

脉冲快中子探测隐藏爆炸物的研究

李培俊 陈琅轩 赖炳泉 徐俊波 宋哲明 何成喜
范泽辉 胡进光 李爱萍 郝有观 力光伦
(应用电子学研究所 成都 610003)

摘要 本文简要介绍中国工程物理研究院应用电子学所近年来在中子探测隐藏爆炸物研究方面的主要进展。

关键词 脉冲快中子, 非弹散射, 炸药探测。

1 引言

如何探测旅客行李中的无隐藏爆炸物, 是多年来世界各国安检部门十分关注的问题之一。自70年代后期国外就开始这方面的研究, 经过十多年的探索, 在炸药探测方面取得了显著的进展, 提出了多种探测方案, 先后研制出了几种不同类型的探测系统。这些探测系统经过机场试验考核, 达到了一定的技术指标, 但都还不甚完美。现在, 新的探测方法和中国探测系统仍在不断研究之中。

最近几年, 我们承担了“八五科技攻关项目”中子探测炸药技术方案的研究, 经过理论分析和实验论证, 认为用小型密封管脉冲中子发生器产生的14MeV脉冲快中子与行李箱中的物品作用探测非弹 γ 射线的方法是可行的, 可以达到预定的探测目标。

2 基本原理研究

首先研究了日常用品与各种炸药的差别。从化学成分上分析, 绝大多数日常用品的化学成分是C、H、N、O四种元素, 不同的物品C、H、N、O的含量也不同。而爆炸物通常指各种炸药, 其化学成分也主要是C、H、N、O。炸药和日常用品的差异首先在于炸药分子中O、N原子的含量比日常用品的含量高, 绝大多数炸药中O原子的相对含量在25%以上, 而日常用品中O的相对含量在15%以下。其次, 炸药与日常用品相比, 炸药的密度比日常用品的高, 一般在 $1.6(\text{g}/\text{cm}^2)$ 以上, 而日常

用品的密度相对比较低。

基于以上分析, 认为炸药探测可从两方面入手, (1)探测元素含量; (2)测定物质密度。以核为基础的探测方法就是通过核相互作用探测物质中不同元素的相对含量。

我们选择了用14MeV脉冲快中子与行李箱中的物品作用, 探测非弹散射 γ 射线方法来分析物品中O、N元素的相对含量, 以识别炸药的存在与否。

众所周知, 氘氚反应产生14MeV快中子



快中子与C、H、N、O元素的核相互作用可产生弹性散射 (n, n) 、非弹性射 (n, n') , 产生带电粒子的核反应如 (n, p) 、 (n, α) 和 (n, t) 等, 以及辐射俘获反应 (n, γ) , 但反应截面不尽相同。14MeV快中子与C核作用, 除了 (n, n) 和 (n, n') 反应截面较高外, 其它反应的截面都很小; 与H核作用除 (n, n) 反应外, 不发生 (n, n') 反应, (n, γ) 反应的截面也很小; 而与O、N核相互作用, (n, n') 反应的截面相对比较高。所以把 (n, n') 反应看作主要的反应道是合理的。表1列出14.1MeV快中子与C、N、O三种元素的核相互作用的主要反应道, 反应截面及产生的 γ 射线能量。

可以看出: (1)O原子的 (n, n') 反应中, 6.13MeV γ 射线的反应截面最高, 其次是产生6.92和7.12MeV γ 射线的反应道; (2)N原子的 (n, n') 反应中, 5.11和2.31MeV γ 射线的两个反应截面较高; (3)C原子的 (n, n') 反应只产生4.43MeV γ 射线的反应道, 且

截面高,但O原子的 $(n, n'\alpha)$ 反应也产生4.44MeV γ 射线,且截面约是C的1/4,不可忽略.可见,把6.13MeV和5.11MeV非弹 γ 射线作O和N元素的特征 γ 射线,测定它们的 γ 射线脉冲数可得到其元素含量的信息.

表 1

反应道	反应截面 (mb)	γ 射线能量 (MeV)
$^{12}\text{C}(n, n'\gamma)^{12}\text{C}^*$	21.6	4.43
$^{14}\text{N}(n, n'\gamma)^{14}\text{N}^*$	24.3	7.03
$^{14}\text{N}(n, n'\gamma)^{14}\text{N}^*$	12.1	6.47
$^{14}\text{N}(n, n'\gamma)^{14}\text{N}^*$	43.6	5.11
$^{14}\text{N}(n, n'\gamma)^{14}\text{N}^*$	55.1	2.31
$^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$	16.4	6.09
$^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}^*$	19.8	4.45
$^{16}\text{O}(n, n'\gamma)^{16}\text{O}^*$	67.0	7.12
$^{16}\text{O}(n, n'\gamma)^{16}\text{O}^*$	56.5	6.92
$^{16}\text{O}(n, n'\gamma)^{16}\text{O}^*$	171	6.13
$^{16}\text{O}(n, n'\gamma)^{16}\text{O}^*$	59.8	2.74
$^{16}\text{O}(n, n'\alpha)^{12}\text{C}^*$	29.3	4.44
$^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N} \rightarrow ^{16}\text{O}^*$	130.7	6.13

问题在于,当14MeV快中子和行李箱中的物品作用时,除产生非弹 γ 射线外,还存在 (n, p) 和 (n, α) 等反应,使靶原子核激活,产生活化衰变 γ 射线.另外,快中子在行李箱中可能慢化成热中子,H核在其作用下的 (n, γ) 反应截面较高,产生2.22MeV的俘获 γ 射线,而N原子核在其作用下也要产生多组能量的俘获 γ 射线.实际情况是,非弹 γ 射线、活化衰变 γ 射线和俘获 γ 射线都混在一起.

为了将非弹 γ 与其它活化、俘获 γ 射线区分开,研究了几种 γ 射线产生的时间关系.非弹 γ 射线是在 (n, n') 反应瞬间产生的,俘获 γ 射线是在快中子经弹性、非弹性散射慢化成热中子后才产生,因此比非弹 γ 射线滞后 $10^{-6} \sim 10^{-3}\text{s}$,而活化衰变 γ 射线出现的时间在 (n, p) 和 (n, α) 等反应后 10^{-3}s .就是说,从时间上可将非弹 γ 与其它 γ 射线分开.

采用脉冲中子源,脉冲持续时间小于俘获 γ 射线、活化 γ 射线出现的时间,就可基本上将非弹 γ 射线分开.

3 探测方法研究

1)脉冲中子源的选择.采用小型密封管脉冲中子发生器为中子源, (d, t) 反应产生14MeV快中子.该发生器的优点是体积小,装卸灵活方便,中子脉冲宽度 $1\mu\text{s}$,重复频率20kHz,脉冲中子产额 $1 \times 10^9\text{n/s}$.为使中子行李箱内照射均匀,采用两只中子发生器分别装在行李箱的上方和下方.

2)探测器阵列.由BGO探测器组成的探测器阵列分别装在行李箱的两侧,每个探测器的前端装有重金属构成的准直器,以减少来自周围其它物质的散射 γ 射线的影响.

3)信号处理.探测器输出的脉冲信号经前放后送入信号处理器进行处理,使只有幅度大小在探测范围内的脉冲信号才能通过并被成形,这样可以滤除无关的信号,抑制堆积,减小死时间的影响.

4)门控制器,是与中子脉冲同步的时间门.在中子脉冲持续时间内,门是畅开的,来自信号处理器的信号可通过;中子脉冲结束后,时间门关闭,信号不能通过.这样,通过时间的主要是非弹 γ 射线形成的脉冲信号.

5)辐射屏蔽.除入射到行李箱上的中子外,其它方向出射的中子与周围其它物质作用也要产生不同能量的 γ 射线,其中的一部分可能散射到探测器形成本底脉冲.此外,14MeV快中子与发生器周围物质产生 (n, n) 和 (n, n') 反应后的散射中子也可能进入探测器形成本底脉冲.为减少本底干扰的影响,对中子发生器和探测器阵列进行中子、 γ 射线辐射屏蔽且不致产生较高能量的 γ 射线.

6)脉冲幅度分析.探测器输出的脉冲信号经过处理器、时间门以后,虽然剔除了探测范围以外的脉冲,但是由于较高能量的 γ 射线与BGO晶体的晶格原子相互作用,康普顿

效应截面较高,光电效应的截面最小,即使是单一能量的 γ 射线入射,输出脉冲幅度谱线也有几个峰,且光电峰不明显,尤其是O的6.13MeV γ 射线的二次逸峰恰恰和N的5.11MeV全能峰重合,因此N和O的特征 γ 射线脉冲数不易分开.采用脉冲幅度分析器分析经过时间门以后的脉冲信号,由微型计算机进行数据处理,分析探测器阵列中每个探测器所对应的行李箱体积之内O和N原子相对含量,判断是否有炸药存在.

4 实验研究

实验只用了一只密封管中子发生器,脉冲宽度 $2\mu s$,重复频率20kHz,脉冲产额达 $5 \times 10^7 n/s$.探测器采用 $\Phi 75 \times 50mm$ 的BGO,用BF₃计数器作脉冲中子监测,中子源和探测器的屏蔽体由石蜡和钨材料组成.由于采用了自制的信号处理器和时间门控制器,较好地抑制了信号堆积,探测系统的死时间控制在5%以下.实验证实,在中子脉冲期间,非弹门

输出的绝大多数脉冲信号是非弹 γ 射线的信号.图1为BGO探测器测得的行李箱中有无炸药两种条件下的 γ 射线谱.

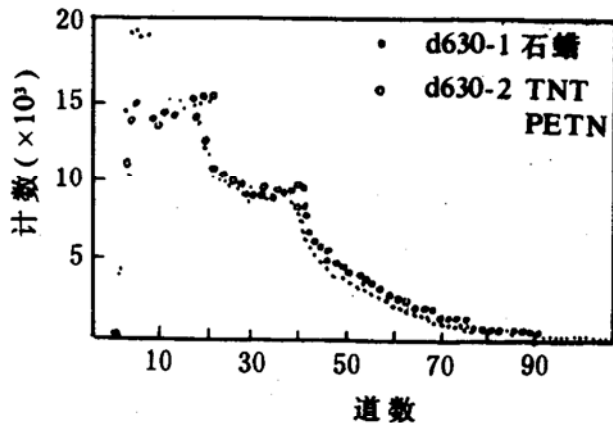


图1 BGO探测器测得石蜡和炸药 γ 射线谱比较

参 考 文 献

- 1 Shea P, et al. Nucl. Instr and Meth., 1990, A299:444
- 2 Rhodes E, et al. IEEE Ns-39, 1992, 4:1041

Study on Hidden Explosive Detection by Pulse Fast Neutrons

Li Peijun · Chen Langxuan · Lai Bingquan · Xu Junbo · Song Zhemin · He Chenxi

Fan Zehui · Hu Jinguang · Li Aipin · Hao Youguan · Li Guanglun

(Institute of Applied Electronics, Chengdu 610003)

Abstract The main recent progress of study on hidden explosive detection means of pulse fast neutrons in the Institute of Applied Electronics, CAEP, is introduced.

Key Words pulse fast neutron, inelastic scatter, explosive detection.