文章编号:1673-5005(2019)04-0060-09

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2019.04.007

## 利用元素伽马能谱测井识别气层的数值模拟

张 锋1,2,赵 靓1,张泉滢1,2,李向辉3, 遆永周3

(1.中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266580; 2.海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术 功能实验室,山东青岛 266071; 3.河南省科学院同位素研究所有限责任公司,河南郑州 450000)

摘要:利用蒙特卡罗方法建立不同井眼和地层条件下的计算模型,模拟研究非弹俘获计数比 R 与含气饱和度的测井 响应规律及井筒和地层环境对 R 的影响;利用研究成果处理新疆某油田实测井资料,验证元素伽马能谱测井技术在 实际生产应用进行地层含气性评价的可行性。结果表明:当地层孔隙度一定时,非弹和俘获伽马计数随着含气饱和 度的增加而增加,而比值 R 减小;当孔隙度增大时,含气饱和度小于某一确定值(约35%)时非弹伽马计数减小,但大 于该值时俘获伽马计数减少,比值 R 增加;岩性、地层水矿化度、井眼流体和尺寸以及钻井液侵入等因素都会对地层 非弹和俘获计数比产生影响;不同井眼流体对非弹俘获计数比 R 的影响较小,在同一地层孔隙度条件下,地层水矿 化度越高、井径越大,非弹俘获计数比 R 越大,且石灰岩地层的非弹俘获计数比 R 高于砂岩地层;钻井液侵入较浅 时,非弹俘获计数比 R 随钻井液侵入的加深而增大,当达到探测深度后,侵入加深但非弹俘获计数比 R 保持不变;地 层水矿化度越高、井径越大、钻井液侵入越小越有利于含气饱和度的评价,但在实际处理时需要对岩性、地层水矿化 度、井径进行校正。

关键词:含气饱和度;元素伽马能谱测井;非弹和俘获计数比;蒙特卡罗模拟

中图分类号: P 631 文献标志码: A

**引用格式:**张锋,赵靓,张泉滢,等.利用元素伽马能谱测井识别气层的数值模拟[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(4);60-68.

ZHANG Feng, ZHAO Liang, ZHANG Quanying, et al. Numerical simulation on gas reservoir identification using element gamma spectrum well logging [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2019,43(4):60-68.

# Numerical simulation on gas reservoir identification using element gamma spectrum well logging

ZHANG Feng<sup>1,2</sup>, ZHAO Liang<sup>1</sup>, ZHANG Quanying<sup>1,2</sup>, LI Xianghui<sup>3</sup>, DI Yongzhou<sup>3</sup>

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology,

Qingdao 266071, China;

3. Isotope Research Institute of Henan Academy of Sciences Company Limited, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Using Monte Carlo method, we build simulation models under different borehole and formation conditions to simulate the response of R (the ratio of inelastic gamma counts and capture gamma counts) and gas saturation. Meanwhile, the influence of R under different borehole and formation environment conditions are also simulated. This method is further applied to a gas well in Xinjiang Oil field to evaluate gas saturation. The results validate the effectiveness of this method. The simulation results show that both inelastic and capture gamma counts increase in the same porosity, while the value of R decreases. When formation porosity increases, inelastic gamma counts decrease while gas saturation is less than a certain value (about

收稿日期:2018-10-09

基金项目:国家自然科学基金项目(41374125,41574119);国家科技重大专项(2017ZX05019005-005);中央高校基本科研业务费专项 (15CX06008A)

作者简介:张锋(1970-),男,教授,博士,研究方向为核测井方法、核测井数据处理及蒙特卡罗模拟。E-mail:zhfxy\_cn@upc.edu.cn。

35%). The trendis opposite when gas saturation is greater, capture gamma counts decrease while the value of *R* increases. Various factors, such as lithology, formation water salinity, borehole fluid types, borehole size and drilling mud invasion can affect the accuracy of *R*. Therefore, these factors should be corrected. The effect of the borehole fluid types is not significant. When formation porosity is confirmed, the higher of formation water salinity and the bigger of the borehole diameter are, the greater value of *R* becomes. In addition, *R* is larger in limestone formation than in sandstone formation. When the depth of mud invasion is less than the detection depth, the value of *R* increases with the increasing mud invasion depth. High salinity formation water, big borehole size and deep mud invasion are beneficial for gas saturation evaluation.

Keywords: gas saturation; element gamma spectrum well logging; counts ratio of inelastic and capture gamma ray; Monte Carlo simulation

随着油气田勘探开发的深入,地层含气饱和度 的评价和定量计算变得尤为重要<sup>[1-2]</sup>。传统评价地 层含气的方法有脉冲中子曲线叠加技术、岩性密度 测井、三孔隙度重叠法、热中子衰减时间测井、电阻 率测井、成像测井[3-5];近年来随着脉冲中子测井技 术的发展,利用仪器探测到的中子及伽马时间谱信 息进行地层含气饱和度评价在油气识别方面发挥了 重要作用<sup>[6-7]</sup>。国内外专家对定量评价含气饱和度 进行了相关研究, Trcka 等<sup>[8]</sup>利用不同探测器的非 弹伽马计数比值动态监测储集层含气情况。黄导武 等<sup>[9]</sup>提出了在 PNC 测井中利用长短源距计数率比 值计算低矿化度水地层含气饱和度的方法; Guo 等[10] 通过利用不同探测器的俘获伽马计数组合来 评价地层含气响应。张锋等[11]利用三探测器中子 测井仪近、远探测器和中、远探测器热中子计数比值 的差值,定量评价含气储层。Guo 等<sup>[12]</sup>根据非弹窗 对岩性密度敏感的特性将俘获窗分为快、慢两个部 分,利用在致密储层中非弹窗和慢俘获窗的比值不 受地层水矿化度影响的特性识别气层。2015年. Gerardo Cedillo 等<sup>[13]</sup>提出了利用多探测器脉冲中子 测井仪中不同源距探测器记录的非弹伽马计数比值 量化计算地层含气饱和度。现有使用脉冲中子源的 元素伽马能谱仪器主要包括贝克休斯公司的 FLeX 仪器<sup>[14]</sup>和斯伦贝谢公司的 Litho Scanner 仪器<sup>[15]</sup>, 两种仪器通过利用 D-T 中子源和单探测器信息在 实际勘探开发中完成地层元素评价及有机碳探测, 但能否利用元素伽马能谱仪器探测得到的伽马信息 进行地层含气饱和度评价仍是亟待解决的问题。由 于气层和水层在组成和快中子核参数存在差异,笔 者利用元素能谱测井仪器记录的伽马能谱信息,通 过研究不同井眼和地层条件下非弹及俘获伽马计数 比值与地层含气饱和度的关系,提出利用非弹伽马 计数与俘获伽马计数的比值确定地层饱和度的方 法,为元素伽马能谱测井技术进行气层识别和定量 评价提供依据。

### 元素伽马能谱测井识别气层物理基 础

相比于常规储集层,煤岩、页岩等非常规具有储 层岩性复杂、储层物性差(孔隙度小于10%、渗透率 小于1.0×10<sup>-3</sup> µm<sup>2</sup>、埋藏较深等特点,油气勘探开发 难度较大<sup>[16-17]</sup>。元素伽马能谱测井技术通过利用 中子与地层元素原子核发生作用放出伽马射线信息 确定元素含量、划分岩性,在非常规储层评价中具有 广泛的应用前景。

脉冲中子源按照一定的频率和脉宽向地层发射 快中子,快中子进入地层后发生非弹性散射和弹性 散射,产生非弹伽马射线并减速为热中子,热中子在 地层中扩散被地层原子核俘获,产生俘获伽马射线。 不同地层流体对快中子的减速能力和对热中子的俘 获能力存在差异,当地层含气时,由于天然气的密度 和含氢指数均远小于水,地层对快中子的减速能力 降低且热中子的扩散长度增加,因此利用元素伽马 能谱测井仪器记录的非弹、俘获伽马射线信息能够 反映地层流体的变化。

根据中子扩散理论,假设源强 S<sub>0</sub>的中子源向地 层发射快中子,快中子与一个原子核发生非弹性散 射放出的伽马射线强度为*i*,则单位时间内地层体积 元 dV 在探测器处产生的非弹伽马射线强度为

$$dC_{in} = \frac{1}{4\pi X^2} i \Sigma_{in} \varphi_{f} e^{-\mu X} dV = \frac{iS_0}{16\pi^2 L_s^2 X^2 r} e^{-r/L_s} e^{-\mu X} dV.$$
(1)

$$C_{\rm in} = \frac{iS_0}{16\pi^2 L_{\rm s}^2} \iiint \frac{1}{r} e^{-r/L_{\rm s}} e^{-\mu X} \sin\theta \, \mathrm{d}X \mathrm{d}\varphi \, \mathrm{d}\theta. \tag{2}$$

式中, $C_{in}$ 为非弹伽马计数; $\Sigma_{in}$ 为非弹散射截面; $\varphi_{f}$ 为快中子的通量分布; $\mu$ 为伽马射线的线性吸收系数; $L_{s}$ 为快中子的减速长度;r,X分别为体积元 dV到中子源和探测器的距离。

同理,热中子与原子核发生俘获反应产生的俘 获伽马射线为 (3)

$$C_{\rm cap} = \frac{i'S_0}{16\pi^2(L_{\rm s}^2 - L_{\rm t}^2)} \iint \frac{1}{r} e^{-r/L_{\rm s}} e^{-\mu X} \sin\theta dX d\varphi d\theta.$$

式中,*C*<sub>eap</sub>为俘获伽马计数;*i*'为一个热中子与原子 核发生俘获反应放出俘获伽马射线强度;*L*<sub>t</sub>为热中 子的扩散长度。

因此探测器记录的非弹伽马计数与俘获伽马计 数比值 *R* 为

$$R = \frac{C_{\rm in}}{C_{\rm con}} = f(i, i', L_{\rm s}, L_{\rm t}).$$

$$\tag{4}$$

式中,比值 R 只与i、i'、快中子减速长度  $L_s$  以及热中 子扩散长度  $L_i$  相关。其中i和i'与地层中物质的原 子核相关,考虑到i和i'在 R中是以比值(i/i')形式 存在的,两者随物质原子核的变化在一定程度上相 互抵消,其影响相对  $L_s$ 和  $L_i$ 造成的影响可以忽略, 因此不考虑地层物质原子核与中子作用产生非弹和 俘获伽马射线强度的比值(i/i')的影响。

显然非弹俘获计数比 R 主要受快中子减速长度  $L_s$  和热中子扩散长度  $L_i$  的影响,其主要取决于地层孔隙度  $\varphi$  和含气饱和度  $S_{g}$ 。如图 1 为砂岩地层(孔隙度为 10% 和 30%)快中子减速长度和热中子扩散长度随地层含气饱和度  $S_{g}$  的变化关系<sup>[18]</sup>。



different gas saturation

从图1中可以看出,当地层孔隙度一定时,快中 子减速长度和热中子扩散长度均随地层含气饱和度 的增加而增加,但快中子减速长度受含气饱和度的 影响变化幅度更大。由于地层中产生的非弹、俘获 伽马射线分布与快中子减速长度和热中子的扩散长 度有关,不同含气饱和度 S<sub>g</sub> 地层的非弹俘获计数比 R 不同,故可利用同一探测器记录的 R 值来确定地 层含气饱和度。

#### 2 蒙特卡罗模拟及结果分析

为了研究非弹和俘获伽马计数比与地层含气饱 和度响应关系,利用蒙特卡罗方法模拟不同地层条 件下的非弹和俘获伽马场分布。建立计算模型参数 如下:井眼直径为 20 cm,井眼内充满淡水,地层半 径为 10~70 cm,高为 140 cm,地层为砂岩地层,地 层孔隙度中分别填充不同的流体;仪器外径为 4.3 cm,仪器外壳厚 0.4 cm,仪器贴井壁测量。仪器采 用由 1 个 D-T 脉冲中子发生器和 1 个 BGO 探测器 组成的测量系统,脉冲宽度为 40 μs,周期为 1 000 μs,BGO 探测器源距为 65 cm,中子源和探测器之间 放置厚度为 5 cm 的钨镍铁屏蔽体。为了简化模拟 的过程,没有考虑探测器的响应特性,计算模型如图 2 所示。



图 2 蒙特卡罗计算模型 Fig. 2 Monte Carlo simulation model

模拟中子数目 1×10<sup>8</sup>,能量 14 MeV;模拟时采 用 F4 栅元计数方式,记录伽马时间谱时间范围为 0~1000 μs,道宽 20 μs,计数误差小于 5%。数据 处理时,非弹伽马和俘获伽马采用能窗范围均为0~ 8.5 MeV,记录非弹伽马时间窗为 0~40 μs,俘获伽 马时间窗为 200~600 μs。利用蒙特卡罗模拟得到 同一源距处的非弹伽马和俘获伽马计数,研究利用 非弹俘获计数比的方法来定量评价气层。

#### 2.1 非弹、俘获伽马计数随含气饱和度的变化规律

利用图 2 所示模型, 井眼内充满淡水, 地层孔隙 含气(主要成分为 CH<sub>4</sub>, 密度为 0.2 g/cm<sup>3</sup>), 地层含 气饱和度为 0、30%、50%、70%、100% 时, 改变地层 孔隙度为 0 到 40%, 间隔为 5%, 模拟得到不同地层 孔隙度条件下, 探测器的非弹、俘获伽马计数(*N*<sub>1</sub> 和 *N*<sub>c</sub>)与地层含气饱和度的关系, 如图 3 所示。



图 3 不同孔隙度地层伽马计数与含气饱和度关系

Fig. 3 Relationship between gamma counts and gas saturation with different porosity

由图 3 可知,探测器记录的非弹、俘获伽马计数 与地层含气饱和度存在函数关系。当地层孔隙度一 定时,随着含气饱和度的增加,地层密度下降、含氢 指数减小,非弹伽马计数和俘获伽马计数均增加;当 地层孔隙度改变时,含气饱和度小于某一确定值 (约 35%)时,非弹伽马计数随着地层孔隙度的增大 而减小,而当地层含气饱和度大于此确定值时规律 相反。当地层孔隙度变化时,俘获伽马计数随着地 层孔隙度的增加而减小。

利用探测器记录到的非弹伽马计数和俘获伽马 计数,计算井眼流体为水,地层含气饱和度为0、 30%、50%、70%、100%,地层孔隙度由0变化为 40%时,不同地层条件下的非弹俘获计数比 R 随地 层含气饱和度的关系如图4 所示。





由图4可知,非弹和俘获伽马计数比R的变化 能够反映地层含气饱和度的大小。当地层孔隙度一 定时,非弹和俘获伽马计数均随着地层含气饱和度 的增大而增大,计算得到的非弹俘获计数比 R 随着 地层含气饱和度的增加呈线性减小,地层孔隙度越 大,不同含气饱和度引起的 R 的差异越大。当地层 含气饱和度一定时,R 随着地层孔隙度的增大而增 大,且地层含气饱和度越小,R 的变化越剧烈。

根据图 4 中不同孔隙度条件下的非弹俘获比 R 与地层含气饱和度 S<sub>g</sub>的响应关系,建立地层含气饱和度 7 和度评价模型

 $S_g = (2\,145 - 176.\,6\varphi + 5.\,93\varphi^2 - 0.\,066\varphi^3) +$ 

 $(-2635+233.7\varphi-7.85\varphi^2+0.088\varphi^3)R.$  (5)

由式(5)可得,地层含气饱和度  $S_g$  是非弹俘获 计数比 R 和地层孔隙度  $\varphi$  的函数,利用探测器探测 到的 R 结合地层孔隙度参数,能够实现地层含气饱 和度评价。

#### 2.2 影响因素分析及校正

由于实际测量中 *R* 受井眼和地层环境的影响。 利用图 2 所示模型,模拟得到不同影响因素对 *R* 的 影响,为进行实际地层含气饱和度解释评价提供了 依据。

2.2.1 地层水矿化度的影响

其他条件不变,改变地层孔隙度由 0 到 40%, 间隔为 5%,地层完全含水,地层水矿化度 C<sub>w</sub>为 0、 1%、2%、5%、10%,计算得到地层流体不同时非弹 俘获计数比 R 随孔隙度的变化规律,如图 5 所示。

由图 5(a)可知,井眼流体相同,地层孔隙度一 定时,R 随着地层水矿化度的增大而增大,这主要是 因为地层水矿化度越高,地层对热中子的俘获能力 越强,非弹俘获计数比 R 越大。当地层水矿化度一 定时,非弹俘获计数比 R 随着地层孔隙度的增大而 增大,且地层水矿化度越大,非弹俘获计数比 R 随 孔隙度的变化越剧烈,差异越明显。因此高地层水 矿化度有利于地层含气饱和度评价。



#### 图 5 非弹俘获计数比和地层水矿化度的响应关系及校正图版

Fig. 5 Relationship of R and porosity under different formation water salinity and its correction chart of water salinity

尽管地层水矿化度越高越有利于地层含气评 价,但矿化度变化会影响地层含气饱和度计算的准 确性,由于高地层水矿化度条件下计算得到的 R 偏 大,从而导致利用公式计算得到的地层含气饱和度 较真实值偏小。因此在实际利用 R 确定地层含气 饱和度时还需要结合电阻率曲线计算储层的地层水 矿化度,并根据如图 5(b)所示的地层水矿化度校正 图版对其进行校正;同时,根据俘获伽马计数受地层 水矿化度影响明显的特点,还可以通过分析俘获伽 马能谱和时间谱,优化俘获伽马计数的能量范围和 时间窗提高非弹俘获计数比 R 的准确性,从而降低 地层水矿化度的影响。

2.2.2 井眼流体的影响

采用图 2 所示模型,其他条件不变,地层分别饱 含气和纯水时,改变地层孔隙度由 0 改变到 40%, 间隔为 5%,模拟井眼流体为淡水、油和矿化度为 2%盐水时的测井响应规律,计算得到不同井眼和地 层条件下非弹俘获计数比 R 随孔隙度的变化规律, 如图 6 所示。

由图 6 可得, 井眼流体的变化对非弹俘获比 R 的影响较小, 不同井眼流体条件下计算得到的非弹 俘获计数比 R 差异较小。井眼流体一定时, R 随着 地层孔隙度的增大而增大, 且井眼流体为水和油条 件下计算得到的 R 基本相同, 对地层含气评价几乎 没有影响。当井眼流体为矿化度 2% 盐水时, 由于 氯对热中子的俘获能力强, 相同孔隙度条件下, 井眼 中盐水的矿化度会影响 R 的测量结果, 探测器记录 的俘获伽马计数随着井眼流体矿化度的增大而减 小,导致 R 增大。



#### 2.2.3 岩性的影响

采用图 2 所示模型,其他条件不变,地层孔隙度 由 0 改变到 40%,间隔为 5%,分别模拟地层岩性为 砂岩和石灰岩时,地层饱含淡水和气条件下的测井 响应规律,计算得到两种岩性条件下非弹俘获计数 比 *R* 随孔隙度的变化规律,如图 7 所示。

由图7可以看出,岩性对R计算的绝对值存在影响。在不同岩性地层R均随地层孔隙度的增大而增大,但地层孔隙度增大,岩石骨架不同引起R的差异减小;且在同一地层孔隙度条件下,石灰岩地层对热中子的俘获能力强,使得其俘获伽马计数比砂岩低,R更大。由于不同岩性计算得到的R随孔隙度的变化幅度相同,但是R的绝对值不同,因此在利用R确定地层含气饱和度时,需要对岩性进行校正。



图 7 不同岩性条件下的非弹俘获计数比

Fig. 7 Relationship of *R* with different lithology



其他条件不变,改变井径为14、20、24.1 cm,地 层孔隙中分别饱含淡水和气,地层孔隙度由0改变 到40%,间隔为5%,模拟得到3种井径条件下的非 弹俘获比,如图8所示。

由图 8(a)可知,非弹俘获计数比 R 受井径变化 的影响。当地层孔隙度一定时,R 随着井径的增大而 增大;当井径一定时,R 随着孔隙度的增大而增大。 通过对比发现,在地层流体相同时,井径的变化仅仅 影响 R 绝对值的大小,不影响 R 随孔隙度变化曲线 的斜率,即不同井径条件下,R 随孔隙度变化的相对 变化量相同。由于井径变化会影响 R,因此可以利用 如图 8(b)所示校正图版对井径进行校正,从而提高 含气饱和度评价的准确性。





#### 2.2.5 钻井液侵入的影响

地层为孔隙度 25% 的砂岩地层,地层含气饱和 度为 80% 时,利用图 2 所建模型,从井壁开始沿着 地层径向依次用钻井液驱替一定厚度地层中的气 体,使得驱替后的地层含水饱和度为 100%,经过若 干次驱替,井眼周围地层变为饱含水的砂岩地层。 通过模拟得到每次驱替后探测器的非弹、俘获伽马 计数,计算得到非弹俘获计数比 R 随钻井液侵入深 度的变化关系,如图 9 所示。

由图 9 可以看出, 仪器探测深度约为 35 cm。 当钻井液侵入较浅(小于 35 cm)时, R 随着侵入深 度的增大而增大,这主要是因为钻井液侵入地层时, 相比于含气地层条件下, 俘获伽马计数衰减剧烈, 从 而使得此时计算得到的 R 比真实值大; 当钻井液侵 入深度大于探测深度(大于 35 cm)时, 随着侵入的 增加 R 基本不变, 此时无法利用非弹俘获计数比确



#### 3 应用实例

定地层含气饱和度。

利用元素能谱测井仪器在套管井中实际测量得

到的非弹性散射伽马计数和俘获伽马计数,计算实 测资料的非弹俘获计数比 R,结合模拟研究得到的 含气饱和度响应模型对实测数据进行含气饱和度评 价。新疆某井中5300~5360 m 井段利用元素能谱测井资料对地层进行含气性评价,实测解释如图10 所示。



图 10 XX 井测井解释 Fig. 10 Logging interpretation of well XX

结合孔隙度曲线和岩性剖面可知,该井段主要 为常规孔隙度砂岩层,夹杂部分泥岩层(泥岩层默 认不含气,含气饱和度判定为0),井眼流体为淡水, 因此不需要进行岩性和井眼流体校正;根据井径和 电法测井曲线得到对应的井眼尺寸和地层水矿化 度,利用相应的校正图版对非弹俘获计数比进行了 井眼环境校正,得到标准地层情况下的非弹俘获计 数比 *R*;并利用图 4 得到含气饱和度计算模型,得到 了该井段的含气饱和度。图 10 中第 5 道为探测器 测量得到的非弹伽马计数(粉色曲线)和俘获伽马 计数(黑色曲线),第 6 道为非弹俘获计数比 *R*。

由图 10 中可知,当深度为 5 320 ~ 5 327 m 时, 声波时差曲线出现周波跳跃,补偿密度曲线指示地 层密度值降低,此时利用图中第 5 道中的非弹伽马 计数和俘获伽马计数计算得到非弹俘获计数比 *R*, 此时 *R*显示低值,综合含气饱和度响应模型求取含 气饱和度,结果显示该层为高含气地层;当深度为 5327.5~5329 m时,地层伽马值为高伽马,岩性显 示该层为泥岩层,非弹俘获计数比相对于含气储层 高很多,主要由于泥岩层含氢指数高,非弹和俘获伽 马计数都降低,但俘获伽马计数降低更剧烈。

可见,通过结合实际测井资料,利用元素伽马能 谱测井技术测量得到的非弹俘获比可以快速划分含 气地层,当地层含气时,非弹俘获计数比 R 显示低 值,且含气饱和度越高,R 越小;当地层为泥岩层时, R 显示为明显的高值。同时,结合孔隙度数据,根据 模拟得到的含气饱和度响应模型能够对地层含气饱 和度定量分析,实现地层含气性评价。

#### 4 结 论

(1)利用元素伽马能谱测井数据信息识别气 层,根据伽马时间谱得到非弹俘获计数比 R 确定地 层含气饱和度,可以实现地层含气性评价。

(2)当地层孔隙度一定时,随着含气饱和度的 增加,非弹和俘获伽马计数均增加,而 R 减小;当地 层孔隙度增加时,含气饱和度小于 35% 时,非弹伽 马计数减少,大于该值时规律正好相反,而俘获伽马 计数都减少,R 都增加。

(3) 井眼流体对非弹俘获计数比 R 的影响较 小,非弹俘获计数比 R 主要受岩性、地层水矿化度、 井眼尺寸、钻井液侵入的影响。相同孔隙条件下,石 灰岩地层的非弹俘获计数比 R 高于砂岩地层;当地 层条件相同时,地层水矿化度越高、井径越大、钻井 液侵入越小越有利于含气饱和度的评价。由于地层 环境因素会影响非弹俘获计数比 R 的计算结果,因 此在实际含气评价中需要对相关参数进行校正。

(4)利用提出的含气饱和度评价模型,对实测 井数据进行地层含气饱和度定量评价,解释结果与 其他评价方法吻合良好,验证了元素伽马能谱测井 技术评价地层含气饱和度的可行性。

#### 参考文献:

- [1] 沈慧萍,史振勤,乔国安,等. 深层气层识别方法研究
  [J]. 天然气工业,2005,25(10):47-48.
  SHEN Huiping, SHI Zhenqin, QIAO Guoan, et al. Study on the method of recognizing deep gas zone[J]. Natural Gas Industry, 2005,25(10):47-48.
- [2] 于世元.复杂气层识别技术研究[J].天然气工业,

1999,19(1):67-70.

YU Shiyuan. Research on the recognition technology of complex gas reservoir [J]. Natural Gas Industry, 1999, 19(1):67-70.

- [3] 邹友龙,谢然红,郭江峰,等.致密储层数字岩心重构 及核磁共振响应模拟[J].中国石油大学学报(自然科 学版),2015,39(6):63-71.
  ZOU Youlong, XIE Ranhong, GUO Jiangfeng, et al. Reconstruction of digital core of tight reservoir and simulation of NMR response[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2015,39(6): 63-71.
- [4] 李曦宁,沈金松,李振苓,等.用多尺度形态学方法实现成像测井电导率图像的缝洞参数表征[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(1):69-77.
  LI Xining, SHEN Jinsong, LI Zhenling, et al. Characterization of reservoir fracture and vug parameters by con-

ductivity image of FMI based on multi-scale mathematical morphology method[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2017,41(1):69-77.

- [5] 邵才瑞,张鹏飞,张福明,等.用J函数提高致密砂岩气 层饱和度测井评价精度[J].中国石油大学学报(自然 科学版),2016,40(4):57-65. SHAO Cairui, ZHANG Pengfei, ZHANG Fuming, et al. Improving well log evaluation accuracy of tight sandstone gas saturation using J function[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2016, 40(4):57-65.
- [6] 刘军涛,张锋,张泉滢,等.低孔隙度储层碳氧比测井 灵敏度提高方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(6):57-62.

LIU Juntao, ZHANG Feng, ZHANG Quanying, et al. A method of improving sensitivity of carbon/oxygen well logging for low porosity formation [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(6):57-62.

- [7] BADRUZZAMAN A, LOGAN J P, BEAN C, et al. Is accurate gas/steam determination behind pipe feasible with pulsed neutron measurements? [R]. SPE 110098, 2007.
- [8] TRCKA D E, GILCHRIST W A, RILEY S, et al. Field trials of a new method for the measurement of formationgas saturation using pulsed-neutron instruments [R]. SPE 102350, 2006.
- [9] 黄导武,宋春华,沈晓红,等.脉冲中子俘获测井求取 低矿化度水地层含气饱和度方法研究及应用[J].中 国海上油气,2007,19(3):169-172.

HUANG Daowu, SONG Chunhua, SHEN Xiaohong, et al. A method of pulse neutron capture logging tocalculate gas saturation in low salinity formations and its application [J]. China Offshore Oil and Gas,2007,19(3):169-172.

- [10] GUO W, JACOBSON L, TRUAX J, et al. A new threedetector 1-11/16-inch pulsed neutron tool for unconventional reservoirs [C/OL]. SPWLA 51st Annual Logging Symposium, Perth, Australia, June19-23, 2010 [2018-01-04]. https://www.onepetro.org/conference-paper/ SPWLA-2010-48800.
- [11] ZHANG F, LIU J, YUAN C. Monte Carlo simulation for determining gas saturation using three-detector pulsed neutron logging technology in tight gas reservoir and its application [J]. Applied Radiation & Isotopes, 2013,78 (78C):51-56.
- [12] GUO W, DORFFER D, ROY S, et al. Uncertainty analysis for determining petrophysical parameters with a multi-detector pulsed neutron tool in unconventional reservoirs[C/OL]. SPWLA 53rd Annual Logging Symposium, Houston, Texas, June 16-20, 2012 [2018-01-04]. https://www.onepetro.org/conference-paper/SPWLA-2012-220.
- [13] CEDILLO G, RAEESI B, ZETT A, et al. Optimizing memory multidetector pulsed neutron logging in slim horizontal coil tubing drilled wells using a carrier assembly
   [R]. SPE 173663, 2015.
- [14] HAN X, PEMPER R, TUTT T, et al. Environmental corrections and system calibration for a new pulsed-neutron mineralogy instrument [C/OL]. SPWLA 50th An-

nual Logging Symposium, Houston, Texas, June21-24, 2009[2018-01-04]. https://www.onepetro.org/conference-paper/SPWLA-2009-30888.

- [15] RADTKE R J, LORENTE M, ADOLPH B, et al. A new capture and inelastic spectroscopy tool takes geochemical logging to the next level[C/OL]. SPWLA 53rd Annual Logging Symposium, Cartagena, Colombia, June16-20,2012[2018-01-04]. https://www.onepetro. org/conference-paper/SPWLA-2012-103.
- [16] 琚宜文,卜红玲,王国昌.页岩气储层主要特征及其 对储层改造的影响[J].地球科学进展,2014,29(4): 492-506.

JU Yiwen, BU Hongling, WANG Guochang. Main characteristics of shale gas reservoir and its effect on the reservoir reconstruction [J]. Advances in Earth Science, 2014,29(4):492-506.

- [17] 梁超,吴靖,姜在兴,等. 有机质在页岩沉积成岩过程 及储层形成中的作用[J]. 中国石油大学学报(自然 科学版),2017,41(6):1-8.
  LIANG Chao, WU Jing, JIANG Zaixing, et al. Significances of organic matters on shale deposition, diagenesis process and reservoir formation [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(6):1-8.
- [18] DUNE K J, GUO D S, ZALAN T A. Gas/steam saturation effect on pulsed neutron capture count rates [J]. Log Analyst, 1994,34(2):34-58.

(编辑 修荣荣)