

# 伴随粒子法瞬发 $\gamma$ 能谱测量技术研究

安力, 何铁, 郭海萍, 阳剑, 郑普, 王新华,  
陈渊, 牟云峰, 朱传新, 杨小飞

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 采用伴随 $\alpha$ 粒子符合方法测量了水、石墨、液氮样品的  $^{16}\text{O}$ 、 $^{12}\text{C}$ 、 $^{14}\text{N}$  核素以及硝酸铵、三聚氰胺、尿素和模拟样品的 D-T 中子作用的非弹瞬发  $\gamma$  谱, 利用反卷积对化合物的脉冲幅度谱进行了解谱, 实验获得的元素份额与其化学成分比在 10% 内相符。

**关键词:** D-T 中子源; 伴随 $\alpha$ 粒子技术; 特征瞬发  $\gamma$

中图分类号: O571.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931 (2010) S0-0015-04

## Prompt $\gamma$ Energy Spectrum by Associated Particle Technique

AN Li, HE Tie, GUO Hai-ping, YANG Jian, ZHENG Pu, WANG Xin-hua,  
CHEN Yuan, MOU Yun-feng, ZHU Chuan-xin, YANG Xiao-fei

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

**Abstract:** The basic principle of associated alpha particle technique and the measurement system were introduced. The characteristic prompt gamma-rays coming from water, graphite, liquid nitrogen, ammonium nitrate, melamine and simulated samples induced by D-T neutron from generator were gained by single alpha particle detector and gamma-ray detector. The complex gamma-ray spectra were deconvolved. The element ratio between the experiment and chemic molecular formula is agreement in 10%.

**Key words:** D-T neutron source; associated alpha particles technique; prompt gamma-rays

准确、灵敏、非破坏性探测爆炸物的技术和方法是爆炸物品的快速检测最为关心的问题。快中子具有穿透能力强的特点, 与原子序数大于 5 的核作用均可产生特征 $\gamma$ 射线, 而爆炸物主要由 C、N、O 元素组成, D-T 源中子与这些核素作用均产生其特征 $\gamma$ 射线。同时爆炸物的 C、N、O 份额与普通物品有差异, 据此可甄别爆炸物。

通常测量 D-T 中子与爆炸物样品中 C、N、O 等核素作用产生的非弹特征 $\gamma$ 射线时, 由于中

子与样品周围的环境作用产生远大于样品本身的 $\gamma$ 射线, 导致信噪比差, 不便于分析。在  $\text{T}(\text{d}, \text{n})\alpha$  反应中, 利用伴随粒子成像技术, 选取由 $\alpha$ 粒子标记的中子作用的非弹 $\gamma$ 射线, 大大提高信噪比<sup>[1-2]</sup>, 并可实现对空间不同区域的测量, 因此, 备受研究者关注。美国、俄罗斯、欧盟等采用该技术进行了爆炸物探测研究<sup>[3]</sup>, 国内清华大学<sup>[4]</sup>、中国原子能科学研究院<sup>[5]</sup>开展过相关研究。本文采用该技术对 D-T 中子与爆炸物模拟样品作用产生的非弹 $\gamma$ 能谱进行测量。

收稿日期: 2010-06-29; 修回日期: 2010-08-30

作者简介: 安力 (1973—), 男, 四川仪陇人, 副研究员, 硕士, 核物理专业

## 1 伴随粒子成像实验原理

在  $T(d, n)\alpha$  核反应中,  $\alpha$  与  $n$  在时间上是相关联的。与  $\alpha$  相关联的中子与物质发生反应产生瞬发  $\gamma$ , 中子与物质作用产生瞬发  $\gamma$  的时间极短 (约  $10^{-16} \sim 10^{-17}$  s), 因此, 在时间上  $\gamma$  与  $\alpha$  也是相关联的, 而其它中子产生的  $\gamma$  在时间上与  $\alpha$  不关联, 形成本底, 通过  $\gamma$  与  $\alpha$  信号的符合测量, 获得  $\gamma$  的相关时间谱, 通过时间窗可选出与  $\alpha$  粒子相关联的瞬发  $\gamma$ , 获得样品的特征  $\gamma$  谱线, 同时很大程度降低不相关的  $\gamma$  本底, 有利于对  $\gamma$  谱的分析。伴随  $\alpha$  粒子技术实验原理如图 1 所示。

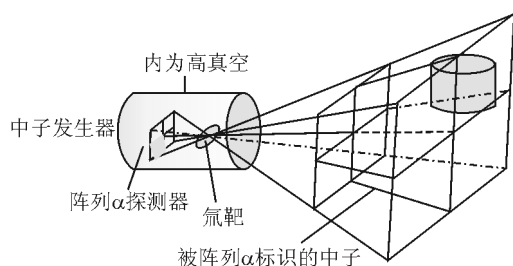
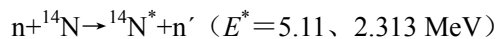
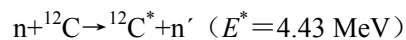
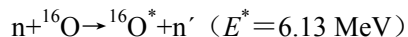


图 1 伴随  $\alpha$  粒子技术测量原理

Fig. 1 Measurement principle of associated  $\alpha$  particle technique

D-T 中子与 C、N、O 3 种元素发生非弹散射产生特征瞬发  $\gamma$  的主要反应道如下:



特征瞬发  $\gamma$  能量大于 2 MeV, 能穿透较厚的材料对隐藏爆炸物进行探测。

## 2 实验测量系统

测量系统由中子源、伴随  $\alpha$  粒子探测器和  $\gamma$  射线探测器组成。

### 2.1 $\alpha$ 谱仪

为获得一定立体角内的中子与被检测对象相关联, 所标识的中子对应的  $\alpha$  粒子必在一定的立体角内, 且距源较近, 因此要求  $\alpha$  粒子探测器为快时间响应; 又因  $\alpha$ - $\gamma$  符合测量,  $\alpha$  粒子探测器的上升时间越小越有利于时间分辨。图 2 为计数约为  $10^6$  时的  $\alpha$  能谱。

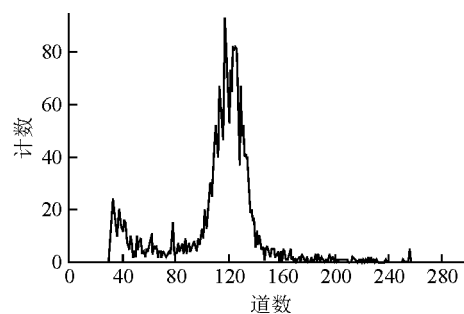


图 2  $\alpha$  粒子幅度谱

Fig. 2 Spectrum of  $\alpha$  amplitude

### 2.2 $\gamma$ 探测器

为了获得一定统计效果的  $\gamma$  谱和较好的空间分辨, 要求  $\gamma$  探测器在高效率、高计数率情况下, 具有优良能量分辨和时间分辨。要求光电倍增管为高计数率, 优良能量分辨是为了能区分各元素的特征峰, 时间分辨好更能准确反映中子穿行厚度, 提高系统的空间分辨率。实验选用  $\phi 5'' \times 8''$  的 NaI (Tl) 晶体配 XP4512 型号光电倍增管作为  $\gamma$  探测器, 从阳极引出的快信号为时间测量信号, 上升时间约为 40 ns, 幅度约为 50~70 mV, 打拿极输出作为能量测量。

### 2.3 测量系统

图 3 示出了单路  $\alpha$ 、 $\gamma$  测量系统方框图。  $\alpha$  探测器获取的快信号和  $\gamma$  探测器获取的快信号通过常份额甄别器进入时间-幅度转换器, 可获得  $\alpha$ - $\gamma$  符合的  $\gamma$  时间谱, 在时间谱上选取来自样品的  $\gamma$  峰作为时间窗与  $\gamma$  能谱在线性门相符合, 获得样品的瞬发  $\gamma$  谱。为避免源中子直照到  $\gamma$  探测器上和周围大量的  $\gamma$  进入探测器,  $\gamma$  探测器外用 10 cm 厚的铅屏蔽。

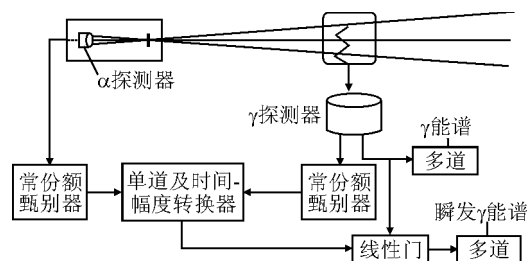


图 3 测量系统方框图

Fig. 3 Schematic diagram of measurement system

### 3 实验研究

利用 D-T 中子源, 测量水、石墨、液氮<sup>[6]</sup>、硝铵、三聚氰胺、尿素和模拟样品的 D-T 中子作用的非弹瞬发  $\gamma$  谱。

采用 1.8 L 的保温杯进行氮样品的瞬发  $\gamma$  谱测量, 石墨样品尺寸为  $6.5\text{ cm} \times 6.5\text{ cm} \times 24\text{ cm}$ , 水与硝铵、三聚氰胺、尿素和模拟样品均用  $\phi 8\text{ cm} \times 15\text{ cm}$  的塑料瓶盛装。

实验布置示意图如图 4 所示, 铁锥屏蔽体屏蔽直接照射到  $\gamma$  探测器的源中子,  $\gamma$  探测器用 10 cm 的铅屏蔽周围的  $\gamma$  射线。  $\gamma$  探测器测量得到的  $\alpha$ - $\gamma$  符合的  $\gamma$  时间谱包括 4 部分: 与铁锥屏蔽体下部分作用产生的  $\gamma$ 、与被检测对象作用

产生的  $\gamma$ 、中子与被检测对象及其铝支撑板散射后再与探测器作用产生的  $\gamma$ 、标识中子产生的  $\gamma$ 。图 5 为水、石墨、氮样品对应的  $^{16}\text{O}$ 、 $^{12}\text{C}$ 、 $^{14}\text{N}$  核素以及尿素样品的特征非弹瞬发  $\gamma$  谱。

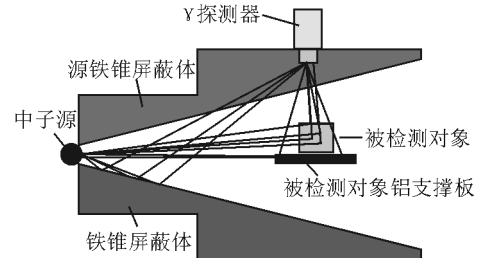


图 4 实验布置示意图

Fig. 4 Layout of experimental assembly

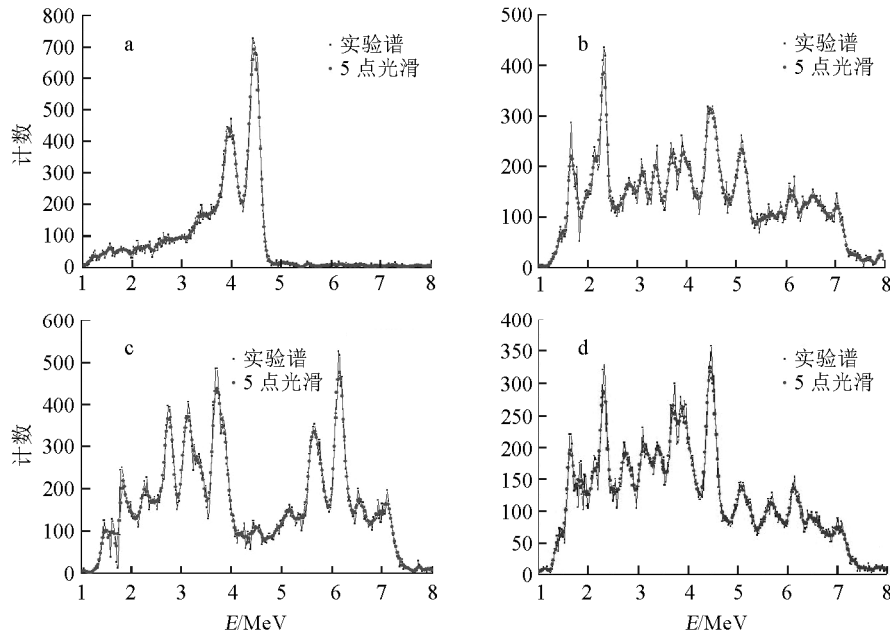


图 5 样品的特征非弹瞬发  $\gamma$  谱

Fig. 5 Inelastic prompt  $\gamma$  energy spectrum form different samples

a——石墨样品; b——液氮样品; c——水样品; d——尿素样品

### 4 数据处理

对实验测量的硝铵、三聚氰胺、尿素和模拟样品（化学式为  $\text{CHNO}$ , 元素组成为 1 : 1 : 1 : 1) 的 D-T 中子作用的非弹瞬发  $\gamma$  谱利用  $^{16}\text{O}$ 、 $^{12}\text{C}$ 、 $^{14}\text{N}$  核素的标准样品谱进行反卷积处理。对图 5 中 C、N、O 核素的非弹特征  $\gamma$  谱归一到相同的量。其中, 尿素中 C、N、O 的比例为 0.347 9 : 0.723 1 : 0.374 9, 三聚氰胺中 C、N

的比例为 0.541 8 : 1.210 1。尿素实验测量的结果 C/N、O/N 比值与化学式  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  中的比值相差 4%, 三聚氰胺实验测量的 C/N 比值较化学式  $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$  中的比值小 9%。

### 5 结论

建立了实验测量系统并开展了相应的测量技术研究。获得了 D-T 中子作用下 C、N、O

元素和几种化合物的非弹特征 $\gamma$ 谱, 利用反卷积对实验数据进行了初步处理, 该测试技术和数据处理方法为后期通过 C/O、N/O 鉴别爆炸物奠定了基础。下一步将进一步完善样品谱的实验测量和数据处理。

#### 参考文献:

- [1] NEBBIA G, PESENTE S, LUNARDON M, et al. Performance of a tagged neutron inspection system (TNIS) based on portable sealed generator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2004, 533: 475-480.
- [2] BLAGUS S, SUDAC D, VALKOVIC V. Hidden substances identification by detection of fast neutron induced  $\gamma$  rays using associated  $\alpha$  particle technique [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2004, 213: 434-438.
- [3] CARASCO C, PEROT B, BERNARD S. In-field tests of the EURITRACK tagged neutron inspection system [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2008, 588: 397-405.
- [4] 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.
- XU Sida, ZHU Weibin. Explosive and drugdetecting method based on associated particle maging[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1998, 32(6): 482-486(in Chinese).
- [5] 沈冠仁. 中子飞行时间法及其应用[M]. 北京: 原子能出版社, 2008: 109-111.
- [6] PEROTA B, CARASCOA C, BERNARDA S. Measurement of 14 MeV neutron-induced prompt gamma-ray spectra from 15 elements found in cargo containers[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2008, 66: 421-434.