文章编号:1673-0062(2011)01-0006-04

降低 NaI(Tl)γ 谱仪探测限的技术探讨

郭晓彬^{1,2}, 屈国普¹, 刘志英², 王红艳², 王烈铭²

(1. 南华大学 核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要:核爆后其放射性元素种类复杂、量少,用 NaI(TI)γ 谱仪监测时,多种核素峰 重叠在能谱的散射区内难以识别,因此对谱仪的稳定性,能量分辨率,解谱技术以及 最小可探测活度有很高的要求.本文通过实验和 MCNP 模拟,分析了对某 NaI(TI)γ 谱仪探测限的影响因素以及降低探测限的措施,提出了通过屏蔽来降低本底,提高其 最小可探测活度的方法,实验表明,通过选择合理的屏蔽尺寸,有效的降低了本底,提 高了谱仪的低水平放射性监测能力.

关键词:NaI(Tl)γ谱仪;核爆;MCNP;探测限;屏蔽 中图分类号:TL817 文献标识码:B

Discuss the Technology for Decrease the Detection Limit of NaI(Tl) Gamma Spectrometer

GUO Xiao-bin^{1,2}, QU Guo-pu¹, LIU Zhi-ying², WANG Hong-yan², WANG Lie-ming²

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The radioelement species is complex and quantity is few after nuclear explosion, thus it is hard to tell the difference when using the Nal(TI) Gamma spectrometer detection due to several kinds of the peak of nuclide overlapped in the scattering region. So there is a high demand for spectrometer stability, energy resolution, solution spectrum and minimum detective activity. The paper analysed the influenced factors to Nal(TI) Gamma spectrometer and the measures of detection limit decrease by experiments and MCNP simulation, which proposed the methods to reduce background through shielding in order to improve minimum detective activity. The experiment shows that choosing reasonable shielding can reduce the background effectively and improve the spectrometer low level radioactive detect ability.

key words: NaI(Tl) gamma spectrometer; nuclear explode; MCNP; detection limit; shield

0 引 言

在低水平放射性和多种未知核素的测量中, NaI(TI)闪烁谱仪与溴化镧和高纯锗γ谱仪相比 NaI(TI)晶体更易于加工成各种形状、大体积时具 有较高的探测效率、价格便宜、响应快、在环境监 测方面具有广泛的应用,但其能量分辨率不高,难 以识别重叠在一起的多种核素峰;对于核爆后的 放射性物质监测,其成分一般为放射性气溶胶、烟 尘和放射性惰性气体,平均能量在0.5~ 1.15 MeV,处于能谱的中低能段,且多种核素峰 重叠在能谱的散射区内而难以识别,对能谱自身 固有性能以及测量时的统计参量和外界影响因素 提出了较高的要求;核爆后的放射性物质,往往以 烟云方式随大气飘散,放射性物质的量非常少,低 于环保监测常规设置的探测限,因此,降低探测限 以提高核爆监测能力至关重要.

为了获得更好的实验数据谱,在仪器固有性 能不变的情况下,本文提出了通过铅屏蔽降低本 底的方法来降低探测限,并对屏蔽体进行优化设 计,拟获得最佳可探测限活度.

1 探测限

1.1 低水平测量中常遇到的几个基本概念

1.1.1 判断限

无放射性,判断出有放射性的错误几率为 α, 有放射性判断出无放射性的错误概率为 β,如图 1 所示.





Fig. 1 Probability distribution of net counts in different expectations

可根据犯 α 差错的大小确定判断限 L_c ,确定 样品中有无放射性:

$$L_{c} = K_{\alpha}\sigma_{0}$$
(1)
式中, L_{c} —判断限; K_{α} —单边置信因子; σ_{0} —无放

射性时样品净计数标准误差.

1.1.2 探测下限

对于有放射性的样品,有可能计数小于判断限,以至于发生 β 错误,把放射性漏记了,可见探测限同时取决于犯 α 差错和 β 差错的概率,

如果确定了 α 和 β 的概率大小,那么净计数 有最小期望值,即为探测限,用 L_{0} 表示;

$$L_D = L_C + K_\beta \alpha_D \tag{2}$$

式中, L_{D} 一探测下限, L_{c} 一判断限, K_{β} 一单边置信因子, α_{D} 一样品净计数标准误差.

在两种差错的置信水平为95%,本底计数远 大于1的情况下,有

$$L_D \approx 4.65 \sqrt{M_b} \tag{3}$$

式中, M_b一本底计数^[1].

1.1.3 探测装置的优质因子

假定计数的误差只由放射性及本底的统计涨 落引起而忽略其他影响,在一定的标准误差下,测 量时间越短越好.即:

$$T = \frac{\left[\left(n_0 + n_b\right)^{1/2} + n_b^{1/2}\right]^2}{v^2 n_0^2}$$
(4)

式中: n_b —本底计数率, n_0 —样品净计数率,T—测量时间.

T可以作为比较不同测量装置优劣程度的一个指标.在低水平测量中,往往本底计数远大于净计数,即

$$T = \frac{4n_b}{v^2 n_0^2}$$
(5)

可知,对于低水平放射性测量装置,提高样品 净计数率及降低本底都十分重要^[2].在核爆测量 中,提高核爆烟云净计数不可控,不可能,因此降 低本底为降低探测限的主要途径.

1.2 本底的来源

本底的来源主要有以下几部分构成:

1) 宇宙射线;

 2)周围环境辐射,包括天然铀系、锕系、钍系 衰变链中的放射性以及放射性粉尘、气溶胶、氡、 钍等;

3) 屏蔽材料和谱仪内部元件中的放射性;

4)样品源的源内因素引起的本底;

核爆监测中,在仪器固定的情况下,同时为保 证探头对核爆烟羽的探测能力,对仪器底部和探头 四周采用合理面积和厚度的铅屏蔽本底来源中的 天然铀系、锕系、钍系衰变链中的放射性部分,降低 本底.具体谱仪及铅屏蔽实验简化图如图2所示.



图 2 屏蔽结构

Fig. 2 The structure of shield

2 MCNP 模拟计算

2.1 铅屏蔽尺寸的优化设计

由于本底来源十分复杂,用 MCNP 程序对实际本底描述难度很大,模拟计算的目的是对谱仪 屏蔽进行优化设计,因此对测量系统本底来源以及源的分布进行简化处理^[3].

理论上, 铅屏蔽越多越好, 但考虑到屏蔽材料的放射性也是本底来源的组成部分, 用 MCNP 模拟屏蔽材料的尺寸时, 改变其中一尺寸大小而其他尺寸不变, 当计数发生明显改变时的尺寸确定为屏蔽尺寸, MCNP 模拟粒子数 50 000 000, 误差在 0.55% 左右, 图 3、图 4 为 MCNP 模拟 512 道 NaI(TI) γ 谱仪不同屏蔽尺寸下 0.5~1.15 MeV 即 85 至 196 道本底计数变化的结果.











根据图表变化情况以及结合铅砖实际尺寸大小,选取铅屏蔽尺寸规格如下:地面屏蔽铅面积 90 cm * 90 cm,厚度 5 cm,探头四周铅屏蔽高度 7 cm,厚度 5 cm.

2.2 核爆谱的模拟

核爆后,其放射性物质有上千种,但大多为短 寿命核素,本文主要对半衰期大于1天的主要核 素进行模拟,如 Zr⁹⁵(0.757 MeV,54.4%;

9

0.724 MeV,44.2%) Nb⁹⁵(0.766 MeV,99.79%) I¹³¹(0.364 MeV,81.1%)I¹³²(0.667 MeV,98.7%) Y⁹¹(0.556 MeV,94.9%) Ba¹⁴⁰(0.029 MeV, 72%)^[4-5],从模拟核爆谱(图5)以及某实测多种 复杂核素谱形图(图6)可以看出由于多种核素其 特征能量相近使其特征峰重叠在一起而无法进行 核素识别,因此为了提高其监测能力,必须降低谱 仪的最小可探测活度.



Fig. 5 Simulation spectrum for nuclear explode



图 6 实测某复杂核素谱 Fig. 6 Measured spectrum for complex nuclide

3 实验结果

实验中,不可能对核爆后的元素进行实验,因此 采用 Cs¹³⁷作为实验源进行降低探测限的对比论证, 由式(1)可知,探测限正比于本底计数,表1为对不 同屏蔽条件 Cs¹³⁷全能峰计数与本底计数进行对比, 推测各种屏蔽条件下谱仪对 Cs 源的探测限^[6].

由表1可知,探头采用5 cm 后的铅砖对其周 围和顶部全屏蔽后其本底降低至原来的三分之 一,但对探头顶部屏蔽也屏蔽掉了核爆烟云,其方 式不可取.采用实验中优化设计中的屏蔽尺寸,其 本底降至原来的70%,基本上屏蔽掉了来自地面 的天然铀系、锕系、钍系衰变链中本底.采用屏蔽 后其最小可探测限活度也降低了约15%,这一结 果也与理论值相一致.

表1 各种屏蔽条件下探测限对比

 Table 1
 Detection limit contrast at various shielding conditions

屏蔽条件	Cs 全能 峰道宽	本底 计数 /cps	理论 探测限 /cps	实际最小 可探测量 /cps
无	104—122 道	13.8	0.58	0.57
优化设计后屏蔽	104—122 道	9.65	0.48	0.49
探头全屏蔽	104—122 道	5.52	0.36	0.36

4 结 论

通过上面的分析得出结论:1)通过屏蔽有效 的降低了能谱中低能端的本底计数,进一步提高 了谱仪的最小可探测活度的能力;2)屏蔽只是降 低本底的一种手段,对于低水平测量,还要从仪器 内部器件的选择和电子学方面考虑,最大限度的 降低本底.

参考文献:

- [1] 黄乃明. 低水平放射性测量中的探测限及其计 算[J]. 辐射防护通讯,2004,24(2):25-32.
- [2] 吴治华,赵国庆,陆福全,等.原子核物理实验方法 [M].3版.北京:原子能出版社,1996:340-351.
- [3] 向永春,龚建,李伟,等.³⁷Ar 测量系统的本底降低技术[J]. 原子能科学技术,2009,43(5):477-480.
- [4] 沈姚崧,刘成安.核爆炸产物放射性衰变过程的研究 [J].原子核物理评论,1998,15(2):103-109.
- [5] 李凯波,张本爱,刘恭梁,等.核爆产物140Ba在大气中传输的理论分析[J].原子能科学技术,2007,41
 (4):474-479.
- [6] 沙连茂,卫为强,宣义仁.放射性环境监测中探测限附 近测量数据的处理[J].环境监测与管理技术,2006, 18(1):38-43.