

文章编号: 1007-4627(2005)01-0072-04

## C/O $\gamma$ 能谱测井新的解析理论和方法\*

庞巨丰

(西安石油大学, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 报道了快中子非弹性散射  $\gamma$  能谱测井(C/O  $\gamma$  能谱测井)新的解析理论和方法, 也就是由 C/O 能谱测井仪在井眼中获取地层的快中子非弹性散射  $\gamma$  射线、NaI(Tl)探测器测量得到的 256 道谱, 再由实测非弹谱确定地层中主要元素 C, O, Si, Ca 和 Fe 等对非弹  $\gamma$  谱的贡献份额, 利用同一地层  $F$  因子相同, 求出 C 产额与 O 产额比, C 的百分含量与 O 的百分含量和原子含量比, 及 Ca 和 Si 相应比值.

**关键词:** C/O 测井; 非弹  $\gamma$  谱; 解释理论; 解释方法

**中图分类号:** TL99      **文献标识码:** A

### 1 引言

C/O  $\gamma$  能谱测井技术在开发测井中确定储层含油饱和度时十分有用. 在淡水、低矿化度或未知矿化度水的地层中, 探测油、气层、寻找和监测油/水界面, 在裸眼测井评价含油储集层等都有很大的应用价值.

但是, 目前所说的 C/O 实际上是地层快中子非弹性散射  $\gamma$  射线的实测谱中, 碳能窗与氧能窗的计数比. 在碳能窗中还有氧非弹  $\gamma$  射线的康普顿散射的贡献, 当然在碳和氧能窗中还有硅和钙非弹  $\gamma$  射线或其散射线贡献. 因此, 即使采取一些改良的数据处理方法<sup>[1]</sup>, C/O 比的灵敏度也不会提高很多, 对于含油饱和度为 100%、孔隙度为 35% 的砂岩地层的 C/O 值, 与含水饱和度为 100%、同样孔隙度的砂岩地层的 C/O 值之差不会超过 0.23. 要想进一步提高 C/O 能谱测井的灵敏度, 必需另辟蹊径, 对快中子非弹性散射  $\gamma$  射线实测谱提出新的解释理论和方法.

本文提出由非弹  $\gamma$  实测谱求出各元素的产额比、重量百分含量比, 即 C 重量百分含量与 O 重量百分含量比, 从而导出 C 与 O 原子比的新理论和新方法.

### 2 快中子非弹 $\gamma$ 实测谱确定地层元素含量的基本理论

用 C/O  $\gamma$  能谱测井仪, 在井眼里确定地层快中子非弹性散射  $\gamma$  能谱的测量中, 地层中第  $j$  种元素快中子非弹性散射瞬发的  $\gamma$  射线经过地层、水泥环和套管(可能还有井眼液体)被下井仪器 NaI(Tl)探测器记录的第  $i$  道的平均计数率  $\overline{CR}_i$  为

$$\overline{CR}_i = W_j I_n (\rho_b \bar{\Phi}_n \bar{\Omega} \bar{V}) N_A \frac{\sigma_j M_{ij}}{A_j},$$
$$i = 2, 3, \dots, 256, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

其中,  $W_j$  为第  $j$  种元素在地层中的重量百分含量(%),  $I_n$  为中子源发射的中子强度(1/s),  $\rho_b$  为地层体积密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $\bar{\Phi}_n$  为中子源单位中子强度(1/s)在地层产生的平均有效快中子通量 [ $(1/\text{cm}^2 \cdot \text{s})/(1/\text{s})$ ],  $\bar{\Omega}$  为探测器对地层平均有效探测立体角份额(%),  $\bar{V}$  为对地层平均有效研究体积( $\text{cm}^3$ ),  $N_A$  为阿弗加德罗常数,  $\sigma_j$  为第  $j$  种元素的总非弹性散射截面( $\text{cm}^2$ ),  $A_j$  为第  $j$  种元素的原子量(mol),  $M_{ij}$  为第  $j$  种元素的快中子非弹性散射  $\gamma$  射线经过地层、水泥环、套管(可能还有井液)透射和被第  $i$  道记录的几率,  $m$  为地层元素种数.

收稿日期: 2004 - 08 - 31

\* 基金项目: 中国石油天然气总公司油气田开发导向技术基金资助项目(9612103)

作者简介: 庞巨丰(1942-), 男(汉族), 广东湛江人, 教授, 博士生导师, 从事测井技术及仪器、油气水三相流不分离测量技术的研究; E-mail: pangjuf@sina.com

若第  $j$  种元素 256 道谱总的平均计数率为  $\overline{CR}_j$ , 第  $j$  种元素的非弹  $\gamma$  射线透射和被记录的几率为  $M_j$ , 则

$$\overline{CR}_j = \sum_{i=2}^{256} \overline{CR}_{j,i}; \quad M_j = \sum_{i=2}^{256} M_{j,i}$$

所以 
$$\overline{CR}_j = W_{j,i} I_n (\rho_b \overline{\Phi}_n \overline{\Omega V}) N_A \frac{\sigma_j M_{j,i}}{A_j},$$

$$j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

由于第 1 道往往是记录时间的, 故上面求和从第 2 道开始. 如果整个地层所有元素快中子非弹性散射  $\gamma$  射线对 256 道 NaI(Tl) 实测谱的总贡献即总计数率为 SUM, 则

$$SUM = \sum_{j=1}^m \overline{CR}_j,$$

那么, 第  $j$  种元素快中子非弹性散射  $\gamma$  射线对实测非弹谱的贡献份额(产额)  $y_j$  为

$$y_j = \frac{\overline{CR}_j}{SUM} = W_{j,i} I_n \left( \frac{\rho_b \overline{\Phi}_n \overline{\Omega V}}{SUM} \right) N_A \frac{\sigma_j M_{j,i}}{A_j},$$

$$j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

令

$$S_j = N_A \frac{\sigma_j M_{j,i}}{A_j}; \quad \frac{1}{F_0} = \frac{I_n \rho_b \overline{\Phi}_n \overline{\Omega V}}{SUM} \quad (4)$$

所以

$$y_j = \frac{W_{j,i} S_j}{F_0},$$

其中,  $S_j$  为第  $j$  种元素非弹性散射  $\gamma$  射线的探测灵敏度,  $F_0$  是与中子源强度和地层有关, 与单种元素无关, 对一确定地层是一个常数.

在实际测量中, 由于  $M_j$  很难测定, 探测灵敏度  $S_j$  不易测量获得, 因此采用相对灵敏度(即灵敏度因子)这个概念. 定义 O(氧)的相对灵敏度为 1, 并以 O 的相对灵敏度为参照值, 定义其他元素的相对灵敏度. 第  $j$  种元素的相对灵敏度  $S_{rj}$  定义为

$$S_{rj} = \frac{S_j}{S_0} = \frac{y_j / W_{j,i}}{y_0 / W_{i,0}} \quad (5)$$

一般来说, 通常都是使用相对灵敏度(即灵敏度因子), 因此就用  $S_j$  代替  $S_{rj}$  来表示第  $j$  种元素的灵敏度因子(相对灵敏度). 对氧元素,  $S_0 = 1$ . 从(5)式可见, 第  $j$  种元素的灵敏度因子是该元素“产额-重量百分含量比”与氧元素“产额-重量百分含量比”的比值. 为简便, 就采用  $S_j$  表示第  $j$  种元素的灵敏度

因子, 故第  $j$  种元素的重量百分含量  $W_{j,i}$  为

$$W_{j,i} = F \frac{y_j}{S_j}, \quad (6)$$

其中,  $F = F_0 / S_{Si}$ ,  $F$  是与地层有关的量, 对某一确定地层它是一个常数.  $F$  值要在实际测井中确定.

(6)式就是由快中子非弹性散射  $\gamma$  实测谱确定地层元素重量百分含量的基本理论公式. 现在的问题关键是求出各种地层元素快中子非弹性散射  $\gamma$  射线对该地层实测的非弹  $\gamma$  谱(称地层非弹谱或混合非弹谱)的贡献份额, 即产额  $y_j$ 、灵敏度因子  $S_j$  和该地层的  $F$  值.

### 3 实测非弹 $\gamma$ 谱的解析求 $y_j$

地层元素快中子非弹性散射  $\gamma$  射线, 由井下 256 道 NaI(Tl) 谱获取实测  $\gamma$  谱, 通过一定的  $\gamma$  谱定量解析方法, 可以求出各元素非弹  $\gamma$  射线的贡献份额(产额)  $y_j$ . 详细方法参阅文献[1], 这里简单给出基本步骤:

(1) 非弹谱的生成: 在 C/O  $\gamma$  能谱测井中, 总共获取了 3 个 256 道谱, 即总谱(在中子脉冲宽度时间内获取的含有非弹谱和俘获谱)、俘获谱和中子时间到达谱. 我们利用减氢峰法从总谱中获得非弹谱[2].

(2) 谱漂移校正和峰形校正: 可参阅文献[3, 4], 这里不再赘述.

(3) 求归一化谱: 由于地层第  $j$  种元素非弹  $\gamma$  的产额  $y_j$  是个百分数, 那么, 所有的非弹谱, 即标准非弹  $\gamma$  谱和待解的地层非弹  $\gamma$  谱(混合非弹谱)都要归一化, 即 256 道谱数据之和为 1.

令归一化前第  $j$  种单一元素或混合非弹  $\gamma$  谱为  $N_{kj}$ ,  $j = 1, 2, \dots, m+1$ ,  $j = m+1$  时为混合非弹谱,  $k$  为道数. 则归一化后相应的非弹  $\gamma$  谱  $N_{Gk}$  为

$$N_{Gk} = \frac{N_{kj}}{\sum_{k=2}^{255} N_{kj}}, \quad k = 2, 3, \dots, 255$$

$$j = 1, 2, \dots, m+1 \quad (7)$$

(4) 用逐道最小二乘法或卡段法解谱: 对于待解析的归一化的地层(混合)非弹  $\gamma$  谱, 第  $i$  道或第  $i$  段区的份额  $c_i$  为

$$c_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} y_j + \epsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

其中,  $a_{ij}$  为测井谱仪的响应矩阵元, 由  $m$  个归一化的标准非弹  $\gamma$  谱(前述  $m$  种单一元素非弹  $\gamma$  谱)产生;  $\epsilon_i$  为误差;  $n$  为总道数或段区数. 用最小二乘法可求得:

$$Y_{(m \times 1)} = \left[ \begin{matrix} A^T & W & A \\ (m \times n) & (n \times n) & (n \times m) \end{matrix} \right]^{-1} \cdot \left[ \begin{matrix} A^T & W & C \\ (m \times n) & (n \times n) & (n \times 1) \end{matrix} \right], \quad (9)$$

其中,  $W$  为对角矩阵,  $W_{ii} = 1/c_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . 令

$$\begin{aligned} L &= \begin{matrix} A^T & W & A \\ (m \times n) & (n \times n) & (n \times m) \end{matrix}; \\ D &= \begin{matrix} A^T & W & C \\ (m \times n) & (n \times n) & (n \times 1) \end{matrix}; \end{aligned} \quad (10)$$

所以  $Y_{(m \times 1)} = L_{(m \times m)}^{-1} \cdot D_{(m \times 1)}$ .

由(11)式则可求得产额的列矩阵  $Y$ , 从而可得产额  $y_j$ , 其误差为

$$\sigma_{y_j} = \sqrt{\frac{1}{n(n-m)} L_{jj} \sum_{i=1}^n (c_i - \sum_{j=1}^m a_{ij} y_j)^2}. \quad (11)$$

为了判断拟合得好坏, 计算拟合优度  $\Delta$ :

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c_i - \sum_{j=1}^m a_{ij} y_j)^2} < \epsilon. \quad (12)$$

若  $\Delta$  太大, 则可能漏掉或多加了一些地层元素的标准非弹谱, 也可能用卡段法时段区选取不当, 则改变段区或标准非弹  $\gamma$  谱数再作拟合, 直到获得可以接受的结果.

#### 4 灵敏度因子 $S_j$ 的确定

用一个  $\phi 1.2 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$  的标准圆筒, 圆筒中再装上一根外径 11.3 cm、内径 10.5 cm 的同轴套管. 先将 C/O 谱测井仪器置于套管内测量, 得空套管与筒系统的快中子非弹性散射  $\gamma$  谱, 即得仪器与空系统的本底谱作为标准  $\gamma$  谱之一一起拟合. 然后, 再在套管外壁与圆筒内壁之间装入精心配制的具有一定孔隙度、孔隙流体和矿物重量百分含量已知的多种矿物混合物. 使混合物密度(即模拟地层密度)和热中子扩散长度与标准非弹  $\gamma$  谱井基本一样, 从而可算得模拟地层中各种元素的重量百分含量  $W_{ij}$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ), 即地层中的  $W_{ij}$  是已知的. 再用 C/O 能谱测井仪在该模型井中, 获取模拟地层的实

测非弹  $\gamma$  谱(即混合非弹  $\gamma$  谱), 为 256 道 NaI(Tl) 谱. 用上节所述的非弹  $\gamma$  谱解析方法与软件<sup>[1]</sup> 求出模拟地层中各种元素的产额  $y_j$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ). 由于对 14.1 MeV 的中子, 氢(H)没有非弹性散射, 在常见的沉积地层元素中, 除氢以外的元素都能发生非弹性散射, 因此只考虑氢以外的其他元素.

令氧元素的灵敏度因子  $S_0=1$ , 则

$$S_j = \frac{y_j/W_{ij}}{y_0/W_{i0}}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

由(14)式可以求出模拟地层(即刻度井地层)中各元素的灵敏度因子, 作为实际 C/O 测井时应用.

#### 5 用非弹 $\gamma$ 谱求得有关比值

由于地层因子  $F$  对一确定地层是一个常数, 因此由公式(6)即可求出碳氧比等比值:

(1) 地层中各元素产额比为

$$\left( \frac{C}{O} \right)_y = \frac{y_C}{y_O}; \quad \left( \frac{Ca}{Si} \right)_y = \frac{y_{Ca}}{y_{Si}}. \quad (14)$$

(2) 地层中各元素重量百分含量比为

$$\left( \frac{C}{O} \right)_w = \frac{W_{iC}}{W_{iO}}; \quad \left( \frac{Ca}{Si} \right)_w = \frac{W_{iCa}}{W_{iSi}}. \quad (15)$$

利用(14)和(15)两个公式计算得两种 C/O 比值, 并进行比较. 取饱和油砂与饱和水砂的 C/O 值之差别最大的那个比值, 或者两种 C/O 都保留, 以作测井解释时参考, 从而大大提高了 C/O 能谱测井中的灵敏度.

#### 6 小结

通过上面的叙述, 本文提出的 C/O 能谱测井非弹  $\gamma$  谱(NaI(Tl)探测器测得的 256 道非弹  $\gamma$  谱)新的解析理论和方法与过去的所谓 C/O 比(实际上是地层非弹性散射谱中, 碳能窗与氧能窗的计数比)有原则的区别, 是另辟蹊径的新解析理论和方法. 主要点是: (1) 导出地层元素重量百分含量与该元素快中子非弹性散射对实测非弹性散射  $\gamma$  谱贡献份额(即产额)之间的关系式; (2) 利用实验室中刻度模型井确定各种元素的灵敏度因子(相对灵敏度), 待实际测井时应用; (3) 计算了碳与氧、钙和硅的产额比、重量百分含量比值, 可供选择和测井解释之应用, 大大提高了 C/O 能谱测井灵敏度.

## 参 考 文 献:

- [1] 庞巨丰等. 原子核物理评论, 2005, 22(6): 67. [3] 庞巨丰等. 测井技术, 1996, 20(6): 397.  
 [2] 庞巨丰等. 测井技术, 1993, 17(5): 349.

## A New Analyzing Theory and Method of C/O Spectrometry Logging\*

PANG Ju-feng

(Xi'an Shiyou University, Xi'an, 710065, China)

**Abstract:** A new analyzing theory and method of C/O spectrometry logging is reported. Fast neutron enelastic scattering  $\gamma$ -ray spectra (256 channels) were acquired in borehole by NaI(Tl) detector. The enelastic scattering  $\gamma$ -ray from major elements C, O, Si, Ca, Fe, etc. have the fractions of mixed enelastic spectrum in formation respectively. Because  $F$  factor is the same for identical formation, then the ratio of yield of C to O, the ratio of weight percent of C to O, and the ratio of atoms C to O could be found, and the corresponding ratio of Ca to Si was found.

**Key words:** carbon/oxygen log; enelastic  $\gamma$ -ray spectra; new analyzing theory; new analyzing method

(上接第 38 页)

## Evidence for Isotope $^{265}\text{Bh}(Z=107)^{**}$

GAN Zai-guo, GUO Jun-sheng, WU Xiao-lei, FAN Hong-mei, QIN Zhi, LEI Xiang-guo, DONG Cheng-fu, XU Hua-geng, CHEN Ruo-fu, ZHANG Fu-ming, GUO Bin, LIU Hong-ye, WANG Hua-lei, XIE Cheng-ying, FENG Zhao-qing, ZHEN Yong, SONG Li-tao, LUO Peng, XU Hu-shan, ZHUO Xiao-hong, JIN Gen-min  
 (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

REN Zhong-zhou

(Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** New isotope  $^{265}\text{Bh}(Z=107)$  was produced in bombardment of an  $^{243}\text{Am}$  target with 135 MeV  $^{26}\text{Mg}$  ions at HIRFL. Identification was made by observation of correlated  $\alpha$ -particle decays between the new isotope  $^{265}\text{Bh}$  and its  $^{261}\text{Db}$  and  $^{257}\text{Lr}$  daughters with four pairs of detectors. The experimental results show that the half-life of  $^{265}\text{Bh}$  is  $0.94^{+0.70}_{-0.31}$  s and its  $\alpha$  energy is  $(9.24 \pm 0.05)$  MeV.

**Key words:** new isotope;  $\alpha$ - $\alpha$  correlation; parent-daughter mode; decay property

\* Foundation item: China National Petroleum Corporation Directive Item (9612103)

\*\* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10275082, 10105010, 10125521, 10235020, 10221003); Major State Basic Research Development Program (G2000077400); One Hundred Person Project of Chinese Academy of Sciences; Knowledge Inovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJ CXZ-SW-No4); National Key Program for Basic Research of the Ministry of Science and Technology(2001CCG01200)