

主动法探测炸药的实验研究

向永春 熊宗华 胡广春 连仁德 章剑华

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 绵阳 621900)

摘要 阐述了采用主动法探测炸药的原理, 综合分析屏蔽体、自然界本底和反应截面对炸药中 ^1H 、 ^{12}C 、 ^{16}O 和 ^{14}N 核素的测量影响。并利用 ^{252}Cf 中子源辐照模拟炸药半球, 采用高纯锗 γ 探测器探测了由中子与 ^1H 、 ^{12}C 、 ^{16}O 和 ^{14}N 核素发生 (n, γ) 俘获反应产生的 γ 射线。通过实验研究了主动法探测炸药的可行性, 分析了探测 ^1H 、 ^{12}C 、 ^{16}O 和 ^{14}N 四种核素的瞬发 γ 射线的优缺点。

关键词 军控, 主动法, 炸药, 高纯锗 γ 探测器, 俘获反应

中图分类号 O571.42

目前在全世界大约有数万计的核弹头贮存。随着核裁军的进一步深入, 将会有更多的核弹头和核部件要拆卸。在核弹头拆卸过程中, 裂变材料和炸药要进行分离。被核查方考虑到自身核武器的设计秘密, 不可能让核查方在拆卸现场, 而且被拆卸的核材料和炸药都被封装在密封容器内。但是如何能够证明裂变材料和炸药真正分离? 这是一个亟待解决的问题。因此炸药元件核查在核弹头拆卸过程中显得尤为重要。

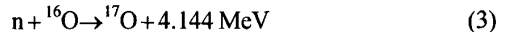
化学炸药存在是证明核弹头存在的属性之一, 如同裂变材料存在一样。但是化学炸药与裂变材料铀钚有所不同, 炸药不能自发辐射, 因此炸药不能用被动探测方法进行核查, 因而炸药的探测比大多数放射性材料的核查更具有挑战性。

主动探测比被动探测具有更大的使用范围, 这种方法是利用中子源辐照探测对象, 探测由 (n, γ) 反应产生的 γ 射线, 它是一种无损探测, 不但可以探测不稳定核素, 而且对稳定核素同样有效。在探测对象不可能或无法直接采用其它检测手段的情况下, 主动探测具有不可替代的优势。在裂变材料(尤其是钚材料)和炸药未分离之前, 可利用钚材料自发裂变中子作为中子源。裂变材料和炸药分离后, 必须采用外中子源辐照炸药元件。本文采用 ^{252}Cf 中子源进行模拟炸药探测实验, 研究主动法探测的可行性。

1 探测原理

炸药一般由 ^1H 、 ^{12}C 、 ^{16}O 和 ^{14}N 等核素组成, 中子与 ^1H 主要核反应有俘获 (n, γ) 、弹性散射 (n, n) 。中子和 ^{12}C 、 ^{16}O 和 ^{14}N 等轻核的主要核反应

有俘获 (n, γ) 、弹性散射 (n, n) 和非弹性散射 (n, n') 。当中子发生弹性散射时, 中子的动能在中子与散射核之间被重新分配。非弹性散射 (n, n') 是阈能反应, ^{12}C 、 ^{16}O 和 ^{14}N 的反应阈能分别约为 4.82 MeV、6.434 MeV 和 4.614 MeV^[1], 只有能量大于其阈能才能发生非弹。而俘获反应 (n, γ) 是无阈能反应, 考虑到 ^{252}Cf 中子源的能谱分布[见公式(5)], 采用俘获反应。其过程如下: 中子与核素 ^1H 、 ^{12}C 、 ^{16}O 和 ^{14}N 发生核反应而发出瞬发 γ 射线, 采用高纯锗 γ 谱仪测量其 γ 射线, 分析 ^1H 、 ^{12}C 、 ^{16}O 和 ^{14}N 核素的存在, 从而探测在该密封容器装有炸药的可能性。中子分别与 ^1H 、 ^{12}C 、 ^{16}O 和 ^{14}N 发生以下反应^[2]:



由 (n, γ) 反应产生的瞬发 γ 能量较高。对高纯锗 γ 谱仪来说: 一方面能够避免自然界本底对测量结果的影响, 但另一方面对较高能量的 γ 射线, 探测器的本征探测效率较低。因此对于以上 γ 射线的探测, 应从以下方面考虑:

(1) 探测对象的选取

理论上, 炸药中 ^1H 、 ^{12}C 、 ^{16}O 和 ^{14}N 的四种核素都可以作为探测对象。实际测量中应考虑以下几个因素: (a) 屏蔽体的影响: 为了减小中子对工作人员的照射剂量, 对较强的中子源要进行必要的屏蔽, 而在中子屏蔽体中一般含有 ^1H 和 ^{12}C , 对测量有一定的影响。(b) 自然本底的影响: 在自然界中, 尤其在空气中含有大量的 ^{16}O 和 ^{14}N , 它们同时参

与 (n,γ) 反应, 对测量有一定的影响。对相同质量 (3.8 kg) 的 ^{14}N , 密度分别为 $0.00129\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (空气) 与 $1.9\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (模拟炸药), MCNP 计算结果表明: 对于中子的俘获分别为 0.077% 和 9.68%。两种相差两个数量级, 因此可以忽略。(c) 反应截面: 中子与 ^1H 、 ^{12}C 、 ^{16}O 和 $^{14}\text{N}(\text{n},\gamma)$ 的反应截面如图 1 所示^[1]。由图 1 看出, 中子与 ^1H 的 (n,γ) 反应截面最大, ^{14}N 的 (n,γ) 反应截面次之, 然后是 ^{12}C , ^{16}O 的反应截面最小。此外还可以看出, 以上核素的 (n,γ) 反应截面较小, 反应截面随中子能量降低而增加, 所以可利用慢化剂慢化中子以增加反应截面。

(2) 中子源的选取

对于主动法, 选择适当的中子源是至关重要的, 首先能够满足探测要求: 如果中子源的强度太低, 在一定的时间内, 高纯锗 γ 谱仪探测到的计数较少; 如果中子源的强度太大, 对中子源的屏蔽带来一定的困难。其次, 要适合现场的操作。本实验中采用 ^{252}Cf 自发裂变中子源作为实验源。其能谱接近纯裂变中子谱, 可用下式描述^[3]:

$$N(E)=2.410\sqrt{E}\cdot\text{e}^{-\frac{E}{1.466}}$$

(5)

式中, E 为中子的能量。

中子源的活度为 $1.77\times10^7\text{ Bq}$, 平均能量 $E=2.158\text{ MeV}$ 。

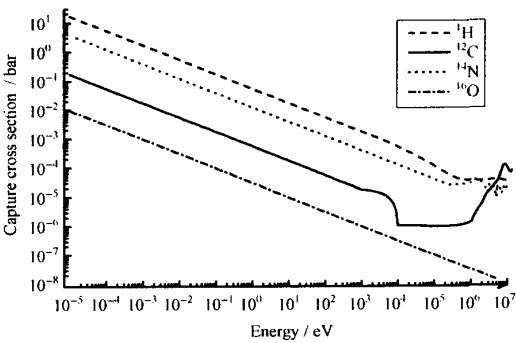


图 1 ^1H 、 ^{12}C 、 ^{14}N 和 ^{16}O 的 (n,γ) 反应截面

Fig.1 Capture cross section of ^1H , ^{12}C , ^{14}N and ^{16}O

2 实验方法

2.1 实验设备

高纯锗 γ 谱仪的技术指标如下: 分辨率 (FWHM) 为 1.80 keV; 相对效率为 30%。其它实验元件见表 1:

表 1 实验元件清单

Table 1 List of experiment components

序号 No.	名称 Name	数量 Quantity	组成与尺寸 Composing and dimension
1	模拟炸药半球 Simulated explosive (MNZY)	2	C:H:O:N=1:2.15:0.44:0.82; 密度 Density: $1.9\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ No.1: $\Phi(10\text{cm},28\text{cm})$, ($\approx 10.4\text{kg}$), No.2: $\Phi(10\text{cm},32\text{cm})$, ($\approx 15.8\text{kg}$)
3	聚乙烯 Polyethylene	2	41 cm×51 cm×3.25 cm
4	中子源筒 Canister of neutron source	1	铁 iron: $\Phi(9.8\text{ cm},10.0\text{ cm})$; 石蜡 paraffin: $\Phi(10.0\text{ cm},50.0\text{ cm})$; 铁 iron: $\Phi(50.0\text{ cm},50.2\text{ cm})$; 硼 boron: $\Phi(50.2\text{ cm},52.2\text{ cm})$; 铁 iron: $\Phi(52.2\text{ cm},52.4\text{ cm})$

2.2 实验步骤

如图 2 所示, ^{252}Cf 中子源置于模拟炸药 (以下简称: MNZY) 半球球心下方 1 cm, 高纯锗 γ 谱仪位于模拟炸药半球的斜上方 45°, 距离炸药半球球心 61 cm, 并保持不变。按照以下步骤以多种模型进行测量 (见表 2):

- (1) 改变模拟炸药的质量: 更换 1 号和 2 号模拟炸药半球。
- (2) 改变中子源的位置: 向下依次从 1 cm 移动中子源到 10 cm, 20 cm。
- (3) 增减中子源和模拟炸药半球之间的慢化

剂: 在中子源上方依次增加 1 块, 2 块聚乙烯板。

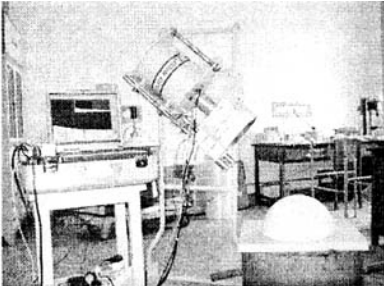


图 2 实验布局图

Fig.2 Experimental layout

3 实验结果

3.1 ¹⁴N 的实验结果与分析

γ射线与物质的相互作用主要有光电效应、康普顿效应和电子对效应^[4]。能量为 10.298 MeV 的 γ射线与锗相互作用时,电子对效应占优势,在 γ能谱中产生明显的双逃逸峰(9.807 MeV)和单逃逸峰(10.318 MeV);而且双逃逸峰和单逃逸峰的计数率有可能大于全能峰。当 γ射线能量越高时,这种效应越明显。图 3 为实验测量 10.829 MeV γ射线的能谱图。

对实验数据进行归一,即在该模型的条件下探测器探测能量为 10.829 MeV γ射线的探测效率 ε如公式(6)所示:

$$\varepsilon(\varepsilon_0, \Omega) = \frac{A}{A_0 \cdot t} \tag{6}$$

式中, A 为在某一能量 γ射线的峰面积计数; t 为测量时间; A₀ 为中子源的活度; ε₀ 为探测器的本征效率; Ω为包括几何位置、物质屏蔽等因子。

具体模型和结果见表 2。从表 2 看出,当中子源位于球心处时,探测效率最大,在 10.835 MeV 探测效率约为 10⁻⁹。当增加慢化体时,由于慢化体吸收部分中子与它的慢化带来的增大截面的效果相比,两者的影响基本相等,因此探测效率并未增加。

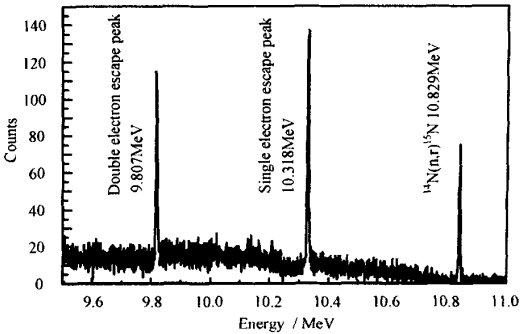


图 3 10.829 MeV γ射线的实验谱图
Fig.3 Experiment energy spectrum of 10.829 MeV γ-ray

表 2 ¹⁴N 的实验结果

Table 2 Experimental results of ¹⁴N

序号 No.	模 型 Model	实验结果 Results of experiment /ε (× 10 ⁻⁹)		
		10.829 MeV	10.318 MeV	9.807 MeV
1	1cm ¹⁾ +MNZY ²⁾ (1)	1.58	4.16	3.65
2	1cm+MNZY(2)	2.55	5.88	5.52
3	2cm+1cm 聚乙烯 ³⁾ +MNZY(2)	1.62	5.84	2.63
4	10cm+MNZY(1)	0.46	1.22	0.50
5	10cm+MNZY(2)	0.79	1.65	0.94
6	11cm+1cm 聚乙烯+MNZY(2)	0.537	0.648	0.552
7	12cm+2cm 聚乙烯+MNZY(2)	0.186	0.241	0.128
8	20cm+MNZY(2)	0.337	0.371	0.135

注: 1) 中子源与模拟炸药半球球心的距离 Distance from neutron source to sphere center of simulated explosive
2) 模拟炸药 Simulated explosive
3) 在模拟炸药与中子源之间加入的屏蔽体 Shield between neutron source and simulated explosive

当炸药质量由 10.4 kg 增加到 15.8 kg 时(两者之比为 1.52 : 1): 10.835 MeV、单逃逸峰 10.324 MeV 和双逃逸峰 9.813 MeV 探测效率同时增大,而且增大程度大约为 1.5 倍(见表 3)。由以上实验可以得知,探测炸药质量成为可能。

改变中子源的位置时,探测效率依次减小(见图 4)。采用最小二乘法实验数据可得出探测效率 ε 与中子源到半球心距离的关系如下式:

$$\varepsilon(x) = 5.52064e^{-0.1778x} \tag{7}$$

表 3 不同位置探测效率与炸药质量(1.52:1)的关系

Table 3 Relative detection efficiencies for different positions and different quantities of explosive

能量 Energy / MeV	ε ₂ : ε ₁ (1 cm)	ε ₂ : ε ₁ (10 cm)
10.829	1.61:1	1.72:1
10.318	1.41:1	1.35:1
9.807	1.43:1	1.88:1

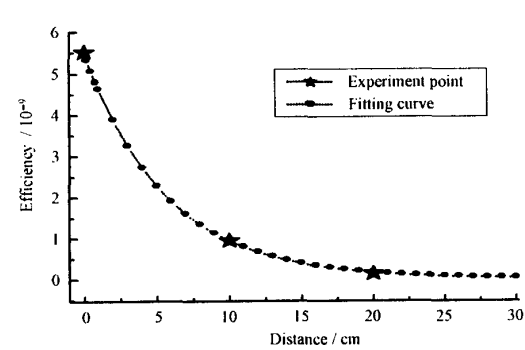


图 4 探测效率与中子源和半球球心距离的关系

Fig.4 Relative efficiency vs. distance from neutron source to sphere center of simulated explosive

3.2 ¹H 和 ¹²C 的实验结果与分析

¹H 和 ¹²C 的实验能谱见图 5，对实验数据进行归一处理，具体模型和结果如表 4。从表 4 看出，中子与 ¹H 反应产生能量为 2.223 MeV 的 γ 射线较

强，在以上模型中，探测效率大于 10⁻⁶。但是在无模拟炸药的情况下，能量为 2.223 MeV 的 γ 射线本底也很强，与有炸药时几乎相当，甚至高于有炸药时的情况。在增加慢化体时，在模型 3 探测效率有所增加；在模型 5、模型 6 和模型 7 中，当增加慢化体时，中子源距离模拟炸药较远，由于慢化体吸收部分中子与它的慢化而带来增大截面效果相比，前者大于后者，因此探测效率反而减小。

中子与 ¹²C 反应产生能量为 4.946 MeV 的 γ 射线较弱（见表 4），在以上模型中，探测效率大于 10⁻⁹。在各种模型中，探测效率的变化趋势与 2.223 MeV γ 射线的基本相同。

对 ¹H 和 ¹²C 核素的探测，难点在于本底的影响。在中子的屏蔽体中，不可避免的要用到含有 ¹H 和 ¹²C 核素的物质，这对于 ¹H 和 ¹²C 的测量极为不利。对 ¹H 和 ¹²C 核素本底的处理一般采用重元素物质进行屏蔽，例如：4 cm 铅可屏蔽掉大约 88% 的能量为

表 4 ¹H 和 ¹²C 实验结果

Table 4 Experimental results of ¹H and ¹²C

实验结果 Results of experiment					
序号 No.	模型 Model	H: 2.223 MeV		C: 4.946 MeV	
		结果 Results	本底 ¹⁾ Background	结果 Results	本底 Background
		(× 10 ⁻⁶)		(× 10 ⁻⁹)	
1	1cm + MNZY (1)	6.83		9.73	
2	1cm + MNZY (2)	5.44	5.55	10.9	9.53
3	2cm + 1cm 聚乙烯 + MNZY (2)	6.33		13.5	
4	10cm + MNZY (1)	4.64		13.0	
5	10cm + MNZY (2)	4.12		9.14	
6	11cm + 1cm 聚乙烯 + MNZY (2)	3.90	5.79	11.7	18.2
7	12cm + 2cm 聚乙烯 + MNZY (2)	3.79		9.96	
8	20cm + MNZY (2)	3.15	4.73	9.53	14.1

注：1）除模拟炸药和慢化剂（聚乙烯）外，产生的射线均认为本底
γ-rays are considered as background except that γ-rays are produced from explosive and polyethylene

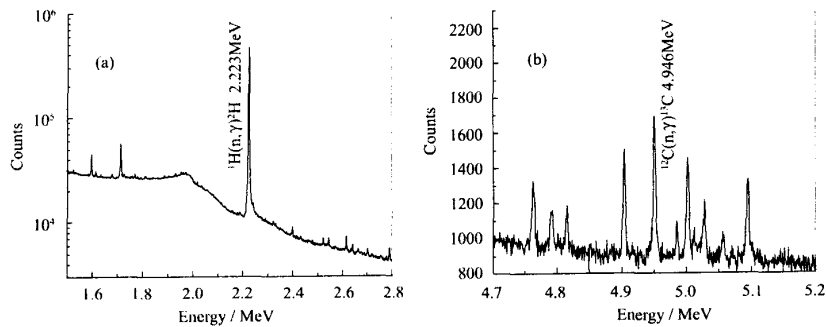


图 5 2.223 MeV (a) 和 4.946 MeV (b) γ 射线的实验谱图

Fig.5 Experiment energy spectra of 2.223 MeV (a) and 4.946 MeV (b) γ-ray

2.223 MeV 的 γ 射线和 85% 的能量为 4.946 MeV 的 γ 射线, 钨的屏蔽效果更好, 同样厚度的钨, 可屏蔽掉大约 96% 的能量为 2.223 MeV 的 γ 射线和 95% 的能量为 4.946 MeV 的 γ 射线。

4 讨论

研究了主动法探测炸药的可行性, 从实验可以得出: 在 ^1H 、 ^{12}C 、 ^{16}O 和 ^{14}N 四种核素中, 首选 ^{14}N , 因由 $^{14}\text{N}(\text{n}, \gamma)^{15}\text{N}$ 反应产生能量为 10.835 MeV 的 γ 射线, 能量高, 本底影响很小 (可以忽略), 不足之处在于反应截面较小, 需要较强的中子源和探测效率较高的探测器或延长测量时间。

其次是 ^1H , 与 ^{14}N 相比, ^1H 的优势在于反应截面大; 不足在于受到本底的影响较大。如果对本底采取屏蔽等措施后, 探测效果有可能好于 ^{14}N 。 ^{12}C 相比 ^1H 和 ^{14}N 不具有优势, 但可用来作为旁证, 计算炸药中的元素之比。

在以上的测量中, 没有探测到由 $^{16}\text{O}(\text{n}, \gamma)^{17}\text{O}$ 反应产生的能量为 4.144 MeV 的 γ 射线, 由于 ^{16}O 的 (n, γ) 反应截面太小, 因此无法利用 ^{16}O 进行炸药探测。

在实际的情况下, 探测对象除炸药之外, 含有其他材料 (如外包装等), 给对炸药的探测识别造成一定难度, 因为在其它大部分有机材料中也含有 ^1H 、 ^{12}C 、 ^{16}O 和 ^{14}N 四种核素, 对探测炸药探测造成干扰, 分析难度增大。解决此类问题在于计算探

测对象中的 ^1H 、 ^{12}C 、 ^{16}O 和 ^{14}N 四种核素之比, 因为炸药中的元素之比不同其他大部分有机材料^[5-6], 此类问题将进一步研究。

参考文献

- 1 Nouri A, Nagel P. OECD Nuclear Energy Agency (<http://www.nea.fr/janis>)
- 2 卢希庭, 陈志才, 陈进贵编. 核素数据手册. 北京: 原子能出版社, 1981. 6—12
LU Xiting, CHEN Zhicai, CHEN Jingui. Handbook of Nuclide data. Beijing: Atomic Energy Press, 1981. 6—12
- 3 汲长松. 中子探测实验方法, 北京: 原子能出版社, 1998. 28—30
JI Changsong. Experimental method of detecting neutron, Beijing: Atomic Press, 1981. 28—30
- 4 复旦大学, 清华大学, 北京大学合编. 原子核物理实验方法, 北京: 原子能出版社, 1997. 54—65
Fudan University, Tsinghua University, Peking University. Experimental method of atomic physics, Beijing: Atomic Energy Press, 1997. 54—65
- 5 Andy Buffler. Contraband detection with fast neutrons. Radiation Physics and Chemistry, 2004, 71: 853—861
- 6 Vourvopoulos G, Womble P C. Pulsed Fast/thermal neutron analysis: a technique for explosives detection. Talanta 2001, 54: 459—468

Detecting dynamite by active method

XIANG Yongchun XIONG Zonghua HU Gungchun ZE Rende ZHANG Jianhua

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

Abstract In this paper, the principal and techniques of activity interrogating the explosives have been illuminated. Some factors affecting the results have been analyzed. We adopted high pure germanium γ -detector to measure γ -ray from the simulated dynamite irradiated by ^{252}Cf neutron source. The feasibility of the method was and analyzed and advantages and shortages of detecting ^1H , ^{12}C , ^{16}O and ^{14}N were discussed.

Key words Army control, Active detection, Explosive, HPGe γ -detector, Capture reaction

CLC O571.42