

用核技术检测隐藏爆炸物

杨福家 吴治华

(复旦大学, 上海 200433)

本文阐述检测隐藏爆炸物之困难、关键及核技术的有效方法。

不法之徒携带爆炸物引起火车爆炸失事在我国已发生多起。国际上恐怖分子利用隐藏爆炸物进行讹诈恐吓, 劫持飞机事件也不断发生, 而进行阴谋暗杀使机坠人亡的政治谋害更是时有所闻。怎样能及时和有效地发现行李中隐藏的爆炸物, 对科学技术界提出了极为艰难而又富有挑战性的课题。这一课题的艰难性在于:

(1) 国际航线上典型的行李箱重 20kg, 尺寸是 $70 \times 45 \times 25\text{cm}^3$, 而能使珍宝机(波音 747)在高空粉身碎骨的爆炸物只要 0.5kg, 仅占行李箱本身重量的 2.5%。

(2) 塑料炸弹可以制备成任何形状, 甚至做成薄片夹藏在行李箱的隔层垫衬内。

(3) 爆炸物成份是 C, N, O 和 H, 与大部分衣服、塑料相近。

(4) 行李箱中隐藏爆炸物的几率是很小的, 在 10^9 件行李中可能发现一件。

(5) 航空管理部门要求每分钟至少检查 10 件行李。

(6) 误报警的几率必须尽可能地小, 每次报警必然导致开箱检查, 这种情况最多允许千分之一的几率, 即 1000 件行李中, 开箱一次。

(7) 采用的检查办法不能被简易的反措施所欺骗。

(8) 不过分地增加财政开支。

除了以上各点外, 我们还可以从下面的分析中进一步看到“甄别”的困难。

因此十几年前, 面对这一课题, 科技界感到束手无策, 还提不出像样的方案。经过多年的努力, 已提出了各种方案和设想, 甚至不惜求助

于动物的嗅觉, 也有用高灵敏的气体成分分析仪器来检测, 而最有进展的则是利用核技术的方法进行检测。

一、如何方能有效地甄别 爆炸物和其他物品

爆炸物品种繁多, 我国发明的黑火药在唐代十世纪已有配方记载: 75% 的硝酸钾(或硝酸钠), 15% 的木炭和 10% 的硫磺。近代使用的固体炸药见表 1。

(1) 根据密度可以区分炸药和衣服, 因为炸药的密度都在 $1.5\text{--}1.7\text{ g/cm}^3$ 之间, 例如 TNT 为 1.5g , PETN 为 1.60 。而衣服的密度只有 0.2 g/cm^3 左右, 只是裘皮接近于 1 g/cm^3 。但是大部分塑料的密度都大于 1 g/cm^3 , 而密胺(melamine)、聚氨脂(polyurethane)、聚氯乙烯(PVC)的密度都在 1.5 g/cm^3 左右, 赛纶(saran)则为 1.7 g/cm^3 , 其它含有金属的物品密度范围更宽, 因此仅仅从密度来甄别爆炸物, 几乎是不可能的。

(2) 从表 1 可见, 氮是爆炸物的主要成分, 然而一个空行李箱含氮的总量足以与 1 kg 炸药的含氮量相当。机场上用于检查行李的 X 光机的检查空间为 1m^3 , 而 1m^3 空气含 1kg 公斤氮, 足以制成 4kg 高烈性的炸弹。因此, 仅从氮的含量也不足以甄别爆炸物。

(3) 在仔细考察爆炸物、衣服、塑料和杂物等四类几十种物品含 H, N, O, C 四种元素的关系后, 发现仅从一种元素的含量不足以唯一地

表 1 常用固体炸药

普通名称	符号	化学名称或成分	分子式
奥托金 Octogen HMX	HMX	四次甲基四硝基胺 $\text{NG} + \text{AN} + \text{NaNO}_3 + \text{C}$	
达那马特 Dynamite		$2,4,6\text{-三硝基苯酚}$	$\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_7$
苦味酸 Picric Acid	Tetryl	三硝基苯甲基硝胺	$\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_7$
特屈儿 Tetryl	TNT	三硝基甲苯	$\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_7$
梯恩梯	PETN	季戊四醇四硝酸酯	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4\text{O}_{12}$
季戊炸药	NC	Nitrocellulose $\text{KNO}_3 + \text{C} + \text{S}$	$\text{C}_{12}\text{H}_1\text{N}_3\text{O}_{10}$
硝化纤维素		ammonium nitrate	NH_4NO_3
黑火药 Black Powder	AN	glycerol trinitrate	$\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_9$
铵油炸药	NGL	cyclonite	$\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_9$
硝化甘油 Nitroglycerin			
黑索金	RDX		

甄别爆炸物。例如，从含氮的密度来说，爆炸物比衣服、杂物和一般塑料都要大很多，但密胺的含氮密度却高于一般爆炸物，看来似乎前途渺茫。然而大自然终会给有智慧的人们以恩赐。如果我们考察含 O, N 成分的相关性，那么我们发现爆炸物都落在一个很确定的范围内，而其他物品无一落在这一区域，见图 1。

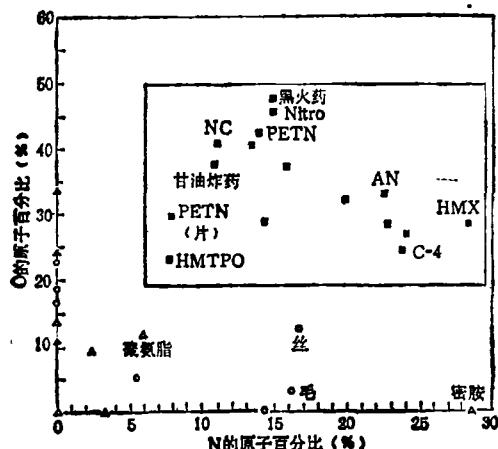


图 1 各种材料的 N, O 原子百分比相关图
■——炸药；△——塑料；○——衣服；▲——其他杂物

二、用核技术检测爆炸物的方法

表 2 汇总了至今提出的各种方案。大多数方法是将行李箱放在中子场中受辐照，并用 γ 探头输出信号。这些方法的进展各异。有的还在探索，有的正在论证或已获资助，有的已在实

验室中用标准行李箱进行模拟试验，还有的已在机场试用。本文不拟详细论述，仅作一简单介绍。

1. 热中子分析 (TNA)

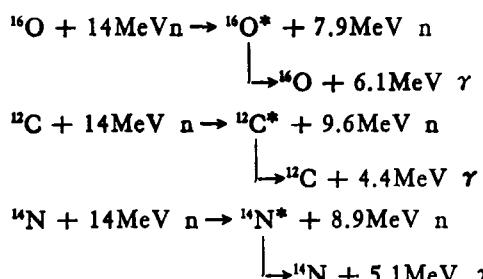
行李箱由传送带运入热中子场，下列反应可检测 N: $^{14}\text{N} + \text{n} \rightarrow ^{15}\text{N} + 10.8\text{ MeV } \gamma$

此反应截面很小，仅 10mb，由于出射 10.8 MeV γ 能量很高，容易识别。用许多 γ 探头组成描述仪以给出氮的空间分布，但空间分辨率有限。这种方法可同时检测氢和其他几种元素，但不能检测氧和碳。

法国采用中子产额达 $10^9/\text{s}$ 的 Cf-252 中子源，组成一套仪器投入了试用。

2. 快中子分析 (FNA)

由中子发生器很容易获得 14.8 MeV 的快中子，将行李箱通过快中子场，由下列反应可分别检测 C, N, O:



同样用一组 γ 探头描述仪探测，可同时给出 O, C, N 的空间分布。O 和 C 的反应截面为 200mb，而 N 的反应截面仅为 70mb，不易探测，

表2 用核技术检测爆炸物的方法

方 法	入射辐射	出射辐射	检测元素
I			
1.热中子分析 TNA	热中子	特征高能 γ	N
2.快中子分析 FNA	快(高能)中子 14.8 MeV	特征高能 γ	C,N,O
3.脉冲中子束	单色快中子	特征 γ	C,N,O
4.伴随粒子	单色快中子	特征 γ	C,N,O
5.脉冲快、慢中子分析	快中子,随后慢中子	特征高能 γ	C,N,O
II			
6. γ 共振吸收	单色高能 γ	高能 γ	N(O?,C?)
7. γ 共振荧光	连续谱高能 γ	高能 γ	C(N?,O?)
8.生成 N-13	连续谱高能 γ	湮没 511 keV γ	N
9.生成 N-12	连续谱高能 γ	湮没 511 keV γ	N
10.生成 B-12	连续谱高能 γ	轫致辐射 γ	N
III			
11.脉冲中子背散射	单色快中子	高能中子谱	C,N,O
12.脉冲中子吸收	连续高能中子	高能中子谱	C,N,O
13.生成 N-13	连续高能 γ	中子	N

并有被其他物品反应混淆的问题。

3. 脉冲快中子束分析 PFNA

由专用的小回旋加速器得到脉冲快中子束准直后射向行李箱,用一组 BaF₂ 探头探测 O, N,C 的特征 γ 辐射。对 14MeV 中子, 测量系统的时间分辨为 1ns 时, 可得 N 的深度分布为 5cm。

4. 伴随粒子法

d-T 反应输出 14.8MeV 中子时, 在相反方向伴随有 3MeV 的 α 粒子发射。把 α 粒子的方向和时间确定后, 中子的方向和时间也可确定。测量特征 γ 辐射和 α 粒子在方向和时间上的符合可得出 C,N,O 的三维分布图。用这个方法和上述 PFNA 的方法, 原理上可以得到空间分辨率小于炸弹的尺寸, 尤其适宜于检测片状爆炸物。

5. 脉冲快慢中子分析 PFSNA

这是把第一和第二种方法结合起来。先产生宽度为几个微秒、间距至少 1ms 的快中子脉冲, 由原始快中子非弹性散射过程得到的 γ 辐射, 可检测 O 和 C; 中子随后将慢化, 并将出现 N 的 10.8 MeV 特征 γ 辐射。这个方法把快中子测 O 和 C, 慢中子测 N 的优点联在一起。也有人考虑分别用快、慢两个中子源。

6. 共振吸收法

由加速器获得 1.7476 MeV 质子束轰击 ¹³C 靶, 形成 ¹⁴N 激发态。退激时放出近于单色的 9.172 MeV 的 γ 辐射, 出射角为 80.2°, 张角为 0.5°, 在其他方向上则没有辐射。当 9.172 MeV 的 γ 辐射照射在行李箱上时, 测量透过的 γ 辐射, 当有 N 时, 将出现共振吸收, 而使透过的 γ 辐射大为减弱。以色列人使用了共振探测器, 它只对共振 γ 能量灵敏, 并在机场使用以检测炸弹。美国的 LASL 小组则用高效率的非 γ 共振探头做成样机试用。由于使用低能加速器, 出射 γ 的方向性强, 防护很方便。反应的截面很大, 因而对 N 的检测灵敏度很高: 出射 γ 能量较高, 可检查较大的容器, 已有以色列和美国在试用。用类似的方法检测 O,C 正在探索中。

7. 共振荧光法

所用连续能谱的 γ 辐射由高能电子轰击重元素靶产生轫致辐射, 照射在样品上, 然后在 90° 方向上用 γ 探测器测量。测试表明, 在 ¹³C 的 4.44 MeV 和 15.1 MeV 能级上的康普顿散射光子能量为 460 keV 和 500 keV, 这是容易区分的。但如果行李箱中有钨等重元素, (γ , n) 和 (γ , p) 反应可能使行李有剩余放射性。

8. 生成 ¹³N

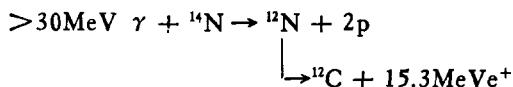
^{14}N 在高能 γ 轰击下将生成 ^{13}N 。



^{13}N 蜕变为碳，并放出二个相反方向的 511 keV γ 辐射，由此可检测 N。

9. 生成 ^{12}N

此方案由 Luis Alvarez 提出，用 50MeV 的 γ 脉冲辐照可生成 ^{12}N



^{12}N 寿命仅 11ms，蜕变为 ^{12}C ，并放出高能正电子，用正电子断层扫描法测量。如入射高能 γ 束准直到 1° 之内，由短寿命的正电子湮没可唯一地甄别 N。这个方法是很有前途的。

10 生成 ^{12}B

与生成 ^{12}N 相类似，由 $(\gamma, 2n)$ 过程可生成 ^{12}B ，寿命是 20ms，放出高能电子，测量由高能电子引起的轫致辐射。

11. 脉冲中子背散射

用脉冲单能中子对行李箱进行扫描。用中

稀 土 永 磁 研 究 的 新 动 态

衡量永磁特性的主要参数是剩磁，矫顽力和最大磁能积，特别是磁能积和矫顽力，其数值的改进可作为划分永磁材料发展阶段的依据。从 19 世纪末的碳钢开始，到目前第三代稀土永磁 NdFeB ，一百年内磁能积从 2KJ/m^3 (0.25MGOe) 提高到 400KJ/m^3 (50MGOe)，增长达 200 倍。

标志着永磁发展最新阶段的 NdFeB 磁体，从 1983 年问世到现在已整七年。它早已从实验室的科研成果变成了全球性的规模巨大的新兴产业。西方 NdFeB 磁体的总产量从 1984 年的 32t 到 1989 年的 860t，增长近 30 倍，预计到本世纪末，其产量的增长率仍将保持在 150% 以上。 NdFeB 产业在量和质方面的飞跃发展，雄辩地说明，它已成为目前永磁材料的“热点”，也是磁性材料领域中最富生命力、最活跃的“生长点”。

虽然 NdFeB 的矫顽力比前两代磁体高，是稀土永磁中的佼佼者，但它有两大弱点：(1) 居里点 T_c 偏低，因而它的温度系数较高和只能在较低的温度范围内使用；(2) 抗腐蚀性能差，容易氧化。

由于 NdFeB 永磁存在这两方面的缺点，目前稀土永磁的研究工作主要在两方面：(1) 着重研究影响 NdFeB 永磁内禀磁性的因素，改进它的温度稳定性和环境稳定性；(2) 探索，开发新的稀土永磁材料。

目前探索，开发新永磁材料最有希望的苗头有三：

子探测器测量反散射的中子能谱。如 E_1 为人射中子能量，则背散射的中子能量 E_2 为

$$E_2 = [(A - 1)^2 / (A + 1)^2] E_1.$$

由中子能谱可显示各个元素的共振吸收。

12. 脉冲中子吸收

和上一方法相似。用一宽能谱的脉冲中子束人射，测量透过行李箱的中子能谱，从而可以确定箱内元素的成分和所在位置。

13. 生成 ^{13}N

这和方案 8 相似，但是测量的是中子。

核技术已从科学上显示了解决这一难题的可能性，但怎么廉价、高效、方便地为航空部门所接受，还得走相当长的一段路程。然而，不管人们喜欢不喜欢这个“核”字，它在过去和将来都将造福于人类，那将是确信无疑的。

作者感谢美国麻省理工学院格罗津斯 (Lee Grodzins) 教授，他提供了尚未发表的材料，并与作者作了详尽的讨论。

稀 土 永 磁 研 究 的 新 动 态

(1) ThMn_{11} 型的 Sm-Fe-TM 系：这体系的饱和磁化强度 I_s ，各向异性场 H_A 和居里点 T_c 皆与 NdFeB 的相当，唯一缺点是剩磁 B_r 太低，但可作为特定场合下使用的永磁体。

(2) Fe_3B 基磁体：在 Fe_3B 基础上加少量稀土，使形成 $\text{R}_x\text{Fe}_{11}\text{B}$ 相弥散分布在 Fe_3B 基相内，获得兼有高矫顽力和剩磁的实用永磁体，可成为能与 Alnico 或铁氧体竞争的廉价磁体。

(3) $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{N}_3$ 化合物： R_2Fe_{14} 是易基面而非易轴的磁性化合物，不能用作永磁材料。最近 M. Coey 教授等人将 N_3 引入 R_2Fe_{14} 内，形成 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{14}\text{N}_3$ 等化合物，使易磁化方向从基面变为 C 轴，居里点 T_c ，饱和磁化强度 I_s 和各向异性场 H_A 都大大提高，内禀磁性与 NdFeB 的相类似，但 T_c 却可比 NdFeB 的高出 160°C 左右。很有可能发展成为第四代永磁材料，因此很受国内外磁性材料的研究单位重视，出现了新的永磁研究“热点”。预计今后的研究重点为：(1) 如何将具有良好内禀磁性的 $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{N}_3$ 化合物做出高矫顽力和高磁能积的磁体。(2) 探索 $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{N}_3$ 化合物内禀和外禀磁性改善的物理原因。

(罗河烈根据 J. Magnetism and Magnetic Materials 87(1990)L251 综合写成)