 451) (b) 646/769keV 能峰强度与吸收材料厚度的关系(◆为 646; ■为 769)

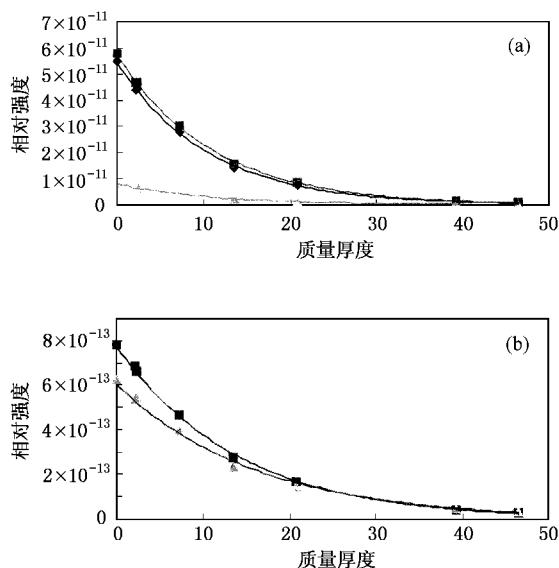


图 3 (a) 375/414/451keV 能峰强度与吸收厚度的关系(◆为 375; ■为 414; ▲为 451) (b) 646/769keV 能峰强度与吸收厚度的关系(■为 646; ▲为 769)

需要说明的是(6)式的规律是近似的。但如果采用实验标定的质量吸收系数,针对特定的核弹头

模型(6)式是比较严格成立的.

4. 反解惰层厚度的方法

根据前面的讨论,核弹头外某条 γ 射线强度 I 遵循的规律为

$$I = I_0 \exp\left(-\sum_l \mu_l t_l\right), \quad (7)$$

式中 I_0 为钚芯辐射出该条 γ 射线的强度, μ_l 为 l 层材料的线性吸收系数, t_l 为 l 层材料厚度.两条能量分别为 E_i, E_j 的 γ 射线的强度比值为

$$\kappa(E_i) \kappa(E_j) = \frac{I_0(E_i)}{I_0(E_j)} \exp\left(-\sum_l [\mu(E_i) - \mu(E_j)] t_l\right). \quad (8)$$

理论上说,如果能得到 l 组 γ 射线强度比值,就可以解出钚芯外各层材料的厚度.但需要的参数多,引入的不确定因素也多,不易得到理想的结果.如果用质量吸收系数 $\mu_m = \mu/\rho$, $t_m = \rho t$ 代替 μ 和 t , ρ 为材料密度,则(7)式变为

$$I = I_0 \exp\left(-\sum_l \mu_{m_l} t_{m_l}\right). \quad (9)$$

既然模拟计算和实验数据都表明铍、炸药、铝、铁等不同吸收材料的出壳 γ 射线强度数据可以放在一起拟合,那么,对 γ 射线的吸收而言,在300—800keV能区,可以把它们视为同一种材料,这样Steve Fetter模型就由五层变成了三层.此时,以脚标1代表惰层材料,脚标2代表其他材料,(9)式简化为

$$I = I_0 e^{-\mu_{m_1} t_{m_1}} e^{-\mu_{m_2} t_{m_2}}. \quad (10)$$

如果通过分析核弹头出壳 γ 谱得到两组能量分别为 E_i, E_j 和 E'_i, E'_j 的 ^{239}Pu 特征 γ 射线的强度比值 $\kappa(E_i) \kappa(E_j)$ 和 $\kappa(E'_i) \kappa(E'_j)$ 则有

$$[\mu_{m_1}(E_i) - \mu_{m_1}(E_j)] t_{m_1} + [\mu_{m_2}(E_i) - \mu_{m_2}(E_j)] t_{m_2} = \ln\left[\frac{I_0(E_i)}{I_0(E_j)} \frac{\kappa(E_i)}{\kappa(E_j)}\right], \quad (11)$$

$$[\mu_{m_1}(E'_i) - \mu_{m_1}(E'_j)] t_{m_1} + [\mu_{m_2}(E'_i) - \mu_{m_2}(E'_j)] t_{m_2} = \ln\left[\frac{I_0(E'_i)}{I_0(E'_j)} \frac{\kappa(E'_i)}{\kappa(E'_j)}\right]. \quad (12)$$

联立解(10)、(11)式组成的方程组,令

$$\Delta\mu_{m_1}(E_{ij}) = \mu_{m_1}(E_i) - \mu_{m_1}(E_j),$$

$$\Delta\mu_{m_2}(E_{ij}) = \mu_{m_2}(E_i) - \mu_{m_2}(E_j),$$

$$\Delta\mu_{m_1}(E'_{ij}) = \mu_{m_1}(E'_i) - \mu_{m_1}(E'_j),$$

$$\Delta\mu_{m_2}(E'_{ij}) = \mu_{m_2}(E'_i) - \mu_{m_2}(E'_j),$$

$$r_0(E_{ij}) = I_0(E_i) / I_0(E_j),$$

$$\kappa(E_{ij}) = \kappa(E_i) / \kappa(E_j),$$

$$r_0(E'_{ij}) = I_0(E'_i) / I_0(E'_j),$$

$$\kappa(E'_{ij}) = \kappa(E'_i) / \kappa(E'_j),$$

得

$$\begin{aligned} t_{m_1} &= \{\Delta\mu_{m_2}(E_{ij}) \cdot \ln[r_0(E'_{ij}) / \kappa(E'_{ij})] \\ &\quad - \Delta\mu_{m_2}(E'_{ij}) \cdot \ln[r_0(E_{ij}) / \kappa(E_{ij})]\} \\ &\quad \times [\Delta\mu_{m_1}(E_{ij}) \cdot \Delta\mu_{m_2}(E'_{ij}) \\ &\quad - \Delta\mu_{m_1}(E'_{ij}) \cdot \Delta\mu_{m_2}(E_{ij})]^{-1}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} t_{m_2} &= \{\Delta\mu_{m_1}(E_{ij}) \cdot \ln[r_0(E'_{ij}) / \kappa(E'_{ij})] \\ &\quad - \Delta\mu_{m_1}(E'_{ij}) \cdot \ln[r_0(E_{ij}) / \kappa(E_{ij})]\} \\ &\quad \times [\Delta\mu_{m_1}(E_{ij}) \cdot \Delta\mu_{m_2}(E'_{ij}) \\ &\quad - \Delta\mu_{m_1}(E'_{ij}) \cdot \Delta\mu_{m_2}(E_{ij})]^{-1}. \end{aligned} \quad (14)$$

在(11)、(12)式中, $I_0(E_i) / I_0(E_j)$ 和 $I_0(E'_i) / I_0(E'_j)$ 为钚裂变芯辐射出对应能量 γ 射线的强度比值.由于自吸收的影响,在裂变芯厚度逐渐增加时,其强度比值将趋于一个常数,可以通过近似计算、实验或蒙卡模拟精确标定.质量吸收系数采用实验标定的数据,根据 γ 谱可以判断惰层为贫化铀或钨,利用(13)式就可以解出惰层厚度.

5. 讨 论

利用上述方法反解惰层厚度时,应尽量选择能量差 $\Delta E = |E_i - E_j|$ 大,测量不确定度小的 γ 射线对.这是因为

$$\kappa(E_{ij}) = r_0(E_{ij}) e^{-\Delta\mu_{m_1}(E_{ij}) t_{m_1} - \Delta\mu_{m_2}(E_{ij}) t_{m_2}}, \quad (15)$$

吸收层厚度变化引起的 γ 射线强度比值相对变化为

$$\Delta\kappa(E_{ij}) / \kappa(E_{ij}) = e^{-\Delta\mu_{m_1}(E_{ij}) \Delta t_{m_1} - \Delta\mu_{m_2}(E_{ij}) \Delta t_{m_2}} - 1. \quad (16)$$

质量吸收系数 μ_m 是 γ 射线能量 E 的函数.除 K, L, M 等吸收限外,随能量升高逐渐减小,低能段变化比高能段更为明显. ΔE 越大,| $\Delta\mu_m$ |就越大, $\kappa(E_{ij})$ 随厚度的变化就越敏感.反之则不敏感.一种极端的情况就是,当 $\Delta E \rightarrow 0$ 时, $\Delta\mu_m \rightarrow 0$, $\Delta\kappa(E_{ij}) / \kappa(E_{ij}) \rightarrow 0$,也就是说, γ 射线强度比值不随吸收材料厚度变化.此时,就无法进行反解.反过来说,如果 γ 射线强度比值的测量不确定度大于吸收材料厚度变化引起的强度比值变化,上述方法也不能应用.该方法应用的条件是 γ 射线强度比值的测量不确定度:

$$|\Delta r(E_{ij})r(E_{ij})| \ll e^{-\Delta\mu_{m_1}\Delta t_{m_1} - \Delta\mu_{m_2}\Delta t_{m_2}} - 1. \quad (17)$$

惰层厚度是非常敏感的武器设计信息,在应用高分辨 γ 探测技术进行核弹头核查时,应避免泄露

此种信息,那就需要采用能谱遮盖技术^[6]等信息屏障技术.

- [1] Du X W 1996 *Science and Technological Groundwork for Nuclear Arms Control* (Beijing: National Defense Industry Press) p128 (in Chinese) [杜祥琬 1996 核军备控制的科学技术基础(北京:国防工业出版社)第 128 页]
- [2] Wu J 1997 *Chinese Journal of Computational Physics* **14** 532 (in Chinese) [伍 钧 1997 计算物理 **14** 532]
- [3] Fetter S and Cochran T B *et al* 1990 *Science* **248** 828
- [4] Tian D F 2000 *Chinese Journal of Computational Physics* **17** 72 (in Chinese) [田东风 2000 计算物理 **17** 72]
- [5] Fetter S *et al* 1990 *Reversing the Arms Race* (Gordon & Breach Science Publishers) p267
- [6] Liu S P, Hu G C, Gong J, Hao F H and Xiang Y C 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1405 (in Chinese) [刘素萍、胡广春、龚 建、郝樊华、向永春 2001 物理学报 **50** 1405]

Analysis of the warhead temper thickness by γ -ray spectra

Xiong Zong-Hua Kang Wu Gong Jian Hu Guang-Chun Xiang Yong-Chun Pei Yong-Quan

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, P. O. Box 919-214, Mianyang 621900, China)

(Received 31 March 2002; revised manuscript received 22 May 2002)

Abstract

The high-resolution γ -ray detection technology is a kind of reliable technologies to verify nuclear warhead. In this paper, the relationship that the γ -ray intensity emitting from warhead varies with the thickness of the absorber is studied by modeling calculation and experimental demarcation. A more compendious method to analyze the temper thickness and its application conditions are also discussed.

Keywords: warhead, γ -ray spectra, temper thickness analysis, verification

PACC: 0150M, 0650D