

doi: 10.11720/wtyht.2021.1082

朱学娟,单沙沙,殷梓原,等.PNN 测井清污混注水淹层剩余油饱和度计算方法[J].物探与化探,2021,45(3):679-685.http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1082

Zhu X J, Shan S S, Yin Z Y, et al. The calculation method of residual oil saturation by PNN logging in water flooded interval injected by fresh water and sewage[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(3): 679-685. http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1082

PNN 测井清污混注水淹层剩余油饱和度计算方法

朱学娟¹, 单沙沙², 殷梓原¹, 孔雪¹

(1. 中国石油大学胜利学院 油气工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中国石油集团测井有限公司 油气评价中心, 陕西 西安 710077)

摘要: 过套管脉冲中子—中子(PNN)测井技术通过测量未被地层俘获的热中子数量来识别流体性质,解决了水淹层电性测井响应不明显以及中子寿命测井受伽马本底影响的问题。本文引入自适应遗传算法,通过选择、交叉、变异概率的设定以及在标准层中选取初始种群的方法,有效消除了多种非地质因素的影响,得到解释参数最优解;针对研究区块清污混注导致混合地层水矿化度变化大的特点,提出变参数 PNN 解释方法,分小层计算混合地层水宏观俘获截面,达到准确识别水淹层、大幅度提高剩余油饱和度计算精度的效果。

关键词: PNN 测井;水淹层;剩余油饱和度;自适应遗传算法

中图分类号: P631.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2021)03-0679-07

0 引言

传统水淹层定量评价主要依靠电法测井完成^[1-2],储层流体性质的识别难度大,测井解释符合率低,水淹层的定量评价及水淹等级划分存在很大困难^[3-4]。过套管脉冲中子—中子测井(PNN)是建立在热中子俘获基础上的套管井剩余油饱和度测井方法,通过记录地层中未被地层俘获的热中子数量来确定储层的流体性质,计算油水饱和度。此方法不需要考虑伽马本底的影响,而且对于低孔隙度与低矿化度地层水的储层仍有较高的计数率,减小了统计误差^[5-7]。但是测量条件、非地质因素影响等对地层热中子宏观俘获截面的提取增加了困难,且在计算饱和度过程中需要解释参数受岩性、流体性质、泥质、注入水等多种因素影响,所以,准确确定解释参数是利用 PNN 测井计算剩余油饱和度的前提^[8]。

1 PNN 测井原理

1.1 热中子俘获理论基础

原子核微观俘获截面指一个原子核俘获热中子的几率,单位为靶恩(b), $1\text{ b}=10^{-24}\text{ cm}^2$,岩石宏观俘获截面即 1 cm^3 岩石中所有原子核微观俘获截面的总和单位为俘获单位(c.u.), $1\text{ c.u.}=10^{-3}\text{ cm}^{-1}$ 。岩石常见元素中氯的微观俘获截面最大,为31.6 b,而氢、碳、氧、镁、铝、硅、钙分别是0.329、0.004 5、0.001 6、0.4、0.215、0.13、0.43 b,石英、方解石、白云石和淡水的宏观俘获截面分别是0.003 4、0.007 1、0.004 6、0.022 cm^{-1} ,因此,岩石对热中子的俘获能力主要取决于含氯量,即地层含水量及地层水含盐量^[9]。以热中子俘获为基础的测井方法通过测量地层的宏观俘获截面来研究地层性质,特别是储层流体性质,是在套管井中代替电阻率测井用来区分油气、水和研究开发动态的很好的测井方法^[10]。

1.2 PNN 测井原理及优势分析

中子寿命测井(热中子衰减时间测井)是最常

收稿日期: 2020-02-24; 修回日期: 2021-01-13

基金项目: 中国石油大学胜利学院科技计划项目(KY2018010);山东省高等学校科技计划项目(J17KA197)

第一作者: 朱学娟(1987-),女,山东济宁人,硕士,讲师,主要从事测井数据处理与解释方面的研究工作。

通讯作者: 单沙沙(1984-),女,山东潍坊人,硕士,工程师,主要从事测井地层评价的研究工作。

用的在套管井中代替电阻率测井研究地层流体性质的测井方法。但中子寿命测井测量的是俘获伽马的计数率,为降低统计误差并消除地层的伽马本底,要求计数率越高越好,所以对中到高孔隙度、地层水矿化度较大的储集层效果最好。PNN 测井通过发射较长时间间隔(75 ms)的中子脉冲与地层发生反应,并测量地层中未被俘获的热中子数量来计算地层对热中子的宏观俘获截面,其整个计数区间内的计数率都能反应热中子的衰减规律^[11]。它的优势在于可有效避免自然伽马本底的影响,对于较低孔隙度、较低矿化度的储层仍有很好的应用效果^[12-14]。

2 PNN 测井计算水淹层剩余油饱和度

2.1 确定热中子宏观俘获截面

根据岩石体积物理模型,储层总的宏观俘获截面等于各部分的宏观俘获截面之和,对于水淹层来讲,地层的宏观俘获截面 Σ 表示为:

$$\Sigma = (1 - V_{sh} - \phi) \Sigma_{ma} + V_{sh} \Sigma_{sh} + \phi(1 - S_w) \Sigma_h + \phi S_w \Sigma_w, \quad (1)$$

式中: Σ_{ma} 为岩石骨架的 Σ ; Σ_{sh} 为泥质的 Σ ; Σ_h 为剩余油气的 Σ ; Σ_w 为混合地层水的 Σ ; V_{sh} 为泥质含量; ϕ 为孔隙度。则储层含水饱和度为:

$$S_w = \frac{(\Sigma - \Sigma_{ma}) - V_{sh}(\Sigma_{sh} - \Sigma_{ma}) - \phi(\Sigma_h - \Sigma_{ma})}{\phi(\Sigma_w - \Sigma_h)}, \quad (2)$$

式中: S_w 为含水饱和度。为得到真实的地层宏观俘获截面 Σ ,消除流体性质、岩石骨架成分、储层孔隙度、仪器测量误差、统计误差等因素的影响,PNN 仪器采用双源距(短源距 425 mm,长源距 745 mm)测量,36 个时间道(每 30 μ s 一道,共 1 080 μ s)计数,计算时取平均值的方法确定岩石宏观俘获截面^[15]。

根据中子守恒定律,某一空间体积内中子密度随时间的变化率:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \text{产生率} - \text{泄漏率} - \text{吸收率}。 \quad (3)$$

在脉冲中子发射的间隔,在源距适当的位置产生率与泄漏率为零,即在中子发射一段时间以后(快中子减速为热中子),热中子密度变化率只与地层对热中子的俘获有关。

选择时刻 t_1 和 t_2 ,此时热中子密度 n_1 和 n_2 分别为:

$$\begin{cases} n_1 = n_0 e^{-t_1/\tau}, \\ n_2 = n_0 e^{-t_2/\tau}, \end{cases} \quad (4)$$

式中: τ 为热中子寿命(μ s),热中子数量 N_1 和 N_2 与热中子密度 n_1 和 n_2 成正比,则有:

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln N_1 - \ln N_2}。 \quad (5)$$

已知热中子寿命 τ 与宏观俘获截面的关系:

$$\tau = \frac{1}{v\Sigma}, \quad (6)$$

在常温条件下(25 $^{\circ}$ C)热中子速度 2 200 m/s,所以:

$$\tau = \frac{4\,545.5}{\Sigma} = \frac{t_2 - t_1}{\ln N_1 - \ln N_2}, \quad (7)$$

$$\Sigma = 4\,545.5 \times \frac{\ln(N_1/N_2)}{t_2 - t_1}。 \quad (8)$$

实际计算时,一般选取 36 个时间道的计数点,即时间间隔为 1 080 μ s,把数据分为 6 组,每组 6 个点的计数分别表示为 $N_0, N_1, N_2, N_3, N_4, N_5$,按照式(7)计算每组内的热中子寿命。为减小涨落误差,第 j 组数据实际处理为:

$$\tau_j = \frac{1}{3} \sum_{i=0}^2 \frac{t_{i+3} - t_i}{\ln N_i - \ln N_{i+3}} = \frac{1}{3} \sum_{i=0}^2 \frac{90}{\ln N_i - \ln N_{i+3}}, \quad (9)$$

第 j 组数据求得的地层宏观俘获截面为:

$$\Sigma_j = \frac{4\,545.5}{\tau_j}, \quad (10)$$

则地层实际宏观俘获截面为:

$$\Sigma = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 \Sigma_j。 \quad (11)$$

2.2 解释参数确定

2.2.1 参数取值范围及常规确定方法

式(1)和式(2)给出了准确计算含水饱和度及剩余油饱和度的算法,需在详细获取地层岩性参数及地层流体俘获特性的条件下才能进行准确计算。常用的参数确定方法如下。

1) V_{sh} 、 ϕ :由裸眼井测井解释得到,一般认为油层水淹后注水冲刷会导致泥质含量发生变化,所以 V_{sh} 也可以根据 PNN 带测的伽马曲线重新计算得到。而水淹过程对孔隙度的影响不大,可以用裸眼井的孔隙度解释结果。

2) Σ_{ma} :主要由岩石矿物成分及其含量决定,不同岩性的 Σ_{ma} 变化范围见表 1。

3) Σ_{sh} :主要取决于黏土的矿物成分、分布形式,需要岩石物性分析资料,一般取解释井段内纯泥岩地层的 Σ 作为 Σ_{sh} 。

4) Σ_h :可根据油的密度、溶解油气比查相关的图版,也可以根据理论计算公式计算,如天然气的宏观俘获截面按下式计算:

$$\Sigma_g = \frac{p(1.38\gamma_g + 0.238)}{256 + 1.4 \times (1.8T + 32)} ; \quad (12)$$

油的宏观俘获截面为:

$$\Sigma_o = 22.3 / (1 + \text{GOR} / 22\,000)^{0.715} , \quad (13)$$

式中: γ_g 为天然气对空气的相对密度; p 为地层压力 (lb/in², 1 lb/in² = 0.332 5 Pa); T 为地层温度 (°C); GOR 为油气比 (ft³/bbl, 1 ft³ = 0.028 3 m³, 1 bbl = 0.159 m³)。大多数油田的 Σ_o 接近 21 c.u.。

5) Σ_w : 主要与水的矿化度有关, 根据等效的 NaCl 浓度查相应的图版, 也可按公式计算:

$$\Sigma_w = 22 + 0.341 - \frac{(1.8T + 32)C}{781\,3} + \frac{C}{341\,7 - 0.68 \times (1.8T + 32)} \circ \quad (14)$$

式中:22 是淡水的宏观俘获截面, C 是地层水等效 NaCl 矿化度 (mg/L)。地层水中盐离子主要俘获核素是氯, 其他常见离子俘获能力比氯小得多, 一般可忽略, 但如果地层水中含硼和锂, 因其俘获能力又比氯大得多, 所以要计算等效 NaCl 矿化度。按式 (14) 计算, Σ_w 的范围一般在 22~120 c.u.。

表 1 常见岩石骨架的宏观俘获截面
Table 1 Macroscopic capture sections of common rock skeletons

岩性	砂岩	石灰岩	白云岩	硬石膏	泥岩
Σ_{ma} 变化范围	4~19	7~12	8~12	13~22	25~66
Σ_{ma} 常见范围	8~13	8~10	8~12	18~21	25~66

2.2.2 遗传算法确定解释参数

从式 (2) 可知, 利用宏观俘获截面计算 S_w 需要准确输入 Σ_{ma} 、 Σ_h 、 Σ_w 、 Σ_{sh} 等参数, 而由 2.2.1 节的分析可知, 对于某个区块而言, 以上参数是在一定范围内变化的, 且受很多因素影响, 这必然导致计算公式具有多解性。为此, 提出基于遗传算法的 PNN 参数优化技术, 即在标准层中选取曲线无异常, 完井解释精度高的点, 利用裸眼井解释的 V_{sh} 、 Φ 、 S_w 等参数, 采用遗传算法求取 Σ_{ma} 、 Σ_h 、 Σ_{sh} 。

1) 遗传算法流程。遗传算法是用于解决最优化问题的一种搜索算法, 其主要步骤包括设置初始群体, 计算群体中每个个体的适应度, 经过选择、交叉、变异运算之后得到下一代群体, 然后进行终止条件判断, 若满足条件则以进化过程中所得到的具有最大适应度个体作为最优解输出, 终止计算, 否则继续迭代。其流程图如图 1^[16-17]。

2) 选择、交叉、变异概率设定^[18]。将某个体被选中的概率与其适应度函数建立如下关系式:

$$P = \sqrt{F} , \quad (15)$$

式中: F 为该个体的适应度。

首先将 P 和 F 作归一化处理, 处理后记为 p 和 f , 当 $F \geq 1$ 时, $p \geq f$ 。为避免算法过快收敛于局部最优解, 可利用 p 代替 P 作为选择概率, 以增加适应度较小的个体被选中的概率。

将该代群体平均适应度表示为 \bar{F} , 则交叉概率 p_c 设定如下:

当 $F \geq \bar{F}$ 时:

$$p_c = p_{c1} - \frac{(p_{c1} - p_{c2}) \times (F - \bar{F})}{\max(F) - \bar{F}} , \quad (16)$$

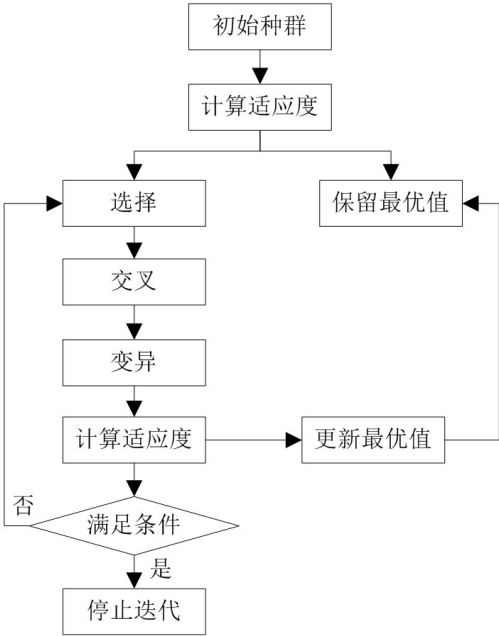


图 1 遗传算法流程

Fig.1 Genetic algorithm flow

当 $F < \bar{F}$ 时:

$$p_c = p_{c1} - \frac{(p_{c2} - p_{c1}) \times (\bar{F} - F)}{\bar{F} - \min(F)} , \quad (17)$$

式中: p_{c1} 为适应度值等于 \bar{F} 的个体所对应的交叉概率, 取值范围 (p_{c2} , 0.5); p_{c2} 为适应度值最大的个体所对应的交叉概率, 取值范围 (0, p_{c1}); $\max(F)$ 、 $\min(F)$ 分别为该代群体中最大、最小适应度。

变异概率 p_m 设定如下:

当 $F \geq \bar{F}$ 时:

$$p_m = p_{m1} - \frac{(p_{m1} - p_{m2}) \times (F - \bar{F})}{\max(F) - \bar{F}} , \quad (18)$$

当 $F < \bar{F}$ 时:

$$p_m = p_{m1} - \frac{(p_{m2} - p_{m1}) \times (\bar{F} - F)}{\bar{F} - \min(F)}, \quad (19)$$

式中: p_{m1} 为适应度值等于 \bar{F} 的个体所对应的变异概率, 取值范围 $(p_{m2}, 0.1]$; p_{m2} 为适应度值最大的个体所对应的变异概率, 取值范围 $[0.000\ 1, p_{m1})$ 。

3) 目标函数及样本点选择。遗传算法的计算过程即目标函数最大值(或最小值)的优化问题^[19], 其数学通用模型表示为:

$$\begin{cases} \min f(X) \\ X \in R \\ R \subset U \end{cases} \quad (20)$$

其中: $f(X)$ 为目标函数, $X \in R, R \subset U$ 为约束条件, U 是基本空间, R 是 U 的子集, 满足约束条件的解 X 为可行解。本例中要求极小化的目标函数, 可表示为:

$$f(X) = \left(\sum_{j=1}^n \frac{|X_j' - X_j|}{X_j} \right) / n, \quad (21)$$

式中: X_j' 为遗传算法计算值, X_j 为真实值, n 为样本点个数。其中样本点选自本区域标准层: 区域沉积稳定, 有一定厚度, 以便保证种群数量; 距离目的层较近, 岩性稳定, 迭代得到的解释参数能在目的层中直接应用; 储层经过注水开发后未被水淹或水淹很弱, 储层性质没有发生变化, 这样才能在饱和度公式中使用裸眼井测井解释的孔隙度等参数^[14]。标准层选出后, 在层内选择曲线质量好、测井解释精度高的点作为样本点, 可以在同一层内相邻位置选择多个点作为样本点。若样本点总数为 n , 将每个样本点值代入式(2), 则其计算值 X_j' 为根据式(2)计算的含水饱和度, 真实值 X_j 为裸眼井解释的含水饱和度。将 PNN 测井值 Σ 及裸眼井解释结果 ϕ 、 V_{sh} 代入, 按照目标函数求最小值进行优化, 迭代最优解为当前的含水饱和度, 此时得到的参数为该井该层位的 Σ_{ma} 、 Σ_w 、 Σ_h 、 Σ_{sh} 。

2.3 逐层计算水淹层混合地层水宏观俘获截面

由 2.2.1 节可知, Σ_w 主要与地层水的矿化度有关且受盐离子类型的影响, 而长期的注水开发导致水淹层混合地层水矿化度变化大, 同时受注采期次及采收率影响, 即使相邻油层组其混合地层水矿化度也差距明显。实际计算结果也显示, 根据标准层数据计算出的 Σ_{ma} 、 Σ_h 、 Σ_{sh} 较为准确, 而 Σ_w 的结果却无法与各个小层完全匹配, 导致根据 2.2.2 节中的方法利用标准层的参数来计算相邻目的层的含水饱和度结果不准确。所以, 分别计算每个小层的 Σ_w ,

对利用 PNN 测井计算剩余油饱和度十分必要^[20]。

根据式(1)可知, 若将孔隙内的油气和水看成一个整体, 其宏观俘获截面记为孔隙宏观俘获截面 Σ_ϕ , 则:

$$\begin{aligned} \Sigma_\phi &= \phi(1 - S_w)\Sigma_h + \phi S_w \Sigma_w \\ &= \Sigma - (1 - V_{sh} - \phi)\Sigma_{ma} - V_{sh}\Sigma_{sh} \circ \end{aligned} \quad (22)$$

为消除孔隙度大小对宏观俘获截面的影响, 设 $\Sigma_f = \Sigma_\phi / \phi$ 为流体宏观俘获截面, 只受流体内部油、水相对含量的影响, 即:

$$\begin{aligned} \Sigma_f &= (1 - S_w)\Sigma_h + S_w \Sigma_w \\ &= [\Sigma - (1 - V_{sh} - \phi)\Sigma_{ma} - V_{sh}\Sigma_{sh}] / \phi, \end{aligned} \quad (23)$$

则剩余油饱和度可表示为:

$$S_o = 1 - \frac{\Sigma_f - \Sigma_h}{\Sigma_w - \Sigma_h} \circ \quad (24)$$

在要确定 Σ_w 的目的层内, 选取水淹程度较一致且原始含油饱和度不同的两点 M 、 N , 为保证满足上述条件, M 、 N 点最好在一个厚层的中部且自然伽马、中子孔隙度、密度、声波时差曲线特征相同, 即二者的岩性、物性、泥质含量等基本无差别, 最大限度地保证在注水开发过程中驱油效率一致, 即水淹程度相同, 而二者的电阻率不同, 即含油饱和度不同。

根据裸眼井解释和遗传算法迭代的结果, 原始含水(含油)饱和度、孔隙度和泥质含量及 Σ_{ma} 、 Σ_h 、 Σ_{sh} 、 Σ_w 等参数已知, Σ_w 未知, 则根据式(23)可分别计算 M 、 N 点的流体宏观俘获截面 Σ_{fM} 和 Σ_{fN} 。已知两点驱油效率一致, 则:

$$S_{oM} - S_{oN} = S_{ooM} - S_{ooN}, \quad (25)$$

式中: S_{oM} 、 S_{oN} 为 M 、 N 点的剩余油饱和度, 未知; S_{ooM} 、 S_{ooN} 为 M 、 N 点的原始含油饱和度, 已知。

将式(24)代入(25), 得到:

$$\begin{aligned} S_{oM} - S_{oN} &= \frac{1}{\Sigma_w - \Sigma_h} (\Sigma_{fN} - \Sigma_{fM}) \\ &= S_{ooM} - S_{ooN} \circ \end{aligned} \quad (26)$$

可以直接根据式(26)得到本层的混合地层水宏观俘获截面 Σ_w , M 和 N 点的 Σ_w 相同。

3 应用效果分析

3.1 应用工区概况

应用区块为尕斯库勒油田的 N_1 - N_2^1 油藏。油藏从 1990 年正式投入开发, 2007 年实施注采井网转换, 随着注水开发的长期进行, 综合含水率逐年上升, 已进入高含水开发阶段。地层水整体矿化度偏高, 且长期清污混注导致混合地层水矿化度变化大,

自然电位曲线无法显示混合地层水矿化度的变化,混合地层水电阻率的复杂化也导致电阻率测井曲线对剩余油饱和度的计算困难;同时,受地质、构造特征及多期注采的影响,剩余油分布复杂,裸眼井解释尤其是电阻率确定剩余油饱和度精度难以满足要求。

3.2 PNN 测井解释结果分析

根据研究区注采情况及产出水矿化度变化(图2),可以推断同一解释井段各个小层的混合地层水宏观俘获截面应该不同,单个小层混合地层水宏观俘获截面的变化对 PNN 解释结果影响较大。所以,利用逐层计算混合地层水宏观俘获截面的方法,将每小层的 Σ_w 代入饱和度计算公式,最终计算得到的含油饱和度更接近真实地层的剩余油饱和度。

如图3所示,研究区某井于2007年11月投产,初期日产油量4.4 t,日产水3 m³,含水40.41%。2008年4月补孔转注,转注后由于反洗井不通换封。转注前累计产油566 t,累计产水529 m³。2009

年4月换封。2011年5月因套管错断换封失败,下混注完井。目前该井套管错断停注。截止到2011年9月底累计注水5.234 4万 m³。2012年2月PNN测井在套管井条件下完成,测量井段内包含砂岩、泥岩以及泥质砂岩储层序列。

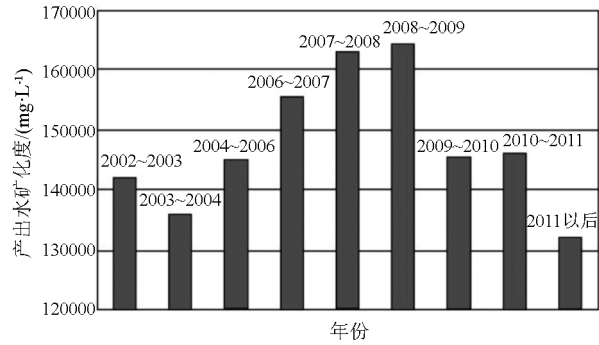


图2 研究区块产出水矿化度变化
Fig.2 Changes in salinity of produced water in the study area

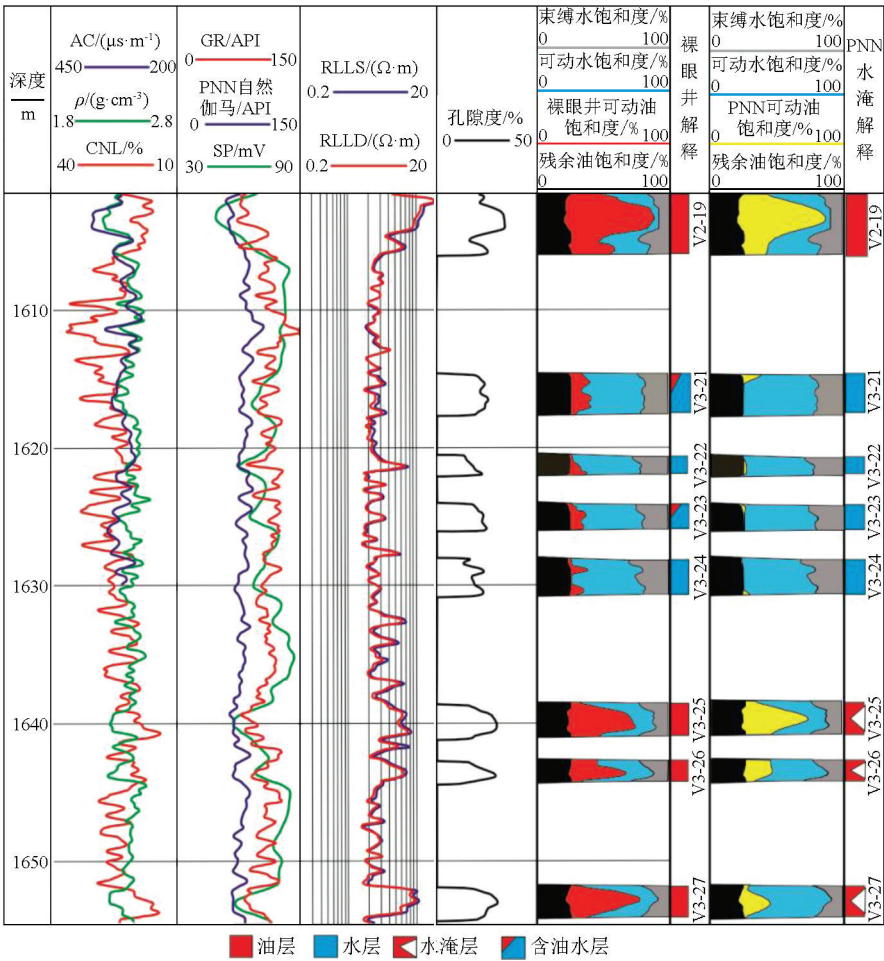


图3 PNN 测井解释结果
Fig.3 Interpretation results of PNN logging

裸眼井解释结果显示, V 2-19、V 3-25、V 3-26、V 3-27 四个小层皆为油层, 而根据 PNN 测井资料, V 2-19、V 3-25、V 3-26 三小层地层宏观俘获截面值分别为 16.1 c.u.、18.2 c.u.、22.4 c.u., 分别为低俘获值、中等俘获值、较高俘获值, PNN 解释含油饱和度分别为 66%、62.6%、45.38%, 综合分析分别为油层、油层、油水层。水淹解释分别为未水淹、低水淹、高水淹。V 3-27 小层地层宏观俘获截面值 20.4 c.u., 为中高俘获值, 但该层较 V 3-26 小层孔隙度高, 岩石骨架对地层宏观俘获截面的贡献更小, 因此 PNN 解释含油饱和度为 39.35%。该层温度呈异常反应, 该层下面围岩段地层宏观俘获截面值呈异常高值, 因该井 1 670 m 处套管错段, 疑为该段水泥环缺失, 注入水从错段处进入上窜至该层, 综合分析为含油层, 水淹解释为高水淹层。通过 PNN 测试检查各小层剩余油分布情况, 根据定性分析和定量解释计算结果, 并结合裸眼井资料、邻井动态资料综合分析, 建议射开 V-19、V-25、V-26 三小层进行生产, 投产后产水率分别为 23.47%、27.34%、45.96%, 半年后稳定产量日产油 4 t 左右, 含水较少。

4 结 论

1) 在地层水矿化度变化复杂的高含水水淹层, PNN 测井依靠测量未被地层俘获的热中子数量来反映地层流体性质, 解决了电阻率测井无法识别水淹层的困难, 同时消除了热中子寿命测井中的伽马本底影响, 是一种有效识别水淹层的过套管饱和度测井方法。

2) 岩石宏观俘获截面受多种因素影响, 岩石骨架、泥质、地层水的宏观俘获截面等参数也在一定范围内变化, 无法单独确定解释参数。采用自适应遗传算法, 在标准层中选择初始种群, 以裸眼井解释含水饱和度为真实值, 最终得到各个解释参数的最优解, 以此来计算相邻井段水淹层剩余油饱和度。

3) 针对长期注水开采, 清污混注导致混合地层水宏观俘获截面变化大的问题, 按水淹程度和储层性质分别确定各个小层的混合地层水宏观俘获截面, 并在此基础上计算变参数 PNN 剩余油饱和度。实际应用效果表明, 变参数计算方法提高了剩余油饱和度计算精度, 为更好地挖掘剩余油、调整开发方案提供了保障。

参考文献 (References):

[1] 朱学娟, 葛新民, 孔雪, 等. 砂泥岩水淹层的常规测井曲线定性

识别方法[J]. 物探与化探, 2018, 42(6): 1215-1220.

Zhu X J, Ge X M, Kong X, et al. Qualitative identification of sandstone water flooded layer by conventional logging curves[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(6): 1215-1220.

[2] 刘欢, 徐锦绣, 高文博, 等. 基于解释单元的水淹层原始电阻率反演及应用[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(1): 144-150.

Liu H, Xu J X, Gao W B, et al. Original resistivity inversion of water-flooded zones based on interpretation unit and its application [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(1): 144-150.

[3] 余鉴桥, 刘红岐, 孙杨沙, 等. GS 油田 E_3^1 油藏水淹层 PNN 测井响应特征与评价分析[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(3): 1085-1091.

Yu J Q, Liu H Q, Sun Y S, et al. PNN logging response characteristics and evaluation analysis in E_3^1 reservoir of GS oilfield [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(3): 1085-1091.

[4] 王靖慈. 清污混注水淹层动静态测井评价及剩余油预测方法研究[D]. 荆州: 长江大学, 2012.

Wang J C. Study on methods of reservoir evaluation and remaining oil prediction based on static and dynamic logging in water flooded interval injected by fresh water and sewage [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2012.

[5] 赵秀峰. PNN 测井在肯基亚克油田适应性分析[J]. 测井技术, 2017, 41(5): 606-610.

Zhao X F. Adaptability of pulsed neutron neutron logging technology in foreign Kenkiyak oilfield [J]. Well Logging Technology, 2017, 41(5): 606-610.

[6] 孙杨沙, 刘红岐, 田杰, 等. PNN 测井在跃进油田水淹层中的应用[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(3): 1105-1112.

Sun Y S, Liu H Q, Tian J, et al. Application of PNN logging in water flooded layer in Yuejinoilfield [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(3): 1105-1112.

[7] 仲艳华. 剩余油饱和度测井方法在现场的应用分析[J]. 长江大学学报: 自科版, 2015, 12(22): 41-46.

Zhong Y H. Application analysis of remaining oil saturation logging method in the oilfields [J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2015, 12(22): 41-46.

[8] 孟宪涛, 夏竹君, 庄玮, 等. PNN 资料计算剩余油饱和度的参数优选方法[J]. 石油仪器, 2013, 27(3): 49-51.

Meng X T, Xia Z J, Zhuang W, et al. The optimum method of choosing parameters to calculate remaining oil saturation by PNN logging data [J]. Petroleum Instrument, 2013, 27(3): 49-51.

[9] 洪有密. 测井原理与综合解释[M]. 青岛: 中国石油大学出版社, 2008: 241-249.

Hong Y M. Logging principles and comprehensive interpretation [M]. Qingdao: China University of Petroleum Press, 2008: 241-249.

[10] 张锋. 我国脉冲中子测井技术发展综述[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(s): 116-123.

Zhang F. Summary of development for Pulsed Neutron well logging technology in our country [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(s): 116-123.

[11] 张斌. 苏斯 E_3^1 油藏 PNN 套后饱和度测井水淹层评价[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.

Zhang B. PNN saturation log evaluation of water flooded layer in Gasikule E₃ reservoir [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.

[12] 张友硕. 裂缝性碳酸盐岩储层脉冲中子测井的蒙特卡罗模拟 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.

Zhang Y S. Monte Carlo simulation of Pulsed Neutron logging in fractured carbonate reservoir [D]. Changchun: Jilin University, 2015.

[13] 徐程宇, 王珊, 陈袁, 等. 脉冲中子—中子 (PNN) 测井技术在塔里木油田的应用 [C] // 西安石油大学、陕西省石油学会. 2016 油气田勘探与开发国际会议 (2016 IFEDC) 论文集 (上册), 2016.

Xu C Y, Wang S, Chen Y, et al. Application of interwell monitoring technique by using micro substance tracer in super-deep and super-thin reservoir of Tarim Basin [C] // 2016 International Field Exploration and Development Conference in Beijing, China, 2016.

[14] 刘厚武. 脉冲中子—中子测井 (PNN) 解释中 Σ 提取方法及参数的优选 [J]. 国外测井技术, 2019, 40(1): 73–79.

Liu H W. Σ extraction method and parameter optimization in Pulsed Neutron-Neutron logging (PNN) interpretation [J]. World Well Logging Technology, 2019, 40(1): 73–79.

[15] 郑利江, 孙雅琳, 车蓉, 等. PNN+ 饱和度测井复杂水淹层识别 [J]. 测井技术, 2019, 43(4): 434–439.

Zheng L J, Sun Y L, Che R, et al. Identification of complex water-flooded layers using PNN+ saturation log data [J]. Well Logging Technology, 2019, 43(4): 434–439.

[16] 陈国良, 王熙法, 庄镇泉, 等. 遗传算法及其应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996.

Chen G L, Wang X F, Zhuang Z Q, et al. Genetic algorithm and its application [M]. Beijing: Post and Telecom Press, 1996.

[17] 冯宪彬, 丁蕊. 改进型遗传算法及其应用 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016.

Feng X B, Ding R. Improved genetic algorithm and its application [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016.

[18] 王婧慈, 郭海敏. 基于标准层及改进遗传算法的剩余油测井评价 [J]. 测井技术, 2012, 36(5): 537–542.

Wang J C, Guo H M. On the remaining oil log evaluation based on standard layer and improved adaptive genetic algorithm [J]. Well Logging Technology, 2012, 36(5): 537–542.

[19] 别康, 徐观佑, 万文春, 等. 基于改进遗传算法的双感应测井反演 [J]. 物探与化探, 2015, 39(5): 1063–1068.

Bie K, Xu G Y, Wan W C, et al. The dual induction logging inversion based on improved genetic algorithm [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(5): 1063–1068.

[20] 王婧慈, 令狐松, 徐文远, 等. 水淹层混合地层水宏观俘获截面逐层计算方法 [J]. 科技导报, 2013, 31(10): 30–34.

Wang J C, Ling H S, Xu W Y, et al. Layer-by-layer calculation of the macroscopic capture cross section of mixed formation water in water-flooded zone [J]. Science and Technology Review, 2013, 31(10): 30–34.

The calculation method of residual oil saturation
by PNN logging in water flooded interval injected by fresh water and sewage

ZHU Xue-Juan¹, SHAN Sha-Sha², YIN Zi-Yuan¹, KONG Xue¹

(1. Department of Oil & Gas Engineering, Shengli College, China University of Petroleum, Dongying 257061, China; 2. Oil and Gas Evaluation Center, CNPC Logging Co. Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Pulsed neutron-neutron (PNN) logging technology through casing can identify fluid properties by measuring the number of thermal neutrons not captured by formation. It solves the problems of unclear response of electrical logging in watered-out zone and the influence of gamma background on neutron lifetime logging. In this paper, an adaptive genetic algorithm was utilized to eliminate the influence of non-geological factors and obtain the optimum solution of PNN interpretation parameters by setting the probability of selection, crossover and mutation and selecting the initial population in the standard layer. In view of the great change of salinity of mixed formation water due to interval injection by fresh water and sewage, the authors propose a variable parameter PNN interpretation method for calculating the macroscopic capture cross section of mixed formation water in small layers, so as to accurately identify the flooded layer and greatly improve the calculation accuracy of residual oil saturation.

Key words: PNN well logging; water flooded layer; residual oil saturation; adaptive genetic algorithm

(本文编辑: 叶佩)