

检查隐藏爆炸物的快中子分析方法*

徐四大 齐并荃 陈泽民 陈迎堂

(清华大学物理系, 北京 100084)

摘要 讨论了快中子分析检查隐藏爆炸物的原理、特点、主要技术关键和研究进展。

关键词 快中子, 爆炸物检查

Abstract The basic principles, important characteristics, key technique and recent development on fast neutron analysis for detecting concealed explosives were reviewed in this paper.

Key words fast neutron, explosives detection

洛克比空难引发的国际争端在几年后的今天仍未了结;约 280 名乘客和村民的惨死悲剧仍在新闻传媒中出现。经过英、美两国数千名专家和军人日夜奋战后查明,此次空难是由捷克斯洛伐克制造的塞姆泰克斯(SEMTEX)型塑性炸药造成的。恐怖分子将这种炸药置于皮箱内的收录机与衣物中。由于塑性炸药的元素组成和密度与常用物品没有明显的差别,又可以捏成任何形状,机场的 X 光射线检查装置未将它查出,被送上了飞机,引发了空难悲剧。还应指出,塞姆泰克斯型塑性炸药的挥发性极弱(无味),气体成分分析仪器,或者探嗅器(“电子狗”),亦对它无能为力。

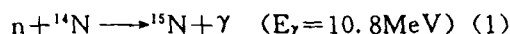
洛克比空难留给人们惨痛的教训。为使炸机事件不再发生,必须在机场就把经过可能实现伪装的任何种类炸药检测出来,绝不让其进入机舱内。利用中子进行检测乃是最有效的方法^[1,2]。中子的穿透力极强可以透过行李与各种包装,直接与炸药中的原子核相互作用,确定它的存在。

本文将首先简要讨论热中子分析方法后,重点讨论快中子分析方法。

1 热中子分析(TNA)^[3]

用热中子检查爆炸物乃是基于炸药中氮的

含量(单位体积中氮原子数)高于(或不同于)普通物品,其基本原理是利用热中子引起的下列反应:



用 γ 能谱仪测量能量 $E_\gamma = 10.8\text{MeV}$ 的 γ 射线,即可确定 ${}^{14}\text{N}$ 的含量,识别爆炸物。

反应(1)的截面很小,仅 10mb。但是,由于它产生的 γ 射线能量很高,测量并不困难;用多个 γ 探头组成阵列,还可以确定氮含量的空间分布,给出爆炸物的轮廓图象。法国已研制成了 TNA 型成套仪器,并已投入试用。采用 Cf-252 中子源,检测灵敏度约为 600g TNT。美国也制成了类似仪器,亦在试用中。

TNA 方法是利用炸药中含氮量高于(或不同于)常规物品来确定爆炸物的存在。但是,却有不少常见物品的含氮量接近于或者高于炸药。在表 1、表 2 中列出了炸药和部分常见物品的含氮量。可以发现,密胺、尿素三聚氰胺甲醛等有机物的含氮量高于炸药,认为含氮量高于某一定值的物品即为炸药的方法必然带来严重的误检。另外,脲甲醛与铵油炸药,聚酰氨树脂与苦味酸炸药,腈纶与 TNT 等的含氮量很接近,仅用含氮量多寡不可能区别它们。还应指

* 1995 年 4 月 13 日收到。

出,物品内的含氮量,即单位体积内氮原子数与物体的密度密切相关,同一种物品,如果以颗粒

状散装,单位体积内氮原子数将明显下降,直接影响 TNA 的检测效力.

表 1 炸药中 N,C,O 含量及其比例

炸 药	含量($\times 10^{22}/\text{cm}^3$)			原子比		
	N	C	O	N/C	O/C	N/O
特屈儿 $\text{C}_8\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_8$	1.75	2.10	2.80	0.83	1.33	0.63
梯恩梯 $\text{C}_7\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_6$	1.32	3.07	2.64	0.43	0.86	0.50
季戊炸药 $\text{C}_5\text{H}_8\text{N}_4\text{O}_{12}$	1.22	1.53	3.66	0.80	2.41	0.33
硝化纤维素 $\text{C}_{11}\text{H}_{15}\text{N}_5\text{O}_{12}$	0.88	2.11	3.52	0.42	1.67	0.25
黑火药 $\text{KNO}_3 + \text{C} + \text{S}$	0.67	0.67	2.00	1.0	3.0	0.33
铵油炸药 NH_4NO_3	2.40	0.0	3.60	∞	∞	0.67
硝化甘油 $\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_9$	1.27	1.27	3.81	1.0	3.0	0.33
黑索金 $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$	2.96	1.48	2.96	2.0	2.0	1.0
苦味酸 $\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_7$	1.40	2.80	3.27	0.50	1.17	0.43
奥托金 $\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_8$	2.68	1.34	2.68	2.0	2.0	1.0

表 2 常见有机物品中 N,C,O 含量及其比例

有 机 物	含量($\times 10^{22}/\text{cm}^3$)			原子比		
	N	C	O	N/C	O/C	N/O
涤纶 $\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{O}_4$	0.0	3.65	2.19	0.0	0.60	0.0
锦纶 $\text{C}_7\text{H}_{13}\text{NO}$	0.54	3.78	0.54	0.14	0.14	1.0
腈纶 $\text{C}_3\text{H}_3\text{N}$	1.33	3.99	0.0	0.33	0.0	∞
维纶 $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_2$	0.0	3.58	1.79	0.0	0.5	0.0
丙纶 C_3H_6	0.0	3.87	0.0	0.0	0.0	
聚氨脂 CHNO_2	1.53	1.53	3.06	1.0	2.0	0.5
聚氨基甲酸酯橡胶 CHNO_2	1.02	1.02	2.04	1.0	2.0	0.5
有机玻璃 $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$	0.0	3.59	1.43	0.0	0.4	0.0
聚酰胺树脂 CHNO	1.47	1.47	1.47	1.0	1.0	1.0
尼龙-9 $\text{C}_9\text{H}_{17}\text{NO}$	0.41	3.69	0.41	0.11	0.11	1.0
尼龙-6 $\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO}$	0.60	3.61	0.60	0.17	0.17	1.0
卡普纶 $\text{C}_{11}\text{H}_{21}\text{NO}$	0.38	4.13	0.38	0.09	0.09	1.0
尼龙-7 $\text{C}_7\text{H}_{13}\text{NO}$	0.52	3.65	0.52	0.14	0.14	1.0
密胺 $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_3$	4.51	2.26	0.0	2.0	0.0	∞
脲甲醛 $\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_2\text{O}$	2.50	2.50	1.25	1.0	0.5	2.0
尿素三聚胺甲醛 $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{N}_4\text{O}$	3.40	2.55	0.43	1.33	0.17	8.0
三聚胺甲醛 $\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_4$	3.28	3.28	0.0	1.0	0.0	∞

2 快中子分析(FNA)原理

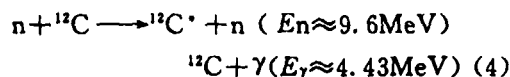
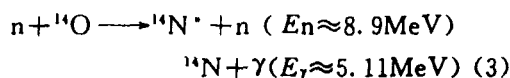
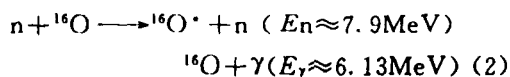
如前所述,仅用一种元素氮的含量很难区分炸药与普通物品,但是在炸药与普通物品中

氮、碳和氧等三种元素的含量总是可以存在明显的差别.表 1 和表 2 给出了相应的计算结果.由氮、碳和氧的含量可以计算它们之间的比值,比值列在表 1 和表 2 中(即 N/C, O/C 和 N/O).应当强调的是,这些比值对于识别炸药更有意义,因为它们不受密度的影响.可以发

现,炸药与普通物品相比,氮和氧含量都比较高,因此,氮/碳比(N/C),氧/碳比都较大.显然,只要测出碳,氮和氧的含量,并计算出它们的比例,即可很有效地区分炸药与常见物品.由表1,2可以发现,特屈儿炸药与聚氨脂制品元素含量和比值数据相对靠近,较难区分它们.即使如此,在测量误差为20%(对于O,C)和40%(对于N)的情况下,我们计算得到特屈儿的检出率在99%时,误检率仅为5%.

FNA就是同时测出待测物中C,N,O含量一种检查爆炸物的方法.

FNA的基本原理.将待测物(例如行李)通过由(d,T)反应产生的约14MeV的快中子场,快中子与待测物中C,N,O原子核作用,产生核反应:



这些反应的截面分别为~170mb,~60mb,~190mb,比热中子反应(1)截面10mb高得多.用 γ 能谱仪测量上述反应产生的非弹性散射特征 γ 射线能谱,由 γ 峰面积即可确定C,N,O的含量,并计算出相应的比值,识别炸药与普通物品.

3 快中子分析的关键技术和研究进展

用快中子分析(FNA)方法检测爆炸物,需要测量快中子与C,N,O原子核相互作用产生的非弹性散射特征 γ 射线能谱,其谱形复杂;同时又在较强的快中子场中进行测量,存在严重的杂散中子和 γ 射线的干扰,因此,FNA涉及的技术问题较为复杂.

目前FNA方法主要有两种类型:第一种类型,是采用脉冲式工作的中子管为中子源,较大体积的BGO晶体为 γ 射线探测器,并以大数

量的 γ 探头组成阵列,实现探测的位置灵敏.中国工程物理研究院已采用这种类型的FNA方法进行检测爆炸物研究.这种类型的FNA方法的主要优点在于采用现已研制成功的中子管,适当提高中子产额即可.但是这种类型FNA方法存在严重的局限性:为了便于 γ 谱的分析和获取较好的计数统计性,需采用大体积的BGO晶体,而采用大体积BGO晶体,必然造成探测的位置分辨的下降,其结果是检测爆炸物的灵敏度较低.

快中子分析(FNA)方法的第二种类型是伴随粒子快中子飞行时间谱技术与位置灵敏 α 探测的结合,现在讨论它的主要技术关键和研究进展.

3.1 伴随粒子快中子飞行时间谱技术

FNA方法利用反应 $d + T \longrightarrow {}^4\text{He} + n$ 为中子源.在此反应中,产生的 α 粒子与中子在时间上是同时的,在空间上是一一对应的.采用伴随 α 粒子快中子飞行时间谱技术,即同时测量 α 粒子和中子与O,N和C原子核反应(2),(3)和(4)产生的 γ 射线,并确定它们之间的时间关系,则可以由 α 粒子的位置与相应的时间特性确定待测物中与中子相互作用的O,N,C原子核的空间坐标.因此,具有位置灵敏伴随 α 粒子飞行时间谱技术的快中子分析是一种具有空间分辨本领的爆炸物检测方法.我们的实验表明,空间分辨不难达到 $6 \times 6 \times 9\text{cm}^3$,检测炸药的灵敏度可以在500g以内(炸药密度通常为 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$).如果采用快响应的伴随 α 粒子探测器,空间分辨可望达到 $6 \times 6 \times 6\text{cm}^3$,检测炸药灵敏度即为300g左右.

3.2 排除干扰

排除干扰在快中子物理研究中具有特殊地位.飞行时间谱技术的采用使FNA方法具有极强的抗干扰能力.选用时间响应快、能量分辨率高和对中子灵敏度低的 BaF_2 晶体探测 γ 射线,完善地屏蔽中子源,可以十分有效地降低杂散中子与 γ 射线的干扰.在我们的实验中,采用了上述排除干扰措施后,杂散中子和 γ 射线干

物理

扰明显下降,能够清晰地测出快中子与C,N和O原子核作用产生的 γ 射线能谱.

3.3 长寿命中子管

研制带有伴随 α 粒子探测器的长寿命中子管是FNA方法的一个关键问题.在中子管上配置位置灵敏的 α 粒子探测器不会有困难.目前国外已生产的靶面积为 10cm^2 的普通中子管的中子产额在 10^{12} 中子/s,寿命达到500—1000h^[4].在FNA中,为获得好的空间分辨,靶面积应在 0.1cm^2 左右,但是,中子产额仅 5×10^8 中子/s即可,因此,用于FNA的中子管的寿命达到500—1000h是能够实现的.最近,美国阿贡国家实验室(ANL)^[5]已制成了第一批带有 α 探测器的中子管,当产额为 10^7 中子/s时,寿命已达到200h.

FNA方法虽然在技术上比TNA方法复杂,但它能同时测定C,N和O的含量,亦能获得相当高空间分辨本领,具有更强的识别爆炸物能力和更低的误检率.国外已开始研制这种查爆设备.国际民航界专家认为^[6],FNA应作为TNA后的新一代检测爆炸物技术.

参 考 文 献

- [1] L. Grodzins, *Nucl. Instr. Meth.*, **B56/57** (1991), 829.
- [2] 杨福家、吴治华, *物理*, **20** (1991), 167.
- [3] Tsahi Gozani et al., *ICCST, Zurich Switzerland*, (1989), 289.
- [4] G. Peto and R. Pepelnik, *Nucl. Sci. Eng.*, **106** (1990), 219.
- [5] R. Rhods et al., *IEEE. Trans. NS.*, **39** (1992), 104.
- [6] 国际航空, 1990, 9, 64.

1996年第3期《物理》内容预告

知识和进展

τ 轻子的发现和电子反中微子的实验证明——1995年诺贝尔物理奖介绍(顾以藩);
高能物理新进展(郑志鹏等);
半导体激光器的进展(I)(王启明);
纳米碳管及其电子显微结构研究(I)(章效峰等);
基于加速器的原子物理(陆福全等);
宽温区磁致冷工质材料的优化(戴闻);
室温下弹道金属点接触电导量化的STM研究(盖峥等).

物理学和经济建设

沉积岩中的分形及其在石油勘探和开发中的应用(田巨平等);
X射线像增强器及其应用(杨晓文等).

实验技术

热敏半导体陶瓷阻温特性的调整原理及方法研究(何自由等);
晶体杂质—配体距离的谱学研究(郑文琛).

物理学史和物理学家

回旋加速器之父——劳伦斯(张会等).

前沿和动态

生命起源和进化中的物理问题——第四次生命起源国际研讨会简讯(王文清等);
钡钾铋氧超导体的研究(赵良仲);
中国物理学会表面与界面物理专业委员会第7届学术会议简讯(杨杰).

书刊评介

《介观物理》一书评介(周义昌等);
《非线性动力学(混沌理论)概要》一书评介(陈立群).