

# 钆示踪中子伽马能谱测井方法的蒙特卡罗模拟

张 锋, 黄隆基

(中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 山东 东营 257061)

**摘要:** 利用蒙特卡罗方法分别模拟砂岩和石灰岩地层渗钆前后的热中子计数及俘获伽马能谱, 研究利用渗钆前后的热中子计数率比  $R$  及俘获伽马能谱的计数比  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  确定饱和度的方法, 确定  $R$  及  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  与孔隙度  $\phi$ 、渗钆浓度、饱和度和岩性等影响因素的关系。

**关键词:** 钆; 示踪; 中子; 俘获伽马能谱; 蒙特卡罗模拟

**中图分类号:** TL99; TE19 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7512(2007)04-0193-06

## Monte Carlo Simulation of Gadolinium Tracer Neutron Gamma Spectroscopy Logging Method

ZHANG Feng, HUANG Long-ji

(Faculty of Geo-resources and Information, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

**Abstract:** The thermal neutron count and capture gamma-ray spectroscopy before and after gadolinium seeping into sandstone and limestone formation are simulated by Monte Carlo Method, and the determination method of oil saturation is studied by using the thermal neutron count rate ratio and the  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  of capture gamma spectrum before and after gadolinium seeping. In addition, the relations of ratio with influence factors such as porosity, salinity of gadolinium seeping, saturation and lithology are given.

**Key words:** gadolinium; tracing; neutron; capture gamma-ray spectroscopy; Monte Carlo simulation

中子伽马测井是利用同位素中子源向地层发射中子,与地层元素的原子核发生俘获反应并放出大量的伽马射线,通过研究伽马射线计数率进行地层评价的测井方法<sup>[1]</sup>。但中子进入地层后发生快中子的慢化、热中子的扩散以及俘获等过程,对其进行定量描述有一定的困难。稀土元素中的钆是稀土元素中俘获截面最大、俘获热中子能力最强的元素<sup>[2]</sup>,是一种潜力巨大的中子示

踪剂,向地层中渗入一定量的钆,会显著改变地层的的中子特性,并影响热中子的空间分布及俘获伽马能谱,姜文达等<sup>[3-4]</sup>曾对钆作为示踪剂及热中子俘获测井进行过研究。本工作拟以钆作为示踪剂,通过研究渗钆前后地层的热中子计数率比值及俘获伽马能谱,但仅限于确定剩余油饱和度及进行井间监测。利用蒙特卡罗模拟方法<sup>[5]</sup>(MCNP)建立计算模型,模拟用钆做示踪剂,在

改变孔隙度  $\phi$ 、岩性和渗钆浓度等地层条件时的热中子计数及俘获伽马能谱,研究渗钆前后的热中子计数比及利用伽马能谱得到的  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  与  $\phi$ 、饱和度、岩性和源距的关系,以对钆示踪中子伽马能谱测井进行定量研究。

## 1 蒙特卡罗模拟方法简介

蒙特卡罗(Monte Carlo, MCNP)方法,又称随机抽样技巧或统计实验方法,它建立了一个概率模型或随机过程,使其参数等于问题的解;然后通过逐一模拟和记录单个粒子的历程计算所求参数的统计特征,最后给出所求解的近似值。MCNP 模拟粒子输运过程就是通过逐一记录单个粒子的历程,对粒子和原子核发生碰撞时的位置、能量、运动方向、反应类型、源分布等多方面进行抽样,最终大量粒子的平均结果反映粒子在物质中的输运。

本工作拟利用 MCNP-4C 程序对同位素中子源产生的快中子与地层元素作用过程进行模拟,分别记录不同探测器位置处的热中子和俘获伽马能谱,为了研究问题的方便没有考虑<sup>3</sup>He 和晶体探测器的响应;模拟过程中所选取的截面数据为 ENDF/B-VI.0,模拟特征伽马能谱时追踪的历史中子数目为  $3 \times 10^7$ ,记录俘获伽马能谱的能量范围为 0.01 ~ 9 MeV,道宽为 0.01 MeV,每一个能量间隔内最大的计数误差为 9%,总计数误差为 0.06%,计算时间为 4 h。

## 2 钆示踪中子伽马能谱测井的核物理基础

渗入少量的含钆物质,就能使地层的热中子通量密度、地层宏观俘获截面、热中子寿命、俘获伽马能谱发生很大变化,因此利用钆的络合物作为示踪剂渗入地层后可以进行中子伽马能谱测井。

### 2.1 钆示踪中子伽马能谱测井原理

2.1.1 钆示踪中子测井 选用同位素中子源,由双组扩散理论得到均匀介质距点源为  $r$  处的热中子通量密度  $\varphi_t(r)$ <sup>[6]</sup>,由(1)式表示。

$$\varphi_t(r) = \frac{L_d^2}{4\pi D_t(L_s^2 - L_d^2)r} (e^{-r/L_s} - e^{-r/L_d}) \quad (1)$$

(1)式中,  $D_t$  为热中子扩散系数,  $\Sigma_t$  为热中子的宏观吸收截面,  $L_d = \sqrt{D_t/\Sigma_t}$  为热中子扩散长度,  $L_s$  为快中子慢化长度。

从(1)式中可以看出,  $\varphi_t(r)$  的分布不仅取决于地层的快中子减速长度  $L_s$ ,而且与地层的吸收性质( $D_t$ 、 $L_d$ )有关。而热中子俘获产生的伽马射线的密度分布与热中子通量的分布区一致,大致与地层中热中子俘获的总俘获率成正比。渗钆前、后的热中子通量的变化也反映了伽马能谱计数的变化。

渗钆前、后源距为  $r$  处的热中子通量密度分别为  $\varphi_{t1}(r)$  和  $\varphi_{t2}(r)$ ,由(2)、(3)式表示为:

$$\varphi_{t1}(r) = \frac{L_{d2}^2}{4\pi D_{t1}(L_s^2 - L_{d1}^2)r} \cdot (e^{-r/L_s} - e^{-r/L_{d1}}) \quad (2)$$

$$\varphi_{t2}(r) = \frac{L_{d2}^2}{4\pi D_{t2}(L_s^2 - L_{d2}^2)r} \cdot (e^{-r/L_s} - e^{-r/L_{d2}}) \quad (3)$$

由于渗钆前、后快中子的慢化长度不变,  $e^{-r/L_s} \gg e^{-r/L_d}$ ,略去  $e^{-r/L_{d2}}$  项,其热中子计数率比  $R$  为:

$$R = \frac{\varphi_{t1}(r)}{\varphi_{t2}(r)} = \frac{L_{d1}^2 e^{-r/L_s}}{D_{t1}(L_s^2 - L_{d1}^2)} \cdot \frac{D_{t2}(L_s^2 - L_{d2}^2)}{L_{d2}^2 e^{-r/L_s}} = \frac{\Sigma_2}{\Sigma_1} \cdot \frac{(L_s^2 - L_{d2}^2)}{L_s^2 - L_{d1}^2} \quad (4)$$

(4)式中,  $\Sigma_1$ 、 $\Sigma_2$  分别为渗钆前后地层的宏观吸收截面。

利用宏观截面和饱和度来表示,(4)式变为:

$$R = \frac{\varphi_{t1}(r)}{\varphi_{t2}(r)} = \frac{(L_s^2 - L_{d2}^2)}{(L_s^2 - L_{d1}^2)} \cdot \frac{[\Sigma_{ma} + (\Sigma_0 - \Sigma_{ma})\varphi + (\Sigma_{w2} - \Sigma_0)S_w\varphi]}{[\Sigma_{ma} + (\Sigma_0 - \Sigma_{ma})\varphi + (\Sigma_{w1} - \Sigma_0)S_w\varphi]} \quad (5)$$

(5)式中,  $\Sigma_0$ 、 $\Sigma_{ma}$ 、 $\Sigma_{w1}$  和  $\Sigma_{w2}$  分别代表油、骨架及其渗钆前、后地层水的宏观吸收截面,  $S_w$  为地层的含水饱和度,  $L_{d1}$  和  $L_{d2}$  分别为渗钆前后地层的热中子的扩散长度,  $\varphi$  为地层的孔隙度。

由(5)式可以看出,在已知渗钆浓度的情况下,  $\phi$  不变,渗钆前、后的热中子通量比与含水饱和度  $S_w$  有关,随着  $S_w$  的增加,  $R$  增加。

2.1.2 钆示踪中子伽马能谱测井 中子在地层中慢化成热中子,与地层孔隙中的 H 和 Gd 元素的原子核发生辐射俘获核反应,其中<sup>1</sup>H 产生的俘获伽马射线能量为 2.23 MeV,而钆元素产生的俘获伽马射线比较复杂,其中强度最大的伽马射线能量分别为 0.182 MeV 和 0.199 MeV。由于伽马射线在地层中的康普顿散射,测量时低能部分的伽马射线计数总要受高能伽马射线的影响,而由于钆发生热中子俘获后能够产生总的激

发能量为 7.94 MeV 和 8.54 MeV 的伽马射线<sup>[7]</sup>, 为了避免低能部分受到其他射线的影响, 可以选用高能量窗进行研究。

记录渗钷后的热中子俘获伽马能谱, 显然地层的含水饱和度越高, 渗钷之后产生的伽马射线越多, 而孔隙中 H 的含量基本不变, 相应产生的伽马射线计数降低, 因此相应 Gd 和 H 能量窗内的伽马射线计数比  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  能够反映含水饱和度的高低。研究时分别选取 (2.1 ~ 2.3) MeV 和 (2.35 ~ 8.7) MeV 能区分别作为 H 和 Gd 元素窗的能量范围, 通过计算  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  值, 就可以确定出地层的含水饱和度。

### 3 钷示踪中子测井的蒙特卡罗模拟

利用蒙特卡罗方法建立套管井条件下的计算模型。井眼直径为 20 cm, 套管外径为 139.7 mm; 而水泥环的厚度为 3 cm, 物质成分为  $\text{CaSiO}_3$ , 密度为  $1.95 \text{ g/cm}^3$ ; 地层设为径向半径为 10~70 cm, 高为 120 cm 的圆柱, 把整个地层划分成高 5 cm、环距 5 cm 的相邻栅元, 地层分别填充不同岩性、 $\phi$  和流体的物质。测井仪器直径为 40 mm, 采用 Am-Be 中子源, 位于距仪器下端 15 cm 处, 探测器放在 30 cm 和 50 cm 的位置, 中子源和探测器之间利用理想屏蔽体进行屏

蔽, 为简单起见, 没有考虑探测器对热中子和伽马计数的影响, 且测井仪器贴井壁测量。该模型示意图示于图 1。

#### 3.1 渗钷前后 $R$ 与含水饱和度的关系

$\phi$  为 30% 的砂岩和石灰岩地层, 含水饱和度  $S_w$  依次为 0、10%、20%、40%、60%、80% 和 100% 的条件下, 地层渗入示踪剂钷的矿化度为 1.0 g/L 和 0.5 g/L, 记录源距为 30 cm 处渗钷前后的  $R$ , 得  $R$  与  $S_w$  的关系, 结果示于图 2。从图 2 可以看出, 同种地层渗钷前后的  $R$  随着含水饱和度的增加而增大, 且开始变化较快, 随着  $S_w$  增加到一定程度,  $R$  变化开始平缓。这主要是由于渗入钷后显著改变了热中子的分布, 当孔隙中含钷较多时, 对热中子的俘获达到一个动态平衡, 因此利用钷示踪中子伽马测井要注意控制渗钷的浓度; 石灰岩地层的  $R$  随  $S_w$  的变化比砂岩稍微平缓一些, 这主要是由于石灰岩对热中子的俘获能力比砂岩大, 因此在渗入同样浓度的示踪剂, 石灰岩地层对热中子的俘获能力前后相差小一些,  $R$  变化平缓; 由图 2 中  $R$  与  $S_w$  关系可以拟合得到在孔隙度 30% 的砂岩和石灰岩地层利用  $R$  确定  $S_w$  的公式, 对于砂岩地层,  $S_w = 169.486 - 344.242R + 175.987R^2$ ; 对于石灰岩,  $S_w = 196.398 - 413.366R + 218.677R^2$ 。

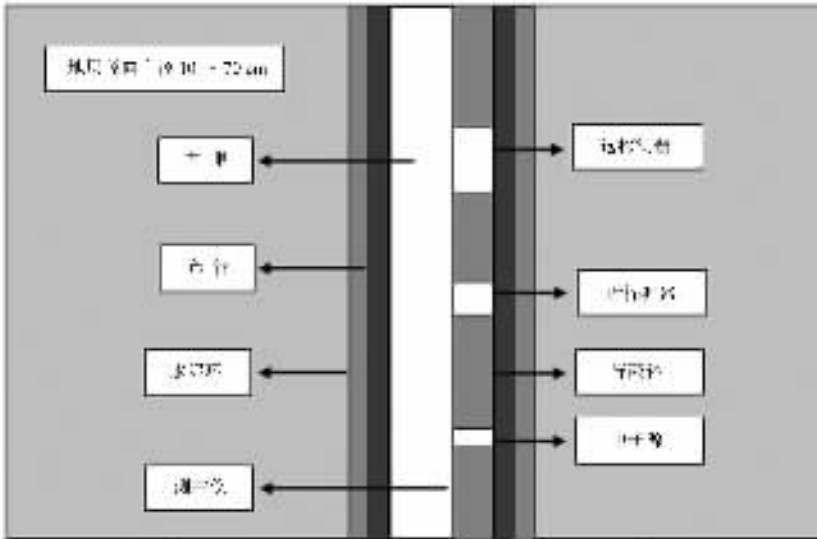


图 1 蒙特卡罗模拟计算模型

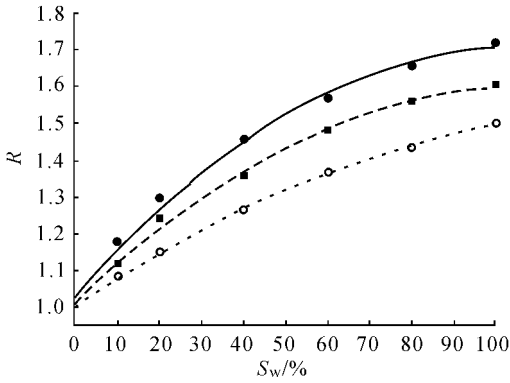


图 2 不同岩性地层热中子计数率比

R 与含水饱和度的关系曲线

○——砂岩地层(0.5 g/L); ■——石灰岩地层(1 g/L);  
●——砂岩地层(1 g/L)

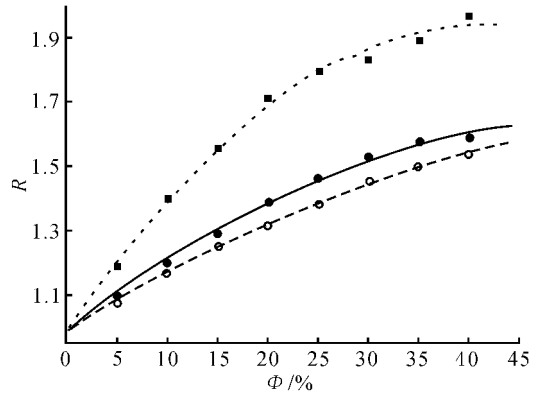


图 3 不同岩性地层热中子计数率比

R 与孔隙度  $\phi$  的关系曲线

●——0.5 g/L, 30 cm 砂岩地层;  
○——0.5 g/L, 30 cm 石灰岩地层;  
■——0.5 g/L, 50 cm 砂岩地层

另外渗钆前后  $R$  还与渗入地层的钆浓度有关, 渗入的钆浓度越高,  $R$  越大, 对区分油水越有利; 同时随着钆浓度升高,  $R$  随  $S_w$  变化平缓的初始值越小, 这由于地层中的  $H$  含量一定, 对中子的减速能力一定, 地层水的钆浓度越高, 对热中子的俘获能力越强, 达到一定值时, 热中子计数变化很小, 趋向于饱和,  $R$  变化不大, 同样说明渗钆浓度的控制是确定  $S_w$  的一个重要因素。

### 3.2 渗钆前后 $R$ 与 $\phi$ 的关系

利用上述计算模型, 地层分别为砂岩和石灰岩, 孔隙中饱含水, 渗钆前地层水的矿化度为 0, 渗钆后的浓度为 0.5 g/L, 改变地层的  $\phi$  分别为 0、5%、10%、15%、20%、25%、30%、35% 和 40%, 记录源距分别为 30 cm 和 50 cm 处的热中子, 得到  $R$  与  $\phi$  的关系示于图 3。

从图 3 中可以看出, 渗钆前后  $R$  随地层  $\phi$  的增加而增加, 近似呈线性关系, 显然  $\phi$  越大, 钆的渗入量越多, 对热中子的俘获能力越强, 渗钆前后  $R$  变化越大, 对确定饱和度越有利; 同样石灰岩地层的比值变化略小于砂岩地层; 在同样地层条件下, 渗入钆前后的  $R$  随着源距的增加而增大, 这是由于热中子在地层中的空间分布取决于地层的慢化和俘获能力, 地层的俘获能力越强, 热中子的分布区域越小, 因此源距越大, 渗钆后的热中子计数越少, 比值越大, 对地层流体的反映越明显。显然利用  $R$  确定地层饱和度时受到  $\phi$  的影响很大, 必须对  $\phi$  进行校正。

热中子计数比  $N_{SS}$  与  $N_{LS}R$  与  $\phi$  的关系示于图 4。其中  $N_{SS}$  与  $N_{LS}$  分别为短源距与长源距

的热中子计数。

从图 4 可以看出, 近、远探测器的  $R$  与  $\phi$  呈线性关系, 且地层水的钆浓度越高, 斜率越大, 这主要是因为远近探测器的探测范围不同, 浓度越高, 远探测器得到的热中子计数越低, 因此在渗钆之后利用补偿中子测井方法确定  $\phi$  时受钆浓度的影响较大。

从上面模拟结果可以看出, 利用渗钆前后的  $R$  与  $\phi$ 、 $S_w$  及岩性等有关因素的关系, 可以确定饱和度, 在实际测井过程中, 用现有的补偿热中子  $\phi$  测井仪器在渗钆前后各测一次, 自身进行  $\phi$  校正, 同时结合其他测井资料可以定量确定  $S_w$ 。

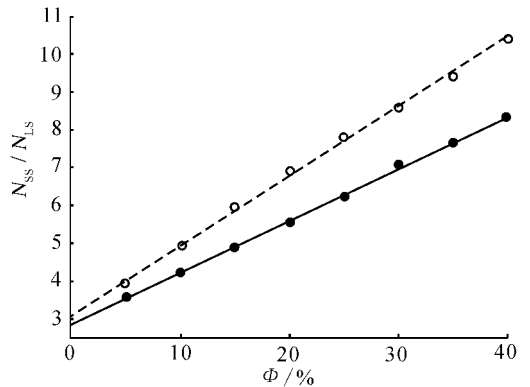


图 4 不同地层水钆浓度近、远探测器的计数率比值与  $\phi$  的关系

●——钆浓度为 0; ○——钆浓度为 0.5 g/L

## 4 钆示踪中子-伽马能谱测井的蒙特卡罗模拟

利用蒙特卡罗方法建立同样的计算模型, 其中中子源仍为同位素中子源, 采用伽马探测器记录相应的俘获伽马能谱, 为了研究问题的方便, 在模拟过程中没有考虑探测器的响应特性, 只记录探测器位置处的特征俘获伽马能谱, 研究各种条件下相应能量窗内的  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  与  $S_w$ 、 $\Phi$  和岩性的关系。

### 4.1 $n(\text{Gd})/n(\text{H})$ 与饱和度的关系

在  $\Phi$  为 30% 的砂岩地层, 井眼流体为淡水, 渗钆前和渗钆后地层水的钆浓度分别为 0 和 0.5 g/L, 油的密度为  $\rho = 0.85 \text{ g/cm}^3$ , 其组成为: C : H = 87 : 13, 在改变  $S_w$  分别为 100%、80%、60%、40%、20% 和 0 的条件下, 记录相应的俘获伽马能谱, 计算  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  与饱和度的关系, 结果示于图 5。

从图 5 可以看出,  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  与  $S_w$  的关系特点: ①当地层水的矿化度为 0 时, 由于地层中不含钆, 钆能窗内的伽马计数主要由地层中其他元素的俘获伽马射线决定,  $S_w$  改变时, 孔隙中 H 的含量几乎不变, 而其他元素的含量也保持不变, 因此  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  几乎保持不变; ②地层渗入钆后, 其能量窗内的伽马计数随着  $S_w$  的增加而增大, 而 H 窗的伽马计数反而减小, 因此  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  与  $S_w$  近似呈线性关系; ③渗入钆的浓度越大, Gd 窗的伽马计数越多, H 窗的计数越少,  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  增大; 因此如果  $\Phi$  和渗注钆浓度已知, 可以根据  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  定量确定  $S_w$ 。

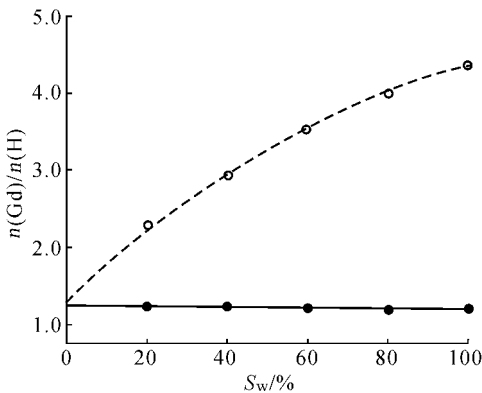


图 5 地层水不同钆浓度时  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  与  $S_w$  的关系

●——钆浓度为 0; ○——钆浓度为 0.5 g/L

### 4.2 $n(\text{Gd})/n(\text{H})$ 与 $\Phi$ 的关系

同样在砂岩地层, 井眼为淡水, 孔隙流体分别为 0、0.5 和 1 g/L 的钆水溶液, 改变  $\Phi$ , 记录源距为 30 cm 处的俘获伽马能谱, 计算不同矿化度时的  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$ , 其与孔隙度  $\Phi$  的关系示于图 6。

从图 6 可以看出: ①  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  都随着  $\Phi$  的增加而降低,  $\Phi$  越大, 相应条件下的 H 含量越高, 其窗内伽马计数越大,  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  越小; ②孔隙中钆的浓度不同,  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  相差很大, 地层水中含有微量的钆就能使比值变化很大, 因此对孔隙流体反应越敏感, 测井越有利; ③渗钆后, 砂岩地层与淡水砂岩的  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  的差值开始随着  $\Phi$  增加而加大,  $\Phi$  大于 20% 时, 该差值变化较小。以  $\Phi$  为 20% 的砂岩地层为例, 当饱含淡水时的  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  为 1.885, 而饱含浓度为 0.5 g/L 的钆水溶液时  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  为 4.803, 该差值为 3, 而  $\Phi$  为 30% 的砂岩地层, 其  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  差值约为 3.14; 因此在钆低浓度条件下孔隙流体不同, 其  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  比的差值也很大, 有利于在低  $\Phi$  条件下确定  $S_w$ , 这是钆示踪中子伽马能谱测井的优势所在。

### 4.3 $n(\text{Gd})/n(\text{H})$ 与岩性的关系

在前面的井筒条件下, 井眼流体为淡水, 孔隙分别饱含淡水和浓度为 0.5 g/L 钆水溶液的砂岩和石灰岩地层, 改变地层的  $\Phi$  分别为 10%、15%、20%、25%、30%、35% 和 40%, 模拟源距为 30 cm 处的俘获伽马能谱, 得到两种岩性地层的  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  与  $\Phi$  的关系, 结果示于图 7。

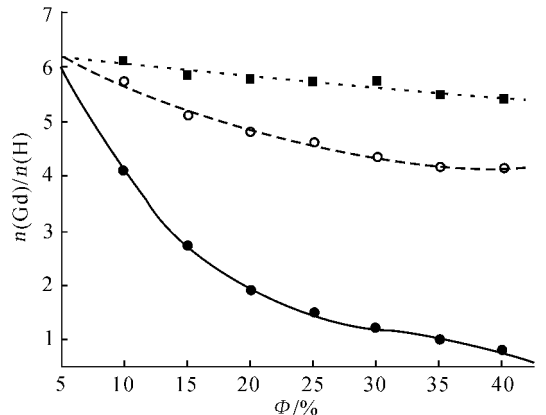


图 6 地层水不同钆浓度时  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  与  $\Phi$  的关系

●——钆浓度为 0; ○——钆浓度为 0.5 g/L

■——钆浓度为 1 g/L

在井眼和地层流体一定的条件下,  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  随着  $\phi$  的增加而减小, 其中石灰岩地层的比值稍大于砂岩地层, 且  $\phi$  越小其比值差别越大, 主要是由于骨架物质原子核发生俘获反应产生的伽马射线对能量窗内的伽马计数有贡献,  $\phi$  越小影响越明显; 当  $\phi$  大于 15% 时, 两种岩性地层的比值差别很小, 在确定  $S_w$  时岩性的影响可以忽略, 这也是钆示踪中子能谱示踪方法的优势所在。

显然利用钆做示踪剂, 中子源钆产生的中子和地层元素原子核发生作用, 分别记录相应的热中子和俘获伽马能谱, 通过渗钆前后的计数率比  $R$  及相应的  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  可以确定饱和度; 同时在井间监测技术中用钆做示踪剂, 在注水井和生产井先后做中子伽马能谱测井, 可获得相关流体的注入和产出剖面, 分层确定携带钆的流体的注入量和产出量, 通过井间剖面对比检测, 以钆作标记的流体在井间的流动和相关采油井的分配, 在厚层细分、薄层评价和一种示踪剂实现多层检测等方面具有优势。但是由于渗钆的浓度对结果影响很大, 因此渗入钆量的工艺问题比较关键; 另外由于一般的同位素中子源强度不高, 在做能谱测量时统计性不好, 可以选用中子产额较高的  $^{252}\text{Cf}$  中子源。

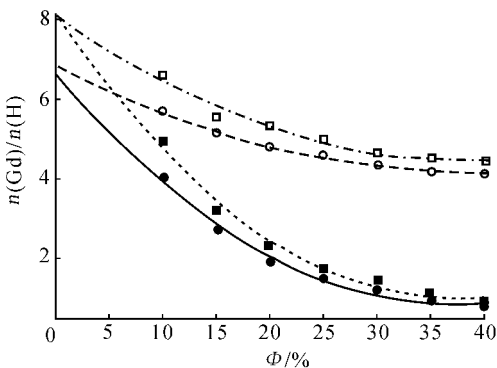


图 7 不同岩性地层的  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  与  $\phi$  的关系

- 砂岩地层, 钆浓度为 0;
- 石灰岩地层, 钆浓度为 0;
- 砂岩地层, 钆浓度为 0.5 g/L;
- 石灰岩地层, 钆浓度为 0.5 g/L

## 5 结 论

(1) 根据钆具有很大的热中子俘获截面的特性, 利用钆作为中子示踪剂, 通过记录热中子和伽马能谱, 提出钆示踪中子伽马能谱测井的基本方法。

(2) 利用 MCNP 模拟了砂岩地层渗入钆前后的热中子分布, 其比值  $R$  随着含水饱和度  $S_w$ 、孔隙度  $\phi$  和钆浓度的增加而增大;  $R$  开始变化较快, 随含水饱和度升高, 矿化度增大, 开始趋于平缓。因此控制渗入钆的浓度是钆示踪中子能谱示踪测井的关键所在; 此外源距  $r$  越大,  $R$  也越大。

(3) 通过模拟不同地层条件下渗钆前后的伽马能谱得到  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  随着饱和度  $S_w$  的增加而增加, 且钆浓度不同, 变化规律不同; 地层流体不同时  $n(\text{Gd})/n(\text{H})$  差值与  $\phi$  有关, 在低  $\phi$  地层差值也很大, 因此可以在低  $\phi$  地层利用钆示踪中子伽马能谱测井方法确定  $S_w$ 。

(4) 利用钆做为示踪剂通过记录热中子及俘获伽马能谱可以进行饱和度及注入、产出剖面的确定, 控制渗入钆量的工艺技术是关键; 可选用中子产额较高的  $^{252}\text{Cf}$  中子源, 减小能谱的统计涨落。

## 参考文献:

- [1] 洪有密. 测井原理与综合解释[M]. 东营: 石油大学出版社, 1993: 238-240.
- [2] 核素图标编制组. 核素常用数据表[M]. 北京: 原子能出版社, 1977: 77-78.
- [3] 姜文达. 热中子俘获饱和度测井示踪剂研究[J]. 石油学报, 2004, 25(2), 80-83.
- [4] 姜文达, 潘为之. 新型示踪剂钆-157 络合物在热中子俘获测井中的应用[J]. 同位素, 2003, 16(2): 70-73.
- [5] U. S. BRIESMEISTER J F. MCNPTM-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C. LA-13709-M[R]. Los Alamos, New Mexico, Los Alamos National Laboratory. 2000.
- [6] 黄隆基. 核测井原理[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000: 106-112.
- [7] 丁大钊, 叶春堂, 赵志祥. 中子物理学[M]. 北京: 原子能出版社, 2001: 131-132.