

核技术与隐藏爆炸物的检测

章佩群



近年来国际上恐怖活动猖獗，民航飞机因放入爆炸物而造成机毁人亡的恶性事件时有发生，对民航安全造成极大威胁。特别是新型塑料爆炸物的检测，成为人们研究的重要课题。

塑性爆炸物具有氮、氧等轻元素含量较高、不导电、无磁性、密度低、蒸汽压低等特点。它的爆炸威力大，约 0.5 公斤这类炸药就足以使一架大型客机爆炸坠落。要在大量行李中检测出如此少量的爆炸物，是件困难的事情。这是因为其主要成分是 C、N、O 和 H，与大部分衣服、塑料的成分相近，不易从元素组成上区分。再者塑性炸药可加工成任何形状，难以根据其形貌来检出。此外约在 10³ 件行李中才可能有一件，易造成检验人员精神上的麻痹。由于每一次报警均需开箱检查，而机场上行李检查受起飞时间限制，这就要求误报警率尽可能低，处理速度要快。美国联邦航空局提出的最低标准是 600 件/小时。可见，要及时有效地发现行李中隐藏的爆炸物并不是一件容易的事。目前安检新技术有两类，即非核检测技术，核检测技术。后者进展较快，前景较好。

一、非核检测技术

1. X 射线康普顿背散射法

X 射线遇到金属等原子序数大的材料，因强吸收而在荧光屏上显示出黑色区域；遇到原子序数小的材料时，光子与电子碰撞的结果，将一部分能

量转移供电子后，光子沿入射束的相反方向返回，即所谓的康普顿效应。塑性炸药等有机材料的原子序数小，受 X 射线照射后可产生大量的康普顿背散射。根据在入射 X 光束的后向测得的光亮区域的面积、强度、图象等即可对塑性爆炸物的存在与否作出判断。美国科学与工程公司 (ASEI) 已研制出一系列新型的 X 射线探测系统，它既可利用普通的 X 射线图象发现金属枪械，还能利用背散射的 X 射线图象查出由原子序数小的物质组成的各种塑性炸药、塑料武器等。其中最先进的 101—ZZ 系统有两组探测器，行李通过该系统时可两面同时接受检查，并配有计算机自动判定系统。但由于塑性炸药可加工成任意形状，干扰散射的情况复杂，从而影响判断的准确性。

2. X 射线计算机层析摄影法 (XCT)

XCT 技术比较成熟，美国伊梅特朗公司在医用 XCT 扫描装置基础上研制出了一种专用于机场行李安检的高速 X 射线 CT 扫描系统——CTX5000，该系统可通过测定行李中物品化学成分密度，准确查出藏在行李中的少量炸药。此装置检测灵敏度高，误报警率低，其不足之处是检测速度慢，目前仅达到 360 件/小时的水平。此外尚需解决断层附近尚未冲洗的胶卷的曝光问题。今后随着高速计算机的成本下降及检测速度的进一步提高，该设备可望达到实用的程度。

3. 快速气体取样化学分析

这是一种常规的检测手段。美国瑟美迪克斯公司用这类方法新研制了两种可自动判定爆炸物存在的安检设备。这类装置较为简单，价格便宜，对某些爆炸物（如硝化甘油，TNT 等）的检测灵敏度很高，虚警率低，但对塑性爆炸物的检测灵敏度不高，且检查速度较慢。

二、核检测技术

1. 中子激发的元素分析法

这类技术主要包括以下三种方法：

(A) TNA 它是利用热中子与原子核发生俘获反应，探测瞬发的 γ 射线来测定元素的含量。当被检行李通过传送带进入热中子富集腔体，经热中子照射后，其原子核会俘获热中子，产生 (n, γ) 反应，瞬时发射出特征 γ 射线。腔体内的热中子云是由在其内放置的 ²⁵²Cf 放射源或中子发生器经由不同材料组成的慢化剂层层慢化而形成的。由于塑性爆炸物中的氮含量相对较高，热中子的 $^{14}\text{N}(n, \gamma)^{14}\text{N}$ 反应的截面有 77 毫巴，具有可探测的数值，而且所产生的瞬发 γ 射线中有 14% 是能量为 10.8 MeV 的高能 γ 射线，而其他元素与热中子反应不可能有如此高能量的 γ 射线产生，因此用 10.8 MeV 这一氮的特征 γ 射线来代表爆炸物中氮的含量显然是十分有利的。释放出的 γ 射线由密布在行李周围的 γ 探测器阵列所吸收，每个探测元可记录到不同能量的 γ 光子的数量，而一个探测元接收

光能量范围为 3.5—22 keV。可以进行 $19 \leq Z \leq 44$ ，即钾到钨元素 K 吸收边和 $46 \leq Z$ 元素 L 吸收边的 XAFS 实验。也就是说，几乎可以覆盖 $Z \geq 19$ 的所有元素。该实验站单色光能量发散度在 8.979 keV 处小于 3eV，故不仅可以进行 EXAFS，也可以进行 XANES 实验。该实验站的全体人员热忱地欢迎国内外用户来进行同步辐射 XAFS 实验。

到的特定能量 γ 光子数量取决于中子与特征原子核的反应截面、中子流强、爆炸物数量、位置及 γ 射线分支比等因素，因此根据探测器阵列所探测到的特定能量（如 10.8 MeV） γ 光子数量即可探明爆炸物的数量及其在行李中的具体位置。

由于非炸药材料中的氮含量可能与炸药的相当甚至更高，故仅仅探测行李物品中氮的含量显然是不能满足要求的。美国科学应用国际公司（SAIC）开发的 TNA 系统就是以探测氮为主，结合探测其他几种元素，还利用塑性爆炸物含氮的密度比大多数其他含氮材料高等特点，用专门的探测图象来提供附加信息。共有 50 个以上的参数，并应用先进的神经网络人工智能技术，自主判定危险物品的存在并发出声像报警信号（见图 1）。这种装置已在纽约肯尼迪机场等几个重要的国际机场安装并投入了使用。它对塑性爆炸物检测的准确度高，但当要求其探测灵敏度从原定的 2.5 磅塑性炸药降低到实际需要的 1 磅水平时，误报警率就

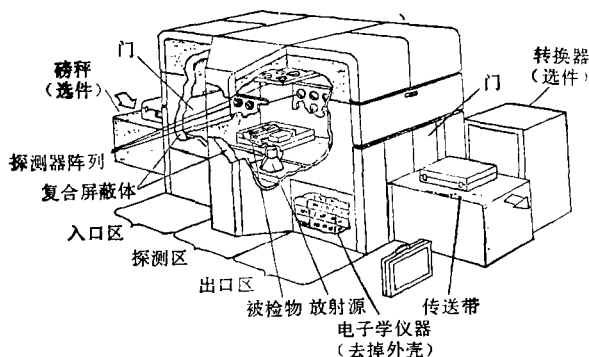


图 1 TNA 系统主体部分简图

大大增加。加之它又有价格昂贵，体积和重量大等缺点，使这一曾引起美国联邦航空局极大兴趣的新型装置在进一步推广使用时受到限制。

(B) FNA 它是利用快中子与爆炸物中的碳、氮、氧等元素发生非弹性散射，瞬时发射出与这些元素核

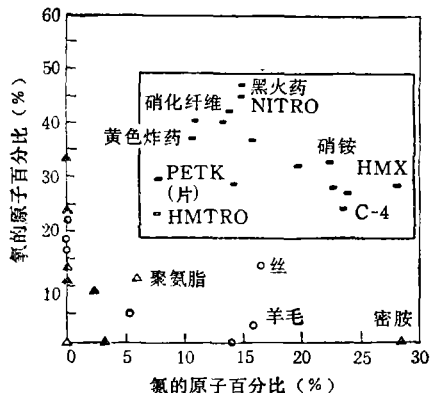


图 2 各种材料氮、氧原子相对含量相关图。■——炸药；△——塑料；○——衣料；▲——其他杂物

能级有关的特征 γ 射线。由探测这些特定能量的 γ 射线来定出行李物品中相应元素的含量及分布。

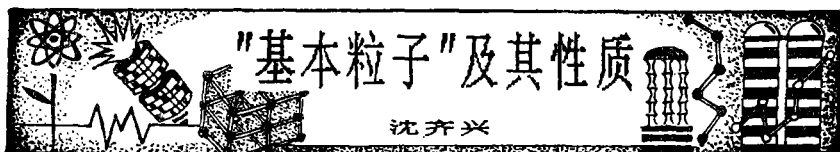
塑性爆炸物氮、氧含量较高，其碳含量也稍高。特别是与含氮的非炸药材料相比，爆炸物的氧含量明显偏高。从各种材料的氮、氧原子相对含量的相关图（图 2）中，可发现所有爆炸物都落在图中方框标出的这一高氮、高氧区域内，而其他材料都落在这一区域以外。若在行李物品中同时测得较高的氮和氧含量，并结合它们在行李中的分布等其他参数，则不难对爆炸物的存在作出较为可靠的判断。

中子发生器（或中子管）产生的 14 MeV 快中子与被检测行李中的原子核发生非弹性散射，即 $(n, n\gamma)$ 反应。对碳、氮、氧这类轻元素来说，其非弹性散射产生的 γ 射线能量较高，有利于与其它元素产生的干扰相区别。而且快中子与这几个元素非弹性散射的截面较大，有几百毫巴，能在检测时间内获得足够的计数。还可利用中子发生器的脉冲工作状态这一性质，只要脉冲系列的占空比小于一定值（如 1/10），则中子与行李中各种元素反应所产生的缓发 γ 射线绝大部分落在无脉冲的时间间隔内。将脉冲期间的计数与无脉冲期间的计数相比较，则能大大提高探测的信噪比。在 14 MeV 快中子与 ^{12}C 、 ^{14}N 和 ^{16}O 反应所产生的各种能量瞬发 γ 射线中，选择产额较高的 4.44、5.10 和 6.13 MeV γ 射线分别作为 ^{12}C 、 ^{14}N 、 ^{16}O 三种元素的特征 γ 射线来进行探测最为有利。根据分布在行李周围的探测器阵列所测得的这些能量的 γ 射线强度，就能给出碳、氮、氧在行李中的含量及分布，由此对爆炸物的存在与否作出判断。

(C) FSNA 这一方法的原理是上述 TNA 和 FNA 两种方法的结合。法国苏顿公司和原子能委员会基于这一方法研制出的全自动爆炸探测仪就是首先测量氮的热中子俘获放出的 10.8 MeV γ 射线，以测定氮的密度，从而初步判断有无爆炸物存在。然后随即开始对可疑行李作第二轮检查，使用的是 14 MeV 快中子的非弹性散射，根据释放出的有关原子核的特征 γ 射线来确定行李中是否存在爆炸物。

2. 原子核共振 γ 射线吸收分析法 (NRA)

它是利用特定能量的 γ 光子束照在被检物体上，使物体中的某种特定原子核发生 γ 射线共振吸收。对物体扫描，测定透射出来的 γ 射线强度即可定出该元素的含量和分布。不同能量的 γ 光子激发原子核的几率具有共振特性，对 ^{14}N 来说，只有 9.17 MeV 这一激发态能级。由于其适宜的能级特性使它的共振吸收截面具有足够的大小，能用作核的 γ 射线共振吸收分析。实际上 9.17 MeV γ 射线在氮中衰减的共振成分是重迭在非共振衰减成分上的。实验上直接测出的是总的衰减成分（共振 + 非共振）和非共振衰减成分。用这两个量相减所得的净共振衰减成分可表示被 γ 射线照到的



在1897年发现电子后的近一个世纪中,人们对物质结构基本组元的认识已前进了一大步。原子不是物质的最小单位,它由原子核和电子组成,而原子核又由质子和中子组成这样的常识已为许多人所了解。这样,在很长时间里,电子、质子、中子等粒子一直被看作是组成物质的“基本粒子”。但是,随着加速器的出现和探测技术的发展,到20世纪60年代,由于一大批共振态粒子的发现,“基本粒子”的数目猛增为上百种。从而使人们意识到,介子、重子这些一度被人们称为“基本粒子”的强子可能并不是基本的,物质结构可能存在更深一层次的基本成份。

由于实验技术和理论工作的迅速发展,迄今人们已经能对 10^{-16} 厘米的微小颗粒,判断其内部是否可能有新的结构。并把迄今尚未发现有结构的粒子称为更深层次的“基本粒子”。

新一层次的“基本粒子”可以分成三大类。第一类是不参与强相互作用的轻子。轻子又可分成所谓的三代。第一代包括电子 e^- 、电子型中微子 ν_e 。(相应的

那部分物体中氮的含量。对9.17MeV能级来说,每厘米厚含氮爆炸物所产生的净共振衰减约为2%。

用于这一目的的理想 γ 射线源应是所发射的光子能量集中在9.17MeV \pm 100eV范围内。这样的源实际上得不到,作为一种补偿的办法,以色列的一个组在常规的 γ 探测器中加入富氮的探测介质,做成共振探测器来探测从物件中透射出来的 γ 射线,这种探测器只对9.17MeV \pm 100eV能量的光子灵敏。已在实验室做成的一种共振探测器就是在市售的液体闪烁体NE-213中加入一定量的氟甲烷,用这种混合物做成的闪烁体探测到共振吸收的成分。

产生9.17MeV光子的途径之一是利用 ^{13}C 俘获1.75MeV质子,产生 $^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$ 反应,发射出9.17MeV的 γ 射线。 ^{13}C 俘获质子后在一给定的角度下所发射的 γ 射线是单色的,在相对于质子束方向 80.2° 处发射的光子恰好为9.172MeV,接近于用作核共振吸收的理想 γ 光源。这类质子加速器的流强需达到 ~ 1 毫安的水平。另一种可用的源即所谓的高能韧致辐射源,实际上是一能产生宽的高能光子谱的电子加速器。用这样的源所能得到的共振光子只占很小的比例,但具有足够束流强度的电子加速器可以买到。

用上述源所产生的 γ 射线来扫描待测物件,用共振探测器和普通 γ 探测器来分别探测总的衰减成分和

反粒子即为正电子 e^+ 和电子型反中微子 $\bar{\nu}_e$);第二代轻子包括 μ^- 粒子和 μ 型中微子 ν_μ (相应的反粒子为 μ^+ 粒子和 μ 型反中微子 $\bar{\nu}_\mu$);

第三代轻子包括轻子中最重的 τ^- 粒子和 τ 型中微子 ν_τ (其反粒子为 τ^+ 粒子和 τ 型反中微子 $\bar{\nu}_\tau$)。

第二类“基本粒子”是组成强子的层子(或称夸克)。层子也有三代,即第一代的上层子 u 和下层子 d ,第二代的粲层子 c 和奇异层子 s ,以及第三代的顶层子 t 和底层子 b 。它们又各有自己的反粒子。上、下、奇异、粲、顶、底六种量子数被称为层子的六种“味道”。此外,每一种层子又具有称为“颜色”的特性,即每种层子又有“红”、“蓝”、“绿”三色。这样,三代层子连同它们的反粒子总共有36种。尽管强子由层子构成的结构模型在许多方面已取得很大的成功,但是实验上至今尚未发现具有分数电荷的自由层子, u, d, c, s, b 五种层子的存在只得到实验的间接的证实,而 t 层子的存在实验上尚未得到证实。因此,和轻子不同,我们无法通过实验精确地测量出每种层子的量子数,例如对于层子的质量,我们只能通过有关的实验间接地确定它们的数值。

第三类“基本粒子”是传递各种相互作用的媒介粒子。非共振衰减成分,由此测出物件中氮含量的分布图象。图3为以色列组测量氮的 γ 射线共振吸收实验安排的示意图。美国的洛斯阿拉莫斯国家实验室则是用高效率的非共振 γ 探测器来测量共振 γ 射线通过氮时信号强度的减小来定氮的含量。以色列及美国的这两个组正在进行的这方面研究已取得了令人满意的结果。

综上所述,在民航部门为解决隐藏爆炸物检测的

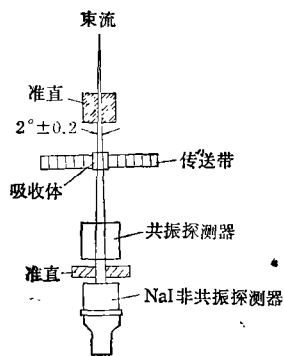


图3 测量氮的 γ 射线共振吸收的实验安排

诸多手段中,以核技术为基础的检测方法已取得了令人瞩目的进展。有的已发展成为迄今为止最为先进的新一代机场安检设备。但它也同任何其它方法一样,并非尽善尽美,在实际使用中尚存在这样那样的不足之处,可以说至今还没找到一种十分有效的手段来充分满足民航部门对隐藏爆炸物检测的要求。为此,对已经开发出来的检测装置加以改进和完善,与此同时积极开发出新的更为先进的机场安检设备,这是对科技界提出的一项艰巨又有意义的课题。