

# 用中子方法检查隐藏爆炸物的理论研究工作进展

蔡少辉 黄正丰 邓力 黄捷

(北京应用物理与计算数学研究所 北京 100088)

**摘要** 本文介绍用中子方法检查隐藏爆炸物的理论研究工作进展,包括对仪器原理的初步分析和相应程序系统和参数文件的建设状况.

**关键词** 热中子分析法(TNA), 快中子分析法(FNA), 脉冲快中子与热中子相结合法(PFSNA), 脉冲快中子分析法(PFNA), 伴随粒子技术(APT), 中子光子联合输运, Monte Carlo 模拟, 响应函数.

## 1 前言

自动检查隐藏爆炸物是一项既困难又复杂的技术. 行李箱中的炸药大约占箱子重量的1.5%(300克),而300~500克的烈性炸药就足以将喷气式客机摧毁. 由于大多数炸药的组成元素(多为碳、氢、氧、氮)与多数日常物品相同,密度又与大多数常用塑料制品相近,加上塑性炸药可以捏成任何形状,例如碾成薄片状,机场X光检查难以辨认. 有些炸药的挥发性很弱,气体成分分析仪或探嗅器亦无能为力.

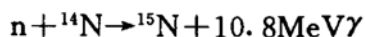
近十年来,由于核检技术,其中包括核电子学、中子管设计等工作取得的进展,利用中子进行检测是最有希望的方法之一. 中子的穿透能力强,它与炸药中的原子核相互作用,发射特征 $\gamma$ ,因而能确定它的存在.

迄今为止,共提出了五种利用中子检测隐藏炸药的候选方案<sup>[1]</sup>. 这些方案由简到繁,体现了人们对中子检测技术开发研究工作的日益深入.

## 2 仪器工作原理的初步分析

### 2.1 热中子分析法

热中子法主要根据炸药中的氮含量一般高于日常物品,通过测量热中子引起的氮俘获 $\gamma$ 反应为



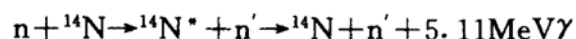
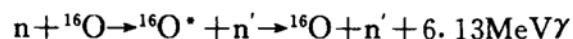
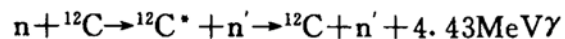
给出行李箱中的氮元素密度分布图. 这种反应的截面虽小,仅75mb,但产生的 $\gamma$ 射线能量

却很高,测量并不困难. 美国 SAIC 公司于 1985 年开始研制,1987 年中期对两种型号样机(一种用氙氙中子源,另一种用<sup>252</sup>Cf 源)进行实验室试验. 并于 1987 年 6 月至 1988 年 3 月在 Los Angeles 和 Sa Francisco 国际机场中投入试用. 试用结果表明,若以美国 FAA(联邦航空局)规定的最小探测炸药量的探测率为 100%,则误报率达到(18~20)%;若将探测率降到 90%,误报率约为 2%. 平均探测率约为(90~96)%,误报率约为(3~8)%. 据称,这种技术若与其它方法,如 X 线成象术结合,误报率可减少一半<sup>[2]</sup>.

这种利用热中子测氮的 10.8MeV 俘获 $\gamma$ 谱线辨认爆炸物的方法,尽管简单(能量如此高的 $\gamma$ 线很容易用 NaI 探测器测到),但含氮量高的不一定是炸药. 不少日常物品含氮量接近或高于炸药(见表 1). 仅用含氮量多少作出判断,很难避免误判或漏判.

### 2.2 快中子分析法

碳、氧、氮原子在快中子场照射下,发射具有特征能量的非弹性散射 $\gamma$ ,其反应为



这些反应截面分别约为 200、168 和 50mb,前两种截面明显比氮的热中子俘获截面大. 其中碳只发射一种特征 $\gamma$ (4.43MeV);氧发射 18 种,但以 6.13MeV 为主;而氮的特征 $\gamma$ 射线却有 41 种之多,相对缺乏突出谱线,易被其它核发射的谱线或环境的本底所掩盖.

表1 几种常见有机物品与炸药中的氮含量

名称	化学式	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	氮原子密度 (10 <sup>22</sup> atom/cm <sup>3</sup> )	用途
密胺	(C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> N <sub>6</sub> ) <sub>n</sub>	1.57	4.5	餐具
尿素三聚氰胺甲醛	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> N <sub>8</sub> O	1.5	3.44	餐具、收录机壳、瓶盖、化妆品盒
黑索金 RDX	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> N <sub>6</sub> O <sub>6</sub>	1.82	2.96	炸药
具托金	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> N <sub>8</sub> O <sub>8</sub>	1.63	2.65	炸药
尿甲醛	(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O) <sub>n</sub>	1.5	2.51	餐具、收录机壳、家具、家用电器壳
硝酸炸药	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	1.6	2.40	炸药
特屈儿	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> N <sub>5</sub> O <sub>8</sub>	1.6	1.75	炸药
聚氨脂	CHNO <sub>2</sub>	1.5	1.53	仪表壳、鞋底
聚酰胺树脂	CHNO	1.05	1.47	电气零件、容器、仪表壳、把手架、医疗体育用品
苦味酸	C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> N <sub>3</sub> O <sub>7</sub>	1.76	1.39	炸药
晴纶	C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> N	1.17	1.33	织物、篷帐、毛毯、滤布
TNT	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>6</sub>	1.654	1.32	炸药
硝化甘油	C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>9</sub>	1.59	1.27	炸药
季戊炸药 PETN	C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> N <sub>4</sub> O <sub>12</sub>	1.6	1.22	炸药
聚氨基甲酸脂橡胶	CHNO <sub>2</sub>	1.0	1.02	鞋底、衬垫、人造心脏、模具
黑火药	75+15%+10% KNO <sub>3</sub> +C+S	1.6	0.90	炸药
硝化纤维素	C <sub>12</sub> H <sub>15</sub> N <sub>5</sub> O <sub>20</sub>	1.6	0.88	炸药
尼龙-6	(C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> NO) <sub>n</sub>	1.13	0.60	外壳、齿轮、机械零件

由于 FNA 法是通过确定碳、氧、氮三种元素原子含量比值来识别炸药与普通物品的，它比单测氮原子密度的 TNA 法可靠。但是光凭这三种元素原子含量比值识别，仍然会造成误检。

表2列出几种炸药与氨基酸以及虾仁(食品)的碳、氢、氧、氮原子含量比值。可以看出，其中三硝基萘(炸药)与脯氨酸，三硝基苯(炸药)与甘氨酸的碳、氧和氮原子含量比值完全一样，因而它们在快中子场作用下发出的  $\gamma$  谱线也是完全一样的。因此单凭碳、氧和氮三种元素含量比值，也难以作出正确的判断。为了区别由碳、氢、氧和氮四种元素组成的爆炸物与普通物品，应设法确定这四种元素的原子含量比值。

本法用恒定氘氟中子源。

表2 某些炸药氨基酸以及虾仁的碳、氢、氧、氮四种元素的原子含量比值

物品名	化学式	N/C	O/C	N/C	H/N
三硝基萘(炸药)	C <sub>10</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.20	0.40	0.50	3.0
脯氨酸	C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub>	0.20	0.40	0.50	9.0
缬氨酸	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub>	0.20	0.40	0.50	11.0
高丝氨酸	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub>	0.25	0.50	0.50	9.0
高丝氨酸内脂	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> NO <sub>2</sub>	0.25	0.50	0.50	8.0
高半胱氨酸	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub> S	0.25	0.50	0.50	9.0
虾仁		0.25	0.51	0.50	7.06
三硝基苯(炸药)	C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> N <sub>3</sub> O <sub>6</sub>	0.50	1.0	0.50	1.0
甘氨酸	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	0.50	1.0	0.50	5.0
甘氨酸	C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> N <sub>3</sub> O <sub>7</sub>	0.50	1.17	0.43	1.0

### 2.3 脉冲快中子与热中子相结合方法

中子源采用  $\mu\text{s}$  量级脉宽的氡气脉冲中子管、脉冲间隔约为几十个  $\mu\text{s}$ . 在脉冲门内测量到的信号, 经过本底门信号扣除后, 得到快中子与碳、氧和氮元素的非弹性散射  $\gamma$  谱. 在两个脉冲之间测到的便是氢和氮元素的热中子俘获  $\gamma$  谱, 即除了测氮的热中子俘获  $\gamma$  之外, 还测量氢的热中子俘获  $\gamma$  反应:  $n + {}^1\text{H} \rightarrow$

${}^2\text{H} + 2.23\text{MeV}\gamma$  相应反应截面为  $332\text{mb}$ . 这种方法有望给出行李箱内四种元素的密度分布图, 因而比方案一或二优越.

以上三种方案只能给出有关元素的二维密度分布图像. 它主要用来检测行李箱中块状爆炸物. 下面两种方案则有可能给出碳、氧和氮三种元素的三维分布图. 因此可检查出片状爆炸物.

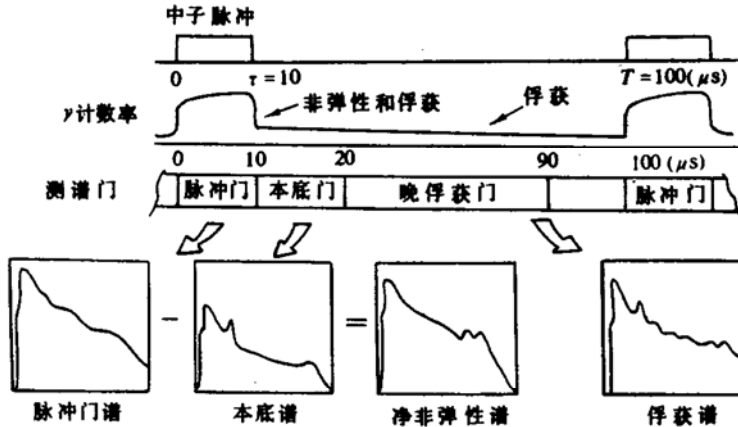


图1 脉冲快中子与热中子相结合方法的定时逻辑图

### 2.4 脉冲快中子束分析法

用小型加速器产生准直快中子脉冲, 对行李箱自上而下的扫描(见图2). 根据探测器收集到的有关元素发射的特征  $\gamma$  射线, 与快中子脉冲发射时间的关系, 给出上述三种元素的三维密度分布图. 对纳秒时间分辨技术, 空间深度分辨可达  $5\text{cm}$ . 因此 PENA 是一种层析照相技术. 如果它的空间分辨率能达到或小于爆炸物的尺寸, 那么它就给出该炸药所在空间内三种元素发射的  $\gamma$  射线信息.

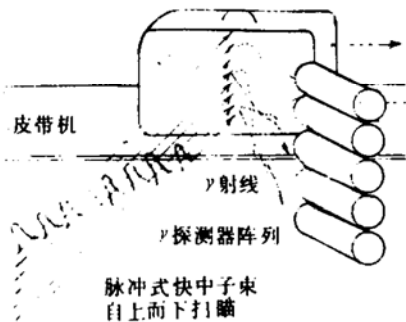


图2 脉冲式快中子检测行李箱示意图

### 2.5 伴随粒子技术

此法把 FNA 技术再推进一步, 目的在于提供中子非弹性  $\gamma$  的三维图像. 它得到美国联邦航空局 (FAA) 和美国海军的资助. Los Alamos 小组还把它发展成为核安全和裁军领域所用的核检手段.

伴随粒子法利用氡气反应产生的  $14\text{MeV}$  中子和伴随  $\alpha$  粒子的时空关联性质, 给出非弹性  $\gamma$  的三维图像.  $14\text{MeV}$  中子和  $\alpha$  粒子作为氡气反应的产物, 它们是同时、同地产生的. 当入射氡的能量比较低时, 它们的飞行方向相反. 因此通过给  $\alpha$  粒子定位就可以确定  $14\text{MeV}$  中子的飞行方向~通过确定  $\alpha$  粒子和随后中子核非弹性散射  $\gamma$  到达探测器的时间差, 确定中子核相互作用点离源的距离, 通过测定  $\gamma$  能谱确定相互作用点物质的核成分(见图3). 因此, APT 法也是一种层析照相术. 国外已於80年代后期研制出一种带  $\alpha$  闪烁探测器密封中子管<sup>[3]</sup>, 其强度达到  $10^7\text{n/s}$ . 此强度可能尚不满足 FAA 关于每分钟完成10件

行李箱的安检工作要求。

由此可见,方案四、五有望给出碳、氧、和氮三种元素三维密度分布图和氢、氮元素的二维密度分布图.因而具有最强的识别爆炸物的能力和更低的误报率的优点.但是它们都需要解决亚纳秒的时间分辨技术和其它一些技术难关.方案四需要建造小型加速器,以提供准直脉冲中子源,这在现代国际机场中恐怕难以采纳.方案五需要大幅度提高伴随粒子密封中子管的中子产额,此外也还有一系列有待解决的技术问题。

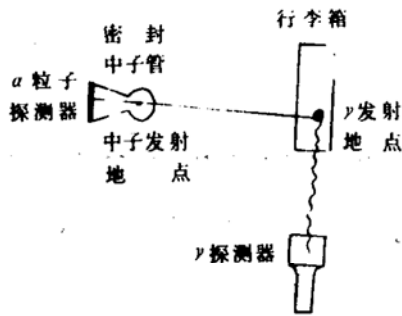


图3 伴随粒子照相术检测行李箱示意图

可见,方案二和三也许是较现实的选择.因方案三增加了热中子俘获 $\gamma$ 测量,故比方案二优越.方案四或五应是发展方向。

### 3 主要物理过程和反应机制模拟研究

#### 3.1 反演问题与正演问题的关系

如前所述,不论哪一种方案,用中子检测炸药就是根据仪器的记录,反推箱内某一分割体积元内的物质成分.这就是通常说的求解粒子输运的反演问题。

求解反演问题的方法一般取决于样品的厚度.若令 $E_j(j=1,2,\dots,n)$ 为仪器的第 $j$ 道址的记数, $C_i(i=1,2,\dots,m)$ 为箱内某一分割体积元内物质中第 $i$ 种元素的浓度.对于光性薄的样品应有

$$E_j = \sum_{i=1}^m C_i M_{ij} + \epsilon_j$$

$$j = 1, 2, \dots, n, \quad (n > m)$$

其中, $M_{ij}$ 为成正比系数,即单位浓度的第 $i$ 元素

对测量仪的第 $j$ 道址的响应贡献, $\epsilon_j$ 为第 $j$ 道址上计数率的统计误差.由于是光性薄样品, $M_{ij}$ 与样品中出现的其它元素无关,只需通过实验或理论方法确定系数 $M_{ij}$ ,也就是先研究正演问题,然后用最小二乘法,即通过让

$$S = \sum_{j=1}^n [E_j - \sum_{i=1}^m C_i M_{ij}]^2$$

为最小,求解 $C_i$ 便是.系数 $M_{ij}$ 又叫做第 $i$ 种核的标准谱或库能谱。

对于光性厚样品,上述关于 $M_{ij}$ 与样品中出现的其它元素无关的假定不再成立.这时样品中出现的其它核素会改变样品中的中子场和光子场,从而改变样品中某一元素对响应的贡献.故 $M_{ij}$ 本身也与 $C_i(i=1,2,\dots,n)$ 有关.在这种情况下,可采用叠代方法对 $C_i$ 求解.具体做法是:先猜测一组元素浓度 $C_i^1$ ,继而用这组浓度进行正演计算,得一组 $M_{ij}^1$ ;然后根据仪器记录 $E_j$ ,用最小二乘法求新的元素浓度 $C_i^2$ .如果 $C_i^2$ 接近 $C_i^1$ ,就说明所猜元素浓度正确,否则用 $C_i^2$ 代替 $C_i^1$ ,重新进行正演计算.如此叠代,直至收敛为止。

对于由碳、氢、氧、氮组成的一般日常物品或爆炸物品,14MeV中子的平均自由程约为 $(12/\rho)\text{cm}$ ,4MeV和6MeV的 $\gamma$ 光子的平均自由程分别为 $32/\rho$ 和 $39/\rho$ ,这里 $\rho$ 是物品的密度.由此可见,对于旅客所携带的行李箱或是行李箱中夹带的一些日常物品或爆炸物品来说,大多属于光性薄的样品,即使需要叠代求解,叠代次数也不过一二次便足够了。

#### 3.2 正演问题的数学模拟

对于正演问题,即给定箱中物质成分,研究仪器记录.这个问题可进一步分割成以下三个问题:(1)对由中子源、探测器(Nal、BGO、或HPGe)、行李箱、行李传送装置及检测环境组成的系统求解中子光子联合输运问题,以提供到达探测器表面的 $\gamma$ 光子角度能量联合谱强度(对方案四、五,还必须给出不同时间窗内的记数值).(2)对给定的探测器,

计算以不同入射角度进入探测器表面的不同能量的单位强度  $\gamma$  光子流引起的脉冲幅度响应函数,该问题涉及到光子进入探测器后引起光子、电子联合输运和能量沉积的过程.

(3)利用上述结果得到探测器的脉冲高度谱.

### 3.3 中子光子联合输运问题的数值模拟

用数值方法模拟中子光子联合输运问题

比较成熟.有两种不同做法,一种是确定论方法,另一种是 Monte Carlo 方法,又称作随机模拟法.考虑到中子源、探测器、行李箱及其物品,以及周围环境的复杂几何布局,选择 Monte Carlo 方法模拟是比较明智的.

尽管在核反应堆屏蔽计算中被广泛使用的通用 Monte Carlo 程序(如 MCNP-3A<sup>[4]</sup>),

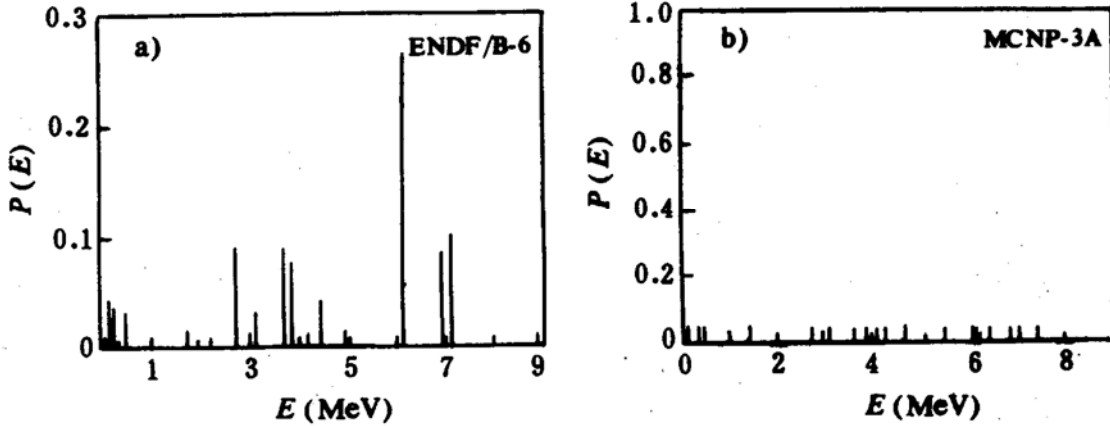


图4 氧的14.1MeV 中子总产光(归一化)谱线,MCNP-3A(a),ENDF/B-6(b)

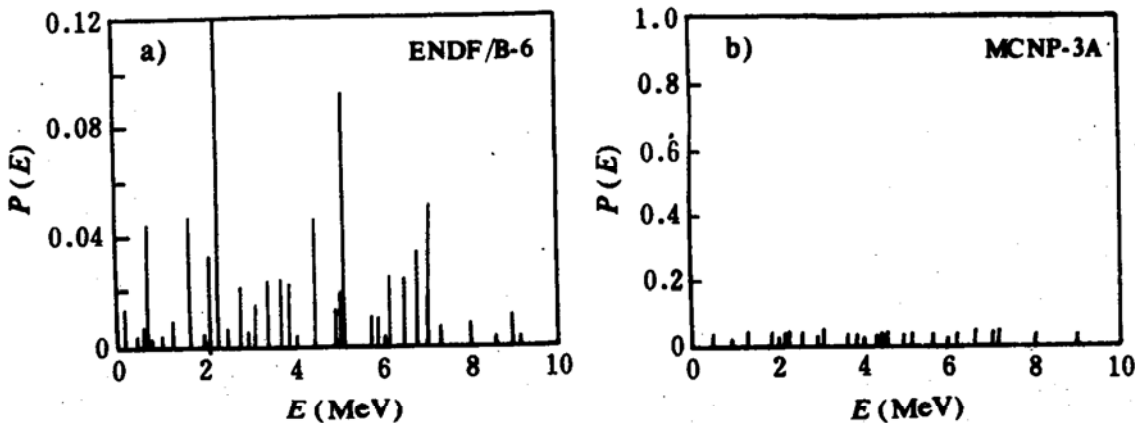


图5 氮的14.1MeV 中子总产光(归一化)谱线,MCNP-3A(a),ENDF/B-6(b)

在辐射能量沉积计算和辐射剂量计算中取得成功,但却无法适应含特征  $\gamma$  谱线的谱形计算要求.究其原因有三:(1)所有中子产光参数十分粗糙.尽管 MCNP-3A 可以对连续能量的粒子实行跟踪,但程序所附的参数文件却相当陈旧.绝大多数核的中子产光能谱是按30个入射中子能群(从 $10^{-5}$ eV 到20MeV)给出的.其中对每一个中子能群所给次级光子能谱为20个等概率(即等高度)谱线.次级光子的发射方向则按各向同性处理.图4、5分别

给出该参数文件中氧和氮核的14.1MeV 中子的产光谱线和实际谱线(ENDF/B-6<sup>[5]</sup>)之比较.由此可见,MCNP-3A 所附参数文件所给谱线,与实际谱线无丝毫共同之处.用这样的产光能谱计算中子光子联合输运问题,是不可能给出正确的  $\gamma$  谱线图像的.(2)由于探测器对箱内任一点所张的立体角很小,导致探测器的记数效率很低,因而  $\gamma$  光子谱形涨落很大.(3)在 MCNP-3A 程序中,探测器的记数是按指定的  $\gamma$  能量间隔进行的,不能适

应 $\gamma$ 谱线计算的要求。

针对通用 Monte Carlo 程序不足, 编制用于计算特征 $\gamma$ 谱线的中子光子联合输运专用的 Monte Carlo 程序, 以改善抵达探测器表面的光子谱形统计量。

### 3.4 $\gamma$ 能谱探测器的响应函数

为了进行 $\gamma$ 能谱分析, 只计算入射到探测器表面的光子流能谱是不够的, 还必须确定探测器对不同能谱 $\gamma$ 射线的响应函数。后者可按三种办法获取: (1) 实验方法。用标准单能 $\gamma$ 源确定某些能量 $\gamma$ 射线的响应函数。缺点是 $\gamma$ 射线源为数有限, 尤其是高能 $\gamma$ 源更难找到, 而且无法获得任意能量的 $\gamma$ 射线响应函数。(2) 理论方法。用 Monte Carlo 方法精确模拟 $\gamma$ 射线与核以及外层电子相互作用的复杂级联过程。能量为 $E_0$ 的 $\gamma$ 射线打在探测器上, 在其内发生各种反应, 沉积能量和激发荧光, 引起脉冲幅度响应。该方法要求事先给出探测器的尺寸和几何条件的详细描述。优点是 Monte Carlo 方法可揭示有关探测器的物理图像。(3) 用解析函数去拟合实验对一系列不同单能 $\gamma$ 源产生的响应函数测量结果, 并导出任意 $\gamma$ 能量的脉冲幅度函数。在选择拟合函数时, 应充分考虑 $\gamma$ 光子在探测器中引起幅度响应的各种物理机制, 从而得到相当适用、准确的响应函数。此方法最为简单, 适用于辐射测量仪器探索阶段。

## 4 结束语

今后所作的理论工作有五个方面(未包括辐射剂量安全的理论设计工作): (1) 对仪器的工作原理进行考察。(2) 对影响检测结果的各个因素, 包括中子源、探测器及其屏蔽体、中子慢化剂(需要的话)、中子反射体及源-探测器距离等进行研究, 以降低测量本底, 提高仪器的灵敏度。(3) 在此基础上对实验样机进行优化设计, 以缩小实验研究范围。(4) 对测量仪器进行刻度工作。(5) 提供能快速作出判断的计算机软件系统。

## 参 考 文 献

- 1 Vourvopoulos G, Paradellis T. (Ed.). International Conference Proceedings on "Applications of Nuclear Techniques", Heraklio, Crete, Greece, June, 1990, 338
- 2 Gozani T, et al. "Explosive Detection System Based on Thermal Neutron Activation", IEEE AES Magazine, Dec., 1989, 17
- 3 Moryado R E, et al. "The Detection of Bulk Explosives Using Nuclear-based Techniques", Proc. International Congress on Applied Criminology, Gent, Belgium, 29, August, 1988
- 4 Briesmeister J F. (Ed.). "MCNP-A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport", Version 3A, Los Alamos National Laboratory Report, 1983
- 5 Rose R F, Dunford C L. (Ed.). "Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File", ENDF-102, March, 1990

## Status of Theoretical Study on Detection of Hidden Explosives

Cai Shaohui Huang Zhengfeng Deng Li Huang Jie

(Institute of Applied Physics Computational Mathematics, Beijing 100088)

**Abstract** The status of theoretical study on detection of hidden explosives in IAPCM is presented. The analysis of the working principles of the instrumentations and the related computational codes and nuclear data needed are discussed.

**Key Words** thermal neutron analysis, fast neutron analysis, pulsed fast/slow neutron analysis, pulsed, fast neutron beam analysis, associated particle technique, neutron-photon coupled transport, Monte Carlo simulation, response function.