

# 一种高纯锗能谱测井仪相对 效率刻度方法

郭太昌 刘际时

(中国原子能科学研究院, 北京, 102413)

介绍了一种用于多元素分析的高纯锗测井系统相对效率刻度的方法, 即所谓“自刻度”方法。这种刻度方法仅依赖于被测对象自身的中子俘获  $\gamma$  射线谱, 不需要任何标准样品或模拟刻度井, 适用于任何高纯锗探测系统。该文给出了用自刻度方法得到的三个分析结果。

**关键词** 测井仪, 多元素分析, 效率刻度。

## 一、引言

在核测井技术领域, 利用中子俘获  $\gamma$  射线谱作地层多元素定量分析是近十几年来国内外大力发展的一种新的测井技术。这种测井技术的发展和使用, 将会改变目前测量放射性强度作地层定性分析的状况, 并逐步发展到测量中子产生的  $\gamma$  射线能谱作为地层多元素分析的手段。近十几年来, 国内外许多实验室已就这种测井技术的物理方法和新型探管系统作了大量研究工作, 微型电子学线路和微机控制的数字化传输系统及高纯锗探测器组成的探管系统已经研制, 并在室内及现场进行了实验性运行<sup>[1-3]</sup>。但至今还没有证据说明这类测井系统已正式使用到地层多元素分析测井工作中。这可能是由于  $\gamma$  射线谱分析技术困难及地质解释工作的复杂性所致。本工作所研究的高纯锗测井仪效率刻度的新方法, 就是利用中子俘获  $\gamma$  射线谱作地层多元素定量分析测井技术中, 由  $\gamma$  能谱求得各元素含量时所必须解决, 但至今还未较好解决的效率刻度问题。

在传统的放射性测井仪应用中, 一般是用标准井对测井仪进行刻度。新的刻度方法与其完全不同, 不需要标准井或刻度井, 能谱测井仪相对效率刻度仅依赖于测得的待测地层或样品自身的中子俘获  $\gamma$  射线谱, 即由一个可供分析的被测对象自身的中子俘获  $\gamma$  射线谱, 就可以对测井仪系统进行相对效率刻度, 进而实现对被测对象作多元素定量分析。所以, 这种刻度方法被称作自刻度方法, 或简称自刻度。

在本工作中, 对利用中子俘获  $\gamma$  射线谱作多元素分析作了简单介绍; 对新方法的提出作了详细论述; 最后给出了几个利用自刻度方法得到的分析结果。

## 二、效率刻度

任何被测对象都是由各种元素组成的。不同的元素吸收热中子后,辐射出能量和强度各不相同的特征 $\gamma$ 射线。测量并分析被测对象的中子俘获 $\gamma$ 射线谱就能够确定有某元素的存在及其在被分析物体中的含量。这也是中子核谱学的研究成果在工业生产上的一个重要应用。如果在测得的中子俘获 $\gamma$ 射线谱中有某元素一特征能量 $E_i$ 的 $\gamma$ 谱线存在,其峰面积为 $N_i$ ,则有关系

$$N_i = M\eta_i \frac{N_A}{M_i} \phi_n \sigma_i I_i \epsilon(E_i) \quad (1)$$

其中, $M$ 为被测物体的总质量数; $\eta_i$ 为该元素在被测物体中的含量(%); $N_A$ 为阿佛加德罗常数; $M_i$ 为该元素的原子量; $\phi_n$ 为待测物体中等效中子注量; $\sigma_i$ 为该元素热中子俘获截面; $I_i$ 为该特征 $\gamma$ 射线强度; $\epsilon(E_i)$ 为探测系统的相对探测效率。

因为 $\sum \eta_i = 1$ ,由式(1)

$$\eta_i = [N_i M_i / \sigma_i I_i \epsilon(E_i)] / [\sum_j N_j M_j / \sigma_j I_j \epsilon(E_j)] \quad (2)$$

峰面积 $N_i$ 由谱分析可得, $M_i$ , $\sigma_i$ 和 $I_i$ 查表得到,由式(2)可以看到,要得到各元素的含量值,必须刻度探测系统的相对效率 $\epsilon(E_i)$ 。

### 1. 现行的刻度方法

在实验室,利用中子俘获 $\gamma$ 射线谱作各类样品多元素分析,探测系统的相对效率刻度方法应该说是成熟的,可以利用标准样品,例如NaCl样品,放在待测样品同样位置,使其与待测样品有同样的几何条件,利用 $^{35}\text{Cl}(n,\gamma)$ 反应产生的一组 $\gamma$ 射线,在1—8.6 MeV能量范围对探测系统进行刻度。由式(1)

$$\epsilon(E_i) = N_i M_i / \phi_n M N_A \sigma_i I_i \eta_i \quad (3)$$

对于同一元素各种能量的 $\gamma$ 射线,相对效率仅正比于各条 $\gamma$ 谱线的 $N_i/I_i$ 值。用最小二乘函数拟合方法,可以得到一条相对效率曲线,这样就对探测系统在整个能量范围进行了相对效率刻度。当然,如果待测样品是个形状复杂,且又不允许破坏的样品,则标准样品的制备也是非常困难的。

在模拟现场测井的大模块实验中,为了刻度探测系统,至今还是在大模块制备时均匀加入一定数量的NaCl成份,目的也是得到一组Cl元素的 $\gamma$ 谱线来刻度探测系统<sup>[3-5]</sup>,以求模块中各元素的含量。但是,在现场井孔测量中,矿化度较高的含Cl地层是很少的。很明显,待测地层也无法均匀加入任何物质。实际上,刻度井方法也是行不通的。因为,在作地层多元素中子俘获 $\gamma$ 能谱分析中,要涉及到中子和 $\gamma$ 射线两者在地层中的输运过程,中子在地层中注量及能量分布与地层各元素组成有关,不同的元素组成,特别是少数热俘获截面大的元素,即所谓有毒元素,如B,Cd,Sm和Gd等,即是微量变化也会引起地层中中子流很大变化。再者,即使除水以外的其他元素组成完全相同,Evens计算结果<sup>[6]</sup>表明,当含水量从2~16%变化时,各点中子注量变化值达一个量级。待测地层是未知的,模拟井是难以较好地模拟地层实际情况。地质情况千差万别,不同地区各不一样,同一地区不同层位也各不相同,几乎不可能建立起能较好地模

拟地层实际情况的刻度井群。大量的刻度井在经济上也是不允许的。新的刻度方法就是在这样的背景下提出来的。我们的目的是,在探测系统和待测地层形成的几何条件下,找到一种能真实地反映中子和 $\gamma$ 射线在地层中的输运过程,并适用于各种地质情况的相对效率刻度方法。

## 2. 自刻度方法

在探测系统和待测地层形成的几何条件下,测到的地层中各元素中子俘获 $\gamma$ 射线谱是中子和 $\gamma$ 射线在地层中输运过程的真实反映,其峰面积的大小正是在测量几何条件下探测效率的真实体现。如果在测得的 $\gamma$ 射线谱中,能找到某一元素的一组 $\gamma$ 谱线,其峰面积能被精确确定,其能量均匀分布在刻度能区(1—8 MeV),谱线数目在六、七条以上,那么,利用这样一组 $\gamma$ 谱线就可以对探测系统作相对效率刻度。这些条件是刻度能区较宽,效率随能量变化剧烈所要求的。在大模块实验中,元素Cl的俘获 $\gamma$ 谱线就能很好地满足这些要求。可是,在井孔测量中,一般来说,从测得的 $\gamma$ 谱中得不到这样一组谱线。因为,中子俘获 $\gamma$ 射线谱非常复杂,在多元素谱中,各元素谱线之间的相互干扰非常严重。一个元素能被用作刻度能点的谱线多者3—5条,少者1—2条,对于某些热中子俘获截面小,或在地层中含量很少的元素,有时连一条峰面积能被较好确定的谱线也没有。所以,在井孔测量中,要利用同一元素的 $\gamma$ 谱线来刻度探测系统几乎是不可能的。但是,是否可以利用多个元素的谱线来作相对效率刻度呢?多个元素的谱线在能区范围和谱线数目上均能满足上述要求,这就是自刻度方法的出发点。

从式(3)知道,利用同一元素的 $\gamma$ 谱线刻度相对效率时, $\phi_n, M_i, \eta$ 和 $\sigma_i$ 完全相同,因此,测得的各能量 $\gamma$ 射线的相对效率仅正比于 $N_i/I_i$ 。如果用不同元素的 $\gamma$ 谱线刻度探测系统的相对效率就没有这种简单关系,各元素的 $\sigma_i, M_i$ 和 $\eta_i$ 不同,并且 $\eta_i$ 是待求量,因而是未知的,这就无法给出各能量点的相对效率测量值。为了使不同元素的 $\gamma$ 谱线在效率刻度中被利用,我们采用虚构新元素的方法,使不同元素的 $\gamma$ 谱线,在不同能量点上的相对效率都仅与各谱线的 $N_i/I_i$ 值成正比。具体作法是,如果 $\gamma$ 谱中有元素 $i$ 的几条谱线,在无 $i$ 元素谱线的能区,有 $j$ 元素的几条谱线,对 $j$ 元素,根据式(3),在 $M_j, \eta_j$ 和 $\sigma_j$ 前分别乘上一常数 $a_1, a_2$ 和 $a_3$ ,使 $a_1 M_j = M_i, a_2 \eta_j = \eta_i, a_3 \sigma_j = \sigma_i$ 。为使式(3)成立,左边也乘上一常数 $a$ ,则有

$$ae(E_j) = N_j a_1 M_j / \phi_n M N_A a_2 \eta_j a_3 \sigma_j \quad (3)$$

$$a = a_1 / a_2 a_3 \quad (4)$$

这样就虚构了一个新的元素,它与 $i$ 元素有相同的原子量,相同的热中子俘获截面,在地层中有相同的含量。在所考虑的刻度问题中,唯一的差别是它与 $i$ 元素辐射的 $\gamma$ 谱线有不同的能量和强度。对 $i$ 元素各 $\gamma$ 射线的探测效率 $\epsilon(E_i)$ 和对 $j$ 元素各 $\gamma$ 射线的探测效率 $ae(E_j)$ 分别与 $N_i/I_i$ 成正比。两者都可以被用作刻度能量点参与相对效率曲线的拟合。系数 $a$ 为源强归一常数,在多参数最小二乘法拟合中求得。 $a_1$ 和 $a_3$ 查表得到。由式(4)可得到各元素在地层中含量比值 $a_3$ 。刻度一个探测系统需要虚构几个新元素,视各元素可被利用的 $\gamma$ 谱线多少及其能量分布而定,只要得到一条满意的效率曲线即可。多一个元素仅多一个拟合参数。

## 三、分析结果

利用上面所介绍的自刻度方法,我们处理了三个中子俘获 $\gamma$ 射线谱。其中,两个是作室内样品分析,样品为煤和砂岩,重量均约一百克。一个NaCl样品也被测量,目的是和自刻度方法

进行比较。另一个是高纯锗测井仪在井下 145m 泥岩地层处测得的中子俘获  $\gamma$  射线谱。室内样品分析是利用原子能院 101 反应堆热中子束作中子源,井下测量是用  $^{252}\text{Cf}$  同位素中子源。有关实验测量及测井仪的详细情况请参阅文献[7]。

在分析中,都是利用 Si,Al,Ti 和 K 等元素中的三个或四个元素的谱线对探测系统作相对效率刻度。拟合函数为一个三次多项式。图 1 中曲线是由煤样品谱得到的相对效率曲线。拟合中所利用的谱线为:Si(6.381,4.934,3.540,2.493,1.274 MeV),Ti(6.418,1.382 MeV),Al(7.724,1.779 MeV)。效率刻度的能量范围 1—8 MeV,曲线上的“○”是由 NaCl 样品得到的拟合值,是经归一后的结果。从图上可以看到,两条相对效率曲线几乎完全一致。这就表明,用待测对象自身的中子俘获  $\gamma$  射线谱,用自刻度方法,在无任何其他标样或标准井的情况下,同样可以达到刻度探测系统的目的。表 1—3 中给出了用分析中子俘获  $\gamma$  能谱和化学分析两种方法得到的分析结果,以便进行比较。表 3 中,已对不锈钢外壳对 Fe 峰计数的贡献作了修正。化学分析是浙江省煤田勘探公司完成的。由表中可以看到,两种分析方法得到的结果是符合得很好的。这也说明这种分析方法是可行的。

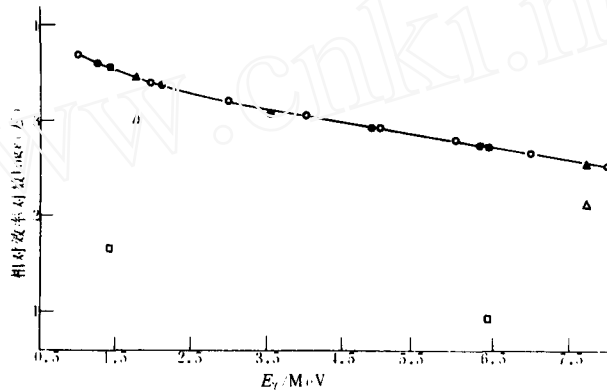


图 1 由煤样品谱得到的相对效率曲线

Fig. 1 Relative efficiency curve derived from a  $\gamma$ -ray spectrum of coal sample

实验值 Si ● Al △ Ti □;  
拟合值 Al ▲ Ti ■ Cl ○

表 1 煤样品成份(%)分析结果

Table 1 Analysis of coal sample content(%)

元 素	Si	Al	Fe	Ti	K	C	S	H
$\gamma$ 谱分析	10.03	3.69	1.54	0.23	0.63	61.19	0.81	2.37
化学分析	8.84	3.98	1.59	0.19	0.59	61.01	0.90	2.7

表 2 砂岩样品成份(%)分析结果

Table 2 Analysis of sandstone sample content(%)

元 素	Si	Al	Fe	Ti	K	Na	Ca
γ 谱分析	34.75	3.63	2.35	0.31	0.71		0.33
化学分析	37.23	3.77	3.27	0.26	0.67	0.07	0.30

表 3 井孔 145 m 处泥岩成份(%)分析结果

Table 3 Analysis of mudstone content(%) at 145 m deep in borehole

成 份	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
γ 谱分析	55.86	16.95	6.37	1.08	1.86	2.74	13.03
化学分析	60.41	15.49	6.00	1.22	1.87		15.01 烧失量

## 四、结 论

从上述可以看到,自刻度方法是利用待测对象自身的中子俘获 $\gamma$ 射线谱所含有的信息来对探测系统作相对效率刻度,进而对待测对象进行多元素分析。对待测对象的大小、形状和物理状态无任何特殊要求,也不受地层类型的限制,不需要待测对象以外的任何标样或标准井,唯一的要求是测得一个可供分析的中子俘获 $\gamma$ 射线谱。分析结果表明,自刻度方法较好地解决了高纯铀能谱测井仪的相对效率刻度问题。对室内形状复杂,且非破坏性样品多元素分析也提供了一个好的相对效率刻度方法,免除了复杂标样的制备。在工业在线分析中,如对生产线上各级产品中目标元素的含量或杂质成份等的快速分析,自刻度方法也使中子俘获 $\gamma$ 能谱分析技术有较好的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Senftle F. E. et al. , *Mining Engineering (AIME)*, 30, 666(1978).
- [2] Mikesell, J. L. et al. , *Nucl. Instrum. Methods*, 215, 561 (1983).
- [3] Clayton, C. G. et al. , *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, 34, 83 (1983).
- [4] Wormald, M. R. et al. , *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, 34, 71(1983).
- [5] Chien Chung, et al. , *Nucl. Instrum. Methods, A* 267 223(1988).
- [6] Evens, L. G. et al. , *Nucl. Instrum. Methods*, 193, 353(1982).
- [7] Zhao Jingqi, Liu Jishi et al. , *Nucl. Geophys.*, 5, 122(1991).

(编辑部收到日期:1991年7月4日)

# A NEW METHOD FOR EFFICIENCY CALIBRATION OF BOREHOLE LOGGING EQUIPMENT WITH HPGe DETECTOR

GUO TAICHANG    LIU JISHI

*(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275, Beijing, 102413)*

## ABSTRACT

A new method known as self-calibration from relative efficiency calibration of borehole logging equipment with HPGe detector is described. The calibration method which only based on the measured neutron capture Gamma ray spectrum without any standard sample or simulated calibration can well be used in relative efficiency calibration of any multielemental analysis system with HPGe detector. Three analysis results obtained with the self-calibration method are given.

**Key words** Elemental analysis, Efficiency calibration, Borehole logging equipment.