

# 用放射性测量技术识别化学毒剂

刘伯学, 黎云, 艾宪云

(防化研究院, 北京 102205)

**摘要:** 简单介绍了非破坏性识别化学毒剂技术, 研究了中子诱发  $\gamma$  谱法、热中子氢含量测量和 X 射线成像技术等放射性测量技术识别化学毒剂的原理和实际使用中的一些问题。

**关键词:** 化学毒剂; 梯恩梯; 热中子; 中子活化分析

**中图分类号:** TL84 **文献标识码:** A

## 1 引言

非破坏性检测技术是化学武器现场核查的主要手段之一。所谓的非破坏性检测是指不打开化学炮弹或化学毒剂储存容器, 直接在外面的用一些特殊仪器测量弹体或其内部物质的特征物理参数, 构造相应的统计学模型, 用测量数据作统计检验以确定化学武器的有关参数。

与常规炮弹相比, 化学炮弹的外壳比较薄, 弹壳内有一个装有 TNT 炸药的引爆管, 在弹壳与引爆管之间填充了一定量的液体化学毒剂。非破坏性检测方法可以在弹壳外直接确定弹壳内是否存在引爆管, 或者是否存在液体, 或者直接确定装填物质的元素组成, 从而区分常规炮弹与化学炮弹, 并确定化学毒剂的种类。

非破坏性检测方法主要有声学法和放射性方法两类。声学方法包括超声回声法与声学共振谱法。放射性方法可以测量的信息比较多, 中子诱发  $\gamma$  谱法测量毒剂中关键元素组成, 氢含量方法用热中子计数测量化学毒剂的氢原子密度, X 射线成像测量弹壳内引爆管和液体高度的图像, 利用这些参数可直接确定炮弹或毒剂的种类<sup>[1,2]</sup>。

最准确的核查技术是直接化学取样分析, 而非破坏性检测方法提供了一种安全、快速、低成本的方法, 它与化学直接取样分析有效结合, 可以提高核查的效率和置信度。

二战后日本遗留在中国的化学炮弹大部分掩埋

在地下土壤中, 锈蚀、泄露问题比较严重, 不宜使用简单、快速但需接触的声学类测试分析技术。因此, 在其销毁过程中, 非接触性的中子诱发  $\gamma$  谱法、热中子氢含量测量、X 射线成像技术等放射性测量分析方法将发挥重要作用。本文研究分析了这 3 种用放射性测量技术识别化学毒剂的原理和实际使用中的一些问题。

## 2 中子诱发 $\gamma$ 谱识别化学毒剂

中子诱发  $\gamma$  谱识别化学毒剂是中子活化分析的一种应用。常规弹药 (TNT) 和化学毒剂都是有机化学物质, 但元素组成不同, 特别是 N, Cl, S, P, F 等含量不同。表 1 给出了 TNT 和几种化学毒剂的主要化学组成。与煤成份分析或探测隐蔽爆炸物质等相似, 利用中子与这些轻元素作用产生的瞬时  $\gamma$  谱, 在中子照射的同时进行测量, 确定相关元素的种类和含量, 并确定炮弹及毒剂种类<sup>[1,3-5]</sup>。

表 1 TNT 及毒剂关键元素质量比例 (%)

元素	TNT	GB	VX	HD	L
H	2.2	7.1	9.7	5.0	1.0
C	37.0	34.3	49.4	30.2	11.4
O	42.3	22.9	12.0		
N	18.5		5.2		
P		13.6			
F		22.1	11.6		
S			12.0	20.1	
Cl				44.7	51.3
As					36.1

注: GB — Sarin, HD — Mustard (芥子气),

L — Lewisite (路易氏气)。

收稿日期: 1999-03-03, 修改日期: 1999-08-04

作者简介: 刘伯学 (1963—), 男 (汉族), 陕西岐山人, 研究员, 从事核监测与辐射防护研究。

表2给出了有关核素的中子反应参数。可以看出,主要利用热中子的俘获反应,同时也利用快中子的非弹性散射反应。同位素中子源一般主要发射快中子,经过慢化才能成为热中子。因此,必须有一个合适的慢化体,产生一定数量的热中子和快中子,用于照射待测的弹壳。此外,还必须要有适当的中子与 $\gamma$ 射线的屏蔽与防护,既减少中子对探测器的照射,又防止中子和 $\gamma$ 辐射对人员的照射。N型HPGe探测器有一定的耐中子照射的能力,并且中子损伤容易修复,测量系统一般选用N型HPGe探测器。

表2 识别核素核反应的参数

元素	核反应	$E_{\gamma}$ /keV	备注
As	(n,n' $\gamma$ )	279.5, 264.7	L
P	(n, $\gamma$ )	3 900.3	GB, VX
	(n,n' $\gamma$ )	1 266.1, 2 233.4,	
Cl	(n, $\gamma$ )	1 950.9, 1 959.1, 6 110.9	HD, L
H	(n, $\gamma$ )	2 223.3	由于能量刻度
S	(n, $\gamma$ )	5 420.5	HD, VX
	(n,n' $\gamma$ )	2 230.2	
Fe	(n,n' $\gamma$ )	1 235.8, 1 348.0, 1 356.5	GB
F	(n, $\gamma$ )	7 631.1, 7 645.4, 1 238.3	外壳
N	(n, $\gamma$ )	10 829.2, 10 829.2, 5 269.2	TNT, VX

从表2可见,瞬发 $\gamma$ 射线能量主要在1 000 keV以上,中子和这种 $\gamma$ 辐射具有很强的穿透能力,木材或金属的外包装箱等对测量的影响较小,不打开

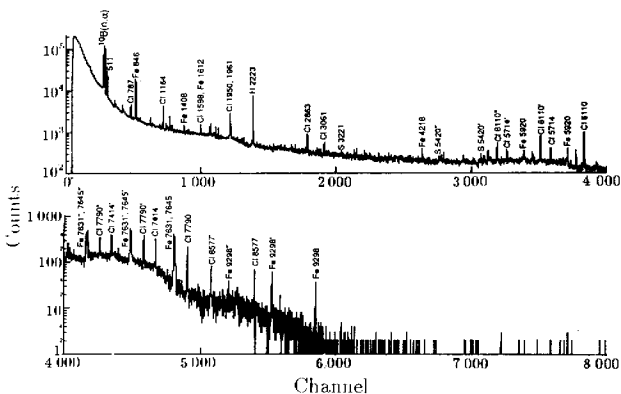
外包装箱也可进行测量分析。

化学毒剂的识别只需要元素种类的判别,因此,只需要测量和确定 $\gamma$ 峰能量,判定元素名称,不需要测量元素的相对含量,即谱仪系统只需进行能量刻度。由表2可见,各核素具有识别意义的 $\gamma$ 峰的能量基本上位于300~10 000 keV。在这个能量范围,谱仪的能量线性较好,可选择两个合适的能量进行线性刻度。不论是TNT还是各种化学毒剂,都含有H,其俘获 $\gamma$ 峰的能量为2 223.4 keV。一般情况下,弹体或容器的外壳主要是铁,其识别 $\gamma$ 峰的能量为7 631.1或7 645.4 keV。这样,谱仪系统能量刻度不需要特别的 $\gamma$ 源,使用这几个能量即可。

图1给出了化学毒剂芥子气(HD)的中子诱发 $\gamma$ 谱的一个测量结果<sup>[2]</sup>。谱中有用于能量刻度的H和Fe的 $\gamma$ 峰,也有HD的关键元素S和Cl的 $\gamma$ 峰。

一个典型的测量系统包括一个 $10^7 \text{ s}^{-1}$ 量级的同位素中子源,如 $^{242}\text{Cf}$ 或 $^{241}\text{Am-Be}$ ,一套相对效率50%左右的N型HPGe探测系统(包括笔记本计算机)和一个测量架(包括中子慢化体、屏蔽体、 $\gamma$ 准直器<sup>[1,3]</sup>)。除了毒剂识别与分析软件需针对化学毒剂的元素组成研究外,其余部分均可利用一般 $\gamma$ 谱分析软件。

美国国防部在图埃勒(Tooles)陆军基地先后于1991年4月、1992年8月和1994年初组织进行了非破

图1 化学毒剂HD的中子诱发 $\gamma$ 谱<sup>[2]</sup>

坏性检测技术的现场试验评价。中子诱发  $\gamma$  谱方法对贮存容器或化学炮弹, 不需移动可直接进行测量, 并能准确识别。即使是老化学炮弹, 也可在现场直接测量与识别。分析一个样品约需 500~2 000 s, 合理地提高放射源强度并最佳组配测量系统, 测量时间还可进一步降到约 200 s 或更少<sup>[1,2,6]</sup>。

此外, 也可使用中子管产生的 14 000 keV 中子。基于中子管的测量分析系统除利用慢化热中子俘获反应分析 H, N, Cl, P, S, Fe 等几种化学元素外, 还可利用高能快中子的非弹性散射反应分析 C, O 及 F, 能够测量、分析的元素多, 识别的可靠性高。中子管的中子注量可以达到  $10^8 \text{ s}^{-1}$  以上, 测量时间短, 但设备系统复杂、成本高<sup>[2]</sup>。

### 3 X 射线成像

化学炮弹的弹壳和引爆管一般是 5~20 mm 的铁, 如果用 200 kV 的 X 光机进行 X 射线成像, 可以得到比较清晰的弹壳及引爆管的图像, 合理调试仪器, 还可获得弹壳内液面高度的图像。炮弹内部是否存在引爆管是区分化学弹的关键, 将图像与已知的各种弹体比较, 即可确定其种类。在化学炮弹销毁时弹体内液面高度以及外壳和引爆管的图像对确定钻孔和切割位置是非常有用的。

X 射线成像方法与其它测试方法联合使用可以有效、快速地分类未知炮弹。对集装箱式保存的化学弹, 不用移动与打开集装箱, 用 X 射线仪可直接获得其内部弹体或容器的清楚图像<sup>[7]</sup>。

X 射线成像技术对识别没有标志的老化学武器是非常有用的, 在中日两国联合调查日本遗留化学武器的过程中, 多次使用了 X 射线成像技术, 取得了很好效果。

X 射线图像可以使用传统的胶片, 也可使用新型的工业 CT 技术。

### 4 热中子氢含量测量

从表 1 可以看出, 化学毒剂与 TNT 都含氢元素。表 3 给出了有关物质的氢含量, 氢含量可以有 2 种方法表示, 氢的质量比例 (%) 或单位体积的氢原子数 ( $10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ), 这里所涉及的氢含量是后者即氢原子密度。路易氏气 (L) 的氢含量是 TNT 的一半,

而其它毒剂的氢含量是 TNT 的 2~3 倍, 氢含量的差别是很明显的。

可以采用与中子水分计类似的原理, 用中子源照射化学炮弹, 氢元素将成为入射中子的主要慢化剂。在炮弹旁边测量氢慢化产生的热中子, 可以确定化学毒剂的氢含量, 进一步可确定毒剂的种类。

表 3 化学毒剂与爆炸物的氢含量及其热中子计数率估算

毒剂或炸药	质量比例 %	原子密度 $10^{22} \text{ cm}^{-3}$	计数率 $\text{s}^{-1}$
TNT	2.2	2.14	86.34
L	1.0	1.18	16.38
HD(N)	5.9	3.75	214.2
Tabun	6.8	4.39	268.7
GB	7.1	4.70	295.9
Soman	8.8	5.49	358.1
VX	9.7	5.92	407.5

130 mm 火箭弹内分别装入氢含量不同的碳酸氢钠、甲酸 (88%)、乙酸 (36%) 和水, 中子源为  $1.12 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$  的  $^{239}\text{Pu}-\text{Be}$  源, 热中子探测器采用  $\Phi 50 \times 150 \text{ mm}$  的  $\text{BF}_3$  计数管。图 2 给出了 130 mm 火箭弹的氢含量与热中子计数的刻度曲线, 也给出了 1 L 玻璃烧杯和 1.25 L 塑料瓶的曲线。3 条刻度曲线的差别是很明显的, 必须对每一种弹型分别进行

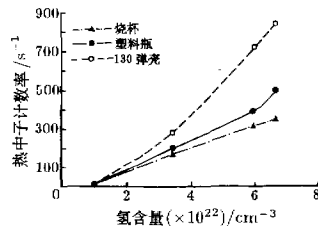


图 2 热中子计数率与氢含量的刻度曲线

刻度。化学炮弹的弹型很多, 不同弹体的化学毒剂装填量不同, 必然导致所产生的热中子数不同。

130 mm 火箭弹壳内填充不同氢含量物质时热中子计数率与氢含量之间的拟合函数为

$$n = 2.551x^2 + 64.40x - 63.16 \quad (1)$$

式中,  $x$  为化学毒剂的氢含量,  $n$  为热中子计数率。显然, 它不是简单的正比关系。

若弹壳内是高爆炸物或化学毒剂, 由式(1)可得到其相应的计数率, 见表3。如果测量时间为100 s, 则热中子计数在5倍的统计涨落范围内不重叠。这说明用此种方法可以识别弹壳内的毒剂种类以及是否是常规炸药。

日本遗留在我国的化学炮弹主要有4种型号: 150 mm, 105 mm, 90 mm 和70 mm, 主要装芥子气、路易氏气或芥、路混合毒剂, 且绝大多数都是装满量的, 每一种弹体的识别, 分别测量相应的校准曲线, 给出拟合公式。对于同种型号的未知炮弹在同样条件下测得热中子计数率, 根据拟合公式或者用插值法求出其氢含量, 判别化学毒剂的种类。对芥、路混合毒剂, 使用此方法时需要根据混合比

例进行适当的调整。

这种方法使用很弱的中子源( $10^5 \text{ s}^{-1}$ 量级), 辐射防护要求比较低, 测量仪器简单, 便于携带, 测量一发炮弹需要几分钟的时间。

## 5 结语

在几种非破坏性检测方法中, 声学类方法比较适用于分析大型容器内液体的高度以及毒剂的种类, 中子诱发  $\gamma$  谱方法几乎成了一种标准方法, 它能准确分析所有种类和处于各种包装存储状态的单体和容器<sup>[3]</sup>, X射线成像和氢含量方法是比较简单和快速的测量分析技术。此外, 3种放射性测量技术比较适合在日本遗留化学武器的销毁过程中使用。

## 参 考 文 献:

- [1] Caffrey A J, Cole J D, Gehrke R J *et al.* Chemical Warfare Agent and High Explosive Identification by Spectroscopy of Neutron Induced Gamma Rays [J]. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1992, 39, 1 422~1 425.
- [2] Taylor T T. An Assessment of Nondestructive Testing Technologies for Chemical Weapons Monitoring [Z]. PNL-8651/UC-706, May 1993.
- [3] 陈伯显, 何景焯, 刘建成. 中子感生激发  $\gamma$  射线煤多元素分析研究 [J]. 核电子学与探测技术, 1996, 16, 8~9.
- [4] 董少辉, 黄正丰, 邓力等. 用中子方法检查隐蔽爆炸物的理论研究工作进展 [J]. 核物理动态, 1995, 12, 64~69.
- [5] 李培俊, 陈景轩, 魏炳泉. 脉冲快中子探测隐蔽爆炸物的研究 [J]. 核物理动态, 1995, 12, 74~76.
- [6] Praezler Alan M. Technologies Selected from the Tooele Exercise [M]. Verification Technologies, 1992, First/Second Quarter, 11~14.
- [7] Efnried Gary. Low-power Portable X-ray System for Chemical Treaty Verification [M]. Verification Technologies, 1992; First/Second Quarter, 32~34.

# Identification of Chemical Warfare Agent with Radiological Measurements

LIU Bo-xue, LI Yun, AI Xian-yun

(Research Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

**Abstract:** There are three non-destructive radiological methods for identification of warfare agents and TNT. Their principles and problems related were discussed. Portable isotopic neutron spectroscopy is based on the assay of key elemental composition (such as Cl, P, H, As, S, N) in chemical agents by neutron induced prompt gamma ray analysis. Hydrogen concentration measurement by means of using thermal neutron can be employed to identify chemical warfare agents and TNT that contains different hydrogen fraction. The calibration curves of thermal neutron count rate against hydrogen concentration were measured. X ray imagination system can be used to determine the internal structure of chemical bombs, thereby to identify them. The radiological methods are very useful for identification of old chemical weapons abandoned by Japan Army during World War 2.

**Key words:** chemical warfare agent; trinitrotoluene; thermal neutron; neutron activation analysis