

# 核谱技术在地球化学测井中的应用

方映东 鲍海秋

(江汉石油管理局测井研究所 湖北潜江县 433123)

**摘要** 核谱分析技术在地球化学测井仪器串(GLT)中得到了广泛应用.它通过测量地层自然 $\gamma$ 射线、活化 $\gamma$ 射线和瞬发中子俘获 $\gamma$ 射线,进而取得Si、Ca、Fe、Al、S、U、Th、K、Ti和Gd等十种元素含量测井曲线,在通过闭合模型的软件可将元素含量测井曲线转换成地层矿物丰度测井曲线.这为地质学家评价沉积环境,正确认识储集层提供了可靠依据.

**关键词** 地球化学, 灵敏度因子, 岩脉.

## 1 引言

### 1.1 GLT 仪器串简介

它包括三个独立的 $\gamma$ 能谱测量,用它可以进行地层元素和矿物的全面分析.用自然 $\gamma$ 能谱测井仪(NGT)测量地层天然放射性元素U、Th和K含量曲线;AACT为铝活化粘土测井仪,测量地层中粘土矿物Al元素含量;俘获 $\gamma$ 能谱测井仪(GST)用14MeV脉冲中子发生器诱发俘获反应,测量反映地层特性的Si、Ca、S、Fe、Ti和Gd六种元素含量;CNT为补偿中子测井仪,可测量地层热中子俘获截面和孔隙度.

该仪器在结构上的一个鲜明特点是一源多用,即用自发裂变中子源 $^{252}\text{Cf}$ ,既作补偿中子(CNT)测井用,又作为铝活化中子源用,一举两得.

### 1.2 用氡谱进行元素分析

GLT的核心技术,就是广泛应用了核谱技术和多道 $\gamma$ 射线谱的解谱技术.本文重点介绍中子能谱测井方法的三个特点.第一,粘土矿物指示元素铝的测量,提出了用滞后活化方法测量Al重量百分含量,此值经过地层环境、中子和 $\gamma$ 射线影响的校正.第二,用14MeV脉冲中子俘获,对反映地层特性的

Si、Ca、S、Fe、Ti和Gd六种元素的测量方法,所有元素含量都可用重量百分数表示.第三,白云岩地层的指示元素Mg,即用地层光电截面 $P$ .值算出地层Mg的含量.

## 2 U、Th、K 自然 $\gamma$ 能谱测量

自然 $\gamma$ 能谱测井是依据U、Th、K在矿物和岩石中分布规律为基础的.这类天然放射性物质,在沉积和运移过程中,容易被吸附在细微的颗粒表面,所以沉积岩的泥质含量越高,所含放射性物质越多.通过对地层自然 $\gamma$ 射线进行能谱分析,可定量测出U、Th和K含量,从而获得更多的测井信息和解决更多的地质和油田开发中出现的问题.

岩石的自然 $\gamma$ 射线是由铀系和钍系中的放射性核素及 $^{40}\text{K}$ 产生的.通常选用铀系中 $^{214}\text{Bi}$ 发射的1.76MeV $\gamma$ 射线来识别U;选用钍系中 $^{208}\text{Tl}$ 发射的2.62MeV $\gamma$ 射线来鉴别Th;用1.46MeV $\gamma$ 射线记录K.同位素 $^{40}\text{K}$ 发射1.46MeV的单色 $\gamma$ 射线,较铀及钍系易识别.自然 $\gamma$ 能谱测井就是一种根据1.46、1.76和2.62MeV三个能谱峰提供的 $\gamma$ 射线信息,通过解谱软件和必要的环境校正而得到地层K、U和Th含量的测井方法.

若岩石样品或地层中含有  $n$  种放射性核素,其核素种类已知,只是含量  $X_j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ )未知,要通过解谱确定之.在室内方法实验的基础上,对每一种核素建立标准谱,并选定核素的固定特征道域.在混合谱上为  $n$  种核素选定  $n$  个特征道域.第  $i$  道域( $i=1, 2, \dots, n$ )总计数率  $N_i$ 是由所有核素在该道域产生的计数率之和,若用  $N_{ij}$ 表示由第  $j$  种核素在  $i$  道域产生的计数率,则有:

$$N_i = \sum_{j=1}^n N_{ij}$$

若地层中每单位含量的第  $j$  种放射性核素在第  $i$  道域产生的计数率为  $a_{ij}$ ,那么  $N_{ij} = a_{ij}X_j$ ,上式则为:

$$N_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}X_j \quad (1)$$

式中  $a_{ij}$  定义为仪器对第  $j$  种核素在第  $i$  道域的响应系数.

(1)式是一个包含  $n$  个未知数  $X_j$  的  $n$  个方程组,解此方程组就可得到每一种核素在地层中的含量.此方程组可改为矩阵形式,

$$AX = N \quad (2)$$

式中  $A$  是由  $a_{ij}$  组成的列矩阵系数,称为响应矩阵,  $X$  为未知量  $X_j$  组成的列矩阵,  $N$  为每个特征道域的计数率  $N_i$  组成的列矩阵.方程组的解为:

$$X = A^{-1}N \quad (3)$$

式中  $A^{-1}$  是  $A$  的逆矩阵,而第  $j$  种核素的含量为:

$$X_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}^{-1}N_i \quad (4)$$

式中  $a_{ij}^{-1}$  是逆矩阵  $A^{-1}$  中第  $j$  行第  $i$  列元素.

若地层中组成核素种类相同,能谱测井仪器测量条件也相同,那么仪器的响应系数  $a_{ij}$  不变,相应的逆矩阵也不变.每次测井时,只要把特征道域的计数率测出来就可得到地层铀、钍和钾含量.目前,用计算机进行矩阵

运算,可迅速给出解谱结果,并依据需要进行不同的显示方式输出,以适应地质上的需要.

### 3 Si、Ca、Fe、S、Ti 和 Gd 瞬发俘获 $\gamma$ 谱测量

脉冲中子  $\gamma$  能谱测井,是利用 14MeV 的快中子,在地层中产生的中子瞬发俘获反应,通过测量 Si、Ca、Fe、S、Ti 和 Gd 元素的俘获特征  $\gamma$  射线谱,进而获得六种元素的含量测井曲线.如果某种元素在俘获中子后不放出  $\gamma$  射线,则不管它吸收热中子的俘获截面多大,也是无法探测的.反之,如果某种元素虽能放出俘获  $\gamma$  射线,但热中子俘获截面很小,也难以测准.另外,如果某种元素所放出的  $\gamma$  射线几乎造成整个能谱,不管该元素热中子俘获截面多大,地层含量多高,同样难以探测.现在用元素典型灵敏度乘积值之大小来衡量某元素能否被探测的标准.其定义为典型元素的百分含量与其微观热中子俘获截面之积除以元素的原子量.表示式如下:

$$\text{元素典型灵敏度乘积} = \frac{\text{元素百分含量} \times \text{俘获截面}}{\text{原子量}}$$

瞬发俘获元素的灵敏度值见表 1.

表 1 瞬发俘获元素的灵敏度值

元素	典型丰度(Wt%)	俘获截面(b)	典型灵敏度乘积
Si	40	0.16	0.23
Ca	20	0.43	0.21
Fe	5	2.55	0.23
S	2	0.52	0.030
Ti	0.2	6.1	0.025
K	1	2.1	0.054
Al	3	0.23	0.026
Gd	0.0005	4900.00	0.16
Na	1	0.53	0.002
Mg	1	0.63	0.002

如果其它因素完全相同,则表1中具有最大灵敏度乘积的元素就能精确测量;其值低的那些元素将难以确定.不言而喻,如果在地层某一深度典型灵敏度乘积值低的元素,其丰度大大超过表1中给定值,这些元素也是可以测的.我们开始用乘积值0.025作为分界点,则Ca、Si、Fe、S、Ti和Gd及K大体上是可测量的.应当指出,元素H和Cl虽未列入表1,但它们对测量的 $\gamma$ 射线谱影响很大.

一般说来,用瞬发俘获 $\gamma$ 射线能谱很难测出地层中的Al、Na和Mg三种元素,因为Na和Mg元素的典型灵敏度乘积仅为0.002,更为突出的原因是,Na和Mg俘获 $\gamma$ 射线特征峰难以区分.作为能谱分析而言,常常要考虑另一个因素,那就是不同元素的能谱之间的相似性.具有极其独特的 $\gamma$ 射线能谱的元素,则具有最佳可测性.而 $\gamma$ 射线谱相似的元素很难精确区分为单一成分.如果两种元素的 $\gamma$ 射线谱相同,只能测出它们的能谱之和.Al元素的典型灵敏度乘积值为0.026,理应可测,但实际上难测.其原因是Al的主俘获 $\gamma$ 射线能量为7.724和7.695 MeV,非常接近Fe的强谱线7.646和7.632 MeV,其差异远远小于NaI(Tl)探测器的分辨能力.因此,用典型俘获 $\gamma$ 射线谱很难区分Al和Fe的影响.然而,用滞后活化 $\gamma$ 能谱测量方法可探测地层铝含量.

在有井眼条件下,欲通过中子瞬发俘获 $\gamma$ 谱的测量而获得地层绝对元素重量的含量是难以实现的.然而,相对元素含量易于确定,只要分出每一元素产额 $Y_i$ ,除以相应的相对能谱灵敏度因子 $S_i$ 就行了.Herron提出用闭合模型中深度归一化因子 $F$ 建立相对元素含量与绝对元素含量的关系,令 $W_a$ 表示绝对元素含量的重量百分数,就得到 $W_a = FY_i/S_i$ .随测井深度变化的关键性归一化因子 $F$ 是一个复合函数,它包含井眼环境下地层因素的每一个物理参数,还直接取决于脉冲中子源的强度.就GST测井仪器而言,脉

冲中子源强度不是恒定的,而是变化和未知的,使归一化因子 $F$ 无法直接确定.Herron提出用闭合模型方法选择归一化因子 $F$ ,闭合模型定义为所有元素重量百分数含量之和为1.在每一个测井深度点求解特定方程:

$$F\left[\sum_i X_i \frac{Y_i}{S_i}\right] + X_K W_K + X_{Al} W_{Al} = 1 \quad (5)$$

式中 $F$ 是每一深度点的归一化因子,可用此方程确定; $Y_i$ 是元素 $i$ 发射的瞬发 $\gamma$ 射线能谱测量值的百分数; $S_i$ 是元素 $i$ 的相对重量百分含量探测灵敏度因子; $X_i$ 是有关氧化物或碳酸盐的重量与元素 $i$ 的重量比; $W_{Al}$ 是用活化测量值确定的Al重量百分含量; $W_K$ 是用自然 $\gamma$ 能谱确定的K的重量百分含量.只要 $F$ 一旦确定,就可用方程(5)计算相对元素重量百分含量.图1就是用GLT测井导出的Si、Ca、Fe、K、Al、U、Th、Ti和Gd含量与岩心测量值的比较.

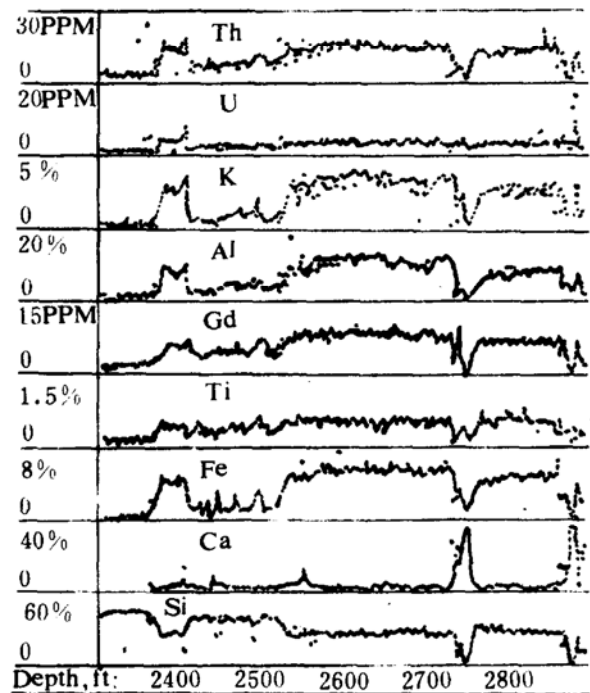


图1 通过Conolo试验井岩心分析元素含量与测井曲线导出的元素含量相比较

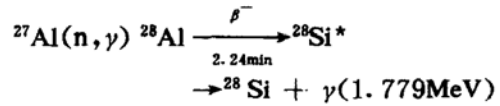
这种方法的一大优点是避开源强度变化及复杂计算,通过闭合模型的约束直接求得  $F$  值. 另一优点是只需考虑岩石骨架中的元素,不要减去井眼影响.

闭合模型的缺点是单一氧化物的假设. 就 Ca、Fe 和 S 而言,显然单一氧化物的假设是不严格的. 然而,实际上的差别不像理论上预测的那么严重.

#### 4 铝活化 $\gamma$ 谱测量

铝活化时,天然同位素  $^{27}\text{Al}$  吸收一个热中子,就产生同位素  $^{28}\text{Al}$ ,经过滞后时间后,在进行  $\beta^-$  衰变的同时,放出活化特征  $\gamma$  射线

1. 779MeV,其半衰期为 2. 24min. 活化反应顺序如下:



这种  $\gamma$  射线较弱,对 GST 能谱测量没有明显影响. 在中子源照射地层过程中,Al 放射性增强到饱和值,这时,活化铝的产额与衰减铝达到平衡. 在半衰期 2. 24min 时间间隔内,选择定点测量或适当测速,即可进行有效测量.

在中子源照射地层的同时,其他核素同样被活化,现将某些可能对测量 Al 产生影响的元素列于表 2.

表 2 常见的被热中子活化的地层元素

元素	同位素丰度 %	产生的放射性同位素	俘获截面 (bar)	半衰期	$\gamma$ 射线能量 (keV)
Na	100	$^{24}\text{Na}$	0. 53	15h	1369; 2754
Mg	11	$^{27}\text{Mg}$	0. 04	9. 5min	844; 1014
Al	100	$^{28}\text{Al}$	0. 23	2. 2min	1779
Cl	24	$^{38}\text{Cl}$	0. 43	37min	1643; 2167
Ca	0. 1	$^{49}\text{Ca}$	1. 1	8. 8min	3084; 4071
Ti	5. 2	$^{51}\text{Ti}$	0. 18	5. 8min	320; 929
V	99. 7	$^{52}\text{V}$	4. 9	2. 7min	1434
Mn	100	$^{56}\text{Mn}$	13. 3	2. 6h	847; 1811; 2113

由表 2 可知,在被热中子活化的地层元素中,唯有 Mn 是最有影响的元素. Mn 的活化  $\gamma$  射线能量为 847、1811 和 2113keV,尤其是 1811keV 与 Al 活化  $\gamma$  能量 1779keV 难以区别. 但是,套管井情况除外,一般裸眼测量,地层中锰元素却是很少的. 在粘土岩中 Al 是最主要的元素,且俘获截面较大,半衰期较短. 综合上述情况分析,可见,铝是最能用活化方法进行测量的几种元素之一.

现在的问题在于选择什么能量的中子源? 常用的 Am—Be 中子源,中子平均能量 5MeV. 在一般地层中,5MeV 的快中子会产生硅元素活化,对铝有干扰.  $^{28}\text{Si}$  吸收快中子,经反应  $^{28}\text{Si}(n, p)^{28}\text{Al}$  后,  $^{28}\text{Al}$  在放出质子的同

时,放出 1. 78MeV 活化  $\gamma$  射线. 这与  $^{27}\text{Al}$  活化  $\gamma$  射线能量相近,无法分开. 还有快中子引起缺元素活化,核反应为  $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ ,同样放出 1. 77MeV 的  $\gamma$  射线. 因为  $^{56}\text{Fe}$  和  $^{28}\text{Si}$  核反应阈能理论值分别为 4MeV 和 3. 8MeV,所以选择低能中子源最有利于 Al 活化测井.

目前,普遍采用  $^{252}\text{Cf}$  源. 中子平均能量 2. 3MeV, 钢中子源只有 12% 的中子能量超过硅铁元素活化阈值,这样由硅、铁造成的干扰会大大减弱. 因此  $^{252}\text{Cf}$  是铝活化测井最理想的中子源,但是它伴生的  $\gamma$  射线本底十分强,不可避免地给自然  $\gamma$  能谱测井造成一定影响,同时,给现场测井操作带来一个新课题——这样强的源如何安全操作.

当用 $^{252}\text{Cf}$ 中子源照射地层时,稳定核素转变为放射性核素.稳定核素称为母核,新生成的放射性核素称为子核.其子核在衰变过程中有本身的半衰期,并发射特征 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 射线.根据测量活化 $\gamma$ 射线强度、能谱和时间特征,就可推出母核在地层中的含量.

用铝活化粘土测井仪 AACT 确定地层铝含量,看起来非常简单,这是因为活化法是常用的分析方法.然而,实际上准确确定地层铝含量,则是一个十分复杂的问题.现场测井与实验室分析不同,井眼活化有一些重要的环境和几何形状问题.环境(地层和井眼)减速参数控制着中子流空间分布.在孔隙度很低时(含氢量很少)热中子分布比高孔隙度时更为分散.当孔隙度很高时,中子在井眼附近就会热化.地层和井眼吸收参数也会影响热中子流使 Al 热化,还有一些同位素也竞相俘获热中子.由于仪器在井中偏置,所探测的 1.779MeV  $\gamma$  射线量随活化位置的空间分布而变化,空间分布又取决于中子减速长度.同时, $\gamma$  射线的测量也受  $\gamma$  射线在地层中的迁移和井眼衰减作用的影响.总之,在地层 Al 含量不变时,活化计数率随地层和井眼的中子减速参数和吸收参数变化而明显变化.目前,关于铝计数率环境校正,采用 Monte Carlo 模拟技术,用它计算地层俘活截面

$\Sigma_{\text{from}}$  和减速长度  $L_s$  以及井眼俘活截面  $\Sigma_{\text{bh}}$  和对井径  $r_{\text{bh}}$  活化铝计数率期望值的影响.

## 5 结束语

GLT 地球化学测井仪,是核谱技术在核测井上最集中、最全面的应用,也是当前国际上最先进的测井技术之一.但是,它还存在一大缺陷,就是测井垂直分辨率不高,有待在技术上进一步提高.例如,微电阻率扫描测井(FMS)是每隔 0.1 英寸(3mm)采集一个样,则垂直分辨率高达 5mm;而 GLT 测井是每隔 6 英寸(15mm)采集一个样,垂直分辨率为 3 英尺(1m).预计,九十年代美国可把 GLT 测井仪全面投入商业性服务.我国在这个领域正组织技术力量攻关.

## 参 考 文 献

- 1 Hertzog R, et al. Geochemical Logging with Spectrometry Tools. Tech. Symp. Soc. Petroleum. Dalla. SPE, 1987, 16792
- 2 Herron M M. Mineralogy from Well Logging. Clay Clay Miner, 1986, 34: 203
- 3 Herron M M. Future Applications of Element Concentrations from Geophysical Logging. Nucl. Geophys., 1987, 1: 197

## Application of Nuclear Spectrum Technique in Geochemical Well Logging

Fang Yingdong Bao Haiqiu

(Institute of Jianghan Well Logging, Hubei Qianjiang 433123)

**Abstract** The spectrum analysing technique is widely used in the Geochemical Logging Tool (GLT) recently. GLT measured the natural  $\gamma$ -rays, induced and prompted neutron-capture  $\gamma$ -rays to get the logs of concentration of ten main elements found in reservoir rocks, and through the use of the closed-modelling, the concentration of these elements can be derived mineral abundances. It provides a reliable way for geologists to evaluate the sedimentary environment and reservoir formation.

**Key Words** geochemistry, sensitivity factor, rock matrix.