

# 诊察行李中暗藏炸药的新技术

杨青云 张英平



大家知道,由于恐怖活动造成国际上民航飞机爆炸事件不断发生.据不完全统计,自1984年以来,恐怖活动造成民航飞机爆炸事件达13起,造成千余人丧生.如何防止在行李中的爆炸物和各种武器混上飞机,是急需解决的问题.而目前各国机场对乘客和行李安全检查系统,绝大部分是采用X射线金属探测系统及化学气体取样分析炸药探测设备.这种设备对于可塑炸药等新型爆炸材料,其局限性是非常明显的.因为有些可塑炸药成分是高分子的碳、氢、氮、氧化合物,很难与塑料区分.多数炸药会释放出某种特定气体(有些可塑炸药没有任何气味),化学探测系统是根据取样周围空气的光谱分析来发现爆炸物.但速度太慢,又受到周围环境气体的影响而困难重重.因此,新一代的机场安全检查设备,已经在现代物理技术的基础上开始研制,虽然还不理想但已处在初步使用阶段.

## 一、现代物理诊探技术概述

### 1. 计算机层析X射线照相系统

在医用计算机层析X射线照相(CT)扫描设备的基础上,研制出用于机场行李安全检查的高速X射线CT扫描系统.该系统根据炸药特殊的密度特性,对每件行李进行径向 $360^\circ$ 范围内多点、轴向多位置X射线断层扫描,计算出行李内各种物品的精确密度,与数据库中百余种炸药密度比较,判定有炸药时,监视系统给出信号,再做直接检查.

CT扫描系统可以建立行李中物品的三维图象,分辨率可达1mm.因此该系统通过测定行李中物品的密度,可以查出藏在行李中的炸药.目前该系统处理行李的速度是每小时360件,将来可提高到1200件.缺点是X射线剂量较高,可使尚未冲洗的胶片曝光,这是急待解决的问题.

### 2. 背散射探测系统

该系统的依据是X射线在低原子序数Z的材料(通常是有机材料)中,主要以康普顿散射形式吸收,而在无机材料中光电吸收是主要的.金属吸收X射线的的能力很强,而对有机材料(如塑料、药品),X射线通过后,将一部分能量传递给原子的电子后,以一定的概率沿原路返回,形成背散射.例如炸药,主要成分是氮,原子序数低,X射线照射后,产生大量背散射,而高原子序数的材料背散射极小.因此,背散射探测系统,是同

时测量透射X射线和背散射X射线的探测系统.用两套监视系统分别显示透射图象和回波图象.比较这两种图象,可以查出各种可塑炸药、塑料武器甚至毒品.

该系统是用两组探测器在行李的两边同时检查.检查速度达每小时1500件,该系统X射线比较硬,可以穿过19mm厚的钢板.售价比较便宜,目前已有小批量生产.

### 3. 热中子分析系统

中子与物质相互作用有其独特性质,任何原子核吸收中子后,都会释放出 $\gamma$ 射线.不同原子核释放的 $\gamma$ 射线有其特定能量(叫特征 $\gamma$ 射线),这样热中子系统在材料分析、机场安全检查中就有应用价值.炸药的共同特征是氮的密度很高,氢等其他低原子序数的成分也比较高.以特征氮元素为主,结合其他几种元素,可综合判断行李中是否藏有爆炸物.检查时,行李通过传送带进入照射室,室内有铀源放出低能中子,各种物品吸收中子后,放出 $\gamma$ 射线,氮放出 $\gamma$ 射线的能量为10.8MeV,分布在行李周围的探测器单元阵列,可以记录不同能量的 $\gamma$ 射线.特征元素产生的 $\gamma$ 射线的数量取决于炸药的数量、位置、入射中子通量和特征元素产生 $\gamma$ 射线的能力(辐射系数).因此,用特征元素产生的 $\gamma$ 射线和探测器阵列,可以查出炸药的数量和位置.

该系统首先对行李中不同物品测定出基准值.建立约4000个基准值的数据库,其中约一半是用不含炸药的行李测出的,其余的是随机选出装有模拟炸药的行李测出的.检查行李时,根据探测单元的特征 $\gamma$ 射线,进行统计处理并与基准值比较,直接得出行李中是否藏有炸药.处理行李的速度为每小时600件,比要求的低.目前对可塑炸药检出率为98%,将来有望达到100%.

### 4. 热中子层析照相系统

该系统与X射线CT十分类似,也称做热中子CT.如与热中子分析系统配合使用,能保证炸药的检出率,后面将专门讨论.

### 5. 其他方法

热中子分析系统,利用的是铀源的中子与特征元素氮的 $N(n, \gamma)$ 反应.其实也可用快中子做源,利用 $N(n, n'\gamma)$ 反应.该法除了用中子发生器的14MeV中子替代铀中子源外,其他部分与热中子分析系统相近,不再细述.

穿透力强的还有 $\gamma$ 射线,用它做人射源发展了 $\gamma$ 射线共振吸收法.炸药中的 $^{14}\text{N}$ 有一个9.17MeV的

激发态,如用 9.17MeV 左右的  $\gamma$  射线扫描行李,炸药会对它有强烈的共振吸收,故用此法亦可检出炸药,但产生 9.17MeV 左右的  $\gamma$  射线源,设备比较复杂,所以该法未达实用阶段。

## 二、热中子层析照相系统

热中子层析照相系统如图 1 所示。以平行的中子束照射检测样品,样品放置在转动控制台上,与束流方向形成一直线,中子的一部分被样品中的原子核俘获,产生特征  $\gamma$  射线(也可以用前面讲过的热中子分析系统分析);而另一部分中子穿过样品后,在闪烁体荧光屏内被吸收(吸收效率是  $\epsilon_s$ ),并且产生  $\gamma$  射线,该射线通过前表面镜-透镜系统进入 CCD 探测器(这是  $n \times m$  个像素组成的矩形阵列),在 CCD 内形成的电信号,比例于闪烁体荧光屏中探测到的中子数目。这种透射中子的数目及分布情况,反映热中子与样品中各种物质相互作用的概率,因此反映出样品中各种物质密度的变化情况。这与 X 射线 CT 十分类似,方法也很相近,只是射线源与探测系统有所区别。所以有时把热中子层析照相系统称做热中子 CT。

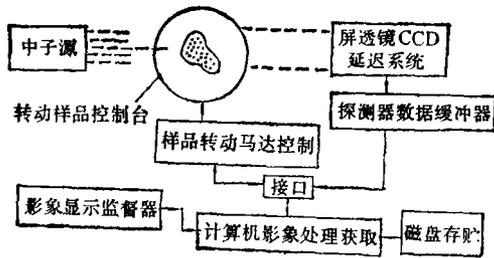


图 1 热中子层析照相系统

### 1. 探测器系统

位置灵敏中子探测系统,是根据电-光学结构和二维积分探测器建立的。探测器系统示意于图 2。探测中子采用  ${}^6\text{LiF-ZnS}$  (NE426) 闪烁体,光用前表面镜和透镜反射聚焦到致冷的 CCD。 ${}^6\text{LiF}$  闪烁体荧光屏的探测效率  $\epsilon_s$  是 15%。当热中子垂直于闪烁体荧光屏入射时,光输出是  $1.7 \times 10^3$  光子/中子,这种探测器对样品中产生的  $\gamma$  射线的探测效率是相当低的。如果需要增加闪烁体荧光屏的固有效率,空间分辨率要相应减小。在一维情况,中子入射方向相对于闪烁体荧光屏的方向倾斜角度  $\alpha$  (如图 2 看到的),中子在闪烁体荧光屏内的路程增加  $(\cos \alpha)^{-1}$  倍,增加了中子的俘获效率,但是减小了光输出。

在闪烁体荧光屏内产生的  $\gamma$  光子,经前表面镜反射,通过一个透镜进入 CCD,这种几何条件的安排,是为了防止中子束射到 CCD 上,减少探测器的辐射损伤,也消除了中子引起的噪声。CCD 用积分模式,CCD 类型选择取决于系统要求的空间分辨率。NE426 闪烁体的空间分辨率是  $100\mu\text{m}$ 。

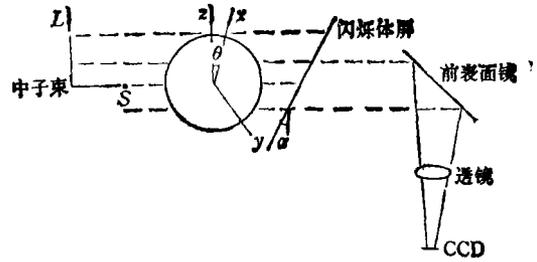


图 2 位置灵敏中子探测器示意图

中子在闪烁体荧光屏中产生的大量  $\gamma$  射线,经透镜后损失了相当大一部分,得到的份额(对小角度  $\alpha$ )是  $L = [2F(m+1)]^{-2}$ ,  $F$  是透镜的焦距与孔径比值,  $m$  是缩小倍数。如果假定 CCD 的尺寸近似  $1\text{cm}$ ,那么  $20\text{cm}$  的闪烁体荧光屏,缩小倍数是 20,用  $F = 1.2$ ,可以得到  $L = 4 \times 10^{-4}$ 。这样一个透镜的透射系数  $\epsilon_L = 0.85$ , CCD 的量子效率  $\epsilon_Q = 0.3$ ,闪烁体荧光屏的光输出是  $N_s$ 。当中子停止在闪烁体内的时候,在 CCD 内产生的光电子数  $L_e = L\epsilon_L\epsilon_Q N_s$ 。在这种情况下,  $L_e = 17$  电子/中子; CCD 的读出噪声  $N_{r0} = 10$  电子/象素,暗电流  $\ll 1$  电子/象素·秒。这种探测系统的空间分辨率受到闪烁体荧光屏空间分辨率  $100\mu\text{m}$  的限制。如果考虑到中子流通量近似是 1 中子/象素·秒,那么空间分辨率可达到  $120\mu\text{m}$ 。

对于一个理想的探测系统,信噪比仅由进来的中子的统计性确定,如果测量了  $N$  个中子,理想的探测器噪声等于  $\sqrt{N}$ ;对于闪烁体屏-透镜-CCD 探测器,若每个中子在 CCD 中产生的电子数是  $N_e$ ,那么这个系统测定中子数的噪声是  $\sigma_n = \sqrt{N(1+N_e^{-1})}$ 。由于  $N_e = 17$ ,因此与理想的探测器比较,噪声增加  $\sim 3\%$ 。若测到  $10^2$  中子/象素·秒,在 100 秒的积分时间内测量了  $10^4$  中子/象素。考虑到暗电流和读出噪声的贡献,总噪声  $\sigma = NN_e^2(1+N_e^{-1}) + N_e^2 + N_{r0}^2 = 1753$  电子/象素,这等效于 103.1 中子/象素。其中暗电流和读出噪声近似为 6 个中子/象素(要求  $10^4$  中子计数),如果阵列为  $512 \times 512$  象素,象素总数是  $2.56 \times 10^5$ ,在整个面积上的总计数率是  $2.56 \times 10^7$  中子/秒。

通过建立单个屏-CCD 系统网路,可以增加影象面积,而不牺牲单个象素的分辨率。如图 3 所示。

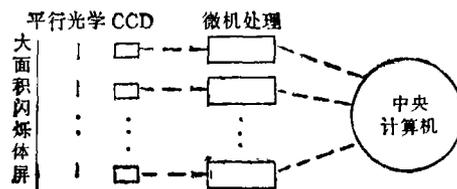


图 3 大影象二维探测器网路

# 巴基管研究的新进展

奇 云

以  $C_{60}$  为代表的巴基球是纯碳的第三种稳定的同素异型结构,具有许多独特的物理化学性质,显示出了广泛的应用前景.为此,巴基球的发现和深入研究,被科学界誉为开创碳化学领域的一场革命.

当巴基球这颗“科技明星”刚刚升起之际,又一个熠熠生辉的新名词跃入了人们的眼帘,这就是目前鲜为人知的“巴基管”.

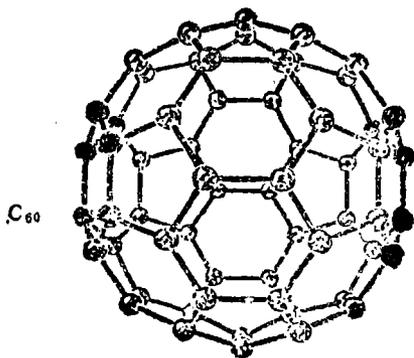


图 1  $C_{60}$  分子的形状如足球

初步认为,巴基管是巴基球的“近亲”(或许是“一家人”),它也是一种由纯碳原子簇组成的碳分子.只不过,巴基球呈球形或类球形笼状结构(图 1),而巴基管是由碳原子组成的管状纤维(图 2).

巴基管的发现者是日本电气公司(NEC)基础研究实验室的电子显微镜专家纯雄饭岛.1991年5月,纯雄饭岛在用电子显微镜观察巴基球时发现,强电子束下的巴基球展开成管状结构.他在用碳棒电极的电弧产生巴基球后,将负极上的沉积物拿到电镜下观察,结果在沉积物上发现了细微的管状纤维,其长度在1微米至几微米之间,外径在1—30纳米之间.1992年,恩多等人用常规的气相法制备巴基球,然后加热处理到2800℃,得到很细的纤维(3纳米以下),其中有外径仅为1.02纳米的纤维,是迄今为止最细的碳管.

## 2. 层析照相的重建方法

所有用辐射传送层析照相象的方法,基本的目的是重建测试样品内部的微观相互作用截面  $\mu(X, Y, Z)$  的空间分布(或样品内部的密度分布).辐射可以从不同的角度穿过样品,测量辐射穿过样品的吸收情况.对于热中子影象,  $\mu(X, Y, Z) = \sum_i \sigma_i(X, Y, Z)$ .  $\sigma_i$ ,  $\rho_i(X, Y, Z)$  是第  $i$  类物质的核密度,  $\sigma_i$  是第  $i$  类

纯雄饭岛根据放大50万倍的高分辨率透射电子显微镜得到的图象和电子衍射图,研究了这种管状纤维的横断面,发现它是由2个或多个到50个同轴管组成.粗管套细管,管与管之间相距0.34纳米(见图3),大致等于巴基球  $C_{60}$  的半径,也大致等于石墨中碳原子层与层之间的距离.

电子衍射图表明,巴基管的管壁是一种像石墨片中发现的六边形碳环结晶结构(六边网格状结构),但有扭曲.各排六边形看上去仿佛是被卷了起来,并粘贴在临近的一排六边形上,形成一个螺旋管(见图4).这种螺旋管状碳分子,其两端可无限延长.对于螺旋结构,在蛋白质中并不少见,但在无机材料中,仅在  $C_{60}$  上见到过.巴基管

的卷绕方式很考究,不同卷绕方式得到的巴基管,它的性能可以迥然不同.总而言之,巴基管是一种类石墨的微管,可以看作是由一层石墨层卷起来的,直径只有几个纳米的微管,也可以看作是由不同直径的微管同轴地套在一起的管束.

纯雄饭岛认为,巴基管在化学上应该是稳定的,不会发生氧化作用.这是因为,巴基管没有剩余的键可与氧原子结合,除非是在管的两端.但管的两端基本上被自行编织的“帽子”封闭了.事实上,早在巴基管的存在成为科学新闻之前,研究巴基球的前驱——赖斯大学的化学教授斯马利就同德雷塞尔豪斯对该管作

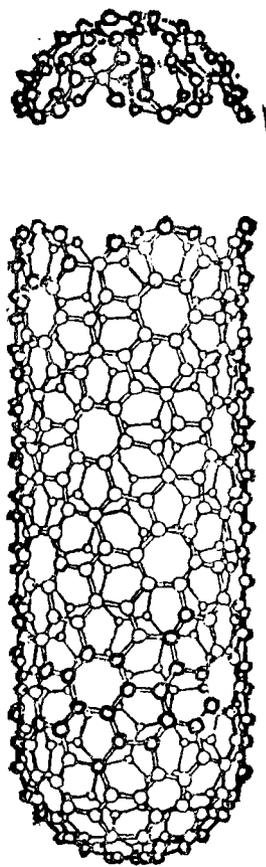


图 2 巴基管示意图

物质的相互作用截面.二维  $\mu(X, Y)$  的重建,是在厚度  $\Delta Z$  的断层内,多次投影获得的,用富利叶变换,可以得到  $\mu(X, Y)$ . 在  $Z$  方向改变测量位置,可以得到三维  $\mu(X, Y, Z)$ . 或者直接执行三维重建方法.

最后,热中子层析照相法在反恐怖活动中将起重要作用,如在机场安全检查中搜索出炸药等爆炸物,在反毒品走私中搜索出毒品以及材料分析等.因此,热中子层析照相是人们非常重视的一个领域.