

Monte Carlo Simulation Result of Pulsed Neutron-neutron Logging Method for Offshore Oilfield

Zhenyong Hou, Jiling Li, Jiajun Li, Zhihua Yang

Well Tech, China Oilfield Service Ltd., COSL, Sanhe Hebei
Email: houzhy3@cosl.com.cn

Received: Aug. 5th, 2019; accepted: Oct. 10th, 2019; published: Dec. 15th, 2019

Abstract

PNN (pulse neutron neutron) logging would be affected by many factors such as casing string, formation physical properties and formation fluids, which would lead to the inability of accurate extraction of the measured macro-capture section of the formation, thus affecting the calculation of remaining oil saturation. In this paper, based on the actual production situation of offshore oilfield, the corresponding numerical simulation was carried out based on MCNP (Monte Carlo method) for the complicated string structure, formation water salinity, shale content and porosity with a wider range of variation. Through the response analysis of each factor simulation, when it is in the third casing string, the shale content is higher than 20%, the measurement accuracy is not high. For more accurately extracting the macro-capture section of the formation, some suggestions are given for channel selection, which provides a certain theoretical basis for the fine evaluation of remaining oil saturation of the formation.

Keywords

PNN Logging, Monte Carlo Simulation, Thermal Neutron Decay Spectrum, Channel Selection Suggestion

海上油田脉冲中子 - 中子测井蒙特卡罗方法模拟研究

侯振永, 李疾翎, 李家骏, 杨志华

中海油服油田技术事业部, 河北 三河

作者简介: 侯振永(1983-), 男, 工程师, 主要从事套管井测井解释与油气田开发地质方面的工作。

Email: houzh3@cosl.com.cn

收稿日期: 2019年8月5日; 录用日期: 2019年10月10日; 发布日期: 2019年12月15日

摘要

脉冲中子 - 中子(PNN)测井受管柱、地层物性和地层流体等诸多因素的影响, 无法准确提取测量到的地层宏观俘获截面, 从而影响剩余油饱和度的计算。根据海上油田的实际生产情况, 针对其复杂的管柱结构、更大的地层水矿化度变化范围、泥质含量以及孔隙度等因素, 基于蒙特卡罗方法进行了相应的数值模拟。通过对各因素模拟的响应结果分析, 在三层管柱、泥质含量高于20%的条件下时仪器测量精度不高, 为了更加准确地提取地层宏观俘获截面, 通过分析研究给出了取道建议, 为精细评价地层剩余油饱和度提供一定的理论依据。

关键词

脉冲中子 - 中子(PNN)测井, 蒙特卡罗方法模拟, 热中子衰减时间谱, 取道建议

Copyright © 2019 by author(s), Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

油田开发后, 地层中的含油气饱和度会发生不同的变化, 甚至有部分储集层会出现严重的水淹情况, 影响油气的产量和油田后期的生产开发, 因此对油气藏的动态监测变得尤为重要。在套管井中剩余油评价一般采用核测井技术, 根据测量原理的不同分为碳氧比和中子寿命测井技术两类。碳氧比测井技术仅适用于中高孔隙度的地层, 而中子寿命测井由于其不受本底的影响, 在低孔隙度的地层具有较大优势, 本次研究的脉冲中子 - 中子(PNN)测井技术就是其中的一种[1] [2]。

PNN 测井通过脉冲中子发生器向地层发射高能量(14 MeV)快中子, 经过一系列的非弹性碰撞和弹性碰撞后, 能量与组成地层的原子处于热平衡时, 中子不再减速, 变为热中子[3] [4] [5]。此时它的能量为0.025 eV 左右, 之后被地层中的元素所吸收, 仪器通过记录未被俘获的热中子数来反映地层的俘获截面, 进而计算含油饱和度。

井眼条件和地层因素对 PNN 测井的测量结果有不同影响, 无论是海上油田还是陆地油田条件下, 地层的矿化度、孔隙度、泥质含量以及管柱结构等都对其所测量的地层宏观俘获截面有着不同程度的影响,

从而直接影响剩余油饱和度的求取。陆地油田以直井为主，而海上油田则多以斜井和丛式井为主，生产井的管柱主要为多层分采管柱，其管柱结构更为复杂多变，且海上油田地层中矿化度变化范围较陆地油田而言更广[6] [7] [8]。因此需要针对海上油田的情况进行蒙特卡罗数值模拟，以便更精确地计算地层剩余油饱和度，为油气田下一步生产措施提供更加合理高效的指导和开发建议。

2. 蒙特卡罗方法模拟研究

蒙特卡罗方法又称统计模拟方法，首先建立一个概率模型或随机过程，使它的参数等于问题的解；然后通过对模型或过程的观察或抽样试验来计算所求参数的统计特征，最后给出所求解的近似值[9] [10]。

针对海上油田设计模拟的计算模型主要由测井仪、地层、井眼(包括流体、套管、水泥环等)、中子发生器、屏蔽体、长短源距探测器等部分组成(见图 1)。其中，测井仪直径为 43 mm；地层为圆筒状几何模型，内外半径和高分别为 10、70、120 cm，填充物为不同岩性、不同矿化度的水和油，含水饱和度为 50% [11]。套管管柱结构包括两种，外径分别为 7 in 和 9 $\frac{5}{8}$ in，油管外径为 3.5 in，筛管外径为 5.5 in，水泥环厚度为 3 cm。中子源发射 6×10^7 个能量为 14.3 MeV 的快中子，脉冲宽度 3 μ s；分别在源距 42.5、74.5 cm 处记录能量小于 0.1 MeV 的热中子；时间道从 0~1800 μ s，每道为 30 μ s。

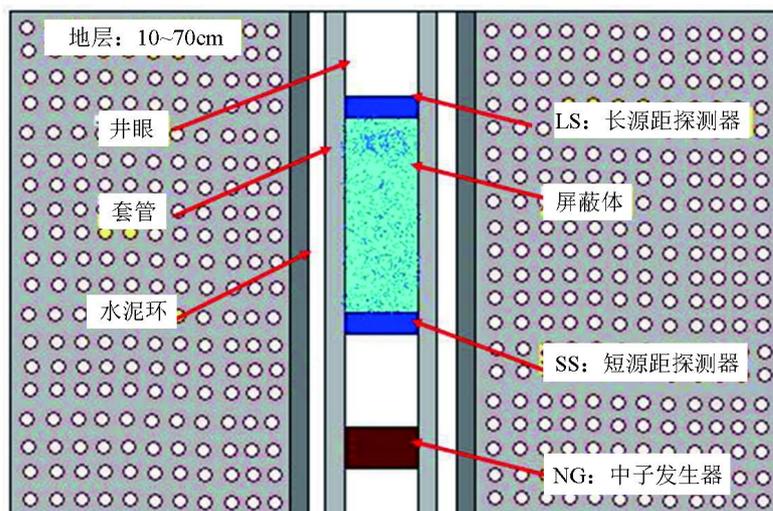


Figure 1. The calculation model of PNN Monte Carlo simulation
图 1. PNN 测井蒙特卡罗方法模拟的计算模型

为了研究 PNN 测井的影响因素对热中子时间衰减谱的影响，建立均匀介质模型，研究各条件下对地层俘获截面的影响。

2.1. 仪器与井眼相对位置模拟

为了研究仪器偏心贴井壁与居中对地层俘获截面求取的影响，建立以下套管条件下的计算模型，其中地层为地层水矿化度 2×10^4 mg/L 的砂泥岩地层，对 7 in 和 9 $\frac{5}{8}$ in 两种套管尺寸在单层(套管)、双层(套管和油管)管柱条件下，进行仪器居中和偏心贴井壁测量的模拟，模拟结果分别如图 2 和图 3 所示。

从图 2、图 3 的模拟结果可知，无论在单层还是双层管柱结构下，仪器居中和偏心贴井壁在井筒区域(0~360 μ s 内)热中子衰减不一样，仪器偏心贴井壁在井筒区衰减更快，但是两种测量情况对地层区域信息提取无影响，对区分油水性质也不会产生影响。测井过程中 PNN 测井仪没有推靠器，无法保证贴井壁测量，因此建议测井时尽可能地贴井壁测量。

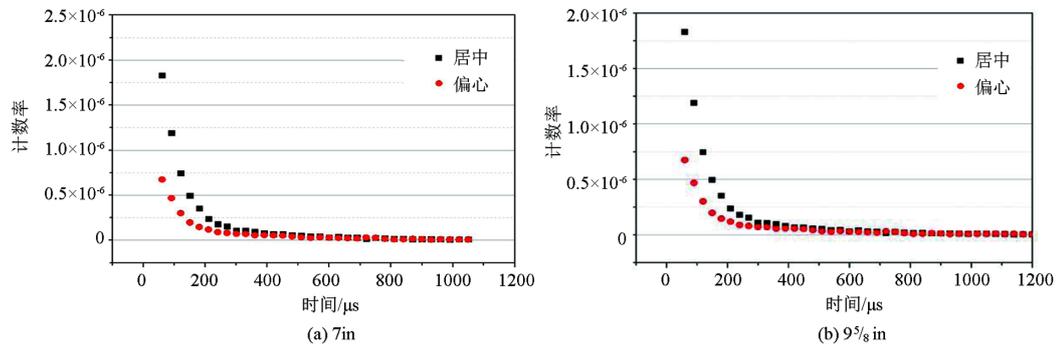


Figure 2. Monte Carlo simulation of the single layer pipe string instrument sticking to wellbore and centralization
图 2. 单层管柱仪器偏心贴井壁与居中时的蒙特卡罗模拟

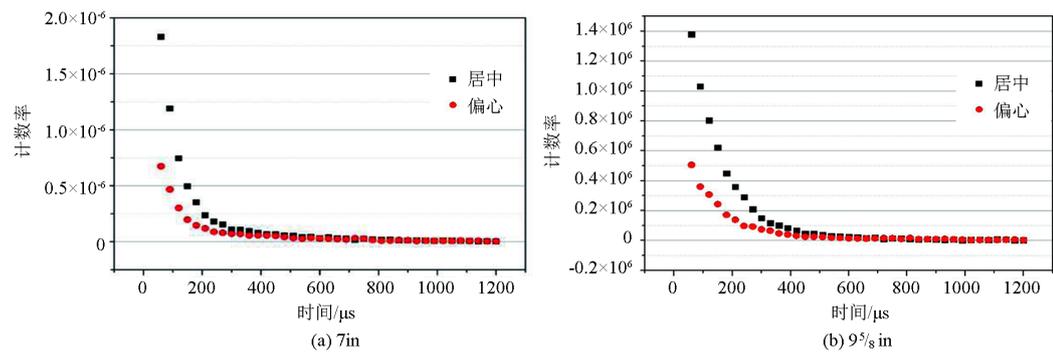


Figure 3. Monte Carlo simulation of the double layer pipe string instrument sticking to wellbore and centralization
图 3. 双层管柱仪器偏心贴井壁与居中时的蒙特卡罗模拟

2.2. 管柱结构模拟

由于海上油田管柱结构较为复杂, 通常分为单层(套管)、双层(油管 and 套管)和三层(套管、油管、筛管)管柱, 管柱结构如表 1 所示。本次模拟分别对 3 种管柱结构进行模拟, 模拟结果如图 4 所示。

Table 1. The structure of casing strings
表 1. 管柱结构表

套管类型		两种规格套管对应的管柱尺寸/in	
		7 in	9 5/8 in
单层管柱	套管	7 (外径) 6.184 (内径)	9 5/8 (外径) 8.681 (内径)
	油管	3.5 (外径) 2.992 (内径)	3.5 (外径) 2.992 (内径)
双层管柱	套管	7 (外径) 6.184 (内径)	9 5/8 (外径) 8.681 (内径)
	油管	3.5 (外径) 2.992 (内径)	3.5 (外径) 2.992 (内径)
三层管柱	筛管	5.5 (外径) 4.5 (内径)	5.5 (外径) 4.5 (内径)
	套管	7 (外径) 6.184 (内径)	9 5/8 (外径) 8.681 (内径)
	筛管	5.5 (外径) 4.5 (内径)	5.5 (外径) 4.5 (内径)

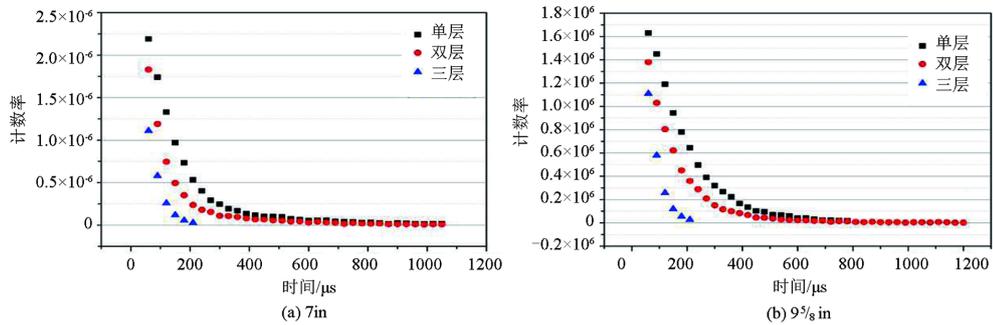


Figure 4. Monte Carlo simulation of difference casing string structures

图 4. 不同管柱结构的蒙特卡罗模拟

从图 4 的模拟结果分析可知, 前 360 μs 热中子计数率基本反映的是井眼区信息, 该时间段随着管柱层数增多热中子计数率明显下降, 单层、双层管柱热中子计数率曲线在进入地层区时间段后斜率趋于稳定, 说明可以有效提取反映地层区的信息。但三层管柱热中子在井眼区就俘获殆尽, 无法有效提取反映地层区的信息, 说明三层管柱结构会对地层俘获截面造成影响。单层管柱地层俘获截面的选道建议是 10~40 道(300~1200 μs); 双层管柱地层俘获截面的选道建议是 13~35 道(390~1050 μs); 三层管柱地层俘获截面的选道建议, 7 in 套管是 7~33 道(210~990 μs), 9 $\frac{5}{8}$ in 套管是 15~45 道(450~1350 μs)。

2.3. 套管尺寸模拟

套管主要由钢铁制成, 俘获截面为 220 c.u., 远大于井内流体的宏观截面, 因此套管对井眼区的影响有待研究[3]。为研究套管尺寸对地层宏观截面的影响, 在单层、双层管柱结构条件下, 分别对 7 in 和 9 $\frac{5}{8}$ in 两种套管尺寸进行模拟。

分析图 5 的模拟结果可知, 相同管柱条件下, 套管影响前 360 μs 的热中子计数率, 随套管尺寸的增加, 热中子相对计数率逐渐减少, 在 0~360 μs 的井眼区内迅速减小, 井眼的尺寸越大, 井眼中存在的流体越多, 扩散效应就越明显。当井筒中模拟条件为淡水时, 套管壁厚越厚, 衰减越快。套管尺寸的不同只影响地层宏观俘获截面绝对值的大小, 由于进入地层区中子数量减少, 可能会造成一定的统计起伏误差, 但理论上对区分油水性质不会产生影响。7 in 套管地层俘获截面的选道建议是 13~40 道(390~1200 μs), 9 $\frac{5}{8}$ in 套管地层俘获截面的选道建议是 16~35 道(480~1050 μs)。

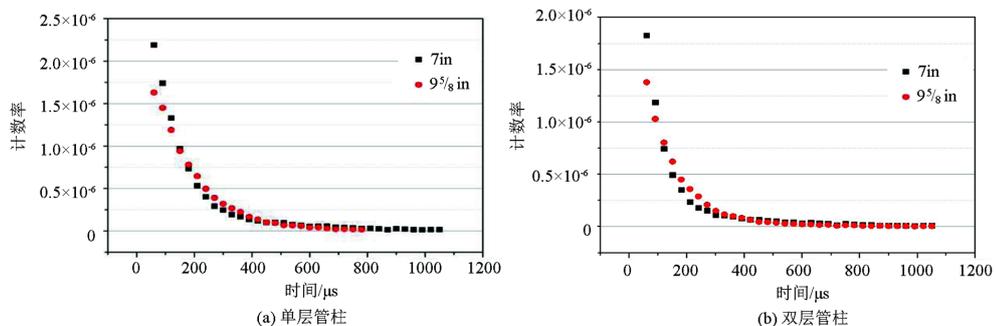


Figure 5. Monte Carlo simulation of different casing diameters

图 5. 不同套管外径的蒙特卡罗模拟

2.4. 地层水矿化度模拟

为了研究地层水矿化度对地层俘获截面的影响以及确定 PNN 测井仪在生产过程中适合的矿化度范

围, 利用蒙特卡罗方法进行模拟。模拟地层为砂泥岩地层[4], 地层孔隙度 20%, 孔隙流体为水, 井眼水矿化度为 2×10^4 mg/L, 单层管柱 7 in 和 9 $\frac{5}{8}$ in 两种套管尺寸。分别对地层水矿化度为 0.7×10^4 、 2×10^4 、 3×10^4 、 4×10^4 、 5×10^4 、 10×10^4 、 15×10^4 、 18×10^4 、 20×10^4 mg/L 进行模拟。

从图 6 可以看出, 模拟时井眼中流体相同, 在热中子时间谱的 0~210 μ s (前 7 道) 时间间隔内, 热中子计数率随时间衰变规律相同, 该时间段是井眼中热中子的衰减区。210 μ s (第 7 道) 以后, 地层水矿化度的不同对热中子衰减快慢有很大影响, 矿化度增加, 热中子计数率不断降低, 能更好地区分油水, 但是同时也使热中子的计数率大幅降低, 导致 PNN 测井测量结果准确度减小。当地层水矿化度小于 3×10^4 mg/L 时, 地层俘获截面求取的选道建议是 10~50 道(300~1500 μ s); 当矿化度介于 $(3\sim 10) \times 10^4$ mg/L 时, 选道建议是 13~40 道(390~1200 μ s); 当矿化度大于 10×10^4 mg/L 时, 选道建议是 15~35 道(450~1050 μ s), 选道随矿化度增大适当提前。

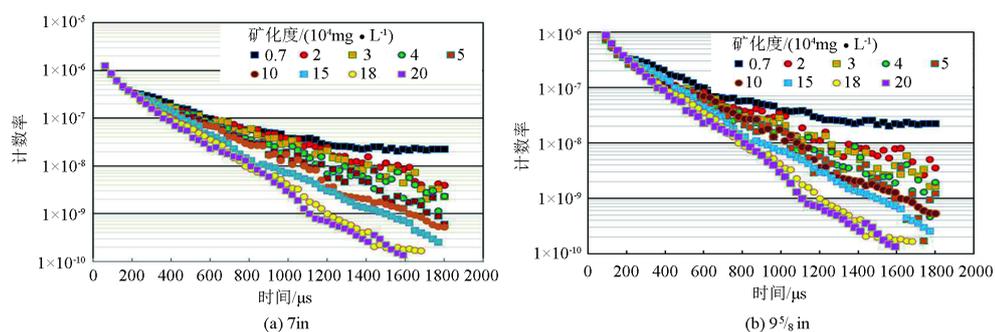


Figure 6. Monte Carlo simulation of different formation water salinities

图 6. 不同地层水矿化度时的蒙特卡罗模拟

2.5. 泥质含量模拟

为研究泥质含量对地层俘获截面的影响, 利用蒙特卡罗方法进行模拟。模拟地层为砂泥岩地层, 井眼水为淡水[5], 地层水矿化度为 2×10^4 mg/L, 单层管柱 7 in 和 9 $\frac{5}{8}$ in 两种套管尺寸。分别对泥质含量为 10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90% 进行模拟。

从图 7 中可以看出, 井眼内流体相同, 在热中子时间谱的 0~210 μ s (前 7 道) 时间间隔内, 热中子计数率随时间的衰变规律相同。210 μ s 以后, 地层泥质含量的不同对热中子衰减快慢有很大影响, 泥质含量增加, 热中子计数率降低, 当泥质含量大于 20%, 斜率变大。泥质含量增加导致地层宏观吸收截面增加, 不利于定性区分地层的油水特性, 泥质含量越高, 影响越明显, 需要对计算的俘获截面或含水饱和度进行校正。

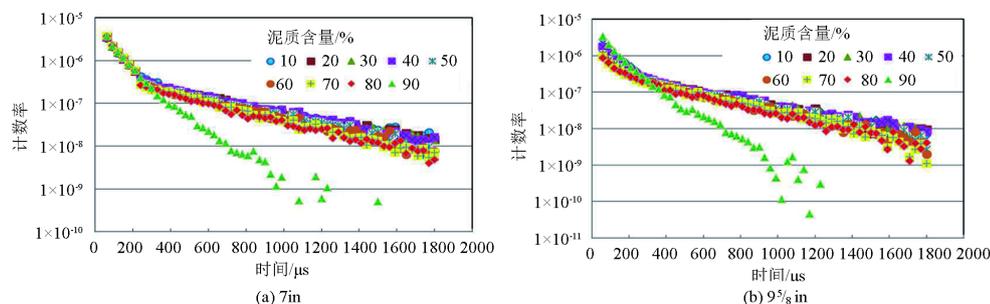


Figure 7. Monte Carlo simulation of different shale contents

图 7. 不同泥质含量时的蒙特卡罗模拟

2.6. 孔隙度不同时的模拟

为研究地层孔隙度对地层俘获截面的影响,利用蒙特卡罗方法进行模拟。模拟地层为纯砂岩地层,井眼水为淡水,孔隙中地层水矿化度 2×10^4 mg/L,单层管柱 7 in 和 9 $\frac{5}{8}$ in 两种套管尺寸。分别对孔隙度为 5%、10%、15%、20%、25%、30% 进行模拟。

从图 8 可以看出,井眼流体相同,在热中子时间谱的 0~210 μ s (前 7 道)时间内,热中子计数率随时间衰变规律相同。210 μ s 以后,孔隙度的不同对热中子衰减快慢有很大影响,孔隙度增加,热中子计数率不断降低且斜率区别较大,对油水区分有一定影响。地层俘获截面求取的选道建议是 10~45 道(300~1350 μ s),同时建议选道随孔隙度增大适当提前。

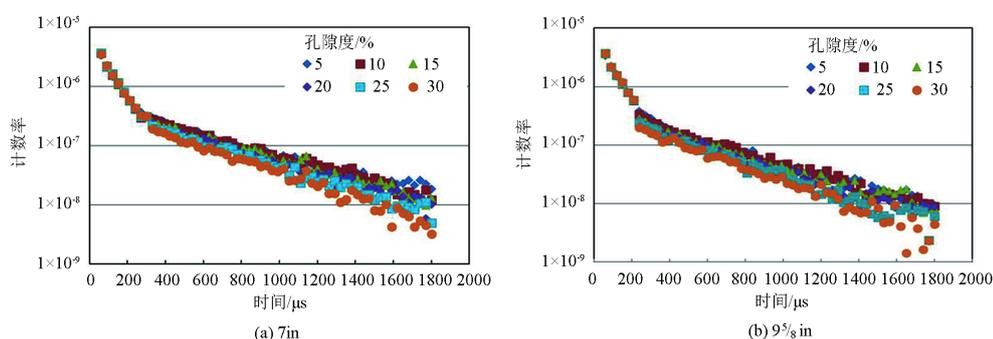


Figure 8. Monte Carlo simulation of different porosities
图 8. 不同孔隙度时的蒙特卡罗模拟

3. 结论

在 PNN 测井过程中,多种环境因素导致测量结果不能准确反映地层信息。结合实际应用,通过蒙特卡罗模拟,得出以下结论。

1) 通过管柱结构模拟,单层、双层、三层管柱在 360 μ s 后均可有效反映地层区的信息。但在三层管柱条件下,计数率较低,不能完全反映地层信息,因此不建议在三层管柱条件下进行 PNN 测井。

2) 通过泥质含量模拟,当泥质含量高于 20%,对地层俘获截面影响较大,需要对俘获截面值进行校正。

3) 通过地层水矿化度、孔隙度模拟,适合 PNN 测井的矿化度范围大约在 $(1\sim 10) \times 10^4$ mg/L,当地层水矿化度为 2×10^4 mg/L 时,PNN 测井适于的孔隙度下限为 5%。通过仪器与井眼相对位置模拟,建议 PNN 测井时尽可能贴井壁测量。

4) 通过管柱结构、套管尺寸、地层水矿化度以及孔隙度的蒙特卡罗模拟,得出相应条件下求取地层俘获截面的取道建议,对含油饱和度的准确求取具有指导意义。

参考文献

- [1] 郭海敏. 生产测井导论[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- [2] 刘勇. 脉冲中子测试技术在老井挖掘中的应用[J]. 化工管理, 2017(26): 203.
- [3] 陈猛. 基于 PNN 测井剩余油饱和度监测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2013.
- [4] 张峰. PNN 测井基础理论和解释方法[M]. 东营: 石油大学出版社, 2005.
- [5] 邱金权, 谢飞, 雷刚, 等. PNN 测井技术影响因素分析[J]. 青海石油, 2013, 31(2): 45-51.
- [6] 时新磊. 复杂管柱环境下 RPM-C/O 剩余油饱和度解释方法[J]. 测井技术, 2018, 42(4): 413-417.

- [7] 张峰. PNN 测井方法的蒙特卡罗模拟研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1924-1930
- [8] 张锋, 孙燕. 蒙特卡罗方法在脉冲中子测井中的应用[J]. 同位素, 2005, 18(Z1): 21-25.
- [9] 赵国志. 蒙特卡罗方法在核测井中的研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2010.
- [10] 蔡晓波, 申会堂. 蒙特卡罗方法、核模拟程序 MCNP 及 MCNP 在核测井中的应用[J]. 舰船科学技术, 2003(S1): 58-61.
- [11] 黄隆基. 核测井原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1985.

[编辑] 龚丹