

# 探测爆炸物和放射性材料的核技术方法

陈涵德

(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]** 叙述了采用核技术方法探查隐藏爆炸物和放射性材料的优越性及其特点, 重点介绍了8类主动式中子质询技术, 对它们探查爆炸物的适用范围进行了剖析, 对采用伽玛法的非中子质询技术作了一般性讨论。概括了各类已商用化工业中子源和伽玛射线探测器, 论述了它们应用于安检系统的长处和不足。分析了两类典型的隐藏爆炸物安检问题, 指出一个理想的爆炸物探查系统应具备的11项特性。介绍了国际上最受重视的伴随粒子成像和脉冲快中子系统的研制进展。简要描述了有别于主动式探查爆炸物的被动式放射性材料探查方法。指出隐藏爆炸物品和放射性物质的检查没有一种方法是万能的, 不同场合不同目标需要用不同的技术或联合使用几种技术。

**[关键词]** 核技术; 中子质询; 爆炸物; 放射性材料; 中子源; 探测器

**[中图分类号]** TL99 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2008)01-0077-09

## 1 引言

近年来, 随着国际形势复杂多变, 各种方式的恐怖活动有增无减。为了有效防范和打击这些犯罪活动的发生和扩展, 各国警方和安检部门都使用安全检查技术装备对危险物品、违禁物品有针对性地进行防范性安全检查。

传统的安全检查设备如 X 射线检查仪、金属武器检测门等, 能发现金属武器和普通炸药等危险物品, 在安全检查工作中发挥了重要的作用。但由于近年恐怖分子配备的武器越来越先进, 促使世界各国都在探索研究更先进的安全检查技术、装备。

核技术能提供一种确定物质(材料)相关元素和同位素的组成(成分)的分析手段, 这是基于有很高灵敏性且可远距离检测到的核反应、放射性衰变、核探测器, 等等。主动式核技术能非破坏性地地质询密封在容器中稳定同位素的存在量, 伽玛射线、X射线和中子被选择为一类探查源, 因为它们能穿透大量物质(材料)。极大多数情况下, 辨认有赖于原子组成比, 例如 $H_2C,N,O$

的相对份额。

## 2 关于中子质询技术与非中子质询技术

### 2.1 中子质询技术

中子从良性(无害)物质(材料)中区分出爆炸物或常规武器的关键点是中子质询(又称中子分析)具备在非破坏(取样)条件下对单个元素的甄别能力, 这是一般其他任何分析方法不具备的。

中子质询技术分为两大类: 中子入伽玛出, 中子入中子出。前者探测出射的伽玛射线, 后者探测出射的中子。中子法检查的技术进展受到多种因素制约, 主要有小型化中子源研制进展, 伽玛探测器、中子探测器和信号采集以及数据处理技术进展, 特征量分析和谱图识别(判明)的经验积累和成熟度, 对使用核技术的政府政策导向和公众接受度等等<sup>[1]</sup>。

大多数中子法需要高强度小型化中子源, 它既需要脉冲式又需要连续式、同时又具备有与发射中子在时间上关联的可探测的粒子能力。除去使用( $\alpha,n$ )和( $\gamma,n$ )反应的放射性核素源外, 在原理上所有其他中子源都具有中子定时定位能力。

应用于检查系统的伽玛射线探测器挑选, 一般需

**[收稿日期]** 2007-11-07

**[作者简介]** 陈涵德(1937-), 男, 浙江余姚市人, 中国工程物理研究院核物理与化学研究所研究员, 从事中子物理与核技术应用研究

要具备以下主要性能：能量分辨率，探测效率，价格，抗辐射损伤能力，稳定性，计数率载荷能力，皮实性等等。最常用的是大面积NaI(Tl)，次要的有BGO，

BaF<sub>2</sub>，LaCl<sub>3</sub>和塑料闪烁体等。中子探测器按探测机理分为：基于探测快中子相互作用，如弹性散射；基于探测中子慢化到热区引起的核反应两大类。

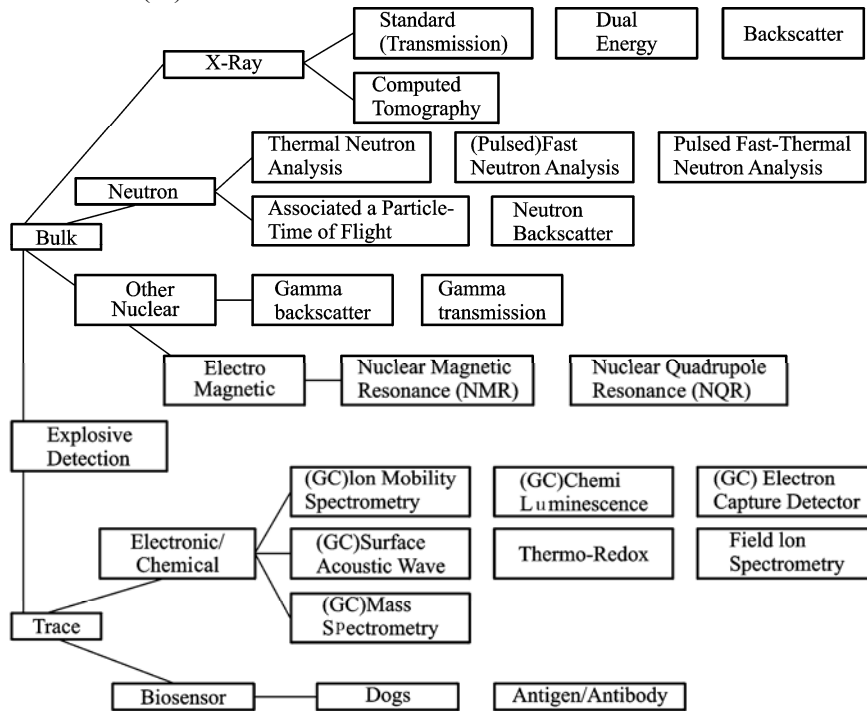


图 1 现代爆炸物检测技术一览<sup>[2]</sup>

Fig.1 Organization of current explosive detection technologies

## 2.2 几种中子质询技术概要

1) 热中子分析(TNA)。此方法基于热中子被核俘获并产生该俘获核专有的特征伽玛射线。热中子由中子源或加速器产生的快(高能)中子,经专门设计的中子慢化体或被质询物体自身慢化形成。伽玛射线由一组阵列探测器完成检测,其构形可以置于被检物两侧,也可成检测通道或检测腔形式包围着被检物。通过类似于辐射断层照相的处理技术,由是否显现出团块状或层片状,可获得特征核素,主要是 N,Cl,H 等含量是否异常信息。

2) 带门的热中子分析(GTNA)。方法与 TNA 类似,但需要使用脉冲中子源,典型的脉宽 5~100 μs,重复周期 100~10 000 Hz。在中子束关闭期间,测量由衰减热中子俘获产生的伽玛射线,呈指数衰减的中子群行为与检查系统和被检物的几何及物质的吸收性质等紧密相关。采用门技术有利于减少非期望本底,可获得特征核素,主要是 N,Cl,H 等含量是否异常信息。

3) 快中子分析(FNA)。方法基于快中子相互作用,最通常的是非弹散射,测量来自 C,O,N 和其他元素的特征伽玛射线。伽玛射线探测器阵列及其谱图分析类似于 TNA 所采用的技术,中子通常由

小型 14 MeV 中子发生器产生。可获得特征核素,主要是 C,O,N 等含量是否异常信息。

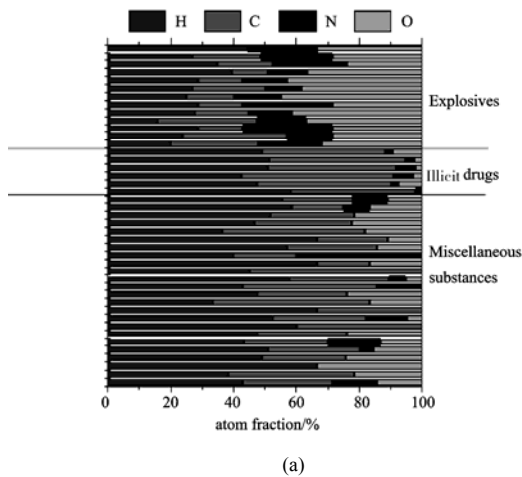
4) 脉冲快/热中子分析(PF/TNA)。此方法是 GTNA 和 FNA 的联合,后者是当中子源产生中子时间内使用,前者是当中子源两次产生中子间隔内使用。采用电子学门控技术有利于减少非期望本底,可获得特征核素,主要是 N,Cl,H,C,O 等含量是否异常信息。

5) 脉冲快中子分析(PFNA)。方法基于经高度准直的单能(典型能量 6~9 MeV 范围)中子束与核相互作用得到特征伽玛射线,并形成全三维的物质图像。中子束为纳秒宽度(频率 1~10 MHz),采用飞行时间(TOF)测定来自信号产生处物质所含 C,O,N 等含量的空间信息。

6) 伴随粒子成像(APT-TOF 或 TNIS)。一种带有中子源时间和方位信息的网格空间标识技术,它是通过与产生中子核反应同时发射的伴随粒子,例如 D+T 反应的 α 粒子或 D+D 反应的 <sup>3</sup>He 粒子来实现。本方法的最大特点是可大大减少非期望本底。

7) 中子共振吸收(NRA)。一种测量被质询对象内部元素区域(面积)密度、即密度与厚度乘积

的技术。这类技术取自当中子在 0.5~5 MeV 能量范围时, 相对于中子总截面(主要是弹性散射)存在有尖锐的共振峰, 利用由窄脉冲产生的宽能谱快中子束, 并结合中子飞行时间(TOF)技术实现中子能量测定, 可获得 N,C,O 和 H 等元素的二维区



域(面积)密度投影像。

8) 中子弹性散射(NES)。一种利用中子弹性散射截面具有不同角分布和结构这一特性来测定元素密集度的技术。该方法测量散射中子, 且通常都是后向散射中子。

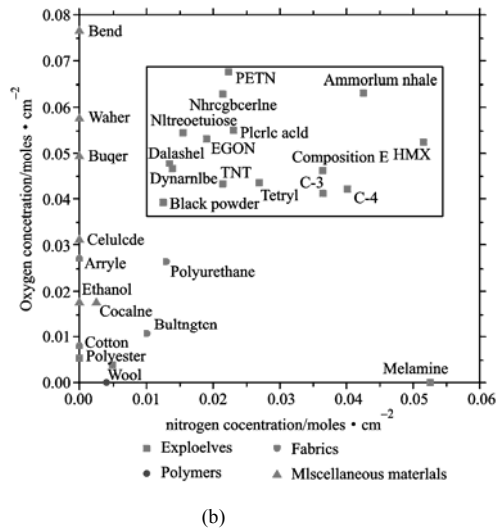


图 2 各类物质的 H,C,N,O 原子份额或 N 和 O 之间的浓度关联<sup>[3]</sup>  
Fig.2 H,C,N,O atom fraction (a) or concentration relationship between N and O (b) of a variety material

### 2.3 伽玛法检查及其特点

伽玛射线束的某些方面特性对爆炸物和常规武器的检查很有利, 分析如下<sup>[1]</sup>:

1) 贯穿能力。1~10 MeV能区的伽玛射线束通过物质(材料)尤其是低Z物质(材料)的衰减很弱。在该能区范围, 光电吸收从低能端的高值迅速下降, 而电子对产生要到高能端才有高值, 康普顿散射平均截面在该能区不大, 这一性能对探查大货运箱件极为有利。一般大货运箱件经常装有例如食品和纺织品等大量低Z物质, 纵然, 有时也装有例如机械设备(器具)和汽车零部件(配件)等高Z物质, 但它们往往都有低Z的内外包装材料, 适合用伽玛射线束来质询。反之, 对此类大货运箱件, 中子束的穿透因中子慢化(吸收)将受到一定的限制。

2) 对氢不灵敏。与中子的情况相反, 伽玛射线对氢的散射或吸收很弱。这一特性对大货运箱件的检查十分有利, 因为大货运箱件内总会含有大量的含氢物质(材料), 这将导致中子慢化而被吸收。

3) 弱的诱发放射性。小于10~12 MeV的伽玛束几乎不对常见的低Z物质, 如C,N,O,Al,Si等元素产生诱发放射性, 因为这些低Z元素的核素如<sup>12</sup>C, <sup>14</sup>N, <sup>16</sup>O, <sup>27</sup>Al, <sup>28</sup>Si等, 其光核反应阈能高, 而且其反

应物是稳定核, 如<sup>2</sup>H, <sup>13</sup>C, <sup>15</sup>N, <sup>17,18</sup>O, <sup>29,30</sup>Si等。

4) 高强度。可由电子直线加速器和电子回旋加速器经转换靶产生高强度伽玛束流。其运行操作相对简易和耐用, 使其适合于航空港和海港口处的反恐检查。但整个系统的庞大、维护复杂及价格高, 也限制了使用的广泛性。

5) 成像及处理能力。使用高通量伽玛射线束和高计数率探测, 容易获得可靠的成像, 这对爆炸物和常规武器的检查极有价值。目前, 伽玛探测技术的空间分辨(毫米量级)远高于中子探测技术的几个厘米量级。

6) 多功能。同一束伽玛, 既能通过其同位素组成的辨认, 用来探查未知物质(材料), 也能通过成像辨认其形状(轮廓)。

7) 普适性。对元素周期表内的几乎所有元素, 由于其光核截面( $\gamma, n$ ), ( $\gamma, 2n$ ), ( $\gamma, p$ ), ( $\gamma, f$ )存在巨共振能区和共振峰, 通过成像功能和光核中子、光核裂变产物测量, 可实现任何(材料)元素的辨认。

8) 专用性。使用共振伽玛吸收(RGA)或共振伽玛散射(RGS)技术, 可辨认单个同位素核。

9) 适用两类伽玛束。既可使用单能量束和也可使用连续能量束。单能束适合于透射法测量, 如

RGA, 由有用的核反应形成, 具有窄能带区; 连续束适合于散射测量, 如RGS和脉冲束伽玛分析(PGA)。

## 2.4 其他非中子的质询技术概要

1) 共振伽玛散射, 核共振荧光, 共振伽玛吸收(RGS,NRF,RGA)。一种利用核对伽玛射线具有能量精确且专属(例如对 $^{14}\text{N}$ 为9.17 MeV)的共振散射或共振吸收能力的技术。在RGS中, 被探测的是散射伽玛射线, 而在RGA中探测伽玛射线束的减弱。虽然在物质中共振伽玛也会被散射或吸收, 但它们是非共振途经、即通常的康普顿散射。使用扫描束可以构成有用元素, 例如爆炸物的氮元素的二维区域(面积)密度分布, 当使用高时间分辨的探测器或多角度检测, 可形成三维图像。

2) 光核活化与脉冲伽玛分析(PGA)。一种通过使用高于10 MeV高功率电子直线加速器的光核反应, 从而使某些特殊的核(例如对 $^{14}\text{N}$ )选择性地具有放射性的技术。由诱发的放射性测量显示是否存在感兴趣的元素, 通过使用正电子发射断层照相技术(PET)测量正电子衰变, 原理上可获取反应区空间信息。

3) 核磁共振和核四极共振(NMR和NQR)。通过与基体材料的固有磁场或电场梯度的相互作用, 可探测本征核磁矩或四极矩的超精细结构, 其原因是这些本征场依赖于材料的化学结构和相, 由此使用感应射频探针, NMR和NQR能提供专属的化学辨认(分子结构指纹)。

4) 太赫兹电磁辐射(T波)。一类不具备电离能力的中性非电离辐射, 它可以穿透塑料、水泥和日常用物质(材料), 可记录和辨认生物性的和塑性材料, 可用于隐藏武器的发现, 例如化学生物剂或塑性爆炸物, 可以测定许多复杂化合物结构和相, 目前处于研发阶段。

## 3 伽玛射线探测器和中子探测器

### 3.1 伽玛射线探测器

伽玛射线探测器测量由光电吸收、康普顿散射或电子对生成相互作用形成的次级电离粒子的能量损失, 三类相互作用的重要性依赖于伽玛射线能量和吸收体(被检查物和专门附加物)的Z值。有3种类型的探测器, 分别为充气电离室, 半导体探测器和闪烁计数器, 前二类测量由次级粒子的电离损失形成的电子和离子或空穴; 第三类利用光敏探测器件测量由闪烁产生的光。

挑选用于隐藏爆炸物检查装置的探测器系统本质上是能力、价格和可靠(准确)性三者间的复杂优化过程。

为了由可辨认的伽玛跃迁获得最高的专属性, 一般选择具有能量线宽达0.2%的精密能量分辨的半导体锗作为探测器, 获得这样的分辨需要在液氮温度下, 这对某些使用是不可取的。近来研制了一种新型锗探测器系统, 它使用一台小型低功率循环冷却器, 可使锗晶体降温到100 K下工作, 但分辨也降低1倍。锗晶体尺寸的目前工艺为直径80 mm, 高100 mm, 由此也限定了其探测效率, 一种新的不受体积影响而使效率提高的技术是将多个单一探测器紧凑地封装成阵列, 即所谓伽玛球, 它极大改善了探测效率, 同时也提高了信噪比。不过这类探测器价高, 只适合于科学研究。工业伽玛射线探测器的主力军是闪烁晶体, 例如NaI(Tl)和BGO, 可制作成大体积、6%~8%的能量分辨, 塑料和液体闪烁体同样可获得大的体积、粗略的位置分辨和作为加和能谱仪, 它们对中子和伽玛都灵敏, 用脉冲形状甄别可区分中子和伽玛事件。

### 3.2 检查系统常用伽玛射线探测器类型及其综合特性

1) NaI(Tl)/BGO。无机类闪烁体, 用于检查系统的典型大小为直径76.2 mm×高76.2 mm到直径152.4 mm×高152.4 mm; 有相对高的探测效率, 相对差的能量分辨, 对662 keV约为7%~13%, 适合于现场野外作业用便携式系统, 中等偏低的价位(与尺寸有关)。

2) CdZnTe(CZT)。固态电荷收集型, 可用大小几个立方厘米(工艺上可拼装成几十立方厘米的灵敏面), 室温工作, 居中偏低的探测灵敏度, 中等偏好的能量分辨, 对662 keV约2%~3%, 处于研发向实用化转变阶段, 不久将是现场系统使用的主力。

3) 高纯锗。固态电荷收集型, 大小可超过300 cm<sup>3</sup>, 需要借助机械式或低温冷却到约77 K才能工作, 中等的探测灵敏度, 很高的能量分辨, 对1332 keV<0.2%, 相对高的价位, 对系统运行要求专门的经验与维护。

4) 塑料闪烁体。有机类闪烁体, 大的尺寸, 可做到1 m×2 m×1 m, 差的能量分辨, 由于大面积或大体积而具有高的灵敏度, 快时间响应(约1 ns), 很低的价位, 特适用于无需能量分辨的出入口通道及其他场合。

### 3.3 基于快中子相互作用和慢化的中子探测器

#### 概要

1)  $^3\text{He}$  正比计数器。时间分辨约  $\mu\text{s}$  量级, 探测效率约 1%, 伽玛灵敏度很弱。

2) 有机闪烁体。时间分辨小于 0.5  $\mu\text{s}$ , 探测效率大于 10%, 伽玛灵敏度很高。

3) 液体闪烁体。时间分辨近于 1 ns, 探测效率大于 10%, 伽玛灵敏度很高, 使用脉冲形状甄别后伽玛灵敏度降低, 但计数率受到限制。

4) 反冲质子望远镜。时间分辨 5 ns, 探测效率约  $10^{-3}$  量级, 伽玛灵敏度极低。

5) 包镭  $^3\text{He}$  正比计数器。时间分辨 10~100  $\mu\text{s}$ , 探测效率 1%~10% (对  $^{252}\text{Cf}$  中子), 伽玛灵敏度很低。

6) 掺  $^6\text{Li}$  玻璃。铯激活, 时间分辨约 1 ns, 探测效率约 10% (对  $^{252}\text{Cf}$  中子), 伽玛灵敏度中等偏低。

#### 3.4 需配套的技术

除了伽玛射线探测器和中子探测器, 完整的爆炸物检测装置必须包括: 高性能中子源及其控制系统; 高性能探测器输出信号采集、管理和存储系统; 伽玛谱数据专用分析软件; 爆炸物识别数据库; 中子数字成像及其图像构建系统; 系统运行的连锁与保护; 辐射防护(屏蔽)系统等。

一般说来, 高性能中子源及其控制系统需要专门研制, 其性能指标以高为好。如: 使用寿命, 中子产额, 可靠性, 可移动性等最为重要。

伽玛射线探测器及其数据采集、管理和存储系统的主要部分有较成熟的商品, 如: 探测器, 其性能指标应根据总体要求, 综合权衡; 数据采集的管理与控制需专门研制。

伽玛谱数据分析软件和爆炸物识别数据库是检查系统的关键, 它的水平直接影响装置性能, 完全要靠自主开发, 其成果具有创新价值。

## 4 中子核查技术用工业中子源概要

### 4.1 放射性同位素源类

1) 由同位素源发射荷电粒子与轻元素相互作用产生中子。如( $\alpha, n$ )核反应的  $^{241}\text{Am-Be}$  源, 源强度一般小于  $10^8$  n/s, 平均中子能量 4.2~5 MeV, 中子能谱为宽谱, 无脉冲化能力, 适用于 TNA, FNA。

2) 由同位素源引起的光核反应产生中子。如( $\gamma, n$ )核反应的  $^{124}\text{Sb-Be}$  源, 源强度一般小于  $10^9$  n/s, 平均中子能量约 0.03 MeV, 中子能谱为窄谱, 无脉

冲化能力, 适合于 TNA 和裂变探测。

3) 由重核自发裂变产生中子。如  $^{252}\text{Cf}$  核的自发裂变, 源强度一般小于  $10^{12}$  n/s, 中子平均能量约 2.1 MeV, 中子能谱为裂变谱, 通过裂变事件为触发器具有脉冲化能力但呈随机性, 因而无“重复周期”, 适用于 TNA。

放射性同位素源适合于现场和野外作业。

### 4.2 低能加速器类 (小于 200 keV)

密封式中子管。使用的核反应一类为 D+D, 其中子源强一般小于  $10^8$  n/s, 中子能量约 2.5 MeV, 有脉冲化能力, 脉宽大于微秒, 重复周期约 10 kHz, 适用于 TNA, GTNA 和可裂变探测。另一类为 D+T, 中子源强一般小于  $10^9$  n/s, 中子能量约 14 MeV, 有脉冲化能力, 脉宽大于微秒, 重复周期 10 kHz, 适用于 TNA, FNA, PF/TNA, 可裂变探测。

密封式中子管适合于现场使用。

### 4.3 “中”能加速器类 (大于 500 keV~2 MeV)

1) 范德格拉夫型。通常使用的核反应为(p,Li), 中子源强  $10^8\sim 10^{10}$  n/s, 中子能量约 0.15~1 MeV, 中子能谱为窄谱, 有脉冲化能力, 可直流、纳秒、微秒三种工况运行, 适用于 TNA, GTNA 和可裂变探测。

2) 射频四极型。通常使用的核反应为(d,Be), 中子源强  $10^9\sim 10^{11}$  n/s, 中子能量可变, 中子能谱为宽谱, 有脉冲化能力, 可直流、纳秒、微秒三种工况运行, 适用于 TNA 和可裂变探测。

“中”能加速器一般都用于中子检测爆炸物科研或专门应用。

### 4.4 “高”能加速器类 (大于 2MeV)

1) 范德格拉夫(静电型)。通常使用的核反应为(d,D), 中子源强  $10^9\sim 10^{11}$  n/s, 中子能量可变, 中子能谱为单色, 有脉冲化能力, 重复周期 1~10 MHz, 适用于 FNA 和可裂变探测。

2) 范德格拉夫(回旋型)。通常使用的核反应为(d,Be), 中子源强  $10^9\sim 10^{12}$  n/s, 中子能量可变, 中子能谱为宽谱, 有脉冲化能力, 脉宽 ns 级, 重复周期约 1 MHz, 适用于 NRA。

“高”能加速器一般都用于中子检测爆炸物科研或专门应用。

## 5 典型问题的考虑

### 5.1 第一类问题

以航空港物流安检为例, 它具有相当代表性。

表 1 各类工业中子源用于中子质询技术的适用性

Table 1 Properties of some neutron sources

| 中子源                    | 特性  |
|------------------------|---|
| 放射性同位素源                |   |
| <sup>241</sup> Am-Be 源 | 源体积小, 宽中子谱, 伴随有 $\gamma$ 本底, 任何时候均发射中子, 适用于 TNA 和 FNA。                        |
| <sup>252</sup> Cf 源    | 源体积小, 宽中子谱, 伴随有 $\gamma$ 本底, 任何时候均发射中子, 仅适用于 TNA。                             |
| 小型密封型中子发生器             |   |
| D+D 反应                 | 源可携带或移动, 单能中子, 无伴随 $\gamma$ 本底, 切断电源无中子发射, 适用于 TNA、GTNA 和 APT/TOF。            |
| D+T 反应                 | 源可携带或移动, 单能中子, 无伴随 $\gamma$ 本底, 切断电源无中子发射, 适用于 TNA、GTNA、FNA、PF/TNA 和 APT/TOF。 |
| “中”能加速器                | 源体积大, 中子产额高, 一般不可移动, 大多用于实验室研究, 很少现场使用, 适用于 TNA、GTNA。切断电源无中子发射。               |
| “高”能加速器                | 源体积大, 中子产额高, 一般不可移动, 大多用于实验室研究, 很少现场使用, 适用于 FNA、PF/TNA。切断电源无中子发射。             |

设单位时间有  $N$  件物件需要检查, 其中有  $n_0$  件为爆炸物。这一检查依靠常规的 X 射线透视法, 因为它要求高的通过率, 即单位时间 (小时) 的检查件数是一个大数, 只有靠 X 射线透视法才能胜任, 一般称为初级检查。经初级检查筛选出  $n$  件可疑物件。显然,  $n$  值有两种情况, 一是  $n > n_0$ , 即检查有误报, 但也不能排除有漏报; 二是  $n < n_0$ , 此时既存在漏报, 同时不能排除有误报 (不讨论  $n = n_0$ , 因为  $n_0$  是安检前无法知道)。结论是安检装置的主要性能应尽可能减少误报和降低漏报。

开发并研制中子法检测系统, 国际核技术界的共识是归属于二级检测范畴, 即对经初级检查筛选出的  $n$  件可疑物, 用中子法再做进一步判断。显然, 因  $n \ll N$ , 即对二级检测不要求快速通过, 但要求对隐藏爆炸物有高的检测率 (命中率)。

靠什么保证中子法检测装置对爆炸物有比 X 射线透视法更高的检测率 (命中率), 研究表明, 除开中子法固有的特点外, 关键是伽玛谱数据分析专用软件、爆炸物识别数据库和提高系统信噪比, 叙述如下:

中子源: 高产额中子源有利于提高系统信号输出率, 有利于提高系统检测限, 但经验表明, 高的信号输出率和高的检测限, 并不意味一定会有好的系统信噪比。

伽玛射线探测器: 现代解谱技术的发展, 高的伽玛射线能量分辨不再是考虑的首要问题, 重要的是在选定伽玛探测器类型后, 其伽玛谱数据分析软件和爆炸物识别数据库应根据探测器能量分辨的高低, 采用不同的解谱技术。研究表明, 可选用高能量分辨的 HPGe, 也可选用低能量分辨的 NaI (TI), 或中等能量分辨的 LaCl<sub>3</sub>, 但都必须针对不同类型探测器, 研制不同的伽玛谱数据分析软件和爆炸物识别数据库。就是说, 能量分辨高低不是中子法探测装置性能指标的反映, 同样探测器效率也

不是制约因素。经验表明, 采用组合或阵列式结构, 即通过单个不太高效率的多个探测器组合来达到一定的探测效率, 这种方案有多方面的优越性, 因此, 单个探测效率也不再是关注的指标。

提高探测系统信噪比: 国内外研究工作表明, 在已有的多种中子质询技术中, 采用探测与中子产生相伴随的带电粒子结合中子飞行时间方法、由延时符合检测被检物诱发的特征伽玛射线技术, 即 APT/TOF 技术, 在原理上对于有效抑制核辐射测量中的非期望本底干扰, 从而提高安检系统的信噪比, 具有决定作用。目前, 这种技术使用的制约因素是, 研制亚纳秒级时间分辨符合谱仪和高产额且源斑小内置多路位置灵敏伴随粒子探测道的小型化中子发生器, 并达到商用化。

## 5.2 第二类问题

以敏感和要害场所进入的物件安检为例, 它具有典型性。

通常不会形成大的物流且物流不经常, 但需要对进入物件进行苛刻的定性, 即探查物件内部有无爆炸物及引爆机构。此类问题不追求快速检测, 而是追求极高的命中率和确保不漏报, 需要专门设计, 属于第一类问题的特殊应用。

中子照相可归属于三级检测, 即在二级检测已有基本结论前提下, 进一步采用中子照相对不透明外包装件给出全部图像信息, 这有益于提供最终决策, 如是否准许实施人工拆卸或在排爆器内销毁。

## 5.3 理想爆炸物品检查系统应具有的特性

1) 高的检出率; 2) 低的检测限; 3) 低的误报率; 4) 低的漏报率; 5) 无或小量的特征干扰元素; 6) 较为单一的干扰本底; 7) 快的检测速度; 8) 快速和多样化的检测结果报告; 9) 不妨碍正常活动; 10) 不对被测者产生后果; 11) 组装式设计,

可迅速转移；

技术如表 2 所示。

## 6 不同中子质询法检查技术的适用性

## 7 中子质询技术研发进展概貌

不同威慑源和不同使用场所适用的中子质询

以最先进的某些 APT/TOF 和 PFNA 为例, 见表 3。

表 2 不同威慑源和不同使用场所适用的中子质询技术  
Table 2 Scope of application with neutron interrogation

| 威慑来源                                   | 使用场所   | 物流情况     | 适用的技术  |
|--|--|----------|--|
| 可随身携带或托运的行李箱包内的爆炸物                     | 航空港受检点<br>邮局邮件分拣点<br>边境通关安检点                               | 中等偏高的流通率 | TNA (配合 X 透视/成像)<br>TNA/FNA (配合 X 透视/成像)<br>PF/TNA (配合 X 透视/成像)<br>NRA (多视角) |
| 隐匿于电子仪器, 台式计算机, 公文包式计算机、办公用电器等内部的小量爆炸物 | 航空港受检点<br>政府、团体首长和机要办公地 (指挥部)<br>机场大堂和候机楼<br>会展场所 (厅、馆、中心) | 中等偏低的流通率 | TNA<br>TNA/FNA<br>PF/TNA   |
| 埋藏的地雷                                  | 军事基地的清雷<br>战区扫雷<br>非军事的人道主义清雷                              |          | TNA, TNA/FNA, PF/TNA<br>(配合传统金属探雷器和定位雷达)                                     |
| 未引爆的弹药军械 (UXO)                         | 训练用靶场, 军火库<br>战区和隐匿的未知环境<br>人道主义清扫或排除                      |          | 基本上同   |
| 置于小型车辆内爆炸品                             | 停车地, 车库, 停机坪入口<br>敏感设施与大型公共场所入口<br>交通枢纽地                   | 中等偏低的流通率 | TNA<br>TNA/FNA<br>PF/TNA   |
| 置于运货车、集装箱、航空运输箱中的爆炸品                   | 边境重要通关卡口岸<br>大型货运运输陆路、海路要害口及集装箱<br>进出口<br>专机专车装运货物         | 中等偏低的流通率 | PFNA (纳秒冲准直的 FNA)  |

表 3 最新的中子质询装置

Table 3 Some current explosive detection systems

| 系统名称 | EURITRACK 项目 <sup>[4]</sup><br>(欧洲共同体)                                 | SENNA 系统 <sup>[5]</sup><br>(俄罗斯)   | PELAN 系统 <sup>[6]</sup><br>(美国) | FNGR 系统 <sup>[7]</sup><br>(澳大利亚)  |
|------|--|--|---------------------------------|---|
| 中子源  | 法国 SODERN 公司中子管, D+T 中子, 源强: $10^8$ n/s。<br>$\alpha$ 道: YAP:Ce, 8×8 阵列 | ING 型中子管, D+T 中子, 源强: 最大 $10^8$ n/s, 使用 $5 \times 10^7$ n/s<br>$\alpha$ 道: PIN, 3×3 阵列 | D+T 中子管 (脉冲式, 10 kHz)           | 中子管, D+T 中子, 源强 $10^8$ n/s, 最大 $10^{10}$ n/s,<br>配合 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 源, 源强: 2.4GBq |
| 探测器  | 中子探测器: BC501A<br>$\gamma$ 探测器: 127 mm×127 mmNaI (TI), 共 24 个           | $\gamma$ 探测器: 63 mm×63 mm 的 BGO, 配 R6233-01 型 PMT                                      | $\gamma$ 探测器: BGO               | 中子探测器: 塑料闪烁体, 阵列式。<br>$\gamma$ 探测器: CsI (TI), 阵列式。  |
| 检测对象 | 集装箱内部炸药及毒品   | 集装箱内部炸药及毒品、武器  | 隐藏爆炸物                           | 集装箱内部炸药及毒品、武器   |
| 研制概况 | 2007 年初在法国勒阿弗尔港口试运行  | 手提箱式, 主体尺寸: 900 mm×500 mm×300 mm, 处于演示试验阶段。  | 主体部分小于 45 kg                    | 全尺寸原型机已在布里斯班国际机场安装试运行   |

## 8 放射性材料检测

放射性材料通指反应堆用核材料, 军用核材料, 乏燃料, 放射性同位素, 工业用放射源, 辐照装置, 核燃料循环装置, 医用治疗源, 科研教学用放射性物质, 太空用同位素电池, 等等。鉴于核材料的至关重要, 一般将核材料单独列出。对人类健

康最有影响的放射性物质为:

$^{241}\text{Am}$ ,  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  和  $^{226}\text{Ra}$  9 种, 其中  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{Pu}$  4 种主要为  $\alpha$  辐射体,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{192}\text{Ir}$  三种为高能  $\gamma$  辐射,  $^{90}\text{Sr}$  属于高能  $\beta$  辐射体。核恐怖主义及其团伙寻求获取易裂变材料制造粗糙核装置 (IND, improvised nuclear devices), 获取放射性材料制造放射性散布装置 (RDD,

radioactivity dispersed devices)。

国际原子能机构(IAEA)最新的统计数据显示:2005年共发生103起涉及核材料及放射性材料非法贩卖事件和其他未经授权的活动,其内容涵盖了非法拥有、企图出售、偷运到材料的未经授权处置、丢失放射源等各种情况。103起中,18起涉及核材料,76起涉及放射性材料,2起涉及核材料及其他放射性材料,7起涉及受到放射性污染事件<sup>[8]</sup>。

“9.11”事件后,全世界在加强核保安和放射性保安的全球框架方面得到了更多的重视,取得了不小的进展,且这项工作仍在继续中。IEAE最新的行动计划是以满足成员国(140个)直至2009年的需求为目标。核保安是一种国家责任,要使保安措施发挥效能,国际合作必不可少<sup>[9]</sup>。

有别于探测没有核辐射的爆炸物,因放射性物质自身具有核辐射,测量其固有放射性是最直接的方法,在核技术中称为被动式技术。即利用专门研制的对 $\gamma$ 射线、X射线或中子发射灵敏的探测器,直接探测由隐藏放射性物质固有的特征 $\gamma$ 射线、特征X射线或中子发射。可以使用单一探测手段,也可以使用多种探测手段的联合。对人流与物流都适用。例如:

1) 小型 $\gamma$ 射线强度比探测仪。设置一个以上探测阈能,通过多个阈能以上积分计数比的异常,辨认放射性物质的存在与否。安装在人流与物流通道,可拆卸装配。

2) 小型方向(位置)灵敏 $\gamma$ 射线多区探测仪。利用 $\gamma$ 射线的康普顿散射效应,确定隐藏放射性物质的隐藏点。

3) 可移动和扫描式 $\gamma$ 射线强度探测仪。适用于停放在货场港口的集装箱内的放射性物质检测,一般安装在小型车辆上。当需要时, $\gamma$ 射线探测器可更换为对X射线或中子发射灵敏的探测器,也可多种探测器联合使用。国际上这一领域有代表性装置有德国Thermo电子公司的小型仪器(FHT1732型),设置两个甄别阈,低阈卡掉噪声,高阈比 $^{60}\text{Co}\gamma$ 能量(1332 keV)略高。在一个地区的不同地点,天然放射性本底强度可能不同,但两个阈值以上计数比基本上是一常数。如果检测时该比值有明显变化,即表明有放射性物质存在<sup>[10]</sup>。

当放射源方位未知时,采用可测定射线方位的那类探测器。例如,将HPGe做成多个区间式,在第一区间发生的康普顿散射时发射的电子产生第

一个信号,同时发射的次级 $\gamma$ 光子当进入第二区间且被吸收,产生第二个信号,由此可给出 $\gamma$ 射线的能量和方向,从而发现隐藏的放射性物质。

无论是隐藏爆炸物探测和隐蔽的放射性材料检测,都涉及本底的干扰或扣除,这是核技术法中一项难度极大的技术问题,也是工程问题。归纳来说,辐射测量本底来源于宇宙射线及其次生辐射;现场环境常存在物的寄生辐射;检测装置(系统)及其附属设施的固有辐射;探查源作用在现场环境常在物和检测装置(系统)及其附属设施诱发的辐射;探查源自身固有的非期望辐射;被检测物件(对象)及其包装材料中良性物质在探查源作用下的诱发辐射。解决本底问题更多的依靠经验,以及对经验积累和使用,没有捷径。

## 9 结语

中子质询技术探查隐藏爆炸物及其安检系统开发,是当前隐藏爆炸物探测科研领域,也是中子应用研究领域的热点课题之一。虽然其成熟度目前不如某些传统安检手段,相信随着科研工作与工程研发的不断深化,有理由指望采用中子质询技术的安检装置将会得到推广应用,并成为防范爆炸恐怖袭击的主要工具。

中子探查爆炸物系统的研制,在原理上没有任何可质疑之处,但它是一项复杂度较高的系统工程,有赖于中子源、核辐射探测器、谱图的特征量提取和定量,经验积累和判明真伪的能力提升,还包括政府的政策导向与扶持、公众的接受度提高等。

在各种中子质询技术中,TNA和FNA由于其空间分辨和非期望本底严重而带来的识别模糊化,已不再是当前的主要研究方向。基于APT/TOF技术的系统开发是当前最受关注的。而采用D+T反应内置伴随粒子的小型密封式中子管被认为优于其它各类中子源。

隐藏爆炸物品检查没有一种方法是万能的,不同场合不同目标需要用不同的技术,或联合使用几种技术。

隐藏放射性物质探查,由于被检查对象自身具有的核辐射固有特性,核技术在应用上已相当成熟,各类商用化产品,在国际上随处可见。但某些特殊应用领域,如无定向(固定)出入口空旷大面积地区流动人群携带放射性物质的探查技术研究,



仍然处于不成熟状态。

#### 参考文献

- [1] Report on the Workshop on the Role of the Nuclear Physics Research Community in Combating Terrorism[A]. DOE/SC-0062, July 2002, Washinton ,D.C
- [2] Bruschini C. Commercial Systems for the Direct Detection of Explosives(for Explosive Ordnance Disposal Tasks)[A]. Final Report, 17/2/2001
- [3] Buehler A. Contraband detection, using neutrons[J]. Nucl. Instr.&Methods B173 (2001)
- [4] Vourvopoulos G, Patrick Doty F. The EURITRACK project: development of a tagged neutron inspection system for cargo containers[A]. Proc. of SPIE Vol. 6213,621305, (2006)
- [5] Kuznetsov A, Evenin A ,et al. SENNA-Device for Explosives Detection Based on Nanosecond Neutron Analysis[A]. Proc. of SPIN Vol.6213,621306-1 2006,Russia
- [6] Womble P C, Campbell C, Vourvopoulos G, et al. Gacsi, snd S. Hui, Detection of Explosives With the PELAN System[A]. Application of Accelerators in Research and Industry-Sixteenth Int'l, Conf., 0-7345-0015 (2001)
- [7] Eberhardt J, Liu Y, Rainey S, J, et al. Fast-Neutron/Gamma-ray Radiography Scanner Y. for the Detection of Contraband in Air Cargo Containers[A]. Proc. of SPIE Vol. 6213,621303-1, (2006), Australia
- [8] 核贩卖(IAEA的最新统计数据)[J]. 国际原子能机构通报, 2006,9,48/1
- [9] Steinhausler F, Bunn G. 核材料和强辐射源的保安[J]. 国际原子能机构通报, 2003,6,45/1
- [10] 孙汉城,李广将. 检查隐藏的违禁品的核技术[A]. 中国核学会核技术工业应用分会学术报告会文集[C]. 2004, 7

## Detection of Explosives and Active Material by Nuclear Technologies

Chen Hande

*(Institute of Nuclear Physics and Chemistry of CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China)*

**[Abstract]** The advantages and characteristics of detection of hidden explosives and radioactive materials by nuclear technologies are explained in this paper. The active neutron interrogation technology and their application to detection of explosives are introduced in detail. The non-neutron interrogation technology by gamma method, the commercialized industry neutron sources and gamma ray detectors and their advantages and disadvantages respectively in security application are summarized respectively. The security problem of two typical hidden explosives are discussed with 11 characteristics of a perfect detecting system of explosives. The current research progress in association with particle imaging and fast-pulse neutron system and the passive method to detection of radioactive materials are briefly described. Finally, the paper points out that for detection of hidden explosives and radioactive materials it is necessary to use different technologies for different scenes and targets or use combined technologies.

**[Key words]** nuclear technology;neutron interrogation;explosive;active material;active material detector