

张 锋,袁 超,王新光. 脉冲中子双伽马谱饱和度测井方法及数值模拟研究. 地球物理学报, 2010, **53**(10): 2527~2533, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.026

Zhang F, Yuan C, Wang X G. Study on the dual gamma spectrum saturation logging method based on pulsed neutron source and numerical simulation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(10): 2527~2533, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.026

脉冲中子双伽马谱饱和度测井方法及数值模拟研究

张 锋,袁 超,王新光

中国石油大学(华东)地球资源与信息学院,青岛 266555

摘 要 脉冲中子双伽马谱饱和度测井方法是利用特定的脉冲和测量时序设计,采用远、近伽马探测器记录非弹性散射和俘获伽马能谱以及伽马射线时间谱,通过获取 C/O 和地层宏观俘获截面等信息来确定地层含油饱和度. 采用大直径仪器和 BGO 晶体探测器时,其采集的非弹性散射和俘获伽马能谱计数统计性优于国外仪器,重复脉冲发射中子后伽马射线时间谱仍满足指数衰减规律,且能使伽马射线时间谱的道计数累积,计数统计性好于常规中子寿命测井,得到的地层宏观俘获截面与单脉冲发射近似相同. 在地层孔隙度未知的情况下,利用 C/O 和地层宏观俘获截面交会技术可以定量确定含油饱和度.

关键词 脉冲中子,双伽马谱,C/O,地层宏观俘获截面,蒙特卡罗模拟

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.026

中图分类号 P631

收稿日期 2009-12-31,2010-07-29 收修定稿

Study on the dual gamma spectrum saturation logging method based on pulsed neutron source and numerical simulation

ZHANG Feng, YUAN Chao, WANG Xin-Guang

College of Geo-Resources and Information, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266555, China

Abstract The dual gamma spectrum saturation logging based on pulsed neutron source is a new technology that can at the same time record inelastic scattering and capture gamma ray spectra, along with gamma ray time spectrum at the far and near gamma ray detector by means of a special pulse and measurement timing design. It is found that counting statistics of inelastic scattering and capture gamma ray is superior to foreign instruments by using large-diameter instrument and BGO crystal detector. The gamma ray time spectrum after repeated pulse neutron emission still meets the exponential decay law, and the channel count of gamma ray time spectrum is cumulated, so its counting statistics is better than conventional neutron lifetime logging. In addition, the macroscopic absorption cross section obtained by this pulse and measure timing is nearly the same as the single pulse. It is found that the oil saturation can be determined with the cross-plot technology of C/O and formation macroscopic absorption cross section under the condition of unknown formation porosity.

Keywords Pulsed neutron, Dual gamma spectrum, C/O, Formation macroscopic absorption cross section, Monte Carlo simulation

基金项目 国家自然科学基金“脉冲中子双谱饱和度测井方法基础研究”(40774058)和山东省自然科学基金“脉冲中子-中子-伽马饱和度测井方法基础研究”(Y2007E02)资助.

作者简介 张 锋,男,1970 年生,山东莒南人,博士,副教授,从事核测井方法基础研究、核测井数据处理及蒙特卡罗模拟等工作.
E-mail:zhfxy_cn@upc.edu.cn; zhfxy_cn@sina.com

1 引言

在油田开发中后期确定剩余油的分布主要依靠 C/O 能谱测井和热中子寿命测井两种脉冲中子测井技术. 早期的饱和度测井仪器主要是具有 C/O 能谱或者中子寿命测井单一功能的脉冲中子测井仪^[1~7], 现在已发展成采用不同脉冲和测量模式具有 C/O 能谱和中子寿命测井多种功能的组合脉冲中子测井仪^[8~14], 美国斯伦贝谢公司的储层饱和度测井仪(RST)、美国哈利伯顿公司的储层监测仪(RMT)、美国阿特拉斯公司的储层动态监测仪(RPM)和美国康普乐公司的脉冲中子衰减能谱仪(PND-S)等都具有 C/O 能谱测井、脉冲中子俘获测井以及氧活化水流测井等多种模式, 在一次测井过程中只能根据地层条件分别进行 C/O 或者热中子寿命测井. 脉冲中子双伽马谱饱和度测井(PDSL)方法通过设计特殊的脉冲中子发射和测量时序, 在一次测井过程中能同时探测伽马能谱和伽马射线时间谱, 利用得到的 C/O 值和 Σ 分别或者组合交会来确定含油饱和度, 且在未知孔隙度的条件下能有效识别油气水层. 利用中子扩散方程和蒙特卡罗模拟方法研究重复脉冲发射中子后测量的伽马射线时间谱衰减规律, 并分析双伽马时间谱的道计数累积特性, 与常规 C/O 能谱测井和中子寿命测井做了对比, 脉冲中子双伽马谱饱和度测井方法是可行的.

2 脉冲中子双伽马谱饱和度测井方法原理

脉冲中子饱和度测井方法是利用伽马能谱或时间谱获取 C/O 或 Σ 值来进行含油饱和度的定量评价, 伽马能谱和时间谱的计数统计性会影响测井结果的精度和准确性, 测井时记录的伽马计数越高, 统计涨落越小, 结果越可靠.

2.1 脉冲和测量时序设计

国外的脉冲中子测井仪在一次测井中只能选择一种脉冲宽度和频率发射中子, 通过一定时序进行数据采集并分别获取 C/O 或 Σ 值, 而脉冲中子双伽马谱饱和度测井在一次井下测量中, 通过探测非弹性伽马能谱、俘获伽马能谱和伽马时间谱同时获取 C/O 和 Σ 值, 必须设计特殊的脉冲和测量时序, 以保证两种记录数据的统计性.

一个完整脉冲中子双伽马谱饱和度测井的测量

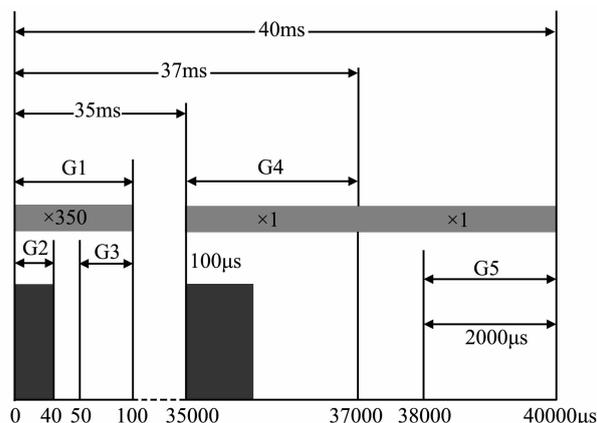


图1 脉冲与测量时序

Fig. 1 Time sequence of pulse and measurement

周期包括三个时间段, 总计 40 ms, 如图 1 所示.

其中第一时间段包括 350 个重复工作的短周期 (G1), 每个周期工作时间均为 0~100 μ s, 共计 35000 μ s, 即 35 ms. 在每个短周期的前 40 μ s 内中子源点火产生中子, 并用三个时间门采集一个时间谱和两个幅度谱. 第一个时间门 (G1) 置于 0~100 μ s, 采集总计数率时间谱, 道宽 0.4 μ s, 共 250 道, 用来监测总计数率随时间的变化; 第二个时间门 (G2) 置于 0~40 μ s, 采集 250 道总幅度谱, 主要反映非弹性散射伽马射线的能量分布, 同时有俘获和本底谱的贡献; 第三个时间门 (G3) 置于 50~100 μ s, 采集 250 道俘获伽马幅度谱, 包括本底谱的影响. 总幅度谱和俘获谱的累计采集时间分别为 14000 μ s 和 17500 μ s. G2 和 G3 中采集的总伽马能谱和俘获伽马能谱用来获取 C/O 值, 其计数统计精度是决定测井质量的关键.

第二时间段在 35 ms 之后, 即 35000~37000 μ s, 是一个间隔为 2000 μ s 的中长周期 (G4), 中子源在前 100 μ s 的脉冲间隔内发射中子, 并采集一个 100 道的伽马计数时间谱, 道宽为 20 μ s. 这个阶段在 C/O 能谱测井采集非弹性散射和俘获伽马能谱后采集伽马射线时间谱, 是脉冲中子双伽马谱饱和度测井中获取 Σ 的主要数据, 其时间间隔占总时间的 5%, 再加上重复脉冲的俘获伽马累积, 能够反映地层对热中子的俘获能力, 统计精度也可以得到保证.

第三时间段测量时间间隔为 37000~40000 μ s, 总间隔为 3000 μ s, 是一个静态过程, 中子源不发射中子. 在此期间后 2000 μ s 开一个脉冲高度分析器门 (G5) 来测量本底能谱.

2.2 双谱计数统计特性

脉冲中子双伽马谱饱和度测井的脉冲和测量时

序设计与常规 C/O 能谱测井不同,在测量中子寿命的宽脉冲发射中子之前有测量非弹和俘获伽马能谱的重复窄脉冲发射,且其重复周期短,重复窄脉冲发射后的热中子俘获伽马射线对宽脉冲发射中子记录的伽马时间衰减谱计数有累积作用,若随时间衰减快慢相同,这种计数的累积对中子寿命测井来说是有利的.由于脉冲中子源产生的快中子进入地层后的热中子计数与产生的俘获伽马计数成正比,为方便起见下面讨论重复脉冲发射中子对热中子时间谱衰减及计数累积的规律.

2.2.1 重复脉冲下的热中子时间衰减特性

为了讨论问题简便起见,假定脉冲中子源在每个脉冲时产生的快中子经过井眼和地层介质慢化后的热中子数相同,不考虑井眼的热中子衰减,则每个脉冲产生的热中子经过地层物质原子核俘获后的衰减规律用公式(1)来表示.

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}, \quad (1)$$

其中 N_0 表示脉冲结束经过一定延迟后热中子在 $t=0$ 时刻的计数, $N(t)$ 表示脉冲结束后 t 时刻的热中子计数, τ 为地层的热中子寿命.

根据脉冲中子时序设计特点,每经过一定时间 T 后下一脉冲开始点火产生快中子,通过选择最佳的源距可以降低扩散效应的影响.根据热中子扩散方程,第 i 个脉冲发射中子后热中子计数随时间 t 的衰减仍满足微分方程

$$dN_i(t)/dt + N_i(t)/\tau = 0, \quad (2)$$

n 个脉冲产生中子后总热中子计数随时间 t 衰减满足的方程为

$$\begin{aligned} dN_1(t)/dt + dN_2(t)/dt + \dots + dN_n(t)/dt \\ = -[N_1(t)/\tau + N_2(t)/\tau + \dots + N_n(t)/\tau], \end{aligned} \quad (3)$$

因此热中子的总计数满足方程可以写为

$$dN(t)/dt + N(t)/\tau = 0. \quad (4)$$

由此可以看出,相隔一定时间间隔的多脉冲发射中子后总的热中子计数仍然按照单脉冲满足的指数规律衰减,多脉冲重复发射中子对测量地层热中子寿命时热中子的总计数起累积作用,从而也增加了热中子时间谱的道计数,对利用热中子时间谱获取地层宏观俘获截面进而确定地层含油饱和度是有利的.

2.2.2 重复脉冲发射中子对热中子时间衰减谱计数的影响

图 1 所示的脉冲与测量时序第一时间段的重复脉冲的周期为 T ,在第二时间段采集的伽马时间谱

除本时间段由单一中子脉冲生成的热中子计数外,还包含其前面非弹模式重复脉冲剩余的热中子累积计数.将中子寿命单脉冲发射后的延时刻 t_0 作为计数初始时刻,则在 t_i 时刻的热中子计数可表示为

$$N_0(t_i) = N_0(t_0) e^{-(t_i-t_0)/\tau} = N_0(t_0) e^{-t/\tau}, \quad (5)$$

式中, $N_0(t_i)$ 为第二时间段中子爆发后 t_i 时刻的热中子计数, $N_0(t_0)$ 为脉冲发射中子延迟一定时间后 t_0 时刻的热中子计数,而 $t=t_i-t_0$,并假定所有脉冲发射中子延迟一定时间后 t_0 时刻的计数相同.

则在俘获时段之前非弹模式第一个脉冲发射的中子对中子寿命测量模式下 t_i 时刻的热中子时间谱的计数增加量为

$$N_1(t_i) = N_0(t_0) e^{-(t+T)/\tau}, \quad (6)$$

第 n 个脉冲发射中子对测量时间谱计数贡献为

$$N_n(t_i) = N_0(t_0) e^{-(t+nT)/\tau}, \quad (7)$$

则在 t_i 时刻热中子时间谱的总计数为

$$\begin{aligned} N(t_i) &= N_0(t_i) + N_1(t_i) + N_2(t_i) + \dots + N_n(t_i) \\ &= N_0(t_0) e^{-t/\tau} + N_0(t_0) e^{-(t+T)/\tau} \\ &\quad + N_0(t_0) e^{-(t+2T)/\tau} + \dots + N_0(t_0) e^{-(t+nT)/\tau} \\ &= N_0(t_0) e^{-t/\tau} (1 + e^{-T/\tau} + e^{-2T/\tau} + \dots + e^{-nT/\tau}). \end{aligned} \quad (8)$$

显然经过非弹模式 n 个脉冲发射中子后对热中子时间谱的道计数贡献比为

$$\begin{aligned} R = N(t_i)/N_0(t_i) &= 1 + e^{-T/\tau} + e^{-2T/\tau} + \dots + e^{-nT/\tau} \\ &= 1 + e^{-T/\tau} [1 - (e^{-T/\tau})^n] / (1 - e^{-T/\tau}). \end{aligned} \quad (9)$$

根据上面脉冲中子双伽马谱饱和度测井的脉冲和测量时序设计方案,相邻的重复脉冲时间间隔为 $T=100 \mu\text{s}$,假设地层的热中子寿命分别为 $\tau_1=200 \mu\text{s}$ 、 $\tau_2=300 \mu\text{s}$ 和 $\tau_3=400 \mu\text{s}$ 三种情况,则重复脉冲次数对热中子时间谱道计数累积贡献比结果列于表 1.

从表中数据可以得到:①对同一地层随着重复脉冲发射中子次数的增加,中子寿命测井模式的热中子时间谱道计数贡献比逐渐增加,当达到十个脉冲后热中子累积贡献比变化很小,即在 $1000 \mu\text{s}$ 以前,接近或大于地层寿命的三倍时,中子脉冲对时间谱计数的贡献很小;②离中子寿命测量更靠前的脉冲发射中子,经过十个脉冲时间间隔 T 后热中子几乎被地层全部俘获,其计数对后续中子寿命测量影响已经很小;③随着地层热中子寿命的增加,前面脉冲对后续中子寿命测量的计数累积贡献越大,对中子寿命测井越有利.常规地层的热中子寿命一般在 $300 \mu\text{s}$ 左右,由于计数累积的贡献,周期性脉冲发射中子可以使热中子时间谱的道计数增加至 3.5 倍左右,有利于提高中子寿命测量的热中子计数统计

表 1 重复脉冲对热中子时间谱的道计数贡献比

Table 1 The contribution ratio of repetitive pulse to channel counts of thermal neutron time spectra

脉冲数目	贡献比(200 μ s)	贡献比(300 μ s)	贡献比(400 μ s)	脉冲数目	贡献比(200 μ s)	贡献比(300 μ s)	贡献比(400 μ s)
1	1.61	1.72	1.78	10	2.53	3.44	4.23
2	1.97	2.23	2.39	15	2.54	3.51	4.44
3	2.20	2.60	2.86	20	2.54	3.52	4.50
4	2.33	2.86	3.22	50	2.54	3.53	4.52
5	2.41	3.05	3.51	100	2.54	3.53	4.52

性,因此利用重复脉冲发射中子可以对后续热中子时间谱测量有热中子计数积累,提高了其道计数,在探测非弹和俘获伽马能谱的同时进行中子寿命测量是可行的。

2.2.3 C/O 和中子寿命测量谱数据统计性分析

为了说明脉冲中子双伽马谱饱和度测井谱计数的可靠性,分别和国外阿特拉斯的 RPM^[14](储层动态监测)测井仪及 PDK-100 中子寿命测井仪^[15]的道计数进行对比,其脉冲宽度、重复周期、测井速度、每个深度点的采集时间及道计数比值列于表 2 中。

表 2 脉冲中子双伽马谱饱和度测井的谱数据分析表

Table 2 Data analysis of dual gamma spectrum saturation logging based on pulsed neutron source

仪器	RPM	PDSL-C/O 模式	PDK-100	PDSL-中子寿命模式
测井速度(m/h)	60	60	360	60
脉冲宽度(μ s)	40	40	10	100
单脉冲测量时间(μ s)	40	40	10	20
短周期重复次数	950	350	1	1
大周期(ms)	100	40	1	40
每一记录点测量总时间(ms)	2280	2100	10	10.5*
道计数比值	PDSL/RPM=92.1%		PDSL/PDK=105%	

* * 考虑 C/O 模式重复周期对热中子计数累积增加 3.5 倍。

在同种井眼和地层条件下,采用相同的能量道记录幅度谱,并假设脉冲中子源、源距和探测器的响应特性都相同,则脉冲中子双伽马谱饱和度测井设计中非弹模式能谱的道计数和 RPM 测井仪的计数比为 92.1%,故兼测中子寿命的非弹伽马能谱测量,其伽马能谱道计数比 RPM 测井仪下降了 7.9%,但 RPM 测井仪直径为 43 mm、且采用 NaI 晶体探测器,计数效率低,而脉冲中子双伽马谱饱和度测井

仪设计成直径为 92 mm、且采用 BGO 晶体探测器,记录非弹伽马能谱的道计数比 RPM 测井仪的道计数高,统计性好。

同样由于测井速度的降低,再加上测量非弹伽马能谱过程中重复脉冲发射中子会提高中子寿命测量的热中子道计数,脉冲中子双伽马谱饱和度测井时时间谱计数还要高于 PDK-100 中子寿命测井。

2.3 测井数据处理和解释原理

利用脉冲中子双伽马谱饱和度测井方法可以采集远、近探测器处脉冲宽度内的非弹伽马总幅度谱(包括俘获伽马及本底伽马能谱)、俘获时间门内的俘获伽马幅度谱(包括本底伽马)和本底伽马能谱,以及测量伽马时间谱。利用能谱处理方法扣除脉冲宽度内的俘获和本底伽马,得到重复脉冲发射中子后远、近探测器处的叠加非弹伽马净谱,同样得到远、近探测器的叠加俘获伽马净谱。

利用非弹伽马能谱及伽马时间谱获取的 C/O 和地层宏观俘获截面 Σ 分别确定含油饱和度的方法已经比较成熟,不再做专门介绍。针对一次下井同时测量得到的 C/O 和地层宏观俘获截面 Σ ,通过交会技术来确定含油饱和度。

根据文献[16]给出测量 C 和 O 的产额 Y_C 和 Y_O 与地层原子密度的关系,采取纯岩石地层模型,对于纯砂岩地层有

$$\frac{Y_C}{Y_O} = \frac{\phi S_o n_c}{\phi(1 - S_o)n_{ow} + (1 - \phi)n_{os}}, \quad (10)$$

式中, n_c 表示原油中的 C 原子密度, n_{ow} 和 n_{os} 分别表示水和纯砂岩中的 O 原子密度。

另外根据纯岩石地层的宏观俘获截面关系,可以得到

$$\Sigma = \Sigma_{ma}(1 - \phi) + \Sigma_h \phi S_o + \Sigma_w \phi(1 - S_o). \quad (11)$$

两式联立得到

$$\frac{Y_C}{Y_O} = \frac{(\Sigma - \Sigma_{ma})S_o n_c}{(\Sigma - \Sigma_{ma})n_{ow} + (\Sigma_w - \Sigma)n_{os} + [(\Sigma_h - \Sigma_w)n_{os} - (\Sigma - \Sigma_{ma})n_{ow}]S_o}. \quad (12)$$

显然利用脉冲中子双伽马谱饱和度测井仪采集的数据同时获取 C/O 和地层宏观俘获截面 Σ , 在未知地层孔隙度时可以直接确定含油饱和度。

3 蒙特卡罗模拟及结果分析

3.1 双伽马谱测量统计性及对 neutron 寿命测量影响的蒙特卡罗模拟

利用蒙特卡罗方法建立井筒条件下的地层模型, 模拟研究多脉冲发射中子时后续中子寿命测量的热中子计数随时间的变化规律。

3.1.1 模型的建立

建立套管井条件下的地层模型, 井眼直径为 20 cm, 其中套管内外直径分别为 126 mm 和 139.7 mm, 水泥环的厚度为 3 cm, 成分为 CaSiO_3 , 密度为 1.95 g/cm^3 ; 地层的径向半径为 10~70 cm, 高为 140 cm, 由不同岩性矿物和地层流体组成; 测井仪器贴井壁放置, 脉冲中子源位于距仪器下端 25 cm 处, 并设中子源的脉冲宽度都为 $40 \mu\text{s}$, 热中子探测器的源距为 40 cm, 如图 2 所示。

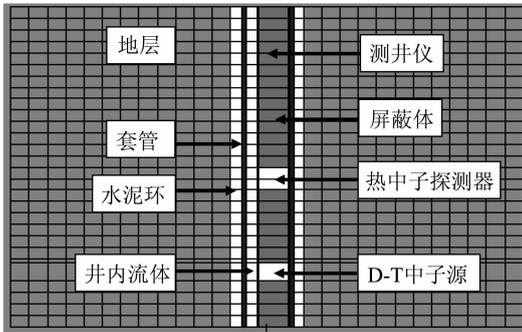


图 2 套管井计算模型

Fig. 2 Simulation model in cased hole

3.1.2 重复脉冲数对后续热中子时间谱测量的影响

井眼内充满淡水、地层为孔隙度 30% 且饱含矿化度为 50 g/L 盐水和油的砂岩, 开启不同的脉冲次数发射中子, 记录源距 40 cm 处的热中子时间谱, 图 3 给出饱含水砂岩地层包括中子寿命测量脉冲在内的单脉冲、双脉冲、五脉冲、十脉冲和五十脉冲发射中子后的热中子时间谱, 图 4 给出单脉冲和十脉冲重复周期发射中子后饱含水和油砂岩地层的热中子时间谱。

由图 3 得到, 采用不同重复脉冲发射中子时, 在中子寿命模式的中子脉冲宽度内热中子计数都先随时间增加而增大, 达到最大值后再下降; 由于井眼和

地层对热中子俘获能力的不同, 时间谱上热中子衰减的快慢不同, 单脉冲中子发射时从 $200 \mu\text{s}$ 开始才反映地层的情况, 而双脉冲中子发射时热中子时间谱的道计数增加, 反映地层部分热中子衰减的时刻提前; 随着脉冲个数的增加, 时间谱道计数随之增加, 反映地层对热中子衰减的时刻更靠前, 井眼的影响更小, 故时间谱数据处理不需延迟长时间就可以避开井眼的影响; 当增加至十个脉冲发射时热中子时间谱达到了饱和, 即使再增加发射中子的脉冲数目, 热中子时间谱的道计数也不再增加, 因此在重复周期发射中子时, 只有前面十个脉冲才会对后续热中子时间谱的测量有计数累积贡献。

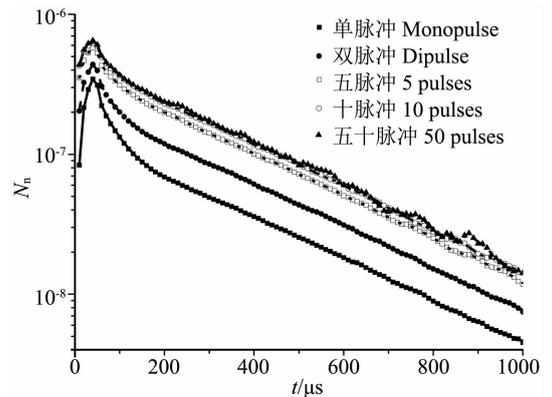


图 3 不同数目脉冲发射中子的后续热中子时间谱
Fig. 3 Subsequent thermal neutron time spectra of neutron emission with different pulse

图 4 给出地层寿命不同, 重复脉冲发射中子相对单脉冲发射时的热中子计数累积不同, 地层对热中子的俘获能力越弱, 热中子寿命越长, 重复脉冲发射中子对后续热中子时间谱的计数累积贡献越大, 计数统计性越好, 对中子寿命测量越有利。

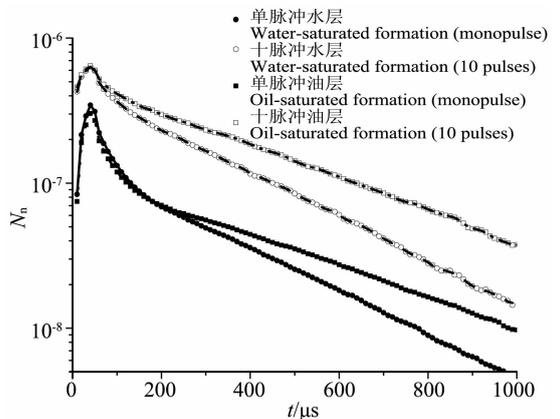


图 4 不同地层的重复脉冲发射中子后续热中子时间谱
Fig. 4 Subsequent thermal neutron time spectra of neutron emission with repetition pulse in different formation

3.1.3 重复脉冲发射中子对测量地层宏观俘获截面的影响

对于孔隙度为 30% 且饱和矿化度 50 g/L 盐水的砂岩地层, 根据前面模拟的不同重复脉冲后热中子时间谱, 选取计算时间间隔分别为 250~450 μs 和 500~700 μs , 利用公式(13)计算地层的宏观俘获截面, 列于表 3 中。

$$\Sigma = \frac{4545.5 \times (\ln N_1 - \ln N_2)}{t_2 - t_1}, \quad (13)$$

式中, N_1 和 N_2 分别为时间间隔 250~450 μs 和 500~700 μs 的热中子总计数。

表 3 不同重复脉冲时地层宏观俘获截面的计算值
Table 3 Calculated values of formation macroscopic absorption cross section of different repetition pulse

脉冲数目	1	2	5	10	50
$\Sigma/\text{c.u.}$	15.12	15.29	15.5	15.49	15.46

由表中数据可以看出, 采用单脉冲发射中子时计算的地层宏观俘获截面略小于多脉冲重复发射中子情况, 主要原因在于单脉冲中子发射后靠近井眼附近地层的热中子数目比多脉冲重复发射中子少, 扩散效应作用影响稍小, 但不同脉冲重复次数得到的截面值变化很小. 因此利用多脉冲重复发射中子的后续热中子时间谱进行中子寿命测量并没有改变对地层参数的反映。

3.2 利用 C/O 和地层宏观俘获截面确定含油饱和度的蒙特卡罗模拟

3.2.1 计算条件

采取前面的计算模型, 井眼充满淡水、地层的含油饱和度分别为 0%、20%、40%、60%、80% 和 100%, 其中地层水的矿化度为 50 g/L, 油的组分为 $\text{C}_{22}\text{H}_{46}$ 、密度为 0.87 g/cm³, 改变地层的孔隙度分别为 10%、15%、20%、25%、30%、35% 和 40%, 记录远伽马探测器处的非弹伽马能谱和伽马射线时间谱。

3.2.2 模拟结果

利用非弹伽马能谱和伽马射线时间谱得到不同含油饱和度时 C/O 值与地层宏观俘获截面, 其交会关系如图 5 所示。

从图中可以得到, 在地层水矿化度一定的条件下, 不同含油饱和度地层的 C/O 随地层宏观俘获截面的增加呈不同的变化规律: ① 水层呈线性降低; ② 随着含油饱和度的增加 C/O 随地层宏观俘获截面增加而减小的趋势变缓, 当达到某一含油饱和度时 C/O 不发生变化, 而地层宏观俘获截面增加, 原

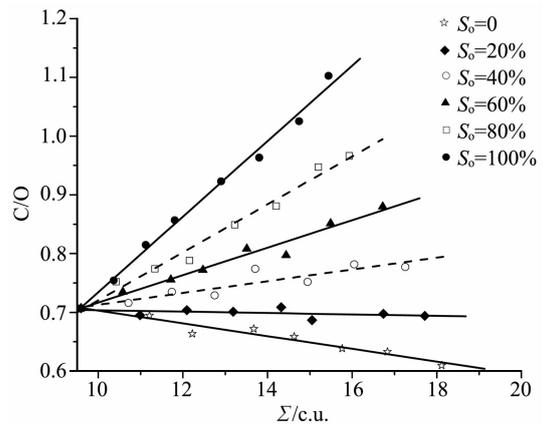


图 5 不同含油饱和度地层 C/O 与地层宏观俘获截面的交会图

Fig. 5 The cross-plot of C/O and formation macroscopic absorption cross section under the condition of different saturation formation

因是孔隙中的 C 含量与骨架和地层孔隙中 O 的含量保持稳定; ③ 含油饱和度继续增加时两者又呈线性增加趋势, 且含油饱和度越高, 增加越快. 交会图上每一点表示一定含油饱和度时的 C/O 与地层宏观俘获截面值, 地层孔隙度的变化同时会引起 C/O 和地层宏观俘获截面的变化, 但在交会图上只是改变位置, 并不改变含油饱和度, 直接利用 C/O 与地层宏观俘获截面值即可确定含油饱和度. 因此利用 C/O 与地层宏观俘获截面值的交会技术可以在孔隙度未知的情况下来确定出含油饱和度。

4 结论

(1) 脉冲中子双伽马谱饱和度测井方法是利用特定的脉冲和测量时序设计, 采用远、近伽马探测器同时记录非弹伽马能谱、俘获伽马能谱和伽马时间谱, 通过获取 C/O 和地层宏观俘获截面等信息来确定地层的含油饱和度;

(2) 在增加仪器直径和采用 BGO 晶体探测器时, 脉冲中子双伽马谱饱和度测井采集的非弹性散射和俘获伽马能谱计数统计性优于国外的测井仪器;

(3) 相隔一定时间间隔的多脉冲发射中子后的热中子时间谱仍按照单脉冲发射中子的规律衰减; 对同一地层随着重复脉冲发射中子次数的增加, 中子寿命模式记录的热中子时间谱计数逐渐增加, 且前面十个脉冲的计数累积效果明显, 兼测中子寿命时热中子或伽马时间谱的道计数都得到了提高, 多

脉冲发射中子对测量地层宏观俘获截面的影响很小;

(4)在地层孔隙度未知的情况下,利用 C/O 和地层宏观俘获截面的交会图技术可以定量确定含油饱和度,但地层水矿化度、岩性等因素对脉冲中子双伽马谱饱和度测井的影响及实际应用还需做进一步研究。

参考文献(References)

- [1] 张 锋,徐建平,胡玲妹等. PNN 测井方法的蒙特卡罗模拟结果研究. 地球物理学报, 2007, **50**(6):1925~1931
Zhang F, Xu J P, Hu L M, et al. Monte Carlo simulation result for the pulsed neutron-neutron logging method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(6):1925~1931
- [2] 李 龙,杨联会,左东梅等. COPJ-B 型碳氧比能谱测井仪. 石油仪器, 2000, **14**(3):19~21
Li L, Yang L H, Zuo D M, et al. COPJ-B type C/O logging tool. *Petroleum Instruments* (in Chinese), 2000, **14**(3):19~21
- [3] 吉朋松,庄人遴,林 谦等. 双 BGO 晶体能谱测井. 核电子学与探测技术, 1997, **17**(2):116~119
Ji P S, Zhuang R L, Lin Q, et al. Dual BGO crystal spectral logging. *Nuclear Electronics & Detection Technology* (in Chinese), 1997, **17**(2):116~119
- [4] 郑 华,刘宪伟,董建华. 双源距碳氧比测井技术研究. 测井技术, 2005, **29**(2):159~163
Zheng H, Liu X W, Dong J H. Study on dual spacing C/O logging technology. *Well Logging Technology* (in Chinese), 2005, **29**(2):159~163
- [5] 董建华,刘宪伟,王 晶. DDCO-2 型双源距碳氧比能谱测井仪. 石油仪器, 2002, **16**(6):21~23
Dong J H, Liu X W, Wang J. DDCO-2 type dual spacing C/O spectral logging tool. *Petroleum Instruments* (in Chinese), 2002, **16**(6):21~23
- [6] 张予生. 一种新的确定储层剩余油饱和度的测井技术——PNN 测井仪器及其应用. 石油仪器, 2005, **19**(3):27~28
Zhang Y S. A new well logging technology to determine reservoir remaining oil saturation—PNN well logging instrument and its application. *Petroleum Instruments* (in Chinese), 2005, **19**(3):27~28
- [7] 吴文圣,付 庚,张 智等. 小直径双源距 C/O 测井的影响因素及处理. 地球物理学报, 2005, **48**(2):459~464
Wu W S, Fu G, Zhang Z, et al. Study of influence factor for dual-detector C/O logging in slim holes. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(2):459~464
- [8] 辛 力,赵 平,赵小青. 改进型储层饱和度仪(RSTPro). 大庆石油地质与开发, 2001, **20**(4):71~73
Xin L, Zhao P, Zhao X Q. Improved reservoir saturation tool (RSTPro). *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing* (in Chinese), 2001, **20**(4):71~73
- [9] 张唯聪,侯世华,刘玉艳等. RMT 测井仪在某些油田中的初步应用. 测井技术, 2003, **27**(2):151~154
Zhang W C, Hou S H, Liu Y Y, et al. Some applications of RMT in some China oilfields. *Well Logging Technology* (in Chinese), 2003, **27**(2):151~154
- [10] Jacobson L, Ethridge R, Simpson G. A new small-diameter High-performance reservoir monitoring tool. The SPWLA39th Annual Logging Symposium, May, 1998
- [11] Elshahawi H, Gad K, William A. Enhanced C/O Logging as an Effective Cased Hole Saturation Monitoring Solution Case Histories from the Gulf of Suez. SPE71743, 2001
- [12] Robert D, Patrick D, Soran W. Quantitative use of computer models in calibration of the Computalog, pulsed neutron thermal decay tool. SPWLA 33rd Annual Logging Symposium, June 1992
- [13] 袁秀婷,张书经. PND 测井在塔河油田碳酸盐岩储层中的应用. 中国西部油气地质, 2006, **2**(1):114~118
Yuan X T, Zhang S J. Application of PND well logging in carbonate reservoir in the Tahe oilfield. *China Western Petroleum Geology* (in Chinese), 2006, **2**(1):114~118
- [14] Gilchrist W A, Prati E, Pemper R, et al. Introduction of a New Through-Tubing Multifunction Pulsed Neutron Instrument, SPE56803, 1999
- [15] 黄隆基. 放射性测井原理. 北京:石油工业出版社, 1985. 198~199
Huang L J. Theory of Radioactive Logging (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 1985. 198~199
- [16] Larry A Jacobson, Jerry Truax. C/O logging in gravel-packs. SPWLA 45th Annual Logging Symposium, June 6~9, 2004

(本文编辑 何 燕)

《地球物理学报》稿约

《地球物理学报》创刊于 1948 年,是中国科学院地质与地球物理研究所、中国地球物理学会联合主办的有关地球物理科学的综合性学术刊物. 主要刊载固体地球物理、应用地球物理、地磁和空间物理、大气和海洋地球物理,以及与地球物理密切相关的交叉学科研究成果的高质量论文. 中文版为月刊,国内外公开发行人,并由美国地球物理学家联合会(简称 AGU)发行英文版电子期刊(双月刊). 作者和读者对象主要为从事地球物理学、地球科学及其他相关学科的国内外科技工作者和大专院校师生. 欢迎您为本刊撰稿!

1 主要栏目

- 1.1 学术论文 报道国内外地球物理各分支学科及相关边缘、交叉学科的重要研究成果,包括具有创新性的基础研究理论成果和在国民经济建设等方面具有重要应用价值的研究成果.
- 1.2 综述或评述 介绍国内外地球物理学和相关交叉学科在某一领域或某一专题的最新研究进展或评述.
- 1.3 研究短论 快捷报道地球物理学领域和相关交叉学科某项研究的重要阶段性成果,或主要结论,或重要发现.
- 1.4 学术争鸣 开展对地球物理学和相关交叉学科以及对本刊文章某一学术观点的讨论,鼓励探索,不拘一格,提倡创新. 可刊载一些有学术观点争议但内容新颖、意义重大的热门文章.
- 1.5 学术动态 国内外有关地球物理学学术活动的报道. 一般 2000 字以内. "1.2"~"1.5"为不定期栏目.

2 稿件要求

- 2.1 文稿观点明确,论据可靠,层次分明,论述精练,语言准确,符合规范,求真反伪,文责自负.
- 2.2 文稿应包括:中、英文对照的题目、作者姓名和地址、摘要、关键词、参考文献,以及正文. 首页脚注处,给出基金项目(含批准号)和第一作者简介(包括姓名、性别、出生年、籍贯、毕业年份及学校、主要从事的研究内容及 E-mail 等约 100 字).
- 2.3 科技术语和名词须使用全国科学技术名词审定委员会公布的名词. 外文缩写词须符合国际规范,在文中首次出现时要说明中文含义.
- 2.4 量符号和单位 采用国家标准《量和单位》. 量符号、代表量和变动性数字及坐标轴的符号均排斜体;量符号的下标,凡用以上符号者排斜体,其他情况排正体;矢量、张量、矩阵排黑斜体. 量符号在文中首次出现时,必须给出其量名称及单位(采用 SI 单位,排正体).

常用的数学符号(自然对数的底 e , 圆周率 π , 转置 T , 虚数 i , Δd 中的 Δ , dx 中的 d , ∂x 中的 ∂ 等)均排正体.

- 2.5 图件 附最必要的图. 要求图件具科学性,清晰美观,能直接用于排版. 坐标轴标目的书写以规范形式"量符号/单位"表示,如 f/Hz , $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$. 图中文字、图例和图题中、英文并列给出. 对于涉及国界的图件,请通过 www.sbsm.gov.cn 下载最新国界图. 最好提供能用 Coreldraw 编辑的图件.
- 2.6 表格 采用三线表,必要时加辅线,直接列于文中. 表题置于表的上方,中、英文并列给出. 表中量和单位的标示形式同图.
- 2.7 参考文献 遵循著作权法,凡引用他人资料、数据、方法、图表以及结果、结论的,必须注明出处,列出文献,涉及版权事宜作者自负. 本刊参考文献采用"顺序编码制",著录格式详见"《地球物理学报》文后参考文献表著录格式".

3 投稿注意事项

- 3.1 作者需登陆本刊网站(<http://www.geophy.cn>)在线投稿. 首次投稿要进行作者注册,完成注册、登录后,要认真阅读投稿须知、版权协议、论文模版,符合要求后即可上传 WORD 和 PDF 格式文档.
- 3.2 作者可建议 5~8 名评审者(请注明其职称、研究领域、单位和 E-mail 地址),以及要回避的评审者,供编辑部参考.
- 3.3 来稿如不符合以上要求,将退回作者修改后再投.
- 3.4 作者可在本刊网站随时查询稿件处理进展情况,若 6 个月未收到或未查询到稿件处理结果,可自行处理(双方有约定者除外),勿一稿多投.
- 3.5 来稿一经发表,酌寄稿酬并收取版面费. 赠送抽印本 30 份及样刊两册. 作者若需加印抽印本,请提前告知编辑部. 作者可在本刊网站上免费下载文章全文.

通讯地址:100029 北京市朝阳区北土城西路 19 号 北京 9825 信箱《地球物理学报》编辑部

网 址:<http://www.geophy.cn>

E-mail: actageop@mail.igcas.ac.cn

电 话: 010-82998105, 82998107, 82998139, 82998113

传 真: 010-82998107