

# 用于放射性惰性气体总 $\beta$ 测量的 组合探测器的厚度的确定

夏文明, 贾铭椿, 龚军军, 付海龙

(海军工程大学船舶与动力学院, 武汉 430033)

**摘要:**确定用于放射性惰性气体总 $\beta$ 测量的组合探测器塑料闪烁体和 BGO 的厚度。利用 MCNP 4C 程序软件对塑料闪烁体和 BGO 组成的 100 种厚度的组合探测器, 4 种不同能量的  $\gamma$  光子的计数率进行计算, 选择出一组使塑料闪烁体和 BGO 对不同能量  $\gamma$  光子计数率最接近同比关系的厚度组合, 从而实现扣除塑料闪烁体中的  $\gamma$  计数, 测定放射性惰性气体中总  $\beta$  计数的目的。结果表明, 塑料闪烁体为 1 cm 厚、BGO 为 3 cm 厚时, 可以为最终设计探测部件的尺寸提供重要参数。

**关键词:**组合探测器; MCNP; 厚度; 放射性惰性气体; 总  $\beta$  测量

**中图分类号:** TL 812 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0934(2010)07-0917-03

总  $\beta$  水平是反映放射性场所污染程度的重要参数, 而某些场所的  $\beta$  放射性主要来自于放射性惰性气体中的  $\beta$  放射性。传统采用半导体多探头组合测量方法, 但是半导体探测器长期工作稳定性差, 使用寿命短, 价格昂贵且不易于维修。

本文在张军民等<sup>[1]</sup>的塑料闪烁体和 BGO (锗酸铋晶体) 组合的探测器基础上, 利用 MCNP 4C 程序软件对塑料闪烁体和 BGO 的 100 种厚度的组合探测器, 对 4 种不同能量的  $\gamma$  光子的计数率进行计算, 选择出一组使塑料闪烁体和 BGO 对不同能量  $\gamma$  光子的计数率最接近同比关系的厚度组合, 从而实现扣除塑料闪烁体中的  $\gamma$  计数, 测定放射性惰性气体中总  $\beta$  计数的目的。

## 1 组合探测器测量总 $\beta$ 的原理

张军民等<sup>[1]</sup>提出使用两种闪烁体复合组成的探测器进行测量的方法, 其结构如图 1 所示。

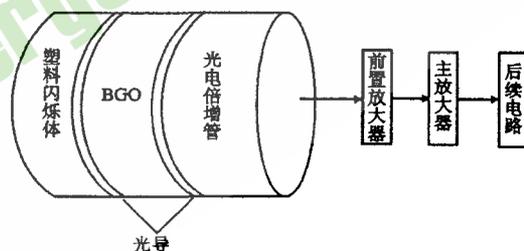


图1 组合探测器的结构原理图

该闪烁体组合探测器, 工作原理见图 2, 塑料闪烁体作为主部件, BGO 作为从部件, 塑料闪烁体对  $\beta$  射线探测效率高, 选择适当的厚度可使进入其中的全部  $\beta$  发生作用, 计数为  $n_{\beta}$ ; 有部分  $\gamma$  射线在塑料闪烁体中发生作用, 计数为  $n_{\gamma 1}$ , 有部分  $\gamma$  射线在 BGO 中发生作用, 计数为  $n_{\gamma 2}$ , 由于 BGO 闪烁体和塑料闪烁体发光衰减时间相差两个数量级, 可通过脉冲形状甄别器把两种不同闪烁体发生的相互作用信号区分开来; 要得到  $n_{\beta}$  计数, 只需将  $n_{\gamma 1}$  扣除掉即可, 但是两种探测器对  $\gamma$  的探测效率是不同的, 因此  $n_{\gamma 1}$

收稿日期: 2009-05-06

作者简介: 夏文明(1982-), 男, 海军工程大学辐射防护与环境保护专业博士研究生。

和  $n_{\gamma 2}$  是不相等的,不能通过简单的相减来得到  $n_{\beta}$ ,但是如果  $n_{\gamma 1}$  和  $n_{\gamma 2}$  对于不同能量的  $\gamma$  光子成一定的比例关系,就可以通过乘以一个比例系数  $K$  再扣除的方法将  $n_{\gamma 1}$  扣除掉。当然,要

使两种探测器对不同能量的  $\gamma$  光子的计数严格地成同比关系是不可能的,而通过改变两种探测器的厚度可以使两种闪烁体探测器对  $\gamma$  的计数接近于一定的比例关系。

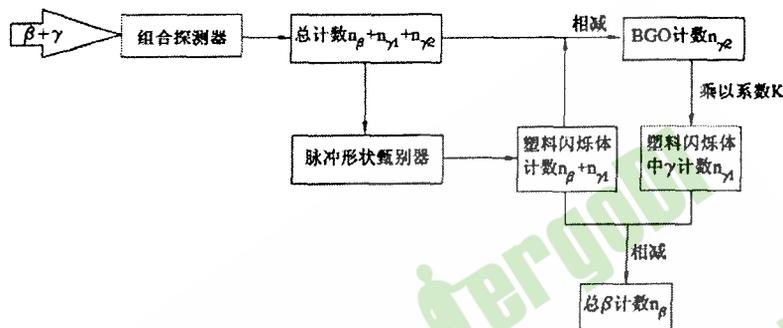


图2 组合探测器的工作原理图

## 2 用 MCNP 4C 程序进行模拟计算

### 2.1 MCNP 4C 程序

MCNP 4C 程序,是由美国 Los Alamos 国家实验室的 Monte Carlo 小组在一系列程序工作的基础上,集中编制的一个大型通用中子-光子蒙特卡罗输运程序。

### 2.2 MCAM 程序

MCAM (Monte Carlo Automatic Modeling System) 程序,MCNP 粒子输运计算自动建模软件系统,由中国科学院等离子体物理研究所反应堆技术研究室开发<sup>[2]</sup>。

### 2.3 模拟计算方法

先使用 MCAM 程序软件建立计算模型,然后利用 MCNP4C 程序软件进行模拟计算。

(1) MCAM 建立的计算模型见图 3。

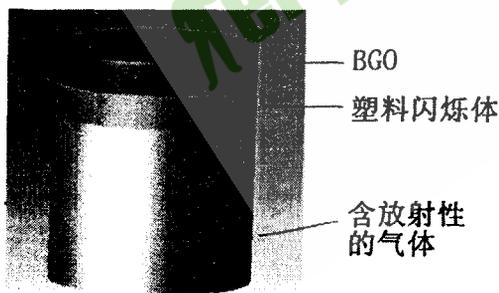


图3 MCAM建立的MCNP的计算模型

因为光导层重量厚度很薄,只是用来传光的,对粒子的作用基本上可以忽略不计,因此在计算模型中省去了光导这一部分。本文计算

中的源定义为圆柱形气体源,即图3中的含放射性的气体,模拟时假设放射性核素是均匀分布的;对源放出的粒子是按照不同种类、不同能量的粒子分别进行模拟的,各种粒子模拟的事例数均为  $10^6$  个,气体的自吸收很小,因此也没有考虑源的自吸收效应。

(2) 设塑料闪烁体和 BGO 的半径  $R$  均为 3 cm,计算中要用到的 BGO 和塑料闪烁体的密度和元素组成列于表 1。

表1 塑料闪烁体和 BGO 的密度和元素组成

灵敏物质	密度/ $g \cdot cm^{-3}$	成份
塑料闪烁体	1.05	H,C,O,N=4951,59689;1.14,1 (质量比)
BGO	7.13	Bi,Ge,O=4;3;12 (原子数比)

(3) 本文计算的是  $\gamma$  射线在两个探测器中的能量消耗  $E_{\gamma 1}$  和  $E_{\gamma 2}$ 。从文献中可以查到塑料闪烁体和 BGO 的单位光子能耗的光子数输出分别为  $7.8 \times 10^3$  光子/MeV 和  $1.1 \times 10^4$  光子/MeV<sup>[3]</sup>,因此,两个探测器对  $\gamma$  产生的光子数  $n_{\gamma 1}$  和  $n_{\gamma 2}$  分别为  $7.8 \times 10^3 \times E_{\gamma 1}$  和  $1.1 \times 10^4 \times E_{\gamma 2}$ 。由于两个探测器共用一个光电倍增管和计数系统,因此产生的光子被记录的概率应该是基本相等的。因此要使  $n_{\gamma 1}$  和  $n_{\gamma 2}$  对于不同能量的  $\gamma$  光子接近同比关系就是要使  $n_{\gamma 1}$  和  $n_{\gamma 2}$  接近同比关系。

(4) 放射性惰性气体产生的放射性核素种类很多,但主要则是  $^{85}Kr$  和  $^{133}Xe$  的放射性同位素,故在实际测量中我们只需考虑  $^{85}Kr$  和  $^{133}Xe$  这两种放射性核素。 $^{85}Kr$  和  $^{133}Xe$  在放出  $\beta$  粒子

的同时也放射出了相当数量的  $\gamma$  光子,这两种核素放射出的  $\gamma$  光子的能量主要有 0.03、0.08、0.15 和 0.3 MeV 四种,其中由  $^{85}\text{Kr}$  放射出的主要  $\gamma$  光子的能量分别为 0.15 和 0.3 MeV,它们的比例大约为 5:1;而由  $^{133}\text{Xe}$  放射出的主要的  $\gamma$  光子的能量分别为 0.03 MeV 和 0.08 MeV,它们的比例大约为 1:1。因为假设放射性核素是均匀分布的,那么  $^{85}\text{Kr}$  和  $^{133}\text{Xe}$  按照 1:1 的关系,0.03、0.08、0.15 和 0.3 MeV 四种能量  $\gamma$  光子的比例为 3:3:5:1,则针对这一情况,本文分别计算了 0.03、0.08、0.15 和 0.3 MeV 情况下的  $n_{\gamma 1}$  和  $n_{\gamma 2}$ 。 $R(E)$  的计算公式见式(1)。

$$R(E) = \frac{n_{\gamma 1}(E)}{n_{\gamma 2}(E)} \quad (1)$$

(5)分别计算  $R(0.03)$ 、 $R(0.08)$ 、 $R(0.15)$  和  $R(0.3)$ ( $R(0.03)$ 代表的是对于能量为 0.03

MeV 的能量  $\gamma$  光子的  $R(E)$ 值),上文中提到的比例系数  $K$  即可取为  $R(E)$ 在四种不同能量按照 3:3:5:1 的权重计算得到的平均值,按照上述的能量比例计算了统计相对误差的平均值,表示为  $\sigma$ 。

## 2.4 结果判定

$\sigma$  值越小,说明  $n_{\gamma 1}$  和  $n_{\gamma 2}$  越接近同比关系。

## 3 结果

按照上节中所述,对于塑料闪烁体和 BGO 组合探测器,设定塑料闪烁体的厚度分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0 cm, BGO 的厚度分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0 cm,就每种厚度,共取 100 种厚度组合,计算每种组合的  $\sigma$  值,计算结果列于表 2。

表 2 塑料闪烁体和 BGO 不同厚度组合探测器的  $\sigma$  值

塑料闪烁体的厚度/cm	BGO 的厚度/cm									
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
0.5	0.354	0.336	0.329	0.349	0.366	0.357	0.370	0.362	0.389	0.354
1.0	0.359	0.336	0.280	0.203	0.201	0.187	0.234	0.273	0.246	0.273
1.5	0.364	0.386	0.280	0.275	0.274	0.273	0.273	0.273	0.273	0.272
2.0	0.368	0.301	0.282	0.277	0.275	0.275	0.274	0.274	0.274	0.274
2.5	0.374	0.304	0.285	0.279	0.277	0.276	0.276	0.276	0.276	0.276
3.0	0.374	0.383	0.283	0.277	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.375
3.5	0.376	0.303	0.282	0.280	0.283	0.283	0.283	0.283	0.283	0.373
4.0	0.378	0.368	0.290	0.300	0.291	0.291	0.291	0.291	0.291	0.353
4.5	0.379	0.393	0.297	0.328	0.298	0.298	0.298	0.298	0.298	0.379
5.0	0.378	0.357	0.304	0.310	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	0.397

从表 2 中可以看出,1 cm 厚的塑料闪烁体与 3 cm 厚的 BGO 的组合探测器得到的  $\sigma$  值最小,这就说明这种厚度组合的探测器得到的  $n_{\gamma 1}$  和  $n_{\gamma 2}$  最接近于同比关系。

## 4 结语

本文利用 MCNP 4C 程序软件,对塑料闪烁体和 BGO 的 100 种厚度的组合探测器,对  $^{85}\text{Kr}$  和  $^{133}\text{Xe}$  放射出的 4 种不同能量的  $\gamma$  光子的计数率之间的关系进行模拟计算,选择 1 cm 厚的塑料闪烁体和 3 cm 厚的 BGO 能够使两种闪烁体对不同能量的  $\gamma$  光子计数率之间最接近同比关系,可以为最终设计探测部件的尺寸提供重要参数。

本文所采用的 MCNP 模拟计算,是用随机抽样的办法来模拟随机事件的一种方法,与文

献张军民等<sup>[1]</sup>的相比更为简单,不须考虑光子与探测器的具体作用过程,只需要根据实际情况建立相应的计算模型,数值计算部分也更为简单。另外,本文还专门针对放射性惰性气体的辐射特点选择了计算的能量点,针对性更强。

## 参考文献:

- [1]张军民,郭兰英,凌球,等.用于总  $\beta$  测量的新型组合探测器主探测部件  $\gamma$  效率计算[J].核电子学与探测技术,2007,27(2):335-338.
- [2]FDS 团队反应堆技术研究室. MCAM4 用户手册[Z].中国科学院等离子体物理研究所.
- [3]汲长松.核辐射探测器及其实验技术手册[M].北京:原子能出版社,2007.

(下转第 985 页,Continued on page 985)

- [5] J. W. Phair, J. C. Schulz, W. k. Bertram, et al. Investigation of the microstructure of alkali-activated cements by neutron scattering[J]. *Cements and Concrete Research*, 2003, 33: 1811-1824.
- [6] Marta Castellote, Cruz Alonso, Carmen Andrade, et al. Campo, Composition and microstructural changes of cement paste upon heating, as studied by neutron diffraction [J]. *Cements and Concrete Research* 2004, 34: 1633-1644.
- [7] Andrew J. Allen, Jeffrey J. Thomas. Analysis of C-S-H gel and cement paste by small-angle neutron scattering [J]. *Cements and Concrete Research* 2007, 37: 319-324.
- [8] J. J. Thomas, H. M. Jennings, A. J. Allen. The surface area of cement paste as measured by neutron scattering: evidence for two C-S-h morphologies [J]. *Cements and Concrete Research*, 1998, 28(6): 897-905.

## Experimental Study of Using D-D Neutron Generator to Test the Element Contents in Cement Raw Meal

HE Ping<sup>1,3</sup>, BIAN Li<sup>2</sup>, JIA Fu-quan<sup>3</sup>, GU De-shan<sup>3</sup>

(1. Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China,

2. Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China,

3. Radiation Technology Institute, Northeast Normal University, Changchun 130117, China)

**Abstract:** The article is about how to use 2.5 MeV neutrons which is generated by D-D neutron generator to test the main elements in the cement raw meal. The test is not only time-saving, as it can test the major element contents such as Si, Al, Fe, Ca etc in the raw cement, but also easy to operate. By figuring out the proportion of each oxide based on the test results, the product quality by controlling the feeding proportion can be improved. It's one of the globally advanced methods in testing element contents in the raw cement thanks to its small deviation of the test result from what we get from the chemical laboratory.

**Key words:** D-D neutron generator, Cement raw meal, Element analysis

(上接第 919 页, Continued from page 919)

## The Selection of Thickness of a Complex Detector Applied for Total Beta Measuring in Radioactive Inert Gases

XIA Wen-ming, JIA Ming-chun, GONG Jun-jun, FU Hai-long

(College of Naval Architecture and Power, Naval Univ. of Engineering, Wuhan Hubei 430033, China)

**Abstract:** The counting rates of gamma with different energies of complex detectors with different thicknesses were calculated applying MCNP. A group of thicknesses of plastic scintillator and BGO was selected out. The counting rates of gamma with different energies of plastic scintillator and BGO fit direct proportion best. So the measurement of total beta counting in radioactive inert gases could be realized by deducting the gamma counting of plastic scintillator.

**Key words:** complex detector, MCNP, thickness, radioactive inert gases, total Beta measuring