

文章编号: 1007-4627 (2005) 01-0067-05

C/O能谱测井非弹谱的解析方法软件及应用*

庞巨丰, 李 敏, 严正国

(西安石油大学, 陕西 西安 710065)

摘 要: 报道了快中子非弹性散射 γ 能谱测井, 非弹 γ 谱的新解析方法软件及应用. 新的解析方法包括: 以标准非弹 γ 谱为基础, 对用 NaI (Tl) 探测器记录的 256 道地层非弹 γ 谱作定量解析, 求出各主要元素产额的方法; 求新的 C/O 和 Ca/Si 值的方法. 可同时求出 3 种 C/O 和 Ca/Si 的值, 即碳氧产额比、重量百分含量比和原子比; 钙硅比也如此. 所设计的软件功能强, 对于孔隙度为 35% 和 100% 油饱和砂岩地层与 100% 水饱和砂岩地层 (刻度井模型地层), 碳氧原子比之差值 >0.33 , C/O 测井油水差值提高了 60% 以上, 并求得了地层的含油饱和度.

关键词: C/O 测井; 非弹 γ 谱; 谱解析; 新方法; 软件

中图分类号: TL99 **文献标识码:** A

1 前言

快中子非弹性散射 γ 能谱测井 (碳氧比 γ 能谱测井) 技术是测井界较为熟悉的一种测井技术. 能在套管井的套管中进行测量, 能下套管的地层中直接寻找油气层、划分油水界面、监测油气层动态以及确定储集层中的含油饱和度.

从 20 世纪 70 年代初诞生的第一代碳氧比测井仪^[1]至 20 世纪 90 年代初的碳氧比 γ 全能谱测井技术, C/O 值均是碳能窗与氧能窗的计数比, 或地层的快中子非弹性散射 γ 谱中碳能区与氧能区的各道计数和之比^[2]. 对于孔隙度为 35% 和 100% 油饱和砂岩地层与 100% 水饱和砂岩地层, 碳氧比值之差总是在 0.2 左右徘徊, 即使采取其他一些辅助的数据处理, 碳氧比值之差仍然没有太大的提高. 在 1996 年 10 月于北京召开的“水驱油田开发测井’96 国际学术讨论会”上, 美国斯仑贝谢公司的 Olesen 先生报告了一种基于解谱的新方法^[3], 但只求出元素产额比, 不知道其测井碳氧比之差值. 为了从根本上提高 C/O γ 能谱测井的灵敏度, 必须另辟蹊径, 研究新的求 C/O 值的方法.

前文^[4]已叙述了 C/O γ 能谱测井新的解析理论和方法, 给出了本方法的理论和基本思想. 本文

主要是研究地层快中子非弹性散射 γ 实测谱的具体解析方法及软件, 并用本软件对各种模型井地层, 特别是孔隙度为 35% 和 100% 油饱和砂岩与 100% 水饱和砂岩地层, 测得的 256 道的非弹 γ 谱进行解析. 求出各主要地层元素非弹 γ 对实测谱的贡献份额 (产额), 以及各种元素的非弹灵敏度因子, 从而求出产额、重量百分含量、原子含量 3 种 C/O 和 Ca/Si 值.

2 快中子非弹性散射 γ 谱的解析方法

2.1 测井实验

2.1.1 测井仪器

本实验采用 COPJA 型 C/O 能谱测井仪. 井下仪器包括: (1) 脉冲中子发生器. 中子能量为 14.1 MeV, 中子脉冲重复频率 ~ 20 kHz, 中子产额 $\sim 10^7$ n/s; (2) NaI (Tl) 探测器系统. NaI (Tl) 闪烁体的大小 $\sim \phi 50$ mm \times 110 mm; 对 137 Cs 0.662 MeV γ 射线的能量分辨率 $\sim 10\%$; (3) 井下电源, 包括井下电子线路的低压电源和探测器的高压电源; (4) 井下 256 道脉冲幅度分析器和 CPU; (5) 谱数据分类和获取控制接口 (井下 I/O 接口); (6) 井下接收/发送器. 地面仪器包括:

* 收稿日期: 2004-08-31; 修改日期: 2005-01-17

* 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: pangju@sina.com

(1) PC/XT微机系统一套；(2) 井下仪器与地面微机的通讯接口；(3) 地面系统软件. 可进行所需信息、参数及控制量的设置, 与井下通讯, 作地面接口和井下仪器系统检查, 谱数据获取、存储与 γ 谱的显示等.

2. 1. 2 模型井与油田密闭取芯井谱数据获取

本实验用的模型井是安放在中国石油天然气集团公司测井仪器刻度中心的刻度井. 除了刻度井并进行 C/O γ 能谱测井外, 还在不同井径的砂岩、灰岩模型井中和致密砂岩、灰岩井 (孔隙度最大为 1 p.u.) 中以及在油田密闭取芯井中获取中子非弹 γ 谱. 中子 γ 能谱数据获取方法是, 将上述 C/O γ 能谱测井仪器置于各模型井的模型地层中进行中子 γ 能谱测量. 每口井一般获取一个数据文件, 而饱和油砂与饱和水砂刻度井重复获取一次, 有两个数据文件. 每个数据文件 (每次测量) 中存储了总谱 (俘获 γ 加非弹 γ)、俘获谱和中子脉冲到达时间谱各 60 张到 120 张, 每张谱 256 道.

3 快中子非弹性散射 γ 谱的解析方法

3. 1 谱数据文件的格式转换与谱相加

原始谱数据文件的存储格式是二进制的, 而且是每计数 15 s 或 10 cm 厚地层存谱一次. 为了保证研究工作中能有统计涨落小的良好谱数据, 分别将 40 个总谱、俘获谱逐道对应相加 (除去中子脉冲到达时间谱), 则得相当于连续计数 10 min 或 4 m 厚地层的总谱和俘获谱^[2] (* . TOL 和 * . CAP). 在油田测得的谱数据格式与国内仪器不同, 需转换.

3. 2 非弹谱的生成方法

上述得到的总谱中含非弹和俘获 γ 的贡献, 我们的研究对象是非弹谱, 因此必须生成非弹谱. 方法为

$$* . INE_i = * . TOL_i - R \times * . CAP_i \quad (1)$$

$i = 2, 3, \dots, 256,$

R 可以为 1/3 或总谱氢峰面积与俘获谱氢峰面积之比^[2], 也可通过观察氢峰是否完全消失而调节确定. 一般 $R = 0.33 - 0.36$.

3. 3 标准非弹谱的生成方法

标准非弹谱的生成方法是实验生成法. 主要是

用模型井与油田密闭取芯井的谱数据经过若干方法的处理, 最后生成各单种元素非弹谱作为标准非弹谱. 本文生成了碳、氧、硅、钙、铁、镁、铝和仪器自身 (本底) 的标准非弹谱.

3. 4 灵敏度因子的确定方法

灵敏度因子即相对灵敏度, 取氧的灵敏度因子为 1, 其他元素的灵敏度因子由下式计算^[3]:

$$S_j = \frac{y_j \sqrt{W_{1j}}}{y_o \sqrt{W_{1o}}}, \quad j = C, Si, Ca \dots \quad (2)$$

本文利用表 1 中的刻度井谱数据反复比较求得各元素的灵敏度因子.

3. 5 非弹 γ 谱的漂移校正

非弹 γ 谱的漂移校正方法与其他 γ 谱的漂移校正方法^[5]一样. 如果非弹 γ 谱发生漂移, 必须在非弹 γ 谱解析之前进行校正, 但根据不同的非弹 γ 谱参考峰可能有所不同. 最好是总谱和俘获谱先漂移校正, 后生成非弹 γ 谱. 漂移校正的方法有单峰法和双峰法.

3. 6 非弹 γ 谱的解析方法

本文解析非弹 γ 谱的方法有: (1) 逐道最小二乘法 (从 30 道到 235 道); (2) 卡段法和交叉卡段法. 这两种方法的基本原理可参阅文献 [5, 6], 具体算法在后面叙述.

4 快中子非弹性散射 γ 谱的解析软件

快中子非弹性 γ 谱的解析软件系统是在 Windows95 或 Windows98 的环境下, 用 VC++ 语言设计开发成功的. 是下拉式菜单、弹出式窗口、汉字化软件系统. 功能齐全、用户界面友好、容错能力强.

4. 1 由快中子非弹性散射 γ 谱的连续解析求新碳氧比测井曲线

非弹 γ NaI (T1) 谱解析软件框图如图 1 所示. 图 1 给出了软件的菜单示意图. 图 2 给出了非弹 γ 标准谱. 图 3 给出了连续处理的窗口和显示 “高 6” 谱数据文件连续解析曲线, 即新 C/O 值随井深的变化曲线, 亦测井曲线.

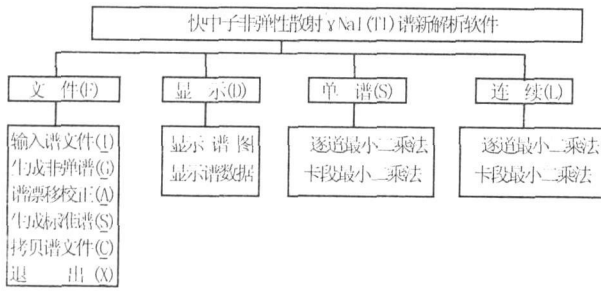


图 1 软件系统总体框图

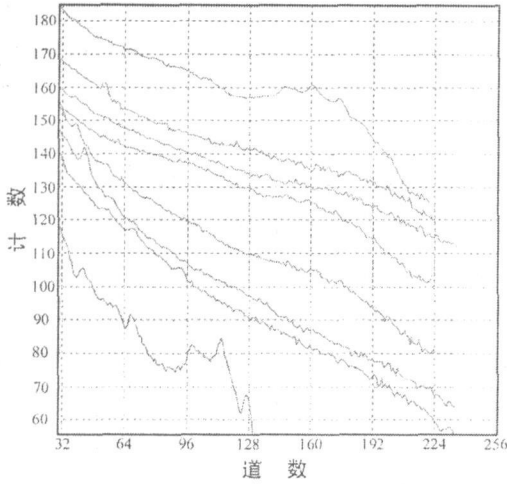


图 2 标准非弹谱

(从上到下为：O、Si、Bd、Ca、Fe、Mg、Al和C)

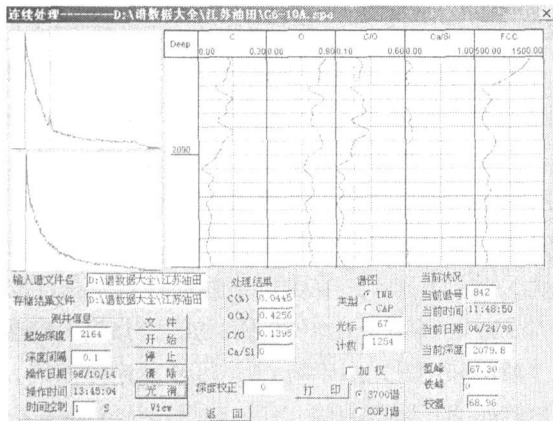


图 3 连续处理的窗口和显示“高6”谱数据文件连续解析曲线（测井曲线）

4. 2 求地层含油饱和度曲线

设地层的孔隙度为 ϕ ，含油饱和度为 S_0 ，碳和氧的原子密度分别为 n_c 和 n_o ，则地层中碳原子和

氧原子的比值可由下式计算：

$$N_{c/o} = \frac{n_c}{n_o} = \frac{a\phi S_0 + b(1-\phi)}{c\phi(1-S_0) + d(1-\phi)}, \quad (3)$$

式中： a 、 b 、 c 和 d 为待定常数，其意义如下： a 为单位体积油中碳原子数目； b 为单位体积岩石骨架中碳原子数目； c 为单位体积水中氧原子数目； d 为单位体积岩石骨架中氧原子数目；令

$$N_{c/o} = COR, \quad B = \frac{b}{a},$$

$$C = \frac{c}{a}, \quad D = \frac{d}{a},$$

则有含油饱和度：

$$S_0 = \frac{B + (C - D) \times COR}{1 + C \times COR} + \frac{D \times COR - B}{1 + C \times COR} \times \frac{1}{\phi}. \quad (4)$$

采用某油田密闭取心井核磁共振岩心分析数据，解3个联立方程得 B 、 C 和 D 3个参数值，代入式(4)得式(5)。

$$S_0 = \frac{3.07 - 12.74 \times COR}{1 + 2.44 \times COR} + \frac{15.18 \times COR - 3.07}{1 + 2.44 \times COR} \times \frac{1}{\phi}. \quad (5)$$

由式(5)所得计算值与真值的比较列于表1。

表 1 S_0 计算值与真值比较

COR	ϕ	S_0 (计算值)	S_0 (真值)
0.235	0.346	0.368	0.369
0.208	0.350	0.348	0.372
0.198	0.318	0.240	0.241
0.210	0.366	0.391	0.391

另外，用 VC++语言（Windows95 或 Windows98 环境）设计了含油饱和度解释软件，该软件设有“读入碳氧比数据”、“读入孔隙度数据”和“画含油饱和度曲线图”。

当读入碳氧比测井资料文件 * .log（由测井曲线计算的）和读入孔隙度资料文件 * .kxd 后，选择“画图 (D)”下拉的“含油饱和度曲线”，则弹出含油饱和度曲线图如图 4 所示。为“羊监 1”井其中一段含油饱和度曲线图。

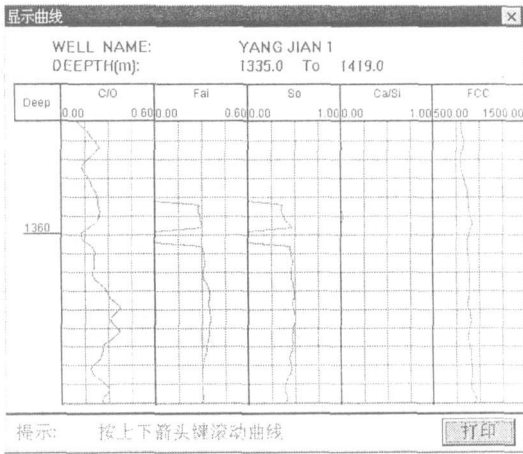


图 4 “羊监 1”井其中一段含油饱和度曲线图

5 非弹谱解析和求含油饱和度结果和讨论

利用本文所述方法和软件系统对饱和油砂地层(孔隙度 35.07%, 含油饱和度 100%)与饱和水砂地层(含淡水饱和度 100%, 孔隙度 35.29%)的非弹谱进行解析, 并获得新的 C/O 测井曲线和含油饱和度曲线, 做了大量的单井和连续解析的研究工作, 这些结果表明:

(1) C/O 能谱测井的灵敏度: 碳氧比能谱测井灵敏度定义为孔隙度为 35% 左右时, 饱和油砂地层与饱和水(淡水)砂地层 C/O 值之差(最大 C/O 差值)。碳氧产额比的最大差值为 0.2-0.22, 比传统的碳氧比灵敏度略好; 碳氧重量百分含量比最大差值 0.24-0.26, 碳氧比灵敏度提高 20%; 碳氧原子比最大差值达到 0.33-0.35, 碳氧比灵敏度提高了 60% 以上。

(2) 用逐道最小二乘法解析非弹 γ 谱, 起止道的选取对解析结果影响较大, 从解析结果来看, 选取 30-235 道比较好, 解析结果较稳定。由于所有的非弹谱(包括标准和待解 γ 非弹谱) 25 道以前均为零, 因此, 最低道不宜低于 30 道; 又因氧的标准谱漂移校正后在 240 道以后均为零, 导致 Si 和 Ca 的标准非弹谱在 240 道后出现计数偏高, 因而最大的道不宜超过 240 道。

(3) 用卡段加交叉卡段法解析非弹 γ 谱, 段区的选取对结果影响很大。经过较大量的研究, 卡段法与交叉卡段法相结合的方法解析结果较好。结果表明段区选为 30-45, 46-64, 65-80, 81-95,

96-128, 129-144, 145-190, 109-215 和 110-235 道的解析结果比较好。

(4) 用逐道最小二乘法与卡段加交叉卡段法(均加权)解析非弹谱比较, 逐道最小二乘法解谱比较好, 解析结果比较稳定, 而且误差小。这是由于逐道最小二乘法的自由度大, 而且拟合优度大。

(5) 求得新 C/O 测井曲线和含油饱和度曲线, 均可在实际中应用。

6 结论

通过对快中子非弹性散射 γ 的 256 道 NaI (T1) 实测谱的解析软件的设计研究和非弹谱解析方法的研究, 可得如下结论:

(1) 用本方法解析非弹谱, 可求得 3 个碳氧比值: 碳产额与氧产额比 y 、碳重量百分含量与氧重量百分含量比 w 、碳原子与氧原子比 N 值。

(2) 孔隙度为 35% 的饱和油砂地层与饱和水(淡水)砂地层的三个碳氧比最大差值分别为: 碳氧产额比最大差值为 $y=0.20-0.22$, 碳氧重量百分含量比最大差值为 $w=0.24-0.26$, 碳氧原子比最大差值为 $N=0.33-0.35$ 。尤其是碳氧原子比的测井灵敏度比传统的 C/O 测井提高了 60% 以上。

(3) 用逐道最小二乘法解析非弹谱时, 宜用 30-235 道。这样, 解析结果较可靠、稳定、结果也较好。因此连续解谱求测井曲线时采用逐道最小二乘法。

(4) 根据 C 与 O 原子比的特点, 推导出含油饱和度 S_0 与碳氧原子比 COR 和孔隙度 ϕ 之间的关系式。由已知 S_0 和 ϕ 的密闭取心井地层, 或 S_0 和 ϕ 准确已知实际地层采集的非弹谱所解析得的新碳氧比 COR 值, 确定关系式中的有关参数, 则得到含油饱和度 S_0 的计算公式。在实际应用时, 只要获得地层孔隙度 ϕ 和新碳氧比 COR 值, 就可以求出该地层的含油饱和度 S_0 。由于新 COR 可显示连续曲线, 只要知道连续孔隙度曲线, 就可获得连续 S_0 随井深度的变化曲线, 结果比较理想。

致谢 本文的实验工作得到西安石油勘探仪器总厂研究所和中国石油天然气总公司测井仪器刻度中心的大力支持和帮助。尤其是李中奇、李 龙、王广礼等同志在仪器装修等方面的鼎力帮助; 还有西安

石油大学车队和油库的积极支持, 在此一并表示衷心的感谢!

参 考 文 献:

- [1] Culver R B, et al. Soc Pet Hg J, 1974, **14** (5): 421—439. 出版社, 1996, 421—439.
- [2] 庞巨丰, 陈 军, 杨懿峰等. 测井技术, 1993, **17** (5): 349. [4] 庞巨丰. 原子核物理评论, 2005, **22** (1): 72.
- [3] Olsen Jean-Remy, Chen Yinghao, Zeng Wenchong, et al. 在地层水电阻率多变的情况下评价水淹油田的剩余油饱和度. 水驱油田开发测井 '96 国际学术讨论会论文集, 石油工业出版社, 1996, **20** (6): 397.
- [7] 庞巨丰编著. γ 能谱数据分析. 西安: 陕西科技出版社, 1990, 365—366.

New Analyzing Method & Software and Applications of Enelastic Spectra from C/O Spectrometry Log^{*}

PANG Ju-feng LIM in, YAN Zheng-guo

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

Abstract: The new analyzing method & software and applications of enelastic spectra from carbon/oxygen spectrometry log is reported. Enelastic γ -ray spectra (256 channels) obtained by NaI (TI) detector were analyzed quantitatively based on standard enelastic spectra. The methods which the ratio of elements yields and new ratio of C to O & of Ca to Si, the yield ratio of C to O and the weight ratio of C to O and the atoms ratio of C to O were found and the corresponding ratio of Ca to Si were found simultaneously by using the new analyzing method. The difference-value of the atoms ratio of C to O between 100% oil saturation and 100% water saturation in sandstone with 35% porosity is greater than 0.33. The difference-value between oil and water increase by a factor of 60%. In addition oil saturations curves changed with the depth were calculated.

Key word: carbon/oxygen log; enelastic gamma-ray spectra; spectrum analysis; new method; software

* Foundation item: China National Petroleum Directive item (9612103)