

利用标记中子检测墙体内爆炸物

侯晶晶, 沈 星, 朱鹏飞, 马 瑞, 景士伟

(东北师范大学 物理学院, 吉林 长春 130024)

摘 要:利用 14 MeV 标记中子发生器、 $\phi 76 \text{ mm} \times 76 \text{ mm}$ 硅酸钇镨(LYSO) γ 探测器及时间分辨率约 1.7 ns 的快电子学系统搭建实验装置, 获得了 D-T 中子作用下空气、墙体 10 cm 和 15 cm 深处以及硝铵和 TNT 模拟物分别在这些环境中的瞬发 γ 能谱. 计算了 ^{13}C , ^{14}N , ^{16}O 的元素特征峰计数, 并讨论了爆炸物在不同环境下的分辨方式.

关键词:标记中子; γ 能谱; 元素含量; 爆炸物

中图分类号: O571.53; X932

文献标识码: A

文章编号: 1005-4642(2017)10-0010-04

近年来, 国际恐怖主义组织的影响在不断扩大, 在全球化背景下, 遏制国际恐怖主义的传播和发展已经成为各国都要面对的重要问题^[1-4]. 爆炸源的隐藏方式多种多样, 能够提前探测到爆炸源并及时做出处置, 可以把爆炸案件消灭在未遂状态. 目前国际上发展以中子为探针来检测爆炸物的方法, 其中主要分为热中子分析法和快中子分析法 2 种. 热中子分析法对富含 N 的样品有一定优势, 但也因周围环境的 N 元素存在而受干扰. 相对于热中子, 快中子具有穿透能力强的特点, 通过近十几年来快中子检测技术的发展, 基于 D+T 反应的伴随粒子成像技术较其他快中子分析方法有许多优点, 最大的优势是抗干扰和空间分区检测, 因而备受研究者关注.

标记中子技术近年来发展很快, 该技术通过检测 α 粒子与 γ 射线的符合谱, 大大降低了测量本底, 并且可以对爆炸物的位置进行定位, 是一项非常有前景的爆炸物检测技术^[5-7]. 本文采用标记中子法(Tagged neutron method, TNM), 对爆炸物所含元素 C, N, O 以及爆炸物所处的空气和墙体环境进行了瞬发 γ 谱测量, 并且对其进行了分析.

1 实验原理

标记中子技术中, 配备有多像素 α 探测器的中子发生器是核心设备. 在中子发生器内, 加速

的 D 离子与靶中的 T 核发生 $t(d, n)\alpha$ 反应, 产生各向同性的 14 MeV 中子. 每产生 1 个中子, 都相应会产生 1 个 α 粒子. 在质心坐标系中, $t(d, n)\alpha$ 的核反应产生的 α 与 n 在 180° 方向为一一对应, 在时间上相关联. 位置灵敏的 α 探测器可以探测出 α 粒子的运动方向, 因而会给出中子的方向信息. 探测器所张的立体角也相应会给出伴随中子出射的锥形区域, 当中子与元素反应发生在这个锥形区域内时, 生成的 γ 射线可以被探测到.

当与 α 粒子相关联的中子与样品发生反应后, 一部分中子直穿出样品, 该部分中子在强度上减弱, 但是时间上仍然与 α 粒子相关联; 另一部分中子与样品发生反应, 产生瞬发 γ 射线, 因中子与物质作用产生瞬发 γ 射线的时间极短($10^{-17} \sim 10^{-16} \text{ s}$), 因此在时间上与 α 关联, 而其他中子产生的 γ 射线在时间上与该部分 α 粒子不关联, 形成本底. 通过 γ 与 α 信号符合测量, 获得 γ 射线飞行时间谱, 通过时间窗可以选出与 α 粒子相关联的中子产生的瞬发 γ 射线, 获得样品特征 γ 谱线, 同时很大程度降低本底 γ , 以便于对 γ 谱进行分析^[7-14].

2 实验装置

实验系统如图 1 所示, 装置主体为手提箱式设计($93 \text{ cm} \times 66 \text{ cm} \times 47 \text{ cm}$), 内有伴随粒子中子

收稿日期: 2017-06-19

作者简介: 侯晶晶(1994—), 女, 山西代县人, 东北师范大学物理学院 2014 级本科生.

指导教师: 景士伟(1975—), 男, 辽宁葫芦岛人, 东北师范大学物理学院副教授, 博士, 主要研究方向为中子发生器研制及射线应用.



发生器系统、硅酸钆镨(LYSO)探测系统、快电子学系统(包括多道分析器)等。手提箱主体固定在可移动式小车上,可以移动至可疑墙体处进行检测。控制分析系统(笔记本电脑)通过单根网线与主体相连接。2个 $\phi 76\text{ mm} \times 76\text{ mm}$ 的 LYSO 探测器分别位于中子发生器一侧,外有 2 cm 厚铅准直器,探测器与中子发生器发射单元之间用 15 cm 厚钨板隔开,以避免中子对探测器的直接照射。



图 1 实验系统

3 实验结果

实验选取了 2 种爆炸物硝铵和 TNT 的模拟物,分别测量在空气中、墙体 10 cm 和 15 cm 深处 C,N,O 3 种元素的瞬发 γ 谱,并测量相应的本底谱。硝铵和 TNT 模拟物在空气、墙体 10 cm 和 15 cm 深处的 γ 能谱如图 2~4 所示。可看出,C 元素的 4.43 MeV 特征峰及 O 元素的 6.13 MeV 特征峰都非常明显。

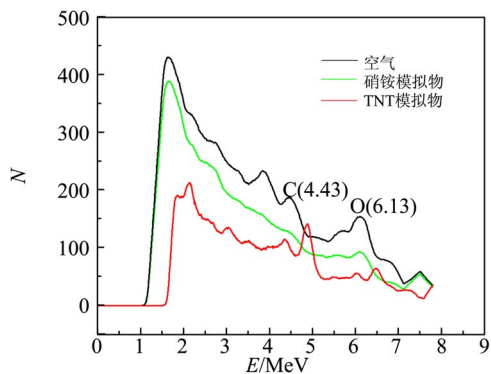


图 2 硝铵和 TNT 模拟物在空气中的 γ 能谱图

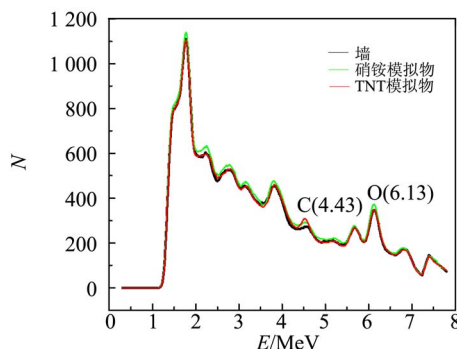


图 3 硝铵和 TNT 模拟物在墙体 10 cm 深处的 γ 能谱图

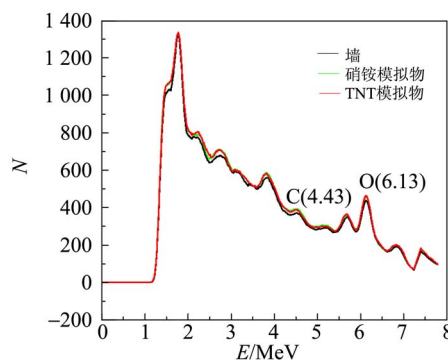


图 4 硝铵和 TNT 模拟物在墙体 15 cm 深处的 γ 能谱图

4 爆炸物判定

根据所测得的能量谱计算 C,O,N 3 种元素的计数,并且分别求出 2 个 γ 探测器所分别对应的第 2,3,5,6 个 α 探测器的 $N(C) : N(O)$, $N(N) : N(O)$, $N(C) : N(C+O+N)$, $N(N) : N(C+O+N)$, $N(O) : N(C+O+N)$ 的值^[9](注:下文用元素符号之比表示计数比),及各自的误差,利用某一确定的条件下环境与爆炸模拟物的各项计数比的差别判断环境中是否存在硝铵和 TNT 模拟物。

实验数据处理采用了宽能窗和窄能窗进行爆炸模拟物的判定,宽能窗用 C,N,O 各元素所在峰的峰面积表示元素含量,峰面积比表示相应元素含量比,窄能窗所取范围是宽能窗范围的中间区域,其包含了相应元素的大部分信息。宽能窗 C 元素峰面积计算取值为 575~632 道,N 元素取值为 657~700 道,O 元素取值为 777~847 道。窄能窗 C 元素取值为 584~613 道,N 元素取值为 671~685 道,O 元素取值为 784~823 道。

利用宽能窗 N/O 值判断墙体 10 cm 深处的爆炸模拟物见图 5,可以看出硝铵模拟物与 10 cm

墙的 N/O 值中 8 个数据全部存在显著差异,即认为有 8 个有效数组,TNT 模拟物与 10 cm 墙的 N/O 值不存在显著差异,即有 0 个有效数组. 因此可通过宽能窗的 N/O 的值判断墙体 10 cm 深处的硝铵,无法判断墙体 10 cm 深处的 TNT.

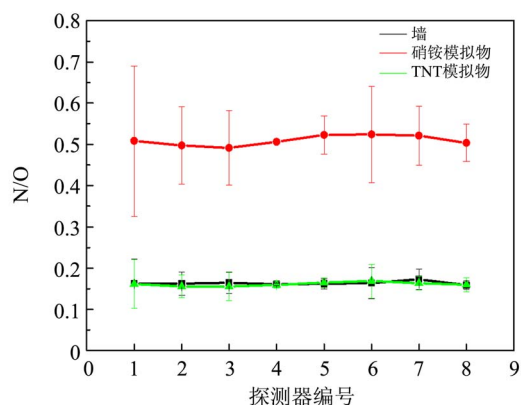


图 5 利用宽能窗 N/O 判断墙体 10 cm 深处爆炸模拟物

利用窄能窗 N/O 的值判断墙体 10 cm 深处的爆炸模拟物如图 6 所示,由图 6 可以看出硝铵和 TNT 模拟物与 10 cm 墙的 N/O 值中,各自都只有 1 组数据存在显著差异,即认为各自有 1 个有效数组,因此无法通过窄能窗的 N/O 的值判断墙体 10 cm 深处的硝铵与 TNT. 在算法中认为

有 2 组或者 2 组以上的数据存在明显性差异便可以判断相应环境中的爆炸物,否则认为该方法无法判断出此种情况是否存在爆炸物.

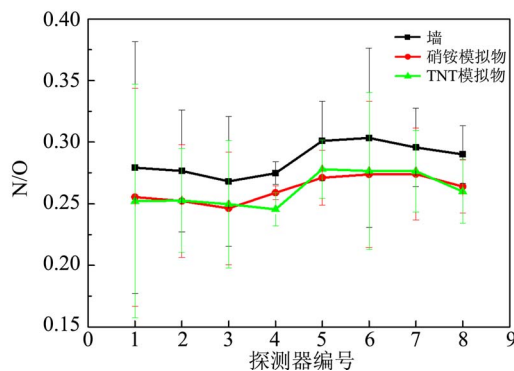


图 6 利用窄能窗 N/O 判断墙体 10 cm 深处爆炸模拟物

用同样的方法得出在空气中、墙体 10 cm 和 15 cm 深处用 C/O, N/O, C/(C+N+O), N/(C+N+O), O/(C+N+O) 分辨爆炸物的有效组数,见表 1. 可以看出用不同指标判断不同环境下不同爆炸物的有效数据不尽相同. 用窄能窗处理时,最多只有 1 组数据存在明显差异,因此用窄能窗无法有效判断爆炸物,用宽能窗处理时,N/O, C/(C+N+O), N/(C+N+O), O/(C+N+O) 计数比可有效判断环境中的爆炸物.

表 1 爆炸模拟物分辨有效组数

能窗	环境	爆炸物	有效组数				
			C/O	N/O	C/(C+N+O)	N/(C+N+O)	O/(C+N+O)
宽能窗	空气	硝铵模拟物	0	4	0	4	0
		TNT 模拟物	0	4	0	4	0
	墙体 10 cm 深处	硝铵模拟物	1	8	1	8	4
		TNT 模拟物	1	0	0	1	1
	墙体 15 cm 深处	硝铵模拟物	0	0	0	0	0
		TNT 模拟物	0	8	2	8	2
窄能窗	空气	硝铵模拟物	0	0	0	0	0
		TNT 模拟物	0	0	0	0	0
	墙体 10 cm 深处	硝铵模拟物	0	1	0	1	0
		TNT 模拟物	0	1	0	1	0
	墙体 15 cm 深处	硝铵模拟物	0	0	0	0	0
		TNT 模拟物	0	0	0	0	0

5 结论

建立了利用标记中子方法检测墙体内爆炸物

的实验测量系统,并且开展了相应的测量研究,获得了 D-T 中子作用下空气中、墙体 10 cm 和 15 cm 深处以及硝铵和 TNT 模拟物分别在这些

环境中的瞬发 γ 谱. 通过宽能窗和窄能窗取峰面积法分别处理了各种条件下 γ 谱中的 C, N, O 峰面积, 进而利用爆炸物在环境中的 C/O, N/O, C/(C+N+O), N/(C+N+O), O/(C+N+O) 的数值之间的差异判断相应环境中是否存在爆炸物. 在宽能窗中可以判断出空气中、墙体 10 cm 深处的硝铵模拟物, 以及墙体 15 cm 深处 TNT 模拟物的存在, 但不同环境下判断不同的爆炸物依据的方式不尽相同, 在宽能窗的情况下无法通过这些方式判断出墙体 10 cm 深处的 TNT 模拟物和墙体 15 cm 深处的硝铵模拟物, 在窄能窗的情况下无法通过这些方式有效地判断出环境中存在的爆炸物.

参考文献:

- [1] Pesente S, Nebbia G, Lunardon M, et al. Detection of hidden explosives by using tagged neutron beams with sub-nanosecond time resolution [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2004, 531(3): 657-667.
- [2] 郑博斐. 全球化背景下国际恐怖主义组织的传播转型[J]. 信息安全与通信保密, 2017(4): 23-28.
- [3] 安健飞, 成彬彬, 桑子儒, 等. 基于目标极化特性的人体隐藏危险品检测方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(7): 1612-1618.
- [4] 梁永磊, 黄寅生, 钮雪冰, 等. 典型爆炸物探测技术研究现状与发展[J]. 中国安防, 2015(22): 74-78.
- [5] 景士伟, 郭勇, 郑玉来, 等. 标记中子法检测包裹内爆炸物[J]. 核电子学与探测技术, 2015, 35(7): 721-725.
- [6] Sudac D, Matika D, Valkovic V. Identification of materials hidden inside a sea-going cargo container filled with an organic cargo by using the tagged neutron inspection system [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2008, 589(1): 47-56.
- [7] 郭海萍, 郑普, 安力, 等. 爆炸物检测中典型样品的瞬发 γ 谱测量[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(9): 2429-2432.
- [8] 徐四大, 朱维彬. 检测爆炸物和毒品的伴随粒子成像方法[J]. 原子能科学技术, 1998, 32(6): 482-486.
- [9] 安力, 何铁, 郭海萍, 等. 伴随粒子法瞬发 γ 能谱测量技术研究[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(S1): 15-18.
- [10] 何铁, 陈渊, 安力, 等. α 粒子散射对爆炸物检测时间分辨的影响[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(10): 2437-2440.
- [11] Donzella A, Bodini I, Zenoni A, et al. Experimental validation of MCNP simulations for the EURITRACK tagged neutron inspection system [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2007, 261(1/2): 291-294.
- [12] 杨祎罡, 李元景, 王宏渊, 等. 基于 14 MeV μ s 脉冲中子发生器与 NaI(Tl) 和 BGO 闪烁探测器的爆炸物检测系统的研制[J]. 同位素, 2005, 18(1): 34-38.
- [13] 徐四大. 伴随粒子成像及其应用[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 1997, 10(2): 60-61.
- [14] 郑玉来, 王强, 杨璐, 等. 基于快中子伴随 α 粒子方法的爆炸物检测技术的蒙特卡罗方法模拟[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(10): 1175-1178.

Inner-wall detection of explosives using tagged neutron

HOU Jing-jing, SHEN Xing, ZHU Peng-fei, MA Rui, JING Shi-wei
(School of Physics, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract: The tagged neutron method was used to detect explosives. The experiment device was set up using 14 MeV tagged neutron generator, LYSO gamma ray detector and fast electronics system with time resolution about 1.7 ns. The prompt gamma energy spectra were obtained under the action of D-T neutron in air, 10 cm and 15 cm wall body, and ammonium nitrate and TNT simulants in these environments. After the analysis of the count areas of ^{12}C , ^{14}N , ^{16}O , the distinguishment of the explosive in the specific environment was discussed.

Key words: tagged neutron; γ energy spectra; element content; explosive

[责任编辑:任德香]