

隐藏爆炸物的快中子活化检测

丁锡祥 李宇兵 翟光年
杨小芸 伍永顺 丁声耀

(中国原子能科学研究院计量测试部, 北京, 102413)

用 2 种不同产额中子源, 检测有无炸药时行李箱不同位置氮、氧元素的 0.511、6.13 MeV γ 能谱及其比值, 确定检测灵敏度和检速, 给出不同氮、氧含量的炸药与非炸药材料的平面分布, 讨论检测方法的安全性及快中子活化分析(FNAA)系统的整体设计。

关键词 爆炸物 快中子活化 核技术检测

近年来世界各地的恐怖活动极为频繁, 劫机绑架事件层出不穷。所谓塑料武器和无形炸弹似乎已是他们采用的主要手段, 它既无金属部件又具有可塑性; 既具有完善的隐藏方法又采用难于探测的新材料和爆炸机制。目前, 利用 X 射线检查, 可以有效地查出金属武器和其他密度和造型具一定特征的违禁物品。由于炸药密度和常见的许多物品相近, 因而难于用 X 射线进行检查。多能量 X 射线检查虽可区分被检物是有机物还是无机物, 但对炸药, 特别是散装炸药和可塑性炸药尚不能有效地鉴别。高能 γ 射线用于炸药中特征元素的探测和成像仍然处在研究阶段。尽管 γ 束聚焦好, 可以作精确位置扫描, 确定炸药的形状和位置, 但其灵敏度低, 且要求高通量 γ 射线, 这会造成放射性污染以及高能中子和 γ 射线的干扰。

隐藏炸药的中子检测是核技术的新应用。该方法是研究入射粒子与检测对象物中单个原子相互作用的产物来发现爆炸物的存在, 它可以解决诸如化学嗅探器、质谱法, 添加法等不易解决的一些难题。美国科学应用国际公司利用热中子分析(TNA)原理已研制了若干台实用检测装置^[1], 显示出核技术不但从原理上且在实用上已解决了隐藏爆炸物的检测。快中子检测隐藏爆炸物方法是当前被较多关注的核探测手段, 国际上也在竞相研究^[2-5]。快中子活化分析方法(FNAA)^[6]已有所报道, 它与 TNA 法比较, 具有多元素同时分析、无需经过中子慢化、 γ 射线的探测避开了中子和 γ 辐射场、中子穿透力强、适于大块物质分析和残留放射性低等优点。该方法可单独或与其它方法配合使用。

1 实验

1.1 基本原理和装置

收稿日期: 1994-03-02 收到修改稿日期: 1994-05-04

当前使用的各类商用和军用炸药中,就其成份而言,都包含有(15—35)%的氮和(30—60)%的氧。其中,氮的含量相对其它非炸药材料都高。当用 14 MeV 快中子照射时,将发生 $^{14}\text{N}(n, 2n)^{13}\text{N}^*$ 和 $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}^*$ 反应。

其中, $^{13}\text{N}^*$ 和 $^{16}\text{N}^*$ 分别经 β^+ 和 β^- 衰变到基态,放出 0.511 和 6.13 MeV 的 γ 射线,半衰期分别为 9.96 min 和 7.12 s。上述反应都具有延迟发射的特点,这样,可将待检物体经中子照射后移到一定距离处,再用探测器记录 γ 辐射,使探测器处于中子辐射及其产生的瞬时 γ 本底场之外。中子环境活化本底降低,则对氮、氧的检测有更为明显的效应。

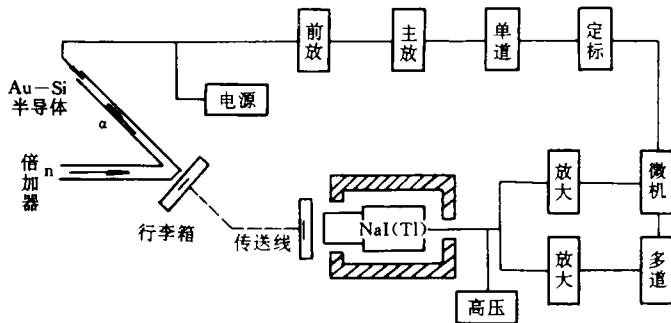


图 1 测量装置示意图

Fig. 1 Experimental schematic diagram

实验装置示于图 1。Au-Si 面垒探测器记录反应伴随 α 粒子,有 90° 和 135° 2 种讯号输出, α 计数用于行李箱中子辐照量的归一。行李箱尺寸为 $800\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 200\text{ mm}$,箱内装有杂物、聚合物、织物和 TNT 炸药。箱的一侧标有 13 个探测位置,炸药置于箱子的中部 13 号位置。简易传送装置将行李箱由辐照位置传送到探测位置,传送时间约 3 s。将 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ NaI(Tl) 探测器置于 50 mm 厚铅屏蔽室中,探测器可随意定位测量行李箱不同位置上的氮和氧的计数,讯号经放大后送入 8192 道分析器并获取净峰面积,由微机作数据处理。

1.2 中子辐照与测量

1.2.1 γ 能与氮氧比测量 由高压倍加器 D-T 反应产生 14 MeV 中子,在约 $5 \times 10^9\text{ s}^{-1}$ 中子产额下,各照射 13 s,行李箱紧靠靶头,对 30、110、300 g TNT 在 3 个位置测得 15 s 内 γ 射线谱及无炸药情况下的本底谱(图 2)。测量时,行李箱紧靠探测器。

在 10^{11} s^{-1} 中子产额下辐照 9 s,在行李箱一侧对 60 g TNT 测量了 13 个位置 12 s 内的氮、氧计数,对 110、300 g TNT 炸药仅测量 13 号位 12 s 内的氮、氧计数,最后求得氮与氧计数比率。

1.2.2 各种材料中氮和氧的 γ 发射率 不同材料有不同的氮、氧含量。在 10^{11} s^{-1} 中子产额下,利用快速传送跑免装置系统,将样品送到紧靠靶头位置,照射 9 s 后将样品再送到 15 m 以外的 HPGe 探测器上测量,传送时间 3 s,测量 12 s。先后测量了 TNT 等 6 种炸药材料。数据经探测器效率校正后求得不同材料氮、氧 γ 发射率,经重量归一后示于图 3。图中同时示出一般日用品以作比较。

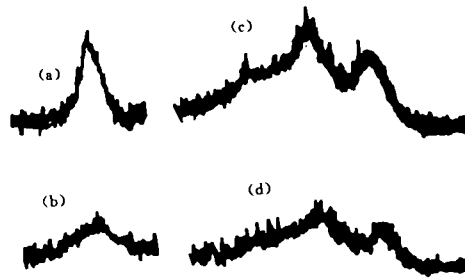


图 2 110 g TNT 时 0.511 和 6.13 MeV 的效应(a, c)与本底(b, d)谱
 Fig.2 0.511, 6.13 MeV energy spectra of effect (a, c) at 110 g TNT and background (b, d) spectrum

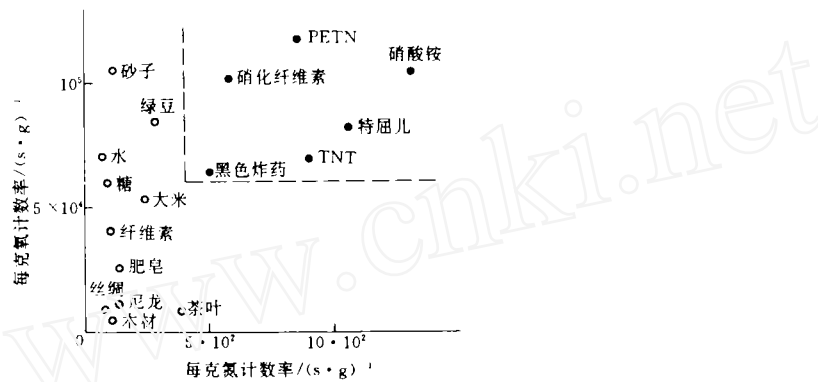


图 3 炸药和非炸药材料氮、氧计数强度间的关系
 Fig.3 Relationship between the intensity of nitrogen and oxygen counts for explosive and non-explosive materials

2 结果和讨论

图 2 中所示 a, b 分别表示有、无 TNT(110 g)炸药情况下 0.511 MeV 的效应与本底谱。0.511 MeV 本底主要来自环境本底, 某些 Cu、Fe 等金属、非金属材料如 Cl、F 等元素的(n, 2n)反应产生的 β⁺衰变和 C、O 元素的(p, n)、(p, α)次级反应生成的¹³N 而发射的 γ 射线的贡献。次级反应引起的贡献很小, 可以忽略。实测情况表明, 本底约占效应的 0.2。图中 c, d 分别表示 110 g TNT 炸药的 6.13 MeV 效应和本底谱。测量表明, 效应与本底比较为明显, 含氧材料是本底的主要来源。中子检测炸药的主要依据是含氮量高。表 1 所列炸药中的氮的平均密度为 0.026 ± 0.012 mol/cm³。如果只以氮作为甄别标志, 则遇少数高氮物品容易引起误检。炸

药中氧的平均密度是 $0.050 \pm 0.009 \text{ mol/cm}^3$, 但氧本身在炸药检测中不是特别有用的, 如果考虑氮、氧元素的相关性, 可以提高检测的可靠性。图3表示各种炸药与非炸药材料单位时间和重量内氮、氧 γ 强度的平面分布。由图3可见, 炸药材料基本处于某一特定的区域。利用氮、氧在不同位置的分布及其密度信息可以作出对炸药的分辨。图4表示行李箱一侧不同位置氮、氧 γ 计数比率。测得计数业经效率校正。除13号位外, 平均比值为0.018。有炸药时平均比值约为0.032, 明显高于本底。由图4可见, 当炸药量大于100 g时, 其氮、氧计数比已明显可辨, 因此, 可定出探测下限为100 g TNT。

表1 各种炸药的化学成份

Table 1 Chemical composition of explosives

序号	名称	各元素原子百分数/%				序号	名称	各元素原子百分数/%			
		C	H	N	O			C	H	N	O
1	黑色火药	23.70	0	14.08	42.23	8	环三亚甲基三硝胺	14.29	28.57	28.57	28.57
2	硝化甘油	15.00	25.00	15.00	45.00	9	三硝基甲苯	33.33	23.81	14.29	28.58
3	三硝基苯	33.33	16.67	16.67	33.33	10	环四亚甲基四硝基胺	15.38	30.77	23.08	30.77
4	三硝基苯酚	31.58	15.79	15.79	36.84	11	硝基胍	10	40	30	20
5	三硝基苯甲基硝胺	25.00	20.83	20.83	33.33	12	季戊四醇四硝酸酯	17.24	27.59	13.79	41.38
6	三硝基萘	45.45	27.27	9.09	18.18	13	炸药	15.61	25.31	14.59	44.48
7	硝胺炸药	0	44.44	22.22	33.33						

整体而言, FNAA 装置应由4部分组成: 中子产生器, 传送系统, 探测器及电子学线路, 数据获取、处理、自动控制及显示报警系统。FNAA 装置可与当前机场多能量 X 射线检查系统(MEX)装置实行互补配接, 分成3个区: X 射线透视检查、快中子活化和 γ 射线探测区。由3条独立的输送皮带完成行李箱的传送, 由1台主控微机实行控制。探测器可采用“C”型多探头阵列, 由3台微机全自动控制数据获取、处理和传输。只有在线检测的3部分同时工作, 装置才具有

最高的检测效率。MEX 系统用于检测金属武器及提供有关材料密度信息, FNAA 系统将0.511、6.13 MeV γ 能峰计数值的箱位提供给 MEX 系统检查员注意, 同时求得氮、氧 γ 发射率平面分布位置及对其 γ 强度比值和综合密度信息作进一步判断。

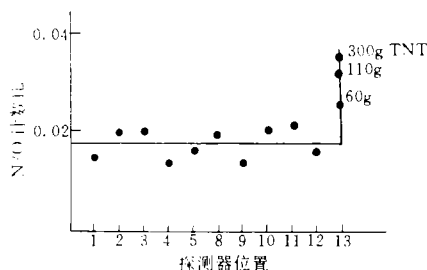


图4 行李箱不同位置 N、O 计数比

Fig.4 Count ratio (N/O) of the baggage at different place

FNA装置 的检速受限于氮的半衰期。本实验条件下检测每件行李约需 15 s。提高中子产额可得到更高的检速。

安全要求中的重要一条是不对操作人员及普通公众造成不必要的辐射伤害。就 D-T 反应而言,若中子产额为 10^{10}s^{-1} ,照射 12 s,在 20 cm 处平均辐射剂量为 $9.8 \times 10^{-3}\text{Sv}$ 。从活化剂量看,放射 6.13 MeV 的 ^{16}N 核在 1 min 内全部死光,不构成任何辐射危害。 ^{13}N 核在 1 h 内衰变,按所用炸药量及照射 1 min 后行李包表面总剂量远小于环境本底剂量值 $1.7 \times 10^{-9}\text{Sv}/\text{min}$ 来看,活化剂量是很小的,不会构成辐射伤害。

宋全勋同志对本工作曾提供有益的建议和帮助。

参 考 文 献

- 1 Shea P, Gozani T. A TNA Explosives-detection System in Airline Baggage. NIM Physics Research, 1990, A299: 444 - 448.
- 2 Grodzins L. Nuclear Techniques for Finding Chemical Explosives in Airport Luggage. NIM Physics Research, 1991, B 56/57: 829 - 833.
- 3 Lyon WS. Analytically Speaking. J Radioanal Nucl Chem Letters, 1990, 146: 145-159, 211 - 214.
- 4 Hussein EMA, Lord PM, Bot DL. An Empirical Fast-Neutron Technique for Detection of Explosive-like Materials. NIM Physics Research, 1990, A 299: 453 - 457.
- 5 Gordon CM, Peters CW. A Fast-Neutron Probe for Tomography and Bulk Analysis. Appl Radiat Isot, 1990, 41:1111 - 1116.
- 6 Ye Zongyuan, Li Yubing, Ding Shengyao, et al. A Method for Detecting Explosives. J Radioanal Nucl Chem, 1991, 151:409 - 415.

FAST NEUTRON ACTIVATION MEASUREMENT OF EXPLOSIVES CONCEALED

DING XIXIANG LI YUBING ZHAI GUANGNIAN
YANG XIAOYUN WU YONGSUN DING SHENGYAO

(Division of Radiometrology, China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275, Beijing, 102413)

ABSTRACT

Spectra of 0.511 MeV γ -ray of nitrogen and 6.13 MeV γ -ray of oxygen and their ratio are measured by using two neutron sources of different yield for explosive or non-explosive materials. Sensitivity and detecting speed are determined. A planar distribution of the explosive or non-explosive materials with different contents of nitrogen and oxygen is given. The whole design and security of detection method of fast neutron activation analysis system is discussed for explosives concealed.

Key words Explosive substance Fast-neutron activation Nuclear technique measurement