

脉冲中子全能谱测井数据处理方法 及影响因素的模拟研究

张 锋¹, 董经利², 许玉俊², 黄隆基¹

(1. 中国石油大学(华东) 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061;
2. 中国石油化工集团公司 胜利测井公司, 山东 东营 257096)

摘要: 利用蒙特卡罗方法模拟不同条件下的非弹能谱, 采用非弹能谱中的 Si、Ca 和 C 窗的伽马计数与 O 窗的伽马计数比值(SCCTO)确定地层含油饱和度。结果显示, 在孔隙度一定的地层, SCCTO 与含油饱和度近似成正比; 随着孔隙度的增加, 含水地层的 SCCTO 减小, 而含油地层的 SCCTO 先略微下降然后再增加; 并眼持水率不同, SCCTO 不同; SCCTO 受岩性的影响较小, 而受泥质含量的影响较大。通过和 C 窗与 O 窗的伽马计数比(C/O)比较看出, 在对岩性、孔隙度、井眼、泥质含量等作出相应校正后, 利用 SCCTO 确定饱和度要比 C/O 具有优势, 能更好地反映地层的油性。

关键词: 脉冲中子; 全能谱; 数据处理方法; 影响因素; 模拟

中图分类号: TL99; TE19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7512(2008)02-0070-07

Simulation of Data Processing Method for Pulsed Neutron Whole Energy Spectroscopy Logging and its Influencing Factors

ZHANG Feng¹, DONG Jing-li², XU Yu-jun², HUANG Long-ji¹

(1. School of Geo-resources and Information, China University of Petroleum, Dongying 257061, China;
2. Shengli Well Logging Company, China Petrochemical Corporation, Dongying 257096, China)

Abstract: The inelastic scattering gamma spectroscopy under the condition of different formation was respectively simulated by using Monte Carlo method, and the formation oil saturation may be accurately determined according to the ratio (SCCTO) of the gamma counts in energy windows of Si, Ca and C to that in energy of O from inelastic scatter gamma spectroscopy. It is concluded that the relation between the SCCTO value and formation oil saturation is approximately linear when the porosity is fixed. The SCCTO value decreases when porosity increases in the formation filled with water, but that first decreases a bit and increases with porosity increasing in the formation filled with oil. The SCCTO varies with the borehole holdup changing, and it is somewhat affected by lithology but greatly affected by

the shale content. It was advantageous to determine formation saturation by using SCCTO comparing with C/O when the corrections of porosity, lithology, holdup and shale content were accomplished. Therefore, the formation fluid character was better distinguished in accordance with SCCTO.

Key words: pulsed neutron; whole energy spectroscopy; data processing method; influencing factors; simulation

C/O 能谱测井方法是生产开发过程中确定地层饱和度的重要方法。国内外各测井公司都在对仪器的设计和数据处理方法进行不断改进,以满足不同井眼和地层条件下的测量,提高测井精度。目前国内外储层饱和度测井仪^[1-13]都是利用脉冲中子源,按照一定的脉冲宽度和发射频率产生 14 MeV 的快中子,进入地层后与地层物质发生非弹性散射和热中子俘获反应,除了 PND-S 测井仪的能谱处理是按照 CATO 确定饱和度之外,其它仪器均通过非弹能谱直接利用 C 与 O 的伽马计数比值(C/O)确定含水饱和度。尽管 PND-S 测井仪利用 CATO 确定饱和度,但由于其采取增大氧窗伽马计数的处理方式,致使由饱和度变化引起的 CATO 动态变化并不明显,且由于康普顿散射,氧原子核产生的非弹性伽马射线在其它能窗内有计数贡献,因此利用全能窗计数确定饱和度时没有消除氧的影响。脉冲中子全能谱测井则是记录脉冲间隔内的非弹全能谱,利用非弹伽马能谱中 Si、Ca 和 C 窗的总伽马计数与 O 窗的伽马计数比确定饱和度,并且剔除了康普顿散射的 O 特征伽马射线在其它能窗产生的计数,改进了利用 C/O 确定饱和度的传统方法,提高地层油水性的分辨率。本研究拟利用蒙特卡罗方法(MCNP)^[14]模拟各种地层、井眼等条件下的非弹能谱,研究不同能窗伽马计数比值与孔隙度、饱和度、井眼持水率等因素的关系,为脉冲中子全能谱测井提供数据处理方法,提高饱和度测井及解释水平。

1 利用非弹性散射伽马全能谱确定饱和度的原理

非弹性散射伽马全谱是由硅、钙、碳、氧 4 种元素各自生成的分量谱组成的,包含岩石骨架、孔隙流体和井眼物质中这些元素的信息。图像粗略地可分为两个区,包括硅、钙特征峰的谱段是岩性区,砂岩与碳酸盐岩存有明显差别;包括碳、氧特征峰的谱段是流体区,水层与油层的特

征应有明显差别。地层性质发生变化,谱图上高能部分计数率变化要比岩性部分变化小得多,这主要是高能部分的伽马射线的康普顿散射在低能部分产生影响,因此单纯利用 C 和 O 两个能窗处理问题灵敏度不高。

饱含油和饱含水砂岩地层的非弹性散射伽马能谱图示于图 1,为方便起见,把两种地层非弹伽马能谱中的 O 窗伽马计数部分重叠。从图 1 中可看出,饱含油地层不但 C 窗伽马计数高,其他低能部分伽马计数都偏高。为充分利用能谱图的全部信息,下面推导地层含油饱和度的变化与所有能窗计数的关系。假定非弹伽马能谱中 Si、Ca、C 和 O 的能窗计数分别为 N_1 、 N_2 、 N_3 和 N_4 ,则有:

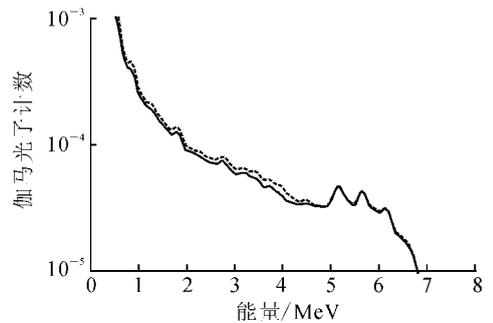


图 1 两种地层的非弹伽马能谱
虚线——饱含水地层;实线——饱含油地层

$$N_1 = \alpha_{11} \text{Si} + \alpha_{21} \text{Ca} + \alpha_{31} \text{C} + \alpha_{41} \text{O} \quad (1)$$

$$N_2 = \alpha_{22} \text{Ca} + \alpha_{32} \text{C} + \alpha_{42} \text{O} \quad (2)$$

$$N_3 = \alpha_{33} \text{C} + \alpha_{43} \text{O} \quad (3)$$

$$N_4 = \alpha_{44} \text{O} \quad (4)$$

(1)~(4)式中, a_{ij} 为第 i 种元素在 j 能窗的计数贡献因子,可以由实验或者数值模拟得到,而 Si、Ca、C 和 O 分别为硅、钙、碳和氧的含量。

在饱含水砂岩地层,分别用 N_{1w} 、 N_{2w} 、 N_{3w} 和 N_{4w} 表示 Si、Ca、C 和 O 的能窗计数,因不含钙和碳,所以方程组简化为:

$$N_{1w} = \alpha_{11} \text{Si} + \alpha_{41} \text{O} \quad (5)$$

$$N_{2W} = \alpha_{42} O \quad (6)$$

$$N_{3W} = \alpha_{43} O \quad (7)$$

$$N_{4W} = \alpha_{44} O \quad (8)$$

则 Si、Ca、C 能窗内的总计数为 N_{OW} :

$$N_{OW} = N_{1W} + N_{2W} + N_{3W} \quad (9)$$

相应扣除 O 的特征伽马射线康普顿作用后,存在:

$$N_W = N_{OW} - (\alpha_{41} O + \alpha_{42} O + \alpha_{43} O) \quad (10)$$

在饱含水砂岩地层则有:

$$\frac{N_W}{N_{4W}} = \frac{N_{OW}}{N_{4W}} - \frac{\alpha_{41} + \alpha_{42} + \alpha_{43}}{\alpha_{44}} = \frac{N_{OW}}{N_{4W}} - k \quad (11)$$

(11)式中, k 为氧特征伽马射线在 Si、Ca、C 能窗与 O 能窗计数贡献的比值。定义全能谱伽马窗计数比为 SCCTO,则有:

$$\begin{aligned} \text{SCCTO} &= \frac{(N_1 + N_2 + N_3) - k N_4}{N_4} \\ &= \frac{(N_1 + N_2 + N_3)}{N_4} - k \end{aligned} \quad (12)$$

则饱含水砂岩地层的比值(SCCTO)_W为:

$$(\text{SCCTO})_W = \frac{(N_{1W} + N_{2W} + N_{3W})}{N_{4W}} - k \quad (13)$$

同样在饱含油砂岩地层相应能窗的计数分别为:

$$N_{10} = \alpha_{11} \text{Si} + \alpha_{31} \text{C} + \alpha_{41} O' \quad (14)$$

$$N_{20} = \alpha_{32} \text{C} + \alpha_{42} O' \quad (15)$$

$$N_{30} = \alpha_{33} \text{C} + \alpha_{43} O' \quad (16)$$

$$N_{40} = \alpha_{44} O' \quad (17)$$

则 Si、Ca、C 能窗内的总计数为:

$$N_{00} = N_{10} + N_{20} + N_{30} \quad (18)$$

扣除 O 的特征伽马射线康普顿作用后,则变为:

$$N_O = N_{00} - (\alpha_{11} O' + \alpha_{21} O' + \alpha_{31} O') \quad (19)$$

$$\begin{aligned} (\text{SCCTO})_O &= \frac{N_{00}}{N_{40}} - \frac{\alpha_{41} + \alpha_{42} + \alpha_{43}}{\alpha_{44}} \\ &= \frac{(N_{10} + N_{20} + N_{30})}{N_{40}} - k \end{aligned} \quad (20)$$

(20)和(13)式相减可以得到:

$$\begin{aligned} \Delta \text{SCCTO} &= (\text{SCCTO})_O - (\text{SCCTO})_W = \\ &= \left(\frac{1}{\alpha_{44} O'} - \frac{1}{\alpha_{44} O} \right) (\alpha_{11} \text{Si}) + \frac{1}{\alpha_{44} O'} (\alpha_{31} + \alpha_{32} + \alpha_{33}) \text{C} \end{aligned} \quad (21)$$

而常规的处理公式为:

$$\begin{aligned} \Delta \text{C/O} &= (\text{C/O})_O - (\text{C/O})_W = \frac{\alpha_{33} \text{C} + \alpha_{43} O'}{\alpha_{44} O'} \\ &- \frac{\alpha_{43}}{\alpha_{44}} = \frac{\alpha_{33} \text{C}}{\alpha_{44} O'} \end{aligned} \quad (22)$$

显然(21)式表示窗计数比差值与碳的含量有关,且其差值比单纯利用 C 窗计数要大,根据其差值确定含油饱和度比采用单窗灵敏度要高。

2 数据处理方法

2.1 全能谱测井处理方法的对比

为了比较 C/O 能谱测井中改进的处理方法与原 C/O 对地层油水性的反映,选取一个内半径为 5.5 cm,外半径为 74 cm,高为 120 cm 的圆柱形罐,罐壁厚 1 cm,里面分别充满孔隙度为 30% 的油砂和水砂,脉冲中子测井仪器置于圆柱体的中心,中子源放在距下底 20 cm 处,利用蒙特卡罗方法分别模拟源距 60 cm 和 25 cm 处的非弹伽马能谱,探测器的直径为 46 mm,长度为 5 cm,NaI 晶体的能量分辨率为 10% (相对¹³⁷Cs 的 0.662 MeV 伽马射线),得到相应的非弹伽马测量谱。

处理能谱时, Si、Ca 和 C 窗的能量范围为 1.59~4.65 MeV, C 窗的能量范围为 3.15~4.65 MeV, O 窗的能量范围为 4.86~6.62 MeV; 利用蒙特卡罗模拟的方法模拟相同条件下水罐远近探测器处的非弹伽马能谱,得到远近探测器 O 的非弹性散射伽马射线在其他 3 窗产生的计数响应系数比 k 分别为 2.81 和 2.58; 根据模拟的饱含水砂罐非弹测量能谱计算 SCCTO 和 C/O 及其差值,结果列于表 1。由表 1 可见,长短源距处砂岩地层的 SCCTO 绝对差值要比 C/O 绝对差值大得多,数值分别提高了 2.37 和 2.15 倍,动态变化范围与饱含水地层的相对值提高了 31.5% 和 34%; 远近探测器处的响应规律几乎相同,主要是由于所设的模型中没有井眼的影响。因此利用 SCCTO 确定饱和度,既增大了动态变化范围的绝对值,又提高了对地层油水性的灵敏度,充分利用了所有的能窗信息,对油水性的反映比 C/O 更明显。

2.2 饱和度的确定方法

在岩性、孔隙度和井条件相同或经适当校正的条件下,确定含油饱和度 S_O 的解释模型可以用下式表示:

$$S_O = \frac{\text{SCCTO} - \text{SCCTO}_W}{\text{SCCTO}_{\text{max}} - \text{SCCTO}_W} \quad (23)$$

(23)式中, SCCTO_W 和 $\text{SCCTO}_{\text{max}}$ 分别为含水饱和度 $S_W = 100\%$ 和 $S_W = 0$ 的地层测量值, SCCTO 为目的层测量值。

表 1 砂岩油水罐不同能窗计数比值的对比

| 处理方式 | $R_w(S_w=100\%)$ | $R_o(S_o=100\%)$ | ΔR | $\Delta R/R_w$ |
|-----------------------|------------------|------------------|------------|----------------|
| (SSCTO) _{LS} | 1.096 | 1.667 | 0.571 | 52.2% |
| (C/O) _{LS} | 1.164 | 1.405 | 0.241 | 20.7% |
| (SSCTO) _{SS} | 1.145 | 1.666 | 0.522 | 45.56% |
| (C/O) _{SS} | 1.125 | 1.368 | 0.243 | 21.56% |

注:LS 表示长源距;SS 表示短源距

3 测井响应及影响因素的蒙特卡罗模拟

3.1 模型的建立

利用蒙特卡罗方法建立套管井条件的地层模型示于图 2,其中井眼部分由水、套管、水泥环等组成,套管内外径分别为 124.26 mm 和 139.7 mm,水泥环厚度为 3 cm;地层径向厚度为 10~70 cm、高为 120 cm,划分为间隔为 5 cm、高为 5 cm 的栅元,且分别填充不同流体及岩性物质。中子源的脉冲宽度为 40 μ s,长短源距分别为 58 cm 和 33 cm。分别记录 0~40 μ s 时间段的非弹伽马能谱,为了处理问题方便,没有再考虑探测器的响应,能谱处理时选取 Si、Ca 和 C 三个能窗的能量范围为 1.59~4.65 MeV,O 能窗的能量范围为 4.86~6.62 MeV,为了消除俘获伽马射线对非弹谱的干扰,采用中子能量截断的方法,追踪的粒子数目为 2×10^8 ,模拟时各能窗计数误差 $<1\%$ 。

3.2 能窗计数比值与饱和度的关系

图 2 所示的计算模型中,井眼充满水,在孔隙度为 30% 的纯砂岩和石灰岩地层,含水饱和度依次改变为 0、20%、40%、50%、60%、80% 和 100%,分别模拟长源距处相应的非弹能谱,并简条件下 SCCTO 与饱和度的关系示于图 3。

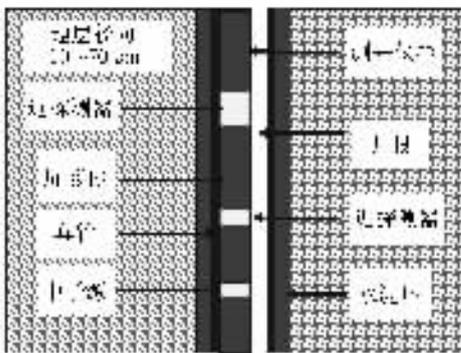


图 2 蒙特卡罗模拟计算模型

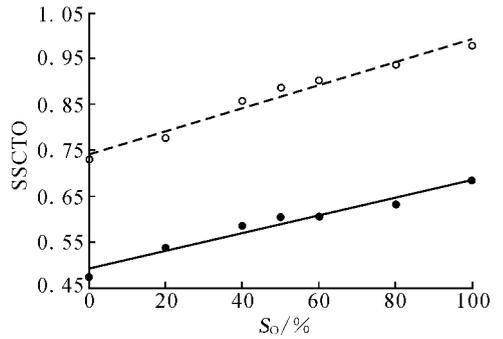


图 3 砂岩和石灰岩地层

SCCTO 与含油饱和度的关系

●——砂岩地层;○——石灰岩地层

由图 3 可以看出,砂岩和石灰岩地层的伽马计数比值 SCCTO 随着含油饱和度的增加而增加,且近似呈线性关系,因此应采用目的层与饱含水地层的 SCCTO 的差值确定地层的含油饱和度;计数比值 SCCTO 也会受到岩性的影响,主要是石灰岩地层骨架中 C 元素的存在,使 SCCTO 比砂岩地层高得多。

3.3 孔隙度对 SCCTO 测井响应的影响

根据同样的非弹能谱处理方法计算 SCCTO 与孔隙度的关系,结果示于图 4。在利用非弹能谱数据确定饱和度的处理过程中孔隙度对结果影响很大,为研究孔隙度对 SCCTO 的影响,同样在图 2 计算模型条件下,井眼充满水且饱含水 and 油的砂岩地层,孔隙度从 5% 增加至 40%。

由图 4 可见,①SCCTO 值在饱含水地层随着孔隙度的增加而减小,且变化较快;②在饱含水 and 油的砂岩地层,孔隙度低时 SCCTO 变化比较平缓,随着孔隙度的增加,SCCTO 值缓慢增加;③相比 C/O 处理方法,SCCTO 的差值随着孔隙度的增加而增加,能够反映的孔隙度范围更宽,在利用 SCCTO 确定饱和度时必须对孔隙度的影响作出相应的校正。

3.4 井眼持率对 SCCTO 测井响应的影响

持水率 Y_w 不同时窗计数 SCCTO 与孔隙度的关系示于图 5。持水率 Y_w 是指在多相的垂直管流中单位体积内水悬持的体积,持水率的高低必然会对 SCCTO 产生影响。为了研究井眼持水率对地层饱和度的影响,在套管井条件下井眼中分别充满淡水和油,改变饱和水和饱和油砂岩地层的孔隙度,记录长源距处的非弹伽马能谱,计算能窗伽马计数比值 SCCTO 与孔隙度的关系。由上面关系得到 SCCTO 在井眼流体或者持水率不同的特性:①在地层流体相同的条件下,井眼中流体为油时的比值 SCCTO 远远大于井眼流体为水时的比值;②地层流体改变时的 SCCTO 差值也受井眼内流体的影响,持水率 Y_w 为 0 远大于持水率为 100% 的情况。

为了研究井眼持水率对确定地层饱和度的影响,选取孔隙度为 30% 且饱和油和水的砂岩地层,改变井眼的持水率分别为 0、20%、40%、50%、60%、80% 和 100%,根据模拟的非弹伽马能谱,得到 SCCTO 与 Y_w 的关系,结果示于图 6。

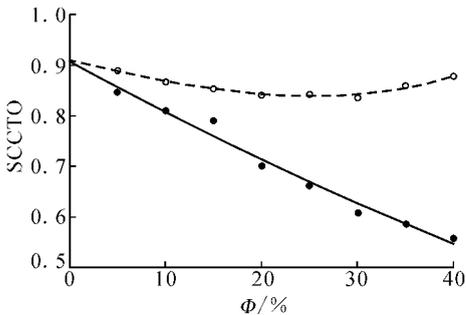


图 4 能窗计数比值 SCCTO 与孔隙度的关系
●—— $S_0=0$; ○—— $S_0=100\%$

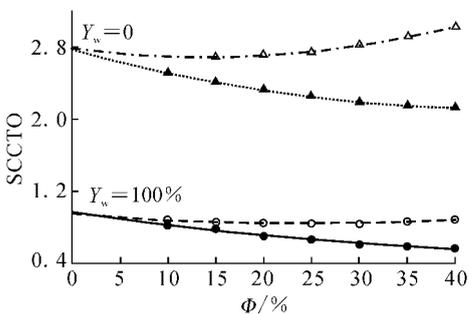


图 5 持水率 Y_w 不同时窗计数
比值 SCCTO 与孔隙度的关系
●—— $S_0=0$; ○—— $S_0=100\%$;
▲—— $S_0=0$; △—— $S_0=100\%$

由图 6 可以看出,不管对饱和油还是饱和水地层,随着井眼 Y_w 的增加, SCCTO 值在减小,反映地层的 SCCTO 差值也减小,由于井眼内充满水时 O 的非弹性散射伽马射线的增加,致使 O 窗的伽马计数增加,在地层孔隙度和流体变化相同的情况下,SCCTO 差值减小,对地层流体的分辨能力变差,因此井眼内充满油时有利于地层含油性的评价。另外井眼的 Y_w 从 0 增加至 100% 的饱和水砂岩地层,其 SCCTO 差值远大于地层流体变化所引起的差值,所以在实际能谱数据处理时不但要考虑井眼为油的影响,同时对井眼持水率 Y_w 较高时的能谱也应该加以处理。

3.5 岩性对 SCCTO 测井响应的影响

井眼充满水,地层分别为饱和水和饱和油的砂岩和石灰岩,改变孔隙度,得到两种岩性地层 SCCTO 与孔隙度的关系,结果示于图 7。由图 7 可以看出,在孔隙度较小的情况下砂岩和石灰岩 SCCTO 差别不大,纯砂岩和纯石灰岩地层骨架中的 Si、Ca 与 O 的质量分数接近,因此 SCCTO

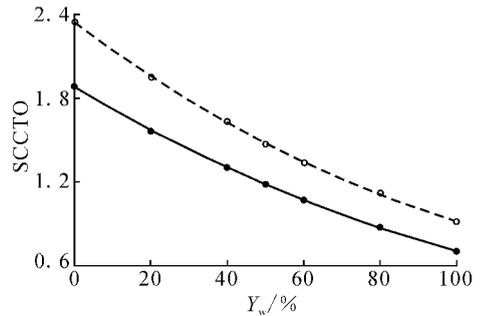


图 6 窗计数比值 SCCTO 与持水率 Y_w 的关系
●——饱和水; ○——饱和油

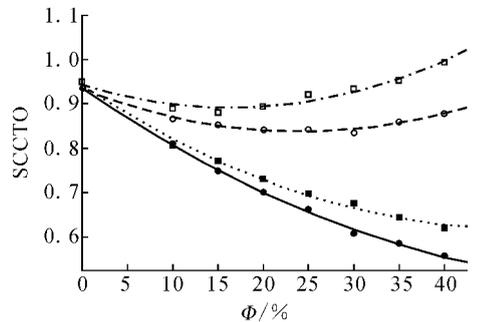


图 7 不同岩性地层能窗计数
SCCTO 与孔隙度的关系
△——砂岩地层($S_w=100\%$); ○——砂岩地层($S_w=0$);
◇——石灰岩地层($S_w=100\%$); □——石灰岩地层($S_w=0$)

相近。随着孔隙度的增大,两种岩性的 SCCTO 值差异比较明显,显然在一般的砂岩和石灰岩地层,利用 SCCTO 确定饱和度较 C/O 法受岩性的影响要小。

3.6 泥质含量对 SCCTO 测井响应的影响

同样模拟地层骨架分别为纯砂岩和泥质含量 40% 的泥质砂岩,其中泥质中粘土矿物包括高岭石、蒙脱石、伊利石和黑云母,孔隙中充满淡水和油,改变孔隙度,得到 SCCTO 与孔隙度的关系,结果示于图 8。由图 8 可以看出,骨架泥质含量为 40% 的泥质砂岩地层的 SCCTO 值比纯砂岩地层小,显然泥质 SCCTO 与孔隙度的关系有影响;随着孔隙度的增加,饱含水泥质砂岩地层的 SCCTO 值比纯砂岩地层下降慢,饱含油泥质砂岩地层在高孔隙度时 SCCTO 比纯砂岩地层增加快,主要是由于泥质中的 O 比骨架矿物的 O 质量分数大,随着孔隙度增加,骨架中 O 的非弹伽马射线总体上是减小的。显然 SCCTO 受泥质的影响比较大,在利用 SCCTO 确定饱和度时,泥质含量的影响校正不容忽视。

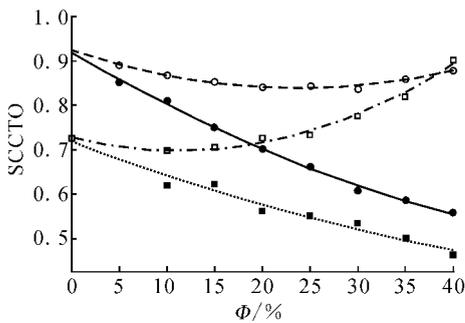


图 8 泥质含量对能窗计数比值 SCCTO 与孔隙度关系的影响

●—— $V_{sh}=0$ (水层); ○—— $V_{sh}=0$ (油层);
■—— $V_{sh}=40\%$ (水层); □—— $V_{sh}=50\%$ (油层)

4 小 结

(1) 由于非弹全能谱中 C 的伽马射线的康普顿散射在低能窗的计数贡献,用全能窗伽马计数并扣除 O 的康普顿作用后的 SCCTO 确定饱和度;在地层流体改变相同的情况下利用 Si、Ca 和 C 的三窗与 O 窗的伽马计数的 SCCTO 值要比直接利用 C/O 处理时差值大,动态变化范围

也大,能够更好地反映地层的油水性,提高测井精度。

(2) 砂岩和石灰岩地层的比值 SCCTO 随着含油饱和度的增加而增加,且近似呈线性关系,能够正确反映地层的含油饱和度,但也会受到孔隙度的影响,实际处理时需要作孔隙度校正。

(3) 在利用 SCCTO 确定饱和度时会受到井眼流体的影响,井眼中流体为油时, SCCTO 及其差值都会增加,在实际能谱数据处理时不但要对井眼为油的影响进行校正,还要对井眼持水率较高时的能谱加以处理,以提高对地层反映的能力。

(4) 在一般的砂岩和石灰岩地层,利用 SCCTO 确定饱和度受岩性的影响比 C/O 要小,但泥质含量的影响较大,在实际处理时必须对泥质含量的影响进行校正。

参考文献:

- [1] 董建华,刘宪伟,王晶. DDCO-2 型双源距碳氧比能谱测井仪[J]. 石油仪器,2002,16(6):21-23.
- [2] 吉松鹏,庄人遴,林谦,等. 双晶 C/O 能谱测井[J]. 测井技术,1997,21(2):133-137.
- [3] 姜占西,王祝文. 碳氧比能谱测井的特点及应用[J]. 物探与化探,2005,29(1):47-49.
- [4] 李龙,杨连会,左冬梅,等. COPJ-B 型碳氧比能谱测井仪[J]. 石油仪器,2000,14(3):19-21.
- [5] ELSHAHAWI H, GAD K, WILLIAM A, et al. Enhanced C/O Logging as an Effective Cased Hole Saturation Monitoring Solution Case Histories from the Gulf of Suez[C/OL]. SPE71743. [2007-10-20]//http://www.spe.org/spe-app/spe/index.jsp.
- [6] JACOBSON L, ETHRIDGE R, SIMPSON G. A New Small-diameter High-performance Reservoir Monitoring Tool[C]. SPWLA 39th Annual Logging Symposium,1998.
- [7] RICHARD C, SHAWN M, ROERT D. Benchmarking Computer Simulations of Neutron-induced, Gamma-ray Spectroscopy for Well Logging[J]. Appl Radiat Isot, 1997, 48 (10-12):1 321-1 328.
- [8] GILCHRIST WA, PRATI E, PEMPER R, et al. Introduction of a New Through-Tubing Multi-function Pulsed Neutron Instrument [C/OL]. SPE56803. [2007-10-20] //http://www.spe.

- org/spe-app/spe/index.jsp.
- [9] NACCACHE R, SAAD I, GURU U, et al. Formation Evaluation and Remaining Oil Saturation Estimation With Pulsed Neutron Logging in Tubing [C/OL] SPE93509. [2007-10-20]//http://www.spe.org/spe-app/spe/index.jsp.
- [10] THOMAZ S, ESCOBAR E AND RAMONEZ M, et al. New C/O Methodology Applied Reservoir Monitor in Atypical Casing Completion and Complex Lithology: A Case Study[C/OL]SPE77788. [2007-10-20]//http://www.spe.org/spe-app/spe/index.jsp.
- [11] SIMPSON GA, TRUAX JA, YOUNSE GA. Field Experience With a New Carbon/Oxygen Logging System in Complex Wellbore and Formation Conditions. [C/OL]SPE71718. [2007-10-20]//http://www.spe.org/spe-app/spe/index.jsp.
- [12] EYVAZZADEH RY. Modern Carbon/Oxygen Logging Methodologies: Comparing Hydrocarbon Saturation Determination Techniques [C/OL] SPE90339. [2007-10-20]//http://www.spe.org/spe-app/spe/index.jsp.
- [13] BADRUZZAMAN A, BADRUZZAMAN T, ZALAN TA. Multi-Sensor Through-Casing Density and Saturation Measurement Concepts With a Pulsed Neutron Source: A Modeling Assessment [C/OL]SPE89884. [2007-10-20]//http://www.spe.org/spe-app/spe/index.jsp.
- [14] BRIESMEISTER JF. MCNPTM-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code , LA-13709-M [R]. Los Alamos: National Laboratory Report, Version 4C, 2000.